



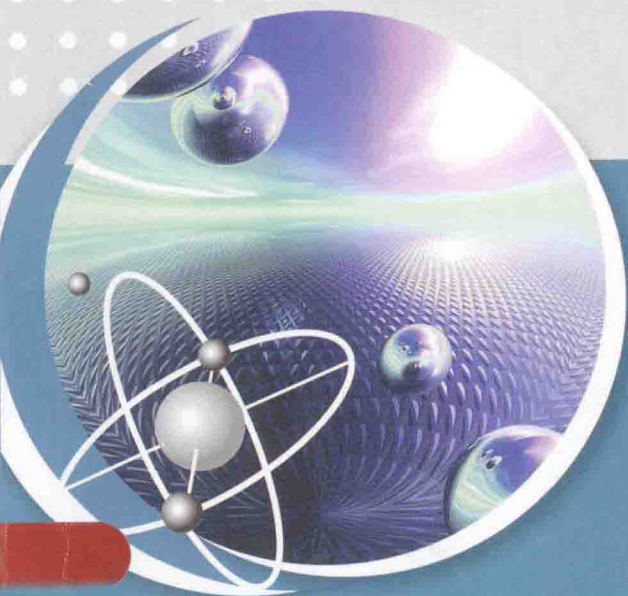
普通高等教育“十二五”规划教材
大学物理创新教学丛书

大学物理实验

——提高篇

(第四版)

李端勇 张 昱 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理创新教学丛书

大学物理实验——提高篇

(第四版)

李端勇 张 昱 主编

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

全书按照教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,根据普通工
科院校大学物理实验教育教学的特点与任务,在对《大学物理实验——基本篇》
和《大学物理实验——提高篇》修订、调整、更新与补充的基础上修编而成,仍
保留两册的原名。

本书为提高篇,是与《大学物理实验——基本篇》融为一体的姐妹篇,侧重
于近代物理现象实验、设计性实验,并系统地介绍大学物理实验常用的实验测
量方法及其相关知识。

本书可作为高等学校本专科及高职高专工科各专业的大学物理实验提高
课程教材,也可作为相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验. 提高篇/李端勇, 张昱主编. —4 版. —北京: 科学出版社,
2014. 6

(大学物理创新教学丛书)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-040720-7

I. ①大… II. ①李… ②张… III. ①物理学—实验—高等学校—教材
IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 109152 号

责任编辑: 吉正霞 / 责任校对: 蔡 莹

责任印制: 高 嵘 / 封面设计: 蓝 正

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5(720×1000)

2014 年 6 月第 四 版 印张: 20 1/2

2014 年 6 月第一次印刷 字数: 403 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是在第三版的基础上,结合近几年来的教学实践完成的。本书对第三版的内容进行调整和增减,系统地介绍了大学物理实验常用的实验测量方法,按照实验技能和物理知识的渐进性提高过程,在设计性实验项目安排上,将设计性实验编写成引导设计性实验和研究设计性实验,比较符合低年级学生的学习状态。在反映物理新成就方面,安排了一定数量的近代物理实验内容,目的在于通过实验学习近代物理若干领域的知识和实验方法。所有这些,均有助于学生进一步理解物理实验的设计思想和实验方法,培养学生的创新思维 and 创新能力。本书可作为高等工科院校、高等职业学校和高等专科学校工科各专业的大学物理实验提高课程的教材。

本书由李端勇、张昱担任主编,秦平力、余雪里担任副主编,许荣荣、周帼红、柳惠平参与了修订工作。李端勇、张昱、秦平力、余雪里等审阅了全书。

实验教学是一项集体事业,实验教材是所有从事实验教学的教师和实验技术人员共同劳动的成果,编者在此对所有为本书出版付出努力和提出宝贵建议的人深表感谢。兄弟院校的实验教材和仪器厂商的仪器说明书也为本书的编写提供了很好的借鉴,借此机会,一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者和同行批评指正。

