




普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

# 简明大学物理

JIANMING DAXUE WULI

主编 山灵芳 审定 刘金海

 河南科学技术出版社

普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

# 简明大学物理

主 编 山灵芳

审 定 刘金海



河南科学技术出版社

·郑州·

## 内 容 提 要

本教材是根据大学物理教学改革新形势的需要,为适应高等师范院校和理工科院校少学时大学物理课程的要求而编写的,也是河南省教育厅2010年自然科学基金项目《高等师范院校大学物理教学策略研究》的研究成果之一。本教材内容的编排严格执行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员会最新颁发的《理工科类大学物理课程教学基本要求》,主要包括力学、热学、电磁学、振动与波动、狭义相对论和量子物理基础等内容。

本教材可以作为理工类、师范类高等院校非物理专业学生大学物理少学时课程的教材,也可供物理爱好者学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

简明大学物理/山灵芳主编. —郑州:河南科学技术出版社,2012.9  
(普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材)  
ISBN 978-7-5349-5829-8

I. ①简… II. ①山… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第123698号

---

出版发行:河南科学技术出版社

地址:郑州市经五路66号 邮编:450002

电话:(0371) 65788613 65788626

网址:www.hnstp.cn

策划编辑:徐素军

责任编辑:张恒

责任校对:柯姣

封面设计:张伟

版式设计:栾亚平

责任印制:张艳芳

印刷:洛阳和众印刷有限公司

经销:全国新华书店

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:16.75 字数:450千字

版次:2012年9月第1版 2012年9月第1次印刷

定价:32.00元

---

如发现印、装质量问题,影响阅读,请与出版社联系并调换。

## 《简明大学物理》编写人员名单

---

主 编 山灵芳  
编 委 (以姓氏笔画为序)  
山灵芳 王三军 刘长欣 杨延生 单雯雯  
审 定 刘金海

# 前 言

本教材是根据大学物理教学改革新形势的需要，为适应高等师范院校和理工科院校少学时大学物理课程的要求而编写的。本教材以河南省教育厅 2010 年自然科学基金项目《高等师范院校大学物理教学策略研究》的研究成果为基础，结合一线教师多年教学经验编写而成的，具有较强适应性。

本教材具有以下特点：

(1) 指导思想清晰明确。依据教育部物理基础课教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》，在保证教材具有科学性、系统性和完整性的前提下，着重于物理学基本概念和规律以及物理学方法的系统阐述，尽量使学生形成完整的物理学思想。

(2) 行文简洁，保持全貌。采用的具体方法是：一避免与中学物理课程的简单重复；二简化和删除过于复杂的数学推导，突出物理思想和方法；三叙述简明到位，避免重复；四割舍部分对物理体系影响不大的内容，对具体的技术应用可以通过参考书学习。

(3) 注意五突出，力求结构创新。一突出知识主线，二突出基础知识，三突出重点内容，四突出分析方法，五突出物理图像。在实际教学中可以根据需要适度扩展。

(4) 注意渗透近代物理思想和观点。

建议：讲述全书内容（包括打\*号内容）并安排习题教学或作业时，教学安排 108 个学时，并根据专业需要就个别知识点深入讨论和扩展；讲述全书基本内容（不包括打\*号内容）时，教学安排 90 个学时；只讲经典物理全部内容（包括打\*号内容）时，安排 72 个学时；只讲述经典物理的基本内容（不包括打\*号内容），也可以安排 54 个学时。

本教材由山灵芳任主编，具体编写分工为：第 1 章、第 2 章及附录 B、附录 C 由刘长欣编写；第 3 章、第 4 章、第 10 章由王三军编写；第 5 章、第 8 章、第 9 章和绪论由山灵芳编写；第 6 章、第 7 章及附录 A 由杨延生编写；第 11 章、第 12 章由单雯雯编写。本教材由山灵芳统稿和定稿，并给出了全部习题的答案。河南省物理学会理事长刘金海教授审定了本教材并提出了修改建议。本教材在出版过程中得到了河南教育学院教务处和物理系的领导及老师的关心和支持，还得到河南科学技术出版社的帮助，在此一并致谢！

