

文章编号:1005-4642(2024)11-0057-06

数显式向心力定量探究仪研制

向悦^{1,2}, 董小庆³, 代珍兵¹

(1. 四川师范大学 物理与电子工程学院, 四川 成都 610101;

2. 华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200241;

3. 四川师范大学附属青台山中学, 四川 成都 610101)

摘要:针对现有中学物理教材中手摇式向心力实验装置存在的测量精度和重复性差等不足,利用现代传感技术和数显仪表对原有实验仪器进行改进,自制了数显式向心力定量探究仪。该装置具有设计巧妙、测量精确、操作简单等优点,通过控制变量法可以定量地探究向心力大小公式,有助于学生深入理解圆周运动的物理原理。

关键词:向心力;圆周运动;数显式;自制教具

中图分类号:G633.7

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2024.11.008

1 教材实验装置的不足之处

实验教学是落实课程目标、全面提升学生科学素养的重要途径^[1],仪器设计在实验教学中占据十分重要的地位。近年来,物理课程改革对学生科学素养的培养提出了更高要求,《普通高中物理课程标准(2017年版,2020年修订)》明确要求“学生探究并理解匀速圆周运动中向心力大小与半径、角速度、质量之间的关系”^[2]。其中,教科版^[3]、人教版^[4]和鲁科版^[5]教材中均采用类似的传统手摇式向心力演示器进行研究,如图1所示。

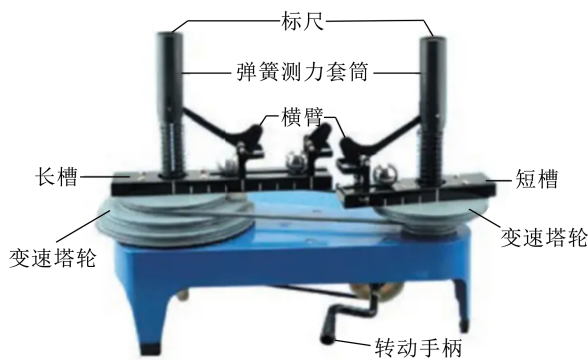


图1 2019 人教版必修2 中传统向心力演示器装置^[4]

教材实验装置存在以下不足:

- 1)通过手摇转动作为驱动力,转速不稳定。
- 2)只能根据红白相间的标尺长度粗略估算向心力的大小,测量误差大,只能进行半定量探究。
- 3)转动过程中,小球会向外挤压与弹簧相连的挡板,其圆周运动的半径会发生改变。
- 4)只能定性说明向心力与质量、半径和角速度之间的关系,不能进行定量处理和分析。

针对以上不足,已有改进方案:张艺馨^[6]与戎杰^[7]等人利用机械能守恒定律教具验证了向心力公式,但实验中存在转速不稳的问题;朱新培^[8]利用数字计时的半圆凹槽向心力定量演示仪对向心力表达式进行了探究,实验过程测量物理量少,操作方便,但无法直接读取向心力大小;王长江^[9]利用废旧器材和电子模块制作的向心力实验仪能充分调动学生学习的积极性,但实验仪电机档位固定,使得圆周运动角速度无法连续调节;江华^[10]与蓝荣^[11]设计的仪器具有良好的可视性和可操作性,但压力传感器随仪器一起做圆周运动,导致向心力的测量结果不精确。

本文开发了数显式向心力定量探究仪,该装置不仅可以实现稳定的匀速转动,还可以在不同质量、圆周半径和角速度下,精确测量向心力的大

收稿日期:2024-07-01;修改日期:2024-09-03

基金项目:四川师范大学开放实验项目(No. XJ20230082)

作者简介:向悦(1999—),女,四川广安人,四川师范大学物理与电子工程学院2018级本科生,华东师范大学物理与电子科学学院2022级研究生,研究方向为计算凝聚态物理。E-mail:1649755730@qq.com

通信作者:代珍兵(1986—),男,四川成都人,四川师范大学物理与电子工程学院高级实验师,博士,从事中学物理实验仪器的开发和二维材料的近场光学研究。E-mail:daizbchina@aliyun.com

小,有助于学生亲身经历科学探究过程,深入理解匀速圆周运动中向心力的相关规律.