编 者

2014年3月

目 录

第一章 物理实验的基本测量	1
第一节 长度测量	1
一、比较法测量长度	1
二、游标法测量长度	2
三、螺旋法测量长度	2
四、放大法测量长度	3
五、光学干涉法测量长度	3
六、光机电方法测量长度	4
七、角度单位	4
八、角游标	5
九、几何光学法测量小角度	6
十、干涉法测量微小角度	6
第二节 压强测量	7
一、压强的表压及压强的单位	7
二、压力计测压	9
三、电学式压力传感器	12
第三节 质量测量	16
一、质量定义及质量基准	16
二、杠杆天平方法	17
三、压力传感方法(电子秤)	18
第四节 时间和频率测量	18
一、频率基准与秒的定义	18
二、秒表	19
三、数字毫秒表	19
四、模拟电路测量频率的方法	19
五、电子计数器测频率	20
六、示波器测频率	21
七、扫频仪	21

第五节 温度测量	21
一、温度与温标	21
二、温度测量原理与方法	22
三、温度计及温度传感器	22
四、膨胀式温度计	24
五、电阻温度计(热电阻)	25
六、气体温度计	26
七、热电偶温度计	26
第六节 电流测量	30
一、电流测量的基本器具及实现原理	30
二、常用电流测量仪表及装置	31
第七节 电压测量	34
一、电压测量基准量具及实现原理	35
二、常用电压仪表与装置	36
第二章 近代物理实验与综合实验	41
第一节 物理效应实验	41
实验一 塞曼效应	41
实验二 光电管特性研究	48
实验三 扫描隧道显微镜的原理及其应用	53
实验四 多普勒效应综合实验	61
实验五 法拉第效应	71
实验六 热声热机	79
实验七 磁光效应	83
实验八 磁阻效应及磁阻传感器的特性研究	87
第二节 电磁学、光学、原子物理学综合实验	92
实验九 等离子体实验	92
实验十 微波铁磁共振实验	100
实验十一 光栅单色仪的调整与应用	106
实验十二 热辐射与红外扫描成像	109
实验十三 色度实验	121
实验十四 紫外可见分光光度计的原理及使用	127
实验十五 光拍的传播和光速的测量	131
实验十六 全息照相	135
实验十七 发光二极管(光源)的照度标定	141
实验十八 用光学多道分析器研究氢原子光谱	144

实验十九 夫兰克-赫兹实验	149
实验二十 电子电荷的测定——密立根油滴实验	154
实验二十一 核磁共振实验	163
实验二十二 顺磁共振实验	167
实验二十三 傅里叶变换光谱	173
第三节 一般应用实验	188
实验二十四 椭圆偏振光测薄膜厚度	188
实验二十五 偏振光实验	191
实验二十六 太阳能电池基本特性测定	195
实验二十七 大气物理探测	199
实验二十八 多媒体光纤传输	201
实验二十九 彩色编码摄影及彩色图像解码	206
实验三十 硅光电池实验	212
实验三十一 光敏电阻实验	214
实验三十二 交直流激励时霍尔传感器位移特性实验	217
实验三十三 气敏湿敏传感器实验	219
实验三十四 超声波探伤	222
第三章 引导设计性实验	229
第一节 自组仪器实验	229
实验三十五 箱式电位差计测电阻	229
实验三十六 伏安法测线性电阻、非线性电阻	231
实验三十七 惠斯通电桥测电阻	235
实验三十八 测微安表内阻	238
第二节 仿真实验	240
实验三十九 单摆测重力加速度	240
实验四十 半导体温度计的设计	244
实验四十一 双臂电桥测低电阻	250
实验四十二 光学设计实验	258
第四章 研究设计性实验	267
第一节 力学实验	267
实验四十三 测量速度和加速度	267
实验四十四 重力加速度测量与计算机处理	267
实验四十五 用力学传感器研究碰撞过程	268
实验四十六 测偏心轮绕定轴的转动惯量	269

