

University

# 大学物理学

*Physics*

上册

主 编 王登龙

副主编 杨友田 王凤姣 谢月娥

高等教育出版社

University

Physics

# 大学物理学

上册

主 编 王登龙

副主编 杨友田 王凤姣 谢月娥

DAXUE WULIXUE

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),并在“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》的基础上改编而成的。全书分为上、下两册,上册内容包括力学基础篇、热学篇;下册内容包括电磁学篇、波动光学篇和量子论篇。本书作为工科大学物理教材及理科非物理类专业大学物理教材的改革尝试,采用了“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽力反映新科技发展,注重各部分知识之间的活化联系,同时保持教材内容难度适宜。

本书可作为高等工科大学各专业的大学物理教材,也可作为综合性大学和师范院校非物理类专业的教材或参考书,还可供社会读者阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/王登龙主编.--北京:高等教育出版社,2018.1

ISBN 978-7-04-046605-8

I. ①大… II. ①王… 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(2016)第 252335 号

策划编辑 忻蓓

责任编辑 马天魁

封面设计 姜磊

版式设计 马敬茹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 张小镝

责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 17.75  
字 数 400千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2018年1月第1版  
印 次 2018年1月第1次印刷  
定 价 35.80元

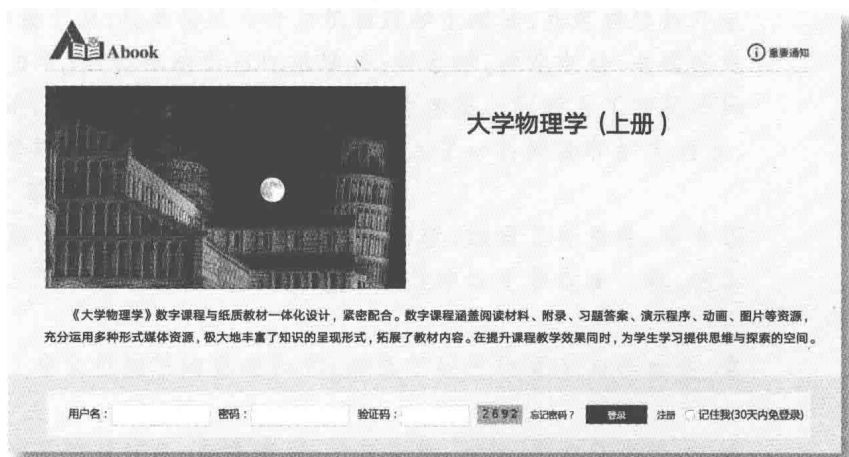
本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 46605-00

# 大学物理学

(上册)

主编 王登龙

- 1 电脑访问<http://abook.hep.com.cn/1246261>，或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录，进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号（20 位密码，刮开涂层可见），或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。
- 4 点击“进入学习”，开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制，部分内容无法在手机端显示，请按提示通过电脑访问学习。

如有使用问题，请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



<http://abook.hep.com.cn/1246261>

# 前 言

本书是为理工科大学生编写的大学物理学教材,其内容涵盖了教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)的全部知识点,是在“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》的基础上改编而成的。

本书的改编是以波为整体线索,从波的分类、产生机制、表达形式把物理的各个知识点连接起来。波分为经典波和量子波;经典波又可分为机械波和电磁波;从经典波的产生机制引出力学篇:运动学和动力学;从电磁波引出电磁学篇:静电场、恒定电场、电磁感应和电磁波;从量子波引出量子论;最后是插入气体动理论和热力学篇。同时为了满足不同层次的教学要求,保持教材内容的连续性和系统性,本书也编入了一些提高和扩充内容,从而形成了“高、宽、新、活、宜”等鲜明特色:

1. 高视点选择经典内容:删去了与中学物理简单重复的内容,加强了矢量性;将牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野;将电磁学与波动光学连在一起,使电磁波归类,更方便教学。

2. 努力拓宽知识面:引入了非线性物理的基础知识;加强了近代物理学的相对论、量子论的基础知识。

3. 尽力反映新科技:如介绍了熵与信息、全息照相、光纤通信、液晶、纳米科学技术、玻色-爱因斯坦凝聚态等科研前沿领域的知识。

4. 注重知识之间的活化联系:教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,便于学生阅读和理解。

5. 开“窗口”,重视科学素质训练:这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,使之得到科学素质和创造能力的基本训练。同时保持普通物理基础知识的层次,难度适宜,可操作性强。

说明:

(1) 教材中带“\*”的章节一般为开“窗口”的内容,可供教师自行取舍;

(2) 书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;

