物理与工程 Vol.46 No.4 2026

滚筒法测量手机的转动惯量

孙泽浩[1] 金靓婕[1] 孙 江[1] 顾 晨[2]

([1]海军航空大学,山东 烟台 264001;[2]清华大学物理系,北京 100084)

摘 要 转动惯量是大学物理与实验教学的核心概念,其传统测量方法虽成熟却存在设备昂贵、操作复杂等局限。本文创新性地提出一种基于Phyphox软件的转动惯量测量方法——滚筒法。该方法是将手机固定于硬质圆筒中,使其沿斜面做无滑滚动,利用陀螺仪传感器实时采集运动数据,从而获得手机的转动惯量。本方法不仅实验装置简单、成本低廉,且易于在常规课堂环境中实施,具有较强的教学适用性。为验证该方法的可靠性,我们系统开展了不同倾角下的变参数实验,对实验结果进行了定量的不确定度评估,并将实验测量值与理论值进行了对比分析。此外,我们还利用人工智能辅助编程,开发了基于NuSEP平台的滚筒法虚拟仿真实验。本文由此进一步给出了该实验方法的完整教学设计。4学时的教学实践不仅可以深化学生对刚体转动知识点的理解,还通过Phyphox应用、AI辅助编程等环节,显著提升学生的创新实验能力与人工智能素养。这为大学物理与实验教学提供了新思路。

关键词 转动惯量;Phyphox;人工智能;NuSEP;教学设计

DOI 10.27024/j.wlygc.2026.03.04.01 **中图分类号** G64,O4

MEASURING THE MOMENT OF INERTIA OF A SMARTPHONE USING THE ROLLING METHOD

SUN Zehao[1] JIN Liangjie[1] SUN Jiang[1] GU Chen[2]

([1] Naval Aviation University, Shandong, Yantai 264001; [2] Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Moment of inertia is a core concept in university physics and experimental teaching. Although traditional measurement methods are mature, they have limitations such as expensive equipment and complex operations. This paper innovatively proposes a rolling cylinder method for measuring moment of inertia based on the Phyphox software. In this method, a smartphone is fixed inside a rigid cylinder and allowed to roll without slipping down an inclined plane. The gyroscope sensor is used to collect motion data in real time, thereby obtaining the moment of inertia of the smartphone. This method not only features simple experimental setup and low cost but is also easy to implement in conventional classroom settings, offering strong teaching applicability. To verify the reliability of the method, we systematically conducted variable-parameter experiments at different inclination angles, performed a quantitative uncertainty assessment of the experimental results, and compared the measured values with theoretical ones. Furthermore, with the assistance of artificial intelligence programming, we developed a virtual simulation experiment of the rolling cylinder method based on the NuSEP platform. This paper further provides a complete teaching design for this experimental

收稿日期:2026-03-04;**修回日期**:2026-04-15;**出版日期**:2026-09-25

通信作者:孙泽浩,1449070238@qq.com。

引文格式:孙泽浩,金靓婕,孙江,等. 滚筒法测量手机的转动惯量[J]. 物理与工程,2026,46(4):237-244.

Cite this article: SUN Z H, JIN L J, SUN J, et al. Measuring the moment of inertia of a smartphone using the rolling method[J]. Physics and Engineering, 2026, 46(4): 237-244. (in Chinese)

method. Through four class hours of teaching practice, it not only deepens students' understanding of rigid body rotation but also significantly enhances their innovative experimental skills and AI literacy through links such as Phyphox application and AI-assisted programming. This provides new insights for university physics and experimental teaching.

Key words moment of inertia; Phyphox; artificial intelligence; NuSEP; instructional design

转动惯量知识点在大学物理和大学物理实验课程中都属于重点内容。当前,传统的转动惯量实验测量方法有三线摆法、扭摆法和落体法。随着智能手机的不断发展与广泛应用,人们也提出了许多新的基于手机传感器和应用软件的实验方法。比如利用手机角速度传感器和 SensorKinetics 软件对三线摆法的改进实验[1],再如使用苹果手机内置的 Bosch 加速度传感器和陀螺仪对手机转动惯量的测量实验[2],还有结合使用 AndroSensor 和 Matlab 的研究[3]。应用更为广泛的则是由德国亚琛工业大学开发的手机物理工坊 Phyphox,研究人员利用软件内置的磁力计、陀螺仪等进行实验,对落体法与扭摆法也进行了大量创新[4-8]。在本文中,我们提出了一种新的基于 Phyphox 的测量手机转动惯量的方法——滚筒法。依据该方法,我们还给出了完整的教学设计。通过本次课的学习,学生不仅可以掌握转动惯量的相关知识点,还能够学会 Phyphox 和 AI 辅助编程分析数据的方法,这为学生后续自主开展创新实验奠定了基础。

1 实验原理

将手机固定放置在硬圆纸筒中,使手机的长轴与圆筒轴线相重合,当圆筒在斜面上无滑滚动时,利用 Phyphox 的滚筒实验可以直接测得系统下滚的角速度,如图 1 所示。

