

# 开源磁悬浮项目 [lanal.weebly.com](http://lanal.weebly.com) 四个基础和一个综合

## 摘要

首先，拉诺（项目带头人）要感谢丽咖姊妹和汤天才在这份开源学习材料中的贡献。通过这份材料，拉诺想把“单点磁悬浮模块”的基础知识尽可能完善的整理出来，包括了“磁铁的本质”，“红外线距离感受器”，“运算放大器”和“PD 负反馈控制器”。

对于任何（无源）磁铁来说，其周围的磁场都随距离快速衰弱。这样的分布方式只能提供一个不稳定平衡，而不能实现稳定磁悬浮。在了解了红外线距离感受器和运算放大器的基本工作原理之后，我们深刻地体会到了电子电路对物理世界的认识方式，简约而可靠。借助 PD 负反馈控制器的相关理论，我们无压力地实现了（直流有源）单点磁悬浮。进一步，拉诺把以上的这一系列基础知识综合了起来，一套最小“单点磁悬浮模块”就跃然纸上了，并创造性地提出来“机械条件反射”的概念。

希望大家喜欢~

## 目录 Contents

基础一：永/电 磁铁 .....	1
S1. 线性控制方程 .....	1
S2. 空间非线性 .....	2
S3. 不稳定平衡 .....	4
【案例分析一】 磁场斥力平衡 .....	4
【案例分析二】 磁场吸力平衡 .....	5
【案例分析三】 平面磁场平衡 .....	5
S4. （直流）电磁铁 .....	7
基础二：红外线距离感受器 .....	9
S1. 原理 .....	9
S2. 技术分析 .....	10
【分析一】 电路设计 .....	10
【分析二】 线性等效性 .....	11
【分析三】 材料表面性质 .....	11
实验一：红外线距离感受器的输出信号 ( $V_{out}$ ) 与测量表面距离 ( $D$ ) 的关系 ..	13

S1. 器材 .....	13
S2. 过程 .....	14
S3. 现象 .....	15
S4. 理论 .....	15
S5. 应用 .....	16
基础三：运算放大器 .....	17
S1. 原理 .....	17
S2. 反馈电路 .....	19
【应用一】电压跟随器 .....	19
【应用二】反相闭环放大器 .....	19
【应用三】反相闭环微分器 .....	20
【应用四】求和放大器 .....	20
实验二：用运算放大器求位移与速度 .....	21
S1. 器材 .....	21
S2. 过程 .....	21
S3. 现象 .....	21
基础四：PD 负反馈控制器 .....	23
S1. 负反馈系统 .....	23
S2. PD 负反馈控制器 .....	24
【P 控制器】 .....	24
【D 控制器】 .....	25
实验三：D 控制器 .....	26
S1. 器材 .....	26
S2. 过程 .....	27
S3. 现象 .....	27
综合：单点磁悬浮模块 – 机械条件反射 .....	28
S1. 设计控制器 .....	28
S2. 电路设计 .....	31
S3. 机械条件反射 .....	35

## 基础一：永/电 磁铁

### PART ONE: Permanent/Electric Magnet

#### 目标 Sections

- S1. 了解磁场的线性控制方程，即麦克斯韦方程组；
- S2. 了解磁场力的空间非线性，即三次方关系；
- S3. 了解磁场力的不稳定平衡，即恩绍定理；和
- S4. 了解电磁铁的基本控制参数，即电流与匝数。

#### S1. 线性控制方程

麦克斯韦方程（微分形式）：

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = \rho \end{cases}$$

从上而下分别是：全电流定律，法拉第电磁感应定律，磁通连续性原理，高斯定理。

在这里，我们不要求掌握这个物理方程，或者它的求解方法。

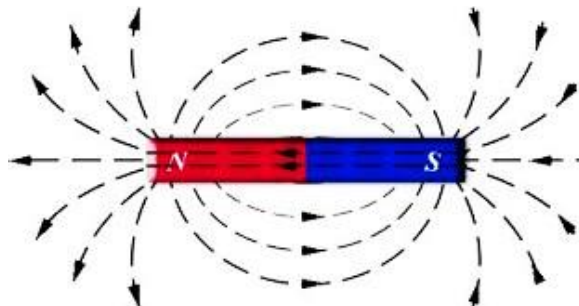
但是，我们必须清楚地认识到，由控制方程可知，这是一个线性物理过程。

何为“线性物理过程”？我们考虑下面这个简单的例子。右图展示了条形磁铁的磁力线分布：“N 出 S 进”；磁力线越密集，磁场强度越大。

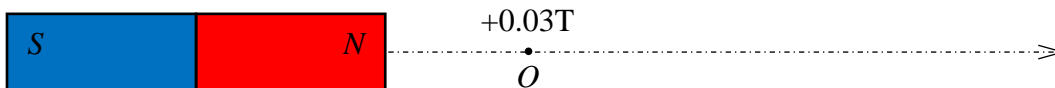
当空间中有且仅有一块条形磁铁， $a$ ，在它的右侧 3cm 处有一个点， $O$ （靠近



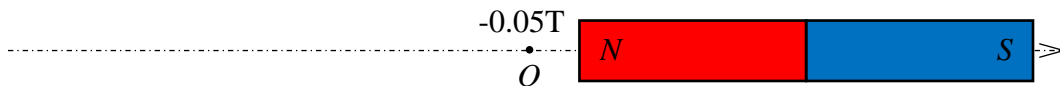
James Clerk Maxwell  
(13.6.1831~5.11.1879)



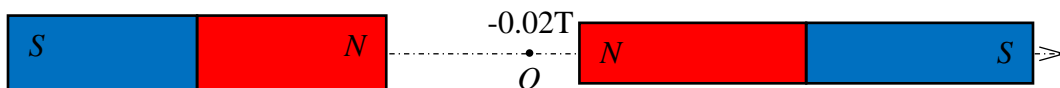
$N$  极，处于中轴线上)。我们通过测量得到， $O$  点的磁场强度为  $B_{O,a} = +0.03\text{T}$  (磁场强度单位：特斯拉，正号代表向右)。



接着，我们把条形磁铁， $a$ ，拿走，并在  $O$  点的右侧放置如下的条形磁铁， $b$ 。 $O$  点依旧位于中轴线上，靠近  $N$  极，距离为  $1\text{cm}$ 。通过测量，我们得到  $O$  点的磁场强度为  $B_{O,b} = -0.05\text{T}$  (负号代表向左)。



最后，当我们把之前的条形磁铁， $a$ ，重新放回原来的位置 (不关心两块条形磁铁间的相互作用)。这时， $O$  点的磁场强度可以由两块条形磁铁分别产生的磁场通过线性叠加得到，即  $B_{O,a\&b} = B_{O,a} + B_{O,b} = +0.03 - 0.05 = -0.02\text{T}$  (负号代表向左)。



以上结论，对于磁悬浮应用而言，至关重要。

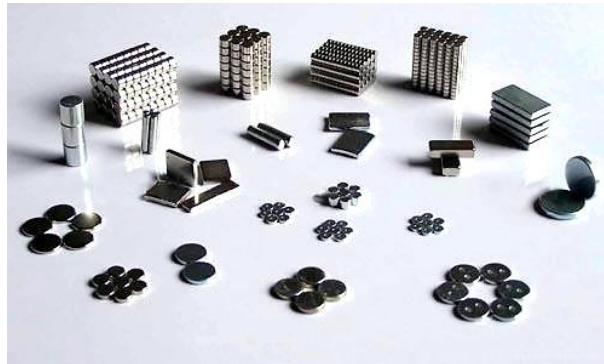
## S2. 空间非线性

电磁场符合线性 (矢量) 叠加原理。但是，电磁场的空间分布具有很强的非线性。

对于一块普通磁铁而言，其表面的磁场强度大约为  $0.5\text{T}$ ，这个数字会随着距离的增加**迅速减弱**。具体表现如右图所示，被吸引的铁屑主要集中在磁铁表面。地球 (特别是地心) 是个大型磁体，但是地表的磁场强度大约仅为  $0.06\text{mT}$  ( $\text{mT}=10^{-3}\text{T}$ )。



右图展示了人类最前沿的科技成果——稀土永磁铁，其表面磁场强度可以高达 1.4T。同样地，它们的磁场强度也随距离增加而迅速衰减。



<https://www.youtube.com/watch?v=DIPnE9vPT-A> 【 How its made - Neodymium magnets 】

由于特别强的表面磁场，这些稀土永磁铁可以非常危险!!!

<https://www.youtube.com/watch?v=Vt8NOdINJ1s> 【 Super-strong neodymium magnets smashing and exploding 】

[https://www.youtube.com/watch?v=tC13\\_BkDieU](https://www.youtube.com/watch?v=tC13_BkDieU) 【 Super-strong neodymium magnets destroying everyday items in slow motion 】

科学家 Mann (美国) 与 Sims (英国) 对磁场强度的空间非线性做了深入的研究。

Mann, B. P., and N. D. Sims. "Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation." *Journal of Sound and Vibration* 319.1 (2009): 515-530.

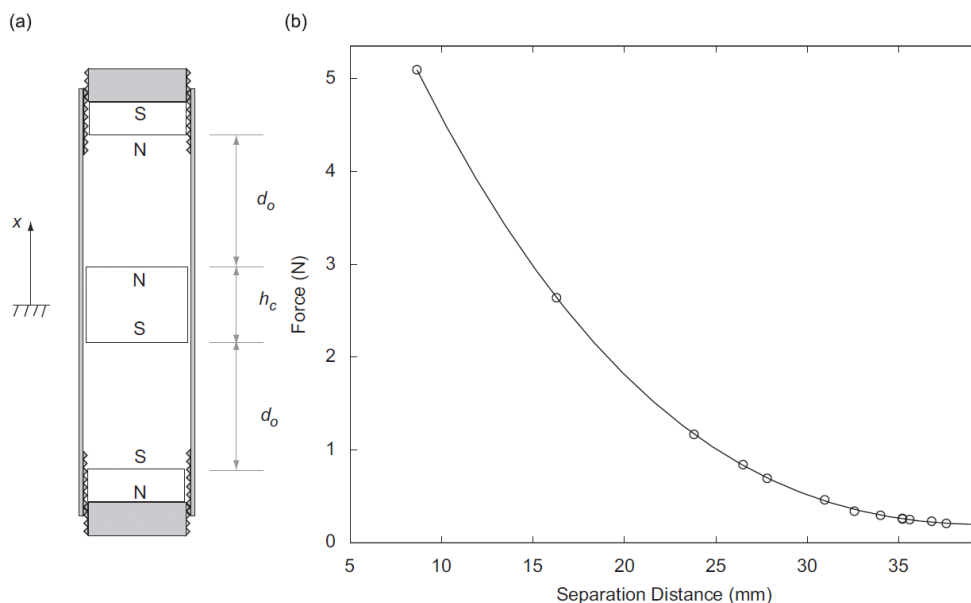


Fig. 1. A schematic diagram of the magnetic levitation system with threaded supports to position the outer magnets is shown in (a) Graph (b) shows the restoring force plotted as a function of the separation distance between the center and bottom magnet.

