参赛学生姓名：虞越

中学：复旦大学附属复兴中学

省份：上海市

国家/地区：中国

指导老师姓名：包鸣

指导老师单位：复旦大学附属复兴中学

论文题目：一种新型多功能电磁感应实验装置

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

一种新型多功能电磁感应实验装置

虞越

论文摘要

电磁感应作为现代技术应用的核心之一，既是高中物理学习的一项重要物理原理，也是联系生活和生产实践的重要学习内容。通过自身学习经历和问卷调查发现，全面深入的实验实践有助于突破电磁感应特有的抽象性和复杂性所带来的学习研究困境。

然而，国内外现有的电磁感应实验装置大多存在实验功能单一、量化分析不足、缺乏应用深化、操作复杂等不足之处，尚无法满足对电磁感应现象及理论充分诠释的学习研究要求。

基于以上，我创新设计出一款一机多能的电磁感应实验装置，可实现针对多个电磁感应理论的多项实验功能，以满足验证、探究、应用深化和科学普及的多种需求。其结构简单，由主机（含：电机、支架、电位器、传感器等）、显示器以及各种型式的磁铁盘、金属盘和线圈盘组成，盘可作为主或从动盘装在支架上。通过交换主、从动盘或交叉设置主动盘转速、小磁铁数量及方向、金属盘种类、线圈数量等，可实现12项以上的实验方案。本装置的快速装夹设计可在30秒内完成实验切换。

本装置已制作成样机，能够稳定运行。使用本装置进行楞次定律探究、金属涡流属性探究等系列实验，共测得1623个实验数据，分析并形成8个实验结论，实验结果完全符合法拉第电磁感应定律、楞次定律等电磁感应相关理论。

本装置一机多能、操作快捷、经济实惠，不仅适合各学校的学习和研究，还适合个人的科普及娱乐，有助于全民提升电磁感应知识水平，具有非常高的应用前景和社会价值。

关键词：电磁感应；感应电流；楞次定律；涡流；涡流探伤

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026年应届中学科学论文公示

目录

1 引言 ---------- 4

1.1 研究背景 ---------- 4

1.2 国内外相关研究情况 ---------- 5

1.3 创新设计目标 ---------- 6

2 实验装置的创新设计 ---------- 7

2.1 原型设计过程 ---------- 7

2.1.1 理论分析 ---------- 7

2.1.2 功能与结构 ---------- 9

2.1.3 操作方式 ---------- 11

2.1.4 不断改进 ---------- 12

2.2 实验方案设计 ---------- 12

3 实验装置的理论探究和验证 ---------- 12

3.1 探究感应电流的形成及条件 ---------- 12

3.2 探究楞次定律 ---------- 14

3.3 探究金属的涡流属性 ---------- 15

3.4 涡流探伤应用的初步解析 ---------- 17

4 结论和创新点 ---------- 18

5 未来展望 ---------- 18

6 应用前景 ---------- 19

参考文献 ---------- 20

致谢 ---------- 21

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

1 引言

1.1 研究背景

电磁感应在现代生产、生活中扮演着越来越重要的角色。从火、核、风等能源生产，到电动机、磁悬浮等交通驱动；从无线通信、数据存储等信息技术，到传感器、核磁共振成像等医疗研究和应用；从电磁炉、变压器等家用设备，到银行卡、手机支付等日常使用，电磁感应技术已经渗透到现代社会的每个角落。

作为现代技术应用的核心之一，电磁感应既是高中物理学习的一项重要物理原理，也是联系生活和生产实践的重要学习内容。

然而，通过我自身学习经历和进一步调查发现，电磁感应的抽象性和复杂性往往使其核心知识难以被充分理解和掌握。图 1(a)和(b)为“电磁感应知识和学习情况问卷调查”结果汇总。图 1(a)来自于 66 位有电磁感应学习经历的受访者（其中，在读高中学生 48 人）。调查发现， 76%的受访者曾遇到较大的学习障碍，包括：磁感线、磁通量概念抽象，难以理解感应电流的形成；楞次定律难以具象化，经常学完就忘；知识点分散，难以建立系统性的知识框架；缺乏与生活技术的论理联系等。调查也发现，66 位中 86%的受访者认为需要有更全面的电磁感应实验和实践方法来更好地提升学习效果。

随着电磁感应技术广泛应用，电磁感应基础知识的科普也日益重要。图 1(b)来自于 29 位无电磁感应学习经历的受访者，其中：仅 38%对电磁感应的生活技术应用有较多了解，但 66%的受访者非常有兴趣了解和学习电磁感应基础知识。

基于以上，我创新设计了这款多功能电磁感应实验装置，不仅能通过简单的实践操作提升学习者的直观感受，多种实验设计的再现对比和定量分析更能深层次解析电磁感应原理，以达到验证、探究、应用深化和科学普及的多种目的。

