

绪 论

1. 实验物理在物理学发展史上的重要性

物理学一词的英文 physics 早先来源于希腊文 φυσικῆ 意为自然规律,可延伸为自然及其发展规律,现在指研究物质运动的最一般的规律及物质基本结构的科学.物理学是实验科学,实验是物理学的基础.凡物理学的概念、规律及公式等都是以客观实验为基础的,即物理理论绝不能脱离物理实验结果的验证.此处所指的实验是近代科学实验,是有目的地去尝试实践,是对自然的积极探索.科学家提出某些假设或预见,为对其进行证明筹划适当的手段和方法,根据由此产生的现象来判断原设计假设或预见的真与否即为科学实验.从认识主体所起的作用来看,科学实验同被动的经验、单纯的观察之间有很大的不同.仅仅停留在观察试验上还不能称为科学实验和方法,还必须使观察试验和理论研究结合起来.可以说科学实验是人类文明发展的积极推动力之一.因此科学实验的重要性是不言而喻的,其中物理实验自然也雄居要位.下面通过两个例子进行说明:

(1) 当代最引人注目的诺贝尔奖金,宗旨是奖给有最重要发现和发明的人.因此,获得诺贝尔物理学奖金的成果均是物理学中划时代的、里程碑级的重大发现和发明.从 1901 年第一次授奖至今已有近百年的历史,有近 150 名获奖者.其中因实验物理学方面的伟大发现或发明而获奖的占三分之二以上.如 1901 年,首届诺贝尔物理学奖金得主德国人伦琴 (W.C.Röntgen) 他因发现 X 射线而获奖;1902 年的得主是荷兰人塞曼 (P. Zeeman) 他在 1894 年发现光谱线在磁场中分裂的现象;1903 年的得主是法国人贝可勒尔 (H.A.Becquerel) 和居里夫妇 (P. Curie, M.S. Curie), 他们发现了天然放射性,由此成为了核物理学的奠基人.由此看出,这些实验方面的发现已被公认为是物理学发展中的最伟大的成就.可见实验物理在物理学发展中的地位是多么重要.

(2) 从物理规律的建立过程看实验物理的重要性.1924 年法国人德布罗意 (de Broglie) 在光波具有微粒性的启发下,明确提出实物粒子具有波动性,即物质波和粒子的缔合概念,通常人们将它描述为波粒二重性或二象性.假设粒子能量为 E 动量为 p ,就同时伴随着物质波的传播矢量 k 关系是 $p = \hbar k$ 即 $p =$

$\frac{h}{\lambda}$.这是一个大胆而伟大的假设.物理伟人爱因斯坦(A.Einstein)对此给予充分的肯定,他称这是照亮我们最难解开的物理学之谜的第一缕微弱的光.并提名德布罗意获诺贝尔物理学奖金.要强调说明的是,理论上美妙的假设或推理,要最终成为被公认的物理规律,还必须有实验结果的验证.德布罗意本人当时指出,可以通过电子在晶体上的衍射实验来证明上述假设.果真在1927年,美国科学家戴维孙(C.J.Davisson)和革末(L.H.Germer)用被电场加速的电子束打在镍晶体上,从而得到衍射环纹照片,恰如光波在光栅上的衍射花样.同时由加速电场计算出电子束动量对应的物质波长与在晶体光栅上衍射极大值对应波长的关系,证实了德布罗意关于 p 、 λ 间的假设关系成立.最终使德布罗意的假设得到公认.他本人也获得了1929年的诺贝尔物理学奖.这一历史事实雄辩地说明了实验结果在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中所占的重要地位和所起的关键作用.

可以毫不夸张地说,没有实验物理就没有物理学的发展.正是由于实验手段的不断进步、仪器精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等,才使得人类在认识自然界的历程中不断探索、发现,进而攀登上更高的高峰.

人类对客观世界的认识是不断深化的,整个物理学的发展历史就是人类不断深化地了解自然、认识自然的过程.大到宇宙天体,小到原子、粒子等等都无不显示着这个过程的各个历史时期的前进步伐.对自然界认识的深化必然引发科学技术生产的革命,必然会推动社会向前发展.

物理学的发展是人类进步的推动力之一,实验物理和理论物理是构成物理学研究的两大支柱.实验物理在推动物理学发展过程中有着明显的重要作用,当然理论物理也有着同样重要的作用,二者密切相关、相辅相成、互相促进,形象地说恰如鸟之双翼、人之双足,不可或缺.物理学正是靠着实验物理和理论物理两大分支的相互配合、相互激励、相互促进,相辅相成的探索前进,而不断向前发展,不断深入认识自然界的在物理学的发展过程中,这种相互促进、相互激励、相互完善的实例举不胜举.如1895年伦琴在实验上发现了新的电磁辐射,被称为X射线(它是由高速电子轰击重元素靶而产生的波长在nm量级的电磁辐射).X射线的发现进一步推动了气体中电传导的研究.汤姆孙(J.J.Thomson)提出了被X射线照射的气体具有导电性是由于气体因分子电离而带有电荷,这给洛伦兹(H.A.Lorentz)创立电子论提供了实验基础,而电子理论又给Zeeman效应,即光谱线在磁场中会分裂这一事实以理论解释.这一连串的事实展示了实验物理和理论物理之间的密切关系和相互激励而共同推进物理学发展的进程.

