第一篇　物理实验方法论

第一章　物理实验方法的兴起与发展

§1-1　物理实验方法的兴起

在物理学发展的漫长历程中,有不少人做过许许多多的实验或观测,对这些实验或观测做出过各种各样的解释，也提出过种种理论，还制造出不少仪器。古巴比伦人发明了梁式天平；古希腊人阿里斯托芬有过用玻璃点火熔化石蜡的记述；欧几里德记载过用凹面镜聚焦太阳光的试验 阿里斯塔克第一次测定了太阳、地球、月亮之间的相对距离……

早在公元前,阿基米德除了做杠杆、滑轮等实验以外,还做了浮力实验,建立了浮力定律。他在《浮体》一文中曾这样叙述:浸没在水中的物体所减少的重量等于它所排开的水的重量,浮体在本身的重量中排除了水的重量。这就是一个从实验总结为理论的定量实验，迄今仍被普遍使用的"阿基米德原理"。

上述这些实验,无论是从系统的观测和记录,或从确定量度标准和量度仪器方面,还是在人为的条件下重现物理现象,制造实验和观测仪器等方面来看,都能够称得上是物理实验,而且其中有些还是很卓越的物理实验。但是这些实验毕竟还是零星的 定量的实验较少,而定性的实验较多,大多数实验没有提升概括出理论,而只限于现象的描述,或者只做了一般的解释而没有形成系统的理论 即使形成了一些理论,也没有再用实验去检验它。因此,这并不标志着物理学的真正开始。

到公元 16～17世纪,吉尔伯特和伽利略等一批科学家的出现,标志着物理学的真正开始。他们把实验方法与物理规律的研究结合起来，对物理学的发展作出了划时代的贡献。伽利略是其中最杰出的代表之一。

伽利略做了摆的实验，说明单摆的周期与摆长的平方根成正比，而与摆的质量和材料无关 做了斜面实验,验证了物体在重力作用下作等加速运动的性质,总结出物体从静止开始作等加速运动时,运动的距离与时间的平方成正比的普遍公式,并且利用几何关系,建立了等加速运动的平均速度与末速度关系的数学表达式。他还根据实验事实或利用演绎推理，得出了许多物理学的理论结论。他采取了一套对近代科学发展很有效、很具体的程序,即 对现象的一般观察→实验测试→提出假设→运用数学和逻辑的手段演绎、推理得出推论→再通过物理的或思想的实验对推论进行检验→对假设进行修正和推广等等。伽利略的科学思想方法有以下几个特点：

1. 运用科学推理和抽象分析

亚里士多德在他的著作《论天》中阐述:"两个不同重量的物体作自由落体运动时,较重的物体速率大,较轻的物体速率小。"伽利略用著名的逻辑推理反驳了这个论述,他指出:"如果亚里士多德的论断成立,即重物比轻物下落的速度大,那么将一轻一重两个物体拴在一起,下落

需要全本请访问 www.ertongbook.com

快的重物会由于被下落慢的轻物拖着而减速，而下落慢的轻物会由于被下落快的重物拖着而加速。因而两个拴在一起的物体其下落速度将比两个中较重的物体下落速度小。但两个物体拴在一起又要比原来较重的物体更重，下落速度应更大。”这样亚里士多德的论断陷于自相矛盾的困境。这个流传了千余年的落体运动的谬误终于被伽利略纠正。

亚里士多德的另一论断“：作用于物体上的力一旦终止，物体就随即静止。”伽利略经过独立思考、推理，用抽象方法针对消除摩擦的极限情况来说明惯性运动，发现了惯性原理，纠正了统治物理界两千年之久的“力是维持速度的原因”的谬误。

2. 重视观察和实验

以哥白尼为代表的地动论和以亚里士多德为代表的地静论争论的焦点是，地静论认为如果地球是在高速地运动，为什么地面上的人一点也感觉不出来呢？为此伽利略亲自到船上作了十分细致的观察、实验，揭示了一条极为重要的真理，即从一个作匀速直线运动的船中发生的任何一种现象，你是无法判断该船究竟是在运动还是停着不动。这就是说地球本身的运动对居住在地球上的人们来说，是觉察不出来的。这个结论从根本上否定了地静论对地动说的非难，现在人们便称这个论断为伽利略相对性原理，这个重要原理后来也成为狭义相对论的两个基本原理之一。

伽利略还用自身的脉搏跳动作计时器(当时无计时工具)证明了摆的等时性，计算了摆的周期，并证明了摆的周期与摆的长度的平方根成正比，而与摆锤的重量无关。这个实验的结论纠正了亚里士多德的“摆幅小需时少”的错误说法。

此外，伽利略还用实验研究了匀加速运动，并用实验来验证他推出的公式—— 从静止开始的匀加速运动的距离和时间的平方成正比，还把这一结果推广到自由落体运动。

3. 把实验和逻辑(数学)有机地结合起来

伽利略所发现的许多最基本的定理，都是通过实验和逻辑(数学)的双重证明并把两者有机地结合起来，从而既克服了实验不精确和不定量的缺陷，又摒弃了“万物皆数”的唯心主义对科学研究的不良影响。值得指出的是，在伽利略的著作里所描述的实验都是理想化的，他所写出的实验数据都同理论有很好的符合，这很可能是因为他对数据进行了筛选。这表明伽利略并没有被实验的表面现象束缚，能正确地对待和解释实验误差。在他看来，实验结果与理想的简单规范之间的偏差，只是某些次要因素干扰的结果。

综上所述，伽利略把科学的实验方法发展到了一个完全新的高度。从此，开始了物理学的一个新时代，使物理学走上了真正科学的道路。

§1－2　物理实验在物理学发展中的作用

在物理学发展的历程中，实验和理论互为依赖，相辅相成，共同缔造着物理王国。下面，我们从它们的相互关系来讨论物理实验在物理学发展中的作用。

1. 物理学理论是实验事实的总结

有许多物理学的理论规律是直接从大量实验事实中总结概括出来的。例如，经典物理学中的开普勒三定律是依据弟谷·布拉赫所积累的大量观测资料，采纳了哥白尼体系，又把哥白尼的圆轨道修改为椭圆轨道而得到的。牛顿是在伽利略、开普勒还有胡克、惠更斯等人的工基础上，总结归纳万有引力定律，完成经典力学体系的。能量守恒及转换定律也是大量实验的归纳，其中包括很重要的焦耳的热功当量实验。

电磁学中的一系列定律,如库仑定律、欧姆定律、安培定律、毕奥·沙伐尔定律、法拉弟电磁感应定律等,都是实验的总结。在有关实验规律和法拉弟的“力线”及场的概念基础上,麦克斯韦总结出了经典电动力学方程组。

不仅经典物理的规律是这样,近代物理的发展中也不乏这种例子。例如,粒子物理中的奇异粒子就是1947年首先在宇宙射线中被观察到的。后来,20世纪50年代在加速器实验中发现了一批粒子,它们协同产生,非协同衰变,而且是快产生、慢衰变。经研究,需要引进一个新的守恒量来概括,于是提出了一个新的量子数——奇异数。普通粒子的奇异数为零,奇异粒子的奇异数不为零。这是完全从实验规律中总结而来的。