根据他们的测量结果，我们可以发现：当两块稀土永磁铁间的距离为 10mm 或 1cm 时，它们之间的相互作用力高达 5N（大约 500g 物体的重力）；而当距离增大到 25mm 时，相互作用力已经减少为 1N（80%降幅）；当距离继续增加到 40mm 时，相互作用力差不多只有 0.2N（又是 80%降幅）。

为了更精确地描述磁场力的这种空间非线性，他们尝试用如下三次方程拟合数据，取得了很好的结果（上图实线就是通过拟合得到的结果）：

$$F = \sum_{n=0}^3 a_n d^n = a_0 + a_1 d + a_2 d^2 + a_3 d^3$$

**结论：**磁场力随距离的增大而迅速减弱；当距离稍远处就可以近似为零了。

这个结论广泛适用于“永磁铁之间”，“电磁铁之间”，“永/电磁铁之间”，或“永/电磁铁与铁质材料之间”，包括斥力或吸力。

*延伸讨论：*我们把这种快速衰减的场（如磁场或声场），称作“近场”，因为我们无法在距离他们遥远的位置观察他们；相反，也存在所谓的“远场”，能向极深的宇宙无限传播，比如引力波。

### S3. 不稳定平衡

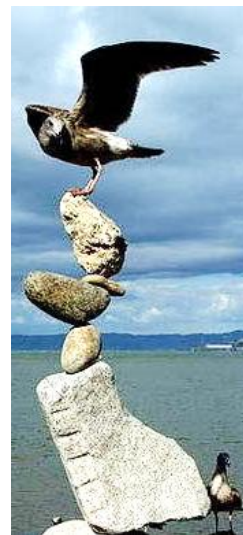
平衡分三种情况：稳定平衡（碗底部的球），中性平衡（平面上的球），和不稳定平衡（山峰上的球）。



#### 【案例分析一】 磁场斥力平衡



考虑一个简单的磁悬浮实验：把两块“同极相对”的永磁铁约束在同一个轴上，如下图所示。那么上面的永磁铁将会被悬浮在半空中。这是一个稳定的平衡状态，因为任何的外界干扰，都不会让上方的永磁铁无限远离平衡位置。

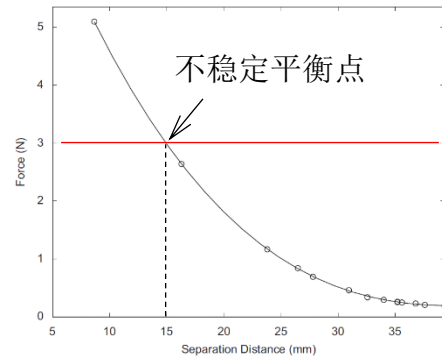




你看，斥力不是很好么。根据“磁场力越近越强”的效果，我们可以悬浮很重的物体呢！但是，请注意，这样实现的磁悬浮，需要机械接触，例如约束轴；而机械接触会导致材料损耗与维护成本。

### 【案例分析二】 磁场吸力平衡

反过来，我们考虑一下，有没有可能通过磁场的吸力实现稳定悬浮呢？比如，我们尝试用 Mann 与 Sims 的磁铁系统，去悬浮一个 3N（红线表示重力）的重物。确实，理论上，我们在大约 15mm 的位置找到了一个平衡点，磁场力恰好可以抵消重力。但是，仔细一看，如果外界扰动让重物稍稍靠近磁铁，磁场力就会大于重力，进而让重物被磁铁吸引到底；而当重物稍稍远离磁铁，磁场力又会小于重力，重物会马上落下，无法悬浮。所以，磁场的吸力只能实现不稳定平衡。



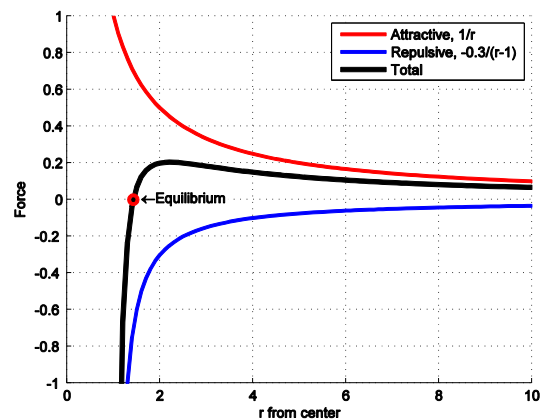
### 【案例分析三】 平面磁场平衡

我们注意到市场上有一种神奇的磁铁玩具。它由两组较大的永磁铁与六组较小的永磁铁组成。通过视频的描述，外围自由的永磁铁与六组小永磁铁都是相互排斥的关系，而与中间的大永磁铁相互吸引。这样一种特殊的磁铁组合，为什么可以实现空间上的稳定平衡和约束定位呢？



<https://www.youtube.com/watch?v=LyvfDzRLsiU> 【Amazing Discovery With Magnets】

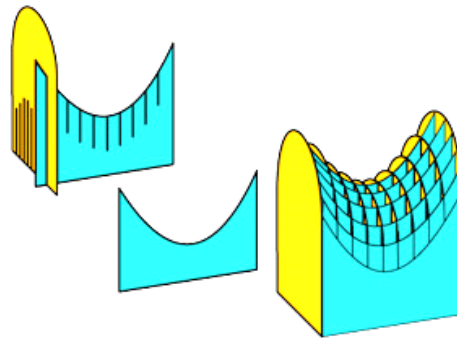
通过 S1（线性控制方程）和 S2（空间非线性）两讲的结论，我们可以很容易地解释其中的原理。如下图所示，红线代表了两组大永磁铁间的吸引力，蓝线代表了大小永磁铁间的排斥力，黑线代表了以上两种力线性叠加的效果，小红圈表示平衡位置。由于小永磁铁与大永磁铁相比要弱得多，所以自由永磁铁在远处仍旧可以感受到大永磁铁的吸引力，黑线取正值；当自由永磁铁在吸引力的作用下，逐渐向组合磁铁靠近时，会首先进入小永磁铁的近场范围，排斥力将迅速增强，使黑线快速掉头向下，变成了负值。那么，自由永磁铁



就被小永磁铁阻挡在了外围，不能进一步靠近大永磁铁。接近时排斥，远离时吸引，这是一个完美的稳定平衡。

然而，细心的你一定可以发现，这个玩具与【案例分析一】类似，也存在着磁铁与桌面的机械接触。如果，我们把桌子撤掉，这个玩具还能稳定平衡么？

**答案是否定的。**这个玩具只能在桌面的约束下实现稳定平衡；一旦桌面被撤去，就会出现类似于马鞍型的磁力面（如下左图所示），向侧边失去稳定。进一步说，如下右图所示，桌面的作用，就是把自由永磁铁约束在蓝色面积表示的平面内，这类似于一个碗的底部，存在一个系统能量最低的稳定平衡点；在三维空间里，与蓝色面积垂直的黄色面积形成了连续的山脊，使自由永磁铁很容易就从侧边失去稳定，“滑下山坡”，被大永磁铁吸引去。

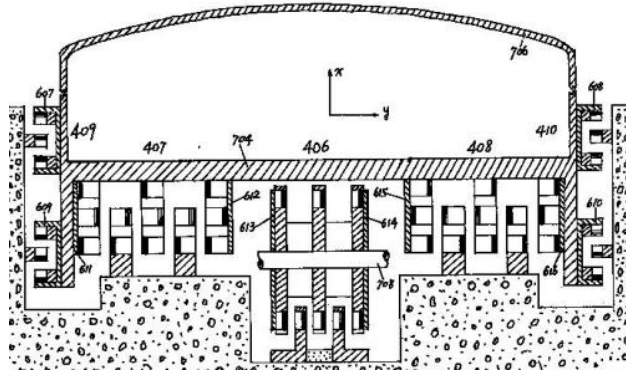


那么，到底能否通过永磁铁的排列组合，实现三维非接触稳定悬浮呢？答案是否定的。依据恩绍定理可得，稳定静止的磁悬浮是不可能仅仅通过静态电磁力去实现。

**\*恩绍定理**的表述如下：点粒子集不能被稳定维持在仅由电荷的静电相互作用构成的一个**稳定静止的力学平衡结构**。该定理首次被英国数学家塞缪尔·恩绍于1842年证明。该定理通常被用于磁场中，但该定理最初被应用于静电场中。该定理适用于经典平方反比定律的力(静电力和引力)，**同时也适用于磁铁和顺磁性材料或者其它任意组合(但非抗磁性材料)的磁场力**。

在历史上，愚蠢的人类曾经尝试过各种各样的磁铁排列组合，试图达到永磁铁系统的非接触稳定悬浮，都以失败告终。下图展示了其中一种复杂的设计；遗憾的是，它也是失败作品之一。





通过高速旋转或抗磁物质，即可克服恩绍定理的适用范围。（此处不展开讨论）

（参考文献：<http://www.diy-robots.com/?p=662> 【磁悬浮的故事（上） - 静态磁悬浮】）

#### S4. （直流）电磁铁

电磁铁由线圈和铁芯（此处不展开讨论）组成。如右图所示，通电的电磁铁可以吸引大量的铁质材料。

铜的电阻率， $\rho$ ，很小，是仅次于银的金属材料。所以，线圈一般由大量铜导线缠绕而成的，如下图所示。



线圈的电阻可以用下面的公式求得，

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

其中， $L$ 是线圈的总长度， $S$ 是铜线的横截面积。如果线圈的匝数为 $N$ ，半径为 $r$ ，线圈的总长度可以表示为，

$$L = 2\pi Nr$$

根据欧姆定律，流过线圈的电流与其两端的直流电压和其电阻有关，

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho L} = \frac{US}{2\pi Nr\rho}$$

对于一般产品而言，线圈的材料（ $\rho$ ），形状（ $r$ ）与线圈两端的电压（ $U$ ）是给定的，那么，我们可以进一步得到线圈发热功率（ $P_{heat}$ ）和磁场力（ $F_{magn}$ ）的关系分别如下，

$$P_{heat} = UI \propto I = \frac{US}{2\pi Nr\rho} \propto \frac{S}{N}$$

$$F_{magn} \propto NI = \frac{US}{2\pi r\rho} \propto S$$

我们只能通过增大线圈横截面积来增大电磁铁的磁场力（ $F_{magn}$ ）。同时，为了降低线圈的发热功率损耗（ $P_{heat}$ ），我们需要成正比地增加线圈匝数。然而，更多的线圈匝数与铜线横截面积，会以平方的关系增加线圈质量，这对某些产品的应用范围提出了巨大的挑战。

**结论：**（a）两个相同的线圈串联→节能（ $P_{heat}$ 减半），但不改变磁场强度；（b）使用更粗的铜线，可以成比例的增大磁场力，同时也会增大热功损耗；（c）强磁场力与弱热功损耗需要通过极重的铜线圈才能实现，或超导体（此处不展开讨论）。

以上结论对于设计磁悬浮时电磁铁线圈的选择，很有参考意义。

## 基础二：红外线距离感受器

### PART TWO: Reflective Optical Sensor

#### 目标 Sections

- S1. 了解红外线距离感受器的原理，即红外线光源与接受器；和
- S2. 技术分析：电路设计，线性等效性，材料表面性质（如反射率，角度关系）。

#### S1. 原理

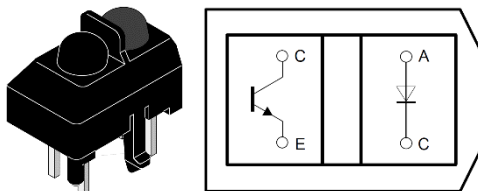
其实，红外线距离感受器就在我们的身边，比如你的苹果手机。当你接听电话时，手机的屏幕就会自动变暗。为啥会那么厉害呀？全靠红外线距离感受器。