物理学是一门成熟的科学,物理学所探索的各种现象的领域总在不断地扩大.现在必须承认,当实验上有新的发现或者实验方法有改进,测量精度有提高

的时候，每个物理学理论都要重新受到验证、检验或修正。

物理学研究的是物质运动的基本规律，它在揭示自然的奥秘、探索自然、认识自然世界，从而推动人类历史的前进、社会的发展等方面都有巨大的作用。物理学是自然科学的基础，实验物理是物理学的基础。

2. 教学实验和科学实验的关系及教学实验的重要性

科学实验是为了预测、验证或获取新的信息，通过技术性操作来观测由预先安排的方法所产生的现象，其全过程应包括四个环节，即：第一步，选定目标作出计划 即确定课题 构思模型 给出实验方案设计 第二步 制作或选择实验装置，按设计方案准备实验所需设备；第三步，观察现象和测量数据，进行实验操作，记录数据 第四步 分析、整理数据结果 得出结论。完成这四步之后，需讨论由实验结果得到的结论，是支持、肯定了原先所构思的模型方案设计，还是部分肯定，尚需改进、完善设备或设计方案，抑或是修改、否定原先的设计目标。因此 科学实验实际上包含着多次实验，甚至失败、再实验之后，最后得出结果，从而获得新的规律。科学实验是探索的过程，可能成功也可能失败，结果可能是符合预期设计的，也可能是否定预期设计的，当然还可能有意外的收获而导致新发现，从而得到未曾预期的成功（穆斯堡尔效应的发现过程就是一例）。每一次科学实验的成功都会揭示出自然界的奥秘，使人类在认识自然的道路上又前进一步。

教学实验不同于科学实验，它是以教学为目的，其目标一般不在于探索，而在于培养人才，它是以传授知识、培养人才为目的的。因此，教学实验（尤其是基础教学实验）与科学实验无论从宗旨、内容和形式上都会有区别。教学实验一般都是理想化了的，排除了次要干扰因素而简化过的实验，是经过精心设计准备，一定能成功的。一般基础实验只作科学实验过程的第三、四两步，到了高年级，视条件允许的程度，可能有少部分学生或少部分实验能涉及到第一、二两步。尽管如此，教学实验的地位仍然是非常重要的，因为该课程担负着培养学生实验能力和科学素质的任务。人们要攀登科学高峰，首先要培养自身攀登高峰的能力，这好比建造通向高峰的阶梯。攀登高峰的阶梯好像一座金字塔，有着广阔、宽厚的基础和高耸的塔尖，基础愈宽厚，塔尖可以愈高，可及的科学高峰也会更高。学生的任务主要就是积累知识、培养素质、提高能力，就是建造攀登高峰的阶梯。从某种意义上说，不管学生自己是否意识到，实际都在建造自己通向高峰的阶梯。每个人建造阶梯的过程和结果则取决于诸多主、客观因素，会有所不同。

物理实验课是一门基础实验课，是知识的底层，这底层的重要性不言而喻，因此教学实验的重要性是显而易见的。

3. 物理实验在人才科学素质培养中的作用

从科学发展的进程看，人的科学素质有三个主要方面：（1）求知欲望；（2）科学思维和创造能力；（3）严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神

人类自从有思想以来，就想认识客观世界，这就是人的求知欲望。科学形成、发展的过程正是人类永恒的、强烈的求知欲望的结果。

科学的发展依赖于人的思维和创造能力，正如爱因斯坦在《物理学的进化》中所述：“科学的发展过程是人类通过思维和观念大胆地探求客观世界的过程”。从物理学的发展来看，牛顿时代以来最重要的发现之一是“场”概念的提出，它揭示了“描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的“场”。如果没有很强的思维和创造能力，“场”的概念是不可能被提出和理解的。“场”的概念摧毁了旧观念，促进了20世纪相对论、量子理论的伟大发现和发展。因此科学发展史证明了思维和创造能力是人的科学素质的核心组成部分。

科学要求人类必须有严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神。因为在探求客观世界的过程中，实践才是检验真理的唯一标准，科学上的每一个想象，必须用实验来验证。任何结果不论如何吸引人，假如与实际不符，都必须放弃。这里来不得半点虚伪和骄傲！

科学的发展是无止境的，它既需要研究相关现象之间的相互的一致性来加以类推，又需要将已解决的问题和未解决的问题联系起来，有些共同的特性常常隐藏在外表差异的背后，必须有严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神，才能发现这些共同点，并在此基础上建立新的理论、新的观念和新的方法，促进科学的不断发展。

科学发展的历史长河证明了物理学的起源和发展促进了自然科学的各个领域、各个学科的建立和发展，物理学的思维和观念已渗透在各个学科、各个领域。例如，21世纪被誉为生命科学的世纪，物理学中的基本观念、基本思维方法，包括实验的误差理论与数据处理的方法都在生命科学领域内得到应用和发展。因此物理学在培养人的科学素质方面具有十分重要的地位，物理实验是其中的重要环节。

人才科学素质培养的核心是思维和创造能力的培养，人的思维和创造能力有“硬”和“软”两个方面。

从理论的角度看，“硬”的方面表现为基本概念的理解、推理演绎的能力、运算的技巧与能力，“软”的方面表现为：物理概念的系统理解与深化、比较和综合的能力等。

从实验的角度看，“硬”的方面表现为：基本实验技能与动手能力、现代技术的应用水平。“软”的方面表现为：实验课题的选择、实验的设计思想和实验方法等。

几十年来，物理实验教学的课程体系和教学内容从“硬”和“软”两个方面培养学生的思维和创造能力，激发他们强烈的求知欲望及严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神物理实验在人才科学素质培养中起着重要的作用。

4. 怎样学好物理实验

物理实验课是理、工、农、医、商等各类专业的必修课程，是培养和提高学生科学素质和能力的重要课程之一。学生通过这类课程学习积累大量知识，并沉积为科学素质的提高，进而转化为自身能力的提高，这正是自觉建造攀登科学高峰阶梯的途径，这也正是要学好物理实验课首先要明确的学习目的及其意义。

