

大学物理

主编：邱 雄 吴敬标

福建教育出版社



大学物理

(上册)

邱 雄 主编
吴敬标

福建教育出版社

编者的话

“大学物理”课程是理工科专业学生的一门必修的公共基础课。在素质教育的新形势下,面对新世纪对创新人才的要求,“大学物理”课程的教学改革跟其他课程一样面临着机遇和挑战。而课程教学改革的核心是课程内容的改革。为此,在1998年学校立项的“面向新世纪大学物理课程深化改革”的教改项目中,我们将之作为重点,组织教研室中的几位志同道合的骨干教师,着手进行教材的改编修订工作,对教材的结构、体系、内容等方面,多次讨论,反复论证。教材修订稿在本校98、99、2000级部分班级试用,在征求使用的师生意见的基础上付印。

本次教材的修订改编我们努力把握的原则是:以《大学物理课程基本要求》为总则,以创新教育为己任,精讲经典,加强近代,面对学校的实际,努力做到好教好学。我们同时力求在内容体系的先进性、深度和广度的适用性、例题习题的针对性等方面形成自己的特色。总而言之,我们希望新教材能够为培养新世纪的高级技术人材贡献一份力量。

修订后的教材分成上下两册。上册由邱雄任主编,下册由吴敬标任主编。参加编写的教师有:郑明学(第四章)、戴福灶(第三、十二章)、李培官(第六、十一章)、邱雄(第一、二、八、十章和绪论)、吴敬标(第五、七、九章)。

新教材的编写过程参考了许多书籍和兄弟院校的教材,在出版过程还获得福州大学教务处教材基金的资助,在此一并表示真诚的谢意。

由于水平所限,加上时间紧,书中的错误和不足在所难免,希望使用的师生与读者批评指正,以期再版时作进一步的修订。

编 者

2001年5月于福州

目 录

绪论	(1)
第一章 运动的经典描述	(6)
§ 1.1 参照系和坐标系 质点和刚体	(6)
§ 1.2 质点运动的描述	(8)
§ 1.3 刚体定轴转动的描述	(21)
习 题	(28)
第二章 狭义相对论时空观	(31)
§ 2.1 力学相对性原理和伽利略变换	(31)
§ 2.2 狭义相对论的基本原理和洛仑兹变换	(36)
§ 2.3 狭义相对论运动学效应	(44)
习 题	(53)
第三章 动量 能量 角动量	(56)
§ 3.1 动量 动量守恒定律	(56)
§ 3.2 能量 能量守恒定律	(77)
§ 3.3 角动量 角动量守恒定律	(88)
习 题	(99)
第四章 振动和波	(103)
§ 4.1 简谐振动	(103)
§ 4.2 简谐振动的合成	(121)
§ 4.3 阻尼振动 受迫振动 共振	(128)
§ 4.4 波的产生与传播	(133)
§ 4.5 波的叠加原理 波的干涉 驻波	(145)
§ 4.6 非线性波简介	(152)
习 题	(154)
第五章 广义相对论与现代宇宙学简介	(159)
§ 5.1 广义相对论简介	(159)
§ 5.2 宇宙及其起源与演化	(164)
习 题	(167)

第六章 电磁相互作用	(168)
§ 6.1 静电场的描述	(169)
§ 6.2 静电场的基本规律	(174)
§ 6.3 静电场与物质的相互作用	(185)
§ 6.4 稳恒电流的磁场	(197)
§ 6.5 磁场对运动电荷及电流的作用	(211)
§ 6.6 电磁场	(220)
习 题	(234)
第七章 电磁波基础	(245)
§ 7.1 电磁振荡	(245)
§ 7.2 电磁波的辐射和传播	(248)
§ 7.3 电磁波的能量	(254)
习 题	(256)

绪 论

一、物质世界

大千世界,无限广阔,多姿多彩.我们把不依赖于人的意识而独立存在的客观实在称为物质.现代物理学认为,仪态万千、丰富多彩的物质世界以两种基本形式存在着:实物和场.

