



重心测定实验教学装置的试制及应用

李 达, 李书卉, 孙 凯, 邢怀念, 金立强

(大连理工大学 工程力学系, 大连 116023)

摘要: 为了开阔学生的工程视野, 培养学生解决工程问题的能力, 针对船舶、汽车、机械等行业需测定物体重心位置的需求, 结合大连理工大学相关专业的特点, 设计了一种测定物体重心坐标的实验教学装置并得到了应用。该教学装置运行稳定、易于操作, 实验结果与理论计算值相一致。该设备的教学应用丰富并完善了基础力学实验的教学内容, 取得了良好的教学效果。

关键词: 重心; 装置研制; 实验教学

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220681

Development and Application of Experimental Teaching Device for Gravity Center Measurement

LI Da, LI Shuhui, SUN Kai, XING Huainian, JIN Liqiang

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to broaden students' engineering vision and develop their ability to solve engineering problems, this paper designs an experimental teaching device for measuring the coordinates of the gravity center of objects. This device meets the needs of the marine, automobile, machinery, and other industries to determine the position of the gravity center of objects, and also takes into account the characteristics of relevant majors of Dalian University of Technology. The teaching device is stable and easy to operate, and the experimental results are consistent with the theoretical calculation values. The teaching application of the equipment enrich and improve the teaching content of basic mechanics experiments, and achieve good teaching results.

Key words: center of gravity; device development; experimental teaching

依据万有引力定律, 地球对物体的每一个微小部分均产生引力, 这些引力的合力即为物体的重力, 合力的作用点即为物体的重心^[1]。

地球上的任何物体都要受到地球的引力, 若把物体假想地分割成无数部分, 则所有这些微小部分受到的地球引力将组成一个汇交点在地球中心的空间汇交力系^[1]。但是由于地球上物体的尺寸要远远小于地球的半径, 因此可将此空间汇交力系近似认为是空间平行力系, 此平行力系的合力 G 即物体的重力。通过实验可以知道, 无论物体怎样放置, 其重力总是通过物体内的一个确定点, 这个确定的点称为物体的重心^[2]。

重心在工程中具有重要的意义。重心的位置对物体的平衡和运动有着直接影响。如船舶的重

心位置对浮态、稳性、耐波性有重要的影响。船体重心位置的偏差会使船舶出现较大的倾斜, 影响船舶的浮态, 使船舶在航行过程中产生较大的摇摆。汽车的重心位置过高会影响汽车的安全性, 导致汽车在高速转弯、急速刹车、发生碰撞时更容易出现侧翻。大型机械设备的重心位置对于机械设备运输过程中的转运及吊装均具有非常重要的意义。

1 重心的测量方法

重心位置计算的理论方法常见的有分割法、负体积法等^[2]。然而, 在实际工程应用中, 由于物体构件的制造和装配公差、材料的均匀程度等往往不够理想, 而理论计算的时候无法考虑这些因

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-11-30

基金项目: 大连理工大学教育教学改革基金项目(YB2021101); 大连理工大学实验室建设基金(2020)。

作者简介: 李达(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事基础力学实验教学方面的研究。E-mail: lida@dlut.edu.cn

素,理论方法只能做近似计算,因此通过实验的方式确定构件重心的位置是不可或缺的。

依据重心的定义及特点,目前常见的重心位置测定方法主要有重量反应法、悬挂法及摇摆法等。

重量反应法是基于力矩平衡原理确定重心的位置,其需要测量物体支点的反力、物体总重及支点距离等。此方法应用广泛,大型机械构件常用此法确定其重心位置。其实施方案为:在大型机械构件的底端安装4个力传感器,通过力采集仪测定4个支点的支撑力,依据力矩平衡的原理,可以计算出大型机械构件在水平方向的重心位置。为了得到被测物体高度方向的重心位置,将被测物体翻转90°,重复上述操作,即可测定物体重心在空间三维坐标的位置。然而对于较为精密的机械设备,翻转时容易造成设备的损坏,因此,精密设备不建议使用此方法进行测试。

悬挂法是基于物体重力的作用线一定通过重心的原理来确定重心的位置。其测试原理简单易于操作,适用于薄板等构件。其实施方案为:用一根绳索吊起被测物体的一端,待被测物体稳定后,在被测物体上绘制绳索直线方向的延长线。改变绳索的吊点位置,并重复上述操作,依据力的平衡原理,重心应在悬线的延长线上,因此两条线的交点即为重心位置。悬挂法对于质量不大且可以任意倾斜、放倒的物体具有明显的优势,然而对于体积及重量较大的物体具有一定的局限性。