通过物理实验课的学习，学生应自觉注意自身能力的培养，简言之有以下两点：其一是培养严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神，也就是实事求是和百折不挠的科学精神，在实验过程中要求认真并重视观察实验现象，一丝不苟地记录实验数据，要求记录数据要原始、完整、全面、清楚，要有必要的说明注解等。不但要用已掌握的知识去分析现象、处理数据，同时经过去伪存真、去粗取精的科学升华过程，探索新实验、新方法和新规律。科学实验包含着多次实验、失败、修改、再实验……最后才可能得出正确的结果而取得成功。在教学实验中也会遇到某些困难或问题，试图解决这些问题，克服这些困难，正是培养学生严谨科学作风和坚韧不拔精神的好途径。其二是创新实验能力的培养，教学实验虽然是经过安排设计的，但仍然要求学生要多问自己些问题首先要思考，应该想清楚诸如每一项实验内容是要测量什么？通过怎样的途径（方法）去测量？也就是实验方法设计。为什么要这样作？这就涉及到要重视实验的提示和注意事项内容。如不这样作会怎样？会出错？会损坏仪器？会有伤害？等等。还可进一步问，此外还有哪些途径方法去测量同一内容？一般来说实验设计方法并不是唯一的，要比较设计方法是否巧妙、简明，条件是繁是简，资金耗费多少等因素，再结合实际条件来讨论、选择、优化，这更能激发学生的求知欲望和学习热情，不断提高创新意识、增强创新能力，以适应新世纪对人才科学素质的要求。

还必须提醒注意的是实验室操作规程和安全规则。学生进入实验室上实验课，会接触到各种测量器具、仪器和仪表，随着学习的深入、层次的提高，还可能接触一些先进的、精密的仪器设备或接触各种实验环境如高温、低温、电磁场、激光、暗室、放射性、真空系统等，这要求学生必须遵守实验室给出的具体操作规程，严格执行安全防护操作规定，养成良好的实验习惯。这也是对高素质实验人

才的一项基本要求。

5. 结 束 语

物理实验在人类文明的发展中，一直扮演着重要的角色，许多物理实验在历史发展中起过里程碑式的作用。可以毫不夸张地讲，没有物理实验就没有当今的人类文明，不学习物理实验，也不可能造就一代新世纪的高素质人才。愿有志于攀登科学高峰的人，在学习物理实验的过程中勇猛精进，为新世纪的发展谱写新篇章。

(吴泳华 霍剑青)

第一章 物理实验的基本方法

§ 1.1 物理实验思想和方法的形成

物理学发展至今, 历经了数以万计的成功的、失败的、著名的、简单的和平凡的实验, 历代物理学家和科技工作者都曾置身于这艰苦的实验研究之中, 用他们的智慧和心血, 换来了今日物理学中的累累硕果. 每一个实验, 都会有自身的一套方法用来测量相关的物理量. 我们把对物理量的具体测量的方法叫测量方法, 把对各类实验都通用的方法叫实验方法, 把在选用实验方法, 进行实验设计, 编排实验或在实验中进行调节和测量时具有普遍指导意义的思想称为实验思想.

公元前 2—3 世纪, 阿基米德除了做杠杆、滑轮等实验外, 还进行了浮力的观察和研究. 他指出, 浸在液体中的物体所受的浮力等于它排开液体的重量, 从而建立了浮力定律, 至今阿基米德原理仍被用于科学实验的各个领域之中.

在中国的古书中也有过古人进行物理实验的记载, 如《墨经》中的小孔成像, 平面镜、凹、凸面镜与成像大小的关系, 像的正倒与位置关系的记载等. 但毕竟那时的实验是零散的, 定量的实验还较少, 大多数实验仅限于现象的描述, 或只作一般的解释, 没有形成系统理论, 或是有了理论的轮廓 (或雏形), 却没有经过再实验的验证循环过程去完善和提高.

物理学发展到 16 世纪以后, 以伽利略为代表的一批杰出的物理学家, 把物理实验方法和物理规律的研究结合起来形成了较系统的科学实验思想体系, 把实验方法发展到一个崭新的高度, 对物理学的发展做出了划时代的贡献正如他自己在《两种新科学的对话》中所述: “我们可以说 大门已经向新方向打开 这种将带来大量奇妙成果的新方法, 在未来年代会博得许多人的重视.” 事实正是如此, 当代著名物理学家爱因斯坦在《物理学的进化》中, 对伽利略的科学思想方法给予了高度评价. 他指出: “伽利略的发现, 以及他所用的科学推理方法, 是人类思想史上最伟大的成就之一, 而且标志着物理学的真正开端.”

伽利略的科学思想中包含有辩证唯物主义的认识论和方法论的成分, 他关于物理实验的科学思想, 影响着历代科学工作者, 至今对我们的实验工作和学习仍具有一定的指导意义.

物理实验是探索物质间的相互作用, 研究自然现象的本质与规律的必要途

径.在确定了研究方向和实验目的后,如何寻求最佳的实验方案,选择合适的实验条件及测量方法,进行精心的设计,合理的安排和认真的观测、测量,悉心的分析和处理数据,得出可靠的结论等等,是实验能否达到预期目标的关键.在实验物理学数百年的发展进程中,出现过众多卓越的实验,它们以其巧妙的物理构思、独到的处理和解决问题的方法、精心设计的仪器、完善的实验安排、高超的测量技术、对实验数据的精心处理和无懈可击的分析判断等,为我们展示了极其丰富和精彩的物理思想,提示了解决问题的途径和方法.这些思想和方法已经超越了各个具体实验而具有普遍的指导意义.学习和掌握物理实验的设计思想,测量和分析的方法,对物理实验课及其他学科的学习和研究都大有裨益.在此我们简要地介绍一些有关物理实验的测量和分析方法.