实验四十七 压阻式压力传感器的压力测量实验	270
实验四十八 传感器的位移特性实验	271
第二节 热学实验	274
实验四十九 热电偶测温性能及标定实验	274
实验五十 热敏电阻温度开关	275
实验五十一 半导体温度计的设计	277
实验五十二 半导体温度传感器温度特性测量	278
实验五十三 金属线膨胀系数测量	282
实验五十四 金属箔式应变片的温度影响实验	283
第三节 电学实验	283
实验五十五 简易万用电表的设计及校准	283
实验五十六 测量电阻丝的电阻率	284
实验五十七 用两种方法测电容器的电容	285
实验五十八 测量地磁强度的水平分量	286
实验五十九 周期函数的傅里叶分解	288
实验六十 交直流全桥的应用实验	292
实验六十一 压阻式压力传感器的压力测量实验	295
实验六十二 用霍尔位置传感器测量横梁的杨氏模量	297
第四节 光学实验	301
实验六十三 内调焦望远镜的组装及放大倍率测定	301
实验六十四 光敏传感器的光电特性研究	305
实验六十五 光电开关实验	311
实验六十六 迈克耳孙干涉仪的组装和应用	313
实验六十七 用双棱镜测量光波波长	313
实验六十八 综述测定光波波长的各种方法	314
实验六十九 用偏振光测定玻璃相对空气的折射率	315
实验七十 用分光仪测定液体(水)的折射率	315
实验七十一 测定细丝的直径	316
实验七十二 测定空气折射率	317
参考文献	319

第一章

物理实验的基本测量

第一节 长度量测量

长度是基本物理量之一,长度的测量在科学实验中被广泛使用,许多非力学量的测量也转化为长度进行读数,因此长度测量显得十分重要。

长度量要依据标准器具度量,长度的测量原理是依据标准器具可复制多种测量工具,将待测长度与测量工具比较,从而得出测量结果。长度测量工具包括量规、量具和量仪。习惯上常把不能指示量值的测量工具称为量规;把能指示量值,拿在手中使用的测量工具称为量具;把能指示量值的座式和上置式测量工具称为量仪。测量工具按用途分为通用测量工具、专类测量工具和专用测量工具三类;按工作原理分为机械、光学、气动、电动和光电等类型。

基准量具主要有饱和吸收稳频激光辐射、线纹尺、量块、角度量块和多面棱体等。常用量具有钢卷尺、正弦规、游标卡尺、千分尺(螺旋测微器)、百分表、千分表、多齿分度台、读数显微镜、比较仪、阿贝比长仪、电感式测微仪、电容式测微仪、线位移光栅、感应同步器、磁尺、电栅(容栅)、单频激光干涉仪和双频激光干涉仪等。

专类测量工具主要是用于测量某一类几何参数、形状和位置误差等的测量工具。用于直线度和平面度测量的有直尺、平尺、平晶、水平仪、自准直仪等;用于表面粗糙度测量的有表面粗糙度样块、光切显微镜、干涉显微镜和表面粗糙度测量仪等;用于圆度和圆柱度测量的有圆度仪、圆柱度测量仪等;用于齿轮测量的有齿轮综合检查仪、渐开线测量仪、周节测量仪、导程仪等;用于螺纹测量工具等。

专用测量工具是仅适用于测量某特定工件的尺寸、表面粗糙度、形状和位置误差等的测量工具。常见的有自动检验机、自动分选机、单尺寸和多尺寸检验装置等。

不同的测量器具测量精度不相同,米尺的精度为 1 mm,游标卡尺的精度为 0.02 mm,千分尺的精度为 0.001 mm。

以下介绍几种长度的测量方法。

一、比较法测量长度

将待测物体的两端与标准长度进行比较,就是最简单的长度测量,紧贴、正视和对准读数是测量时的要领和关键。用不同精度的标准尺去测量同一待测物体,所得结果的有效数字的位数是不同的。尺子的精度越高,测得的量值的有效数

字的位数也越多。

利用比较法进行测量的长度测量工具称为比较仪,比较仪一般由测微仪和比较仪座组成。按测微仪所采用的放大原理,比较仪可分为机械式比较仪、光学比较仪和电学比较仪三种。机械式比较仪常用百分表、千分表、杠杆齿轮式测微仪或扭簧测微仪等机械式指示表作为放大、指示部件。机械式比较仪常用于测量工件外径和厚度等。光学比较仪是利用光学测微仪作为放大指示部件。常见的有立式、卧式和影屏式三种。立式光学比较仪,又称立式光学计,其分度值为 $1\text{ }\mu\text{m}$,示值范围为 0.1 mm ,适宜在计量室使用,测量范围为 $0\sim 180\text{ mm}$,常用于检定量块和光滑量规以及测量工件的外径、厚度;卧式光学比较仪,又称卧式光学计,测量范围为 $0\sim 500\text{ mm}$,适用于在计量室测量较大的或在立式光学计不易定位的工件,如圆盘等;影屏式光学比较仪,又称投影光学计,分度值有 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 等。分度值为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的光学系统采用多次反射以增大光学杠杆的放大比。此外,还有用光波干涉法测量的接触式干涉比较仪,其分度值为 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.2\text{ }\mu\text{m}$;电学比较仪常用电感式或电容式测微仪作为放大、指示部件,如电感式比较仪,其分辨率有 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 等几种。

