



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新编 基础物理学

(上册)

王少杰 顾 牡 / 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新编基础物理学

(上册)

主 编 王少杰 顾 牡
副主编 罗时军 赵安庆 施昌勇
参 编 邱明辉 杨桂娟 刘传先

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书依照物理基础教学指导分委会编写的《理工科类大学物理课程教学基本要求、理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2008版)》编写,其中不仅融入作者多年教学经历所积累的成功经验,而且考虑到目前学生学习和教师教学的新特点,还为本书配备了习题解答、学习指导和电子教案等教学资源。全书分为两册,本书是上册,包括力学篇、机械振动、机械波篇和热学篇。

本书适合于普通高等学校工科各专业学生学习使用,也可作为教师或相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新编基础物理学.上册/王少杰,顾牡主编. —北京:科学出版社,2009
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-03-023190-1

I. 新… II. ①王… ②顾… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 159867 号

责任编辑:胡云志 昌盛 / 责任校对:赵燕珍
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市农林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年1月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—10 000 字数:455 000

定价:27.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(文林))

前 言

本教材是参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会于 2008 年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(以下简称《教学基本要求》),在原教材《基础物理学》(获 1997 年度上海市优秀教材奖)基础上重新改编而成的. 改编时在基本保留原有特色和风格的基础上,结合当前高等教育新形势,对全书的内容作了重新审视及必要的调整和增删,以使本教材成为一本既符合大学物理《教学基本要求》,又适应教育发展趋势,适合大多数普通高等院校各类专业的物理教学需要的优秀教材.

非物理类专业的大学生学习物理学的目的在于:使学生对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统的认识 and 正确的理解,并为进一步学习打下必要而坚实的基础. 同时,着力培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识,以实现学生知识、能力、素质的协调发展.

基于以上认识,我们作了以下工作:

(1) 根据“保证宽度(A类)、加强近代、联系实际、涉及前沿”的选材原则,在内容选取上,将《教学基本要求》中 A 类知识点作为核心教学内容的同时,对 B 类知识点有选择性地作适当拓展,既保证基本知识结构、系统完整,又使学生有一个进一步了解当代科学技术进展的良好基础.

(2) 在保证传统教学内容框架下,将原教材《基础物理学》上册中第 2~第 7 章(含流体力学简介)合并为第 2 章质点动力学,在下册中重新改写了几何光学,删去了第 22 章核物理与粒子物理简介,舍去了“阅读材料”这一栏目,采用“融合和点睛”的方法充实于各章教学内容之中,从而压缩了篇幅,使全书更紧凑而实用.

(3) 改正了原教材中出现的印刷错误和个别表达欠确切的内容和词句,对文字作了进一步润色,力求语言通畅,好读易懂,并按全国自然科学名词审查委员会公布的《物理学名词》,对全书重新进行了核实.

(4) 对全书的例题和习题作了适当调整和增删.

(5) 适当考虑双语教学需要,对全书第一次出现的物理量和物理学名词加了英文注释,并在书后备以索引.

改编后,全书共 6 篇 17 章,分上、下两册出版,上册包括第 1 篇力学,第 2 篇机械振动、机械波和第 3 篇热学,下册包括第 4 篇电磁学、第 5 篇光学和第 6 篇量子物理基础. 书中凡冠以“*”号的章、节、习题供教师根据课时数和专业需求选用. 经适当选择后,本书可作为 100~

140 学时理工科大学物理课程的教材,也可供相关专业的师生选用和参考。

参加本书改编工作的有同济大学顾牡、王少杰,大连交通大学邱明辉,大连水产学院杨桂娟,湖北汽车工业学院罗时军,河南农业大学赵安庆,北京服装学院施昌勇和上海第二工业大学刘传先、滕琴等。上述各位老师分工合作,对各人所承担的章、节内容和习题,逐字逐句精心审视、提炼,提出了许多有价值的改编意见和建议,最后由主编王少杰、顾牡统稿核定。

本书改编、出版过程中,始终得到同济大学教务处,同济大学国家工科物理课程教学基地和科学出版社数理分社的关注、帮助和支持,昌盛、胡云志担任本书责任编辑,为本书的出版,付出了辛勤的汗水,并作了出色的工作,在此一并表示诚挚的谢意。