（参考文献：[www.zhihu.com/question/25526443](http://www.zhihu.com/question/25526443) 【iPhone 5/5s/6 的光线和距离感应器为什么可以只用一个孔？】）

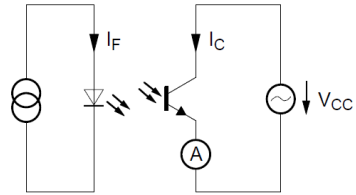
TCRT5000 是一款普及型的红外线距离感受器。它的英文描述如下：

*“The TCRT5000(L) has a compact construction where the emitting-light source and the detector are arranged in the same direction to sense the presence of an object by using the reflective IR beam from the object. The operating wavelength is 950 nm. The detector consists of a phototransistor.”*



简单来说，它由两部分组成，红外线发光二极管（A 到 C）和红外线光电三极管（C 到 E）。这两部分被一块黑色隔板阻断，互相无法直视。由于发光二极管与光电三极管的敏感光波段都精确在 950 纳米，所以自然光源（400~750 纳米）对该光学系统的影响极其微弱。

在一定的电流下， $I_F$ ，发光二极管会释放出稳定数量的光子；这群光子打到物体表面，一部分会被吸收，另一部分会被反射；那么，光电三极管就会接收到一定数量的反射光子，然后成正比地激发出电流， $I_C$ ，通过电路。



如果，你的脸比较靠近感受器，光电三极管就有机会接收到更多的反射光子，然后激发出更大的电流；反之，如果你根本就没有接听这通电话，光电三极管就不会接收到任何光子，也不会激发出任何电流， $I_C = 0$ 。

这个原理，可以通过一个很简单的实验进行感受——广场舞。我相信，现在，很多家庭都有晚餐后散步的习惯。当你听到悠（e）扬（su）的乐曲声渐行渐响的时候，你就知道，广场舞，近了。

## S2. 技术分析

### 【分析一】电路设计

依照上一讲的原理，我们设计了右图所示的电路。

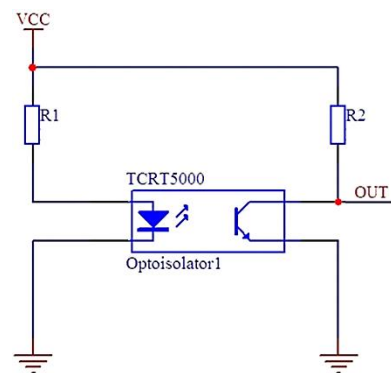
$R_1$ 是一个限流电阻，它可以调节通过发光二极管的电流大小，以控制其亮度； $R_1$ 越大， $I_F$ 越小，反之亦然，所以，

$$I_F \propto \frac{1}{R_1}$$

$R_2$ 是一个功能电阻，它与输出的信号电压有以下等式关系，

$$V_{out} = V_{cc} - I_C R_2 = V_{cc} - V_{drop}$$

上式中，红色部分表示经过功能电阻的电压降。当 $I_C = 0$ （无反射光子）时， $V_{out} = V_{cc}$ ；当光电三极管饱和时， $I_C = V_{cc}/R_2$ 和 $V_{out} = 0$ 。



### 【分析二】线性等效性

$I_c$  受到三个物理量的影响：光场强度 ( $I_F$ )，物体距离 ( $D$ )，和表面反射率 ( $\epsilon$ )。其中， $I_c$  与  $D$  的关系会在 **实验一** 中详细讨论。一般而言， $I_c$  与  $I_F$  和  $\epsilon$  成正比，即，

$$I_c \propto \epsilon I_F \propto \frac{\epsilon}{R_1}$$

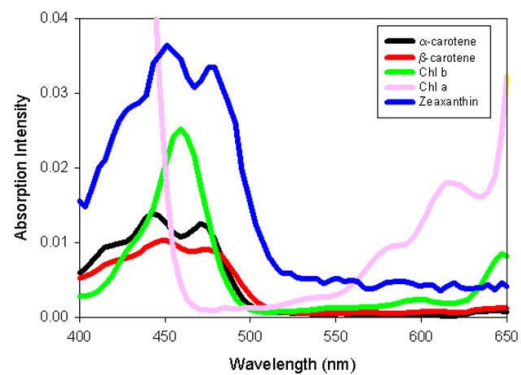
进而，

$$V_{drop} = I_c R_2 \propto \epsilon \frac{R_2}{R_1} = \epsilon_{eff}$$

受到以上等比关系的启发，我们提出了所谓的“线性等效性”：假若材料性质 ( $\epsilon$ ) 不变，想要提高距离感受器的灵敏度一倍，我们可以 (a) 增大一倍  $R_2$  或 (b) 减小一半  $R_1$ 。所以，我们可以把  $\epsilon R_2/R_1$  看做为一个等效反射率， $\epsilon_{eff}$ 。

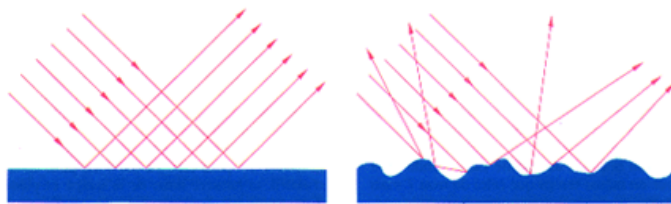
### 【分析三】材料表面性质

由于该光学系统的光波长是固定的，950 纳米，而不同材料对于这种光波的吸收率是不同的。右图显示了叶片中不同物质对光谱的吸收率。所以，当反射表面的反射率 ( $\epsilon$ ) 较低，我们可以增大  $R_2$  或减小  $R_1$ ；反之亦然。最终，我们总是可以把  $\epsilon R_2/R_1$  调整到一个优化的数值， $\epsilon_{eff}$ （一般由目标悬浮距离处的输出信号电压决定；优化的  $\epsilon_{eff}$ ，最好能让目标输出值位于线性比较好的区间，或最大、最小输出值的平均位置）。

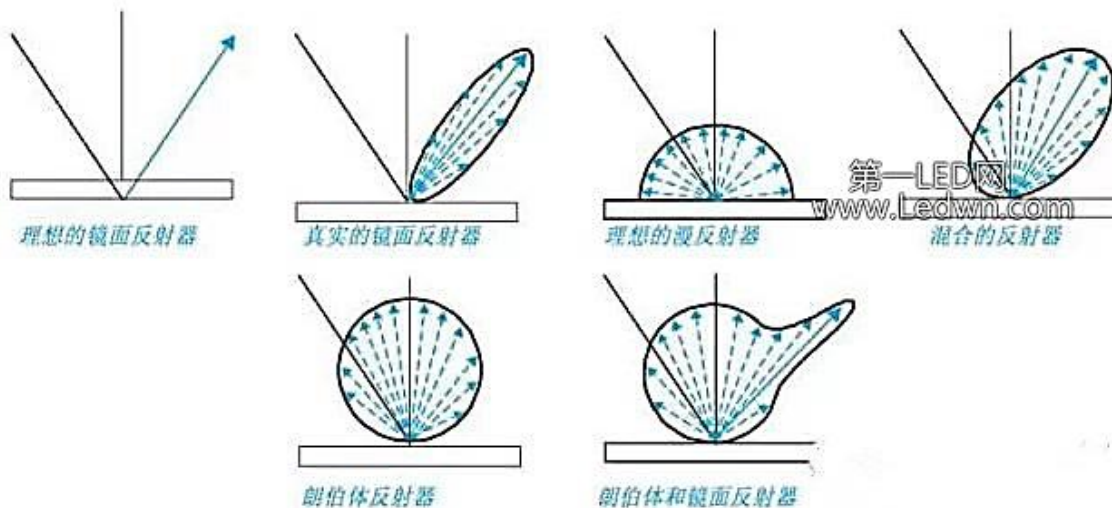


（参考文献：[http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_5ebcc024010180uv.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_5ebcc024010180uv.html) 【植被光谱分析与植被指数计算】）

另外，我们也注意到，材料表面的反射率会随着反射夹角而发生变化，这涉及镜面反射与漫反射的相关知识。对于磁悬浮的应用来说，悬浮物的摇摆往往是不可避免的；使用良好的漫反射表面，可以减小距离测量数据对表面夹角的敏感度，从而降低由之产生的距离数据误差。



如下图所示，理想的漫反射器根本不关心入射光线，而一律向各个方向等量反射；这就让入射角、反射角靠边站咯，完全不需要考虑咯，因为反射的光子数量一定相等。相反，其他的反射模型多多少少都会受入射角、反射角的影响。



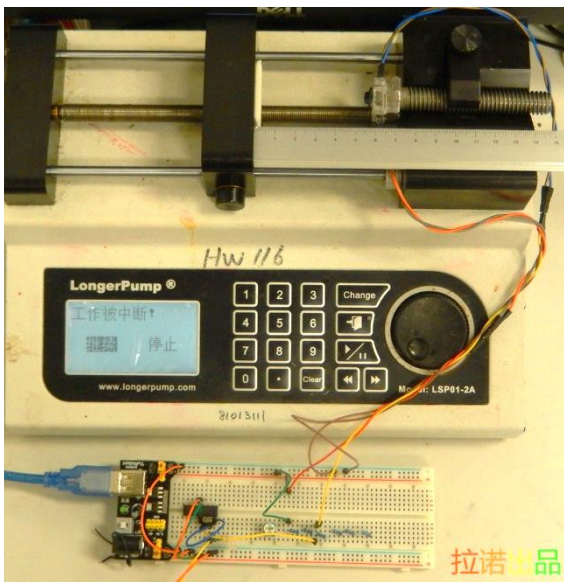
结论：在实际操作的过程中，我们调节等效反射率， $\epsilon_{eff} = \epsilon R_2/R_1$ ，以达到适宜的感受器灵敏度；为了充分发挥红外线距离感受器的潜力，我们需要使用良好的漫反射表面（针对950 纳米）。

拉诺还设计了一个小实验，让大家感受一下，红外线距离感受到的世界是什么样子的。



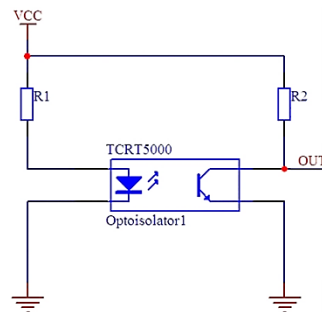
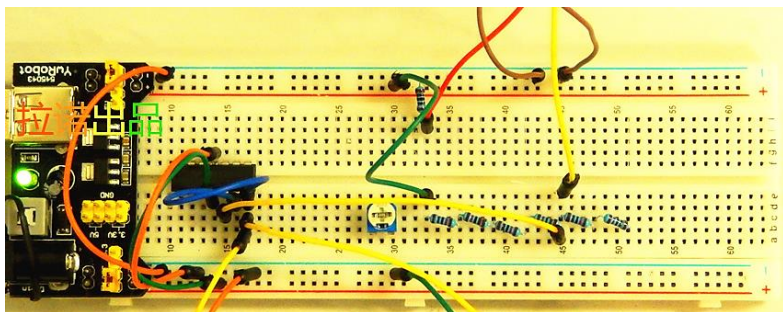
## 实验一：红外线距离感受器的输出信号 ( $V_{out}$ ) 与测量表面距离 ( $D$ ) 的关系

