

重心坐标的测量装置设计与制作

黄晓倩¹, 黄 柳², 申禹繁¹, 接娅纯¹, 胥保春^{1*}

¹南京工程学院机械工程学院, 江苏 南京

²东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年6月12日

摘 要

本文聚焦于智能传感的重心坐标测量装置的设计与制作, 详细阐述了基于力矩平衡原理的测量方法, 介绍装置的机械结构、设计原理及制作过程, 并通过实验验证其性能。该装置为精确测量物体二维重心坐标提供了有效途径, 向多源传感器融合与智能算法集成方向发展, 实现重心坐标动态实时监测, 全面评估监测对象状况。

关键词

重心坐标, 力矩平衡, 智能算法

Design and Development of a Center of Gravity Coordinates Measurement Device

Xiaoqian Huang¹, Liu Huang², Yufan Shen¹, Yachun Jie¹, Baochun Xu^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

²School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

This paper focuses on the design and development of an intelligent sensing-based device for measuring center of gravity (CoG) coordinates. It elaborates on the measurement method grounded in the torque balance principle, detailing the mechanical structure, design rationale, and fabrication

*通讯作者。

文章引用: 黄晓倩, 黄柳, 申禹繁, 接娅纯, 胥保春. 重心坐标的测量装置设计与制作[J]. 仪器与设备, 2025, 13(2): 182-196. DOI: 10.12677/iae.2025.132025

process of the device. Experimental validation confirms its performance. The device provides an effective solution for accurately measuring two-dimensional CoG coordinates of objects. By advancing toward multi-sensor fusion and intelligent algorithm integration, it enables dynamic real-time monitoring of CoG coordinates, offering comprehensive assessment of the monitored object's condition.

Keywords

Center of Gravity Coordinates, Torque Balance, Intelligent Algorithms

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

随着我国经济高质量发展进程加速，城市基建、交通运输和装备制造领域对物体重心坐标测量技术提出了更高要求。重心作为物体质量分布的核心参数，其精确测定直接关系到工程结构稳定性、运载工具安全性和装备运行可靠性，已成为现代工程技术领域不可或缺的基础性检测指标。本研究针对现有重心测量技术存在的局限性，提出了一种基于力矩平衡原理的重心二维坐标测量系统创新设计，旨在为海陆空多领域工程应用提供高精度、高效率的测量解决方案[1]。

在重型装备制造中，重心坐标精准测定直接关系到结构的稳定性，本研究通过实时监测系统为装备配平提供优化依据。重心监测技术的应用在交通运输领域呈现多维需求：航空工程要求飞机重心误差控制在 $\pm 3\%$ 平均气动弦长内；陆地运输中货车重心每升高 10 cm 侧翻风险增加 30% [2]；城市基建领域，80% 的高架桥梁墩柱倾斜事故与重心偏移相关。这些领域共同验证了重心控制技术对工程安全的关键支撑作用[3]。

现有测量技术普遍存在操作复杂、适应性差等缺陷。悬挂法受限于物体几何形状，称重平台式系统存在多点标定误差累积问题。本研究突破传统测量范式，基于力矩平衡原理构建了新型二维坐标测量系统，采用高精度称重传感器阵列，不仅可提升传统制造业的质量控制水平，还可以引入课堂实验教学中，让学生通过动手操作更切实领悟到重心测量的流程和力矩平衡的原理，培养学生实践能力[4]。

2. 力矩平衡原理

力矩可以使物体向不同的方向转动。如果这两个力矩的大小相等且方向相反，如果把物体向逆时针方向转动的力矩规定为正力矩，使物体向顺时针方向转动的力矩规定为负力矩，则有固定转动轴的物体的平衡条件是力矩的代数和为零($\sum M = 0$)。

2.1. 杠杆平衡原理

杠杆是力矩平衡原理最常见的应用在杠杆系统中，当两端的力矩相等时，系统保持平衡。公式表达为：

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2 \quad (1)$$

其中， F_1 和 F_2 为作用力， L_1 和 L_2 为对应力臂长度，O 点为支撑点。此原理被用于简化支撑点受力分析，如图 1 所示。

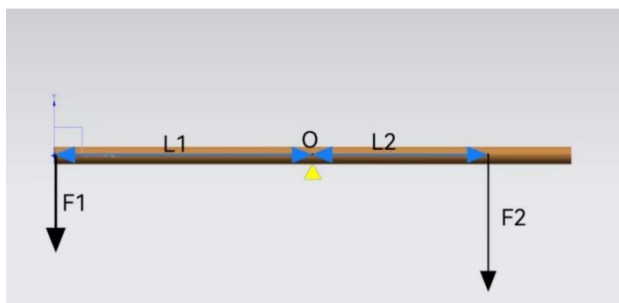


Figure 1. Lever balance principle diagram

图 1. 杠杆平衡原理图

2.2. 单边支撑力矩平衡法

对于单侧有支撑轴的物体而言，力矩平衡原理同样适用。通过计算受力点到单侧支撑轴的距离，当平面上两接触点在力的作用下，使物体处于静态平衡状态时，此时物体在两接触点的力矩总和为零。如图 2 所示。

