

基于 ESP32 的智能追光教具设计与教学应用

常 威^{1,2} 袁 静¹ 陈 建¹ 许巍严¹ 罗小成^{1,2}

1.内江师范学院物理与电子信息工程学院 四川 内江 641100

2.四川省“中小学智能教仪研发与应用”高校重点实验室（内江师范学院） 四川 内江 641002

【摘 要】：目的：针对初中物理“能量转化效率”教学中实验载体不足、数据呈现不连续和现象感知较弱的问题，设计一种低成本数字化教具。方法：以 ESP32 为控制核心，结合光敏电阻、INA226 电压电流检测模块、双舵机追光机构、TFT 显示屏和 Phyphox 移动端，完成光照识别、姿态调节、功率计算和曲线显示。结果：入射角由 0°增至 70°时，太阳能板转化效率由约 7%降至约 2%；自动追光模式平均效率约为 7.00%，较固定模式提高约 2.63 个百分点。结论：该教具能将负载现象、实时数据和控制过程结合起来，可用于能量转化效率的可视化探究教学。

【关键词】：智能追光教具；能量转化效率；ESP32；Phyphox；数字化实验

DOI:10.12417/2705-1358.26.12.007

1 引言

能量转化效率教学需要学生把实验现象、测量数据和物理规律联系起来。《义务教育物理课程标准（2022 年版）》强调探究实践和跨学科实践^[1]。如果课堂主要依赖公式讲授，学生容易掌握计算形式，却难以理解效率数值背后的能量输入和输出过程。

现有课堂条件仍存在不足。部分学校缺少面向能量效率探究的专用教具，定量实验和连续数据呈现较少。一些自制装置能够显示数字，但难以同步呈现负载变化，也不便于比较不同入射角和控制模式。因此，本文设计一种基于 ESP32 的智能追光教具，将 3D 打印结构、传感测量、舵机控制和 Phyphox 数据可视化整合到同一实验场景中。

2 装置设计与实验方法

2.1 设计思路

教科版九年级物理教材通常将能量转化效率定义为：

$$\text{能量转换效率}\eta=\frac{\text{输出有效能量}}{\text{输入能量}}$$

对于太阳能板，其能量转化效率可表示为^[4]：

$$\eta=\frac{P_1}{P_2}$$

式中，P_{out} 表示太阳能板输出电功率，P_{in} 表示入射到

太阳能板表面的光功率。

太阳能板效率探究的关键，是在相对稳定的光照条件下测量输出电功率和入射光功率，并控制入射角、光源距离等变量。本教具以 ESP32 为控制核心，利用 INA226 采集电压和电流，利用光敏传感器识别光照变化，并通过 Phyphox 显示曲线。

2.2 教具构成与工作原理

2.2.1 教具主要部件

教具由控制、检测、执行、供电和结构支撑五部分构成。控制部分采用 ESP32 开发板；检测部分包括四路光敏电阻、INA226 模块和 TFT 显示屏；执行部分包括 PCA9685 舵机驱动板、两只 MG996R 舵机、LED 灯带和小风扇；供电部分包括太阳能板、锂电池组、充电管理模块和降压模块；结构部分由 3D 打印件和亚克力底座组成。

2.2.2 教具工作原理

装置包括自动追光、数据采集传输和负载显示三个功能模块。三个模块分别服务于方向控制、效率计算和现象呈现，并由 ESP32 进行统一协调。

（1）自动追光。四路光敏电阻安装在太阳能板边缘，并通过遮光隔板增强方向差异。ESP32 读取四通道光强信号后，判断光源偏移方向，并输出 PWM 信号。PCA9685 驱动水平和俯仰两个舵机，使太阳能板尽量正对光源。追光控制连接如图 1 所示。

作者简介：常威（1998—），男，硕士，内江师范学院物理与电子信息工程学院助理实验师，研究方向：教具制作、物理实验教学、嵌入式系统设计。

基金项目：四川省教育厅高校重点实验室（内江师范学院）“中小学智能教仪研发与应用”项目“基于物联网的远程实境数字化物理实验平台研发”（项目编号：2024-K05）；内江师范学院基础教育教学成果培育项目“基教牵引 高教赋能 协同育人”高中物理习题研究与教学实践”（项目编号：JJPY2401）；2025 年四川省大学生创新创业训练项目（项目编号：X2025076）。

