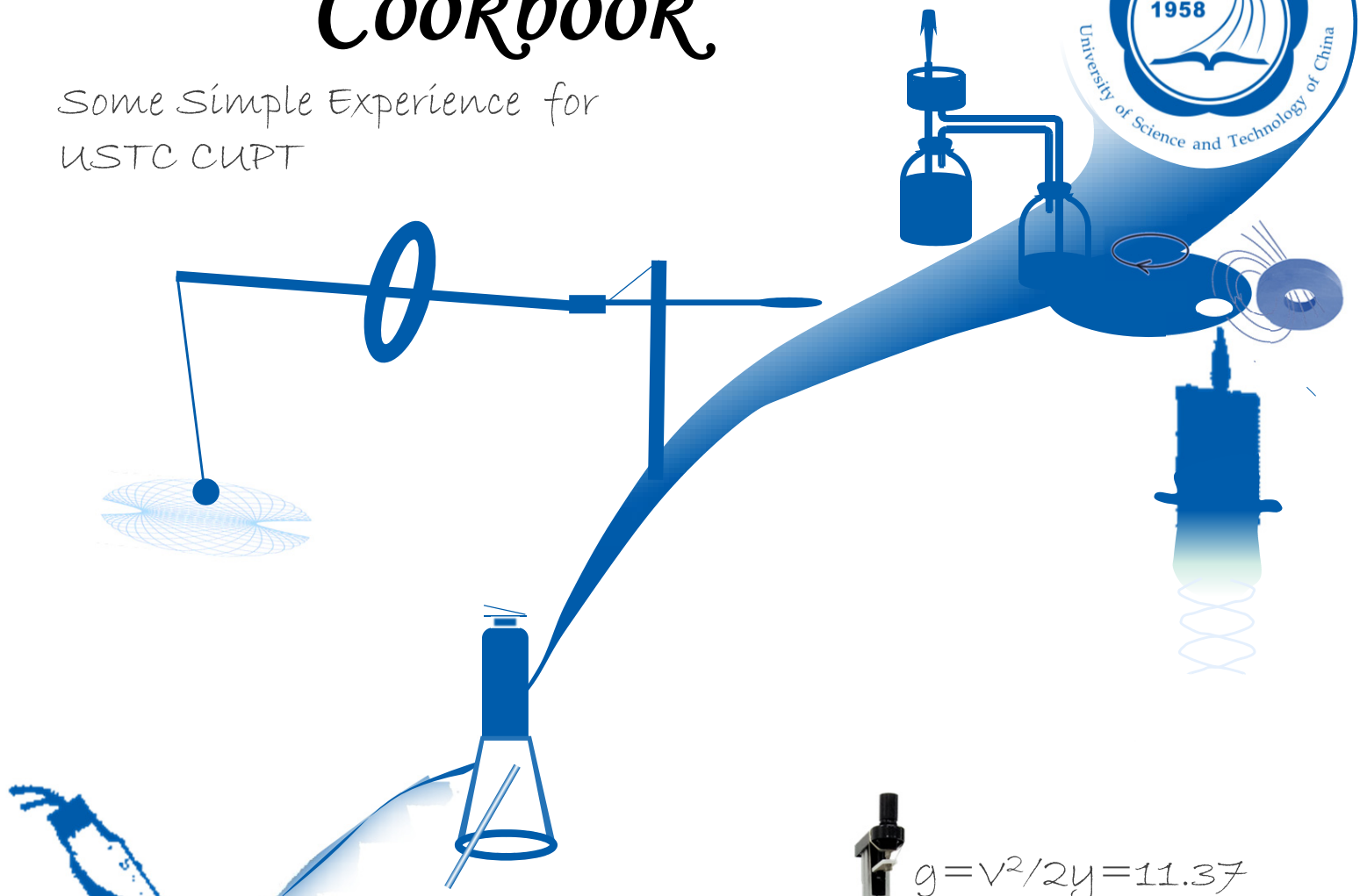
CUPT Cookbook

Some Simple Experience for USTC CUPT

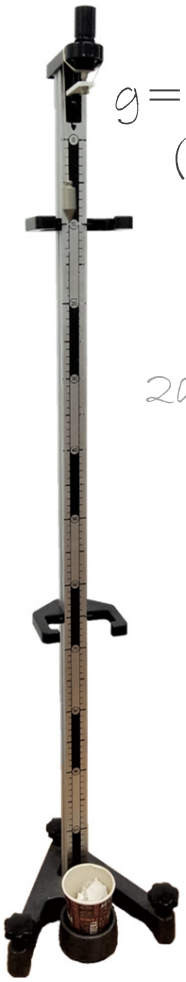


$g=v^2/2y=11.37$

$(g-9.8)/9.8=16.02\%$

$v=\Delta x/\Delta t$???

$2ax=v_1^2-v_2^2$



Gold Mine?

Author : 2018·USTCUPT

Version : 0.0



Thinking and trying in different directions-- $\mathcal{L}$



目　录

序 1

1 Sensors 3

1.1 综述 . . . 3

1.1.1 传感器类型 . . . 3

1.1.2 传感器性能 . . . 3

1.1.3 预处理 . . . 4

1.2 控制 . . . 5

1.2.1 单片机控制 . . . 6

1.2.2 数据传输 . . . 9

1.2.3 学习新传感器 . . . 10

1.2.4 上位机 . . . 10

1.3 传感器 . . . 15

1.3.1 水/气压 . . . 15

1.3.2 温度 . . . 16

1.3.3 长度 . . . 18

1.3.4 光强 . . . 19

1.3.5 力/形变 . . . 20

1.3.6 速度 . . . 21

1.3.7 磁场 . . . 22

1.3.8 加速度 . . . 22

1.3.9 倾角 . . . 23

1.3.10 流量/速 . . . 24

1.3.11 湿度 . . . 24

1.3.12 光纤 . . . 25

1.3.13 声音 . . . 25

1.3.14 颜色 . . . 26

1.3.15 转速 . . . 27

1.3.16 CCD/CMOS . . . 27

1.3.17 万用表 . . . 30

1.3.18 光电对管 . . . 31

1.4 电路设计与制作 . . . 31

1.4.1 元件与工具 . . . 31

1.4.2 设计打样 . . . 39

1.4.3 焊接方法 40

2 Machine and Instrument Building 43

2.1 综述 43
2.1.1 机械结构参数 43
2.1.2 仪器控制 43
2.1.3 安全(bu yao)与实验防护(zuo si) 48
2.2 机械与加工 51
2.2.1 工具 51
2.2.2 材料 56
2.2.3 传动与结构 61
2.3 仪器搭建 71
2.3.1 源 71
2.3.2 控温 80
2.3.3 磁场设计 82
2.3.4 悬浮结构 85
2.3.5 光照 85
2.3.6 力/形变 87
2.3.7 采集电路 87
2.3.8 功率放大 90
2.3.9 孔结构 91
2.3.10 薄膜体系 91
2.3.11 3D打印 92
2.3.12 常见仪器说明 100

3 Data Measuring and Processing 104

3.1 综述 104
3.1.1 数据采集 104
3.1.2 数据评估 104
3.2 处理 105
3.2.1 数值计算方法 105
3.2.2 信号处理 109
3.2.3 图像处理 117
3.3 采集 128
3.3.1 追迹 128
3.3.2 电学量 129
3.3.3 流体测量 130
3.3.4 力学量测量 131
3.3.5 运动测量 133

3.3.6 其他 . . . 134

4 Simulation and Computation 139

4.1 综述 . . . 139
4.1.1 模拟方法 . . . 139
4.1.2 对照方法 . . . 141
4.2 软件 . . . 141
4.2.1 COMSOL . . . 141
4.2.2 InteractivePhysics . . . 142
4.2.3 RK4 . . . 142
4.2.4 FDTD . . . 143
4.2.5 Mathematica/Matlab . . . 144
4.3 计算物理(?) . . . 144
4.3.1 Monte Carlo . . . 144
4.3.2 Metropolis . . . 145
4.3.3 模拟退火算法 . . . 146
4.3.4 元胞自动机 . . . 146
4.3.5 模型抽象 . . . 147
4.4 对照 . . . 148
4.4.1 拟合优度 . . . 148
4.4.2 曲线特点 . . . 148
4.4.3 实验-理论耦合? . . . 149

5 PPT and Show 150

5.1 展示目的 . . . 150
5.2 规范 . . . 150
5.2.1 PPT格式 . . . 150
5.2.2 学术规范(?) . . . 150
5.2.3 一些建议 . . . 152
5.3 展示 . . . 157
5.3.1 观感 . . . 157
5.3.2 演示动画 . . . 158
5.3.3 图片展示 . . . 160
5.3.4 PPT动画 . . . 160
5.4 团队合作? . . . 161

A 参考 164

B 物理量与测量方法 165

C 软件 **166**

D 一教仪器列表(部分) **167**

E 资料源 **168**

后序 **169**

序

CUPT，又名菜鸡互啄大赛。该比赛涉及17道奇怪的物理实验题目，虽然有部分文献可查，但更推荐加入自己的想法，模仿从来不是科大的风格。要提供形象直观的解释和验证，除了对物理本质和过程深刻理解外，构建正确的实验方法与仪器也常常是验证正确结论的必要条件。但由于偏理科的专业和较低年级的限制，对这些题目开始入手研究时，往往在实验方法方面欠缺较大，所以打算编写这个文档来作为一个参考工具。主要在USTC校内使用。

全文内容来自实验的经验总结和所学知识，偏向于应用方法，也包含部分之前参赛过程中总结的经验。起名为Cookbook也是因为所列的内容非常细碎，并不适通读一遍，反而更适合当作菜谱一样在需要的时候进行查找。由于并非想写一份专业的、完备的文档，所以许多概念以简单易懂的语言进行了解释，避免专业术语和繁杂的严谨性，并且虽然很多内容本身是可以写成专著的题材，但在这里只做了简单介绍，提供以实用为主的方法，背后的原理可跳过或自行查找，尤其在简单的使用并不能解决问题的时候；可能会附加一些参考链接供进一步了解(其实网页基本也都是简介，去看专门的教材又太花时间，所以找了一个在有限时间内可以得到有效帮助的折中方案。有关于本文档内容理解或详细方法的问题可发邮件到lizi25@mail.ustc.edu.cn[如果觉得我了解的话……])。预计该文档会对参加CUPT比赛和做一二级实验中IYPT题目的同学有些帮助，四级实验的研究型课题或许也能找到问题的解决方法。

文档主要分为五部分：

- Sensors：介绍仪器的控制方法和常用传感器，并提供了电子线路方面的实践方法作为参考；
- Machine and Instrument Building：一些可能会用到的安全注意事项，并总结机械结构的搭建和材料、工具内容，同时综合传感器部分写了一些仪器搭建的经验；
- Data Measuring and Processing：介绍数据处理的一些方法与其可实现的功能，以及一些经典的或我们在实验中提出的物理量的测量方法；
- Simulation and Computation：对计算机模拟物理过程或物理场的计算进行了介绍，介绍3种或许可行的理论-实验对照方法；
- PPT and Show：这一部分比较开放，总结赛场上展示环节的经验，由于现场展示是个无最优解的随机过程问题，所以仅具有参考价值。包含对PPT制作和三方报告的建议。

每一部分配了一部分可能与实际不符的参考图片或者动画，没有动画的版本可从这里下载，有动画的PDF可用支持Flash的阅读器直接观看(如Adobe Reader)，其他阅读器可能会需要将动画另存为文件播放。为减小排版篇幅，图片和动画均已尽量缩小，但其源



文件有足够的分辨率使其可被放大观看。此外还附上了一些简单的程序代码，这些代码一般不能直接运行，仅作为函数或算法的说明，代码注释部分标识了编程语言。红色桃心标识的部分为危险器件，使用时需要特别注意实验安全。

本文档半开放，任何建议、纠错或想加入此文档的内容均可发邮件到：lizi25@mail.ustc.edu.cn 。在不违背本文档目的的前提下将会在下一次的更新中进行修改。完整的文档下载地址(除非空间被清除……)：Download

PS:若认为本文档有帮助，请在PPT参考文献中加入：

USTC·2018CUPT校队,CUPT Cookbook,[M],Hefei,Anhui,USTC1231

USTC·1231

2019.06



第 1 章 Sensors

物理量的测量均可认为是通过传感器实现，故选用合适的传感器，并进行系统的控制，可以显著提高实验效率与数据精确度。本章介绍传感器的性能术语与控制方式，并主要介绍采用Arduino单片机进行的控制的操作方法，同时简略介绍上位机程序的编写和电路硬件的相关经验。

1.1 综述

1.1.1 传感器类型

- 数字传感器：输出数字量，需要特定的通信协议读取数据。
- 模拟传感器：输出模拟量，需要配合模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)将模拟量转换为数字信号，并由控制部分读取ADC进行测量。
- 电压/电流信号：初始输出信号为电压/电流，对于输出电流，需要加采样电阻转换为电压，再用ADC采集。
- 连续/触发测量：是否需要外部触发信号来开始测量。

1.1.2 传感器性能

- 采样率：每秒测量物理量(采样)的次数。
- 采样定理：对频率为f的信号完整采样要求采样频率大于等于$2f$。一般为减少频率泄漏(见后)，完整还原波形，建议大于$10f$，并采集较长时间。、
- 精度：最小分度值或噪声影响下的最小有效分度值。受传感器或ADC限制，同时受环境影响，可能可以通过滤波、屏蔽等措施减小噪声提高精度。
- 准确度：测量数据与真实物理值的偏差。属于系统误差，但不可知，故认为是真实值，应在需要准确值时考虑此误差(考虑相对误差)。一般高精度传感器均有大于最小精度的最小准确度，所以在测量绝对值而非相对值或变化时，一味追求精度而不考虑准确度是不适当的。
- 控制：通讯协议与硬件连接。应注意合适的信号接口、端口是否需要上下拉、以及上电顺序等问题。
- 转换时间：传感器完成一次测量需要的时间(多指ADC转换所需时间)。
- 响应时间：传感器只有在内部测量部分与外部待测量量达到相等时，测量结果才为外部量，中间的时间差可认为是传感器的响应时间，同时该响应时间也限制了传感器可测量的最高变化频率。常见于温度测量、振动测量。更普适的响应时间代表变化传递所需的时间。
- 响应曲线：传感器对外部刺激的响应形式随外部刺激不同而改变。如频率响应，幅度响应，相位响应，脉冲响应。在振动(声音)方面常需注意，不能将一个频率

的性能简单地推广到其他频段或非线性的振幅范围。

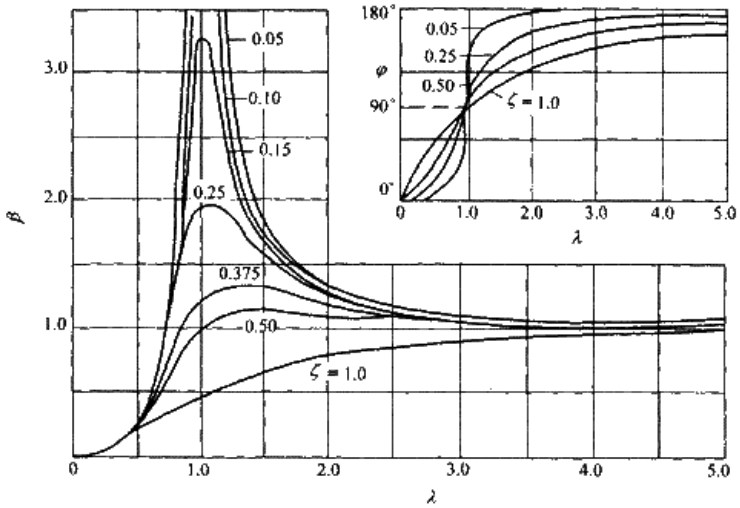


图 1.1: 典型响应曲线

1.1.3 预处理

- 噪声：环境或器件固有属性对测量精确度带来的影响。

  [►]非电路噪声，如温度、噪声音、振动等，可以通过屏蔽(大热容(水)物体包裹、高低热导率材料包裹(紫铜、泡沫)、隔音材料、减震器)减弱。

  [►]电路噪声：电磁辐射可以通过采集电路外包裹铝箔纸，并接地，以减弱(如环境50Hz噪声)。电路本身噪声(如高精度ADC采样噪声)可以通过滤波电路、恒温控制、电源稳压，长时间采集等方式减弱。

- 漂移：信号采集电路会存在因温度、累计误差等因素出现的信号漂移现象，即存在向一个方向或振荡形式的偏移。选购时需要注意该参数，尤其在需要长时间测量信号的情况下。可在使用前不加变化量进行测试。测量形变/长度的传感器的漂移可能由机械结构的硬度或牢固程度不够导致滑移形变等。一些存在漂移的传感器需要充分预热，或者在器件周围设置控温电阻。

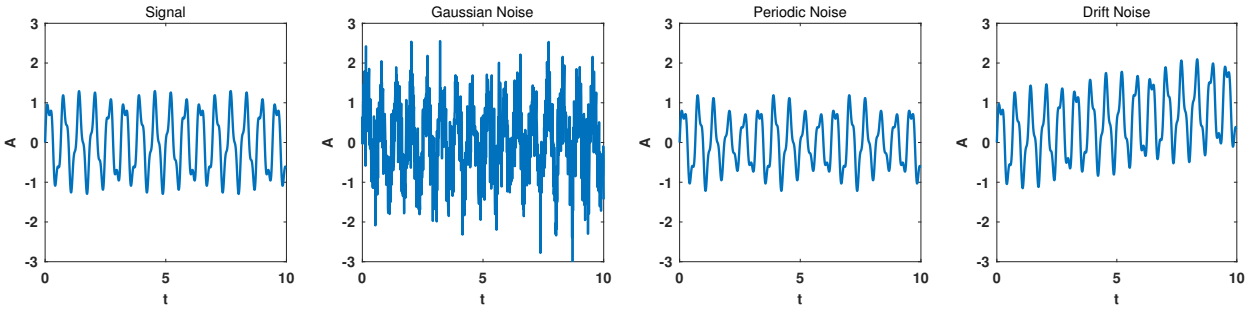


图 1.2: 噪声

- 滤波：滤除信号中不需要的成分，多为噪声，也可以是频域滤波，保留需要的频率的信号。

[▶]硬件滤波：电容：常用于需要稳定供电或电压参考点的位置，采用大小(pF与μF)两个电容并联与需要稳定的端口和GND之间。

[▶]π型滤波等滤波电路：可采用多级串联提高滤波效果，但信号强度也会随之下降，常需要放大。注意输入输出阻抗匹配，设计参考模电。

[▶]软件滤波(见信号处理部分)：

Ⅰ.时域滤波：采用平滑或差分窗口对信号进行卷积。(Matlab—conv,conv2,smooth,filter)。中位滤波很好的抑制高低突变噪声。

Ⅱ.实时滤波：卡尔曼滤波器等，参考信号与系统或数字信号处理。

Ⅲ.频域滤波：引入频域概念，滤除频域中的部分信号。常见有:直接截断(存在振铃效应)，高斯滤波，逆滤波，维纳滤波(后两个针对频域乘性噪声)

- 放大：对信号进行线性或非线性放大。

[▶]线性放大：经典反/同项比例放大电路，差分放大电路，需要注意放大器输出限制、响应曲线、阻抗匹配、单电源情况下的直流偏置。为避免对噪声进行放大，对于较强信号，可采用滤波-放大-滤波串联结构，微弱信号可以采用放大-滤波结构。运放常具对有50Hz/60Hz的抑制。

[▶]非线性放大：常用于检测信号的有/无，或采用施密特触发器、Lm393等器件判断信号是否超出阈值。

- 模数转换器(ADC)：将模拟电压信号转换为数字信号。

[▶]采样率：单位时间采样次数。

[▶]可编程放大器(PGA)：对输入信号的预放大。

[▶]参考电压V_{Ref}：用于比较输入信号的标准电压，需要旁路电容等保证稳定。

[▶]位数：用于表示模拟电压的数值位数w，共可表示2^w个电压值，最小分辨电压近似为$\frac{V_{Ref}}{2^w}$。

- (数模转换器(DAC)：将数字值转换为电压不同大小的电压，可用于产生波形、产生控制电压等)

1.2 控制

一些较复杂的传感器有配套的软件可以使用，但对于简单的传感器或者需要综合多个传感器时，则需要自行编写一些控制程序，或可用将一些硬件通信信号转USB通信的方式通过电脑控制，更方便的一个方法是采用单片机作为控制端直接控制传感器，然后再将数据存储或传到电脑的上位机程序上。

常见的单片机有Arduino系列(准确地说是Atmel的ARM架构系列)，STM系列以及古董级的C51系列(但也很有用)，因为这是个关于物理实验比赛，所以建议选择开发难度小(性能相对比较弱……)的Arduino系列(但不要沉迷于Flxg……)。

1.2.1 单片机控制

- Arduino简介

  Arduino是一种开源的单片机平台，包括硬件和开发软件两部分。其主体是黑色的Atmel的单片机(或者叫微控制器，Microcontroller)芯片，可认为是一种包含了硬盘和特定功能电路的小型CPU。通过产生(晶振电路)一定频率的方波来驱动此芯片，从而使其像电脑一样自动执行内部的程序，同时Arduino电路板还引出了芯片的一些通用输入输出端口(GPIO)，并焊接了一些用于表示状态的指示灯和类似电脑重启键的复位按钮。电路板上的一些其他芯片负责完成电压转换并稳定，或者将串口信号转成可用USB通信的信号(CH340、CP2102等)。将电路板上的Micro-USB端口连接电脑后可用一些串口软件控制(需要在电脑上安装CH340、CP2102等芯片的驱动，同时单片机内也要有相应的程序)。可用官方开发环境编程，或者集成了VisualGDB等编译器的其他开发环境(VsCode,Visual Studio)，编程语言是一种封装过的C++，掌握基础C语言及一点点“类”(先认为是复杂的结构体)的知识即可顺利开发。

  [▶]数字端口：D013。使用digitalWrite/ digitalRead可以读取/输出数字值(LOW/HIGH对应0V/5V)，部分引脚可以用analogWrite输出脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM,即可调占空比的方波)信号。

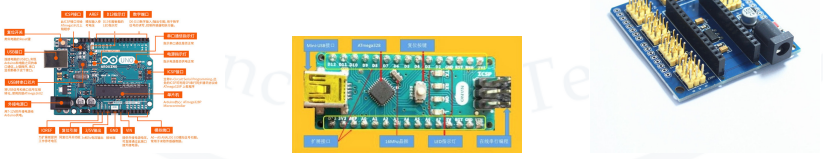
  [▶]模拟端口： A0~7。芯片内置10位ADC， analogRead可以读取模拟值。没有DAC，所以不可以输出模拟值。

  [▶]通讯(见后)模块：I2C(I_2C)，SPI，Serial(串口) 专有外设与模拟方式实现，使用专有外设需要连接特定引脚，模拟方式可以为任意引脚。

  [▶]计时器：内部计时，由一个寄存器完成，计时器增加1对应的时间为芯片的系统频率或其分频。可用于计时，产生方波(PWM波)，可设置计时中断

  [▶]中断：可以打断运行的程序去运行指定的中断函数。用于同步或响应事件，避免等待信号时的资源浪费。外部信号的中断需要连接特定引脚。

  [▶]字长：16位



(a) Arduino UNO (b) Arduino NANO (c) NANO 扩展板

图 1.3: Arduino

- 常用函数(Arduino)：

  [▶]端口设置：pinMode

  [▶]端口访存：analogRead digitalRead analogWrite digitalWrite

  [▶]串口：Serial.begin available flush print println read

  [▶]延时：delay delayMicroseconds

[►]其他：pluseIn

[►]I2C库： Wire.begin requestFrom read available write

- STM32简介

性能更加强大的32位单片机(也有同系列的8位STM8)，主频72MHz到400+MHz，3.3V供电，端口(GPIO)更多。部分型号内置1MHz 12位ADC与1MHz 10位DAC。同时有DMA功能加快数据传输。串口等外设同样多于ATMEGA328。

可采用C、C++开发，同时有简化配置的库函数可以调用。编程较为复杂，设置参数时需要了解更多内容，并且常需要一份引脚-外设对应表辅助编程(也可用STMCube辅助配置)。

Arduino示例代码·呼吸灯与测温

```
// 包含需要的库
// 非内置函数库需要添加到同一项目中，如第二、三个库。
#include <SPI.h> // SPI库
#include "Adafruit_Sensor.h"
#include "Adafruit_BMP280.h"

// 定义元件引脚
// D0-D13 直接用数字表示
// A0-A7 用 A? 表示
#define Key 2
#define LED 3
// 温度传感器接口，SPI通讯
// 不过有Arduino专门的SPI接口可以用……
#define BMP_CS A0
#define BMP_MOSI A1
#define BMP_MISO A2
#define BMP_SCK A3
// 传感器对象 (或者认为是一个可以附加函数的结构体)
Adafruit_BMP280 bmp(BMP_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO,BMP_SCK);

// 封装的函数之一
// 这个只会在程序开始被执行一次
void setup() {
  //设置端口模式
  //LED为输出模式，并初始化为低电平输出
  // (对数字引脚使用 digitalWrite 设置 0/5V)
  pinMode(LED, OUTPUT);
  digitalWrite(LED, LOW);
  // 按键设置为上拉输入，需要与外电路对应
  // 使按键没有输入的时候该端口读取到的为高电平
  pinMode(Key, INPUT_PULLUP);
```

```
32
33    // 设置中断函数
34    // 中断端口：0(外部中断) 中断函数：InterFunction(名字随便)
35    // 触发方式：电压下降时触发，也可为上升时、变化时或为特定电平
36    attachInterrupt(0, InterFunction, FALLING);
37
38    // 初始化串口，设置波特率
39    Serial.begin(115200);
40    // 初始化传感器
41    if (!bmp.begin()) {
42      Serial.println("Could not find a valid BMP280-1 sensor 1, check wiring!");
43      while (1);
44    }
45
46    //串口发送一个消息后开始运行之后的程序
47    while(Serial.available()<1);
48    while(Serial.available()>0){
49      // 读取串口发送来的信息,每次返回读取一个字符
50      Serial.read();
51      // 为避免信息丢失，需要延时等待硬件响应
52      delay(2);
53    }
54  }
55
56  // 全局变量
57  float Temperature,LEDLight;
58  int i,step;
59  // 封装的函数
60  // 这个函数会在执行了 setup() 后不断执行
61  void loop() {
62    // 采用传感器对象 bmp 的函数读取温度
63    Temperature=bmp.readTemperature();
64    if(Temperature<1)
65      Temperature=1;
66
67    // 呼吸灯部分，根据温度改变呼吸频率
68    step=1;
69    for(i=1;i>0;i+=step){
70      // 对部分数字端口用 analogWrite 设置输出可得到不同占空比的PWM输出
71      analogWrite(LED,i);
72      // 延时 (ms)
73      delay(int(1000/Temperature));
74      if(i==255)
```

```
75        step=-1;
76    }
77
78    // 串口输出温度到电脑
79    Serial.print("Temperature:"); // 发送，不换行
80    Serial.print(Temperature);
81    Serial.println("℃");        // 发送，换行
82
83    // 若单片机串口收到输入，则停止程序(进入死循环)
84    if(Serial.available()>0)
85      // 死循环
86      while(1);
87  }
88
89  // 中断函数，无返回，可有输入
90  void InterFunction(){
91    // 按键消抖，判断是否真的按下按键
92    delay(10);
93    if(digitalRead(Key))
94      return;
95
96    // LED闪烁5次，并将 i 置零，重新开始“呼吸”
97    for(i=5;i>0;i--){
98      digitalWrite(LED,HIGH);
99      // 延时(us)
100     delayMicroseconds(100):
101     digitalWrite(LED,LOW);
102     delayMicroseconds(100):
103   }
104
105   return;
106 }
```

1.2.2 数据传输

- 通讯协议

  [►]I2C：时钟 SCL(CLK) 数据SDA 双总线半双工

  [►]SPI：片选 CS 时钟 SCL 数据MOSI(主出从入) MISO(从出主入) 双总线双工

  [►]One-Wire： Wire 单总线指令和数据分别发送时序参考Datasheet

  [►]Serial：发送(TX) 接收(RX) 不同设备交叉连接软件约定波特率双工

  [►]485: 时钟 CLK 数据 A、B 根据AB电压相对高低表示0、1，需要接口转换芯片。

[►](CAN、USB、PCI)

- 蓝牙：连接蓝牙模块，需要串口进行通讯，开启电脑蓝牙串口功能，低波特率。
- 通讯：

  [►]时钟：信号传输速率与节拍

  [►]命令：控制指令

  [►]片选：使能信号，选择进行通讯的器件，用于一条总线上有多个器件的情况。

  [►]地址：访存寄存器的地址

  [►]数据：写数据和读寄存器的数据
- 常见步骤：总线空闲时被释放(高阻态、低电平、高电平)，开始先发送表示占据总线的信号，表示通信开始(可能主机需要等待从机的应答)，从机在每个时钟节拍对数据进行采集，每次传输特定长度(一般为1byte)，然后使用校验位检验数据是否正确。较复杂器件读取、写入需要先传输指令，然后地址，数据(地址数据需要注意高低字节顺序)。以上大部分由底层函数完成。
- 综合：

  [►]多状态传输：定义指令，可以通过主机发送不同的字符运行不同功能，或进行传输的同步，避免等待时间太长丢失数据。

  [►]采用中断、计时器等进行后台运行。

1.2.3 学习新传感器

首先要确定传感器性能与测量方式(输出类型)，集成的模块需要找出主要传感元件型号，并进行相应控制：

1. 数据手册(Datasheet):通常可从淘宝卖家提供的资料、网络搜索、生产商官网，找到对应元件数据手册。从数据手册中，可以得到详细的性能参数以及工作极限条件，有的器件会附上示例电路与封装尺寸等信息，便于电路设计。此外，对于数字输出的元件，数据手册中的时序图与控制方法更为重要，需要注意寄存器的设置(可以改变元件采样率、量程等)，指令、中断等信息。
2. 找代码：对于可以采用Arduino控制的模块，修改已有代码可以显著提高效率。模块控制程序常常可以从一些淘宝卖家给出的资料中找到，或在一些Arduino论坛找到示例，另有一些系统开发控制程序的厂家，并将自己的程序提交到GitHub上，故也可在GitHub搜索。对于找到的程序，要注意端口的定义和寄存器配置，可以做相应端口和输出方式的修改。对于找不到示例代码，但使用I_2C或SPI方式进行通讯的模块，使用Arduino已有库函数操作也很方便。

总之，加深了解，避免造轮子。

1.2.4 上位机

单个单片机控制可能会因为引脚或端口冲突导致需要多片单片机相互通讯协同工作，或者主动控制单片机工作模式和参数，同时可以完成数据的采集存储和预处理。当

然，部分功能也可以经过较复杂操作后纯用单片机完成。以下主要采用串口通信方式进行控制。

上位机的编写可以使用Python的pySerial模块，Matlab的串口通讯功能和C语言的conin.h库(将串口视为一个文件进行读写)。较为推荐Python模块，免费且易操作。但注意Python的各种编码问题……

需要设定的参数：波特率，串口地址[数据数，校验位等]，一般只需要设置前两项。串口通讯数据会发送到电脑端的缓存内，故在程序读取串口数据时，会优先读取先发送来的数据，所以在更新设置后若需要读取更新的数据则需要先清空缓冲再进行读取，采用readline()读取可以每次读取一行(以\r\n为结尾)，但读取到的为字符串格式，所以可以在正式使用前预先显示发送的字符串，经过split处理后对有效部分转换格式。此外指令发送的格式一般为单字节而非数字，所以接收时的指令也作为单字节来选择指令。数据的累计可以用Python的list.append()完成(或其他数据结构)。Matlab与C的库同样需要进行格式转换。为避免程序出错或采用Ctrl+C停止数据采集导致端口错误而需要重新插拔硬件，建议加入try和except处理错误，也可以加入数据存储、画图等功能。使用time函数查询时间来作为文件名可以避免每次输入文件名，但需要记录数据和实验顺序的对应。

为配合上位机的使用，单片机同样需要处理读取和时间同步问题，同时需要实现对指令的等待和缓存的清除，在读到新字符(指令)后查找对应功能并该改变程序运行。

Python 上位机程序框架

```
# -*- coding:  utf-8 -*-
# 导入库
import matplotlib.pyplot as pl
import numpy as np
import serial
import serial.tools.list_ports
import time

# 查询可用端口
plist = list(serial.tools.list_ports.comports())
if len(plist) <= 0:
    print("The Serial port can't find!")
else:
    plist_0 =list(plist[0])
    # 选择端口并设置参数
    serialName = plist_0[0]
    ser=serial.Serial(serialName,115200, bytesize=8, timeout=4)

c='o'

# 不限长采集
while(True):
```

```
    # 状态选择
    if(c==’q’):
        break
    elif(c==’c’):
        ser=serial.Serial(serialName,115200, bytesize=8, timeout=4)

    # 等待开始
    while(True):
        print(serialName)
        c=input(’Please Input "s" to Start:’)
        if(c==’s’):
            break

    data=[]
    try:
        # 向单片机发送开始指令
        ser.write(’s’.encode(’ascii’))
        print(’Begin!’)
        # 读取并替换，注意Python坑人的编码问题
        while(True):
            data.append(float(ser.readline().decode(’gb18030’).replace("\r\n",""
                )))
    # Ctrl+C 退出采集
    except KeyboardInterrupt:
        # 清理缓存并关闭串口，释放文件号
        ser.read_all()
        ser.close()
        # 作图，并以时间为名字写入文件
        pl.plot(range(len(data)),data)
        with open(time.strftime(’%H-%M-%S’,time.localtime(time.time()))+’.txt’,’
            w’) as fp:
            for i in data:
                fp.write(str(i)+’\n’)
        # 新一轮测量
        c=input(’’’
                Countinue to Measure --c
                Quit --q
                ’’’)
```

C语言串口读写程序

```
// 头文件
#include <windows.h>
#include <conio.h>
```

```
// 字符串操作
#include <string.h>

#define ComName "com3"

int main()
{
  // 文件指针
  HANDLE Comp;

  // 将不同端口视为文件，此处将串口视为一个文件打开
  // 打开前理论上应该加入检测指定的串口是否存在的程序……
  //串口号(字符串格式);读写选项;独占方式;安全特性;打开存在的端口;同步方式;指针
  Comp = CreateFile(_T(ComName),GENERIC_READ | GENERIC_WRITE,0,NULL,
      OPEN_EXISTING,0,NULL);

  if (Comp == (HANDLE)-1){
    // 打开失败，输出错误信息
    printf("打开失败COM! %x\n", GetLastError());
    return FALSE;
  }
  else{
    printf("打开成功! COM\n");
  }

  //设置输入输出缓存区大小
  SetupComm(Comp, 1024, 1024);

  // 最长等待时间设置(ms)
  COMMTIMEOUTS TimeOuts;
  //读等待时间，全部时间与间隔时间
  TimeOuts.ReadIntervalTimeout = 500;
  TimeOuts.ReadTotalTimeoutMultiplier = 500;
  TimeOuts.ReadTotalTimeoutConstant = 1000;
  //写等待时间，全部时间与间隔时间
  TimeOuts.WriteTotalTimeoutMultiplier = 5000;
  TimeOuts.WriteTotalTimeoutConstant = 2000;
  SetCommTimeouts(Comp, &TimeOuts); //设置串口

  // 波特率设置
  DCB dcb; //波特率结构体
  // GetCommState(Comp, &dcb); 可读取状态
  dcb.BaudRate = 115200; //波特率
```

```
  dcb.ByteSize = 8;  // 每字节的比特数
  dcb.Parity = NOPARITY; //奇偶校验位
  dcb.StopBits = ONESTOPBIT; //停止位
  dcb.fParity = FALSE;
  dcb.fNull = FALSE;
  SetCommState(Comp, &dcb); //设置串口

  // 清空缓存
  PurgeComm(Comp, PURGE_TXCLEAR | PURGE_RXCLEAR);

  // 程序中的读取缓存与待写入数据
  char str[256],s[]='Holle World!\0';

  DWORD RNum = 4,WNum=strlen(s);
  DWORD ARNum,AWNum;

  // 写入数据
  // 文件指针(串口)，待写入数据，需要写入的字符数，实际写入数，没用的参数(记录输入输出信息的结构体)
  WriteFile(Comp, s, WNum, &AWNum, NULL);

  // 读入数据
  // 文件指针(串口)，读取缓存，需要读取的字符数，实际读取数，没用(同上)
  if (!ReadFile(Comp, str, RNum, &ARNum, NULL))
  {
    printf("读串口失败!");
    return FALSE;
  }
  // 读取的字符流没有结束符，除非特意发送，所以需要手动加入
  *(str + ARNum) = '\0';

  // 用一些格式转换函数得到需要的类型
  atof(str);

  //关闭串口
  CloseHandle(Comp);
  return 0;
}
```

Arduino同步与发送部分

```
// 用于等待指令的同步函数
while(Serial.available()<1);

```

```
// 运行代码至收到新指令，也可写成中断函数格式
while(Serial.available()<1){
  // 运行部分
}

// 读取新指令，改变状态
n=0;
while(Serial.available()>0){
  c[n++]=Serial.read();
  delay(2);
}
ChangeState(c);
```

1.3 传感器

1.3.1 水/气压

- 传感器模块(如BMP280)：使用专门的数字芯片对气压进行测量，可以自行焊接或买模块，直接输出气压绝对值。以BMP280为例，3.3V供电，*SPI*或I_2C通讯，采样率最大860Hz，可通过寄存器配置改变采样率与精度(实测200Hz左右，加上数据传输时间，<150Hz……)。气压精度±150Pa，长时间有一定漂移，所以建议为得到较精准的数据，降低采样率，测量口为<1mm直径圆孔。主要芯片为6引脚BGA封装，通讯端口需要上拉电阻。可采用Arduino控制，通过多端口模拟SPI通讯或使用CS使能端口进行多片控制。响应较快，小于采样时间。
- 气压表：传统指针式气压表，针对不同气压段有不同精度的气压表，量程广，但响应慢，可以用来静态/稳态测量，动态变化不准确。
- 咪头(气压变化)：类比声压，测量声音的咪头也可用于气压变化的测量，拥有较高的频率响应与灵敏度，但无法得到绝对压强，仅能在一定范围内得到气压相对变化。最小体积可以到4*4*2mm，需要接外围电路进行测量，可用声卡代替ADC采集信号。

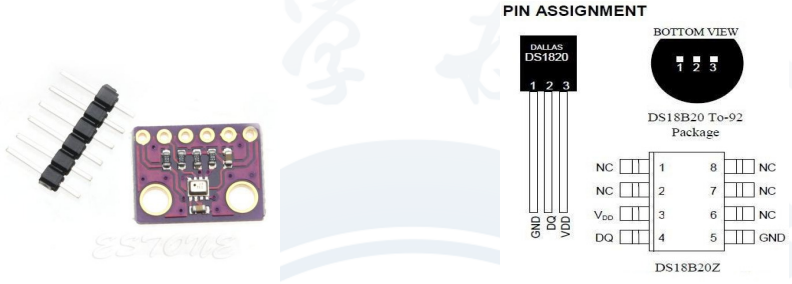


(a) BMP280　(b) 气压表　(c) 咪头

图 1.4: 气压传感器

1.3.2 温度

- 数字模块(BMP280、DS18B20等)：直接输出数字温度值的元件，具有指令格式、控制时序等要求。一般温度模块采样时间均较长，在100ms量级，需要与待测物体有较好的热接触以较小变化到测量到变化的响应时间。BMP280也可以测量温度，量程为$-40^oC \sim 80^oC$，但存在漂移。DS18B20采用单总线进行控制，12位精度，数据端口需要上拉电阻。



(a) BMP280　　(b) DS18B20

图 1.5: 数字温度传感器

- 热电偶：采用温差电动势原理进行测量，传感器结构为两种金属一端焊接在一起，另一端接测量端，焊点为测温端。按照两种金属种类的不同，又分为K，J等型号的热电偶，一般K型热电偶热电势随温度变化较大。热电偶在使用时需要设置温度参考点或进行电压的零点补偿，一些芯片如MAX31855，ADS1118等本身带有0点补偿和ADC功能，所以可以方便地实现温度的测量，若没有专门的零点补偿机制，则热电偶测量到的电压近似认为是温度差对应电压(近似的原因是热电偶的温度差-电压系数会随绝对温度的变化而改变)，温度差应为查找到的电压-温度表中的温度。由电压转换成温度需要系数对照表(这个链接可能会失效，可自行查找，如：K型热电偶温度对照表)，表中未列出的温度可通过线性插值得到。热电偶因为信号很弱，所以为减小噪声，较长的热电偶线建议用金属屏蔽线并接地。因测量需要温度差，需要较长的距离保持参考点的恒定温度，但焊点可以很小，以测量很小区域的温度。不同型号热电偶适用于不同温段，可从10^1K到10^3K。



图 1.6: 不同样式热电偶

- NTC/PTC：负/正温度系数半导体传感器，器件电阻与温度成指数关系，具体的电阻-温度对应关系需要查找对应芯片的Datasheet。这类元件或芯片尺寸可以很小(2×0.8mm)，

所以可集成在电路板上进行温度探测，但需要外围电路将电阻值转换成电压，如使用恒流源、电桥等方式。电阻传感器件使用时要避免电流太大产生热效应影响测量精度。

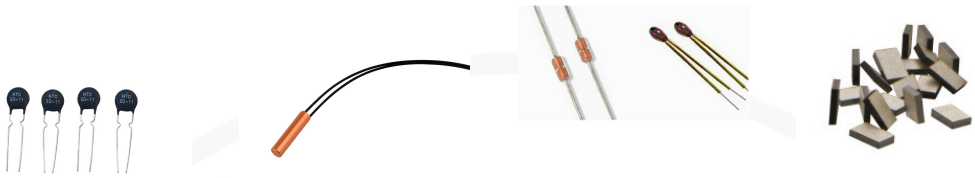


图 1.7: NTC/PTC

- Pt：利用铂电阻温度特性进行测量，一般有Pt100和Pt1000，后面的数字指在0℃时元件的阻值。电阻随温度增加而增加，具体系数需要查表。同NTC/PTC，采用电桥或电流源作为外电路将阻值转换为电压以便测量。封装形式如下，最小封装为直插式两脚/四角的约3×2mm封装。Pt热电阻分级不同精度不同，一般可购买到的最高级为AA级，其他有AAA，A，B等级别。Pt1000较Pt100灵敏度高。



图 1.8: PT100/PT1000

- 温度计：指水银、煤油为测温物质的常见温度计，读数注意平视，不可过度加热，测量液体温度时，应考虑液体内部的温度分布，所以不要使测温泡接触器壁。
- 红外测温枪/成像：利用物体的红外辐射谱进行测量。红外系统可以通过内部设定的辐射与镜头收集到的外部辐射进行比对确定温度。可实现非接触测量，但一般精度低，成像设备贵。测量的温度与被测物体表面情况有关(辐射系数)，所以实际温度应根据仪器设定的辐射系数与物体对应的辐射系数(查表，可用经验值)换算得到。测量精度与镜头到物体的距离有关，刚好聚焦成像情况下环境噪声相对最小。



(a) 热成像仪　　(b) 红外测温枪

图 1.9: 红外测温设备

1.3.3 长度

- 超声测距：采用超声脉冲进行距离测量。超声探头分为发射和接收端，发射端需要较大发射功率和好的方向性(模块上的发射端可在10cm出达到120dB的声强)，接收端需要高灵敏度，用于将声信号转换为电信号。目前超声器件为基于压电陶瓷制作，所以有特定的谐振频率，驱动和接收只有在其共振频率处才会有较强的响应。测量时先控制发射端发射一段短超声信号，然后等待接收端收到回波后产生的信号，可用Arduino函数自动完成。使用时需要保证待测物体有一个较好的反射端面。且脉冲是否对准对测量结果有较大影响。

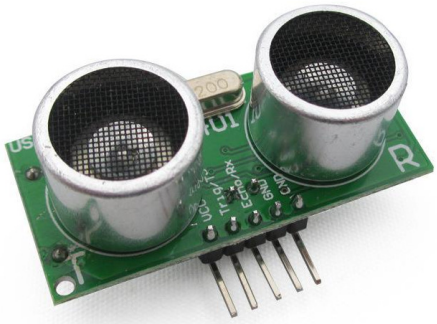


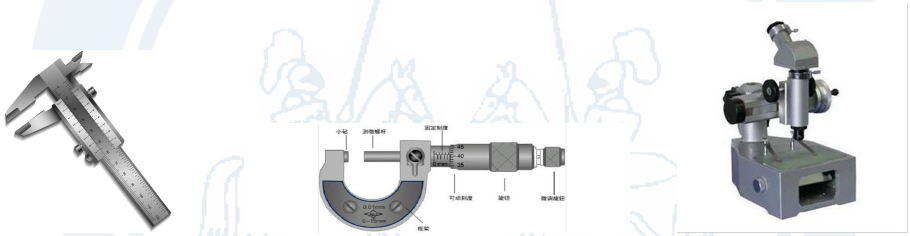
图 1.10: 超声测距模块

- 激光测距：采用脉冲激光作为测距介质，原理同为回波法测量。激光方向性比超声要好，测量的距离更长，精度更高，频率更高，收发可由同一芯片完成，但价格贵。模块可直接输出距离。同样需要反射端面，



图 1.11: 激光测距

- 读数显微镜：读数显微镜为镜筒可移动，内有叉丝的显微镜，控制移动的旋轮可达到10um的精度，但存在回程误差。用于微小距离的静态测量(有些光学显微镜的可移动载物台也附有标尺)。
- 图像：对物体拍摄图片(动态距离需要拍摄视频)后采用像素与实际距离的对应关系进行测量，详见后面图像处理部分。不需要反射端面，可测量水柱等不规则物体的任意方向长度。(或者这条不该放传感器这……)
- 游标卡尺/螺旋测微器/尺子/线：常用仪器，需要学习标尺读数方法，注意零点漂移和回程差的问题。线可用于测量曲线长度。



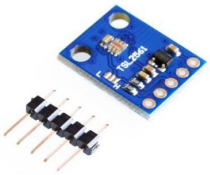
(a) 游标卡尺　(b) 螺旋测微器　(c) 读数显微镜

图 1.12: 机械测距仪器

1.3.4 光强

- 数字模块(TSL2561等)：利用半导体光生载流子原理测量光照强度，电流强度(或转换为电阻的分压值)在一定范围内可认为是线性关系，经标定后可得到绝对光强。数字模块可直接直接输出照度值，可用Arduino进行数字通讯。测量时需要调节传感器的积分时间以改变信噪比或采样率。对于没有前置透镜的传感器可以预先聚焦提高光强。
- 功率计：直接测试光强的专业仪器，可输出功率值，一般有通讯接口，测量分波段，所以使用时要选择合适的波段。此外为保证测量精度，需要选择合适的量程。
- 光电阻：光强越大阻值越小，阻值和光强关系不是很线性，且不能直接输出光强，最多提供相对值，需要外电路测量阻值变化，一般用于光强追踪，比如一些追光探头。电阻传感器件使用时要避免电流太大产生热效应影响测量精度。
- CCD：可直接拍摄二维光强分布，也可向一个方向求和得到一维光强分布(或者直接用线性CCD测量一维分布，但因为采样数少所以误差可能会较大)，详见后面的CCD部分。

- 光电二极管/硅光电池：一些仪器的主要测试器件，可通过自行焊接制作简单的光强探测，但没有标定前只能用于相对值的测量。焊接时要附加外电路进行测量，光电二级管或硅光电池均为电流型传感器，所以需要附加偏置电压和采样电阻转换成电压信号用ADC测量。
- 光谱：用于测量不同波段的光强，可得到发光功谱率分布。用于判断光源的相干性、颜色的定量表示等，在材料表征中作用很大。



(a) TSL2561



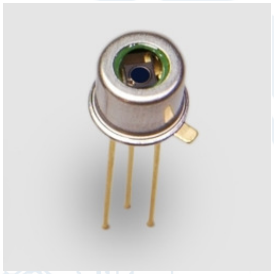
(b) 功率计



(c) 光敏电阻



(d) CCD/CMOS



(e) 光电二极管/硅光电池

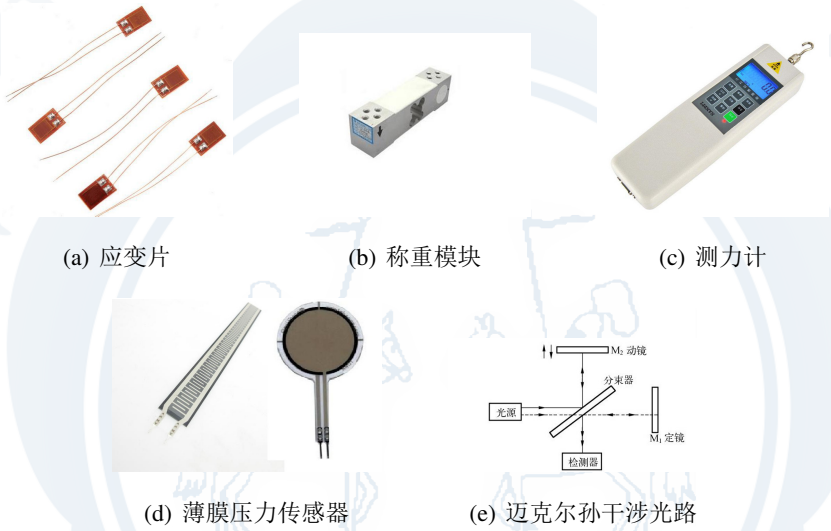
图 1.13: 光强传感器

1.3.5 力/形变

- 应变片：阻值根据弯曲程度不同而改变的薄膜电阻，贴附于金属片上可通过金属片的弯曲测量金属形变或受力。一般为双线式接头，通过电桥或电流源将电阻转成电压测量阻值。电桥式接法可将多个臂接上应变片，然后将不同臂的应变片贴在形变电阻的正反两面，使形变不同的电阻以相反的方向变化，获得多倍测量灵敏度。应变片可用502粘贴到金属上，粘贴前需要清理金属表面油污锈迹等，一般502粘贴不能持续很长时间(指几个月)，可再用较少的AB胶辅助粘贴，但太多的AB胶会影响金属的形变。精确测量时要注意金属片响应时间、阻尼系数的选择，应使金属的振荡时间短于测量的力/形变变化的最小分辨时间，响应时间也应小于所需的最下分辨时间。因电压信号一般较小，所以为减小噪声对线路进行屏蔽，也可添加滤波放大电路，提供稳定的电源对测试电桥供电。对精度要求高时，需要配备高位数的和形变频率相适应的ADC进行测量(如HX711,ADS1256等)，此外还需要对信号进行滤波放大处理。自制仪器使用时需要预先在线性范围内定标。电阻传感器件使用时要避免电流太大产生热效应影响测量精度。
- 称重模块(?)：基于应变片进行测量，但采用防水胶进行了很好的封装，并设计了弹性较好的铝制金属结构以满足大范围内的线性要求，但还是有测量限度，负载

过大会发生不可逆的损坏，需要根据测量的范围与精度购买合适的传感器。四线式接法，红黑为电源线，另外两条(绿白或其他颜色)为信号线，变化的正负表示形变方向。

- 测力计：专业测试仪器，可通过探头直接测试推拉力，显示数字值，使用前需要调零，可能有数字输出接口。
- 薄膜压力传感器：有压电，压阻，电容式等多种原理，图示为利用半导体压阻效应测量的传感器。不需要传感片的形变就可以得到电压，比如测量水或颗粒内的压力，同样需要用电阻测量方式进行测量压力。线性区较小，安装方便。
- 迈克尔孙干涉仪：波长级精度，可将一片反射镜与需要测试的移动端固连，通过CCD拍摄干涉后的光强变化来得到形变信息，若拍摄视频则可测量动态变化。



(a) 应变片　(b) 称重模块　(c) 测力计

(d) 薄膜压力传感器　(e) 迈克尔孙干涉光路

图 1.14: 力与形变传感器

1.3.6 速度

- 光电门：短时间平均速度趋近瞬时速度。光电门有红外LED和对应的光电二极管组成(光电对管)，LED光强可使光电二极管输出较高电压，加入比较器(非线性工作的运放)得到整形后的电压，一般不加也可没问题。挡光片通过光电门时遮挡LED发光，使光电二极管输出与通光时不同的电压，这种不同的电压信号长度可作为挡光时间，挡光片宽度除以挡光时间得到近似的瞬时速度。使用时若电路中电容较大，则光电二极管响应时间边长，不利于高速测试，挡光片也要选择遮挡红外的材料，并不是可见光不透明就意味着红外不透明。为保证测试精度，红外的光电二极管采用不透可见光的黑色封装，并将LED与光电二极管相隔较近。可用Arduino函数简单实现测试。
- 雷达：利用多普勒原理测量速度，可以在较远距离测量不同方向的运动速度。通过测量发射信号的回波频移得到速度值，但方向不同速度即使运动速度不同也会得到相同的频移，使用时需要注意测试物体的移动方向。但高精度雷达比较贵。
- 视频：拍摄视频，定标，找出物体移动像素值，详见测量部分的速度测试。