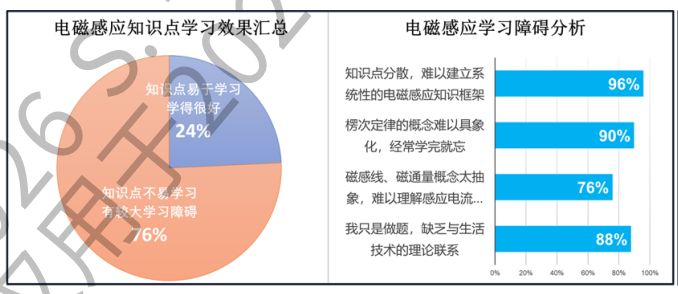


图1(a)
电磁感应知识和学习情况问卷调查
（有电磁感应学习经历人群）

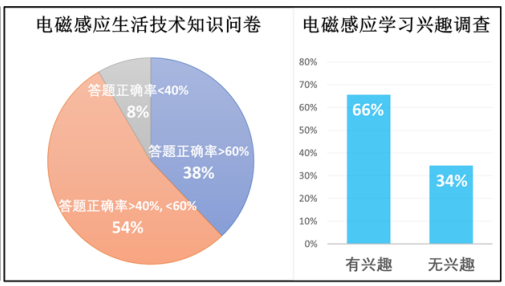


图1(b)
电磁感应知识和学习情况问卷调查
（无电磁感应学习经历人群）

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026正成清华学科学奖公示

1.2 国内外相关研究情况

我在多个平台上进行了查询工作，包括：中国知网，维基百科，国家知识产权局公报，往届大赛获奖作品，智慧云图书馆，高中物理教材等，并且在电商平台进行了市场调研。

查询我国及国外、历史上及目前的电磁感应实验方法，我梳理出较有代表性的 2 类设计思路，即以下 5 款电磁感应基本原理研究及教学实验装置，做进一步分析。

A. 法拉第圆环实验的衍生和改进，见图 2(a)-(c)。

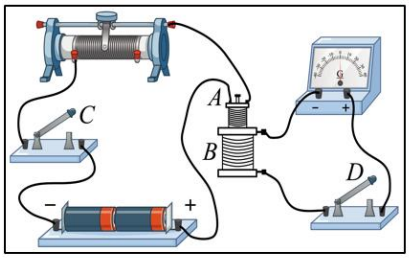


图2(a)
双回路法拉第电磁感应实验
高中物理教材，中国

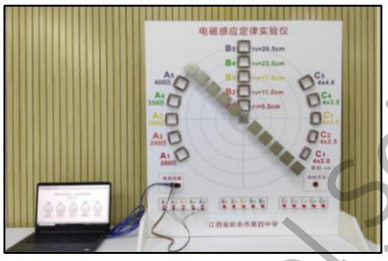


图2(b)
基于Arduino和LabVIEW的电磁感应实验
胡博，中国，2019年

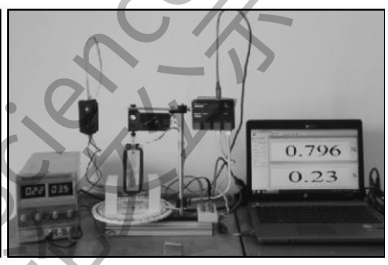


图2(c)
可测量电流与磁场的夹角的电磁感应实验
赵廷富，中国，2019年

图 2(a)为双回路法拉第电磁感应实验，通过控制开关 C 和滑动变阻器以改变线圈 A 所在回路的电流，从而使得穿过线圈 B 的磁通量变化，在线圈 B 所在的闭合回路内产生感应电流，可定量分析“电生磁，磁生电”的过程。改进点：实验较为单一，缺乏对感应电流产生条件的进一步研究，无法呈现楞次定律。

图 2(b) 使用电机带动磁铁在线圈上方匀速转动来产生感应电动势，探究控制线圈匝数、线圈与转轴距离、线圈面积 3 个因素与感应电动势的关系，以 Arduino 和 LabVIEW 辅助测量和显示感应电动势。改进点：缺少对不同金属材质的探究，无法呈现和探究楞次定律，缺少与生活技术的联系，实验切换操作较复杂。

图 2(c) 采用 2 块可旋转的强磁铁，以改变磁场与通电线圈的夹角，采用多抽头线圈以改变导线有效长度，利用力传感器测量多匝线圈所受安培力，定量探究安培力大小与电流强度、通电导线长度、磁场和通电导线夹角的关系。改进点：缺少对感应电流形成的研究，缺少对不同金属材质的探究，缺少与生活技术的联系。

B. 阿拉果圆盘实验及改进，见图 3(a)和图 3(b)。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026正成杯中学科学奖比赛公示

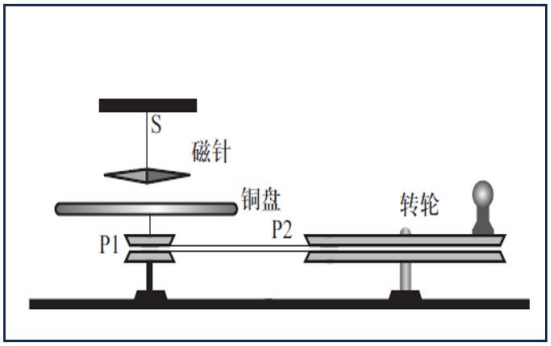


图3(a)
经典阿拉果转盘
Francois Arago, 法国，1825年

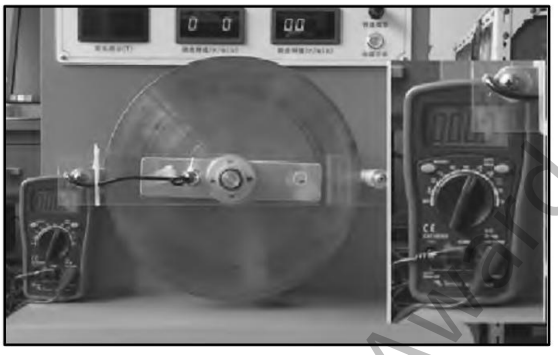


图3(b)
基于单极电机结构的阿拉果圆盘
郑洽好，中国，2023年

图 3(a)经典阿拉果转盘，铜盘旋转切割磁力线并产生涡流和新磁场，从而驱动磁针转动。该装置可直观地观察“磁生电，电生磁”的过程，也可对比不同铜盘转速下磁针的转速变化，并且磁针与铜盘的转速关系对楞次定律“感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化”具有一定的呈现。可改进点：无法测量和读取实验数据，无法定量分析。

图 3(b)在上述基础上，通过电刷连接灵敏电压表和圆盘以测量圆盘内形成的径向电流，并通过转速表、转速调节器定量研究不同材料圆盘内的径向电流形成以及磁针与圆盘转速的关系。可改进点：实验功能较为单一，操作操作复杂，不便于携带。

综上，电磁感应基本原理研究及教学实验装置从 19 世纪上以来，始终受到国内外行业内人士的高度关注，并进行了不同程度的发展和改进，各有千秋，但大多存在实验功能较为单一、量化分析不足、缺乏应用深化、操作复杂等实际不足之处，尚无法满足对电磁感应现象及理论充分诠释的学习研究要求。

1.3 创新设计目标

经过对国内外相关情况的研究，我设定了如下创新设计目标：

1) 一机多能，可完成多项实验，操作简单，实验切换快速；
2) 可设置多个实验变量，并可读取实验数据，进行定量分析；
3) 可实现对感应电流产生条件的探究；
4) 可实现对楞次定律的实验设计和定量分析；
5) 可实现不同金属材质的电磁感应属性的实验设计和定量分析；
6) 可实现对电磁感应生活技术应用的一定解析；
7) 结构简单、轻巧便携、经济实惠、便于修理。

2026 STEM High School Science Award
仅用于2026上海市中学生科学论文大赛

2 实验装置的创新设计

2.1 原型设计过程

2.1.1 理论分析

考虑到创新设计目标要求既能实现对感应电流产生条件的探究，又能实现对楞次定律的实验设计和定量分析，我锁定阿拉果转盘这一设计思路，在此基础上创新设计。

A. 磁场的模拟分析。

使用磁标势法（等效磁荷模型）来模拟分析图 3(a)中外磁场的情况。

外磁场为小磁铁产生的磁场。由于铜盘所在的空气域无自由传导电流，磁场强度$\mathbf{H}$的旋度为零（$\nabla \times \mathbf{H} = 0$），可将小磁铁等效为一对磁荷：由$+q_m$和$-q_m$组成，二者相距$l$，磁矩$\mathbf{m}$沿$z$轴正方向，磁矩大小$m = q_m l$。小磁铁中心位于原点。观测点位置矢量为$\mathbf{r}$，距离$r = |\mathbf{r}|$，极角$\theta$为$\mathbf{r}$与$z$轴的夹角。