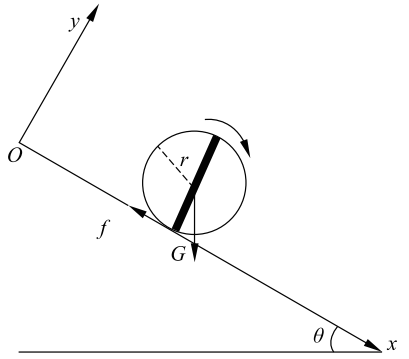

图 1 手机与圆筒在斜面上的下滚运动示意图

由质心运动定理和转动定律可得

$$\begin{aligned}(m_1+m_2)\,a&=(m_1+m_2)\,g\sin\theta-f\\(I_1+I_2)\,\alpha&=fR\end{aligned}\tag{1}$$

式中,m_1、m_2 分别是手机和圆筒的质量,I_1、I_2 分别是手机和圆筒绕圆筒轴线(即手机长轴)的转动惯量,a 是质心沿斜面方向的加速度,α 是角加速度,R 是圆筒外半径。结合无滑滚动条件 $a=\alpha R$,容易得到角加速度

$$\alpha=\frac{(m_1+m_2)\,gR\sin\theta}{(m_1+m_2)\,R^2+I_1+I_2}\tag{2}$$

考虑圆筒存在壁厚,设圆筒内半径为 r,则圆筒绕其轴线的转动惯量为 $I_2=m_2(R^2+r^2)/2$。由公式(2)可求得手机绕其长轴的转动惯量

$$I_1=(m_1+m_2)\left(\frac{gR\sin\theta}{\alpha}-R^2\right)-\frac{m_2(R^2+r^2)}{2}\tag{3}$$

由公式(2)还可以看出,角加速度 α 与 $\sin\theta$ 成正比关系

$$\alpha=k\sin\theta\tag{4}$$

式中 $k=\dfrac{(m_1+m_2)gR}{(m_1+m_2)R^2+I_1+I_2}$ 为仅与系统参数有关的常数。将 $\alpha=k\sin\theta$ 代入公式(3)可得

$$I_1=(m_1+m_2)\left(\frac{gR}{k}-R^2\right)-\frac{m_2(R^2+r^2)}{2}\tag{5}$$

因此,通过在多个不同倾角 θ 下分别测量角加速度 α,对 α 与 $\sin\theta$ 进行线性拟合可以求得斜率 k,再由公式(5)即可获得手机转动惯量的实验测量值。这种方法综合利用了多组实验数据,结果更为可靠。上式中各物理量均可直接测得或由拟合得到。若将手机视为质量均匀分布的长方体,其绕长轴的转动惯量理论值为

$$I_1=\frac{m_1(d^2+w^2)}{12}\tag{6}$$

其中,d 和 w 为手机的厚度和宽度。对比理论值与实验值,并对实验结果进行不确定度评估,可以

检验该方法的可靠性。需要指出的是，理论值(6)本身基于质量均匀分布和理想长方体两项近似，真实手机并不严格满足这些条件，因此理论值存在不可忽略的模型误差。

2 实验内容

2.1 实验装置

本实验所需器材包括手机、电脑、硬圆纸筒、斜面、双面胶、电子天平、游标卡尺。实验装置如图2所示。

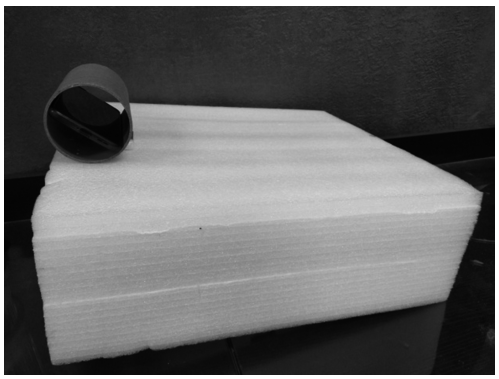

图2 实验装置图

2.2 实验步骤

(1) 利用电子天平测量出手机和硬圆纸筒的质量，用游标卡尺测出手机的厚度和宽度以及圆筒的内径和壁厚；

(2) 垫高桌子或其他平面以构建斜面，打开Phyphox的斜面功能测出倾角θ；

(3) 打开Phyphox的滚筒实验，使用远程控制功能将实验共享到电脑，设置滚筒半径为由步骤1测量得到的圆筒外径；

(4) 将手机固定于圆筒中间位置，使用双面胶确保手机紧密贴合无晃动；

(5) 将圆筒放置在斜面顶端，在电脑端点击运行开始记录实验数据，然后自由释放圆筒，使其在斜面上无滑滚动；

(6) 圆筒停止滚动后，点击暂停实验并导出数据；

(7) 系统改变斜面倾角(建议在10°～20°范围内选取5个不同的倾角)，在每个倾角下重复上述步骤(2)至步骤(6)，记录并保存所有实验数据。

2.3 实验结果与分析

本次实验所用手机品牌为红米K50，装配手机壳后测得质量为225.0g，厚度为10.14mm，宽度为77.84mm。圆筒质量83.5g，内径为80.00mm，壁厚3.00mm。

