




2023

全国大学生物理实验竞赛

Research Report



研究报告

参赛题目：在电磁作用下小杆的平衡

目录

- 一 研究背景 3
- 二 研究目标 3
- 三 理论模型的设计与研究 4
- 四 实验方案设计 6
 - 1. 实验器材 6
 - 2. 实验原理 7
 - 3. 实验装置展示 11
 - 4. 实验步骤 13
 - 5. 实验数据 14
 - 6. 实验数据分析 16
- 五 误差分析与改进措施 18
- 六 实验创新点 19
- 七 结论 20
- 八 成本预算 21
- 九 人员分工 21
- 十 参考文献 22

一 研究背景

不倒的杆这样一个追求稳定性的研究，其研究背景可以追溯到控制论和稳定性理论的发展。

在控制论中，稳定性是一个关键的概念。一个系统在稳定状态下，当受到干扰或扰动时，会返回到原始的稳定状态。稳定性分析和控制是控制论的核心内容之一。

不倒的杆作为一个控制系统的经典案例，可以用来研究稳定性和控制方法。通过实验和理论分析，我们可以探索如何通过适当的控制手段来维持杆的平衡。这种研究有助于深入理解控制系统的稳定性原理，以及如何应用这些原理来设计更复杂的控制系统。

此外，不倒的杆的研究还与机器人技术和自动化控制密切相关。在机器人控制中，稳定性和平衡是实现精确运动和任务完成的关键要素。通过研究不倒的杆，我们可以提炼出一些控制方法和算法，用于机器人的平衡和稳定控制。

因此，不倒的杆的研究背景可以追溯到控制论的发展，并与自动化控制和机器人技术有着密切的联系。

二 研究目标

1. 探究杆子平衡的稳定性：不倒的杆实验可以帮助研究者深入理解物

体平衡的稳定性，探究杆子如何在微小扰动下保持平衡，为其他相关研究提供基础。

2. 研究角动量和转动惯量：不倒的杆实验可以帮助研究者更好地理解角动量和转动惯量的概念，为物理学研究提供基础。

3. 应用于教学：不倒的杆实验是一种很好的物理学教学实验，可以帮助学生更好地理解物理学原理，提高他们的实验技能。

总之，不倒的杆实验的研究背景和目标都是为了深入理解物理学原理，推动物理学的发展和应用。

三 理论模型的设计与研究

研究小杆在外力（风力）的作用下保持竖直反向上的平衡，本实验采用电生磁的方法，提供一个与风力反方向且相同大小的力，使小杆回到平衡状态。下面是理论模型：

设风力为 F_0 ，小杆质量为 m

根据牛顿第二定律，可以得到以下方程：

$$F_0 = ma \quad (1)$$

a 为杆子绕 yaw 的加速度。杆子的绕 yaw 加速度可以表示为：

$$a = \omega^2 \cdot L \quad (2)$$

其中 ω 为杆子的角速度， θ 为杆子相对于竖直方向的倾斜角度，杆子的角速度可以表示为：

$$\omega = \Delta\theta/\Delta t \quad (3)$$

其中 $\Delta\theta$ 为杆子绕 yaw 的角度变化量， Δt 为时间间隔。将 (3) 带入 (2) 式中，可以得到：

$$a = (\Delta\theta/\Delta t)^2 L \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (1) 式的方程中，可以得到：

$$F_0 = m(\Delta\theta/\Delta t)^2 L \quad (5)$$

由于 $\Delta\theta/\Delta t$ 即为杆子的角速度 ω ，可得：

$$F_0 = m\omega^2 L \quad (6)$$

根据实验设计，螺线管通电产生一个与风力 F_0 反方向且相同大小的力 F_1 ，即满足：

$$F_1 = F_0 \quad (7)$$

根据毕奥萨伐尔定律，可以得到螺线管在杆子上产生的磁场 B ：

$$B = \mu_0 n I / 2\pi R \quad (8)$$

其中， μ_0 为真空磁导率， n 为螺线管的匝数， I 为螺线管中所通的电流， R 为螺线管中心距。杆子所受到的安培力可以表示为：

$$F_1 = BLI \quad (9)$$

其中 L 为杆子的长度。将 (8) 带入 (9) 式中，可以得到：

$$F_1 = \mu_0 n L I^2 / 2\pi R \quad (10)$$

由于： $F_0 = F_1$

即： $m\omega^2 L = \mu_0 n L I^2 / 2\pi R \quad (11)$

根据上述理论模型，真空磁导率 μ_0 、螺线管中心距离 R 、匝数 n ，以及小杆的长度 L 、质量 m 等都是定值，可直接测量。

易得： $\frac{\omega}{I} = \sqrt{\frac{\mu_0 n L}{2m\pi R}} = k \quad (12)$

因此我们仅需要测量小杆受风力的角速度 ω 、螺线管的电流 I 并证明两者的线性关系便可证明该实验的科学性与可行性。

四 实验方案设计

1. 实验器材

基础材料：

- | | |
|-------|---------|
| ①小杆 | ②圆形磁铁片 |
| ③铁架台 | ④泡沫板 |
| ⑤亚克力板 | ⑥可调节电风扇 |
| ⑦万向轴 | |