### S1. 器材



拉诺出品 (致谢香港大学微流体实验室)

1. 注射泵：用于获得匀速平移；



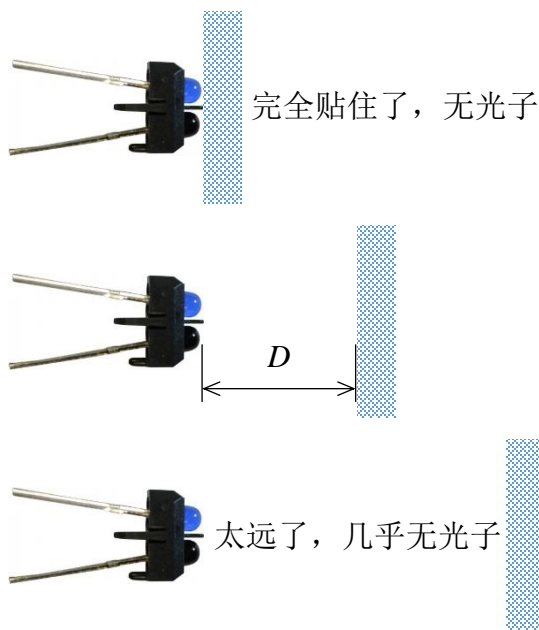
2. 基本电路：供电与信号获取，如上右图所示。 $V_{CC} = 3.3 V$ ， $R_1 = 100 \Omega$ 。我们会通过调节 $R_2$ 来改变 $\epsilon_{eff} = \epsilon R_2 / R_1$ 。 $R_2$ 分别取值  $2.4 k\Omega$ ， $3.6 k\Omega$ ， $4.8 k\Omega$ ， $6 k\Omega$ 。上左图中有一排电阻，它们有相同的阻值， $1.2 k\Omega$ ；和



### 3. 漫反射材料：表面粗糙的泡沫胶带。

如右图所示，泡沫胶带在感受器前移动。 $D$ 代表了胶带与感受器之间的距离，如中间图所示。似乎，我们有理由相信，当 $D$ 太小或太大时，三极管都会接受到比较少的反射光子，所以感受器输出的电压信号， $V_{out}$ ，都会比较大。但是，到底感受器反馈的信号是如何的？我们该如何应用这个信号呢？

通过这个实验，我们会了解到红外线感受器所反馈的电压信号， $V_{out}$ ，与 $D$ 的关系，然后提供一个利用方案。

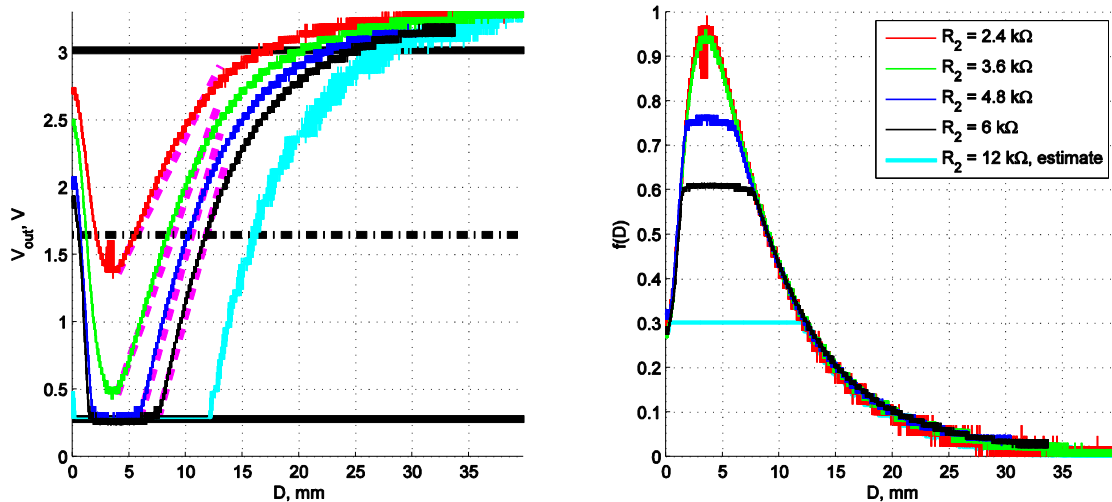


## S2. 过程

1. 调整妥当 $R_2$ 至适当阻值；
2. 打开注射泵 和 数据采集卡；
3. 关闭注射泵 和 数据采集卡；和
4. 重复以上步骤。

### S3. 现象

下左图的四种颜色的曲线，分别代表了  $V_{out} - D$  在不同  $R_2$  条件下的关系。



确实，我们注意到：

1. 红外线距离感受器在近场 ( $D$  小于  $4\text{mm}$ ) 时会失效，具体表现为输出电压不再随距离的减小而减小，反而开始快速增大；
2. 随距离的增加， $V_{out}$  一开始快速增大，而且几乎是线性的关系（如粉红色虚线表示，虚线的起点是  $D_{近}$ ）；但是当  $(D - D_{近})$  超过约  $10\text{mm}$  后， $V_{out}$  的变化便不再那么明显了；和
3. 不同  $R_2$  导致了不同的最小电压， $V_{out,min}$ ；但是，当  $R_2$  比较大时， $V_{out}$  会出现一个平台电压，大约  $0.28\text{V}$ 。这个最小平台电压，或截止电压，是由三极管最小工作电压决定的，一定会略大于零。

### S4. 理论

透过现象看本质，我们发现以上现象不过是验证了以下的比例关系而已，

$$V_{drop} \propto \epsilon \frac{R_2}{R_1} = \epsilon_{eff}$$

所以，我们不妨假设  $V_{drop}$  关于  $D$  的方程如下，

$$V_{drop} = R_2 f(D)$$

而

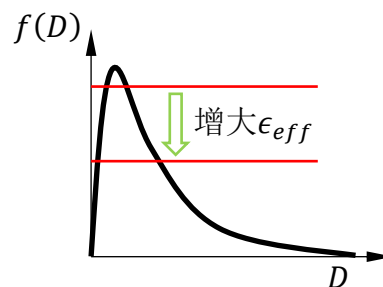
$$V_{out} = V_{cc} - V_{drop}$$

所以，我们可以把  $f(D)$  通过实验数据求出来，

$$f(D) = \frac{V_{cc} - V_{out}}{R_2}$$

然后，把不同  $R_2$  下的  $f(D)$  画到一个坐标系内，我们就可以得到上面的右图了！四条  $f(D)$  曲线呈现出完美的拟合！

美中不足的是，当  $R_2$  比较大时， $f(D)$  曲线似乎被砍掉了一个脑袋（Cut-off Effect），这是受到了电路截止电压（0.28V 平台）的影响，如右图所示。



## S5. 应用

太好了！我们甚至可以把上面的结论加以应用。比如，我们想知道  $V_{out} - D$  在  $R_2 = 12 \text{ k}\Omega$  时的关系，套用以下方程就可以估计了，

$$V_{out} = V_{cc} - R_2 f(D)$$

那么我们可以得到上面图中，淡蓝色的曲线啦！不要忘记 0.28V 平台哦！

红外线距离感受器就是那么简单。

以上的结论，对确定合适的  $R_2$  阻值有很强的参考价值。一般我们不调节  $R_1$ ，因为它毕竟太小了；而调节  $R_2$  有很强的操作性。比如，我们想把物体悬浮在感受器下方 16mm 处，似乎  $2.4 \text{ k}\Omega$  是个不错的选择（一般而言，平衡位置由电压中值  $V_{cc}/2$  确定；据不同应用而定，此处不展开讨论）！

## 基础三：运算放大器

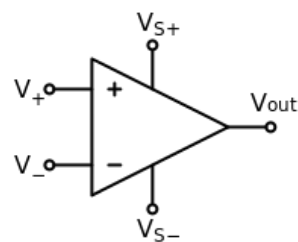
### PART THREE: Operational Amplifier

#### 目标 Sections

- S1. 了解运算放大器，一种无编程电子电路；和
- S2. 了解四种基本反馈电路：电压跟随器，反相闭环放大器，反相闭环微分器和求和放大器。

#### S1. 原理

运算放大器的电路符号如右图所示，一般由五个端口组成。以下关于运算放大器的介绍摘自维基百科 (<https://zh.wikipedia.org/wiki/运算放大器>)：

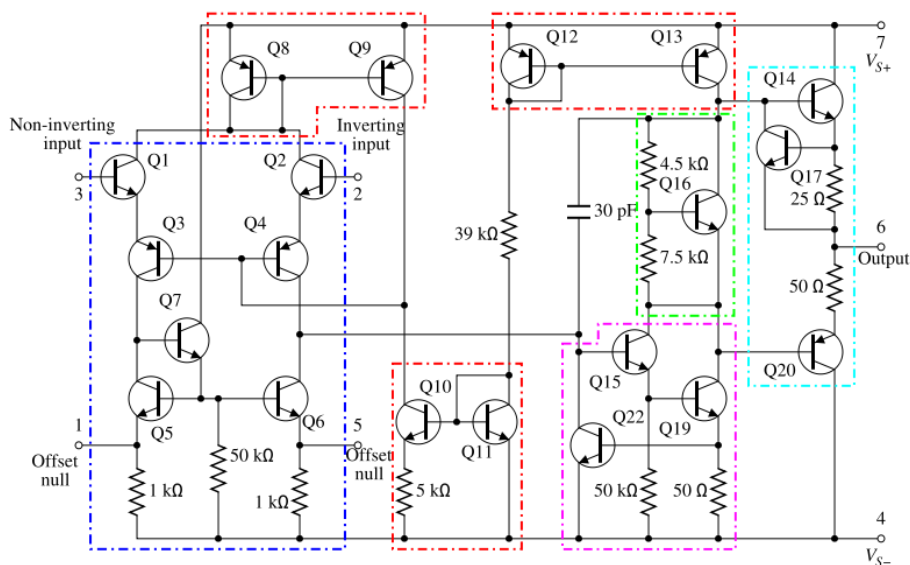


“**运算放大器**（英语：Operational Amplifier，简称 OP、OPA、op-amp、运放）是一种直流耦合，差模（差动模式）输入、通常为单端输出（Differential-in, single-ended output）的高增益（gain）电压放大器。在这种配置下，运算放大器能产生一个比输入端电势差大数十万倍的输出电势（对地而言）。因为刚开始主要用于加法，减法等模拟运算电路中，因而得名。通常使用运算放大器时，会将其输出端与其反相输入端（inverting input node）连接，形成一负反馈组态。原因是运算放大器的电压增益非常大，范围从数百至数万倍不等，使用负反馈方可保证电路的稳定运作。”