二、游标法测量长度

米尺的最小刻度为 1 mm ,它只能测到精度为毫米的估计位。为了提高对于标准米尺(主尺)估读最小刻度的精度,通常在主尺上附带一个可以沿尺身移动的小尺(称副尺或游标),组成游标尺,如图 1-1-1 所示。

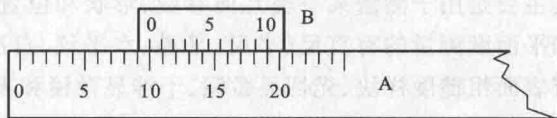


图 1-1-1 主尺和副尺示意图

常用的三种游标尺有 $n=10, 20, 50$, 即精度各为 0.1 mm 、 0.05 mm 、 0.02 mm 。读数方法参见基本篇第三章。

三、螺旋法测量长度

螺旋法测量长度的原理是利用螺旋将直线位移变为套管的角位移而加以放大。分度值为 0.001 mm 的称“千分尺”;分度值为 0.01 mm 的称“百分尺”。

千分尺分为机械式千分尺和电子千分尺两类。机械式千分尺,简称千分尺,也称螺旋测微器,是利用精密螺纹原理测长的手携式通用长度测量工具。千分尺的品种很多,改变千分尺测量面形状和尺架等就可以制成不同用途的千分尺,如用于测量内径、螺纹中径、齿轮公法线或深度等的千分尺。利用精密螺纹原理测长的仪

器还有读数显微镜、迈克耳孙干涉仪等。

千分尺的构成是在一根带有毫米刻度的测杆上,加工出高精度的螺纹(又称丝杠),并配上与之相应的精制螺母套筒,在套筒周界上准确地刻以等分的刻度,就构成了测微螺旋。根据螺旋推进的原理,套筒每转过一周(360°),测杆就前进一个螺距。只要螺距准确相等,则按照套筒转过的角度,就可以用游标原理构成的尺准确地估计出测杆端部前进的位移尺寸。

螺旋测微器量限有 10 mm、25 mm、50 mm、75 mm、100 mm,刻度通常为 0.01 mm,另外还有刻度值为 0.002 mm 和 0.005 mm 的丝杆千分尺。

四、放大法测量长度

把已知长度中的最小单位长度放大细分,使之能准确地分辨出已知长度与被测长度的微小差值,主要有机械、光学、气动、电学和光电等类型。其中机械型采用斜楔、杠杆、齿轮、扭簧等的放大机构和利用游标原理的细分机构等。光学型有读数显微镜的显微镜光学系统、投影仪的投影光学系统和自准直仪的自准直光学系统等。光电型采用光学方法和电学方法先后将被测尺寸转换、放大、细分,以得到所需要的分辨率,常用于光栅测量系统、激光干涉仪、固体阵列测量系统等。

当被测物很小或观测视场较远时,可以借助于显微镜或望远镜将待测物体的像放大或移近到人眼能观测的适当距离(人眼明视距离约为 25 cm),然后与标准米尺、长度规(刻度经过严格校准的尺)或精密测微丝杆等进行比较,通过换算获得测量结果。测量精确与标准米尺、长度规和丝杆的精度有关,利用显微镜、望远镜、投影仪等光学仪器来测量长度时的读数准确度可达 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

