◎ 程稼夫　编著

中学奥林匹克竞赛物理教程

力学篇

中国科学技术大学出版社

☆ 奥林匹克竞赛实战丛书

中学奥林匹克竞赛物理教程

力　学　篇

程稼夫　编著

中国科学技术大学出版社
2008・合肥

内 容 简 介

本书是作者在长期进行奥林匹克中学物理竞赛指导和教学实践的基础上编写的，倾注了作者对奥林匹克物理竞赛事业毕生的心血和热情。本书紧紧围绕中学物理的各个方面以及中学物理竞赛内容：时间和距离、运动学、牛顿动力学、动量、能量、角动量、静力学、振动、波动，在中学层面上精辟生动地介绍了有关重点概念、定律和公式，结合丰富的练习题，以生动的实例，进行问题的分析和综合，训练积极主动的解题思路，活跃思想，发展智能。同时各章均给出了具有一定份量的习题，并附有相应的参考答案。在科学训练的基础上，促使中学生整体物理素质的提高。

本书可作为广大中学生中学物理综合学习和素质提高的有效的辅导书和工具书，是广大中学生参加各类中学物理竞赛、奥林匹克物理竞赛以及高考物理的复习迎考的必备书籍；同时，本书也为中学物理教师提供了一个物理教学探索研究的崭新思路，是广大中学物理教师不可多得的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中学奥林匹克竞赛物理教程. 力学篇/程稼夫编著. —合肥：中国科学技术大学出版社，2002.12(2008.11 重印)
(奥林匹克竞赛实战丛书)
ISBN 978-7-312-01493-2

Ⅰ. 中… Ⅱ. 程… Ⅲ. 物理课—中学—教学参考资料 Ⅳ. G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 086719 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号，230026)
合肥学苑印务有限公司印刷
全国新华书店经销

开本：787×1092/16 印张：24.25 字数：605 千
2002 年 12 月第 1 版 2008 年 11 月第 5 次印刷
印数：18 001—23 000 册
定价：35.00 元

绪　　言

中学奥林匹克物理竞赛在激发中学生的物理兴趣、提高中学生物理素质以及推动中学基础物理教学事业的发展起到了不可忽视的作用。事实证明，中学奥林匹克物理竞赛已经得到广大师生和家长的欢迎，受到了社会各界的关注，已经成为培养和选拔优秀青少年物理人才的又一条行之有效的途径。

为了配合中学奥林匹克物理竞赛活动的积极开展，也为了推动中学基础物理教学改革的深入进行，让更多有天赋的青少年优秀人才脱颖而出，笔者与物理奥林匹克国家集训队总教练轩植华教授联手编写了“奥林匹克竞赛实战丛书”，本丛书共五册：

(1)《中学奥林匹克竞赛物理讲座》

(2)《中学奥林匹克竞赛物理教程·力学篇》

(3)《中学奥林匹克竞赛物理教程·电磁学篇》

(4)《中学奥林匹克竞赛物理教程·热学、光学和近代物理篇》

(5)《中学奥林匹克竞赛物理教程·实验篇》

我们编写这套丛书的目的，首先是为了提供给广大中学生一套密切联系中学物理教材、全面系统并有一定品位的物理课外读本。在“科教兴国”的大潮中，教育事业蓬勃发展，广大中学生的求知欲望空前高涨，特别是一大批优秀中学生对物理知识的高度渴求，他们应该得到更多、更好、更适合于他们阅读的书籍。大学物理课本不是专门为他们编写的，阅读中不可避免会存在许多障碍。本丛书试图提供一套适合他们阅读的课外参考书，并尝试给中学物理教师提供一本与中学物理教学实践联系密切的教学参考书，以便老师们能够更深入地实践培养优秀学生的工作。

编写本丛书的几点说明：

1. 本丛书的内容基本上按照2000年全国中学生物理竞赛委员会第十九次全体会议通过的《全国中学生物理竞赛内容提要》并结合中学物理教学实际编写而成。

2. 在素材选择和编排方面，我们在以下几方面作了努力：

①总结并选择了多年来国际、国内各届物理竞赛中的优秀试题，并吸取了广大师生在竞赛物理研究中的丰富经验。一大批优秀试题具有“经典性”的示范作用，对基本概念、基本方法、基本能力的训练均可借鉴，因为它们很精彩，理应加以总结。