为系统研究不同倾角对实验结果的影响，我们分别在$\theta=10.0°$、13.0°、15.0°、17.0°和20.0°五个倾角下进行了实验。图3给出了五个倾角下角速度ω随时间t变化的实验数据及其线性拟合结果。由图可以观察到：(1)随着倾角的增大，ω-t曲线在下滚阶段的斜率明显增大，表明角加速度随倾角增大而增大，这与公式(2)的理论预测定性一致；(2)倾角越大，圆筒到达斜面底端所需的时间越短，有效数据采集的时间区间变窄；(3)在所有倾角下，下滚阶段的ω-t关系均保持良好的线性特征，线性相关系数R^2均大于0.999，说明圆筒在各倾角下均近似做匀加速滚动。

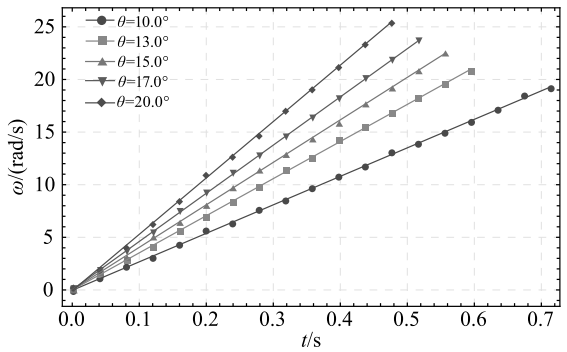

图3 五个不同倾角下圆筒下滚的角速度-时间曲线及线性拟合结果(从左至右倾角依次增大，斜率依次增大)

各倾角下线性拟合得到的角加速度α和线性相关系数R^2汇总如下：$\theta=10.0°$时$\alpha=27.0\text{rad/s}^2$($R^2=0.9993$)，$\theta=13.0°$时$\alpha=35.2\text{rad/s}^2$($R^2=0.9996$)，$\theta=15.0°$时$\alpha=40.5\text{rad/s}^2$($R^2=0.9998$)，$\theta=17.0°$时$\alpha=45.7\text{rad/s}^2$($R^2=0.9996$)，$\theta=20.0°$时$\alpha=53.5\text{rad/s}^2$($R^2=0.9994$)。可以看到，中间三个倾角(13°～17°)的$R^2$值最高，而10°和20°处的$R^2$略低，这可能分别是因为小倾角下摩擦效应相对较大以及大倾角下采集数据点较少所致。

根据公式(4)，角加速度α应与$\sin\theta$成正比。图4(a)给出了α与$\sin\theta$的关系及其过原点的线性拟合结果。由图可见，五个实验数据点与拟合直线吻合良好，线性相关系数$R^2=0.99997$验证了理论预测的正比关系。拟合得到的斜率为$k=156.3\text{rad/s}^2$。由公式(5)可求得手机转动惯量的

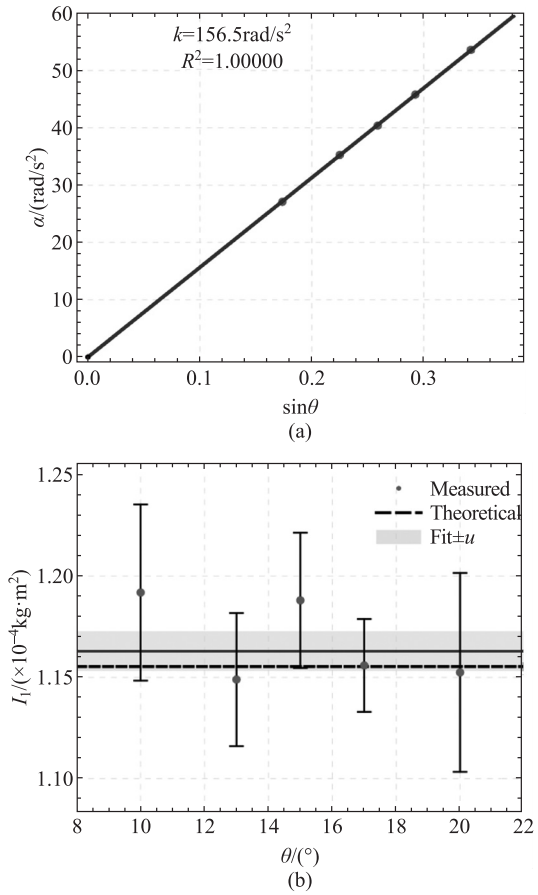

图 4 实验数据结果

(a) 角加速度 α 与 $\sin\theta$ 的关系及过原点的线性拟合；(b) 不同倾角下由公式(3)独立计算的 I_1 值(数据点及误差棒)，虚线为理论值，阴影区域为拟合值的不确定度范围

