

探究一种基于磁力排斥的牛顿摆运动状态 特征及影响因素

摘要

为探究磁力排斥耦合下的牛顿摆运动特征，本研究依据 IYPT2026 第 15 题，设计并制作了双球摆与三球摆装置，采用 240 fps 高速摄像与 Tracker 软件追踪摆球位移，结合简正模理论与数据清洗方法，定量分析了能量传递规律。实验发现：双球摆中能量周期性交换，拍频周期 0.833 s，转移效率 67%；三球摆中能量逐级传递，拍频周期 1.00 s，转移效率达 85%。创新性地发现三球摆效率反超双球摆，与普通牛顿摆“球数越多效率越低”的规律相反，揭示了中间球的缓冲作用与磁力耦合增强机制。采用精确简正模公式反推耦合强度，避免小耦合近似误差，并首次将滑动窗口 3σ 法与差分法结合用于 Tracker 轨迹数据清洗。三球摆因平衡间距更小，磁力梯度 (9.82 N/m) 和平衡磁力 (0.379 N) 均大于双球摆，阻尼比更小 (0.079)。本研究为磁力非接触能量传递的动力学分析提供了实验依据，对减震缓冲装置设计具有参考价值。

关键词：磁性牛顿摆；磁力耦合；简正模；能量传递；Tracker 软件；拍频

目 录

摘 要.....	II
目 录.....	III
正 文.....	I
1. 前言.....	1
1.1 磁性牛顿摆.....	1
1.2 本课题的研究意义.....	1
1.3 研究流程与技术路线.....	1
2. 实验材料与方法.....	2
2.1 实验材料.....	2
2.2 实验方法.....	2
2.2.1 定制化磁性牛顿摆.....	2
2.2.2 多变量控制实验.....	3
2.2.3 数据处理.....	3
3. 结果与分析	5
3.1 实验现象	5
3.1.1 双球摆.....	5
3.1.2 三球摆.....	6
3.2 与普通牛顿摆的差异.....	7
3.3 对组间差异的定量计算分析.....	9
3.3.1 计算流程.....	9
3.3.2 实验结果对比.....	10
3.3.3 不同点原因差异分析.....	11
4. 结论与展望.....	12
4.1 结论.....	12
4.2 展望.....	12
5. 收获与体会.....	13
6. 致谢.....	14
参考文献.....	15

正文

1. 前言

1.1 磁性牛顿摆

在第 39 届国际青年物理学家锦标赛 (IYPT2026) 的第 15 题^[1]中:

Magnetic Newton's cradle 磁力牛顿摆

原文: Repulsing, non-touching magnets are used instead of colliding balls to make a new type of Newton's cradle. The new cradle can act in a similar way to a regular cradle, but can also exhibit other interesting behaviour. Explain and study the movement of this magnetic cradle.

翻译: 利用相互排斥、不接触的磁铁来代替碰撞的球制作一种新型牛顿摆。这种新型牛顿摆可以像普通牛顿摆一样运作, 并且还会表现出其他有趣的现象。解释并研究这个磁力摆的运动。

传统牛顿摆基于动量守恒与能量传递原理, 通过刚性碰撞实现运动传递, 其运动状态单一且能量损耗机制明确。而这种基于磁力排斥的新型牛顿摆器件的设计突破了传统刚性碰撞的局限, 运动传递过程更具特殊性, 其运动状态受磁力、结构等多因素影响, 目前相关系统性研究较少, 因此开展课题探究。

1.2 本课题的研究意义

(1) 在科普教育领域, 磁力牛顿摆兼具趣味性与知识性, 能直观展示磁力与动量、能量的相互作用, 助力受众理解磁场力与力学守恒定律的结合应用。

(2) 在精密仪器领域, 磁力排斥的非接触式传递特性可为振动控制、能量缓冲装置设计提供新思路, 减少刚性碰撞带来的磨损与精度损耗。

(3) 在玩具与文创产品领域, 独特的磁力运动效果可提升产品吸引力, 其运动稳定性与持久度的优化的核心依据, 能为相关产品创新提供技术支撑。

1.3 研究流程与技术路线

(1) 实验研究磁性牛顿摆中, 钕铁硼磁铁因受磁力排斥产生的非接触式动能转化与其初始摆动条件的联系。本实验通过改变摆杆长度与摆球数量探究其

运动特性。

(2) 分析猜测并一定程度上验证其原理。

2. 实验材料与方法

2.1 实验材料

磁性牛顿摆主体结构由带方孔铁板用螺丝螺母固定搭成 $32\text{cm} \times 12\text{cm} \times 32\text{cm}$ 的铁架；磁铁采用六个钕铁硼磁铁；摆球摆杆部分采用不锈钢管夹，带有螺纹连杆，共 3 根，长度为 15cm ，保证磁铁得到有效固定约束，避免磁铁间在急剧靠近时，因强大的作用力而扭转相撞；固定材料采用圆柱长螺母 $\times 3$ ，燕尾夹 $\times 3$ ，并在长螺母上贴 1-2 圈透明胶带，尽可能减小摩擦带来的动能损耗；受钟茱杏研究^[2]启发，记录设备采用手机摄像机（240fps）与电脑 tracker 软件。