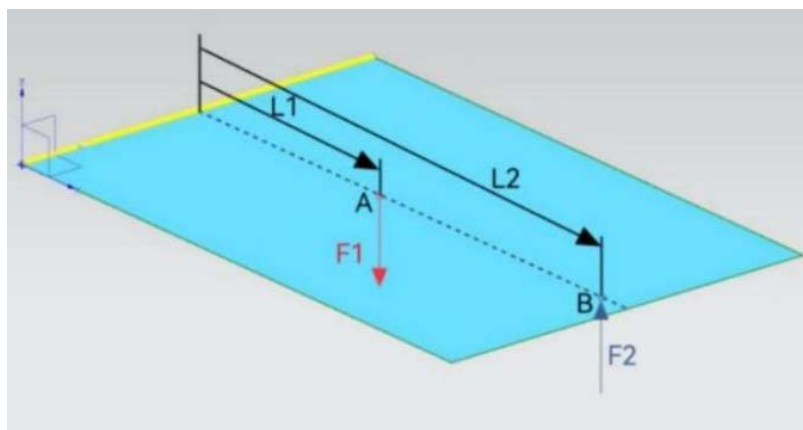


Figure 2. Single-side support method principle diagram

图 2. 单边支撑法原理图

根据力矩平衡原理：使物体向逆时针方向转动的力矩规定为正力矩，使物体向顺时针方向转动的力矩规定为负力矩。所以对于单边支撑的物体而言，在 A 接触点作用下，物体受到绕轴做顺时针方向运动的力矩，在 B 接触点作用下，物体受到绕轴做顺时针方向转动的力矩，当力矩的代数和为零时，物体处于平衡状态[5]。

将上述情况推广至物体重心的测量，如果设各支撑点力值为 $(\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n)$ ，且是平行力系，令坐标系 Z 轴与力的作用线平行。各力作用点 $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ， $A_i(x_i, y_i, z_i)$ ， $A_n(x_n, y_n, z_n)$ ，假定物体的重心 C 的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ，根据力矩平衡原理，由于重心 C 使物体做顺时针运动即为负力矩，其余支撑点的平行力系做逆时针运动即为正力矩[6]。

对 ox 轴取矩：

$$M_x(\vec{F}) = \sum_{i=1}^n M_x(\vec{F}_i) \quad (2)$$

得

$$-Fy_c = -\sum_{i=1}^n F_i y_i \quad (3)$$

对 oy 取矩:

$$M_y(\vec{F}) = \sum_{i=1}^n M_y(\vec{F}_i) \quad (4)$$

得

$$-Fx_c = -\sum_{i=1}^n F_i x_i \quad (5)$$

因本课题的重心在 Z 轴上可忽略不计, 所以对 Z 轴不多加阐述。

由上述公式可得:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (6)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (7)$$

2.3. 力作用点坐标计算

本研究采用四点支撑法计算物体的二维重心, 以异形物体作为被测对象, 采用四角矩阵式测力架构, 通过精密设计的玻璃承载平台(尺寸 $a \times b$)与四个高线性度力传感器(A-D), 传感器对应力值为 F_1 - F_4 , 构成测量基体。根据空间力系平衡原理, 将二维重心坐标投影至 XOY 平面进行解耦分析[7], 力矩平衡原理示意图如图 3 所示。

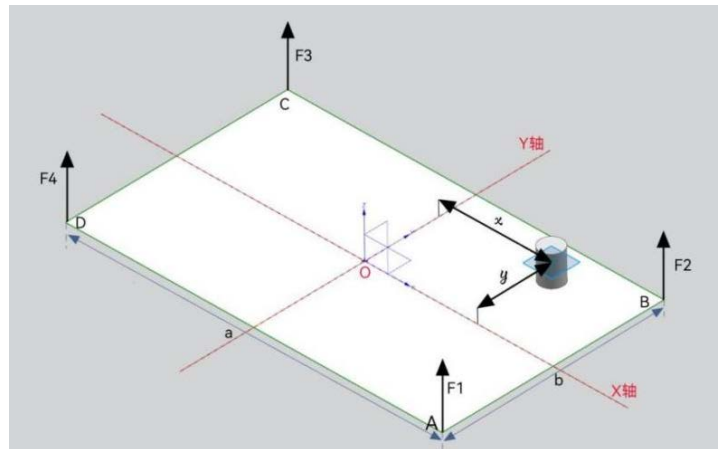


Figure 3. Four-Point support method principle diagram
图 3. 四点支撑法原理图

被测异形体重心坐标设为 (X, Y) , 被测物体总重量设为 W , 根据静力学原理, 则有:

$$W = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (8)$$

将重心映射到 XOY 平面, 因为四个力传感器的受力和等于物体的重量, 对 y 方向求矩, 根据力矩平衡原理, 则有:

$$\sum My = x \cdot W = \frac{a}{2}(F1 + F2 - F3 - F4) \quad (9)$$

同理, 对 X 方向求矩, 有:

$$\sum Mx = y \cdot W = \frac{b}{2}(F2 + F3 - F1 - F4) \quad (10)$$

得:

$$X = (a \times (F1 + F2 - F3 - F4)) / (2 \times (F1 + F2 + F3 + F4)) \quad (11)$$

$$Y = (b \times (F2 + F3 - F1 - F4)) / (2 \times (F1 + F2 + F3 + F4)) \quad (12)$$