编写适合教学改革的教材是一种探讨性工作，由于编者水平有限，对教材中存在的疏漏之处，真诚希望广大读者不吝指正。

编 者

2012 年 4 月

# 目 录

---

绪论	(1)
----	-----

## 第1篇 经典力学基础

第1章 质点力学	(4)
1.1 参照系 运动方程	(4)
1.2 速度和加速度	(5)
1.3 直线运动和圆周运动的速度及加速度	(8)
1.4 牛顿运动定律	(11)
1.5 功和能	(18)
1.6 机械能守恒定律和能量守恒定律	(21)
1.7 动量定理和动量守恒定律	(25)
*1.8 火箭飞行原理	(28)
1.9 角动量守恒定律	(28)
*1.10 守恒定律与时空对称性	(30)
习题	(31)
思考题	(34)
第2章 刚体定轴转动	(36)
2.1 刚体的基本运动形式	(36)
2.2 转动定律	(38)
2.3 刚体对定轴的角动量守恒定律	(42)
2.4 刚体定轴转动的动能定理	(44)
习题	(46)
思考题	(47)

## 第2篇 热学基础

第3章 气体动理论	(49)
3.1 对理想气体的认识	(49)

3.2	麦克斯韦速率分布律	(52)
3.3	理想气体的压强公式和温度公式	(54)
3.4	能量按自由度均分原理	(57)
*3.5	气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	(59)
	习题	(61)
	思考题	(62)
<b>第4章</b>	<b>热力学基础</b>	(63)
4.1	热力学第一定律	(63)
4.2	热力学第一定律对理想气体的应用	(65)
4.3	热力学第一定律对循环过程的应用	(69)
4.4	热力学第二定律	(73)
	习题	(77)
	思考题	(78)

## 第3篇 电磁学基础

<b>第5章</b>	<b>静电场</b>	(81)
5.1	电荷与静电场	(81)
5.2	静电场的高斯定理	(87)
5.3	静电场的环路定理 电势	(92)
5.4	静电场中的导体	(95)
5.5	静电场中的电介质	(96)
5.6	电容器的电容	(99)
5.7	电容器储能 电场的能量	(101)
	习题	(102)
	思考题	(104)
<b>第6章</b>	<b>稳恒磁场</b>	(106)
6.1	磁场 毕奥-萨伐尔定律	(106)
6.2	真空中稳恒磁场的安培环路定理	(110)
6.3	带电粒子在磁场中的运动	(113)
6.4	磁场对载流导线的作用力	(115)
6.5	物质中的磁场	(117)
6.6	稳恒电流 电动势	(122)
	习题	(125)
	思考题	(127)
<b>第7章</b>	<b>变化的电场和磁场</b>	(129)
7.1	电磁感应的基本规律 感生电场	(129)
*7.2	电子感应加速器	(133)
7.3	自感和互感 磁场的能量	(134)

7.4 位移电流 .....	(137)
*7.5 麦克斯韦方程组 .....	(139)
7.6 电磁振荡与电磁波 .....	(141)
习题 .....	(146)
思考题 .....	(148)

## 第4篇 振动与波动基础

<b>第8章 机械振动</b> .....	(151)
8.1 简谐振动 .....	(151)
8.2 简谐振动的表示法 .....	(154)
8.3 简谐振动的能量 .....	(156)
8.4 简谐振动的合成 .....	(157)
*8.5 阻尼振动 受迫振动 共振 .....	(160)
习题 .....	(162)
思考题 .....	(164)
<b>第9章 机械波</b> .....	(165)
9.1 波的基本概念 .....	(165)
9.2 平面简谐波的波函数 .....	(168)
*9.3 波的能量与传播 .....	(171)
9.4 惠更斯原理 .....	(173)
9.5 波的叠加与干涉 .....	(174)
*9.6 多普勒效应 .....	(178)
习题 .....	(180)
思考题 .....	(182)
<b>第10章 波动光学</b> .....	(183)
10.1 相干光的获得 杨氏双缝干涉 .....	(183)
10.2 光程和光程差 薄膜干涉 .....	(186)
10.3 光的衍射 .....	(191)
10.4 光的偏振 .....	(197)
习题 .....	(200)
思考题 .....	(201)

