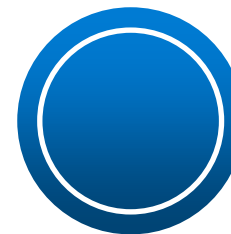


磁悬浮实验装置

大连理工大学 吴振宇

2024年9月



汇报提纲

1

出题背景

2

题目要求

3

方案分析

4

实物验证

一、出题背景

磁悬浮技术：

磁悬浮技术主要是利用电磁力将磁浮体悬浮于空间中，该技术不仅消除了系统中运动部件和静止部件之间的机械接触，而且具有低摩擦、噪声低等优点。

磁悬浮系统是一个典型的复杂非线性系统，存在模型内部参数不确定性、开环不稳定性、易受外界扰动影响等问题。

研究磁悬浮控制系统，最终目的是实现磁悬浮系统的高性能控制。



磁悬浮列车发展路线

一、出题背景

磁悬浮方式：

(1) 永磁铁斥力悬浮方式 (PRS, Permanent Repulsive Suspension) :

利用相同永磁铁磁极间的斥力将物体悬浮，并且磁极材料不同产生的斥力不同。主要应用于磁悬浮轴承上，利用磁铁之间的斥力使转子在某一位置保持稳定。

(2) 感应斥力悬浮方式 (EDS, Electro Dynamics Suspension)

利用电磁铁之间磁极异性相斥的原理进行悬浮的一种系统，它不需要主动进行磁悬浮的控制。

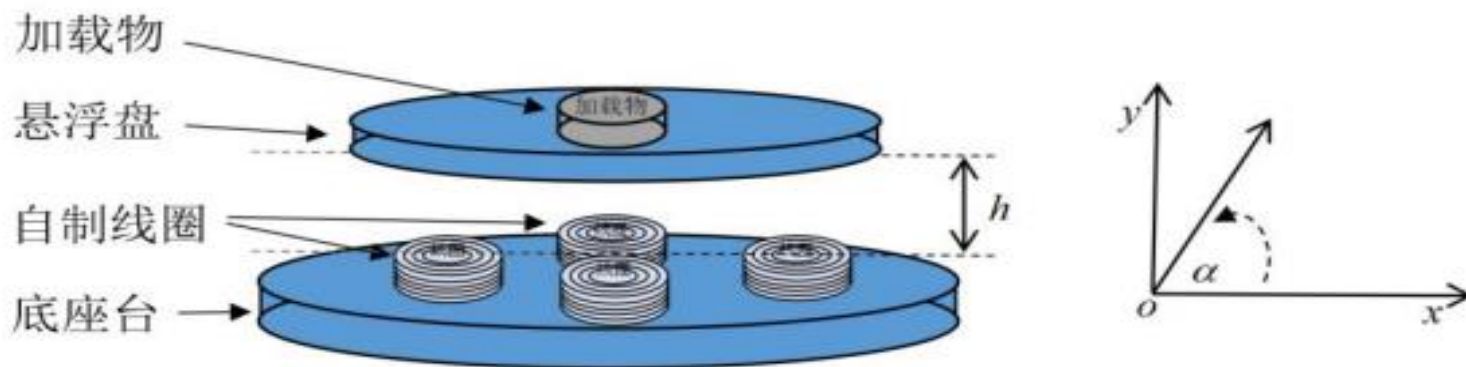
(3) 电磁吸引悬浮方式 (EMS, Electro Magnetic Suspension)

通过电磁吸力将带磁物体悬浮起来。悬浮物体只受电磁力和自身重力，就可以达到悬浮状态。电磁吸力到带磁物中心的距离远近，磁铁间气隙值的大小，线圈中的电流的大小等等都有可能影响悬浮状态。

二、题目要求

一、任务

设计并制作一套磁悬浮实验装置，由底座台和悬浮盘构成，在实验装置启动后悬浮盘悬浮，并可以完成一定的动作，如图所示。要求底座台**不得安装永磁体**，为底座台提供的**电源电压不大于 30V/DC**，底座台外形尺寸**最大值不得超过 18cm**。悬浮盘为**无源系统**，不得加装电池，也不得外接电线，悬浮盘的**直径不超过 10cm**。



磁悬浮实验装置示意图

二、题目要求

二、要求

- (1) 悬浮盘能够**悬浮**超过 2 秒，悬浮高度 h 大于 1cm。 (10 分)
- (2) 悬浮盘能够**稳定悬浮**，悬浮高度 h **不小于 2cm**，且稳定时间在 **10 秒**以上。 (20 分)
- (3) 悬浮盘**稳定悬浮的状态**下，在悬浮盘中心处放置重量约 **20 克加载物体**，悬浮盘可以**稳定悬浮 10 秒**以上。 (15 分)
- (4) 可以**数字设定**悬浮盘悬浮高度，可调整悬浮高度**范围不小于 2cm**，可调整**精度不小于 0.2cm**，稳定时间在 **10 秒**以上。 (20 分)
- (5) 处于悬浮稳定状态后，底座台和悬浮盘可以**手动整体倾斜**，倾斜角度**越大越好**。 (15 分)
- (6) 尽量**降低**磁悬浮实验装置的**功率**，在悬浮盘稳定悬浮高度不小于 2cm前提下，磁悬浮实验装置的**底座台供电功率越小越好**。 (10 分)
- (7) 其他。 (10 分)
- (8) 报告。 (20 分)

二、题目要求

三、说明

(1) 磁悬浮技术，简称EML技术或EMS技术，是指利用磁力克服重力使物体悬浮的一种技术。磁悬浮技术实现形式比较多，主要可以分为系统**自稳的被动悬浮**和系统不能自稳的**主动悬浮**等。

(2) 实验装置的底座台**不得使用永磁体**，须全部采用**电磁线圈构成**的电磁铁来实现。电磁铁是通电产生磁场的一种装置，是在铁芯外部缠绕与其功率相匹配的导电绕组，通有电流的电磁铁具有磁性，并且可以通过改变电磁线圈的电流来改变磁场大小。为了实现题目要求，实验装置的底座台需要多个电磁线圈协调工作，电磁线圈**个数不限**，电磁线圈要求**自己绕制**。