经过上述分析, 由此可得异形体的二维重心位置坐标具体值(X, Y), 此方法可扩展至三维空间, 通过多平面测量间接确定三维重心坐标。

3. 重心测量系统介绍

重心测量系统由软、硬件构成, 其中硬件包括了 AT8502 传感器、TDA-04D4 四通道变送器、72 cm × 30 cm × 1.5 cm 的伴有沉孔 U 型槽的 45 号钢的钢板底座; 软件由 Python 语言编写, 可以实现动态呈现重心坐标及总重量、绘制运动物体重心轨迹散点图、基于 Modbus 协议实现多通道同步数据采集等功能。

3.1. 测量硬件

本系统测量硬件的核心在于采用了欧路达 AT8502 平行梁称重传感器与欧路达 TDA-04D4 四通道变送器。传感器基于应变计原理构建, 具有高灵敏度(2 mV/V)、抗偏载能力强及稳定性优异等特点。它由金属框架和焊接在框架上的应变计组装而成, 应变计是一种由金属箔或金属片制成的敏感元件, 用于测量金属结构的微小变形, 其电阻值与应变呈线性关系。当称重物体施加在传感器上时, 金属结构框架会受到外力的作用而产生微小的变形和应力。这种应力会导致应变计发生形变, 从而改变其电阻值。电阻值的微小变化经过放大和处理后转换为输出信号, 用于表示异形物体重量。四组传感器对称分布于 72 cm × 30 cm × 1.5 cm 的 45 号钢制底座四角, 通过 M6 螺丝固定于沉孔 U 型槽内, 有效避免应力集中[8]。力传感器实物图如图 4 所示。



Figure 4. Force sensor physical diagram
图 4. 力传感器实物图

变送器能同时实现将力传感器接收到的模拟信号转换为电信号输出和多通道同步处理的功能。本设计选用欧路达 TDA-04D4 四通道变送器, 支持 RS-232 接口与外部设备(如计算机、PLC)进行数据通信和控制。无线传输采用 RS232-LORA 透传模块, 通过两个 LORA 模块点对点互相通讯的方式实现数据的准确传输。变送器和无线通信模块实物图如图 5、图 6 所示。



Figure 5. Transmitter physical diagram
图 5. 变送器实物图



Figure 6. Wireless communication module physical diagram
图 6. 无线通信模块实物图

数据传送采用的是串口通信，利用无线通信模块，按照 Modbus 协议格式实现底层和上位机之间的信息交换[9]。Modbus 是一种开放标准的串行通信协议，广泛应用于工业自动化领域。其采用主从式架构，支持 RS-232/485 等物理接口，具有协议简单、兼容性强、可靠性高等特点[10]。在本研究中，使用 RS-232 转 USB 通信接口数据线与上位机相连，基于 Modbus 通信协议，上位机向变送器下发数据采集指令，触发传感器力值信息的动态实时采集，并通过 Modbus 协议格式将解析后的力学参数回传至上位机终端，最终构建平面重心坐标的实时动态监测系统[11]。Modbus 通信格式如下表 1 所示。

Table 1. MODBUS communication format
表 1. MODBUS 通信格式

读取格式									
变送器地址	功能代码	寄存器起始地址		寄存器数量		CRC16 校验			
Add	0 × 03	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位		
变送器返回格式(广播指令不回复)									
变送器地址	功能代码	字节数	第一组寄存器数据	…寄存器数据…		最后组寄存器数据	CRC16 校验		
Addr	0 × 03	N	高 8 位	低 8 位	…数据…	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位

重量单位的格式如表 2 所示。

Table 2. Weight unit communication format
表 2. 重量单位通信格式

重量单位	40105 (104)	16 位无符号整数	0: 无; 1: g; 2: kg; 4: N	读/写	0
------	-------------	-----------	-------------------------	-----	---

3.2. 软件设计

上位机软件基于 PyCharm 和 PyQt5 软件框架，选用 Python 语言构建异形物体重心二维坐标的监测界面。该监测界面包含界面绘制、数据存储、重量计算与重心坐标显示等核心功能。界面设计兼顾功能性与交互性，主要显示按钮及功能说明如图 7 所示。

