



高等院校物理系列教材
Textbook Series in Physics for Higher Education

大学物理

College Physics

西安通信学院物理教研室 编

清华大学出版社



高等院校物理系列教材
Textbook Series in Physics for Higher Education

大学物理

College Physics

朱 峰 主编

参编院校：西安通信学院
西安工程科技学院
西安工业学院

组 长：李振富 官亦兵

编写成员：肖胜利 郑好望 任文辉 路铁牛
房 鸿 翟学军 杨东升

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书紧扣《高等学校非物理专业物理课程教学基本要求》，是由多位长期从事大学物理教学的一线教师编写的。与此书配套的另有电子教案光盘一张，教学参考书一本。本书在编写过程中，广泛调研了非物理类本科各专业和高等职业教育各专业的教学教改情况和培养模式，适合现代教学的需要；采取压缩经典、简化近代、突出重点的方法精选和组织内容；增强经典物理中的现代观点和信息，适度介绍近代物理的成就和物理学与新技术。

本书共 13 章，涉及力学、热学、电磁学、振动和波、波动光学、狭义相对论和量子物理基础。每章包括相关著名物理学家简介、基本内容、阅读材料、本章提要 and 练习题。

本书可作为高等职业教育各专业的物理教材，也可作为高等院校非物理类专业本科少学时的物理教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/朱峰主编. —北京：清华大学出版社，2004

(高等院校物理系列教材)

ISBN 7-302-08353-3

I. 大… II. 朱… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 025061 号

出 版 者：清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机：010-62770175

地 址：北京清华大学学研大厦

邮 编：100084

客 户 服 务：010-62776969

责任编辑：朱红莲

印 装 者：北京国马印刷厂

发 行 者：新华书店总店北京发行所

开 本：185×260 印张：22.25 字数：509 千字

版 次：2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7-302-08353-3/O · 353

印 数：1~4000

定 价：28.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：(010)62770175-3103 或(010)62795704

本教材是依据国家教育部《高等学校非物理专业物理课程教学基本要求》而编写的专科物理教材,也可作为本科物理教材(少学时)。本教材配有电子教案光盘一张,辅导书一本同步配合使用,便于教学。

本教材共 13 章,涉及力学、热学、电磁学、振动和波、波动光学、狭义相对论和量子物理基础,内容深广度适当,物理概念清晰。每章包括相关著名物理学家简介、基本内容、阅读材料、本章摘要和练习题。电子教案利用 Office 办公软件——PowerPoint 为平台,分为课堂教学、例题讲解、3D 动画演示和影视资料三部分,使物理中抽象的、难以理解的内容变得生动、直观。该软件操作简单,播放流畅,易于掌握,便于教师授课和学生自学。教学参考书分为基本要求、基本内容、典型例题、习题精解、综合自我检测题五部分,题型丰富多样,内容全面新颖,便于学生更好地掌握所学知识点。

本教材在编写中力求使读者掌握物理学的基本概念和规律,建立较完整的物理思想,同时渗透人文社会科学知识,让读者活用所学知识,加强应用能力,实现知识、能力与素质协调发展。此外还有少量的选学内容以拓展知识面,选学内容标以“*”号。

全书讲授约 100 学时。

本教材绪论和第 1~3 章由肖胜利执笔,路铁牛审阅;第 4~5 章由郑好望执笔,朱峰审阅;第 6~8 章和附录由朱峰执笔,任文辉审阅;第 9~10 章由路铁牛执笔,肖胜利审阅;第 11 章由任文辉执笔,郑好望审阅;第 12 章由房鸿执笔,朱峰、路铁牛审阅;第 13 章由肖胜利执笔,翟学军审阅。

本教材由朱峰统稿。特别感谢清华大学出版社、西安通信学院、西安工程科技学院、西安工业学院和西安通信学院物理教研室全体同志对本书编写和出版给予的大力支持和帮助,编者在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不恰当之处,请读者不吝指正。