需要注意的是，以上所有材料都特地选用无磁性材料，避免外部磁场干扰。磁铁与连杆组装后，全部挂在铁架外侧的一端，因此将宽度做成 12cm ，以在另一端平衡配重。

2.2 实验方法

2.2.1 定制化磁性牛顿摆

在带方孔铁架上端中央固定长螺母，将钢管夹子连杆上端圆环套入螺母并用燕尾夹固定。将 6 个磁铁两两分成 3 组嵌入钢管夹中，以组 2 为例（见图 2-2-1-1）：

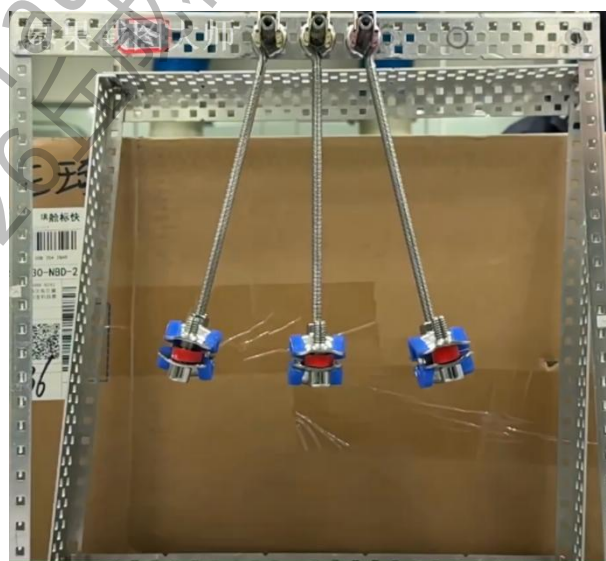


图 2-2-1-1 磁性牛顿摆实验装置

2.2.2 多变量控制实验

采用控制变量法，围绕磁力牛顿摆摆球数量开展定量研究（见表 2-2-2-1）

表 2-2-2-1 磁性牛顿摆实验参数

组别	摆球数量 (个)	摆长 (m)	摆角 (°)	一套钢管夹与磁铁 总质量（不含连 杆） (g)
1	2	0.168	37	100.13
2	3	0.168		

选取相同圆形尺寸磁铁，通过软件中量角器高度标尺控制初始摆角摆长，确保单一变量变化时其他属性保持一致。

部署 1 台手机构建运动追踪系统，帧率采用 240fps。选取侧视角度，距装置水平距离 1.5m 用于捕捉摆动幅度变化、摆动周期及整体运动轨迹，同时根据钟荧杏的拍摄方式^[2]，调整手机高度与拍摄角度，尽量竖直齐平拍摄，减小视频产生的视角误差；为软件方便追踪，将牛顿摆放置于纯色背景外，用红色垫片标记摆球（见图 2-2-1-1）。

通过 tracker 软件校准协同拍摄，完整还原磁力牛顿摆的运动状态。

2.2.3 数据处理

结合摄像记录，tracker 软件与 AI 工具进行数据整合分析。

根据钟荧杏的方法^[2]：

（1）在 tracker 软件中点击“导入”，选取实验视频，固定起始帧与结束帧，添加质点小球并建立坐标轴，将 Y 轴置于整个装置的竖直中线，将原点置于中间摆球的中心，将正方向定为右。以实际测量尺寸数据为定标尺设置长度定标，并用软件自带量角器测量主动球摆角。