2. 用实验去判定物理学中的争论

物理学中常常发生一些不同意见,或以不同的理论解释同一个问题的争论。往往,实验会给某一种意见以有力的支持,而且最终还要靠实验作出终结判断。

在对光本质认识的历史过程中,微粒说和波动说的争论持续过很长一段时期。最初,由于光的成像和直线传播的事实,很自然地支持了微粒说。可是,光的独立传播,即两束光交叉后,还是各自按原来的方向和强度传播,又给惠更斯的波动说提供了有力的佐证。杨氏的双缝干涉实验显然证明光是一种波动,马吕斯发现的光的偏振也证明光是一种横波。在光速的测定成为可能以后,光在空气中的速度大于还是小于水中速度的实验,曾经成为微粒说还是波动说的判据。列别捷夫的光压测定又利于光是一种粒子的学说,劳厄的X射线实验证实了X射线也是一种电磁波,具有波动的性质。还有,光电效应及康普顿效应又给爱因斯坦的光量子论以有力的支持。最后,以波粒二象性结束了这一场旷日持久的争论,解释了全部实验事实。

在争论电的本质、流动的电荷是什么以及是否有最小荷电单位等问题上,实验也给出了判定性的凭证。

至于“以太”学说,则是从另一个角度说明了实验的作用。17世纪以来,许多有卓越成就的科学家,提出了各种“以太”假说,从“机械以太”、“电磁以太”、“光以太”一直到“绝对以太”等。但是,任何一种“以太”学说都不能解释那些实验事实,于是最后只得以放弃“以太”学说而告终。

3. 实验是修正错误的依据和发展理论的起点

实验常常成为纠正错误理论的依据和发展理论的新起点。例如,古希腊的亚里士多德曾经断言:体积相等的两个物体,较重的下落较快。他认为,物体下落的快慢精确地与它们的重量成正比。这种理论曾经统治物理界1800多年。但以后的无数实验事实以及伽利略的逻辑分析,都无可争辩地否定了亚里士多德的观点。亚里士多德还有一个理论,即保持物体匀速运动是由力的持久作用而导致的,但这也被伽利略的斜面实验引出的惯性定律所否定。

1911年,卡末林-昂内斯在观察低温下水银的电导变化时,在4.2K附近突然发现电阻消失的现象,而后又观察到了许多金属在低温下的超导状态(即电阻率为0)。随后,又发现了超流现象(即粘滞系数为0),由此产生了一个新的物理学分支领域——超导物理。

4.物理学的发展模式

物理学任何一个分支的发展,都先是从某些物理现象或实验事实开始,或是受到某些事物的启发,提出一定的物理模型,以解释过去已有的实验事实,然后再用实验来进一步验证这个模型的合理性,并根据不断发展的实验结果修正和完善它。实验—理论—实验—理论—实验……是物理学发展的一般模式。电子被发现以后,就认定中性的原子是由正、负两部分带电荷的物体组成的。1902年开尔文提出物质的原子是由带正电的均匀球组成的,整个物质原子里

面负电是按分立电子的形式分布的。1904 年，J·J·汤姆森发展了这个模型，认为电子分布在直径约为 1×10^{-10}m(1Å) 的带正电的均匀球体中，有如葡萄干撒在布丁点心上一样。 1902 年,勒纳德根据薄金属片对于阴极射线几乎是完全透明的这一实验事实,提出不同物质的原子是由同一类型、不同数目的组元——“ 动力子 ”所构成的,原子直径约为 10^{-10}m(1Å)的数量级，“ 动力子 ”只占其中极微小的一部分。“ 动力子 ”可能是电子和质量比电子大得多的带正电的物质的紧密结合体。1903 年,日本人长冈提出,原子中有一个很重的正电球体,电子围绕它并按一定间隔分布在周围,电子在平衡位置附近作微小振动,产生光的辐射。无疑,这是由原子光谱的事实引起的设想。1906 年,卢瑟福观察到 α粒子实验又产生大角度散射。例如，用 α 粒子轰击 ZnS 薄片时，有八千分之一的几率要反射回来。于是卢瑟福提出了原子的有核模型，即处于原子中心的带正电的原子核,直径只有整个原子的万分之一,原子的大部分质量集中在这个中心上，电子围绕原子核旋转。

卢瑟福的模型无法解释复杂的光谱现象,也无法说明原子为何能发射出线光谱。因为,如果电子以一定频率围绕原子核转动而产生辐射,则辐射的结果必将导致能量的损失,并且引起光线频率的变化，于是玻尔提出了电子处于量子化圆轨道上，进行定态跃迁的模型。1914 年弗兰克 – 赫兹实验的结果很好地验证了玻尔的理论。

由于光谱精细结构的发现,1915 年索末菲把玻尔的圆轨道推广为椭圆轨道，由此引入了两个量子条件,在应用了相对论理论以后,斯塔克效应,即原子光谱在电场上的多重分裂,获得了完满的解释。

1922 年斯特恩 – 盖拉赫实验的结果证实了原子也有磁偶极子的性质，而且原子磁矩是空间量子化的，使原子模型又得到进一步发展。

发展的玻尔理论还是不能解释光谱的相对强度,于是,在德布洛意物质波的基础上,薛定谔提出了“ 波原子 ”的理论,解决了玻尔理论的困难。

5.理论与实验的结合和统一

以上我们强调了实验在发展理论中的重要作用，但是，并没有丝毫轻视理论的意图。

在物理学的发展史上,理论的发展往往有其相对的独立性。在一个相当的时期内,理论可以独立于实验而发展,而且这种独立的趋势还可能随着物理学的进一步发展而扩展。然而,归根结底,新理论的提出还是在一定实验事实的基础上,受实验事实的影响,并且绝不能违背已有的实验事实。相对论是思维和演绎的产物,但是,爱因斯坦自己也曾经说过“ 当目的在揭示以假想的光以太为参照的特许运动状态的物理实验都失败以后，问题就应该反过来加以考虑了。”

“ 直接引导我提出狭义相对论的,是由于我深信 物体在磁场上运动所感生的电动力,不过是一种电场罢了。但是我也受到了斐索实验结果以及光行差实验的指引。”“ 还在学生时代,我就想这个问题了,当我知道迈克尔逊实验的奇怪结果时,我很快得出结论,如果我承认迈克尔逊的零结果是事实,那么地球相对于以太运动的想法就是错的,这是引导我走向狭义相对论的最早想法。”

物理学发展到今天，在理论指导下进行实验就变得更加重要了。因为，除了天文现象以外,已经很少有在一般自然条件下或一般实验条件下就可以观察到的新的、具有前所未有的理论价值的实验现象了。现代的实验往往要用大型或非常精密的仪器,使用很多人力、物力和时间,在一定的特殊条件下去探求,经过大量数据处理,才可能获得结果。为了寻求某一个结果往往要制造专用的仪器。因此,只有在精确地进行了理论计算,并在实验方案获得认可后才进