实验值为

$$I_1=(m_1+m_2)\left(\frac{gR}{k}-R^2\right)-\frac{m_2(R^2+r^2)}{2}$$
$$=1.17\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2} \quad (7)$$

由公式(6)可求得手机转动惯量的理论值为

$$I_1=\frac{m_1(d^2+w^2)}{12}=1.155\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2} \quad (8)$$

实验值相对理论值的偏差为 1.3%。关于不确定度的定量评估将在下节给出。

为了进一步检验不同倾角下实验结果的一致性，我们利用公式(3)分别由每个倾角的(α,θ)独立计算了手机的转动惯量，结果如图 4(b)所示。各倾角下得到的 I_1 值分别为：$\theta=10.0°$ 时 $I_1=1.215\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，$\theta=13.0°$ 时 $I_1=1.163\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，$\theta=15.0°$ 时 $I_1=1.165\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，$\theta=17.0°$ 时 $I_1=1.174\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，$\theta=20.0°$ 时 $I_1=1.166\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$。除 10°的测量值略偏高外，其余四个倾角所得结果相互吻合，且理论值(图中虚线)均落在各测量值的不确定度范围内。10°处的偏高可归因于小倾角下滚动摩擦的相对影响增大。五组数据的算术平均值为 $\overline{I_1}=1.177\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，排除 10°后的四组平均值为 $1.167\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，均与理论值和拟合值高度一致，排除了特定条件下凑合数据的可能性。

2.4 误差分析与不确定度评估

对实验结果的评估，我们遵循先分析系统误差并进行合理修正，再评估标准不确定度的原则进行[11]。

2.4.1 系统误差分析

在进行标准不确定度评估之前，需先对实验中可能存在的系统误差来源进行识别和讨论。

(1) 角加速度 α 的系统偏差。在实验操作时，可能会由于手机宽度与实验所用圆筒内径不匹配，导致手机相对圆筒来说过小或过大。过小会导致手机在筒内发生晃动，测得数据会产生额外散布；过大则会导致圆筒变形，下滚运动偏离匀加速。建议选择内径较手机宽度大 1mm 左右的圆筒，然后通过在手机两侧粘贴双面胶的方式来满足要求。此外，斜面不应过于光滑，如果圆筒在下滚过程中发生打滑，也会带来角加速度的系统偏差。判断数据质量可以通过线性相关系数实现，越接近于 1，表明运动越趋近于匀加速下滚。

(2) 滚动摩擦的影响。实验实测值略高于理论值，五个倾角的平均偏差为 1.3%～1.9%。这种系统性偏高可能是由滚动摩擦所致。滚动摩擦阻力矩会使实测角加速度略小于理论无摩擦值，从而导致由式(3)或(5)反推得到的 I_1 偏大。该效应在小倾角(如 10°)下尤为显著，这与图 4(b)中 10°数据点偏高的实验观测一致。由于缺乏对滚动摩擦系数的精确测量，本文未对该系统偏差进行定量修正，但将其作为已识别的系统效应加以说明。

(3) 斜面倾角 θ 的测量。对单一角度的测量而言，实验结果对 θ 十分敏感，θ 相差 0.5°即可引起超过 10%的偏差。因此，本文采用的多角度线性拟合方法能够有效降低角度测量误差的影响。在测量倾角时，需使用 Phyphox 的斜面功能先在水平面上进行校准，测量结果至少保留 1 位小数。也可对斜面进行拍照，将照片导入 Tracker 中进行角度的交叉检验。

(4) 理论模型的近似。理论计算将手机近似

为质量均匀分布的长方体，然而真实手机内部元器件分布不均（如电池、主板、摄像头等），且外形偏离理想长方体（如后置摄像头凸起、边缘圆角等）。这些因素使得理论值本身存在难以精确量化的模型误差。不过，实验值与理论值的一致性表明，均匀长方体近似对本实验中的手机是合理的。

综上，除滚动摩擦带来的1%～2%系统正偏差外，其余系统误差通过合理的实验操作和数据处理方法已将其影响降至最低。以下在此基础上对实验结果进行标准不确定度评估。

2.4.2 测量模型与直接测量量的标准不确定度评定

由公式(5)，手机转动惯量 I_1 为间接测量量，其测量模型为

$$I_1 = f(k,R,r,m_1,m_2) = \frac{(m_1+m_2)gR}{k} - (m_1+m_2)R^2 - \frac{m_2(R^2+r^2)}{2} \tag{9}$$

其中 k 为 α-$\sin\theta$ 线性拟合斜率，R、r 分别为圆筒外半径和内半径，m_1、m_2 分别为手机和圆筒质量。根据GB/T 27418—2017，标准不确定度的评定分为A类（用统计方法评定）和B类（用非统计方法评定）两类分量。各直接测量量的标准不确定度评定如下。

(1) 斜率 k 的标准不确定度（A类）

斜率 k 由 α 和 $\sin\theta$ 的过原点加权最小二乘拟合获得，其不确定度通过统计方法评定，属于A类标准不确定度。以各角加速度的拟合标准不确定度作为权重，斜率的A类标准不确定度为

$$u_A(k) = \frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\sqrt{\sum_{i=1}^{5}\sin\theta_i{}^2}} \tag{10}$$