(3) 不同院校不同专业的物理教学计划时数存在差异,在使用本教材时,若将带“\*”号的章节和小字部分除去,仍不影响知识的整体性。教学时数可掌握在96~128学时范围内。

全书分为上、下两册,上册内容包括力学基础篇、热学篇;下册内容包括电磁学篇、波动光学篇、量子论篇。王凤姣负责改编力学、振动与波及其相应章节的阅读材料和习题;杨友田负责改编热学篇、量子物理篇的所有内容;谢月娥负责改编电磁学篇的所有内容;王登龙负责改编相对论、波动光学篇的全部内容。最后由王登龙教授负责全书的修改和定稿工作。教育部高等学校物理学类专业教指委委员、江苏大学颜晓红教授仔细审查了

## II 前言

此书。高等教育出版社高建、王红波等相关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量辛勤的劳动,在此表示感谢。

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有不妥和疏漏之处,恳求读者批评指正。

编者

2016年8月

# 目 录

## 力学基础篇/1

### 第 1 章 质点运动学/3

#### 1.1 参考系 坐标系 物理模型/3

1.1.1 参考系/3

1.1.2 坐标系/3

1.1.3 物理模型/5

#### 1.2 位置矢量 位移 速度 加速度/6

1.2.1 位置矢量/6

1.2.2 位移/7

1.2.3 速度/7


1.2.4 加速度/9

#### 1.3 曲线运动的描述 运动学中的两类问题/11

1.3.1 曲线运动的描述/11

1.3.2 运动学中的两类问题/16

#### 1.4 相对运动/19

 阅读材料一 物理学中的简单性与对称性概述/22

本章提要/22

习题/23

### 第 2 章 质点动力学/25

#### 2.1 牛顿运动定律/25

2.1.1 牛顿第一定律/25

2.1.2 牛顿第二定律 惯性质量 引力质量/26

2.1.3 牛顿第三定律/27

2.1.4 牛顿三大定律的适用条件/27

2.1.5 牛顿定律的应用/28

\* 2.1.6 国际单位制和量纲/30

\* 2.2 非惯性系 惯性力/31

2.3 动量 动量守恒定律 \* 质心运动定理/34

2.3.1 质点的动量定理/34

2.3.2 质点系的动量定理/36

2.3.3 质点系的动量守恒定律/37

2.3.4 动量定理及动量守恒定律的典型应用实例/38

\* 2.3.5 质心和质心运动定理/42

#### 2.4 功 动能 势能 机械能守恒定律/44

2.4.1 功 功率/44

2.4.2 动能定理/48

2.4.3 势能/49

\* 2.4.4 势能曲线/51

2.4.5 质点系的动能定理与功能原理/53

2.4.6 机械能守恒定律/54


2.4.7 能量守恒与转化定律/54

\* 2.5 理想流体的伯努利方程/57

2.5.1 理想流体/57

2.5.2 不可压缩流体的连续性方程/58

2.5.3 液体动力学的处理方法——伯努利方程/59

 阅读材料二 时空对称性和守恒定律/63

本章提要/64

习题/64

### 第 3 章 刚体力学基础/68

#### 3.1 刚体定轴转动的描述/68


3.1.1 刚体的基本运动/68


3.1.2 刚体定轴转动的描述/70

#### 3.2 力矩 刚体定轴转动的转动定律/71

3.2.1 力矩/71


3.2.2 刚体定轴转动的转动定律/72

- 3.2.3 转动惯量/73
- 3.2.4 转动定律的应用/76
- 3.3 刚体定轴转动的动能定理/78
  - 3.3.1 刚体的转动动能/78
  - 3.3.2 力矩的功/79
  - 3.3.3 刚体定轴转动的动能定理/79
  - 3.3.4 刚体的机械能守恒定律 /80
- 3.4 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律/82
  - 3.4.1 角动量 质点的角动量定理及角动量守恒定律 /82
  - 3.4.2 刚体对轴的角动量 刚体定轴转动的角动量定理/86
  - 3.4.3 刚体对轴的角动量守恒定律/87
-  阅读材料三 宇航动力学问题/90
  - 本章提要/91
  - 习题/91
- 第4章 狭义相对论 /96**
  - 4.1 伽利略变换和经典力学时空观/96
    - 4.1.1 伽利略变换 经典力学时空观/96
    - 4.1.2 伽利略相对性原理/97
  - 4.2 狭义相对论产生的实验基础和 历史条件/98
  - 4.3 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换/101
    - 4.3.1 狭义相对论的两条基本原理/101
    - 4.3.2 洛伦兹变换/102
    - \* 4.3.3 洛伦兹变换式的具体推导/103
    - 4.3.4 洛伦兹速度变换/105
  - 4.4 狭义相对论时空观/107
    - 4.4.1 同时的相对性/107
    - 4.4.2 长度的相对性/109
    - 4.4.3 时间间隔的相对性/110
    - 4.4.4 因果关系/111
  - 4.5 狭义相对论动力学/112
    - 4.5.1 动量、质量与速度的关系/112
    - 4.5.2 质量和能量的关系/114
    - 4.5.3 动量和能量的关系/117