图 1.15: 光电门



图 1.16: 毫米波雷达

- 测距：采用响应速度较快的距离传感器不断测量物体位置，差分后得到速度变化。

1.3.7 磁场

- 霍尔元件：利用漂移的载流子在磁场中的定向累积出的电压(霍尔效应)进行测量，测试磁场方向与电流方向垂直，霍尔电压与磁感应强度成正比，一般霍尔元件会有一个明显的平面，测试的磁场方向即为垂直于该平面的方向。一些集成的霍尔芯片可以直接输出磁场强度，而未经标定的霍尔元件只能在一定范围内用于相对值的测定。一般测试磁场需要对一定范围内进行测试，需要配备可控的二维移动平台。
- 特斯拉计(原理同上)：制作好的磁场测试仪器，附有长屏蔽线的探头用于磁场测试，机箱用于电压信号的采集与转换，可能配有数字通讯的接口。



(a) 霍尔元件　　(b) 特斯拉计

图 1.17: 磁场传感器

- 巨磁阻：利用巨磁阻效应测量，元件阻值随磁感应强度变化，灵敏度较高，似乎比较贵，不如霍尔元件常见。

1.3.8 加速度

- 加速度(六轴)传感器：MEMS芯片，内部可认为是用三方向薄膜固定的小物体在加速度场下受到的“惯性力”的反作用(并不想用这个词，，，薄膜的弹力提供物体的加速度，理解就好)进行加速度的测量，有一定静态漂移。加通过单片机读写芯片内部寄存器配置采样率等参数或读取不同方向加速度或角速度数据。为保证较好的测试性能，一般需要使用动态滤波(如卡尔曼滤波)或PID算法进行控制。六轴传

感器也可测量角速度，并根据对重力的测量又可分为线性加速度传感器(输出=重力+加速度)、重力传感器(仅重力)。



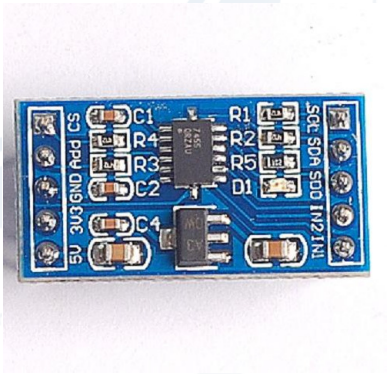
图 1.18: 六轴传感器模块

1.3.9 倾角

- 水平仪：简单的调平仪器，内置气泡位于标记环中间时水平仪即认为是水平状态，所以使用时需要使水平仪与待调整平面平贴。不能用于测试倾角，只是用于调平，且有一定滞回。
- 倾角模块：一个原理还不清楚的模块(或许也是测量重力加速度？)……可以输出倾角的数字值，精度特性等不清楚(并没有用过的模块……)



(a) 水平仪



(b) 倾角传感器模块

图 1.19: 倾角传感器

- 铅锤：用于标定竖直方向，可再通过比较铅垂线与测试平面的夹角来得到待测角度，比如量角器玄学估计，或者见下一条。
- 图片：只能测试一个平面内的两条线夹角，拍摄图片后得到直线端点坐标，并计算出角度，也可用一些算法自动得到之间角度，详见图像处理部分。

1.3.10 流量/速

- 转子流量计：或者叫玻璃转子流量计，内部为一个可上下移动的特定形状颗粒，中间管道为锥形，通入气流或水流后根据颗粒位置与流量计上的刻度值确定输出流量，但由于流体粘滞力的原因，一种流量计的刻度只用于一种流体的测试，所以在通入不同流体时需要查找对应流量计的比例系数，将测到的值换算为实际流体的流量值。要根据流体
- 叶轮流量计：大概叫这个名字。内置测速叶轮，流体通过时转动叶轮，通过测试叶轮的转速得到流速，一般只用于液体流动的测量。精度较转子流量计高，且可实时得到数字数据。
- 风速仪：采用扇叶转速测试风速，直接输出风速值。测试部分有限，且中心与边界对空气有些阻挡，故不能精确测得风速。



(a) 转子流量计　(b) 叶轮流量计　(c) 风速仪

图 1.20: 流量传感器

1.3.11 湿度

- 数字模块(DHT11等)：目前知道的易用的湿度测试传感器只有数字芯片，单片机数字输出，精度一般吧。湿度太大时要避免对电路的影响。

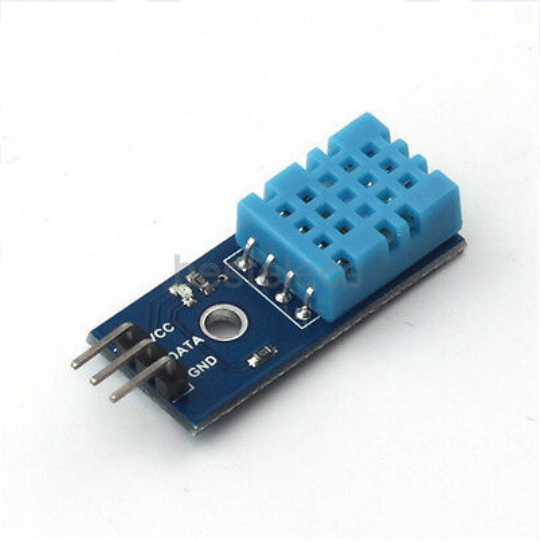
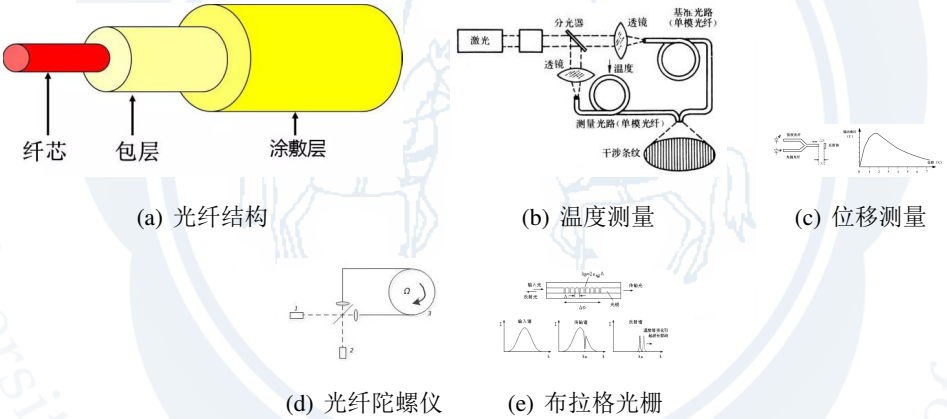


图 1.21: 湿度传感器

1.3.12 光纤

采用光纤本身性质或构造所需测量量对应的传感结构进行测量，因光纤体积小、光波波长小使光纤制备的传感器可用于多种精密/微区测量，同时也方便组建传感器网络。采用光信号的光强、频率、偏振、相位(干涉后测强度)可用于测量，但检测光波频率(或者说主峰频率)改变(通常由温度、形变等产生的布拉格光栅改变)所需的仪器(可认为是"光谱仪"?)比较贵重，不见得能借到。

- 光强传感：一种为单纯导光然后测量光信号性质，另一种为利用光强变化作为测量方法。前者可用于微区(近光纤纤芯端面大小)的测量，如通过传导荧光物质发光得到微区温度等性质，或用于产生小范围的光场(光纤光镊)；后者可通过改变两根光纤的对齐距离、角度或距离反射端面的距离用来测量微小位移或振动，具体结构又可分为Y型探头和双光纤对射等形式。
- 相位传感：通过应力、温度、光纤运动(如Sagnac效应,可用于测量转动)等导致测试部分光通过的光程变化产生相位的变化，通常需要使用多匝环形光纤累加变化。相位的检测可用探测光纤与另一束同源光纤搭建干涉仪(Michelson、Mach-Zehnder干涉仪)得到光强变化。



(a) 光纤结构　(b) 温度测量　(c) 位移测量

(d) 光纤陀螺仪　(e) 布拉格光栅

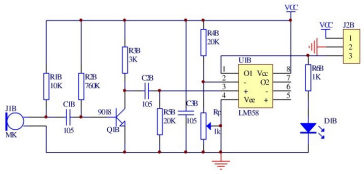
图 1.22: 光纤传感器

1.3.13 声音

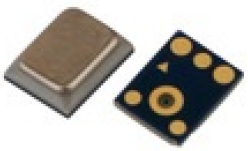
- 模拟咪头：以可变电容为原理的电流型器件，需要外加偏置与采样电路。输出强度随声场变化的电信号。为得到较完整的声音信号，需要使用高速ADC(采样率>40kHz)或直接用示波器采样。使用时要注意咪头的响应曲线，即频幅响应与相位响应，一般的探测器只用于100Hz到10kHz的采样，超过这个频段的信号响应较弱，不能认为该频段的信号和其他频段信号仍与声强为正比关系。高频测试需要滤波降噪。
- 硅咪：采用1MHz以上的高频数字信号承载声波信号，信号只为0或1，经低通滤波后得到实际的声波信号。不需要高速ADC，一些单片机的端口可以轻松实现MHz量级的数字读取，可扩展成阵列采集多点声波信号。
- 泡沫(离子阱?)：利用一些悬浮的低阻力颗粒探测声波分布，声场中颗粒受力运动到平衡位置，故其可用于定性反映定态声场分布。



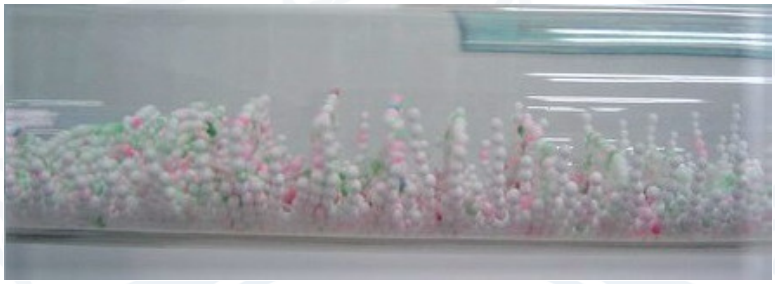
(a) 模拟咪头



(b) 咪头驱动电路



(c) 数字硅咪



(d) 泡沫场

图 1.23: 声音传感器

1.3.14 颜色

(颜色的定义与表征是一个很复杂的概念，不同频谱分布颜色可能相同，且人眼对颜色的感知也与电磁辐射的频谱分布决定的颜色不同，需要精确表示时建议预先查找相关资料)

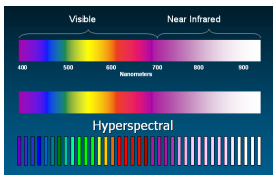
- 色卡：采用某个颜色标准制定的不同颜色的样图，通过比对待测试颜色来确定最相近的颜色，但通过视觉确定颜色有一定误差，且不同颜色的视觉对比精度不同，且绿色段灵敏度最差，光照条件和视角大小也会影响颜色判断，所以色卡比对并不是一个严格颜色测试方法。
- 数字模块：可以认为是一个三色CCD单元，通过采集RGB三分量的值来表示探测到的颜色，数字模块常附有用于照明的白色LED(LED的频谱会影响显色性，所以……这玩意也不准)。单片机控制，输出三色数值。
- 光谱：最严格的颜色表征方式。可得到反射光、透射光或荧光的光谱频率分布，再通过光谱功率分布与视见函数计算出人眼观测的到颜色表示。不同频谱分布可产生相同的颜色分布，不同照明条件也会改变人眼对颜色的辨识。使用光谱仪时要选择合适的波段(闪耀光栅的闪耀波长)和分辨率。



(a) 色卡



(b) TSC3200



(c) 光谱

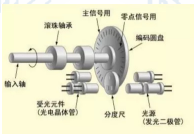
图 1.24: 颜色传感器

1.3.15 转速

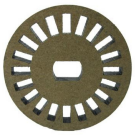
- 六轴传感器：见上。
- 码盘：一个有许多径向镂空的挡光板，配合光电门测试速度。遮光与镂空位置很多，可以提高测试精度，并且光电门并不是通过计算挡光时间得到转速，而是计算码盘挡光产生的脉冲信号周期来表示转速。可组成编码器。
- 霍尔编码器：可用于取代码盘-光电门结构的转速测试传感器，码盘被替代为有多个磁极的环形圆盘，用于产生脉冲信号的光电对管被替代为霍尔元件，通过霍尔元件产生的电脉冲信号得到转速。一些芯片可将信号频率转换为电压值，所以可以直接输出转速的数字值。



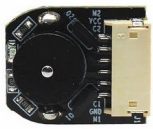
(a) 六轴传感器



(b) 编码器



(c) 码盘



(d) 霍尔编码器

图 1.25: 转速传感器

- 速度：通过速度传感器测试转盘某位置的速度，然后通过半径得到其转速值。

1.3.16 CCD/CMOS

视频和图片可能是实验中重要的数据采集方法，同时去掉镜头的拍摄设备可直接记录元件平面上的光强分布，所以有关主要元件——CCD和COMS，一些特性需要简单了解以合理使用拍摄设备。(以下CCD与CMOS可能会混称，并且所说的光强多表示为曝光时间内的光照总能量)

- 原理：COMS与CCD为一种单元器件的阵列组合，图示为利用半导体的光激发将光强信号转换为电荷，然后利用电容与ADC将每个单元采集到的电荷量转换为电压信号，从而用于成像。CCD与COMS的转换位置不同，从而也会有不同的优缺点。手机摄像头多为CMOS器件。

- 响应：分为光谱响应与光强响应，摄像单元接收到的光子数量与其产生的电压值呈现非线性关系，阈值光强为最小的可探测光强(一般大于专业光电二极管阈值光强)，中间为线性区域，CCD输出的电压值与光强成正比，当光强进一步增强时，由于半导体激发饱和与ADC转换电压上限打限制，CCD响应进入饱和区，进一步增加光强并不会使输出增加，甚至可能会损坏CCD单元，一些高端CCD拥有更高位的ADC以提供更精确的光强成像，或者已经主动屏蔽了前后的非线性响应部分;光谱响应为CCD单元对与相同强度、不同波长的光有不同的电压输出，因而也导致了用于测量彩色图像时，其像素的不同颜色分量值并不能简单地认为正比与该颜色光强。一种彩色CCD的实现方法则是利用在不同波段响应强的三色CCD组成二维阵列，然后通过插值算法得到完整的彩色图片。较专业的CCD提供了响应调节的接口，可以调节响应曲线线性部分的截距与斜率，提高斜率可增强对比/灵敏度，但减小量程；增加截距可用于平滑暗背景，提高画面平均亮度，同样会减小量程；两者配合调节达到最合适的范围。需要注意在用CCD测量光强时，要避免使用开启了自动曝光调节的CCD，因为其响应曲线会随环境光强变化，不能得到可直接相比较的光强图片。其典型响应如下。
- 热效应与噪声：由于半导体除了光激发外还存在本征激发，即由于热能使半导体内出现电子-空穴对(可认为是前面说的电荷)，从而在没有光照射且CCD温度较高时，也会得到非全暗(像素值全为0)的图像，并且其数值随温度升高而变大，同时这种非0的响应也会叠加到拍摄的图片上，但热噪声的特点可认为噪声满足随机高斯分布。除了热噪声外，拍摄图片的噪声还可来自光路中间杂散光、ADC转换噪声和信号传输过程中的电噪声。
- 时序与帧率：

CCD相关时间：

快门时间：快门包括机械快门(光阑)与电子快门，采集时先开启机械快门，然后开启CCD电压快门，其时间包括快门开启的时间长度与快门开启到开始曝光采集之间的时间间隔。

曝光时间：真正采集图像的时间。

图像收集时间：曝光结束后在CCD阵列一侧通过设置偏置电压，将各单元的采集到的电荷移动到阵列一边，通过采集电路和ADC采集到电荷值即光强值。电荷移动所需时间与偏置电压大小正相关，移动的总时间主要与垂直ADC阵列方向CCD单元数有关，平行方向数量影响不大(但要将该方向数据沿总线传输，所以也会有些影响)。ADC将电压转换成数字值也需要时间，一般ADC有效位数越高，所需时间越长。该部分电荷移动时间较长。

数据存储与传输时间：采集到的电压值会先预存在高速缓存芯片，待缓存空间不足或收到传输指令后，将数据传输到其他设备上，与前所述波特率类似，数据传输也需要时间，但提高传输速度会增加传输过程中线路误码率。

CCD刷新：每次采集完一张图像后，虽然偏置电压已经将CCD阵列单元的电荷移动到边缘，但当图像中存在曝光很强的区域或者为确保不对下次采集产生影

响，CCD会对阵列进行刷新，再次通过强电压清理电荷，该过程对应CCD的刷新时间。

CCD一个完整采集过程为：CCD刷新，清楚上次拍摄的图片⟹(机械)快门开启⟹曝光⟹结束曝光⟹电荷平移并通过ADC采集，将像素值写入缓存⟹数据传输，清除缓存并准备下一次采集。

帧率(fps)：每秒拍摄的图片数量，与摄像相关，帧率越高，每张图曝光时间也就越短，从而光通量减少，画面变暗。限制帧率或者说速度的因素包括采集与数据传输两方面，采集方面涉及电荷的平移(CCD)与ADC读取速度，电荷平移可通过提高CCD移动电压加速，ADC也同样可以牺牲有效位数来提高速度，但只有很高端的CCD可以进行设值置；提高数据传输速度可响应提高帧率，但误码率会提高，内置存储空间的摄像仪器可先预存在CCD端以提高帧率。长时间曝光可减小图片噪声，或用于拍摄延时摄影。

- 高速摄像：非常有用的实验技术，可揭示许多关键性的物理过程，或作为一种高采样率的测量方法(见后需要视频测量的部分)。手机慢动作通常为120fps或240fps，最高可到960fps，但后者往往需要动态触发，并且拍摄时长短；此外，手机拍摄慢动作时，有些会在前后加入常速拍摄的部分，使用时要注意这几帧对应的时间间隔非慢动作对应间隔，可考虑去掉。使用专业设备拍摄时，因为帧率越高每帧的平均光强越弱，所以要调节好光阑与外补光，同时避免环境温度过热，也不要损伤数据传输线。高速摄像往往意味着大数据量，采用程序处理时(手动处理请忽略...)，为减少调参数时的等待时间，可先将视频进行裁剪，保留需要处理的主要区域作为副本，之后就不需要处理大量冗余信息，计算加速可参考图像处理部分。
- 拖尾效应：当CCD中间有强曝光区域或电荷移动速度太快时，会发生CCD单元内电荷向周围泄漏的情况，表现在视频上为出现物体的拖影。
- 视/像差：CCD配合镜头使用时，作为成像元件，镜头带来的像差与平行光轴的远近变化会影响测量结果的精确度(可以通过对平行与垂直的网格纸拍摄来判断像差影响)，现在镜头和拍摄条件使像差的影响在一般使用条件下可忽略，除非对与镜头不匹配的光谱频段进行成像。因为拍摄始终为一平面，所以远近变化会造成对实际移动距离的错误计算，拍摄时应尽量避免，或用多个相机拍摄后联立得到更精确结果(较复杂，不过有现成的双目视觉算法)，用平行光照射，并拍摄投影也可是一种得到二维投影运动的方法(见图像处理部分)。
- 其他：

  光阑(光圈)：对入射光束尺寸进行限制，具体参数自己查资料。大光圈通光量大，小光圈可用于确定光线射入的位置和角度(调节光阑可方便地调节光路同心性)。

  景深：拍摄面前后一定范围(景深)内均能在相机上得到清晰的像(因为CCD单元为有限大小)，小景深可用于滤除背景等不关心的部分，同时提高分辨能力，大景深用于更全面的整体成像。景深、放大率与镜头参数(比如长短焦)有关，在不能

同时满足景深与放大率条件时，需要更换镜头或改变光阑。

滤光片：光谱响应较广的CCD用来拍摄特定波段的图像时，需要添加滤波片。在成像光路中杂散光较多时，也可用小孔滤光片去除。

iCCD(增强CCD)：用于拍摄弱光的CCD，可增强入射光后进行记录(可理解为微型光电倍增管阵列？)。这类设备包含两个成像部分，直接接收光的一部分可用入射光来激发一层荧光物质阵列，使每个单元的荧光强度正比于该点的入射光强度，然后用普通CCD对荧光物质进行成像，得到增强的图像。这类CCD除了前面的一些参数外，还可以设置前端的增益强度与增益时间，但要注意荧光物质本身的寿命会限制最小的时间尺度。

……

1.3.17 万用表

电气设备的重要通用仪器，介绍不熟悉的用法和一些常见万用表特点。



图 1.26: 万用表

- 基本接口：交直流电压、电流、电阻、通断、三极管放大系数、二极管阈值电压[,温度、频率、电感、电容(后两个为LC表)]。
- 交流测量：万用表的交流档一般默认为50Hz的信号测试，显示值为信号有效值，所以用万用表测试其他频率的信号或非正弦信号时，并不能简单的认为显示值为对信号的正确表示。
- 大电阻测量：100$k\Omega$以上的电阻测量时，需要避免用手直接接触测量端点，否则人体的$M\Omega$级电阻会变并联到大电阻两端，影响阻值测量，且如果大电阻还连有电容，则会因为放电缓慢而影响测试结果。(理论上测量时都不能接触触点，小信号的话会因为人体感应出的周围环境50Hz的信号产生影响，大电压会对人产生危险)
- 通断测量：很有用但的测试档位，当表笔间短路时(电阻小于一定值)，万用表的蜂鸣器会报警。用于电路通断测试(在了解这个档位前多会用电阻档测试……)

- 三极管/二极管：二极管通过表笔测量，三极管通过万用表8个插槽测量三极管放大系数，需要区分PNP与NPN类型以及管脚顺序。
- 温度：一些高端万用表配备了温度测试档位，即用热电偶连接电压档，通过测量经内部零点补偿后的电压得到温度值。
- 通信：同样是高端万用表的附带功能，有串口或红外端口用于通讯。在进行远程测试或危险环境的测试时，不能直接读取万用表示数，这时可通过远程通讯得到测试信号，同时也便于数据的记录。

1.3.18 光电对管

- 原理：光电对管即光电门的主要部分，由红外LED与对应波段的光电二极管组成，光电二极管常常加入滤除可见波段的干扰。配合外电路，使光电二极管收到红外光时输出一种电平，无照射时输出另一种电平，可用于测试挡光时间或用来探测运动作为触发信号。
- 驱动电路：光电二极管可认为是以光照产生的光生载流子作为三极管基极输入的三极管，有光照时可处于集电极-发射极电阻(R_{CE})较小的状态，无光照则较大。故典型的外电路如下图所示。同时也可加入电容或工作在非线性区的运算放大器来优化输出。

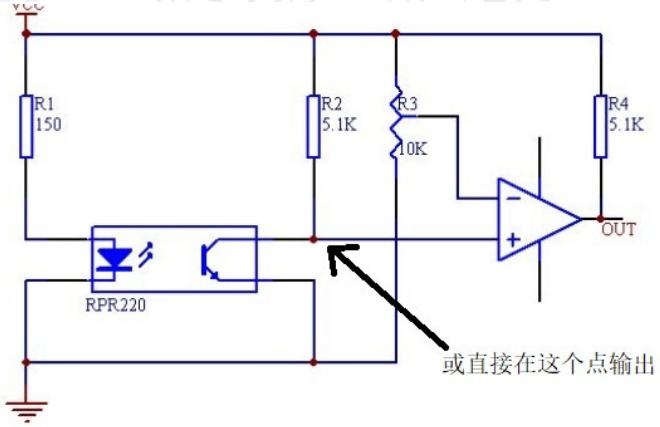


图 1.27: 光电对管驱动电路

1.4 电路设计与制作

本节介绍关于电路的常见器件和其焊接与制作方法，虽然有成品传感器模块可以使用，并能简单地连接到控制板上，但对于一些需要外围电路驱动或对电路板形状有要求时，则需要自己设计并焊接电路板。熟练操作需要多加联系。

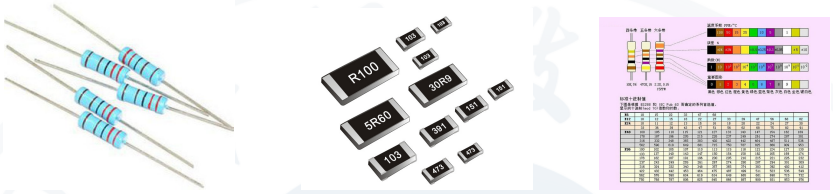
1.4.1 元件与工具

1.4.1.1 元件

基本电子元件及其辨识、使用方法。种类较复杂的元件元件均附有详细介绍的链

接，所以下面只介绍简单使用的注意事项，并放置常见型号的图片。元件值标识方法如：125或3*R*6，其代表12×10^5或3.6Ω。电阻单位为欧姆(Ω)，电容单位为皮法(*pF*，如$206,2\times10^6pF$)。

- 电阻：较大电流电路需要预先计算电阻功率，当不满足电阻参数限制时可考虑多各电阻并联作为临时解决方案。插脚电阻可用色环判断阻值(虽然更推荐万用表)。上下拉电阻，限流电阻，分压偏置电路。



(a) 金属膜电阻　(b) 贴片电阻　(c) 电阻色环

图 1.28: 电阻

- 电位器：根据图示或万用表测量确定中间引脚和两侧引脚，一般关于一个面对称的两个引脚为固定电阻的引脚，另一个为滑动引脚。用于调节放大倍率，PMW占空比。调谐电路。



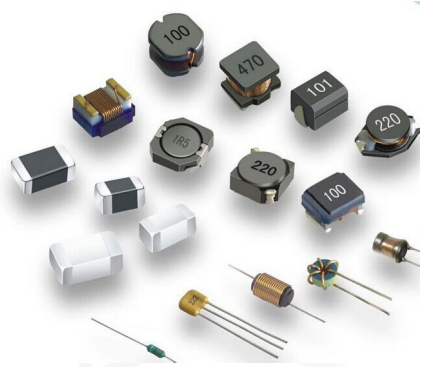
(a) 电位器　(b) 可调电容器

图 1.29: 可调器件

- 电容：储能器件、高通器件，用于滤波，谐振。需要区分极性电容极性(铝电解电容器会标出负极)，可增强驱动源电流负载能力，需要注意电容容值和耐压。可用LC表测量。
- 电感：储能器件、低通器件，用于滤波、谐振。较大的电感需要内置磁芯。可以提高开关时电压峰值，大电感比较危险。



(a) 电容器



(b) 电感

图 1.30: 电容与电感

- 变压器：电压转换，需要选择合适的频率和输入输出电压。预先查看器件接口。

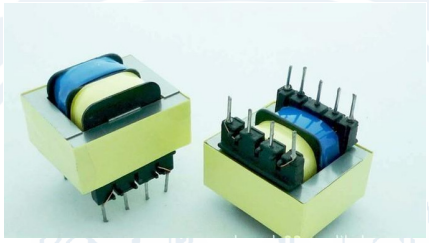
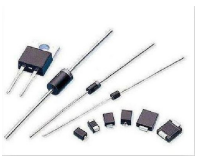
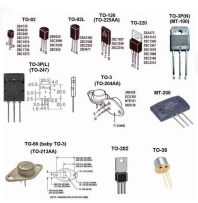


图 1.31: 小型变压器

- 二极管：LED，探测、整流、反向泄流、限幅、导引电流经过不同电路，一般会标记正极
- 三极管：电流驱动器件。“并联的三极管”达林顿管可用于提高驱动功率。高频三极管、需要区分引脚和PNP/NPN型号，可用万用表测量放大倍率(β)，可用作电子开关，工作在线性放大状态需要偏置电路，同时可在基极输入电路/输出电路中加入电容以隔绝直流信号，详细设计参见模拟电路教材。大功率工作时需要散热。
- MOS(金属-氧化物-半导体结构)管：电压驱动器件，通过电压控制元件中导电(低电阻部分)沟道的开关与大小，相比三极管更省电，输入阻抗高，受温度影响小(多子导电)。需要区分P/N沟道，耗尽/增强型。可用作电子开关、信号控制。
- 可控硅/晶闸管：大功率可控电子单/双向开关，可认为是导向可控的二极管。



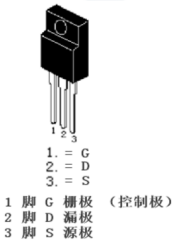
(a) 二极管



(b) 插脚三极管



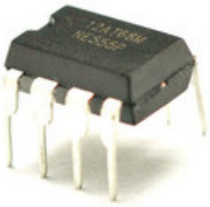
(c) 贴片三极管



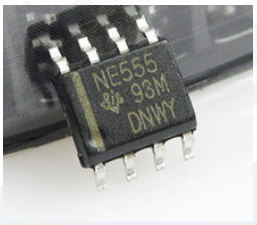
(d) 场效应管(MOS管)

图 1.32: 半导体器件

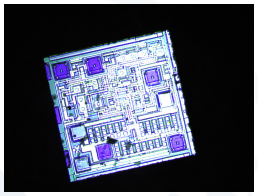
- 集成电路(IC)：即通常所指的芯片。采用硅酸盐和其他材料混合物形成黑色封装，内部为硅基芯片，采用金/银/铜丝连接芯片上的焊点到铁/铜引脚上。产热大的芯片还会附有散热底片。芯片上会以缺口或圆点标识出1号引脚，然后其他引脚在芯片正面向上时逆时针排列。一些精密传感/运放芯片焊接时注意防止静电，也要避免焊接时间太长。电路布线前需要查找对应芯片的引脚图、供电电压、接口驱动方式等。



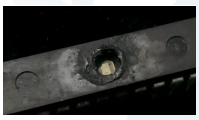
(a) DIP封装555芯片



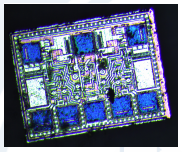
(b) SOP封装555芯片



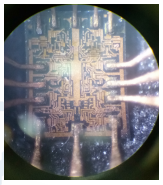
(c) 555芯片



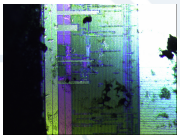
(d) 芯片解封



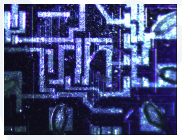
(e) 358芯片



(f) 施密特触发器芯片



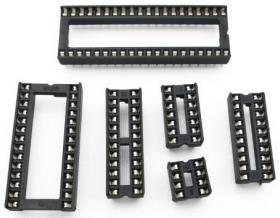
(g) ATMEGA328P (存储)



(h) 线路

图 1.33: 集成电路

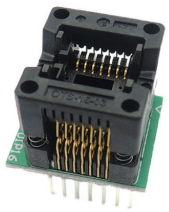
- IC座：用于芯片测试或方便地更换，有DIP封装和部分贴片封装的测试座。强烈建议自己焊接DIP封装的芯片时使用IC座，既方便之后的更换，也能防止焊接时损坏芯片。



(a) DIP封装IC座



(b) DIP封装IC座

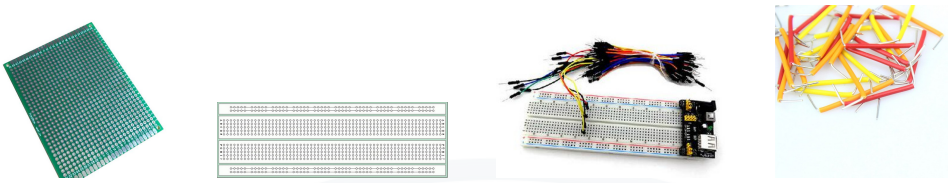


(c) 贴片封装IC座

图 1.34: IC座

- 万用板：2.54mm间隔孔洞的电路板，材质为玻纤或电木，分为镀锡，单双面，双面板上下焊点连通，但不易走锡。
- 面包板：具有特定内部链接方式的易插线塑料板，同为2.54mm间隔，可方便的用杜邦线、跳线、面包线、插脚器件连接。

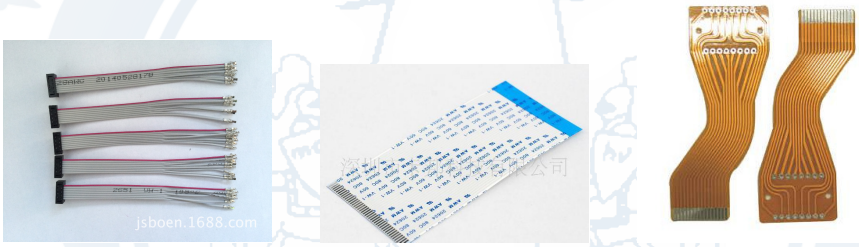
- 跳线：其实并不是什么特别的器件，用于连接两个触点的一段线径合适的导线，连接时要处理好接触点减少接触电阻。



(a) 万用板　(b) 面包板结构　(c) 面包板及配件　(d) 跳线

图 1.35: 电路板

- 杜邦线：连接电子模块所用最多的导线，连接方便，分为公母头，塑料壳+金属接口结构，可连接常见的2.54接口。插拔次数太多后会使连接容易松脱，接触变差，模拟信号杀手。
- 排线：即一排线……便于同时传输多个信号。可单独使用，也有对应的常用接头。细、薄排线不适用于传输较大电流。



(a) 灰排线　(b) 软(FPC)排线　(c) FPC排线

图 1.36: 排线

- 接线座/端子：接线方式通常为金属片卡死、直接焊接或螺丝压住。根据通过的信号特点、电流大小、尺寸限制需要选用不同的接头。

  模块和单片机中最常见的是2.54mm间距的排针和排母，有长脚、弯脚、直插贴片形式，可用于杜邦线的连接，跳线帽可代替杜邦线方便的连接相邻的两个排针。但杜邦线连接不太牢固，可换用XH端子或牛角座连接排线。



(a) 排针、外壳与端子　(b) 排母　(c) 杜邦线　(d) XH2.54端子　(e) 牛角座

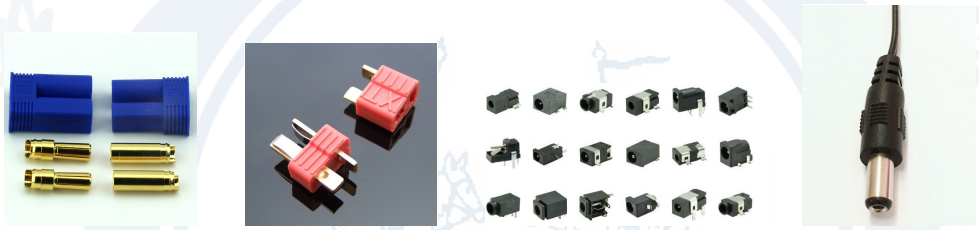
图 1.37: 常用端子与接线座

有特定顺序的接口(网线的水晶头、USB)需要查找对应接线顺序。



图 1.38: USB接口

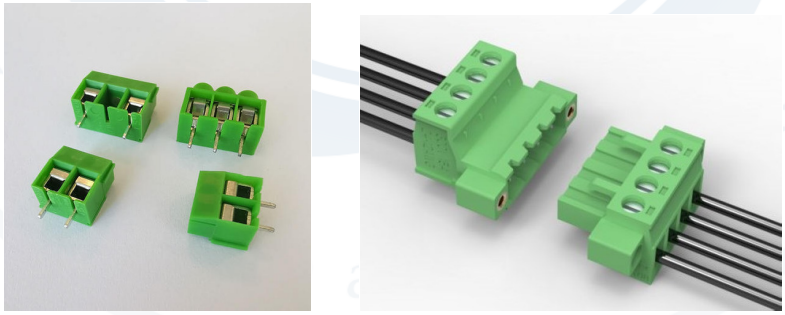
大电流可选用接触面积大的DC电源座或者更牢固的T插和香蕉头接头。



(a) 香蕉头接头　(b) T插　(c) DC电源插座　(d) DC电源插头

图 1.39: 大电流端子

不需要特殊接线工具的接头可以直接用螺丝固定接线，使用较方便，对这种端子的改进是改成快插型端子，即螺丝固定+香蕉头(或者DC电源插头)。



(a) (?不知道叫啥)　(b) 快插端子

图 1.40: 大电流端子

为防止小信号传输线中引入噪声，可采用SMA或BNC连接带有屏蔽层的同轴电缆线，外层接地，内芯为信号线，除了屏蔽外，两种接头均能提供牢固的固定方式，SMA接线会需要对应工具(虽然没有也行)。



(a) SMA插头



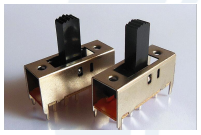
(b) SMA座



(c) BNC接头

图 1.41: 信号线接头

- 开关：主要分为可自锁(松开后状态不变)和不自锁的开关，一些自锁开关为双向开关。选择开关要考虑其耐压与限流，高压/大电流电路中介入短柄的开关比较危险。开关的导通电阻并不一定很小(或者相对很小，可到$10^1\Omega$)，对电路电阻要求严格时需要预先测量。一些带有传感器的开关可起到限制电路电流、环境温度等作用。



(a) 拨动开关



(b) 微动开关



(c) 拨码开关



(d) 自锁按钮开关



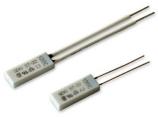
(e) 按键开关



(f) 船型开关



(g) 空气开关



(h) 温度开关

图 1.42: 开关

- 继电器：小电压控制大电压，最大电流较大。选型时要注意驱动电压(虽然不需要很严格)。触发速度不是太快，且可存在火花，不适合10Hz以上的通断变化。



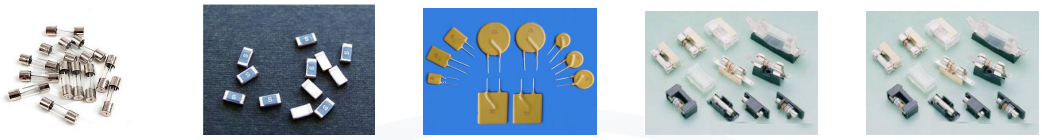
(a) 继电器



(b) 继电器模块

图 1.43: 继电器

- 保险丝：限制电路电流，防过载保护。贴片型可直接焊接(所以都用可以自恢复的贴片保险丝)，较大型的保险丝需要对应的安装底座。漏电断路器(类似的旧器件为漏电保护器)可用防止触电的危险。



(a) 玻璃管保险丝　(b) 贴片保险丝　(c) 自恢复保险丝　(d) 保险丝座　(e) 漏电断路器

图 1.44: 保险丝

- 电线：使用时主要电线的允许通过的最大电流。

  单/多股线：根据内含铜(铝)芯数量区分为单/多股电线。

  硬/软线：软线易弯折，硬线更多的被我用来抽铜丝……

  漆包线：表面有一层透明绝缘漆，不太耐高温，焊接或接线时可先烧掉部分漆。实验室使用较多。

  硅胶线：硅胶指表面的胶皮材质，硅胶耐温更高，材质软，不易燃。更重要的是硅胶线常常可以通过很大的电流，电阻小(如航模用的硅胶线)。

  屏蔽线：用于弱信号、高速信号的传输，有一层接地的金属网屏蔽层来屏蔽噪声。常需要使用SMA、BNC等专用接头，直接焊接内芯和屏蔽层也可以用。

  双绞线(花线)：两根缠绕在一起的线，便于传输正负电源或差分信号，缠绕的方式也可起到一定的降噪效果。

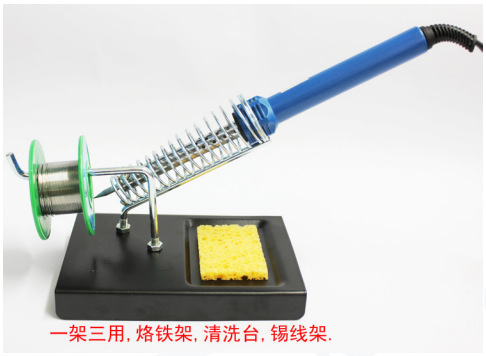


(a) 单股硬铜线　(b) 漆包线　(c) 硅胶线　(d) 屏蔽线　(e) 双绞线(多股线)

图 1.45: 电线

1.4.1.2 工具

- 烙铁：配合恒温焊台和清洗海绵(或铜丝球)使用，根据加热方式分为内热、外热，可控温的烙铁(如一些T12焊台)在焊接插脚元件时温度在200^oC ~ 260^oC即可，有散热较快或者不可长时间加热的元件时可适当提高温度。
- 烙铁头：表面镀有在高温下也可浸润焊锡的涂层，有针头、圆头、马蹄头和刀头，直或弯头等形状，一些贴片元件有特定的形状的烙铁头以便于焊接或拆下。为保护烙铁头的涂层，不要在高温时接触塑料或者木制品等会粘附在烙铁上的物品，更不要用来当作热加工的工具。



(a) 烙铁(海绵+支架)



(b) 烙铁头

图 1.46: 部分焊接工具

- 热风枪：见后热源部分。
- 吸锡器(铜带)：用于去除多余的锡，避免短路和错焊。吸锡器压入尾部阀后用开关控制吸入。铜带利用铜和锡的浸润吸入多余焊锡，可以处理小范围内的焊锡，但似乎不太有用。
- 锡膏：溶解了锡颗粒的膏，遇热后膏体熔化，锡熔化后铺满原来膏体部分。用于焊接多引脚或引脚被遮挡的元件，需要配合热风枪。
- 松香(助焊膏):可以降低焊锡熔点(也可提高焊锡表面张力？使焊锡更易聚集到焊点位置)，一般焊锡中心有灌有助焊膏。
- 热缩管：加热即会收缩的塑胶管，可有一定的防水效果，使用时需要预先穿入导线中，在连接好接点后套入热缩管，然后适当加热(打火机的火焰加热约5s左右，不牢等一会再稍加热)。因为收缩能力有限，尽可能选择半径相近的热缩管。
- 电子钳：用于剪去多余引脚或简单软质材料的修剪，见后工具部分。
- 镊子：直、弯、尖、圆头，防静电的镊子。用于夹贴片元件、飞线，不要用来搅胶水！爱护镊子，人人有责。



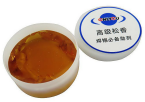
(a) 吸锡器



(b) 吸锡带



(c) 锡膏



(d) 松香



(e) 热缩管

图 1.47: 部分焊接工具

1.4.2 设计打样

- EDA 软件：Altium Design 等专业软件，或制板公司提供的软件，如立创EDA。
- 原理图：类似伪算法，器件的逻辑连接图。元件为原理图格式。
- PCB(印刷电路板)文件：电路的实际连接方式，即器件、导线在电路板上的排布方式。元件为封装格式。
- 术语：

封装：器件的装配方式，体现了连接电路时的接线点布局。

布线：导线排布方式。

焊盘：保留裸露的可焊接位置。

过孔：多层板之间电气连接点。

覆铜厚度：铜线厚度。

丝印：电路板上用于标记信息的文字或边框。

- 简单电路设计的建议：

  DIP封装焊盘尽量大，便于手工制作后打孔与焊接。

  需要稳定工作的芯片的电源输入处加双电容滤波。

  模拟信号尽量用较粗的线传输。

  大电流/模拟信号布线加粗。

  紧凑布局。

流程(热转印方式)：

设计原理图和PCB->用热转印纸光面打印PCB中的电路连接层(无丝印)，可能需要在打印时选择镜像。⟹热转印纸打印面覆盖覆铜板(可用酒精等预先擦净)，用热转印机/覆膜机加热转印⟹揭下热转印纸，检查转印电路是否有断点，可用油性笔连接⟹将印有电路的覆铜板在腐蚀液中腐蚀，可适当加热(大概<80°C)⟹腐蚀完成后取出清水冲洗⟹打孔，焊盘砂纸打磨，去掉表面油墨(丙酮擦洗也可以)⟹焊接⟹镀锡、涂油墨或松香水等后处理。

(对于感光膜方法，将腐蚀步骤前换成菲林纸打印电路⟹紧贴于贴好感光蓝膜或涂有感光油墨的覆铜板上⟹采用紫外灯曝光⟹冲洗表面蓝膜。感光膜的方法可以用于镀阻焊油墨和加丝印)



(a) 热转印机(塑封机)转印　(b) 蚀刻　(c) 蚀刻结果　(d) 打磨裁剪

图 1.48: 热转印PCB制作步骤

1.4.3 焊接方法

- 插脚元件(或DIP封装)：烙铁头和焊锡同时接触引脚，或在焊盘上用烙铁熔化焊锡，使焊锡自然与引脚浸润。要保证焊锡和引脚的接触，尤其注意表面涂油的引脚。最终焊点应尽量圆润，布满焊盘。
- 少触点贴片元件：先在一个焊点上焊上小块锡，然后用镊子夹住贴片元件，夹子固定电路板，在另一只手用烙铁熔化小块焊锡的同时，将镊子所夹的元件在保持其他焊点相对位置的前提下，推或贴到熔化的焊锡上。然后松开烙铁，等待锡凝

固后，焊接其他焊点，若第一个焊点焊接不牢，可在焊好其他的一个焊点用于固定的后，重新补焊。

- 多触点贴片(引脚露出的封装)：对于引脚很多的芯片，同样可以采用上述方法，但由于引脚密集以及数量多，焊接时间长，且错焊率高。 i可以采用预先在所有焊盘上镀锡(采用锡膏+热风枪或直接熔化焊锡的方法)，然后将芯片按照引脚对应顺序摆放在焊盘上，用镊子压住芯片，用热风枪熔化周围焊锡，等冷却后测试接触情况。 ii采用同少触点贴片焊接的方式，在一个焊接好后，在其他引脚上镀一排较少的锡或锡膏，这里可以不需要考虑短路问题，然后将松香在锡表面熔化，使焊锡分开吸附到引脚上，若出现短路情况，可用吸锡器去掉多余焊锡。
- 芯片：

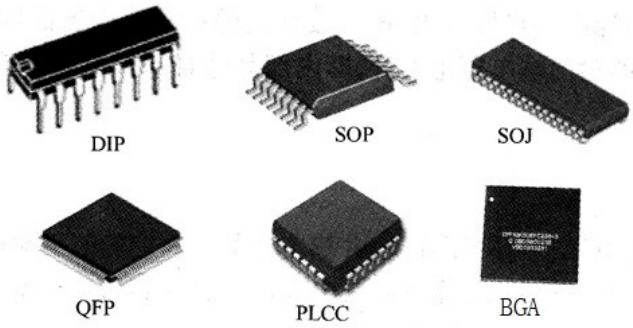


图 1.49: 芯片封装

DIP:为便于更换，建议焊接一个IC座，将芯片插在IC座上使用。插在IC座上的芯片可用细硬金属条(如镊子)从凹槽插入后撬出。焊接与插拔芯片时，注意缺口方向(指明1号引脚)。

类SOP:同多焊点的贴片元件，同样注意1号引脚指示。

类BGA：此类芯片为焊点在芯片下方，而没有接出，所以不能直接用焊锡进行焊接。可采用在焊盘上预先涂一层较薄锡膏，用镊子夹住芯片对准下方焊盘，然后用热风枪从周围吹化内部锡膏，再将芯片压在焊盘上即完成焊接，但无法直接测试，且若芯片为金属外壳封装，还需要注意焊锡粘到外壳时外壳引起的短路。

- 强导热元件(散热片、粗导线等)：导热较强的部分多为需要通过大电流的导线或用于器件散热的散热片(接地处理)，也有需要将元件焊接到较大金属块上的情况，由于烙铁功率一般不大，故在焊接导热较强的器件时，常出现焊接不牢，粘连少或虚焊的情况，且使用较高温度焊接时也易损坏其他器件。焊接这类器件可以采用热风枪或喷枪等预热，或直接用喷枪进行焊接。使用烙铁焊接时，可以先不用烙铁接触导热高的器件，使器件粘一层锡，然后用烙铁开强热，大面积接触，熔化锡后等待自然凝固，大块锡凝固慢，温度较高，需要固定一段时间，注意防止烫伤。
- 排针：排针由于塑料部分小，导热快，且表面无镀层的排针不易沾锡，焊接易烫伤、虚焊或融化塑料。尽量不要焊接单独一个排针，并尽量购买表面有镀层(声称镀金)的排针。焊接时可以先在一个排针的焊盘上焊上一部分锡，然后手持其他排

针，将排针对准焊盘，向内压入并同时加热之前焊上的焊锡，待锡熔化插入排针后，调整垂直并简单焊接固定，之后焊接其他排针，并对第一个补焊。

- 走锡：在万用板上直接用焊锡作为线路连接不同焊点，单面板更易走锡，但也需要需要多练习才能焊出较好的线路。连接两个焊点时容易因为焊锡的表面张力会因为聚集到一个焊点上导致无法连接，可采用较大的烙铁在不接触两个焊点但相隔很近的情况下，在焊点上熔化一些焊锡使其滴落到两个焊点间并与两个已有焊锡的焊点接触。之后可略微补焊以避免虚焊的情况。
- 飞线：另一种线路连接方式，直接用短导线连接两个焊点，可能会使电路看起来较乱，但便于修改，也可以跳过一些导线以避免走锡的连线限制。
- 接线：两个导线相连接时要考虑连接的机械强度和接触电阻，电阻太大会产生局部热点导致导线胶皮损坏。可以先剥出一部分铜线然后缠绕在一起(或者系一个绳结？)，然后用焊锡适当焊接，最后用绝缘胶带或者热缩管包裹使连接点绝缘并进一步加强连接强度(热缩管的使用见下，需要预先套入)。
- 静电防护：无意产生的静电会损坏芯片等耐压不高的器件，可用防静电的镊子、硅胶板、防静电包装等避免损坏。
- 热损：所有元件如果焊接时间过长，温度升高，就可能发生热损坏或改变原有性能，尤其是芯片类器件。而接插件也会在温度很高时塑料发生融化，接触变松动。更严重的情况可以使焊盘脱落或烧坏基底电木或玻纤板。

第 2 章 Machine and Instrument Building

单一传感器可以完成测量当然是极好的，但实际实验中常常为了使用某些器件而需要搭建合适的机械结构，或者对运动进行控制，更进一步，完整实验仪器的搭建可以为特定问题提供专门的测量方式或变量控制，这便是一个机械结构与传感系统的集成。故本章介绍一些实验过程所用到的机械性能常识和仪器搭建方法，主要为一些参量的控制方式及其特点。

2.1 综述

2.1.1 机械结构参数

- 振动与形变：存在共振的特征频率，一般整体刚度越高，频率越高、窄，衰减越慢(Q值越高)。单频振源经过一定结构可产生多频振动。
  切向形变与纵向形变，对应切边模量和杨氏模量。不要超弹性范围，较大形变非线性关系。波速~ $\sqrt{\frac{G(Y)}{\rho}}$(量级估计）。对振动敏感的部分可加减震器或振动的滤波器。
- 硬度，刚度，脆性不是一个概念，一般合金较硬，紫铜、铝较软，玻璃、金刚石硬度高但脆。脆性材料和硬度低的软材料在较强机械接触部分易产生形变。用于考虑不同材料接触点的形变，尤其在针尖接触时。
- 精度：设计>部件制作>安装，需要留有余量。
  需要高精度位置固定的部分可考虑可调节的结构(螺纹结构、丝杆)。为提高同心结构的对准精度建议在安装时用标杆对准，或直接制作同心器件(如3D打印)。
- 响应时间(并不单指材料)：变化发生到检测到变化的时间，限制测量速率与信号的最高频率。刚度大的材料一般响应时间小。可用于估算波动造成的误差对系统的影响。

2.1.2 仪器控制

- 开环控制：
  外界调控系统的输入变化使输出按规律变化。输出不返回到输入。一般稳定性差，弛豫时间长，但灵活，调节需经验。
- 闭环控制：
  利用输出信号作为反馈进行系统调节，响应速度取决系统本身，也可引入外界主动控制同时进行调节。稳定，但反馈系数需要调参。
- PID：
  经典闭环控制算法。采用输出量对系统输出进行调节，实现系统状态的稳定。(说明：系统状态：需要控制的系统状态参数X，如温度、速度；预设值：预先设定的

需要系统状态达到的值EX；偏差：实际系统状态与预设值间差值$\Delta X(t_n) = X(t_n) - EX$；控制参数：用于改变系统状态的参数$S$，如电机控制的PWM频率、占空比，加热器电流；PID计算周期：每次调节控制的时间间隔，$\delta t = t_{n+1} - t_n$)

此外，又可根据执行器特性分为位置式PID与增量式PID(后面表述可能不太准确)。位置式PID中，用于改变系统状态的执行器不具有记忆作用，每次改变$S(t_n)$均重新设置执行器状态，如PWM控制的加热器、电机转速。计算出现错误会造成较大影响，要防止过冲现象；而增量式PID用于执行器具有状态记忆的情况，可以在上一次调节结果的基础上改变$S(t_n)$进行调节(输出的是执行器的改变量)，如控制位置的电机(每次调节为在现有位置的基础上再转动一定角度)，用于运动控制的压电陶瓷片。输出$S(t_n)$仅与最近3次的采样值有关(最简单的积分/微分形式)，可通过在运算中引入权重进行调节，计算错误影响小。两者在表达式上为互为微积分关系，将多个PID控制器串联使用组成级联PID控制器，如无人机的角度控制(控制几个电机的转速以达到目标角度)和具体的电机控制(控制电机电流以达到特定转速)。虽然增量式PID有许多优点，但位置式PID更易理解，所以后面以位置式PID为例进行介绍。

主要思想：根据反馈计算三个量来控制输出$S(t)$：

比例项(P)：根据系统状态与预设值偏差ΔX直接计算与其正比的一个数值$K_P \times \Delta X$作为控制l参数$S(t_{n+1}) = K_P \Delta X$，其中参数$K_P$即为比例项系数(更专业的表述中用的比例度$\delta = \frac{1}{K_P} \times 100\%$)。但由于系统状态存在漂移等误差，使单纯的比例调节无法完全达到稳定(即稳态误差的存在，用最常见的维持水桶水面高度的例子来解释：水桶存在固定速度的漏水，当水面接近设定值时，$P\Delta X$逐渐减小，当其决定的灌水速度等于漏水速度时，水面不再变化，此时系统状态X与预设值间仍存在偏差，增加K_P可减少此偏差，但会影响系统稳定性)，并且该系数太大时，虽然会提高调节速度，但会出现明显的超调(系统状态超出设定值)和振荡现象。