物理实验中常用放大法构成的仪器有光杠杆、读数显微镜、阿贝比长仪等。

光杠杆是一种利用放大法测量微小长度变化的常用仪器,光杠杆原理及应用参见基本篇第三章。

五、光学干涉法测量长度

利用光的干涉现象测量长度是长度测量的最精密的实验方法,大学物理实验中有牛顿环干涉法、迈克耳孙干涉法等。设有两束具有相同频率、相位和振动方向的光波 S_1 、 S_2 经过不同的光程后相遇,在空间形成光强的稳定分布的现象是干涉现象。利用干涉法测量位移的原理如图 1-1-2 所示。从光源发出的光,经分光镜分为两路:一路透过分光镜射向可动反射镜 M_1 ,另一路由分光镜反射到固定反射镜 M_2 ,并分别从 M_1 和 M_2 反射回来,经过分光镜叠加在接受屏上。每当 M_1 移动 $1/2$ 波长时,接受屏上的干涉条纹就会出现一次由暗到亮或者由亮到暗的变化。计算这些明暗变化次数就可以计算出 M_1 的移动量。利用这一原理测量位移的光学系统称为迈克耳孙干涉系统。激光干涉仪就是用这个系统来测长的。

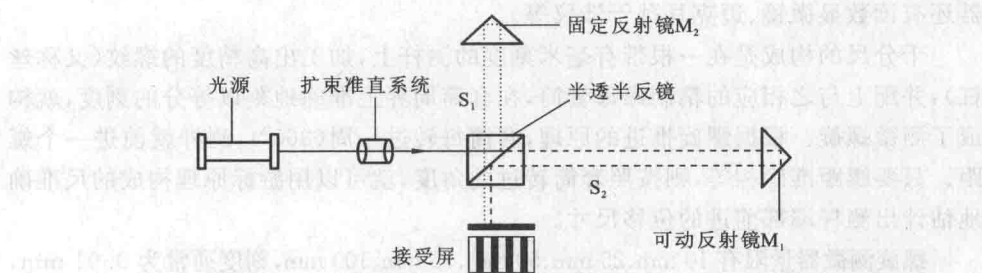


图 1-1-2 干涉法测量位移的原理图

在迈克耳孙干涉法的基础上,法布里和珀罗又作了改进,逐渐构成了现在各种类型、不同用途的干涉比长仪。使用干涉仪,长度测量可精确到光波长的数量级 10^{-7} m。

激光器的普遍使用、近代光学技术的发展,使得一些测量长度的新方法、新技术和仪器不断涌现,最有代表性的是激光散斑全息干涉法、莫尔条纹技术等,所测位移可准确到 10^{-8} m。

激光干涉仪是以激光波长为已知长度、利用迈克耳孙干涉系统测量位移的长度测量工具。激光干涉仪有单频的和双频的两种。

六、光机电方法测量长度

利用机械放大机构与光学方法的组合仪器,读数显微镜是典型的光机电仪器。

读数显微镜是利用显微镜光学系统对线纹尺的分度进行放大、细分和读数的长度测量工具。按细分的原理不同,读数显微镜通常分为直读式、标线移动式和影像移动式三种。常被用作比长仪、测长机和工具显微镜等的读数部件,也可单独用于测量较小的尺寸,如线纹间距、硬度测试中的压痕直径、裂缝和小孔直径等。其分度值有 $10\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \mu\text{m}$ 几种。物理实验中的牛顿环实验的读数系统就是采用了读数显微镜。

七、角度单位

角度和长度是构成几何量的两个基本要素。角度可以用长度的比值来表示,所以有时人们就把角度和长度等几何量测量统称为长度测量。角度测量在物理实验中常常遇到,特别是在光学实验中,需要精确测量角度。

习惯上,角度的单位沿用了六十分制,又称为秒角度制。六十分制将整个圆周分成 360 等份,每等份弧长所对应的圆心角为 1° (1°); 1° 分成 60 等份,每等份为 1 分 ($1'$); 1 分再分成 60 等份,每等份为 1 秒 ($1''$)。整个圆周对应的圆心角为

$$360^\circ = 21600' = 1296000''$$

秒是六十分制的最小单位,小于1秒时,按十进制计算,如十分之六秒可写为 $0.6''$ 。小于1度的“分”值,也可按十进制计算,如 $30'$ 可写为 0.5° 。