电路部分：

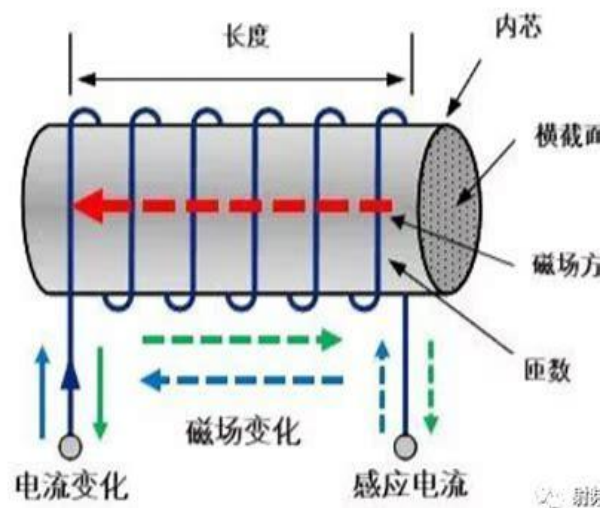
- | | |
|---------------------|-----------|
| ①mpu6050 三轴加速度传感器模块 | ⑤螺线管 |
| ②电源 12-24v | ⑥mos 场效应管 |
| ③esp32 开发板 | ⑦舵机 |
| ④导线若干 | |

2. 实验原理

2.1 电生磁原理

如果将一条长长的金属导线在一个空心筒上沿一个方向缠绕起来，形成的物体我们称为螺线管。

如果使这个螺线管通电，那么会怎样。通电以后，螺线管的每一匝都会产生磁场，磁场的方向“安培定则二”：用右手握住通电螺线管，让四指指向电流的方向，那么大拇指所指的那一端是通电



螺线管的 N 极。那么，在相邻的两匝之间的位置，由于磁场方向相反，总的磁场相抵消；而在螺线管内部和外部，每一匝线圈产生的磁场互相叠加起来，最终形成磁场形状。也可以看出，在螺线管外部的磁场形状和一块磁铁产生的磁场形状是相同的。而螺线管内部的磁场刚好

与外部的磁场组成闭合的磁力线。

2.2 毕奥-萨伐尔定律

图 1：电生磁原理图

在静磁学中，毕奥-萨伐尔定律（英文：Biot-Savart Law）描述电流元在空间任意点 P 处所激发的磁场。

定律文字描述：电流元 Idl 在空间某点 P 处产生的磁感应强度 $d\vec{B}$ 的大小与电流元 Idl 的大小成正比，与电流元 Idl 所在处到 P 点的位置矢量和电流元 Idl 之间的夹角的正弦成正比，而与电流元 Idl 到 P 点的距离的平方成反比。

该定律在静磁近似中是有效的并且与 Ampère 的电路规律和磁性高斯定律一致，以 Biot Savart 命名。

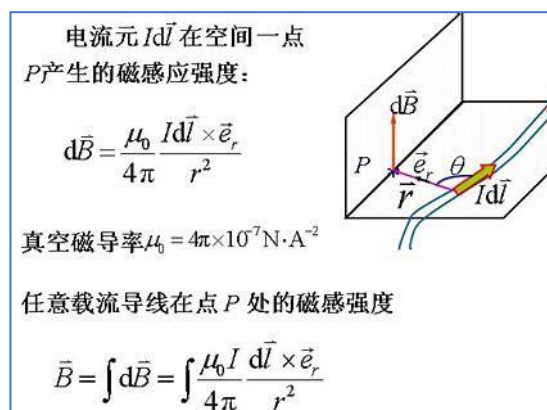


图 2：毕奥-萨伐尔定律图

2.3 mos 场效应管

MOS 场效应管是一种基于金属氧化物半导体技术的半导体器件，常用于电路中作为放大器或开关。它由金属氧化物半导体材料制成，具有高输入阻抗、低噪声、低功耗、高速度等特点，因此在电子电路中应用广泛。

MOS 场效应管的工作原理基于半导体材料的特性，当在氧化层上施加一个电场时，可以改变介质中电子的浓度，从而控制电流的流动。MOS 场效应管由源极、漏极和栅极三个区域组成。当在栅极处施加一定电压时，可以改变源极和漏极之间的电阻值，从而控制电流的大小和流动方向。