(3) 作品通过直流电源供电，由于对多个电磁线圈供电，需要对供电电路进行设计，控制多个电磁线圈的工作电流，实现磁悬浮系统的悬浮控制，**整套磁浮装置要求自制**。

二、题目要求

三、说明

(4) 除了第(5)项功能测试外，整个控制过程中底座台与地面保持平行，测试过程中不允许移动。

(5) 本题中悬浮高度 h 是指悬浮盘平稳悬浮后，悬浮盘底面距底座台最高元器件上沿（面）的距离。

(6) 第(3)项测试中的重物，可以用3枚第四套或第五套的一元硬币替代，每枚约6克。

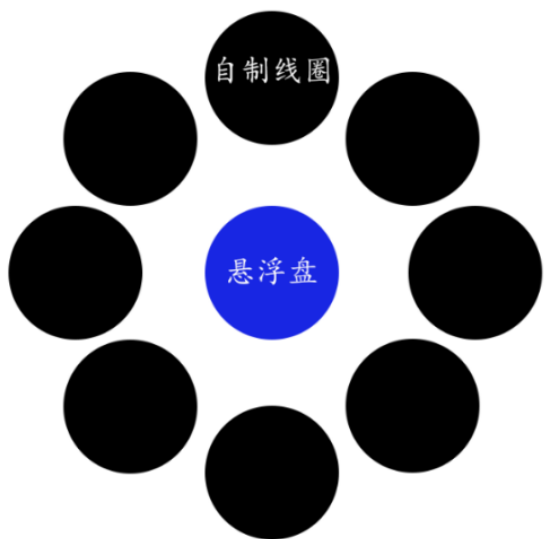
(7) 第(4)项测试悬浮盘高度设定功能时，可在装置处于稳定悬浮状态后，再设定基于此高度的相对高度，设置范围不小于2cm。

(8) 系统在进行各项功能测试时，启动20秒内必须进入稳定悬浮状态，逾期或者不能稳定的，不予测试。悬浮盘在某一高度平稳旋转，可视为稳定状态。

三、方案分析

一、线圈位置分布

由于题目明确要求不能使用永磁体，最大难题在于如何巧妙分配磁力来**克服悬浮盘的重力**，并且达到稳定的效果。分配磁力方面，在**布置线圈位置**提供了两种解决方案。



方案一：

将八捆**等匝数\等体积线圈**依次摆放，围成**圆形**。通过控制不同方向的线圈电流达到悬浮盘始终在中心稳定、保持一定高度的效果。

三、方案分析



方案二：

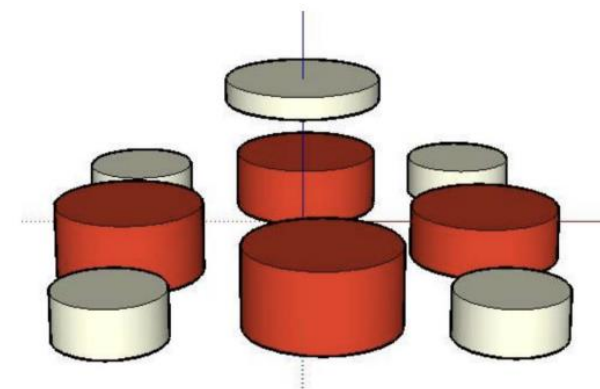
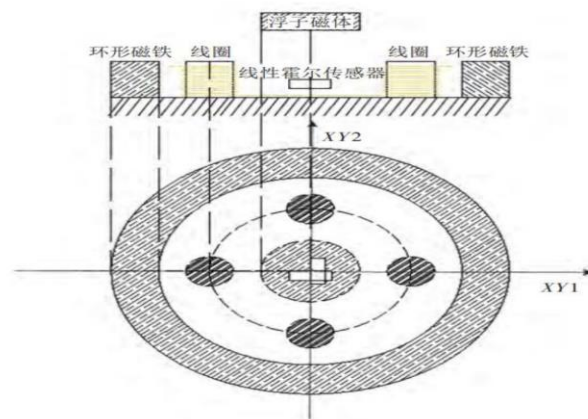
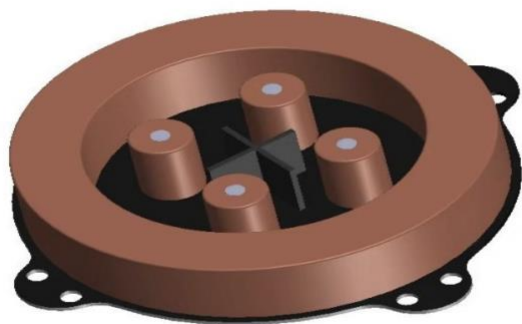
将四捆匝数多、高度小的线圈摆成正方形四角，用于调整高度；另四捆匝数少、高度大的线圈置于间隙，用于调整悬浮盘x、y方向位置。

综合分析：

1. 由于方案一在控制位置时，八个线圈需要同时控制悬浮盘的高度与平面位置，整体控制较为复杂。优势是可控维度和范围大。
2. 方案二将悬浮盘的高度与位置控制拆开分析，并巧妙设置线圈位置，使得控制更加简洁，也易于实现精准控制。缺点是固定磁场线圈要求尽量具有一致性。

三、方案分析

其他方案：



三、方案分析

二、线圈大小确定

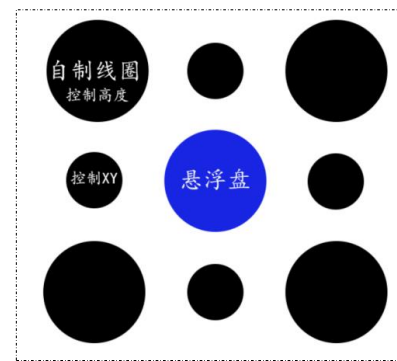
由毕奥—萨伐尔定律知磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu I}{4\pi r^2}$$