理想的运算放大器，可以近似为一个“超级三极管”，把电压差放大无限倍（ $k \rightarrow \infty$ ），

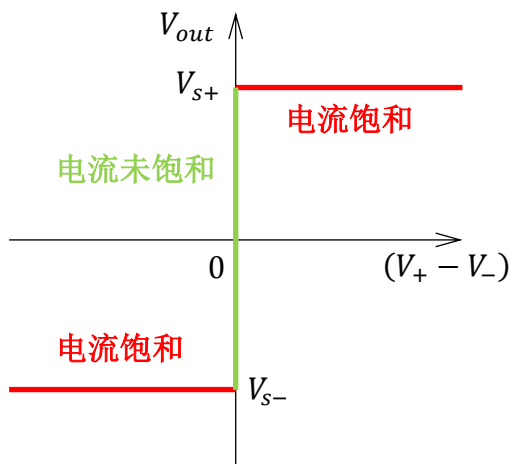
$$V_{out} = k(V_+ - V_-)$$

对目前的工业技术而言，我们尚且还无法实现“无穷大”的放大倍数。通过一系列电子元件（包括 22 只三极管，11 只电阻，和一只电容器）的有序组合、集成，我们得到了一只功能稳定的 741 运算放大器。尽管如此，它的放大倍数也可以高达  $k = 10^5$ 。下图展示了 741 运算放大器的内部电路：镜像电流源(红虚线框)；差分放大器(蓝)；A 类增益级(品红)；电压电平转换器(绿)；输出级(青)。

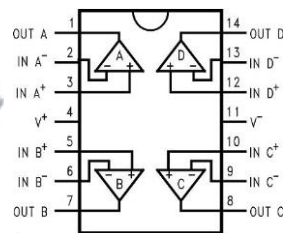


这种运算放大器主要依赖三极管的放大作用，所以流经五个端口的电流都有可能达到三极管的**饱和电流**，并且 $V_{out}$ “以 $V_{s-}$ 为最小值”，“以 $V_{s+}$ 为最大值”。那么，会出现以下两种情况，见下图：

- 如果电流未饱和， $V_{out}$ 输出一个电压，并且 $V_+ = V_-$ （实际存在小到可以忽略的电压差）。显然，这应该是运放的通常工作状态，需要**反馈电路**才能实现；
- 如果电流饱和， $V_{out}$ 输出饱和电压（ $V_{s-}$ 或 $V_{s+}$ ），并且 $V_+ \neq V_-$ 。饱和是非常不好的状态，这样子的运放已经基本失效了。



在后面的磁悬浮设计中，我们会使用 LM324 运算放大器。它其实是四个放大器的合体，**零售**单价只需要 0.27 元人民币（2016 年 1 月 7 日）！





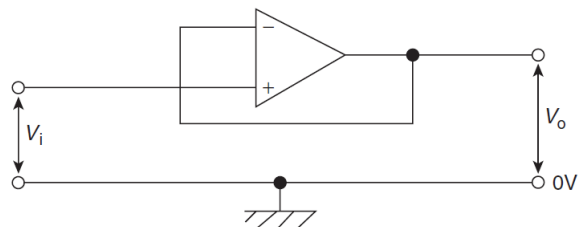
## S2. 反馈电路

那么高大上的运算放大器，不需要窜天猴就能上天哩~我们这里介绍四种后续会涉及到的（负）反馈电路。

### 【应用一】电压跟随器

根据右图可得，

$$V_o = k(V_i - V_o) \text{ 或 } V_o = \frac{k}{k+1} V_i = \frac{100000}{100001} V_i \approx V_i$$



啊，什么？ $V_o \approx V_i$ ，这是不是有点“脱裤子放屁——多此一举”的感觉？

当然不会啦，这个电压跟随器有特别的作用。首先，由于运算放大器的输入电流往往很小（微安级别），这样小的电流，几乎不会影响 $V_i$ ；同时，运算放大器是有源元件（ $V_{s-}$ 和 $V_{s+}$ ）， $V_o$ 既可以维持在 $V_i$ 的水平，也可以输出一定大小的电流（毫安级别）。所以，这个电压跟随器常常被用于信号测量电路，如红外线距离感受器的输出，能最大限度地保护信号电压。

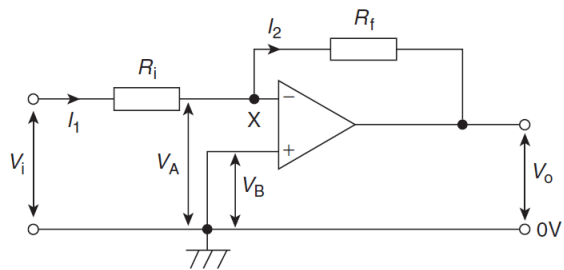
### 【应用二】反相闭环放大器

首先，在电流未饱和的条件下，我们可以得到，

$$X = V_B = 0$$

接着，应用电流定律，

$$I_1 = \frac{V_i - X}{R_i} = I_2 = \frac{X - V_o}{R_f}$$



综合以上两条方程可得，

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

这样，如果 $V_i > 0$ ，那么 $V_o < 0$ ；反之亦然。而且， $V_i$ 与 $V_o$ 之间存在一个放大或缩小关系 $R_f/R_i$ 。拉诺感觉，上面这条方程有点“小孔成像”的味道~

### 【应用三】反相闭环微分器

不知道，你发现了没有：右图的电路只不过用**电容器**， $C$ ，取代了【应用二】中的 $R_i$ 。

根据电容器的**充放电**性质，

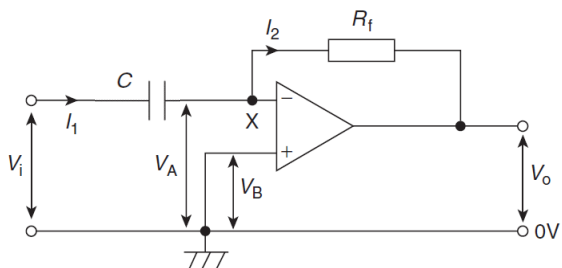
$$I_1 = C \frac{\partial(V_i - X)}{\partial t} = I_2 = \frac{X - V_o}{R_f}$$

可得 ( $X = 0$ )，

$$V_o = -R_f C \frac{\partial V_i}{\partial t}$$

也就是说， $V_o$ 与 $V_i$ 的**时间变化率**成正比。如果， $V_i$ 是恒定电压，那么 $V_o = 0$ 。

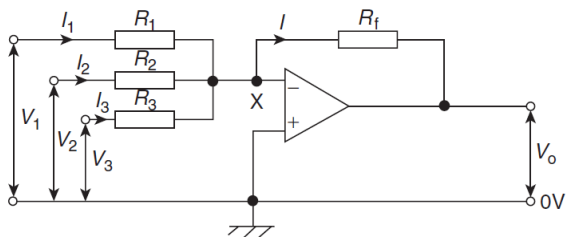
另外，在实际操作中，我们也需要在 $R_f$ 的两端并联一只小电容器（大约 103，也就是 10nF 即可），用于去除高频振荡信号。



### 【应用四】求和放大器

这个应用其实是【应用二】的拓展，我们易得下面的数学求和关系，

$$V_o = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$



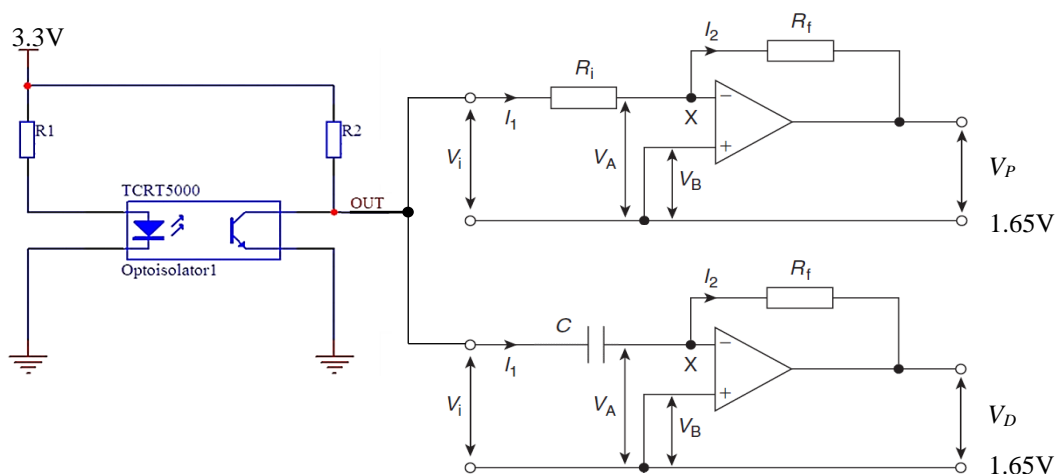
拉诺还设计了一个小实验，让大家感受一下，这个纯电子电路“做数学题”的本领有多强大！

## 实验二：用运算放大器求位移与速度

### S1. 器材

我们需要用到基础二中的红外线距离感受器，和基础三中的【反相闭环放大器】（输出电压信号记为  $V_P$ ）和【反相闭环微分器】（输出电压信号记为  $V_D$ ）。电路图如下所示（未展示电压跟随器等其他配套电路）。

整个系统有两个特征电压，分别是 3.3V 和 1.65V（为什么需要 1.65V 呢，这是特殊设计，有点像跷跷板，作为 0 ~ 3.3V 的中点，此处不展开讨论）。运算放大器的源电压为， $V_{s-} = 0V$  和  $V_{s+} = 3.3V$ 。这样，输出的信号都以 1.65V 为参考值，在 0 ~ 3.3V 之间变化。



### S2. 过程

把反光材料在红外线距离感受器前移动，并记录  $V_P$  和  $V_D$ 。

### S3. 现象

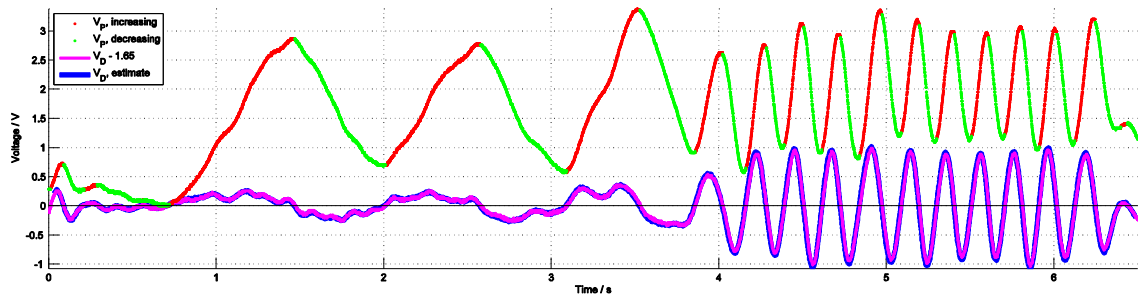
我们的采样频率为 1000Hz。这大概是一般嵌入式系统/单片机的取样频率上限。

下图展示了未饱和的  $V_P$  和  $(V_D - 1.65)$ 。另外，我们可以通过数值近似的方法，把  $V_P$  的变化率求出来，就是下图中的粗蓝线。

这样，我们可以注意到，在红点表示的区间， $V_p$ 逐渐增大， $(V_D - 1.65) > 0$ ；在绿点表示的区间， $V_p$ 逐渐减小， $(V_D - 1.65) < 0$ 。

$$(V_D - 1.65) \propto \frac{dV_p}{dt}$$

而且，通过数值方法得到的 $V_p$ 的变化率，与 $(V_D - 1.65)$ 吻合得非常好。



所以，通过这个实验，我们可以近似得把 $V_p$ 认为是悬浮物的**位移**，同时把 $(V_D - 1.65)$ 认为是悬浮物的**速度**。有了“位移”和“速度”两个概念在脑海中，我们就能对下一块基础知识【**PD 负反馈控制器**】有更加深刻的理解。