②在概念的讲述中，注意准确到位；在解题的应用中，注意清晰透彻，简洁深刻，视野独特，富有创意，以期对读者在深层次上有所帮助。

③不一味总结别人的东西，更着力于要有新意。我们注意到，在对各种问题的处理中，在对物理本质的理解上，应有更高的要求、更深刻的思维或观点。这对优秀中学生以及培养优秀中学生的物理教师是十分必要的。方法是在一定的物理观点下采用的，观点不同，方法各异。创造性思维和能力的培养是对优秀中学生培养工作的灵魂。

举个例子。在处理静电场的问题中，有这样一个问题，即，一个不带电的金属球壳(内外半径为 a 和 b)，球心处放置一个带电量为 Q 的点电荷，欲把球心处点电荷从球内经球壳上一小缝移至无限远，求外力做了多少功。这个问题的求解通常是这样去做，考虑到球心处电荷 Q

一下移出时，移动过程中球壳上感应电荷分布变化，静电场变化。因此，做的功用Q乘初终态电势差是不妥的。解决办法是，把Q分成无限多个小电荷，一个一个地经球壳小缝移至无限远。这样处理，保证了移一个无限小电荷，不会带来移动中电场分布的改变。然后，对每一次移小电荷做的元功相加，就是所求的外力做功大小(分Q，最后合Q，外力做功为零，不计)。这是在移电荷，外力做功的观点下给出的一种解法。我们也可以换一种观点。把未移前的初态与移完后的终态比较，两种状态下的静电能量均贮存在电场中，终态的静电能是一个带电量为Q的点电荷周围静电场的能量，它比初态静电能多，多的部分就是初态球壳层导体中的那一部分空间有了静电能(因为初态导体壳内无电场)。因此，只需算出这部分多余的静电能(即静电能增量)，也就知道外力做了多少功。

那么这部分静电能如何计算呢？因为它是一个非匀强电场。尽管知道静电场的能量密度可以表达为$w=\frac{1}{2}\varepsilon_0E^2$，但由于电场不均匀，中学生还无法得到结果。怎么办？

考虑到在静电场理论中，静电能量贮存在电场中的观点与静电能量由电荷携带的观点是等价的，在应用中会有相同的结论(注意：只限于静电场！)。在这一观点下，我们可以用静电能由电荷携带的观点去计算这部分静电场的贮能。因此，导体球壳内由初态无电场到终态中相应的空间有电场，增加的静电能可以写成

$$\Delta W=\frac{Q^2}{2C_a}-\frac{Q^2}{2C_b}$$

其中C_a、C_b分别表示半径为a、b的孤立导体球的电容，即$C_a=4\pi\varepsilon_0a$，$C_b=4\pi\varepsilon_0b$，由此，可得外力做的功$A=\Delta W$。值得注意的是，这里采用的观点、方法可以解决类似的一批问题。

再举一个例子。当处理一个连续分布的带电体、带电面或带电线在空间某一指定点所激发的静电场时，一种常规的做法是把带电体、带电面或带电线分成无限多个点电荷，把每个点电荷在那个指定点激发的电场强度求出，再矢量叠加得到。事实上，我们也可以这样去考察，在那个指定点放一个带电量为q_0的试验电荷，此试验电荷受力为$q_0\boldsymbol{E}$，其中$\boldsymbol{E}$即为所求的电场强度。考虑到q_0对带电物体(体、面或线)的作用力正好是$(-q_0\boldsymbol{E})$，作用力大小与反作用力相等。在某些对称情况下，q_0对带电物体的作用力易求，从而得到电场强度。我们在书中，均匀带电半圆环、均匀带电半球面在球心激发的静电场强度就是这样处理的。

类似的问题书中还有很多，例如力学中对两个质点系统的讨论具有重要的实际意义，如二质点碰撞问题、引力问题，以及许多实际的牵涉两个质点的问题。因此，我们在理论上结合中学物理的实际，作了详尽的分析讨论，使得对两个物体系统的处理有一个更高的境界，甚至用通常方法处理感到困难的问题，在新的观点下会迎刃而解。