大至日月星辰、小到原子电子,这些都是实物物质.实物具有静止质量,占有一定空间大小,是以空间间隔形式存在的物质形态.人类目前已经认识的空间尺度大至 10^{27} 米(已观测的宇宙范围),小到 10^{-15} 米(电子经典半径).按照空间尺度来划分,实物物质可以划分为宏观和微观两大类.宏观实物的尺度下限相当于有机化合物中的大分子的尺寸,即 10^{-7} 米以上.在普通显微镜下可以看见.而微观实物的尺寸则在 10^{-7} 米以下,包括原子、中子、质子和电子等.宏观物质与微观物质不仅在尺度大小上存在差异,它们的基本性质以及所遵从的规律也不同.通常,宏观物质显示粒子性,服从因果律,其运动规律可以用牛顿定律(或者在更普遍的范围用相对论力学)来描述;而微观物质显示波粒二象性,服从统计规律,其运动规律要用量子力学来描述.还要指出,宏观物质是由大量的微观物质聚集而成的.大量的微观粒子在一定温度、压力等外界条件下聚集而成的稳定结构状态叫做物质的凝聚态,简称物态.像固态、液态、气态、等离子态等等.在一定条件下,微观物质的各种聚集状态可以相互转化.

场没有确定的空间范围,是以弥漫连续形式存在着的物质形态.与实物存在形式的多样性一样,场的存在形式也是多样的,如电磁场、引力场、胶子场等.场也同样具有质量、动量、能量,同样遵从能量守恒、动量守恒等自然界物质运动的普遍规律.场与实物的最主要的区别是实物具有不可入性,一种实物所占据的空间不能同时为其他实物所占据;而场具有叠加性,几个场可以同时存在于同一空间内而且互不干扰.另外,实物的质量密度较大而场的质量密度很小;实物的运动速度不能达到光速而电磁场却以光速传播;实物受力可以产生加速度而场却不能被加速等等.

现代物理研究表明,引起场与实物的差别的根本原因是组成它们的基本粒子具有不同的特性:组成场的规范粒子(称场量子)是玻色子而组成实物的粒子是费米子.

必须指出,这里所叙述的物质存在的基本形式是就人类迄今为止的认识水平而言的,是一个相对的概念.另一方面,两类物质存在的基本形态实物和场,是相互联系的.任何实物物质周围都存在相应的场,场是传递实物间相互作用的媒介.正是实物个体和其周围弥漫的场,构成了物质的间断性和连续性的统一.同时,场和实物可以相互转化;实物

粒子和场量子都具有波粒二象性等等。

谈到物质,就不能不谈到它们的另一固有属性——运动性。各式各样的物质在自然界中不断地运动变化着。运动是绝对的。天体的演化、日月的运行、江河的奔流、生物的代谢,这些都表明绝对静止的物质是不存在的。物质运动的形式是多种多样的:有物理的、化学的、生物的、社会的运动;有表现为突变的或渐变的运动;有表现为无序的或有序的运动,等等。各种运动形式之间是相互联系,可以相互转化的。而物质的运动总是在时间和空间中进行的,因此时间和空间也是物质存在的基本形式,是物质的固有属性。

多种多样的物质运动形式,它们既遵从共同的普遍规律,又各自有其独特的规律。对各种不同的物质运动形式的研究,形成了自然科学的各个分科。

二、物理学及其发展

物理学是探讨物质基本结构和运动基本规律的学科。物理运动包括机械运动、热运动、电磁运动等,是物质最基本、最简单、最普遍的运动形式,渗透于物质的其他运动形式之中。物理学一词的英文 *physica* 来源于希腊词 *physis*。这个词的原义是活的东西的生长或发展。古希腊人把所有对自然界的观察和思考,都笼统地包含在一门学问里,那就是自然哲学。所以牛顿把当时的物理学叫做自然哲学,他的第一本关于物理学的著作就叫做《自然哲学的数学原理》。当人们发现自然界的现象是按照一定模式进行的以后, *physics* 这个词就转化成表示生长和发展的规律之意。科学分化为天文学、物理学、化学、生物学、地质学等,只是最近几百年的事。物理学最直接地关心自然界的最基本规律,我国的先哲们将英文 *physics* 翻译为汉语“物理学”,显示了东方文化的博大精深。它既简单又明了地表明了这一门学科的内涵。它可以理解为物体运动变化的道理,或者物质世界生长发展的根本原理。

物理学的发展,按其时间进程来分,通常可分为三大时期:

第一时期(公元 1600 年以前):