编者
2004 年 5 月



第 0 章 绪论	1
0.1 什么是物理学	1
0.2 学习物理学的意义	1
0.3 研究物理学的方法	2
0.4 物理学的最高追求	5
第 1 章 质点运动学	6
1.1 位置矢量和位移	6
1.2 速度和加速度	9
1.3 直线运动	12
1.4 平面曲线运动	13
阅读材料 1 全球定位系统和质点运动学	19
本章提要	21
练习题	22
科学家简介 伽利略	24
第 2 章 质点动力学	25
2.1 牛顿运动定律	25
2.2 动量 动量守恒定律	32
2.3 动能 动能定理	38
2.4 势能 机械能转化及守恒定律	44
阅读材料 2 火箭与宇宙速度	50
本章提要	53
练习题	55
科学家简介 牛顿	59

第3章 刚体的定轴转动	60
3.1 刚体定轴转动的运动学	60
3.2 刚体定轴转动的动力学	62
阅读材料3 行星与人造地球卫星	74
本章提要	77
练习题	79
科学家简介 开普勒	82
第4章 气体动理论	83
4.1 理想气体的压强和温度	83
4.2 能均分定理 理想气体的热力学能	88
4.3 麦克斯韦速率分布律	90
4.4 玻耳兹曼分布律	93
4.5 气体分子碰撞和平均自由程	95
阅读材料4 真空的获得	97
本章提要	100
练习题	102
科学家简介 玻耳兹曼	104
第5章 热力学基础	105
5.1 热力学第一定律及其应用	105
5.2 循环过程 卡诺循环	113
5.3 热力学第二定律	117
阅读材料5 低温的获得	119
本章提要	123
练习题	125
科学家简介 克劳修斯	127
第6章 静电场	128
6.1 库仑定律 电场强度	128
6.2 高斯定理	135
6.3 电势	141
6.4 静电场中的导体和电介质	146
6.5 电容器 电场能量	151
阅读材料6 压电效应及其逆效应	156
本章提要	158
练习题	159
科学家简介 库仑	162

第 7 章 稳恒磁场	163
7.1 磁场 磁感应强度	163
7.2 毕奥—萨伐尔定律	166
7.3 磁场的高斯定理和安培环路定理	168
7.4 磁场对运动电荷和载流导线的作用	173
7.5 介质中的磁场	180
阅读材料 7 超导电性	184
本章提要	186
练习题	186
科学家简介 安培	190
第 8 章 电磁感应 电磁场	191
8.1 电磁感应的基本定律	191
8.2 动生电动势 感生电动势	193
8.3 自感 互感 磁场的能量	196
8.4 电磁场 麦克斯韦方程组	200
阅读材料 8 电磁波	203
本章提要	206
练习题	207
科学家简介 麦克斯韦	210
第 9 章 振动学基础	211
9.1 简谐振动的定义	211
9.2 简谐振动的规律	213
9.3 简谐振动的合成	217
阅读材料 9 混沌	221
本章提要	223
练习题	223
科学家简介 惠更斯	227
第 10 章 波动学基础	228
10.1 机械波的产生及描述	228
10.2 平面简谐波	230
10.3 波的衍射和干涉	235
阅读材料 10 超声波简介	242
本章提要	244
练习题	245
科学家简介 多普勒	247

第 11 章 波动光学	248
11.1 光的本性 光源	248
11.2 光的相干性 光程和光程差	251
11.3 分波阵面干涉	254
11.4 薄膜干涉	258
11.5 光的衍射	264
11.6 光栅衍射	269
11.7 圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领	274
11.8 光的偏振现象	276
阅读材料 11 全息照相	281
本章提要	283
练习题	286
科学家简介 菲涅耳	291
第 12 章 狭义相对论	292
12.1 狭义相对论的基本原理 洛伦兹坐标变换	292
12.2 狭义相对论的时空观	295
12.3 相对论动力学	298
阅读材料 12 广义相对论	300
本章提要	301
练习题	302
科学家简介 爱因斯坦	304
第 13 章 量子物理基础	305
13.1 量子论的形成	305
13.2 物质波 不确定关系	315
13.3 波函数 薛定谔方程	319
阅读材料 13 黑洞简介	323
本章提要	325
练习题	326
科学家简介 普朗克	328
附录	329
附录一 国际单位制(SI)	329
附录二 常用物理常量	330
附录三 数学公式	331
附录四 科学家名称	333
参考答案	335



0.1 什么是物理学

物理学这一词最早引自于希腊文 *physis*, 其原意是研究自然的科学. 但随着自然科学的不断发展, 各独立的学科门类陆续形成, 如数学、物理学、力学、化学、天文学、生物学及地质学. 在现代, 物理学指的是研究物质的基本结构、相互作用和运动形态的基本规律的科学. 物理学研究目的在于认识物质运动的普遍规律和揭示物质各层次的内部结构, 以便更好地改造自然. 按其研究的物质运动形态和具体对象, 物理学所涉及的范围包括: 力学、声学、热学、分子物理学、电磁学、光学、原子和原子核物理学、粒子物理学、固体物理学和流体力学等.