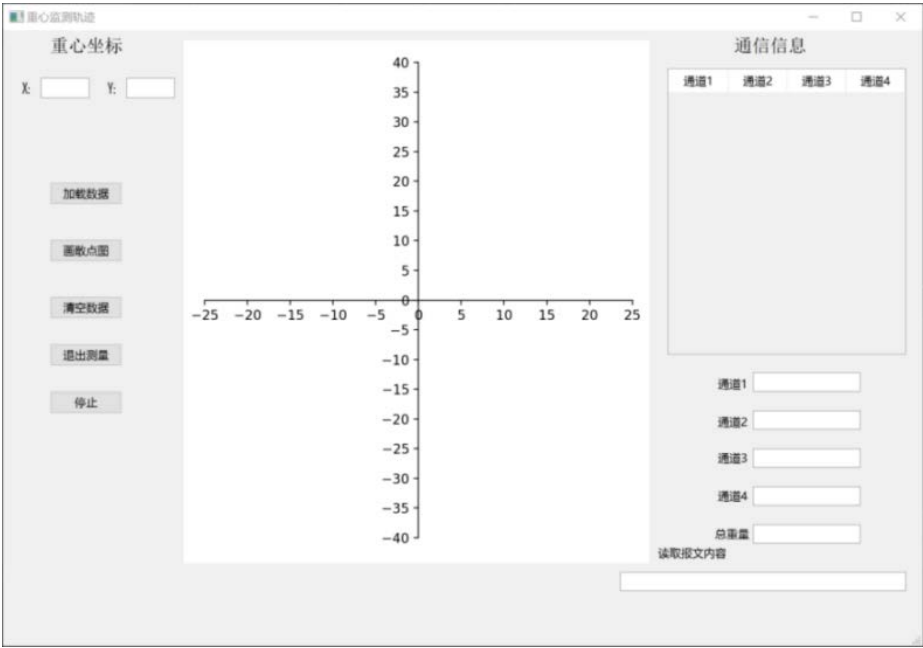


Figure 7. Interface design
图 7. 界面绘制

将异形物体置于测量装置上，上位机界面可实时显示当前物体的重心坐标(X,Y)，并将具体坐标位置直观反映在界面的二维坐标轴上，通过对四个力的传感器数据的读取与求和计算，得出异形物体的总重量。

在测量静止物体时，点击“加载数据”按钮可更新并显示当前被测物体的重心坐标值与投影在二维坐标系中的位置；若要测量运行中的物体重心，则需先点击“加载数据”再点击“画散点图”按钮，动态追踪运动物体的重心坐标轨迹，并将轨迹图绘制在二维坐标系中。每间隔 1000 ms 装置会采集并更新 4 个传感器数据，各传感器历史数据将记录在通道 1~4 中。通过点击“停止测量”按钮，使得数据采集进程终止，将当前采集的传感器力值及计算的重心坐标导出为文件则点击“保存数据”按钮。

总体流程如下：系统启动后，首先初始化串口并发送 Modbus 指令触发传感器数据采集，随后接收并解析传感器信号，基于力矩平衡原理计算重心坐标，实时更新界面显示测量结果，若需连续测量则循环执行上述步骤以动态追踪重心轨迹，最终保存数据并结束流程。流程图如图 8 所示。

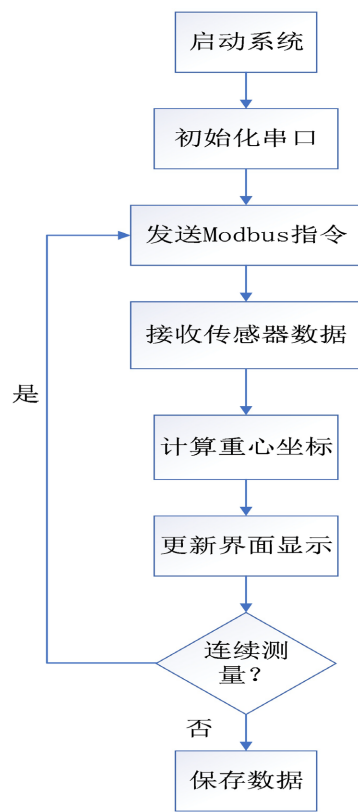


Figure 8. System flowchart
图 8. 流程图

4. 物体重心坐标测量数据

4.1. 静态物体二维重心坐标测量

针对物体二维重心坐标的测定方法研究，本实验采用悬挂投影法对具有规则投影特征的非对称物体进行重心测定。实验装置由水平玻璃测试平台构成，被测复合体结构参数如下：基底部分为 $15\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的矩形平板，顶部叠加对称分布的长方体构件，其尺寸为 9.6 cm (长) $\times 10\text{ cm}$ (宽) $\times 5.3\text{ cm}$ (高)。放置一枚硬币于被测物体基底中心之下当作垫片，保证玻璃板所受应力集中并且防止玻璃板被铁质被测物体磨损。硬币与待测物体实物图如图 9 所示。



Figure 9. Coin and test object physical diagram
图 9. 硬币与待测物体实物图

实验阶段将待测物放置在玻璃坐标系中心，理论模型预测其理想重心坐标为(0,0)。开始运行测量程序后，首先去除承重板自重影响，再将待测物体置于玻璃板中心即硬币中心之上，实现试件中心对位。实测数据显示重心坐标为(-0.2,0.1)，与理论预测值存在偏差，该误差量级在工程测量允许范围内，验证了测量系统的有效性。实验装置的实物布置与测量界面对应关系如图 10 及图 11 所示。