由于空间无自由电流，可引入磁标势ϕ_m，满足关系式：

$$\mathbf{H} = -\nabla\phi_m \tag{1}$$

对于位于$+\frac{l}{2}\mathbf{e}_z$和$-\frac{l}{2}\mathbf{e}_z$的一对磁荷，空间点$\mathbf{r}$处的磁标势为二者的线性叠加：

$$\phi_m(\mathbf{r}) = \frac{q_m}{4\pi}\left[\frac{1}{\|\mathbf{r}-\frac{l}{2}\mathbf{e}_z\|} - \frac{1}{\|\mathbf{r}+\frac{l}{2}\mathbf{e}_z\|}\right] \tag{2}$$

在远场近似（$r \gg l$）下，对距离项进行泰勒展开（多极展开），保留一阶项：

$$\frac{1}{\|\mathbf{r}\mp\frac{l}{2}\mathbf{e}_z\|} \approx \frac{1}{r} \pm \frac{l}{2}\frac{\mathbf{e}_z\cdot\mathbf{r}}{r^3} \tag{3}$$

将式(3)代入式(2)，消去零阶项，得到磁偶极子（小磁铁）的标量势解析式：

$$\phi_m(\mathbf{r}) \approx \frac{q_m l}{4\pi}\frac{\mathbf{e}_z\cdot\mathbf{r}}{r^3} = \frac{\mathbf{m}\cdot\mathbf{r}}{4\pi r^3} = \frac{m\cdot\cos\theta}{4\pi r^2} \tag{4}$$

根据式(1)，在球坐标系 (r,θ,φ) 下对标量势求梯度：

$$\mathbf{H}_r = -\frac{\partial\phi_m}{\partial r} = \frac{2m\cdot\cos\theta}{4\pi r^3} \tag{5}$$

$$\mathbf{H}_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial\phi_m}{\partial\theta} = \frac{m\cdot\sin\theta}{4\pi r^3} \tag{6}$$

$$\mathbf{H}_\varphi = 0 \tag{7}$$

在真空中，磁感应强度$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$，$\mu_0$为真空磁导率，球坐标下的磁感应强度分量为：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot 2m \cdot \cos\theta}{4\pi r^3} \quad (8)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 \cdot m \cdot \sin\theta}{4\pi r^3} \quad (9)$$

写为紧凑的矢量形式：

$$\mathbf{B}_{(\mathbf{r})} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}\left[3(\mathbf{m}\cdot\hat{\mathbf{r}})\,\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{m}\right] \quad (10)$$

将球坐标结果转换为柱坐标(ρ, φ, z)。设$\rho = \sqrt{x^2+y^2}$，则有几何关系：$r = \sqrt{\rho^2+z^2}$，$\cos\theta = \frac{z}{r}$，$\sin\theta = \frac{\rho}{r}$。

将上述关系代入式(8)和(9)，经代数化简可得柱坐标下的磁场分量：

$$B_\rho(\rho, z) = \frac{3\mu_0 m\rho z}{4\pi(\rho^2+z^2)^{5/2}} \quad (11)$$

$$B_z(\rho, z) = \frac{\mu_0 m(2z^2-\rho^2)}{4\pi(\rho^2+z^2)^{5/2}} \quad (12)$$

利用 Python 绘制三维立体磁场分布散点图，如图 4，模拟该磁场的三维立体分布情况。

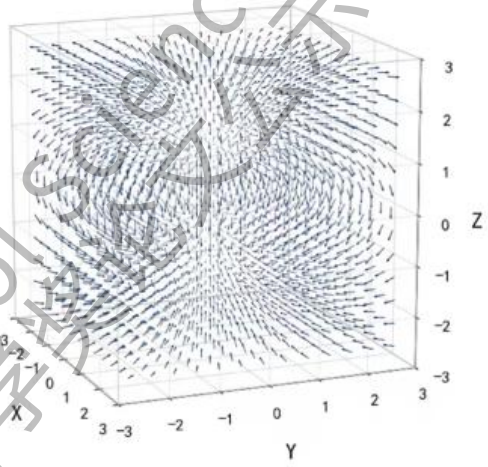


图 4
Python模拟该磁场的三位立体分布图

B. 分析感应电动势的产生。

图 3(a)中，铜盘置于小磁铁正下方，且铜盘中心正对小磁铁中心。设铜盘位于$z = -h$平面，绕z轴以恒定角速度ω匀速旋转。

此理想情况下，磁场是轴对称的，B_z只与半径r有关，忽略方位角α的影响。基于式（12），铜盘所在平面$z = -h$，盘上到中心的径向距离为r的某点处的磁感应强度的垂直分量为：

$$B_z(r) = \frac{\mu_0 m(2h^2-r^2)}{4\pi(r^2+h^2)^{5/2}} \quad (13)$$

将圆盘近似分解为无数根沿半径方向排列的铜棒，每个铜棒上都有感应电动势产生。取一根铜棒，其与中心距离为r处的线速度大小为：

$$v(r) = \omega r \quad (14)$$

方向沿切向（$\mathbf{e}_\varphi$方向）。

铜棒上宽度为dr的微元段切割磁感线，产生的感应电动势微元为：$d\varepsilon = (\mathbf{v}\times\mathbf{B})\cdot d\mathbf{r}$。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026年成都中学科学奖公示

将速度 $\mathbf{v} = \omega r\mathbf{e}_\varphi$ 和磁场 $\mathbf{B} = B_r\mathbf{e}_r + B_z\mathbf{e}_z$ 代入，利用叉乘关系 $\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{e}_r = -\mathbf{e}_z$ 及 $\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{e}_z = \mathbf{e}_r$，化简得：

$$d\varepsilon = \omega r B_z(r) dr \tag{15}$$

对整根铜棒从圆心（$r = 0$）到半径r进行积分，单根铜棒的总电动势为：

$$\varepsilon(r) = \int_0^r \omega r' B_z(r') dr' \tag{16}$$

代入式(13)：

$$\varepsilon(r) = \frac{\omega\mu_0 \cdot m}{4\pi} \int_0^r \frac{r'(2h^2 - r'^2)}{(r'^2 + h^2)^{5/2}} dr' \tag{17}$$

令$u = r'^2 + h^2$，则$du = 2r'dr'$，且$2h^2 - r'^2 = 3h^2 - u$，并逐项积分：

$$\varepsilon(r) = \frac{\omega\mu_0 \cdot m}{8\pi} \left[3h^2 \left(-\frac{2}{3}\right) u^{-3/2} + 2u^{-1/2}\right]_{h^2}^{r^2+h^2}$$

化简后得到单根铜棒感应电动势的解析解：

$$\varepsilon(r) = \frac{\omega\mu_0 \cdot m}{4\pi} \frac{r^2}{(r^2 + h^2)^{3/2}} \tag{18}$$

