

# 自制电磁混合磁悬浮实验系统

## 一、实验任务

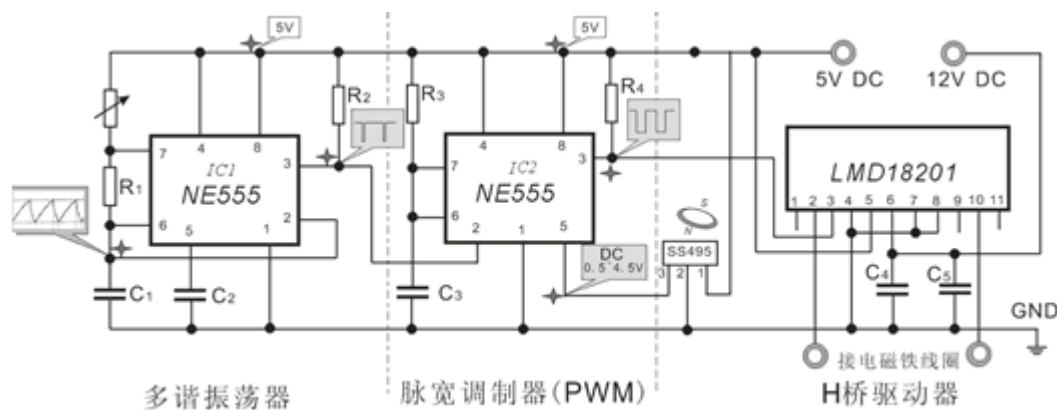
1. 焊接非稳态多谐振荡器和脉宽调制器电路板，调整和测试各电路板的参数及波形。
2. 在面包板上按线路图连接各电路部分，悬起物体。

## 二、操作要点

1. 焊接电路板之前，首先要测试各分立电子元件的参数（电阻、电容的数值）。
2. 将电子元件正确的插入线路板（PCB）相应的位置上，用电烙铁焊接元件。注意不要虚焊，也不能焊接时间太久，否则容易过热而损坏元件。
3. 焊接好线路板之后，将线路板安装进插件盒子当中。然后分别对线路板进行测试。首先选好电源电压（注意：集成电路组件的供电电压有严格要求，电压过高会瞬间烧毁组件），12V 和 5V 电源不要接错。然后测试组件供电是否正常，输出波形是否正确（输出幅度和频率等）
4. 用导线连接各线路板，继续用示波器观察各个线路板的输出波形是否正确。如果波形正确，可以试着将物体放在电磁铁的正下方并上下移动，感觉一下手受到的力是怎样的？如果明显的感觉到一直是斥力，可以将电磁线圈的两个接点对调一下，改变一下电磁铁的出力方向。然后慢慢的将物体由远至近靠近电磁铁，如果电磁铁出力方向正确，此时用手向上或者向下推动物体，都会感觉到一股相反的力存在。此时松开手，物体会在电磁铁下方的某一点稳定地悬浮。

## 三、电路连线

按下图连线，并测试画星号各点的电压值或波形，记录数据。



★ 图上带有星号的点需要用电压表或者示波器测试，并做记录。

## 四、注意事项

焊接好线路板之后，一定要在老师检查完线路之后方可通电测试及实验。由于本实验所用的集成电路组件较贵重，一旦烧毁将严重影响实验的继续进行，并可能造成其他同学无法继续实验，请同学们一定仔细检查线路的连接，并请老师检查后再通电。

## 五、报告要求

1. 稳定悬浮起物体后，记录多谐振荡器的频率，输出波形，幅度等信息。

2. 拍摄磁悬浮实验系统的照片，有条件的同学打印出来后附在实验报告中。如无法打印，请电子邮件联系上课教师，并发送拍摄的照片给上课教师。

## 附录 自制电磁混合磁悬浮实验系统 讲义

磁悬浮技术是集电磁学、电子学、力学和控制工程于一体的现代高新技术，利用此技术可实现无摩擦、无接触、无噪声和无污染等状态，因而倍受世人关注。它在磁悬浮列车、磁悬浮轴承等领域得到了广泛应用。