物理学由实验和理论两部分构成, 经过实践检验而被证实为可靠的理论物理包括: 理论力学、热力学和统计物理学、电动力学、相对论、量子力学和量子场论. 物理学理论一般分为两大部分, 19 世纪以前的成就称为经典物理学, 19 世纪以后的成就称为近代物理学, 它的主要支柱是量子力学和相对论. 当然, 任何理论都是相对的, 都有各自的局限性并总是处在不断的发展之中.

运用物理学的基本理论和实验方法去研究各种专门问题的过程中, 物理学中各种新的分支学科不断涌现和形成. 例如: 流体力学、弹性力学、无线电电子学、金属物理学、半导体物理学、电介质物理学、超导体物理学、等离子体物理学、固体发光学、液晶学和激光等. 当然, 随着物理学的广泛应用, 还导致了一些边缘科学陆续形成, 如化学物理、生物物理、天体物理和海洋物理等.

0.2 学习物理学的意义

物理学是现代工业的基础, 是高新技术的先导, 是人类文明的根基, 纵观世界科学技术史上的三次大的技术革命便可清楚地知道这一点.

第一次技术革命使人类迈入了蒸汽时代, 它发生于 18 世纪 60 年代, 应用的是物理学中的力学和热力学原理, 以蒸汽机的发明和应用为主要标志. 蒸汽机的使用是人类在发明火之后在征服自然方面取得的一次伟大的胜利. 随着蒸汽机和其它动力机械的陆续出现,

19 世纪相继发明了汽车、轮船、火车和飞机,使交通运输事业发生了根本性的革命。

第二次技术革命使人类迈入了**电气时代**,它发生于 19 世纪 70 年代,应用的是物理学中的**电磁学理论**,以电的发明和应用为主要标志.电磁学理论是麦克斯韦在前人(尤其是法拉第)的基础上,于 19 世纪 60 年代创立的,它的创立为电力技术的发展提供了极为重要的理论基础,为人类开辟了一种新能源,自此人类开始了以电作为动力、照明、通讯的基础的现代文明生活。

第三次技术革命使人类迈入了**原子能与信息时代**,它发生于 20 世纪 40 年代,应用的是物理学中的**原子物理学、量子力学、相对论和半导体物理学**的理论,以原子能、电子计算机和空间技术的广泛应用为主要标志.由于原子能、电子计算机和空间技术的诞生和应用,导致了新材料技术、微电子技术、激光技术、生物技术、宇航技术和新能源技术等一大批新技术的迅速崛起,从而掀起了一场新的技术革命.这次技术革命意义之重大,影响之广泛,是以往任何一次技术革命都无法比拟的.这次革命也被人们称为**数字革命**。

物理学的发展之所以能对人类社会的发展起到如此巨大的推动作用,除了它本身属于第一生产力的因素之外,物理学教育也起到了关键作用.回顾历史,我们对那些为物理学发展贡献毕生精力乃至生命的做出伟大贡献的物理学家怀着无比崇高的敬意.他们中有坚持真理,为科学献身的布鲁诺(Bruno,生于 1548 年,1600 年被烧死在火刑柱上);不畏强权的伽利略(Galileo, 1564—1642 年);有经典力学的奠基人牛顿(Newton, 1642—1727 年)和经典电磁学创立者麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879 年);有相对论大师爱因斯坦(Einstein, 1879—1955 年)和量子理论的先导普朗克(Planck, 1858—1947 年);还有被人们称为当今世界爱因斯坦的霍金(Stephen W. Hawking, 1942—),他身残志坚,为统一 21 世纪理论物理的两大基础理论,即爱因斯坦的相对论和普朗克的量子论奠定了基础……一代接着一代,许许多多物理学家的辛勤劳动,创造了人类的共同财富——物理学,为现代物质文明建立了重要的理论基础。