-  阅读材料四 广义相对论简介/118
  - 本章提要/118
  - 习题/119

**第5章 机械振动/122**

- 5.1 简谐振动的动力学特征/122
  - 5.1.1 弹簧振子模型/122
  - 5.1.2 微振动的简谐近似/123
- 5.2 简谐振动的运动学/125
  - 5.2.1 简谐振动的运动学方程/125
  - 5.2.2 描述简谐振动的三个重要参量/125
  - 5.2.3 简谐振动的旋转矢量表示法/127
- 5.3 简谐振动的能量/130
- 5.4 简谐振动的合成 \* 振动的频谱分析/132
  - 5.4.1 同方向同频率简谐振动的合成/133
  - 5.4.2 同方向不同频率简谐振动的合成/134
  - \* 5.4.3 振动的频谱分析/136
  - \* 5.4.4 两个相互垂直的同频率简谐振动的合成/137
  - \* 5.4.5 两个相互垂直的不同频率简谐振动的合成/139
- 5.5 阻尼振动 受迫振动 共振/140
  - 5.5.1 阻尼振动/140
  - 5.5.2 受迫振动/141
  - 5.5.3 共振/142

-  阅读材料五 非线性振动/143
  - 本章提要/143
  - 习题/144

**第6章 机械波/148**

- 6.1 机械波的形成和传播/148
  - 6.1.1 机械波产生的条件/148
  - 6.1.2 横波和纵波/148
  - 6.1.3 简谐波/150
  - 6.1.4 波线和波面/150
  - \* 6.1.5 物体的弹性形变/151

- 6.1.6 描述波动的几个物理量/152
- 6.2 平面简谐波的波函数/153
  - 6.2.1 平面简谐波的波函数/154
  - 6.2.2 波函数的物理意义/155
  - \* 6.2.3 波动微分方程与波速/157
- 6.3 波的能量 \* 声强/162
  - 6.3.1 波的能量和能量密度/162
  - 6.3.2 波的能量流和能流密度/164
  - 6.3.3 波的吸收/166
  - \* 6.3.4 声压、声强和声强级/166
- 6.4 惠更斯原理 波的叠加和干涉/167
  - 6.4.1 惠更斯原理/167
  - 6.4.2 波的叠加原理/170
  - 6.4.3 波的干涉/170
- 6.5 驻波/174

- 6.5.1 驻波方程/174
- 6.5.2 驻波的特点/175
- 6.5.3 半波损失/177
- \* 6.5.4 简正模式(自本征振动)/177
- 6.6 多普勒效应 \* 冲击波/179
  - 6.6.1 多普勒效应/179
  - \* 6.6.2 光波多普勒效应/181
  - \* 6.6.3 冲击波/181
- \* 6.7 色散 波包 群速度/183
  - 6.7.1 色散/183
  - 6.7.2 波包/183
  - 6.7.3 群速度/184

 阅读材料六 非线性波 孤波/185

本章提要/185


习题/186

## 热 学 篇/191

### 第 7 章 气体动理论基础/193

- 7.1 平衡态 温度 理想气体物态方程/193
  - 7.1.1 平衡态/193
  - 7.1.2 热力学第零定律 温度/194
  - 7.1.3 理想气体物态方程/195
- 7.2 理想气体压强公式/196
  - 7.2.1 理想气体分子模型和统计假设/196
  - 7.2.2 理想气体的压强公式/197
- 7.3 温度的统计解释/198
  - 7.3.1 温度的统计解释/198
  - 7.3.2 气体分子的方均根速率/199
- 7.4 能量均分定理 理想气体的内能/199
  - 7.4.1 自由度/200
  - 7.4.2 能量均分定理/201
  - 7.4.3 理想气体的内能/201
- 7.5 麦克斯韦分子速率分布律/203
  - 7.5.1 气体分子的速率分布 分布函数/203
  - 7.5.2 麦克斯韦速率分布规律/205