Tracker 软件界面如下，以组 2 为例，无关人员已打码（见图 2-2-3-1）。

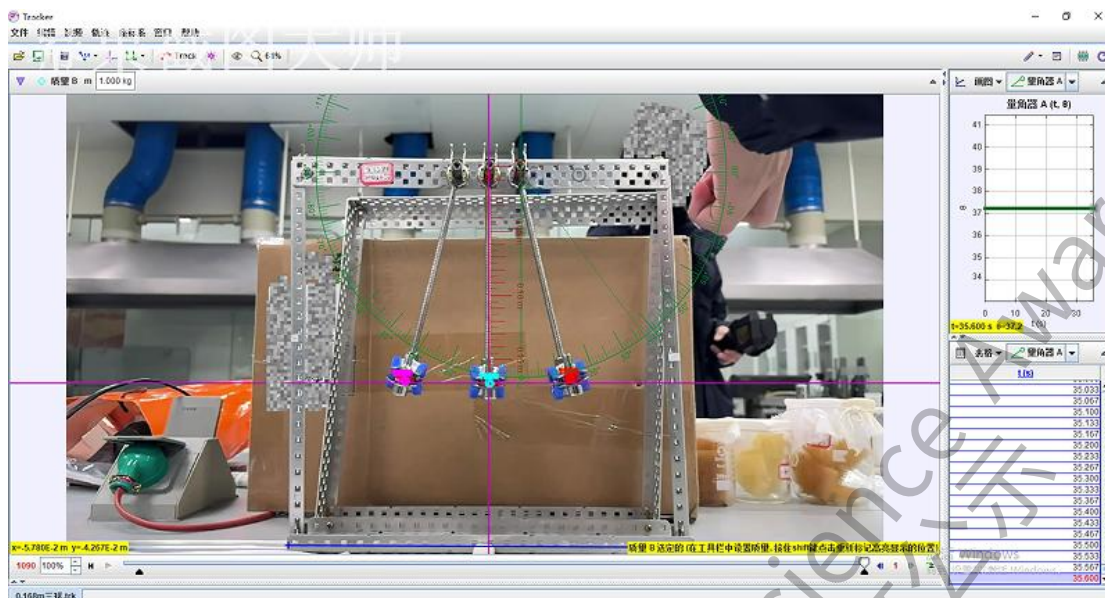


图 2-2-3-1 tracker 页面

(2) 利用 Tracker 视频轨迹追踪软件对摄像画面进行逐帧解析，按住 Shift+Ctrl 键点击标记点完成第一帧画面坐标定位。调整搜索方框大小，点击搜索，Tracker 软件会自动追踪研究小球中标记点的位置。

并得到位移-时间图像与数据库，从而精准提取摆动幅度等核心指标。利用 AI 工具制作论文标准图像，直观体现运动轨迹。

本实验拉起右端小球开始摆动，因此将最右端小球称作主动球，最左端小球称作从动球，组 2 中特别将中央小球称作中间球。

采集过程中可能因传感器噪声或软件异常产生孤立异常点。为保障分析可靠性，借助 Deepseek-V3.2 模型，采用以下流程进行数据清洗：

1) 差分法辅助识别：计算相邻时间点的位移差（速度），若某点速度远超周围平均值（如 5 倍），视为异常。

2) 此外，受许静文研究启发^[3]，额外采用滑动窗口 3σ 法：以窗口宽度 30 个采样点（约为半个振荡周期）计算局部均值 μ_w 和标准差 σ_w ，若某点位移偏离 μ_w 超过 $3\sigma_w$ ，则也标记为异常。

3) 异常点修正：对被标记的异常点采用线性插值替换（利用前后正常点数值）。

最后引入电磁学与动量守恒等理论进行辅助分析，结合运动数据反推不同参数组合下磁力与能量的传递效率，基于磁力作用规律与动量守恒原理推导理

论并与实验比较差异，分析差异原因。

3. 结果与分析

3.1 实验现象

3.1.1 双球摆

需要在一开始说明的是，由于实验为慢镜头模式录制，图 3-1-1-2 与图 3-1-2-3 中横轴时间数据均为实际时间的 6 倍，这在现象描述与计算中已得到修正。

组 1 中，被释放的“主动球”与另一个“从动球”存在明显的动能传递，约 0.42 秒后能量几乎完全转移，随后反向回流，形成周期性的能量交换。每在一个球被激发后，另一球总会有微弱的回弹现象，即两球之间存在反相关系（见图 3-1-1-1）。这种回弹现象在第 1 至第 4 周期中越发显著，之后随能量衰减又趋于平缓。两球之间位移随时间变化的关系则更直观地突出了这一点（如图 3-1-1-2）。