§ 1.2 物理实验分析方法

1. 数量级估计法

实验物理学家在着手准备精确测量之前,为选择合适的仪器和测量方法,常常需要对各种物理量的数量级先作一番估计.掌握特征量的数量级,往往是研究一个物理问题时登堂入室的关键.一个实验经验很丰富的人必然会对数量级有直觉的感知,一眼就能估计出这个实验的精度可能有多高,即哪些因素会影响实验结果,哪些因素影响比较大些,要提高测量精度,应如何改变测量条件,采取何种测量方法等,这些经验的积累需要一个长时间的过程.因此,我们在一开始学做物理实验时,就应该经常练习对各种事物的数量级作出快速的反应,粗略地估计数量级范围,留心尺度大小改变所产生的影响,各参变量之间的关系,相互作用的影响等,有意识地将这种作法养成习惯,久而久之,就可以加深我们对物理现象的感知,从而增进我们对事物本质的洞察能力.

(1) 通过数量级的排序分析,抓住主要影响

在实际的每一个物理实验中,都有数不清的因素会对实验过程的每一个环节带来影响,对实验有影响的因素,其自身的大小,以及它对实验结果的影响是非常悬殊的.通常我们要抓住对实验有较大影响的主要因素,而抛开(或忽略)那些与主要因素相比,影响要小得多的次要因素.“影响小得多”是指在修正了已成为测量公式一部分的系统误差后,比起影响实验结果的主要的不确定误差来说,至少要小一个数量级.

例如以最普通的单摆实验为例.理想的单摆,应该是一根没有质量、没有弹性的线,系住一个没有体积的质点.在真空中它纯粹由于重力作用,在与地面垂直的平面内作摆角趋于零的自由振动.而这种理想的单摆,实际上是不存在的.在实际的单摆实验中,悬线是一根有质量(弹性很小)的线,摆球是有质量有体积

的刚性小球，摆角不能为零，而且又受空气浮力的影响，如图 1.2-1 所示。

单摆的周期公式为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{g}{l} \left[1 + \frac{d^2}{20l^2} - \frac{m_0}{12m} \left(1 + \frac{d}{2l} + \frac{m_0}{m} \right) + \frac{\rho_0}{2\rho} + \frac{\theta^2}{16} \right]} \quad (1)$$

式中 T 是单摆的振动周期， l 、 m_0 是单摆的线长和质量， d 、 m 、 ρ 是摆球的直径、质量和密度， ρ_0 是空气密度， θ 是摆角。设 $m = 33.0 \text{ g}$ ， $m_0 = 0.1 \text{ g}$ ， $l = 80.0 \text{ cm}$ ， $d = 2.00 \text{ cm}$ ， $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ ， $\rho_0 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ， $\theta = 5^\circ$ 则摆球几何形状对 T 的修正量为：

$$\frac{d^2}{20l^2} \approx 3 \times 10^{-5}$$

$$\text{摆的质量的修正为：} \quad \frac{m_0}{12m} \times \left(1 + \frac{d}{2l} + \frac{m_0}{m} \right) \approx 2.6 \times 10^{-4}$$

$$\text{空气浮力的修正为：} \quad \frac{\rho_0}{2\rho} \approx 8.3 \times 10^{-5}$$

$$\text{摆角的修正为：} \quad \theta = 5^\circ \text{ 时} \quad \frac{\theta^2}{16} \approx 4.7 \times 10^{-4}$$

$$\theta = 3^\circ \text{ 时} \quad \frac{\theta^2}{16} \approx 1.7 \times 10^{-4}$$

若实验精度要求在 10^{-3} 内，则这些修正项都可忽略不计。若要求更高的精度，则这些因素就不可忽略，必须考虑。

(2) 通过数量级分析，确定基本误差和减少不确定因素

上面单摆的例子是针对某一个因素或某一物理量来讲的，实际上各个因素之间会有相互联系和制约。如果在一个实验中有一个误差很大的因素，那么，其他量测量得再精确也是毫无意义的。例如在比热实验中，温度与质量的测定就采用了不同的测量精度。

由于各种不可制约的偶然因素的影响（例如实验条件和环境），或仪器分辨能力的局限，观测者感觉灵敏度（分辨率和反应能力等）的限制等，每个实验都存在基本误差。基本误差是指在一定条件下实验误差的最低限度，一般是给出一个数量级或给出一位数。对于不同仪器和不同学科中的不同实验，在不同的环境条件下进行，不同的人进行测量，基本误差的大小是不同的。例如用石英晶体振荡器定标的计时器，其基本误差在一般情况下为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ s}$ ；在恒温条件下为 10^{-6} s 而作为时间测量的标准，经过精密加工的石英晶体配合精密的辅助电路，在训练有素的科技人员的测量中，基本误差却可小于 10^{-9} s 。

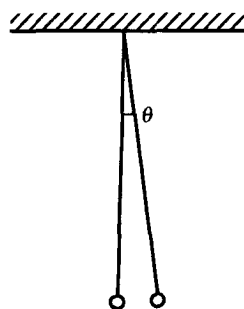


图 1.2-1 单摆示意图

对一个实验的基本误差有所了解以后，就可以以此去衡量实验中其他因素的影响。数量级远小于基本误差的因素就可以不予考虑。但还有一点要注意，随着实验方法、实验技巧或仪器装置的改进，构成实验基本误差的因素也可以转变和减小。例如吴健雄教授在设计验证弱相互作用下宇称不守恒的实验时，为减少分子不规则运动的影响，将实验安排在低温进行。再如普通物理实验中，当空间杂散的分布电容是构成实验基本误差的主要因素时，可用屏蔽的方法来解决，若构成实验的基本误差是属于随机性的，可用适当增加测量次数来减小。在许多情况下，基本误差是一个综合的效果。