2 数显式向心力定量探究仪的设计与制作

2.1 仪器外观及结构

图 2 为数显式向心力定量探究仪,主要包含

6 个部分,分别是:盒式底座(64 cm×38 cm×18 cm)、可调速电机驱动系统、匀速圆周系统、角速度测量系统、向心力大小测量系统、仪器配件.为了避免竖直挂绳在连续转动过程中出现打结现象,采用 PVC 小块、轴承和打孔的螺钉设计制作了轴向旋转器.

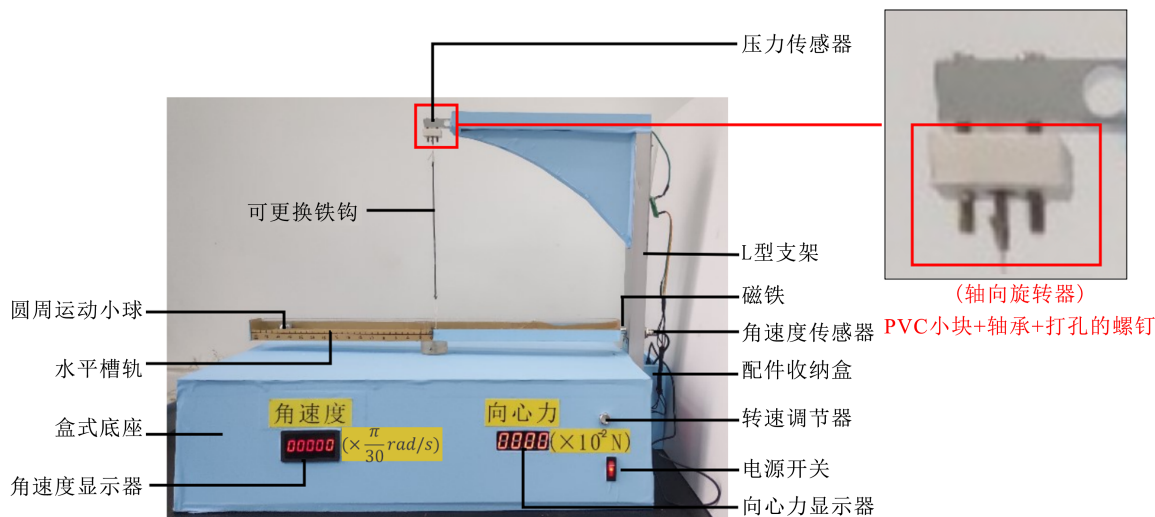


图 2 数显式向心力定量探究仪整体装置图

2.2 仪器制作

实验器材:PVC板、12 V 直流减速电机、12 V稳压电源、5 V 直流电源、转速调节器、亚克力板、滑轮、法兰、磁铁、金属支架、霍尔传感器、压力传感器(含 HX711 模块)、压力传感器校准板、压力显示器、轴承、平头螺钉、细棉线、小球、铁钩、导线、开关、插头等.

基于以上器材,对仪器的 6 个主要部分进行制作,然后按图 2 所示进行组装.

1)盒式底座:包括底座、电源开关及 L 型支架.底座主要材料是 PVC 板,底座右侧面安装配件收纳盒,底座内部放置可调速电机驱动系统及变压器,底座面板固定角速度大小显示器、向心力大小显示器、电源开关及转速调节器. L 型支架用螺钉固定于底座右侧,用于固定和安装压力传感器,以及悬挂待测小球.

2)可调速电机驱动系统:包括 12 V 直流减速电机、12 V 稳压电源、转速调节器、开关,电路连接方式如图 3 所示,调节转速调节器可控制直流减速电机的转速.将直流减速电机竖直固定在盒式底座内部中央,从盒式底座顶部露出电机转轴.