本实验通过设定项目学习任务—自制电磁混合磁悬浮实验系统的方式，要求同学们在规定的时间内通过通力合作，从系统分析、电路设计、电路板焊接、分系统测试、系统总装、总体调试等过程，自己动手达到项目学习的目标—电磁混合磁悬浮系统实验的正常运行。

在本实验中你自己就是项目总体设计师，你自己需要对任务进行合理安排和调整，完成项目任务。

### 实验目的

- 1、了解磁悬浮实验系统的工作原理和系统的实现；
- 2、学习电路元器件焊接技术和电路调试方法；
- 3、总体上把握实验系统的总装方法和调试方法。

### 实验条件

实验室提供：电源、电磁铁线圈、电烙铁，电子元器件、面包板，数字多用表，示波器、导线等。

### 实验系统简介

本实验系统的工作框图 1 如下，系统包含有：永久磁体悬浮物，带铁芯的电磁铁，霍尔位移传感器，控制器，驱动电路等。

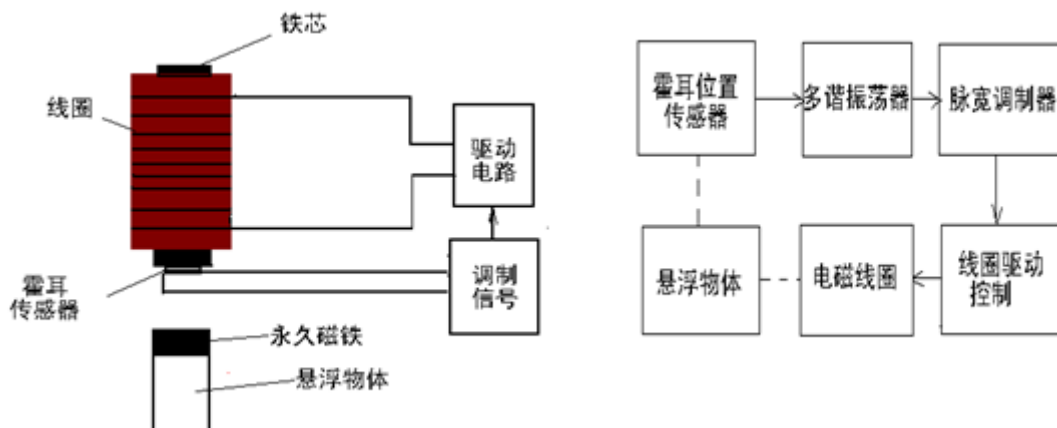


图 1. 电磁悬浮系统工作原理图和原理框图

系统工作时，永久磁体悬浮物在平衡位置处，悬浮物的重力和永久磁体与电磁线圈中铁芯间作用力平衡。电磁线圈中的电流主要用于控制，假设悬浮物在平衡位置受到向下的

扰动，悬浮物会偏离原来的平衡位置向下运动，此时霍尔传感器所在处的磁场减小，霍尔传感器会将这个信息传给调制控制器，控制器将这一信号处理后，通过改变输出脉宽调制信号的占空比来增加电磁线圈对悬浮物的吸力，使悬浮物受到的向上的力大于向下的力，则悬浮物回到原来的平衡位置。同理，当悬浮物受到径向的向上的扰动时，控制器控制电磁力变成斥力，悬浮物就会下移，通过这种动态控制达到悬浮物在平衡位置附近的动态悬浮。

## 实验原理

### 一、电磁悬浮系统的物理模型

本系统的数学建模是以悬浮物的动力学方程和电磁学、力学关联方程为基础而建立的。因此系统的模型建立从下面两个方面来考虑。

#### 1. 悬浮对象的动力学模型

假如忽略掉悬浮物受到的其他干扰力（如风力、电压波动等）的影响，则受控悬浮对象只受到自身的重力  $mg$  和系统电磁作用力  $F$ （包括永磁体和铁芯间的作用力和电磁线圈和永磁体的作用力）。

动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_1(x) + F_2(i, x) - mg \quad (1)$$

其中， $m$  是悬浮物的质量， $x$  是悬浮物和铁芯间的距离， $i$  是电磁铁中的电流。 $F_1(x)$  是悬浮物中永久磁体和铁芯的磁力，此力方向和重力方向相反，大小和位移  $x$  有关， $F_2(i, x)$  电磁线圈和永磁体的作用力，此力可正可负（由电流方向决定），大小与位移  $x$  和电流  $i$  有关。