(3) 利用数量级的分析作为实验的判断

有时，实验结果得不到正确的解释，往往是由于没有从数量级上进行分析。事实证明，有时仅从数量级的分析就可以对问题作出判断。查德威克发现中子的过程就是一个很好的例证。当时居里夫妇已经观测到用 α 粒子轰击铍 (Be) 和硼 (B) 时会产生一种中性辐射，这种辐射能够从含氢的物质中打出速度相当大的质子。在实验中，他们用 α 粒子轰击铍所产生的辐射通过一个薄窗口进入装有常压空气的电离室中，当他们把石蜡或含氢物质放在这个室的窗前时，电离室中空气的电离量就增加了，甚至是成倍的增加，他们把这一现象看作是由于质子被打出造成的。进一步的实验证明这种质子具有 3×10^9 cm/s 的速度。他们认为，能量是通过类似于电子的康普顿效应的某个过程，从这种中性辐射传递给质子的，并估计这种中性辐射的量子能量为 50 MeV。于是矛盾产生了，根据克莱因 - 仁科公式所算出的质子散射频率，比观测到的结果小了三个数量级，同时很难解释一个 Be 核与一个动能为 50 MeV 的 α 粒子相互作用，竟能产生一个 50 MeV 的能量子，这样的矛盾引导查德威克用“中子”——一种质量近似于质子而不带电的新粒子来解释。中子的发现使查德威克荣获了 1935 年的诺贝尔物理学奖金。

2. 量纲分析法

用量纲分析法去寻求物理量之间的联系，并建立方程，亦是物理实验中常用的方法之一。在物理学中，仅仅靠量纲分析，也可以得到某些重要的结论，虽然不是每一个问题都能得到完全的定量结果，但往往与它只差一个无量纲的未知函数或未知系数。有时，借助于量纲以及其他来源的知识和推理（例如已知的特例或实验规律），还可以进一步获知未知系数的特征，甚至将它完全确定下来。当然最终的结果还需要依赖实验的检验。

[例 1] 用量纲分析法导出开普勒第三定律。

解：由牛顿的万有引力定律可知，真空中两个质量为 m_0 、 m_1 的物体之间的万有引力 $F = G \frac{m_0 m_1}{r^2}$ ，式中 r 为两物体之间的距离， G 是引力常量。如果 $m_0 \gg m_1$ 则可认为 m_1 在万有引力下绕 m_0 作圆周运动。显然影响 m_1 运动周期的

物理量可能有 m_0 、 m_1 、 r 和 G 。但实际上 m_1 对运动周期不产生任何影响，因为 m_1 增大一倍， F 也增大一倍，即 m_1 的法向加速度不变（即 v^2/r 不变）， v 是切向速度，于是 m_1 运动的周期

$$T = f(m_0, r, G) = km_0^\alpha r^\beta G^\gamma \quad (2)$$

写出量纲公式

$$T = M^\alpha L^\beta (M^{-1}L^3T^{-2})^\gamma = M^{\alpha-\gamma} L^{\beta+3\gamma} T^{-2\gamma} \quad (3)$$

根据等式两边量纲必须相等的原理，得 $\alpha - \gamma = 0$ ， $\beta + 3\gamma = 0$ ， $-2\gamma = 1$ ，即 $\gamma = -1/2$ ， $\beta = 3/2$ ， $\alpha = 1/2$ ，于是有

$$T = \frac{kr^{3/2}}{\sqrt{Gm_0}} \quad (4)$$

这与开普勒第三定律 $\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM_0}$ 相符。

[例 2] 一个观测原子弹爆炸的例证。火球直径 D 随时间 T 变化的数据记录如下：

T/ms	0.24	0.66	1.22	4.61	15.0	53.0
D/m	19.9	31.9	41.9	67.3	106.5	1750

在双对数坐标纸上作两者关系曲线，发现它是一条斜率为 0.4 的直线，如图 1.2-2 所示。怎样理解此事？

解：膨胀的火球外缘是冲击波，可能有哪些因素决定其推进速度的大小呢？原子弹释放的能量 E 可能是一个，空气密度 ρ 可能是另一个，还有其他因素吗？现在 E 、 ρ 加上 D 、 T 可能有四个参量，在通常的 SI 单位制中，它们可能构成一个无量纲的组合，即