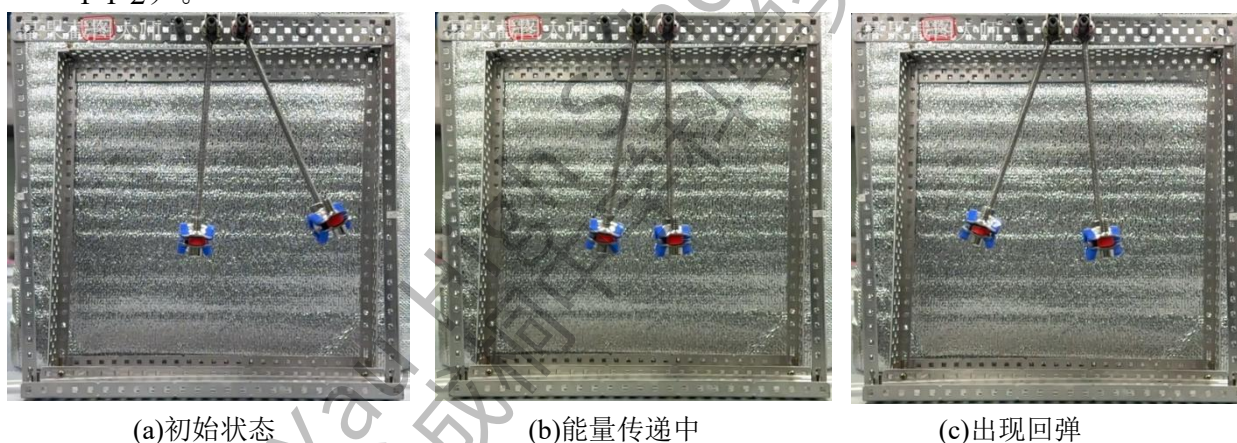


图 3-1-1-1 组 1

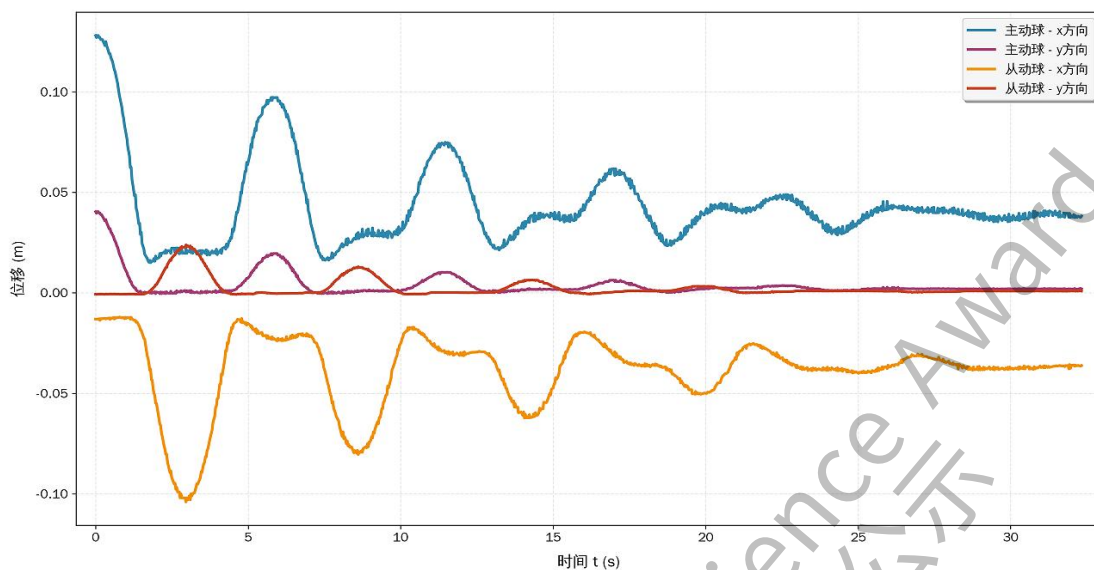


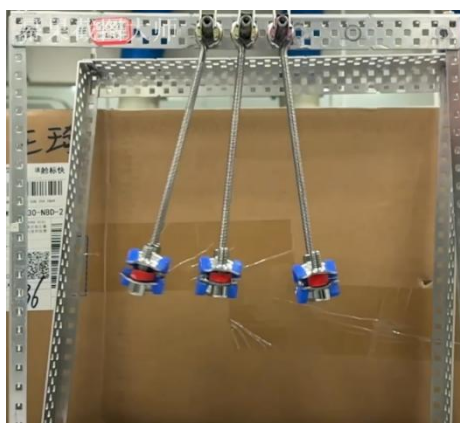
图 3-1-1-2 摆长为 0.168m 时 2 球摆主从动球位移对比

3.1.2 三球摆

组 2 中，三球在实验中呈现能量沿球链逐级传递的特征。释放主动球后，其振幅逐渐减小，经能量传递后，从动球开始被明显激发。其中，中间球起传递作用：一方面将能量从主动球传向从动球（见图 3-1-2-1）；另一方面从动球被激发后，中间球先回弹，并带动主动球回弹，中间球又再次回弹并迅速衰减直到下一周期（见图 3-1-2-2）。这些亦能在图像中更直观地体现（见图 3-1-2-3）。