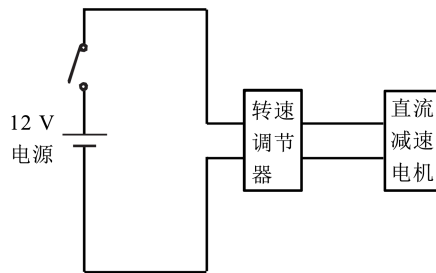


图 3 可调速电机驱动系统电路示意图

3)匀速圆周系统:设置在盒式底座的上方,包括带刻度的水平槽轨、滑轮和磁铁.带刻度槽轨由亚克力板粘接而成,其俯视图如图 4 所示.利用法兰将带刻度槽轨底部中心与电机转轴固定,由电机带动水平槽轨实现匀速转动,由此克服传统教具手摇转动转速不稳定的问题.滑轮固定于槽轨中心位置,用于改变绳上拉力的方向,用于测量向心力,同时保证在圆周运动过程中小球做圆周运动的半径保持不变.另外,槽轨无刻度一端外侧固定圆形磁铁,便于霍尔传感器接收信号,为角速度测量系统正常工作奠定基础.



图 4 水平槽轨俯视图(匀速圆周系统)

4)角速度测量系统:包括支架、霍尔传感器(SJA12-10N1 NPN 常开型霍尔接近开关)、角速度显示器(CF5135D-FR 转速表)。支架固定于盒式底座的右侧,霍尔传感器从侧面穿过 L 型支架固定在支架上与槽轨上磁铁等高的位置。当磁铁随着槽轨移动经过霍尔传感器时,霍尔传感器附近的磁场发生变化,产生脉冲信号,该信号被传输给高性能单片机作为中央处理器的角速度显示器(转速表)。角速度显示器采用全同步周期测量法,测量并计算得到槽轨的转速及角速度的大小。角速度显示器和霍尔传感器与 12 V 稳压电源连接,如图 5 所示。因此,利用该系统可以精准测量角速度,精度为 $\frac{\pi}{30}$ rad/s。

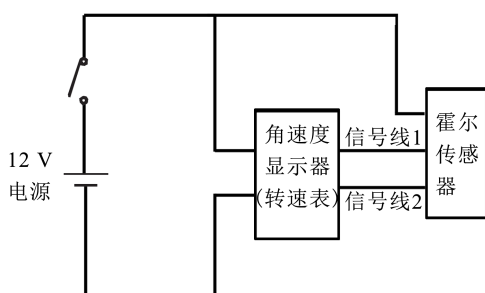


图 5 角速度测量系统电路示意图

5)向心力大小测量系统:设置在支架上方,包括压力传感器(含 HX711 模块)、压力传感器校准板、向心力大小显示器、轴向旋转器、打孔平头螺钉、细棉线、小球、铁钩。压力传感器利用应变式测力传感器的电阻应变片将试件上受力产生的应变转换为电阻变化^[12],即随着试件受力变形,通过应变片的电阻变化反映外界作用力的大小^[13],显示在向心力显示器上。轴向旋转器由轴承、PVC 板和打孔螺钉构成,将轴承嵌入 PVC 板,从轴承中心上方插入平头螺钉,平头螺钉尾部

及侧壁均打孔,细棉线从打孔平头螺钉下方穿入,侧面穿出并打结。压力传感器与轴向旋转器的 PVC 板用螺丝钉连接。铁钩一端挂在细棉线上,另一端挂在与小球相连的细线上。因此,轴向旋转器可有效避免压力传感器下方棉线缠绕导致的圆周运动半径变小的问题。在盒式底座的右侧面安装向心力校准模块,在实验前用于校准向心力,压力显示器本质上是数码管,与压力传感器校准板显示器并联,二者显示的读数相同,可精确显示向心力大小,精度达 10^{-2} N,实现精准定量测量。向心力大小测量系统电路如图 6 所示。