## 第5篇 近代物理学基础

<b>第11章 狭义相对论基础</b> .....	(204)
11.1 经典力学的时空观 .....	(204)
11.2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换 .....	(206)
11.3 相对论的时空理论 .....	(209)



11.4	相对论动力学 .....	(212)
	习题 .....	(216)
	思考题 .....	(217)
<b>第 12 章</b>	<b>量子物理基础</b> .....	(218)
12.1	热辐射 量子概念的诞生 .....	(218)
12.2	光电效应 光的本性 .....	(220)
* 12.3	康普顿效应 .....	(223)
12.4	氢原子的玻尔理论 .....	(225)
12.5	实物粒子的波粒二象性 德布罗意波 .....	(228)
12.6	不确定关系 .....	(229)
12.7	波函数 薛定谔方程 .....	(231)
* 12.8	定态薛定谔方程的应用 .....	(232)
* 12.9	原子的壳层结构 .....	(236)
	习题 .....	(237)
	思考题 .....	(238)
	<b>习题参考答案</b> .....	(239)
<b>附录</b>	.....	(247)
	附录 A 矢量基础知识 .....	(247)
	附录 B 单位制和国际单位制 .....	(254)
	附录 C 常用物理学常量的计算取值 .....	(257)
<b>参考文献</b>	.....	(258)

# 绪 论

## 1. 物理学的研究对象

物理学以不同层次、不同形态和不同形式的物质为研究对象，研究它们的内部结构及运动基本规律。这里的“运动”是指物质物理变化的一切过程，包括位置、状态、结构等的变化。物质运动的基本形式有机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核的运动。能量形式经常以运动形式区分。

## 2. 物理学与科学技术的关系

物理学研究的运动是物质运动中最基本最普遍的形式，因而物理学是自然科学中最基础的学科。纵观物理学发展历史，物理学理论的每次重大突破都带来科学技术的革命性发展，科学技术的需要也不时地要求物理理论的支撑，物理学的发展及建立的概念、规律与科学技术有密切关系。

物理理论的第一次突破发生在 17~18 世纪，牛顿力学（经典力学）的建立和热力学的发展推动了其他学科的发展。以蒸汽动力的推广使用为标志促成了第一次科技革命。

物理理论的第二次突破发生在 19 世纪，法拉第发现了电磁感应，麦克斯韦建立了系统的电磁理论，人们成功地制造了各种电力、电信设备，使人类进入生产和应用电能的时代，促成了以工业电气化和无线电通信为标志的第二次科技革命。

到 19 世纪末，以当时的力学、热力学和统计物理、电动力学为三大支柱的物理学理论结合成了一座雄伟而美丽的物理学殿堂，当时人们所知道的物理现象几乎都可以从相应的理论中得到满意解释。这使不少物理学家以为物理学理论已接近完成，但同时也有一些物理实验现象和一些深层次的物理学问题正危及着这座美丽的物理学殿堂，这正是物理学理论第三次突破的原因。20 世纪以前发展起来的物理理论统称为经典物理学。

物理理论的第三次突破发生在 20 世纪初，以普朗克、玻尔、爱因斯坦、海森堡、德布罗意、薛定谔为代表的一批物理学大家，建立了相对论和量子理论，使人类认识了原子、原子核的结构，推动了激光技术、航空航天技术、核技术、计算机技术的发展和普遍使用，生产和生活实现了信息化，而且还扩展和完善了人类对大自然和社会探索的手段。这就是第三次科技革命，人类进入了信息化时代。

20 世纪物理学正在向更加深入和更加广泛的范围发展，向大尺度的恒星、星系探索，追踪宇宙的结构和起源，向微观世界追问，研究物质的基本组成，向其他科学渗透，研究更为复杂的物质结构和运动现象，形成了许多交叉学科和边缘学科。例如，在生物领域形成了生物物理学、量子生物学，在转基因技术和育种技术中都使用了物理学方法，DNA 双螺旋结构的发现利用了物理学手段。

物理学的发展对科学技术发展的推动作用至少可以从以下几个方面来认识：

(1) 物理学的发展促进形成科学技术的前沿新领域。在历史上，相对论关于质能关系的确立、原子核结合能的研究和裂变现象的发现开辟了原子核能利用的新领域。如今物理学的深入发展促进形成了众多工程技术的前沿新领域。例如，激光器的发明、光导纤维的制成在有线通信技术领域引起了一场重大革新。