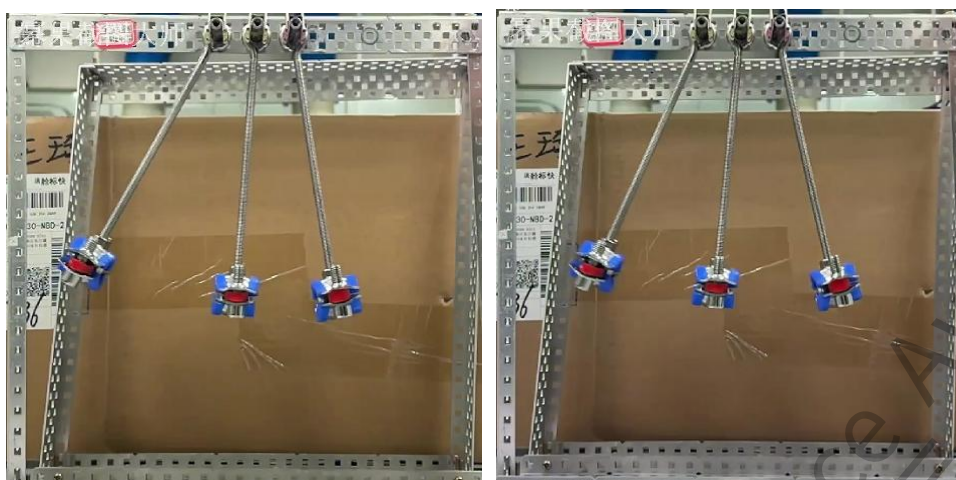


(a)主动球传递能量给中间球



(b)中间球传递能量给从动球

图 3-1-2-1 能量传递链



(a)中间球回弹

(b)中间球带动主动球回弹

图 3-1-2-2 回弹传递

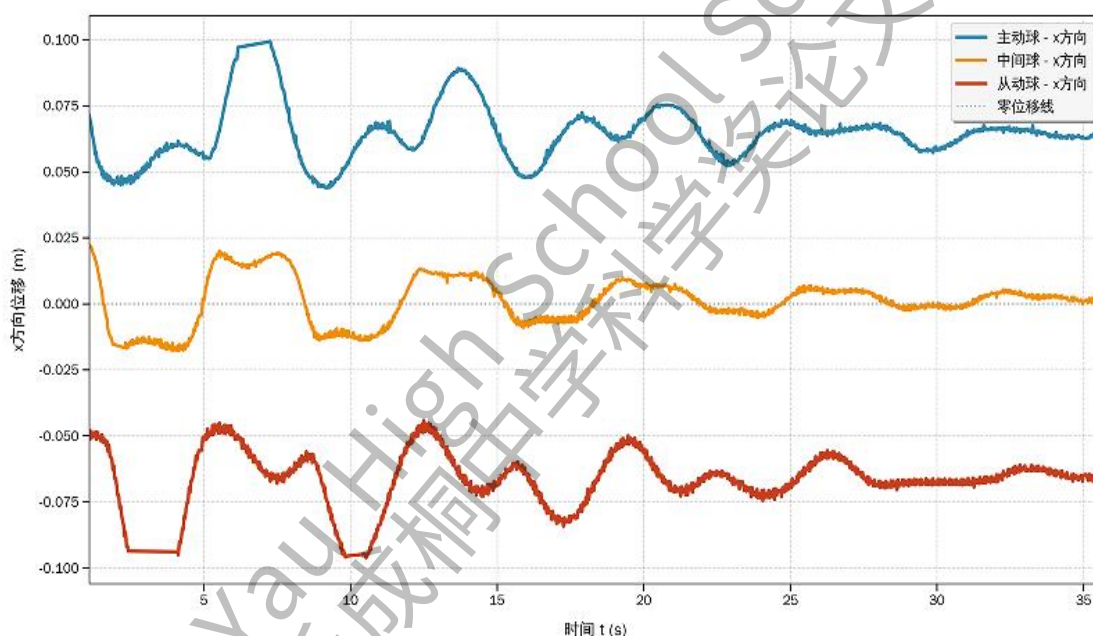


图 3-1-2-3 摆长为 0.168m 时 3 球摆主从动球位移对比

3.2 与普通牛顿摆的差异

对于磁性牛顿摆，以组 2 为例，主要差异如下（见表 3-2-1，表 3-2-2，表 3-2-3，表 3-2-4）

表 3-2-1 耦合机制差异

	磁性牛顿摆	普通牛顿摆
相互作用	非接触磁性斥力，力随距离连续变化，两球靠近时斥力增大，远离时斥力减小	接触碰撞，力只有碰撞瞬间才会在极短时间内脉冲式作用

能量传递 能量通过磁场产生“弹簧”效 能量通过弹性碰撞直接“跳转”
果逐渐转移

关键在于，与普通牛顿摆刚体直接碰撞不同，磁性牛顿摆的三球两两不会真正接触，能量通过磁场连续作用以“流淌”的形式传递。

表 3-2-2 运动形态差异

	磁性牛顿摆	普通牛顿摆
振荡特征	所有球同时摆动，只有振幅间的此消彼长，中间球参与摆动，其振幅不可忽略。	通常仅两端球摆动，中间球虽有微小速度，但几乎可看作静止
相位关系	基本反相	同相交替

磁性牛顿摆与普通牛顿摆均可近似看作以三个弹簧连接的振子一起晃动。但在普通牛顿摆的“弹簧—质点”碰撞模型^{[2][4][5]}下，其弹性势能主要来自于刚体形变，而磁性牛顿摆的弹簧主要来自磁场作用下的斥力。

表 3-2-3 能量传递差异

	磁性牛顿摆	普通牛顿摆
传递用时	需要一定时间（秒级）	直接瞬时完成（毫秒级） ^[2]
传递路径	连续平滑，部分可逆	离散跳跃，完全可逆
多球效应	三球能量逐级传递，有一定时间延迟	能量从主动球瞬间“跳”至从动球，中间球几乎不参与