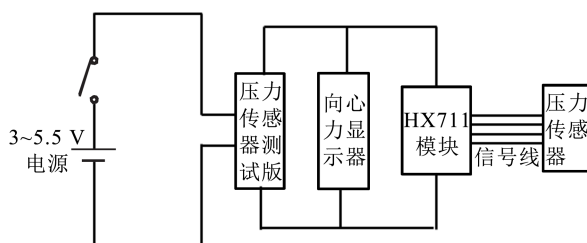


图 6 向心力大小测量系统电路示意图

6)仪器配件:包括质量不同但连接细线长度相同的小球及不同长度的铁钩,如图 7 所示。



图 7 数显式向心力定量探究仪成套配件

3 实验

采用控制变量法探究向心力公式 $F = mr\omega^2$, 通过 3 个案例介绍本装置的使用方法。

3.1 探究向心力 F 与角速度 ω 的关系

保证圆周运动的半径和物体的质量不变,只改变角速度,具体操作步骤如下:

1)选择合适的铁钩和小球,测量并记录小球质量 $m = 0.0323$ kg,将小球放置于槽轨,用细线

一端连接小球,另一端绕过槽轨中央的定滑轮,挂在铁钩上,铁钩另一端与压力传感器下方螺钉上的细线相连,读取并记录小球运动的圆周运动半径 $r=0.290\text{ m}$.

2) 插上电源,打开电源总开关,利用向心力传感器调节模块中的调零按钮将力传感器归零.

3) 顺时针调节电机调速器,改变槽轨的转动角速度 ω ,读取并记录不同 ω 对应的 F 值,结果如表 1 所示.

4) 借助软件(例如 Excel 或 Origin)对表 1 中的实验数据进行描点,得到 $F-\omega^2$ 的关系曲线,如图 8 所示.

表 1 向心力与角速度关系的实验数据

i	$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega^2/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^2$	F/N
1	2.702	7.300	0.060
2	3.581	12.823	0.115
3	4.189	17.548	0.155
4	4.482	20.088	0.180
5	4.974	24.740	0.230
6	5.288	27.963	0.270

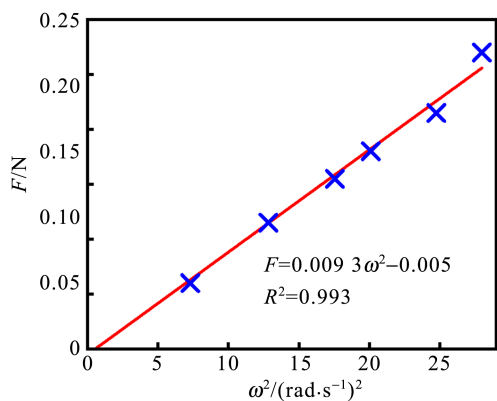


图 8 $F-\omega^2$ 关系曲线

从图 8 可以得出: F 与 ω^2 近似成正比. 拟合曲线的斜率 $k=0.009\ 3$, 与 $mr=0.009\ 4\text{ kg} \cdot \text{m}$ 的值相近, 进而得到了向心力公式 $F=m\omega^2 r$.

3.2 探究向心力 F 与小球质量 m 的关系

保持圆周运动半径 $r=0.290\text{ m}$ 和角速度 $\omega=4.189\text{ rad/s}$ 不变, 改变 m , 重复 3.1 中的操作步骤, 读取并记录 m 及 F 的值, 结果如表 2 所示.

对表 2 中的数据进行描点, 得到 $F-m$ 的关系

曲线, 该曲线为近似过原点的直线, 如图 9 所示. 说明 r 与 ω 不变时, 向心力 F 与质量 m 成正比.