行实验，或者是在理论指出方向后再进行实验。例如，探索高温超导是在理论上指出可能以后，经多年反复试验，得到意外的突破，才形成热潮的。

但是，也并不排斥另一种可能，就是首先发现新的实验现象。例如，切伦科夫发现原子核反应堆中有不同于已知发光行为的微光。3年以后，塔姆和弗兰克才对此作出了理论解释。

事实上，还有许多自然界之谜，有待我们去解决、去认识。

有些情况下，理论高于实验，实验结果可能是错误的。例如，1901 年考夫曼用镭－溴化合物发生的 β射线发现了电子质量随运动速度变化的事实。阿布拉罕姆和布雪勒在 1903 年和 1904 年用经典理论作的解释要比洛伦兹－爱因斯坦公式更与实验结果相符合。对此，爱因斯坦在 1907 年曾写道：“阿布拉罕姆和布雪勒的电子运动理论所给出的曲线显然比相对论所得出的结果更符合于观测结果。但是，在我看来，那些理论在很大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符的，因为他们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系中得出来的。”

后来的实验，包括布雪勒本人做的实验，证明了洛伦兹一爱因斯坦理论的正确性。

§1－3　物理实验方法的发展

物理学是一门基础科学，它的发展会引起整个自然科学的变革，导致生产技术的革命。基于力学和热力学的纺织机械和蒸汽机的发明引起了产业革命；基于发现电子、各种电学规律以及电磁波理论，造就了当今的电的世界和计算机的世界；原子核裂变的发现开始了原子时代；热核聚变正预示着更新的能源的开发；量子化效应把我们推到一个更精细的境界；高温超导的发现和利用为科技的发展展示出了一片新的光明前景；计算机系统和高能辐射武器、空间武器的结合又勾画出一片战争的可怕图像。这些都是与物理实验方法和实验技术的发展密切联系的。在物理实验方法和技术不断发展着的今天，物理实验也越来越成为大规模的、集体的、综合的事业。

1. 物理实验方法需要去搜索更大和更小

当今已不是伽利略、牛顿的时代，也不是库仑、奥斯特和麦克斯韦的时代了。也就是说，从日常的生活或观察中，用简陋的仪器和简单的实验方法几乎不可能在物理学上有什么偶然的发现或找出什么显而易见的规律了。物理学实验更加需要理论的指导，在理论的预测和一定的条件范围内去进行，实验与理论越来越紧密地结合，是当前物理实验方法发展的特点之一。

常规的仪器和简单的方法已经不能满足当前进一步探索物理世界的需要。因此实验要向新的更加深入的领域进军，利用越来越大的加速器探索更细微的结构，利用越来越大的射电望远镜来观察更远的距离，从天体获得更高的温度、更大和更小的压强。

同时，人们也在追求实验的更高精确度，库仑定律的平方反比律

$$F \propto \frac{1}{\gamma^{2+\delta}}$$

的实验精确度在不断提高，20 世纪 60年代达到 $\delta < 10^{-12}$，20 世纪 70 年代达到 $\delta < 10^{-16}$。如果证明 $\delta \neq 0$，则物理学又将会有新的变革。

总之，实验要有更高的精确度，就需要有更先进的仪器和设备。

2. 物理实验方法是集体的综合事业

当代前沿的物理实验常常是一个综合性的巨大工程。它的设计、建设、运转和使用都是许

需要全本请访问 www.ertongbook.com

多一线科学家和二线工程技术人员集体的智慧和结晶。另外还需要有许多辅助和配套工作。比如一个大型的加速器、一个大风洞、一台望远镜、一个核反应堆,都相当于一个大型的特殊工厂,需要成百上千的工作人员和各方面的科学家、技术专家。而运转它们就需要几十万千瓦的电力,相当于一个大型电站的发电功率。

3. 物理实验方法是各学科的结合、渗透和应用

物理实验方法与其他学科的结合、渗透以及新的方法和技术在应用领域的推广和使用,也是当前的一种趋势。

一方面，在物理实验中广泛地应用计算机是一个不可阻挡的潮流。计算物理已经成为一门联系理论物理和实验物理纽带性的学科。各种大型的实验基地无一例外地要有一个先进的计算中心,进行如处理亿万个数据,在几百万分之一的几率中寻找新粒子的踪迹,综合分析等工作。计算机控制物理实验,计算机辅助设计实验,计算机辅助进行实验,计算机模拟实验,用计算机进行最优化选择，用计算机对实验数据进行综合处理和系统分析都已被普遍采用。

另一方面,计算机从电子管到晶体管到集成电路到大规模、超大规模集成电路,以至预期的激光计算机，都是基于物理学的理论和技术发展并与之密切相联系的。

物理实验方法和仪器已被广泛地使用在各个自然科学部门，如物质结构分析或化学分析中使用的各种谱仪(光谱仪、X 光谱仪、质谱仪、波谱仪、极谱仪、色谱仪等)都是一些物理仪器。特别是新兴的前沿学科,如生命科学、信息科学、材料科学、环境科学等采用的都是大量的物理实验仪器和计算机。

第一类边缘学科是自然科学学科之间或自然科学与技术学科的结合。而第二类边缘学科则是自然科学或技术科学与社会科学的结合。在这些边缘学科里也大量使用了物理实验方法。如音乐物理,它综合了物理学、音乐学、计算机科学、生理学、心理学以及美学等诸个部门。如音乐的声谱分析、和弦的协调性与频率成分之间的关系,乐器的材料、结构与音的质量的关系,乐器发声的客观激励,人耳对音高分辨能力的统计分析,电声乐器和电子乐器的发音取样,计算机音乐中音的数字合成的模式等等，这些都是同物理实验方法紧密相关的。

总之,对于新的科学发现,就需要有新的理论去解释。出现一种新现象,就会有一种新的理论,从而就需要用新实验、新方法、新仪器去验证它、解释它。科技的不断发展进步,也会给人们提供新的实验方法和新的实验手段。

第二章　物理实验中的实验方法

在物理学中,基本物理量包括长度、质量、时间、温度、电流强度与发光强度等。除此之外，电动势、电压及电阻，也是电学测量中十分重要的常用物理量。本章将分别介绍上述一些物理量的基本实验方法。

§2-1　实 验 方 法

物理学是一门实验科学。包罗万象的物理规律,是通过对现象的观察分析,对各种物理量进行大量地反复测量而建立的。物理量的测量方法种类繁多,在大学物理实验中究其共性,可以概括出一些基本实验方法,如比较法、模拟法、放大法、补偿法、混合法和仿真法等。