本丛书的编写实属尝试，愿望和实效会有距离，不当和错误定难避免，恳切希望各位读者批评指教。

本丛书的编写一直得到安徽省物理学会阮图南教授、赵宗彦教授、吴以勤教授、丁莉兰教授的指导，还得到安徽省教育厅教学科学研究所何润伟老师、杨思锋老师、梅小景老师、合肥市物理教学研究会王继珩老师、王可兵老师的鼓励和支持，在此一并表示衷心感谢。

程 稼 夫

2005 年 2 月 23 日

于中国科学技术大学

目　次

第一章　时间和距离

1.1　物体的运动

物理学归根结底是一门实验科学，它依赖于定量的观察。唯有通过定量的观察，以及采用必要的抽象、假设、推理等手段，人们才能得到定量的关系和规律，而这些关系和规律构成了整个物理学的核心内容。

人们常常把约 400 年前伽利略所做的工作看成是物理学的开端，因为在此之前对物体运动的研究是哲学家们的事情，许多论据是由亚里斯多德以及其它希腊哲学家头脑中想像出来的，并被人们普遍认为是“正确”的，是“已经证明”了的。伽利略对此持怀疑态度，并做了著名的关于物体运动的斜面实验。他让一个小球沿一斜面滚下，对其运动进行观察，并进行了定量测量：在多长一段时间内小球跑了多远一段距离。

当时，测量距离的方法早已被人们掌握。但是对于时间的测量还没有较为精确的方法，特别是对短时间的测量。伽利略在做第一次运动实验时是用他的脉搏来数出等间隔的时间的。当小球沿斜面滚下时，伽利略一边数着自己的脉搏：“一，二，三，……”，一边由他的助手标上小球所在的位置 1，2，3，…。实验结果，如果小球从释放时刻算起，那么离记号的距离正比于 1，4，9，…。这就是今天我们知道的结论：当小球作初速为零的匀加速运动时，距离与时间的平方成正比：$s \propto t^2$。

下面就伽利略斜面实验中所涉及到的时间和距离分别加以进一步的讨论。

1.2　时间及其量度

1.2.1　时间

时间可以说是人们最为熟悉、最为平凡的一个概念了，但是人们对时间的种种定义仍难以令人满意。有人说，时间很可能是我们不能定义的事物之一。但这样的事实并不妨碍物理学中对时间的使用。我们干脆说时间是表示事物之间的一种顺序与间隔。

对于物理学，重要的不是去追究其“准确”的定义，而是应当了解时间是怎样量度的，即如何去测量它。

1.2.2　时间的量度

用钟来测量时间这是对具有能周期性发生的过程或现象进行时间测量的一种方法。太阳的升落、月亮的盈亏、四季的循环，以及人体的脉搏、分子的振动、单摆的摆动等等都可以作为测时工具。

以太阳升落的一个昼夜作为例子，昼夜是周而复始地重复出现的，然而昼夜是否真正周期

性重复呢？每一天是否都同样长？就平均而言，一天的日子确实大致一样长。有什么办法可以检验每一天长短相同与否？一个办法是把它同某个别的周期性现象作比较。我们可以用沙漏来作这种比较，每当最后一粒沙掉下之后，立即把沙漏倒转过来，这样就人为地制造了一个周期性事件。为了测量准确起见，我们不要计算每天太阳升起到下一天太阳升起倒转沙漏的次数，而是计算一个中午到下一个中午（中午指太阳在其最高点的时刻）沙漏倒转的次数，我们会发现每天的倒转次数是相等的。若把沙漏倒转一次称为经历了一个“小时”，那么现在就较有把握地认为“小时”和“昼夜”具有一种有规则的周期性，它可以划分出相继的等时间间隔。或许有人会对这种周期性的“证明”表示异议，确实如此，这里只是发现一种事物的规则性与另一种事物的规则性相吻合而已。

总而言之，我们只能说，时间的量度是建立在某种明显是周期性事物的重复性之上的。

1.2.3 短的时间

必须指出，上述检验昼夜重复性过程中，我们同时找到了一种较为精确地测量一天的若干分之一的方法，即找到了用较小的时间间隔来计量时间的方法。只要把这种方法稍加发展，就可以得到更小的时间间隔。

