

# 物理实验的常用测量方法

戴岩伟

物理实验都离不开定量的测量和分析,待测量很广泛,包括力学量、热学量、电磁学量和光学量等。测量方法也很多,本文仅介绍几种具有共性的基本测量方法。这些测量方法是物理实验的思想方法,而不是指具体的测量过程和方式。学习并掌握好这些基本的实验方法,可指导我们设计实验方案,选择测量手段,提高科学实验和研究的能力。

## 一、比较法

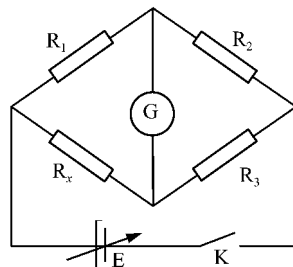
通过将待测未知量与已知标准量进行比较,从而达到测量目的的方法称为比较法。实际上,任何一个测量过程,原则上讲都是一种比较过程,所以比较法在物理实验中是最基本、最普遍的测量方法。在比较过程中,根据是否进行了转换,可将比较法分为“直接比较法”和“间接比较法”两类。

最简单的直接比较法就是将待测量与量具上属于同类物理量的标准量进行直接比较,测出其大小,例如用米尺测量长度、用秒表测量时间。而平衡测量法、补偿测量法和重合测量法等,也属于直接比较法的范畴。

**平衡测量法** 用等臂天平称衡物体的质量就是一种平衡测量。又如,如图所示的惠斯登电桥测电阻的实验中,我们知道,只有当电桥平衡时才有关系

式  $R_x = (R_1/R_2) R_3$ ,从而可测出电阻  $R_x$ ,所以,从原理上讲,这也是一种平衡测量。

**补偿测量法** 例如,将待测电动势的电源  $E_x$  与一已知电动势的电源  $E_n$  “+”端对“+”端、“-”端对“-”端地连成一回路,如果这样组成的电路



(补偿回路)中电流为零,表示待测电动势  $E_x$  得到已知电动势  $E_n$  的补偿,因而两者数值相等,这样就可以根据已知电动势  $E_n$  定出  $E_x$ ,这种方法叫做补偿测量法。用电压表测量电压时,总要从被测电路上分出一部分电流,从而改变了被测电路的状态。用补偿法测电压时,不从被测电路中取得电流,所以不影响被测电路的状态。

**重合测量法** 所谓重合法是指当待测量与已知标准量相差一个数值较小的量时,将两者加以延伸、重复若干个周期后,使两者重合在一起,这样即可通过相互间的比较测出未知量的大小。在用游标尺(包括各类游标卡尺和角游标)测量中所运用的游标原理就体现了这种测量方法。

在一些具体的实验中,为了提高测量精度也可

$10^{-16}$ 、 $\phi$ 是引力方向与 $\gamma$ 射线方向间夹角。由此可见,所得结果与理论符合得很好。

**横向多普勒效应的观测** 狭义相对论给出的多普勒频移公式  $\nu' = (1 + v \cos\theta/c) \nu \sqrt{1 - (v/c)^2}$ ,其一级近似与经典物理中的多普勒频移相同,而光的传播方向与源同吸收体相对运动速度垂直时存在横向多普勒效应,经典物理学中并没有这种效应,此时横向多普勒效应为  $\Delta\nu/\nu = v^2/2c^2$ 。显然,横向多普勒效应是一种时钟变慢效应。

1960年,海伊(H. J. Hay)等人利用这个穆斯堡尔效应验证了狭义相对论预言的横向多普勒效应。他们将 $^{57}\text{Fe}$ 放射源置于超速离心机高速转子的中心,将 $^{57}\text{Fe}$ 吸收体置于转子的边缘,记录穿过吸收体的 $\gamma$ 光子数目。按照他们当时的实验,实验结果

与理论预言在2%精度内符合,以后又有一些人重复过这样的测量,其中最高精度达到1.1%。这些实验对于理论的发展都有重大意义。

穆斯堡尔效应大量的应用是研究原子核和周围环境间的超精细相互作用。通过测量核能级超精细结构,可以了解有关原子核周围物质微观结构的信息,这已成为固体物理研究领域中的重要方法。另外,不少核科学家已经利用穆斯堡尔效应以及很高的精确度成功测量了一批核结构参数,为核科学的发展做出了贡献。当前,穆斯堡尔效应的应用已经突破物理领域的界限,进入化学、生物学、冶金学、地质学、材料科学,以至考古学的研究领域,并形成了一门重要的边缘学科——穆斯堡尔谱学。

(山东省烟台市鲁东大学物理与电子工程学院 264025)