1. 比较法

物理量的测量、实验多数是采用比较的方法。比较的方法简称比较法,是将被测量与标准量进行比较而得出测量值的。例如，用米尺测量长度，就是将被测长度与标准长度(m、cm、mm等)进行比较;用天平测质量,当指针指示达平衡时,就是将被测质量与标准质量(kg、g、mg等)进行比较;用时钟或电子秒表测时间,同样是用比较的方法进行测量的。又如测量光栅衍射的各级衍射角,也是用比较法通过已刻好分度的圆游标测出结果的。除上述诸例之外,用电桥平衡法测未知电阻,实质上也是一种比较法——电位比较法。

2. 模拟法

模拟法是一种间接的测量方法。这里以电流场模拟静电场为例，对模拟方法加以说明。

人所共知，研究静电场是十分重要的。但是，直接对静电场进行测量是相当困难的。为此，可联想到，电流场与静电场虽然是两种不同的场，然而它们所遵循的规律在形式上相似。那么，利用其相似性，对容易测量的电流场进行研究以代替对不容易进行测量的静电场的研究,这就是一种模拟的方法。用模拟法研究静电场时,必须注意到它的适用条件,即电流场中导电介质的分布,必须相应于静电场中介质的分布。如要模拟真空(空气)中的电场,则模拟场中的介质应是均匀分布的,如要模拟的电场中的介质不是均匀分布的,则模拟场介质应有相应的电阻分布。要模拟静电场中的带电导体,如果表面是等电位面,则电流场中的导体也应是等电位面。这就要求采用良导体制作电极，而且导电介质的电导率不宜太大。测定电介质中的电位时，必须保证探测电极支路中无电流流过。

3. 放大法

在物理量测量中,对那些难以用普通测量仪器进行准确测量的微小量,采用放大的方法将其放大,也是一种基本测量方法,称为放大法。例如,用光杠杆法测量钢丝在拉力作用下的微小伸长量、用光线的镜尺法取代电流表的指针测量小于10^{-6}A的微弱电流(即光点式灵敏电流计）皆采用了放大法。

4. 补偿法

补偿法是将因种种原因使测量状态受到的影响尽量加以弥补。例如，可用电压补偿法弥

补因用电压表直接测量电压时而引起被测支路工作电流的变化；用温度补偿法可弥补因某些物理量(如电阻)随温度变化而对测试状态带来的影响;用光程补偿法可弥补光路中光程的不对称等。

5. 混合法

在测量固体的比热容等时，往往用最基本的量热方法——混合法。对温度不同的物体使之混合后,热量将由高温物体传给低温物体。如果在混合的过程中与外界没有热量交换,混合后的物体最后将达到均匀稳定的平衡温度。这一过程称为热平衡过程，这一方法称为混合法。

6. 仿真法

在现代的物理实验中,利用计算机进行仿真实验,是一种新兴的实验方法。

随着计算机的迅速发展与普及，计算机提供了强大的数学运算能力、绘图能力及存储空间,对于一些物理实验,可以先在计算机上进行模拟,快速调节各实验参数,综合数据进行结果分析,从而找出其中的一般规律。

§2-2 基本物理量的测量方法

1. 长度的测量方法

长度的国际标准,从 1795 年法国颁布米制条例以来一直在不断地完善。

最早,科学家设想从自然界选取长度标准,把从北极通过巴黎到赤道的地球子午线长度的一千万分之一作为长度的基本单位,称为‘米’,并用纯铂制成了米的基准器。显然,这种基准器(称为自然基准器)的准确度受到对地球子午线的测量程度的限制。

在 1889 年巴黎第 1 届国际计量大会上规定长度的国际标准是一根横截面呈 X 型的铂铱(90%铂和 10%铱）合金棒，保存于巴黎附近的塞弗尔市的国际计量局中，叫做国际米原器。把刻在棒两端附近金栓上的两条细线之间的距离(棒处在标准条件下)定义为 1 米。

由于国际米原器及其复制品的长度可能由于外界的作用而随时间发生极微小的变化，所以对于极精密的测量工作来说，国际米原器不是理想的长度标准。任何大块物质都不可能保持本身的物理性质永久不变，而单个原子的性质可以合理地假定为基本上不随时间而变化。所以许多年来，科学家们就企图把长度的标准和原子的性质联系起来。由于实验技术的发展，人们已经能够极精密地测定光的波长。1960 年第 11 届国际计量大会决定，以氪的一种纯同位素——氪－86 原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级间跃迁的辐射在真空中的波长作为长度的新标准，并规定 1 米等于该波长的 1 650 763.73 倍。新标准一方面提高了测量的准确度，另一方面比旧标准方便得多,因为在任何设备比较完善的实验室中,都能够获得氪－86 发出的橙红色光。

用氪－86 波长复现长度单位‘米’时,在最好的复现条件下,其准确度为 $\pm 4\times10^{-9}$,要继续提高存在着困难。因为受激原子跃迁时,总要受外部电磁场作用和其他干扰的影响,使谱线偏移以及增加谱线的半值宽度。后来，又发现氪－86 标准谱线不对称，其原因不清。正是由于这些因素，限制了长度计量的测量精确度的进一步提高。

20 世纪 70 年代初，有些国家在研究光速方面投入了很大的力量。因为当时的时间频率测量精度已经比较高了,如果能准确测量光速,则必然会提高长度测量的精度。

1983 年 10 月 7 日在巴黎召开的第 17 届国际计量大会上，审议并批准了米的新定义。决定

(1)米是光在真空中在 1/299 792 458 s 的时间间隔内行程的长度。

(2)废除 1960年以来使用的建立在氪－86 原子在 $2P_{10}$和 $5d_5$ 之间能级跃迁的米的定义。

新定义用词简单,含义明确、科学,又能够为广大非科技人员所理解。这个定义带有开放性,定义本身不限制单位量值的复现精度,随着科学技术的发展,复现精度可不断提高,定义复现方便,即使是经济不很发达的国家,也有能力复现,并有足够的精确度。

在国际单位制(SI制,简称国际制)中,长度单位是"米(m)"。

除了"米"以外,在国际制中还可用"米"的十进倍数或分数作长度单位。常用长度单位的符号及其与"米"的关系如下:

1千米(km)$=10^3$ m

1厘米(cm)$=10^{-2}$m

1毫米(mm)$=10^{-3}$m

1微米(μm)$=10^{-6}$m

1纳[诺]米(nm)$=10^{-9}$m

1埃(Å)$=10^{-10}$m

天文学中计量天体之间的距离时,常用"天文单位"及"光年"作为长度单位。1天文单位就是地球和太阳的平均距离,等于 1.496×10^8 km。1光年就是光在真空中1年时间所走过的路程。1 s内光在真空中走过的路程约为 3×10^8 m,所以 1光年等于 9.46×10^{15}m。