#### 2. 系统的电磁力模型

设线圈内通过的磁通量为  $\phi_m$ ，线圈截面积为  $A$ ，悬浮物距离线圈的距离为  $x$ 。考虑到漏磁，设通过电磁铁与悬浮物之间的磁通量  $\phi_0$  与通过线圈的磁通量之比为  $c$ ，即  $\phi_0 = c\phi_m$ 。

电磁铁线圈内部的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu Ni}{l} \quad (2)$$

其中， $\mu$  为铁芯材料的磁导率， $N$  为线圈匝数， $i$  为线圈中的电流， $l$  为铁芯导磁长度。根据定义，有电磁铁和悬浮物构成系统的自感系数为

$$L(x) = c \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (3)$$

当线圈中的电流为  $i$  时，系统的自感能为

$$W = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (4)$$

由此可计算出悬浮磁体和线圈之间的相互作用力

$$F = -\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{c\mu N^2 A i^2}{2l x^2} \quad (5)$$

此力既是电磁铁和永磁体间的作用力，即式(1)中的  $F_2(i, x)$ 。

至于永久磁体和铁芯材料间的磁力  $F_1(x)$ ，其大小和距离  $x$  的平方成反比。

根据上述分析，电磁混合磁悬浮系统的运动方程为

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{k'}{x^2} \pm \frac{k'' i^2}{x^2} - mg \quad (6)$$

式中  $k'$  为与系统参数有关的常数， $k'' = \frac{c\mu N^2 A}{2l}$ ，中式第二项的正负对应于是吸力或斥力， $m$  为悬浮物的质量， $g$  为重力加速度。

当悬浮物处于平衡位置  $x_0$  时，电磁线圈中的等效电流为零(对应本系统状态为等宽占空比调制控制)，可由式(6)得到平衡位置  $x_0$  和系统参数的关系。

## 二、控制系统和电路实现

### 1. 设计制作对悬浮磁体位置作出响应的位置传感器

要实现悬浮物的控制，首先要准确的获取悬浮物的位置状态。传感器的灵敏度、可靠性是成功实施控制的先决条件。由于悬浮的是永磁体，可以选用与磁场相关的传感器。这里选用体积很小的霍耳效应传感器，并将其粘贴在电磁铁线圈的最下端中心处，距离悬浮磁体为  $x$ 。霍耳效应传感器的输出信号与磁感应强度成正比，悬浮磁块离它越近，它输出的信号越强。

本实验使用的霍尔传感器 SS495A 是一种高灵敏线性霍尔传感器。有如下特点：

- 体积小巧 (0.16x0.118") 低功耗—典型 7mA 在 5VDC
- 电源沉或源线性输出
- 内含激光修正的薄膜电阻提供精确的灵敏度和温暖度补偿
- 工作温度范围-40~+150
- 可反应于正的或负的磁场
- 工作电压 +5V DC

当磁场为零时，其输出电压是电源电压的一半。然后输出电压随着磁场的变化而线性变化。特性曲线如图 2 所示。

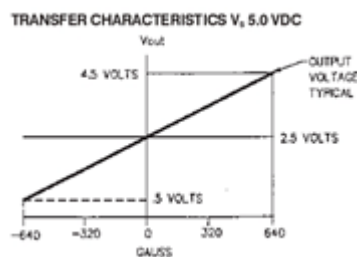


图 2 SS495A 磁场强度—输出电压特性曲线

### 2. 设计制作利用调制位置传感器输出信号来控制电磁铁的控制装置

我们需要将霍尔效应传感器输出的线性信号转变为脉宽调制信号，通过脉冲宽度的变化来控制电磁铁线圈电流的大小和方向。电路用分立元件搭建 555 电路实现。具体电路分为两部分：