由式(18)可解析电势随半径r的分布特性：

圆心处 $r = 0$：$\varepsilon = 0$，由于线速度为零，圆心处不切割磁感线。

边缘处 $r = R$：$\varepsilon(R) = \frac{\omega\mu_0 m}{4\pi} \frac{R^2}{(R^2+h^2)^{3/2}}$。

极值点 $r = \sqrt{2}h$：$\varepsilon_{max} = \frac{\omega\mu_0 m}{6\sqrt{3}\pi h}$

极值点的物理意义：在$r < \sqrt{2}h$区域，电动势指向圆心外侧；在$r > \sqrt{2}h$区域，电动势指向圆心内侧，从而在铜盘内部形成两个旋向相反的环形涡流回路，最终产生阻碍铜盘旋转的拖拽力矩。

在实验装置的金属盘设计中，选择$R \gg h$，以确保实验效果。

2.1.2 功能与结构

A. 磁铁盘的设计和实验功能

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

不同于传统的单个磁铁或整只磁铁盘，我选用了多个小圆形磁铁，手动旋紧于塑料盘上，见图 5。优点是：1)通过增减小磁铁来探究磁场强度与感应电流的关系；2)水平和垂直的 2 个角度的磁场，可单独实验，也可叠加实验，以探究多种磁场分布下的磁感应强度变化，及其与感应电流变化的关系。

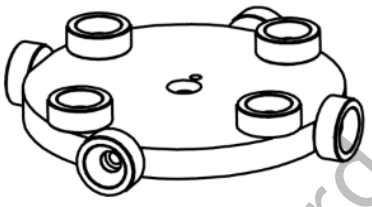


图5
磁铁盘简图

B. 金属盘的设计和实验功能

查询国家标准，我根据导电性分别选取了 T2 紫铜、铝 6061、H62 黄铜、304 不锈钢制作成 4 款金属盘，以探究不同金属导体的电磁感应特性。由于 304 不锈钢的奥氏体不够稳定，冷加工能量易使其部分转变为有磁性的马氏体而产生铁磁性，使用电极消磁法消磁。我又设计了 3 款不同开槽方式的紫铜盘（径向开槽、同心半开槽、同心全开槽），探究其对感应电流的影响，以初步解析金属探伤技术的应用原理。紫铜电阻率低，实验效果优于其它。开槽盘简图见图 14。

材料	电阻率（Ω·m）	电导率（%IACS）	数据来源依据
T2紫铜	≈1.72×10⁻⁸	≈100%	GB/T 5231-2012《加工铜及铜合金》
铝6061	≈3.65×10⁻⁸	≈47%	GB/T 3190-2020《变形铝及铝合金化学成分》
H62黄铜	≈6.2×10⁻⁸	≈28%	GB/T 5231-2012《加工铜及铜合金》
304不锈钢	≈7.2×10⁻⁷	≈2.4%	GB/T 20878-2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》

表1
电阻率对比表（20° C）

C. 线圈盘的设计和实验功能

采用多抽头线圈，可通过连线方式快速增减线圈数量，以探究线圈面积、导体长度、盘转速与感应电流的关系。回路中可连接高精度万能表，以测量感应电动势、感应电流。

D. 快速切换的设计

分别为主动盘设计了卡槽式机械装夹方式，为从动盘设计了手柄旋紧的机械装夹方式，二者均可在 10 秒内完成盘的拆卸或装夹。

E. 主动盘转速可调节性的设计

采用电位器，通过旋转开关，调节电位器电阻大小，改变电机转速，从而实现主动盘转速可调节性。同时，采用瞬时开关作为辅助开关，以固定主动盘转速设置，达到重复实验和对比实验的目的。

F. 实验数据读取的设计

采用光电门传感器，通过记录转盘上挡光片的挡光时间，实时计算成转盘的转速，

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于 2026 丘成桐中学科学奖论文提交

在显示器上显示。

G. 整体设计

该实验装置包括：主体、支架、显示器，见图 6。主体包括：外壳、蓄电池、电位器、可调开关、电机、主动机构。主动盘装夹在主动机构上。支架立于外壳上并靠近主动机构，从动盘装夹在支架上与主动盘互动。支架侧壁安装光电门传感器以测量主、从动盘转速，支架上方可悬挂小磁铁。显示器实时显示主、从动盘的转速。实验装置的主要参数见表 2。实验装置总览见图 7。

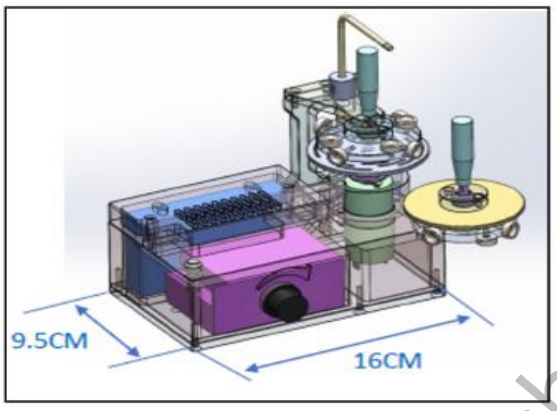


图6
实验装置3D模型－主体、支架

整机	L=320mm H=200mm W=95mm
电机	0-1100r/m
磁铁盘	D=80mm
金属盘	D=70mm
主、从动盘距离	5mm-10mm
磁铁	2T-20T
线圈	D: 3mm-10mm N: 50-500

表2
实验装置主要参数



图7
实验装置总览图

2.1.3 操作方式

首先，装夹待实验的主、从动盘；接着，打开可调节开关并根据主动盘转速显示器读数进行调节；然后，根据实验需求，读取从动盘测量结果。我分别制作了主动盘、

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

从动盘各一套。磁铁盘既可作为主动盘，又可作为从动盘，以进行交叉实验，进一步增加了实验功能。

2.1.4 不断改进

该实验装置经过了一系列的改进和升级，主要分为三代设计。

第一代：电源为干电池，并且主动盘转速固定。

第二代：增加了充电功能；增加了电位器，可对主动盘进行转速调节；增加了开槽金属盘；增加了舞动的小磁铁实验功能。

第三代：增加了主、从动盘转速读取和显示，可设置多个实验变量，并可读取实验数据，进行定量分析；增加了线圈盘以定量探究感应电流产生条件。

2.2 实验方案设计

该实验装置可实现多种电磁感应实验设计方案。其中：12 项实验方案列举见表 3，更多实验可通过交换主、从动盘和交叉切换主动盘转速、小磁铁数量及方向、金属盘种类、线圈数量等来实现。