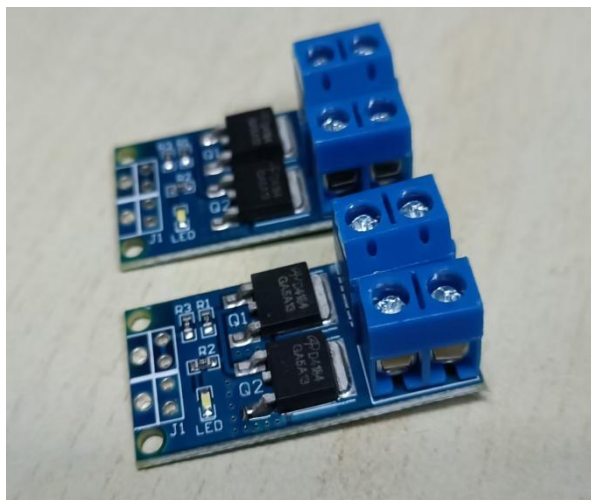


图 3: mos 场效应管图

2.4 三轴加速度传感器

三轴加速度传感器是加速度传感器中用来测量空间加速度的传感器，即测量物体在空间中速度变化的快慢，如图 5 所示。三轴加速度传感器与单轴、两轴加速度传感器在测量原理上没有差别，他们的主要差别在于测量的维度不同，三轴加速度传感器主要是将空间加速度在 X、Y、Z 三个轴上进行分解，在一定的技术上三个单轴就可以变

成一个三轴。

三轴加速度传感器的特点是能够在预先不知道物体运动方向的情况下，准确且全面的测量出物体的空间加速度，并且体积小，质量轻。

$$\text{pitch} = \alpha = \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right)$$
$$\text{roll} = \beta = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right)$$
$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{a_z}\right)$$

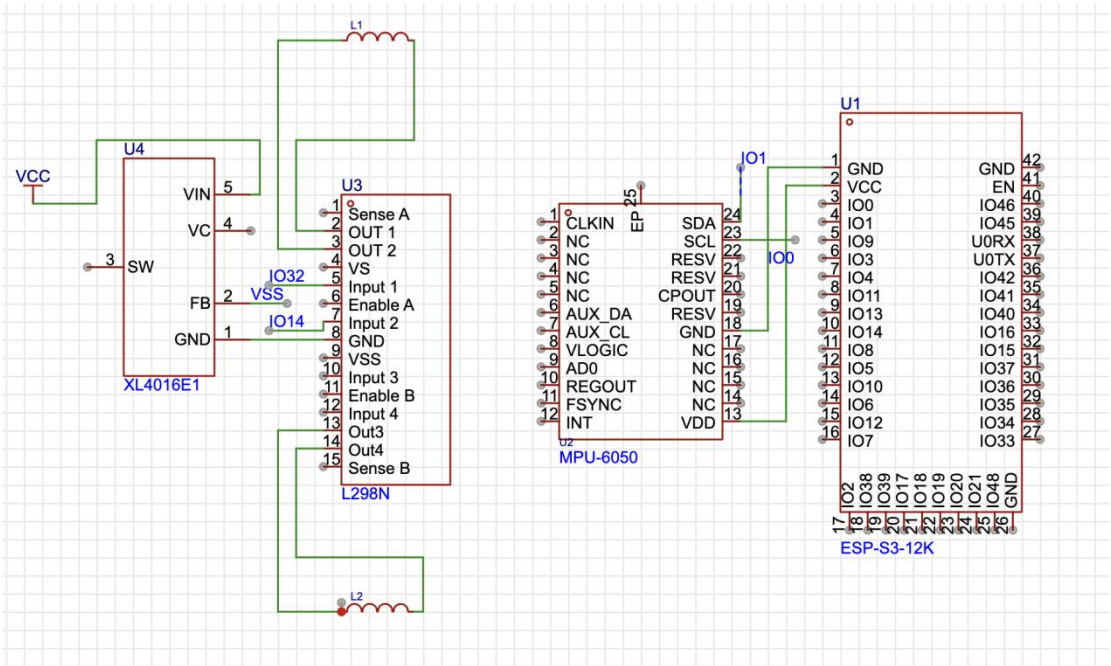
知乎 @虹科医药电子

图 4：加速器角度计算公式



图 5：三轴加速度传感器实物图

3. 电路设计图



4. 电路原理设计

- ①调节电风扇的转速和角度,使正对小杆中心施加一个稳定的作用力,令小杆发生倾斜。
- ②与小杆同轴的 mpu6050 三轴加速度传感器模块感受到角速度的变化,将数据输入计算机并打印出来。
- ③计算机接受角度变化数据,分析数据,判断小杆倾倒方向,控制舵机迅速旋转至合适位置,使螺线管能够发挥最大作用。
- ④在接收到小杆角度变化的同时,调控 mos 场效应管进而控制两侧线圈的电流大小使磁场改变。小杆在磁场作用下回归平衡状态,实验结束。