磁感应强度与**电流呈正相关**，据此调节电流来控制磁力大小。

此外**线圈匝数**的增加可以增大线圈中的磁通量，从而使得磁感应强度增加，为了在有限范围内增大磁力，所以选择了匝数更多的线圈。

由于需要主要克服悬浮盘重力，所以将四个大线圈（1000匝）布置于四周为中心**提供固定推力**，而将其余小线圈（400匝）布置在中间用于单独提供向四周的**矫正力**。

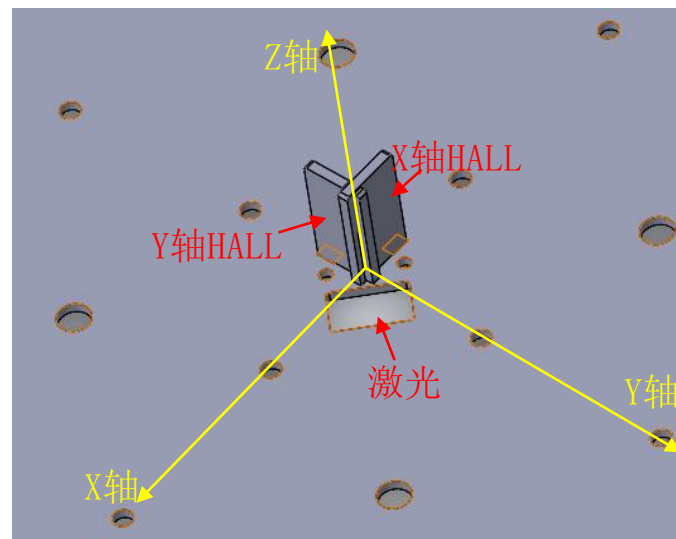


三、方案分析

三、传感器

霍尔传感器是利用霍尔效应来测试感应磁场中磁力大小变化的一种半导体感应元件。使用3个**垂直放置**的线性霍尔传感器测量悬浮盘**XYZ三轴位置**，偏差量输出给线圈电流环。

使用**TOF050F激光测距**进行Z轴位置准确测量并与设定的位置进行比较，将比较误差传递给控制器处理，进而实现对系统的闭环控制。



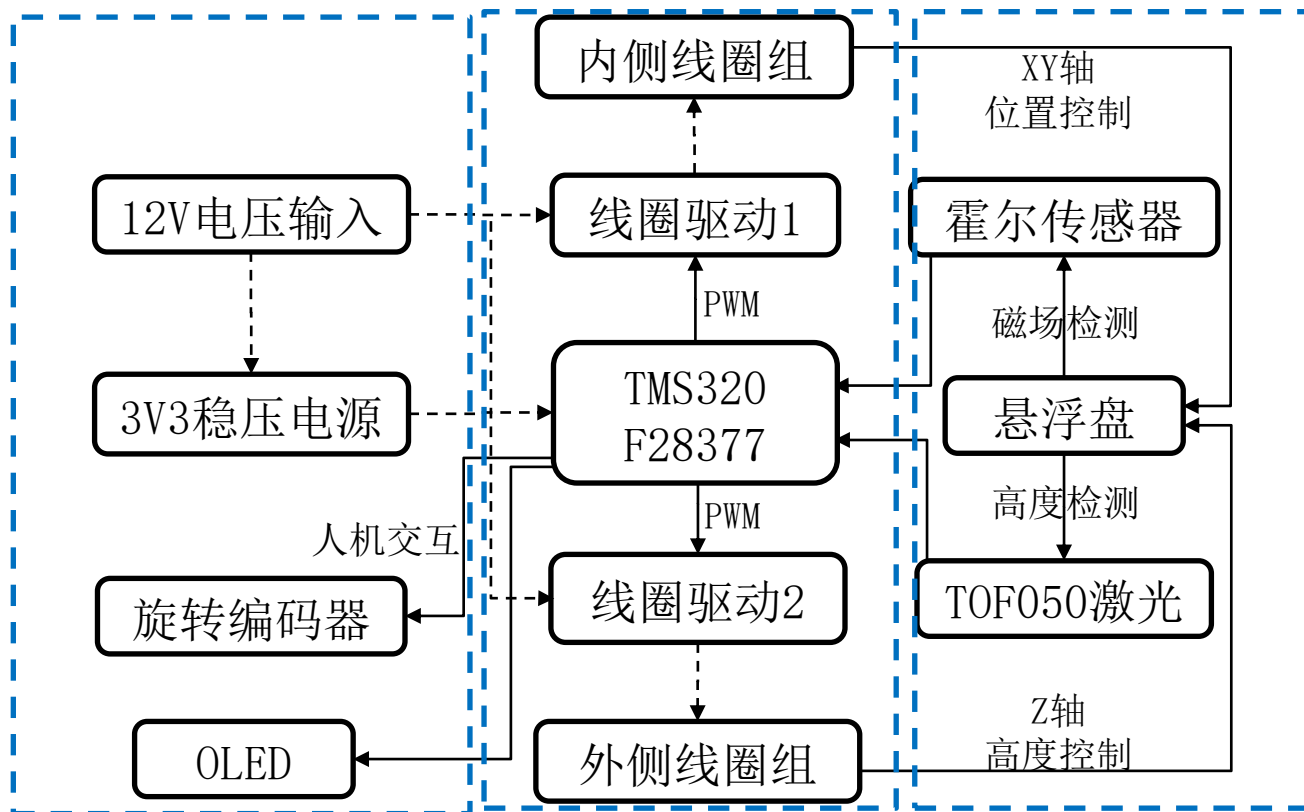
四、线圈驱动

电磁线圈若想实现较强的控制磁场需要较大的电流通过，采用**直流电机驱动模块**，可以对通过线圈的电流方向和大小进行精细控制。同时通过INA240对**电流进行采样**，方便对电流进行闭环控制。