运用这种重合法。例如用单摆测量重力加速度的实验,为了提高周期的测量精度,可在测量摆旁边放一标准摆,设测量摆的待测周期为  $T$ , 标准摆的周期已知为  $T_0$ 。假定标准摆比待测摆稍快,于是在它们前后两次同时通过平衡位置(重合)期间,标准摆摆动  $n$  次,而待测摆摆动  $n-1$  次,则有  $nT_0/2 = (n-1)T/2$ , 于是  $T = T_0n/(n-1)$ 。这样,就可通过重合比较法精确测出单摆周期。

很多待测量是无法进行直接比较的,只能通过间接比较的方法进行测量,即利用物理量之间的函数转换关系制作成相应的仪器或设计出相应的方法间接比较。例如,温度的测量就是利用某种物质的温度特性设计出相应的测温仪器,通过仪器间接比较进行的。

用“流体静力称衡法”测某种液体的密度,也可采用间接比较法。分别将一特定固体在真空(空气)中、浸没在已知密度为  $\rho_0$  的液体中及浸没在待测密度为  $\rho$  的液体中称衡,相应砝码的质量分别为  $m$ 、 $m_1$  和  $m_2$ , 根据浮力定律有  $F = (m - m_1)g = \rho_0vg$ 、 $F = (m - m_2)g = \rho g$ , 所以  $\rho = (m - m_1)/(m - m_2)\rho_0$ 。

需要指出的是,正是这种形式上间接的比较法,能将待测量与最少的几个可直接测量量以最简捷的方式直接联系起来,从而消除了许多中间量的累积误差,使测量变得简单和准确。因此,这种方法在物理实验中的应用较为广泛。这种间接比较往往是“不同时”的比较,所以又称为异时比较法,而异时比较测量法是以实验条件的稳定性为前提的。

## 二、放大法

对于一些微小量,例如微小的长度、很短的时间、微弱的电流,如果采用常规测量方法,不是无法测量,就是精度太低。这时通常需将被测量放大后再测量。所以,放大法也是一种基本的测量方法(缩小也可视为放大,只是放大倍数小于1),常用的放大法有累计放大法、机械放大法、光学放大法、电子学放大法等。

**累计放大法** 用秒表测量单摆摆动周期,一般都是测量累计摆动 50 或 100 个周期所需的时间。设所用机械秒表的仪器误差为 0.1 秒,某单摆周期约为 2 秒,则测量单个周期时间间隔的相对误差为  $0.1/2 = 0.05$ , 即 5%。若测量 100 个周期的累计时间,则相对误差为  $0.1/200 = 0.0005$ , 即 0.05%, 测量仪器未变,实验精度却有很大提高。

在运用劈尖干涉测量金属丝直径的实验中,也要用到这种累计放大法。为了测出相邻干涉条纹的间距  $l$ , 我们不是仅对某一条纹测量,而是测量若干个条纹的总间距  $L = nl$ , 这样可减少实验误差。

**机械放大法** 这是运用机械原理及相应装置将待测量进行放大测量的方法。例如,螺旋测微计是利用螺旋放大法进行精密测量的,将与被测物关联的测量尺面与螺杆连在一起,螺杆尾端加上一个圆盘,称为鼓轮,其边缘等分刻成 50 格,鼓轮每转一圈,恰使测量尺面移动 0.5 毫米,那么鼓轮转动一小格,尺面移动了 0.01 毫米。若鼓轮外径为 16 毫米,则周长约为 50 毫米,鼓轮上每一格弧长相当于 1 毫米;也就是说,尺面移动 0.01 毫米时,则鼓轮上变化了 1 毫米,于是微小位移被放大了 100 倍,测量精度也就提高了 100 倍。游标尺运用的游标原理也体现了这种机械放大思想。

**光学放大法** 通过光学手段放大待测量,然后再进行测量的方法即为光学放大测量法。在杨氏弹性模量测定实验中,为测量金属丝长度的微小伸长量而设计的“光杠杆法”正是这种光学放大法的一个典型例子。我们知道,有许多光学测量仪器,如测微目镜、读数显微镜等,本身就是根据光学放大原理设计而成的。所以,用这一类仪器进行测量也是光学放大法的一种具体运用。另外,这种光学放大法也用于光标式灵敏检流计。

**电子学放大法** 微弱的电信号(电流、电压或功率)可以经放大器放大后进行观测,若被测量为非电量,则可设法用传感器转换为电学量,再经电子学放大进行测量,这种电子学放大法在电磁测量中应用非常广泛。

## 三、转换测量法

转换测量法(简称换测法)是根据物理量间的各种关系、物理现象及规律中存在的各种效应,运用变换原理进行测量的方法。由于物理量间的关系多种多样,各种物理效应也有很丰富的内涵,所以有各种不同的换测法,这正是物理实验中最具启发性的一面。随着科学技术的发展,一方面,物理实验的方法渗透到各学科领域;另一方面,物理实验本身也在不断向高精度、宽量程、快速测量、遥感测量和自动化测量发展,而这一切都与转换测量法密切相关。转换测量法大致可分为参量换测法和能量换测法两大类。