积分项(I)：根据一段时间内(也可设为从开始进行累积)的偏差总和$Err_I = \sum_{k=n-\delta N}^{k=n} \Delta X(t_k)$来计算与偏差总和成正比的调节量$K_I \times Err_I$，其中系数$K_I$为积分项系数，也可表示为$K_I = K_P \times \frac{\delta t}{T_I}$，$T_I$称为积分时间(仅是因为其具有时间量纲)。积分项可以累积比例项中产生的稳态误差，从而进一步使系统状态趋近设定值。减小积分项系数可以减小超调和振荡现象，但会增加系统达到稳定的时间。对于累积的误差，常常需要限制其数值大小，避免累积过大导致严重迟滞现象。

微分项(D)：用于增强系统的瞬时响应(比如外界影响变化的情况，无人机在有风环境中悬停)和减小滞后性(调节有较长滞后时间的情况，比如惯性较大的智能车位置控制)。基于几个时刻的偏差计算出偏差的差分量，最简单的形式：$Err_D = \Delta X(t_k) - \Delta X(t_{k-1})$，则微分项对系统的调节为$S(t_{n+1}) = K_D \times Err_D$，$K_D$为微分项系数，又可写为$K_D = K_P \times \frac{T_D}{\delta t}$，$T_D$称微分时间(量纲原因)。由于微分项会放大噪声的影响，所以提高微分项系数虽然会提高系统更随外界影响变化的速度，但系统的稳定性会降低，所以不需要太快变化的情况不建议使用微分项，即使使用也要从很小的数值(比如0)开始调起。与积分项相同，需要限制Err_D大小。



最终形式：$S(t_{n+1}) = K_P \times \Delta X(t_n) + K_I \times Err_I + K_D \times Err_D$

或者：$S(t_{n+1}) = K_P\{\Delta X(t_n) + \frac{1}{T_I}\sum_{k=0}^{k=n}\Delta X(t_k)\delta t + T_D\frac{\Delta X(t_n)-\Delta X(t_{n-1})}{\delta t}\}$

相应的增量式PID：$S(t_{n+1}) = K_P\{[\Delta X(t_n)-\Delta X(t_{n-1})]+\frac{1}{T_I}\Delta X(t_n)\delta t+T_D\frac{\Delta X(t_n)+\Delta X(t_{n-2})-2\Delta X(t_{n-1})}{\delta t}\}$

编程时要考虑清楚各系数的正负！

PID 速度控制示例

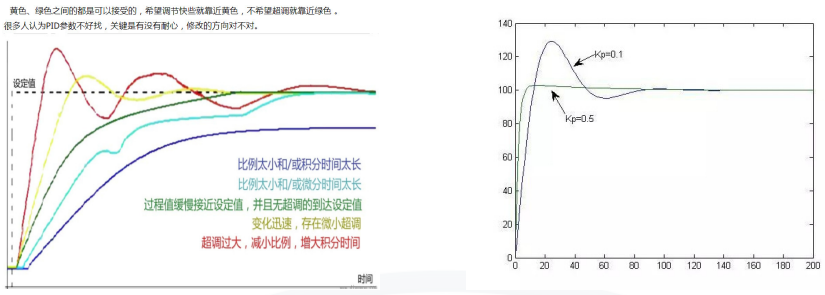
```
//其实不需要结构体，用宏定义代替不变参数也可以
typedef struct{
    float Kp, dt, Ti, Td;
    //中间量
    float Integral, LastError;
    //数值限制
    signed short MinOutput,MaxOutput;
    float MinInt,MaxInt;
    float MaxDiff,MinDiff;

}PIDStruct;

PIDStruct PIDSpeed;

int PIDInit(PIDStruct *PID);
int PID(PIDStruct *pid, float ESpeed, float Speed);
//以上部分和宏定义可以扔到一个头文件里

int main(void){
    //变量定义
    float ESpeed=ExpectSpeed; //期望速度
    float Speed;              //实际速度
    int PIDOutput;            //输出

    Speed=GetSpeed();         //测量速度

    while(1){
        PIDOutput=PID(&PIDSpeed,ESpeed,Speed); //PID计算输出
        SetSpeed(PIDOutput);                   //设置电机转速等
        delay(PIDSpeed.dt);                    //延时，对应PID计算周期
        Speed=GetSpeed();                      //测试速度

        //判断是否达到稳态，也可修改成退出之外的其他形式
        //重点是延时一段时间后再次判断状态
        if(abs(Speed-ESpeed)<Err){
            delay(TestTime);
            if(abs(Speed-ESpeed)<Err)
```

```
                break;
            }
        }
}

//初始化函数
int PIDInit(PIDStruct *PID){
    int error=1;
    //初始化参数
    PID->Kp=KpInit;
    PID->dt=dtInit;
    PID->Ti=TiInit;
    PID->Td=TdInit;

    //参数检错部分，也可去掉
    error&=KpInit>0;
    error&=(dtInit>Mindt) && (dtInit<Maxdt);
    //接着检错...

    PID->Integral=0;
    PID->LastError=0;

    PID->MinOutput=MinPIDOutput;
    PID->MaxOutput=MaxPIDOutput;
    PID->MinInt=MinPIDIntegral;
    PID->MaxInt=MaxPIDIntegral;
    PID->MinDiff=MinPIDDifference;
    PID->MaxDiff=MaxPIDDifference;
    //参数检错 No.2
    //...

    if (error){
        //报错与参数恢复...
        return -1;
    }
    else{
        return 0;
    }
}

//PID计算部分
float PID(PIDStruct *pid, float ESpeed, float Speed){
    //计算差值
```

```
    float Error=ESpeed-Speed,DErr=Error-pid->LastError;
    float PIDOutput=0;

    PIDOutput+=pid->Kp*Error;    //比例项

    //积分项
    //限制积分数值
    pid->Integral+=Error;
    pid->Integral=pid->Integral>pid->MaxInt?pid->MaxInt:pid->Integral;
    pid->Integral=pid->Integral<pid->MinInt?pid->MinInt:pid->Integral;
    PIDOutput+=Kp*pid->Integral*pid->dt/pid->Ti;

    //微分项
    //同样限制微分数值
    pid->LastError=Error;
    DErr=DErr>pid->MaxDiff?pid->MaxDiff:DErr;
    DErr=DErr<pid->MinDiff?pid->MinDiff:DErr;
    PIDOutput+=pid->Kp*DErr*pid->Td/pid->dt;

    //限制输出数值
    PIDOutput=PIDOutput>pid->MaxOutput?pid->MaxOutput:PIDOutput;
    PIDOutput=PIDOutput<pid->MinOutput?pid->MinOutput:PIDOutput;

    return PIDOutput;
}
```

调参方法(参考其他资料)：调节时虽然可以将每项系数写成单独的形式，但这样往往忽略了PID计算周期的影响(周期短响应快，振荡增加)。所以后面的调节方式以调节积分时间、微分时间表述。

各系数数值从小到大；先比例、再积分、最后加微分项；状态振荡多则减小比例系数，稳定慢则增加比例系数；振荡周期长则增加积分时间(减小积分项系数)，状态恢复慢则减小积分时间(增加积分项系数)；振荡频率快则减小微分系数。最终需要调节至系统状态经过一两个振荡周期，且两个周期幅度比约4:1(这个纯属经验？)后达到设定的稳态。虽然应当将每个系数调节好后再调节下一个系数，但对于一些系统，返回调节上一个系数可能会达到更好的控制效果(如下图)。



(a) 调参　　(b) 特殊调节

图 2.1: PID控制

模糊PID：即将模糊控制用于PID算法。适用于系统参数、响应函数会实时变化的情况，此时设定好的PID系数会因时间变化而不能达到较好的调节效果，所以需要实时地对PID系数进行调整。对于应用环境较为简单稳定的系统来说，不是很必要。算法大致思路：根据经验和模拟建立模糊规则表(模糊控制的重要步骤，系统状态偏差-PID参数改变量对应表)⟹检测系统状态并计算偏差⟹根据偏差查表(即模糊化与隶属度计算，多用线性函数计算)⟹改变PID系数⟹根据PID系数改变系统控制参数⟹重新检测系统状态。当然还需要加入数值限制、控制周期δt等细节，可自行查找示例代码。

- 综合方法(上位机)：类似第一章中的上位机程序，在采集过程中将反馈控制、滤波、存储分别写于上位机或单片机中，上位机可满足一些大计算量(如实时图像识别[用DMA传输数据]，Fourier变换等)的要求，从而避免减弱单片机等采样频率，而一些简单的处理(如一些滤波算法)则可直接在单片机中完成。

2.1.3 安全(bu yao)与实验防护(zuo si)

2.1.3.1 安全事项

危险标识：♠

- 伤口处理：

烧伤：冷敷，或冷水冲洗，可涂敷烫伤膏。若有伤口需要先消毒，大范围烫伤与较大水泡需要即使就医。水泡用无菌方法抽出水泡液，但不要撕掉表皮。

划/擦伤：♠清洗伤口，去除伤口中的碎屑、灰尘、尖刺等，尽量使用无菌水清洗，避免自来水细菌。采用碘酒、酒精等消毒，创可贴等止血与包扎少扣，避免污染接触。较大或较深的伤口即时就医。

- 电气安全：♠

设备安全：防止电磁辐射造成的影响。短路，湿度，温度

操作安全：防止触电与电气损坏。避免水或潮湿蒸汽接触插头。对于较高电压的部分，需要避免内有高压的导线交叉，或与金属接触，同时减少电路或周围的金属尖端。高压不可直接用万用表、示波器测量，也不能施加到普通元件上，高压经过的电路中的元件要保证元件耐压大于可能的高压。高压的数值可以通过高

压电阻组成分压网络进行测量，也有一些专用高压表等仪器。对于内部含有大电感(变压器、磁场线圈)或非导通的高压电路，接触前需要用导线进行放电，尤其并联了大电容的高压端，电容内存储的电量更易造成触电。

- 激光：♠

  设备安全：激光对电源稳定性与器件温度要求较高，工作条件的波动会造成激光功率的较大波动和频谱的平移等变化。过高的温度与电压甚至会造成激光的损坏。此外应避免较大功率的激光回射到激光内，尤其对于半导体等固体激光器，较强的激光会造成工作介质的损坏。可采用隔离器或选择反射表面避免回射。开启激光时，对于有两个开关的电源，需要先开始非钥匙转动的开关，等待电源预热(声音稳定)后开启钥匙开关，激光预热完成，波长与功率稳定后再进行使用。

  操作安全：未经聚焦的2W激光可以直接烧穿木板！大功率红外光纤激光脉冲可以烧穿铁板！故一定要注意避免直视入射或反射的激光。调节光路时尽量使用小功率可见波段激光进行调节(虽然对于同一套光学系统，波长不同调节出的效果不同)，并佩戴对应波段的激光护目镜。此外避免在激光光路中出现电源线等物体，以及避免烧伤手，对于不可见光，红外光可采用用于探测的荧光片检测光点位置，紫外光还需要注意不要照射到塑料、皮肤等。不可见光光路可先用可见激光进行调节，但对于一些色散大的器件，调出的光路效果并不很完美。

- 高低温：♠

  设备安全：温度控制器件一般需要很大电流，且存在局部温度过高的部分，使用时要注意设备使用时间要求和环境要求，且工作不能长时间超功率，避免器件其他部分损坏。低温设备要注意散热和控制环境温度，过高的环境温度会影响降温效果。使用液氮等低温液态气体时，不要用普通不耐高压的封闭容器盛放，易发生容器爆裂。

  操作安全：避免烫伤与冻伤，接触温度过高与过低的部分或温度未知的部分时注意戴合适的手套，不可直接接触。在没有看管的情况下，不要开启高温设备(加热板、烙铁等)，并拔掉其电源。

- 玻璃/金属/木：这些材料加工时很容易产生毛边，所以使用前使用砂纸、锉刀(更推荐海绵砂块)打磨加工的边缘，去掉尖刺或小角度边缘。使用时建议戴防护手套。

- 加热与充电：♠

  设备安全：避免采用水或可燃性液体直接冷却高温器件，既可能会加快器件氧化、破坏表面，也可能会引燃可燃性液体，发生火灾甚至爆炸(曾听到有人用酒精冷却烧红的金属……)

  操作安全：无人看管的情况下一定要关闭高温加热设备(烙铁、加热板、红外灯管等)和大功率设备(强光照明、大功率充电锂电池、高压模块)，长时间离开时关掉锂电池充电设备和其他没有设置保护电路的充电设备。

2.1.3.2 防护

- 眼镜：使用激光时需要佩戴对应波段的护目镜，并且涉及大功率激光时(如> $10^2 mW$)，

还需要考虑护目镜的衰减倍率是否足够安全。另一种普通的透明护目镜用于防止化学或碎片溅射，比如在操作高温溶液、加工金属或玻璃(尤其使用小型钻台钻孔时)，透明面罩可达到更好的防护效果。



(a) 激光防护眼镜　　(b) 防溅射眼镜

图 2.2: 防护眼镜

- 手套：接触一些粗糙的玻璃、金属、木质器件时，尽量戴上粗线编织的或者附有胶面的防护手套以避免玻璃边缘划伤或者金属、木头毛刺划伤，也可用来在接触高低温物体时避免受伤，不过这种线织手套不防水，也不太绝缘，一些尖刺还是可以刺穿的。绝缘手套通常为厚橡胶手套，绝缘电压在kV以上，使用前需要选择耐压参数高于操作环境最大电压的手套，由于橡胶很厚，并不方便操作。硅胶手套防水且防大部分化学试剂(不代表可以长时间接触腐蚀性试剂)，薄而有弹性，便于操作。可戴多层手套增强防护或用于满足不同用途。



(a) 防护手套　　(b) 绝缘手套　　(c) 硅胶手套

图 2.3: 手套

- 口罩：防可吸入式粉尘(塑料粉末、烧制块状粉末等)，有毒气体(氯气、HCl等)，易挥发有毒气体(丙酮、浓硝酸等)。可带多重口罩。



图 2.4: 口罩

- 面罩：防碎片溅射、危险液体爆沸。有色面罩也可防强光，用于焊接、切割等。



(a) 防溅射



(b) 焊接面罩

图 2.5: 手套

2.2 机械与加工

2.2.1 工具

本节介绍需要一些技巧或注意事项的工具，请先保证正确使用，再考虑其他操作。

- 钳类：

  剥线钳：用于剥去电线的胶皮，不可用于漆包线(漆包线可以烧焦表皮后磨掉)。使用时需要选择与线芯直径相对应的孔位，多股线去皮时避免前端弯折，否则易折断线丝。在电线中部去皮可得到一段中间裸露，两侧有胶皮的电线(见下)，用于一根线缠绕连接多个节点。

  电子钳：小型平口钳，用于剪去电子元件多余引脚或细线，一般硬度不高，且需要较精确对齐，所以不要尝试用来剪断钢丝或较粗的金属。

  端子钳：专业压制接线端子的钳子(图例为压制2.54端子的端子钳)，类似的有专用于牛角座、网口的水晶头的钳子。使用时先将一部分裸露的铜线塞入端子固定部分，然后和端子钳的压槽前后对准后压下，避免压毁前面的插线端。带自锁的钳子可通过钳身一个卡口解锁。



(a) 剥线钳



(b) 电子钳



(c) 端子钳

图 2.6: 钳子们

- 切割：

  锯：具有不同大小的锯齿的锯条(同时配套锯弓使用)，材质也略有差别，质量较好的钢锯可直接锯铜、铝等金属，同时也更不易磨损(一根好锯条并不会贵很多，

但使用体验会急剧提升，所以强烈建议买些好工具)。为得到较好的端面和平直的切口，可先用手抵住锯，以较小的角度锯一条较浅的沟槽，然后在沿沟槽继续锯开。为避免中间偏离垂直面，要固定好锯的物体(比如踩在凳子上？)，同时保证用力方向保证在竖直面内。电路板、泡沫、塑料、蜡等材料均可用钢锯切割。

锯片/砂轮：♠需要借助钻台(非专业设备，极度危险！)或者切割机使锯片或砂轮高速旋转使用。有锯齿的锯片可用来切割木、塑料这类较软的材料；砂轮有可用来打磨的厚砂轮(真砂质砂轮)，比如磨去金属材料的锋利边缘，但手动固定比较危险，一定要戴手套操作，或者用更专业的工具操作；也有用来切割的薄砂轮(比如有金刚石颗粒镀层的砂轮，或者也叫锯片)，可用来切割钢锯无法切割的不锈钢、玻璃、陶瓷等材料(比如光轴)。

玻璃刀：用来切割一些较薄的脆性硬质材料，比如玻璃板，单晶硅片，使用时沿尺子用力在表面画一条贯穿整块材料的沟槽，然后沿沟槽折断(硅片这类很脆的材料可能会在用力划开时直接碎掉)。

铣床：专业模型加工设备，用钻头切除材料形成沟道，可数控，但要预留钻头半径的尺寸。

激光切割：♠可数控，设备贵。多用于金属、玻璃、塑料(尤其是用CO_2激光器切有机玻璃)切割，小型激光切割机可切薄木板、不透明塑料等易融化的材料。

热丝切割：♠用通电的金属丝产生的高温融化材料以进行切割。金属丝需要有较大的电阻率(其实也不需要很大)和较高熔点，比如钢丝、钨丝。可用来切割玻璃、泡沫、塑料(虽然塑料会有很大刺激味道)。因金属丝和连接点温度很高，所以使用时一定要注意安全，避免碰到切割设备的热丝部分和切割的物体处的热丝。可用直流电源+钢丝自制热切割即。



(a) 锯



(b) 锯片



(c) 砂轮



(d) 玻璃刀



(e) 激光切割



(f) 热丝切割

图 2.7: 切割工具

- 钻孔：

钻床：使用“钥匙”更换钻头，可更换传动部分的带轮半径比改变转速/扭矩，硬质材料、深孔换用大扭矩。小器件需要用夹具固定。打孔前预先从多个角度观察使钻头对准标记点，或者可先打一个很浅的坑用来观察打孔位置。钻头材质决定了可用于加工的材料，不锈钢、铁等材质需要选用较硬的钻头，塑料材料建议用锋利的钻头以避免大量产热融化材料，同时适当加快打孔速度。打孔时可适当加水降温，但使用后要及时擦除。在金属材料、脆性材料打孔时需要佩戴手套和防护眼镜。

手钻：打孔位置限制较小，但一般打孔位置精度低，不易控制，且使用不当易损坏钻头。可配装不同的钻头固定接头以配合不同粗细的钻头。

钻头：尺寸标注类似螺丝，前端分为不同角度，小角度的钻头不适合普通钻头的钻孔，附有类似一字螺丝刀的前端可用于木材的开孔。钻头的螺纹数可为1到4，还有一些用于铣床等仪器的交叉螺纹、异形钻头(磨头)。直径很小的钻头为固定牢固，需要直径大的直柄固定。

开孔器：♠或者说用于钻大孔的钻头，分为齿状和金刚石磨砂型的开孔器。齿状的开孔器可用于较软的木、塑料、泡沫材料，磨砂状的开孔器可用于玻璃、陶瓷、大理石等硬质材料。玻璃开孔需要同样需要佩戴眼镜手套等防护用具，防止碎片飞溅，同时需要在开孔时加水。

激光打孔：♠高端打孔技术，用于金属、半导体等，一种是用位置可控的激光切割出孔，一种直接用脉冲激光打微型孔。

攻丝：用于在环割出外螺纹(套丝板牙)或内螺纹(攻丝丝锥)。



(a) 钻头



(b) 开孔器-陶瓷/玻璃



(c) 开孔器-木-1



(d) 开孔器-木-2



(e) 钻床



(f) 手钻/电动螺丝刀



(g) 攻丝丝锥



(h) 套丝板牙

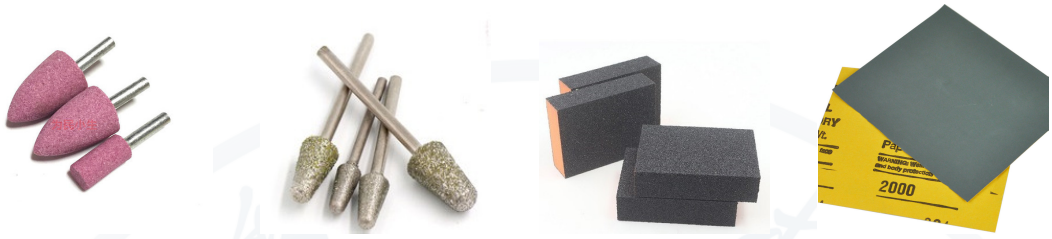
图 2.8: 打孔

- 打磨：

红刚玉磨头/金属磨头：♠借助钻台或手钻等高速旋转以打磨金属、木、塑料等材料。

海绵砂块/砂纸：海绵砂块可用来磨去玻璃、金属、木头的棱角或尖刺，砂纸有不同的粗细，用于不同精细程度的打磨。

金刚砂膏：内含金刚砂的膏状材料，用来打磨一些不规则曲面。或用不同粗细的金刚砂膏、羊毛砂轮等实现抛光效果。



(a) 红刚玉磨头　(b) 金属磨头　(c) 海绵沙块　(d) 砂纸

图 2.9: 打磨工具

- 类螺丝刀：

螺丝刀/扳手：常用工具……十字、一字、六角、异形，梅花、套筒扳手。选择好尺寸。

批头：仅螺丝头或螺母套筒，配合螺丝刀手柄或电动螺丝刀使用。套筒需要使用转接杆。

棘轮扳手：单方向可锁死的螺丝刀，使用时可转换锁死方向。



(a) 活扳手　(b) 组合螺丝刀　(c) 棘轮扳手

图 2.10: 打磨工具

- 胶：

类502：流动性较好的胶水，粘接快，用量小，会浸入到木、纸板内部。粘接强度弱。可用于光滑平整或柔性表面的粘接，需要擦除表面的水与油污，有一定腐蚀性，不能粘接泡沫。

热熔胶：比较常用的胶，性能中规中矩……加热后软化可以使用，可以粘连较多的东西，粘接强度优于502(主要是因为可以用很多胶来粘)，但由于热熔胶较软，故不能非常牢固地粘连物体，所以不建议用于需要承受较大力的分别的粘接，且温度稍高或碰触较多会使胶进一步软化。可起到填充和结构固定的作用。可配合胶枪使用。对于一些材料可以用作压强要求不高的密封。凝固时间较长。

AB胶/环氧树脂：两种成分混合后使用的胶水，但要注意混合比，AB胶通常为1：1混合，环氧树脂需要按标识混合(体积比或质量比)。凝固时间长，但粘接效

果好，硬度与强度均较高，甚至一些型号的效果堪比焊接。可用于密封，粘接材料多，但不易在不对外界产生不可逆影响的情况下取下来，所以一些对粘连强度要求不高的情况不建议使用AB胶。耐温80℃到200℃，不同型号差别较大，甚至可以更高。可加热取下。

玻璃胶：用于粘接玻璃套磁等表面光滑的物品，配合胶枪使用，具有密封效果，但胶较软，凝固时间很长。开封后有效时间短。

导热硅胶：一种并不能算作胶水的胶，用于提供较好的热接触，导热率应该比较高(掺银颗粒的导热硅胶效果好，但一般买到的都是普通产品，不如紫铜材料直接接触导热效果好)，可用于填充接触面间的缝隙，有一定粘连效果，有些导热胶常温下粘接较牢，高温下软化。不用于粘接固定。

凡士林：同样不是胶水，用于真空密封，防锈、防水。保湿化妆品？



(a) 502



(b) 热熔胶



(c) 热熔胶



(d) AB胶



(e) 环氧树脂



(f) 玻璃胶



(g) 导热硅胶

图 2.11: 胶水

海绵双面胶带：一般常见的有黑白两种颜色，白色较软而轻，但粘连能力差别大，有些胶带粘性较好，可做缓冲，可粘连不太平整的表面，但老化快。另一种是黑色的海绵双面胶，粘性很强，且老化慢，可压缩性较弱，用于较平整表面比较好。

绝缘胶带：就是一般看到的彩色不透明胶带……但廉价的这种胶带并不能很好的防水或绝缘，质量较好的胶带明星较厚，甚至为布质材料，伸缩性和绝缘性能均较好。用于绝缘时建议用粘接紧一点，把接头周围的线也可以粘连一部分，避免接头断开。彩色胶带可用于颜色标记。

金属胶带：金属箔+胶制成的胶带，有些可提供双面导电性，直接与金属接触的面导电性较好，胶面阻抗比较大，有些仅金属面导电。宽度或厚度均有较大范围可选，用于提供较硬的粘贴面，或者方便粘贴的金属面，或者代替镀金属膜(导

电、反光、导热、防止油污等)，一般用铝和铜两种材质。

高温胶带：一种橙色半透明的胶带，用于在高温环境中使用，如在150℃以上的情况。

碳纤贴纸：黑色碳纤材质贴纸，有很弱的导电性，主要用于装饰(确实很好看)，也可用于挡光。

魔术贴：非严格胶带，一面可通过双面胶等方式固定到其他表面上，两种魔术贴之间可多次使用，调节位置，但固定不是很牢，位置也会轻微变动。

反光胶带：具有特殊的表面结构(类光学全反器)，可以向光入射方向强烈反光，用于物体标记(需要配备光源拍摄，见图像处理部分)(和道路安全警示？)。



(a) 双面胶-黑



(b) 双面胶-白



(c) 绝缘胶带



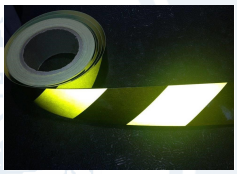
(d) 金属胶带



(e) 高温胶带



(f) 魔术贴



(g) 反光胶带

图 2.12: 胶带

2.2.2 材料

- 木：

实木板：通常想法中的木板，可用锯、钻头、热切割加工，较为方便。不同种类密度硬度不同，较硬的木板可用于制作支架或底座(常用的如松木板、椴木板)；轻而软的木板(如轻木板)可用于做木塞与软垫。

三合板：采用薄实木板-木屑或碎木板-薄实木板胶合而成的木板(实际上可有更多层结构)。称重、抗弯曲能力更强，但层间强度取决于粘连的胶水，且可能有残留甲醇等有毒气体。环保节约较便宜。

刨花板：采用碎料等胶合压制成的木板，表面平整，吸音绝热性能较好，且其结构使木板性质各项同性。横向承重力相对差，不太易加工整齐。



(a) 松木板　(b) 轻木板　(c) 三合板　(d) 刨花板

图 2.13: 木材料

- 金属：

(材料参数并非严格，错了不要打我……且不同型号的金属或合金均有不同的参数，甚至差别很大，故详细计算时请查找对应型号的参数。)

紫铜：即纯铜，优秀的导热与导电材料，可用作散热模具。材质较软，钢锯、钻头等均可加工。有较大粘滞力？

密度：$8.960g/cm^3$ 热导率(20℃)：$397W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$59.6\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ 熔点：1083^oC (注意参数随温度的变化)

黄铜：铜锌合金，材质较硬，但导热与导电均较差。

密度：$8.50-8.80g/cm^3$ 热导率(20℃)：$108.9W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$14.3\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ (合金材料精确参数与成分有关，并不准确，仅用于量级估算和粗略比较)

铝：此处指纯铝，有较多铝合金。一种常用且实用金属，加工方便，硬度大于紫铜，铝合进硬度更大，且密度小，更适合用于制作金属结构。熔点低，但氧化膜熔点高。有可用于反射的镜面铝。

密度：$2.70g/m^3$ 热导率(20℃)：$108.9W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$34.5\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ 熔点：660^oC

铁：常用金属，有磁性，型号很多，密度大，比铝硬，不太便于加工。一些铁合金有较大磁化率，可用于制作磁芯，且居里温度高。

密度：$7.8kg/m^3$ 热导率(20℃)：$46.5W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$10\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ 熔点：1535^oC 居里点：$\sim770^oC$

镍：居里点较低的金属，磁性弱于铁，用于锂电池的电极。

密度：$2.70kg/m^3$ 热导率(20℃)：$108.9W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$34.5\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ 熔点：1453^oC 居里点：$\sim350^oC$

钨：电阻率高且熔点高，可用作电热丝或热切割。

密度：$2.70kg/m^3$ 热导率(20℃)：$108.9W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：$18.9\times10^6\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ 熔点：3410^oC

不锈钢：硬度很高的金属，有些合金密度较低，很实用的金属，但比较贵……且非专业工具加工会比较危险。用于钢轴等部件。有镜面型不锈钢。目前除数控机床、铣床等设备，只能用金刚石砂轮切割(或切一条凹槽后用锯切割)，危险。

密度：$2.70kg/m^3$ 热导率(20℃)：$108.9W/(m\cdot k)$ 电导率(20℃)：34.5×10^6

石墨：软质层状类金属材料，可做惰性电极、电刷、高温坩埚、中子减速剂或者润滑剂，磨损一段时间后作电极的石墨与接触点会贴合紧密，但同时会有磨损，

需要定时更换。可用普通刀片加工，石墨可方便地从铅笔芯中获取。

密度：$2.25kg/m^3$ 热导率(20℃)：$151W/(m\cdot k)$ 熔点：3652^oC 电导率与电流方向和材料的构成均有关，所以没有固定值



(a) 紫铜　(b) 黄铜　(c) 铝　(d) 铁



(e) 镍　(f) 不锈钢　(g) 石墨

图 2.14: 金属材料

- 玻璃与光学元件

玻璃：主要为SiO_2，不同类型玻璃会有K,Ca,Na等元素，折射率与吸收特性不同，入射光也可能会激发玻璃中的离子发光。密度约$2.5\times10^3kg/m^3$，软/融化温度范围变化大，从400^oC到1100^oC，其中石英玻璃(高浓度SiO_2)耐温较高。常见的材料中与碱(如$NaOH$)反应(不要考虑HF，危险且损伤不可逆)。

可采用玻璃刀或热切割/拉伸的方式加工，有条件的也可用高压水刀、吸收波段的激光切割，可用有金刚石磨料的开孔器打孔。厚玻璃块可从光学器件店家购买，薄玻璃可考虑手机膜。硬而脆，使用前用砂纸打磨边缘，注意避免划伤。

平面镜：用于反射，压缩光路和分离光路的调节，普通的镜子反射面在玻璃后，易出现多个光点或者位置的偏移，没有专业反射镜的情况下若要求不高可采用镜面金属(镜面铝/不锈钢)替代。

透镜：主要参数为口径、焦距。为避免像差、散射等问题，尽量用透镜$\frac{1}{3}$范围内成像，平凸透镜摆放时使光束从凸面进入(减小整体像差)。表面镀膜可增强透射。

偏振片：制作方法多样，容易买到的大片偏振片多为塑料基底，可剪裁拼装成组合偏振片，从而产生有偏振分布的出射光束(如轴对称偏振光束)。强光透过偏振片时需要避免光束聚焦太强，否则容易烧毁偏振片，可扩束后通过偏振片。

膜：可实现窄波段光束的反射，偏振分离等功能，效果与入射角度有关，多为多层塑料膜，故不可接触高温，不能用丙酮等有机溶剂擦拭(部分可用酒精擦拭，但能不擦就不要碰，详见购买的元件说明)。

分束镜：包括利用两三棱镜贴合面分束和平面玻璃上镀膜分束，也有偏振分

束器和偏振无关的两种。其可分离正入射和回射光束，但需要波片改变偏振。也可用来分离产生与入射光束相关的光信号。

光栅、棱镜等器件请需要时自行查找。

- 磁性材料：

钕铁硼磁体：银白色磁铁，固有磁矩强，在空间中衰减快，常见磁体较小，贵，退磁温度100℃左右，与形状、种类有关。可用于提供小范围非均匀磁场，大范围均匀磁场可用小磁体拼成；也可用于作为磁芯的磁场源(见后面控制磁场的一种用法)

铁氧体磁体：黑色磁铁，固有磁矩较弱，但方便做很大，较便宜。退磁温度250℃左右，且恢复到室温后磁性会部分回复。可用于提供大范围磁场，形状和磁极分布种类较多。

磁芯：本色多为黑/灰色，但涂有各种各样的漆，本身没有固有磁矩，种类多，性能差异大，故使用时需要根据要求选购。常用方式为加强(引导)磁场，即用在线圈中提供高磁导率和高饱和磁矩。形状有多种，但要根据所需磁场分布选择。由于居里温度限制，磁化效果与温度，即线圈功率有关，大功率线圈需要考虑散热问题。烧结的磁芯较脆(似乎磁性材料都比较脆)，不易加工，但可用铁粉浇筑(见磁场设计部分)。



(a) 钕铁硼磁体　(b) 铁氧体磁体　(c) 磁芯

图 2.15: 磁材料

- 塑料：最常见的材料，各种优异性能，但又因种类不同而具有较大差异。这里介绍部分常用材料特性和加工方法(其实仅有机玻璃和3D打印用的比较多，其他的多为热加工，不易自行处理)。

有机玻璃(亚克力)：方便加工与使用，且外形光滑美观的塑料，有圆筒、平板等各种形状，可用CO_2激光器切割，没有激光器则可用勾刀划出约$\frac{1}{3}$板厚的沟槽，然后折断，但异性孔、尺寸要求严格的孔建议定制。可用钻头打孔，但若打孔钻头不够锋利或摩擦时间较长，将导致产热过多，使亚克力融化，最终形成的孔大于预计尺寸。有专门的亚克力胶可以粘接，但AB胶也没有问题。绝缘性好，较硬，但脆，有多种颜色。较贵。透光率好，但紫外透光差(塑料紫外都不太透光)，红外透光较好。

TPX/TPU/硅胶：软塑料，可用于加工薄膜、缓冲垫等(如有用于浇筑的硅胶，可用3D打印制作模具，然后浇筑硅胶)。TPX综合透光率在塑料中基本最好，但贵，耐温250℃，氧化慢。TPU可用于3D打印，成功率一般。

PLA/ABS:用于3D打印的常见塑料。PLA耐温约180℃，ABS可到200℃。ABS硬度大于PLA，更易溶于丙酮(丙酮的ABS溶液涂到线材的3D打印热床上可加强热床与模型的粘连)，但加热有毒气，3D打印时层与层之间粘连弱于PLA。均有多种颜色可选，但不同颜色性能有细微差别；透明材料打印效果并不透明。(其他3D打印材料在后面介绍)

泡沫：用于防震、绝热、固定、轻质支撑。泡沫颗粒也可作为轻质悬浮物体比如跟踪液体流动。到泡沫的材质和密度均可不同，其会影响材料的导热率、弹性。用于减震时为避免碰碎可用塑料袋包裹。会被一些胶水腐蚀。

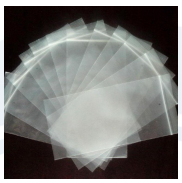
海绵：柔软的减震材料。吸水，可在吸水后作为短时间的水冷。不太能粘连。



(a) PMMA(有 机玻璃、亚克力板)



(b) TPX



(c) 聚乙烯



(d) 松散泡沫



(e) 致密泡沫

图 2.16: 塑料材料

- 碳纤维：略有一点导电性，耐高温、腐蚀，导热好(但比金属差)，弹、韧性高。有板、棒等多种形状。可用锯、钻头加工。



(a) 碳纤棒



(b) 碳纤板

图 2.17: 打磨工具

- 管材：

玻璃管：可用金刚石磨片、热丝切割、喷枪简单加工。锋利易碎，需佩戴眼镜、手套等防护设备。不同玻璃的耐温、透光性差别均较大，不建议随便使用。

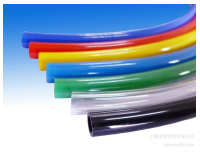
塑料管：(没有想写的……

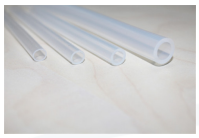
硅胶管：柔软的易扩张管，可通过多种腐蚀性液体，对液体阻尼较大。温度较高的话易老化。

金属管：钢锯、砂轮切割，但切割后会有略微形变和毛刺。可通过高温液体/蒸汽。铜、不锈钢对液体有不同的阻力，但均小于硅胶管。不易加工弯折或连接，螺

纹管才有攻丝的接头(弯头、三通等)连接。

生料带：一层柔软的塑料膜，用于防水密封(替代稻草密封)。


(a) 塑料管·PVC


(b) 硅胶管


(c) 包塑管


(d) 生料带

图 2.18: 管材

- 线材：以下均代表一类线。

  棉线：易起毛边(会相对较大的阻力)，吸水，几乎无弹性，承力较大。

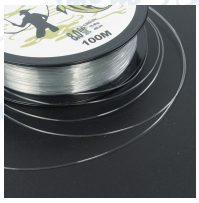
  鱼线：光滑、细，弹性很好，不耐磨，承力可较大。

  光纤：脆(或许不该放这里)，不能大曲率弯折。

  钢丝：钢丝不易弯折，横向弹性良好，承力很大，铜丝相对较软，普通铁丝介于两者之间。

  橡皮筋：弹性非常好，有多种尺寸可以选择。可替代弹簧作为力的提供部分(如配合扳机、投石机)。


(a) 棉线


(b) 鱼线(尼龙)


(c) 钢丝


(d) 橡皮筋

图 2.19: 线材

2.2.3 传动与结构

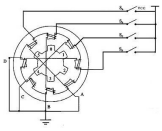
2.2.3.1 电机

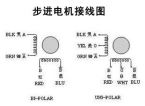
- 步进电机：见原理图。通过转换接线线圈以形成方向转动的磁场，从而驱动转子以特定角度为步长转动。接口需要按照特定顺序通电，且需要前置电机驱动板以增强电流驱动能力，有细分/功率选择拨码开关的驱动板可将方波转换为驱动信号，同时通过调节各项电流比例使电机以更精细的角度步长转动。步进电机型号反映了其单步角度，常见的两相四线多为4.2^o。


(a) 电机


(b) 步进电机驱动板2


(c) 步进电机驱动板2


(d) 步进电机原理

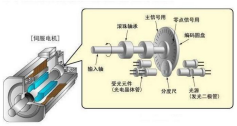


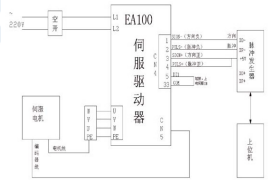
(e) 接线方式

图 2.20: 步进电机

- 伺服电机：相比于步进电机，伺服电机多了编码器反馈系统，其驱动板也需要接入编码盘信号线。并且从控制上也将步进方式变为了通过控制脉冲周期实现转动(虽然输入驱动板的均为方波)。启动加速快，角度控制精度高，低频转动更加稳定，且扭矩不会随转速显著改变。


(a) 伺服电机驱动板


(b) 伺服电机原理



(c) 伺服电机接线

图 2.21: 伺服电机

- 舵机：通过PWM占空比控制角度的电机。体积小，重量轻，运转速度较快。一般不能360^{o}整周期旋转。用于航模或机械臂等。



图 2.22: 舵机

- 减速电机：配备减速箱的直流电机，两根线接口，通过正负控制转动方向。扭矩大，相应的转速慢。可拆掉减速箱获得高速旋转的直流电机。



(a) 电机



(b) 电机与减速箱

图 2.23: 减速电机

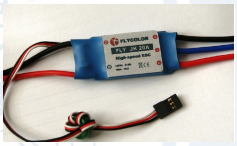
- 无刷电机：采用霍尔元件测量磁场变化，同时相应地改变电子开关(比如MOS管?)状态来代替用于电流方向换向的电刷。但需要电子调速器(电调)将PWM波转换为三相交流电来驱动电机，PWM的频率和占空比可用来调节输出电压、频率等，电调同时具有加/减速控制功能，需要设置PWM使电机在较低速情况下启动，然后调节PWM频率/占空比达到最大输出，虽然大部分情况下能转起来就可以。无刷电机转速快，不易产生火花，且电极转换部分不易受灰尘影响。用于航模、涵道等需要高速旋转或一些防火花的场合。



(a) 电机1



(b) 电机2(常用于航模)



(c) 电调

图 2.24: 无刷电机

2.2.3.2 传动零件

传动结构精巧而优美，非单薄文字可言其智慧(况且我还没专门学过……)，仅粗陋地介绍几种零件以达抛砖之效。多加了解，广泛参考，巧思设计。

- 齿轮：较软材质(塑料、木)的圆孔齿轮可直接套进轴内固定，多边形孔可以用对应形状的轴带动，圆孔金属齿轮需要螺丝来定位在轴上。伞状齿轮可用于转动的换向(磨损较快)，多级齿轮用于变速。



(a) 各种齿轮



(b) 伞状齿轮



(c) 行星齿轮



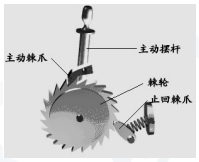
(d) 多级齿轮与配装结构

图 2.25: 齿轮

- 摩擦轮：采用摩擦较大的软质橡胶轮进行传动或发射物体(乒乓球、卡片等)。
- 棘轮：齿两边一边角度大可滑动，一边小角度用于制动的齿轮。用于控制单方向转动或限制最大力矩。
- 链条：通过调节链节数量来调节链条长度，需要配合链轮使用，可传动的力较大。



(a) 摩擦轮



(b) 棘轮结构



(c) 链条



(d) 链轮

图 2.26

- 皮带：分为有/无齿的皮带，带有齿的同步皮带又分为闭合的或者可以调节长度(用一种卡扣)的皮带，可调长度的皮带用于非整周期的传动(比如固定长度的位移平台)，有齿的皮带需要配合同步带轮使用，但高速大扭矩情况下容易滑动。用摩擦传动的皮带常扭转成莫比乌斯带的形式以避免单面磨损，对应的皮带轮有限位纹路。



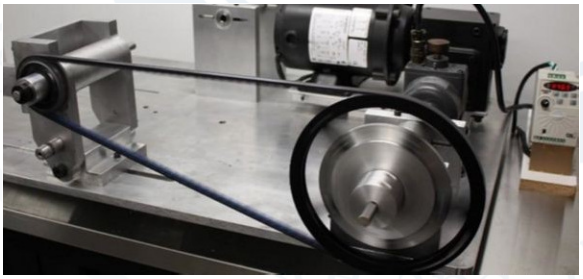
(a) 同步皮带·可调结构



(b) 同步皮带·闭合结构



(c) 同步皮带轮



(d) 摩擦皮带



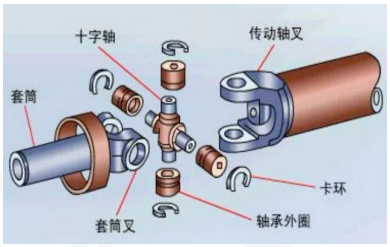
(e) 皮带轮(?)

图 2.27: 皮带传动

- 凸轮：通过不对称的形状和向直接接触传动可实现任意(大概是吧)形式的直线振动。
- 万向节：如名字所述，高旋转自由度，可在弯折的情况下传导轴的转动。



(a) 凸轮(其实还是螺母)



(b) 万向节

图 2.28

- 联轴器：同轴连接，有螺丝可拧紧卡口。中间为螺纹形的(挠性联轴器)有一定弹性，可避免两个轴不同心带来的影响，但也要求轴有其他固定方式由单块金属制成的联轴器往往两端孔直径相差不大，中间有其他连接部分的膜片、梅花联轴器可找到连接直径相差较大的轴的型号(或者可以买来自己拼装)，但这种联轴器若中间固定不牢则会有轻微滑动。此外除图示型号外还有可以转变方向的万向联轴器、链条联轴器等。



图 2.29: 联轴器

- 曲轴连杆：

曲轴：弯曲的轴……可提供以不同半径转动的位置。可能需要连接飞轮渡过无动力部分。

连杆：采用可转动结构(轴承或简单的环状结构)连接的多根轴，可将转动运动转换为直线往复运动，行程<=转动直径。



(a) 曲轴



(b) 连杆

图 2.30: 曲轴连杆

- 隔水传动轴：借鉴船轴结构。对于需要改变转动方向的情况，需要用套管+轴套+轴承然后套筒内注入较粘稠的润滑油(黄油？)的方法进行隔水，该结构可以实现转动的改向和较高转速。另一种结构可将中间的轴换成有螺纹的丝杆，并采用较软的橡胶或者塑料作为外侧轴套，则螺纹在转动时可以起到排出渗入的水的作用，但该结构只能单向慢速转动(螺纹向外排出水的转动方向)，且需要较大扭矩的电机。

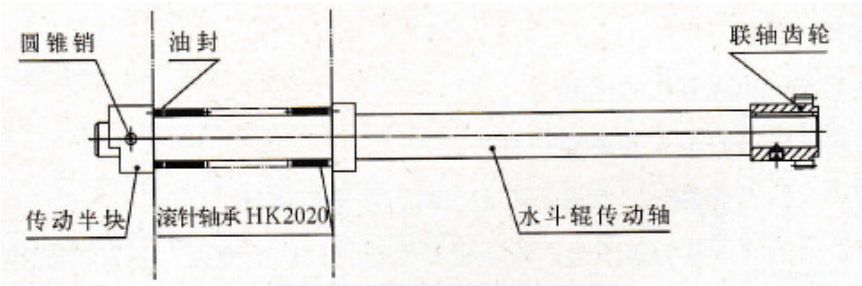
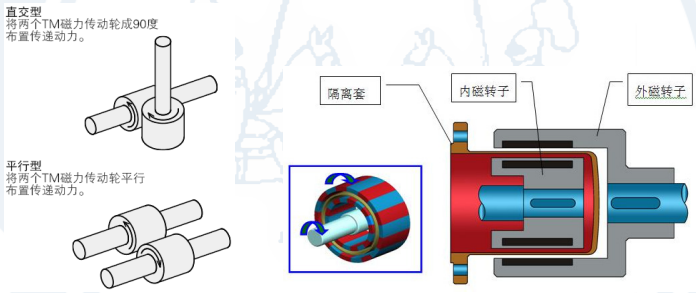


图 2.31: 船轴结构

- 磁传动：一种非接触的传动方式，采用NS磁极的吸引和排斥驱动轴。根据磁极设置的方式也有不同的传动方式。除了购买专业的多磁极磁环外也可自制平板型的磁传动结构。



(a) 非同心轴的传动　　(b) 同心轴的传动

图 2.32: 磁传动

2.2.3.3 常用机械结构

- 丝杆滑台：平行移动结构，丝杆+电机(多为步进电机或伺服电机)实现平行轴方向较精确的距离控制与运动。采用皮带和齿轮组代替丝杆可组成皮带传动结构，与丝杆滑台类似，需要选择齿距合适的皮带和齿轮，使用前需要调节齿轮位置确保皮带松紧度合适。

  丝杆：可认为是“长螺丝”，表面攻有一或二套螺纹，配合有内螺纹的器件(比如螺母)，可以用于将转动转换为平动，主要参数为螺距、直径、长度和螺纹数。可通过联轴器与电机相连。为避免晃动或弯曲，使用时还需要一对光轴支架加轴承进行支撑。

  光轴：光滑的轴……硬度较高，但较细的长光轴还是容易发生弯曲，可在人为磨制凹槽或磨出一个端面后用联轴器与电机相连(但似乎用途较少)，也可用光轴支架(见下)固定或在支架中嵌入轴承使轴可旋转。

轴承：内外圈同心且可相对转动的零件，从结构上可分为滚珠与滚针轴承，材质上可分为不同硬度的金属、橡胶、塑料。对于小型轻质转子，轴承并不一定能提供阻力很小的同轴转动，但较小的轴承并加入一些较稀的润滑油后可以适当得到较小阻力。根据形状又分为直线轴承与通常的同心轴承，直线轴承为一段管状结构，内部有可滚动的钢珠使光轴可在内部运动；同心轴承内圈在光轴上的固定可使用胶粘或焊接，或者在上下固定部分用胶带等限位，焊接时要尽量快，过高的温度会破坏轴承精密尺寸，导致阻力显著增大，将轴承外圈固定在物体上可用卧式轴承支架，或者强行塞入然后胶粘(可能会不太平)，不需要固连的话直接顶在一个凹槽内也可以。

滑台：内部嵌有一个直线轴承的金属块，有一个带有一些螺丝孔的平台，可用于固定物体，但单个滑台并不能使物体平行运动，所以一般需要至少两套滑台-光轴搭建平台(较大平台可用四个)，中间与丝杆配套的传动结构或者皮带相连。滑台两端放置弹簧可减少回程误差，也可避免自由运动(见后图)。



(a) 光轴　(b) 丝杆　(c) 轴承　(d) 直线轴承　(e) 直线滑台

图 2.33: 丝杆滑台结构

法兰：类似滑台的结构，不同的是固定面为与中间孔平行，用于固定同心结构，如嵌有直线轴承的法兰用于光轴上平动，侧面配有螺孔的法兰用于轴(比如电机轴)和平面的连接。



(a) 法兰　(b) 法兰+直线轴承　(c) 真空法兰

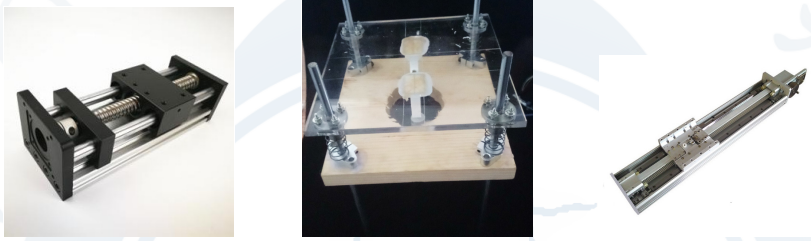
图 2.34: 法兰

光轴支架(也可叫轴承支架)：分立式与卧式，固定部分有一定弹性，通过调节螺丝卡紧轴承或光轴，调节范围不大，调节范围随孔尺寸有关，大概2%?所以一定买标称尺寸和轴/轴承最相近且只能大不能小的支架。



(a) 立式光轴支架　(b) 卧式光轴支架　(c) 带轴承的支架

图 2.35: 光轴支架



(a) 丝杆滑台结构　(b) 丝杆滑台结构·弹簧限位　(c) 皮带滑台

图 2.36: 滑台结构

- 型铝框架：轻便的金属框架，同时提供杆上任意位置的固定，但杆与杆之间夹角只能为90°整数倍。

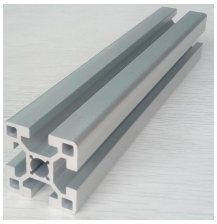
铝型材：具有某种方框结构的铝棒，尺寸为10mm到50mm每5mm为间隔的方形铝(如10×10*mm*型号)或1：2尺寸的长方形铝(如10×20*mm*型号)。可用钢锯切割。

角码：直角形状的铝块(或铝片)，用于连接垂直的铝型材。

螺母：可以卡在铝型材凹槽里的螺母。安装时若不能直接从凹槽塞入，则只能从侧面塞入，拧紧螺丝时可以使螺母卡在凹槽里，如果卡不住就多试几次……

角铝：直角形铝条，多用来作为直角连接件(打孔后用螺丝固定)，可用钢锯加工。

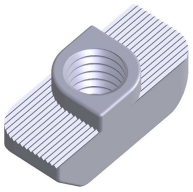
使用方法：角码中心卡到凹槽里，垂直连接铝型材，连接时两条铝型材建议有厚度长度的交叉，并且可以使用多个角码在不同方向连接以加强固定。预先将螺母放入铝型材中，稍微拧入螺丝简单定位，两个螺丝平衡拧入并注意调节铝型材的位置。最终拧紧时使螺母卡在铝型材中。



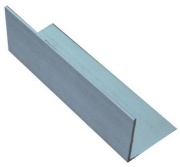
(a) 铝型材



(b) 角码



(c) 螺母



(d) 角铝

图 2.37: 型铝配件

螺丝与螺母：常用零件(做团队的一颗小螺丝钉)。底部削平的螺丝需要固定在有内螺纹的孔内，或者在另一端用螺母固定，加紧中间的材料。底部为尖头的自攻螺丝可以在木材这类较软又有一定可压缩性的材料中直接固定，对于不太能压缩的材料可以预先打一个比螺丝略小的孔，不然可能会导致材料碎裂。3D打印可打印内螺纹。除了普通螺母外，还有一些防松脱的螺母，但除长期振动部分外，不太必要使用，如果担心螺丝松脱，可考虑拧紧后在螺母-螺丝间涂较牢固的胶。螺丝/螺母尺寸以$Mn \times L$表示，$n = 1,2,3,4...$表示直径，如$M3$的螺丝直径近似3mm，L为长度。



(a) 螺丝



(b) 自攻螺丝



(c) 螺母

图 2.38: 螺丝与螺母

垫片：为防止螺丝/螺母与底面间压强太大损坏表面(尤其是一些很脆的材料)，可在螺母或螺丝与底面间加入垫片。除普通的金属垫片外，还有更柔软的塑料/橡胶垫片，橡胶垫片还可以使两个比较粗糙的面间接触更紧密，所以也会用于管道连接时的接口密封。弹簧垫片是开口的一圈弹簧钢圈，可有较大形变，拧紧后对螺母/螺丝和底面均有一定弹力，可防止松动，但由于其接触面积也比较小，所以会和普通金属垫片配合使用(螺丝-弹簧垫片-普通垫片-部件面结构)。



(a) 金属垫片



(b) 橡胶/塑料垫片



(c) 弹簧垫片

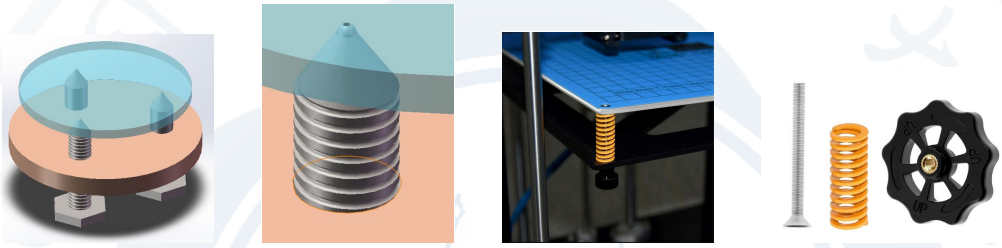
图 2.39: 垫片

- 调平：

最简单(除去使平台漂浮在静止的液面上)的结构是采用可调长度的支脚(三个或四个，四个比较稳，三个容易调[三个转动自由度])来支撑平台(类似分光计载物台的调平和一教许多古老支架的调平)，支撑的尖端可用嵌有钢珠的结构来避免损坏平台或磨损支脚。但这种结构平台易滑动(可以在支撑点挖凹槽)，且缺少对向上运动的限制。

将支脚改成螺丝-弹簧(弹簧也可避免拧螺丝时用力太大损坏表面或回程误差)套件后可减少简单支脚的问题，但平台称重不能超过弹簧总支持力。

更复杂的调平是采低频主动减震的思路配合传感器(似乎没有太好的倾角传感器，可以测重力加速度？)和机械结构调节平台至水平(云台)。



(a) 示意图　(b) 圆珠末端　(c) 热床支撑　(d) 弹簧螺丝套件

图 2.40: 调平

- 减振：

原理：对于不同频率之间没有相互作用的系统，其典型的振幅响应曲线如下所示，基本特征为在低频段不断趋进1,之后出现一个(实际情形可能有多个)共振峰，然后在高频段(相对与特征频率而言)快速衰减至0,即可作为一种有共振频率的低通滤波器，阻挡高频段振动；所以为进行减振，可设计这样的一些滤波器使所需隔绝的频段落在滤波器的高频段。另外，系统的阻尼越大，共振峰越宽，值越低(>1)，向高频段的衰减越慢。系统的特征频率近似为 $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ ，k为有效劲度(刚度)系数，m为有效质量，所以减小特征频率可以扩展有效减振的频段，比如制作在一定范围内应力与形变无关的0刚度系统，或者增加负载质量(如m，参考LIGO的减振科普演示实验)。对于小于特征频率的低频段的减振，目前似乎只有进行主动减振(通过传感器测量振源运动，然后控制电机使待减振平台反向运动，即叠加一个反相位的振动)?