史称古代物理学时期。这一时期是科学的萌芽期,也可以叫做经验科学和自然哲学时期。这时期内我国和古希腊形成两个东西交相辉映的文化中心。经验科学已从生产劳动中逐渐分化出来。这时的主要方法是直觉的观察(包括现象的描述与经验的初步总结)与哲学的猜测性思辨。与生产活动及人类的直接感观有关的天文、力、热、声、光等知识首先得到较多发展。必须特别指出,在这一时期,除希腊的静力学外,中国在以上几方面都处在领先的地位。大约在公元前 11 世纪,中国就产生了把水、火、木、金、土五种具体物质形态看成是世界物质本原的思想,差不多与古希腊同时。春秋战国时期的墨翟创立的墨家学派就提出了类似古希腊的原子论概念。在东汉时期王充在《论衡》中运用当时自然科学成就,创立了以气为自然原始物质基础的元气论,它比古希腊的“原子论”蕴含着更多的论证法内容,更深刻地揭露和描绘了自然界的客观变化。近代西方大科学家玻尔把他年轻时读过的中国的《道德经》称为“中国的智慧”。当他 1947 年被授于丹麦荣誉勋章时,要设计一枚盾形纹饰以象征他所建立的原子与量子力学的微观理论时,他欣然选择了举世闻名的中华“太极图”作为勋章图案。

第二时期(17 世纪至 19 世纪):

是经典物理学时期。这时期内建立了系统的观察实验与严密的数学推理相结合的方法,形成了比较完整的经典物理学体系。在 16 世纪,物理学开始从或多或少不太定型的一堆科学知识变成一门范围明确的学科。对创立这门学科起最大作用的人当数伽利略。他最重要的科学工作是研究物体的运动。这是希腊哲学家亚里士多德曾极为关注的问题,同时也曾以相当多的谬误影响了很长的一段历史时期。伽利略的实验工作和理论推理使得他远远超过亚里士多德,为后来的物理学发展奠定了坚实的基础。他对当时哲学观点的挑战和他的许多新发现,为其后近三个世纪的物理学研究指明了方向。

17 世纪,牛顿在伽利略、开普勒工作的基础上,建立了完整的经典力学理论,这是现代意义下的物理学的开端。其后的两百多年,在大量实验的基础上,卡诺、焦耳等人建立了宏观的热力学理论;克劳修斯、玻尔兹曼等建立了气体分子运动理论;库仑、安培、麦克斯韦等建立了电磁学理论,等等。至此,经典物理学理论体系的大厦巍然耸立。

第三时期(20 世纪至今):

人称近代物理学时期。这是一个革命性的时期。19 世纪末,迈克尔逊——莫雷干涉实验、黑体辐射实验、光电效应实验等一系列实验结果,以及 X 射线、放射性和电子的发现等,都向经典物理学体系发出巨大的冲击波,使得经典物理学大厦的基础产生了动摇。在这些实验的基础上,20 世纪初,爱因斯坦独自创立了相对论;普朗克、爱因斯坦、玻尔、德布罗意、海森堡、薛定谔、玻恩等多人经过努力,创立了量子论和量子力学。他们一起奠定了近代物理学的理论基础。相对论与量子力学的建立,一方面导致了探讨物质结构和相互作用等一大批新分支学科的出现,像原子分子物理、原子核物理、凝聚态物理、高能物理、激光物理、电子物理、等离子物理等等;另一方面,物理学向其他学科渗透,从物理学和其他学科的杂交中生长出了诸如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等众多交叉学科。在这一时期,在实验手段、数学工具和逻辑推理方法等方面也较过去大大地前进了一步。

物理学的发展,就其理论框架结构上来看,大体可以分为以牛顿力学、麦克斯韦电磁学、热力学为支柱的经典物理学和以相对论、量子力学为支柱的近代物理学两部分。近代物理学是建立在经典物理学的基础之上,比经典物理学更普遍、更高级的理论,是现代科学技术的基础。但对宏观领域的绝大多数研究对象而言,经典物理学不仅仍然适用,而且所得结果的精确程度与近代物理相差无几,处理方法又简捷方便。所以,经典物理学并未丧失其独立存在的价值,同时还在不断地扩大其应用领域,取得新的进展。

牛顿说:“自然喜欢简洁”。爱因斯坦说:“物理上真实的东西,一定是逻辑上简洁的东西”。从物理学的发展可以看到,许多伟大的物理学家都以简洁、和谐、对称、统一作为他们对物理理论探索的指导原则。从牛顿以来,物理学发展中一条鲜明的主线,就是执着地追求自然规律的统一性。在古希腊,亚里士多德认为“天上”的运动和地面的运动完全不同。牛顿打破了延续千年之久的传统观念,把天地间的物质运动纳入统一的经典力学框架,成功地完成了物理学史上的第一次统一。电、磁和光曾被认为是毫无关联的现象,麦克斯韦的电磁场理论把它们统一到一起。爱因斯坦的相对论实现了高速运动和低速运动的统

