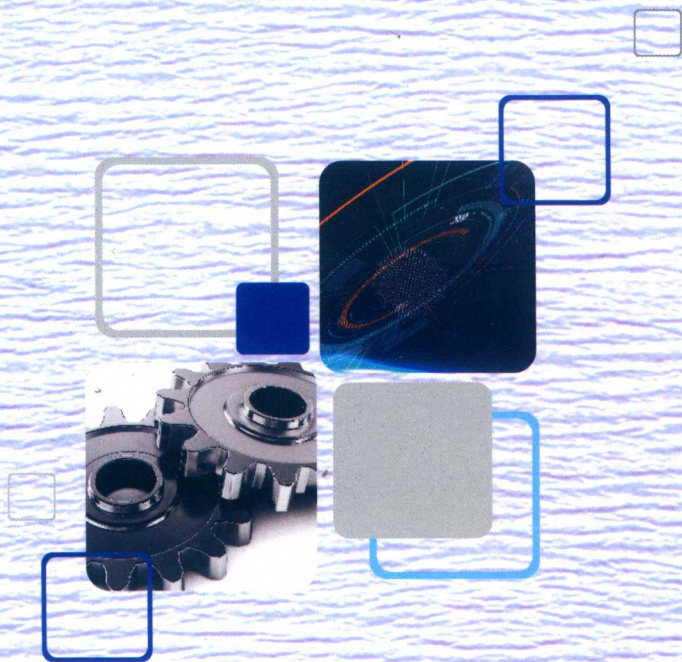


● 高等学校“十三五”规划教材

工程力学实验教程

——基础力学、电测与振动

郭空明 徐亚兰 王芳林 师 阳 编著



高等学校“十三五”规划教材 内容简介

工程力学实验教程

——基础力学、电测与振动

郭空明 徐亚兰 编著
王芳林 师 阳

贵州师范学院内部使用

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是一本力学实验教材,是针对新形势下本科力学类课程课内实验的要求而编写的。本书覆盖面广,包含理论力学实验、材料力学实验、流体力学实验和振动力学实验四部分,每部分又包含四个基础实验,基本覆盖了一般高校教学大纲规定的实验内容,并对实验的基础知识和实验设备进行了详细介绍。

本书可作为力学、机械、土木工程、航空航天、船舶等专业本科生的力学课程实验教材,也可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验教程:基础力学、电测与振动/郭空明,徐亚兰,王芳林,等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.10

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5474 - 4

I. ① 工… II. ① 郭… ② 徐… ③ 王… III. ① 工程力学—实验—高等学校—教材

IV. ① TB12-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 211024 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 马晓娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 咸阳华盛印务有限责任公司

版 次 2019年10月第1版 2019年10月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印 张 7

字 数 138千字

印 数 1~3000册

定 价 16.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5474 - 4/TB

XDUP 5776001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

序

实验在力学的发展过程中发挥了关键和重要的作用。力学实验引导了力学理论的产生,并推动和促进了力学理论的发展。人们所熟知的伽利略开展的抛体和落体实验,阐明了自由落体的运动规律,提出了加速度的概念和惯性定律;伯努利精心设计的管道中水流动实验,得到了流体在定常运动下流速、压力和管道高程之间的关系。在科学研究的三大手段——理论分析、数值计算和实验研究中,实验仍发挥着不可替代的作用,是检验理论的标准。

力学作为一门最早发展和成熟起来的独立基础学科,兼有技术学科的特性。从遵循和尊重实验在力学发展进程中作用的角度出发,无论是力学的基础课程,还是力学的专业课程,均十分注重力学实验在力学理论知识传授、力学研究方法学习以及力学能力素养培养中所发挥的重要基础性作用。因此,无论是面向工科类学生开设的基础课“理论力学”和“材料力学”,还是面向特定专业学生开设的专业基础课程,如“流体力学”和“振动力学”,均设置有一定课时的实验教学内容。毋庸置疑,实验可以培养学生综合应用力学理论、数据处理、程序编制和仪器操作等多种知识的能力,培养学生自主学习、发现问题和解决问题的能力,是培养学生探索精神和增强创新能力的重要手段。