$$\Pi = \frac{ET^2}{\rho D^5} \quad (5)$$

由式 (5) 可看到 $D \propto T^{2/5}$ 。

这便解释了观测数据显示的结果。看来我们选择的物理量是对的，而且已经基本上够了。如果我们进一步设无量纲的组合 Π 的数量级为 1 取

$$\rho \approx 1.3 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

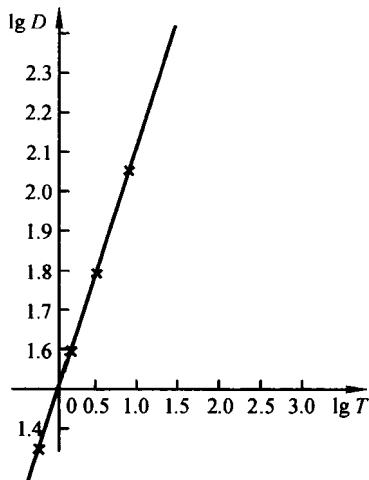


图 1.2-2 火球直径 D 与时间 T 的关系

则可估计出原子弹爆炸时释放出的能量的数量级为

$$E \approx \rho D^3 / T^2 \approx 10^{14} \text{ J} \quad (7)$$

§ 1.3 物理实验的基本测量方法

一切描述物质状态和运动的物理量都可以从几个最基本的物理量中导出，而这些基本物理量的定量描述只有通过测量才能得到。将待测的物理量直接或间接地与作为基准的同类物理量进行比较，得到比值的过程，叫做测量。测量的方法和精确度随着科学技术的发展而不断地丰富和提高。例如对时间的测量，远古时代人们“日出而作，日落而息”原始的计时单位是“日”人们利用太阳东升西落，周而复始，循环出现的天然时间变化周期，逐渐产生了日的概念。人们从月亮圆缺产生了“月”的概念，当人们知道太阳是一颗恒星时，地球绕太阳的运动周期便成了计量时间的科学标准。人类曾发明了日晷、滴漏和各种各样的计时器来测量较短的时间间隔。随着物理学的发展，人们学会把单摆吊在时钟上，做出了摆钟，提高计时精度约 3 个数量级；随后人们用石英晶体振荡牵引时钟钟面，做出了石英钟，将计时精度提高了近 6 个数量级；1949 年，美国国家标准局首先利用氦分子跃迁做出了氦分子钟，1955 年英国皇家物理实验室终于把铯原子用在了时钟上，做成了世界上第一架铯原子钟（量子频标），测时精度达到 10^{-9} s 。到 1975 年铯原子钟的测量精度已达 10^{-13} s 。其他类型的原子钟相继问世，其中主要有氢原子钟和铷原子钟等。图 1.3-1 显示了从 14 世纪的机械钟到现代的原子钟，计时精度大约按指数规律在提高。

由此可见测量的精度与不同时代的测量方法和手段密切相关。同一种物理量，在量值的不同范围，测量方法不同，即使在同一范围内，精度要求不同也可以有多种测量方法，选用何种方法要看待测物理量在哪个范围和我们对测量精度的要求。例如长度的测量，覆盖了整个物理学研究的尺度范围——小到微观粒子，大到宇宙深处 ($10^{-16} \sim 10^{26} \text{ m}$)。人们利用高分辨率电子显微镜和扫描隧穿显微镜或原子力显微镜已经可测量原子的直径和原子的间隔，其分辨率已达 10^{-11} m ；前苏联哈尔科夫的射电望远镜已可探测近 10^{10} l.y. 的距离（约 $2.6 \times 10^{26} \text{ m}$ ）。而宏观物理的范围，一般采用力、电磁和光的放大方法进行测量，例如我们在物理实验中就常用到的直尺、游标卡尺、螺旋测微计、电感和电容式测微仪、线位移光栅、光学显微镜、阿贝比长仪和激光干涉仪等。随着人类对物质世界更深入的了解，待测物理量的内容越来越广泛，随着科学技术的飞速发展，测量方法和手段也越来越丰富，越来越先进，我们不可能花大量笔墨在此介绍所有的测量方法和手段，本节只是将我们在物理实验中常用的几种最基本测量方法作概括性的介绍。

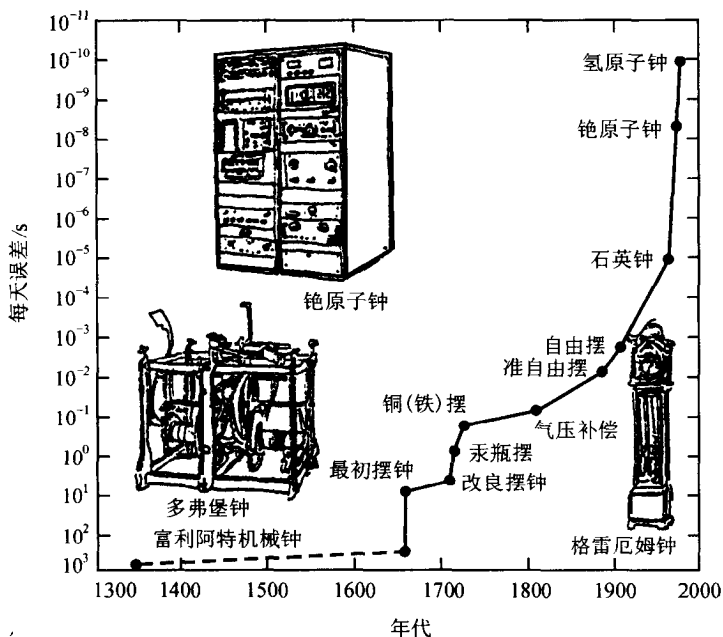


图 1.3-1 计时精度的发展

1. 比较法

比较法是最基本和最重要的测量方法之一。因为所谓测量，就是把待测的物理量直接或间接地与作为基准（或标准单位）的同类物理量进行比较，得到比值的过程。比较法可分为直接比较和间接比较。

(1) 直接比较测量法

直接比较测量法是把待测物理量 X 与已知的同类物理量或标准量 S 直接比较，这种比较通常要借助仪器或标准量具。

1) 均衡法、补偿法或示零法 把标准值 S 选择或调节到与待测物理量 X 值相等，用于抵消或补偿待测物理量的作用，使系统处于平衡或补偿状态，处于平衡状态的测量系统，待测物理量 X 与标准值 S 具有确定的关系，这种测量方法称为均衡法（或补偿法）。均衡法（或补偿法）的特点是测量系统中包含有标准量具和平衡器（或示零器）在测量过程中待测物理量 X 与标准量 S 直接比较，调整标准量 S 使 S 与 X 之差为零（故也有人称其为示零法）。这个测量过程就是调节平衡（或补偿）的过程，其优点是可以免去一些附加的系统误差，当系统具有高精度的标准量具和平衡指示器时，可获得较高的分辨率、灵敏度及测量的精确度。匈牙利物理学家厄缶设计的扭摆实验就是利用均衡测量法的原理。扭摆实验如图 1.3-2 所示，用悬丝吊起的物体 A 只受三个力，即指向地心的引力