限于时间紧迫,编著水平有限,虽经多次审校,教材中缺点、错误及不当之处在所难免,恳请专家、同行和读者斧正。

编 者

2008 年 10 月



科学出版社 高等教育出版中心

教学支持说明

科学出版社高等教育出版中心为了对教师的教学提供支持，特对教师免费提供本教材的电子课件，以方便教师教学。

获取电子课件的教师需要填写如下情况的调查表，以确保本电子课件仅为任课教师获得，并保证只能用于教学，不得复制传播用于商业用途。否则，科学出版社保留诉诸法律的权利。

地址：北京市东黄城根北街16号，100717

科学出版社 高等教育出版中心数理出版分社 昌盛（收）

联系方式：010-64015178 010-64033787(传真)mph@mail.sciencep.com

登陆科学出版社网站：www.sciencep.com “教材天地”栏目可下载本表。

请将本证明签字盖章后，传真或者邮寄到本社，我们确认销售记录后立即赠送。

如果您对本书有任何意见和建议，也欢迎您告诉我们。意见一旦被采纳，我们将赠送书目，教师可以免费赠书一本。

证 明

兹证明_____大学_____学院/
系第_____学年 上 下学期开设的课程，采用科学出版社出版的
_____/_____（书名/作者）作为上课教材。任
课老师为_____共_____人，学生_____个班共_____人。