如果沙漏大小做得合适，使倒转 24 次正好与一个昼夜相吻合，我们就把一昼夜分成 24 小时。伽利略指出，只要一个摆的摆幅始终保持很小，那么此摆将以等时间间隔来回摆动。这种装置就是大家熟悉的摆钟。

我们约定，如果此摆钟在 1 小时内摆动 3600 次，那么称每摆动一次的时间为 1“秒”。应用同样的原理可以把秒分成更加小的间隔。自然，利用机械摆已不能完成使命，只能借助于电学中的谐振电路，电在其中来回振动（反映在电流或电压的振动），其方式与摆锤的摆动方式相类似，这种称为电学摆的摆动周期很短。

调整谐振电路（电子振荡器）中各参数，可以制造一系列电子振荡器，每一个振荡周期比前一个缩小到 1/10，前者用后者来“定标”。对于小于 1 秒的振荡周期可借助于电子示波器，这种装置在荧光屏上画出一幅电流对时间的图像。将示波器依次与上述系列中相继两个振荡器相连，对照两图像就能测出较快的振荡器在较慢的振荡器的一个周期中振荡的次数。

利用电子技术制造出周期约为 10^{-12} 秒的振荡器已不困难。更短的时间也被测量出来，但用的是另一种测量技术。

以测量 π^0 介子寿命为例。π^0 介子在感光乳剂中产生并在其中留下细微的踪迹，用显微镜观察，平均而言一个 π^0 介子在蜕变之前大约走过了 10^{-7} 米距离，且速度接近于光速，因此其寿命总共只有大约 10^{-16} 秒。但必须指出：这里使用了一个与以前不同的、然而是等效的时间量度方法。

在把我们的技术（必要时也把时间的量度方法）进一步加以扩展之后，就能推断更快物理事件的持续时间，最短寿的奇异共振态的寿命只有 10^{-24} 秒，大致相当于光通过氢原子核所花的时间。目前物理学中涉及的最小时间是 10^{-43} 秒，称为普朗克时间。比普朗克时间还要小的范围内，时间的概念可能就不再适用了。

1.2.4 长的时间

下面考虑比一昼夜还长的时间。要测量较长的时间，只要数一数有几天就可以了。如果

时间更长，就可以利用自然界中存在的另一个周期性——年，一年等于 365 天。树木的年轮或河流底部的沉积物提供了以年计算的自然界中所发生某种事件以来所经历的时间。

当我们不能用计算年的方法来测量更长的时间时，必须寻找其它的测量方法。方法之一是把放射性材料作为一只“钟”来使用。在这种情况下，并不出现周期性，但存在一种新的“规则性”。如果一块材料在其形成时其中含有数量为 N_0 的放射性物质，此刻(t 时间)测得的数量为 N，那么只要求解方程

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

就能计算这一物体的年龄 t。其中 T 为此放射性物质的半衰期。

利用上述规则性来测定物体年龄的一个前提是必须确定此物体中放射性物质的放射性总量 N_0。在某种情况下，可以办到。例如，空气中的二氧化碳含有放射性同位素 C^{14}，由于宇宙射线的作用不断地补充衰变掉的 C^{14}，使其对总碳原子中保持某一确定比例。如果我们测量某一物体碳的总量，根据在此得到的比例，立即知道总量中 C^{14} 的最初含量 N_0。C^{14} 的半衰期是 5000 年，通过仔细测量，我们测出经 20 个左右的半衰期后所遗留下来的数量。由此，我们就能够确定生长于 10 万年以前那样古老的有机体的年代。

为测定更早期的事物的寿命，可通过测量具有不同半衰期的其它放射性同位素而得到。例如：U^{238}具有半衰期 10^9 年，如果有某种岩石在它 10^9 年前形成时含有这种铀，那么今天这种铀只剩下一半。当铀蜕变时，它变成铅。因此，若考察应该只有铀存在的地方，从岩石中测出铀和铅所占份额，通过比较计算，就能说出有百分之几的铀已变成铅。利用这个方法可以测定年龄约几十亿年的岩石。地球本身的年龄约为 55 亿年。