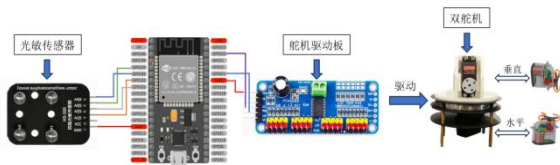


图 1 追光控制连接示意图

(Figure 1 Tracking control connection diagram)

(2) 数据采集与传输。INA226 模块用于采集太阳能板输出电压和电流，光敏电阻用于提供相对光强信息^[4]。ESP32 读取相关数据后，计算输出功率、输入光功率和能量转化效率，并将主要数据同步显示在 TFT 屏幕上。数据采集连接如图 2 所示。

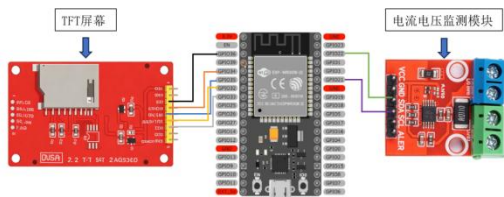


图 2 数据采集连接示意图

(Figure 2 Data acquisition connection diagram)

(3) 负载显示。太阳能板输出端连接 LED 灯带和小风扇。随着输出功率变化，灯带亮度和风扇转速随之改变。该模块将效率数值与可观察的负载状态对应起来，帮助学生从现象层面理解能量输出差异。

(4) 电源管理。太阳能板输出电能经防倒流处理后为锂电池组充电；锂电池组再经降压模块分别为 ESP32、传感器、TFT 屏幕、INA226 模块和舵机供电。舵机供电与控制电路分开，可减小舵机启动时的电压波动对数据采集的影响。

该装置将光能转化、电能存储、自动控制、数据测量和移动端曲线显示整合为一个连续实验系统。数据采集与控制流程如图 3 所示。

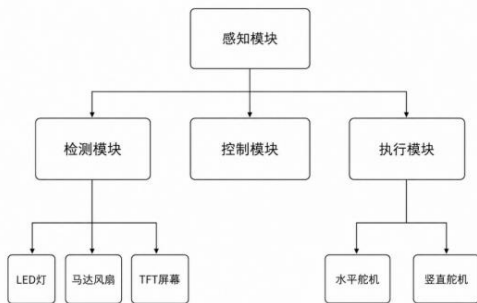


图 3 智能追光仪工作流程

(Figure 3 Workflow of the intelligent solar-tracking teaching aid)

2.3 软件与数据可视化

Arduino IDE 用于完成 ESP32 开发环境配置和程序上传^[8-9]。程序包括多通道数据采集、舵机控制和蓝牙串口传输。实验过程中，ESP32 将数据发送至 Phython 移动端，学生可同时读取 TFT 瞬时值和手机端曲线。与单次读数相比，曲线更便于观察变量变化趋势^[10]。

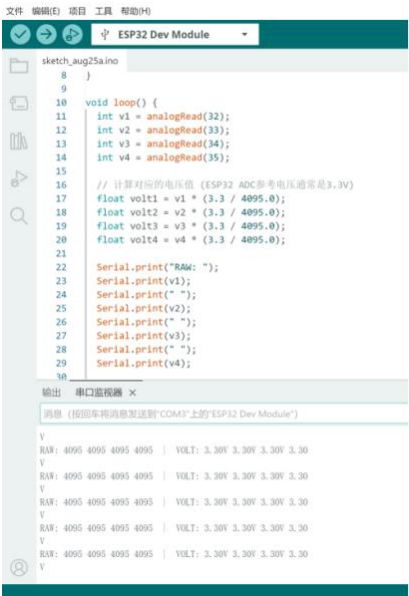


图 4 Arduino IDE 编程界面

(Figure 4 Arduino IDE programming interface)

2.4 装置结构与组装

3D 打印技术有助于提高自制教具结构件的加工精度和复现性^[11]。本装置采用 Fusion 360 完成太阳能板支架和外壳建模^[12]。底座内部划分为控制区、供电区和驱动区，顶部安装太阳能板支架和传感器，前方面板嵌入 TFT 显示屏。装置整体结构见图 5。



图 5 智能追光仪整体结构实物图

(Figure 5 Physical structure of the intelligent solar-tracking teaching aid)