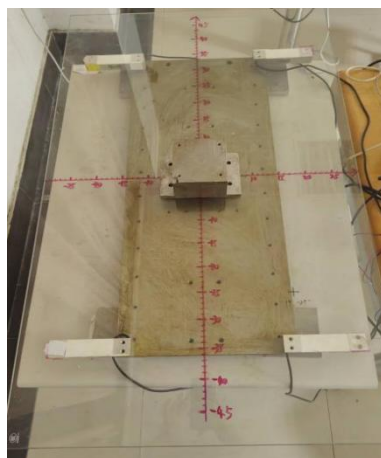


Figure 10. Test object central position physical diagram
图 10. 待测物体中心位置实物图

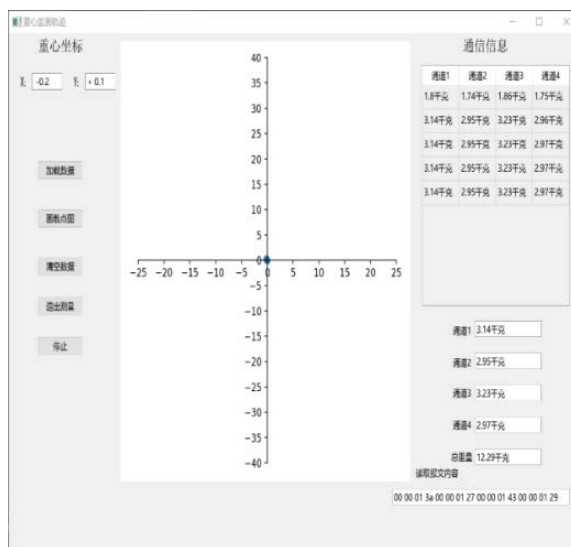


Figure 11. Test object central position monitoring interface
图 11. 待测物体中心位置监测界面

若将待测物体分别置于玻璃板坐标系各个象限内部，由于待测物体质量分布均匀，几何形状对称，根据待测物的几何形状关系计算出此时理想重心坐标位置，并与实际上位机重心监测界面显示的坐标位置进行对比，从而进行调试并验证该系统的准确性。

当待测物体分别置于四个象限时,理论重心坐标依次为第一象限(15.5, 13.7)、第二象限(-15, 9.4)、第三象限(-13.3, -15.4)及第四象限(13.7, -23),通过点击“加载数据”按钮实时获取实际重心坐标分别为(15.9, 14.2)、(-16, 9.8)、(-14.2, -15.5)和(13.8, -23.3),其对应实监测界面如图 12、图 13、图 14 及图 15 所示。