摇摆法需要利用特定的摇摆台进行,通过测量物体在摇摆台上的摆振周期,利用摆振周期与转动惯量的关系,确定物体的重心位置。工程中常采用此法确定汽车的重心位置。

本文设计的基于力矩平衡的重心测定实验装置,采用重量反应法测定物体重心位置。该装置结合大连理工大学运载学部的专业需求,面向船舶与海洋工程、汽车工程、机械工程、工程力学等专业开展重心测定实验,丰富并完善了基础力学实验的教学内容,取得了良好的教学效果^[3-4]。

2 重心测定装置的结构

本文设计的重心测定实验装置结构如图1所示,主要由主体框架、手轮、导轨、滑块、轴承、导向轮、力传感器、力采集仪、水平仪等组成。主体框架由底板、立柱及上盖板组成。底板下端布置有调节螺栓并放置于桌面上,实验时可利用水平仪调整调节螺栓,使实验装置处于水平

状态。立柱为空心管,固定于底板上,立柱顶端连接上盖板。在上盖板上端安装导轨及滑块,滑块通过螺柱及轴承与手轮连接,可通过旋转手轮使滑块在导轨上滑动。钢丝绳一端连接滑块一端连接力传感器及被测物体,并通过导向轮改变方向。力传感器与力采集仪相连可测得被测物体在当前状态下的力值。在底板上端安装导轨及滑块,滑块通过螺柱及轴承与手轮连接,将被测物体置于滑块上端,可通过旋转手轮使滑块在导轨上滑动进而改变被测物体的状态。底板与盖板均布置有刻度尺,可读取滑块滑动的距离,进而可以计算得到被测物体的起升高度及起升角度。滑轮一侧设置有铅锤,实验时可以保证被测物体处于垂直状态。

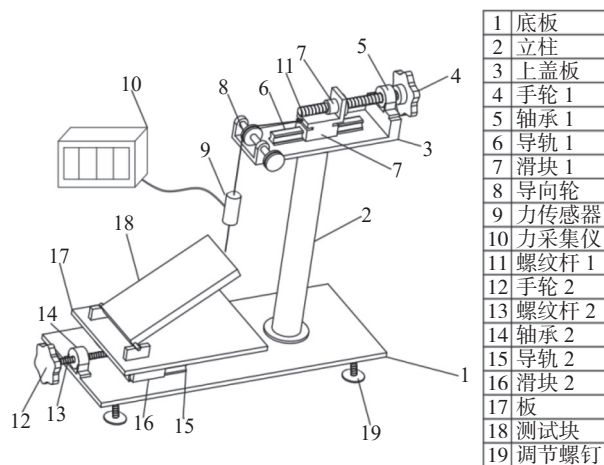


图1 实验装置整体结构图

3 实验方案设计

基于力矩平衡原理,采用重量反应法测定物体重心位置,需测定物体吊点的作用力及距离。

3.1 重心位置水平坐标的确定

如图2所示,对任意形状的构件,假设其总重量为 G ,将其A端放置于支点M位置,将其B端用带有力传感器的吊索悬挂,使得吊索处于竖直状态(与铅垂线平行)。假设力传感器读数为 G_1 ,A点到B点的水平距离为 L_{AB} ,重心到A点的水平距离为 L_{AD} ,重心与B点的水平距离为 L_{BD} 。则根据力矩平衡原理有:

$$G_1 \times L_{AB} = G \times L_{AD} \quad (1)$$

通过式(1)可以确定出重心所在位置一个方向上的水平坐标。将物体水平旋转90°,重复上述操作,同理可以测得重心位置另一方向的水平坐标。

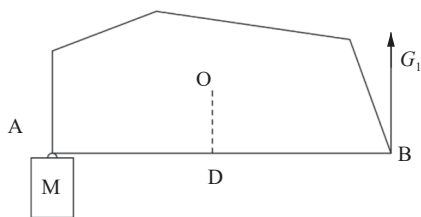


图 2 重心位置水平坐标测定示意图

3.2 重心位置垂向坐标的确定

确定物体的水平坐标后,可调整吊点的位置,使被测物体在垂直于纸面方向处于水平状态。同时,调节 A、B 两点高度,使被测物体在 AB 方向上处于水平状态。然后将 B 端抬起一定高度,并使吊线处于铅锤状态。此时 AB 连线与水平线夹角为 α ,如图 3 所示。假设力传感器读数为 G_2 ,A 点到 B 点的水平距离为 L_{AB} ,重心到 A 点的水平距离为 L_{AD} ,重心与 B 点的水平距离为 L_{BC} 。则根据力矩平衡原理有:

$$G_2 \times L_{AC} = G \times L_{AH} \quad (2)$$

通过式(2)就可以确定出重心所在位置的一个方向的水平坐标 H 点。此时,过 H 点可画出一条铅垂线。设两条直线的交点为 O,测出 O 点与测量水平基准面的距离,即可得到重心位置在此平面内的坐标,如图 3 所示。

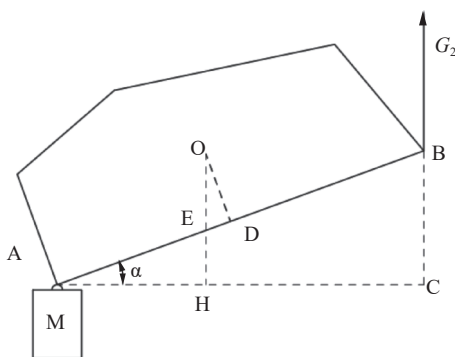


图 3 重心位置垂向坐标测定示意图

基于三角形相似理论,则:

$$L_{AE} = L_{AH} \times L_{AB} / L_{AC} \quad (3)$$

进而求得:

$$L_{DE} = L_{AD} - L_{AE} \quad (4)$$

最终可得重心的垂向坐标:

$$L_{OD} = L_{AC} \times L_{DE} / L_{BC} \quad (5)$$

4 重心位置的理论计算方法

重心是物体各部分所受重力的合力的作用点。在物体内部各部分所受重力可看作平行力的情

况下,重心是一个定点。

质量均匀分布的物体,重心的位置只跟物体的形状有关。有规则形状的物体,它的重心就在几何中心上。质量分布不均匀的物体,重心的位置除跟物体的形状有关外,还跟物体内部质量的分布有关。因此凡是具有对称面、对称轴或者对称中心的简单形状的均匀物体,其重心一定在它的对称面、对称轴和对称中心上。如质量分布均匀的球体的重心就在球心,质量分布均匀的直棒的重心就在棒的中点。

对于形状不规则的或质量分布不均匀的物体,可假设物体的重心坐标为 (x_G, y_G, z_G) ,如图 4 所示,在空间直角坐标系 $oxyz$ 中,将物体分成若干微小部分,每个微小部分所受重力分别为 $G_1, G_2, \dots, G_n$,各力作用点的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ 。 G 是各重力 $G_1, G_2, \dots, G_n$ 的合力,则物体的重心坐标如下所示:

$$\begin{cases} x_G = \frac{\sum G_i \times x_i}{G} \\ y_G = \frac{\sum G_i \times y_i}{G} \\ z_G = \frac{\sum G_i \times z_i}{G} \end{cases} \quad (6)$$

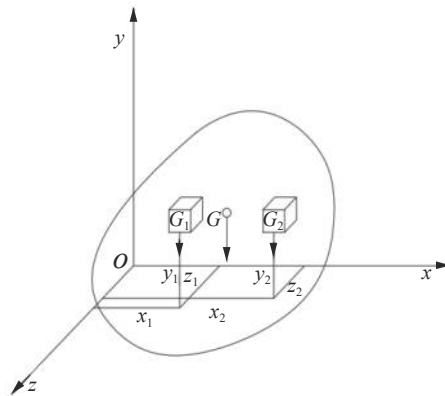


图 4 重心位置计算图

依据式(6),基于力矩平衡的重心测定装置的被测物体由一个尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的长方体及一个尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的正方体组合而成。正方体置于长方体长度方向 150 mm 位置,如图 5 所示。建立如图所示笛卡尔空间直角坐标系,则 $x_1=100 \text{ mm}, y_1=10 \text{ mm}, z_1=50 \text{ mm}; x_2=150 \text{ mm}, y_2=45 \text{ mm}, z_2=50 \text{ mm}$ 。则其重心位置理论坐标为:

$$\begin{cases} x_G = \frac{G_1 \times x_1 + G_2 \times x_2}{(G_1 + G_2)} = 111.9 \text{ mm} \\ y_G = \frac{G_1 \times y_1 + G_2 \times y_2}{(G_1 + G_2)} = 18.3 \text{ mm} \\ z_G = \frac{G_1 \times z_1 + G_2 \times z_2}{(G_1 + G_2)} = 50 \text{ mm} \end{cases}$$