科学计算中常用弧度单位,在一个圆内,如圆心角 φ 所对应的弧长 AB 恰好等于该圆的半径 R ,则该圆心角 φ 称为一弧度,记为 1 rad (图1-1-3)。用弧长作单位来衡量

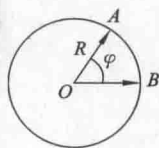


图 1-1-3 弧度定义图示

角度大小的单位制度称为弧度制。弧度单位主要是用于计算,在角度测量中,很少直接作为角度单位使用,因为圆周角为无理数,实验仪器上不能实现,所以实验测量中只用度、分、秒作为角度的单位。但在进行理论计算时,一般又要换算成以弧度为单位。实际上只是在度、分、秒之间的换算使用六十分制,在单独的度(或分、或秒)上仍然使用十进制。因此,角度的乘除、开方运算只需将角度化成以度为单位的数(或者以分为单位的数,或者以秒为单位的数,是单一单位的数),按十进制计算。

半径为 R 的圆周的周长为 $2\pi R$,所以整个圆周对应的圆心角为 $2\pi(\text{rad})$ 。当某圆心角 φ 对应的圆周弧长为 S ,则有

$$\varphi = \frac{S}{R}(\text{rad})$$

弧度制和六十分制的换算如下:

$$360^\circ = 2\pi(\text{rad}) = 6.2832(\text{rad})$$

$$1^\circ = \frac{2\pi}{360}(\text{rad}) = 0.0174533(\text{rad})$$

$$1' = \frac{2\pi}{360 \times 60}(\text{rad}) = 0.000291(\text{rad})$$

$$1'' = \frac{2\pi}{360 \times 60 \times 60}(\text{rad}) = 0.000004848(\text{rad})$$

而 $1\text{ rad} = 57.295779^\circ \approx 57.3^\circ \approx 3438' \approx 206265'' \approx (2 \times 10^5)''$

在角度测量中,当被测角小于 2° 时,常用近似的简易计算式。

八、角 游 标

大多数的精密测角仪都是由望远镜和刻度盘组成的,由于用途不同,增加了不同的附件而名称各异,如经纬仪、分光计等。物理实验中常用的分光计又叫分光测角仪,它是专门用来测量角度的仪器,为了提高测量角度的精度,在分格为 0.5° 的度盘上附加了一个可以滑动的角游标,如图1-1-4所示。角游标分成30格,这样测角仪的精度为 $1'$ 。

生产中常用角度规来测量角度工件,角度规是一种轻便的通用角度量具,由于结构简单,使用方便,在生产中得到了广泛的应用。角度规按结构可分为游标角度规、光学角度规和正弦尺角度规。

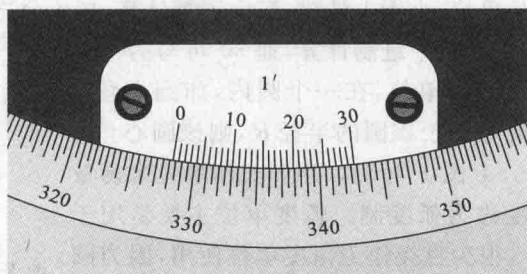


图 1-1-4 度盘与游标

常用的测角方法和仪器还有倾斜仪测角、光学分度头及分度台测角、多齿分度台测角、在工具显微镜上测角、螺纹牙型半角的测量。

九、几何光学法测量小角度

小角度的测量,一般待测角只有几分,小者则只有几十秒甚至几秒,而且要求精度高。实现小角度测量的方法大体上可分为三种。第一,对平面度误差与粗糙度参数值均较小、反射率也较高的被测物表面可采用光学自准直方法,使用的仪器是光学自准直仪或光电自准直仪等。第二,对水平或垂直安放的对被测件,测量相对于水平面或铅垂直面的倾斜角,再换算为待求的被测量,使用的仪器是各种水平仪,如框式水平仪、电子水平仪等。第三,利用正弦原理,在正弦臂为定长的情况下,其转过的小角度与其端点的位移成正比,激光小角度测量仪就是应用正弦原理测量小角度的。