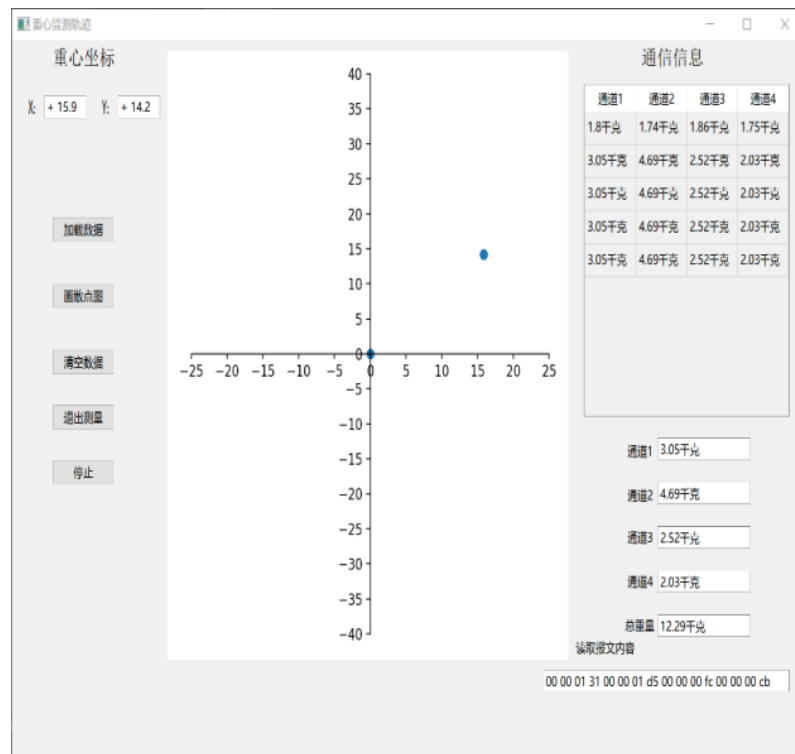


Figure 12. Test object first quadrant monitoring interface

图 12. 待测物体第一象限监测界面

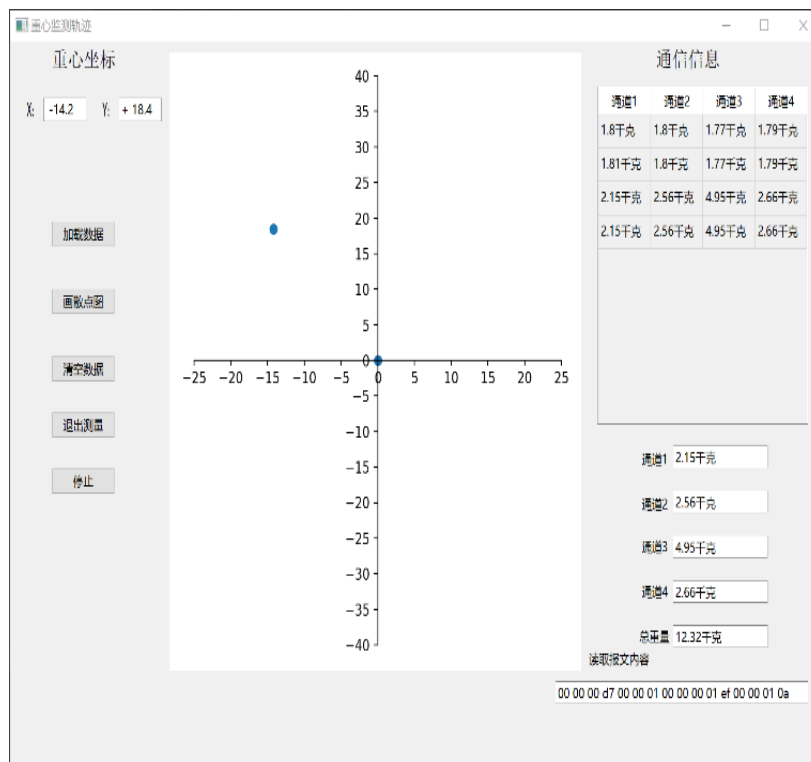


Figure 13. Test object second quadrant monitoring interface

图 13. 待测物体第二象限监测界面

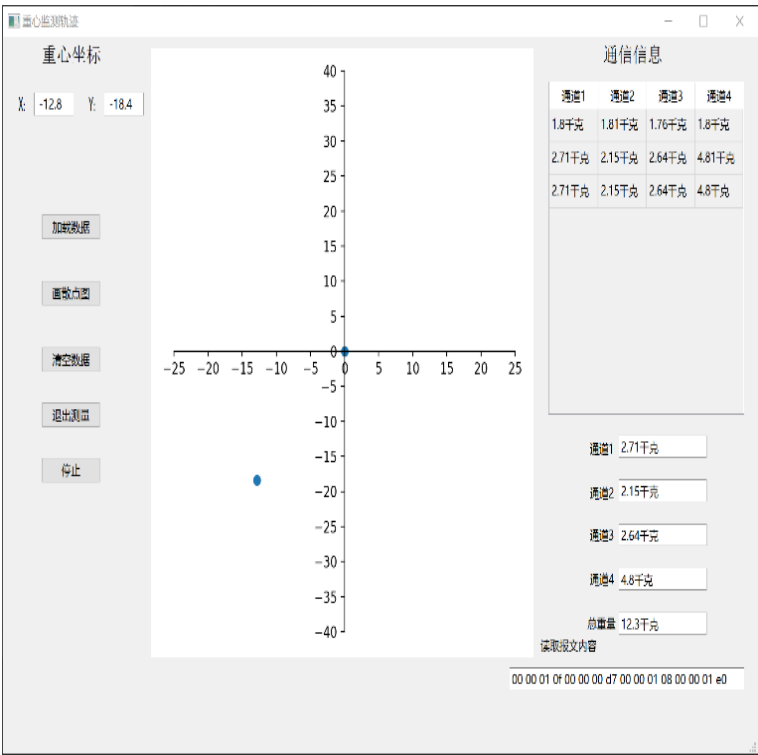


Figure 14. Test object third quadrant monitoring interface
图 14. 待测物体第三象限监测界面

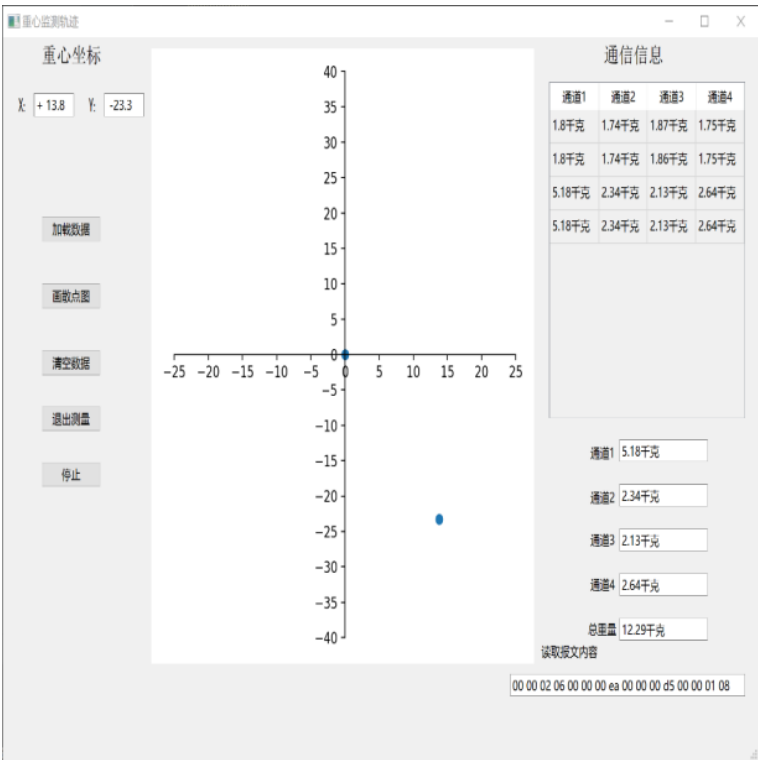


Figure 15. Test object fourth quadrant monitoring interface
图 15. 待测物体第四象限监测界面

以上就是异形物体放置于测量平面不同位置时的五组实验，可以直观地展现出该物体重心二维坐标测量系统在进行二维重心坐标定位的准确性，具体实验对比结果如表 3 所示。

Table 3. 2D Center of gravity coordinate measurement experimental comparison
表 3. 重心二维坐标测量实验对比

实验序号	理论坐标(cm)	实际坐标(cm)	误差绝对值
1	(0.0, 0.0)	(0.2, 0.1)	(0.2, 0.1)
2	(15.5, 13.7)	(15.9, 14.2)	(0.4, 0.5)
3	(-13.9, 18.5)	(-14.2, 18.4)	(0.3, 0.1)
4	(-12.3, -18.0)	(-12.8, -18.4)	(0.5, 0.4)
5	(13.7, -23.0)	(13.8, -23.3)	(0.1, 0.3)