5. 实验装置展示

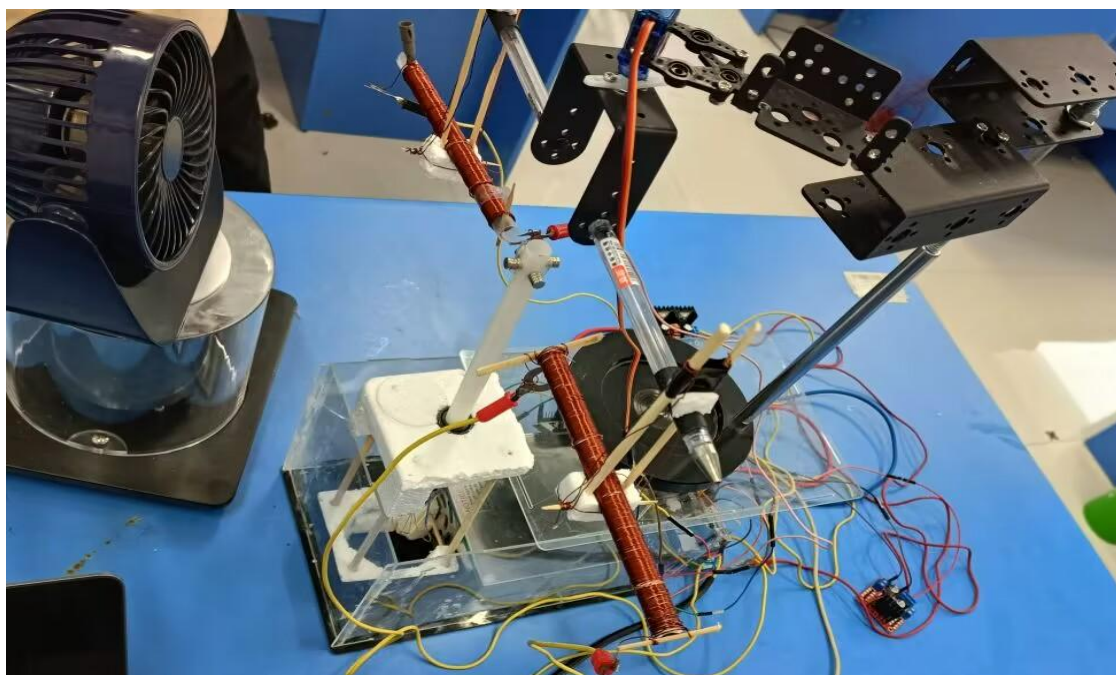


图 6: 实验装置图 (侧面)