其中，$\bar{\sigma}_\alpha$ 为五个倾角下 ω-t 线性拟合残差的平均标准不确定度。计算得 $u_A(k)\approx 0.4\,\mathrm{rad/s^2}$，由于 k 无B类分量，其合成标准不确定度 $u_c(k)=u_A(k)=0.4\,\mathrm{rad/s^2}$。

(2) 圆筒外半径 R 的标准不确定度（B类）

外半径由 $R=d/2+t$ 计算得到，其中内径 $d=80.00\,\mathrm{mm}$、壁厚 $t=3.00\,\mathrm{mm}$ 均由分度值为 $0.02\,\mathrm{mm}$ 的游标卡尺单次测量得到。游标卡尺的最大允差 $\Delta_{仪}=0.02\,\mathrm{mm}$，其误差近似服从均匀分布[11]，B类标准不确定度为

$$u_B(d)=u_B(t)=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}\approx 0.01\,\mathrm{mm} \tag{11}$$

由不确定度传递，R 的合成标准不确定度为

$$u_c(R)=\sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 u_B^2(d)+u_B^2(t)}\approx 0.01\,\mathrm{mm} \tag{12}$$

(3) 圆筒内半径斜率 r 的标准不确定度（B类）

$r=d/2$，故 $u_c(r)=u_B(d)/2\approx 0.005\,\mathrm{mm}$。

(4) 质量 m_1、m_2 的标准不确定度（B类）

电子天平的分度值为 $0.1\,\mathrm{g}$，最大允差 $\Delta_{仪}=0.1\,\mathrm{g}$，误差近似服从均匀分布，B类标准不确定度为

$$u_B(m_1)=u_B(m_2)=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}\approx 0.06\,\mathrm{g} \tag{13}$$

2.4.3 间接测量量 I_1 的合成标准不确定度

I_1 为间接测量量，根据不确定度传递公式[11]，其合成标准不确定度为

$$u_c(I_1)=\sqrt{\begin{aligned}&\left(\frac{\partial I_1}{\partial k}\right)^2 u_c^2(k)+\left(\frac{\partial I_1}{\partial R}\right)^2 u_c^2(R)+\\&\left(\frac{\partial I_1}{\partial r}\right)^2 u_c^2(r)+\left(\frac{\partial I_1}{\partial m_1}\right)^2 u_c^2(m_1)+\\&\left(\frac{\partial I_1}{\partial m_2}\right)^2 u_c^2(m_2)\end{aligned}} \tag{14}$$

其中，偏导数 $\partial I_1/\partial x_j$ 为各直接测量量的灵敏系数，描述了 I_1 随 x_j 变化的敏感程度。由测量模型式(9)求各偏导数

$$\begin{aligned}&\frac{\partial I_1}{\partial k}=-\frac{(m_1+m_2)gR}{k^2},\\&\frac{\partial I_1}{\partial R}=\frac{(m_1+m_2)g}{k}-2(m_1+m_2)R-m_2R,\\&\frac{\partial I_1}{\partial r}=-m_2r,\\&\frac{\partial I_1}{\partial m_1}=\frac{gR}{k}-R^2,\\&\frac{\partial I_1}{\partial m_2}=\frac{gR}{k}-R^2-\frac{R^2+r^2}{2}\end{aligned} \tag{15}$$

代入各参数值计算各灵敏系数对 I_1 不确定度的贡献，可知拟合斜率 k 的不确定度是 I_1 不确定度的主要来源，其贡献占总方差的99%以上。圆筒半径和质量的测量不确定度贡献均可忽略。将各项代入式(14)，得到的合成标准不确定度为 $u_c(I_1)\approx 2.2\times10^{-6}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，相对合成标准不确定度为 $u_c(I_1)/I_1\approx 1.9\%$。

2.4.4 测量结果

综合以上分析，手机转动惯量的实验测量结

果为 $I_1=(1.17\pm0.02)\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$，其中 $0.02\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$ 为合成标准不确定度。理论值 $I_{1,\mathrm{theo}}=1.155\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，落在实验结果 $[1.15,1.19]\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$ 的不确定度范围之内，两者在 1 倍标准不确定度内一致，表明该实验方法可靠。

2.5 虚拟仿真实验

为进一步丰富本实验的教学资源，我们参考清华大学 H5 数值仿真物理实验（NuSEP）的建设思路[9]，利用 AI 辅助编程[10]，开发了一套基于 HTML5 的滚筒法转动惯量虚拟仿真实验。该仿真采用 HTML5 架构配合 Three.js 三维渲染引擎构建，用户无需安装任何插件，即可通过个人电脑、平板电脑或智能手机的浏览器直接访问运行，具备良好的跨平台兼容性与大规模传播能力。