经过以上实验可知，上位机显示的实际测量物体二维重心坐标与理论计算的物体二维重心坐标有一定的误差，但误差较小，可以忽略，因此，该重心监测系统具有一定的准确性，可以应用于实践。

4.2. 重物运动二维重心坐标追踪

使用玻璃板作为测量平台，四个力传感器实时监测当前所受的力的信息，实物小车模型模拟待测重心的异形物体。首先点击上位机界面中的“加载数据”按钮，计算传感器上玻璃板的净重，再点击“画散点图”按钮，此时控制小车绕玻璃板坐标系原点行驶一圈，观察在上位机重心监测界面上追踪的重心坐标轨迹。实物图如图 16 所示，上位机重心监测界面上追踪的重心坐标轨迹如图 17 所示。

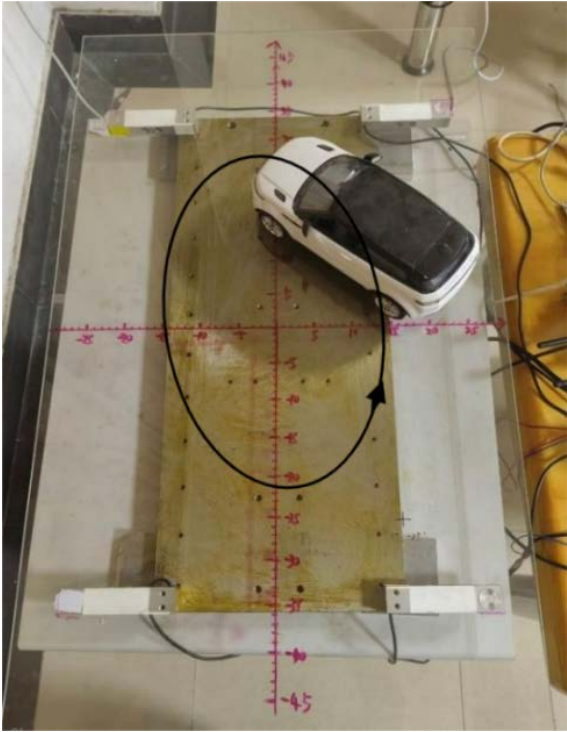


Figure 16. Heavy object circular motion coordinate tracking physical diagram
图 16. 重物绕圈运动坐标追踪实物图

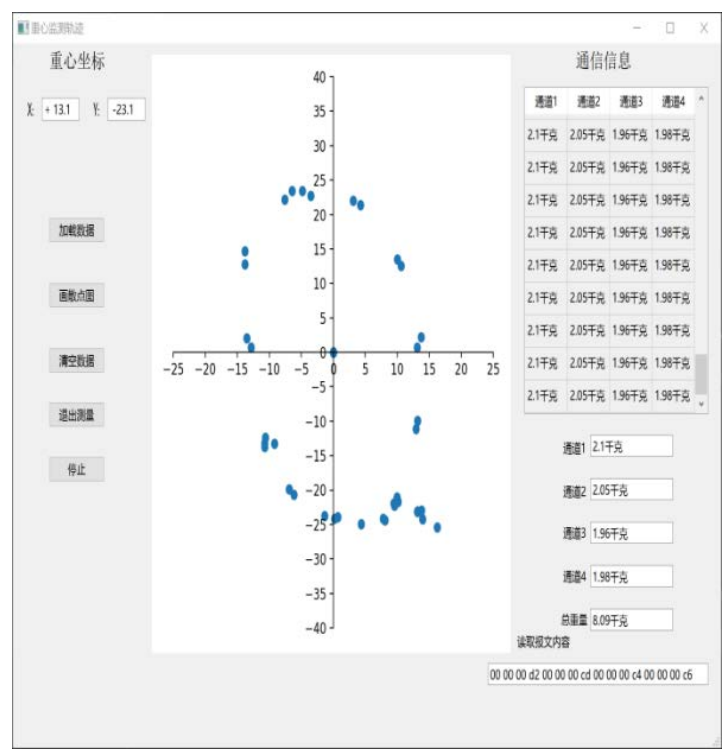


Figure 17. Heavy object circular motion coordinate tracking monitoring interface
图 17. 重物绕圈运动坐标追踪监测界面

当控制小车在玻璃板坐标系上沿斜线运动时，观察在上位机重心监测界面上追踪的重心坐标轨迹。

实物图如图 18 所示，上位机重心监测界面上追踪的重心坐标轨迹如图 19 所示。

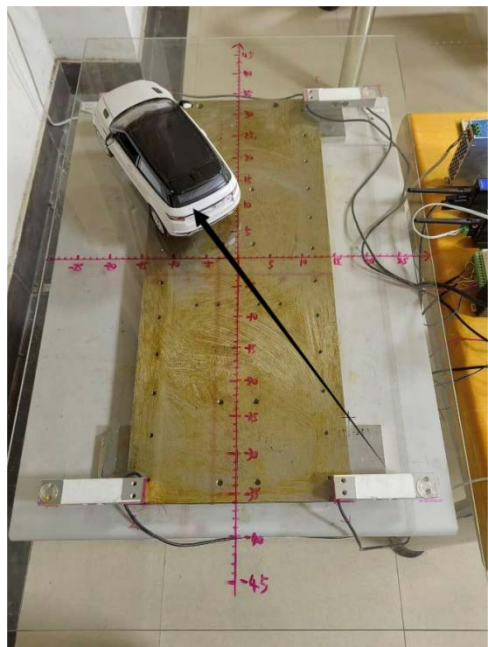


Figure 18. Heavy object diagonal motion coordinate tracking physical diagram
图 18. 重物斜线运动坐标追踪实物图