## 基础四：PD 负反馈控制器

### PART FOUR: PD Feedback Controller

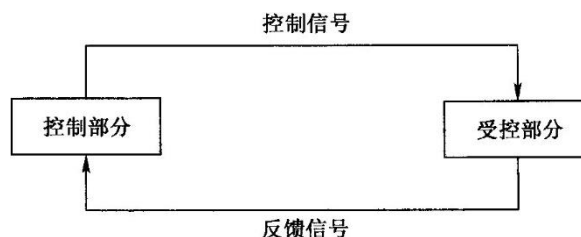
#### 目标 Sections

- S1. 认识负反馈系统，如血糖调节；
- S2. 了解 PD 负反馈控制器的实现，位移与速度；和

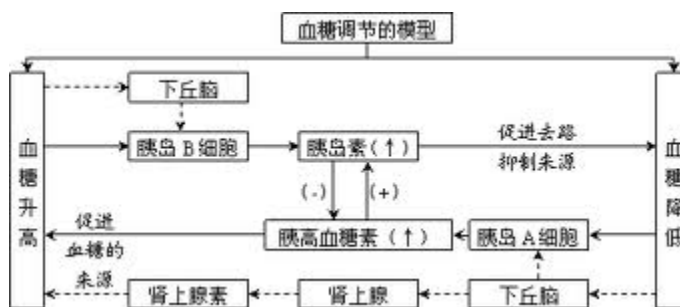
#### S1. 负反馈系统

不知道大家还记得在基础一中的一个论断么：接近时排斥，远离时吸引，这是一个完美的稳定平衡。这个论断，其实说得就是一个负反馈系统。

提到反馈系统，如右图所示，就至少包含两部分：控制部分与受控部分；它们由反馈信号与控制信号相互交流影响。反馈信号把受控部分的信息，如位移、速度、浓度或温度，传递给控制部分；然后，控制部分作出判断，把控制信号输出到受控部分。



我们人体内就存在一个十分重要的负反馈系统——血糖调节，如右图所示。当血糖升高时，下脑丘就会调节胰岛 B 细胞，使胰岛素浓度上升；这会促进去路，抑制来源，导致血糖降低。反之，如果血糖过低，下丘脑就会督促胰岛 A 细胞分泌胰高血糖素，维持并提高血糖水平。



一般而言，所谓“负反馈”，是通过控制信号对受控部分进行反制或抑制，所以能够让系统稳定平衡下来；相应地，所谓“正反馈”，受控部分与控制信号比翼齐飞，相得益彰，完全停不下来，好像人口爆炸那样！

## S2. PD 负反馈控制器

让我们先来欣赏一下日本 HONDA 机器人 ASIMO 的精彩表演。

<https://www.youtube.com/watch?v=zul8ACjZI18> 【ASIMO - All New Features 2011】

在视频中，ASIMO 成功拿到了杯子。是的，对于人类而言，拿一只杯子有什么难的呢？要知道，你小时候一定打碎了不少杯子吧？

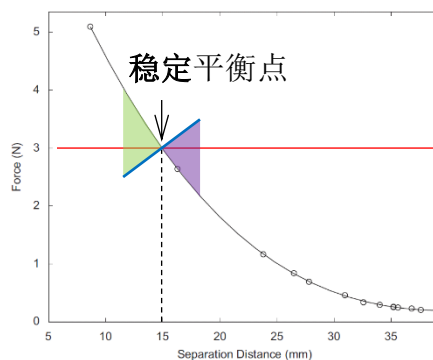
简单来说，拿杯子这个动作，可以分为四个步骤：一、**靠近**杯子；二、**停在**杯子附近；三、**握住**杯子；四、**bingo!** 在第一步里，我们需要知道手与杯子间的**距离**，或**位移**——**P 控制器**；在第二步里，我们需要知道手与杯子的**相对速度**——**D 控制器**。

### 【P 控制器】

P 控制器 (*proportional controller*) 代表了对于相对距离的反馈。正如前文讨论的血糖调节，一旦相对距离超过了设置值，控制器就产生一个相反的作用力；反之，如果相对距离小于设置值，控制器就会试图增大相对距离。

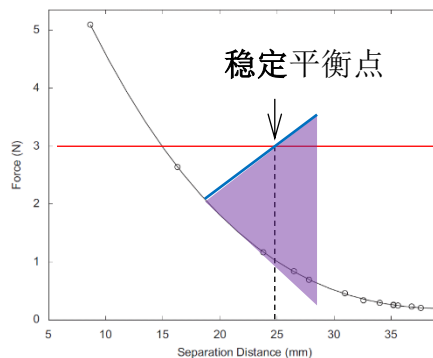
大家还记得**基础一**中的【案例分析二】么？对于普通的磁场吸力平衡，物体根本无法稳定在平衡点，而很容易向两端无限偏离。我们能不能在 P 控制器的帮助下，营造一个负反馈系统，而实现稳定平衡呢？

答案是肯定的！如果我们准确知道了这个平衡点的位置（如 15mm 处），那么，我们可以通过线圈，附加一个 P 控制器实现的磁场（还记得磁场的线性叠加原理么？），简称为 **P 磁场**，如右图绿色和紫色的区域。其中，绿色磁场是排斥力，即反向电流；紫色磁场是吸引力，即正向电流。那么，悬浮物在这样一个“永磁铁磁场+**P 磁场**”的组合磁场中，受到的力可以用**蓝线**表示。我们可以发现，蓝线符合了“**接近时排斥，远离时吸引，这是一个完美的稳定平衡**”。所以，蓝线与红线（重力）的焦点，是一个**稳定平衡点**！





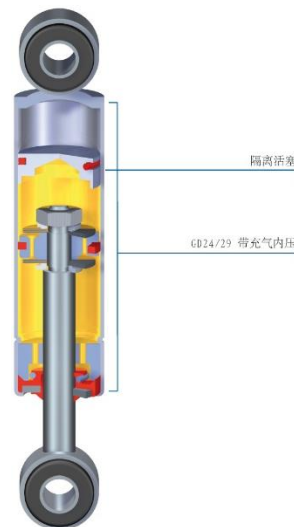
一般而言，只要 P 控制器足够强大，能够“大勇止于戈，永不居功”，那么稳定平衡不是问题！比如右图所示，如果，我们的线圈，在 28mm 处依然能提供可观的吸引力，即大块的紫色区域；那么，我们的蓝线依旧可以与红线相交，形成一个稳定平衡点，让悬浮物平衡在大约在 25mm 处！



### 【D 控制器】

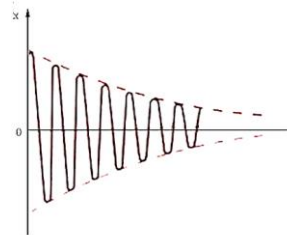
既然，我们已经实现了一个稳定平衡，D 控制器又是用来做什么的？可以把 D 控制器去掉么？

看这种名字，有些人可能就会联想到英文中的“damper”或阻尼器（如右图所示，汽车悬挂系统中的重要部件，请自行百度，此处不展开讨论）。是的，D 控制器（*differential controller*）代表了对于相对速度的负反馈。与 P 控制器类似（尽可能地降低相对距离），D 控制器试图创造一个 **D 磁场**，尽可能地降低相对速度，让悬浮物慢下来。



有些人以为，磁悬浮嘛~浮起来就可以高枕无忧啦~磁场不就是块棉花糖嘛，好像云朵那样飘在天空中，多美好呀~~~

**大错特错。**一旦成功地反抗了地球的吸引，无所依托的悬浮物其实是很难受的。周围的风吹草动都会对悬浮物造成很大的影响。本来，物体在地面上有**摩擦力**作为保护伞，一丢丢的风，根本就吹不动物体，可以用“稳如泰山”来形容。但是，比如高层建筑，特别是上海的那些，楼顶的风速都可以高达十几米或者几十米每秒，如果是你，根本就站不稳；所以，高层建筑反而需要深达一百多米的地桩。那么，我们的磁悬浮，不能打地桩，又能向谁讨依托呢？



阻尼震动的图象

所谓，成也线圈，败也线圈。线圈（电磁铁）把物体悬浮了起来，也唯有线圈能帮助悬浮物抵抗环境干扰！对于磁悬浮应用而言，D 控制器是很重要的一环，它能帮助耗散系统中以震荡形式存在的能量；同样地，它也能让悬浮物在充满干扰的环境中，如风中，尽可能得稳定下来。

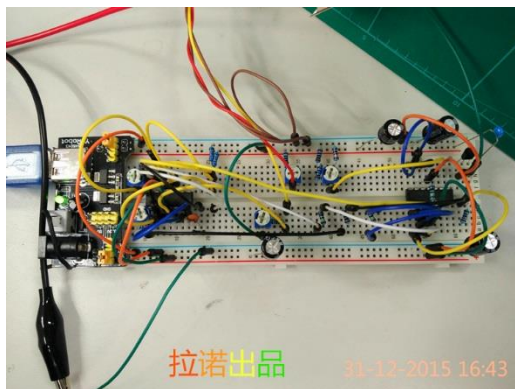
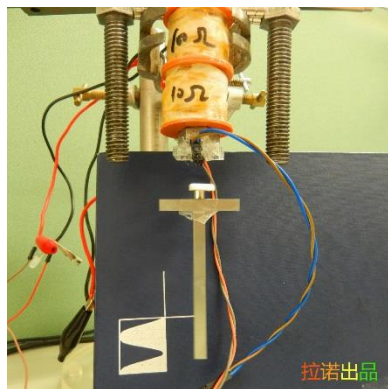
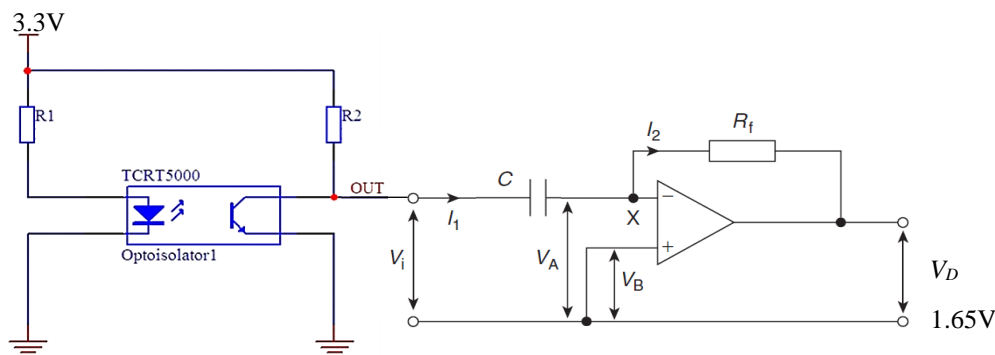
拉诺还设计了一个小实验，让大家感受一下，D 控制器的重要性。

网友动力老男孩也对 PID 控制器进行过一番描述，链接如下，共各位参考。（参考文献：<http://www.diy-robots.com/?p=787>【盗梦陀螺攻略 5- PID 平衡算法】）

## 实验三：D 控制器

### S1. 器材

下面的电路图已经聚焦在了D控制器部分（未展示电压跟随器等其他配套电路）。我们把 $(V_D - 1.65)$ 看做速度信号（相关知识请参阅实验二），通过D负反馈控制器，表达为线圈中的电流，进而成为**D磁场**。D磁场的作用是降低悬浮物的速率，让它能够更加稳定地悬浮。