3 实验结果与教学应用分析

实验教学不仅要验证结论,还要引导学生提出问题、控制变量和解释证据^[13]。本研究围绕“能量转化效率受哪些因素影响”组织活动。实验前保持光照条件相对稳定,接通电源后观察 TFT 初始读数和舵机复位状态,再进入探究环节。

3.1 入射角度对转化效率的影响

在固定模式下,以卤素灯作为模拟光源,并保持光源距离和环境光强基本不变。将垂直入射记为 0°,依次测量 0°、30°、45°、60°和 70°时的电压、电流及瞬时能量转化效率,每个角度重复 3 次。学生可读取 TFT 数据,也可观察 Phyphox 曲线,如图 6 所示。实验数据见表 1,整理结果如图 7 所示。

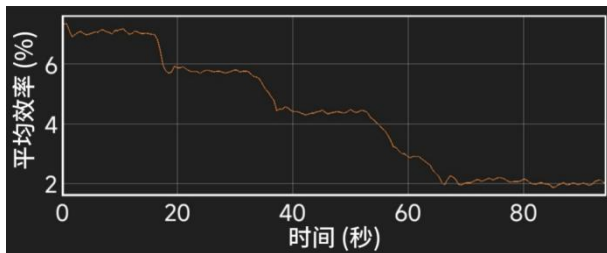


图 6 太阳能板转化效率与入射角度关系实时动态曲线图

(Figure 6 Real-time curve of conversion efficiency and incident angle)

表 1 太阳能板转化效率与入射角度关系实验数据

(Table 1 Experimental data on conversion efficiency and incident angle)

入射角度 (°)	输入功率 (W)			输出功率 (W)			能量转化效率 (%)		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
0	2.96	2.94	2.98	0.21	0.20	0.21	7.1	6.8	7.0
30	2.58	2.60	2.57	0.15	0.16	0.15	5.8	6.2	5.8
45	2.05	2.13	2.12	0.09	0.11	0.10	4.4	5.2	4.7
60	1.41	1.42	1.39	0.03	0.04	0.03	2.1	2.8	2.2
70	1.03	1.03	1.01	0.02	0.02	0.02	1.9	1.9	2.0

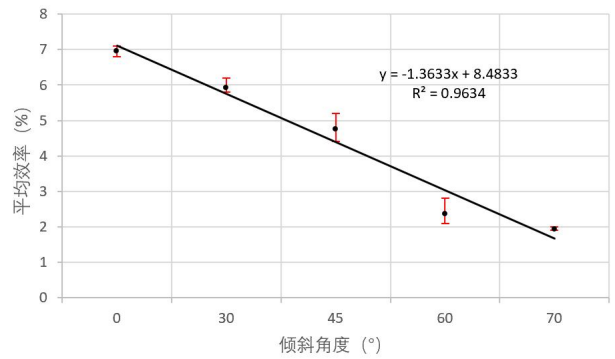


图 7 转化效率与入射角度关系

(Figure 7 Relationship between conversion efficiency and incident angle)

完成数据测量后,教师可打开 LED 灯带或小风扇,引导学生比较不同入射角下的负载状态。负载运行情况见表 2。

表 2 负载端运行与入射角度的关系

(Table 2 Relationship between load operation and incident angle)

角度 (°)	LED 灯亮度	小风扇转速
0°	明亮	高速
30°~45°	较亮	中速
60°~70°	暗淡	中速

表 1 和图 7 显示,当入射角由 0°增大至 70°时,太阳能板转化效率由约 7%降至约 2%。表 2 中的负载现象与数据变化一致:入射角较小时 LED 较亮、风扇转速较高;入射角增大后,负载运行明显减弱。这说明太阳能板正对光源时接收的有效光照较多。

3.2 自动追光模式与固定模式的效率对比

在固定模式下,使太阳能板初始方向与光源垂直。教师将卤素灯从左侧 30 cm 处匀速移动至右侧 30 cm 处,移动时间为 30 s,并重复 3 次。随后开启自动追光功能,保持相同光源路径和速度,记录平均输出功率和平均效率。实验数据见表 3。

表 3 不同模式下太阳能板转化效率实验数据

(Table 3 Experimental data on conversion efficiency under different modes)

指标	固定模式			追光模式		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
平均输出功率 (W)	0.10	0.13	0.10	0.19	0.20	0.22
平均效率 (%)	4.3	4.5	4.3	6.9	7.0	7.1