任课教师需要与本教材配套的电子教案。

电 话：_____

传 真：_____

E-mail：_____

地 址：_____

邮 编：_____

学院/系主任：_____（签字）

（学院/系办公室章）

_____年_____月_____日

目 录

前言

第 1 篇 力 学

第 1 章 质点运动学 3

1.1 参考系 时间和空间的测量 3

1.1.1 参考系 坐标系 3

1.1.2 时间的测量 3

1.1.3 长度的测量 4

1.2 质点运动的矢量描述 5

1.2.1 质点 5

1.2.2 位矢 运动方程和轨迹方程 5

1.2.3 速度 加速度 6

1.2.4 自然坐标系 切向加速度和法向加 速度 10

1.3 相对运动 14

习题 1 16

第 2 章 质点动力学 18

2.1 牛顿运动定律 18

2.1.1 牛顿第一定律 18

2.1.2 牛顿第二定律 19

2.1.3 牛顿第三定律 19

2.1.4 国际单位制 量纲 20

2.1.5 常见的力 21

2.1.6 牛顿运动定律的应用 23

* 2.1.7 非惯性系 惯性力 27

2.2 动量和动量守恒定律 29

2.2.1 质点和质点系的动量定理 30

2.2.2 动量守恒定律 33

2.3 功、机械能和机械能守恒定律 36

2.3.1 功 功率 37

2.3.2 动能和质点动能定理 43

2.3.3 质点系动能定理 45

2.3.4 势能和势能曲线 46

2.3.5 功能原理 机械能守恒定律 49

2.4 质点的角动量和角动量守恒定律 54

2.4.1 力对参考点的力矩 54

2.4.2 质点角动量 55

2.4.3 质点的角动量定理 55

2.4.4 质点角动量守恒定律 56

2.4.5 质点系的角动量定理和角动量守恒 定律 58

习题 2 60

第 3 章 刚体力学基础 65

3.1 刚体运动的描述 65

3.1.1 刚体 65

3.1.2 刚体的自由度 65

3.1.3 刚体运动的几种形式 66

3.1.4 刚体定轴转动的描述 67

3.2 刚体定轴转动定律 角动量守恒 定律 68

3.2.1 力矩 68

3.2.2 定轴转动定律 转动惯量 69

3.2.3 刚体定轴转动的角动量和角动量 定理 75

3.2.4 定轴转动刚体的角动量守恒定律 ... 76

3.3 刚体的能量 78

3.3.1 刚体定轴转动的动能和动能定理 ... 78

3.3.2 刚体的重力势能 79

* 3.4 陀螺的运动 进动 82

3.4.1 不受外力矩作用的陀螺	82	5.3.2 复摆	131
3.4.2 陀螺的进动	82	5.4 振动的能量	132
习题 3	85	5.5 简谐运动的合成	134
第 4 章 狭义相对论	88	5.5.1 同方向、同频率的两个简谐运动的 合成	134
4.1 爱因斯坦的两个基本假设	88	5.5.2 同方向、不同频率的两个简谐运动 的合成 拍	137
4.1.1 牛顿力学的时空观	89	* 5.5.3 相互垂直的两个简谐运动的合成	139
4.1.2 爱因斯坦的两个基本假设	92	5.6 阻尼振动 受迫振动 共振	141
4.2 爱因斯坦的时空观	93	5.6.1 阻尼振动	141
4.2.1 同时性的相对性	93	5.6.2 受迫振动 共振	143
4.2.2 时间延缓	95	习题 5	146
4.2.3 长度收缩	97	第 6 章 机械波	149
4.3 洛伦兹坐标变换和速度变换	101	6.1 机械波的产生、传播和描述	149
4.3.1 洛伦兹坐标变换	101	6.1.1 机械波的形成	149
4.3.2 洛伦兹速度变换	105	6.1.2 横波与纵波	149
4.4 几个经典佯谬	106	6.1.3 波的几何描述	150
4.4.1 因果关系	106	6.1.4 波速 波长 周期(频率)	151
4.4.2 孪生子效应	107	6.2 平面简谐波的波函数	152
4.4.3 高速物体的视觉效应	109	6.2.1 平面简谐波波函数的建立和意义	153
4.5 相对论动力学基础	111	* 6.2.2 波动方程	155
4.5.1 相对论质量和动量	111	6.3 波的能量	158
* 4.5.2 力和加速度的关系	114	6.3.1 波动能量的传播	158
4.5.3 相对论能量	115	6.3.2 能流和能流密度	160
习题 4	120	6.3.3 波能量的吸收	161
第 2 篇 机械振动 机械波		6.4 惠更斯原理 波的衍射、反射和 折射	162
第 5 章 机械振动	123	6.4.1 惠更斯原理	162
5.1 简谐运动	123	6.4.2 波的衍射	163
5.1.1 简谐运动的特征及其运动方程	123	6.4.3 波的反射和折射	163
5.1.2 简谐运动方程中的三个基本物理量	124	6.5 波的干涉	165
5.2 简谐运动的旋转矢量表示法	127	6.5.1 波的叠加原理	165
5.2.1 旋转矢量表示法	127	6.5.2 波的干涉条件和公式	165
5.2.2 旋转矢量图的应用	128		
5.3 单摆和复摆	130		
5.3.1 单摆	130		

6.6 驻波	168	7.5.1 自由度	198
6.6.1 驻波的产生	169	7.5.2 能量均分定理	199
6.6.2 驻波方程	169	7.5.3 理想气体的内能	200
6.6.3 驻波的能量	171	7.6 麦克斯韦速率分布律	201
6.6.4 半波损失	172	7.6.1 速率分布和分布函数	202
6.6.5 振动的简正模式	172	7.6.2 理想气体分子的麦克斯韦速率分 布律	203
6.7 多普勒效应	174	7.6.3 三种速率	204
6.7.1 波源静止, 观察者以 u_R 相对于介质 运动	174	7.6.4 麦克斯韦速率分布的实验验证	205
6.7.2 观测者静止, 波源以 u_S 相对于介质 运动	175	* 7.7 玻尔兹曼分布	208
6.7.3 波源以 u_S 运动, 观测者以 u_R 运动 (相向为正)	176	7.7.1 玻尔兹曼分布律	208
* 6.8 声波 超声波 次声波	177	7.7.2 重力场中微粒按高度的分布	209
6.8.1 音量、音调和音色	177	7.8 气体分子的平均自由程和碰撞 频率	209
6.8.2 声压	179	* 7.9 气体的内迁移现象	212
6.8.3 次声波	179	7.9.1 内摩擦现象	212
6.8.4 超声波	180	7.9.2 热传导现象	213
习题 6	182	7.9.3 扩散现象	214
第 3 篇 热 学		* 7.10 真实气体 范德瓦耳斯方程	215
第 7 章 气体动理论	187	7.10.1 真实气体	215
7.1 热力学系统 平衡态 状态参量	187	7.10.2 范德瓦耳斯方程	216
7.1.1 热力学系统	187	习题 7	219
7.1.2 平衡态	187	第 8 章 热力学基础	221
7.1.3 状态参量	188	8.1 准静态过程 功 热量	221
7.2 理想气体状态方程	190	8.1.1 准静态过程	221
7.3 理想气体的压强	193	8.1.2 准静态过程压力的功	222
7.3.1 理想气体的微观模型	193	8.1.3 热量和热容量	223
7.3.2 平衡状态气体的统计假设	194	8.2 热力学第一定律	224
7.3.3 理想气体的压强公式	194	8.2.1 内能	224
7.4 理想气体的温度公式	196	8.2.2 热力学第一定律的表述	224
7.5 能量均分定理 理想气体内能	198	8.3 热力学第一定律对理想气体等值 过程的应用	225
		8.3.1 等体过程	226
		8.3.2 等压过程	227
		8.3.3 等温过程	228