关键在于与刚体的直接形变碰撞不同，磁场作用的滞后性与连续性，导致能量传递较为缓慢平滑。

表 3-2-4 阻尼差异

	磁性牛顿摆	普通牛顿摆
能量耗散主要来源	悬挂点摩擦、空气阻力	碰撞时的塑性形变、声能、摩擦

能量转移效率	双球摆 67%，三球摆 85%（计算方法见 3.3）	理想弹性碰撞 100%，潘志民的研究 ^[5] 测量出实际单次碰撞后系统损失了约 9.08%的初始动能
--------	----------------------------	---

值得关注的是，根据潘志民的研究^[5]，牛顿摆通常只有两球时效率最高，因为中间球会导致多次碰撞损失；但磁性牛顿摆中三球摆能量转移效率反而大于双球摆。这反映了连续力耦合与离散碰撞的不同（具体分析见 3.3.3）。

3.3 对组间差异的定量计算分析

3.3.1 计算流程

首先，根据线性耦合振子理论分析不同的简正模。

对于双球摆，两相同单摆通过磁力耦合时，系统存在两个简正模：

同相模（两球同向摆动）：由于此模中磁力未发挥作用，理论频率等于单摆固有频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$ ，以及固有角速度 $\omega_0 = 2\pi f_0$

反相模（两球反向摆动）：此模中磁力发挥排斥作用，进而产生类似弹簧的效果，理论频率 $f_{\text{反}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{2\kappa}{\omega_0^2}}$ （其中 κ 为耦合强度，单位 s^{-2} ）

根据王天会的研究^[6]，普通牛顿摆从左向右传播的波和从右向左传播的波互不干扰，独立叠加。但由于磁力作用效果的滞后性，当两个简正模同时被激发时，两个不同频率的振动叠加在一起，就会出现振幅时大时小的现象，即拍频。从而使时域振动表现为振幅调制，调制周期（拍频周期）理论值

$$T_{b \text{ 理论}} = \frac{1}{|f_{\text{反}} - f_0|}$$

而对于三球摆，三质量等耦合系统存在三个简正模：

模式 1（三球同相）：此处同双球摆，理论频率 $f_1 = f_0$

模式 2（中间球静止，两端反相）：此处两端球相对距离变化，磁力参与，频率升高，理论频率 $f_2 = f_0 \sqrt{1 + \frac{\kappa}{\omega_0^2}}$

模式 3（三球交替运动）：此处所有球都在动，相邻的球总是相反方向，磁力作用最强，频率最高：理论频率 $f_3 = f_0 \sqrt{1 + \frac{3\kappa}{\omega_0^2}}$

实验中主要激发模式 2 和模式 3，两者叠加产生拍频现象，拍频周期

$$T_b = \frac{1}{|f_3 - f_2|}$$

随后，进行耦合强度反推，由实验观测所得拍频周期 T_b ，得频率与角速度差：

$$\Delta f = \frac{1}{T_b}, \quad \Delta \omega = 2\pi \Delta f$$

由于观察到耦合极强。所以为避免小耦合近似产生的误差，此处采用更精确的公式。

其中双球摆反相模频率与同相模频率差满足：

$$\Delta f = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{2\kappa}{\omega_0^2}} - 1 \right)$$

三球摆类似，但更复杂：

$$\Delta f = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{3\kappa}{\omega_0^2}} - \sqrt{1 + \frac{\kappa}{\omega_0^2}} \right)$$

两式联立解出耦合强度 κ ，并算出无量纲耦合系数 $x = \frac{\kappa}{\omega_0^2}$

然后是阻尼估算，这是磁性牛顿摆走向衰减的原因，一般采用指数函数来拟合，这里取用主动球 x 方向前 1.67 s 峰值点估算衰减系数 β 与阻尼比 ζ ：

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \quad \zeta = \frac{\beta}{\omega_0}$$

这里阻尼估算受峰值点选取影响，存在一定主观性，但也避免了后期位移过于微小导致误差的放大。

由于实验条件问题，之后的磁力参数仅结合实测质量（单球 $m=0.10013\text{kg}$ ）反推。总共要计算以下参数：

磁力梯度： $k_c = m\kappa$

平衡间距：取系统振动相对平稳的后段，双球摆取 5.00~5.33s 位置均值，三球摆取 5.00~5.83s 位置均值作差。

平衡磁力：由重力恢复力平衡 $F_{mag} = \frac{mg}{L} x_1$ （其中 x_1 为主动球平衡时位置）

需要注意的是，平衡位置取自实验数据后期均值，磁力计算基于小角度近似，且由于实验位移数据中垂直方向位移数量级小到 $10^{-4}m$ ，所以忽略垂直方向影响。

最后比较能量转移效率。因为振动能量和振幅平方成正比(对单摆近似成立), 此处采用主动球与从动球的最大振幅平方比, 即:

$$\eta = \frac{A_{\text{从}}^2}{A_{\text{主初}}^2}$$

3.3.2 实验结果对比

对于组 1 与组 2, 结果对比如下 (见表 3-3-2-1)