**参量换测法** 参量换测法是运用一定的参量变

换关系或变化规律,将测量某些难以直接测量或者难以准确测量的物理量,转换成测量另外一些易于准确测量的物理量。这种方法在物理实验中应用得非常广泛。例如,实验中测量钢丝的杨氏模量  $E$ ,是以应变与应力成线性变化的规律,将  $E$  的测量转换成对应力  $F/S$  和应变  $\Delta L/L$  的测量后得到  $E = (F/S)/(\Delta L/L)$ ;密度测量实验中将不规则固体体积的测量转换为质量的测量;分光计实验中将棱镜折射率的测量转换为最小偏向角的测量。类似的例子还可举出很多。

**能量换测法** 能量换测法是利用物理学中的能量守恒定律以及能量形式上的相互转换规律进行转换测量的方法。而这种能将一种能量形式转换为另一种能量形式的器件称为传感器,所以能量换测技术就是传感器技术。

**热电换测**——将热量转换成电学量测量。例如,利用温差电动势原理将温度的测量转换成热电偶的温差电动势的测量,或利用热敏电阻的温度特性将温度的测量转换成金属电阻的测量。

**压电换测**——这是一种压力和电势间的变换,属于力电换测技术的范畴。话筒和扬声器就是我们所熟知的换能器;话筒把声波的压力变化转换为相应的电压变化,而扬声器则进行相反的转换。

**光电换测**——这是一种将光通量变换为电量的换能器,其理论依据即是光电效应。光敏二极管、光电效应实验中所用的光电管等,都是具体运用的例子。事实上,各种光电转换器件在测量和控制系统中已获得相当广泛的应用。

**磁电换测**——这是利用半导体霍尔效应进行磁学量与电学量的换测。

不难看出,以上几种能量换测法基本上可归结为“非电量电测法”范畴,即将位移、压力、温度、流量、光强、功率等非电学量转换成相应的电学量再实施测量。由于电学量具有控制方便、灵敏度高、反应速度快、能进行动态测量和自动记录等优越性,因此成为技术上的研究热点并广泛应用于诸多领域。

#### 四、模拟法

模拟法是指人们依据相似理论,人为制造一个类同于研究对象的物理现象或过程,用模型的测试替代对实际对象的测试。模拟法是一种间接测量方法,它不直接研究物理现象或过程本身,而是用与该现象或过程相似的模型来研究和测量。采用模拟法

的基本条件是,模拟量与被模拟量必须是等效或相似的。模拟法用途广泛,对许多难以测量甚至无法测量的物理量或物理过程,可通过模拟法进行测量和研究。从原理上讲,模拟法分为数学模拟和物理模拟两大类型。

**数学模拟** 数学模拟是指把两个本质不同的物理现象或过程用相同的数学方程来描述。例如在研究静电声时就运用了这种模拟法。即用易于实现、便于测量的稳恒电流场来模拟难以测量的静电场。当然,前提是这两种场的分布具有相同的数学形式。

**物理模拟** 物理模拟就是保持同一物理本质的模拟,这种模拟法不仅运用于物理实验上,而且更多地被运用到其他科学。例如,用振动台模拟地震对工程结构强度的影响、用飞机模型在“风洞”(一种高速气流装置)中模拟实际飞机在大气中的飞行等。

如果将物理模拟和数学模拟两者配合使用,结果将会更加精确。随着计算机技术的高速发展和广泛应用,现在人们已经可以通过计算机模拟实验过程,并预测可能的实验结果。

物理实验还有其他许多实验方法,如补偿法、干涉法等。事实上,许多具体的实验,往往要综合应用各种方法。因此,实验者只有对各种实验方法有深刻的了解,才能在实际工作中得心应手、游刃有余。

(河南安阳师范学院物理系 455002)

### 科苑快讯

出租车内的  
超细粉尘污染物

根据发表在今年1月《大气环境》(*Atmospheric Environment*)杂志上的一个对伦敦市中心的研究报告,乘坐出租车比采用其他交通工具,要接触更多的超细粉尘污染物。研究者推测,直径小于100纳米的微粒可能在出租车内逐渐聚积,因为出租车一天内运送很多乘客,也有可能刚刚搭载过吸烟的乘客。研究者发现,乘坐出租车出行,会使乘客暴露在平均每立方厘米具有10万个超细粉尘微粒的环境中,而步行者所处环境中的超细粉尘微粒只有上述的一半。自己开车出行接触的超细粉尘微粒最少,但是为了减少大气污染,还是步行最佳。

(高凌云译自 *Environmental Science & Technology*, 2006年第7期)