在物理实验中常用的长度测量仪器有米尺、游标卡尺、螺旋测微计、读数显微镜、百分表等。选用时要注意仪器的量程和分度值(一般分度值越小,仪器越精密)。

在工程技术和科学研究中经常需要测量不同量值、不同精度要求的长度,针对不同情况需使用不同的长度测量仪器。

此外,有许多物理量的测量也经常转化为长度测量,如温度、压力、电流和电压等,因而掌握长度测量十分重要。

2.质量的测量方法

物体的质量可以用两种不同的方法来测量。

一种方法是利用定义质量的关系式,即物体的质量是作用在该物体上的力与物体加速度的比值。将一个已知力作用在一个物体上,测出该物体的加速度,那么用这个力除以此加速度,就可得到该物体的质量。这种方法专门用来测量原子的质量。

另一种方法是与另一物体的质量相比较。这另一物体的质量等于给定物体的质量,而且是已知的。首先研究测定两个质量相等的方法。我们知道,在地球表面的同一位置上,任何物体都以同一加速度 g 自由下落。因为物体的重量 P 等于它的质量 m 与加速度 g 的乘积。由此可见,如果在同一位置上,两个物体的重量相等,那么它们的质量也相等,等臂天平就是这样一种仪器,能非常精确地测定两个物体重量相等,从而它们的质量也相等。

用来直接测量物体质量的仪器叫做秤。

秤的种类繁多,结构形式各不相同,量限精度也相差很大。就其平衡原理来讲,有的是利用杠杆原理,有的是利用液压原理,有的是利用牛顿第二定律和弹性理论,有的则是利用电磁原理。

在日常的质量计量工作中,遇到最多的是单杠杆秤,通常称天平。如果这种杠杆左右两臂相等,就称为等臂天平,否则就称为不等臂天平。

天平作为一种计量仪器,很早就出现在世界上了。我们勤劳、智慧的祖先早在周朝时期已

在我国不少地方利用天平做仪器进行称衡了。如果追究我国第一次使用这种天平的时间，应当比这还早。我国是世界上使用天平最早的国家之一。

质量的国际单位,在 1889年以前经历了与长度的国际单位相类似的完善过程。 1795年以后,把千克作为重量单位(当时还没有使用质量这一名词),它等于十分之一米长度的立方体($1\ dm^3$)的纯水在4 ℃时的重量。并且纯铂制成了千克的基准器。随着测量技术的提高，经过反复地精确测量,发现重量为 1 千克的纯水,在 4℃时的体积并不是$1\ dm^3$,而是$1.00028\ dm^3$,即千克基准器的重量和理论千克的重量之间存在着很大的差别。

1889 年巴黎第 1 届国际计量大会规定千克是质量单位，质量的国际标准是一个直径和高度均为39 mm的铂铱合金柱体，称为国际千克原器。它放置在双层玻璃罩内的石英托盘上，与国际米原器一起，保存于国际计量局。

常用质量单位及其换算关系如下：

$$1\text{克}(g)=10^{-3}kg$$
$$1\text{毫克}(mg)=10^{-6}kg$$
$$1\text{微克}(\mu g)=10^{-9}kg$$

3.时间的测量方法

关于时间的测量,可能碰到两类问题 第一类是测定某一现象开始的真正时刻,这主要是在天文和地球物理研究中有它的意义 第二类是测定两个时刻之间的时间间隔,例如,某一现象的开始和终止之间的时间间隔。在物理学的研究中经常遇到这一类问题。

1960年以前，国际上对时间的标准定为太阳在头顶连续两次出现的时间间隔，取其一年中的平均值,称为平均太阳日。1960～1967 年,时间的标准改为 1900年的回归年,即 1900年太阳从天空某一特定的位置出发再回到同一点所经历的时间。 1967 年 10 月,第 13届国际计量大会决定,把时间的标准改为铯－133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射周期时间。并规定1 s等于该周期的 9 192 631 770倍 。

用来定义标准时间的钟是铯钟,它是一个大型的、复杂的、昂贵的实验仪器。它的精度非常高,能以1/10″以上的准确度维持其频率不变。还可以用来校验其他高精度的钟，校验时间只需1 h左右,而用回归的天文标准来校验,则需要几年的时间。

国际单位制中,时间的单位是‘秒(s)”,除‘秒’以外,国际制还可使用其他某些时间单位。常用的其他时间单位及其与“秒”的关系如下：

$$1\text{日}(d)=86\ 400\ s$$
$$1\text{时}(h)=3\ 600\ s$$
$$1\text{分}(min)=60\ s$$
$$1\text{毫秒}(ms)=10^{-3}s$$
$$1\text{微秒}(\mu s)=10^{-6}s$$
$$1\text{纳秒}(ns)=10^{-9}s$$

实验室中测量时间常用的仪器有停表(机械停表、电子停表)和数字毫秒计。

4. 温度的测量方法与仪器

温度是表征物体冷热程度的物理量。当用手触摸物体时,感觉越热,温度就越高。这种判断物体温度高低的作法是非常粗略的，只能作为定性地讨论。

要定量地确定温度，必须对不同的温度给以具体的数量标志。温度的数量表示方法叫做温标。为使温度的测量统一，就必须建立统一的温标。人们总结了生产和科学研究中的测量

温度的经验，并经理论分析得出热力学温标是最科学的温标。因此国际上规定热力学温标为基本温标。热力学温度单位是国际单位制中的温度单位。1954 年第 10 届国际计量大会,对它的定义规定为选取水的三相点为基本点，并定义其温度为 273.16K。1967 年第 13 届国际计量大会通过以开尔文的名称(符号 K)代替“K 氏度(符号 K)”,并对热力学温度定义如下：“热力学温度单位开尔文是水的三相点热力学温度的 1/273.16。”

除了开尔文表示的热力学温度(符号 T)外,也使用由式 $t = T - T_0$ 所定义的摄氏温度。按定义,式中 $T_0 = 273.15\text{K}$(T_0 是水的冰点的热力学温度，它与水的三相点的热力学温度相差 0.01K)。摄氏温度单位用摄氏度表示。单位摄氏度与单位开尔文相等，而且摄氏温度间隔或温度差也可以用热力学温度开尔文来表示。

现代科学技术中要求的温度范围很大,从接近于绝对零度的极低温度到几千度的高温,这样大的范围需要各种不同的测温仪器，即需要各种温度计。这些温度计的准确度或应用范围都是有区别的。基本仪器有:气体温度计、水银温度计、电测温度计以及光测温度计。

5.电流的测量方法与仪器

在国际单位制中，电流是基本物理量之一。电流的测量不仅是电学中其他物理量测量的基础,也是许多非电量测量的基础。

电流的单位为安培(符号 A),它是使强度相等的电流通过真空中相距 1 m 的两根无限长平行导线,如果电流在两导线间每米平均产生 2×10^{-7}N 的力时,则称该电流为 1 A。

利用电流的各种物理效应，可以构成各种各样测量电流的仪器。在实验中最常用的是磁电式电流表。

6.电压的测量方法与仪器

电压与电动势是电学中极为重要的物理量。在电学测量中，经常测量的是电压。

电压的单位为伏特(符号 V),当在一导线两点之间通过 1 A 的电流时,如果所耗的功率为 1 W,就称这两点间的电压为 1 V。

电压的测量方法有多种。实验上常使用的仪器有:电压表(直流、交流)、电位差计、电子管或晶体管电压表、数字电压表与示波器等。

7.电阻的测量方法

电阻是电学中很重要的物理量,电阻的单位为欧姆(符号 Ω)。

在实验中,经常需要测量介于 $10^1\sim10^6$ Ω的电阻值(俗称中阻)。随着科学技术的发展,还需要测量介于 $10^7\sim10^{13}$Ω的高阻与超高阻,如一些高阻半导体、新型绝缘材料等;也还需要测量低于 1 Ω乃至10^{-7}Ω的低阻与超低阻,如金属材料的电阻、接触电阻、低温超导等。

测量电阻的常用方法有:伏安法、电桥法、电容器充放电法等。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第三章　测量误差与数据处理

§3－1　测量与误差

物理实验不仅要定性观察物理量的变化过程，而且更重要的是要定量地测定物理量的大小.