弹簧-阻尼器：最经典的减震结构，通过弹簧的串并联提供弹性系数k，阻尼器提供耗散，不同的结构设计可实现不同频带、隔振能力的减振器，可采用Matlab模拟，多级并不一定比单级减震效果好。阻尼器可基于粘滞液体耗散制作(制作效果较差)。

减震垫(简单易用)：采用橡胶、泡沫、海绵、气垫做成镂空的弹性结构可作为隔绝高频振动的减震垫，随然可以提取其有效弹性系数和有效质量，但其对振动的响应曲线并不很符合理论上的响应曲线。常见减震垫的模型和使用建议可以查

找专业教材。软木、橡皮泥、沙子等塑性材料也可作为减小冲击的介质。

$k = 0$减振器：如原理所述，为滤除更广频段的振动，0刚度器件的近似0的共振频率使其可滤除大部分频率的振动，但同时实现0刚度和合适的支撑力并不是容易的事，许多0刚度(甚至负刚度)减振器结构不易制作调节，对经验和专业知识要求高，简单的实现方式可通过多级永磁体叠加得到一定范围(比如小于1cm)内的0刚度。减振要求不高的话，就不要考虑这个了，而且主动减振效果可以更好。

尾翼?：对于流体中的物体(水或空气中漂浮、下沉等)，添加类似尾翼、防摇鳍的塑料、纸片等元件以减弱振动。



(a) 振动幅频响应曲线　(b) 阻尼器　(c) 减振垫　(d) 一种0刚度减振器

图 2.41: 减振

- 转动与支撑：可采用笔尖(带圆珠)、针尖、轴承来连接转子，一种是将转子与针尖等固定，轴随转子转动；另一种方式是针尖等与支架固定，转子在轴上转动，后者便于更换不同的转子。采用针尖/笔尖支撑转子时，若除支点外，其他地方若有与轴的摩擦(多为晃动导致)，可在摩擦的地方缠绕金属胶带、打磨转子摩擦处并润滑来减小摩擦。有外力的情况下，不建议仅用单支点支撑，转子晃动会较大。轴承可以更稳定地实现转动，但对于轻质转子，其摩擦并不会很小。轴承在轴上的固定可采用胶粘、轴上缠绕胶带或铁丝、螺丝等在下方支撑或用轴上套上一定长度的笔芯、吸管限位，与转子的连接类似，也可用轴承支架固定(但要调节转子的平衡)或凹槽支撑。

2.3 仪器搭建

自制的仪器不一定是最合适的，但对于CUPT这类问题，最合适的仪器往往带有自主设计成分。此外，对于第17题这类常常需要人操作，或者正常过程中带有较大随机性的问题，制作一个可控参数的机器以减小这种随机性也是很有必要的，虽然不一定真的有用。

2.3.1 源

- 电源：

  主要分为电池和稳压电源两种，分别介绍两种电源的具体类型特点和使用时的注意事项。

直流稳压电源：电压电流可调的直流电源，可通过滚轮或数字位进行调节，也可在设置好步长后用上下箭头调节。建议使用时同时设置电压与电流最大值，且电流最大值略大于可能的工作电流，用于对电路进行短路保护，避免出现击穿等情况时电流过大使部分器件热损。不同型号电源有不同的最大电压/电流或不同精度的调节范围(一般显示的电流/电压数值不是很精确，且导线与触点也会存在分压)。将鳄鱼夹的塑料套前推保住电极部分可避免短路。比较讽刺的是，这个用来提供直流稳定电压的设备，具有很强的电磁辐射……

锂电源：♠性能优异的充电电池。放电电流大，容量大。单节锂电池电压为2.7V到4.2V(2.7V为一般过度放电后的电压，而过度放电有害电池寿命)，一般标识为3.7V，多节串联会出现见到的7.4V、12V、24V等电压的锂电池。电池容量单位常为mAh，如1000mAh，其含义为电池在放电电流为1A的情况下，可连续工作1h(一般来说……由于电压下降、偷工减料等原因到不了1h)。放电C率：最大放电电流为容量乘以C，如1000mAh，2C的电池最大放电电流为2A。一般锂电池在0.5A到3A左右，一些特殊电池(如航模电池)可到几十A。锂电池充电需要使用平衡充或至少是专门的稳压充电器，电压高于4.2V充电可能会发生爆炸，电池短路使电流过大或电池温度过高也可发生爆炸。多节独立锂电池不要轻易并联，电量的不平衡会损害电池寿命，并联的电池也要用平衡充同时充电。不要过度放电，避免爆炸情况。

普通电池：又可以叫干电池，锰锌电池等。最常见的电池，电压1.5V，9V，所谓1号，5号，7号为电池尺寸，从大到小。9V电池为方块形状，目前需要的是用于万用表或一些电路板的高压供电端口。电流一般，电压随电量变化。一种12V的电池为铅酸电池，一般体积大电量大，可充电，较为稳定。

钮扣电池：小型圆柱体银白色电池。电压1.2V,2V等，电流很小，mA量级。12V的小型电池有一些就是六节钮扣电池串联形成的。用于手表，RTC模块或驱动小功率LED。

开关电源：♠交流转直流电源，内部电路大致为输入交流电转直流电，然后直流电经开关元件转高频直流电，经变压器转换后得到需求电压的交流电，再经整流滤波等得到所需直流电。可略微调整电压，内部开关器件会产生高频电磁场，有一定干扰，所以多用金属盒子装配电源电路，且产热大，效率低。需要注意的是一般开关电源为220V输入，接口裸露，所以需要防止触电和短路。另外选取电源时除了挑选电压参数，还需要注意电流限制参数。如果输出电压的纹波系数太大可以考虑并联大电容进行滤波。

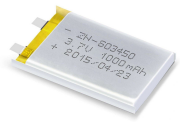
硅光电池：光伏发电电池，电压电流均较弱，一般为单晶硅或多晶硅电池。可用作光强探测或需电量小的长期运行设备的供电，如户外长期的数据采集。



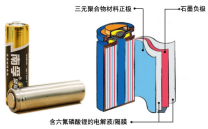
(a) 直流稳压电源



(b) 锂电池1



(c) 锂电池2



(d) 干电池



(e) 钮扣电池



(f) 开关电源



(g) 硅光电池

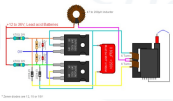
图 2.42: 电源

DC-DC模块：小型电压转换模块，分升降压芯片，调节范围大，效率较高。内部原理大致为输入直流电压转PWM波，然后输出为PWM波的积分(或平均)，通过改变占空比改变输出电压，升压电路可在电路中加入电感以产生高电压。需要注意电源模块输出的电压限制和最大电流，可通过在输出并联电容减小纹波系数。

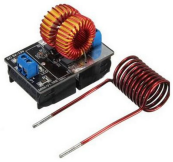
ZVS+高压包：♠ 零电压开关(ZVS)电路可以将恒定直流电转变为高频直流方波(可用于涡流加热，见后)，在经高压包(可认为是一种变压器，同时内置高压桥式整流电路[硅堆])后得到高压直流电。因ZVS是一种谐振电路，所以需要较陡的足够大的上升电压来起振，直接连接直流稳压电源，然后通过电源的开关按钮控制电源可能会因电压上升平缓而不能起振，表现为ZVS内电流非常大，此时要立刻关闭电源，防止器件热损。高压包输出的电压与ZVS电路输入电压有关。小功率ZVS+高压包结构不会电死(♠并没有试过，但一定会电伤，小心使用！)，在输出端并联电容后，会使输出电流可在短时间内大幅增加，同样危险性也会剧增。ZVS功率较大时，要对其主要谐振器件散热(散热片+风冷/水冷)。



(a) DC-DC模块



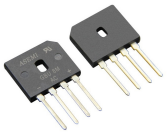
(b) ZVS原理



(c) ZVS与感应线圈



(d) 高压包



(e) 硅堆

图 2.43: 电压转换

- 光源：

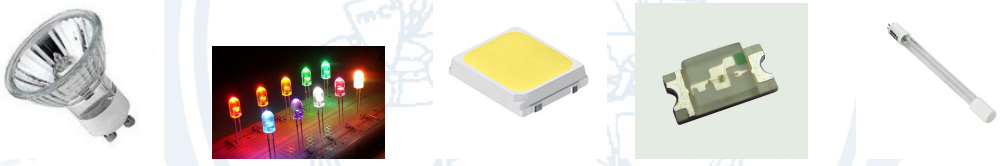
(建议了解一下：辐射功率，光功率，辐射强度，光照强度，照度，光亮度)

热光源：♠这里指白炽灯，卤素灯等会产生高温而不是通过高温发光的光源。

频谱宽，时空相干性差，亮度可很高，产热严重，辐照可用于加热。颜色不可控。

LED：半导体载流子复合发光，光谱较热光源窄，颜色多，但一些颜色为激发荧光粉或照亮封装塑料颜色产生的发光。多为内部有一个发光芯片的透明圆帽形封装，但这种LED光照方向角较为集中，且中心有个亮斑，这种LED似乎更适合用于照明？还有一种封装为磨砂塑料，不同方向发光较为均匀，可用于标记或指示，除了直接购买外，磨砂LED可通过砂纸打磨透明LED或涂一层可产生散射的涂层制作，效果会略差一点；内部有多个发光芯片(多为RGB三色)的LED可通过改变不同颜色的亮度来合成其他颜色(但饱和度降低)。除了圆帽封装外，还有方形封装和扁平的封装(并不知道叫什么)，后两者多用于较大功率的LED，扁平的封装背面多附有一片绝缘的金属作为发光芯片的散热片，使用时需要注意这种大功率LED的散射。小型贴片LED是一种很好的用于追迹的标记。低波长LED可用于代替紫外灯对一些材料曝光处理或作为荧光激发源。

紫外灯：♠发光谱集中在能量较高部分的灯管，利用低压汞蒸气发光。波长集中在185nm和254nm，一些表面有白色荧光物质的灯会有蓝紫色的谱。可破坏生物组织和一般的塑料制品，产生臭氧，故使用时尽快远离，避免直视，可添加必要的遮光罩(一般的塑料可能会在紫外线下降解或者被透过，所以遮光材料还没有接触过)。可用于荧光激发，光固化膜等材料的曝光处理。



(a) 卤素灯　(b) LED　(c) LED　(d) 贴片LED　(e) 紫外灯

图 2.44: 光源

激光：♠亮度大，连续激光频谱窄(脉冲激光频谱可很宽)，方向性好，辐射强度高。激光器由泵浦源，谐振腔，工作物质组成，泵浦功率超过粒子数布居反转阈值后可输出与谐振腔共振波长的激光。氦氖激光器波长632.8nm；半导体激光器波长有355nm,435nm,485nm,532nm(可通过1064nm倍频实现)等，一般功率较大；CO_2激光和光纤激光器可达到更高功率。一般可认为输出的激光为高斯光束，即光束某一截面的光强分布为高斯分布，但光束半径与光波曲率半径随光束位置变化，最小半径w称为激光的束腰，束腰前光束汇聚，光束后光束发散，其理论发散角ϑ满足：$tan\vartheta = \frac{\lambda}{\pi w}$，束腰越小，越偏离平行光，所以使用时要判断是否可以作为均匀平行光。高斯光束经透镜变换后仍为高斯光束，薄透镜近似下：

$$\frac{1}{w_0'^2} = \frac{1}{w_0^2}[(1-\frac{z}{f})^2 + \frac{1}{f^2}(\frac{\pi w_0^2}{\lambda})^2]$$

z为变换前束腰位置到透镜光心的距离。当束腰位于焦点处，$w_0' = \frac{f\lambda}{\pi w_0}$，即r变换前束腰越小，透镜半径越大，变换后的光束平行性越好，光斑越大。

采用双凸透镜可实现对激光的扩束，其基本思路为：先将激光用短焦透镜聚焦成小束腰的光束，然后再用长焦透镜变换，两透镜焦点重合。按照上述思路，用其

他光学元件或多级透镜实现激光的聚焦和扩束也可以。

半导体激光一般输出的为椭圆形光束，可用柱透镜整形成圆光束。一些自带透镜的“玩具级”激光器可在调节好激光器前的透镜位置后滴加胶水来避免松动。

由于激光的相干性太好，在照明时会出现散斑现象，或者对于一些需要改变相干性但保持方向性和亮度的实验，可通过在激光出射后加一片高速旋转的颗粒较细的磨砂玻璃(或磨砂塑料板)，来降低相干性(Collet-Wolf光源)。当然还有其他通过调制相位等原理抑制散斑的方法。

较好的方向使激光可实现很好散射光，可用于对气泡、悬浮颗粒的观察或暗背景下拍摄记录。散射光强可用于计算颗粒浓度(多为胶体浓度，有个公式忘了叫啥……)



(a) 激光器1　(b) 激光器2　(c) 激光二极管　(d) 激光电源

图 2.45: 激光

- 声源：发声器件，同样可作为振动器件。使用时通常需要注意其频幅响应曲线与阻抗，所接的驱动源也需要调节到与器件匹配的阻抗才能得到较大功率输出。需要考虑振源之间的相干行为时还需要考虑器件和线路的相位响应。

  振膜喇叭：电磁线圈式声源，交流信号产生交变磁场，然后带动膜片振动发声，功率、尺寸变化范围大，大型振膜喇叭可用作振源(振幅需要校准，且随负载变化。若要得到较好的单频振动，还需要考虑喇叭)，太低频率的振动易损坏喇叭，且低频声波、次声波对人体有害。

  蜂鸣器：似乎只用来当作发声器件，比如报警或播放音频。分为有源与无源蜂鸣器，有源蜂鸣器内部自带振荡电路，直接连接直流电即可发声，输出频率随电压在一个中心频率两侧略微变动；无源蜂鸣器需要输入交流信号源作为驱动信号，同样需要注意其使用频段与电压范围。

  压电陶瓷片：一些蜂鸣器的主要发声元件。通过电致收缩效应振动发声，具有固定的共振频率(即发声频率)，单片价格便宜但很难焊接。。。

  高音喇叭：专用于播放高频声音的喇叭，响应频段在5kHz～20kHz左右,该频段失真比普通喇叭要小很多，振膜材质很好，似乎没其他用途？

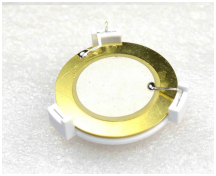
  超声振子：高频压电陶瓷片，同时可附加振动部分或变幅杆来改变振动幅度、波前或方向。工作在固定共振频率，功率较大，往往需要特殊驱动电路，小型超声换能器可直接用电机驱动板+共振频率的方波驱动。有弧度的超声陶瓷片可以起到对超声聚焦的作用。



(a) 喇叭



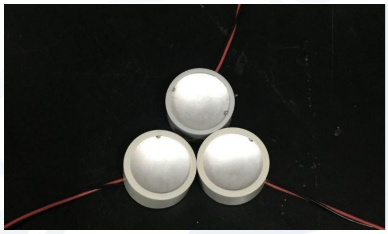
(b) 蜂鸣器



(c) 压电蜂鸣片



(d) 高音喇叭



(e) 超声陶瓷片



(f) 超声振子

图 2.46: 声源

- 振源：对于涉及振动系统，需要考虑振动面的波形、频率、振幅，同时为避免引入太强的与底座作用形成的非所需频率的振动，还应对振动系统加入减振(见前)部分。振动的传输要考虑材料和结构的响应频率，避免适用松散的结构或软材料，其太低的特征频率会使振源的高频振动振幅急剧下降，同时系统的阻尼也会影响传输出的振动与源的相位关系。

  振膜喇叭：见上，需要大功率功放，频率主要在100Hz～10kHz，就振源性能来说，频谱相对比较窄，其他性能不够精确稳定，负载能力差，但容易搭建(不过调平比较麻烦)，且频率轻松到kHz。解决不时之需，能用其他方法代替就尽量不用。

  超声换能器/陶瓷片：高速微振动，可传导到其他部分，比如用于雾化、超声清洗等。

  电磁式：原理类似电磁铁或上面的喇叭……通过交流信号驱动线圈产生振动，往往频率不高，有些直接用市电的就是固定的50Hz，但功率(振幅)和负载能力更大。成品振动平台一般加入了减振和调平设备，虽然效果并不一定很好。

  机械振动(名字也是编的……)：通过电机和丝杆、曲轴连杆、凸轮等机械结构产生直线往复运动，然后驱动一个平台振动，或者直接利用电机转动时的振动来作为振源(这个不太可控，频谱也比较差，不过比喇叭还容易得到)。频率和振幅(改变丝杆螺距、振动周期的电机圈数，或者曲轴半径)较精确可控，甚至可以通过控制电机转速来控制振动波形，负载能力取决于电机功率和中间机械部分强度。平台直线运动部分加入弹簧可进行限位、支撑或用于减小回程误差(尤其是小振幅的情况)。成品较贵，但可自制。

  冲击：用于产生一个大小可控或可测量的瞬时冲量。冲量的详细参数可通过高采样率的测力计(或者高速ADC+应变片)测量波形，同时要保证测量部分有较大的

带宽(或者说中间的对形变的响应时间足够短)可以尽可能完整得传递并测量冲击波形，而且仪器应有较大的量程以避免冲击太大损坏仪器。

实现方式：橡皮筋构成弩状的结构，通过控制拉伸距离控制冲量大小；采用弹簧的压缩和拉伸也可以实现相同结构，但两者都需要对回弹时橡皮筋/弹簧进行限位(对弹簧可采用光轴+直线轴承法兰的结构)，以保证冲量的方向。或通过重物的自由落体产生向下的撞击或者将绳子系到重物上可以改变冲量的方向(需要在中间设置一个可调的支点/齿轮调节绳子的方向)，也可以用摆锤产生水平冲击。



图 2.47: 振动平台

- 气源：

  气瓶：♠ 高压气瓶或液态气瓶，通常采用两到阀门控制，初级阀与气瓶直接相连，并配有气压表可显示气瓶内气压(气体余量)，次级阀配有气压表或流量计，用于显示气体流量。因内部储气量较大，所以一般可认为一定时间内为稳定流量，出口流速分布可认为是高斯分布。小型气瓶使用时注意避免爆炸。

  气泵：通过压缩机产生高压空气并存储在气胆内，通过调节放气阀门调节出气量，使用时若内部气压低于阈值则会在放气时同时进行压缩。有气压表用于显示储气量。因内部储气量一般不大，所以不太能认为是恒定气源，放气并同时压缩时，一段时间后可认为气流达到稳定，但此时气流会比较弱。

  风扇：即吹风机……直接出风比较混乱，需要较长的管道稳定气流，同时也会减弱气流，因风扇产生的气压不大，所以出气量会因出口后管道的等效阻力而改变，在一定精度内可认为是恒定气源。一些高速喷气机，如涵道，可提供非常强劲的风力，甚至会产生明显的反冲效应。



(a) 气瓶　(b) 气泵　(c) 鼓风机　(d) 涵道

图 2.48: 气源

- 热源：

加热台：♠采用加热丝进行反馈加热，可将表面温度控制在预设温度。一般具有较大热容，加热有一定延迟。并且由于仅在表面下方加热，所以表面温度并不严格为预设温度，环境的影响也会使表面产生波动。电热丝局部温度很高易发生危险，所以无人时不要使用。用于平板类物体的控温加热(比如烙饼)，有凹槽的加热台可做小范围的恒温区域。

酒精灯/酒精喷灯/蜡烛：酒精灯温度$400^oC \sim 500^oC$，酒精喷灯可达1000^oC以上，启动前先点燃一圈酒精预热，并且加热过程中可通过加热灯身提高酒精挥发速度使火焰更集中，熄灭时用耐高温材料覆盖喷口(或拧松酒精灌入的阀门)。蜡烛温度在600^oC左右，与蜡烛的成分有关，不完全燃烧产生的炭黑也可在作为一种“镀膜”方法。

喷枪：♠危险！ 丁烷气体喷枪，火焰聚焦后温度可到1000℃以上。一般结构为一个阀门控制排气量，一个开关通过电火花打火。一种为可充气的喷枪，在底部倒放喷枪向下充气；一种为直接安装到丁烷气瓶上使用。前者一般火焰细，可较好地聚焦，而后者火焰较。小范围加热(1cm内)建议用小喷枪的聚焦火焰，需要高温加热时，用大喷枪才能达到更高的温度，但加热范围大，不易控制。不要对着人使用。用于高温加热烘烤，焊接，熔化玻璃，退磁烧蚀，烤焦糖等。

热风枪：♠和吹风机原理一样，电热丝加风扇。热风可以达到很高的温度，甚至可以融化焊锡，但吹风面积大，周围也会加热到较高温度，所以避免周围有塑料、橡胶、木板等物品。热风枪使用后不要立刻关闭电源，应关闭加热，保持风扇运转，使内部温度下降后再关闭电源。用于焊接贴片元件，风干，吹头发。

加热片：内含加热丝的封装橡胶片或塑料片，柔性较好，可防水，有些附带温度传感器以便控温。可加热的最高温度因材料而不同，功率一般较小，但电热丝局部温度很高，所以紧贴加热片会造成加热不均。可用PCB的方式制作特殊形状的加热片。用于薄层加热，对物体的环绕加热。

电热丝：♠钨丝、镍铬合金等制成的导电丝，由表面裸露或封装在填充了陶瓷的金属管内，温度可达上千度，有短路和烧伤的危险，电流很大(或者说加热制冷的东西电流都很大)，接头处温度也会很高，所以要小心使用。可用于高温加热，绕称加热区域，热切割或烧水，取暖，电烧烤。

涡流/磁畴：♠利用ZVS产生高频直流电进行加热，对于频率高的交流电可以实现用感应涡流进行加热，但一般ZVS功率不足，只能通过翻转铁磁性物质中的磁畴方向做功加热(所以会有温度加热的上限)，可实现无接触的真空悬浮加热。使用时注意ZVS开关器件的产热，需要加强散热，甚至制冷。加热线圈为双抽头或三抽头，三抽头情况中间接GND，两侧接另两个电极。可在线圈上并联大功率电流提高加热功率。用于熔化小块金属，间接加热，在铁坩埚里均匀加热，铁架烤肉。

红外加热灯/卤素灯：♠高温玻璃管套加热丝，采用高温产生的红外辐射加热物体，或热光源辐射加热，加热效果与物体表面吸收系数有关。也可用于无接触加热，配合硅胶辊轴可做塑封机(压力+加热)，大范围区域加热，烧烤。



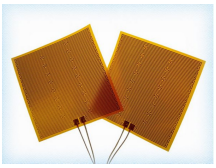
(a) 加热平台



(b) 喷枪



(c) 热风枪



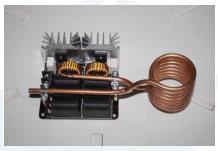
(d) 加热片



(e) 电热丝



(f) 涡流加热



(g) 涡流加热·ZVS



(h) 红外灯管

图 2.49: 热源

半导体制冷片：采用 Peltier效应和P、N类型半导体相反的热电系数制成的热量迁移器件，内部为并联的PN结阵列，在外加电流作用下可以将热量从一面输运到另一面，从而实现制冷或用另一面加热，热量输运方向与电流方向有关。可有多种形状，以及多级制冷。电流大，产热大，所以在功率达到一定值后由于一面产热太大导致热量传导到制冷面，使器件无法加热(变成很好的加热片……)。可再用导热硅胶粘连金属散热片并附加风扇/水冷以达到更低温度的制冷效果，小功率工作时可只粘连散热片。可用于小范围制冷，实现更快的反馈控温，做小冰箱。

压缩机(冰箱)：专业制冷设备。通过工作介质相变输运热量，但体积较大。

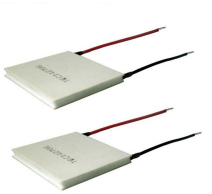
冰块、干冰、液态气体：强行热接触制冷，效果拔群，不太可控？

辐射制冷膜：通过加强8～12μm(大气窗口)波段的辐射来造成辐射的不平衡，从而降低贴附表面温度，目前(2019.7)没有商业产品，可在$10^1\mu m$厚塑料薄膜中加6%左右体积比的SiO_2微球自制(更实用的方法是在环氧树脂内掺入微球，然后做膜或直接涂饰[见后薄膜体系部分])

散热片：通过提高热物体的散热面积来达到降温效果，多为导热率较高的金属材质，使用时尽量选择与待散热表面性质贴合的散热片，然后用导热胶粘贴在物体表面。

风扇：最常用也非常有效的降温方法，提高对流传热，多于散热片配合使用，但只能降到周围环境温度附近，用于高温物体的散热或者发热物体的温度控制。风扇会对被降温物体有较大力的作用，单独使用风扇也有散热效果，但很弱。接线使风吹向待散热物体。

水冷：采用水泵驱动低温水循环，并使水通过循环管道与待散热物体贴合，通过热传导带走热量。



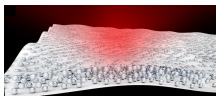
(a) 制冷片



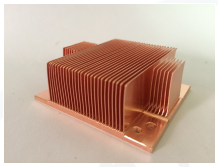
(b) 压缩机



(c) 液氮



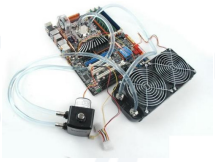
(d) 辐射制冷



(e) 散热片



(f) 风扇



(g) 水冷套组

图 2.50: 冷源

- 水源：

  水泵：涡轮式水泵通过旋转叶片抽运水，使用时需要注意电机接头处的防水处理。抽水的速度、流量与对电机产生的负载有关，若对出水口施加压力太大，导致流速太慢，会使电机热功率提高。

  水桶……：将一个较大的水桶放在高处，并在下方开口接出水管，则可简单得到流速近似恒定的水源，流速会随水管出口处的阻力变化，同样也会由于管道阻力而小于伯努利原理计算的结果。通过调节水桶中水面高度得到不同的流速，但一般比较小，也可通过在水桶中画好高度标记，并实时补充水以得到更精确的稳定流速。当然也可以将阀门和流量计连到水管上作为可控水源。



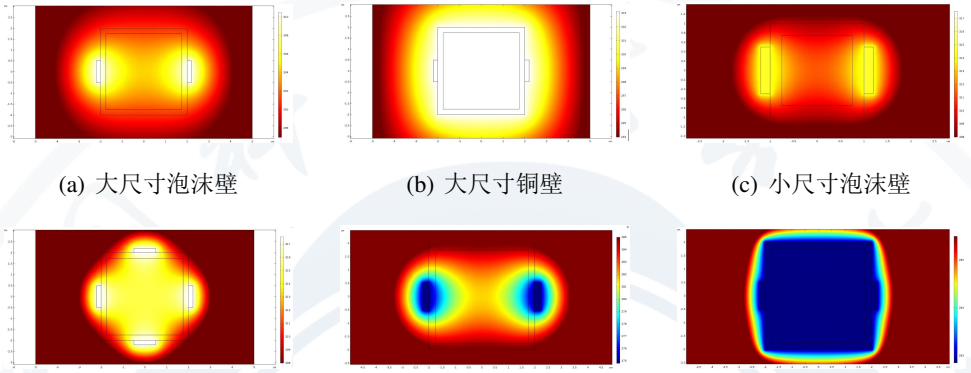
图 2.51: 水泵

2.3.2 控温

在CUPT的题目中，温度常常是一个需要改变或控制的参数，一般可以分为室温跟随(避免热传导)、极限温度控制或改变温度后控制恒温。前面热源和传感器部分已经介绍了改变温度和测量温度的方法，配合控制算法(如PID)即可实现简单的温度控制，但要达到一定区域内均匀且实时的温度控制还是需要一些特别的设计，也就是本节的内容。

- 温度分布：在使用热源/冷源实现在一定空间内达到均匀的与外界不同的温度分布时，加热/制冷元件的存在均会产生温度不均匀性，且控温的空间越大、加热/制冷元件越集中、与外界温度差异越大、壁的导热率越低，其内部温度差异越大(见下

图稳态模拟)。所以当温度分布相对差异对理论产生不能忽略的影响时，需要考虑这方便的优化，如使用水/沙/油浴的方法进行加热，浸泡于低温液体(需要考虑浸入过程腔体空气的液化)、粘贴多片制冷片来使制冷均匀。可用分布在不同区域的温度传感器(使用精度、测量范围合适的传感器)检验其均匀性或计算得到用于评估腔体温度的数值，多传感器共同使用时要考虑传感器的差异造成的固有数值差值，可在无加热的完全均匀情况下采集温度后作为零点漂移值。



(a) 大尺寸泡沫壁　(b) 大尺寸铜壁　(c) 小尺寸泡沫壁

(d) 多热源大尺寸泡沫壁　(e) 泡沫壁制冷　(f) 铜壁制冷

图 2.52: 固定外加热/制冷功率温度分布模拟

- 动态响应：无论是需要保持恒定温度还是需要实时调控温度，系统对温度变化的响应时间均是限制控制实时性的参数。对于需要保持恒温，不受内部需要控温的器件或环境波动影响的情况，可以增加控温腔的热容，减小单位时间内传热带来的温度的改变(可认为是一种低通，类似减振方法中增加负载质量)，但大热容也意味着在调控过程中需要更长的时间来达到所需温度；另一方面，需要对温度快速调控或者需要对外界温度达到快速响应时，则需要减小控温区的热容，或者提供更大功率的加热/制冷(同时意味着调节会不稳定？)，这种情况需要在腔的热容和调节能力之间寻求平衡，似乎可以以响应时间=调节时间间隔为依据？(瞎猜的，多试试自己调参)
- 特定形状加热：用于没钱(有钱找厂家定制)又想实现特殊形状的加热的方法。

  100^oC以下温度可采用PCB设计的方法制作特定形状、不同阻抗的加热片，然后利用线路背面作为加热面(避免热源太集中)，线路设计可采用脚本完成(如Altium Designer)，为获得较大的电阻，线宽往往要很小，这样制作的加热片不能加热太高的温度，否则会损坏表面油墨甚至烧断线路。手工制作这样的PCB可能会因为蚀刻不均而使局部电阻较大，更易烧断。此外黑可以在PCB上焊接一些传感器测量温度；

  另一种方法是直接缠绕加热丝(推荐钨丝)，以及用一些导热率高的模具来使加热更均匀，加热丝本身的温度可能非常高，缠绕时要考虑到加热丝表面的绝缘(因为很少有耐高温的胶皮，加热丝表面常常裸露)。

  高温部分的处理需要使用高温胶带、耐高温玻璃、玻璃纤维等材料。

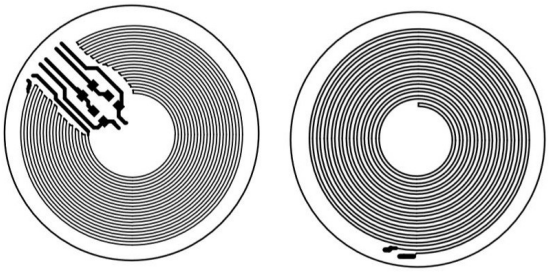


图 2.53: PCB加热片电路

- 极限温度(见热源和冷源部分)：

  低温：与冰箱、冰块、干冰、液氮(氦)等低温物体接触得到低温，采用阀门控制液氮流量则可以在短时间、一定温度精度实现较可控的低温。

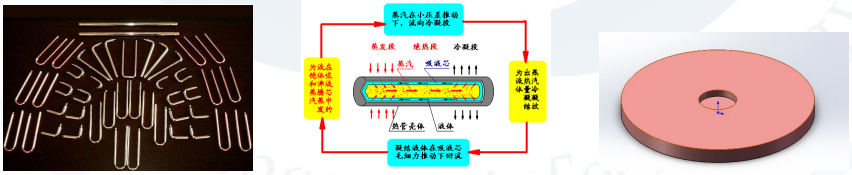
  高温：最易控制的方式是采用加热丝加热，比较暴力、升温较快的方式为直接用喷枪加热，不同的燃料能达到的温度不同，可采用一些聚集方式(环绕金属网或用吹风)提高温度(如酒精灯和酒精喷灯)。不易控制。

- 其他处理：

  抛光或喷涂黑色磨砂高温漆可改变表面的辐射情况，温度很高或很低的情况下辐射会明显影响热量的传导。

  采用泡沫等绝热材料作为支撑材料或用丝线悬挂于抽成低压(理想情况为真空)可减小空气热传导。但低导热会使系统达到热平衡的时间更长。采用热管、制作铜质模具、导热硅胶/掺金属颗粒的膏体粘连填充缝隙来增加热传导，或用风扇增加对流传热，提高温度均匀性或达到热平衡的速度。采用泡沫腔体包裹金属腔体可以同时实现均衡的温度控制和隔热？

  热容会影响温度的变化速度，大热容可以减小外界波动对温度的影响，使恒温更稳定，但同样改变温度后平衡速度变慢；小热容的腔体用于实现更快速的温度变化。



(a) 热管　(b) 热管原理　(c) 均匀加热模具

图 2.54: 其他处理

2.3.3 磁场设计

磁场设计意味着并不仅是场强大小的设计，还要考虑磁场的强度、梯度分布。

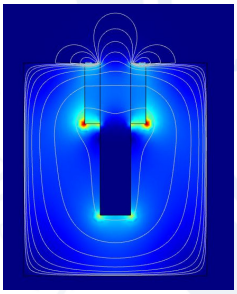
- 场强：为增加场强，接近闭合的磁路近乎是必要条件。同时用高磁导率与高饱和磁化率的磁芯提高线圈产生的磁场。采用线圈产生强磁场时需要考虑线圈的发热，并配备散热降温装置(最简单的是用水冷)，且高温也会影响磁性性能。设计强度可

调又足够强的磁场，采用永磁体+线圈的结构可以减小线圈功率。对于获得精密弱磁场的情况，可直接用多级线圈实现，不同级的线圈即可使中心磁场产生需要的变化率，还能用作磁场的细调/粗调。但要考虑地磁影响，必要时在高磁导率材料制备的磁屏蔽罩内实验。(使用强磁场时避免靠近一些存储设备或磁条卡，同时避免被强磁体夹伤)

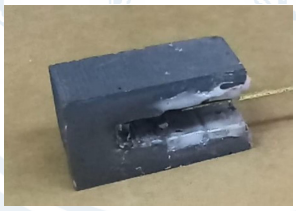
- 磁芯制作：磁芯可很好地引导磁场的分布，所以制作较好的磁芯甚至可直接得到需要的磁场分布。制作前需要通过模拟来得到需要的几何形状，制备后也要对得到的磁场进行测量，验证其分布。

  一种方法是选用成品磁芯进行再加工，由于其比较脆，一般只能打磨加工，比如可得到不同的角度以产生不同磁场梯度，加工时间长(有钱也可找厂家定制)。另一种替代方法为采用3D打印制作模具，然后用环氧树脂、硅胶等可固化材料混合铁粉(需要其他性质也可掺入其他金属粉末)，比例不同性质也不同(但没测过)，大概加入铁粉混合至不会自然流动，搅匀后填充到模具中，等待凝固后取出。填充时要注意排除空气(比如在封闭的区域内扎几个孔)；铁粉不需要选择太细的，避免自然形成的磁畴太小，影响整体磁导率；打印的模具可做成上下闭合易拆下的形式(但都不好拆)；适当加热($< 90^oC$?)可加快环氧树脂凝固；拆卸时用较细的钳子(如电子钳)一点点拆开塑料模具。

  磁芯制作后可用线圈或永磁体产生磁场，线圈的绕制(避免电流旋转反向)与永磁体的摆放也要配合磁芯，使磁路接近闭合。



(a) 磁场模拟(永磁体磁化)



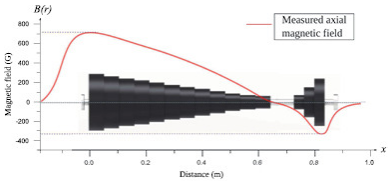
(b) 自制磁芯



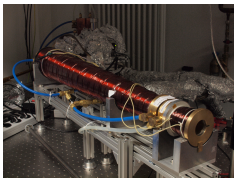
(c) 铁粉

图 2.55: 磁芯制作

- 磁场分布：通用的方法为采用多级线圈构建(如Zeeman减速器)，此方法可以得到一定范围内任意分布的磁场，但往往只用于一维磁场的构建。小范围内匀磁场可用三个方向的Helmholtz 线圈(多级线圈产生更高阶的均匀性)，框架可采用亚克力板或铝材定制。



(a) Zeeman减速器



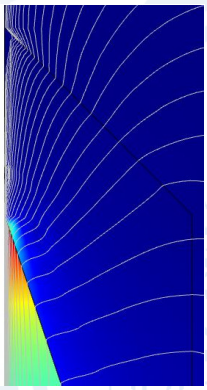
(b) Zeeman减速器



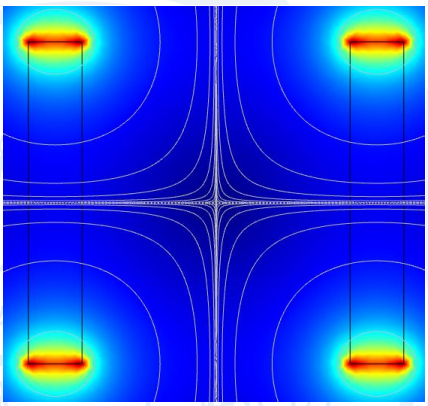
(c) 3维Helmholtz线圈

图 2.56: 磁场分布

- 磁场梯度：较大曲率磁极与两级距离较近的磁性可用于产生大梯度磁场(如Stern-Gerlach实验中的磁场)。相同磁极相对，中间也会有较大梯度，但存在磁场零点。较均匀的磁场梯度可参考马蹄形结构(如上面自制磁芯的模拟)。

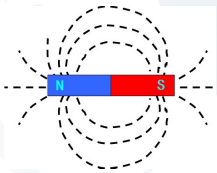


(a) 尖端磁场

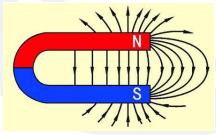


(b) 同磁极间磁场

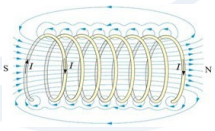
图 2.57: 磁场梯度



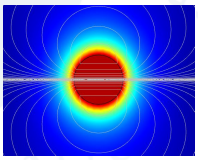
(a) 条形磁铁



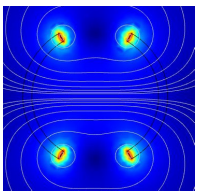
(b) 马蹄形磁铁



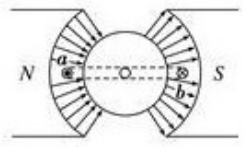
(c) 螺线圈



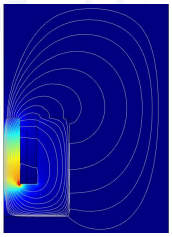
(d) 理想球形磁铁(伪)



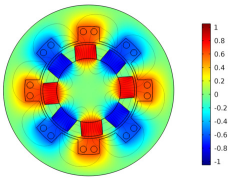
(e) 瓦形磁铁



(f) 瓦形磁铁+转子



(g) 罐形磁芯(线圈产生磁场)



(h) 多磁级(电机)

图 2.58: 常见磁场构型

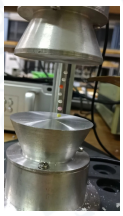
2.3.4 悬浮结构

悬浮结构可以实现小摩擦、无接触操作、测量微小影响等功能，可用于测量，转子制成、空间束缚。

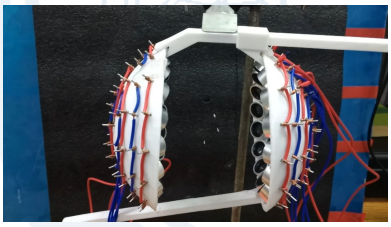
- 声悬浮：利用声波和物体作用的非线性效应实现悬浮，通常采用大功率超声或超声源阵列，可实现对射式悬浮或者单方向声源(两侧需要有π相位差)的悬浮。通过调节阵列相位关系可实现对悬浮物体的操控(类比空间光调制器对光的调控)，主要用于小密度、小体积物体的悬浮。复杂，成本高。
- 磁悬浮：首先静态磁场无法实现稳定悬浮。常用且可靠的方法是用几个线圈根据霍尔元件等磁场传感器采集到的反馈信息来提供动态磁场(如图)，实现上吸式或下推式悬浮，可悬浮的质量大，但需要被悬浮的物体有一定磁性(或者粘片永磁体)。制作时需要测量被悬浮物体的磁场-距离曲线，以通过测量的磁场推算物体距离，然后通过控制算法(如PID)根据电路板上的霍尔元件(线圈外)测量的磁场实时计算几个线圈的电流，将物体动态地稳定在中心。设计时可附加一块永磁体提供一部分磁场来较小线圈功率，同时需要仔细调节、提高PWM频率来避免悬浮时的振动，放置浮子时动作尽量轻，避免直接吸附撞坏器件。参考。

  采用旋转的方式也可以用静磁/电场实现悬浮(悬浮陀螺、离子阱)。

  用磁悬浮替代轴承(磁悬浮轴承)可减小轴摩擦，完全静态的悬浮轴结构(结构简单，较推荐)需要轴的一段顶在限位的壁上(采用尖端、硬质、润滑结构)，加入动态悬浮的轴承可实现完全浮空。



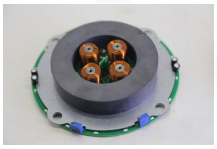
(a) 声悬浮·对射单振子



(b) 声悬浮·阵列



(c) 声悬浮·阵列



(d) 磁悬浮



(e) 磁悬浮轴承·静态



(f) 磁悬浮轴承·主动式

图 2.59: 悬浮结构

2.3.5 光照

- 调光路(部分)：不要触碰光学面！逐级调节，元件从少到多，从光源到输出。

可变光阑：在光路中加入光阑，在光阑变小的过程中其在输出屏上的像会聚集到后面光路的中心，但往往和屏上最亮的位置(整体光路的中心?)不重合，通过调节光阑后的元件并同时不断改变光阑通光口径，最终使最亮的位置与光阑汇聚的点重合，达到同心的效果。

CCD：用于观察光斑形貌和位置，光斑形状、光强的对称与否也反映了光路的同心情况，采用CCD可以更直接地得到光路中偏移的元件；而在判断光斑的平行性时，可通过CCD作为成像屏，然后在近处确定光斑中心和直径(比如在屏幕上用鼠标标注?)，然后远离(沿直线远离，很困难)后再次比较光斑，这种方法可用于较精细的调节。CCD前不加镜头，且调弱光强避免损坏CCD。

- 平行光路：并没有严格平行的连续光束。采用原本准直性较好的激光经透镜变换后获得长束腰距离的高斯光束(变换公式见光源部分)，即可在一定范围内当作平行光束。同时利用透镜焦距也可对光束进行扩束(大范围平行光、相干光[并不指空间相干性好])或缩束(提高单位面积功率，受透镜数值孔径、材料限制)。
- 4F成像：得名于采用两个焦距(F)相等的凸透镜组成长度为4F的成像光路，其中间可得到输入光场的空间频谱，可方便地加入一些元件对光场进行线性变换(最简单的是高/低通空间滤波)。

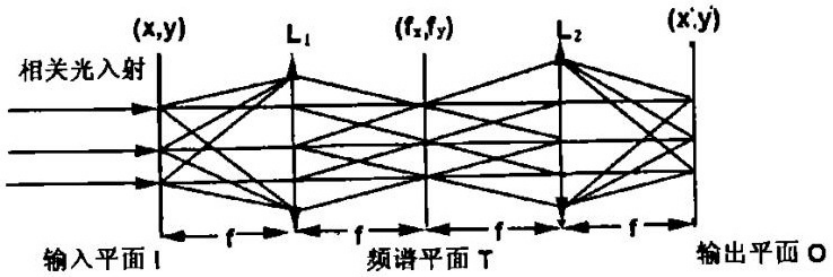


图 2.60: 4F光路

- 光强/光谱：两片偏振片可用于调节输出光强(强激光会损伤偏振片，需要预先扩束或衰减)，也可对激光电源采用PWM进行调制，得到不同的平均功率。光照的光谱可用滤波片串联或者单色仪进行选择，但会降低光照效率。对于窄光谱可用合适波长(或可调谐激光)的激光作为光源；用于成像时尽可能用非相干的光源，如用滤光片或单色仪对氙灯选择所需波段。
- 遮光：构造黑暗环境，黑色糙面材料可以很好地用于吸光，如采用铝型材和雪弗板搭建暗室。但黑色材料由于吸光较强，暗室内有大功率激光时会产生火灾危险(尤其是不可见激光)。这种情况可换用白板密封，虽然会增加散射光。此外回射入激光器的激光功率太强时会损坏激光器，可在调节时略微偏转第一个器件的反射平面，避免反射光点射回激光器，或者加入基于偏振和旋光效应构造的。
- 滤光：

  偏振滤波：偏振片、组合棱镜(忘了名字了。。。)、偏振分束器(PBS)。主要参数为通过偏振的透射率和通过偏振与阻碍偏振透过率比。

频率滤波：即所说的滤光片。从原理上可分为吸收性滤波、干涉滤波、原子旋光滤波。吸收性滤波透过频段到吸收频段间过渡较宽，但使用时滤波效果与入射方向无关，可用在汇聚或发散的任意光路中，用于强光滤波时，要避免吸收的光强太大而局部烧毁滤光片。干涉滤光片通过多层不同折射率的膜间的干涉进行滤波，根据预先计算的每层膜厚度(如两种折射率的膜交替叠加形成具有透射禁带的光子晶体)采用R2R、沉积等方式制成，可获得很陡的过渡带和可见+红外波段几乎任意位置的滤波。且滤除效果更好，但干涉原理使干涉滤光片需要以特定角度入射(多为平行、45°入射)。原子滤光器通过磁场中的原子蒸气的在能级间隔附近频率的旋光效果加上前后正交的偏振片组成滤波器，通过光的波段可以非常窄，但通带频率关于能级间隔对于频率对称，周围有一些通光旁瓣。

2.3.6 力/形变

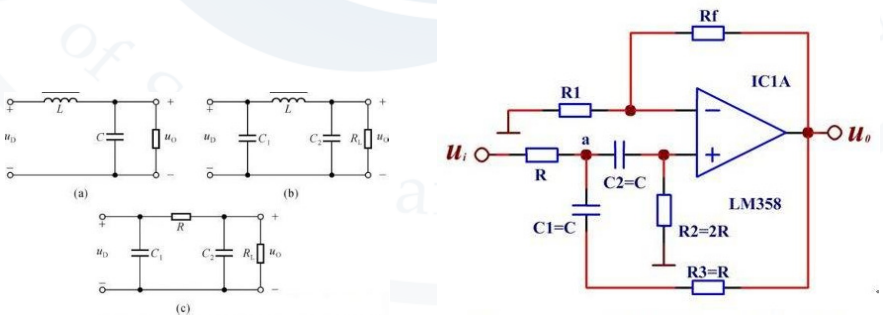
因为形变往往会产生作用力，并且在足够小的形变范围内力与形变可认为是线性关系，所以此处将力和微小形变放在一起，将两者联系起来得到力与形变的比例系数。

- “电子秤”：基于应变片测量形变或力(用已知大小的力标定后可以得到形变-力转换关系，所以后面以形变代称力)，可将应变片粘到不同材质的金属上以满足不同大小的形变或不同灵敏度的力检测，软金属片灵敏度高但测力量程小，硬金属片则要注意其本身的振动带来的测量影响；改变金属片长度也可相应改变形变测量的灵敏度和量程，但要避免应变片形变太大，以至于进入非线性区。
- 光杠杆：采用杠杆结构放大位移，近支点的一端接触小位移，在远支点的一端得到放大的位移，利用光线代替杆，并将小位移转换为平面镜的转动，则光点的反射端再原有距离放大效果的基础上再得到两倍的放大。若可制作出跟随振动形变运动的端点和不随振动运动的支点(或制作一个随振动而改变角度的反射面)，这可通过另一段位移的最大距离得到振动振幅(用激光光杠杆的输出的话，可以很方便的拍到光点因振动而形成的一条光线)。
- 仿杨氏模量：采用最基础的测力＋测形变的方式得到弹性系数，或进一步得到杨氏 / 切变模量。力可用已知 / 可测质量的物体代替，并通过读数显微镜(可横置)、光杠杆、高倍摄像机等得到微小形变(因为要保证测量部分在线性区，同时避免无外力时的松弛状态)，通过计算得到弹性系数等性质。弹性物体测量或使用是要考虑其自重是否产生影响。
- 气压计改液体压力计：通过在气压计测量孔处密封粘连一段不影响流场的细管，比如毛细玻璃管，并保证管中可密封一段气体，使流入管道的液体保持水平，避免引入压强差，并不接触气压计，避免短路，则可将气压计用于流体中压力的测量。

2.3.7 采集电路

对于模拟电信号在使用ADC采集前，可通过滤波与放大电路优化信号质量，提高数据的信噪比并充分利用ADC性能。

- 供电电路：初次接触信号采集，最易被忽略的噪声源估计就是供电了。其引入噪声的方式最常见的是来自市电工频50Hz的干扰，其分布广，主要通过空间感应的方式耦合到电路中，但其并不稳定的电压幅度也会使供电电路输出发生脉冲或周期性波动(尤其是同一线路中有大功率用电器件时，如电梯、空调)。没有屏蔽罩的大电流的开关电源同样会因开关器件快速闭合断开而产生较强的辐射，若输出端没有足够的电容则也会因幅度波动而对其他元件产生影响。这些波动的电源在用于ADC参考电压和小信号测量时会产生强烈的干扰，必要时可采用电池供电。
- 滤波电路：即除去软件滤波算法之外的硬件滤波。根据电路中是否有需要电源的器件(主要是运算放大器)可分为有源滤波器和无源滤波器，无源滤波器电路较为简单，也能实现可以接受的效果，同时可提供较大负载能力，最经典的结构为π型滤波器(因为长得像个π)。滤波过程中要注意滤波电路的滤波范围(预先计算)。有源滤波器效果和通带均更易调节，但电路结构会更复杂。一些芯片中可能会带有滤除50/60Hz噪声的滤波电路。
- 滤波电路设计：基于频域的滤波电路主要性能参数为截止频率(对信号幅度衰减-3db[对应幅度下降到$\frac{1}{\sqrt{2}}$,能量下降到$\frac{1}{2}$]的频率)，通带(对信号衰减较小或不衰减的频段)与阻带(对信号衰减较大的频段)纹波系数(相对波动幅度)，过渡带宽度(从通带到阻带的频率间隔)和相位响应。截止频率决定滤波器的通带阻带位置，设计时应使需保留的信号频段在通带内，噪声对应的频率在阻带内。通带内的波动会造成不同频率信号相对幅度改变，信号发生变形；过渡带宽度决定引入滤波后信号中的噪声强度，当存在和信号频段相邻很近的噪声频段时，应使设计的滤波器过渡带足够窄(多为高阶滤波器)。滤波器的相位响应影响信号不同频率信号的相对延时，线性相位响应表示各频率延迟时间相同，否则会造成信号的非线性变形，一般由电路元件构建的滤波器只能在一段频率内近似有线性频率响应，采用数字滤波器可通过设计具有在时间上奇/偶对称的脉冲响应函数的滤波器实现线性相位响应。