一、电磁相互作用和弱相互作用统一的理论为寻求基本粒子世界的统一开创了令人鼓舞的前景。人们把物理理论发展的模式归结为逐步趋向统一的理论模式。为此,物理学还在不断深入、不断更新、不断发展。

三、大学物理的学习

以物理学的基础知识为内容的“大学物理”课程,它所包括的经典物理、近代物理及它们在科学技术上应用的初步知识等都是一个高级工程技术人员所必备的。因此,“大学物理”课程是各理工科专业学生的一门重要的必修基础课。

“大学物理”课程的作用,一方面在于为学生较系统地打好必要的物理基础;另一方面使学生初步学习科学的思想方法和研究问题的方法。通过课程的学习,有助于学生开拓思路、激发探求和创新的精神,增强适应能力,提高科学素质。学好本课程,不仅对学生在校的学习十分重要,而且对学生毕业后的工作和进一步学习新理论、新技术,不断更新知识,都将发生深远的影响。

由于“大学物理”课程是在低年级开设的,因而它在使学生树立正确的学习态度、掌握科学的学习方法、培养独立获取知识的能力和帮助学生尽快适应大学阶段的学习生活也将起着重要的作用。另外,通过学习物理知识、物理思想和物理学的研究方法,还将有利于培养学生建立辩证唯物主义世界观。

那么,怎样才能学好“大学物理”课程呢?

下面我们摘录北京大学赵凯华教授在《新概念物理教程——力学》一书中的一段话奉献给读者,同时也作为本绪论的结束语。

“著名理论物理学家、诺贝尔奖金获得者理查得·费曼说:‘科学是一种方法,它教导人们:一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的),如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物,做出判断,如何区别真伪和表面现象’。学习物理学,不能仅仅掌握一些知识、定律和公式,更不要把自己的注意力只集中在解题上,而应在学习过程中努力使自己逐渐对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像,以及其历史、现状和前沿等方面,从整体上有个全面的了解。”

“学好物理学,关键是勤于思考,悟物穷理。”

“勤于思考,就要对新的概念、定义、公式中的符号和公式本身的含义,用自己的语言陈述出来。对于定理的证明、公式的推导,最好在了解了基本思路之后,自己背着书本把它们演算出来。这样你才能对它们成立的条件、关键的步骤、推演的技巧等有深刻的理解。”

“悟物穷理,就要多向自己提问:哪些是事实?哪些是推论?推论是怎样得来的?我为什么相信?……问题可以正面提,也可以反向提。譬如,已知物体所受的力,可以求它的运动;知道了它的运动,反过来问它受了什么样的力。”

“勤于思考,悟物穷理,就要对问题建立自己的物理图像。学习物理,不做习题是不行的,但做习题不在于多,而在于精。习题做完了,不要对一下答案或缴给老师去批改就了

事。自己从物理上应该想一想,答案的数量级是否对头?所反映的物理过程是否合理?能否从别的角度判断自己的答案是否正确?我们应该力争能够作到,习题要么做不出来,做出来就有充分的理由相信它是对的,即使它和书上给的答案不一样。老师说你错了,你在未被说服之前敢于和老师争辩。好的老师最欣赏的是能指出自己错误的学生。如果最后证明是你错了,也错个明白。”

“正是:书山有路勤为径,学海无涯悟作舟。”

第一章 运动的经典描述

世界是物质的世界,物质是在永恒地运动着.物理学研究对象中,物质运动最基本最普遍的形式与规律是其主要内容.在这些运动形式中,最简单而又最基本的运动是物体位置的变化.这种变化可以是物体之间相对位置的变化,也可以是物体本身中的某些部分相对其他部分位置的变化.例如,宇宙空间中天体的运行、地球上各种交通工具的运动等等.这种位置变化叫做机械运动.

力学是研究物体机械运动所遵循的运动规律的一门科学.根据研究对象的不同可将力学分为更细的分支学科.经典力学是研究在常速(速度比光速 $3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 小很多)情况下宏观物体的机械运动所遵循的规律;相对论力学则是研究在高速(速度与光速可比拟)情况下宏观物体的机械运动所遵循的规律.根据描述物体运动的侧重点的不同,还可以将力学分为运动学、动力学和静力学等等.运动学只研究物体运动的描述,而不涉及物体为什么会运动以及改变物体运动的原因;动力学则是研究物体间的相互作用与物体运动状态变化之间的内在联系;静力学却主要研究物体在相互作用下的平衡问题.本章我们将就运动学的基本内容进行阐述.