<1>非稳态多谐振荡器

此电路用来产生频率确定的脉冲振荡信号，以此作为后面的脉宽调制器的时钟输入信号。产生的脉冲振荡信号的频率由  $R_1 + 2R_2$  的值决定。在搭建的电路中， $R_1$  选可变电阻器。而振荡信号的频率直接决定着电磁铁磁力变化的响应频率，一般来说，响应频率高一些比较好(为什么?)。因此通过调节  $R_1$  的大小可直接控制磁悬浮系统的响应频率。非稳态多谐振荡器电路图如图 3-1，

输出波形图如图 3-2。响应频率与  $R_1 + 2R_2$  的关系如图 3-3。

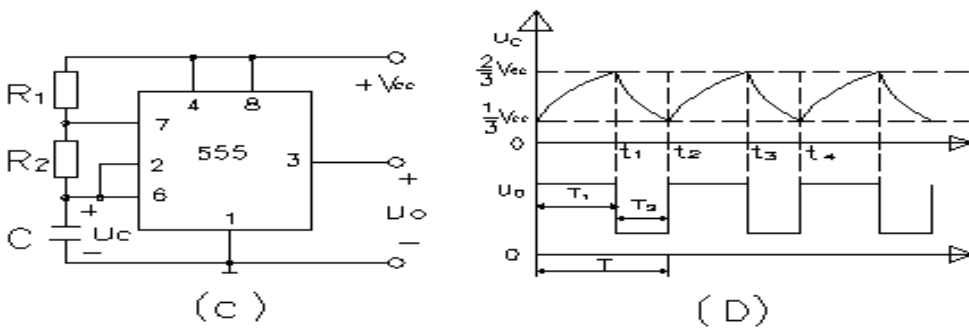


图 3-1：非稳态多谐振荡器电路图

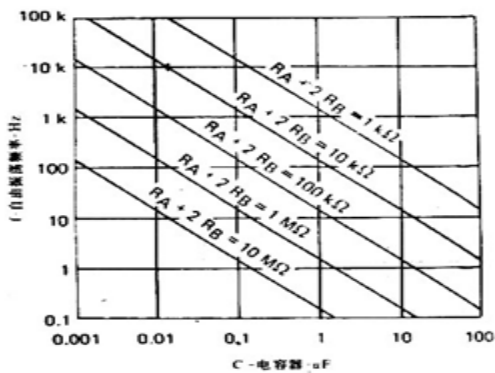


图 3-2：非稳态多谐振荡器响应频率

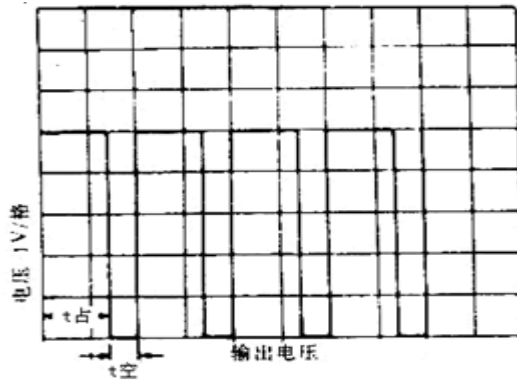


图 3-3：非稳态多谐振荡器输出波形图

矩形波的振荡周期  $T = T_1 + T_2 = \ln 2(R_1 + 2R_2)C \approx 0.7(R_1 + 2R_2)C$

<2>脉宽调制器

时钟输入 2 接<1>中的非稳态多谐振荡器的输出，输入脉冲振荡作为时钟信号；调制输入 5 接霍尔效应传感器的输出信号，作为调制信号。此电路将原本脉宽一定的时钟信号调制为随霍尔效应传感器的输出信号大小而改变脉冲宽度大小的 PWM 信号。脉宽调制器电路图见图 3-1。输入、输出波形对比图见图 4-2。当悬浮磁体离霍尔效应传感器较近时，传感器的输出信号较大，这相当于调制输入电压较大；由图 4-2 可见，对于较大的调制输入