8.4 绝热过程 * 多方过程	230	8.7 热力学第二定律的统计意义和熵 的概念	247
8.4.1 热力学第一定律在绝热过程中的 应用	230	8.7.1 热力学第二定律的统计意义	247
8.4.2 绝热方程	231	8.7.2 熵和熵增加原理	249
8.4.3 绝热线和等温线的比较	232	8.7.3 熵的热力学表示	250
* 8.4.4 多方过程	234	8.7.4 熵的计算	252
8.5 循环过程 卡诺循环	236	习题 8	254
8.5.1 循环过程	236	参考答案	257
8.5.2 热机和热机循环	237	参考文献	262
8.5.3 制冷机和制冷系数	238	附录	263
8.5.4 卡诺循环	240	附录一 希腊字母表	263
8.6 热力学第二定律 卡诺定理	244	附录二 常用天文量	263
8.6.1 可逆过程与不可逆过程	244	附录三 常用物理常量表	264
8.6.2 热力学第二定律	245	附录四 书中物理量的符号及单位	265
8.6.3 卡诺定理	246	名词索引	267

第 1 篇

力 学

自然界中一切物质都在永不停息地运动着,这是所有物质的一个共同特征,而运动的形式多种多样,如机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动以及其他微观粒子的运动等,但其中最简单、最基本而又最常见的运动形式是机械运动.所谓**机械运动**(mechanical motion)是指,物体相对于其他物体的位置(距离和方向)的变化以及物体各部分之间的相对运动(如形变).在物理学中,专门研究物体的机械运动及其规律的学科分支就是**力学**(mechanics).

力学的历史悠久,是人类最早建立的学科之一.英国物理学家牛顿(Isaac Newton, 1642~1727)总结、分析了亚里士多德、伽利略、开普勒、笛卡儿和惠更斯等的实验和理论后,于1687年发表了《自然哲学的数学原理》一书,提出了著名的运动三定律和万有引力定律,从而奠定了经典力学的基础.至此,力学进入了所谓的牛顿力学时代,这是力学发展史上的一个重要里程碑.此后,牛顿建立的力学体系又经过伯努利、拉格朗日和达朗贝尔等的推广和完善,形成了系统的理论,取得了广泛的应用并发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支.随着科技的发展,到了20世纪初,相继建立了研究物体在高速运动时规律的相对论力学和研究微观客体运动规律的量子力学,使牛顿力学得以进一步扩展和修正.近代物理学的研究揭示了经典力学只适用于宏观低速的情况,尽管如此,经典力学仍然能在相当广阔的尺度和速率范围内使用.在自然科学和工程技术领域,牛顿力学仍然能够较精确地解决许多理论和实际问题.

力学的研究内容是力与物体运动的关系.通常我们把力学分成**运动学**(kinematics)、**动力学**(dynamics)和**狭义相对论**(special relativity)三部分.运动学研究的是物体在运动过程中位置和时间的关系,不追究运动发生的原因;而动力学研究的是物体的运动与物体间相互作用的内在联系和规律;狭义相对论主要介绍相对论时空观、运动学基本问题和狭义相对论质点动力学的初步知识,从而使读者尽早感受到经典物理和近代物理的适当融合,以拓展视野.