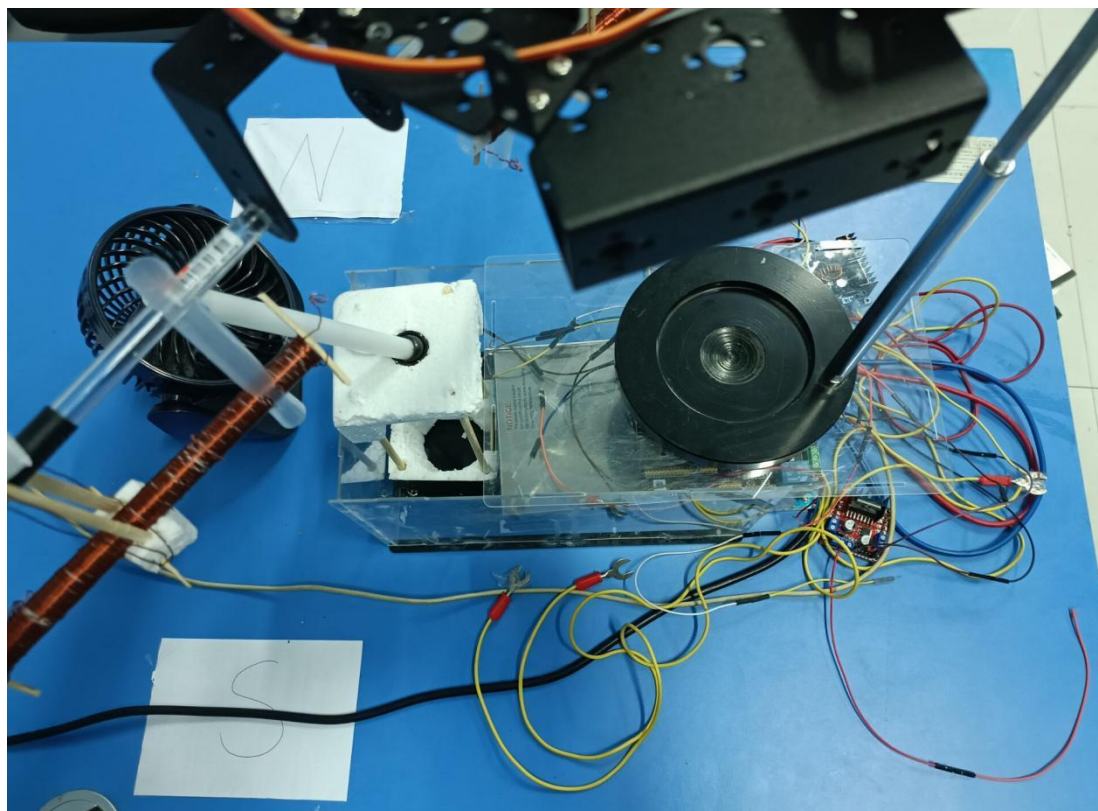


图 7：实验装置图（附视）

补充：部分代码展示

```

364
365 if __name__ == "__main__":
366
367     mpu = MPU6050()
368     while True:
369         g=mpu.readData()
370         # x,y,z数据换算pinch
371         # 假设已知x,y,z轴数据
372         x_acceleration = g.Gx
373         y_acceleration = g.Gy
374         z_acceleration = g.Gz
375
376         # 计算加速度的分量
377         accel_x = x_acceleration / 16384.0
378         accel_y = y_acceleration / 16384.0
379         accel_z = z_acceleration / 16384.0
380
381         # 计算pitch角度
382         pitch = math.atan2(accel_y, math.sqrt(accel_x * accel_x + accel_z * accel_z))
383         pitch = pitch * 180.0 / math.pi
384
385         # 算pitch加速度"a"
386         ax = accel_x          # 读取 MPU6050 的三轴加速度数据 ax, ay, az
387         ay = accel_y
388         az = accel_z
389
390         sinPitch = ay / math.sqrt(ax**2 + ay**2 + az**2) # 计算 pitch 角度的正弦值 sinPitch 和余弦
391         cosPitch = math.sqrt(ax**2 + az**2) / math.sqrt(ax**2 + ay**2 + az**2)
392

```

图 8：部分代码展示（a）

```

def __init__(self, bus=1, address=0x68, scl=Pin(25), sda=Pin(26), freq=400000):
    self.i2c = I2C(bus, scl=scl, sda=sda, freq=freq)
    self.MPU6050_ADDRESS = address
    self.setSampleRate(100)
    self.setGResolution(2)
    self.setGyroResolution(250)
    # Disable gyro self tests, scale of 500 degrees/s
    self.reg_writeByte(self.MPU6050_RA_GYRO_CONFIG, 0b00001000)

    for loop in self.ZeroRegister:
        self.reg_writeByte(loop, 0)

    # Sets clock source to gyro reference w/ PLL
    self.reg_writeByte(self.MPU6050_RA_PWR_MGMT_1, 0b00000010)

    # Controls frequency of wakeups in accel low power mode plus the sensor standby modes
    self.reg_writeByte(self.MPU6050_RA_PWR_MGMT_2, 0x00)

    self.reg_writeByte(self.MPU6050_RA_INT_ENABLE, 0x01)
    self.readStatus()
    self.fifoCount = 0

def readDataFromFifo(self):
    # first check how many bytes in temporary fifo counter
    if self.fifoCount == 0 :
        self.fifoCount = self.readFifoCount()

    # max block transfer in i2c is 32 bytes including the address
    # accelerometer, gyro and temperature data => 7 short = 14 bytes => 31 bytes / 14 = 2
    # then it will be 28
    ...

```

图 9：部分代码展示（b）

3. 实验步骤

1. 将各原件按电路图组装，调整小杆的位置和角度，以便开始时小杆能够保持竖直平衡。
2. 将搭载舵机的吊架放置在合适位置，使舵机中心对准小杆中心线，两个螺线管相对并固定在舵机两侧轴的左右，使两个螺线管到小杆的距离相等且合适。
3. 将计算机接入电路，启动程序，进入待应答状态。调节电风扇的转速和角度，使正对小杆中心施加一个稳定的作用力，令小杆发生倾斜。观察小杆是否丝滑倾倒，计算机有无数据输出，若一切正常则实验准