(a) 无源滤波·π　　(b) 有源滤波器

图 2.61: 滤波电路

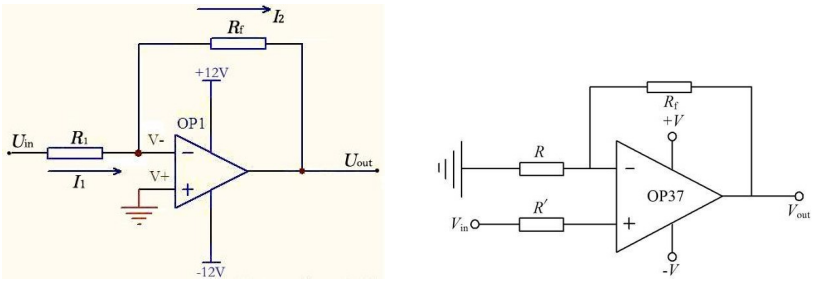
- 放大电路：在避免引入高噪声的同时对输入信号线性放大(但电元件的放大一定会降低信噪比)，可以充分利用ADC采样位数以提高对电压的分辨精度。放大电路同样有线性放大范围和饱和值。为放大差分信号，常常需要为运算放大器芯片提供

双电源供电(需要连接地线)，若只需要放大交流信号，则在芯片前加入偏置电路也可通过单电源供电实现差分交流信号的放大。此外，除了信号幅度的放大外，运算放大器还可以用于改善信号品质(比如电压跟随器):利用运算放大器高输入电路的性质获取较大的信号幅度，同时较小的输出电阻使后续电路获得较大的输出信号幅度。

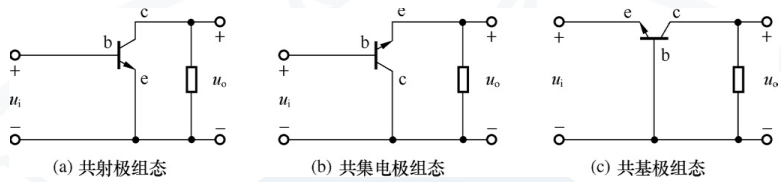
反相比例电路($u_{OUT} = \frac{R_f}{R_1}u_{IN}$，会加入$\pi$相位差)和同相比例电路($u_{OUT} = (1+\frac{R_f}{R})u_{IN}$)几乎是常用的放大(也能缩小)信号的电路，选择电阻时不要用太小的电阻(会降低输入阻抗，使电路获得的信号分压减小)，也避免使用太大的电阻(影响内部半导体结构，可选用$k\Omega$量级[?])，同时可将一个电阻焊接为电位器便于调节放大倍率。单个运放不建议设置太大倍率的电阻，比较差的运放在10^2量级即可，太大则会易产生噪声或失真(换用高更高级的运放当然也能部分解决问题，只要有钱……)，高倍率放大可用多个运算放大器级联实现。若电路中有其他元件引入相位差则可能使电路产生自激振荡。(下图的三极管放大电路仅做原理性说明，三种放大方式有不同的特点与用途。但各项性能均不及运算放大器芯片)

对于信号，可先滤波再放大，但如果信号非常微弱，则只能先放大后再滤波，如果有条件的话采用滤波-放大-滤波电路。

极微弱或者被噪声淹没的信号需要特殊的测量仪器和方法。极微弱的信号需要选用具有高倍率内放大的传感器(如光子探测用的光电倍增管、雪崩二极管)，避免采集到的信号在后续引入相对太强的噪声(估计用不到，如果出现这种情况要么估算错了，要么方法不合适)；而后者可以采用锁相放大(产生一个与测量信号相关的信号[理论上是一个同频正弦信号]与输入的噪声+信号相乘、调相、检测)的方法测量信号，但要选择合适的工作模式(估计也用不到，用到再看说明书)并提供与测量信号的相关的信号。

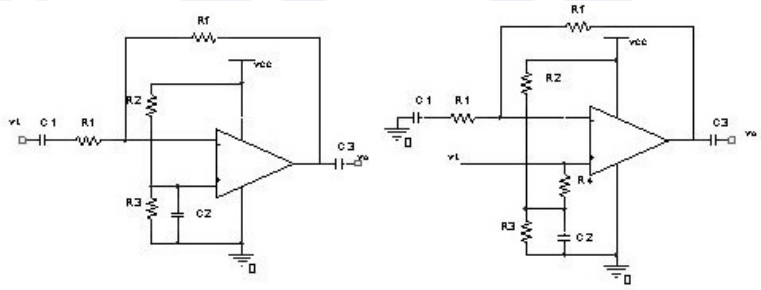


(a) 反相比例电路　　(b) 同相比例电路



(a) 共射极组态　　(b) 共集电极组态　　(c) 共基极组态

(c) 三极管放大电路



(d) 直流偏置放大(电容用于滤除直流分量)

图 2.62: 放大电路

2.3.8 功率放大

通常各种波形的信号可以很容易的通过信号发生器或者单片机+DAC产生，但可用于驱动大功率声源、光源等需要较大功率器件的信号往往很难直接产生，所以需要将非功率信号通过功率放大器(功放)后再作为驱动源。有些功率放大仅需要大致还原波形(或者有用的只是占空比)，其要求低，甚至可直接用大功率MOS管作为电子开关放大功率；有些则要求尽可能完美地还原波形，此时则需要考虑交越失真、频率响应等因素。

常见的功率放大可分为模拟和数字式的，对于前者，往往通过变压器、三极管或MOS管等对信号进行放大，其线性放大范围应在半导体器件线性工作范围内，仔细选择器件的参数可以实现高频段或脉冲信号的放大。对于后者，可认为采用输入信号对一个方波(或者说开关)进行调制，得到频率变化的方波信号，而方波信号可通过开关电路较简单地放大输入方波，放大后的波形经低通滤波后可以得到原输入信号的放大信号，这种方法由于低通滤波的限制，导致不能用于高频信号或脉冲信号的放大。

- 变压器：最简单的功率放大器，理论输出波形为输入波形对时间的微分，考虑到电路中的阻抗，输出多会变形。放大倍率等于两边线圈匝数比，同时有一定相位差(与电路中的阻抗有关)。购买成品变压器要注意选择合适的频段、功率限制和匝数比。自己制作也要根据电压频率购买合适的磁芯(频率越低磁芯越大)。

- 功放芯片：功能更强大的放大方法，利用晶体管结构在一定频率、功率范围内放大信号。较多的用于音频放大，所以容易找到的芯片使用频段多为100Hz到10kHz。一般运算放大器也能有微弱的功率放大作用，但最大输出功率很低，所以不能混用运放/功放。功率放大芯片常需要配备散热片，需要提供稳定的大功率直流供电，一些功率更大的放大器似乎只能通过焊接独立元件电路满足功率需求(高频、任意波形、大范围阻抗匹配、大功率放大建议还是买成品吧，设计需要丰富的经验，且元件也比较贵)。

2.3.9 孔结构

一个比较冷门的实验方法，用来制作一些微孔结构，如作为喷口、衍射孔或光阑、以及一些多孔结构的特殊用途。

- 激光：高强脉冲激光专业打孔，可切割较大异形孔、可烧穿微型孔(< μm)，陡峭边缘，可数控。使用不当则极度危险。
- 机械方法：钻台打孔(木、金属、玻璃、塑料)，加热细丝后熔孔(塑料、蜡、玻璃)，针尖磨孔(金属箔、膜)等方法可以方便地加工一些> $10^2\mu m$直径的孔(高级数控机床可能可能可以更小？)，后两种需要手动加工的方法位置与直径误差均较大，但很实用。
- 溶解：用于制作多微孔结构或较大的孔结构。涉及化学方法，比如在液态基底制备时，在基底凝固前加入微型不反应的液滴，并在凝固后蒸发或其他方式去除得到分布有微孔的基底，比如以蜡为基底，表面引入水滴制作表面分布有小坑的蜡表面(虽然这个不知道有什么用，而且也很难做出来)。另一个方式是直接用化学物质溶解基底表面结构，使其凹陷或穿孔，比如玻璃雕刻，芯片开盖，这种方法因为不能控制化学物质只向下反应，所以孔边缘较平缓，而且往往尺寸较大，一些材料可预先用其他方法在表面制作一个沟槽来限制溶解或者表面铺设一层不反应的物质。用来腐蚀的物质多会腐蚀皮肤，所以小心使用。
- 3D Printer：直接打印一些微孔或特定尺寸孔结构。在> $10^2\mu m$直径时精度较高，光固化方法精度可更高一些，但允许的材料受限。线材打印时需要注意不要堵塞喷头，见 3D打印部分。

2.3.10 薄膜体系

另一个冷门的实验方法……制作一些薄膜作为较小厚度的材料或者在薄膜中溶解一些粉末材料来调节薄膜的辐射、透射、导电性、铁磁性等特性，但需要预先考虑薄膜基底的这些性质。这里不包括真空蒸发、磁控溅射等镀膜方法。

- 蒸发：将液态原料(如硅胶+固化剂，环氧树脂胶水等)先制成薄膜状后，等待其蒸发凝固后得到薄膜。制成液态薄膜的方法有旋涂法、提拉法，以及薄膜孔(随便编的名字……)，液态原料更易分散粉末，并且不需加热，使用方便。旋涂法有专业设备旋涂机可用，当然也可用电机自制一个旋转平面进行旋涂，滴液旋涂前先选择易取下薄膜的洁净平面，通过旋转确定旋转平面中心，用双面胶或真空泵固定

基底，滴液后用低转速简单铺开液滴，然后换用高转速得到需要的薄膜，薄膜的厚度可以通过转速控制，高速时要避免选用质量较大的基底。提拉法为将一片基底(玻璃或金属)浸入原料后，然后缓慢提拉基底，待粘到基底上的一部分原料凝固后再继续提拉，不过这样得到的薄膜厚度与原料粘度有关，而且如果提拉不均匀，薄膜会用一层一层的纹路，多次提拉可增加薄膜厚度，单次提拉得到的薄膜很薄。另一种方法为在一张成品薄膜(普通塑料膜、硅胶膜、胶带)上裁剪出一个孔并粘附到一个基底上，然后将液态原料滴入孔中，用刀片等刮平并布满薄膜的孔，待其凝固后得到需要的薄膜，可通过成品薄膜的厚度和孔的形状控制制作的薄膜(虽然凝固后会变薄且表面凹凸)，同样的方法也可用于制作粉材薄膜。将薄膜孔换作3D打印出的模具则可浇筑对应材料的立体零件。

- 热压：一些具有热塑+热熔性的塑料(如PMMA、TPX)可以通过对原料加热后挤压的方式制膜。为避免薄膜破碎或有较多气泡，一般只有块状原料可通过直接挤压得到薄膜。加热可用电热丝加热硅胶/金属滚筒，或者红外灯管近距离照射(参考滚筒塑封机结构)。同时为避免粘连，滚筒需要选用特殊的材料或者在出口处风冷降温后剥离(参见风刀)，用刀片剥离或许也可以？用与滚筒不粘连的膜材料(如金属片)包裹原料后挤压也可制膜。粉材或颗粒原料需要加热后排除气泡，然后挤出融化的原料到滚筒，然后挤压制膜，不过这个方法不易自制。融化原料时要注意控制温度与氧化情况，粘稠的融化原料均匀地分散粉末也较困难。

2.3.11 3D打印

3D打印机大概是购买的性价比最高的设备了，极大地扩展了零件制备类型和方式。其一般有两种：线材打印与光固化打印，近年也出现了可以打印某种金属材料的打印机。线材打印为将塑料线材通过一个加热的喷头融化后，用电机控制喷头与一个平面(热床，可以升温，便于模型粘连到热床上)做3维的相对运动，同时喷头挤出塑料细丝，使塑料细丝很快固化并粘连到一起，喷头先水平运动构建出模型一层的塑料丝，再竖直移动一定距离构建下一层，最终组成一个模型。光固化为使用投影系统将模型的每个横截面投影到光敏树脂材料上，使材料与周围粘连并固化，固化好一层再铺设新一层材料并投影，直至完成模型的打印。

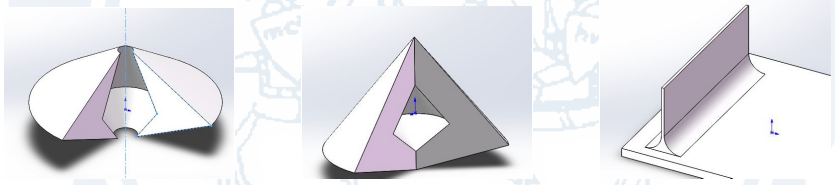
3D打印的流程：3D模型构建$\Longrightarrow$适用于打印机型号的切片软件进行切片，生成与3D模型对应的喷头路径文件(线材)或光束整形文件(光固化)$\Longrightarrow$导入3D打印机设置参数并开始打印。

本节介绍3D打印的模型设计方法和一些结构设计中的注意事项；切片软件参数设置的说明和不同模型打印时的参数推荐；打印出的模型机械与热学性能以及3D打印的一些例子。

2.3.11.1 模型设计

模型设计以SolidWorks软件的功能为基础，AutoCAD等软件也有类似的功能。

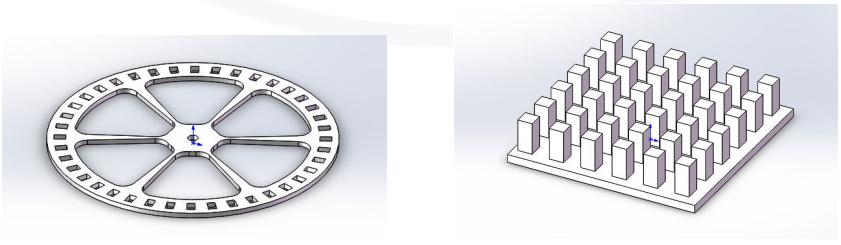
- 轴对称旋转：圆锥、圆柱等轴对称模型采用旋转拉伸的方式设计更易调节夹角、半径的几何参数。需要在草图中画一根单独的线并设为构造线来作为旋转轴。
- 薄壳：为减少打印材料的消耗和打印时间，可将一些实心部分设为薄壳结构，或者用于设计薄壳容器。可在建立物体时通过在草图中用等距线生成薄壳边界，或者在画好实心物体后，使用抽壳功能，选择需要去掉的面以得到薄壳结构。
- 圆角/倒角/筋：在一些直角或小于直角的转折点添加圆角可使模型更加圆滑不易磨损，但圆角更大的作用在于强化连接。尤其是小面积的垂直面的连接会因线材打印的层打印的方式而不太牢固，直角连接较易折断，所以为提高连接的机械强度，可在直角处添加圆角或倒角，比如直接在草图上画出或使用圆角功能，后者需要注意半径设置不能大于连接的两个面的最小长度，圆角功能也可对面或棱圆角化。筋也是一种加强连接的方式，但以在两个垂直面之间加一个斜支撑用于使连接更牢固，但耗材较多？圆角还可以在不使用支撑的情况下打印一定长度的悬空结构(线材打印，光固化可用为所欲为)，由于线材打印的层与层之间可有一定的向外延申，所以只要延申角度足够小，就可以在不添加支撑的情况下打印出有一定小角度的悬空结构，经测试，延申角度与水平夹角45°是可以打印的，圆角/倒角则提供了一种添加这种延申结构的方式，并可使用不对称圆角/倒角在打印成功的同时减小材料使用或打印时间。



(a) 参考轴线　(b) 中心轴线　(c) 圆角结构

图 2.63

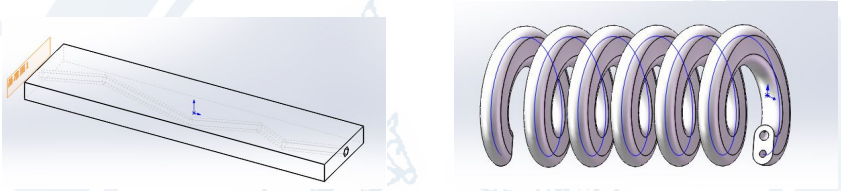
- 阵列：简单易用的复制功能，有线性阵列与圆周阵列两种。线性阵列可选择面为阵列方向(即垂直面的方向)，每个单元间的尺寸是边到相同边距离，而非两个单元相邻边的距离，最多实现二维阵列，将‘阵列’单元进行阵列可以实现三维线性阵列。圆周阵列选择点/圆周为阵列中心，间隔可以设置角度或360°内的单元数。若设置的参数产生的复制单元与已有实体没有接触，则软件会报错，这时应添加用于支撑复制单元的底面或更改阵列参数。



(a) 圆周阵列　(b) 线性阵列

图 2.64

- 几何关系：非常重要的功能，用于确定线、间隔、半径的长度或之间夹角。需要注意标注的长度方向(比如斜线的长度、水平投影长度、竖直投影长度)，标注的尺寸也不要拖拽的太近或太远，不利于之后的更改。可在非草图窗口中显示出注解尺寸，然后直接更改来改变模型尺寸，所以建议模型的所有边均进行尺寸标注或添加几何关系(见后)。
- 扫描：用于设计非直线的管道或柱子。需要构建管道或柱子的中心线，然后使用扫描功能拉伸或切除，其截面可为预设圆形或另一个与中心线相交的草图。若中心线有交叉或小夹角，则在使用太大的截面进行扫描时会报错，这时可以重新设计或分段扫描。
- 螺旋线：曲线功能中有预设的螺旋线，定义螺距、方向与圈数，可配合扫描功能绘制螺纹或弹簧结构。
- 新建平面：Ctrl+拖动已有平面可以生成新参考平面，并可以定义新平面与原平面的间隔或夹角。用于在实体的不能找到基面的位置镂空或者拉伸凸台，尤其是在曲面上进行操作。新平面也便于使用‘拉伸/切除到平面’的功能。



(a) 新建平面+扫描切割　　(b) 螺旋线+扫描凸台

图 2.65

- 视图：准确说是视角和模型的边缘表示方式，合适的视角利于方便定义几何关系(所以生成草图后转换到垂直草图视角)，对需要展示的模型截图时也要选择一个可以反映整体情况的视角。模型的边缘可选择是否遮挡、实虚线等，无遮挡情况下便于选择一些孔洞内部的面或边缘用于操作。
- 外观：用于需要将所建模型截图并展示。为不同面设置响应的颜色和材质可以更好地区分不同零件，设置颜色/材质时，若对几何体设置，则其每个面均会变为相同颜色，所以如需要区分不同表面状态，对面进行颜色/材质设置。材质可以表现表面的纹理、反光、透射特性，也会用于其自带的模拟程序的参数设置。

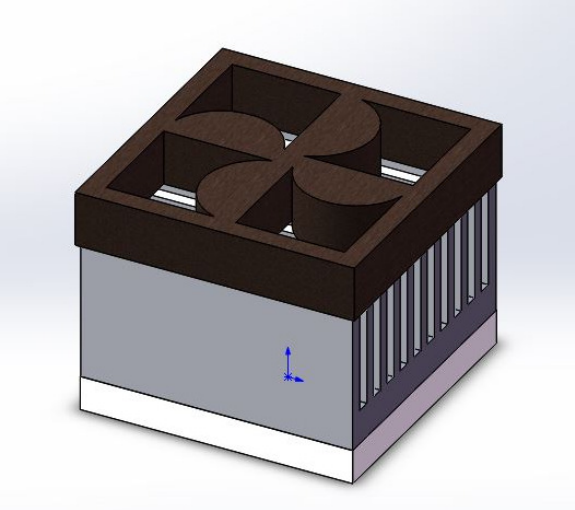


图 2.66: 外观与材质

- 输出格式：3D打印格式一般为STL或3MF格式，文件直接存储3维几何体形状信息；一些铣床、数控机床需要DWG或DXF格式，只存储一些选定的视图的信息。SolidWorks本身有一套文件格式，可用于SolidWorks加工或导入一些模拟软件中(如COMSOL)。
- 尺寸设置(线材3D打印)：为了使模型与实际尺寸匹配，在设置尺寸时，由于打印的线材宽度和打印误差等因素，并不能完全按照测量的尺寸进行相同设置。根据经验，线材3D打印机对于小尺寸(限制长度<1cm)的模型，内尺寸增加0.2mm作用，外尺寸减小0.3~0.4mm；而较大尺寸的模型尺寸变化要大一点，比如内尺寸增加0.4~0.6mm，外尺寸减小0.5~0.8mm。(以上参数仅针对咸鱼打印机，有些高端设备精度更高一些，但也要考虑尺寸余量)

2.3.11.2 切片

仅介绍需要注意的参数设置，一些高级设置或者不太重要的设置请自行查看说明书。且本节的推荐参数均是根据两台打印机总结，不同的打印机建议预先打印一些小物品进行测试。

- 壁厚：打印件机械强度的主要决定因素，一般侧壁与上下壁厚度分别设置，0.8mm左右可满足大部分需求，承重大时可以适当增加壁厚，但打印时间会加长，也会受材料的层与层粘连强度限制。
- 填充：另一个决定打印件机械强度的因素，填充为模型实心结构内部的打印方式，100%填充即实心打印，强度高，耗时长，耗材多，非100%填充为按照一定纹路打印内部结构，有一定支撑作用，同时也便于打印实心结构的顶面。对强度要求不高的情况下，推荐20% ~ 60% 的填充，具体值根据打印机设置而定。
- 精度：打印机精度分为竖直精度和水平精度，一般可调的为竖直精度，决定每层的厚度，可设为较高的精度，而水平精度由于传动装置结构的原因，一般低于竖直精度，误差在0.2mm左右，光固化打印水平精度同样受限于投影光路系统，低端打印机为10μm左右。精度需要根据模型的最小尺寸设置，或者一些对位置要求高的零件(如同心系统，光学元件的固定底座)可以使用高精度打印，一般零件的

话0.2mm竖直精度即可。高精度打印耗时长，且喷头不连续地出细丝也比较易堵。

- 底座：为提高打印模型的底面质量或者增强与热床的粘连程度，切片时常需要加一个底座。底座主要有3种，模型周边打印一圈线，模型底部没有打印额外部分，所以并不能对模型的粘连有什么影响；在模型底部的边缘扩展一段距离(3~10mm)打印一层边带，用于扩展边缘与热床粘连面积，用于小面积的底部接触情况下；在模型底部打印一层较厚的约4层线厚的底座，从下到上线径逐渐变细，然后模型在该底座的基础上打印，较厚的底座便于消除热床的不均匀程度，使底面更平滑整洁。底座设置太大耗时长，且超过一定厚度或边缘宽度厚对粘连性能提高帮助不大。
- 支撑：用于打印支撑悬空结构的，在悬空部分下打印一些非完全接触的竖直支撑，然后在支撑的基础上打印悬空层，打印完成后在去除支撑部分，所以不要在封闭的内部打印非溶解性的支撑。短距离的支撑较易打印，太高的支撑失败率高。
- 速度：高级设置中可设置变速打印，常速设置会影响喷头的移动速度，但不建议在切片时修改，打印过程中根据打印情况修改速度更合适。

2.3.11.3 打印性能

- 温度：打印过程中热床在数十摄氏度范围，喷头在100~300℃左右，不同材料温度不同。打印的模型也会因为加热而软化或分离。根据经验，水溶性材料不易粘连，打印温度低(150℃/40℃)；ABS材料本身硬度较高，但粘连差，打印温度与热床高(270℃/80℃)，可溶于丙酮，且打印时会有有毒气体；PLA材料易软化，打印温度较ABS低(210℃/60℃)。塑料材料在打印温度的80% 左右即会软化，软化后可以略微变形处理。(温度参数为根据一台具体的打印机设定，具体材料和打印机型号需要根据说明推荐设定)
- 速度：打印速度主要受喷头的移动速度和停顿时间限制，打印过程中或者切片时候调节温度主要影响的是移动速度，所以对于停顿较多的模型，提高打印速度并不能显著较小打印时间。打印速度太快会使层与层粘连变差，且水平尺寸偏差增加，使表面更加不平滑，也容易碰掉模型。为了兼顾打印时间和强度，建议底座和底部的粘连层采用较慢的速度进行打印，在保证粘连强度后，再提高打印速度。建议不要超过200%。
- 软化与再加工：若打印出的模型尺寸与预设尺寸有些偏差，可用热风枪或喷枪稍微加热模型，使其软化后调整尺寸。一般软化的温度为150℃左右，但不需要严格控制(总之凭经验)，过高温度会烤焦塑料。
- 磨/打孔：线材模型加工时与其他材料的加工会很不同，打磨或打孔会因温度太高而软化变形，且加工的边缘会出现线材的毛刺，所以若毛刺对使用有影响可以在加工后用加热的金属片去掉边缘。
- 强度：打印模型的承力能力与表面硬度。硬度由材料决定，ABS>PLA>柔性材料，层与层之间粘连不牢的高精度打印模型也会使表现出的强度降低。承力能力首先受模型的设计影响，此外打印的壁厚和内部填充比与填充结构有关，壁厚影响较

大。另外力对模型的作用方向与层平行时也会使可承受的力降低。

- 精度：一般线材打印的表面都会一些线状纹路，大概有0.3mm的起伏，且随设置的打印精度提高而减小，而与光滑热床的接触面可以达到较光滑的表面。小半径的部分由于有限线宽会使打印精度差。若需要平整的打印表面，可以打印后在表面涂一层较薄的胶或粘贴宽的硬质胶带来抹除表面的起伏。
- 柔性材料：如TPU材料，可打印柔性模型，但层与层接触不是太好，也可用硬性材料打印模具，然后用硅胶浇筑制作柔性模型。
- 导电材料：掺有石墨的塑料材料，导电率并不高，粘连同样不好。
- 荧光材料：比较好看，嗯。
- 水/酸溶材料：一种适合打印浇筑模具或支撑的材料，打印支撑需要使用双喷头的打印机。热床温度低，粘连差，水溶材料溶解后会成为絮状材料，酸溶材料使用柠檬酸进行溶解，相比而言酸溶材料更好用一点。
- 光固化：采用紫外光进行固化的材料，水平或竖直精度很高，打印表面较光滑，且速度快。不过光固化打印机最大的可打印模型比较小。材料很贵。。。

2.3.11.4 打印机使用与维护

- 热床调平：热床调平是打印机第一次使用时必须要进行的步骤，需要调整到喷头到达竖直方向的最低点时，和热床之间的距离可以使大概两张A4纸厚度的纸片恰好无阻力通过(有些打印机会配有标准厚度片)，但一般恰好无阻力不易判断，可以调节到和喷头有细微摩擦的情况。并且许要对热床的多个点调平(如四个角附近和中心点)，调平过程中每次只动一个螺丝达到理想高度会更容易些？每次动多个螺丝会导致对其他点也产生较复杂影响。喷头和热床的移动要预先解锁步进电机，有些打印机有调平模式可以自动移动。喷头和热床距离太大会导致粘连不牢，太小则挤出细丝的阻力变大，导致喷头堵塞(可以听到喷头内步进电机尺寸打滑的声音)。
- 热床焊接：热床采用加热片加热，连接的导线较粗，且会随热床移动反复弯折，所以焊接时需要用大功率的烙铁焊接，或者可用喷枪焊接。若觉得焊接不牢也可用耐高温的胶进行固定。
- 热床粘连：热床与材料的粘连是线材打印中决定成功率的重要因素，尤其是较高且与底面接触面积小的模型。而热床表面均声称有一层利于粘连的涂层，且材质和温度也均不同。对于比较差的热床，若涂层没有效果，则可以在模型打印出一段高度后再用热熔胶粘连到热床上或者打印前先在加热好的热床上用热熔胶棒略微涂一层以加强连接。在热床上涂一层ABS的丙酮溶液也可以显著改善粘连强度。

- 更换细丝：更换细丝时，需要先加热喷头，等到温度达到打印温度左右时(并不需要完全达到打印温度)，按下喷头上的卡扣，抽出/插入细丝，插入细丝前为避免细丝偏折，需要预先拉直约5cm左右的细丝，插入时保持对准，当插入后可以稍用力推进细丝，并可以看到喷头口有细丝挤出，则为安装完成。打印时不同材料注意

设置不同的喷头与热床温度。

- 电机控制：一般使用步进电机控制喷头或热床的移动，在驱动器控制电机时，电机为锁死状态，所以不能自由移动，当解锁后(Motor Disable)可以自动移动热床或喷头。
- 温度控制：在打印前通过打印机功能键预先设定温度，减少等待时间，而打印过程中调节温度也可以实时改变打印情况，喷头温度过高会出现不能及时冷却，而产生牵丝，过低则不易挤出，且层与层之间粘连不牢；热床温度太高会使模型易软化，打印的模型中途易脱落，过低则不易粘牢，但对温度设置不敏感。
- 堵塞：喷头温度设置不合适或者在用很高的精度打印时断时续的模型(如孔结构，栅栏结构)时喷头易发生堵塞，可以高温加热喷头，然后用细丝疏通喷头。为防止打印过程中发生堵塞，可在打印易堵的模型的同时打印一个使喷头连续挤丝的模型(如一段圆柱)。
- 传送皮带：喷头的三维移动一般有两个轴通过皮带或吊绳牵引移动，所以由牵引控制的运动方向的精度并不高，而且若齿轮和皮带间卡住或皮带磨损导致有相对滑动会造成打印模型在中间发生偏移，所以使用前需要检查皮带的松紧与是否有异物，皮带太紧也会因为电机扭力问题而发生滑移。

2.3.11.5 例

- 薄片/壳结构：厚度1.5~2mm即可满足大部分要求，但不要薄于1mm。直角接触的地方加圆角以加强固定。
- 同心性：可用于管体的固定，或者转动结构的轴部固定。

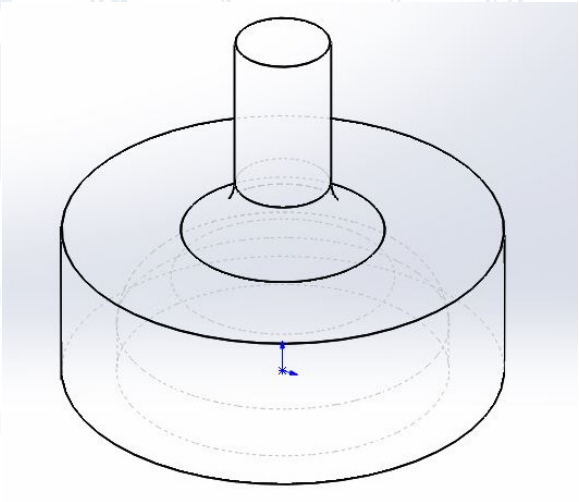


图 2.67: 管道接口·同心

- 固定位置：比如光路的调整与固定，或者其他需要限位、保护的器件，如电路板，需要考虑孔或支柱的位置、圆角固定、紧固方式。边缘处的圆角可能会是固定元件与模型不能完全紧密接触，从而造成尺寸偏差。
- 螺纹：采用螺旋线+扫描作为凸台或切割可设计出螺纹结构，内螺纹可作为螺丝的孔位使用，但需要用较高精度进行打印，外螺纹强度不足。需要预先测量好螺丝

的螺距、沟槽深度、螺旋方向等参数，预留尺寸可以小一点。

- 支架：3D打印最常用的功能，需要测量好尺寸以及预留尺寸，若实际尺寸难以测量可考虑先打印一个大概尺寸的模型，然后然后通过加热软化修正或者用打磨等方式再加工。受力结构需要加宽支撑部分，然后再转折处添加圆角或倒角。

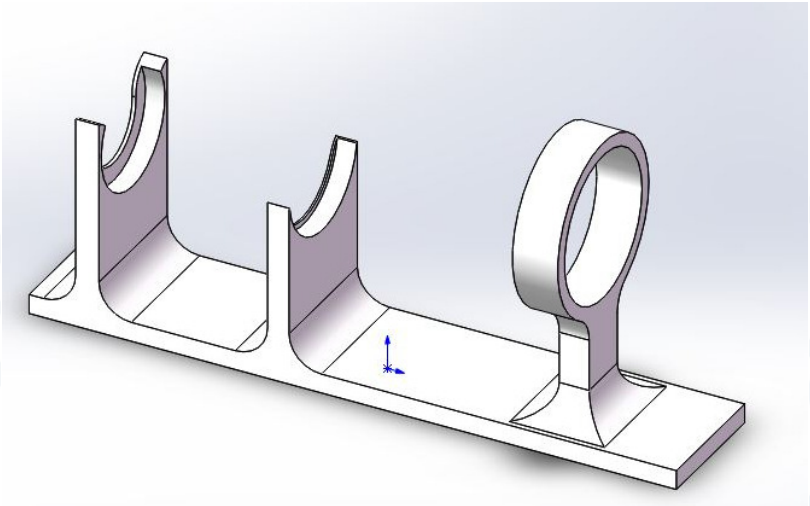
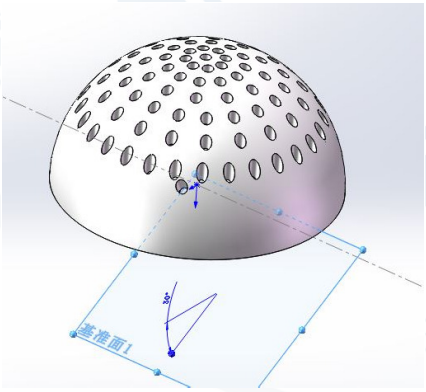
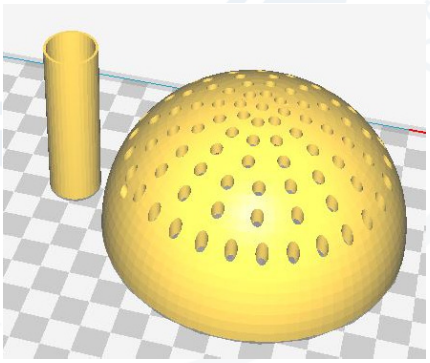


图 2.68: 光学元件支架

- 管道/孔打印：封闭管道需要考虑管道和支撑方式，管道宽度太大则会无法直接连丝到另一边，使管道顶部变形，又由于较长的管道不能添加支撑，所以可以采用加圆角的方式代替。微型管道需要考虑线材打印产生的表面起伏对流动的影响。孔结构或者圆顶结构则会因打印线宽有限而会产生很大的缺陷，比如很不光滑的球内面和变形的小孔结构。另外打印多空结构时，若采用较高精度，会因为挤线的断断续续而易发生喷头堵塞，解决见上。



(a) 模型(斜参考面与圆周阵列)



(b) 切片

图 2.69: 多孔结构打印

- 多模型打印：多个模型可以同时切片并打印，且排版距离较近也可以节省底座的打印面积。但建议较大的模型不要同时打印多个，避免一个模型的失败导致其他模型失败，小模型打印多个时排成横竖对齐时可减少喷头在不同模型间移动的时间。但效果并不一定明显，因为小模型打印时间都较短。

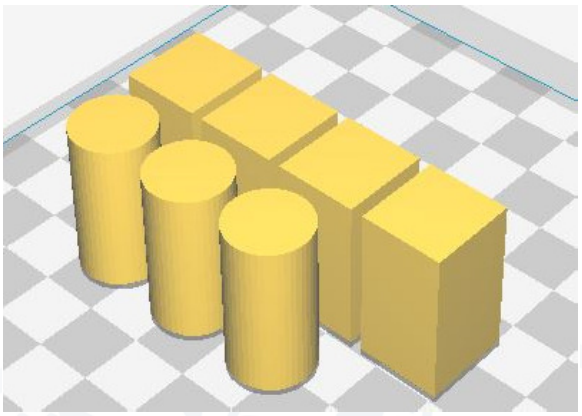
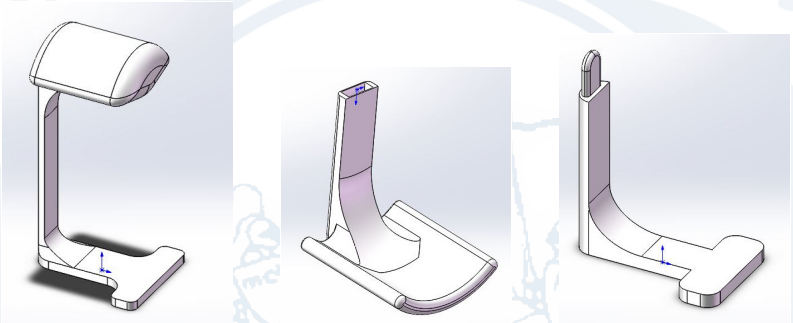


图 2.70: 多模型

- 拆分：当模型太大或者不能使用太多支撑破坏表面时，可将模型分拆称小模型，并构建接口结构，分开打印后再粘连到一起。



(a) 整体模型　(b) 分拆1　(c) 分拆2

图 2.71: 拆分

2.3.12 常见仪器说明

本节介绍示波器与信号发生器的部分功能和主要参数，型号不同按键也不同，但功能类似，所以使用前查看说明书。

2.3.12.1 示波器

信号测量仪器，一般为16位精度，>10MHz的采样率，且价格较贵。

- 参数：

  频率：即通道采样率，有粗细调两种调节方式，若有两个旋钮，则分别为粗细调，若只有一个且可按下，则通过按下该旋钮调节粗细调模式。该旋钮影响显示屏中横向刻度的分辨率，即横向每格代表的时间长度。一般所有通道只有一个时间调节旋钮。此外还有一个调节时间偏置的旋钮，可以用于横向移动波形。

  电压分辨率：纵向分辨率，用于设定最小的分辨电压，每通道各有一个调节旋钮，分粗细调。旋钮影响显示屏中纵向刻度分辨率。同样电压偏置旋钮用于改变零电平的显示位置，纵向移动波形。

显示：一般示波器显示为时间-电压波形，但也可设置为XY显示，即用两个通道分别作为波形数据的横纵位置，比如观察Lissajous图形时。

增益：数据的预防大，可用于在滤除输入的噪声前提下，提高信噪比。

触发电平：示波器采集并非一个连续过程，而是间端进行，所以需要一个电压值用于标记开始测量的位置，即作为设置触发信号的电平，用于测试脉冲信号或进行同步。

耦合方式：分为直流耦合、交流耦合、接地。直流耦合会完整记录输入电压信号，交流耦合仅记录输入的交流信号，并滤除直流偏置，而接地则将输入置0，多用于示波器的校准或光标、零点的校准。

通道：类前述ADC通道数，示波器可对不同通道分别采样或测量，一般各通道电压分辨率独立，时间分辨率不独立。

安全范围：示波器正常工作的范围，需要注意的为输入的最大交直流电压，高压信号可以经高压电阻分压后测量或用专门的仪表进行测试。



图 2.72: 示波器

- 功能：

测量：最基本也最重要的功能，可用示波器内置测量功能直接将需要测量的参数显示在面板上(峰值、峰峰值、平均值、频率、两个通道相位差等)；也可用光标(需要设置好对应通道、测量的内容)移动到数据曲线的特定位置得到其参数或两个光标共同得到的参数；或者将波形数据通过数据线或U盘输出为文件，然后自行分析。

响应：示波器内部电路结构导致输入的信号与仪器响应函数卷积后得到输出，若仪器响应的时间常数RC太大，则测量短寿命信号时则会有较大失真，此时应当在信号输入端同时并联一个小电阻，减小时间常数中的R，从而减小仪器造成的失真(如果通过一些信号拟合出时间参数RC，也可以避免这种操作)，但太小的R会减小信号强度。

累计：累加平均，减小随机噪声，提高信噪比，但需要调节好触发电平使信号

同相位(连续性信号)或同时间零点(脉冲信号)叠加。

运算：对信号运算并显示运算结果，如单通道的Fourier变换，多通道的加减运算等。

记录：示波器可以通过U盘输出，输出前使用Stop按钮停止采集，然后输出为文件，对于不易找到合适波形的随机脉冲信号，可用Signal模式使示波器以脉冲作为中断，采集到脉冲信号后自动停止。没有USB输出的示波器可以拍照然后用图像处理的方式得到数据(Maybe?)。

- 基本使用步骤：接线$\Longrightarrow$选择测量通道，设置耦合方式$\Longrightarrow$调大时间刻度，调小电压刻度，并适当调触发电平至可观察到信号$\Longrightarrow$调到合适的时间、幅值分辨率，使欲观察的波形尽可能占满显示屏(或者说充分利用仪器性能)$\Longrightarrow$调节触发电平至信号稳定或用Stop选择一段信号，然后进行测量或数据输出。

2.3.12.2 信号发生器

信号发生仪器，用于产生特定波形，但一般仅作为信号没有功率驱动，可外接功率放大器以达到功率输出的目的。

- 参数：

频率：输出信号频率，不同频率的准确度不同，一般低频和很高频可能存在失真。

幅值：信号幅度，可设置峰峰值、峰值或有效值，不同波形的有效值-幅值关系理论上不同，但设置时一些低端信号发生器均认为是 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 关系。

波形：信号波形选择，如正弦波、三角波、方波、自定义波形，不同波形又可有自己独特设置。

通道：与示波器类似，信号发生器也有多个通道可进行输出，如两个信号通道，一个与一通道信号相连的功率输出(虽然功率不大)。



图 2.73: 信号发生器

- 功能：

波形输出：最基本的功能，输出幅值、频率、形状可变的信号。有一定输出电阻，所以实际输出给外电路的值会略小于设定值，且外电路负载太小可能会损坏

设备。

偏置：没有设置偏置的信号输出为电压在±幅值之间变化，但对于一些只能输入正电压或者仅需要正电压的情况，需要设置与幅值相等的直流偏置，使输出不存在正负变化。偏置设置可能和幅值设置键相同。

占空比：用于方波参数的设置，比如在用信号发生器直接当作PWM源使用时加以设置。

相差：用于双通道输出的情况，可改变两个通道之间的相对相位，用于电路测试(?)。

调频与调幅：利用低频信号对高频信号的幅度(AM)或频率(FM)加以调制。

- 基本使用步骤：设置电压、频率和波形(因为一些信号发生器打开时已经处于输出状态，所以为避免损坏外电路，要先保证输出值在安全范围内)，特殊情况设置占空比、偏置等其他参数$\Longrightarrow$接线。

第 3 章 Data Measuring and Processing

传感器和仪器的目的还是要回到数据的测量与采集上，而所谓“君子不器”，相同的传感器也可以在不同的使用方式下发挥不同功能，灵活使用或者说从待测物理量出发设计测量方法要比掌握死知识更重要。而采集到的数据如何处理，如何更直观地表达出物理内容也是在物理内涵分析前重要的一环，包括从原始数据中提取有效数据，从预处理后的数据中提取反映现象特点的变化均作为本章介绍内容。同时对于采集到的数据，简单的评估和量级估计可以使我们预先舍弃次要因素，并选择合适测量方法，而减少陷入怀疑与被怀疑实验误差大，考虑不周的困境。

3.1 综述

3.1.1 数据采集

即合理地利用传感器获取有效数据，可以将一些难以直接观测的过程采用其他数据间接测量，或者转变题目表述的正常过程，基于理论分解验证每部分。比如：

通过将一个动态过程分拆成一系列不同条件的静态过程，然后测量每个过程的相关参数，即可简化实验也能得到更精确的结果，因为静态的测量很容易通过增加测量次数等方法提高过程中变化参量的测量精度(虽然对动态过程多测测量并取均值也可达到相同的结果，但至少需要保证每次测量的条件相同)

或为得到一个过程的临界条件，固定物体运动并强行改变状态，使系统经历转变点以进行测量。

……

3.1.2 数据评估

并不是所有的数据均有足够可信性或利用价值，再进行详细的处理和作图前至少应保证数据结果可以另他人和自己信服。对于采集变化信号(随时间或随距离)，为得到完整的变化过程，至少应保证采样率大于两倍的信号最大变化频率(采样定理)，信号的最大频率由变化最剧烈的位置决定。但往往更应该得到足够精细的变化，采用10倍以上的采样率更为合适。对于测量恒定值的情况，应考虑测量的标准差与准确度，准确度值测量值偏离真实值的情况，一般只能通过改进测量系统来提高准确度，对于一些本身就有较大系统误差的传感器(传感器分辨率!=测量准确度)，使用其测得的绝对值时要考虑到与真实值的偏离。提高测量次数并平均可以减小测量误差(对于变化的信号也可再同样条件下重复进行然后平均)。信噪比指信号的强度(幅度或功率谱)与背底噪声的比例，数字测量系统往往会不可避免地引入背底噪声，则信噪比可用来衡量结果的有效性。同时对于相同条件下的测量结果，也可以背底噪声作为一个恒定值，用来衡量信号的强度。

较小的信噪比往往意味着有很多细节会被背底淹没，信号数值也更不可信，所以尽可能提高信噪比对于得到便于处理的数据很重要。

3.2 处理

物理本质往往隐藏于原始数据背后，杂乱的原始数据会因噪声、表象、表现方式或经过仪器处理后附加了非物理过程的信息等原因而难以提取直观的信息，因而对数据的预处理便成为沟通理论与实验的纽带。本节主要分为数值方法与信号处理两部分内容。数值方法介绍对数据形式上的处理，但常常可以起到预言趋势、验证理论或凸显变化的作用。而信号处理涉及数据表述形式的改变，如从图像中提取数值数据，从频域分析时域变化，或者联合时域与频域得到频域的时间变化。

由于经典的处理算法均有现成函数可以调用，所以并不推荐自己造轮子。每部分的结尾会列出一些函数和简单的使用说明，详细内容请查帮助手册。并且附加了一些网页的超链接辅助理解(优先看链接内容，因为自己比较懒，而且写的差……)，可参考的教材在后面统一列出。

3.2.1 数值计算方法

即使理论表示均为连续函数形式，但真正可以操作的数值均为计算机有限精度存储的离散形式，所以了解计算机数值处理的特定与典型算法对于正确评估计算结果精度或解释奇怪现象均有借鉴意义。

3.2.1.1 精度与误差

有限小的数值间隔与有限长的存储精度会在无法取极限的情况下得到与理论的导数或积分结果之间存在差异的结果，同时不当的数值计算也会增加结果的误差甚至会产生错误结果，选择精度足够的算法并避免/识别出奇异的结果。

- 精度：多以误差的量级作为评判。
- 误差的产生：

  两个相近数值相减会因存储精度有限而使相对误差增大。

  除以0或非常小的数值。

  将连续函数离散化后因计算方法产生的误差。

3.2.1.2 拟合

拟合可认为基于某种规则与已有数据寻找一个指定形式的函数。用于理论的验证或参数的提取，与插值不同，该函数不必通过所有数据点，即认为数据存在偏差。拟合相关性可用于评估数据符合拟合函数的程度。拟合时请先保证数据个数大于拟合函数的参数数量，否则拟合相关性为1，是没有意义的拟合(其实数据少了也没意义，建议大于拟合参数数量的两倍？)。

- 最小二乘法：以数据与拟合函数的平方误差最小为出发点进行拟合。对于线性拟合可有解析形式的公式，一般自变量的小变化引起物理量变化均可用线性函数进行拟合，然后通过斜率或截距得到所求物理量。
- 非线性拟合：对非线性函数进行拟合一种为将其变换成线性函数，然后利用公式拟合，另一种是基于迭代的方法，求得预设参数附近的最优参数。前者并不一定满足最小平方误差，后者也并不一定是最佳拟合(仅是部分而非全部参数空间内的最优值)。尤其对于双指数这类参数偏差对拟合曲线影响可很小的的拟合，需要手动调节参数(见下)使其在一些数据的关键变化部分达到较好的拟合。
- 拟合调参：对于迭代拟合的函数，需要规定拟合时的参数上下界与起始点以得到正确的拟合结果，不够一般的拟合不需要太多调节。首先可以用上下界确定参数的正负，然后调小迭代范围使参数的置信区间尽可能小(至少不要出现 $-10^5, 10^5$ 这类的区间)。虽然在一组参数拟合上下界的设置下可以得到一个拟合结果，但其相关性并不会是　　大值，或者相关性最大的拟合结果与实验数据的变化趋势有明显偏差，这时则应该强制指定参数大小(比如把上下界设为同一值)，然后根据拟合优度手动调参拟合。
- 拟合优度判断：拟合程序一般都提供了标志拟合相关性的参数(如卡方、相关性)，其数值可作为一种判断依据(如MATLAB的 R^2 越趋近1则拟合越好，至少要到 $R^2 > 0.99$ 才可认为拟合较好，但也和数据量有关)，对实验数据和拟合曲线的直接比较也是在一些情况下很重要的判断依据，主要应比较数据数值变化、数据一阶差分(并不需要计算一阶差分，可直接观察数据得到)变化较大的部分，使该部分的拟合与数据符合较好。
- 多项式平滑：(MATLAB-cftool-Smooth Spline)一个没有什么实际意义但可较好的展示数据变化趋势的方法。
- MATLAB-拟合结果结构体的使用如下：

Matlab拟合示例代码

```
% x,y 为输入的数据
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y );

% 设置拟合类型、函数及其参数
% 拟合类型：平滑拟合
ft = fittype( 'smoothingspline' );
%拟合方法：光滑样条
opts = fitoptions( 'Method', 'SmoothingSpline' );
%拟合函数的参数
opts.SmoothingParam = 0.6;

% 单指数函数拟合 y=a*exp(b*x)
ft = fittype( 'exponential1' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
```

```
opts.Display = 'Off';
%参数范围
opts.Lower = [-Inf -Inf ];
opts.Upper = [Inf Inf ];
% 迭代起始点
opts.StartPoint = [1.2 31 ];

% fitresult包含拟合出的参数数值和范围
% gof包含评判拟合结果的参数
% 这两个变量也可通过cftool生成
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

% 同时画出拟合结果和原数据
fx=linspace(x(1),x(end),10*length(x));
plot( fx,fitresult(fx), xData, yData, 'ro' );
legend( 'Fitting Curve', 'Original Data');
```

3.2.1.3 插值

插值是一种接受已有数据没有偏差，并以其为基础得到其他没有测量到的部分的数据的方法，通常插值点内部的结果更准确，外插则会因为条件设置或者高阶多项式的问题会很不准确。最终得到的插值结果通过每个数据点，多用于高维数据的扩展(高维拟合难度较大)。

- 多项式插值：以高阶多项式(阶数=数据个数-1)对数据进行插值，计算过程为求解线性方程组以得到每项系数，一维情况有显示公式(见Newton插值或Lagrange插值)，外推时存在不稳定现象。
- 分段插值：每次利用部分数据(多为邻近数据)进行插值得到这些数据的自变量之间的部分，较常用的有线性插值、样条插值，线性插值计算快，编程简单，对于相邻两个数据自变量差较小或系统较符合线性变化时(如查热电偶的对照表时用线性插值得到中间值)较常用，样条插值可以保证一阶导在数据点位置的连续性，多用于曲线设计。扫描物理场(如磁场、温度场)时，可用插值的方式得到更为精细的二维分布，但对于物理量变化较剧烈的点，还是建议尽可能增加数据测量个数。

3.2.1.4 数值微积分

(参考数值分析或数值计算方法与算法等教材)

- 微分：即离散形式的差分，但根据进行差分的数据位置又分为向前、后差分和中心差分，中心差分具有高一阶的精度。
- 数值微分形式与精度：由于数值计算离散性的限制，不同算法得到的结果与连续形式的理论值误差(一般是Δx的幂次)也不同。
- 积分：

- 积分方法与精度：简单的方法由长方形积分、梯形积分，这两种方法分别有零阶、一阶精度。为提高计算精度，基本思路为尽可能构造逼近连续函数的曲线，并提高采样后得到更精确的小单元拟合值与整体积分结果。
- 拟合函数积分：对数据先采用前述方式拟合，然后以更精细的步长对你和后的函数积分，或者可以得到拟合函数的积分表达式。

3.2.1.5 数值线性代数

小心奇异矩阵和条件数很大的病态矩阵。(参考线性代数、数值计算或数值线性代数教材)

- 逆矩阵：分为待定系数法与计算伴随矩阵的方法。但要预先确定矩阵非奇异。算法复杂度较大。
- 特征值：采用[反]幂法或Jacobi方法迭代方式得到。
- 线性方程组求解：较小的完备方程组可通过Gauss方法在有限步内得到(运算复杂度很大)，较大的方程组需要迭代算法求解，系数矩阵为稀疏矩阵使可降低对内存的要求。

Matlab数值线性代数示例代码

```
% 不同矩阵
% 单位阵; 全1矩阵; 全0矩阵; 均匀分布随机数; 高斯分布随机数
eye(m,n); ones; zeros; rand; randn

size % 矩阵尺寸
length % 向量的长度
end % 一个维度的长度

% 等分向量; num 默认100
linspace(min,max[,num]) % 线性
logspace          % 对数
% 产生三维曲面的分格线坐标
x=linspace(xmin,xmax,xnum);
y=linspace(ymin,ymax,ynum);
[X,Y]=meshgrid(x,y)

% 上三角阵; 下三角阵; 对角阵; 行阶梯阵; 转置符号
tril; triu; diag; rref; '

% 伴随矩阵; 逆矩阵; 伪逆
compan; inv; pinv;

% 空格或 , 表示列之间分割,  ; 表示行之间分割
\ / % 左右除法(可用于解方程)
```

```
. % 每个元素单独计算，如：
a=[1,2;3,4];
a^2
ans=
    7  10
   15  22
a.^2
ans=
    1   4
    9  16

% 秩；迹；行列式；条件数；范数
rank; trace; det; cond; norm;

% LU;  QR ; Schur; 奇异值分解
lu; qr; schur; svd;

% 特征值；特征值条件数
eig eigs condeig

% 矩阵函数
% 指数；对数；平方根；一般函数
expm logm sqrtm funm
```