(2) 物理学的发展为科学技术提供了新的研究手段。利用量子隧道效应制成的扫描隧道显微镜可观察到物体表面原子尺度的细微结构，为表面物理和分子生物学研究提供了有力手段。集成光学的研究成果为制造运算速度更快、抗干扰能力更强的新一代计算机提供了基础。

(3) 物理学的发展也为技术开发提供了新思路。物理学的每项新发现总是以观察到新的现象、找到新的联系、实现新的构想、揭示新的本质属性为标志，从而提供了技术开发的新的可能性。例如，在微电子技术中所用的加工和分析手段，如离子注入、激光退火、卢瑟福背散射谱、俄歇电子谱、X 射线发光谱、二次发射离子质谱，以及高分辨的电子刻蚀、离子刻蚀、同步辐射光刻等，无不是从各个物理学分支的实验室里移植到工业上的。正是这些技术手段的应用推动了微电子学的迅猛发展，从晶体管到集成电路，从大规模集成电路到超大规模集成电路，迅猛增长。

物理学与科学技术的密切关系是由物理学的基础性质决定的。正是因为物理学是其他自然科学以及技术科学的基础学科，它的影响力才会如此深厚，影响面才会如此广阔。也正是因为物理学的基础性质，科学技术需要物理学从根基研究上作出应有的贡献。

### 3. 大学物理课程的性质和目的

大学物理是一门理工科学生必修的公共基础课，通过学习本课程达到以下基本目的。

- (1) 使学生较全面系统地获得自然界各种基本运动形式及其规律的知识；
- (2) 培养学生的科学思想和研究方法，使学生在科学实验、逻辑思维和解决问题的能力等方面都得到基本而系统的训练。

大学物理教学的目的就是给学生打下坚实的物理基础，提高学生的科学素养，开阔思路，激发探索和创新精神，增强学生自我更新知识的能力，以适应飞速发展的科技时代的种种要求。在本课程教学的过程中，要通过各个教学环节逐步培养学生抽象思维能力、逻辑推理能力和自学能力，并特别注意培养学生具有灵活运用所学知识去综合分析问题和解决问题的能力。

# 第1篇 经典力学基础

---

物质的运动形式多种多样，其中最简单、最常见的运动是物体之间或者同一物体各部分之间相对位置的变化，这种运动形式叫做机械运动。经典力学研究宏观物体在低速情况下的机械运动规律及其应用，它是物理学的最重要组成部分。

在17世纪形成了以牛顿运动定律为基础的经典力学。随着经典力学的发展，创立了物理学研究的基本方法，形成了对整个物理学都有价值的若干物理概念。经典力学是学习物理学的重要基础，也是学习自然科学和技术的重要理论基础。

# 第 1 章 质点力学

质点力学研究质点运动的基本规律。其中，质点运动学研究的是物体的位置随时间变化的描述和规律，质点动力学研究的是物体间相互作用力对物体运动的影响。

## 1.1 参照系 运动方程

### 1.1.1 质点

作机械运动的任何实际物体都有一定的大小和形状。我们先讨论下列运动物体的大小和形状对研究问题的影响：①记录列车从郑州到北京的时间；②确定列车通过某桥头的时刻；③确定标枪从投出到落地的距离；④研究旋转乒乓球的发球和接球；⑤记录地球某时刻在公转轨道上的位置；⑥研究郑州天亮的时间。

在①、③、⑤的情况下，运动物体的大小和形状与研究的问题无关紧要，因而可以忽略其大小和形状。用质量等于物体全部质量的点代替物体，用这个点的运动代替物体的运动，这个物体模型称为质点。质点是人们为了方便研究问题、突出问题的主要性质而设想的一个简化物理模型。一个物体能否看成质点由问题的性质和特点决定，不是由物体的大小决定的。

在本章中，如果不加特别说明，物体均看成质点。

### 1.1.2 参照系

2003年10月15日，我国第一艘载人飞船成功升空，假想你和你的同学在飞船上聊天，在“地球人”看来，你们绕地球运动得极快，但你和同学都觉得自己静坐在飞船上。显然，运动和静止的描述是相对的。