大量的事实证明,物理学的知识和方法已日益成为当今许多工程技术的基础,现代尖端技术如原子能、大规模集成电路、激光通讯和激光医学、基因工程、超导材料和纳米材料等都是明显的例子。

总之,物理学所涉及的范围极广.它既研究人们身旁发生的一切物理现象,也研究宇宙中天体的运动与构造;它既研究微观领域中物质的运动,还研究宏观领域中物质的运动;它既研究客观物质的运动,还指导人们认识客观世界、改造客观世界;它既能提高人的科学素质,又能锻炼人的思维;它不仅是工程技术的基础,而且也是培养创新人才过程中不可被任何其他学科所替代的一门学科,它的发展自始至终对人类文明产生着深远的影响.因此,要踏进科学技术的任何领域并成为科技人才,都必须敲开物理学的大门。

0.3 研究物理学的方法

从物理学的发展过程及其所起的作用来看,物理学的研究方法主要有以下 5 种:

0.3.1 理想模型法

物理学中通常为了突出所要研究的主要问题,以便于寻求规律,常把所研究的对象加

以简化,使之抽象为理想模型.理想模型保留了研究对象的主要特征,而将次要因素不予考虑或暂时不予考虑.当然弄清楚主要因素之后,再考虑次要因素,如此下去,一级级的采取近似以至最后逼近实体,而在其中的每一步都可以用数学方法尽可能精确地加以研究.

理想模型法是物理学研究中的一种十分有效的研究方法,这里的模型可以是看得见、摸得着的实体,也可以是看不见、摸不着的非实体.如:力学中的质点、刚体、理想绳、弹簧振子、谐振子、弹性媒质等,热学中的理想气体、孤立系统等,电磁学中的点电荷、试探电荷、电偶极子、匀强电场、匀强磁场、无限长直导线、无限长直螺线管等,光学中的点光源、光线、薄透镜等,近代物理学中的光子火箭、黑体、卢瑟福模型、玻尔模型等.

理想模型是经过科学抽象而建立起来的一种理想形态,它具有科学的推测性,它本身是一种科学的概念,但不同于一般的抽象概念,它是形象思维的产物,是建立在抽象思维中的图式、图像、符号.所以有人说,正是各种各样的理想模型把人们的认识一步一步地引向了物质世界的深处.

0.3.2 理想实验法

理想实验法也称思考实验法或假想实验法.它是运用形象思维的能力去构思研究对象的假想过程,同时又运用了概念、判断、推理等抽象思维的逻辑手段对研究对象进行逻辑上的推断.所以它是抽象思维与形象思维相结合的情况下进行的思考实验或假想实验.

理想实验是在真实实验的基础上抓住主要矛盾,对过程利用抽象思维和形象思维的逻辑手段进行深入分析的过程,它有利于概念的形成、假设的产生、争端的裁判、基本定律的建立,它对于物理学规律的探索和揭示是真实的物理实验所达不到的,当然它对真实实验的构思可以指明方向.

在物理学发展史上有很多重要观点或结论都是采用理想实验做出推断的.如:伽利略的“落体实验”,它以逻辑推理的方法驳倒了亚里士多德关于“重物下落得快,轻物下降得慢”的错误论断;“斜面实验”推翻了亚里士多德关于“力是维持物体运动原因”的统治人们思想达两千年的错误论断,进而建立起了牛顿的惯性定律;爱因斯坦从“爱因斯坦车实验”得出了同时性是相对的,从“追光实验”得出了相对时空观,从“爱因斯坦升降机实验”得出了等效原理;“卡诺热机实验”在实践上为提高热机效率指明了方向、为热力学第二定律的建立奠定了理论基础;“麦克斯韦车实验”正是迈克耳逊-莫雷实验的诞生基础等.

0.3.3 科学假设法

所谓科学假设法是指在已有知识和科学事实的基础上,对事物本质及其运动规律所做出的一种推测性说明.它具有科学性、推测性,是人们接近客观真理的方式.它是广泛用来解决物理问题的一种普遍方法.