传统上,根据力学二级学科的划分,在高校中上述四门课程由不同教研室的教师负责讲授,而相应的力学实验(含场地和设备)也由相应教研室负责。随着教育部设立了国家级力学实验教学中心后,各个高校也逐步建设起统一规划和管理的力学实验室,配备有专职的力学实验教学和技术人员,负责主要力学课程的力学实验的教学任务,并编写了与之相配套的综合多门力学课程的工程力学实验的教材。

西安电子科技大学机电工程学院电子机械系的郭空明等老师结合该校力学实验近40年的发展历程以及现实学生综合素质培养的需求,在多年力学理论

与力学实验教学经验的基础上，编写了本力学实验教材。该教材包含理论力学实验、材料力学实验、流体力学实验和振动力学实验四部分内容。该教材注重与实验相对应的力学理论公式的推导，且力求详尽，致力于引导学生综合应用所学知识。此外，该教材侧重于主要力学实验仪器和设备的基本原理介绍，有助于学生综合素质的培养。

期望这本力学实验教材的出版能够帮助学生掌握相关的力学原理，丰富学生的力学实验学习内容，为我国高等学校的力学实验教学的发展提供有益的参考。



西安交通大学 教授

2019年7月26日于西安

前 言

早期力学学科是建立在观察和实验基础上的，目前实验手段在力学研究中仍占有重要的地位。因此，实验是力学课程教学的重要组成部分，力学课程实验对力学、机械、土木工程、航空航天等专业的本科生而言很重要。

早在 20 世纪 80 年代初，西安电子科技大学电子机械系就开设了材料力学课程的拉伸、扭转等基础实验，之后又陆续开设了流体力学、材料力学电测、振动力学、理论力学等实验，并不断更新实验内容与设备。近年来，为了满足工程专业认证的要求、学校教学部门对实验教学的要求以及学生综合素质培养的要求，我们结合多年的实验教学经验，编写了本书。学生在实验课程的学习中，结合本书的辅导，可以更好地掌握实验原理和技能，为解决工程中的实际力学问题打下坚实的基础。

本书有以下特点：

(1) 内容较全面，包含理论力学实验、材料力学实验、流体力学实验和振动力学实验。每一部分又包括基础知识、实验设备与仪器和基础实验三方面内容。

(2) 本书虽然是一本实验教材，但对理论公式的推导力求详尽，而非简单引用。例如针对振动微分方程的求解、模态线性无关的证明、电桥的输出等，给出了推导过程的细节。对于一些理论推导采用了与传统教材不同的视角，例如针对材料力学主应力的推导，采用了矩阵特征值理论，可以使学生更好地串连各门课程的知识。

(3) 对主要实验设备和仪器的原理进行了介绍。由于实验设备和仪器的原理包含力学、测控、机械、电气等多门课程的知识，因此这部分内容非常有助于学生综合素质的培养。不过，由于时间紧，加之作者知识有限，这部分内容深度

还不够，这也是本书的一大缺憾。

本书的出版得到了西安电子科技大学教材基金(BJ1806)资助、国家自然科学基金(11502183)以及陕西省科技计划项目(2018JQ1081)的支持。本书的编写参考了许多同行的理论及实验教材，以及多个厂家的仪器及设备指导书，在此一并表示感谢。最后特别感谢西安交通大学江俊教授为本书作序。

希望本书的出版能给各高等院校的力学实验教学提供一些帮助和参考。由于水平有限，书中难免存在不妥，敬请批评指正。邮箱：kmguo@xidian.edu.cn。

郭空明

2019年7月

目 录

第一章 理论力学实验	1
1.1 基础知识	1
1.1.1 平面物体的重心	1
1.1.2 单自由度系统的无阻尼自由振动	3
1.2 实验设备与仪器	5
1.3 基础实验	6
实验一 重心测定实验	6
实验二 三线摆法求圆盘转动惯量实验	8
实验三 等效法求非规则物体转动惯量实验	11
实验四 单自由度系统自由振动实验	13
本章参考文献	15
第二章 材料力学实验	16
2.1 基础知识	16
2.1.1 材料拉伸的力学性能	16
2.1.2 材料扭转的力学性能	18
2.1.3 电阻应变片的原理	20
2.1.4 电阻应变片的粘贴	23
2.1.5 电阻应变片的测量电路	25
2.1.6 应力状态分析	27
2.1.7 应变状态分析	29
2.2 实验设备与仪器	30
2.2.1 微机控制电子万能试验机	30
2.2.2 扭转试验机	34
2.2.3 静态电阻应变仪	34
2.2.4 弯曲正应力实验装置	37
2.2.5 弯扭组合实验装置	38
2.3 基础实验	39
实验一 拉伸实验	39
实验二 扭转实验	44