表 2 向心力与质量关系的实验数据

i	m/kg	F/N
1	0.016 2	0.060
2	0.023 4	0.110
3	0.032 3	0.155
4	0.042 7	0.220
5	0.062 3	0.330
6	0.088 1	0.470

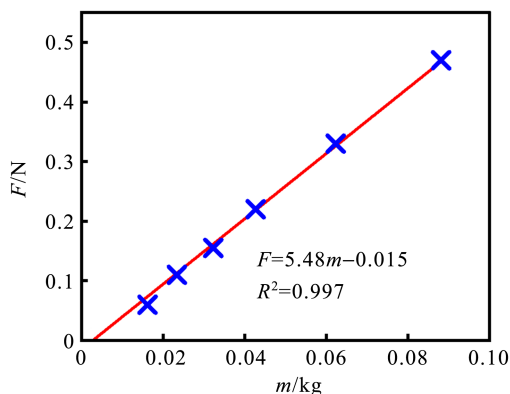


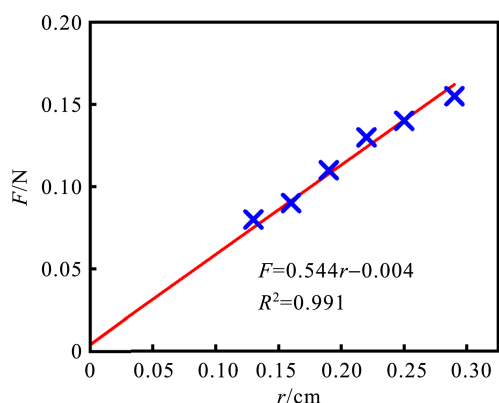
图 9 $F-m$ 的关系曲线

3.3 探究向心力 F 与圆周运动半径 r 的关系

保持小球质量 $m=0.03\ 23\text{ kg}$ 和圆周运动角速度 $\omega=4.189\text{ rad/s}$ 不变, 改变圆周运动半径 r (通过选择不同长度铁钩改变 r), 重复 3.1 中的操作步骤, 读取并记录 r 及 F 的值, 结果如表 3 所示. 对表 3 中的数据进行描点, 得到 $F-r$ 的关系曲线, 该曲线为近似过原点的直线, 如图 10 所示. 说明 m 与 ω 不变时, 向心力 F 与圆周运动半径 r 成正比.

表 3 向心力与半径关系的实验数据

i	r/m	F/N
1	0.290	0.155
2	0.250	0.140
3	0.220	0.130
4	0.190	0.110
5	0.160	0.090
6	0.130	0.080

图 10 $F-r$ 的关系曲线

通过以上 3 个实验,定量探究向心力与角速度平方、小球质量和圆周运动半径的关系,进而验证向心力公式 $F=mr\omega^2$ 。

4 仪器优势

本文自制的实验仪器可以弥补传统向心力实验装置存在的缺陷,具备一定的创新性,在实际教学中也得到了教学应用与推广。本装置的优势主要体现在以下方面:

1)物理量数字化显示,可视性强。利用现代传感器和数字显示装置可以直观准确地呈现物理量,如向心力 F 和角速度 ω 分别采用数字仪表显示,数据直观、准确,且读取方便,解决了传统仪器测量精度差的不足。因此,在课堂上使用本装置,能够有效吸引学生的注意力,提高学生的实验探究兴趣

2)小球转动稳定、可控。本装置采用电机驱动小球做匀速圆周运动,克服了传统仪器手摇式转动导致的转速不稳定的缺点,稳定性更好。另外,通过调节电机调速旋钮,可以便捷地改变圆周运动的角速度,且实验数据精确、可重复性强,可以为学生推导向心力公式提供强有力的支撑。

3)操作方便,实验效率高。通过更换不同质量的小球和不同长度的铁钩,可以快速改变做圆周运动的物体质量和半径,从而有助于教师更好地完成相关实验、分析实验现象,提升课堂效率。

5 结束语

本文设计并制作了数显式向心力定量探究仪,可定量探究向心力与小球质量、角速度以及圆周运动半径之间的关系。本文详细介绍了仪器的制作要点、工作原理和使用方法。该装置设计巧妙,可作为探究、验证向心力公式 $F=mr\omega^2$ 的教学实验装置。

参考文献:

- [1] 裘思远. 借助新技术提升高中物理实验演示效果[J]. 物理教师, 2014, 35(10): 53-55.
- [2] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版, 2020年修订)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2020.
- [3] 蔡铁权, 周昌鲜, 尹强, 等. 普通高中教科书·物理(必修第二册)[M]. 北京: 教育科学出版社, 2019: 34.
- [4] 张颖, 张玉峰, 梁旭. 普通高中教科书·物理(必修第二册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 2019: 29.
- [5] 廖伯琴, 林明华, 杜明荣, 等. 普通高中教科书·物理(必修第二册)[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2019: 62.
- [6] 张艺馨. 用 DIS 机械能守恒实验器定量探究向心力[J]. 中学物理教学参考, 2018, 47(24): 48-49.
- [7] 戎杰, 郭拯, 胡科杰. 自制验证“向心力”公式和“机械能守恒定律”教具[J]. 物理教师, 2019, 40(8): 57-59.
- [8] 朱新培. 向心力演示器的创新改进: 基于数字计时的半圆凹槽向心力定量演示仪[J]. 物理教师, 2022, 43(9): 56-58.
- [9] 王长江, 任新成. 定量探究向心力实验仪[J]. 物理实验, 2012, 32(7): 21-22, 26.
- [10] 江华, 张伟林. 向心力影响因素探究仪[J]. 物理实验, 2020, 40(4): 59-61.
- [11] 蓝荣. 基于蓝牙技术的向心力探究演示仪[J]. 物理实验, 2019, 39(1): 58-60, 64.
- [12] 潘学军. 大学物理实验(基础物理部分)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 259-263.
- [13] 代珍兵, 董小庆, 潘学军. 数字式滑动摩擦力演示仪[J]. 物理教学探讨, 2011, 29(10): 53-55.

Design and fabrication of a digital instrument for quantitative investigation of centripetal force

XIANG Yue^{1,2}, DONG Xiaoqing³, DAI Zhenbing¹

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;
2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. Qingtaishan Middle School Attached to Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: To address the limitations of centripetal force experimental devices commonly found in middle school physics textbooks, i. e. poor measurement accuracy and repeatability, a self-designed digital centripetal force quantitative exploration instrument was presented through the improvement of the original apparatus based on the modern sensing technology and digital display instruments. Featuring a well-designed structure, high measurement accuracy, and user-friendly operation, this device enabled students to accurately investigate the centripetal force formula through the controlled variable method, fostering a more intuitive and in-depth understanding of circular motion principles.

Key words: centripetal force; circular motion; digital display; self-made teaching aids

[编辑:龙玉梅]

(上接 56 页)

- | | |
|---|--|
| <p>[2] 徐梓莹,吴楚金,李倩,等.《义务教育地理课程标准(2022年版)》中“教学提示”的意蕴及使用建议[J].地理教学,2023(6):21-23.</p> <p>[3] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.普通高中物理课程标准实验教科书·物理(必修1)[M].北京:人民教育出版社,2019:64.</p> | <p>[4] 熊建文.普通高中教科书·物理(必修第一册)[M].广州:广东教育出版社,2020:72.</p> <p>[5] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.义务教育教科书·物理(八年级下册)[M].北京:人民教育出版社,2012:23.</p> |
|---|--|

Organizing teaching based on instructional prompts to develop students' scientific inquiry skills ——Taking sliding friction as an example

LIU Changcan

(Panyu Middle School, Guangzhou 511400, China)

Abstract: This paper analyzed the group oriented, nature, and content of the instructional prompts in the curriculum standards. Taking sliding friction as an example, it illustrated how to organize classroom teaching based on instructional prompts. Recommendations were made for creating situations to stimulate inquiry enthusiasm and cultivate problem awareness, for following teaching activity suggestions to cultivate the ability to formulate plans and gather evidence, and for implementing task requirements to develop analytical reasoning and evaluate communication skills. Organizing teaching based on instructional prompts could develop students' scientific inquiry literacy.

Key words: instructional prompts; scientific inquiry; core competencies; sliding friction

[编辑:龙玉梅]