物理学研究的任务在于揭示事物的本质及其运动规律,但由于事物运动的复杂性以及人们认识的局限性,人们的认识总是由初步的、探索性的猜测,逐步提高到对事物本质的认识.在这一过程中科学假设法对物理学理论的形成及发展起着非常重要的作用.

如:麦克斯韦为了解释在变化的磁场中导体回路内所产生的感应电流的现象,就提出了涡旋电场的假设;为了解决安培环路定律在传导电流不连续时所遇到的困难,就又提

出了位移电流的假设,从而使电磁场理论得以完善.爱因斯坦为了解释物质、时空与运动的关系问题,提出了狭义相对论的两条基本假设,从而建立起了更接近客观事实的狭义相对论.量子力学的建立也是如此,它是科学假设法不断发展、不断深入的结晶:在1900年,德国物理学家普朗克提出了能量子假设,在理论上圆满地解决了黑体辐射问题;在1905年,德国物理学家爱因斯坦把普朗克的能量子概念应用于光学领域,提出了光量子假设,成功地解释了光电效应的问题;在1913年,丹麦物理学家玻尔把卢瑟福的原子模型与普朗克的能量子假设相结合,提出了原子的量子化模型,从而把普朗克的能量子假设推广到了原子结构和电子的运动之中,初步解决了原子的线状光谱问题;在1924年,法国物理学家德布罗意受爱因斯坦光量子假设的启发,进一步提出了物质波的假设,后相继被电子衍射、中子衍射所证实;在1926年,奥地利物理学家薛定谔在以上假设的基础上创立了量子力学.

0.3.4 类比推理法

类比法是根据两类或两个对象之间某些方面的相似性而推出它们在其他方面也可能相似的一种逻辑思维方法.类比推理的客观基础是事物之间存在着普遍联系的本性,类比法是人类认识客观世界的一种思维方法,是科学研究中非常有创造性的思维方式,在物理学的发展与研究中它的作用和地位是不容忽视的,它是构建新概念、新理论的常规手段.

如:牛顿从看到苹果落地的现象,到万有引力定律的建立.麦克斯韦从静电场对其中的电荷有力的作用,变化磁场对其中的电荷也有力的作用这一事实出发,类比推出变化的磁场就是涡旋电场这一新概念;进而又从稳恒电流可以在其周围产生磁场,变化电场也可产生磁场这一事实出发,类比推出变化的电场就是位移电流这一新概念;于是随着这两个新概念的提出,电磁场理论的建立过程得到了加速.

0.3.5 分析综合法

所谓分析综合法就是分析法与综合法的总和.二者相互关联、相互渗透,又相互区别、相互对立,不可分割.综合法必须通过分析,分析是综合的基础,分析法也必须综合,这样才能认识事物的本质,把握事物发展的全过程,才能在未知与已知之间架起思维的桥梁,达到探索不断深入的目的.

分析法是指人们在思维过程中把要研究的对象由整体分解为若干个组成部分(层次或要素),然后对各个部分(层次或要素)分别进行研究以解释它们的本质和属性,并研究各个部分(层次或要素)之间的相互作用及其在整体对象中的地位,考察它们对研究对象的状态及其发展变化的影响.如:牛顿力学中的隔离法,物理学中普遍采用的知果索因法(假定结果已知,从待求量出发,利用已有的概念、定理和定律,寻求未知量和已知量之间的相互关系式的方法)和微元分析法等.

综合法正好与分析法相反,它是从局部到整体,从已知到未知的思维方法.它也是物理学研究中普遍采用的方法.如:从牛顿运动三定律到经典力学的创立,从热力学四个定律到经典热力学的建立,从麦克斯韦方程组到经典电磁场理论的完善,从四种基本相互作用到超大统一理论的提出等.

0.4 物理学的最高追求

自然界中物质之间的各种相互作用可归结为四种最基本的相互作用,即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用. 它们的传播媒介不同,作用范围(即力程)各异,作用强度也相差极大,若以强相互作用的强度为1,则将其比较可列表如下:

基本作用	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
相对强度	1	10^{-2}	10^{-13}	10^{-40}
力程/m	10^{-15}	长程	$<10^{-17}$	长程
传播媒介	胶子	光子	中间玻色子	引力子(待发现)

引力相互作用是人们认识最早的一种相互作用. 原则上讲,在一切质量不为零的粒子之间都存在这种作用,但实际上只有当这些粒子聚集成质量巨大的物体时,它才显著地发挥作用. 在微观世界,特别是基本粒子中它和其他三种相互作用相比较是微不足道的.