力学是物理学的起点,也是整个物理学的“基石”,因此,掌握力学对学好物理学的其他部分是极其重要的.



第1章 质点运动学

质点运动学的任务是研究和描述做机械运动的物体在空间的位置随时间变化的关系,并不追究运动发生的原因.本章在引入参考系、坐标系、质点等概念的基础上,定义描述质点运动的物理量,如位置矢量、位移、速度和加速度等,进而讨论这些量随时间的变化以及相互关系,然后讨论曲线运动中的切向加速度和法向加速度,最后将介绍相对运动.

1.1 参考系 时间和空间的测量

1.1.1 参考系 坐标系

自然界中所有的物体都在不停地运动着,绝对静止的物体是没有的,这就是运动的绝对性.同时,运动还具有相对性.描述一个物体的运动时,首先要选定某一物体作为参考物体,选定的参考物体不同,运动的描述也就可能不同,这种被选作参考的物体称为参考物.与参考物固连的空间称为参考空间.而参考空间和与之固连的时间组合称为**参考系**(reference system).但习惯上,常把参考物简称为参考系,并不特别指出与之相连的参考空间和钟.参考系选定后,为了定量地描述物体相对于参考系的位置,还必须在参考系上建立适当的**坐标系**(coordinate system).因此,坐标系是参考系的数学表示.尽管坐标系的选取是完全任意的,然而一旦选定坐标系,物体运动的描述便随之确定.常用的坐标系有直角坐标系(又称笛卡儿坐标系)、平面极坐标系、球坐标系和柱坐标系等.今后若不特别指明,我们均采用直角坐标系.需要说明的是,物体的运动状态与选择的参考系密切相关(运动是相对的),而与选取何种类型的坐标系无关.同时必须注意,求解运动学问题时,需将各类物理量变换到同一参考系中分析求解.

通常按惯例约定:若不明确指出选用什么物体为参考系,就是选取地面为参考系.

1.1.2 时间的测量

描写物体的运动,要用到**时间**(time)和**空间**(space)这两个概念.

虽然在生活中我们对时间和空间已经比较熟悉,但是要问你什么是时间、什么是空间,却又不容易找到恰当的答案.所谓时间,是用以表述事件之间的先后顺序性和持续性;空间是用以表述事物相互之间的位形和广延性.尽管对时间和空间没有满意的“严格”的理论定义,但这并不影响二者在物理学中的使用.因为,物理学是一门基于实验的科学,首要应考虑的问题不是它们的定义,而是了解它们是怎样度量的.

一切周期运动都可以用来度量时间.太阳的升起和降落表示天(日),四季的循环表示年,月亮的盈亏是农历的月,这些均已为我们所熟悉,因而年、月、日一直是各民族计量时间的单位和标准.为了更精细地量度时间,我国古代将1日分为12个时辰,1个时辰又分为4刻;近代将1日分为24个小时,1小时分为60分钟,1分钟分为60秒.

目前,国际通用的时间单位是秒(s).1967年10月在第十三届国际度量衡会议上决定采用原子的跃迁辐射作为计时标准,规定1秒为位于海平面上的 ^{133}Cs 原子的基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射的周期 T 的9 192 631 770倍.此时间标准称为原子时.

在自然界中,任何现象都有一个时间尺度.如宇宙的年龄大约是 $6 \times 10^{17}\text{s}$,即200亿年;地球自转一周约为 $8.64 \times 10^4\text{s}$; μ 子的寿命是 $2 \times 10^{-6}\text{s}$;一个分子里的一个原子完成一次典型的振动需要 $10^{-14} \sim 10^{-13}\text{s}$.目前,物理学中涉及的最长的时间是 10^{38}s ,它是质子寿命的下限;涉及的最小的时间是 10^{-43}s ,称为普朗克时间.普朗克时间被认为是最小的时间,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.