其实，从各个物体的相对运动中不难理解运动是绝对的。例如，地球上的房屋、树木等看似静止，但它们随着地球一起绕太阳公转，同时和地球一起绕地轴自转，而太阳又绕银河系中心以很大的速度运动着。然而，只有相对运动才是可以观测和描述的。例如，在行驶的列车上，乘客丢下一个物体，乘客看物体竖直下落，地面上的人看物体作平抛运动；又如在刮北风的时候，骑车向西行的人感觉刮的是西北风。显然，描述物体是否运动以及怎样运动，必须参考另外一些物体。在描述物体运动时，被选为参考的其他物体或物体群称为参照物。

运动的相对性表现为同一物体对不同的参照物运动特点不同。“太阳冉冉升起”、“斗

转星移”、“日食”、“月食”，这些天文现象都是天体相对于一定参照物运动产生的。参照物的选择主要看问题的性质和研究便利。今后，若不特殊说明，都选择地面或相对地面静止的物体作为参照物。

### 1.1.3 质点位置的描述 运动方程

机械运动是物体位置随时间变化的过程，要描述机械运动必须能描述质点的位置。质点的位置可以用坐标系中的坐标表示，由于质点相对于参照物运动，为定量地描述质点在各个时刻相对参照物的位置，通常在参照物上固定一个坐标系，固结有坐标系的参照物称为参照系。最常用的坐标系是直角坐标系，如图1-1所示。质点在运动中， $t$ 时刻处于 $P$ 点，它相对于参照系的位置用 $P$ 点的三个坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示。质点运动过程中，位置是时间 $t$ 的单值函数，表达式为

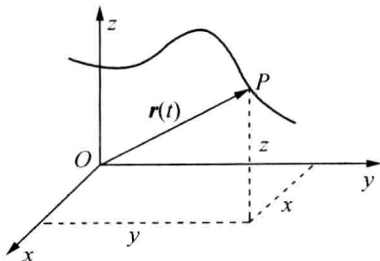


图1-1 质点的位置用坐标系

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

这组方程描述了质点位置随时间变化的规律，称为运动方程的分量式。

质点的位置还可以用几何方法描述。由坐标原点 $O$ 向质点所在的瞬时位置 $P$ 点引一个矢量 $\mathbf{r}(t)$ ，称为位置矢量，简称位矢。 $\mathbf{r}(t)$ 的模代表质点到参考点的距离， $\mathbf{r}(t)$ 与三个坐标轴之间的夹角则代表着该位置的方位。位置矢量随时间变化，记为

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

式(1-2)称为运动方程的矢量式。显然，运动方程的分量式是位矢 $\mathbf{r}(t)$ 在三个坐标轴上的投影，即

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-3)$$

式中， $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的单位矢量。式(1-3)表示的 $\mathbf{r}$ 的大小和方向为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}$$

式中， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 表示 $\mathbf{r}$ 与 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的夹角，它们的余弦叫方向余弦。

## 1.2 速度和加速度

在机械运动中，为了描述质点在一定时间内位置变化情况引进位移概念，为了描述质点运动的快慢程度及运动方向，引入速度概念。

### 1.2.1 位移

如图1-2所示，质点沿一条曲线运动， $\mathbf{r}(t)$ 与 $\mathbf{r}(t+\Delta t)$ 分别是它在 $t$ 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻的位矢。从质点初时刻的位置 $P$ 点向末时刻位置 $Q$ 点所引的有向线段 $\mathbf{PQ}$ ，叫做质

点在  $\Delta t$  时间内的位移, 即

$$\mathbf{PQ} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) = \Delta \mathbf{r} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 说明, 位移  $\Delta \mathbf{r}$  是两个时刻位矢的增量。按位置矢量的分量表示法, 位移表示为

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

若知道了位移矢量的三个分量  $\Delta x = (x_2 - x_1)$ 、 $\Delta y = (y_2 - y_1)$  和  $\Delta z = (z_2 - z_1)$ , 则位移的大小和方向余弦可以按照勾股定理求出:

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}, \quad \cos \alpha = \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|},$$

$$\cos \beta = \frac{\Delta y}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{\Delta z}{|\Delta \mathbf{r}|}$$