进一步的测量知道，地球的年龄与掉到地球上的陨石的年龄相同。这说明，地球是由漂游在太空中的岩石形成的，而陨石很可能是遗留下来的那些物质的残片。

现在普遍认为，宇宙大约起源于 100 亿或 120 亿年之前。由于在此前不知道发生过什么事情，所以谈论更早的时间现在不知是否还有意义。

1.2.5 时间的单位和标准

确定时间的单位和标准为统一使用时间是必要的。我们选择一天或一秒作为时间的某个标准单位，并把所有其它的时间表示为这个单位的倍数或分数。长期以来人们把地球的自转周期当作时间的基本单位。后来发现，若用最好的钟来进行测量，地球的转动也不是严格周期性的。而且地球的周期随着一个世纪一个世纪的过去而稍稍变长一点。

其次选择一只标准的钟，使全世界所有的钟有一个统一的计时，这无疑是方便的。格林威治时间就是在这种需要下产生的。

原子钟是基于原子振动周期十分稳定，对温度和其它外界影响不十分敏感这一特点而制造的，它远比天文时间精确。1967 年 10 月第十三届国际度量衡会议通过决议，将时间单位“秒”定义为：位于海平面上的^{133}Cs(铯)原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁的辐射周期 T 与 1 秒的关系为

$$1\,秒 = 9192631770T$$

1.3 距离及其量度

测量空间距离的方法是选用一种长度单位再加上计数。测量小的长度，可以用此长度单位的几分之一作为一个较小的长度单位去测量。我们目前采用的长度单位是米。

1.3.1 长的距离测量

但是，不是所有长的距离都可以用米尺去量的。两个山顶之间的水平距离可以用另外的方法——三角法去测量，空间大致有点像欧几里德所设想的欧几里德空间（即平直空间），所以用三角法测量是有效的。我国第一颗人造卫星的高度就可以通过安放在地球上两个不同地点的两个望远镜同时测得所需的两个角度得到。用这种方法还可以测得月球离我们的距离约为 3.8×10^8 米（为地球平均半径的 60 倍）。

但这种方法不能测量我们离太阳的距离，这是因为我们不能相当精确地对准太阳上一个特定的点，从而不能精确地测出两个角度。那么如何测量这个距离呢？我们只要把三角法稍加引申即可办到，这个办法直到 20 世纪中叶仍然被认为是很好的办法。此法是这样的，通过天文观察方法测量所有行星出现的位置之间的相对距离，从而得到一幅太阳系的图像，图中显示的都是相对距离。只要测得一个绝对距离就能完成地球到太阳或者地球到任一行星的距离测量。当时选择地球到常常靠近地球的一颗小行星（爱神星），利用三角法进行绝对距离的测量，这个距离相当于提供了太阳系图像的一个比例尺。

20 世纪 60 年代初人们利用雷达发射无线电波测定了地球到金星的距离，现在人们利用激光器发射的激光进行测量。这种方法利用无线电波（包括光波）以光速传播，并假定在地球和所测行星之间无论何处这个速度均相等，那么我们就可以从无线电波返回时间来确定地球与行星间的距离。

如何测量一个更为遥远的恒星的距离呢？经思考，人们回到三角法，利用地球绕太阳公转，提供了为测量太阳系外恒星距离的一条基线。我们可以在夏天和冬天用望远镜对准此恒星，并足够精确地测出两个角度，从而测得地球到恒星间的距离，如图 1-1 所示。

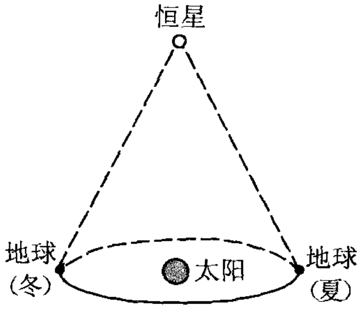

图 1-1

如果恒星离得太远而不能应用三角法时又如何？天文学家发现，从恒星的颜色可以估计它的亮度（内在亮度）。他们通过测定许多靠近地球的恒星（其距离可由三角法测得）的颜色和内在亮度建立了一个确定关系。借助于这个关系，先测出遥远恒星的颜色，就可用颜色——亮度关系确定其内在亮度；然后测定这颗恒星的亮度（称表观亮度），依表观亮度随距离平方减小的规律，就能够由上面得到的内在亮度算得此恒星离地球的距离。银河系中由一群恒星聚集而形成的球状星团用此法测得的距离基本上是正确的。