F_g ，指向地球自转轴的惯性离心力 F_w 和悬丝的张力 F_t 。在实验中按图 1.3-2(b)吊起的两个物体 A 和 B 达到平衡，厄缶比较了具有相同质量不同材质的物体，即保持物体 A 的材质不变，物体 B 分别用不同的材质做成，结果看不出固定于悬丝 S 上的反射镜 M 有任何偏转，从而证明引力质量与惯性质量相等，与物质的材料无关。在物理实验的测量操作中，均衡法的运用是非常广泛的，例如等臂天平称重、惠斯通电桥在 1:1 时测电阻、电位差计测电压、卡文迪什 (S.H.Cavendish) 扭秤法测万有引力，以及各种平衡电桥的调节等。

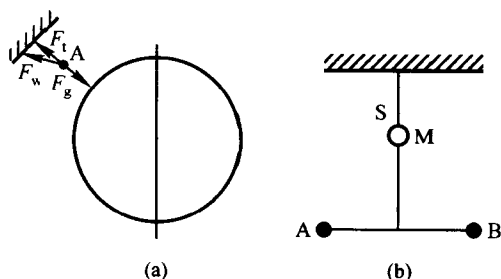


图 1.3-2 厄缶的扭摆实验示意图

2) 比率测量法 将一个未知量 X 与一已知量 S 的某分数或倍数进行比较， $X = KS$ (K 为比例系数，可由实验定出)。例如用于测量装置和模拟计算机中的线电位差计，将标准电位差 V_S 加到电阻的两端，这电阻通常是一根均匀的长导线（或均匀的线绕滑行电阻器），我们可移动触点，选取某一确定的长度 L_X 。若 $\frac{L_X}{L_0} = K$ (L_0 为长导线或滑行电阻器的总长)，则 K 也是电位差的比值（即 $\frac{V_X}{V_S} = K$ ）。再如，惠斯通电桥的倍率旋钮挡的设计，就是利用了比率测量法的原理，即利用 $\frac{R_1}{R_2} = K$ ($K = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000$) 来达到改变量程的目的。

3) 小差值测量法 如果差值 $X - S = \delta$ 已测定，那么 $X = S + \delta$ (δ 可正可负)。若 δ 很小，那么 δ 的相对误差比较大也是可以容许的，并不给 X 的测量值带来很大的误差。例如，考虑用一个 1.27 cm 的块规作为标准量 (S) 和一个供测量 δ 用的差数指示器来测量一段略大于 S 的长度。假定： $S = (1.270\ 000 \pm 0.000\ 013)$ cm。先用块规 S 将千分表调节到读数为 0，再用 X 代替 S ，并且假定千分表读出的差值 $\delta = (2.49 \pm 0.05) \times 10^{-4}$ cm，此时 X 的测量值为 $X = 1.270\ 249$ cm， δ 的相对误差为 $\pm 2\%$ ，它对 X 的测量误差产生的影响小于标准值 S 自身容许的偏差 0.000 013 cm，这是一个说明小差值测量法的特例。

(2) 间接比较测量法

当一些物理量难用直接比较法测量时，可以利用物理量之间的函数关系将待测物理量与同类标准量进行间接比较测量出。图 1.3-3 给出了一个利用均衡法间接比较测量电阻的示意图。将一个可调节的标准电阻与待测电阻相联接，保持稳压电源的输出电压 V 不变，调节标准电阻 R_S 的阻值，使开关 K 在 '1' 和 '2' 两个位置时，电流指示值不变，则 $R_X = R_S = V/I$ 。

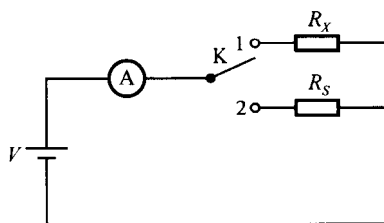


图 1.3-3 间接比较法测量电阻的示意图

2. 积累和放大法

把实验中测量的微小物理量或把待测的物理量进行选择，积累或放大有用的部分，相对压低不需要的部分，提高测量的分辨率和灵敏度是物理实验中最常用的方法之一。

(1) 累积放大法

在物理实验中我们常常可能遇到这样一些问题，即受测量仪器的精度的限制，或存在很大的本底噪音或受人的反应时间的限制，单次测量的误差很大或无法测量出待测量的有用信息，采用累积放大法来进行测量，就可以减小测量误差、降低本底噪音和获得有用的信息。例如最简单的单摆实验的周期测量，假定单摆周期 T 为 1.50 s ，人开启和关闭秒表的平均反应时间为 $\Delta T = 0.2\text{ s}$ ，则单次测量周期的相对误差为 $\Delta T/T = 30\%$ 。若我们测量 50 个周期，则将由于人开启和关闭秒表的平均反应时间引起的误差降到 $\Delta T/50T = 0.6\%$ （参阅实验 4.2.2）。

再如激光器，为了获得高度集束光，采用一对平行度很高的半透半反射膜，使光在两半透半反射膜之间多次反射，光强不断增强，其中与反射面不垂直的光会由于多次反射而最终被筛选掉，如图 1.3-4 所示。

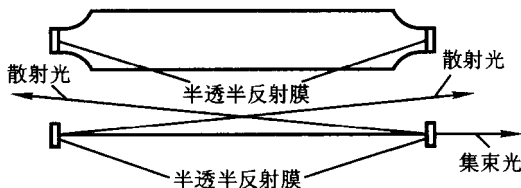


图 1.3-4 激光器半透半反射膜选择放大示意图

回旋加速器，也是利用了累积放大的原理，电子每通过加速器半圆的出口进行一次加速，使电子的能量不断增加。如图 1.3-5 所示，电子的速度不断增加， $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < \dots < v_{10}$ 即动能不断增加。