三、方案分析

五、系统框架

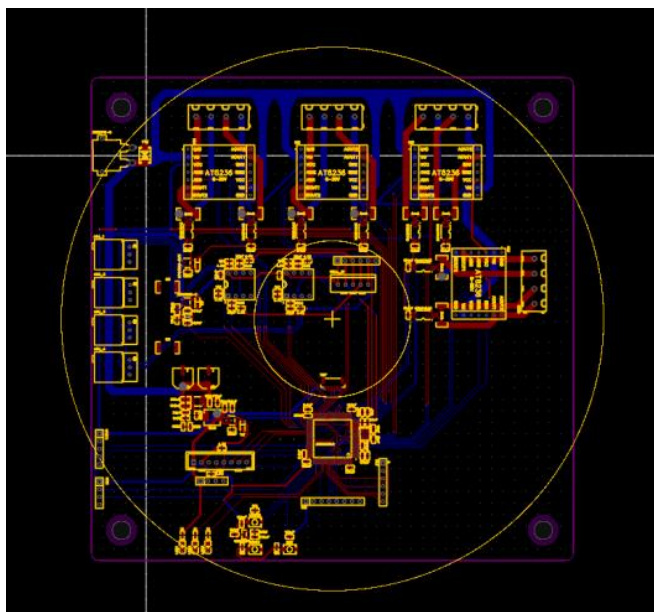
磁悬浮系统主要由TMS320组成的总控制模块，TOF050F激光测距、霍尔编码器传感模块，自制线圈生磁模块，OLED显示模块，AT8236驱动八个线圈的磁场生成模块以及INA240A2电流检测模块组成



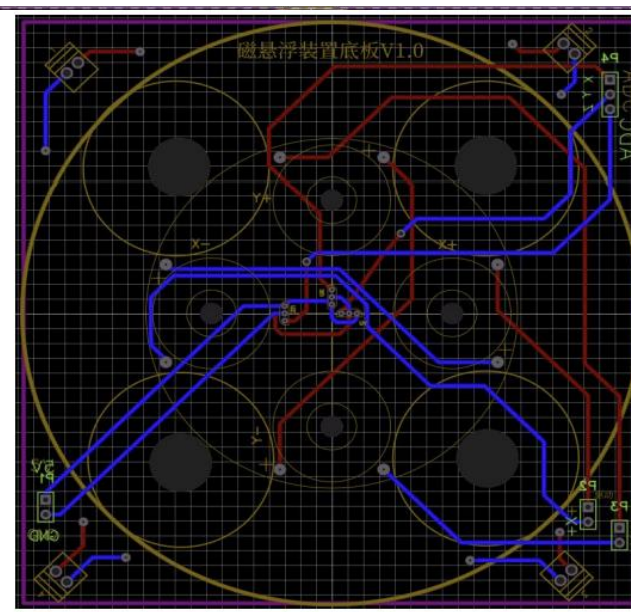
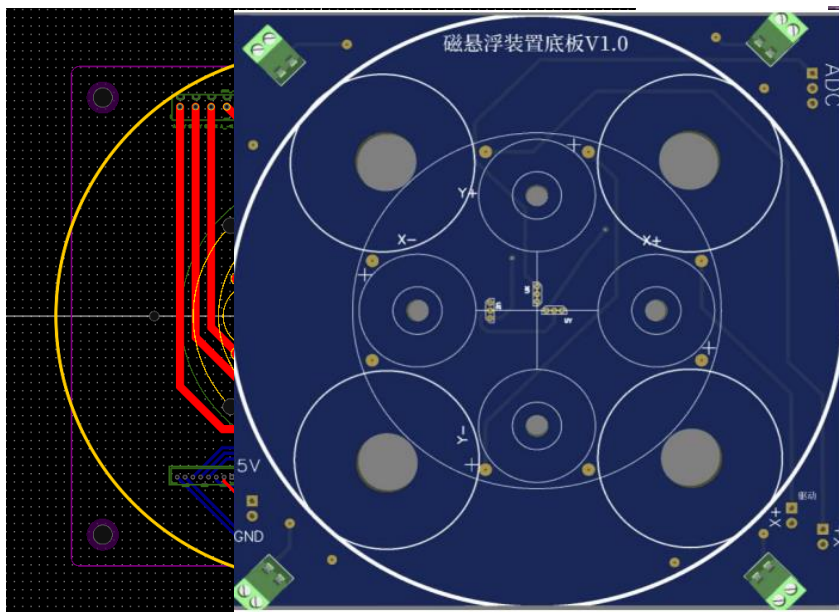
四、实物验证