一、测量的基本概念

图 3－1－1 是用米尺测量$\overline{AB}$的长度。这是一个最简单、最基本的测量。由此例可知“测量”就是将待测量与选为单位的标准量进行比较的过程。此例中，$\overline{AB}$的长度就是待测量(更确切地说是‘给定的测量目标”)，米尺(测量设备)上每一分格的长度就是标准量(如以 cm 为单位，则一个大格长是标准量；以 mm 为单位，则一个小格长为标准量)。比较的结果(测量所得的信息)，即待测量与标准量比较所得的倍数(此倍数可能是整数、分数或无理数)称为‘测得值’或‘测定值”。图 3－1－1 中$\overline{AB}$的测量值是4.25 cm或42.5 mm。

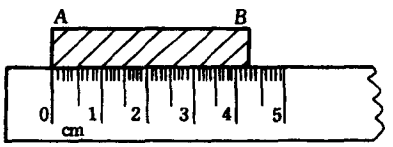


图 3－1－1　用米尺量$\overline{AB}$的长度

二、直接测量和间接测量

“直接测量”是指能用仪器或仪表直接测出测量值的测量过程。由直接测量所得的测量值为‘直接测量值”。例如用米尺量得$\overline{AB}$的长度是4.25 cm；用电压表测得电路中两点的电势差是3.20 V等。

“间接测量”是指测量的最终结果(测得值)须由一些直接测量值代入一定的函数式，通过计算才能得出的测量过程。例如，圆柱体的密度 ρ 须由圆柱截面的直径 D、圆柱体的高 H 和质量 m 这三个直接测量值代入函数式$\rho=4m/(\pi D^2 H)$中计算才能得出。

物理实验大都是由直接测量得出某些物理量的值，然后通过已确定的函数关系来求另一物理量的值；或通过对一些直接测量数据的分析研究来寻找或建立待测量间的函数关系。

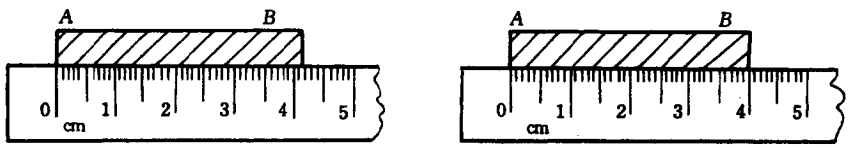
三、真值、近真值与误差

1. 真值

物体有各种各样的性质，我们可以用一些物理量来表示这些性质。这些物理量所具有的客观真实值称为它的‘真值”。也可更确切、更具体地给真值下一个定义，即‘当量(指待测量)和测量过程完全确定，且所有测量的不完善性可以排除时，由测量所获得的一个值’称为此量的真值。

测量的目的是力求得到待测量的真值，通过有限次测量能测得真值吗？我们再来分析一下图 3－1－1 所示的测量。我们把 AB 的一端 A 和米尺‘0’刻线对齐，另一端 B 所对的米尺

的位置即为 AB 的长度。从图中可以看到 B 是在4.2 cm到4.3 cm之间。但究竟是 4.2 几 cm 呢？不同的人可以读出不同的数来(对同一个人,在不同的时候来测,读数也可能不同),例如读成4.28 cm、4.27 cm、4.24 cm等。这些读数中，最后一位数是估计出来的，称为“估计数字”(也称为“可疑数字”“欠准数字”等)。我们很难判断哪个读数更准,因而也就不能确定物长的真值是多少。那么图 3－1－2 中所示的两个测量是否就很准了呢？其实不然。图 3－1－2(a)中 $\overline{AB}$ 应记为4.20 cm,即 $\overline{AB}$ 的长度可能是 4.19、4.20、4.21 cm等。而图 3－1－2(b)中 AB 应记为4.00 cm,即它可能是 4.01、4.00 或3.99 cm 等。要注意的是,这两个读数中的“0”,并不表示绝对正确,而是表示在我们测量时,边缘“B”似乎与米尺的某一刻线对齐了,即把估读的那位数估成“0”了。还要注意的是 AB 测得值的最后一位应比米尺的最小分格还小一位。例如,图 3－1－2(b)中 AB 一定要记为4.00 cm,而不能记为4 cm或4.0 cm。



(a) $\overline{AB}$=4.20 cm　　(b) $\overline{AB}$=4.00 cm

图 3－1－2　用米尺量 $\overline{AB}$ 长度

以上的例子是由于主观因素(估计读数不能确定)造成的测量值与真值有差异,其实还有许多客观因素（例如，待测物与测量设备的材料不同，在温度变化时，它们的膨胀情况也不一样），以及难以预料的因素也会造成测量值与真值的差异。所以，通过有限次测量是不能测得真值的。

2. 近真值

由统计理论证明，对一物理量进行多次测量，则这些测量值的算术平均值最接近于真值，称为“近真值”或“最佳测量值”。

3. 误差

由以上分析可知,任何测量都包含欠佳成分(可疑成分)。也就是说,任何测量值与真值之间都存在差异，这种差异就是测量的误差。

§3－2　误差、不确定度的定义和分类

由于种种主观的、客观的、可以预见和不可预见的原因都对测量有影响,使测量值偏离了真值而造成误差。为了能定量地估算这种偏离程度，人们定义了绝对误差和相对误差。

一、绝对误差和相对误差

绝对误差是测量值与真值之差,即

$$\Delta x = x - X \qquad (3-2-1)$$

式中 x 是测量值,X 是待测量的真值,Δx 则是 x 的绝对误差。注意 绝对误差可以取“＋”或“－”(不是误差取绝对值),即 Δx 可表示测量值 x 偏离真值 X 的程度(即“大小”),也可表示偏离的方向(如 $\Delta x>0$,表示 x 偏大于 X;$\Delta x<0$,则表示 x 偏小于 X)。

但是,绝对误差并不能反映测量的准确程度,即测量的好坏。例如,多级弹道火箭在射程为12 000 km时,能击中直径为2 km的圆面积目标 而优秀射手在距离为50 m 远处,能准确地射