- 备完毕，若不正常则检查实验装置直至能够正常工作。
4. 将电风扇置于固定位置，打开装置电源，启动程序，将电风扇调至一档，观察小杆状态，当小杆恢复稳定时，关闭电源。记录电风扇一档时小杆的角速度 α 、螺线管电流 I 和小杆恢复平衡耗时 t 。
5. 保持电风扇位置不变，按照上述步骤重复实验，记录电风扇在二档、三档时得出的相关数据。
6. 测试装置面对不同方位风力的自动矫正系统，先将电风扇正对着小杆放置正北处，打开装置电源，启动程序，将电风扇调至二档，观察小杆状态，当小杆稳定时，关闭电源。记录电风扇在正北方向时，测量的小杆角速度 α ，螺线管电流 I 和小杆恢复平衡所耗时间 t 。
7. 保持电风扇二档，分别将电风扇置于正西、东北、西北等方向，重复上述步骤，记录相关数据。
8. 将上述数据导入 excel 中拟合函数曲线。根据实验结果，分析小杆所受到的外力与线圈产生的磁场之间的关系。
9. 以每组小杆从受风扰动到恢复平衡状态所用的时间 t 为参考，计算实验的不确定度 u 。

5. 实验数据

部分实验数据如下图表 1：

风向固定，风力大小改变		
一档	二档	三档

电流 I	角速度 ω	电流 I	角加速度 ω	电流 I	角加速度 ω
0.512	0.038	0.512	0.045	0.512	0.037
0.514	0.196	0.514	0.192	0.514	0.198
0.518	0.418	0.518	0.427	0.518	0.424
0.524	0.624	0.524	0.616	0.524	0.616
0.532	0.876	0.532	0.881	0.532	0.895
0.542	1.045	0.542	1.055	0.542	1.021
0.554	1.279	0.554	1.278	0.554	1.253
0.568	1.464	0.568	1.469	0.568	1.459
0.584	1.601	0.584	1.597	0.584	1.689
0.602	1.821	0.602	1.818	0.602	1.827
0.622	2.016	0.622	2.027	0.622	2.047
0.644	2.229	0.644	2.221	0.644	2.238
0.668	2.431	0.668	2.428	0.668	2.455

4. 实验数据分析

取实验中小杆摆动前后时一段数据导入 excel 表格之中,拟合函数曲线,直观的展现小杆加速度与螺线管电流的关系,如下图所示:

第一组:

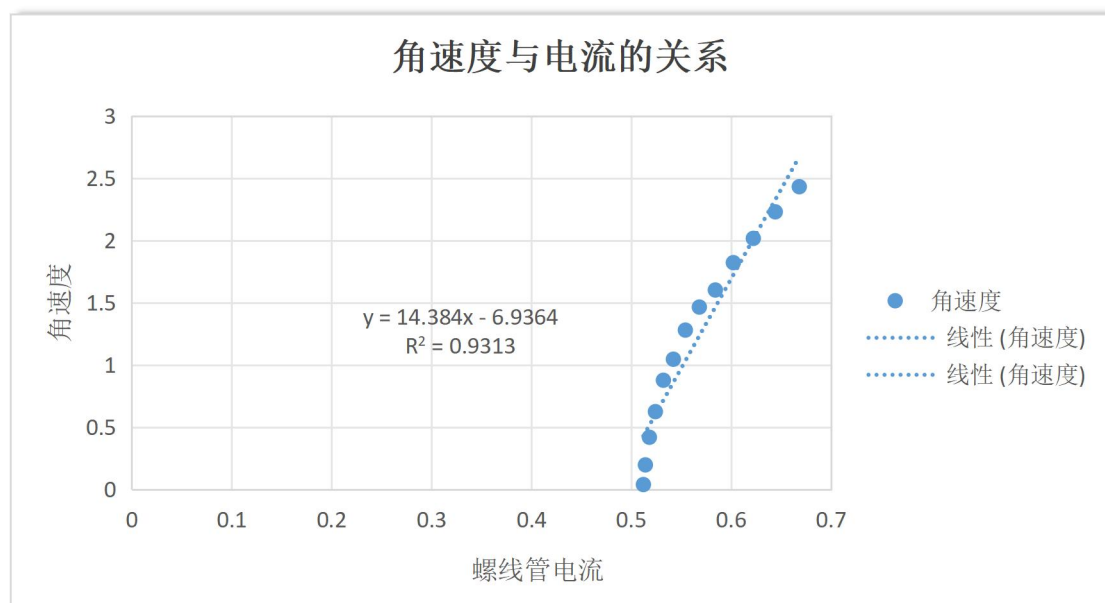


图 10: 第一组实验函数图像

第二组:

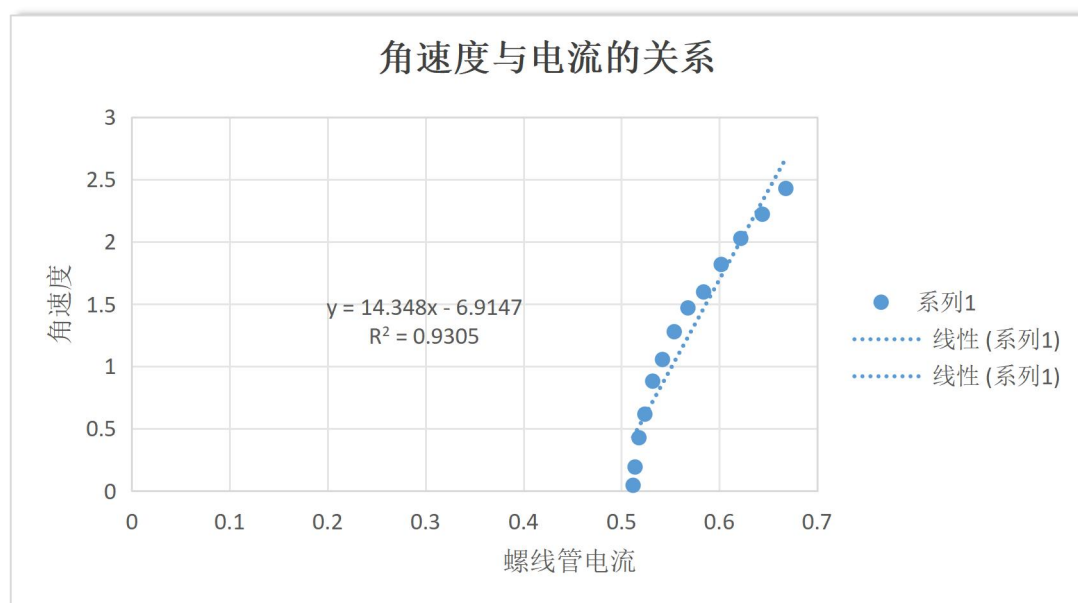


图 11: 第二组实验函数图像

第三组：

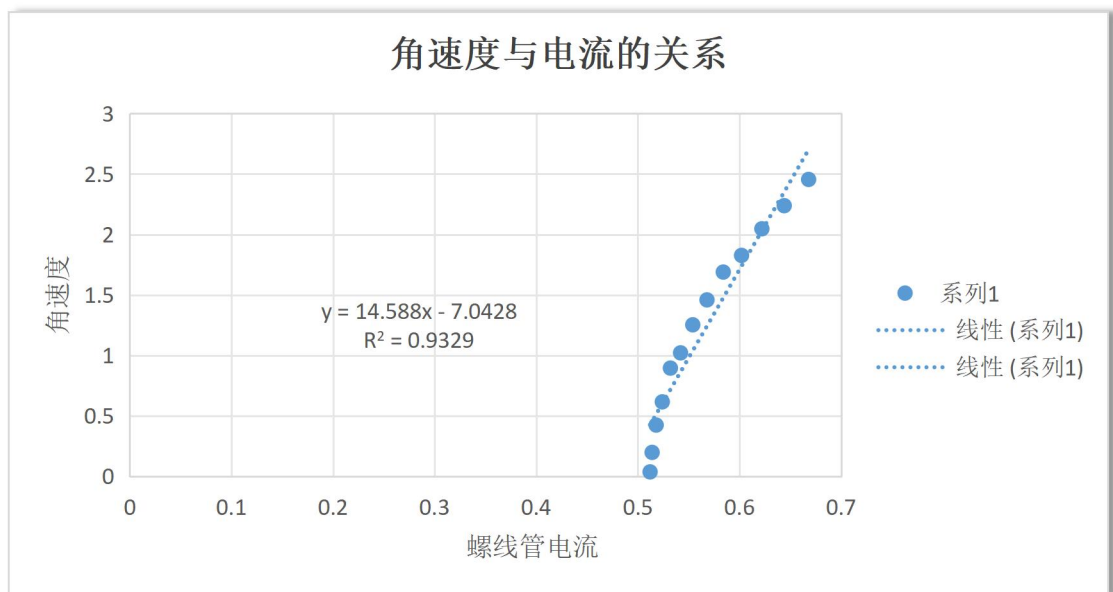


图 12：第三组实验函数图像

可以清楚的看到三组图像可近似看作斜线，其线性回归系数基本上是 1，说明小杆加速度与螺线管之间存在严格的线性关系。符合前文的理论设计，由此可证明该实验的科学性与可行性。

6. 不确定度

通过调节电风扇的位置和风力大小做多次实验，拟合函数曲线，以其线性回归方程斜率为变量计算该实验装置的不确定度。

计算斜率的平均值，再依据标准偏差公式： $s = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{n-1}}$ 计算标准偏差，代入计算 A 类不确定度，根据装置性能得到 b 类不确定度，即总不确定度 U 为 $\sqrt{(A^2 + B^2)}$ 。

作下表：

	k 值		
1	14.348	k 的平均值	14.319
2	13.834	标准偏差 s	0.25395
3	14.588	A 类不确定度	0.26665
4	14.384	B 类不确定度	0.001
5	14.414	总不确定度 U	0.266651875
6	14.347		