表 4-3-2-1 组 1 与组 2 实验结果对比

参数	组 1	组 2
拍频周期 $T_b(s)$	0.833	1.00
两端球相位关系	基本相反	
垂直方向最大扰动 (m)	0.026	0.025
单摆固有频率 f_0 (Hz)	1.216	
耦合强度 κ (s^{-2})	86.1	98.1
无量纲耦合系数 x	1.475	1.68
磁力梯度 k_c (N/m)	8.62	9.82
相邻球平衡间距 (m)	0.076	0.065
平衡磁力 F_{mag} (N)	0.222	0.379
阻尼比 ζ	0.094	0.079
能量转移效率 η	67%	85%

其中, 相同点有: 两端球基本反相; 能量在球之间周期性转移; 垂直方向存在非线性扰动。前两项符合普通牛顿摆的运动特征。而垂直方向的非线性扰动可能源于软件跟踪跳点和转轴摩擦。

而不同点有: 三球摆的耦合强度、平衡磁力、磁力梯度、能量转移效率更大; 双球摆拍频周期更短。

3.3.3 不同点原因差异分析

首先, 耦合强度与平衡磁力差异源于三球摆由于中间球挤压, 重力恢复力更强, 因而平衡间距更小, 根据磁力随距离减小而增大的规律, 其等效刚度也应更大。

随后, 磁力梯度的差异同样源于三球摆平衡间距更小, 力与距离平均比更

大。另一方面，三球摆相邻的两个磁铁也是面对面，但中间球同时受左右两个磁铁的力。虽然磁铁本身相同，但每个磁铁周围的磁场会受到邻近磁铁的影响（即磁场的叠加效应），这可能改变力与距离的关系，导致在相同间距下等效刚度与双球摆略有差异。

最后，为什么三球摆能量传递效率反而高？先分析阻尼比差异的根源：双球摆中，主从动球直接的来回振荡会使每一个球都反复承受剧烈的能量失去与回流，从而加剧主动球振幅的衰减速率。而三球摆中，能量传递在中间球得到缓冲，逐级传递因而使能量流失更平缓。这也是三球摆能量转移效率更高的主要原因之一。除此之外，一方面，间距更小、磁力更大、耦合更强，导致能量在球间交换虽平缓但更充分迅速，在耗散之前更完整地转移；另一方面，三球摆中，能量不仅能从主动球传递到从动球，还可以通过中间球共振放大，可能是丰富的传递路径使能量转移效率提高。

4. 结论与展望

4.1 结论

实验结果表明：

1.对于磁性牛顿摆本身

能量在摆球之间沿球链呈周期性往复，存在多个简正模，由于磁力作用效果的滞后性，这几个简正模频率不同，叠加后产生拍频，故能量的传递与回流并存，从而出现回弹现象。

2.相对于普通牛顿摆：

磁性牛顿摆由于磁力随距离的连续性，摆球间不会直接接触碰撞，而是以“弹簧”的形式在两端之间“流淌”。故能量传递更平滑缓慢，避免刚体碰撞导致的塑性形变损伤。

3.双球摆与三球摆对比之下：

- (1) 三球摆相邻球平衡间距小于双球摆，磁力梯度更大，故耦合更强。
- (2) 因三球摆两个高频简正模的频率差小于双球摆反相模与同相模的频率差，其拍频周期长于双球摆。
- (3) 三球摆能量沿主动球→中间球→从动球逐级传递，中间球振幅不可忽

略。更强磁力与更小阻尼比，使三球摆能量转移效率更高。

4.2 展望

受限于当前实验条件，本研究存在诸多误差因素：

(1) 摩擦，实验在转轴处仅使用燕尾夹加固，在固定摆杆的同时产生了一定的摩擦阻力，即便在转轴处缠绕光滑胶带，实际实验一次摆动也仅能持续 5 s 左右，未能得到更多数据样本。