根据基础三中【反相闭环微分器】的相关讨论可知，

$$(V_D - 1.65) = -R_f C \frac{\partial V_i}{\partial t} \propto R_f C$$

所以，我们可以使用较大的电阻， $R_f$ ，或电容， $C$ ，来获得更加强大的D控制器。但是，一般而言，在实验过程中，电容器（104，也就是100nF）是不容易被调节的；我们就使用蓝色可调电阻， $R_f$ ，来调节D控制器的强弱。

## S2. 过程

首先，我们需要使用较强的D控制器，让悬浮物达到稳定悬浮。然后，我们逐步降低D控制器的强度，即调小蓝色可调电阻， $R_f$ ，并注意观察悬浮物的表现。

## S3. 现象

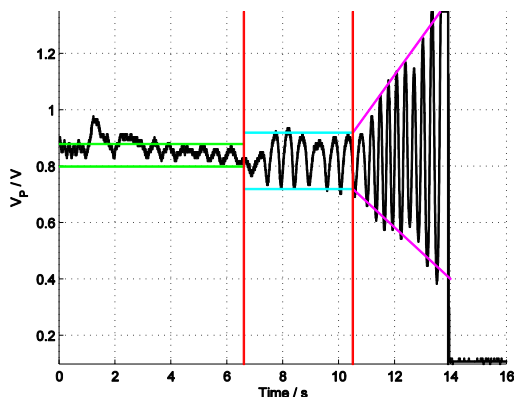
我们提供一个视频如下：

优酷视频网址，[http://v.youku.com/v\\_show/id\\_XMTQzODUxMjYzMg==.html](http://v.youku.com/v_show/id_XMTQzODUxMjYzMg==.html)

或，YouTube 视频网址，<https://youtu.be/K-nUEGOOwVc>

在视频中，我们把 $R_f$ 调小了，可以观察到悬浮物上下抖动的幅度明显增大了，但是并没有失去稳定！一段时间后，我们增大 $R_f$ ，发现，悬浮物恢复到了几乎静止的悬浮状态。

下面这张图，显示了另一次尝试中的 $V_p$ 数据。其中，绿色平行线之间的范围来自比较大的 $R_f$ ；此时D控制器比较强！当我们减小一定 $R_f$ 后，D控制器也就减弱了，蓝色平行线之间的范围已经明显增大了。四秒后，我们试图继续缓慢减小 $R_f$ ，同时明显感受到悬浮物的抖动开始加剧！在14s的时候，悬浮物掉在了桌子上。



所以，通过这个实验，我们非常直观地感受到了D控制器的重要作用，就是对“速度”的负反馈。为了能让悬浮物更加稳定，我们非常需要一个适宜的D控制器，以耗散掉系统中以震荡形式存在的能量

## 综合：单点磁悬浮模块 – 机械条件反射

### FINAL PART: Maglev Module - Conditioned Response

#### 目标 Sections

- S1. 明确**磁场**对 **PD 负反馈控制器**的要求；
- S2. 能够读懂**一般**网友磁悬浮控制的**电路设计**； 和
- S3. 深化“**机械条件反射**”概念，即**局部独立稳定系统**。

#### S1. 设计控制器

在**基础一**中，拉诺着重介绍了永磁体的磁场分布，说明了磁场本身的不稳定属性。**基础二**和**基础三**其实都为**基础四**服务，实现一个 PD 控制器去**驯服**不稳定的磁场。

拉诺特意总结了如下的七幅图片，试图把整个控制器设计的思路整理清晰。

- i. **磁场力随距离的增加快速衰减。这个结论普遍适用于永/电磁铁等。**

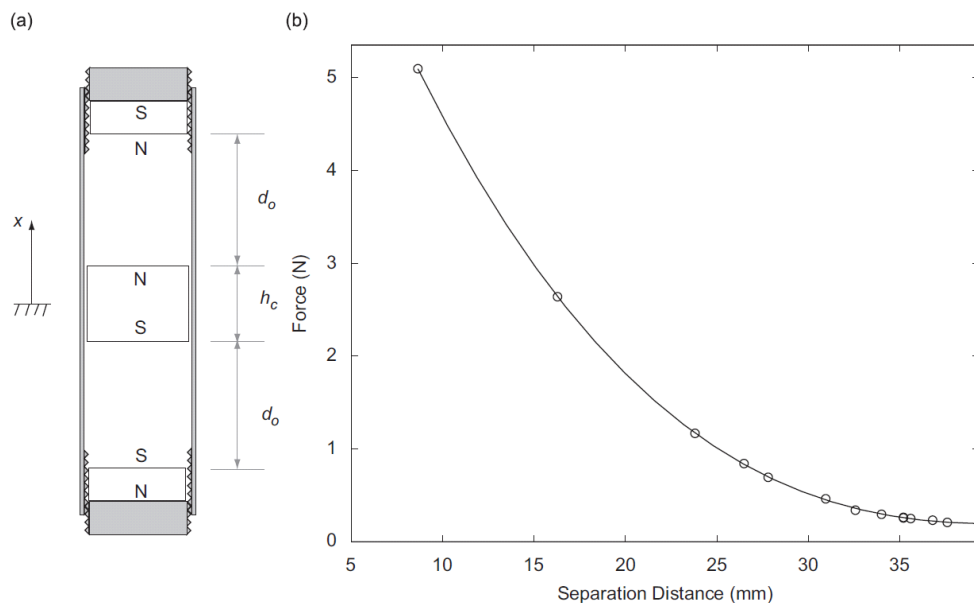
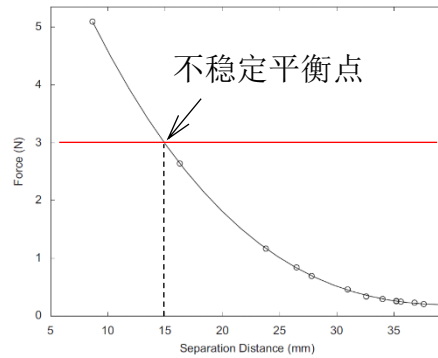
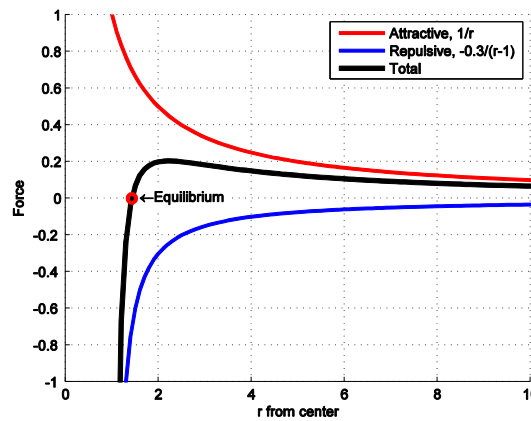


Fig. 1. A schematic diagram of the magnetic levitation system with threaded supports to position the outer magnets is shown in (a) Graph (b) shows the restoring force plotted as a function of the separation distance between the center and bottom magnet.

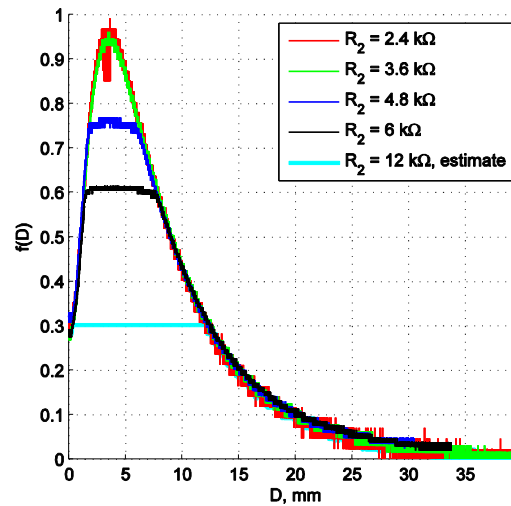
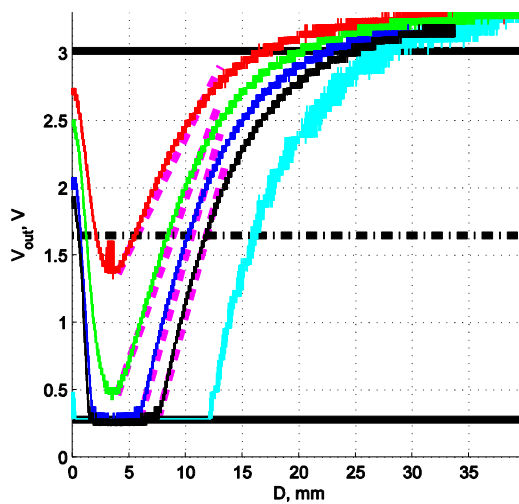
ii. 静态的磁场本身是不稳定的，并不能在三维空间中悬浮任何重物。



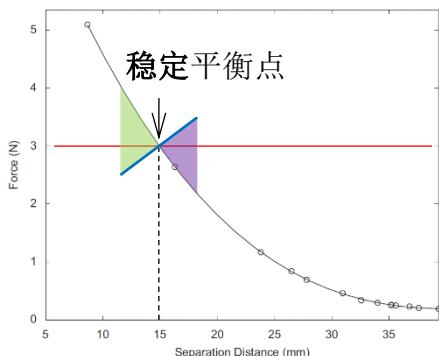
iii. 磁场符合线性叠加原理；两组强弱不同的磁场，可以在一个二维平面内实现稳定平衡。



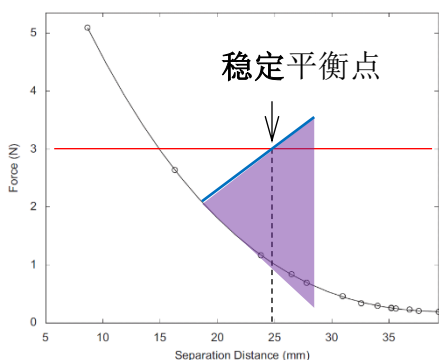
iv. 红外线距离感受器可以反馈距离信号，并且在一定范围内可以近似看成线性的。经过一定处理，距离信号也可以提供速度信号！



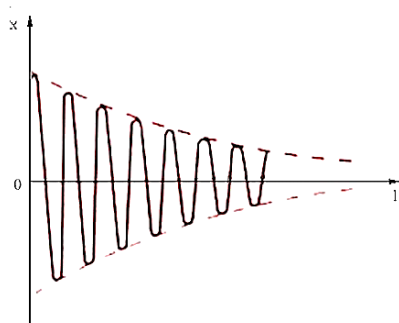
v. 当线圈内电流的方向和大小都能方便调节时，我们可以很容易地实现稳定平衡。



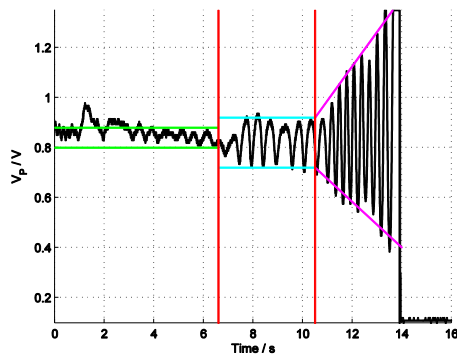
vi. 当线圈内电流的方向不能改变，我们依旧可以通过调节电流大小，去实现稳定的磁悬浮，



vii. D 控制器产生的阻尼效果，可以显著提高磁悬浮系统的稳定性！



阻尼震动的图象



综上所述：我们需要对永磁铁与电磁铁磁场的相对强度有个宏观的把握，即（1）P控制器可以实现稳定平衡，原则上，其强度够用就好；（2）D控制器让磁悬浮静止在稳定点，其强度可以尽量强一些。