实验探究目的	研究对象	No.	实验设计方案	分析手段
探究 感应电流形成	感应电动势与磁通量变化率的关系	1	主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量线圈盘回路的感应电动势	定量分析
	感应电动势与磁通量变化的关系	2	主动磁铁盘转速不变，改变磁铁盘小磁铁数量，分别测量线圈盘回路感应电动势的变化	定量分析
	感应电动势与磁场方向及位置的关系	3	主动磁铁盘转速不变，改变磁铁盘小磁铁方向或位置，分别测量线圈盘回路感应电动势的变化	定量分析
	感应电动势与线圈面积/导体长度的关系	4	主动磁铁盘转速不变，改变线圈数量（线圈面积/导体长度），分别测量线圈盘回路感应电流的变化	定量分析
探究 楞次定律	感应电流的电磁驱动与电磁阻尼效应拟合	5	从动盘使用黄铜金属盘，主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量从动金属盘转速从零至稳定的时间	定量分析
		6	从动盘使用黄铜金属盘，主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量从动金属盘随时间变化的转速，直至转速稳定	定量分析
	电磁驱动效应的多种呈现	7	手持从动盘手柄，使之与主动盘垂直或呈不同夹角，观察从动盘速度	观察比较
		8	悬挂的小磁铁在主动金属盘旋转时舞动，观察舞动幅度变化	观察比较
探究 金属的涡流属性	金属电阻率与感应电流的关系	9	从动盘可使用不同材质的金属盘，主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量从动金属盘的稳定转速	定量分析
		10	从动盘可使用不同材质的金属盘，主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量从动金属盘转速从零至稳定的时间	定量分析
金属涡流探伤 初步解析	金属形态与感应电流的关系	11	从动盘可使用不同开槽金属盘，主动磁铁盘设置在不同转速下，分别测量从动金属盘的稳定转速	定量分析
		12	从动盘可使用不同开槽金属盘，主动磁铁盘转速不变，分别测量从动金属盘随时间变化的转速，直至转速稳定	定量分析

表3
电磁感应实验设计方案列举

3 实验装置的理论探究和验证

3.1 探究感应电流的形成及条件

在主动盘设置不同转速的条件下以及使用不同数量线圈的条件下，通过分析线圈

2026 Yau High School Science Award
仅用于2026年成都市科学奖论文公示

回路的感应电动势，研究感应电流与磁感线变化率、导线长度、线圈面积的关系。

3.1.1 实验设计

主动盘选用磁铁盘，磁铁盘配置 12 颗 6T 小磁铁。线圈盘采用 6 个串联线圈，每个线圈匝数为 100。主动盘转速设置分别为：自 100r/m 至 1000r/m，每次增加 100r/m。线圈回路连接万能表，在主动盘启动后，测量感应电动势。

主动盘选用磁铁盘，磁铁盘配置 12 颗 6T 小磁铁。主动盘转速设置：500r/m。线圈数量设置分别为：1、2、3、4、5，每个线圈匝数为 100。线圈回路连接万能表，在主动盘启动后，测量感应电动势。

以上，每个实验条件重复 3 次，各测得 3 个实验值，实验数据分析使用平均值。

3.1.2 实验数据分析和结论

根据法拉第电磁感应定律，闭合电路中感应电动势的大小与穿过这一电路的磁通量的变化率成正比，即 $E = N\times(\Delta\Phi/\Delta t)$，其中 E 是感应电动势，N 是线圈匝数，$\Delta\Phi$ 是磁通量的变化，Δt 是时间变化量。根据欧姆定律，计算感应电流 $I = E / R$，其中 R 为回路的总电阻 。

实验中，主动磁铁盘转速是唯一变量，即，Δt 变化而 N 与 $\Delta\Phi$ 均保持不变。E 与 Δt 成反比，即，主动磁铁盘转速越大，Δt 越小，电动感应式越大。将表 4 中的实验数据制作成趋势图，如图 8 所示：感应电动势随主动盘转速增大而线性递增（此处忽略轻微实验误差），感应电流 I 也随之线性递增。实验结果符合法拉第电磁感应定律。

主动盘转速r/m	100	200	300	400	500
感应电动势mV	76.5	97.5	118.7	134	161.1
主动盘转速r/m	**600**	**700**	**800**	**900**	**1000**
感应电动势mV	175.9	207.8	232	260	286

表4
感应电动势记录表
主动盘转速设置：自100r/m至1000r/m，每次增加100r/m）

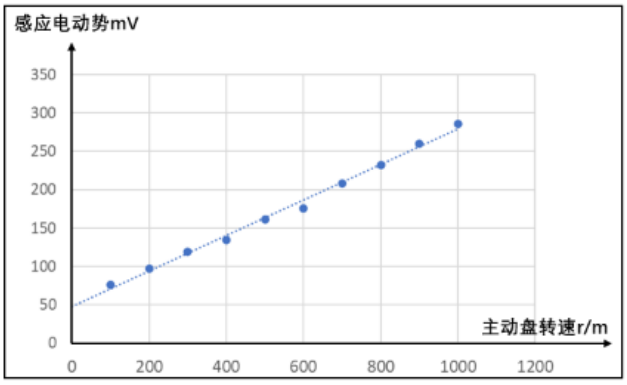


图8
感应电动势趋势图
（主动盘转速设置：自100r/m至1000r/m，每次增加100r/m）

进一步实验中，将线圈数量作为唯一变量，即，线圈总面积发生变化而导致磁通量变化量 $\Delta\Phi$ 变化，而 N 与 Δt 均保持不变。E 与 $\Delta\Phi$ 成正比，即，线圈数量越多，$\Delta\Phi$ 越大，感应电动势越大。将表 5 中的实验数据制作成趋势图，如图 9 所示：感应电动

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

势随线圈数量增大而线性递增（此处忽略轻微实验误差），感应电流 I 也随之线性递增。实验结果符合法拉第电磁感应定律。

线圈个数	1	2	3	4	5
感应电动势	45.6	75.2	110.7	171.4	197.7

表5
感应电动势记录表
（主动盘转速设置：500r/m）

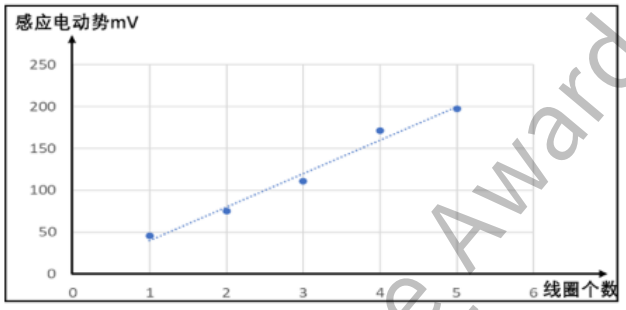


图 9
感应电动势趋势图
（主动盘转速设置：500r/m）

3.2 探究楞次定律

通过分析磁铁盘与金属盘的转速差异，研究感应电流的“电磁驱动”和“电磁阻尼”效应。

3.2.1 实验设计

主动盘选用磁铁盘，磁铁盘配置 8 颗 T6 小磁铁，从动盘选用黄铜盘。将主动盘转速设置在 300r/m 后启动，从动盘随之旋转并加速，每隔 0.5 秒，记录主、从动盘的实时转速，直至从动盘转速稳定。每个实验条件重复 3 次，各测得 3 个实验值，实验数据分析使用平均值。