3.2.2 信号处理

3.2.2.1 线性系统

线性系统为一种简单的系统，其输出可认为是不同形式输入对应的输出线性叠加的结果，不同输入之间没有相互作用。若不同时间内的输入对于的响应函数(见下)相同，则称为线性时不变系统。其严格定义可查看教材《信号与系统》。线性系统作为很简单有很普适的一种系统可以简单的运算根据系统的输出得到输入信号。简单的说，判断一个系统是否为线性系统，可考察其输出与输入之间是否满足线性关系或线性微分方程关系，并且0输入对应0输出(一般中间过程变化较小的都可认为是线性系统)。

3.2.2.2 响应函数

若对系统输入一个激励信号，其输出$h(t)$则称为系统的响应函数。当输入为脉冲信号(离散或连续的$\delta(t)$函数形式)时，对应脉冲响应函数，可直接用于线性时不变系统的卷积运算(后面简称为响应函数)。

3.2.2.3 卷积

函数$f(t),g(t)$的卷积为：$k(t)=f*g=\int_{-\infty}^{\infty}f(\tau)g(\tau-t)d\tau$

离散形式：$k(t_n)=f*g=\sum_{i=-\infty}^{i=\infty}f(\tau_i)g(\tau_i-t_n)$。

对于线性系统，其输出$g_{OUT}=f_{IN}*h$，已知响应函数的情况下，对输入(输出)进行卷积(退卷积)得到输出(输入)，也可以在输出输入(输入常假设为一种函数形式)已知的情况下得到响应函数。

3.2.2.4 Fourier变换

向新的基(坐标基矢、函数基等)上的变换是一种非常重要的思想，其以新的角度表示数据，其类似相关系数的计算方式也是进行正交模式分解的一般形式。

通常来讲，连续函数$f(t)$的Fourier变换为：

$F(\omega)=\mathcal{F}\{f(t)\}=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-i\omega t}dt$

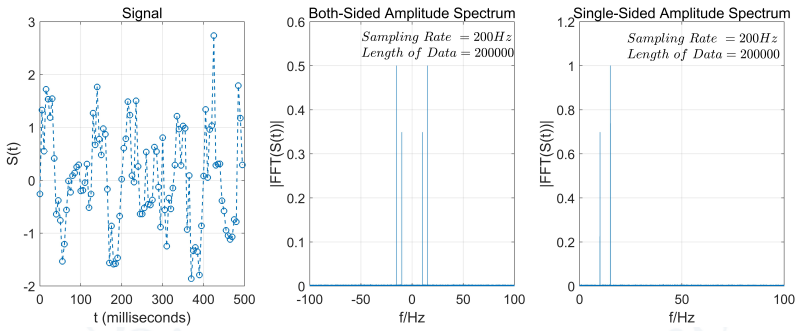
逆变换：$\mathcal{F}^{-1}\{F(\omega)\}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)e^{i\omega t}d\omega$

但实际处理的为有限个数的离散信号，所以本节主要介绍离散傅里叶变换的形式和特殊性质。离散Fourier变换为：

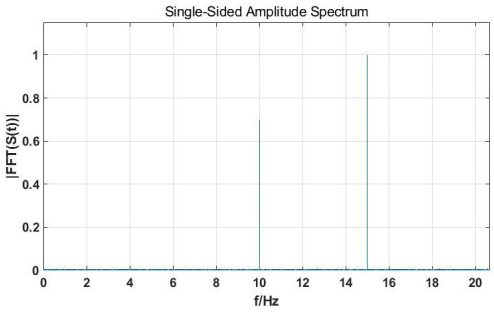
$F(\omega_n)=\mathcal{F}\{f(t_k)\}=\sum_{k=0}^{k=N-1}f(t_k)e^{(}-i\omega_n t_k)$

逆变换：$f(t_k)=\mathcal{F}^{-1}\{F(\omega_n)\}=\sum_{n=0}^{n=N-1}F(\omega_n)e^{(}i\omega_n t_k)$

其中$\omega_n=n\frac{2\pi}{N}$，N为数据个数。由于离散Fourier变换的基函数循环封闭的性质($(e^{-i\omega_n t_k})^N=1$)。可用MATLAB或Python中的库函数实现。



(a)



(b)

图 3.1: Fourier 变换

- 频率限制：根据离散形式变换中的基函数$e^{in\frac{2\pi}{N}t_k}$可知其频率分辨精度为$\frac{2\pi}{N}f$，f为信号采样率。而最大频率为$\frac{2\pi}{N}f\times\lfloor\frac{N}{2}\rfloor$(因为基函数的对称性

$$\begin{cases} Re(e^{i\frac{2\pi}{N}t_k}) = Re(e^{-i\frac{2\pi}{N}t_k}) \\ Im(e^{i\frac{2\pi}{N}t_k}) = -Im(e^{-i\frac{2\pi}{N}t_k}) \end{cases} \tag{3.1}$$

，也是快速Fourier变换[FFT]的基础，同时体现了采样定理的限制)，$\lfloor\frac{N}{2}\rfloor$为向下取整函数。如上图所示，对信号直接变换会得到对称的双边频谱，但只取单边频谱作为有效部分。图中信号为$0.7sin(2\pi f_1 t)+sin(2\pi f_2 t); f_1 = 10Hz, f_2 = 15Hz$和$[0, 0.1]$内均匀分布噪声叠加而成，变换并将双边频谱能量叠加到单边后可以得到原信号的频率、幅值。噪声反映为下方非零的起伏。

- 窗函数：一个仅在部分区域不为零的函数$F(t_n)$，用于和一段序列相乘后截断原序列以选择一段信号，可用于短时Fourier变换得到时频图。窗函数一般形式：

$$\begin{cases} F(t_n) \neq 0 \quad n = M, M+1, M+2, ..., M+N \\ F(t_n) = 0 \qquad\qquad\qquad\qquad Others \end{cases} \tag{3.2}$$

窗函数有不同的形式，其虽然会使信号变换后的强度变低，也会在原有Fourier变换谱的峰值两侧出现泄露(见下)，所以对于窗函数比较重要的特性包括侧瓣强度、位置，衰减强度(见参考网页)。

- 频率泄漏：所谓频率泄露即在原本不存在某种频率的信号中经离散Fourier变换后得到该频率分量。其形成原因来自于对信号的截断，设一段无限长的信号为$S_\infty(t_n), n \in (-\infty, \infty)$，实际测量的是其中一段有限长的信号$S(t_n), n = 0, 1, 2, ..., N$，即相当于对原信号在时域乘上一个选择函数，即$S(t_n) = S_\infty(t_n)F(t_n)$，$F(t_n)$为从$n = 0$开始不为0的窗函数。则对$S(t_n)$的Fourier变换为：$\mathcal{F}\{S(t_n)\} = \mathcal{F}\{S_{\inf}(t_n)F(t_n)\} = \mathcal{F}\{S_\infty(t_n)\} * \mathcal{F}\{F(t_n)\}$，在频域与$\mathcal{F}\{F(t_n)\}$的卷积使的在$\mathcal{F}\{S_\infty(t_n)\} = 0$的区域出现了不为0的分量。非整周期的截断必然造成频谱泄露，而实际信号又是多个频率的叠加，所以并不能简单地做到整周期截断。而选择合适的窗函数或延长信号时间可以减小频率泄露效应。

- 运算：Fourier变换为一种线性运算，同样对于函数自变量的线性变换和函数的微分、积分也有相应的变换，同时对于卷积运算也有公式：

$$\begin{cases} \mathcal{F}\{f(t) * g(t)\} = F(\omega)G(\omega) \\ \mathcal{F}^{-1}\{F(\omega) * G(\omega)\} = 2\pi f(t)g(t) \end{cases} \tag{3.3}$$

这种将卷积转为另一个自变量域乘积运算的性质可方便地用来进行卷积或退卷积。对于线性系统，$g_{OUT} = f_{IN} * h$在频域可表示为：$G_{OUT} = F_{IN}H$，其中$G_{OUT} = \mathcal{F}\{g_{OUT}\}$，$F_{In} = \mathcal{F}\{f_{IN}\}$，$H = \mathcal{F}\{h\}$，这也是一些频域滤波的基础。

变换前通过计算$f'(t_n) = (-1)^n f(t_n)$，使变换后的频谱分布在中心位置。

Fourier 变换 Matlab 示例代码

```
Fs = 200;              % 采样频率
T = 1/Fs;              % 采样周期

N = length(Signal); % 信号长度,Signal为输入信号
t = (0:N-1)*T;      % 采样时刻

% Fourier 变换
% 第二个参数N表示输出的数据长度,默认等于信号长度。
% N 大于信号长度时在信号后自动补零(据说可以增加频率分辨率)
Y = fft(Signal,N);
% 逆变换
ifft
% 将频谱移动到中心
fftshift

% 完整的双边谱
SpectrumD = abs(Y/N);
% 实际有效的单边谱
SpectrumS = SpectrumD(1:N/2+1);
SpectrumS(2:end-1) = 2*SpectrumS(2:end-1);
% 单边谱频率
Fs = Fs*(0:(N/2))/N;

plotyy(Fs,SpectrumS,t,Signal)
```

3.2.2.5 小波变换

- 原理：通过计算信号在一系列不同“精度”(尺度)、不同延时的有限长基函数上进行投影得到投影系数，以不同尺度的小波函数系数表示频率坐标，不同延时的小波函数系数表示时间坐标。基函数可有不同的形式。不同小波基函数的系数为：

$$WT(s,\tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\phi(\frac{t-\tau}{s})dt \tag{3.4}$$

可以简单理解为用不同频率的一段长度较小的曲线在不同时刻与信号进行相关运算，从而得到这一时刻附近不同频率成分。与加窗函数做短时Fourier变换不同的是其采用的小波基函数仍满足正交性，可以有效分离不同频率。而短时Fourier变换中，相对于信号来说，变换的基函数是“窗函数×Fourier变换基函数”，其不再满足正交性。



图 3.2: 小波基函数示例

- 尺度与频率：设s为尺度，f_s为采样频率，f_c为小波中心频率(可认为是对尺度为1的小波函数Fourier变换后的中心频率)，则s对应的实际频率$f = \frac{f_c}{s} \times f_s$(可理解为尺度$s$将小波基函数中心频率减小s倍，然后乘以信号采样率得到实际频率[这一步类似Fourier变换中的操作])。同时为避免损失采样定理和采样率限制频率分辨精度，需要使小波尺度对应的频率范围为$(0, \frac{f_s}{2})$，则尺度范围应为$(2f_c, \infty)$。不过直接将中心频率作为此小波基函数对应的频率是否有局限？
- 时频图：首先，不可能得到时间、频率均可任意准确的时频图(如不确定性关系？)，不同方法均有分辨极限。时频图可表示每时刻(更准确的是每时刻的间隔)频谱的分布(见下)和信号辐角的变化率，即$\frac{d\theta}{dt}(t)$(见Hilbert部分)。

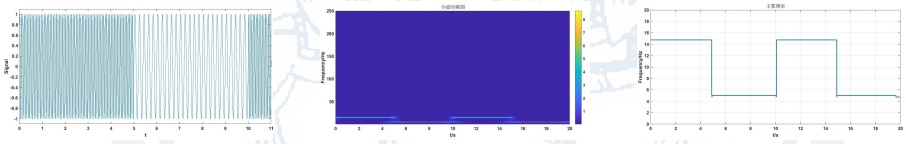
  最简单的方式是对信号分段加窗函数进行Fourier变换(短时Fourier变换，STFT)，越短的信号序列得到的频率随时间变化越精确，但这并不代表得到的频率会更精确，与前所述的Fourier变换部分相似，太短的序列会影响可得到的频率范围，且使用不同的窗口截断信号也会引入窗口本身的Fourier变换影响。一些音频分析软件提供了丰富的窗函数和友好的STFT界面。

  另一种方式是通过小波变换变换得到时频图。参见代码示例，其中用颜色表示不同时间、不同频率(尺度)的小波基函数系数大小，并画出了每时刻最强的频率。

小波变换时频图 Matlab 示例代码

```
Fs=100;                          %采样率
t=[0:length(Signal)-1]/Fs; %信号时间坐标，Signal为输入信号

wavename='cmor3-3';        % 小波类型
totalscal=1000;    % 最大尺度。增加可以提高频率分辨精度
Fc=centfrq(wavename);  % 小波的中心频率
% 计算尺度序列，同时避免丢失采样精度
c=2*Fc*totalscal;
% 为了保证频率域取样间隔相等，不必要
scals=c./(1:totalscal);

f=scal2frq(scals,wavename,1/Fs);   % 尺度转换为频率

% 连续小波变换，得到不同尺度、延时的小波函数系数
% 输入：信号,尺度序列,小波名称
```

```
coefs=cwt(Signal,scals,wavename);

% 不同时刻频谱最大值对应频率
% 中值滤波避免低频影响
[~,loc]=max(medfilt2(abs(coefs)));
mf=f(loc);

figure
imagesc(t,f,abs(coefs));
set(gca,'YDir','normal')
colorbar;
xlabel('t/s');
ylabel('Frequency/Hz');
title('小波时频图');

figure
plot(t,medfilt1(mf))
xlabel('t/s');
ylabel('Frequency/Hz');
```

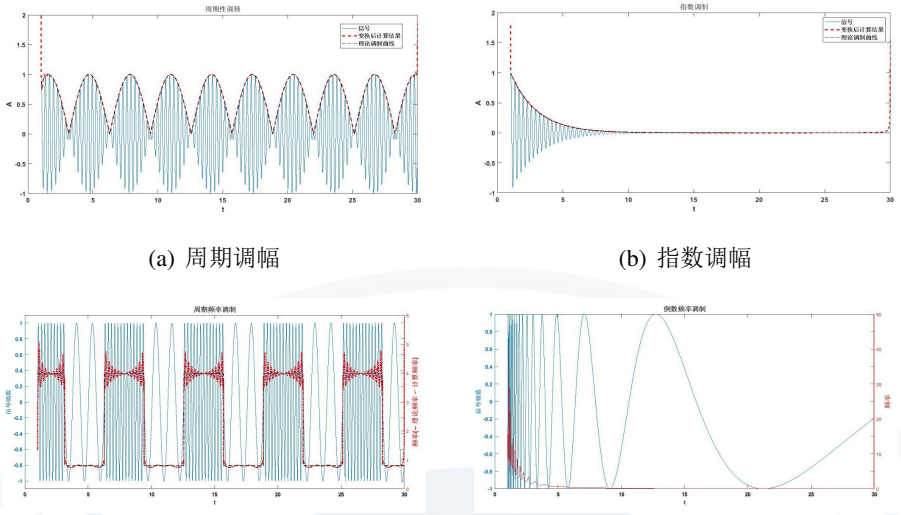


(a) 信号　(b) 时频图　(c) 提取频率

图 3.3: Hilbert变换

3.2.2.6 Hilbert变换

- 原理：将实数域信号$u(t)$变换成只有正频率且总能量/功率不变的复数域解析信号$u(t)$。频域变换形式为$\mathcal{F}\{u(t)\} = (1 + sign(\omega))\mathcal{F}\{u(t)\}$，$sign(x)$为阶跃函数，即负频率分量置零，正频率加倍。逆变换得到时域形式：$u(t) = p.v.(\frac{1}{\pi t} * u(t))$，$p.v.$表示柯西主值(只学过统计光学里的一点点，需要用再自己查资料)。
- 应用：用于解调频与调幅。将信号变换到复数域后，其相位相关的信息可以直接通过辐角计算。但由于时域离散化(Gibbs效应)，计算结果在端点处有很大的误差。



(a) 周期调幅　　(b) 指数调幅

(c) 周期调频　　(d) 倒数调频

图 3.4: Hilbert变换

Hilbert变换 Matlab 示例代码

```
Fs=100;                    %采样率
t=[0:length(Signal)-1]/Fs; %信号时间坐标，Signal为输入信号

HSignal=hilbert(Signal); %Hilbert变换
AM=abs(HSignal);   %幅度调制
Angle=angle(HSignal);   %相位
Angle=unwrap(SAngle);   %调整跳变
%瞬时频率,得到的为归一化频率，需要变换
FM=(0.5-diff(Angle)/2/pi)*Fs;
% 因为diff会减小数组长度，所以可以:
FM=[FM(1) ,/; FM];

% 瞬时频率函数,需要 TFTD 工具箱
[FM,T]=instfreq(HSignal);
FM=(0.5-[FM(1);FM;FM(end)])*Fs;
```

3.2.2.7 滤波

直接得到的信号通常混有许多干扰信息分辨的部分，即可认为是信号噪声。滤波算法则可以通过滤除这些干扰，以突出所需信息。因简单的滤波算法很多，所以这里只介绍一般思路和一些算法优缺点。除了基于噪声、信号频谱分离假设的经典滤波算法外，还可将信号和噪声均视为随机过程，并简单介绍一些在视噪声为平稳过程的前提下得到的滤波算法，包括卡尔曼(Kalman)滤波、维纳(Wiener)滤波(其实我只简单用过这两种滤波器……所以更严谨正确地使用请查找参考文献或咨询专业人士)。

- 思路：一种简单的方法是从一段采集的数据(后面称为数据集)中提取一个值作用一个时间点滤波后的结果，这个值可为加权/算术/几何/调和平均值(信号平滑度较高，但灵敏度较低，但与平均数据个数有关。适用于高频随机零均值噪声，或者用于多次测量减小误差的情况。但不太能用于实时控制系统)、中位数(次序统计滤波。滤除偶然的较大/小脉冲噪声，适用于相对采样率慢变的信号)。也可在采集前对数据进行选取，仅保留“认为正常”的数据(如限幅滤波、去抖动操作，仅保留与之前的一个信号[延迟时间取决于用途]相差在一定范围内的信号，但无法滤除周期性噪声，结果也不太平滑)。

  而一些数据集的选择方法可有：为避免降低采样率可以用滑动的窗口选择数据，每次仅改变数据集中部分数据(可抑制周期噪声，但保留了脉冲噪声)；基于信号间的相关性来选择有反馈形式的数据集，将部分之前的滤波后结果作为数据集中的部分(因而这种方式有无限长的脉冲响应函数[IIR]，这种滤波器相比于有限长单位脉冲响应函数FIR可有相位上的延时)；

  较通用的滤波公式可以写为：$y(t_{n+1}) = \sum_{k=n-\delta N}^{k=n} a_k x(t_k) + \sum_{k=n-\delta M}^{k=n} b_k y(t_k)$，$x(t_k)$和$y(t_k)$分别为之前测量到的信号和滤波后的信号。通过选取合适的系数可以得到不同频带的滤波器，通过z变换等分析方法可以指导设定系数。具体性能可用MALTAb信号处理工具箱模拟。



(a) 滑动窗口　　(b) IIR滤波器数据输入

图 3.5: 数据集选择方法

- 变换域滤波：用于直接滤除特定频段噪声的方法，变换多为Fourier变换或小波变换，通过在变换后的结果中保留需要的频段(或尺度)，然后反变换得到重构信号，从而去掉噪声。同时为了避免引入新的噪声，滤除不需要的频段时往往不会直接置零，而是乘以高斯函数等窗口函数(这里大概没这种说法)。将频域的乘积函数反变换到时域，并截取中间主要部分后，可在时域通过卷积运算实现滤波效果。
- 卡尔曼滤波：采用估计值(Y'_n，可为向量形式)和测量(Y^m_n)值线性组合得到滤波结果($Y_n = Y'_n + K(Y^m_n - Y'_n) = (1-K)Y'_n + K \cdot Y^m_n$)，K称为Kalman系数，该方法运算简单且有效。基于最小方差可得到线性组合系数(基于高斯噪声模型)。其中所谓估计值为一种采用更精确的参数运算得到的结果，或者用之前滤波后的结果预测出的数值(如最简单的形式$Y'_{n+1} = Y_n + (Y_n - Y_{n+1}) = 2Y_n - Y_{n+1}$)。Kalman系数理论上应当根据预测和测量两种方式的方差计算得到(最简单的情形，测量值即系统变量)：$K_k = P_k(P_k + R)^{-1}$，变量非向量时，$K_k = \frac{P_k}{P_k+R}$，其中P_k为预测方差(变量为向量情况下为协方差矩阵)，R为测量方差(或协方差矩阵)。详细推导请查阅教材或参考网

页。实际使用时即可预先测量一些已知结果得到两个方差，也可玄学调参……

维纳滤波可认为是基于最小方差计算得到滤波器系数的滤波算法，但也需要理想的期望信号。

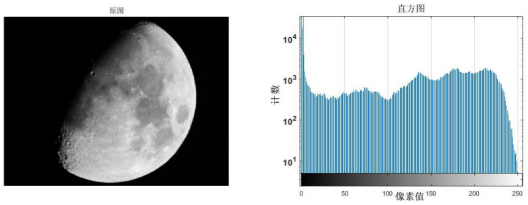
3.2.3 图像处理

图像和视频作为一种直观的信息承载方式可以方便地采集与测量。但由于图片包含的信息存在于多个像素点集合中，所以不能简单地采用单点像素值进行分析，但感谢前人已经研究出很好的图像处理方法，所以在此介绍一部分其他文献中的方法和一些之前总结出的一些技巧。为了更好地提取图像信息，本节后面介绍提高图像对比度以减小算法难度的拍摄方法(虽然比较简单……)，另外拍摄的图像通常有百万像素，而视频数据更加庞大，所以对视频的逐帧处理更需要一些加速，所以也会总结加快图像计算的方式和常用软件代码。另外机器学习的方法并不太适用于这些实验，除非有大量可靠的数据集。

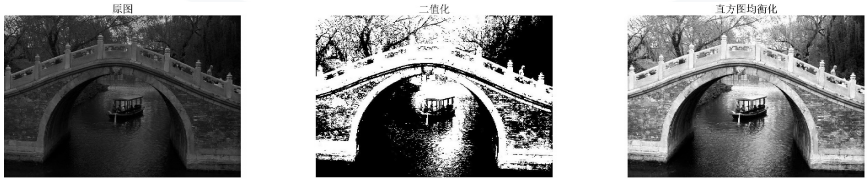
图像处理可以实现的功能包括但不限于：距离，速度，角速度，轨迹，直线角度与长度，圆半径，颗粒数量，空间频率与分布。

3.2.3.1 基本概念与操作

- 模板：一个形状不定的矩阵，用于和图片进行相关或卷积运算。模板常需要满足一定条件使其在均匀图像中的响应为0或者无影响，如低通滤波模板所有系数和为1，微分模板所有系数和为0。
- 直方图：图片灰度的直方图分布，对于彩色图片，不同颜色通道有各自直方图。常将各灰度的计数除以总像素数以归一化，此时灰度分布可视为一种概率分布。直方图均值化通过将灰度分布尽可能转为均匀分布可以提高对灰度的利用率，增强图片效果。



(a) 直方图



(b) 均衡化

图 3.6: 直方图及相关操作

直方图与均衡化函数

```
%图像直方图，N为灰度数，默认256。二值图像尽可为2
imhist(img[,N])
%灰度均衡化，N为均衡的像素数，默认256。img仅可为单通道图像。
histeq(img[,N])
%尺寸缩放函数
%scale可为缩放为特性尺寸的矩阵，或缩放倍数
imresize(img,scale)
```

- 相关与卷积：一维运算的扩展，对于连续情形：

  相关：$f_{out}(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int f_{in}(x+\xi,y+\eta)h(\xi,\eta)\,d\xi\,d\eta$

  卷积：$f_{out}(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int f_{in}(x-\xi,y-\eta)h(\xi,\eta)\,d\xi\,d\eta$

  离散情形：

  相关：$f_{out}(x_i,y_j)=\sum_{\xi=-N,\eta=-M}^{\xi=N,\eta=M} f_{in}(x_i+\xi,y_j+\eta)h(\xi,\eta)$

  卷积：$f_{out}(x_i,y_j)=\sum_{\xi=-N,\eta=-M}^{\xi=N,\eta=M} f_{in}(x_i-\xi,y_j-\eta)h(\xi,\eta)$

  实际的图像处理中，使用的为离散形式。上面提到的模板即函数$h(\xi,\eta)$，而根据模板的不同，可以实现不同的功能，如滤波，阈值分割，边缘检测等。

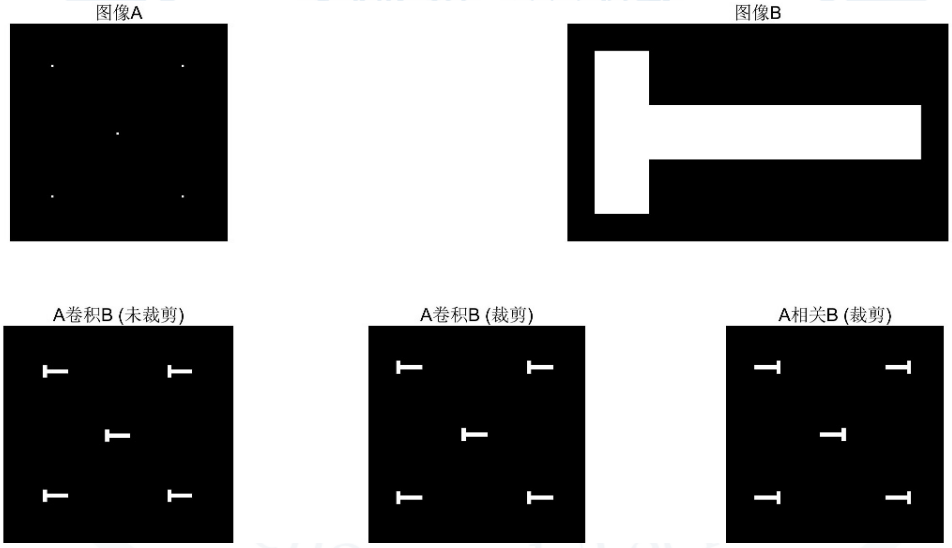


图 3.7: 卷积与相关运算

图像卷积函数

```
%二维卷积函数，输出默认为img与str尺寸之和。
%option为字符串格式，'same'选项使输出与img尺寸相同
conv2(img,str[,option])
% 退卷积函数(Winner滤波函数，K为0即退卷积)
deconvwnr(img,H)
```

- 图片存储格式：图片主要有 jpg,bmp,tif,png等格式，不同格式的压缩编码不同，但均可使用现有的程序函数读取，而不需要造轮子。但需要注意的是，图片分为二值图片(黑白图)，灰度图，彩色图，其读取后的格式并不相同：

  黑白图读取后可为8位unsigned int格式，也可能为逻辑变量格式；

  灰度图多为仅一个通道的图片(即每个像素点有一个数据进行记录)，也存在3通道的灰度图，每个通道存储数据相同，多为8位unsigned int格式，但一些专业设备可输出16或32位的unsigned int格式；

  彩色图片多为3通道，即分别存储红色(R),绿色(G),蓝色(B)三种分量强度，RGB顺序不定，需要根据实际图片和软件确定，有些彩色图有第四个通道——透明度α，对于图像处理似乎没用。数据存储格式与灰度图相同。

  这一段主要是说明彩色图片的存储和读入后的格式，为避免unsigned int 运算时的各种问题，建议读入后先转换成float或double格式，然后除以灰度最大值归一化。
- 颜色格式：

  RGB格式：颜色存储通常为RGB格式，即三个分量分别记录红绿蓝三色的强度，但由于这种存储，改变颜色可能会该改变三个通道的分量，不利于RGB三种纯色之外的颜色的分割，但作为显示系统中数据传输编码，还是需要了解一下。

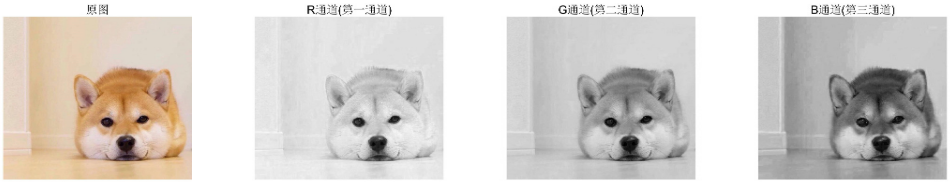
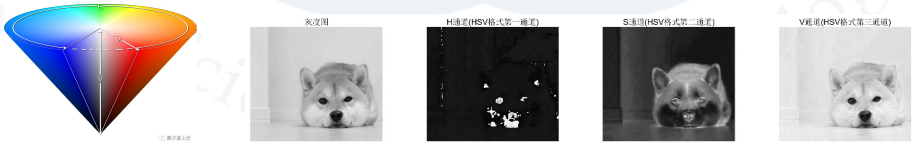


图 3.8: RGB格式

HSV格式(H:色调 S:饱和度 V:亮度)：H分量记录颜色信息，S分量为图像中颜色的均匀成分(即白光成分)，V分量为图像像素值强度。三个分量可用下面的锥体进行说明。需要注意的是三个分量取值范围并非均为[0,255]或图中标识的范围，对于OpenCV转换得到的HSV格式，H分量取值[0,180],S和V分量为[0,255]。



(a) HSV色谱　　(b) HSV通道

图 3.9: HSV格式

色彩转换

```
%其他转换函数类似
rgb2gray(img) %转灰度图
rgb2hsv(img) %转HSV格式
```

- 单像素操作与应用：对图片的操作按照每次涉及的图像像素数量可分为单像素操作，区域操作与全局操作，即1个像素，部分像素和全部像素，后面会涉及到全局操作和区域操作。

  单像素操作主要用于图像分割与灰度变换(其实阈值分割也是一种灰度变换)，点像素操作可以从不同通道进行变换，从而分割出色调亮度或饱和度不同的区域，但一般为去掉低亮度与高低饱和度的像素，然后选择不同色调来进行分割.

  例：对视频的每一帧变换到HSV颜色空间，然后通过HSV通道对单像素进行筛选分割出视频中特定颜色标记范围，对有效范围取像素位置取中心得到标记位置，即可用于追迹，或者识别之后进行边缘识别并采用一下形态识别算法(如Hough变换)得到标记区域的角度、长度等信息。

  对于灰度图，也可通过像素变换分割前背景，识别所需目标，从而便于后面的处理。

  软件操作：单像素操作需要访问每个像素的数据，OpenCV采用结构体(或类)记录图片，像素的访问需要使用指针(或类的成员)进行操作，Mat类型和IplImage类型或者Python的cv2库索引变量不同，MATLAB直接读取到的图片为矩阵形式，可以直接用矩阵索引进行操作。较为推荐MATLAB。少量图测量的情况下Windows画图软件也有奇效(见后)。

3.2.3.2 处理方法

- 颜色处理：

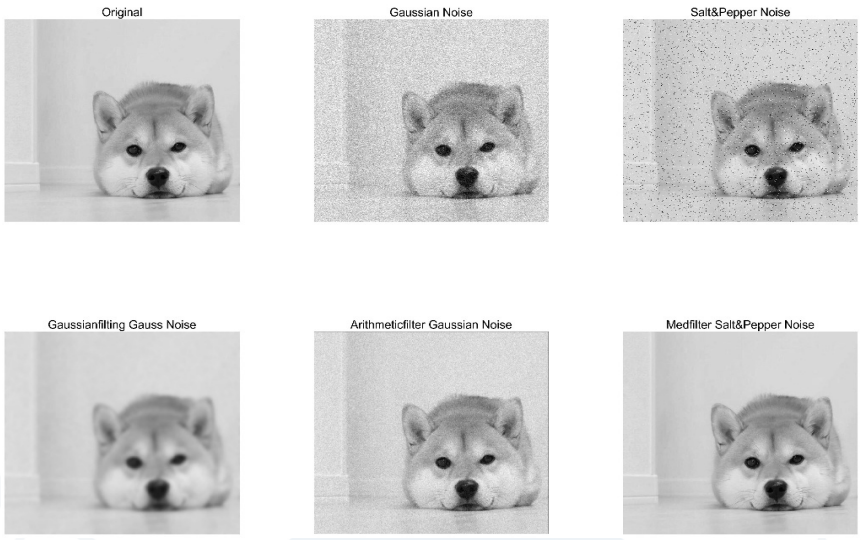
  标记：如同单像素操作中所举的例子，采用有颜色的标记来跟踪目标，再颜色域进行分割和识别。前背景采用对比色(色环直径两端的颜色)可提高识别的边界清晰度。

  色彩-灰度：色彩图转灰度图可用现有函数完成，像素的灰度值为彩色图三通道的像素值的均值。也可用RGB其中一个通道作为灰度图，相当于拍摄的加有滤光片的照片。以一些函数对RGB三通道进行同时变换可以改变颜色的主色调，可用于图片的增强，但对分析用处不大。

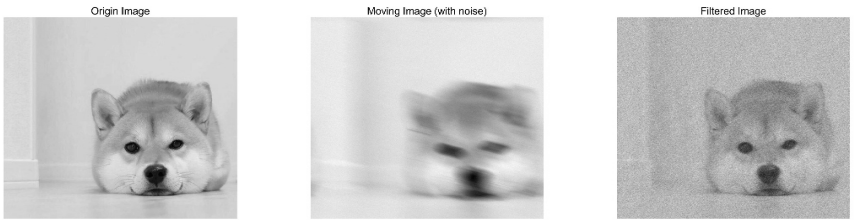
- 滤波与边界识别：

  图像滤波：与信号的滤波一样，图像滤波用于消除像素点强度的涨落或CCD单元电噪声，一般拍摄的图像噪声不大，黑暗环境下直接记录的光照情况可能会有噪声，采用激光照明的图像也会因为散斑的原因而产生画面噪声。噪声(或画面缺陷)类别主要有：椒盐噪声(黑白斑点)，连续分布噪声(并非专业名词，形式为加性的高斯噪声、均匀噪声，Γ噪声)，频域噪声(体现为图像的叠加有规则的周期性条纹或乘以退化函数)，乘性噪声(噪声函数与信号相乘后输出)，非均匀光照，

  滤波思路与信号滤波相似，需要注意的图像为二维信号，所用的函数、模板也均为2维形式。



(a) 简单滤波算法



(b) 运动模糊与Winner滤波

图 3.10: 图像滤波

图像滤波

```
%噪声函数(虽然用不到)
%type为字符串格式，用于选择噪声类型
%parameter为每种类型的参数，如方差，比例等
imnoise(img,type,parameter);

%中值滤波函数
medfilt2(img);

% 构建Gauss滤波器(类似一个模板)
% 'gaussian'可换为其他参数以实现不同模板
% window表示频率截断的半径
% sigma为Gauss分布标准差
H=fspecial('gaussian',window, sigma);

% 通用的滤波函数，输入图像和滤波器
% 最后的字符串选项可以选择滤波时的图像扩展方式
imfilter(img,H,'replicate');

```

```
% Winner滤波
% H为退化函数，K为估计的噪声/信号功率谱之比
deconvwnr(img,H,K);
```

边界识别：所谓边界即灰度/颜色变化剧烈的窄区域，采用对图像的微分可以得到灰度变化情况，但由于微分运算对噪声响应大，所以实际的边缘提取前需要先进行一次低通滤波。边缘提取算法的基本过程为：滤波->微分运算->筛选幅值较大的点作为有效边界。当然这样得到的边界一般比较宽，且由于一次微分的方向性和二次微分的双边缘效果，并不能很好的得到边缘线中心位置，所以还会加入细化和边缘线连接的步骤。

以Canny算法为例：Canny边缘提取需要在得到滤波图片后，使用不同方向的微分模板依次运算，将每次运算的结果取范数(如2范数，各方向结果平方相加开根号)得到变化的幅值图，再根据不同方向(多用xy方向)的梯度近似算出该点的边缘方向，在此方向上对幅值图通过“非最大值抑制”算法进行细化，得到单线宽梯度幅值图。最后根据幅值大小选择有效的边缘(双阈值法，选择梯度幅值较高的一些点得到图A和次高的一些点图B，以A中点作为有效边缘，通过将A中非零的一点对应的相同位置的B图邻域的非零点添加到A中，作为有效边缘，来实现简单的边缘连接)，对边缘连接可采用8邻域法(括号内的方法)，直线拟合法等。

对于二值图像可以用更简单的方法得到边缘：将图像A采用3×3的结构元进行膨胀(或腐蚀)得到图B，B-A得到A中图像的边缘。



(a) 灰度图　(b) Canny算法　(c) 二值图　(d) 膨胀+异或

图 3.11: 边缘识别

- Hough变换：一个想法很好的方法。为了识别图片中特定的几何形状(可写出函数表达式)，也就是确定需要的几何函数的参数，可以通过在参数空间进行累计实现。

  首先要得到待检测图片的边缘图，函数中的参数视为自变量，图片中的坐标视为参数，从而根据边缘图中的非零点得到参数空间中的一些几何体，如以直线为例：$r = x\,cos(\vartheta)+y\,sin(\vartheta)$(为避免斜率为0或inf出现的发散情况，使用极坐标)，将r和ϑ视为自变量，x,y视为参数，对于每个非零点 $f(x,y) \neq 0$，可得到一条三角函数曲线，将不同的曲线在离散后的参数空间中累加，累加值较高的点对应的r,ϑ即意味着原图中有较多的点在这组参数决定的直线上，再通过对这条直线上的点进行适当连接和长度限制，即可得到对应直线的参数、长度等信息。

  Hough变换同样可扩展到圆、椭圆等几何形状的识别上，并且基于上述基本Hough变换算法，发展出加入了概率统计和其他优化的算法，可以直接通过函数调用实现(示

例见后)。

- 形态处理：

阈值分割：即对于一副灰度图(或者彩色图的一个通道)选择几个阈值将图片分割成几部分。

单阈值选择可基于分割的两部分均值相等或相对方差最大。对于背景有来亮度分布的情况，直接采用单阈值会因背景像素的影响产生错误分割，此时可采用分块阈值分割或自适应阈值分割，其思想均为在不同位置采用不同阈值进行分割。对图片背景预先进行阴影校正也是可行的方法。多阈值分割除非各部分区分很大，否则效果较差，可用于层次划分。上述方法均有函数可以调用。对于全图的区域分割，也可采用以灰度梯度为基础的分水岭算法。

用来分割出颗粒类的物体以进行统计等处理，或者分割出用于标记的物体以便进行追迹、形态学识别或其他测量。



图 3.12: 阈值分割

目标增强：对阈值处理后的物体或直接拍摄的物体中的由于光照原因导致一部分太暗无法处理或者背景有一些亮/暗小区域干扰，可采用形态学方法补全较小的缺口或去掉小区域的噪声。(以下以二值图像为例[0为黑，1为白]，灰度图像对像素值的改变规则不同)

膨胀与腐蚀：首先定义结构元为一个有中心的特定形状的值为1的模板。膨胀操作为遍历图像中任一像素A为结构元中心得到结构元形状的邻域中，若有原图像中任一值为1的像素，则像素A设为1,否则设为0。改变后的像素不影响此次膨胀操作。膨胀操作可以增加图像中不为0的像素数或将线条变粗。腐蚀操作为以像素A为中心的结构元若不完全与图像值为1的像素重合时，则A设为0。对图像的膨胀操作等价于对图像的反图像(非标准术语，表示0-1互换的图像)进行腐蚀操作后结果的反图像。

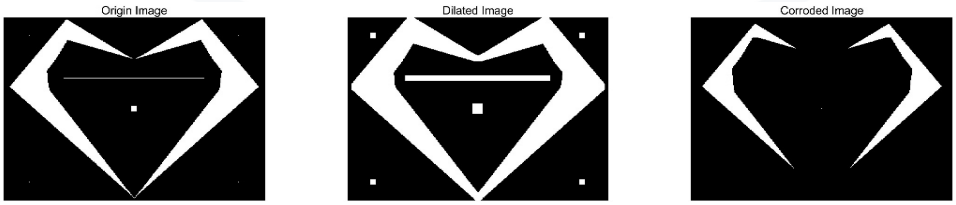


图 3.13: 腐蚀与膨胀

开/闭操作：开操作为对图像先后使用同一结构元进行腐蚀与膨胀操作，闭操作为先后进行膨胀和腐蚀操作。两种操作同样具有共轭关系。采用闭操作可用来连接

暗间隔(如采用特定方向的长方形结构元连接间断的线条)或者用来消除暗区域；同样开操作可消除亮区域(使用比该区域略大的结构元)或连接亮间断。

形态识别：这里介绍两种基于以上基本操作的特定形态学处理方法。

颗粒半径检测：对图片采用不同半径r的圆形结构元进行开/闭操作(亮圆用开操作，暗圆用闭操作)，然后统计图片像素的平均值或总和S，根据S-r曲线变化最较大的的r处即可判断图像中主要的半径分布(或者对S-r曲线计算一次差分，峰值位置为主要r的位置)，该方法不适用于r有连续分布的情形，只用于特定几个r且圆的数量较多的情况，具体计算峰值可得到大致数量分布。改变结构元也可用于其他形状尺寸的检测。

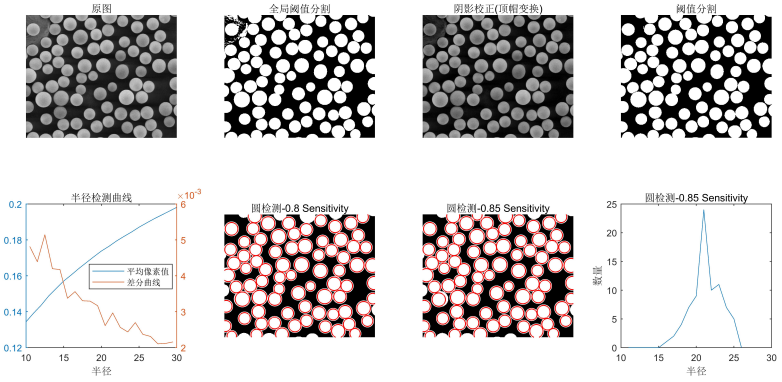


图 3.14: 阈值分割与半径检测

特定形状识别：即所谓击中击不中变换，以检测特定亮区域为例，先用略小于(最好是等于)检测区域的结构元A进行腐蚀操作，然后检测剩余的不为零的位置(即检测大于等于特定形状的区域)，之后用大于A且包含一个略大于检测区域的空洞的结构元B进行膨胀操作(检测小于等于特定形状的区域)，比较得到的暗点和之前的亮点是否在相同(或相近区域)，则可判断是否存在特定形状。将上面所说的膨胀和腐蚀改为开闭操作后，再取两次处理结果的交集，得到保留特定形状的图片。

- 频率与运动：除了从一张图片记录的物体中得到信息外，还可通过变换或者视频中多张图片得到其他自变量域上的信息，可用于图片整体的分析，或将图片二维像素分布与时间相联系。

空间频率：与信号的时间-频率关系相似，对于空间分布，同样可通过变换得到其空间频率(比如Fraunhofer衍射得到衍射面的空间频率)，借助频率可分析图片整体性质，如线条周期大小与周期序列长度(非精确)。与一维信号的滤波相似的是，这些变换同样可用于空间滤波。

Fourier变换：对图片可进行二维Fourier变换或者通过只改变一个方向的空间坐标得到一维Fourier变换分布。与一维Fourier变换不同的是，二维Fourier变换除了可以得到周期性空间分布的强度和频率外，还可得到空间周期的方向(或者说是二维频率方向)。

小波变换：与一维小波变换相似，二维变换可将分为对xy不同方向的高低通变换，

如x方向的高通变换+y方向的低通变换可以得到x方向的频率信息，而两个方向的低通变换可认为是对图像进行低通滤波并缩小得到的结果，而两个方向的高通变换得到剧烈变换成分往往以高频噪声为主体，因而可通过减少这部分幅值实现滤波效果。

运动信息：物体追踪

3.2.3.3 其他操作

- 拍摄条件：一般需要程序处理的图像或视频为追迹、目标分割或边缘检测等功能。拍摄时提高对比度有助于程序的识别和与提高检测精确度。一些可行的方法：

  颜色对比：用鲜艳的饱和度高的颜色来标记目标，再通过HSV在颜色域选择出目标，然后作为灰度图进行处理。如用红色胶带在旋转面上标记一条半径，然后通过颜色识别出长条胶带后可以通过边缘检测和直线识别得到胶带的角度，从而得到转速随时间的变化。

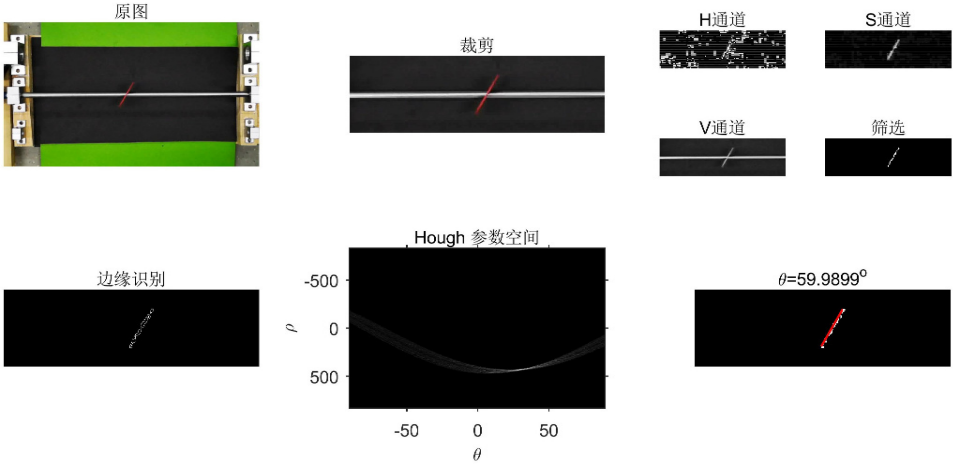


图 3.15: 颜色标记与识别

明暗对比：采用黑白对比来获得更明显的分割效果，可以对图片直接二值化得到目标，避免了单像素选取的调参和循环耗时。可通过背景和物体颜色的选取改变对比度；或者采用荧光或小LED标记运动物体，在黑暗环境下拍摄；对于水波形貌这些不易采集的图像，也可通过测入射准直光束或其他方向入射光束使表面进行反光或折光来凸显这些波纹，再在黑暗环境下拍摄，经阈值分割后识别出水波纹路。

光照和背景：拍摄时若图像背景较为黯淡，颜色偏灰色，比如一教实验室铺设的灰色地面或淡黄色木板，这些会导致颜色的全局对比降低，且黑白对比也会因为差别不大导致分割困难。为提高颜色的对比和避免背景对程序的影响，可以采用暗的纯色纸或布来铺作拍摄背景，以便用亮色或鲜艳颜色进行标记。而外界光照则会由于反射等在图片中产生一些亮点或光照不均导致的颜色识别因在不同的区域因所需参数不同导致分割困难。理想的光照当然是均匀照明，同时避免图像中的光滑面反射照明光源形成亮斑，可以考虑打磨或用粗糙面覆盖光滑面，也可

同通过移动照明光源位置将光源的反射角度移出图像。采用激光照明时，要避免散斑(明暗斑点)的影响。此外一种突出边界的方式为拍摄影子：通过产生大面积准直光(激光+大口径透镜进行扩束)，照明需要拍摄的物体，在后面放置光屏(薄纸)，从光屏的背面拍摄影子的变化可用于识别中间物体的运动或边界，尤其适用一些与背景区分不大或本身颜色杂乱的颗粒堆积形状。另外推荐类黑色天鹅绒布作为物品的拍摄背景，效果奇佳。

拍摄范围：相机或手机虽然有一些对像差校正的处理，但不能完全校正全部画面的相差，所以拍摄时尽量使需要处理的目标在画面中央区域，同时加长拍摄距离可以较好的避免视差和角度影响。

- 程序加速：大型图像处理或视频处理常因编程不当导致程序运行很慢，这部分介绍一些加快计算的方法或要避免的坑。

程序优化：

循环问题：对于C或C++这种没有数组、矩阵操作的语言如果必须使用循环对单像素操作，则可在循环中避免无用函数的反复调用，如在循环最大值时使用直接的变量而不是每次调用函数求解变量。同时根据数组存储有限顺序进行循环，如C/C++为行优先，则内层循环设为对行的坐标循环，以充分利用Cache。对于Python的一些科学计算库或Fortron、MATLAB这些向量或矩阵操作的时，优先使用矩阵操作或内部库函数，以利用CPU向量运算提高速度，对于MATLAB效果很明显。同时避免分布式的文件读写也可减少中间等待内存访存消耗的时间，可用数组存储要读写内容，然后集中读写。

编程语言：如Fortran或使用Fortran/C为底层的MATLAB/Python库，据说有更好的运算速度，但同时还要考虑到开发效率的问题，所以选择一种常用语言并熟悉其特性即可，因为选择较好的函数库后其性能差别在需要的范围内差别不大。

并行计算：

CPU主要的并行库有OpenMP和MPI，OpenMP为共享式内存，使用简单方便，线程之间没有通讯，可以很好的对相互之间没有一类关系的循环进行优化，推荐使用。MPI为分布式内存并行，每个线程之间需要进行通讯以传递数据或同步，需要包含对应的头文件或导入库。并行程序编程时需要避免数据之间的访存冲突，建立线程的私有变量以及调节各线程之间的循环数(负载)以平衡线程的运行时间。此外使用一些库函数可以快而安全地完成各线程变量求和等操作。

对于图像处理还可用GPU进行计算，如CUDA或OpenCL(CUDA用于英伟达显卡，OpenCL为一个通用协议，不同显卡有不用的使用方式，所以需要下载与自己显卡对应的OpenCL SDK)，但需要了解较多知识内容，所以若不会的话不推荐单独学习。Python提供了很友好的CUDA或OpenCL接口库，包装了繁杂的配置代码。GPU包含更多的计算单元，所以适合与多单元同时进行相同的计算(或相同代码的计算)，但相比于CPU不擅长逻辑运算，所以在进行并行计算时，CPU并行更适用于分配复杂的粗粒计算(复杂代码，如对串行程序的最外层循环设置并行)，而GPU适用于细粒度的计算(如对串行程序的最内层循环设置并行)，通过建立更多的并行单元来展开多层循环。

OpenAcc等没有了解过……

- 软件：MATLAB OpenCV Tracker：

MATLAB和OpenCV为功能基本相同的图像处理库，包含从底层处理到图像语义识别丰富的函数，两者可选其一，具体使用需要参见前面的一些代码或自行查找资料。Tracker为一个现成专用软件，见到的较多的应用为目标追踪。

MATLAB：一个很贵但很有用的软件，不过学校买了正版版权。另外Mathematica也有类似功能，甚至函数更加强大，但我没用过Mathematica图像处理……所以想用就自己查资料吧(学校没有Mathematica版权，而且正版的购买还要用美元支付)。MATLAB有一个图像处理工具箱，普通环境调用的函数一些也会转到调用该工具箱内的函数。MATLAB读取较为方便，不需要设置太多参数，内部函数多为使用模板的矩阵操作，根据开发速度和运行速度综合评价结果较好。但是用MATLAB需要注意矩阵采取列优先存储方式，且尽量避免采用循环对图像每个像素操作，尤其是内层循环为行循环的单像素操作，会严重降低运行速度。

OpenCV：一个开源免费64位图像处理库。支持C，C++，Python语言接口，对于C和C++需要下载函数库，然后添加路径，使用时在程序环境设置中添加头文件和链接库路径(总之，跟着网页教程设置)，这个教程中添加的链接库可以没有后缀d(debug)，可能会略微加快运行速度；Python可以直接用pip下载opencv库，然后导入的模块名为cv2(Python的另一个图像处理库为PIL，同样没有用过 __(:з)∠)_...)。OpenCV采用结构体或类记录图片尺寸、数据类型、数据指针等信息，有Mat和IplImage两种类型，推荐使用Mat，IplImage为OpenCV2所用的类型，当然版本3也支持。此外要注意一些函数并不适用于两种类型，且不同函数的图像参数有传递对象和传递指针两种方式，Python的cv2库相对统一。使用C++编写时，需要了解中对数据类型的改变的基本知识(模板的使用)，以及在视频处理的程序中注意对空间的释放。OpenCV显示图片步骤为：创建窗口(可选)->显示图片->设置等待时间(设置之后才会出现)->销毁窗口(可选)。

Tracker：免费软件，我完全没有用过……根据介绍应该是可以用来对视频中的目标进行追踪，会因对比度不足等问题而追踪失败，运行似乎超慢。所以建议有时间的话,,,优化拍摄条件，然后MATLAB或OpenCV自己写识别程序。

(PotPlayer&画图)：排除专业大型付费软件外的两个强烈推荐的免费软件(并没有给广告费……)，PotPlayer是一款免费的播放器，可以实现视频的转录，截取，画面调整、逐帧播放等实用功能，在视频分析和画面截取中均很有用；画图作为小学计算机教学软件也是一个很有用的程序(在没有Photoshop等高级图片分析软件的情况下)，主要用于像素的坐标和强度的读取，可为自动处理的程序获取一些参数，画图软件左下角会显示光标在图像中的像素点位置，所以可以用来人工手动读取图像中线的长度、角度等参数：

角度读取可将光标分别置于线的两个端点，然后用两个端点的坐标算出线的倾角，也可以进一步计算出两条线的夹角；

长度的读取需要在拍摄时同时拍摄一个标准长度的标尺，同时保证相机光轴与标

尺垂直，从图片中先读出标尺的像素长度，用于确定每个像素对应实际的距离，然后在通过两个端点的坐标得到待读取的直线的像素长度，乘以单位像素实际长度后得到目标直线的实际长度。