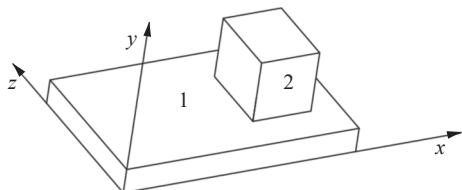


图5 被测物体示意图

5 实验项目设计及应用

依据实验方案, 重心测定实验项目的设计步骤如下。

1) 实验前应利用水平仪通过调整调节螺栓对重心测定实验装置进行调试, 保证实验台面处于水平状态, 如图6所示。

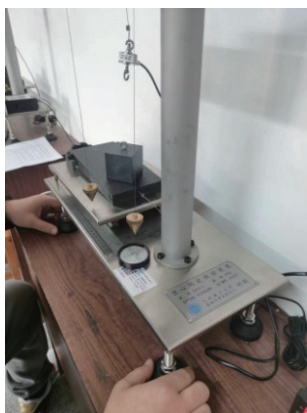


图6 装置调平示意图

2) 选择被测物体, 用三角板测定被测物体的尺寸, 如图7所示。并依据被测物体尺寸计算物体重心位置的理论值。



图7 测定被测物体尺寸示意图

3) 在被测物体上随机布置一个测量基准点。以该基准点作为原点建立三维笛卡尔空间坐标系。该基准点的选择对实验结果没有影响, 但为了便于理解及计算, 通常选择测试件某一直角边的交点为基准点。

4) 用吊钩吊起被测物体, 使被测物体处于悬空状态。通过力传感器及力采集仪测定被测物体的总重量 G , 如图8所示。



图8 物体总重测试示意图

5) 将被测物体左端置于底板支架上, 同时用吊钩吊起被测物体的右端, 如图9所示。利用水平仪及调节手轮使被测物体处于水平状态, 同时利用铅锤调节吊线方向, 使吊线处于竖直状态。待试样静止后, 读取力采集仪读数 G_1 , 并读取下滑块1与上滑块2在刻度尺上对应的初始刻度值。



图9 重心位置计算图

6) 旋转手轮2, 使被测物体一端抬起一定高度, 同时旋转手轮1, 使吊线处于竖直状态, 使AB连线与水平线成一定的夹角(以 20° 为宜), 读取力采集仪读数 G_2 及下滑块1与上滑块2在刻度尺上对应的刻度值。

7) 将力采集仪读数及下滑块1、上滑块2的数值记录入数据记录表中, 如表1所示, 并计算被测物体的重心坐标。

表 1 数据记录表

力采集仪读数/kg			下滑块1读数/mm		上滑块2读数/mm	
G	G_1	G_2	$L_{1初}$	$L_{1终}$	$L_{2初}$	$L_{2终}$
4.153	2.355	2.245	61.2	70.2	90.9	145.3

已知, 被测物体试样长度 $L_{AB}=200\text{ mm}$, 被测物体总重量 $G=4.153\text{ kg}$, 力采集仪读数 $G_1=2.355\text{ kg}$, 将上述实验结果代入式(1):

$$G_1 \times L_{AB} = G \times L_{AD}$$

计算可得 $L_{AD}=113.41\text{ mm}$, 即 $x_{G\text{测}}=113.41\text{ mm}$ 。

已知: $G_2=2.245\text{ kg}$; $L_{AC}=L_{AB}-(L_{1终}-L_{1初})=191.0\text{ mm}$; $L_{BC}=L_{2终}-L_{2初}=54.4\text{ mm}$ 。

将上述结果代入式(2):

$$G_2 \times L_{AC} = G \times L_{AH}$$

计算可得 $L_{AH}=103.25\text{ mm}$, 代入式(3):

$$L_{AE} = L_{AH} \times L_{AB} / L_{AC}$$

得 $L_{AE}=108.11\text{ mm}$, 代入式(4):

$$L_{DE} = L_{AD} - L_{AE}$$

得 $L_{DE}=5.30\text{ mm}$, 代入式(5):

$$L_{OD} = L_{AC} \times L_{DE} / L_{BC}$$

得 $L_{OD}=18.60\text{ mm}$ 。

被测物体的三维空间坐标实验值为: $x_{G\text{测}}=113.41\text{ mm}$, $y_{G\text{测}}=18.60\text{ mm}$ 。