将主动盘转速分别设置在 100r/m，500 r/m，700 r/m，重复前述实验。

3.2.2 实验数据分析和结论

将金属圆盘视为无数个径向的金属棒组成，当磁铁盘在转动时，各个金属棒切割磁感线，发生电磁感应现象，从而在圆心和金属盘边缘之间产生感应电动势。金属盘内部距离圆心远近不同的点电势不等而形成若干闭合回路产生感应电流，即涡流。根据楞次定律，涡流产生的新磁场总要阻碍引起涡流的磁通量的变化，即阻碍金属盘与磁铁盘的相对运动，使其相对运动减小。由于磁铁盘由电机驱动旋转，金属盘抗拒不了相对运动，只能随磁铁盘旋转，但略有“滞后”。

将表 6 中的实验数据制成趋势图，如图 10 所示：1）黄铜从动盘受到“电磁驱动”而随着磁铁主动盘异步转动并逐渐加速，以减少与磁铁主动盘的相对运动；2）磁铁主动盘同时受到“电磁阻尼”的影响，虽在从动盘加速后，主动盘转速有略微提升，但始终未能达到设定转速值 300r/m；3）实验至第 10.5S 起，主、从动盘转速稳定，

2026 S-T Youth High School Science Award
仅用于2026年成都中学科学奖论文公示

并表现出“滞后”的转速差现象。实验结果符合楞次定律。

时间 S	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
黄铜从动盘转速 r/m	0	0	0	98	140	140	157	173	173
磁铁主动盘转速 r/m	293	297	297	297	297	297	297	297	297
时间 S	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
黄铜从动盘转速 r/m	184	193	199	203	206	206	206	208	212
磁铁主动盘转速 r/m	297	297	297	298	298	298	298	298	298
时间 S	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
黄铜从动盘转速 r/m	212	212	212	214	214	214	214	214	214
磁铁主动盘转速 r/m	298	298	299	299	299	299	299	299	299

表6
主、从动盘转速记录表
（主动盘转速设置：300r/m）

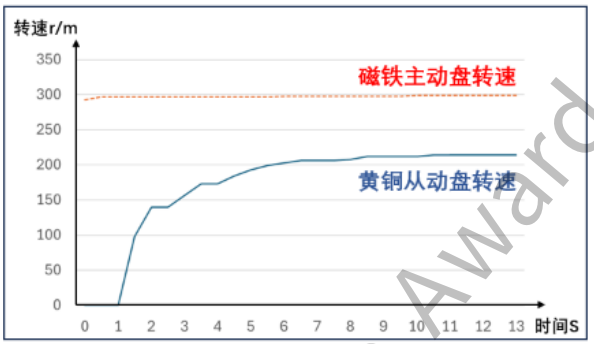


图10
主、从动盘转速随时间变化趋势图
（主动盘转速设置：300r/m）

将主动盘转速分别设置在 100r/m，300r/m，500 r/m，700 r/m，重复前述实验。将各转速设置下的黄铜从动盘转速制作趋势图，如图 11 所示：1）在主动磁铁盘的各个转速设置下，从动盘均受到 “电磁驱动”而加速转动，直至匀速“滞后”于主动盘；2）计算“滞后”的速度差/主动盘转速，该值随主动盘转速增大而减小。当主动盘速度增大，从动金属盘内的涡流强度随磁通量变化率增大而增大，涡流产生的新磁场强度也随之增大，从而使从动盘受到更大的“电磁驱动”去“追赶”主动磁铁盘，以减小与主动盘的相对运动。该实验进一步验证了楞次定律。

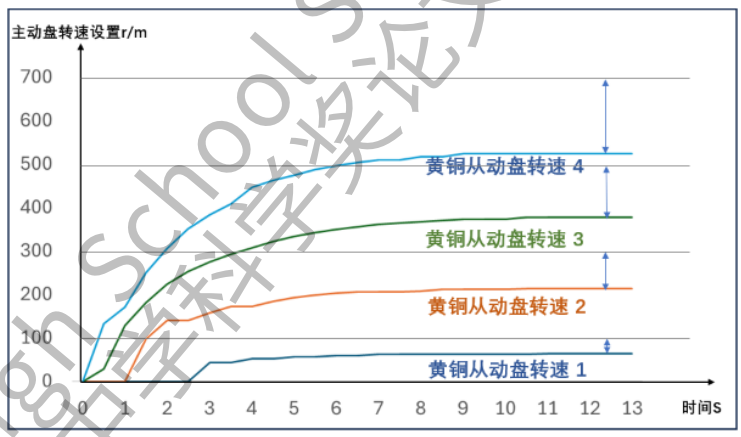


图11
主、从动盘转速随时间变化趋势图
（主动盘转速设置：100r/m，300r/m，500r/m，700r/m）

3.3 探究金属的涡流属性

通过分析不同材质金属盘的转速差异，研究金属电阻率与感应电流强度的关系。

3.3.1 实验设计

主动盘选用磁铁盘，磁铁盘配置 12 颗 T6 小磁铁，从动盘分别选用紫铜盘、铝盘、黄铜盘和不锈钢盘。主动盘转速设置分别为：自 100r/m 至 1000r/m，每次增加 100r/m。主动盘启动后，从动盘随之旋转。

分别记录各个金属从动盘启动旋转后，达到稳定状态下的转速（接近于匀速）。每个实验条件重复 3 次，各测得 3 个实验值，实验数据分析使用平均值。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

3.3.2 实验数据分析和结论

将表 7 中的实验数据制成趋势图，如图 12 所示：1）随着主动盘转速增大，各从动盘的稳定转速也随之增大；2）在主动盘各转速设置下，各从动盘稳定转速从大至小排列均为：紫铜、铝、黄铜、不锈钢，且他们之间稳定转速差异随着主动盘转速增大而增加。

主动磁铁盘转速设置 r/m	100	200	300	400	500
紫铜从动盘稳定转速	95	193	287	383	475
铝从动盘稳定转速	80	171	261	359	458
黄铜从动盘稳定转速	76	169	256	344	431
不锈钢从动盘稳定转速	13	43	60	89	97
主动磁铁盘转速设置 r/m	**600**	**700**	**800**	**900**	**1000**
紫铜从动盘稳定转速	579	678	779	876	966
铝从动盘稳定转速	556	658	759	852	945
黄铜从动盘稳定转速	526	615	703	790	880
不锈钢从动盘稳定转速	124	153	182	207	217