在测量标尺时，为避免模糊边界带来的误差，可以放置一把有多个刻度的标尺(如普通钢尺)，然后读取多个刻度线的像素坐标，对其进行线型拟合后得到更准确的单位像素长度。为简化操作，建议标尺刻度在拍摄画面中水平或竖直，即只需要读取一个方向的坐标。

3.3 采集

本节介绍不同物理量的测量方法，且避免与前重复，仅介绍非传感器可以直接完成的测量。

3.3.1 追迹

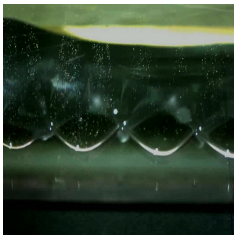
- 陀螺仪：六轴传感器+蓝牙/Wifi通讯+锂电池可实现小型的实时加速度测量，然后二次积分后得到轨迹，积分过程会产生部分误差，所以更多的是用来和视频拍摄共同确定物体的位置、速度、加速度。
- 视频：标记方法：彩色胶带，反光材料，荧光涂料，LED。尤其是雾状封装的LED+钮扣电池在黑暗环境下效果奇佳，用贴片LED和小型的较高压(>=2V)的钮扣电池可制成很小体积的追迹光源，但贴片LED直接焊接较难，且需要进行磨砂处理，钮扣电池加热可能会爆炸(真爆炸)。黑暗环境下拍摄时需要调好聚焦位置，然后在移动相机前在运动平面拍摄标尺。处理时可先利用颜色或亮度确定标记的部分，然后对有效像素位置取均值得到中心，当然也可利用Hough变换等拟合有效部分的形状，但根据经验效果并不一定很好。
- 反射(其他学校提供)：其实还是基于视频，但此方法可以得到一个反光平面角度的变化轨迹。其思路为在待测物体周围摆放半透明光屏，上方架设相机(很有可能需要多个相机)，固定的激光入射到反射面，然后通过反射光点位置和物体反射面位置反解出反射面角度。(反解困难，也不精确，多相机还涉及同步和对准问题，总之不是好方法)
- 液体流线：大概有两种方法：利用漂浮颗粒或悬浮气泡追踪轨迹，较快的流速需要高帧率拍摄，同时液体反光和背景对分辨影响较大，并且用程序自动追踪一个颗粒以得到流线较为困难，所以手动标记或者用其他方法(如散斑摄像)；另一种为在流场中持续滴加墨水等颜色不同的染料，待染料形成稳定颜色分布后拍摄，然后通过颜色处理得到颜色饱和度极值点来连成流线。
- 云/烟：与液体流线表征思路类似，在一定空间内充满饱和水蒸气(云室)、酒精蒸气或烟雾(燃烧某些东西？)，通过颗粒在其中的运动、驻波声场或者空气流动形成轨迹(或形状)。但高浓度的烟雾可能会改变传播媒介性质，从而影响传播。(基本只能用于观看)



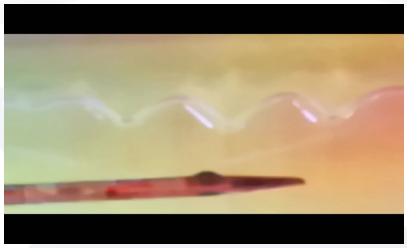
(a) 荧光剂



(b) 贴片LED发光



(c) 气泡流动



(d) 流线

图 3.16: 追迹

3.3.2 电学量

3.3.2.1 防护

安全使用(详见实验安全部分)：使用前考虑电路中的最小的电流、电压限制，避免过载。其次需要在危险的电路中介入漏电保护器、保险管等保护元件。辐射与噪声：高压高频交流电(ZVS+高压包或直流稳压电源)会产生较强的电磁辐射，其靠近一些电子模块时会感应出较强的杂乱信号，从而产生错误的数值或控制流，甚至发生击穿，此外50Hz交流市电也会对精密的电学测量产生干扰。最简单的方式是使用金属网/金属箔包裹后接地，也可在通过加入对应频率的滤波电路。

3.3.2.2 电阻

最简单的方式是直接用万用表测量，但测量小电阻(往往用于测量材料电导率)时会引入接触电阻误差，所以采用Kelvin四线制进行测量。并且测量时在保证信噪比的前提下尽量使用小电流，避免自热、环境温度、湿度的变化。

3.3.2.3 霍尔系数

四线式测量以消除几种误差。为避免降低精度，样品尺寸也需要采用较高精度的测量方式，同时四线的接线方式和样品形状会引入不同的几何因子，为避免复杂系数，建议将样品裁剪成正方形并在四角接线。

3.3.2.4 电容/电感

可使用LC表进行测量。电容测量前应进行放电处理。可基于LC/RC电路、LC谐振电路、交流电桥电路配合示波器与已知数值的器件进行测量。微小电容的测量则需要更加

精密的电路。

3.3.3 流体测量

3.3.3.1 粘度

粘度计：通过测量转子在液体中转动受到的阻力得到液体粘度，使用时需要提供尽量多的液体，先预估粘度系数后选择量程合适的转子安装在粘度计上并浸入液体，然后放入温度计以得到该温度下的液体粘度。得到的结果受液体温度、转子到器壁的距离、测量时的转速(应当很小，避免产生湍流等其他耗散形式)影响。建议多次测量，使用后及时清洗转子，但不要破坏其表面平整度。



图 3.17: 粘度计

3.3.3.2 流速

- 压强：基于伯努利原理，在可以忽略测量时间范围内测量点的高度变化时，可通过流场中一点的压强变化来反映流速变化。液体内部的压强可由气压计改装而成。

- 也可测量流量后除以出口面积得到平均流速度(实际上管道中心流速快于边缘)。

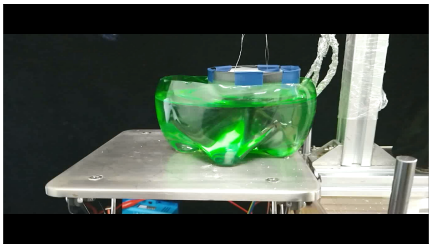
3.3.3.3 流量

量筒+秒表：从使用经验来看，流量计其实并不精确……也不是很好用，一种替代的方法是在保证水源在一定误差内可认为是恒稳流动时，可记录该流量下在一定时间内流出的液体体积，比如直接流到量筒里，得到平均流量。

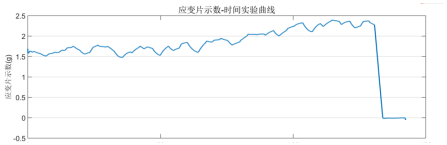
3.3.3.4 表面张力

表面张力常作为液体环境中不可忽略的力，其主要有表面张力系数和接触角两个影响因素。

- 拉脱法：测量表面张力系数，见大物实验讲义，应注意调节支架水平以及拉脱环的平整，缓慢操作，此外表面张力系数与接触材料有关，所以可能的话用实验环境中接触的材料制备拉脱环。或者采用测量静摩擦系数的方式。



(a) 拉脱法

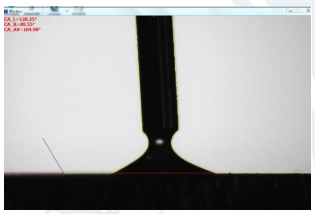


(b) 拉脱法数据

- 表面波：一种需要专门仪器的来测量表面张力系数的方式，通过振子激发液体表面振动，根据波形或者对振子产生的附加质量或阻尼得到表面张力系数，一教没有。
- 接触角仪：其实就是一个高放大率的短焦相机，在水平方向拍摄液滴接触情况，然后测量接触点的液滴切线与接触面夹角。使用时需要准备平整的材料表面来滴加液体(或许应该放到传感器那里，但传感器只是CCD，和测量又没什么关系)



(c) 接触角仪



(d) 正在滴加液体

图 3.18: 接触角测量

3.3.4 力学量测量

3.3.4.1 振幅/微距

此处振幅指高于摄像频率的振动，否则可通过视频或其他测量位移/距离的方式完成(有高速摄像可忽略前面部分，但用起来较麻烦，有些情况还需要搭建较好的减振平台)。

- 应变片+读数显微镜：应变片响应频率1000Hz以上，可用的金属片响应更高，所以配置合适的ADC可实现对1000Hz频率以下的振动进行测量(虽然不知道为什么有评委不听解释就认为不可行)，测量的振幅一般在$10^1\mu m$到$10^0 mm$之间，范围和精度根据应变片所贴的金属片决定。测量振幅前需要对振幅-电压关系进行标定，可将读数显微镜横置，然后在金属片上放置不同的重物，并测得金属片末端移动距离和输出电压用于标定；或者使用固定的位移平台(或直接用铁架台固定螺旋测微器)定量移动金属片末端，但若金属片另一端固定不好则这种方法有一些误差。
- 光杠杆：测量振幅其实不需要得到振动的波形曲线，而只需要得到振动位移的峰峰值，所以借助光杠杆的方法(或者说是对光斑反射的原理)利用较长的臂来放大振动，并测量得到光点(或者说移动成一条线)的长度，再反推得到振幅。

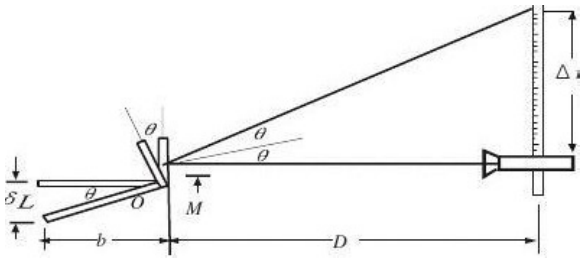
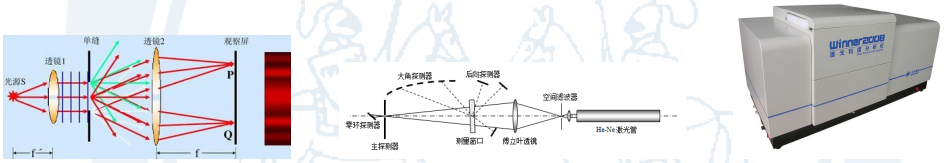


图 3.19: 光杠杆光路

- 衍射/散射：通过狭缝Fraunhofer衍射或圆盘(不太准确)衍射后的光强分布推算细丝、狭缝宽度或颗粒直径。

  单缝衍射公式(屏与入射平行光垂直) $I(\theta) = I_0\frac{sin^2x}{x^2}$，$x = \frac{\pi asin\theta}{\lambda}$ (θ为屏上一点到衍射面中心[更准确的是后透镜中心]与入射光的夹角，I_0为衍射的中心光强，a为狭缝/细丝直径，λ激光波长)。测量时既可测量每点光强，然后拟合衍射光强分布，也可找到第一次光强极小点(一般到不了0)对应的 θ_{min}，然后得到 $a = \frac{\lambda}{sin\theta_{min}}$

  对于颗粒需要先分散到空气(高速振动面或风扇？)或者溶液(超声)中，然后同样通过测量衍射光强角分布得到颗粒直径或直径分布(实际的仪器考虑更加复杂，会涉及波长级直径颗粒的Mie散射)。



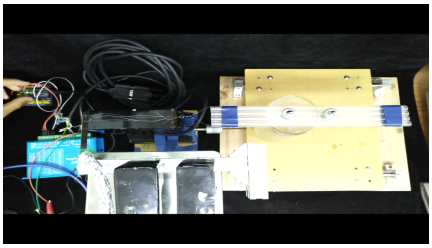
(a) 单缝衍射　　(b) 粒径分析仪原理　　(c) 粒径分析仪

图 3.20: 衍射测量

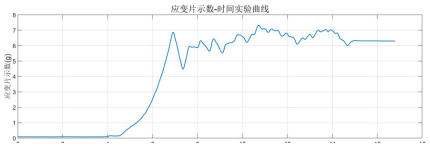
3.3.4.2 摩擦系数

分为动摩擦与静摩擦，前者可用动力学的方法测量，后者似乎只能从根据定义测量。

- 牵引：用于测量动摩擦系数，思路简单，需要一个较灵敏的测力仪器和一个可较慢运动的位移平台(慢速主要是避免不平整的表面使平面上的物体颠簸)，固定待测平面或测力计，然后使另一个缓慢运动，根据测力计示数和垂直平面的压力得到动摩擦系数。需要注意：对于不能输出变化曲线的仪器应进行多次测量，可输出力变化曲线则取一段较平稳部分的均值作为测量的力；摩擦系数与接触面种类很和方向有关，牵引时尽量保证接触面为所需要的摩擦条件，且接触面与牵引方向、测力方向平行，最好也保持与压力方向垂直；一般用于速度控制的为步进电机或伺服电机，其运动并非连续，所以选用较好的运动平台与小螺距的丝杆以减小这种不连续性。



(a) 牵引测量



(b) 动摩擦数据

- 拉脱最大值：用于测量静摩擦系数，思路同样简单，装置类上，但　　要测力计有较高的采样率和实时输出(一些可存储最大值的测力计因为可能的波动误差的原因使最大值并不可用，所以还是在输出力的变化曲线后确定合适的拉脱力)，此外位移平台建议设置从零到一定慢速运动的缓慢加速，避免突然的运动导致的直接拉脱，测力计用线连接物体，从松弛状态开始运动。
- 动力学方法：如利用斜面下滑，Maxwell轮这类于动摩擦系数有关的动力学过程，通过测量该过程中物体的运动得到动摩擦系数，但这种方法限制较大，可解的模型只适用于简单的理想情况，且会引入如表面不均匀，拍摄与运动不平行等各种误差。

3.3.5 运动测量

3.3.5.1 速度

- 互相干系数：用于随机物体或颗粒速度的非接触测量，思路来自散斑实验(散斑成像也可用于测量，但定量不是很精确)。流动的随机颗粒并不能很好的追踪一个颗粒以得到其速度，并且单个颗粒也不能很好地代表整体流动速度，而对颗粒流拍摄后计算相邻两帧之间的互相干度，其极大值即为对应的像素位移值，在通过距离标定和帧率得到对应流速。该方法需要帧率较和分辨率均较高的拍摄设备，并可将颗粒染不同颜色以提高分辨率。

  具体计算方法：平稳过程的互相干系数：$\gamma(\Delta x,\Delta y)=\frac{\int\int f(\mu,\upsilon)g(\mu+\Delta x,\upsilon+\Delta y)d\mu d\upsilon}{\sqrt{(\int\int f^2(\mu,\upsilon)d\mu d\upsilon)(\int\int g^2(\mu,\upsilon)d\mu d\upsilon)}}$，编程需要将积分离散化为求和，但因有图片的相对移动时，其可求和像素数会变，所以归一化是必要的。另一种更快的计算方法为：$\gamma(\Delta x,\Delta y)=\frac{\int\int(f(\mu,\upsilon)-g(\mu+\Delta x,\upsilon+\Delta y))d\mu d\upsilon}{\int\int d\mu d\upsilon}$，其思路为计算相邻两帧图片的最相似部分，即平均差值最小的两部分。两者均可用库函数实现或采用并行计算加速。

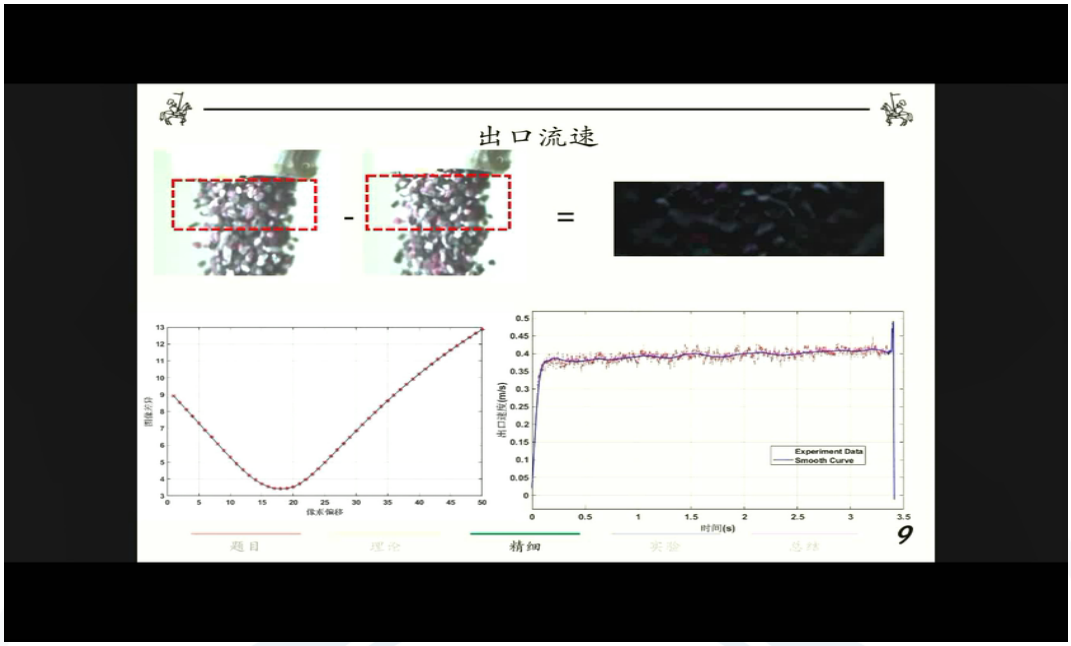


图 3.21: 颗粒流测速

- 视频大法好：对于不透明或颜色单一的物块，可采用单一高对比度背景拍摄视频后在颜色域进行二值化，然后找出边缘或几何中心的运动速度。

3.3.5.2 加速度

通过测量速度曲线并微分后可得到加速度，或者在运动物体上放置一个铅锤，通过拍摄运动过程中的铅锤线倾角也可近似算出运动的加速度，但只适用于加速很稳定、铅锤不会晃动的情况。

3.3.5.3 转速

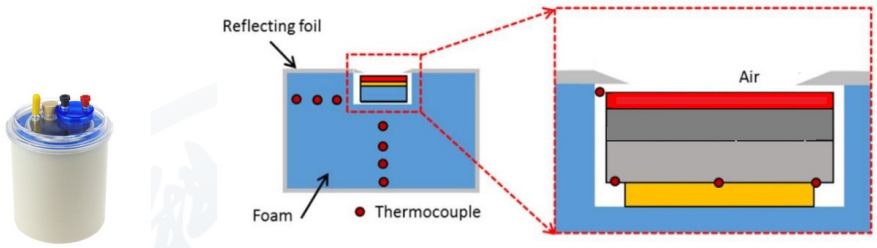
- 光电门 / 编码器：见传感器部分。若使用光电门则可在转动物体上粘贴一个较窄的挡光片，并使其转动时通过光电门，通过挡光时间得到速度与转速，该方式用于转速较慢的情况，转速太快可能会超出光电门的响应时间(尤其是加了电容和整形芯片的光电门模块，可去掉其并联的电容)，转速太慢时可在轴对称的位置多粘贴一些宽度尽量相同的挡光片，相反转速太快时，可用脉冲周期来代替挡光时间得到转速。
- 视频：在转动物体上添加标记物，拍摄视频后得到标记运动情况，配合高速摄像可测量很高的转速。可用色块标记(计算色块中心)或长条胶带标记(Hough变换计算角度)，详见图像处理部分。

3.3.6 其他

3.3.6.1 量热

为较精确得到一个物体的达到平衡态时的散热，不仅要像传统量热器那样用较大热

容的材料包裹物体，然后用高热阻(低热导率)的材料包裹整体，还要考虑通过热阻层传导散失的热量，一种方法是在较厚的热阻层中插入温度传感器并组成阵列，则通过传感器测量示数随时间的变化与传热模型得到这部分散失热量。对于燃烧热、反应热等常用测试，有专业仪器可以使用。



(a) 传统量热器　　(b) 更精确的量热方式

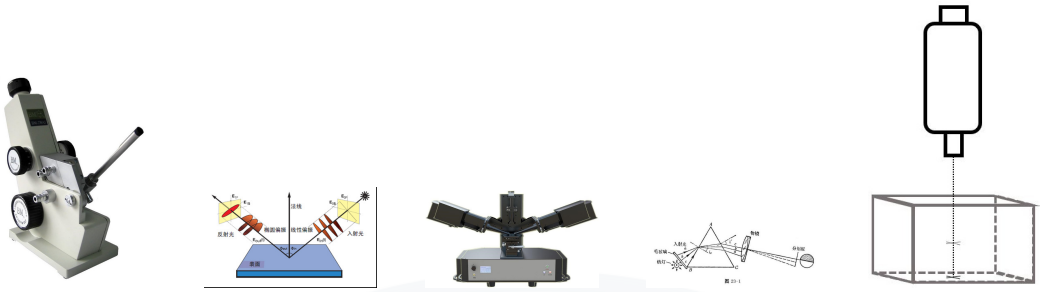
图 3.22: 量热

3.3.6.2 声学

为测量一定空间范围内的声场，需要采用很小以至于不会明显改变声场分布的拾音器(咪头)以及细线＋细硬质杆连接的装置进行测量(虽然这样也会不可避免的改变声场，尤其是拾音器后的声场，拾音器大小最好远小于波长)。通过位移平台可以扫描得到空间内的分布，低频声波可用普通的ADC记录结果，高频声波在不易获得高速ADC的情况下，用示波器代替也是可行的方案。

3.3.6.3 折射率

- 阿贝折射仪：采用全反射角测得液体相对棱镜的折射率，从旁边在旋轮刻度上可读出液体的绝对折射率。使用时可连接恒温水浴控制测量液体的温度(目前先进点的仪器内置控温系统)。需要调节色差补偿消除边界的彩色带，以得到更精确的结果。使用后要及时清洗棱镜表面并垫上擦镜纸，避免损毁或粘上液体。
- 椭偏仪：可分为消光式、偏振调制式和回转元件三种测量方式，利用介质表面对不同偏振光的透/反射率的不同和薄膜表面间的干涉得到与薄膜厚度、折射率相关的测量值(不同入射偏振的消光角度)，再通过在一个预估值周围计算得到厚度与折射率。将探测部分摆放着光源的同一侧或不同侧可测量反/透射膜。较精密的仪器可到$10^0 nm$精度。(不建议使用附录中介绍的古董仪器方案……)
- 折射定律简单应用：基于 $n_1 Sin(\theta_i) = n_2 Sin(\theta_t)$ 和光线的几何关系得到介质折射率。见高中物理竞赛实验28、33……。虽然比较粗陋，但不失为实用的方法，比如液体/平板型材质用下图所示方法测量。



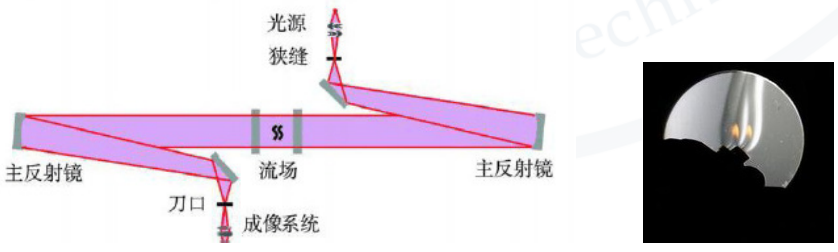
(a) 阿贝折射仪 (b) 椭偏仪原理 (c) 椭偏仪 (d) 折射率一 (e) 折射率二

图 3.23: 折射率测量

3.3.6.4 空气折射率分布

空气中的流场、声场与温度场除了直接产生对应物理量的分布外，还会间接影响空气中的折射率分布，所以也可通过记录折射率分布得到对应物理量，但要得到物理量的绝对值还需要经过很麻烦且不精确的标定，所以这两个方法目前只建议用来得到场分布。

- 全息：全息作为一种同时记录光场振幅与相位的过程，除了是一种3D成像的方法外，还可用于多种影响光场相位或振幅的过程的测量，如微小振动振幅，折射率分布，通过将测量区域作为成像物体，经过干涉后得到
- 纹影摄像(光学高通滤波)：变化的相位信息会在原本均匀、相对相位缓变的光场中引入高频变化信息，这些高频分量对应光场成像的细节或尖锐部分，而低频分量对应于成像结果中集中了大部分光强的缓变部分，这些能量较多的缓变部分往往会降低高频部分的对比度，从而使其难以观察，所以为得到光场中变化较快的相位分布，折射率分布，可以在对光场进行Fourier变换后去掉低频部分，仅用高频部分成像，为提高其对比度，还可附加相位偏移，比如相称法。与光轴平行的平行光经过具有折射率分布的区域，然后再经过凸透镜，则会在透镜的焦平面位置得到光波的相位Fourier变换结果，低频分量靠近光轴，所以将光轴处的光点遮挡后，再在之后搭建成像光路，即可得到与折射率分布产生的相位分布相关的成像结果，实际上多采用4F系统或凹面镜(成像面积大，即纹影成像)。



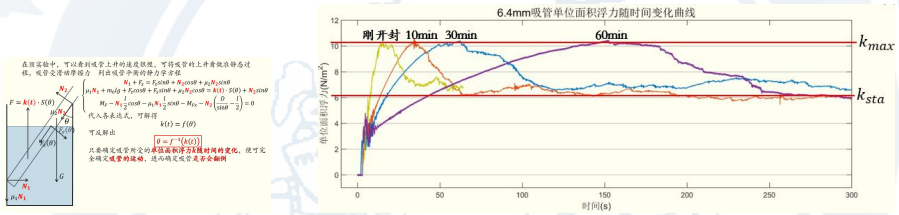
(a) 光路 (b) 效果

图 3.24: 纹影摄像

3.3.6.5 等效

对于物理过程中一些玄学量或者没有准确的简单理论公式可以使用时，可采用一种半经验的方式来取代该部分，然后用于验证其他物理内容。本节并不以介绍具体的实验方法为主，因为不同实验的变量不同，至于如何用经验公式替代所需的变量还需要根据实际思考。下面是取自2018年CUPT三道题目的例子：

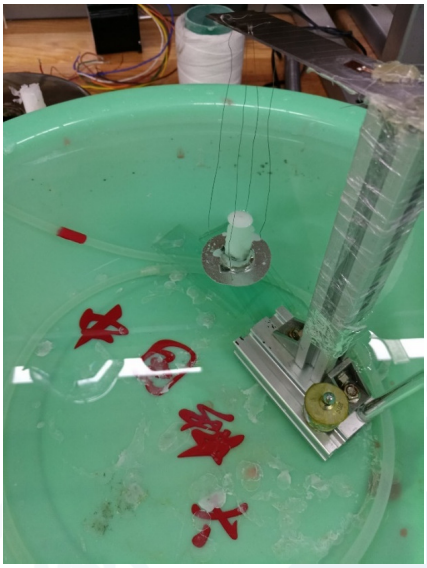
- 附着气泡的升力：研究碳酸饮料中吸管的受力与运动问题。从饮料中析出的气泡附着在吸管表面后，可以对吸管产生随时间和吸管尺寸变化浮力，其他学校的解释基本基于一篇关于气泡产生与演化的论文，在很多参数难以测定的情况下得到一个很不精确的浮力变化公式，从而用来解释吸管的运动(所以也导致新思路难以被理解)。一种解决方法是直接测量气泡对吸管的浮力变化。下面的图片和动画演示了测量结果与过程，将多根吸管(增加最大浮力，减小测量误差)固定在一个支架上，与测力计相连，然后浸入汽水中，得到测力计示数随时间的变化曲线，从不同参数的曲线中可以清晰地看到浮力的全部变化过程，既揭示理论无法计算的一些暂态过程，也能更精确得到浮力的变化方式与整个过程中的特殊点。



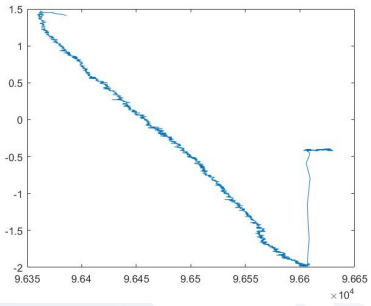
(a) 推导　　(b) 数据

图 3.25: 气泡浮力

- 表面张力变化：水中悬浮的蜡烛在燃烧过程中的受力。浮在水中的蜡烛因为其下陷高度、与水的接触角均难以测量，而最大表面张力又与浮力的变化量同一量级，而其他学校选择不考虑浮力或者将其当作一个不变量，两种处理均有较大误差，不能很精确地得到最后结果。将蜡烛固定在电子秤上，并缓慢升高液面，用压强来间接测量高度(可以显著减小由于液面接触部分造成的读数误差，同时也便于实时记录数据)，可得到电子秤力曲线如下，整个过程中的突变力即最大表面张力(处理了蜡烛上表面以避免涌入的液体影响)，不需要再考虑蜡烛边缘的接触情况。



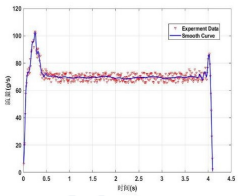
(a) 装置



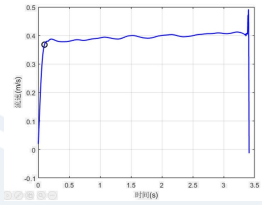
(b) 数据

图 3.26: 表面张力测量

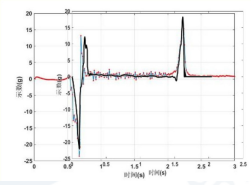
- 沙漏流速与流量：研究沙漏中沙子下落过程中表观重力的变化。沙子从开始下落到落完的过程中，其流量(单位时间的出口质量)和流速(沙子出口速度)并不是一个恒定的量，且由于两者在冲力上的耦合，不能通过测量视重得到两者变化，虽然已有的这种颗粒堆积问题已经经验性地得到在中间阶段流量与流速可认为是恒定值，但基于此的文献或理论也仅能解释部分实验现象。从直观上可以想象漏斗口打开时沙子的流动存在一个暂态过程，如加速和密度减小的过程，分开测量两个量后将得到的变化曲线代替理论中的假设，便可以得到与实际更加相符的结果。



(a) 流量



(b) 出口速度



(c) 视重计算与比较

图 3.27: 沙漏测量

第 4 章 Simulation and Computation

一个完整物理问题的解释除了给出测量结果与理论分析，实验和理论的对照才是将两者联系在一起的纽带。而对于有较多未知变量、无显式解或无法预测完整演化过程的理论，直接对实验数据进行拟合对比是不现实的，所以这个时候模拟和数值计算便提供了一条连接数据与公式新道路。虽然我一直认为仅仅将一个现象通过普适的理论计算出或过程无法控制的模拟出来并不是真正解决了该问题，而是为已有的普适理论又提供了一个新的验证，但总要有一些既不需要和“丑陋”的实验交互，又能很好的得到变化趋势，甚至突破实际限制的结果的方法来指导进一步的实验与提高理论说服力。所以本章简要介绍一些数值方法和模拟方法，主要分为常微分方程的数值求解和一种或许可行的理论对照方法，对物理场的模拟(有限元方法或时域有限差分法)，Monte Carlo 方法通过统计思想提取系统特性。因每一部分的著作都可以摆满一排书架，所以这里以使用为目的，而去掉了严谨的讨论和分析(甚至偷懒只给出参考文献)。

4.1 综述

计算机模拟为基于物理模型和公式进行假想条件下的计算，可用于对实验的指导或限制条件的突破，也可用于与实验进行对照，来验证猜测的原理或条件参数。所以本章主要介绍如何模拟与如何对照。

4.1.1 模拟方法

本节的模拟方法介绍不同方式(软件/编程)或不同模型、计算方法，相互之间有些交叠，为减少使用难度，优先介绍软件和较简单的编程。

4.1.1.1 有限元/有限差分

用于偏微分方程边值问题的求解，需要在模拟区域建立网格，对格点上的物理量通过离散后的方程建立关联，然后对所有网格进行迭代计算得到方程的数值解。有限差分法利用差分取代微分，构建一个巨大的线性方程组；有限元基于变分思想，在小区域内对方程的解进行逼近，通过迭代得到最小误差的近似解。两种编程均较困难，如果需要建议使用现有软件。

4.1.1.2 时域方法

即将时间视为方程中的另一个维度进行计算，用于求解初值问题，主要有时域有限差分法(FDTD)、时域有限元法，参考非时域方法也很容易理解其思想，不同的是迭代过程中可采用时间步长交叉变化(如对x，y分量在不同时间进行计算$E_x(r,ndt), E_y(r,\frac{dt}{2}+ndt), n\in N$)以提高计算精度。不建议自己写，有很方便的现成开发包或软件。

4.1.1.3 Monte Carlo

一种基于概率思想得到复杂体系某状态估计值，并可用于找出解析式的经验规律的模拟思想(参考Buffon 投针实验)。基本步骤可分为构建概率相关的模型或演变过程(平行线间隔、针长度、针倒下方向的等概率假设等)+随机抽样(投针)+计算估计值(根据相交比例计算π)。这种方法避免了中间复杂或带有随机性的过程的解析求解难度，又可方便的在中间加入其他影响因素。其得到的数值的相对误差(标准差)与$\frac{1}{\sqrt{N}}$同量级(N为有效抽样次数，这里即针与线相交的次数)。同时为提高随机抽样的有效性(可认为是投针实验中线间隔和针长的比例，间隔太大则需要更多的投针次数来减小到同样的误差)，可采用Markov Chain 的思想(Metroplis方法，一维采样，见后)或Gibbs采样(高维方法)替代一般的随机数采样。

4.1.1.4 数值微分方程

这里指对可分离成常微分方程组求解和一些计算软件可轻松完成的方程求解问题。这种方法要求定义出系统的演变方程并可适当化简，对于常微分方程(ODE)可不用考虑太多而使用四阶Runge-Kutta(RK4)方法(高阶方法如线性多步法(Adams方法)可提高精度，但会受计算机本身限制，甚至可能会出现错误)

4.1.1.5 软件

可以说是最常用的模拟方式，但免费软件较少，一个软件功能通常都很多，完整学习较花时间，所以不建议同一个软件很多人学习——充分发挥合作分工优势。

- 有限元：如COMSOL、ANSYS，可用于计算场的瞬态、稳态或本征模式，需要设置几何模型、材料参数然后生成网格进行计算。在安装、使用、结果呈现方面，COMSOL似乎更为友好，一些实验室已购买正版软件。后面较详细介绍COMSOL软件。
- 流场：一些通用的有限元或物理场计算软件虽然可以计算流体，但由于流体方程的性质，精度和准确度并不会很高，所以流体软件单独作为一种模拟来选用合适的软件。(因为我也不熟悉，就不多写)
- 刚体模型：简单地以牛顿力学和刚体模型为基础的模拟软件，但也可以解决很多问题，比如有约束的运动或简单多体模拟。此类软件有一些免费版本，或者一些游戏物理引擎也可作为很好的模拟软件。

4.1.1.6 编程

- 编程基本建议：

  使用有意义的名字；

  分行分段、代码对齐；

  能用库函数就不要造轮子；

  合理利用宏定义、头文件；

避免‘==’和‘=’的问题；

小心数值错误(溢出、除0)；

浮点数比较一般不会‘==’；

对自己不是太自信的话，，，加点注释；

设置有意义的文件名与方便使用的文件格式。

长程序加入阶段性输出用于表示程序运行状态；

如果修改的变量太多则可以为每组数据生成参数配置文件；

调试工具是个好东西，不会用的话也可以用printf调试法；

- 运行速度：(见图像处理-其他操作-程序加速部分)

4.1.2 对照方法

模拟或理论结果与实验数据的对照是一个完整实验的最后的过程，也是将之前内容连成一个整体、进一步强调物理解释的关键步骤，本节总结一些或许可行的对照方法(因为有些方法因为实验数据太差而没发挥过真正用途)以供参考。

- 图像对比：最简单的对比方法，不建议使用，尤其涉及2个自变量以上的曲线。。。放在这主要是因为别人用的很多，但两个相似的曲线其函数可能相差很大，而且涉及多个自变量时，一张二维图的对比会缺失另一个自由度信息，或者通常可以调节参数(使模拟参数与实际条件不符或在另一维度不符)使模拟曲线与实验曲线相符，但这并不是真实的模拟。若迫不得已只能对照曲线时(没有解析形式，没有描述中间过程的方程，没有合适的可以从数据中提取的合适特征量)，请尽量考虑完备，重点对比曲线特征位置。
- 定量：一个更好的对照方法：从模拟和实验数据中提取一些特征量用于比较，
- 参数拟合评估：用于有理论上的解析形式公式的情况，通过用理论公式对实验数据进行拟合，并以拟合优度判断符合程度。拟合时，可根据实际参数定义理论公式中的一些参数数值，然后对剩下的更为关键或不易测量的参数进行拟合，同时考虑到实验数据的特点，拟合时要加入自变量与因变量的偏移，如理论为指数形式时，拟合函数应为 $y = A\,e^{-\frac{x-x_0}{\tau}} + y_0$而非$y = A\,e^{-\frac{x}{\tau}}$。
- 极限条件：其实这并不是对照方法，也基本不用于展示，但可用来检验模拟或理论是否正确。将一些参数取极限值(极大或极小或一些特殊点)时，往往可以得到可预测的简单结果，所以在模拟结果与实验偏差太大又毫无思绪时不妨先验证一下正确性(或者在开始模拟前就该验证)，这种验证对于复杂演化过程的模拟更为重要。

4.2 软件

4.2.1 COMSOL

多物理场模拟软件，可计算时变场、稳态分布或特征模式，每个模块(每个功能)基于基本公式与设置的边界条件进行计算，每个功能相对独立，所以只需要学习需要的模

块。该软件提供了友好的帮助文档与案例，可先重复文档中的示例以熟悉软件流程和一些基本设置方法，或者直接修改案例中的模型来完成自己的模拟。

建议模型从低维到高维逐步增加复杂性，复杂模型或细网格需要较大内存的计算机计算(小内存也可以算，就是慢)。

4.2.2 InteractivePhysics

基于刚体模型与牛顿力学的免费模拟软件，可用来模拟简单力学模型或者多体力学过程(比如多体碰撞、颗粒)。其实并没有用过……所以放一些结果和参考网站： Examples

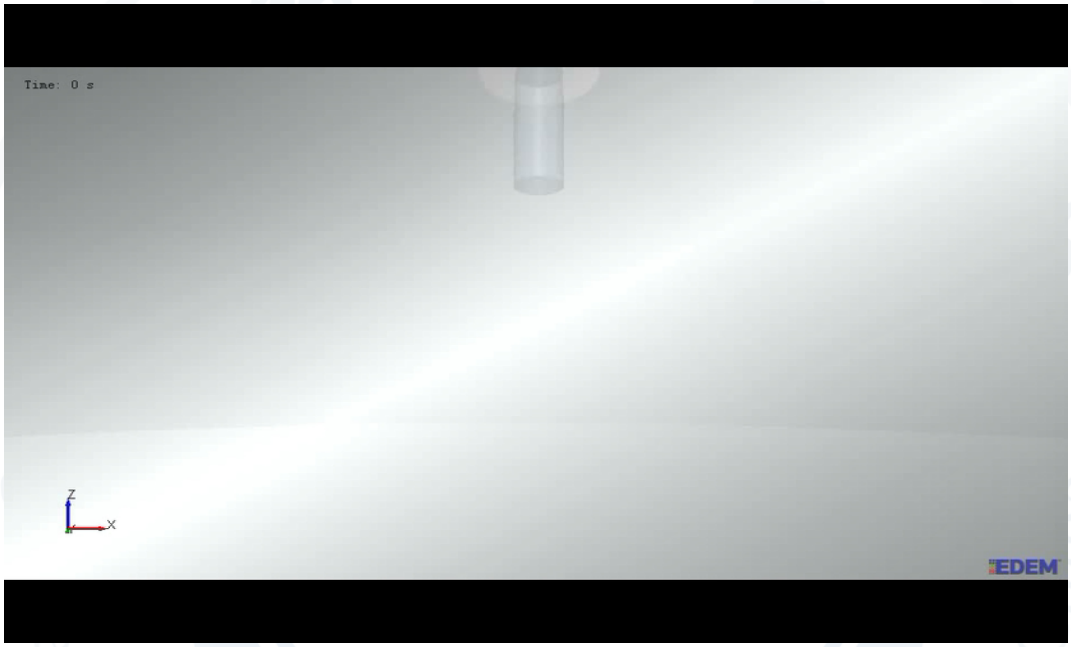


图 4.1: 钢球模拟

4.2.3 RK4

RK4即四阶Runge-Kutta法的简称，Runge-Kutta法为一系列方法，对于常微分方程或可化简成简单形式微分方程组的多元高阶常微分方程最常用的数值计算方法，有软件函数可以调用，也可轻松的自行编程。

四阶Runge-Kutta 方法(y可为向量)：

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ t_{n+1} = t_n + h \\ k_1 = h\ f(t_n, y_n) \\ k_2 = h\ f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}) \\ k_3 = h\ f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}) \\ k_4 = h\ f(t_n + h, y_n + k_3) \\ y' = f(t, y) \end{cases} \tag{4.1}$$

例(经典的混沌方程)：

$$\begin{cases} x' = a(y - x) \\ y' = bx - y - xz \\ z' = xy - cz \end{cases} \tag{4.2}$$

ode45函数示例

```
t=[0:0.01:100]; %求解区间或自变量值
y0=[1 2 3];    %初值
% 输入函数自变量初值
[t,y]=ode45(@Equation,t,y0);

% 函数定义，输出为方程组中的一阶导数值
function y=Equation(t,x)
    a=10;b=30;c=3;
    y=zeros(3,1);
    y(1)=a*(x(2)-x(1));
    y(2)=b*x(1)-x(2)-x(1)*x(3);
    y(3)=x(1)*x(2)-c*x(3);
end
```

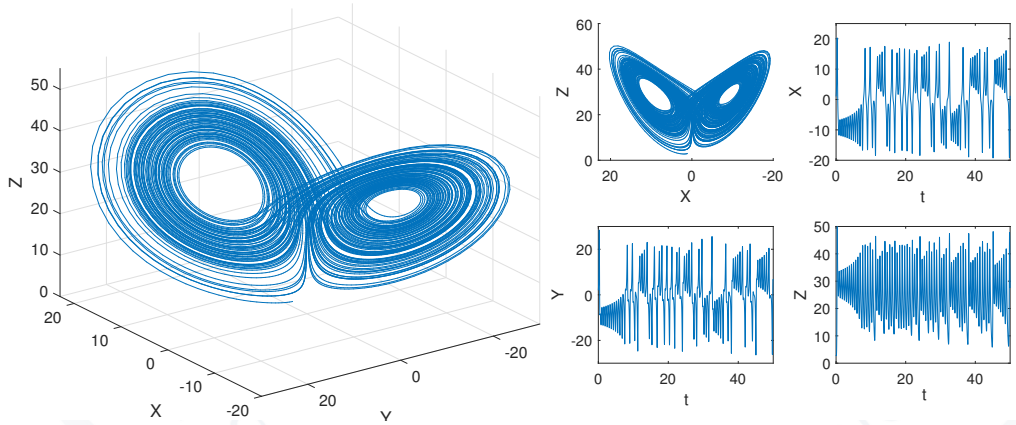
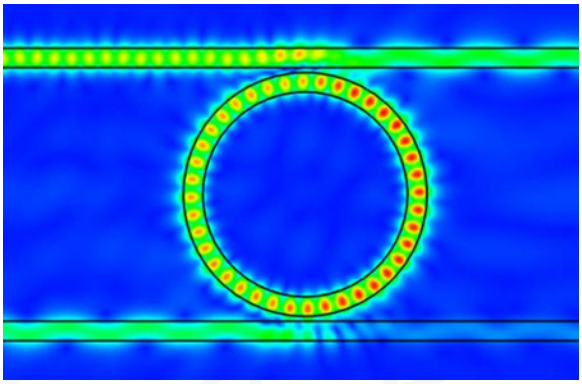


图 4.2: 运行结果

4.2.4 FDTD

FDTD(时域有限差分法)用于计算时变偏微分方程，通过初值条件或驱动源得到物理场随时间的变化，也可通过计算计算域内的场量或一个面的通量得到场的积分性质或频域性质。开源软件：MEEP



(a) 耦合



(b) 传播

图 4.3: 时域有限差分法

4.2.5 Mathematica/Matlab

通用编程软件，可高效地采用内置函数编写各种通用程序和实现常用计算功能。

Matlab具有多种数值/矩阵计算功能，具有信号处理、图像处理、优化计算等工具箱。同时提供Simulink可进行简单的系统模拟。

Mathematica以符号计算著称。具有强大的理论公式推导功能，编写方式也可以有较好的手写形式，符号推导和计算具有全精度，用于数据处理时全精度可能会导致计算时间太长，所以可能要改回数值计算方式。此外还提供一些有趣的功能，包括图形、音频、信号处理，但一些包装很好的函数虽然功能很强大，并不能单独适用于一个问题，也需要加入一些预处理。内置函数众多，帮助文档也很完善。(编写的公式可单行复制到Office文档里)

(Python)混入一个编程语言，所谓的“胶水语言”，语法简单，适用方便，有众多的模块可以导入，库函数代替Matlab大部分非专业功能(需要安装不同的库)，建议作为轻便的日常工具，也可做为接口联合其他程序。可能会遇到烦人的编码问题，且对于密集的计算，这种解释性语言运行速度较慢(Numpy、Scipy等采用C/Fortran作为一些函数的实现，所以这些函数的速度并不会太慢)。

4.3 计算物理(?)

此处可以推荐一下丁泽军老师的计算物理教材。

4.3.1 Monte Carlo

非常强大的方法，基于统计思想提取模拟的体系的特征量作为模拟结果。

- 原理：构建随机抽样过程，然后遵照演化规则使系统达到稳定状态(常需要一个参量的收敛来表示稳定状态)并计算参数。同前所述。
- 适用情况：高阶积分、生长模型、多体运动的演变过程或演变的最终稳态的参量计算。

  涉及一些随机过程(更准确的是系统较为复杂无法得知更多参数来决定系统演变，如粒子运动、多体碰撞等)可用特定分布的随机数来代替“随机”机制。如在粒子游走模型中，采用均匀分布的随机数选择运动方向，然后用高斯分布的随机数选择移动距离以模拟高斯形式的速率分布；或者采用分布区间的随机数作为下一步试探方向。

  对于需要在计算机体系中保证系统某参量不变的情况(通常是能量)，需要设置一个变量Δ和阈值Δ_{Max}来记录所允许的最大偏差，每步模拟前计算下一步改变带来的该量的偏差，并将偏差累积到Δ中，然后判断此时的Δ是否超出设定的阈值，超出则放弃该步改变，重新计算随机数和一步演化，不超出则接受该步变化作为系统的下一状态。
- 随机数：为保证结果的可靠性，演化过程中涉及的随机数需要尽可能的接近真随机(或者做到对结果没有影响)。而一般的编程语言中自带的随机数多为采用线性同余法(LCG，$r_{n+1} = mod(a * r_n + b, c)$)得到的随机数，这类随机数在小范中仍存在线性相关和一定长度的周期，同时也无法变量平面中的所有数值(这点通常影响不大)，所以为避免伪随机造成的问题，可以尝试使用非相邻产生的LCG随机数或者采用多个随机数计算下一结果的方式得到随机性更好的数字。对程序产生的均匀分布的随机数，通过反函数变换或者其他方法(比如舍选法，分段线性拟合得到特定的没有显式公式的分布结果)得到特定分布的随机数，比较重要的是生成指数分布的随机数和高斯分布的随机数(Box Muller算法)(不过一般都能找到库函数)
- 加速：一般来说，这类依靠上一步计算结果的程序无法通过并行方式加速，但可以同时运行多个参数，或者改变程序的编写方式，在一些细节上提升运行速度，比如采用数组的方式获取随机数，避免多次调用函数带来的延时。

4.3.2 Metropolis

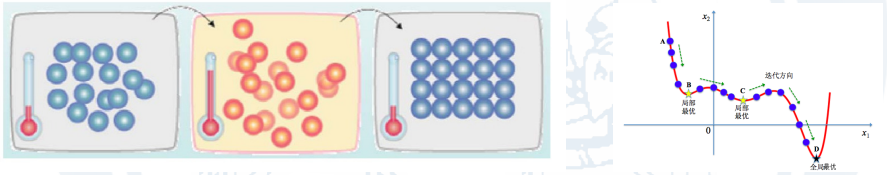
又称Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 方法，是一种对Monte Carlo 方法中采样方式的改进，用于得到更贴近理论分布的抽样，从而提高抽样效率。其中非常重要的细致平衡原理描述了稳态分布与各状态转换概率的关系，构建所需的状态转移矩阵也是MCMC的模拟过程。

- 一种编程实现方式：首先需要对系统设定一个“能量值”，系统的每步演化倾向于向稳定，即低能量的方向变动，所以对于每一步随机运动，通过比较这步随机运动前后能量值，变小则发生此变化，变大则再选取一个随机数，比较其与能量增加对应的一个值(比如能量增加的可能性，常用的Boltzmann 分布形式：$e^{-\frac{\delta E}{kT}}$，kT可设为描述系统状态的一个参数)的关系，依次判断是否接受这样一步能量增加的变化。

- 适用情况：加速一维分布的抽样，高维分布常因计算得到的结果大于1而降低效率，此时可用高维分布的Gibbs采样代替。适用于寻求稳态的情况，同时需要提取一个参量作为能量值(见模型抽象部分)。

4.3.3 模拟退火算法

- 原理：从大范围的系统状态先寻找稳态，再逐步细化得到所需系统参数对应的最稳定状态的精确位置。模拟过程中，每次改变系统参数，使有较大差异的状态间转变由容易到困难，每次改变系统参数后，采用Metropolis抽样使系统达到最稳定状态，最终得到系统全局最稳定状态的精确位置(需要系统最稳定状态在每个温度对应的稳定状态附近)，之前的易转变状态是为了使系统可以跳出一些局部稳定状态。系统参数可认为是上述Metropolis方法中的参数T，逐渐减小T使大能量间隔的状态转变逐渐困难，因此其称为退火算法。
- 示例与应用：用于确定具有多个局部稳态的系统的全局稳态，如晶体相变、最优路径问题等。对于“低温”时的状态若单个“能量”不足以使系统跳出当前的局部稳态，则可通过设置多个表征系统稳定情况的参数，并在一个参数陷入僵局后转换判据参数，最终达到全部参数均最优的稳态(比如魔方求解)。



(a) 物理机制类比　　(b) 系统转变过程

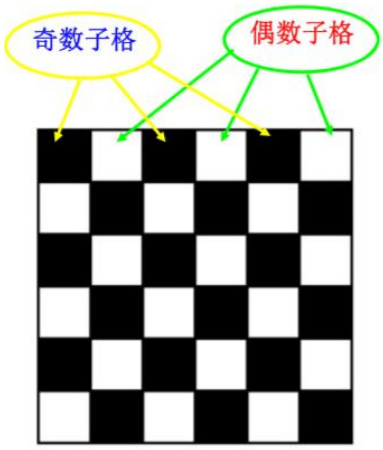
图 4.4: 模拟退火法

4.3.4 元胞自动机

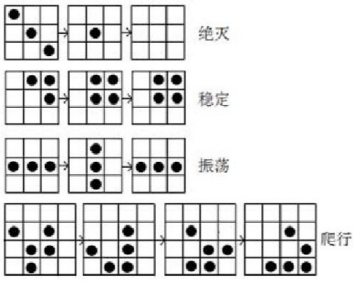
元胞自动机是一种基于迭代计算的过程演化模拟，但由于其定义灵活，编程简单，利用网格化系统的有限局部状态与状态间演变过程而对系统进行模拟，其物理内容或作用机制可体现在状态的定义与演变中，所以也作是可考虑的一种模拟方法(虽然很可能用不到，该模型有些情况下太过理想，CUPT题目中曾用于模拟沙堆)。

关键步骤在于定义元胞和元胞间转换过程。需要在小范围内找到演变机制，并离散抽象化为元胞，元胞的构成可反映系统状态，而演变的规则、概率反映其中物理机制。边界部分可设定为定值，也可采用准无限大模型的周期型边界($State(-Boundary-1)=State(Boundary)$)；局域范围也可选择最近4、8、不对称形状邻域。此外，还要考虑能量守恒等在演变中的限制，可采用不同行的元胞交叉演化的方法。

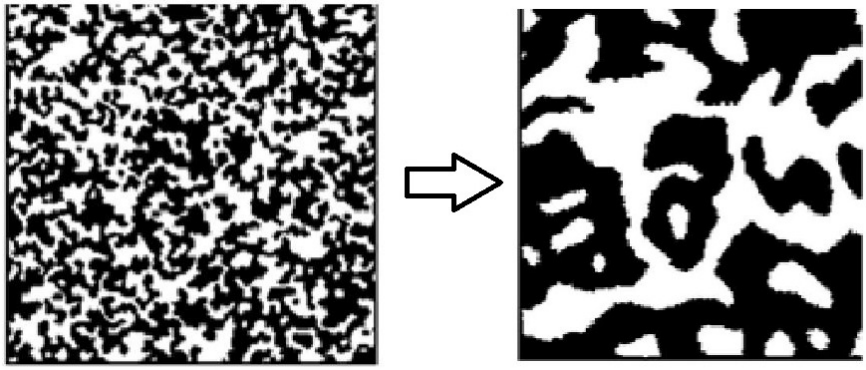
元胞自动机可用于无序-有序转变，自组织、物质扩散的振荡、螺旋波和混沌等模型。



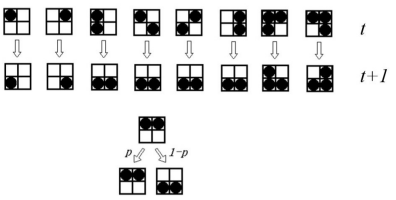
(a) 交替演化



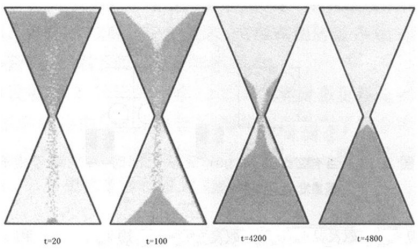
(b) 生命游戏



(c) 磁化



(d) 沙漏模拟·元胞与规则



(e) 沙漏模拟·结果

图 4.5: 元胞自动机

4.3.5 模型抽象

模拟中最重要的部分，为保证程序可以实现待模拟的过程，同时尽量简化编程提高运行速度，将实际过程中复杂、带有随机和涨落的机制映射为可用代码表达的模型，提取实际过程中的主要过程，用模糊简单的作用代替实际中复杂甚至不可计算的过程。实际问题多种多样，所以仅举两个例子：

- 电子运动：

  物理情形：电子在材料中热运动，同时受到电场(可恒定也可变化)的作用，材料会给电子一些阻力，并且电子也会被材料中的原子捕获而不能再运动。

  模拟方法：材料的阻力一般是来自材料提供的一个有周期性的势场，通过计

算(具体过程见固体物理)可以发现这种影响可通过改变电子的“质量”(称为有效质量，可各向异性)来替代；而电子的热运动可采用Maxwell速度分布对每次电子运动的方向(均匀的)和距离(正比于速度，也是Maxwell速率分布)用随机数来选择，并改变电子位置，其中用到的质量要改为有效质量；对于电场的影响其提供的是单方向的漂移运动，可在随机运动后再附加上电场导致的运动(= $E \cdot \mu_e$，μ_e是一个叫做电子在材料中的迁移率的系数[或张量]，可通过查表得到)；最后电子的被捕获的情况若捕获速率正比于电子数量(如果还有其他影响因素，则可加入到概率的计算中)，则可以根据每秒捕获电子数和模拟中每次运动代表的时间间隔设定一个阈值作为“寿命”，每次运动后产生一个随机数，然后比较阈值和该随机数来判断是否被捕获(往往需要大量电子的模拟来反映材料性质)。

- 碰撞自组织：

  2019题目中自组装的棍棒自组装情形。

  模拟方法：棒在振动过程中受到碰撞，并且可以每次随机改变一个小角度和距离，但直接模拟碰撞显然计算量是很大的，而且编程复杂，另一种方法是考虑碰撞的等效作用。一个独立、固定的棒受到的各方向平均碰撞力可认为正比于不同方向的边的长度，且垂直于该边缘，但两个有一定夹角的固定的棒，因可进入其夹角中间的棒数量减少，且可碰撞的范围减小，导致在这种位形下两根棒中的一根受到的力不再均匀，而是产生了向内的合力。这个合力可作为与上面电场类似的漂移运动，使棒在随机运动后向内偏移一个角度，也可作为Metropolis方法中的能量进行计算。
- ……

4.4 对照

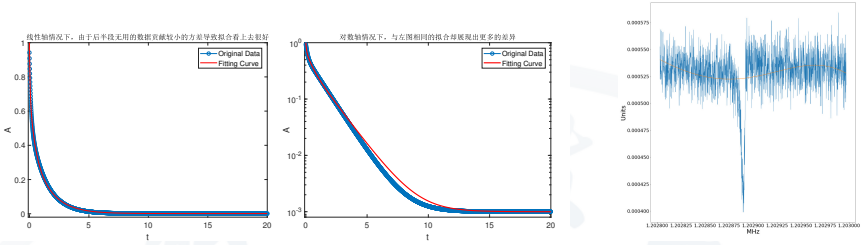
4.4.1 拟合优度

用于可推导出解析形式理论公式或者比例关系的情况，对曲线采用理论公式进行拟合，通过拟合优度来验证理论。一般以相关系数(r或r^2)或卡方检验(χ,表示置信度)来代表符合度。但有时看上去符合更好的曲线拟合优度参数并不是最好，或者拟合优度参数相近的几条曲线中的参数差别很大，参数太多时也会出现多组不同参数均能呈现较好的拟合结果。

4.4.2 曲线特点

即提取曲线中的特征点(转折点、峰值位置与大小)数值进行比较，或者对曲线通过变换(Fourier变换、平均值、拟合参数值[与拟合优度不同，这里的拟合参数指函数形式已知，但其中的参数待确定的情况，比如指数拟合的衰减寿命、线性拟合的斜率，通过在模拟中带入部分实际参数值，然后比较对模拟结果拟合出的参数和实际值的差别。])得到代表整个过程的数值。则可对实验和模拟结果得到的值进行比较来验证理论。

曲线特点同样是一种可以配合拟合优度验证理论符合情况的方法，若不同参数均可计算出较好的拟合优度参数，则比较曲线变化较快的部分和转折点拟合情况(前提是变化速度不超出仪器响应，否则数据无效)，优先选择更能反映系统变化的一组参数作为结果。



(a) 曲线特点　　(b) 噪声影响特点

图 4.6: 拟合曲线比较

4.4.3 实验-理论耦合?