§ 1.1 参照系和坐标系 质点和刚体

一、运动描述的相对性

自然界中的任何物体都在不停地运动着,因此运动是绝对的.在这个运动的世界里,描述某一物体的运动,也就只能相对于其他物体而言.例如,当人们观察行驶着的汽车的位置变化,通常以某一物体(相对地面静止的物体,如大树)作为标准,并把它看成是不动的.同样地,平常人们所观察到的“日出”、“日落”现象也总是以我们认为不动的海岸或山脉作为标准来判别的.

所以,在观察一个物体的位置以及它的位置变化时,总要选取其他物体来作标准.然而,选取不同的标准物,对物体运动情况的描述是不同的.如,在行进中的火车车厢内的观察者看到车厢里茶几上的茶杯是静止的而看到车厢外的电线杆却是运动着的;同一时刻,站在地面上的观察者却看到电线杆是静止的,而车厢里的茶杯却跟车厢一同运动.这是因为,车厢内的观察者和地面上的观察者所选取的标准物不同(前者是将车厢作为不动的标

准物,后者则是将地面作为不动的标准物)。

可见,相对于不同的标准物(上述的车厢或地面),对物体(上述的茶杯或电线杆)的描述情况是不同的,这就是运动描述的相对性。

二、参照系和坐标系

1. 参照系

要描述某个物体的位置以及位置的变化,必须选定另一些被认为是不动的物体来作为参考.为描述物体的运动而被选作参考的物体叫做参照物或参照系.因此,对物体运动情况的描述是相对于那些被选取作为参照系的物体作出的.事实上,在日常生活中我们常常用上了参照系的概念,并且大部分都是以地球作为参照系的.像我们说的:“A 在走动”、“马停下来”等,都是以地球作为参照系的.但是如果是在太阳上来描述 A 和马的运动情况,则会有完全不同的描述结论的.这就是说,由于选定的参照系不同,对同一物体的运动的描述是不同的。

特别要指出的是,参照系的选择是任意的,可以根据对象的不同或问题的需要来选择不同的参照系.一般说来,在研究运动学问题时,参照系的选择主要是考虑所选择的参照系在问题的描述方面是否方便;而在解决动力学问题时,参照系的选择就要慎重了,因为一些动力学规律(如牛顿定律)只对某类参照系(惯性系)才成立.通常在没有特别指明的情况下,我们总是选地球为参照系的.这是因为我们所研究的物体绝大部分是在地球上运动的,而如果研究的是太阳系中的行星运动,则通常选太阳作为参照系。

2. 坐标系

参照系只能定性地描述物体的运动,即物体是否运动,却无法定量地确定物体的位置和运动的快慢等.若要对物体的运动情况进行定量地描述,就要在参照系上建立坐标系.坐标系是在参照系上选定一个点作为原点,然后以其作为基点规定若干用以确定物体位置坐标的选取方法.最常用的坐标系是直角坐标系,有时也选用极坐标系、球坐标系、柱坐标系等等.至于选用什么样的坐标系,这是以研究问题的方便为准则的。

需要注意的是,同一参照系两个不同的坐标系,它们对同一物体的运动性质的描述是一样的,而仅仅是描述的参数变了.另外,坐标系是固定在参照系上的,物体相对于坐标系的运动就是相对于参照系的运动.坐标系实质上是由实物构成的参照系的数学抽象.一旦建立了坐标系,实际上就意味着参照系也已选定。

三、质点和刚体

在物理学中,为了突出被研究对象的主要性质,常常暂不考虑其他一些次要的因素,而引入了理想化的模型来代替实际的物体.理想化的模型在现实的世界里是不存在的,但却起到了突出重点简化问题的作用.质点和刚体都是理想化的模型。

1. 质点

任何物体都有一定的大小和形状.一般说来,物体在运动时,它的各部分的位置变化是不相同的.例如在平直公路上行驶的汽车,就其整体来说是沿公路作平行移动,但对于

车轮来说,其整体除了沿公路作平行移动外,还在作转动;从枪口射出的子弹,一边向前飞行一边却在绕自身的轴线转动.这些例子说明,物体运动的真实情况是十分复杂的.