在物体的运动描述中,通常我们把某一瞬时称为时刻,用 t 表示.选定的计时起点为 $t=0$ 时刻,同时把两个时刻间的一段时间 $\Delta t=(t_2-t_1)$ 称为时间间隔,简称为时间.显然,时刻与物体的某一空间位置相对应,时间与物体运动的空间位移相对应.

1.1.3 长度的测量

长度(length)是空间的一个基本性质.对于长度的测量,在古代常常以人体的某部分作为单位和标准,这显然不能取作统一的标准.以客观存在的不变事物作为长度的标准是一种必然的趋势.目前国际通用的长度单位是米(m).1960年以前,用铂铱米尺作为标准尺,规定米的大小.1960年以后,改用光的波长作为标准.在第十一届国际计量大会上规定1米等于 ^{86}Kr 原子 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁时所对应的辐射在真空中的波长的1 650 763.73倍.1983年,第十七届国际计量大会上又通过了米的新定义:米是光在真空中经历 $1/299\,792\,458\text{s}$ 的时间间隔内所传播的路程长度.按这种新的定义,光速是一个固定的常数,从而将长度标准和时间标准统一了起来,并

1.2 质点运动的矢量描述

使长度计量的精度提高到与时间计量相同的精度。

目前,物理学中涉及的最大长度是 10^{28} m,它是宇宙曲率半径的下限;已达到的最小长度为 10^{-20} m,它是弱电统一的特征尺度.普朗克长度约为 10^{-35} m,被认为是最小的长度,意思是说,在比普朗克长度更小的范围内,长度的概念可能就不再适用了。

1.2 质点运动的矢量描述

1.2.1 质点

牛顿力学中的运动学,就是研究如何描述物体位置随时间的变化.研究问题往往总是从简单的情况入手,我们首先讨论一种被称为质点(mass point, particle)的物体,即具有质量而大小为几何点的物体.我们知道,任何实际物体都有一定的大小、形状和内部结构,没有任何一个真实物体与质点等价.但是,当我们仅考察物体的整体运动,物体本身的大小比所考察运动的线度又小得多时,就可以不计物体各部分运动情况的差别而把它看作一个质点。

质点是一种理想的力学模型,它突出了物体具有质量和占有空间位置这两个主要因素,而忽略了形状、大小及内部运动等次要因素.在物理上,这种突出研究对象的主要特征而忽略其次要特征的理想模型是常用的,如刚体、点电荷、理想气体、理想流体等。

1.2.2 位矢 运动方程和轨迹方程

设质点做曲线运动,在坐标系建立以后,物体的运动情况便可以进行定量描述.如图 1-1 所示,设某时刻质点在 P 点,在中学里我们已经学过 P 点的位置可以用直角坐标 (x, y, z) 来确定,现在我们将学习确定质点位置的另一种方法——位置矢量法.定义 P 点的位置矢量(position vector) \vec{r} 的大小为有向线段 \vec{OP} 的长度,而方向是从原点 O 指向 P ,位置矢量又简称为位矢或径矢(radius vector).用这样一个矢量 \vec{r} 就完全确定了该时刻质点的位置.于是位置矢量 \vec{r} 的矢端在直角坐标系三个坐标轴上的坐标就是 x, y, z ,于是 \vec{r} 可以写为

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

式中, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 分别为 x, y, z 轴上的单位矢量。

当质点运动时,它相对于坐标原点 O 的位矢 \vec{r} 是随时间变化的,因此, \vec{r} 是时间 t 的函数,即

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

或

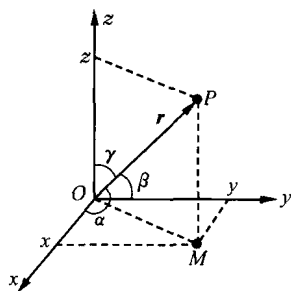


图 1-1 位置矢量

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

这就是质点的运动学方程(kinematical equation);而 $x(t), y(t)$ 和 $z(t)$ 则是运动方程的分量式,从中消去参数 t 便可得到质点运动的轨迹方程或轨道方程.若轨迹为直线,则称质点做直线运动,若轨迹为曲线则称质点做曲线运动.