一种用于比较由微分方程决定的过程的似乎可行的方法，但往往因为理论与数据差别太大导致没有什么使用价值。对于数据较好、与理论误差小的结果，可用来探究最优参数。

微分方程的数值解可以得到过程参数变化曲线，但对于无法提取特征量进行比较只可比较曲线相似度时，一种方法是以每步有限采样率测到数据作为初始条件，并通过微分方程预测下一步测量结果的自变量的数值，然后比较计算值与测量值的偏差，对全部数据这样处理后取每次偏差的和或均值，以平均偏差作为对理论或方程中参数是否合适的衡量判据。不过这种方法若用于较多数据且本身测量误差较大的情况时，最终的平均偏差会很大，甚至与实验数据无关……所以这种方法只可用于误差小或容错率较大的数据理论，或者说这是种在准确参数附近衰减很快的方法，因而对于参数可有较大的筛选精度。

第 5 章 PPT and Show

经过一段马拉松般的实验和数据处理，终于到了直接展示成果的阶段。“菜鸡互啄”重在啄，而CUPT中，PPT也占了一半之多，故PPT和表达可以认为是马拉松最后终点线前的几步。本章部分内容并没有定式，仅仅总结之前比赛中的经验与一些建议。

5.1 展示目的

展示即表达，但为有目的的限时表达，所以在PPT制作与表述中，针对听众的不同，要达到的目的的不同，逻辑结构与展示方式也应对应改变，减少冗余，突出主干内容与独特内容，甚至可以尝试加入引导成分，避开对时间的浪费与错误氛围。

最终效果应首先保证使听众(一般难度最大的是评委们)正确理解自己的主干内容，然后尽量突出独特内容并使听众发现这些内容的独到之处与重要性。

- 正方：清晰而正确解释题目现象，避免存在漏洞。在照顾评委能力的同时尽量用易理解的方式凸显自己独到之处。
- 反方：从根据已有经验，客观看待正方报告，从中寻找理论、实验问题而非欠缺，避免偏离问题关键原理以及实验重点，也不用陷入对实验细节的纠缠中。
- 评论方：评价双方表现，如优缺点，可以从双方的回答中表达自己的判断。同时可以对两方的不足提出相关建议。

5.2 规范

5.2.1 PPT格式

- 页码：必须要标，以便于讨论具体页的内容，不标很有可能被指出(尤其在提不出有意义的问题的时候)，不建议用PPT自带的页码，最好用较大字号，可略作装饰。
- 子标题：不是硬性要求，但可以提供很好的逻辑指导，建议标。
- 日期：没什么用，似乎不写也可以，虽然总有人说要写。

5.2.2 学术规范(?)

- 作图：

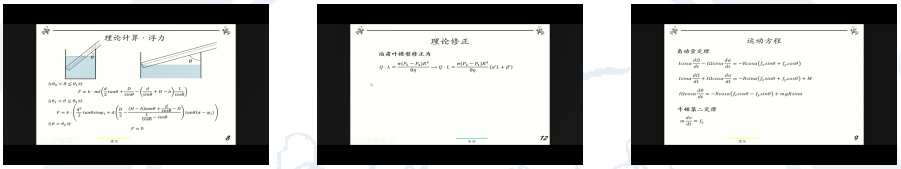
  必要元素：图名、坐标轴含义与单位，多条曲线情况下表明每条曲线的含义，可用标记或颜色(尤其是和光谱、颜色有关的曲线)进行区分(在没有有意义的问题可提的时候这些总被关注)。可添加的元素包括有多个参数测试时的特定条件、拟合结构与曲线方程、数据误差棒等用于表现信息和测试条件的元素。更多的技巧。

- 公式：公式的形式可分为线性(1/x)和手写样式($\frac{1}{x}$)两种，为便于观看建议采用手写形式，并每个公式单列一行。

  采用可采用斜体来凸显公式部分，同时有上下指标时应改变字号使其在投影上足够可以分辨。对于需要引用的公式可以在公式末尾添加标号，但最好不要引用其他页面的公式。

  解释公式参数的含义是将物理公式与实际过程联系起来的一个步骤，但列表式的念一遍或列在PPT页面上并不是一个突出重点的方法，同时让观众不断比对所列的含义和公式中该符号的位置也是很花时间的事，往往导致观众没有完全理解公式就被翻到下一页。建议采用箭头+文本框的方式将公式中的符号含义标在周围，并由箭头指向该符号(要注意避免交叉和混乱的布局)，讲述时也只需要点明与问题研究的参量相关的主要变量即可，不需要毫无重点地讲述全部符号。

  Office公式编辑 Latex公式编辑 Mathematica公式编辑 希腊字母输入(每种方式差不多都一样)



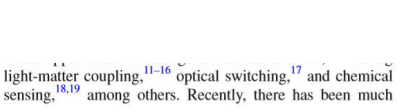
(a) (b) (c)

图 5.1: 公式展示

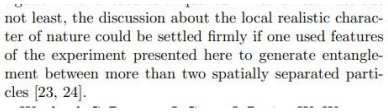
- 引用：

  格式与标注：引用格式需要包含作者、时间、来源(期刊名、出版社)，可选加题目或引用材料类型，可方便地从Google学术等网站查到文献并复制其引用格式。在问中标注时多为标在引用的一段结论或公式的右上角，引用的图片可标注在图名的右上角。

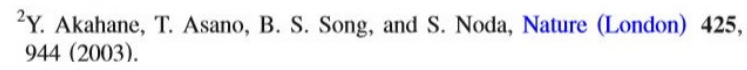
  例：


light-matter coupling,[11–16] optical switching,[17] and chemical sensing,[18,19] among others. Recently, there has been much

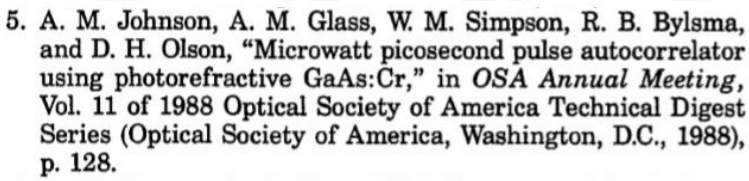
(a) 文中引用例


not least, the discussion about the local realistic character of nature could be settled firmly if one used features of the experiment presented here to generate entanglement between more than two spatially separated particles [23, 24].

(b) 文中引用例


[2]Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, Nature (London) 425, 944 (2003).

(c) 引用格式例


5. A. M. Johnson, A. M. Glass, W. M. Simpson, R. B. Bylsma, and D. H. Olson, "Microwatt picosecond pulse autocorrelator using photorefractive GaAs:Cr," in *OSA Annual Meeting*, Vol. 11 of 1988 Optical Society of America Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1988), p. 128.

(d) 引用格式例


[9] Spivak,G. "Can the Subaltern Speak?" [A]. In C.Nelson & L. Grossberg(eds.). Victory in Limbo: Imigism [C]. Urbana: University of Illinois Press, 1988, pp.271-313.

(e) 引用格式例

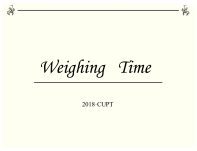
图 5.2: 引用格式

- (找资料)： IYPT的题目许多是基于近年论文报导的新现象或一些有趣的玩具或应用，所以其相关论文或者已有的研究均可用来参考，虽然这些材料并不能完全信任照搬。有些论文因年代久远，可能需要到一些论文库或国内收录的资料站上去找，有些可以从图书馆所藏的期刊文献中找到。而与近期的文献相关的问题可从论文的被引文献或引用文献中找到更详细的材料。但查找时不建议使用中文翻译的内容(因为翻译往往很差)，有时其英文题目也只是现象的简单总结，不适合直接查找。可以先从Wiki或视频网站上用多个关键词找到题目描述内容的“正确”名称后再查找其文献。附录中列有一些资料网站，期刊网站没有列出。

5.2.3 一些建议

- 例：一个可以参考的PPT的部分页面，但不需要照搬，适当加入一些自己的风格和体会。

  正方：标题、目录、题目、正文(实验+理论+误差分析+结论)、总结、参考文献、致谢、附录(见后)。



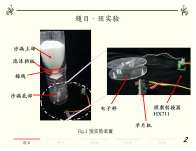
(a) 标题



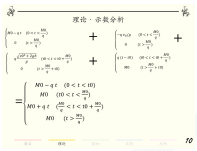
(b) 目录



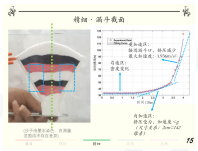
(c) 题目



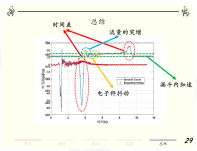
(d) 正文·实验



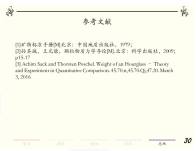
(e) 正文·理论



(f) 正文·分析



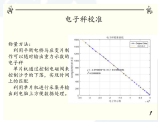
(g) 正文·总结



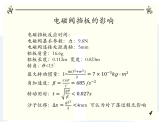
(h) 参考文献



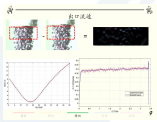
(i) 致谢



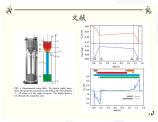
(j) 附录·实验条件



(k) 附录·补充计算



(l) 附录·实验细节



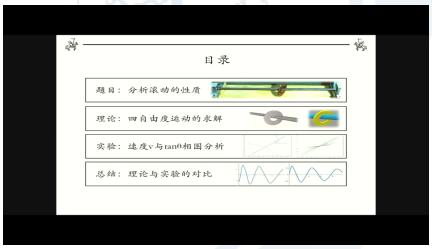
(m) 附录·其他

图 5.3: 正方参考

目录：可添加超链接以方便讨论，或添加一些特征结果，但往往一翻而过，用处不大。



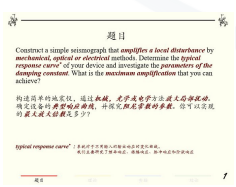
(a) 目录超链接



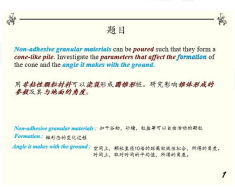
(b) 内容图示

图 5.4: 目录

题目分析：点明研究内容和限制条件，必要时，需要对一些有争议或重点的关键词进行解释。



(a)



(b)



(c)

图 5.5: 题目分析

正文：自由发挥，保证清晰简明。



(a) 对比



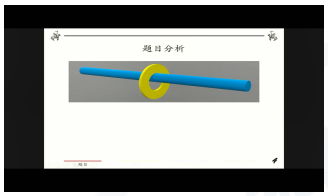
(b) 对比



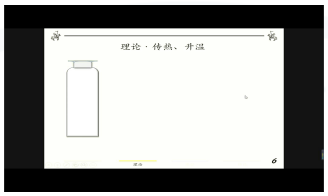
(c) 多参数展示



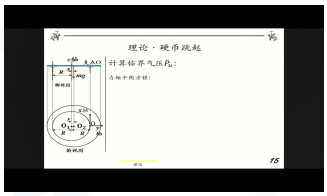
(d) 理论分析·分析



(e) 理论分析·坐标系



(f) 理论分析·影响舍选



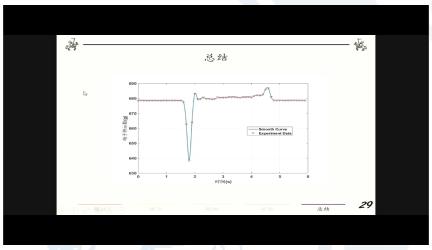
(g) 理论分析·计算

图 5.6: 正文展示

总结：回顾报告，并再次点名结论(评委很可能迷失在繁杂的报告中)和创新点。



(a)



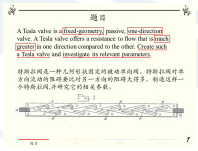
(b)

图 5.7: 总结

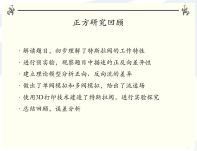
反方：标题、题目、正方报告总结、正方优缺点、致谢、讨论问题、补充材料。



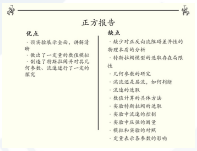
(a) 标题



(b) 题目



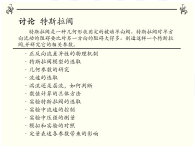
(c) 正方总结



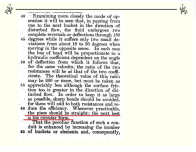
(d) 正方优缺点



(e) 致谢



(f) 讨论问题



(g) 补充材料

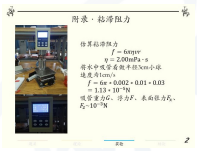
图 5.8: 反方参考

评论方：标题、正方优缺点、反方优缺点、主要讨论问题、自己的观点、致谢

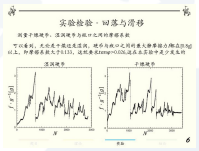
- 字体：不要用等线，不用等线，不用等线。。。建议换成楷体。英文标题可适当用

较花写的字体，但至少要可以清晰辨认，英文小字可随意，同样保证清晰易辨认，字母间隔不要太大，也不要全部用大写来表示单词(相比小写并不熟悉)。汉字不要有错别字(虽然有了也很难注意到。。。)

- 附录：虽然不一定会用到，但很重要。在PPT正文后面添加一些补充内容，可以是用来对正文中一些由于较复杂又不必要解释的内容进行补充(比如繁琐的推导、完整的计算、模拟模型与细节)；或者用来补充实验中的细节、仪器参数、测量方法这些很可能被挑刺的内容；如果能根据主要的文献或者该实验普遍存在的问题预测一些对手可能提问的内容，也可以将一些用于回答的资料补充到附录中。



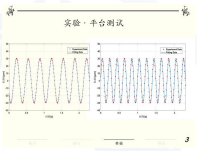
(a) 可忽略的条件计算与说明



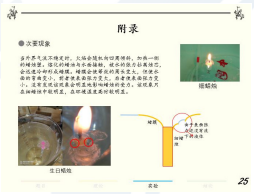
(b) 可忽略的参数测试与说明



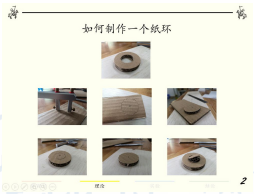
(c) 仪器参数



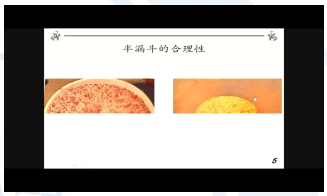
(d) 补充测试



(e) 可忽略过程说明



(f) 实验步骤细节

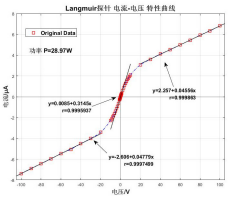


(g) 实验中可能被质疑的内容

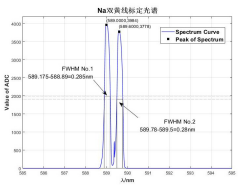
图 5.9: 附录

- 图片：分为两种，一种为数据/模拟作图，一种为拍摄的图片。

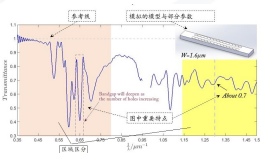
数据/模拟作图：曲线图需要保证其信息可以清晰地展现给观众，所以除了要有前面所述的各种信息的标注外，还需要考虑投影带来的观看效果，保证曲线和标注清晰易辨认，使用大号加粗字体，并对数据线宽加粗。一些数量较少的离散数据可用标记(也需要调节大小与线宽)来表示数据，并采用拟合曲线或平滑曲线代替数据间的折线以更自然地反映趋势。添加网格可对坐标轴刻度进行延伸，可使曲线不单调，也可用于需要对曲线一些位置数值分析的地方。



(a) 图示1

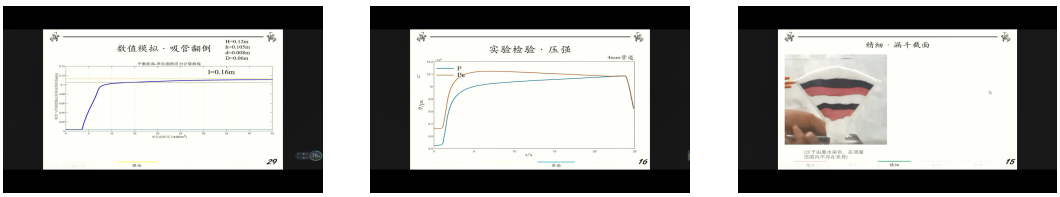


(b) 图示2

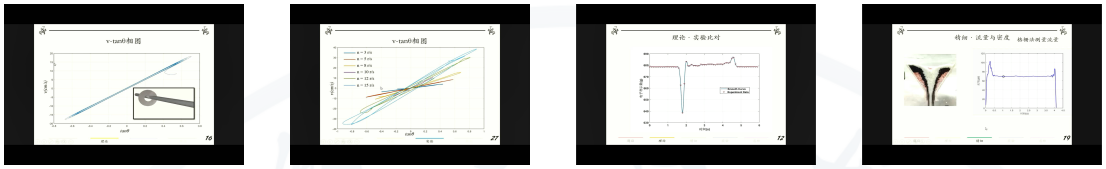


(c) 图示3

图 5.10: 数据作图



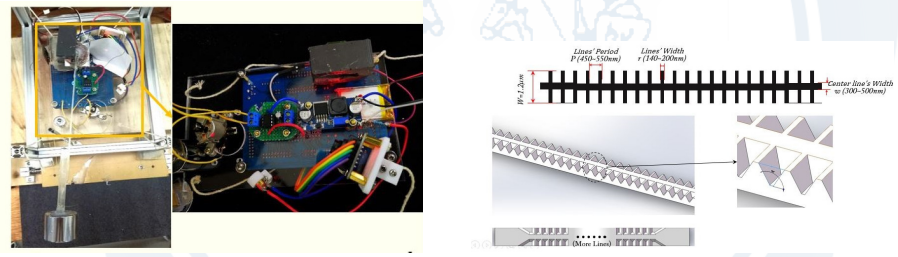
(a) 标识线与实际装置对应　(b) 过程分析1　(c) 过程分析2



(d) 特征标注　(e) 变化趋势与特点　(f) 理论实验对照与特征　(g) 与实验过程配合

图 5.11: 曲线分析

拍摄图片：提高图片内物体的对比度(类似图片处理部分中的拍摄条件)，选用简洁的背景以突出要拍摄的主体，并在PPT中适当调节图片的亮度和对比度。而作为拍摄的仪器图片，因为一般有几个组成部分，建议用文本框和箭头标注每个部分。另外对图片应适当剪裁、缩放并压缩，使播放更流畅的同时也能使细节展示清楚，太小的细节在投影上并不能看清。



(a)　(b)

图 5.12: 细节展示

- 对比度：指PPT页面中的对比度，PPT背景和装饰的主题色会影响页面内文字和图片的观看效果，同时太繁杂的装饰(比如网上的一些推销、介绍模板)也不利于凸显展示内容，所以简单修饰避免单调就好。PPT的布局也要避免遮挡和太多的内容。采用动画控制页面内元素的展示数量、顺序和位置(见下)以达到整洁而富有逻辑性的展示效果。对于一些对比度难以调整的情况，可在图片或文本框上添加阴影效果。
- 子标题：为PPT的每一章节与章节内的不同页面添加子标题可使观众更清晰地观看展示，也可如模板底部那样设置一些标志，以高亮的标志来表示当前内容。

5.3 展示

5.3.1 观感

最有效的优化方式是将自己设想为观众，然后尝试仅从12min的讲述中获得尽可能多的信息，最终得到的整体感受变差一些后基本就是其他人听完的结果。

- 观看者角度：分为正反评三方中的两方之外，更需要考虑的是评委的感受。

  对手一般对题目有基本了解甚至较深的研究(当然也有例外，比如我……)，所以可以设想自己观看PPT的感受，但观看时不能预先受自己对PPT内容了解的影响。需要提供一个清晰的视角，讲述时避免遮挡(尤其座位离投影屏较近，观看角度很小的时候)，一般看到不了解的公式或较多曲线的图时会尝试去理解每个参数/曲线的意义，这时配上讲解或者较近的标注(不是图例形式)会减少理解的时间，当然建议只放表示原理的重要公式，避免繁杂的推导与计算(放了也没人看，打起来还费时间)。较好的逻辑性与每部分预先点明的讲述主题均可降低观众理解难度，避免错过主要信息，从而导致理解的偏差(很可怕。。。)，最后的简洁总结也是一个给观众强调正确表达内容和思路的机会，同时其作为离下一个阶段最近的部分，很有可能影响观众最终的印象。

  评委的感受就很难把控了。。。首先不能假设其了解题目，并且在正方报告开始的一段时间内很可能在读题目……其次不能期望其有较全面正确的物理基础，更不能期望有工科知识基础(即使学校名字有工业、工程。。。)，所以讲述时要注意有逻辑地清晰表述观点，同时尽可能用最基础的语言和理论进行解释(甚至琐碎)，可以参照新加坡队在IYPT中的表现，其选题不会是很难的内容，展现的结果也不一定有太多新意或者深刻结论，不过会把过程和原理讲的非常细。但琐碎并不代表凌乱，首先表明观点的中心(尽量简短的关键词)，然后在讲述中尽量复现该中心，并表明每个实验理论过程与中心观点的联系。

  虽然CUPT的评委有一定普物基础，而且太过琐碎也会要求对时间和节奏掌握地很好，但不代表评委对题目的了解可达到根据较简洁地讲述就足以评判展示内容是否深刻揭露本质的地步。另外目前来说，堆砌参数往往即无脑又可达到很好的得分效果，也不需要费力得到定量的结论(参见CUPT表演赛[决赛])，所以至少保证展示内容尽量丰富。

  在展示中要避免时使用复杂的表述，或者采用易让人产生误解的表述(比如将通过用来做电子秤的应变片测量振动说成采用电子秤测量振动，或者使用直角坐标系描述转动[其实并没有什么问题])，因为一些基础较差或不认真的观众往往会发现这种可能的错误后，只会抓着这些表述不放而忽略其他更主要的内容，并且对于评委的误解只能在评分后才能解释。
- 投影效果：投影仪的原理导致其投影画面颜色饱和度并不会很高，分辨率也较低，而且较差的投影会有颜色的失真，所以PPT上应使用较大的字体与放大的细节图片以避免模糊影响，避免使用难以与白色背景分辨的浅色标记(浅粉红、浅黄色等)。
- 逻辑：清晰的逻辑可以帮助观众理解正在讲述的内容与目的，大致方式和高考议

论文差不多……以下是两种可能的PPT组织方式，仅供参考。

预实验-理论-实验-其他：普通的顺序，介绍预实验，给听众一个简单印象，然后根据实验内容提出理论，并通过与理论参数相关的实验对理论进行验证，也可补充更详细的理论完善结论。最后是误差分析、总结等。

预实验与理论-重点-实验-其他：实验操作与粗糙理论较为简单易懂的情况，不需要浪费太多时间在大家都知道的地方，简单介绍一下以保证PPT的完整性，然后将重点放在自己独特的解释、观点上，并进一步展示相关的详细实验。最后加入误差分析、总结等内容，如果时间允许可对比自己的分析与一些常见参考文献中的内容(前提是其他人[尤其是评委]了解文献内容)。

- 图片/文字/视频/公式：并不推荐在正文中加入大量文字，因为每页PPT停留的时间很难保证观众能看完文字并理解，而且文字解释相对来说也是一种较花时间的方式，所以每页标注关键字和简洁的结论，略去繁琐的表述方式。公式类似，繁杂的符号和冗长的推导过程也会有相同的影响，对于这个限时的报告，仅解释主要原理公式和与结论/现象/后面的研究内容相关的理论结果即可(反正中间过程大多也听不懂?)。

5.3.2 演示动画

似乎观众有图就不看文字，有动画就不看图，所以合适的动态演示可以更清晰简洁地进行展示(当然混乱的动画反而会造成误解……)。需要建模的3D动画可用部分CAD软件制作动画，如SolidWorks，或一些专业动画制作软件，如Blender、Adobe Flash(?)制作。而一些简单的动态图(即GIF图)可直接编程生成。

GIF生成 Matlab代码示例

```
filename='Output.gif'; % 文件名
DelayTime=0.2;     % 帧间延时(s)

for i=begin:step:end
    % 自定义的窗口绘图函数
    % 可绘制曲线，也可读入图片后显示
    Plot(i);

    set(gcf,'color','w'); % 背景颜色
    frame = getframe(gcf); % 帧对象
    img = frame2im(frame);
    [I,map] = rgb2ind(img,20); % 压缩映射
    % 写文件
    if i==begin
        imwrite(I,map,filename,'gif','Loopcount',inf,'DelayTime',DelayTime);
    else
        imwrite(I,map,filename,'gif','WriteMode','append','DelayTime',DelayTime)
            ;
```

```
    end
end
```

- 装置：利用动画展示设备的组装与相对位置关系，尤其是无法在2维图上展现的情况。对仪器建模后通过切换视角以展现仪器各个部分(其实2维图更清楚？)，或者对零件建模后展现拼装过程以说明复杂仪器各部分关系，虽然可以提高表观水平，但这些仅为锦上添花的内容，既非必要也不会是讨论重点，所以不要花太多时间……对实际仪器拍摄视频也可实现类似功能，但相比对比度高，背景简单的动画来说，效果并不好。

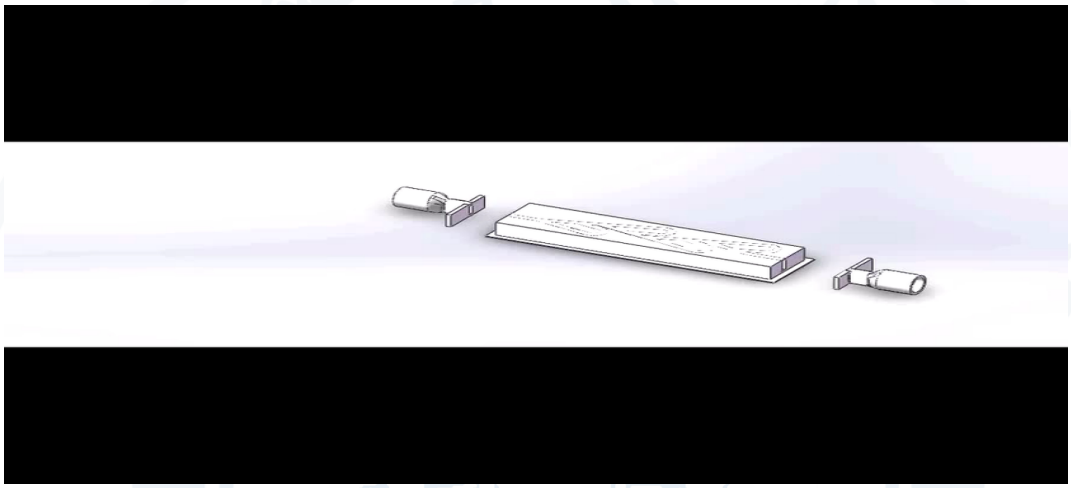
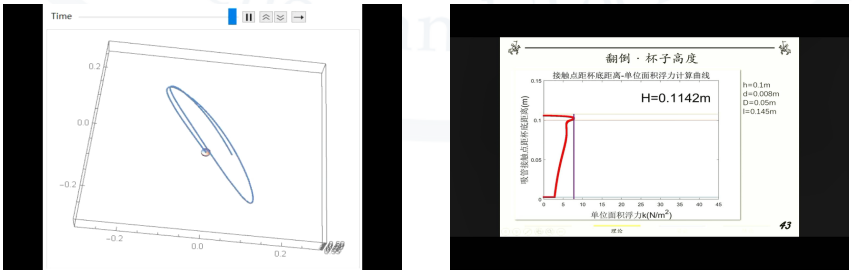


图 5.13: 装置动画

- 实验过程：类似预实验，采用模拟动画实现实际的过程，可用来代替实际实验中因为时间或角度原因不易拍摄的部分，或者完全用制作的动画展示一个画面更清晰明确的过程。
- 间端分析：对于一个历经不同阶段的实验过程，结合之前的实验过程在中间插入
- 过程演变：更为重要的动画演示，以时间变化展示另一维度自变量的变化。如涉及追迹的问题，二维空间坐标中(其实人并不能很好的理解三维图中的相对关系，所以不如将一个维度换成时间然后用更易理解的二维图展示)以一个点的运动说明物体随时间的运动(用不同颜色表示数值也可增加一个维度)；



(a) 轨迹 (模拟结果)　　(b) 参数变化 (GIF,Matlab)

图 5.14: 过程演变

5.3.3 图片展示

- 对比度：包括图片内需要突出的物体与背景的对比度与整张图片放置在PPT中与背景色或周围元素的对比度。前者可用黑色绒布作为背景，并加强照明以突出拍摄物体；后者则需要考虑PPT的排版与主题色的使用，若需要展示和背景相近的图片时，可考虑为图片添加对比色、黑色粗边框或添加阴影。
- 分辨率：分辨率会影响观看感受加载速度，拍摄时需要保证细节的分辨效果，但放在PPT上后，为避免播放过程中出现卡顿的情况，进行剪裁并压缩。
- 颜色与光照：指拍摄图片的背景颜色和光照，
- 裁剪：裁剪成小尺寸或特殊形状，以保留主要部分，甚至可用抠图软件仅保留主要物体。
- 压缩：为保证PPT播放的流畅性以及减小文件大小便于传输，在裁剪、缩放好图片后进行压缩。
- 示意图：采用简单图形表示实验过程或实验装置，以突出实验思路或逻辑，同时比实物图更易布局。
- 标注：复杂的图片可通过添加一些边框+箭头+文本框来对图片中内容进行说明，尤其是说明拍摄的装置图片或数据曲线中的特殊部分时。
- 堆叠：emmm不建议堆叠，用消失动画去掉底部的图片。但用小图来解释大图中的细节时，若不可避免需要堆叠图片，则可在在小图上添加粗边框或者阴影，并用图形边框圈出小图显示的部分。

5.3.4 PPT动画

- 逻辑：采用动画凸显、标识讲述的部分，使讲述跟随PPT，或构建简单的示意动画来表示思路。
- 数据展示：对于需要分析一条曲线的特征或拟合效果并同时需要比较不同参数下得到的曲线之间变化趋势或者展现相似的理论符合效果时，可通过PPT动画实现先展示一条曲线，再在不改变坐标轴的情况下展示其他曲线。一种方法是直接在PPT中利用数据插入曲线，然后对曲线添加动画，但这种作图不太方便，可操作性也不高；另一种方法是预先导出具有相同坐标和尺寸的单条曲线和多条曲线的两张图，在PPT中设置透明色并将其坐标对齐，为一张图添加“出现”动画。

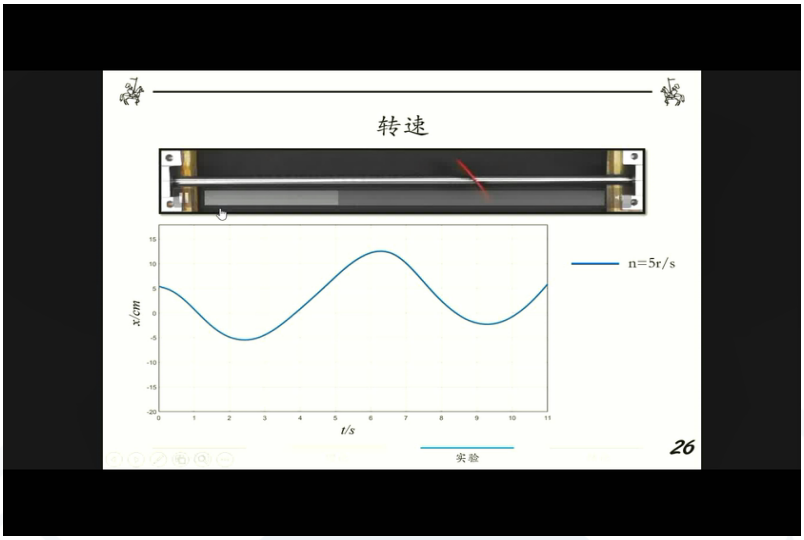
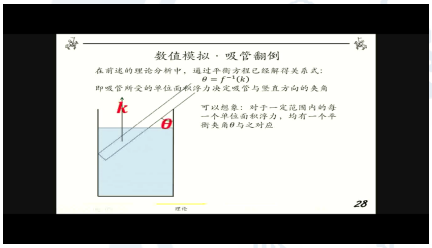
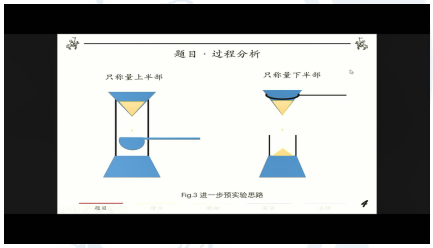


图 5.15: 多曲线展示(切换应与上方视频同步)

- 缩放：用来凸显部分元素或者隐藏部分元素，或者配合移动等动画使用。
- 移动：PPT动画可提供直线移动、沿曲线移动和旋转操作，可用来制作实验过程的运动演示，也可用来配合缩放将一些示意图移动到角落里作为展示说明。



(a) 实验过程



(b) 页面衔接与示意图

图 5.16: 缩放与运动

- 时间：包括动画时长和开始时间，可拖动动画窗格里的时间方块进行修改。此外尽量减短动画时间，页面切换之间动画可能会影响讲述和翻页时的流畅性，所以页面切换间不建议加动画。
- 顺序：多个动画间不建议均使用单击来开始每一个，使用同时开始与下一个开始，并调节这些之间的时间。

5.4 团队合作？

CUPT虽然一般是一两个人负责一道题目，但从全部准备过程来看，这仍是一个与整个团队合作相关的比赛。良好的团队分工、合作可以更好地激发每个人的实验热情并提高整体效率，本节总结了一些关于团队在比赛初、中、末期的合作建议，但仅供参考，硬性执行或许会有反作用。

- 能力与意愿沟通：良好的团队合作与分工首先应基于对队员个人能力和意愿的了解与关注的基础上，因为这终究是一个以自愿为基础的比赛(虽然学校可能会有些

奖励)，尽量满足队员自己的想法才能使队员有兴趣去解决问题。团队组成后建议先找时间一起沟通交流一次，每人介绍自己可以完成的事情(已有能力或愿意去学的能力)以及感兴趣的题目，之后的分工也可优先基于此进行分配。

- 文件共享：主要用于实验思路、数据、模型、PPT的共享。采用U盘或QQ进行传输并不利于其他人接收，也没有一个清晰的目录，使用网盘、文件合作软件(如坚果云，OneNote)、Github(我就随便说说)、学校邮箱的ftp服务器空间(仅300MB)则能解决以上问题，但需要有人贡献一个账号。或许数据、PPT并不需要太多人了解，但关于实验思路还是建议做成一个可以公开修改的文件，利于每个人记录并分享自己的想法。
- 题目分配：分工合作的开始，比如每两三个人负责一道题目，或更多人负责一类题目(尤其是流体、声学这些大家都没基础所以需要一两个人学习其基础理论的内容，虽然这些题目之间并没什么联系)。CUPT的题目性质决定了其可有不同的理解，为了可以在讨论中吸收新想法，改进实验方案与原理，每道题目至少要有两个人较为了解以便进行讨论(一个人也会比较孤单，容易陷入错误方向)，进行实验时可以在确定操作后找其他人帮忙完成。一个人的负责的题目也不要太多，若要兼顾则容易每个都无法深入；若中途自行鸽掉一部分，很可能会影响那道题目的最终完成度。
- 分工：一道题目大致可分为理论、实验和展示三部分，故一种可行的分工也可以根据这三部分来区分。理论部分需要对题目有较多的了解与思考，需要投入较多精力，而不同题目间这部分相对独立，每道题有一两个人负责(类上)；实验部分除去根据理论制定出实验方案外，在执行上不需要太多预备知识，可有较多的临时合作；展示部分建议由讲述者主要完成，避免思路和题目关键点不符。另外对于一些软件模拟或数据处理方式的使用，可由几个人集中完成，避免反复学习浪费时间。另外如果条件允许的话，建议有一个了解全局进度与分工的人进行协调，或像胶水一样联合队员并弥补不同队员的不足。
- 讨论与交流：很重要的内容，虽然常常因为追随参考文献的工作而忽视这一点。可主要分为实验和原理两部分的讨论，形式上可较为随意，思路不一定是刻意去想就能想到的，一种可行的形式为建立一个所有人均可修改的公共文档，存储对每道题目的想法，并实时更新，有新想法则及时填补。内容上可涉及原理的理解(不需要根据文献的观点和出发点来)，注重物理内容而不是计算内容，一个先入为主的观点往往会制约之后的思考，而不同人的不同理解反而可利于找出复杂过程中的关键点；也可涉及具体的实验、处理技术，不同的背景使不同人可用不同的技术或出发点来解决问题，因为若预先完全不知道某种方法，则也不会想到使用该方法，讨论和交流则减小了这种局限性，尤其是不同学院的同学之间的交流。也可尝试与其他学校交流，如果有人乐意的话(这个比赛何必那么追求成绩)。
- 情绪：主要是自己的情绪调节与受其他人情绪的影响。一般影响较大的是准备中期想放弃的情绪，和比赛前的焦虑情绪，控制好自己的情绪和言行以避免影响他人(比如处于临界点的同学)，也尽量避免由于他人想法就轻易改变自己的计划或最

初的打算。等到比赛的时候，就会发现当时焦虑的内容并不会有多大影响(如果能坚持到比赛期间的话)。还有一点是赛场上对评委和对手的情绪，但并没有太好的建议，只能说对于对手，基于尊重的前提合理利用一些方法避免一些不愉快的情况，对于评委。。。目前这就是现实，尽量优化表达方式，避免过激行为。

- 场上合作：按照规则所写，比赛时每队仅可有一人发言，其他人可用纸条传达消息，不可使用网络交流。正方时，可在讨论环节为发言同学补充一些实验参数、知识内容，在中间的反方环节订正之前发言同学的错误或者反方的理解偏差等；反方可辅助制作PPT、寻找正方漏洞；评论方类似。

附录 参考

可能会用到的参考书目，链接为科大图书馆搜索，可用校内邮箱借阅电子版。所选参考材料并不一定是该方面最好的教材，以尽量贴合之后课程中会用到的教材为目的。

- 随机过程
- 信号与系统
- 数字图像处理：理论部分
- 数字信号处理
- 模拟电子技术基础
- 数字电子技术基础
- 力学与理论力学：分为两部分，两个链接
- 电磁学与电动力学：同上
- 光学
- 工程光学：几何光学，光路设计，光学仪器
- 现代光学基础：波动光学为主，建立相位分析的方法和应用
- 统计光学：将光场视为随机过程，以统计观点分析计算
- 傅里叶光学：光场空间频率的分析与调控
- 热学：都差不多
- 热力学与统计物理：多元计算方法与统计观点
- 流体力学：其实不知道怎么样，并没有看过
- 振动理论
- 减振理论：用于减振设计
- 计算物理
- 偏微分方程的有限差分方法
- 电磁场计算中的时域有限差分法
- 数值分析：数值计算方法与分析
- Arduino程序设计基础：以下与电子计算机相关的技术部分网络也能找到丰富资料，从问题出发效率更高？
- 一本STM介绍：相关教材很多，网络资料也很多，STM开发方法也很多……
- 真实世界的Python仪器监控：计算机与硬件通讯及控制
- Python物理学高效计算
- OpenCL异构并行计算
- 学习OpenCV：同样是本Cookbook
- 实 验 讲 义们
- Building Scientific Apparatus：更高端的仪器设计
- 苏东坡传：放松心态

附录 物理量与测量方法

本文档大部分测量方法的总汇，可在前文找到详细说明。君子不器，方法亦然。多加了解，尝试迁移创新。

欢迎补充。

物理量	方法
距离	图像/视频　超声/激光测距　读数显微镜　游标卡尺/螺旋测微器/线　光纤干涉仪　光杆杆
尺寸	测距　衍射　光散射
角度	图像/视频　倾角模块　量角器/角度卡尺　分光计　(水平仪?)
速度	视频　快速测距　光电门　雷达　颗粒流互相关度
加速度	快速测速　ADXL345　BMI160　MPU6050 MPU9250　SCA2100
角速度	测量某半径上的速度　六轴传感器　光纤陀螺仪　码盘/霍尔编码器
温度	水银/煤油温度计　热电偶　PT100/1000　NTC/PTC　DS18B20　BMP280 DHT11　MLX90614　热敏电阻　红外测温仪/成像仪　光纤
热量	量热仪　分布式温度测量
湿度	DHT11　GY39
光强	光敏电阻　CCD　光电二极管　功率计 TSL/GY2561　GY39
颜色	色卡　光谱　TCS320/3200/34725　GY31
光谱	光谱仪　棱镜
气压	气压表　BMP280/180 GY68/63　真空规　咪头
压力	测力计　电子秤　应变片　称重模块　薄膜压力传感器
流速/流量	转子流量计　叶轮流量计　风速仪　量筒+秒表　颗粒/染料流线　压强
粘度	粘度计
表面张力系数	拉脱法　表面波　滴重法　毛细效应
接触角	接触角仪(微距CCD+图像处理)
磁场	霍尔元件　特斯拉/高斯计　巨磁阻
声场	咪头　硅咪　轻质颗粒　(折射率?)
折射率	阿贝折射仪　椭偏仪　折射定律的简单实验　全息　纹影(傅里叶光学)
电学量	万用表　LC表　电桥　四线式电桥　谐振电路

图 B.1: 测量

附录 软件

(*表示免费软件，(*)表示校内免费软件，表示没用过，不能提供更多信息)

分析与仿真	备注
Interactive physics	简单的刚体模型物理仿真
Ansys	通用有限元计算软件，多模块
Comsol	多物理场有限元模拟
Zemax	光路模拟与元件设计
Multisim	模拟/数字电路仿真
Adobe PhotoShop	图片处理与设计(做PPT？)
Adobe Audition	音频处理与加工
OpenCV*	图像处理
Phyphox*	Android系统手机采集软件
Tracker*	视频分析
Matlab(*)	
Mathematica	

仪器控制	备注
LabView	图形化仪器控制与编程
STMCubeMX*	STM配置
Visual GDB	硬件开发
Keil	硬件开发
Arduino IDE *	Arduino系列开发

编程	备注
(Ana/Mini)conda*	Python环境管理器(含Spyder)
Visual Studio*	强大的可扩展编程环境
Visual Studio Code*	强大的可扩展编辑器(可连接编译器)

设计	备注
立创 EDA*	开放的PCB设计
Altium Designer	更专业PCB设计与模拟
Solidworks / FreeCAD*	模型设计(含动画制作与模拟)
Blender*	3D动画设计
Print 3D*	简单的3D图形设计
画图*	基于像素的图片绘制和分析

合作	备注
OneNote(*)	开放笔记
坚果云*	共享式网盘
Git*	代码库

其他	备注
Origin(*)	画图
ScreenToGif*	录屏与GIF制作
SmartPDF*	PDF编辑
Listary/Everything*	文件搜索
FormatFactory*	格式转换
PotPlayer*	播放器
Notepad++*	文本编辑器
Microsoft Office/WPS(*)	科大学生平均Office能力最弱？
Translator*	看文献需要个翻译软件
Music*	实验之余怎能少了音乐？

图 C.1: 可能用到的软件

附录 一教仪器列表(部分)

(不包含杂乱的1231)

仪器介绍

仪器	备注	仪器	备注
3D打印机	线材打印，单双喷头	PH计	
CCD	多种型号，从玩具到专业	超声清洗机	分散粉末，清洗
X射线衍射	晶格结构	磁力搅拌	加热+搅拌，旋转的磁场
阿贝折射仪	折射率	电烙铁	咸鱼
波片	632.8nm的1/2、1/4波片	电源线	红黑硅胶线
测力计	不稳定	风速仪	
磁性底座		高压电源	
电容箱	古董	光纤	
电子秤(多种精度)	0.1mg~10mg	光学平台	无气垫
电阻箱	古董+1，精度还可以	光栅	
动态光散射粒径分析仪	分析悬浮颗粒直径	化学试剂与仪器	
读数显微镜		激光器(632.8\532nm…)	
分光光度计		接触角仪	
分光计		拉脱法套件	古董+2
分束镜(1:9、1:1)	没有镀膜	螺旋测微器	
分束棱镜(BS)		迈克尔孙干涉仪	不方便改造
高斯计		秒表	手机秒表就可以
高速摄像机	很强大	偏振分束棱镜(PBS)	也没镀膜
热台		气泵	
光学显微镜	可配备摄像头拍摄	气垫导轨	
红外测温仪	不准	气瓶	多为氮气
红外光谱	透反射	全息	对振动极敏感
红外热成像仪		三线摆	其实没什么用？
可见近红外荧光光谱		声速测量	脉冲或相位法
离心机	沉淀分层，高速旋转	声音采集	较专业设备，适用频谱更广
偏振片	起偏检偏控制光强	示波器	
强磁场源		水平竖直振动平台	定频大功率或可变频小功率
扫描电子显微镜	表面微观形貌	铁架台	
数控机床	1um精度	万用表	记着关电源
透镜	尺寸不是很多	信号发生器	
椭圆偏振光谱仪	百纳米薄膜厚度&折射率	杨氏模量	光杠杆法
位移平台	二维比较多，10um精度	液氮	
温度计	煤油、水银	音频功率放大器	
旋涂机	薄膜	游标卡尺	
荧光寿命		粘度计	用完清洗
真空干燥箱	抽气泡	真空泵	
激光切割		直流稳压电源	

图 D.1: 仪器

附录 资料源

- 论文与英文书籍
- 论文与书籍
- 非专业电子书
- 论文
- Arduino 传感器模块库
- 物理论坛
- 图书馆：可申请藏书的电子版，或者找到数据库与期刊免费下载入口(直接访问对应期刊的主页也可以)。
- 实验中心网络课堂(古董)
- 部分课程(不一定能看)
- 物理实验教学中心(可下载讲义)
- Wikipedia (English)
- Python(强烈推荐)
- Python 2
- Intel OpenCL

后序

断断续续编了4个月，终于能在新一届校内CUPT开始前完成一个能看的版本。最开始的时候仅打算做个简单PPT支援一下校队，但后来又突然想搞点事情写出个完整点的文档(这也是第一章风格和其他章不太相似的原因，日后慢慢修正)，于是便开始了挤占各种时间来翻书码字找图片，甚至暑研期间也是以码字为主(感谢老师给我分了个天天等结果的模拟课题，虽然说了不想做模拟……)，希望这堆乱七八糟的东西有些许作用吧。

当初规划的时候觉得内容很丰富，但写完回想一下去年进行实验时的心情，又觉得写的内容太过苍白。方法、技巧都是可以毫无悬念得不断积累得到的，而这些旧的东西不能带来当时好奇心与理论建模的兴奋。真正的对问题的分析、合适的处理、验证方法也总和简单的积累得到的经验有些出入，而过分注重技巧、工具或者参考文献也会忽视了自己对原理的思考。从成绩来讲这些方法、参考文献必然是有帮助的，若参赛就志在于此也没什么问题，不过这些并不会是长久地、创造性地坚持下去的动力。

今年比赛在台风中结束，每年必不可少的对国赛的诟病也按时出现在网上。在一些参加过CUPT的(或者网上发表言论的)同学中，“这比赛没用”几乎是主流观点，“与其浪费时间不如去实验室搬砖能学到更多”，甚至还能找到更加消极、黑暗的想法。我感觉并没有完全说错，即使为比赛投入总计约20个学分课程的时间，也确实没有什么能说得出的学到的物理理论、实验室一定中能用到的方法，或者得到的都是些“玩具式”的能力。所谓的投入/产出比是个现实的因素，精密的考虑也确实可以更快捷、省力以及高成功率地得到目前追求的东西，无论是学分、成绩，还是比赛的体验和名次。类似的观点也出现在对科大全部必修的大物实验的抨击中，评分、讲述方式、助教、报告要求和所花时间都是这些观点的论据，不过自己的对待方式也许也应该算入其中。所以在这个比赛中，希望能充分利用其提供的各种机会，尝试找一找这些产出之外的意义。

目标周围，标准之外，清奇峻险，海阔天空。

新海港

2019.09