在拉曼光谱或红外光谱的测量中，由于电子噪音、机械振动噪音和环境噪音等，使单次扫描往往不能获得高分辨率和信噪比的谱图或曲线，也常常采用累积放大法进行多次扫描测量来降低本底噪音，提高测量的分辨率和获取有用信息。

(2) 机械放大法

机械放大是最直观的一种放大方法。例如利用游标可以提高测量的细分程度，原来分度值为 y 的主尺加上一个 n 等分的游标后，组成的游标尺的分度值 $\Delta y = y/n$ ，即对 y 细分了 n 倍，这对直游标和角游标都是适用的（参阅长度测量的有关实验）。

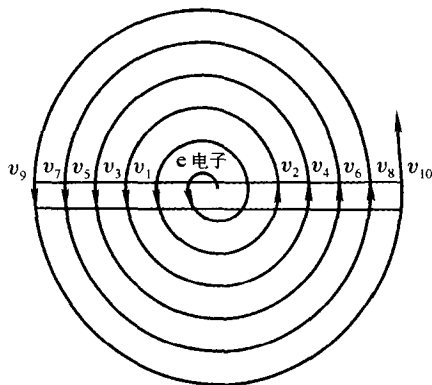


图 1.3-5 回旋加速器累积加速示意图

螺旋测微原理也是一种机械放大，将螺距（螺旋进一圈的推进距离）通过螺母上的圆周来进行放大。放大率 $\beta = \pi D/d$ 其中 d 是螺距， D 是螺母连接在一起的微分套微的直径。

机械杠杆可以把力和位移放大或细分，例如各种不等臂的秤杆。

滑轮亦可以把力和位移细分，例如机械连杆杆或丝杆，连动滑轮或齿轮等。

(3) 电信号的放大和信噪比的提高

电信号的放大可以是电压放大、电流放大、功率放大，电信号亦可以是交流或直流的。

随着微电子技术和电子器件的发展，各种电信号的放大都很容易实现，因而也是用得最广泛、最普遍的。例如三极管是在任何电子电路中都可能遇到的常用元件，因为栅极 E_g 的微小变化都会产生板极电流 I_p 的很大变化，所以三极管常用作放大器。现在各种新型的高集成度的运算放大器不断涌现，把弱信号放大几个至十几个数量级已不再是难事。因此，常常把其他物理量转换成电信号放大以后再转换回去（如压电转换、光电转换、电磁转换等）。把电学量放大，在提高物理量本身量值的同时，还必须注意减小本底信号，提高所测物理量的信噪比和灵敏度，降低电信号的噪声。提高信噪比的方法是多种多样的，详见电子线路的有关书籍。

(4) 光学放大法

光学放大的仪器有放大镜、显微镜和望远镜。这类仪器只是在观察中放大视角，并不是实际尺寸的变化，所以并不增加误差。因而许多精密仪器都是在最后的读数装置上加一个视角放大装置以提高测量精度。

微小变化量的放大原理常用于检流计、光杠杆等装置中.光杠杆镜尺法就是通过放大测量物理量(微小长度变化)详见实验 5.3-1.

3. 转换测量法

各物理量之间存在着千丝万缕的联系.它们相互关联,相互依存,在一定的条件下亦可相互转化.因而,寻求物理量之间的关系,是探索物理学奥秘的主要方法之一,也是物理学中常见的课题.当人们了解了物理量之间的相互关系和函数形式时,就可以将一些不易测量的物理量转化成可以(或易于)测量的物理量来进行测量,这也是物理实验中常用的方法之一.

(1) 寻求物理量之间的相互关系

寻求物理量之间的相互关系,可以分为定性描述和定量测量两类.定性描述以实验观察为主,旨在了解各相关物理量间相互依赖、相互转化的物理现象的过程或变化规律等,定量描述则是在此基础上,不仅要观察物理现象和变化规律,还需要精确测量各物理量之间的变化,经过数学和逻辑推理过程,用数学公式表达出来,使之具有普适性.在定量寻求中,又可分为直接寻求和间接寻求两类.

1) 直接寻求

探求两个物理量之间的关系时,可以直接改变其中某一物理量,测量另一物理量随前一物理量的变化值.

探求多个物理量之间的关系时:

(a) 可以先固定某个或某些物理量,而求出两个主要变化量之间的关系.

(b) 先固定某个或某些物理量,两两地求出相互关系,再综合分析.

(c) 先找出影响各物理量变化的主要物理量.改变这一物理量,同时测量多个变量,然后用某种方法进行处理,并找出各物理量之间的关系.

2) 间接寻求

在设计和安排实验时,有的物理量有时不能直接测量或求出,就需要采用迂回的策略,先找到容易攻克的突破口进行攻击,然后一鼓作气直捣核心,这也是一种解决问题的途径和方法.

(a) 把不可测的量转换成可测的量(即变量转换法)

在设计和安排实验时,当预先估算不能达到要求时,就需另辟新径,把一些不可测量的物理量转换成可测量的物理量.例如质子衰变实验.长期以来,物理学家们都没有观察到质子的衰变,故认为它是一种稳定的粒子,其寿命是无限的.但根据弱电统一理论预言,质子的寿命是有限的,其平均寿命约为 10^{38} s,即大约 10^{31} a. 10^{31} a 是一个多么漫长的时期,简直是一个无法测量的时间.因为地球的年龄才大约 10^9 a.谁也无法预料 10^{31} a 内,世界上会发生什么样的变化.因此在很长一段时间,人们无法揭示质子寿命的奥秘.但是当人们把思考的着眼点变换一个角度,把时间的测量转换为空间概率的测量时,整个事件就发生了戏剧