电磁相互作用是人们研究得较为透彻的一种相互作用. 它发生在一切带电或具有磁矩的粒子之间,在宏观世界中它扮演了主要的角色,在微观世界它同样也起着十分重要的作用.

强相互作用是存在于质子、中子等强子(参与强相互作用的粒子)之间的一种相互作用. 正是这种相互作用的存在,才使具有相互排斥作用的质子聚集在一起形成了不同的原子核,组成了丰富的物质世界.

弱相互作用除存在于强子之间外,还存在于像电子、中微子等轻子之间,但只有在发生衰变反应时才显示出它的重要性.

关于相互作用理论的研究是粒子物理的基本内容,尤其近十多年来,在这方面有了较大的进展. 最早做出贡献的是美国物理学家温伯格(S. Weinberg)、格拉肖(S. Glashow)和巴基斯坦物理学家萨拉姆(A. Salam),他们先后提出了弱电统一理论,将弱相互作用和电磁相互作用统一在同一理论框架中,取得了极大的成就,并因此而获1979年诺贝尔物理学奖. 在此基础上,又有人试图建立一个统一处理强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用的理论,即所谓大统一理论,这种理论正在研究之中. 最后建立起把这四种基本相互作用都统一起来的“超大统一理论”,就是在爱因斯坦的启发下,不息奋斗的物理学家们对物理学的最高追求.

物体之间或同一物体各部分之间相对位置的变动称为**机械运动**(简称为**运动**)。机械运动是自然界中最简单、最普遍的一种运动形式,物理学中把研究机械运动的规律及其应用的学科称为**力学**。

质点是力学中的理想模型之一,是为了研究问题的方便,突出主要矛盾,忽视次要矛盾而抽象出来的理想模型,它是有质量而无线度的物体。任何物体都有一定的大小,但当其线度对所讨论的问题影响很小,且物体内部运动状态差别可忽略时,可把物体看作质点。描述质点运动状态变化的物理量有:位置矢量、位移、速度和加速度等。本章主要研究这4个物理量之间的相互关系及如何用它们来描述物体的机械运动。研究物体位置随时间的变化或运动轨道问题而不涉及物体发生运动变化原因的学科称为**运动学**。

1.1 位置矢量和位移

1.1.1 参照系与坐标系

物体的机械运动是指它的位置随时间的改变。位置总是相对的,这就是说任何物体的位置总是相对于其他物体或物体系来确定的。这个其他的物体或物体系就叫做确定运动物体位置的参照系,简而言之:被选做参照的物体或物体系称为**参照系**。

例如:确定交通车辆的位置时,我们用固定在地面上的一些物体,如房子或路牌作参照系,这样的参照系通常称为**地面参照系**。在物理实验中,确定某一物体的位置时,我们就用固定在实验室内的物体,如周围的墙壁或固定的实验桌作参照系,这样的参照系就称为**实验室参照系**。

经验告诉我们,相对于不同的参照系,同一物体的同一运动会表现为不同的运动形式。例如:一自由落体的运动,在地面参照系中观察时,它是竖直向下的直线运动,如果在近旁驶过的车厢内观察,即以一行进的车厢为参照系,则物体将做曲线运动。物体的运动形式随参照系的不同而不同,这个事实就是**运动的相对性**。由于运动的相对性,当我们确定一个物体的运动时就必须指明是相对于哪个参照系来说的。宇宙中的所有物体都处于永不停止的运动中,这就是与之相对应的**运动的绝对性**。

当确定了参照系之后,为了确切地、定量地说明一个质点相对于此参照系的位置,就得在此参照系上固结一个坐标系.最常见的是笛卡儿直角坐标系,但有时为了研究问题的方便还选用极坐标系、球坐标系、柱坐标系和自然坐标系等.对于笛卡儿直角坐标系而言,称一固结点为坐标原点,记作 o ,从此原点沿三个相互垂直的方向引三条固定的且有刻度和方向的直线作为坐标轴,通常记作 x, y, z 轴,如图1-1所示.于是在这样的坐标系中,一个质点在任意时刻的位置将会准确给出,如 P 点就可以用坐标 (x, y, z) 来表示.