一、电路设计

采用分层式设计，将线圈强磁部分隔离至上层，防止干扰芯片正常工作。控制器、电源管理、驱动部分位于底层。



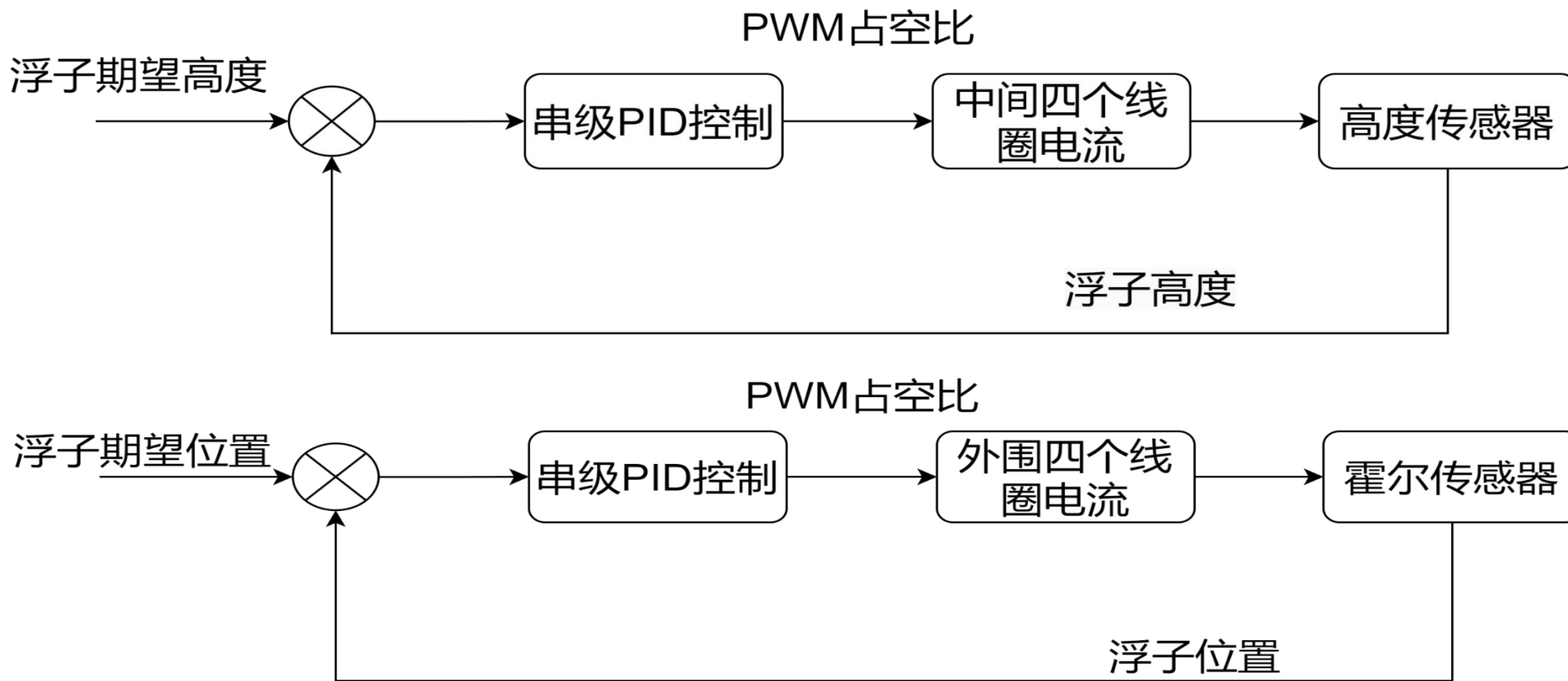
底层控制板



顶层线圈安装板

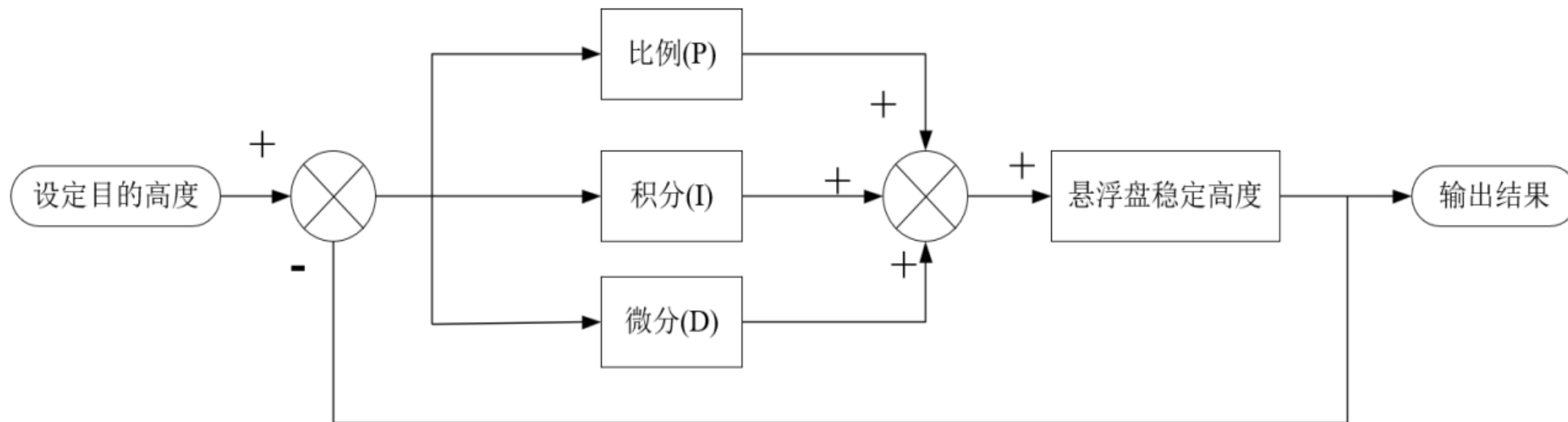
四、实物验证

二、控制框图



四、实物验证

二、控制框图



四、实物验证

三、测试方法与仪器

1. 第一、第二问将装置底座台置于水平实验桌上，供电后检测电源供电无问题后将悬浮盘置于磁场中心，松手后开始计时，同时用直尺测量线圈最高处与悬浮盘底面的距离。观测悬浮盘状态是否稳定，同时通过直尺度数和秒表读数得到测试结果。
2. 第三问在第一、第二问基础上在悬浮盘上装载3枚第四套或第五套的一元硬币，利用第一、二问方法观测悬浮盘稳定性、高度、持续时间。
3. 第四问旋转EC11旋转编码器来调节悬浮盘的悬浮高度，同时查看OLED屏显示高度并对比直尺测量读数，得到高度调节结果。
4. 第五问将底座台一端抬高从而改变水平方向倾斜角度，观测悬浮盘状态是否保持之前稳定状态、是否保持水平，记录悬浮盘失衡时最大倾斜角度。
5. 第六问通过给装置提供电流及电压的学生电源RIGOL DP832中显示的功率，得到磁悬浮实验装置的底座台供电功率。