表7
不同材质金属盘稳定转速记录表
（主动盘转速设置：自100r/m至1000r/m，每次增加100r/m）

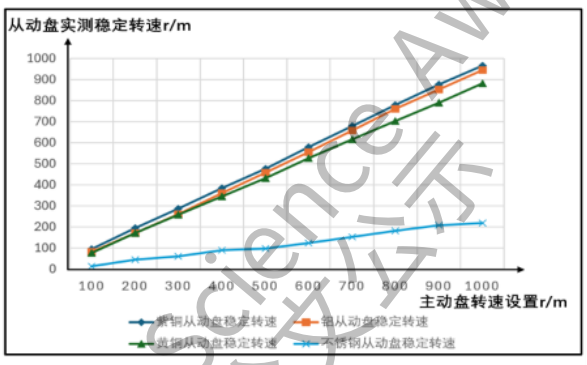


图12
不同材质金属盘稳定转速趋势图
（主动盘转速设置：自100r/m至1000r/m，每次增加100r/m）

将各金属电阻率代入表 7 后，可研究金属盘电阻率与金属盘稳定转速间的关系，如图 13 所示：在相同主动盘转速下，随着电阻率增加，各金属从动盘的稳定转速呈下降趋势。

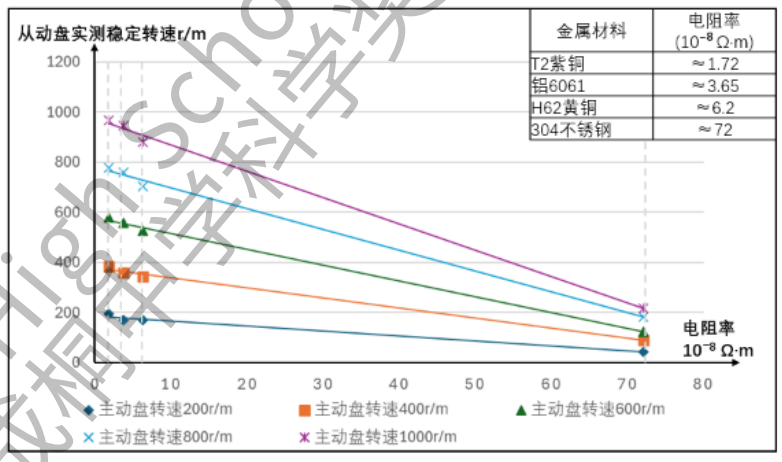


图13
电阻率与金属从盘稳定转速关系图
（主动盘转速设置：200r/m，500r/m，700r/m，900r/m）

根据 $E = N\times(\Delta\Phi/\Delta t)$，进一步分析该实验：各金属从动盘尺寸相同则 N 和 $\Delta\Phi$ 均视为相同（此处不考虑金属盘密度差异和杂质含量），主动盘转速相同则 Δt 相同，因此各金属从动盘内感应电动势 E 相同。又根据 $I = E / R$，因为 E 相同，所以各金属从动盘内感应电流 I 与盘内电阻 R 成反比。因此，电阻率越大的金属从动盘内产生的感应电流即涡流越小，其新磁场越弱，从而对从动盘的“电磁驱动”效应也相应越小，导致该从动盘的稳定转速越小。实验结果符合电磁感应理论。

该实验也进一步说明，在实际生活和生产中，应根据对涡流效应实际需求，慎重选用合适的金属材料。

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026正成初中学术公众号

3.4 涡流探伤应用的初步解析

通过分析不同形态金属盘的转速差异，研究金属形态与感应电流及其磁场强度的关系，模拟涡流探伤的应用，并解析其应用原理。

3.4.1 实验设计

主动盘选用磁铁盘，磁铁盘配置 8 颗 T6 小磁铁，从动盘分别选用 T2 紫铜材质的不开槽盘、径向开槽盘、同心半开槽盘、同心全开槽盘，见图 14。主动盘转速设置为 500r/m。主动盘启动后，从动盘随之旋转并加速，每隔 0.5 秒，记录主、从动盘的实时转速，直至从动盘转速稳定。每个实验条件重复 3 次，各测得 3 个实验值，实验数据分析使用平均值。

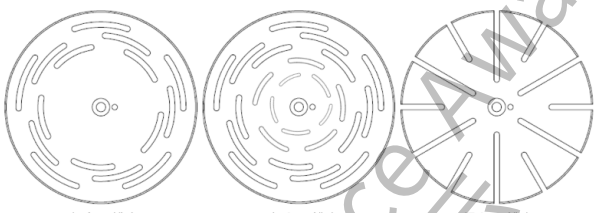


图14
开槽金属盘简图

3.4.2 实验数据分析和结论

涡流探伤仪的工作原理：利用通有高频交流电的线圈在被检测的导电材料（主要是金属）中感应出涡电流，导电材料表面和近表面缺陷（如裂纹、孔洞、夹杂物）或材料特性的变化（如电导率、磁导率、硬度、热处理状态、残余应力、涂层厚度变化）会干扰涡流的正常流动路径和强度，涡流发生畸变，通过检测涡流畸变及其产生的次级磁场的扰动，来获取材料内部状态的信息。

将表 8 中的实验数据制作成转速变化趋势图，如图 15 所示：1）在相同主动盘转速下，金属从动盘稳定速度从大至小依次为：不开槽盘、同心半开槽盘、径向开槽盘、同心全开槽盘；2）金属从动盘转速从零至稳定（接近于匀速）所需时间从短至长的排序同上。如前文所述，涡流是金属盘内部距离圆心远近不同的点电势不等而形成若干闭合回路产生的感应电流。实验金属盘有不同程度的开槽，影响了闭合回路的形成，涡流在流经开槽时路径扭曲，被迫绕行、分叉或终止。对比开槽数量和开槽面积，对涡流形成的干扰影响从小至大依次为：不开槽盘、同心半开槽盘、径向开槽盘、同心全开槽盘。金属从动盘中产生的涡流越强，其新磁场对金属从动盘的“电磁驱动”效应越强，具体表现在稳定速度更接近主动盘转速，且在更短时间内达到稳定的“滞后”。

前文中，探究了金属电阻率与感应电流强度的关系，在相同实验状态下，电阻率与感应电流成反比。不同材质金属（电阻率）在涡流探伤过程中，产生的涡流强度不同，从而反应出不同的“电磁驱动”效应。涡流探伤仪基于对“电磁驱动”效应的“读