位矢的大小、方向分别为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-3)$$

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-4)$$

例 1-1 已知某质点的运动学方程为 $\mathbf{r}(t) = t\mathbf{i} + (t^2 - 4t)\mathbf{j}$ (m), 求该质点的轨迹方程.

解 由题意可知

$$\begin{cases} x = x(t) = t \\ y = y(t) = t^2 - 4t \end{cases}$$

消去参数 t , 可得轨迹方程为 $y = (x - 2)^2 - 4$, 不难看出该质点做的是抛物线运动(图 1-2).

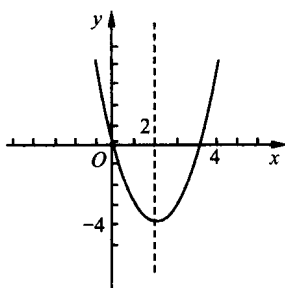


图 1-2 质点的轨迹

1.2.3 速度 加速度

1. 位移

有了位置矢量就可以确定质点在某时刻的位置,为了进一步描述质点的位置变化,需引入另一个重要物理量——位移矢量.如图 1-3 所示,设质点在 t 时刻位于 A 点,在 $t + \Delta t$ 时刻位于 B 点,我们将从始点 A 指向终点 B 的有向线段 \overrightarrow{AB} 称为点 A 到点 B 的位移矢量,简称位移(displacement).位移常用 $\Delta\mathbf{r}$ 表示,于是有 $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$,即质点在 $t \sim t + \Delta t$ 内的位移就等于质点位置矢量的增量.

在直角坐标系下,有

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \quad (1-5)$$

位移的大小为

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (1-6)$$

其方向为从 A 指向 B .

为了正确理解,我们对位移作以下说明:

(1) 位置矢量与坐标原点的选取有关,而位移与坐标原点的选取无关.

(2) 位移与路程(path) Δs 不同.位移是矢量,它只取决于质点的

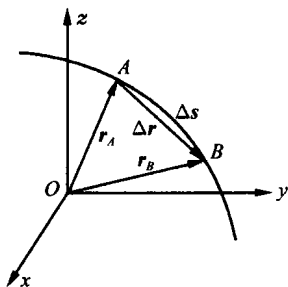


图 1-3 位移和速度

始末位置,与路径(path)的形状无关;而路程为标量(scalar),它表示质点运动的实际路径的长度。

(3) 只有当 Δt 趋于零时或单向直线运动时,位移的大小才与路程相等。

2. 速度

现在我们介绍描述质点运动状态的另一个物理量——速度(velocity)。我们将质点在 $t \sim t + \Delta t$ 的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与产生这位移的时间间隔 Δt 的比值称为该时间间隔内质点的平均速度(average velocity),用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速度也是矢量,方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 相同,大小是 $\left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right|$ 。

平均速度只是对质点在时间 Δt 内位置随时间变化情况的粗略描述,并不能反映在这段时间间隔内质点运动快慢和方向的细致差别。当 Δt 趋于零时,上述平均速度的极限就可以精确描述 t 时刻质点运动的快慢与方向,此极限称为 t 时刻质点的瞬时速度(instantaneous velocity),简称速度,用 \mathbf{v} 表示

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t}$$

根据微积分的知识可知,这一极限就是位矢 \mathbf{r} 对时间的导数,即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} \quad (1-8)$$

由图 1-3 可知,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\mathbf{r}_B \rightarrow \mathbf{r}_A$, $\Delta \mathbf{r}$ 方向趋近 A 点的切线方向,即 A 点处瞬时速度的方向是沿质点运动路径的切向(tangential)并指向前进方向。通常,我们把速度的大小称为速率(speed),它就是速度矢量的模 $|\mathbf{v}|$ 。

在国际单位制中,速度大小的单位为米·秒⁻¹($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

在直角坐标系中有

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-9)$$

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-10)$$

3. 加速度

在一般情况下,质点沿某一轨迹运动时,其速度随时间也会有变化,即 $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$ 。我们将质点在 $t \sim t + \Delta t$ 的速度增量 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t)$ 与 Δt 的比值称为该时间间隔内质点的平均加速度(average acceleration),用 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示