(2) 水平偏移，为避免固定过紧导致过大摩擦，实验中将燕尾夹略微放松，导致摆动过程中产生细微水平纵向偏移，导致磁力方向的偏转与位移误差。

(3) 摆杆，为防止磁铁在摆动中由于强大的磁场作用扭转吸引，实验将摆绳替换成摆杆，而摆杆的自重会对摆球额外做功导致摆球机械能变化，在计算能量转移效率时产生误差。

因此，计划在后续实验中尝试其余转轴装置替代燕尾夹，并将摆杆更换成更轻材质。

此外，在实验设计上也有诸多可改进之处：

(1) 实验变量过少，由于装置组装过久，实验时间紧迫，故未能探究更多影响因素。

(2) 拍摄，由于缺乏定标竿，实验仅尽力目测竖直拍摄，必定导致视角的偏斜。

(3) 缺乏拟真模拟验证，受限于计算机知识，模拟困难，仅用实际数据反推。

因此，计划增设摆杆长度等变量，并增加实验组，手工制作定标竿，借助 AI 工具寻找拟真模拟途径。

综上，本研究将在未来进一步完善、延伸，并加以严谨、精确化，包括更多的变量探究。

5. 收获与体会

在这项研究中，我受益匪浅。从 IYPT 官网上偶然一瞥的好奇，到文献给予我的创新性启发，最终落实到课题的实践。我深刻体会到物理实验从“做出

来”到“分析透”的完整过程。个人能力也由此提升。

诚然，研究的挑战不可避免。搭建磁性牛顿摆装置时，我遇到摆球扭转相撞、摩擦、水平偏移等诸多实际问题，这让我认识到理想模型与现实实验之间的鸿沟，锻炼了动手能力和解决问题的耐心。在数据处理阶段，苦思冥想的我受到文献的启发，让我对文献阅读的重要性有更直观的理解。更何况，在生活中，繁重的学习不断压缩我的研究时间，这对我时间分配、劳逸结合的能力提出更高的要求，但老师同学的鼓励与家长的支持，给予我勇敢面对的动力。

需要特别说明的是，在数据分析的 AI 使用中，我充分意识到 AI 在研究中的局限性。经过人工核查，我发现 AI 常常产生幻觉甚至编造数据导致结论严重错误，在不断的追问与鉴别后，我才最终确定正确，实际可用的却更是少之又少。因此，我意识到 AI 在科学研究中仅能辅助分析，且在准确性上存在较大风险，必须实现以我为主、为我所用而非全盘替代。

所有努力最终落实到明确严谨且与预期相反的结论。这让我意识到科学探索中不能简单套用既有认知，而是尊重实验数据、敢于质疑。本次研究虽受限于装置简陋、变量不足，但这一曲折但富有价值的研究过程为我打开了磁力耦合动力学的一扇窗，也坚定了我继续深入探究的信心。

6. 致谢

从 IYPT2026 第 15 题上获得的偶然好奇与灵感，到完成此项课题，不仅是因为自己的付出，更是得益于我身边许多人的帮助。

首先，感谢我的学校科创指导教师王振堂老师，在学校专门开设的科创课上，他带我初步认识科创，到对我的选题、实验设计进行评价指导，协助购买实验设备，提供论文格式参考并对我的论文提供修改意见。没有他无偿细心、专业的辅导与点拨，我的课题不可能顺利完成。

第二，感谢各位支持、鼓励我的同学们，他们的关心和建议都令我铭记；以及张轩豪学长，他的科创经验帮助我做好科创与学习生活的平衡。

第三，我要感谢我的家人，不仅为我的课题提供了充足的经济支持，在我遭受挫折时帮助我、鼓励我。

关于困难，实验前，学校缺乏现成实验器材，网上无法购买到符合实验需

求的牛顿摆框架，后来我拆卸相关社团的无用机械装置自行搭建铁架。实验中，我曾计划延续传统牛顿摆用细线挂磁铁，但磁铁由于强大的吸引，朝向无法被细线约束导致经常扭转相撞几近损坏，因此我在尝试铁丝无果后，改用不锈钢管夹。面对三个摆杆上螺丝拧紧后磁铁夹方向不同，放松后又无法约束磁铁扭转的问题，我通过垫碎纸片的方式调整方向。

关于 AI 使用，我借助 Deepseek-V3.2 模型提供线性耦合振子理论相关公式（已经过本人核查）辅助分析数据（仅使用其计算结果，理论部分本人已充分理解并改用自己的语言讲述），绘制图表 3-1-1-2 与 3-1-2-3，在自主写完“收获与体会”一章后用其压缩至 400 字左右并重新添改，使用频率约为每周一次。

参考文献

- [1] IYPT2026, Problem 15: Magnetic Newton's Cradle [EB/OL]. International Young Physicists' Tournament, 2025. <https://iypt.org>.
- [2] 钟荧杏、肖桂娜. 利用 Tracker 软件研究牛顿摆的运动[J]. 物理通报, 2023, (01).
- [3] 许静文, 李晶, 偶晓娟, 易韦韦. 基于可变滑动窗口与 3σ 准则的脉冲星信号去噪算法[J]. 飞行器测控学报, 2017, (02): 130-135.
- [4] 王成会、莫润阳、贺西平、边小兵、陈时. 牛顿摆系统中的能量和动量传递[J]. 物理通报, 2018, (06): 10-13.
- [5] 潘志民、于云卿、李尤. 关于牛顿摆运动衰减的研究[J]. 物理教师, 2020, 41(04): 56-62.
- [6] 王天会、何清. 牛顿摆的各种碰撞现象及理论解释[J]. 中学物理教学参考, 2021, 50(14): 29-30.

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