但是,当我们只研究某一段时间内汽车沿公路作平行移动时所通过的路程是多少,就可以不去考虑车轮的转动.这时可以认为汽车上各点所通过的路程是相同的,求出汽车上某一点所通过的路程就解决了所提出的问题.即此时的汽车可以忽略其大小和形状,而以一个点来代替它.如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用或作用很小时,就可以将物体抽象看成只有质量而没有体积的几何点,这样的点就称为质点.所以,我们说质点只是经过抽象出来的理想化的模型.

必须特别指出,把物体当作质点是有条件的、相对的,而不是任意的、绝对的.一个物体能否被看成质点不在于这个物体的大与小,也不在于物体的轻与重,唯一的依据是看物体的大小和形状在所讨论的问题中起不起作用.例如,当我们研究一个乒乓球是如何沿一个斜面滚动时,尽管乒乓球很小也很轻,但球上各点的运动情况是大不相同的,就不能将其看成是质点.而当研究地球绕太阳公转时,由于地球与太阳的平均距离(约为 1.5×10^8 千米)比地球的半径(约为 6370 千米)大得多,地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的,所以在研究地球公转时,就可以把地球当作质点;但如果是研究地球本身的自转时,地球上各点的运动情况就各不相同,此时的地球也就不能当作质点了.

此外,当我们研究一些比较复杂的物体(如后面的刚体)运动时,虽然不能把整个物体看成质点,但在处理方法上可把复杂物体看成由许多质点组成,在解决质点运动问题的基础上来研究这些复杂物体的运动.

2. 刚体

物体有大小和形状,物体在运动过程中严格地说来其大小和形状总是会发生改变的.如果物体在运动过程中,其大小和形状的改变不很显著,或者对于我们所研究的问题可以不考虑其大小和形状的改变,这样的物体就称为刚体.刚体,通俗地说就是在运动过程中大小和形状不会变化的物体.可见,刚体也是一个理想化的模型.一个物体能否看作刚体也要视具体情况而定.研究地球自转时,可以把地球看成刚体;而研究地壳中地震波的传播时,就不能把地球看作刚体了.

刚体可以看成是由无数的质点组成的.因此,刚体的另一个定义是:在运动过程中物体内部任何两个质点间的距离都保持不变的物体.或者说,刚体是一个内部各质点的相对位置保持不变的质点系.

§ 1.2 质点运动的描述

一、长度标准和时间标准

研究物体位置随时间变化,离不开长度和时间的量度.要量度长度和时间,首先要选择长度和时间的标准.这里简单介绍长度和时间的标准及单位.

1. 长度标准和单位

1889 年第一届国际计量大会通过:将保存在法国巴黎附近的国际计量局中的一根铂铱合金棒在 0°C 时两条横刻线之间的距离叫做 1 米.各国都有这个被称为国际米原器的精确复制品,而其它各种量具的刻度就是以这种国际米原器的精确复制品为根据的.

长度标准以实物作为基准,就无法保证其不随时间发生变化,也很难防止战争、地震等灾害的毁坏.物理学家早就发现任何大块物质都不可能保持本身的物理性质永久不变,而单个原子的性质却可以合理地假定为基本上不随时间而改变.随着科学技术的发展,1960 年第十一届国际计量大会决定,以氪的一种纯同位素——氪 86 发出的橙红色光的波长作为长度的标准,规定 1 米等于该波长的 1,650,763.73 倍,从而实现了长度计量的自然基准.

随着激光技术的发展和爱因斯坦的相对论观点不断为实验事实所验证,人们发现通过光速来定义米的精度要远优于氪 86.于是,1983 年第十七届国际计量大会通过:米是光在真空中 $1/299792458$ 秒的时间间隔内运行路程的长度.该届大会同时规定了真空中光速值 $c = 299792458$ 米/秒,并规定了复现米定义的三种方法.

本书主要采用国际单位制(SI 制).在国际单位制中,长度的单位是“米(m)”.除了“米”外,还可以用“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:

$$1 \text{ 千米(km)} = 10^3 \text{ 米}$$

$$1 \text{ 厘米(cm)} = 10^{-2} \text{ 米}$$

$$1 \text{ 毫米(mm)} = 10^{-3} \text{ 米}$$

$$1 \text{ 微米}(\mu\text{m}) = 10^{-6} \text{ 米}$$

$$1 \text{ 纳米(nm)} = 10^{-9} \text{ 米}$$

另外,在天文学中计量天体之间的距离时,还常用“天文单位”、“光年”等作为长度单位.

$$1 \text{ 天文单位} \approx 1.496 \times 10^{11} \text{ 米}$$

$$1 \text{ 光年} \approx 9.46 \times 10^{15} \text{ 米}$$

2. 时间标准和单位

自然界存在着许多周期性的现象,时间标准应以这种周期性现象为基础.过去的时间标准是在天文观测的基础上规定的.人们把太阳每连续两次经过观察者子午圈相隔的时间称为 1 个太阳日,也就是通常所说的一昼夜.因为一年之中,太阳日的长短略有差异,我们取一年中所有太阳日的平均值作为时间的标准单位,叫做 1 个平均太阳日,或简称 1 日.1 日分为 24 小时,1 小时分为 60 分,1 分又分为 60 秒.这样一个平均太阳日就有 $24 \times 60 \times 60 = 86,400$ 秒.