天文学家发现，在天空中有许多这样的星团高度集中在一起，而且其中大部分离地球的距离大致相同，把这个事实与其它证据结合起来，能够断定，星团集中之处就是我们所在银河系的中心，于是得知我们离银河系中心约有 10^{20} 米之遥。

把上述数据作为我们所在银河系线度的一半，就得到了测量更大距离的“尺子”。假定天

空中的各银河系大小相近(这个结论得到其它证据支持),那么通过测量该银河系的张角就能算出其距离(利用三角法)。现代望远镜可以测得处于地球至宇宙边界一半或更远处的银河系。10^{26}米是我们能够想像的最大距离。

1.3.2 短的距离测量

下面讨论小的距离测量,测定小的距离应采用小的单位。把1米分成1000个相等大小的间隔,每一间隔为1毫米。把1毫米再分成1000个等份,每一份为1微米。这种分法已感困难,要继续分成更小的尺度就更困难了。如果物体小于可见光的波长,那么肉眼就看不见了。此时必须借助于像电子显微镜一类的仪器来继续这个过程。用X光衍射的方法能对更小尺度的物体进行测量,测得原子的直径约为10^{-10}米。

原子大小约为10^{-10}米,而原子核的大小约为10^{-15}米,两者之比为10^5倍!可见原子中在物理大小上存在一个很大的"空隙"。对原子核大小的测定可以采用另一种更为方便的方法,先测出它的表观面积σ,称为有效截面,由于原子核近似球形,则可以利用$\sigma=\pi r^2$,算得其半径r。

取一块材料的薄片,用高能粒子去轰击,测定没有通过此板的粒子数。这些高能粒子几乎无阻碍地通过原子周围的电子云,只有在它们碰上质量集中的原子核时才会被阻止或被偏转。假设此材料有1毫米厚,由于原子核如此之小,以致此薄片中一个核恰好位于另一个核背后的机会极小。所以不妨假说原子核在高能粒子的通道上没有重叠。

高能粒子流中任一粒子在通过材料时能打在核上的机会正好等于其中所有原子核的剖面总面积除以材料总面积。设这块材料薄片的面积为A,材料总原子数为N(每个原子有一个核),再设粒子束中射到薄片的粒子数为n_1,从薄片另一边射出的粒子数为n_2,这样,没有通过薄片粒子的比数为$\frac{n_1-n_2}{n_1}$,它正好等于被原子核覆盖面积的比数$\frac{N\sigma}{A}$。于是从等式

$$\pi r^2=\sigma=\frac{A}{N}\cdot\frac{n_1-n_2}{n_1}$$

就能获得核的半径。由实验得到原子核的半径大约为10^{-15}米的1～6倍。10^{-15}米这个长度单位称为费米。

目前物理学中所涉及的最小长度为10^{-20}米,这是弱电统一的特征尺度。普朗克长度约为10^{-35}米,人们认为这是最小长度,比它更小的范围长度概念可能已经不存在了。

1.3.3 长度单位

人们希望用某些自然长度作为长度单位,比如说取地球半径的某个分数倍。出于这种考虑,米被定义为地球半径的$\frac{\pi}{2}\times10^{-7}$倍。但是这种方法定出的长度单位既不方便,也不准确。1960年以前,国际上约定用铂铱米尺作为1米的定义。1960年第十一届国际计量大会上改用光的波长作为长度标准。1983年10月第十七届国际计量大会上确定用光速值来定义长度标准。在会上,米被定义为:"米是光在真空中在1/299792458秒时间间隔内所传播的路程长度"。按此定义,真空中光速是一个常数:

$$\begin{aligned}c&=299792458(\text{米}/\text{秒})\\&\approx3.00\times10^8(\text{米}/\text{秒})\end{aligned}$$

1.4 时间、距离测量中的局限

近代物理理论指出[①]：

(1)长度测量和时间测量的结果有赖于观察者。物体的长度和时间间隔将随着参照系的不同而有不同的结果，两个作相互运动的观察者在测量同一个事物时，将会有不同的长度和时间间隔。这个问题将在相对论一节中讨论。