仿真界面如图 5 所示，分为参数设置区、三维可视化区和结果显示区三个模块。参数设置区提供斜面倾角 θ、手机质量 m_1、手机厚度 d、圆筒内径 $2r$、壁厚及圆筒质量 m_2 共六个可调参数，每个参数均配备数值输入框与滑动条，支持实时联动调节。用户单击“开始仿真”后，系统依据本文式(2)～(6)实时计算理论转动惯量、角加速度和质心线加速度，并在三维可视化区以动画形式展示圆筒沿斜面的无滑滚动过程。三维场景支持鼠标左键旋转、右键平移和滚轮缩放，用户可从任意视角观察运动细节。圆筒采用透明材质渲染，内部嵌入的手机模型清晰可见，直观呈现了实验装置的组装结构。

该虚拟仿真实验在教学中发挥了三方面作用：其一，作为实体实验的预习环节，学生可在正式实验前通过仿真熟悉实验原理与操作流程，建立直观的物理图像；其二，作为变参数探究的辅助工具，学生可自由调节各参数观察角加速度和转动惯量的变化趋势，加深对公式(2)中各物理量之间定量关系的理解，这在实体实验中受器材限制往往难以实现；其三，作为居家实验或课后复习的补充资源，满足了不同教学场景下的灵活需求。值得一提的是，该仿真的核心代码由 AI 大模型（DeepSeek）辅助生成，开发者仅需用自然语言描述物理模型和界面需求，AI 即可快速输出可运行的 JavaScript 代码框架，再经人工修正与调试即可完成部署，整个开发周期不超过一周，充分体现了 AI 辅助编程在物理教学资源建设中的高效性。

3 教学设计

我们在全校公选课《物理建模仿真与实验设计》上进行了本实验的教学实践，时长 4 学时。该课程以中国大学生物理学术竞赛（CUPT）为目标牵引，旨在培养学生运用物理知识解决实际问题的能力，锻炼发散思维，培养创新精神。本次课的

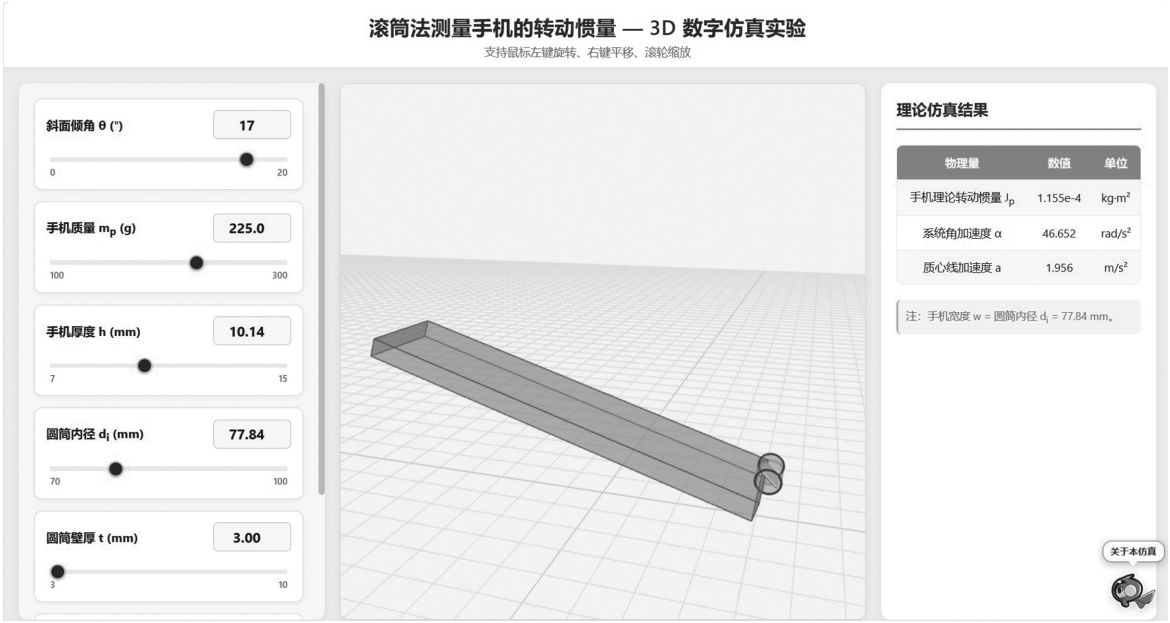

图 5 基于 H5 的滚筒法虚拟仿真实验界面

教学目的是让学生掌握如何使用 Phyphox 软件，以及如何利用生活中常见的器材工具进行合理的实验设计，怎样运用人工智能辅助编程进行数据处理与误差分析。经过教学实践我们发现，本次课取得了良好的效果，达成了预设的教学目标，有可能推广到《大学物理》或《大学物理实验》课程中去。下面给出本次课的具体教学设计。