位移反映了质点位置的改变情况, 并不能反映质点沿轨道运动的情况。由  $P$  点到  $Q$  点质点经过的轨道长度  $s$ , 叫  $\Delta t$  时间内质点通过的路程。

位移和路程是两个截然不同的概念。路程只有大小, 没有方向, 而且在一般情况下, 路程的大小与位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  也不相等, 见图 1-2。在  $t$  到  $t + \Delta t$  过程中, 质点的路程  $s$  为  $P$ 、 $Q$  两点之间的弧长, 而位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  为  $P$ 、 $Q$  两点之间线段的长度。但是在  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 路程的大小等于位移的大小, 即  $ds = |d\mathbf{r}|$ 。

运动过程中质点到原点  $O$  的距离  $r$  的增量用  $\Delta r$  表示,  $\Delta r = \Delta|r|$ 。在一般情况下, 它与位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  也不相等, 即  $\Delta r \neq |\Delta \mathbf{r}|$ 。例如, 在圆周运动中质点运动半周, 若以圆心为坐标原点, 则质点到原点  $O$  的距离  $r$  是一个常量,  $\Delta r = 0$ , 但是质点位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  等于直径。

## 1.2.2 速度

在匀速直线运动时, 质点的运动方向一定, 运动快慢均匀, 我们定义, 质点运动速度的大小为  $v = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 。在一般曲线运动中, 如何描述速度的大小和方向呢? 假设质点在时间  $\Delta t$  内的位移为  $\Delta \mathbf{r}$ , 从等效的角度看, 如果质点在这段时间内沿  $\Delta \mathbf{r}$  的直线做匀速直线运动, 那么它的位移也是  $\Delta \mathbf{r}$ , 沿这条直线的速度是  $\Delta \mathbf{r}/\Delta t$ , 这是一种平均的方法。

位移  $\Delta \mathbf{r}$  与发生这个位移所用时间  $\Delta t$  的比值叫做质点在  $\Delta t$  时间内的平均速度, 可表示为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-5)$$

显然, 平均速度不是运动的真实快慢, 不能精确描述质点在某个位置或某个时刻的运动情况。但时间  $\Delta t$  越短, 描述越精确。如图 1-3 所示, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $Q$  点将无限地靠近  $P$  点, 运动快慢可看成均匀的, 弧  $PQ$ 、弦  $PQ$  及切线三者方向也趋于一样, 这时平均速度描述了  $t$  时刻的运动情况。

平均速度在  $\Delta t \rightarrow 0$  时的极限可以用来描述质点在  $t$  时刻

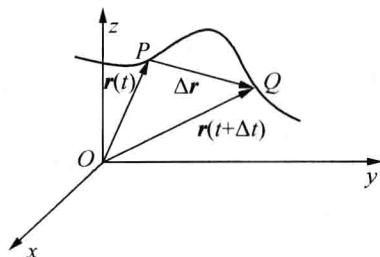


图 1-2 质点的位移

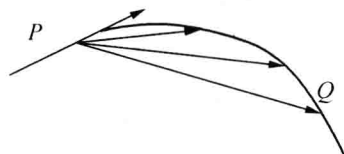


图 1-3 平均速度与瞬时速度

的运动情况,称为瞬时速度,简称速度,可表示为

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1-6)$$

可见,位矢对时间的一阶导数等于速度。

与速度定义类似, $\Delta t$ 时间内质点通过的路程 $\Delta s$ 与 $\Delta t$ 的比值称为平均速率,用 $\bar{v}$ 表示

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

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速率的极限值称为瞬时速率,简称速率,可用下式表示:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-8)$$

速度的方向与 $d\boldsymbol{r}$ 方向相同。 $d\boldsymbol{r}$ 的方向沿质点运动轨道的切线方向,因此质点的速度方向沿轨道切线并指向质点的运动方向。速度的大小是

$$|\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| \quad (1-9)$$

$|d\boldsymbol{r}|$ 为位移元大小,正是质点在 $dt$ 时间内通过的路程 $ds$ 。因此,速度的大小等于速率。在直角坐标系中 $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$ ,瞬时速度表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} \quad (1-10)$$