表 4：装置不确定度表

注：

标准偏差系数表						
测量次数 n	2	3	4	5	6	7
t / \sqrt{n}	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93

表 5：标准偏差系数表

五. 误差分析与改进措施

误差分析：

由于时间与资金的限制，且自身经验的不足，导致难以将实验设计思路完全的实现出来，实验器材不可避免存在简陋，测量不精确的问题。

实验中除了需要考虑风机输出不稳定，测量工具不精准，小杆重量不均匀等的系统误差，还要考虑与小杆同轴的传感器连接的导线对

小杆存在的牵引力作用, 万向轴内部的摩擦, 舵机在转动时的滞后, 以及实验环境的影响, 如自然风等因素。

改进措施:

- ①使用风泵作为外部风力来源, 使输出风力变得可控可视。
- ②更换更精确的测量工具, 使测量数据更加精准, 减少系统误差的影响。
- ③可接入其他传感器, 如霍尔传感器, 风速仪等, 测量并统计多种实验数据, 使结果更具科学性, 增加说服力。
- ④将两个电磁铁增加到四个并安置在合适位置, 减少舵机转动操控电磁铁到操控位置花费时间, 使装置能够更加有效应对各个方向的风力作用, 不仅实用性大大提高, 其精准度与灵敏度也有非常大的增强。

六. 实验创新点

- ① 本实验创新性的采用电与磁的方法, 依据电生磁和毕奥-萨伐尔定理等原理, 通过给予小杆一个可调的, 与风力相反的磁力的作用, 使小杆不倒。从原理与方法上与传统方式如: 改变重心(不倒翁), 反力结构(反力架), 角动量守恒(陀螺仪)有着很大的差别。
- ② 搭建由计算器与电路组成的系统, 利用三轴加速度传感器及其他传感器实现自动化测量和收集实验数据, 相较于传统手动测

量有着独特的便利的优势。

③ 根据所测的数据依靠内部代码自动计算，精准调节螺线管电流大小，产生与风力方向相反大小相同的磁力，实时控制舵机旋转，带动螺线管移动至最合适的地方，实现全方向上精准的自动姿态矫正。

④ 传统不倒的杆实验需要计算杆受到风的作用力，就需要测量更多物理量，增加计算负担，费时费力。而本实验使用加速度传感器，根据牛顿第二定理： $F=ma$ ，易得 $F \propto a$ ，通过与小杆同轴，便可直接测量风作用在小杆上的作用力。

七. 结论

经过实验，可证实该装置无论从思路和设计还是实践上都具有科学性与可行性。既可以实现杆在风力等作用下的稳定不倒又能便捷给出实验结果，量化抵御外部作用的能力，完全符合本实验课题的要求。且其自动化与高精度的特点有非常可观的潜力价值，值得推广到实际应用中如：

①直接的可作为一种测量风力的仪器；

②介于它电磁平衡在平衡装置的快速性特点，可广泛适用于各

种需要时刻保持平衡的物体，如平衡车。

③作为助平衡装置，其精准调节性，上可以接其他装置，如照相机甚至一些需要稳定的科学仪器，使其在露天作业时在遭受环境干扰的条件下也能保持竖直的平衡，减少结果的误差；

④矫正竖直姿态，可应用于太阳能板，风力发电机，甚至可用于火箭，卫星等航空航天飞行器。

八. 成本预算

表六：成本预算

名称	数量	价格（元）	名称	数量	价格(元)
Esp32 开发板	1	30	电风扇	1	24
mpu6050 三轴加速度传感器	1	30	Mos 场效应管	2	25
杜邦线	若干	4	万向轴	1	7
电源	1	205	舵机	1	6
亚克力板	1	16	强磁铁片	20	8
其他		30			
合计	385				

九. 人员分工

A 同学（队长）：实验思路与方案提出、PPT 与实验报告的编写、实验装置设计、视频配音。

B 同学（队员）：实验思路与方案改进、电路设计、代码编写、视频剪辑、器材采购。

十. 参考文献

- [1]王玉娥.毕奥——萨伐尔定律及其运用分析[J].科技信息(学术研究),2007(16):52-53.
- [2]陈钺,刘发科.库仑定律与毕奥—萨伐尔定律[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2005(03):34-36.
- [3] 陈海明,李荣冰,王双甲等.MEMS 陀螺仪的高精度标定方法[J].导航定位与授时,2022,9(05):179-185.DOI:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.020.
- [4]吕建泽,黎付安,文智江等.基于 ESP32 的振弦式传感器分布式数据采集系统研发[J].装备维修技术,2023(02):68-73.DOI:10.16648/j.cnki.1005-2917.2023.2.092.
- [5] 许启铿,王浩然,马世举等.钢结构反力架系统力学性能研究[J].实验技术与管理,2023,40(08):126-135.DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2023.08.019.