3.1 课前准备

本实验对场地要求不高，无需在实验室环境下进行。以 30 人的课堂为例，普通的具备桌椅与投影设备的教室即可满足授课条件。课前教师让学生自由组成 2 人一组的小组，每组自带一部手机和一台笔记本电脑，并且提前在手机上安装好 Phyphox，在电脑上安装 Mathematica。此外，教师需定制 15 个硬圆纸筒。当前主流手机的宽度在 71～74mm，少部分大屏手机会接近 80mm。再考虑到大部分人会装配手机壳，因此为满足手机在圆筒中无晃动的要求，建议教师准备 10 个 76mm、5 个 80mm 内径的圆筒。上课前让学生根据自己手机的尺寸自主选择圆筒。另外，教师还需准备电子天平和游标卡尺各一套，方便学生共同使用。所有器材成本总价不超过 200 元。相较现行大学物理实验课程中动辄几千元一套的设备来说，本实验具有明显的成本优势。

3.2 新课引入

本节课要求学生已经学习完转动定律和转动惯量的前置知识，并且熟悉刚体的平面平行运动问题。教师可以通过复习引入，提问学生一个质量均匀分布的圆盘在斜面上做无滑滚动的加速度是多少。如果学生可以正确回答出 $a=2g\sin\theta/3$，表明学生掌握较好，可以继续讲解新课。如果学生忘记答案，教师可进行引导，需要应用何种定律和条件进行问题求解？学生应回答转动定律和无滑滚动条件。通过简单的数学推导，便可得出结论。由此教师再提问引出本节课：如何利用大家手中的圆筒和手机，以及刚才的理论工具，测量出手机的转动惯量？学生经过简单的思考和讨论后，教师便可正式开始本节课的讲授。

3.3 新课讲授

教师可利用手机的投屏功能，将自己手机的 Phyphox 软件界面实时投放到屏幕上，为学生边演示边讲解 Phyphox 基于手机传感器的各种实验功能，学生可进行跟随操作练习。比如打开“光”实验，教师只需用手遮住手机的光传感器，便可在界面上看到光强随时间的变化图线；再比如打开“陀螺仪”实验，教师在各个方向上转动手机，学生就可看到各方向角速度的变化。随后教师再讲解如何将实验数据共享到电脑上。这需要用户的手机和电脑处于同一网络环境下，比如用电脑连接手机的热点网络，再用手机开启实验的远程控制权限。由于在后续开展实验时手机处于圆筒内，实验者无法操作手机，因此用电脑进行远程控制对本实验来说是必须的。讲解完 Phyphox 的原理和基本操作后，便可以进行滚筒法理论的介绍，也就是本文第一节所涉及的式(1)～(4)的推导。该部分建议教师通过板书带领学生一步步推导，特别是要强调 α 与 $\sin\theta$ 的正比关系以及多角度拟合方法的优势，这对理解本实验的设计思想具有重要意义。

3.4 学生实验

教师将实验步骤和注意事项投放在屏幕上，学生即可按照步骤进行小组实验。教师巡视学生实验情况，对实验中发生的问题及时予以指导。在教学实践过程中，笔者发现学生实验主要存在两个问题：一是手机尺寸不恰当，无法固定在圆筒中央。针对这个问题，教师可以提示学生，可以通过增减手机壳的方式改变宽度，如果装配手机壳后仍然有空隙导致晃动，可以在手机两侧对称粘贴纸条以增加宽度，但是要注意在应用公式计算质量时，需考虑手机壳和纸条的质量。二是斜面构建不合理。部分学生将书本或者笔记本电脑支架作为斜面，这会致使实验时斜面发生晃动从而带来误差。还有的学生桌面垫高不够或者过高，导致倾角测量误差较大，且由此带来的圆筒下滚过慢或过快都不利于数据的采集。合理的做法是将桌面垫至倾斜 10°～20°，并且保证稳定无晃动。

3.5 数据处理

在传统的大学物理实验课上，数据的记录与分析处理对学生来说是一件繁琐困难的事情。在本次课上，笔者尝试将人工智能辅助编程引入数据处理教学，取得了良好的效果。具体而言，在学生完成实验获得数据后，教师提示学生可以利用 DeepSeek 或者豆包等 AI 工具进行处理，比如给出提示词：“请你帮我编写一段 Mathematica 代码，拟合出 Excel 表格中角速度和时间的关系，给出相关系数，求出角加速度。”这样 AI 可以立刻给出符合要求的代码。这样，即使学生没有相应的编程基础，也可以完成数据处理的任务。对于多

角度实验，还可以进一步给出提示词："请对五组角加速度和对应的 $\sin\theta$ 进行过原点的线性拟合，求出斜率和拟合不确定度。"特别是 Mathematica 界面简洁，无需额外的环境配置，代码编写和结果输出都是所见即所得，学生非常容易上手。