以天文观测为基础的时间标准,确定它非常费事,而且用这种方法所确定的时间的准确度也不能满足现代科学技术发展的要求.随着人们对微观世界认识的日益深入和实验水平的日益提高,使得把时间标准和某些分子或原子的固有性质联系起来成为可能.在长期研究的基础上,1967 年第十三届国际计量大会决定以铯的一种同位素——铯 133 所辐

射的某一种电磁波的周期作为时间的新标准,并规定 1 秒等于该周期的 9,192,631,770 倍。

在国际单位制(SI制)中,时间的单位是“秒(s)”。除了“秒”外,还可以用其他某些时间单位,常用的其他某些时间单位的符号及其与“秒”的关系如下:

$$1 \text{ 分}(\text{min}) = 60 \text{ 秒}$$

$$1 \text{ 毫秒}(\text{ms}) = 10^{-3} \text{ 秒}$$

$$1 \text{ 微秒}(\mu\text{s}) = 10^{-6} \text{ 秒}$$

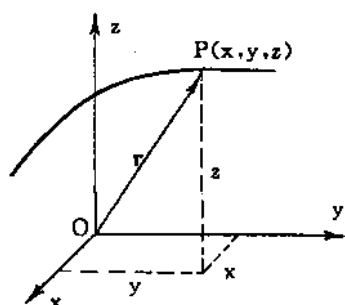
$$1 \text{ 纳秒}(\text{ns}) = 10^{-9} \text{ 秒}$$

二、位置矢量 运动方程 轨迹方程

1. 位置矢量

在运动学中,常用一个几何点代表质点。要描述质点的运动,首先要确定质点在任一时刻的位置。在选定的参照系上先建立一个坐标系,确定了坐标系后,从坐标原点到质点所在位置引出一个矢量 $\mathbf{r}$,该矢量可以表示出质点在坐标系中的位置,称为质点的位置矢量,简称位矢。

在图 1-1 中,某一时刻质点处于空间的 P 点位置上,我们在建立了坐标系后由原点 O 出发向着 P 点画出一条带有箭头的线段 $\mathbf{r}$ 。这就是该时刻质点的位置矢量。位矢 $\mathbf{r}$ 的大小 r ,表示质点到坐标原点的距离; $\mathbf{r}$ 的方向(由 O 指向 P)表示质点相对于原点的方向。可见,当坐标原点选定之后,位矢 $\mathbf{r}$ 就能指明质点相对原点的距离和方位,亦即确定了质点的空间位置。另一方面也应注意到,对于质点的一个确定位置,它的位矢的大小和方向当然与坐标原点所在的位置有关,也就是与坐标系的选择有关。



位置矢量及其投影

图 1-1

在直角坐标系中,位矢 $\mathbf{r}$ 在三个坐标轴上的投影就是质点的三个位置坐标 x, y, z 。

根据矢量的有关知识有

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1-2-1)$$

质点 P 距原点 O 的距离(即位矢 $\mathbf{r}$ 的模) r 为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-2-2)$$

位矢 $\mathbf{r}$ 的方向由三个方向余弦确定

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r}, \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-2-3)$$

α, β, γ 分别是位矢 $\mathbf{r}$ 与三个坐标轴 x, y, z 之间的夹角,且有

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1-2-4)$$

2. 运动方程 轨迹方程

(1) 运动方程

当质点运动时,其位矢 $\mathbf{r}$ 就随时间变化. 即 $\mathbf{r}$ 成为时间 t 的矢量函数. 在任一时刻 t , 有

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-2-5)$$

它描述的是质点在任一时刻 t 相对于坐标原点的距离和方位, 称之为质点的运动方程.

在直角坐标系下, 质点的运动方程又可表示为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-2-6)$$

或者用分量式表示为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-2-7)$$

也就是说三个位置坐标 x, y, z 都是时间的函数.