则沿三个坐标轴的速度分量为

$$v_x = dx/dt, v_y = dy/dt, v_z = dz/dt \quad (1-11)$$

速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-12)$$

在经典力学中,质点的运动状态用位置和速度描写。在宏观范围内,运动质点在任一时刻,具有唯一的、确定的运动状态,运动状态随时间连续变化。

### 1.2.3 加速度

质点在运动中不仅位置变化,而且速度 $\boldsymbol{v}$ 常随时间变化。为了描述速度的变化情况(快慢和方向),运动学引入另一个重要物理量——加速度。

如图1-4所示, $t$ 时刻质点在 $P$ 点,速度是 $\boldsymbol{v}(t)$ ;  $t + \Delta t$ 时刻质点在 $Q$ 点,速度是 $\boldsymbol{v}(t + \Delta t)$ 。在 $\Delta t$ 时间内速度的增量是

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(t + \Delta t) - \boldsymbol{v}(t)$$

$\Delta \boldsymbol{v}/\Delta t$ 称为 $\Delta t$ 时间内质点的平均加速度,用 $\bar{\boldsymbol{a}}$ 表示,即

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均加速度的极限为 $t$ 时刻的瞬时加速度,简称加速度,用 $\boldsymbol{a}$ 表示,即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-13)$$

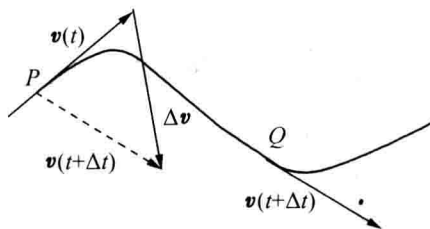


图1-4 加速度



加速度等于速度对时间的一阶导数或位矢对时间的二阶导数。在直角坐标系中，加速度可表示为

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} \quad (1-14)$$

加速度的三个分量是

$$a_x = dv_x/dt, a_y = dv_y/dt, a_z = dv_z/dt \quad (1-15)$$

加速度的大小是

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-16)$$

由式(1-13)知，加速度 $\mathbf{a}$ 的方向沿 $d\mathbf{v}$ 的方向。在曲线运动中， $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{v}$ 不共线， $\mathbf{a}$ 的方向指向曲线凹方。只有质点作直线运动时 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{v}$ 都在运动轨道上。

## 1.3 直线运动和圆周运动的速度及加速度

### 1.3.1 直线运动中的速度和加速度

质点沿 $x$ 轴作直线运动，位置矢量、速度和加速度的方向一定在 $x$ 轴上，则位置矢量可以写成 $\mathbf{r} = xi$ ，速度可以写成 $\mathbf{v} = vi$ ，加速度可以写成 $\mathbf{a} = ai$ ，根据速度的定义式

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i}$$

当 $dx/dt > 0$ 时，速度与 $x$ 轴同向；当 $dx/dt < 0$ 时，速度与 $x$ 轴反向。质点作直线运动时，速度一般写为

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (1-17)$$

根据加速度的定义式

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv}{dt}\mathbf{i}$$

当 $dv/dt > 0$ 时，加速度与 $x$ 轴同向；当 $dv/dt < 0$ 时，加速度与 $x$ 轴反向。质点作直线运动时，加速度一般写为

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (1-18)$$

### 1.3.2 圆周运动的角速度

如图1-5所示，质点沿半径为 $R$ 的圆周运动时，在微小时间 $\Delta t$ 内从 $P$ 点运动到 $Q$ 点。在该段时间内质点通过的路程为沿圆周的弧长 $\Delta s$ ，它所对应的圆心角为 $\Delta\theta$ （角位移），则

$$\Delta s = R\Delta\theta \quad (1-19)$$

质点运动的速率为

$$v = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega \quad (1-20)$$

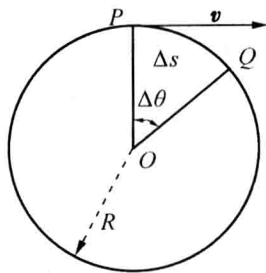


图1-5 圆周运动中的角速度

式中， $\omega = d\theta/dt$ 称为质点绕 $O$ 点的角速度，表示质点绕固定点运动的快慢。而前面讲的