4 总结

本文介绍了如何使用滚筒法来测量手机的转动惯量。我们在五个不同倾角下系统开展了实验，通过 α-$\sin\theta$ 的线性拟合获得了手机转动惯量的实验值 $I_{1,\mathrm{exp}}=(1.17\pm0.02)\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$，与理论值 $I_{1,\mathrm{theo}}=1.155\times10^{-4}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$ 在不确定度范围内一致，相对偏差仅为 1.3%。不同倾角下独立测量的转动惯量值相互吻合良好，验证了该方法的可靠性与可重复性。虽然从实验角度来讲，该方法具有一定局限性，仅能用于测量手机绕自身长轴的转动惯量，难以推广至其他一般的刚体，且实验精度较现行方法未有明显优势。但是该实验方法在物理教学上具有较高的应用价值。首先，实验原理清晰易懂，通过大学物理理论课上的刚体知识点的简单推广便可得出相应结论；其次，实验条件上便捷可行，如前所述，除需学生自带电脑和手机外，其他器材成本仅百余元，对于硬件条件有限的学校来说这无疑是十分有益的；最后，在能力达成方面，通过本节课的学习，学生不仅加深了对转动惯量知识点的理解，还掌握了如何使用包括 Phyphox、Mathematica 和人工智能在内的现代信息技术工具来进行实验数据的获取和分析，特别是学会了变参数的系统实验方法和不确定度评估方法，这对学生创新能力的培养是至关重要的。综上所述，利用滚筒法来测量手机转动惯量的实验方法是具有积极意义的。

参 考 文 献

[1] 李正天，胡琦珩，冯一帆，等. 利用智能手机测定刚体转动惯量[J]. 物理与工程，2017，27(6)：108-110.
LI Z T, HU Q H, FENG Y F, et al. Measurement of the moment of inertia of a rigid body using smartphone[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(6): 108-110. (in Chinese)

[2] 时天宇，冷宜霖，陈泽坤，等. 基于转动惯量平台与智能手机的教研实验探究[J]. 物理与工程，2017，27(4)：66-69，78.
SHI T Y, LENG Y L, CHEN Z K, et al. Research on teaching and experiment exploration based on rotating inertia platform and smartphone[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(4): 66-69, 78. (in Chinese)

[3] 黄建成，石峰宇，赵昶，等. 智能手机陀螺仪传感器测量转动惯量研究[J]. 物理与工程，2018，28(3)：103-108.
HUANG J C, SHI F Y, ZHAO C, et al. Measurement of the rotary inertia by the gyroscope sensor in smartphone[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(3): 103-108. (in Chinese)

[4] 陈国华，程敏熙. 智能手机磁传感器在落体法测量刚体转动惯量中的应用[J]. 大学物理实验，2020，33(6)：55-57，71.
CHEN G H, CHENG M X. The application of a smartphone magnetic sensor for the moment of inertia of rigid body using the falling body method[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(6): 55-57, 71. (in Chinese)

[5] 贺梓淞，焦梦鸽，江宜航，等. 基于智能手机传感器和 phyphox 软件精确测量刚体转动惯量[J]. 实验科学与技术，2023，21(4)：32-36.
HE Z S, JIAO M G, JIANG Y H, et al. Accurately measuring the moment of inertia of rigid body based on smartphone sensor and Phyphox software[J]. Experiment Science and Technology, 2023, 21(4): 32-36. (in Chinese)

[6] 刘梦林，齐敬强. 基于手机 Phyphox 软件测量刚体转动惯量[J]. 大学物理实验，2025，38(1)：100-104
LIU M L, QI J Q. Measuring the moment of inertia of rigid body based on Phyphox software of mobile phone[J]. Physical Experiment of College, 2025, 38(1): 100-104. (in Chinese)

[7] 徐钱欣，丁益民，范兵，等. 利用智能手机测物体转动惯量的居家 DIY 实验[J]. 物理与工程，2020，30(6)：95-99.
XU Q X, DING Y M, FAN B, et al. Home DIY experiment of measuring the moment of inertia of an object with a smartphone[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(6): 95-99. (in Chinese)

[8] 易伟松，刘熹微，何展航，等. 利用智能手机磁力计定量测量刚体转动惯量[J]. 大学物理实验，2021，34(6)：36-39.
YI W S, LIU X W, HE Z H, et al. Quantitative measurement moment of inertia of rigid body with the built-in magnetometer on smartphone[J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(6): 36-39. (in Chinese)

[9] 顾晨，张留碗，魏斌，等. 清华大学 H5 数值仿真物理实验建设[J]. 物理与工程，2022，32(4)：125-130.
GU C, ZHANG L W, WEI B, et al. Construction of H5 numerical simulation experiment of physics in Tsinghua university[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(4): 125-130. (in Chinese)

[10] 张文号. 基于人工智能编程的大学物理教学创新实践[J]. 物理与工程，2025，35(5)：158-168.
ZHANG W H. Innovation practice of college physics teaching based on artificial intelligence programming[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 158-168. (in Chinese)

[11] 吴平，张师平，万初斌. 大学物理实验教学中的实验数据处理与不确定度评定[J]. 物理与工程，2025，35(6)：138-145，164.
WU P, ZHANG S P, WAN C B. Data processing and uncertainty evaluation in university physics experimental teaching[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 138-145, 164. (in Chinese)

■