这里要着重指出以下两点:

① 一个运动可以分解为几个分运动, 而这些分运动迭加起来就构成合运动. 这一性质称为运动的迭加性. 质点的运动方程在坐标系中分解为分量式实际上反映了运动的迭加性. 例如, 作平抛运动的质点其运动可分解为水平匀速直线运动和竖直匀加速直线运动. 该质点的运动方程 ($\mathbf{r} = v_0 t \mathbf{i} - \frac{1}{2} g t^2 \mathbf{j}$) 在直角坐标系的分量式

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 \\ z = 0 \end{cases}$$

正好反映了质点的这一运动特性.

② 质点的运动方程描述了质点运动的全过程. 例如上述的运动方程描述了作平抛运动的质点从抛出到落地的这一段时间里其运动的全过程. 只要在这一段时间之内, 以任一具体 t 的数值代入方程即可算出该时刻质点在空间的位置.

(2) 轨迹方程

质点在空间实际所描绘的曲线(经过的路径)称为轨道, 相应的曲线方程称为轨迹方程. 将质点的运动方程消去参数 t , 就得到了质点的轨迹方程. 例如, 已知某一质点的运动方程为

$$\mathbf{r} = 5\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)\mathbf{i} + 5\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)\mathbf{j}$$

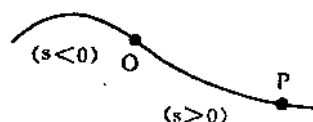
其分量式表示是: $x = 5\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right), y = 5\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right), z = 0$.

于是, 该质点的轨迹方程是:

$$x^2 + y^2 = 25, z = 0$$

这是一个圆的曲线方程. 它表明质点是在 xoy 平面内作圆周运动.

最后需要指出,质点的位置除了可以用位置矢量来表示外,我们还可以用弧坐标来表示.如图1-2所示,质点沿一已知的曲线运动时,如果我们在曲线上任意选定一个点作为原点 O ,并选择一个方向为正方向,则 t 时刻质点在曲线上的位置可用其离 O 点的带正负号的弧 s 来表示. s 为正,表示质点在原点 O 的正方向一侧; s 为负,则质点在反方向位置上.这种用弧坐标 s 来表示质点位置的方法,对于作圆周等平面曲线运动质点的位置的确定是比较方便的.



弧坐标

图1-2

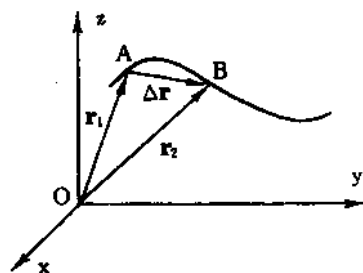
采用弧坐标,质点的位置随时间变化的规律(即运动方程)可以表示为:

$$s = s(t)$$

三、位移 路程

1. 位移

运动的质点,其位置在自身的运动轨道上连续变化着.不同的时刻,有不同的位置矢量.如图1-3所示,质点沿图中的轨迹曲线运动,曲线 AB 是其运动轨道的一部分. t 时刻质点处在 A 点,相应的位矢为 $\mathbf{r}_1$; $t + \Delta t$ 时刻质点处在 B 点,位矢为 $\mathbf{r}_2$.我们将 Δt 时间间隔内质点位矢的增量 $\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 叫做质点在 Δt 时间间隔内的位移,用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示.即



位移的定义

图1-3

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-2-8)$$

在直角坐标系下, t 时刻质点的位置矢量可表示为 $\mathbf{r}_1 = x_1\mathbf{i} + y_1\mathbf{j} + z_1\mathbf{k}$; $t + \Delta t$ 时刻的位矢为 $\mathbf{r}_2 = x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k}$.那么, Δt 时间间隔内质点的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k}$$

即

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-2-9)$$

这里, $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$,分别表示质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 在三个坐标轴的分量.

于是,直角坐标系下,位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

应注意的是,位移的大小必须写成 $|\Delta \mathbf{r}|$,而不能简写为 Δr 或 $\Delta |\mathbf{r}|$.这是因为 Δr 或 $\Delta |\mathbf{r}|$ 均是表示位矢大小的增量,即 $\Delta |\mathbf{r}| = \Delta r = r_2 - r_1$. $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 或 $\Delta |\mathbf{r}|$,它们的大小不一样,物理意义也不一样.

2. 路程

运动质点在 Δt 时间间隔内所经过的实际路径的长度称为路程.通常用 ΔS 表示.关