十、干涉法测量微小角度

利用劈尖干涉测微小角度,可以进一步间接计算微小物件的线度,在两块光学

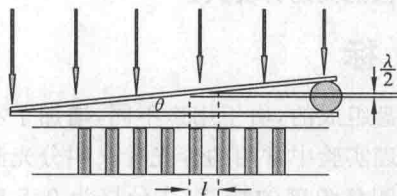


图 1-1-5 劈尖干涉测微示意图

平板之间的一端夹住微小物件,在两平板之间形成空气劈尖,一束波长为 λ 的单色平行光垂直入射到空气劈尖上将发生干涉,形成干涉条纹。相邻暗条纹(或明条纹)间空气膜厚度差为 $\lambda/2$ 。装置如图 1-1-5 所示,设 n 条条纹宽度为 d ,则有

$$\theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

式中 λ 是已知的。只要用读数显微镜测出 n 条条纹宽度 d ,就可以得到微小角度的测量值。

第二节 压强测量

单位面积上所受到的垂直作用力称为压强。若总力 F 均匀地垂直作用于面积 A 上, 则其压强 p 为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2-1)$$

根据气体分子运动论, 气体的压强是气体分子运动撞击表面, 而在单位面积上所呈现的垂直于壁面的平均作用力:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \bar{\epsilon}_t$$

式中, n_0 为单位容积内的分子数, $\bar{\epsilon}_t$ 为分子的平均平动动能。液体系统除传递压力外, 在重力场中还有由于液体的重量而产生的静压力。静压力与液柱的垂直高度有关。

在非均匀介质或系统处在非平衡态时, 压强并不是处处相等, 但可以在任意处选取一面积 dA , 垂直作用在面积上的力为 dF , 则该处的压强表为

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1-2-2)$$

一、压强的表压及压强的单位

流体的压强用压力计测量。工程上常用的压力计(压强计, 以下相同)有两种, 即弹簧管压力计及测量微小压力的 U 形管压力计。它们实际上是测量压差的仪器, 故又称压差计。

弹簧管压力计的基本结构如图 1-2-1 所示。它利用弹簧管在内外压差作用下产生变形, 从而拨动指针转动来指示工质与环境间的压差。

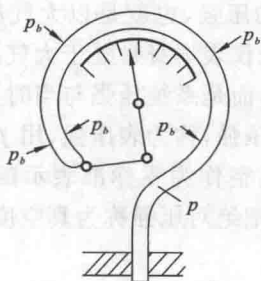


图 1-2-1 弹簧管压力计

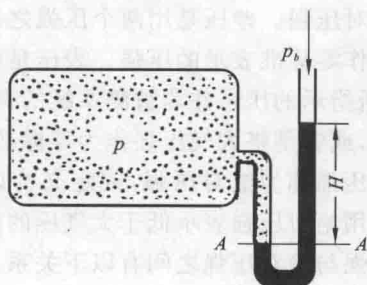


图 1-2-2 U 形管压力计

U 形管压力计如图 1-2-2 所示, 其主要部件为一 U 形玻璃管, 管内盛有用来

测压的液体,如水银或水。U形管的一端与被测系统相连,另一端与环境(如大气)相通。当系统压强与环境压强不等时,即可由U形管两边液柱的高度差读出系统与环境之间的压差。

根据流体静力学原理,当流体处在静止时,连通容器内同一高度上的压强相等。于是,对于图1-2-2中A-A等压面可写出压强平衡方程:

$$p = p_b + \rho g H \quad (1-2-3)$$

或

$$H = \frac{p - p_b}{\rho g} \quad (1-2-4)$$

式中, H 为U形管两边的液柱高度差; p 为被测系统的压强,对应流体处在静止时称为液体的静压强; p_b 为环境压强(一般情况下为大气压强,单位:Pa); ρ 为测压液体的密度(单位:kg/m³); g 为重力加速度(单位:m/s²)。

由式(1-2-4)可见,当选定测压液体,且将 ρ 、 g 视为常数时,液柱高度差 H 与压差($p - p_b$)成正比,故可用高度差 H 单值地度量压差 Δp 。这就是U形管压差计的工作原理。式(1-2-4)反映了压强与液柱高度差 H 间的数量关系。