由上文可知, 被测物体的重心位置理论值为: $x_G=111.9\text{ mm}$, $y_G=18.3\text{ mm}$, 则相对误差 $T(x)=1.35\%$, $T(y)=1.64\%$ 。

本文设计的基于力矩平衡的重心测定实验教学装置结合大连理工大学运载学部的专业需求, 面向船舶学院、汽车工程学院、工程力学系等专业开展重心测定实验, 每学年的使用量达 2000 人次。从装置使用情况来看, 该教学装置运行稳定、易于操作, 实验结果与理论计算值相一致; 从教学效果来看, 学生在教师的指导下能熟练地掌握该装置的测试原理及测试方法, 并能准确地使用该装置测试物体重心位置^[5-7]。根据不同的专业, 该装置可测试船舶、汽车、飞机等模型的重心位置, 激发学生的学习兴趣, 获得学生的一致好评; 从创新性来看, 该装置虽然依据力矩平衡原理测试, 但其仅仅通过对物体的一次倾斜即可得到物体的三维空间坐标, 此方法是原有的测量装置所不具备的, 具有一定的科学性及创新性。该实验设备的研制及应用开阔了学生的工程视野, 培养了学生解决工程问题的能力, 丰富及完善了基础力学实验的教学内容, 并取得了良好的教学效果^[8-10]。

6 结束语

本文针对船舶、汽车、机械等行业需测定物体重心位置的需求, 结合学校相关专业的特点设计了一种测定物体重心坐标的实验教学装置。该装置基于力矩平衡原理, 通过测定物体一端的重量及平移距离实现重心位置的确定^[11]。该实验装置已连续 4 年应用于基础力学实验教学, 运行稳定、易于操作, 实验结果与理论计算值相一致。该教学装置的应用激发了学生的学习兴趣, 获得学生的一致好评并开拓了学生的工程视野, 培养了学生解决工程问题的能力^[12-14]。该设备的研制及教学应用丰富及完善了基础力学实验的教学内容, 取得了良好的教学效果。

参考文献

- [1] 李达, 李书卉, 孙凯, 等. 一种测定物体重心三维空间坐标的实验教学装置: CN202011499255.9[P]. 2020-12-17.
- [2] 邢怀念, 李达, 李书卉, 等. 基础力学实验 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2021.
- [3] 刘晓宇, 杨谨蔚, 赵晓争, 等. 新工科背景下基础力学实验教学模式改革实践与探索 [J]. 力学与实践, 2022, 44(3): 693-699.
- [4] 徐志敏, 吴莹. 基于翻转课堂的基础力学实验教学模式探索与实践 [J]. 实验室科学, 2021, 24(6): 88-91.
- [5] 吴莹, 徐志敏, 张陵. 适应“新工科”人才培养需求的力学实验教学新模式 [J]. 力学与实践, 2019, 41(1): 86-90.
- [6] 陈红兵, 郑应彬, 罗书强. 材料力学实验教学改革探讨 [J]. 实验科学与技术, 2014, 12(6): 77-80.
- [7] 李建华, 乔箭, 陈亮亮. 材料力学实验“互动式”教学模式探索 [J]. 实验技术与管理, 2013, 30(12): 181-183.
- [8] 郝光香, 李明珠, 徐京明. 大创项目与自制实验设备的深度融合 [J]. 高师理科学刊, 2022, 42(9): 81-83.
- [9] 刘亚丰, 杨祥良, 赵元弟, 等. 走自制实验设备之路凸显学科专业特色 [J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 201-203.
- [10] 胡静, 杨成建, 崔海航, 等. 新型静水压强实验设备研制及教学改革实践 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36(5): 107-110.
- [11] 韩旭, 王子申, 李健. 海洋平台大型橇装设备重心计算的新方法 [J]. 中国造船, 2019(60): 252-255.
- [12] 张海峰, 徐贺, 闫荣富. 高校实验室安全系统治理的研究与实践 [J]. 实验技术与管理, 2018, 35(7): 12-15.
- [13] 林路秀, 李艳彩, 刘凤娇, 等. 基于移动终端的高校大型仪器设备管理研究 [J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 115-118.
- [14] 王勇. 学生实验中的错与纠错 [J]. 实验科学与技术, 2018, 16(1): 65-68.