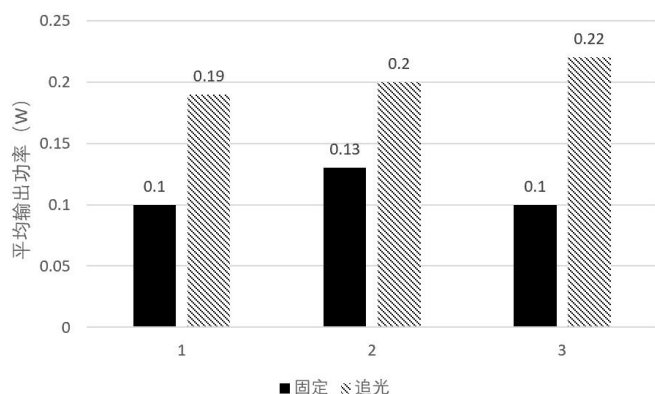


图8 不同模式下太阳能板转化效率对比

(Figure 8 Comparison of conversion efficiency under different modes)

表3和图8显示,固定模式下太阳能板平均效率约为4.37%;自动追光模式下,平均效率约为7.00%,提高约2.63个百分点。该结果表明,在光源位置变化时,追光控制能够改善太阳能板获取光能的状态,也可作为学生理解控制变量和系统调节的实例。

3.3 教学应用价值与研究边界

从课堂应用看,该装置将能量转化、传感测量、自动控制

和数据处理置于同一实验情境。教师可先引导学生观察负载变化,再组织学生提出变量假设,随后通过角度控制和追光对比完成验证。这种流程有助于学生建立定性现象与定量证据之间的联系。

本文的证据边界也需要明确。现有结果主要支持教具能够完成数据采集、自动追光和负载显示。本文尚未开展大样本前后测或长期跟踪评价,后续仍需结合问卷、访谈、测试和课堂观察进一步检验教学效果。

4 结论

本文设计并制作了一套基于ESP32与Phyphox的智能追光教具。装置以太阳能板为实验对象,整合四路光敏传感、双舵机追光控制、电压电流采集、负载显示和移动端曲线显示,使学生能够在同一情境中观察现象、调节变量和解释规律。

实验结果表明,当入射角由 0° 增大至 70° 时,太阳能板转化效率由约7%降至约2%;自动追光模式的平均效率较固定模式提高约2.63个百分点。该教具能够联通能量转化过程、实时数据和负载现象,可用于能量转化效率的可视化探究教学。后续仍需在更大样本课堂中检验其教学效果。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部.义务教育物理课程标准(2022年版)[S].北京:人民教育出版社,2022.
- [2] 胡红杏.中小学科学教育的发展逻辑[J].教育研究,2024,45(12):112-123.
- [3] 罗世洪.例谈基于3D打印的中学物理实验教具开发策略[J].广西物理,2022,43(2):212-216.
- [4] 郝玺,邱选兵,魏计林.太阳能电池板转换效率测量[J].太原科技大学学报,2017,38(5):369-372.
- [5] 何振浩,桑芝芳.基于ESP32与Phyphox的中学物理实验开发与与设计[J].实验教学与仪器,2026,43(2):126-129.
- [6] 高永恒,丁益民,张倩,等.基于ESP32单片机和Phyphox软件的磁感应强度测量研究[J].中学物理教学参考,2025,54(35):76-78.
- [7] 李晗,王春艳,明亮.融合手机传感器的实验设计与实践——以Phyphox光传感器应用为例[J].中学物理教学参考,2025,54(9):54-56.
- [8] 张景媛.基于Arduino的高中物理实验教学资源开发及应用研究[D].昆明:云南师范大学,2024.
- [9] 赖毅标.基于Arduino的高中物理实验教学资源开发及应用[D].银川:宁夏大学,2023.
- [10] 蔡敏.巧用Phyphox创新初中物理实验教学[J].中国现代教育装备,2025(16):28-30.
- [11] 厉智锋.基于3D打印技术的初中物理实验教具的改进与创新[J].物理教学,2025,47(12):72-75,59.
- [12] 张磊.基于Fusion 360的无人机机架轻量化设计及增减材制造研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(2):22-25.
- [13] 陈泓宇,田博扬,李春密.基于义务教育物理课程标准(2022年版)的实验教学变革探讨[J].物理教师,2022,43(8):27-32.
- [14] 郑远,鲍德松,王业伍.可视化物理演示实验教学的探索与实践[J].物理实验,2022,42(6):26-32.