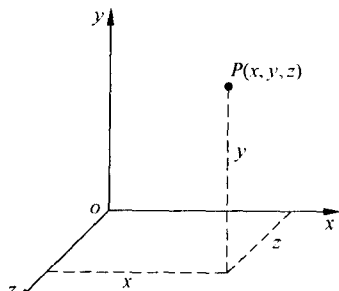


图1-1 质点的位置表示

1.1.2 位置矢量(即运动方程)

由于运动是与时间有关的,在不同的时刻,质点的位置不同,也就是说位置是随时间而变化的,用数学函数的形式来表示,即

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

这样的一组函数称为质点的运动函数(或运动方程).将质点的运动方程消去时间参数 t ,得到坐标相关的方程称为质点的轨道方程,在坐标系中可画出相应的轨道曲线.

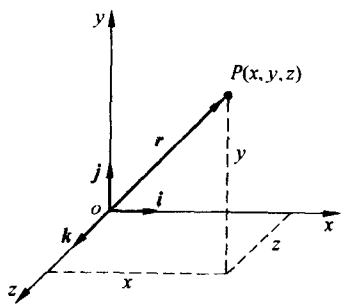


图1-2 位置矢量

为了确定质点在空间的位置,我们可以使用位置矢量这一更简洁、更清楚的概念.图1-2中质点 P 的位置,可以用笛卡儿坐标系中的三个坐标 x, y, z 确定,如果从原点 o 向 P 作有向线段 r ,显然,有向线段 r 与 P 点的位置 (x, y, z) 有一一对应的关系,因此可以借用从参考点 o 到 P 的有向线段 r 来表示 P 点的位置,我们称 r 为 P 点的位置矢量.若以 i, j, k 分别表示沿 x, y, z 轴的单位矢量,则在笛卡儿坐标系中, P 点的位置矢量为

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

式(1-1)中各函数表示质点位置的各坐标值随时间的变化情况,可以看作是质点沿各个坐标轴的分运动表示式.质点的实际运动是由式(1-1)中的三个函数的总体式(1-2)表示.同时式(1-2)也表明:质点的实际运动是各分运动的矢量和,这个由空间的几何性质所决定的各分运动和实际运动的关系称为运动叠加原理.

在国际单位制(SI)中,位置矢量的量纲单位为米(m),大小和方向分别用其模和方向余弦来表示,即

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\cos(\mathbf{r}, \mathbf{i}) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \cos(\mathbf{r}, \mathbf{j}) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \cos(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

如：若质点 P 的位置为 $(2, 3, 4)$ ，则质点 P 的位置矢量为 $\mathbf{r} = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} + 4\mathbf{k}$

质点 P 的位置矢量的大小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{2^2 + 3^2 + 4^2} = \sqrt{29}\text{m}$$

质点 P 的位置矢量的方向余弦为

$$\cos(\mathbf{r}, \mathbf{i}) = \frac{2}{\sqrt{29}}, \cos(\mathbf{r}, \mathbf{j}) = \frac{3}{\sqrt{29}}, \cos(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \frac{4}{\sqrt{29}}$$

1.1.3 位移矢量

从运动质点初始时刻所在位置指向运动质点任意时刻所在位置的有向线段称为在对应时间内的位移矢量(简称位移). 如图 1-3 所示, 质点 P 沿图中曲线运动, t 时刻位于 P_1 点, $t + \Delta t$ 时刻位于 P_2 点. P_1, P_2 两点的位置矢量分别为 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$, 在时间 Δt 内质点的空间位置变化可用矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 来表示, 其关系式为

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) = \Delta \mathbf{r} \quad (1-3)$$

$\Delta \mathbf{r}$ 是描述质点空间位置变化的物理量, 它同时也表示了质点位置变化的距离和方向.

位移不同于位置矢量. 在质点运动过程中, 位置矢量表示某时刻质点的位置, 它描述该时刻质点相对于坐标原点的位置状态, 是描述状态的物理量. 位移则表示某段时间内质点位置的变化, 它描述该段时间内质点状态的变化, 是与运动过程相对应的物理量.