实验三 弯曲正应力实验	48
实验四 弯扭组合主应力实验	52
本章参考文献	55
第三章 流体力学实验	56
3.1 基础知识	56
3.1.1 Bernoulli 方程	56
3.1.2 管道流动沿程损失	57
3.2 实验设备与仪器	59
3.2.1 Pitot 管	59
3.2.2 流体力学综合实验台	59
3.3 基础实验	60
实验一 Reynold 实验	60
实验二 能量方程实验	64
实验三 沿程阻力实验	67
实验四 局部阻力实验	70
本章参考文献	73
第四章 振动力学实验	74
4.1 基础知识	74
4.1.1 单自由度系统的自由衰减振动	74
4.1.2 单自由度系统的受迫振动	75
4.1.3 多自由度系统的自由振动	79
4.1.4 多自由度系统的受迫振动	81
4.1.5 离散 Fourier 变换	82
4.1.6 采样定理	84
4.2 实验设备与仪器	85
4.2.1 振动测试原理概述	85
4.2.2 压电传感器	86
4.2.3 磁电式速度传感器	87
4.2.4 电磁式激振器	88
4.2.5 振动教学实验装置	89
4.3 基础实验	93
实验一 振动物理量测定实验	93
实验二 单自由度系统衰减振动实验	95
实验三 阻尼减振实验	98
实验四 两自由度系统振动实验	101
本章参考文献	104

第一章 理论力学实验

1.1 基础知识

1.1.1 平面物体的重心

首先考虑图 1-1 所示的平面平行力系, 假设每个力 F_i 的作用点为 (x_i, y_i) , 所有力的合力为 F , 力心坐标为 (x_c, y_c) , 则根据合力矩定理, 有如下关系式:

$$\begin{cases} F \cos\theta x_c = \sum_{i=1}^n F_i \cos\theta x_i \\ F \sin\theta y_c = \sum_{i=1}^n F_i \sin\theta y_i \end{cases} \quad (1-1)$$

进而得到力心坐标为

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{F}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{F} \quad (1-2)$$

可以看出, 力心坐标与平行力系作用的方向无关。

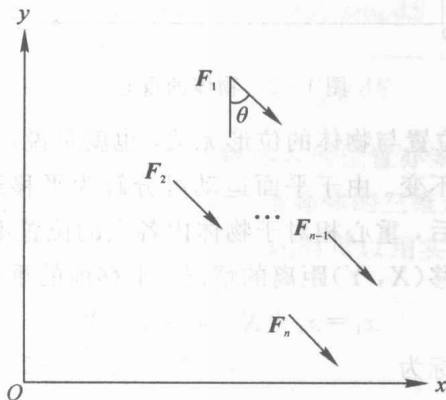


图 1-1 平面平行力系

考虑均匀重力场中的二维物体(见图 1-2), 即等厚度的薄物体, 其重量为 W , 在 xOy 平面内将其分割为无数微元体, 第 i 个微元体的坐标为 (x_i, y_i) , 重量为 W_i , 根据式(1-2) 可得

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n W_i x_i}{W}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n W_i y_i}{W} \quad (1-3)$$

微元体数目无限增大的极限情况下, 式(1-3)改用积分形式表示:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\int_S \rho g x dS}{W} = \frac{\int_S \rho g x dS}{\int_S \rho g dS} \\ y_c = \frac{\int_S \rho g y dS}{W} = \frac{\int_S \rho g y dS}{\int_S \rho g dS} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, ρ 为单位面积的质量, 而非密度, 对于均质物体, ρ 为常数; S 为二维物体的面积。