电压，输出电压的脉冲宽度较大，反之亦然。在此电路中， $R_A$  为可变电阻器，它的作用是调节初始状态占空比。

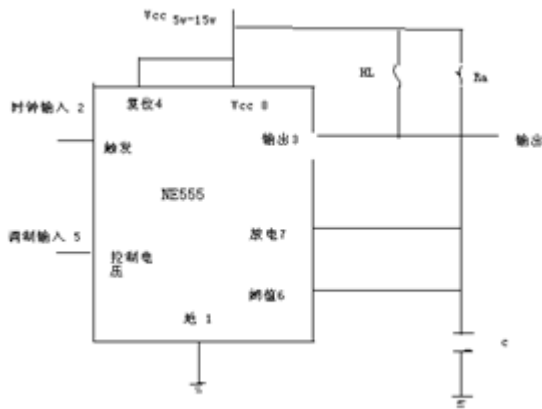


图 4-1: 脉宽调制器电路图

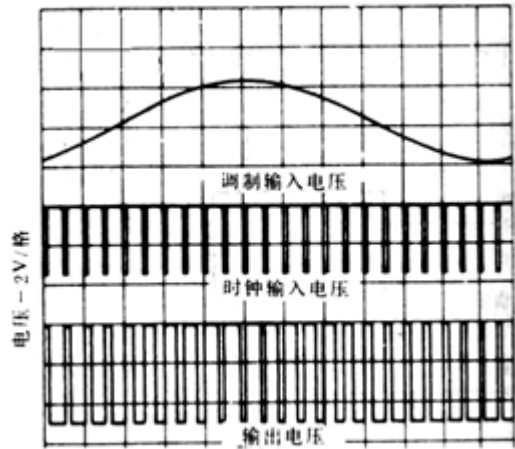


图 4-2: 脉宽调制器输入、输出波形图

### 3. 线圈驱动电路的设计制作

由于电磁铁线圈内有铁芯，当悬浮磁块离贴在铁芯上的传感器太近时，一定会被铁芯吸引。这时，电磁铁线圈应该产生将它推开的斥力。而对于相反的情况，电磁铁线圈应该产生吸力。这就需要电磁铁能够改变极性，可以提供从斥力一直连续变化到吸力的输出。本实验选择机器人控制领域常用的元件——电机控制芯片 LMD18201。LMD18201 可提供很多种功能，使用它来得到包含方向与脉宽两方面信息的信号，它还起到将控制信号放大的作用。将 LMD18201 的 3 脚（方向）接 555 电路的 PWM 信号输出；LMD18201 的 5 脚直接接高电平。输入输出信号示意图如图 5。电路中每个周期都有正向及反向的电压存在，最终电压的方向决定于电压对时间的积分。例如，脉冲宽度为整个周期的 50% 的 PWM 信号，积分结果平均电压为零，所以线圈电流也为零。这种控制方法意味着电磁铁的线圈电流在控制过程中以极高的频率转换方向，积分后的平均值决定最终线圈内的控制电流。

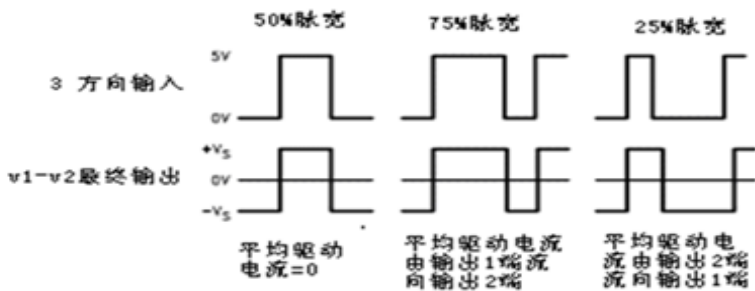


图 4 线圈驱动电路的输入、输出信号比较图

#### 实验内容和步骤

1. 首先弄清楚系统的工作原理，在教师的指导下辨认各种电子元器件；

2. 根据实验室提供的三块电路板分别焊接组成多谐振荡器、脉宽调制器和线圈驱动控制器；

3. 利用测量仪器分别测量分系统的工作状态，保证各电路系统正常工作，记录相应测试现象；

4. 利用实验室提供的大面包板，将各分电路系统总装在一起，注意面包板的正确使用；

5. 总机调试，观察实验现象，分析实验过程，实现系统目标。

6. 总结本次实验心得体会，提供实验报告，附实验系统正常运行照片。

★ 控制电路总装图参见实验室中的挂图。电路调试时，各个电路板上的测试点的参数可以参考实验室墙上的挂图给出的参数和波形图。