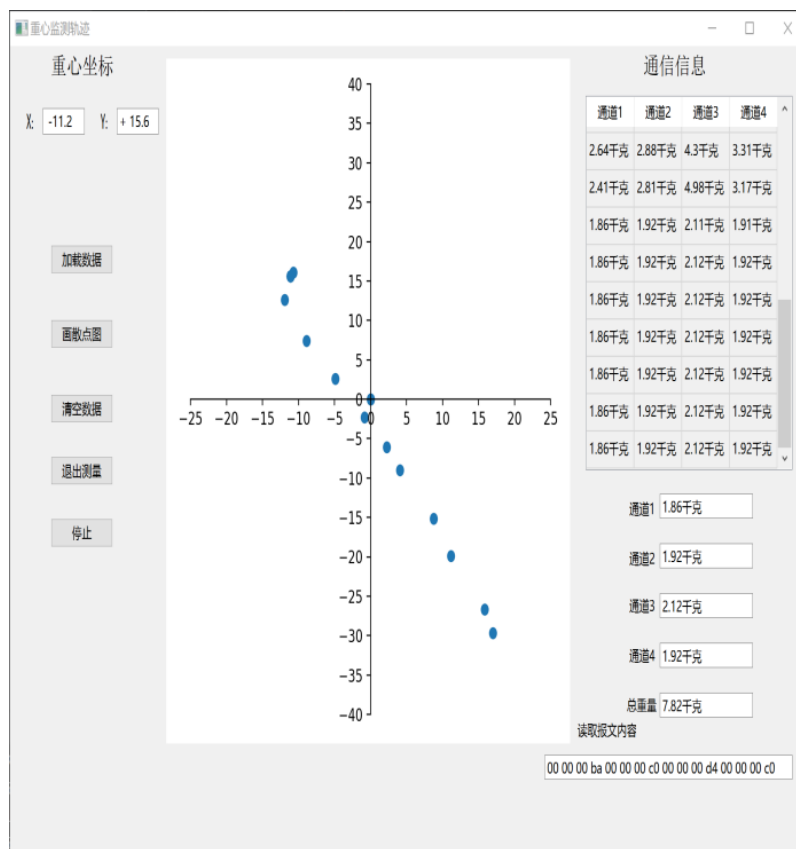


Figure 19. Heavy object diagonal motion coordinate tracking monitoring interface
图 19. 重物斜线运动坐标追踪监测界面

5. 总结

本文设计并制作了一种基于力矩平衡原理的重心坐标测量装置，通过四点支撑法结合高精度传感器阵列，实现了对异形物体及组合体二维重心坐标的快速、精确测量。实验结果表明，该装置测量误差小、重复性好，能够有效解决传统测量方法操作复杂、适应性差等问题。该装置的设计理念与模块化结构对课堂教学仪器研发具有示范价值，不仅验证了重心计算算法，还可以用于智能传感实验设备的搭建，其直观的测量界面与动态追踪功能为工程力学、机械设计等课程提供了理论与实践融合的教学工具，有助于学生深入理解力矩平衡原理及其工程应用，推动创新型工程技术人才培养[12]。

基金项目

南京工程学院校级科研基金项目资助，项目号：CKJB202208。

参考文献

- [1] 宋建钦. 力矩平衡在车辆重心测量和装载防偏重的应用[J]. 技术与市场, 2020, 27(4): 73-74.
- [2] 杜庆臣, 叶剑林. 浅谈水下产品的重心测量和计算[J]. 石化技术, 2021, 28(2): 30-31.
- [3] 魏榛, 聂书严, 刘浩. 基于无人机重心测量的互动模型装置设计[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(18): 136-139.
- [4] 杨柏年. 水陆两栖车辆运行姿态及重心实时监测系统开发[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [5] 周祖濂. 称重原理——力矩平衡和静不定原理[J]. 衡器, 2017, 46(1): 42-46.
- [6] 王亮, 王东峰, 常磊, 等. 基于力矩平衡原理的秦兵马俑重心测量及临界地震加速度计算[J]. 文物保护与考古科

- 学, 2016, 28(1): 101-107.
- [7] 贾恒信, 李明波, 吕江涛. 基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统的研究及应用[J]. 衡器, 2012, 41(8): 5-9.
 - [8] 刘九卿. 解析平行梁称重传感器的力学特性[J]. 衡器, 2025, 54(1): 5-13.
 - [9] 黄国静. Modbus 协议在 STM32 单片机与 MCGS 通信中的应用研究[J]. 电子产品世界, 2024, 31(10): 6-8, 31.
 - [10] 王攀. 一种 Modbus 通讯协议转换方法研究与实践[J]. 石化技术, 2023, 30(10): 142-143, 58.
 - [11] 陈昊苓, 张兵, 吴吉恒. 基于 RS485 和 RS232 的机车总线控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 152-159.
 - [12] 周祖濂. 集装箱重心测量装置“校准”[J]. 衡器, 2020, 49(12): 16-18, 21.