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026年成都中学科学奖论文公示

取”形成探测结果。以上实验，均能够解析涡流探伤的原理。

时间 S	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
不开槽盘转速r/m	0	287	377	421	442	452	458	458	458
径向开槽盘转速r/m	0	104	196	254	289	317	341	357	368
同心半开槽盘转速r/m	0	154	257	335	379	412	419	424	424
同心全开槽盘转速r/m	0	57	173	173	213	238	268	278	285
时间 S	**4.5**	**5**	**5.5**	**6**	**6.5**	**7**	**7.5**	**8**	**8.5**
不开槽盘转速r/m	463	462	462	462	461	462	462	462	462
径向开槽盘转速r/m	376	382	386	386	390	390	394	394	394
同心半开槽盘转速r/m	429	429	429	429	429	429	430	430	430
同心全开槽盘转速r/m	292	298	304	304	308	311	311	316	316
时间 S	**9**	**9.5**	**10**	**10.5**	**11**	**11.5**	**12**	**12.5**	**13**
不开槽盘转速r/m	463	462	463	462	462	462	462	462	462
径向开槽盘转速r/m	394	394	399	399	399	400	399	399	399
同心半开槽盘转速r/m	430	431	431	431	431	432	432	432	432
同心全开槽盘转速r/m	319	319	319	319	319	323	323	323	323

表8
不同形态金属盘转速记录表
（主动盘转速设置：500r/m）

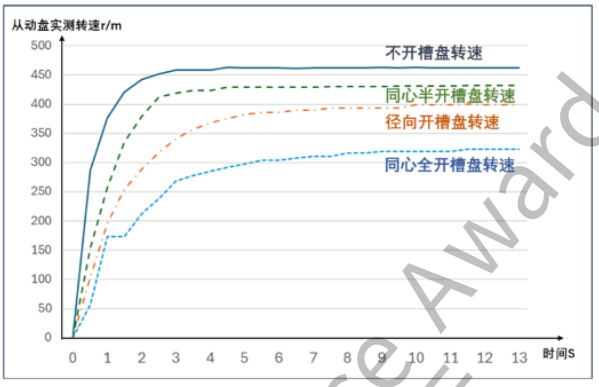


图15
不同形态金属盘转速随时间变化趋势图
（主动盘转速设置：500r/m）

4 结论和创新点

本实验装置已制作成样机，能够稳定运行。经过实验论证，本实验装置实现了所有预设的创新设计目标，且实验结果完全符合法拉第电磁感应定律、楞次定律等电磁感应相关理论。

与现有技术相比，本装置的创新点是：

1） 一机多能，即在同一台实验装置上实现对多个电磁感应理论的多项实验功能，以满足验证、探究、应用深化和科学普及的多种需求；
2） 定量分析，即同时进行多个实验变量设置，多项实验数据采集；
3） 操作简捷：快速装夹设计，可在 30 秒内完成实验切换和设置；
4） 成本优势，即结构简单，轻巧便携，制造成本低廉，易于维修，节约能源。

5 未来展望

本装置的进一步优化方向已明确，包括：

设计优化：

1） 电机采用 PID 闭环调速系统，解决电机转速漂移的问题；
2） 改进多抽头线圈盘，集成电压电流表，改善接触电阻不稳定性；
3） 增加实验数据自动读取、存储和图表分析功能；
4） 设计与实验配套的（磁感线、感应电流）动画演示视频，提升理论知识的丰富性和深度；
5） 增加声、光效果，配合实验数据变化，提升直观性、趣味性；

实验探究与论证深化：

6） 追加研究变量：开槽量化（面积、隔断），更多电阻率材质；

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐科学奖论文公示

7） 追加完整误差分析；

8） 涡流属性的回归分析和建模；

商业推广：

9） 制作少量样机，在本区学校小批量试用和推广，同时收集意见和建议，作为优化依据；

10) 科技节、科技馆路演。

6 应用前景

本装置是一种新型的一机多能的电磁感应实验装置，将电磁感应现象呈现与理论探究深度结合，在同一台实验装置上实现对多个电磁感应理论的多项实验功能，以满足验证、探究、应用深化和科学普及的多种需求，为突破电磁感应的抽象性和复杂性所带来的学习研究困境提供了可行的解决方案。

本实验装置不仅适合各学校的学习和研究，还适合个人的科普及娱乐，有助于全民提升电磁感应知识水平，具有非常高的应用前景和社会价值。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

参考文献

[1] 吴留龙，《高中物理电磁感应教学的实验教学策略研究》，中国知网，2025 年 4 月

[2] 郑洽好，《现代阿拉果圆盘实验在大学物理中设计与应用》，大学物理，2023 年 10 月

[3] 胡博，《利用 Arduino 和 LabVIEW 探究电磁感应定律》，物理通报，2021 年第 4 期

[4] 赵挺富，《“探究磁感应强度”的实验设计》，实验设计与技术，2019 年第 2 期

[5] 李胜强，《再议阿拉果圆盘实验》，中小学实验与装备，2017 年 3 期

[6] 庄业友，《法拉第电磁感应现象与阿拉果圆盘实验探讨》，物理之友 2016 年 4 月

[7] Ishafit,I., Arduino and LabVIEW-based remote data acquisition system for magnetic field of coils experiments, Physics Education, 2020 (2)

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

致谢

感谢包鸣老师在本项目过程中给予的无偿指导和无私帮助。包鸣老师是复旦大学附属复兴中学的物理老师。我在电磁感应学习过程中遇到困境，萌发出设计实验装置的创意。包老师帮助我梳理思路，使得我的选题得以在研究方向上具备一定的科学性与可操作性。经过在各大平台充分查询国内外相关研究，并在电商平台进行市场调查后，我制定了具体的创意设计目标，并在包老师的指导下，完成了初始可行性评估。我将阿拉果转盘作为创新基础，但因部分高阶知识而卡在了理论分析环节，包老师耐心地为我答疑解惑，帮助我充分理解了阿拉果转盘的物理逻辑，为接下来的设计工作奠定了基础。由于我曾学习了系统化的 STEM 课程，并有多年的机器人设计/开发/应用的工程实践经历，我独自完成了实验装置的第一阶段设计工作，包括：设计各功能部件的材质、结构和实验变量；快速实验切换的设计；初代整机设计；初代样机制作等。在此过程中，包老师多次提出合理性建议，让我少走了很多弯路。初代设计顺利通过中期测试考核。我在初代设计的基础上，进行了多项功能优化，如：增加数据读取功能、增加主动盘的转速调节功能、增加不同形状的金属盘等，并且制作成样机。实验设计和验证过程中，在包老师引导下，我正确运用理论工具，实验设计严谨、实验数据充分、逻辑链条完善，使用样机测得实验数据 1623 个，分析形成 8 个实验结论，完全符合多个电磁感应相关定律。在论文撰写阶段，包老师提出了结构、表达和格式上的宝贵修改意见。

包老师在整个项目过程中主要承担辅助任务：提供思路启发、方法建议、过程监督与质量把关，而将核心研究、设计制作、实验操作和论文写作任务留给我独立完成。这既保证了研究的科学性，又锻炼了我的科研能力。再次向包老师致以最诚挚的谢意！

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示