(2)长度测量和时间测量受自然规律的支配，使其精度受到限制。完全精密的长度测量或时间测量是为自然规律所不允许的。在测量一个物体的位置时，其误差至少有

$$\Delta x = h/\Delta p$$

那样大。其中 h 为普朗克常数，而 Δp 是我们测量物体位置时对其动量了解的误差(动量的不确定度)。这种位置测量的不确定性与物质的波动性有关，称为位置、动量的不确定关系。

类似地，测量时间间隔时，其误差至少有

$$\Delta t = h/\Delta E$$

那样大。其中 ΔE 是测量过程的时间时，对其能量了解的误差(能量的不确定度)。这种时间测量的不确定性也与物质的波动性有关，称为时间、能量的不确定关系。

习 题 一

1-1 设宇宙半径为 10^{26} 米。假定一个现处于宇宙边缘的恒星自宇宙开始之时起就以 $0.6c=1.8\times10^{8}$ 米/秒的恒定速度(c 为真空中的光速)从宇宙中心向外运动，求宇宙的寿命。

1-2 试估计一个以光速行进的讯号通过一个质子直径的距离所需要的时间。质子直径取为 2×10^{-15} 米。(在基本粒子和核物理中，这个时间是一个方便的参考时间。)

1-3 用作长度标准的光波波长，可以测到高于 10^{-9} 的准确度。如果我们不用波长而用铁棒的长度作为标准，问温度变化多大，就能使长度变化 10^{-9}？已知温度变化 1℃，可使铁棒长度变化 10^{-5}。

1-4 一恒星对地球绕太阳公转轨道两端张角的一半为该恒星的视差。天狼星的视差是 $0.37''$(弧秒)。求天狼星有多远？用米和秒差距表示。1 秒差距就是恒星的视差为 $1''$ 时恒星的距离，1 秒差距 $=3.084\times10^{16}$ 米。

1-5 已知月球轨道半径是 3.8×10^{8} 米，测得月球对地球的张角为 9.3×10^{-3} 弧度。求月球半径。

---

① 根据竞赛大纲要求，我们将在近代物理部分作出简要讨论。

第二章　运动学

2.1　参照系和坐标系

牛顿力学研究的是物体的机械运动，即物体的位置随时间的变化。机械运动是相对运动，即一物体相对于预先选定的另一物体的运动。该预先选定的物体及其延拓空间被称为参照系。

质点是没有大小的物体，它是被简化了的模型。只有当物体运动的尺度远大于物体本身的线度时，或者在不考虑物体的转动和内部运动时，才可以把此物体看成是一个只有质量没有大小的几何点。此外，引入质点模型还为研究质量连续分布的物体的运动提供了一种处理方法。刚体、流体、弹性体等连续体的变化或运动的研究，可以把物体分割成无限多个质点，再利用高等数学进行处理。

从质点开始研究物体的运动简单易行。在牛顿力学中，质点所在的空间，可以近似乎欧几里德平直几何空间。在解析几何中，点的位置由其坐标值确定。在认定我们周围的空间是欧几里德空间的前提下，质点的位置就可以用这种坐标方法给定，因此，首先应给出坐标系。应该强调指出，数学上坐标系的选取是完全任意的，而物理上坐标系不能脱离参照物。坐标系是为定量描述物体运动的需要而引入的，有时又称参照坐标系。

2.2　位矢、位移、速度和加速度

2.2.1　位矢

质点相对参照系的位置可以在坐标系中定量描述。一个质点在坐标系中的位置可以用一个起于坐标原点 o，终于质点所在位置 P 的位置矢量，简称位矢，记为$\boldsymbol{oP}$或$\boldsymbol{r}$，如图 2-1。质点的运动表达为时间的函数表达式：