那么，到底多强的P控制器才够用呢？一般而言，在实际调节时，如果观察到悬浮物上下跳动，就基本认定，这个P控制器已经足够强大了！这个标准是参考老男孩



给出的，他说“参数很重要！如果你的磁悬浮上下跳动的厉害，恭喜你，其实你已经接近成功了”

（参考文献：<http://www.diy-robots.com/?p=754> 【盗梦陀螺攻略3- 上拉式磁悬浮理论方面，拉诺会在今后的《磁悬浮进阶》中，为大家认真推演。

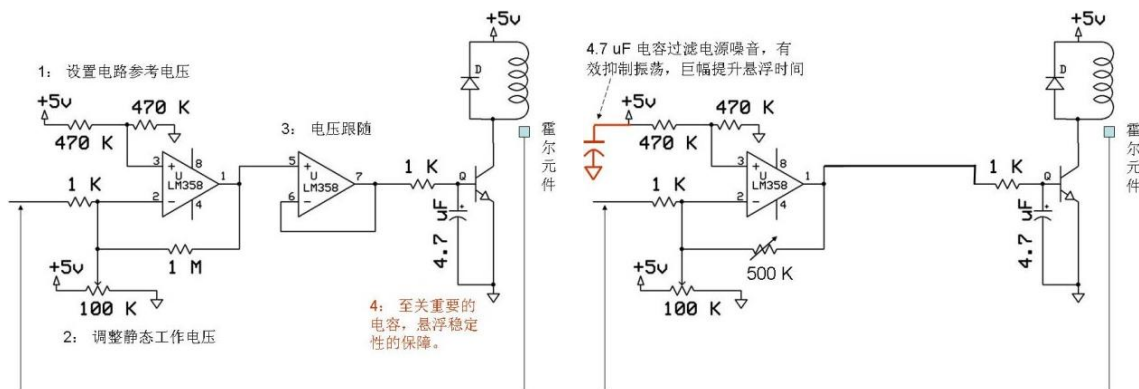
## S2. 电路设计

经过前面四个基础模块和三个小实验的学习，相信大家对磁悬浮的基本原理都已经略知一二了，充当半个专家绰绰有余了吧！下面，我们来稍微考察一下，两个来自互联网的电路设计。

首先是费米门下老薛。他在 2011 年就提出了一套最简化电路，来实现单点磁悬浮。根据他的说法，他只用了个运算放大器哦（大概是因为运放在那个时候还不便宜）。如下左图所示，老薛用了霍尔元件（此处不展开讨论）取得距离信号，经过了一个类似于 P 控制器的运放处理，然后电压跟随，实现了信号反馈。老薛表示，这样单纯的 P 控制器，可以悬浮数分钟之久。拉诺看来，这是可能的。

然后，老薛改进了电路设计，在前一个运放的电路上，增加了一个小电容，竟然就巨幅提升了悬浮时间。在拉诺看来，这是因为实现了一个等效的 D 控制器。

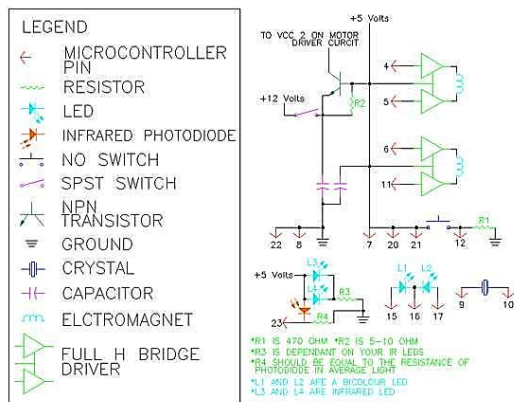
总之，拉诺并不推荐老薛的那种不明就里的设计思路。没有理论，乱舞春秋的做法，太不严谨了。



（参考文献：[http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_71afdbfd0100qo0i.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_71afdbfd0100qo0i.html) 【上拉式磁悬浮电路小析（最简化电路，仅需一个运放）】）

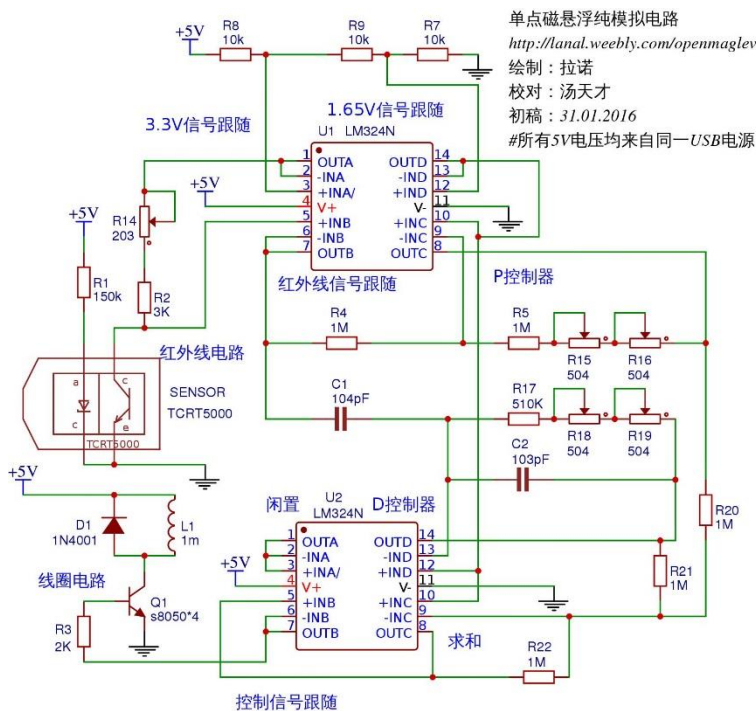
下面的电路图，来自果壳网的一个专题栏目，鼓励网友们动手设计新奇的小玩意。当然咯，一看就知道，这张电路图其实是抄袭自某位国外网友。相比之前拉诺的设计，这位外国网友同样使用红外线距离感受器，实现了单点磁悬浮。不同之处是，

这个设计需要使用嵌入式单片机以**获取信号与反馈控制**；然后在线圈的利用方面，他使用了H电桥，实现了单一线圈中正反向电流。当然，这样的控制器就需要有一定编程素养的朋友才能尝试咯。总的来说，他的效果不可能比拉诺目前的纯电子电路更好，毕竟单片机的取样频率有限（上限大约为1kHz），而且成本高。



（参考文献：<http://www.guokr.com/article/3016/>【磁力悬浮器：玩儿的就是“气场”】）

拉诺通过严谨的**理论推导与实验验证**，得出了如下电路。



开源电路网址：[https://easyeda.com/LanalZhang/MagLev\\_Single\\_point-pymW8IifP](https://easyeda.com/LanalZhang/MagLev_Single_point-pymW8IifP)

材料清单如下：

说明		
1. 基本工作电压，5Vusb；		
2. 三个可调参数：高度，P 控制器，和 D 控制器；		
3. 驱动 TCRT5000 红外线距离感受器，和 20 欧姆线圈。		

红外线电路部分		
TCRT5000		发光二极管以 5V 供电；光电三极管以 3.3v 供电
R1	150 欧	红外线发光二级管，限流
R2	3k 欧+203 可调	通过可调电阻控制磁悬浮稳定点高度

控制电路部分		
输出的控制信号范围是 0~3.3V。两只 LM324N 运算放大器，共 8 个运放，使用 7 个，作用如下：		
参考电压信号跟随，3.3V 和 1.65V		
	两个运放（或一个）	其中，3.3V 需要作为驱动电源，1.65V 只是参考电压
R	10K 欧（三只）	串联在 5V 与地之间，两节点分别是 1.65V 和 3.3V
红外线信号跟随		
	一个运放	
	无额外零件	
P 控制器		
	一个运放	以 5V 作为供电电源，以 1.65V 作为参考电压
R	1M 欧	
Rf	1M 欧+504 可调（两只）	
D 控制器		
	一个运放	以 5V 作为供电电源，以 1.65V 作为参考电压
C	104pF	
Rf	510K 欧+504 可调（两只）	
Cf	103pF	与 Rf 并联，滤波
加法		
	一个运放	以 5V 作为供电电源，以 1.65V 作为参考电压
R	1M 欧（两只）	P 信号和 D 信号各一只

Rf	1M 欧	
<b>输出信号跟随</b>		
	一个运放	
	无额外零件	

线圈电路部分		
我们使用两只 10 欧的铜质线圈，共 20 欧。铜线直径未知。		
	S8050 三极管 ( 四只 )	全部并联
	二极管	并联在铜线圈两端，分流作用，保护三极管
R	2K 欧	三极管限流电阻
C	103pF	暂不需要

材料清单		
实现一套单点磁悬浮的纯模拟控制电路，我们只需要如下材料		
元件	数量	性质
TCRT5000	1	红外线距离感受器
LM324N	2	运算放大器
S8050	4	小功率三极管
二极管	1	分流
10欧线圈	2	纯铜
5Vusb	1	供电电源，1A足够了
150欧	1	电阻
2K欧	1	
3K欧	1	
10k欧	3	
510 500K欧	1	
1M欧	5	
504	4	可调电阻
203	1	
103pF	2	瓷片电容
104pF	1	

拉诺出品

### S3. 机械条件反射

经过大脑的反射弧是缓慢而漫长的，并不足以体现高级生物之高级；对于高级生物而言，其真正的高级之处，在于进化出了众多局部（local）独立（independent）的条件反射系统，如膝跳反射和甲状腺激素的血糖调节。这些条件反射系统，看似繁复，却能自动运行，而不消耗任何的大脑资源，维持着高级生物的基本生命活动。那么，高级生物的大脑就有充分的资源去进行“高级活动”，比如“喜怒哀乐”！

除基础四中介绍的两个反馈的例子以外，自然与人类社会中都还存在很多条件反射的例子：

- 著名的“狐狸与兔子”的捕猎模型，就是一个二元互动的例子，最终会达到自然界的动态稳定平衡。
- 你家的空调、电饭煲都是人类设计的对温度进行条件反射的例子：当温度未达到设置温度时，系统的控制模块（纯模拟电路即可，并不需要电脑芯片）会让压缩机或者电热丝持续工作；等到温度达到设置温度时，相关的设备就会停止工作。如此这般，温度就被稳定地控制在了设置值上。
- 在更大的范围上，经济学中所谓的“看不见的手”也是一种条件反射。这只手实现了供求之间的平衡，让人民的生活水平稳步提高。并没有什么智慧能比条件反射更加客观(objective)或经济(efficient & economic)。

条件反射最主要的功能，就是按照一个既定的“游戏规则”进行快速反馈，实现二元或多元的局部独立稳定平衡。虽然这个规则有时候是人类设置的，有时候却不关人类任何事情。“机械条件反射”的概念，对于构建底层的机械基础设施，有着至关重要的意义！

我们的“单点磁悬浮模块”正是如此，贯彻了“局部”、“独立”和“稳定平衡”等概念，尽一切可能让系统处于最好的状态；不需要用户后期过多的干预或操心。

超强！稳定！不操心！

就此，所有的基础知识和拉诺想说的废话，都已经结束了！

接下来，拉诺将会不定期upload 磁悬浮的进阶知识和装逼玩法，敬请关注。