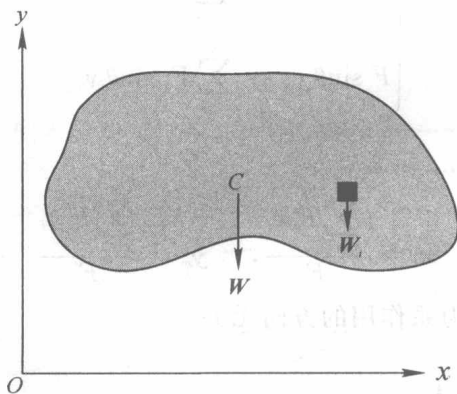


图 1-2 物体的重心

可以证明, 物体的重心位置与物体的位形无关, 也就是说, 若物体做平面运动, 则重心相对于物体中各点所处位置不变。由于平面运动可分解为平移运动和定轴转动, 因此只需要分别证明物体平移和转动后, 重心相对于物体内各点的位置不变即可。

首先考虑物体各点平移 (X, Y) 距离的情况, 平移前的重心点在平移后变为

$$x_1 = x_c + X, \quad y_1 = y_c + Y \quad (1-5)$$

而平移后物体新的重心点坐标为

$$\begin{cases} x_{c1} = \frac{\int_S \rho g (x + X) dS}{\int_S \rho g dS} = \frac{\int_S \rho g x dS}{\int_S \rho g dS} + \frac{\int_S \rho g X dS}{\int_S \rho g dS} = x_c + X \\ y_{c1} = \frac{\int_S \rho g (y + Y) dS}{\int_S \rho g dS} = \frac{\int_S \rho g y dS}{\int_S \rho g dS} + \frac{\int_S \rho g Y dS}{\int_S \rho g dS} = y_c + Y \end{cases} \quad (1-6)$$

比较式(1-5)和式(1-6), 可得重心在物体内的位置未变化。

然后考虑定轴转动的情形。不失一般性, 考虑物体绕 z 轴转动的情形。设原重心位置的矢径长度为 r , 即

$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (1-7)$$

设矢径与 x 轴夹角为 θ (逆时针为正), 则

$$\begin{cases} x_c = r \cos \theta \\ y_c = r \sin \theta \end{cases} \quad (1-8)$$

考虑物体绕 z 轴逆时针转动 ψ 角, 此时原重心位置的坐标变为

$$\begin{cases} x_2 = r \cos(\theta + \psi) = r \cos \theta \cos \psi - r \sin \theta \sin \psi = x_c \cos \psi - y_c \sin \psi \\ y_2 = r \sin(\theta + \psi) = r \sin \theta \cos \psi + r \cos \theta \sin \psi = y_c \cos \psi + x_c \sin \psi \end{cases} \quad (1-9)$$

新的重心点坐标为

$$\begin{cases} x_{c2} = \frac{\int_S \rho g (x \cos \psi - y \sin \psi) dS}{\int_S \rho g dS} = \frac{\int_S \rho g x \cos \psi dS}{\int_S \rho g dS} - \frac{\int_S \rho g y \sin \psi dS}{\int_S \rho g dS} = x_c \cos \psi - y_c \sin \psi \\ y_{c2} = \frac{\int_S \rho g (y \cos \psi + x \sin \psi) dS}{\int_S \rho g dS} = \frac{\int_S \rho g y \cos \psi dS}{\int_S \rho g dS} + \frac{\int_S \rho g x \sin \psi dS}{\int_S \rho g dS} = y_c \cos \psi + x_c \sin \psi \end{cases} \quad (1-10)$$

比较式(1-9)和式(1-10), 可得重心在物体内的位置亦未变化。因此物体的运动不改变重心在物体内的位置。类似可证, 这一点对三维物体的三维运动也是成立的。

对于形状复杂的物体, 式(1-4)难以应用, 此时可以用实验方法确定物体的重心。常用的方法有悬吊法和称重法。

1.1.2 单自由度系统的无阻尼自由振动

考虑单自由度振动系统, 假设其位移为 x , 质量为 m , 刚度为 k , 在不受外力时, 运动

方程为

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1-11)$$

假设式(1-11)的解具有如下形式:

$$x(t) = Ce^{st} \quad (1-12)$$

其中, t 表示时间。考虑非平凡解, 即不恒为零的解, 则 $C \neq 0$ 。

将式(1-12)代入式(1-11), 可得式(1-11)的特征方程:

$$ms^2 + k = 0 \quad (1-13)$$

其特征根为

$$s_{1,2} = \pm j\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-14)$$

其中, j 为虚数单位。定义系统的固有(圆)频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-15)$$