仪器：直尺，秒表，量角器，直流电源RIGOL DP832

四、实物验证

四、测试数据与结果分析

1. 悬浮盘在1.0~2.0cm高度中均能稳定时间10s以上，满足第一问及第二问要求。
2. 通过旋钮调节悬浮盘高度，其高度可以每次调整且小于0.2，故可读高度变化范围约为1cm，所以完成第四问。
3. 使用第四套的一元硬币作为负载，测试得出负载3枚硬币悬浮盘稳定都能超过10s，完美完成第三问。在此基础上扩展为4枚硬币，同样完成题目要求。
4. 将底座台一端抬高从而改变水平方向倾斜角度，第五问成功达到最大倾角为 $\pm 60^\circ$ 。
5. 读取实验装置上电流电压示数，得到该装置所耗功率为30W~90W，其中30W为悬浮盘空载时最低稳定高度时所需功率，90W为承载三枚硬币稳定时所耗功率。

高度(mm)↔	1.0↔	1.1↔	1.2↔	1.3↔	1.4↔	1.5↔	1.6↔	1.7↔	1.8↔	1.9↔	2.0↔
持续时间(s)↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔	10+↔

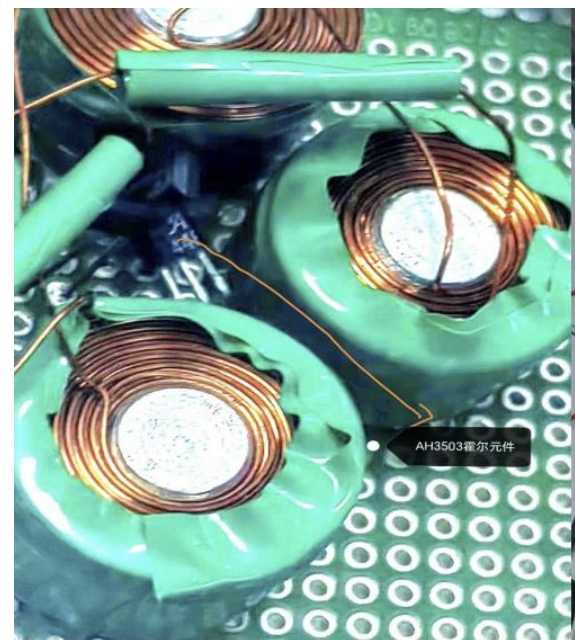
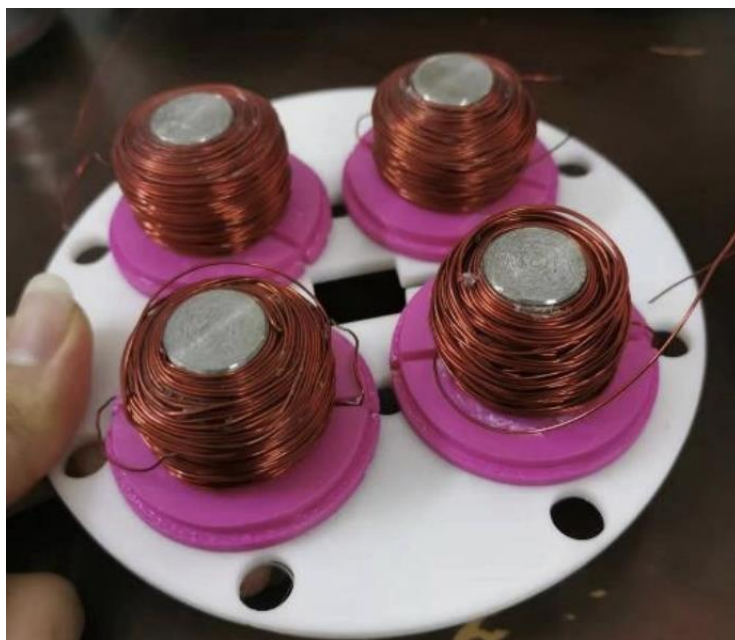
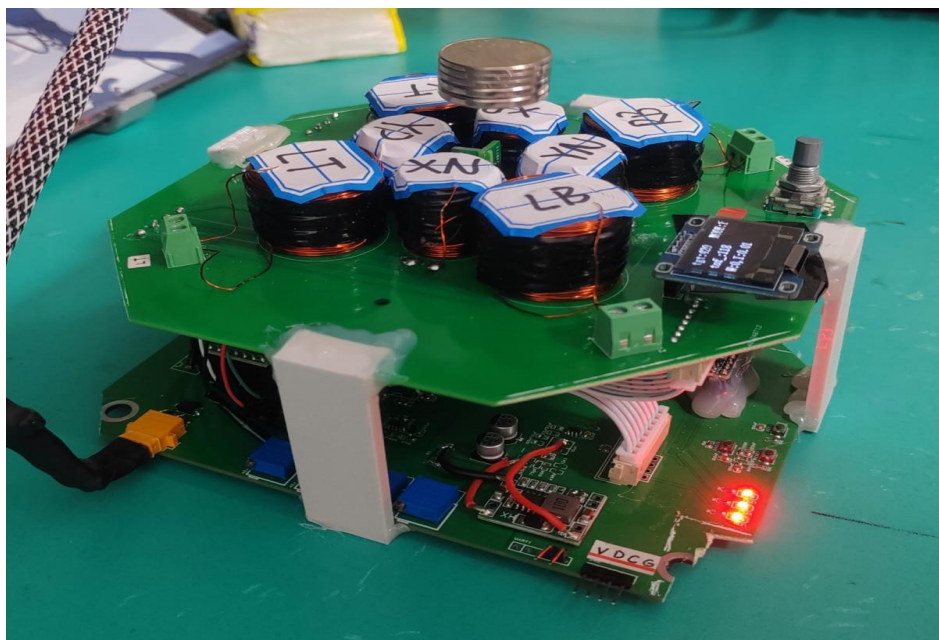
加载重量(g)↔	6↔	12↔	20↔
持续时间(s)↔	10+↔	10+↔	10+↔