如果液体处于运动状态,在液体中某一点的静压强与流速 v_1 及高度 h_1 之间遵从伯努利方程,即

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = \text{常数} \quad (1-2-5)$$

式中, p_1 为被测点流体静压强, h_1 为在流体中被测点距参照点的高度, v_1 为被测点处流体的流速。

当流体沿水平方向流动时,参照点选在被测点处,则 $h_1 = 0$,由上式得

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \text{常数} \quad (1-2-6)$$

显然,当流体处于静止时, $v_1 = 0$,则有

$$p_1 + \rho g h_1 = \text{常数} \quad (1-2-7)$$

在流体中对于压强的测量是一个重要的测量。压强的表示方法有三种:差压、表压和绝对压强。差压是用两个压强之差表示的压强,也就是以大气压强以外任意压强值作零标准表示的压强。表压是由于测压仪表本身常处于大气压强的作用下,表上所指示的压强并非被测系统的真实压强,而是系统压强与当时当地大气压强的差值,或者是将大气压强作为零标准表示的压强,称为表压强,用 p_e 表示。系统的真实压强称为绝对压强,或定义为以绝对真空作为零标准表示的压强,用 p 表示。在用绝对压强表示低于大气压的压强时,把绝对压强称为真空度。

表压强与绝对压强之间有以下关系:

(1) 当 $p > p_b$ 时

$$p = p_e + p_b \quad (1-2-8)$$

式中, p_b 为当时当地大气压强, p 及 p_e 分别为系统的绝对压强及表压强。

(2) 当 $p < p_b$ 时, 测量压强的仪表叫真空计。真空计上的读数称为真空度, 用 p_v 表示, 如图 1-2-3 所示。此时有

$$p = p_b - p_v \quad (1-2-9)$$

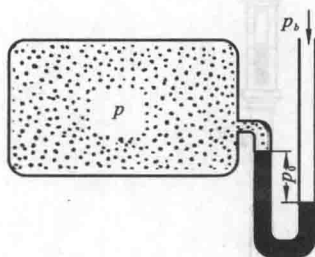


图 1-2-3 真空计

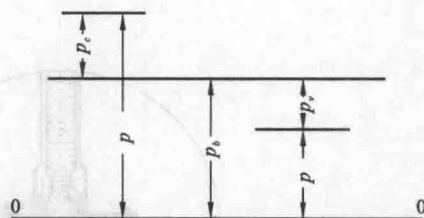


图 1-2-4 绝对压力与表压力

若以绝对压强为 0 时作为基线, 则可将表压强、真空度、绝对压强、大气压强之间的关系用图 1-2-4 表示。作为工质的状态参数, 应该是 p 而不是 p_e 或 p_v 。

压强的单位: 在法定计量单位中压强的单位由基本单位导出。根据牛顿第二定律

$$F = ma$$

法定计量单位中规定, 当 m 为 1 kg 、 a 为 1 m/s^2 、 F 为 1 N 时, 由此导出的压强单位称为帕[斯卡], 单位符号为 Pa 。

在工程应用上常嫌 Pa 过小, 而用 MPa (即 10^6 Pa) 作为压强单位。习惯上曾用巴 (符号为 bar , $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) 作为压强单位。

在公制单位中, 压强用 at (工程大气压) 作单位:

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

标准大气压: 物理学中, 把纬度为 45° 的海平面上的常年平均气压定为标准大气压, 即 atm 。1 atm 在气压计上的水银柱高度为 760 mm , 它相当于 0.1013 MPa 或 1.03323 at 。

物理标准状况: 物理学上规定, 压强为 1 atm 、温度为 0°C 的状况称为物理标准状况。各种压强单位的换算关系主要有

$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar} = 10.1972 \text{ at}$$

二、压力计测压

凡是用来测量流体压强的仪器, 总称为压力计, 在实验室中也常称为压强计。压强计按测量原理可分为两大类: 一类是机械方法, 利用弹簧应力与被测压力平衡进行测量; 另一类是利用在力的作用下产生的物理效应来测量。

机械式压力计有液柱式、砝码式和弹簧式等几种。

液柱式 液柱式压力计是一种使用了很久的简便的压力计, 其原理是由液柱 (水、水银、酒精、甲苯矿物油) 所产生的压力与被测压力平衡, 并用液柱高度来表示