可计算出振动周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1-16)$$

则式(1-11)的通解为

$$x(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} = C_1 e^{j\omega_0 t} + C_2 e^{-j\omega_0 t} \quad (1-17)$$

其中, C_1 、 C_2 为复常数, 由初始条件确定。

虽然从形式上看, 式(1-17)的表达式可能是复数, 但实际上, 由于初始条件为实数, 代入初始条件求出 C_1 、 C_2 后, $x(t)$ 的表达式必然为实数。利用 Euler(欧拉)公式, 可将式(1-17)写成:

$$\begin{aligned} x(t) &= C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} = C_1 e^{j\omega_0 t} + C_2 e^{-j\omega_0 t} \\ &= (C_1 + C_2) \cos\omega_0 t + j(C_1 - C_2) \sin\omega_0 t \\ &= A_1 \cos\omega_0 t + A_2 \sin\omega_0 t \end{aligned} \quad (1-18)$$

其中, A_1 、 A_2 为新的常数, 理论上为复数, 但只要初始条件为实数, 则从式(1-18)最后一步可以看出, A_1 、 A_2 必然为实常数。

将式(1-18)进一步整理为

$$x(t) = A_1 \cos\omega_0 t + A_2 \sin\omega_0 t = A \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (1-19)$$

其中, A 和 θ 由初始条件确定:

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{\dot{x}_0^2}{\omega_0^2}}, \quad \tan\theta = \frac{\omega_0 x_0}{\dot{x}_0} \quad (1-20)$$

对于扭转振动, 设物体转动惯量为 J , 扭转刚度为 k , 转角为 φ , 类似可得扭转自由振动的方程:

$$J\ddot{\varphi} + k\varphi = 0 \quad (1-21)$$

振动的固有(圆)频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (1-22)$$

周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} \quad (1-23)$$

对于一般的单自由度振动,其方程为

$$a\ddot{u} + bu = 0 \quad (1-24)$$

振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a}{b}} \quad (1-25)$$

1.2 实验设备与仪器

理论力学多功能实验台是一种可进行多种理论力学教学实验的教学专用设备,最早由浙江大学庄表中教授设计研制,目前已衍生出多个型号。

下面以 ZML-1 型理论力学多功能实验台为例,对这一设备进行简单介绍。ZML-1 型理论力学多功能实验台的结构图如图 1-3 所示。

图中,1 为台面水平调节地撑;2 为抽屉 I (内置连杆、振动载荷、渐加载荷袋、积木块、型钢模片等);3 为风扇调速器;4 为风扇;5 为三线摆;6 为三线摆升降手轮;7 为电缆振动模型;8 为刚度测定加载钩;9 为工作台面;10 为抽屉 II (内置电子秤、风速仪、转速表、秒表、砝码组、水平尺等)。

该多功能实验台可进行单自由度振动、重心测定、转动惯量计算等多个实验。实验前,应注意调节地撑,利用水平尺进行测量,使台面的纵、横方向均为水平。

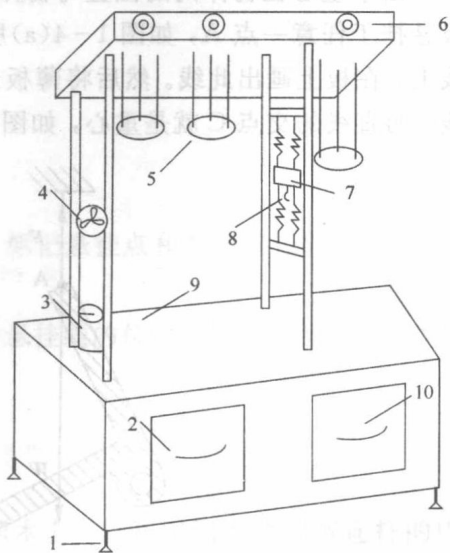


图 1-3 ZML-1 型理论力学多功能实验台

1.3 基础实验

实验一 重心测定实验

一、实验目的

- (1) 通过实验加深对合力矩定理、重心概念的理解。
- (2) 学会用悬吊法测不规则物体的重心。
- (3) 学会用称重法求不规则物体的重心。

二、实验设备

ZML-1 型理论力学多功能实验台。

三、实验原理

1. 悬吊法测不规则物体的重心

由于重心在物体内的位置与物体的位形无关,如果要求等厚薄板的重心,可先将薄板悬挂于任意一点 A,如图 1-4(a)所示。根据二力平衡公理,重心必然在过悬吊点的铅直线上,在板上画出此线。然后将薄板悬挂于另外一点 B,依前法同样可以画出另外一条直线。两直线的交点 C 就是重心,如图 1-4(b)所示。