- 7.5.3 分子速率的 3 个统计值/206
- 7.5.4 麦克斯韦分布曲线的性质/207
- \* 7.6 玻耳兹曼分布律/209
  - 7.6.1 麦克斯韦速度分布律/209
  - 7.6.2 玻耳兹曼分布律/209
- 7.7 分子的平均碰撞频率和平均自由程/211
  - 7.7.1 平均碰撞频率/211
  - 7.7.2 平均自由程/212
- \* 7.8 气体内的输运过程/213
  - 7.8.1 扩散/213
  - 7.8.2 热传导/214
  - 7.8.3 黏性/215

 阅读材料七 热大爆炸与宇宙膨胀/217


本章提要/217

习题/218

### 第 8 章 热力学基础/221

- 8.1 内能 功和热量 准静态过程/221
  - 8.1.1 内能 功和热量/221

8.1.2	准静态过程/221	8.6.1	开尔文表述/240
8.1.3	准静态过程的功与热量/222	8.6.2	克劳修斯表述/241
8.2	热力学第一定律/223	8.6.3	自然过程的方向性/242
8.2.1	热力学第一定律/223	8.6.4	可逆过程与不可逆过程/243
8.2.2	热力学第一定律在理想气体等值过程中的应用/224	8.7	卡诺定理 克劳修斯熵/244
8.3	气体的摩尔热容/226	8.7.1	卡诺定理/244
8.3.1	热容与摩尔热容/226	8.7.2	克劳修斯等式与不等式/245
8.3.2	理想气体的摩尔热容/227	8.7.3	克劳修斯熵/246
8.4	绝热过程/229	8.7.4	熵增加原理/247
8.4.1	绝热过程/229	8.8	热力学第二定律的统计意义
8.4.2	准静态绝热过程/230		玻耳兹曼熵/250
8.5	循环过程 卡诺循环/233	8.8.1	热力学第二定律的微观意义/250
8.5.1	正循环 热机/234	8.8.2	热力学概率与玻耳兹曼熵/251
8.5.2	逆循环 制冷机/235		
8.5.3	卡诺循环/236		
8.6	热力学第二定律/240		

 阅读材料八 耗散结构/254

本章提要/254

习题/255

 附录 I 矢量/259

 附录 II 中华人民共和国法定计量单位/271

 附录 III 常用物理常量表/271

 附录 IV 历年诺贝尔物理学奖获得者/271

 习题答案/271

# 力学基础篇

力学是物理学中最古老和发展最完美的学科。它起源于公元前4世纪古希腊学者亚里士多德关于力产生运动的说法,以及我国《墨经》中关于杠杆原理的论述等。但其成为一门科学理论则始于17世纪伽利略论述惯性运动,继而牛顿提出了力学三个运动定律。以牛顿运动定律为基础的力学理论称为牛顿力学或经典力学。它所研究的对象是物体的机械运动。经典力学有严谨的理论体系和完备的研究方法,如观察现象,分析和综合实验结果,建立物理模型,应用数学表述,作出推论和预言,以及用实践检验和校正结果等。因此,它曾被人们誉为完美普遍的理论而兴盛了约三百年。直至20世纪初才发现它在高速和微观领域的局限性,从而在这两个领域分别被相对论和量子力学所取代,但在一般的技术领域,如机械制造、土木建筑、水利设施、航空航天等工程技术中,经典力学仍然是必不可少的重要的基础理论。

本篇主要讲述质点力学、刚体的定轴转动,以及机械振动和机械波。着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律(并简要介绍了对称性与守恒定律的关系)。狭义相对论的时空观和牛顿力学联系紧密,亦可归入力学范畴。



# 第1章 质点运动学

力学所研究的是物体机械运动(即宏观物体之间或物体内部各部分之间相对位置的改变)的规律. 在经典力学中,通常将力学分为运动学、动力学和静力学. 本章只研究运动学规律. 运动学是从几何的观点来描述物体的运动,即研究物体的空间位置随时间的变化关系,不涉及引发物体运动和改变运动状态的原因.

## 1.1 参考系 坐标系 物理模型

众所周知,运动是物质的存在形式,运动是物质的固有属性. 任何物体在任何时刻都在不停地运动着. 例如,地球在自转的同时绕太阳公转,太阳又相对于银河系为中心以大约  $250 \text{ km/s}$  的速率运动,而我们所处的银河系又相对于其他银河系大约以  $600 \text{ km/s}$  的速率运动着. 总之,绝对不运动的物体是不存在的. 从这种意义上讲,运动是绝对的.

然而本书所研究的物体的运动都是在一定环境和特定条件下的运动. 例如,当说一列火车开动了,这显然是指火车相对于地球(即车站)而言的. 离开特定的环境、条件谈论运动没有任何意义. 正如恩格斯所说:“单个物体的运动是不存在的——只有在相对的意义下才可以谈运动.”因此运动的描述又具有相对性.