倾斜方向↔	x轴正方向↔	x轴负方向↔
最大倾角↔	60°↔	60°↔

四、实物验证

五、水平悬浮展示

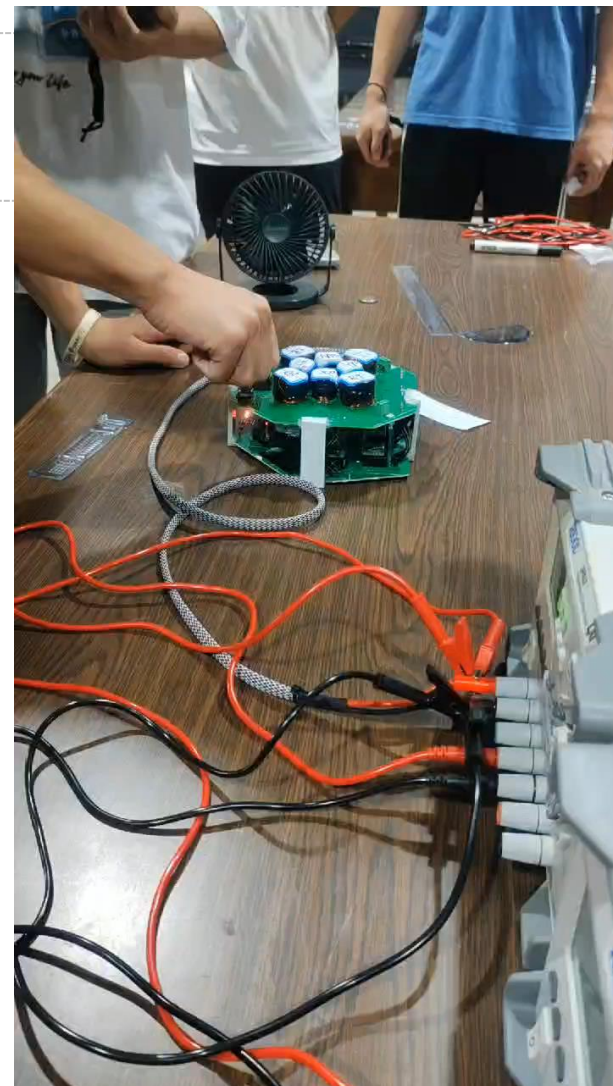
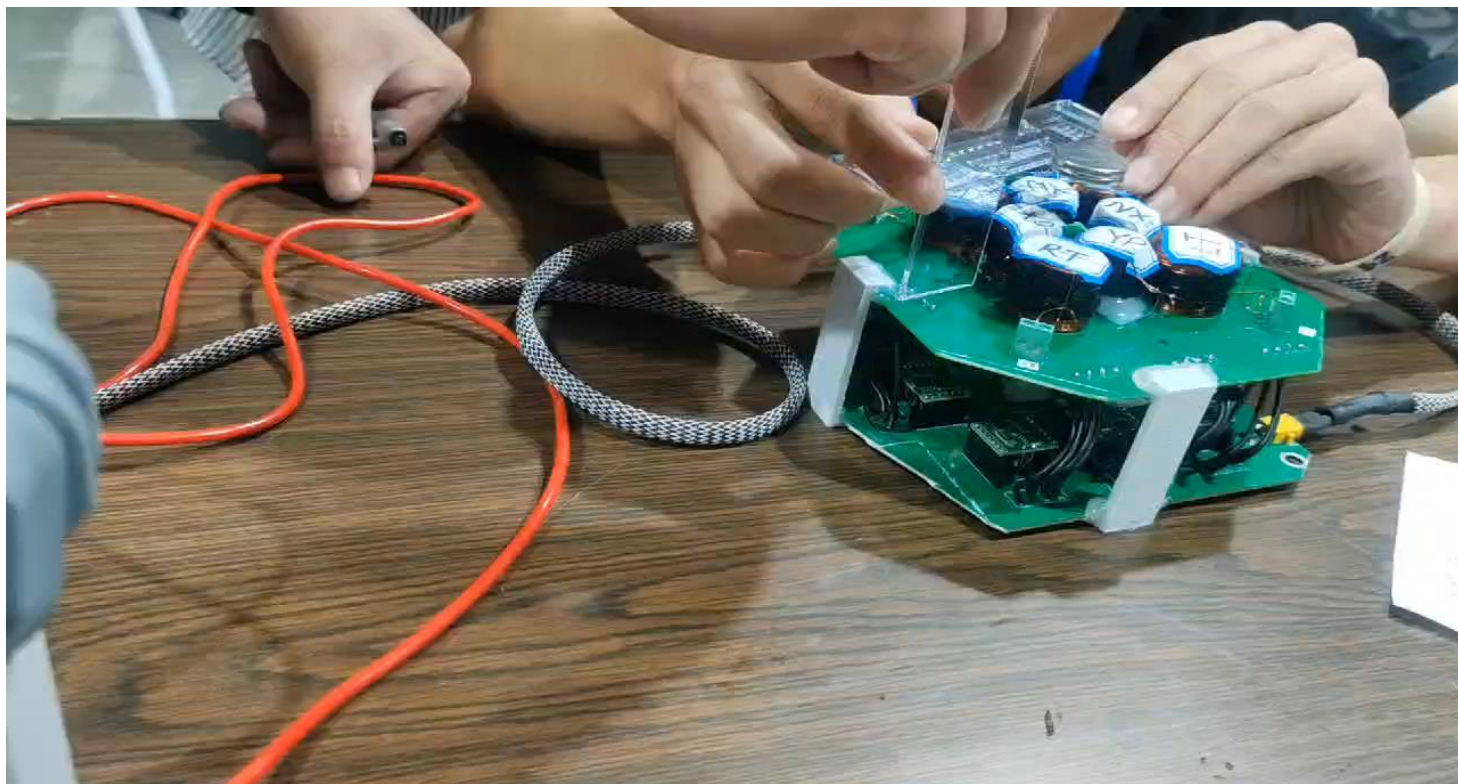
作品最终水平悬浮效果如下。