位移也不同于路程. 质点从 P_1 运动到 P_2 所经历的路程 Δs 是图 1-3 中从 P_1 到 P_2 的一段曲线长, 路程是标量, 恒取正值. 在一般情况下, 路程 Δs 与位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ (图 1-3 中 P_1 和 P_2 之间的弦长) 并不相等. 只有当质点做单向的直线运动时, 路程和位移的大小才是相等的. 此外, 在时间间隔 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下, P_2 无限靠近 P_1 , 弦 $P_1 P_2$ 与曲线 $P_1 P_2$ 的长度无限接近, 这时, 路程 ds 与位移的大小 $|d\mathbf{r}|$ 才相等, 即

$$ds = |d\mathbf{r}|$$

在笛卡儿坐标系中, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \\ &= (x_2 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j} + z_2 \mathbf{k}) - (x_1 \mathbf{i} + y_1 \mathbf{j} + z_1 \mathbf{k}) \\ &= (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j} + (z_2 - z_1) \mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \end{aligned}$$

如：若 P_1 点的位置矢量为 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{i} + 3\mathbf{j} + 5\mathbf{k}$, P_2 点的位置矢量为 $\mathbf{r}_2 = 2\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 6\mathbf{k}$, 则 P_1 与 P_2 间的位移为 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \mathbf{i} + \mathbf{j} + \mathbf{k}$.

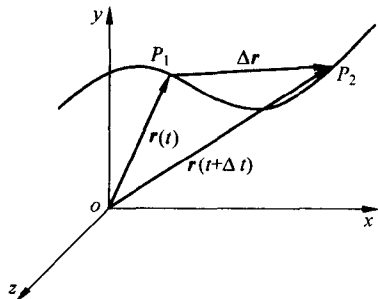


图 1-3 位移矢量

1.2 速度和加速度

1.2.1 速度

质点的位置随着时间变化,产生了位移,而位移一般也是随时间变化的,那么位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和产生这段位移所用的时间 Δt 之间有怎样的关系呢? $\Delta \mathbf{r}/\Delta t$ 是一个怎样的物理量呢?

从物理意义上来看,它描述的是质点位置变化的快慢和位置变化的方向. 由于它对应的是时间间隔而不是某一时刻或位置,所以我们称其为在 Δt 时间内的平均速度,以 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

平均速度是矢量,它的方向就是相应位移的方向,如图 1-4 所示.

实际上当 Δt 趋近于零时,式(1-4)的极限就是质点位置矢量对时间的变化率,将其定义为质点在 t 时刻的瞬时速度(简称速度),以 $\mathbf{v}$ 表示,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} \quad (1-5)$$

速度的方向就是 Δt 趋近于零时 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向,如图 1-4 所示. 当 Δt 趋近于零时 P_1 点向 P 点趋近,而 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向最后将与质点运动轨道在 P 点的切线方向一致. 因此质点在时刻 t 的速度方向沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线指向运动的前方. 可见它能够反映某一时刻或某一位置时质点的运动快慢和运动方向. 这就是速度与平均速度的区别所在.

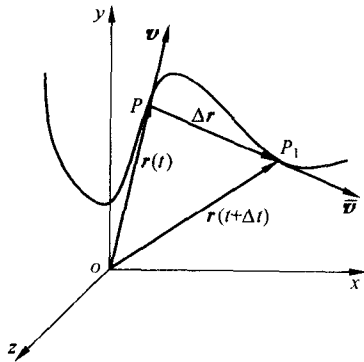


图 1-4 平均速度与速度

速度的大小定义为速率,以 v 表示,即

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} \quad (1-5a)$$

以 Δs 表示在 Δt 时间内质点沿轨道所经历的路程. 当 Δt 趋近于零时,由于 $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δs 将趋于相同,因此可以得到

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{ds}{dt} = \dot{s} \quad (1-5b)$$

这就是说速度的大小又等于质点所走过的路程对时间的变化率(即速率). 因此以后对速率与速度的大小不再区别.

注意: 位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 是有区别的,一般来讲

$$v = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \neq \frac{dr}{dt}$$

若将式(1-2)代入式(1-4),由于三个坐标轴上的单位矢量都不随时间变化,所以有

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-5c)$$