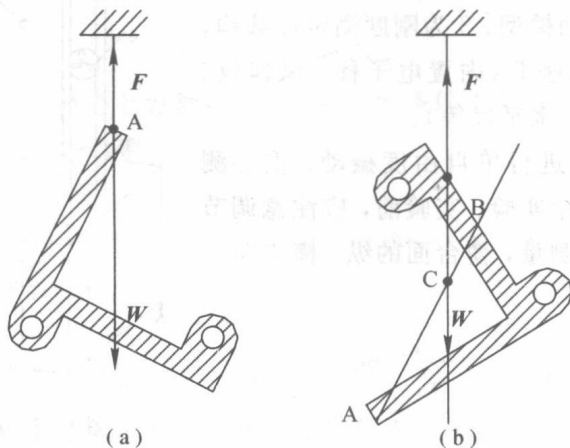


图 1-4 悬吊法测重心位置

2. 称重法求不规则物体的重心

下面以连杆为例简述称重法求重心的方法。

先用电子秤测出连杆重量 W ，再利用积木块设法使连杆水平搁置，如图 1-5 所示。根据力矩平衡，有

$$x_c W = F_{N1} l \quad (1-26)$$

式中， F_{N1} 为电子秤此时的读数。根据式 (1-26) 便可计算出重心位置 x_c 。

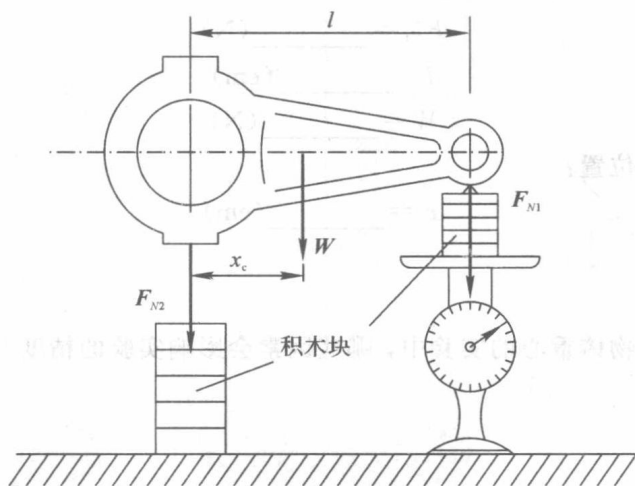


图 1-5 称重法求重心位置

四、实验步骤

1. 悬吊法测不规则物体的重心

- (1) 在纸上描出不规则物体的外形。
- (2) 用细绳将不规则物体悬挂于上顶板的螺钉上，标记悬挂点和第一条悬挂线的位置，并在纸上画出。
- (3) 将物体换一个方向悬挂，标记悬挂点和第二条悬挂线的位置，并在纸上画出。两条悬挂线的交点，即为重心的位置。

2. 称重法求对称连杆的重心

- (1) 先称出连杆的总重量。
- (2) 将连杆的一端置于电子台秤上，另一端置于积木上，并利用积木块调节连杆的中心位置使它成水平，记录此时电子秤的读数。

五、实验数据记录及处理

1. 悬吊法

对组合型钢悬吊两次，作图标示出重心位置。

2. 称重法

利用积木块水平搁置连杆，用电子秤称出连杆重量($g=10 \text{ m/s}^2$)。记录：

$$F_{N1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (N)}$$

$$l = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (cm)}$$

$$W = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (N)}$$

据此求出连杆的重心位置：

$$x_c = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (cm)}$$

六、思考题

在进行称重法求物体重心的实验中，哪些因素会影响实验的精度？

实验二 三线摆法求圆盘转动惯量实验

一、实验目的

- (1) 掌握用三线摆测量转动惯量的原理和方法。
- (2) 测定均质圆盘的转动惯量，并与理论值进行比较。

二、实验设备

ZML-1 型理论力学多功能实验台。