四、实物验证

六、水平悬浮高度测量

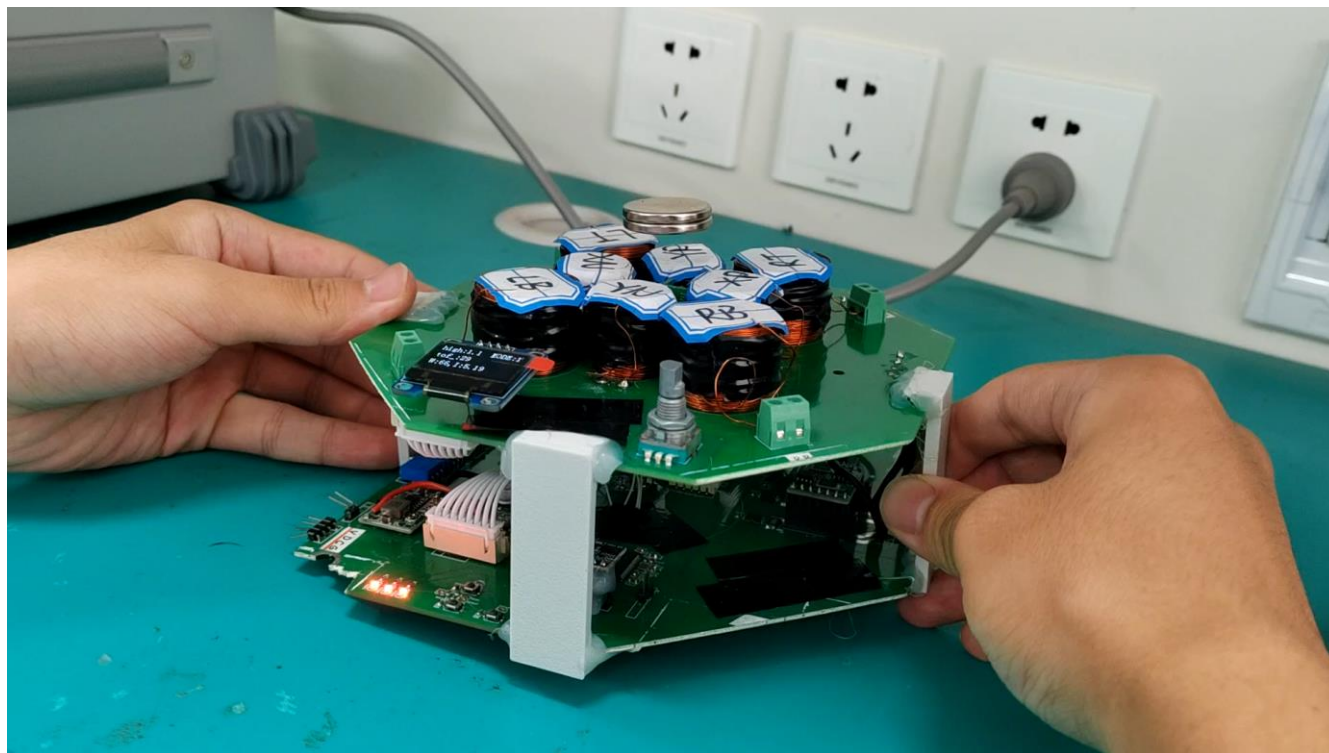
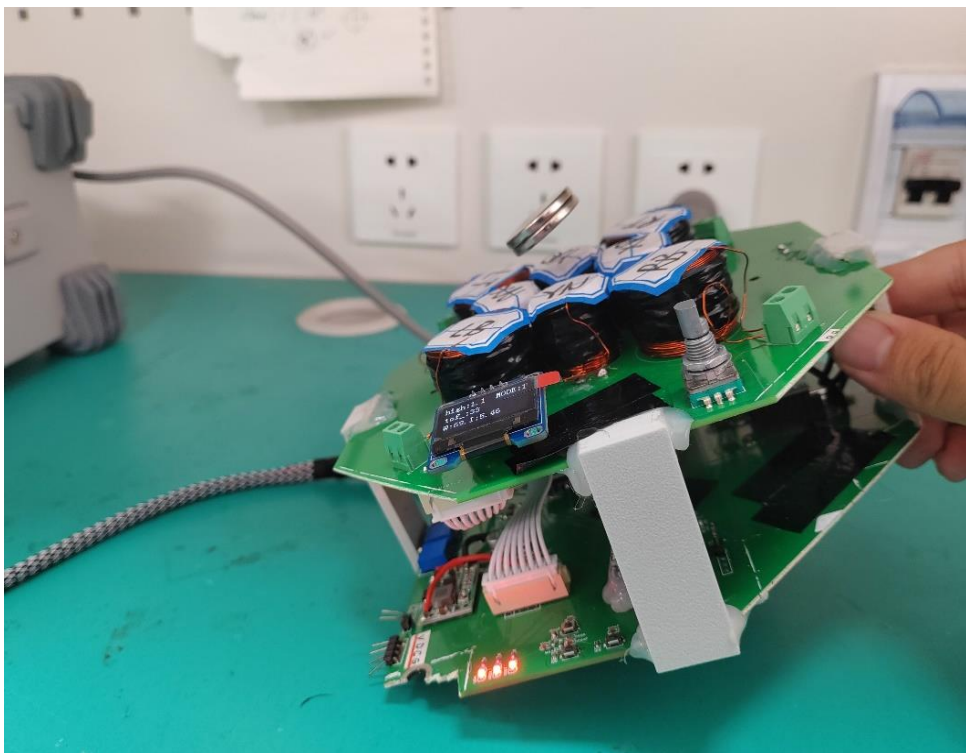
悬浮高度在10mm到20mm范围内可调。



四、实物验证

七、倾斜悬浮展示

作品最终倾斜悬浮效果如下。



谢 谢!