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \tag{2.1}$$

称为运动方程或运动解。因为知道了运动方程等于知道了此质点运动的一切情况。

在直角坐标下，可以把运动方程(2.1)写成三个分量方程：

$$x = x(t),\qquad y = y(t),\qquad z = z(t) \tag{2.2}$$

如果位矢的长度用 r 表示，位矢的方向用方向余弦 $\cos\alpha$、$\cos\beta$、$\cos\gamma$ 表示，直角坐标下的三个分量可以写为：

$$x = r\cos\alpha,\qquad y = r\cos\beta,\qquad z = r\cos\gamma \tag{2.3}$$

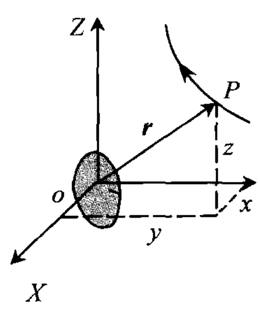

图 2-1

其中角度 α、β、γ 为矢量 $\boldsymbol{r}$ 与 X、Y、Z 轴的夹角，且满足：

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \tag{2.4}$$

约束方程(2.4)说明表示位矢方位的三个参量 α、β、γ 中只有两个是独立的。加上位矢长度的参量 r,一个质点在三维空间中的位置仍需用三个独立参量表示。

在直角坐标系中,设 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为沿 X、Y、Z 轴方向的单位矢量,则位矢可表示为:

$$\boldsymbol{r} = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \tag{2.5}$$

这里应该指出:

(1)一个质点的位矢与坐标原点的选择有关。不同的参照系或同一参照系中不同的坐标系描述同一个质点的位置有不同的位置矢量。因此,位矢是一个具有相对性的物理量。

(2)对于运动方程中所含的时间,也有时间原点的选取问题。时间原点选取不同,运动方程形式也不同。有鉴于此,参照系的概念应作扩充;除了给定放置在某参照物体上(或延拓部分空间)的坐标系作为测量空间的标准之外,还应给定一只钟,作为测量时间的标准。

随着时间 t 的变化,质点沿位置矢量端点(即质点所在位置)在空间画出的曲线称为质点运动的轨迹。比如喷气式飞机在飞行时,其尾部泄出的白烟在空中构成形状优美的曲线反映了飞机飞行的轨迹。轨迹曲线的方程称为轨道方程。轨道方程只描述质点所经历的路径,而不能反映质点何时在何处。

2.2.2 位移

质点的运动用质点位置的变化描述。设 t_1 时刻质点位置在$\boldsymbol{r}_1$,经过时间 Δt,即 $t_2=t_1+\Delta t$ 时刻运动到$\boldsymbol{r}_2$,则位矢改变量 $\Delta\boldsymbol{r}$为:

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = (x_2 - x_1)\boldsymbol{i} + (y_2 - y_1)\boldsymbol{j} + (z_2 - z_1)\boldsymbol{k} = \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k} \tag{2.6}$$

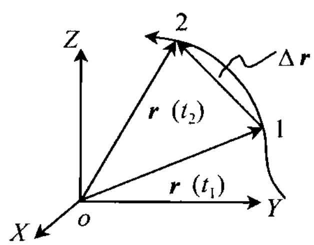

图 2-2

称为 t_1 到 t_2 时间内质点的位移,如图 2-2。位移除了是一个矢量之外,还有以下性质:

(1)位移不同于位矢。位移与坐标原点的选取无关。

(2)位移不同于路程。t_1 到 t_2 时间内质点所经历的路程是由位置 1 到 2 的曲线的实际长度,是一个标量。位移是由始点 1 到终点 2 的有向线段,是一个矢量。而且,位移的大小通常也不等于路程,只有当 $\Delta t=t_2-t_1\to 0$ 时,两者大小相等。

(3)位移不反映初位置到终位置中间的细节,也不反映初位置或终位置本身,仅反映初末位置的改变。

2.2.3 速度和加速度

速度这个概念对于博学多才的古希腊人仍然被认为是十分奥妙和难以捉摸的。原因之一是因为精通几何学和代数学的古希腊人还没有数学手段(微积分还未产生)去解决物理学上的这个基本问题。同时,还由于某些人的推波助澜,使当时人们思想更加混乱。以对某一时刻速度的推理为例,古希腊哲学家芝诺(Zeno)提出了一大堆佯谬。举一例说明他思考运动时存在明显困难的论点。请听论点:"阿齐尔斯(Achilles)①比乌龟跑得快 10 倍,但他却永远追不上乌龟。因为,假定他们开始赛跑时,乌龟在阿齐尔斯前面 100 米,那么当阿齐尔斯跑了 100 米

① 阿齐尔斯是跑得飞快的古希腊神话英雄。