中直径为2 cm的圆形靶心。如只考虑绝对误差，则火箭的误差比射手要大 10 万倍。但是，火箭的误差与射程之比为 0.01%，而射手的误差与射程之比却是 $1/(50\times1\,000)=0.02\%$，可见火箭击中目标的准确率还是比优秀射手要好。为了能正确地表达测量的好坏，还应引入相对误差的概念。

相对误差是绝对误差与测量值(对某一次测量言)或近真值(对多次测量言)之比(常用百分率表示),即

$$E_x=(\Delta x/x)\times100 \qquad (3-2-2)$$

从以上讨论可以得知"误差"这个词含有"差异""差错""错误"等意思,即误差的出现似乎是人为的,误差是用来表示这个差错的量。其实,测量值的不确定是客观事实,是不以人的意志为转移的。人们做实验进行测量,只能得出对待测量真值的"不明确""模糊""不确定"的一个大概的认识。为了能更正确、更科学地表达这一客观事实，国际上通过一系列的研究，在 1980 年基本上取得了一致意见,1986 年国际计量委员会又作出了决议，并于 1989 年 10 月编制了 ISO/TAG4/WG3文件,正式作出了用"不确定度"来表达测量不确定程度的决定。

不确定度(uncertainty) 所测数值的(未知)误差可能范围的测度。

根据定义,误差是测量值和真值之差,通常是无法知道的。而不确定度是表征被测量与真值之差的某个量值范围的一个评定。后者更能表示测量结果的性质。用不确定度取代误差来评价测量质量，在国内外已得到普遍重视和采用。

二、误差的分类和不确定度的分类

传统的误差分类法是着重于误差的产生原因和误差值的规律、特性等,一般把误差分为如下三类。

1. 系统误差

在同一测量条件下,多次测量同一量时,其误差的绝对值和符号恒定(定值系统误差),或按一定规律变化（变值系统误差）的误差称为系统误差。系统误差发生的原因有：

(1)理论或实验方法方面—— 实验所依据的理论不够充分，或未考虑到影响所求结果的全部因素。例如精密测定某物体的重量时,忽略了空气浮力所产生的影响,计算真实气体的状态变化时,采用了理想气体状态方程等;在简化运算公式时,略去的部分所占比例过大等。如果能充分探讨其理论，并将校正项引入到量度结果中去，这种误差可以部分地被避免。

(2)仪器设备方面——仪器设备常由于制造不够精密或装置不妥，使数据不可能读得准确。例如米尺的刻度不均匀或弯曲,天平的两臂不等距 螺旋测微计的螺距不均匀等。虽然仪器设备不可能绝对的完好，但设法改进仪器的设计和制造，这种误差可以减低到最小程度。

(3)个人原因—— 因观察者感觉的敏钝或生理上某些缺陷引起的。这种误差往往因人而异，若矫正生理上的缺陷，并经过一定时期的实验技术训练，这种误差可以减少。

系统误差的特点是使测量的结果总是偏向一边,不是偏大,就是偏小。一般来说,这类误差有规律可循,往往可预先设法消除或减少。在物理实验中,前两个因素由实验室在设计和准备实验时加以考虑。第三个因素要靠实验者自己努力克服。

2. 偶然误差

在相同条件下,对同一量进行多次重复测量时,在极力消除或修正一切明显的系统误差之后，每次测量值仍会出现一些随机起伏，由这些起伏所造成的误差称为偶然误差。

偶然误差产生的原因有：

(1)剩余的—— 系统误差虽然可以设法减少，但不能完全消除。一般讲，经过精心校正后的测量值,其误差残余已不再有系统误差的性质,而成为一种服从几率大小,多少不定的误差。例如,对真实气体使用范德瓦尔斯方程比采用理想气体方程准确,但仍然只是近似准确,在某些状态范围内它和真实气体之间仍有偏离。

(2)意外的—— 在测定过程中,观察者的生理状态以及外界条件,如温度、气流等情况发生变化(实际上总是在不断地改变着)都会引起相应的误差,而且这种影响往往不是人力所能控制或完全避免的。

偶然误差的特征是“随机性”,即每一个单独误差值的大小和正负的出现是没有一定规律性的,不固定的 而多次测量时,大量误差值的大小和正负的出现却是有规律的,即遵循统计规律,所以偶然误差又称为“随机误差”。

偶然误差是无法消除的,我们只能研究它的分布情况,估算它的大小,并探讨它出现的概率。

3. 过失误差和粗大误差

过失误差是指由于人为的事故所造成的误差。粗大误差是指超出规定条件下预期的误差,这两类误差产生的原因均是由于观察者的疏忽大意,或对仪器的使用方法不当,或对实验原理不甚理解或记错数据造成的。这种误差毫无规律可循，有时可能造成极大的差错。因此,这种误差可称为“错误”,但它是完全可以避免的,而且应该避免。

按照现代用不确定度来评价测量质量的观点,认为以上系统误差、粗大误差不应属于数据处理的内容,即在作不确定度估算之前系统误差即应修正,使其消除 粗大误差则应剔除,余下的全部误差(不确定度)再按数据处理方法分为两个分量,即可以用统计方法计算的 A 类分量和用其他方法估算的 B 类分量。

§3－3　测量的准确度、精密度,仪器准确度与仪器误差

一、多次测量误差分布的直方图、分布曲线和分布函数

表 3－3－1 中所列的数据是测量某钢球直径所得的值。表中列了两组数据， I 组总共做了 $N=150$ 次测量,IA 组做了 $N=50$ 次测量。为了便于比较，我们所列的数据是以测量值 S_i 为中心值,间隔 $\Delta S=0.01$ 的出现次数。例如,表中 7.320 出现的次数 $n_i=3$(对应于 $N=150$),是指 S_i 的测量值在 7.315～7.325 这一区间内出现的次数为 3。表中的相对出现次数(n_i/N 统计学上称为频率。当 $N\to\infty$ 时,频率的极限就是概率。图 3－3－1 是以 n_i 为纵坐标,S_i 为横坐标所作的直方图（在横轴上依次按间隔 ΔS_i 截出各组距,并以此组距为底,以 ΔS_i 间隔中纵坐标的中心值为高作一长方形。用这种方法所作的统计图,称为“直方图”)。图 3－3－2 是以 S_i 为横坐标,频率 n_i/N 为纵坐标的频率直方图。图 3－3－3 是以 S_i 为横坐标，以($n_i/N)\times(1/\Delta S)$ 此乘积称为“频率密度”)为纵坐标的频率密度直方

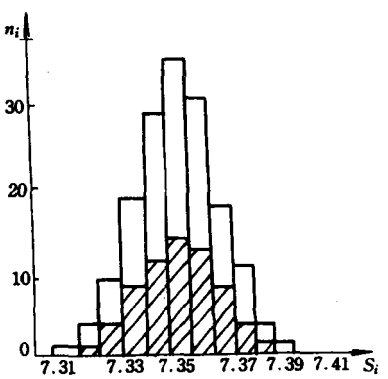


图 3－3－1　直方图

图。

表 3-3-1 钢球直径测量数据表

测量值 S_i(mm)	出现次数(n_i)		相对出现次数(频率)(n_i/N)	
	Ⅰ组 $N=150$	ⅠA组 $N=50$	Ⅰ组 $N=150$	ⅠA组 $N=50$
7.310	1	0	0.007	0
7.320	3	1	0.020	0.02
7.330	8	3	0.058	0.06
7.340	18	6	0.120	0.12
7.350	28	9	0.187	0.18
7.860	34	11	0.227	0.22
7.370	29	10	0.198	0.20
7.380	17	6	0.113	0.12
7.390	9	2	0.060	0.04
7.400	2	1	0.013	0.02
7.410	1	1	0.007	0.02

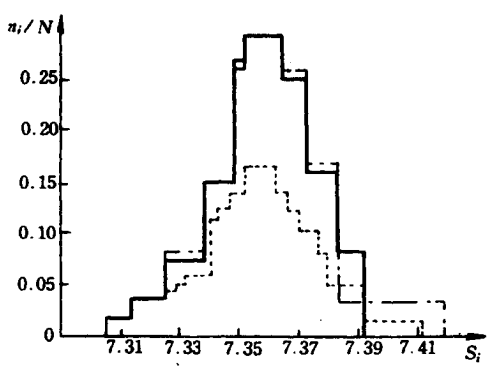


图 3-3-2 频 率 直 方 图

——I组($N=150, \Delta S=0.01$)

- - - IA($N=50, \Delta S=0.01$)

------ Ⅱ($N=150, \Delta S=0.005$)

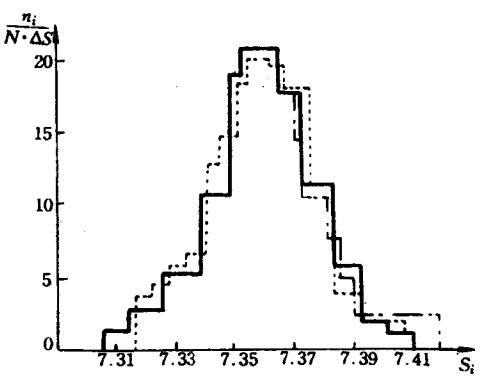


图 3-3-3 频率密度直方图

——I($N=150, \Delta S=0.01$)

- - - IA($N=50, \Delta S=0.01$)

------ Ⅱ($N=150, \Delta S=0.005$)

仔细分析以上各图，可得如下结论：

(1)由图 3-3-1 可见，$N=150$ 次(图中无阴影部分)与 $N=50$ 次(阴影部分)此两组数据所对应的测量总次数虽然不同，但他们的分布情况(直方图)却非常相似。这说明，对同一物理量进行相同的测量，不论测量次数多少(当然要足够多)，数据的分布基本相同。

(2)由图 3-3-2 可知，只要间隔 ΔS 分得一样，不论 $N=150$ 或 $N=50$，所得的频率直方图(为了便于研究，图中有些直线未画)几乎重合；但如间隔不同(图中 Ⅰ 组与 Ⅱ 组，虽 N 相同但 ΔS 都不同，一个为 0.01，另一个为 0.005，虽总次数 N 相同，频率直方图也不能重合。可见，频率分布情况与间隔 ΔS 有关。

(3)图 3-3-3 表示，对于同一物理量作相同的测量，不论测量多少次(但要足够多)，也不

论取多大间隔作图，他们的频率密度直方图几乎是重合的。

(4)为了能较深刻地对频率密度与 S_i 作理论分析，我们可以设想把间隔 ΔS 分得无限小，即使它成为一微分量（无穷小量）$\mathrm{d}S$，并设 $y=(1/N)(\mathrm{d}n_i/\mathrm{d}S)$，则图 3－3－4 即为 $y-S$ 曲线，它是一条光滑的曲线。

(5) 由以上讨论可知：在一组总测量次数为 N 的实验中，测量值介于 $[S_i+(\Delta S/2), S_i-(\Delta S/2)]$ 之内的出现次数为 n_i，其出现频率为

$$n_i/N=(n_i/N\cdot\Delta S)\Delta S_i \quad (3-3-1)$$

如把 ΔS 无限取小，即 $\Delta S\to\mathrm{d}S$，致使在$(S, S+\mathrm{d}S)$间隔内不多于一个测量值，那么上式就变为

$$p_i=\frac{\mathrm{d}n_i}{N}=\frac{1}{N}\left(\frac{\mathrm{d}n_i}{\mathrm{d}S}\right)\mathrm{d}S=y_i\mathrm{d}S \quad (3-3-2)$$

p_i 就是测量值 S 在 N 次测量中出现的概率。

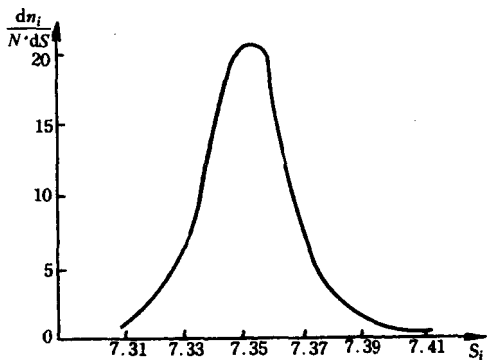


图 3－3－4 正态分布曲线

以上的讨论是对测量值而言的，由误差理论可以证明，偶然误差也有相同的规律，也有像图 3－3－4 那样的曲线(以误差值作为横坐标)。图 3－3－4 称为正态分布曲线或高斯分布曲线，所对应的函数称为正态分布函数。由实验和理论证明，偶然误差服从正态分布，并具有以下一些特性：

(1)单峰性：绝对值小的误差出现概率比绝对值大的出现概率大；

(2)对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相同；

(3)有界性 在一定的测量条件下，误差的绝对值不会超过一定限度，即特别大的正负误差出现的概率都极小；

(4)抵偿性：偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于 0。所以不能用绝对误差的算术平均值来估算多次测量的偶然误差，而应该先把各绝对误差取绝对值(都变成正的)，然后再平均。

由误差理论可以证明，偶然误差的分布函数(即与图 3－3－4相对应的正态分布函数)是

$$y=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-(x^2/2\sigma)} \quad (3-3-3)$$

或

$$y=\frac{h}{\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-(h^2x^2)} \quad (3-3-4)$$

式中 σ 称为均方根误差或标准误差，h 称为精密度常数。h 与 σ 的关系为

$$h=\frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \quad (3-3-5)$$

式(3－3－3)、(3－3－4)称为误差函数。

二、测量精密度、准确度和精度

测量精密度、准确度和精度是测量、实验、检验和工程技术中常用的，下面简单介绍他们的含义。

(1)精密度。它是指重复测量所得结果的相互接近程度，是描述实验(或测量)重复性好坏

需要全本请访问 www.ertongbook.com