为了描述物体的运动必须作三点准备,即选择参考系、建立坐标系、提出物理模型.

### 1.1.1 参考系

运动具有绝对性,但运动的描述却具有相对性. 因此,在确定研究对象的位置时,必须先选定一个标准物体(或相对静止的几个物体)作为基准. 那么这个被选作标准的物体或物体群,就称为参考系.

同一物体的运动,由于所选参考系不同,对其运动的描述就会不同. 例如在匀速直线运动的车厢中,物体的自由下落,相对于车厢是作直线运动;相对于地面,却是作抛物线运动;相对于太阳或其他天体,运动的描述则更为复杂. 这一事实充分说明了运动的描述是相对的.

从运动学的角度讲,参考系的选择是任意的,通常以对问题的研究最方便、最简单为原则. 研究地球上物体的运动,在大多数情况下,以地球为参考系最为方便(以后如不作特别说明,研究地面上物体的运动,都是以地球为参考系). 但是,当在地球上发射人造“宇宙小天体”时,如“宇宙小天体”进入绕太阳运动的轨道,则应以太阳为参考系.

### 1.1.2 坐标系

要想定量地描述物体的运动,就必须在参考系上建立适当的坐标系. 在力学中常用的

有直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、球面坐标系或柱面坐标系等。

### 1. 直角坐标系

直角坐标系也称笛卡儿坐标系,它由三条共点且互相垂直的射线组成(图 1.1);三条射线的交点  $O$  称为坐标系的原点,每一条射线分别称为坐标系的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标轴;三个坐标轴的方向分别由三个单位常矢量  $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$  表示. 如果物体局限于在一个平面内运动,通常用二维直角坐标系(只有两个独立坐标或独立参量)来定量描述其运动情况.

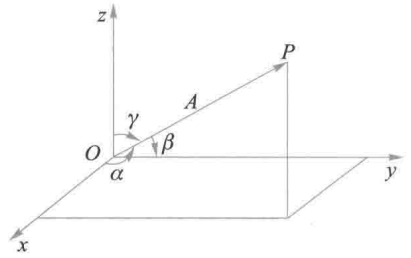


图 1.1 直角坐标系

在直角坐标系中,任意矢量  $\mathbf{A}$  可以表示为

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k} \quad (1.1)$$

矢量的大小或模表示为

$$|\mathbf{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1.2)$$

矢量的方向也可以由它与三个坐标轴之间的夹角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  来表示,因此,这三个夹角的余弦也称矢量的方向余弦. 在直角坐标系中,方向余弦满足关系

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1.3)$$

同时,在直角坐标系中,坐标轴的单位矢量是常矢量,因此满足

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = 0, \quad \frac{d\mathbf{j}}{dt} = 0, \quad \frac{d\mathbf{k}}{dt} = 0 \quad (1.4)$$

### 2. 自然坐标系

如图 1.2 所示,当质点运动轨迹为已知时,在运动轨迹上任取一点  $O$  为坐标原点,用质点距离原点的轨道长度  $s$  来确定质点任意时刻的位置,以轨迹切向和法向的单位矢量  $(\mathbf{e}_t, \mathbf{e}_n)$  作为其独立的坐标方向,这样的坐标系,称为自然坐标系,  $s$  称为自然坐标. 以后将会看到,用自然坐标来描述一般曲线运动,是很方便的.

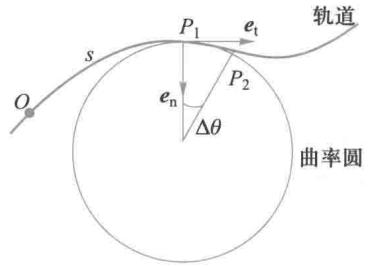


图 1.2 自然坐标系

自然坐标系将矢量分解到法向和切向进行研究,法向分量与轨道的曲率有关. 设轨道上  $P_1$  和邻近点  $P_2$  切线之间的夹角为  $\Delta\theta$ , 两点间的路程为  $\Delta s$ , 则  $P_1$  的曲率为

$$k = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} \quad (1.5)$$

$P_1$  的曲率半径为

$$\rho = \frac{1}{k} = \frac{ds}{d\theta} \quad (1.6)$$

过轨道上一点  $P_1$ , 可以作很多与轨道相切的圆, 如果圆的曲率与  $P_1$  的曲率半径相等, 称这个圆为  $P_1$  的曲率圆. 曲率和曲率半径反映了曲线的弯曲程度.

在自然坐标系中, 任意矢量  $\mathbf{A}$  可以表示为

$$\mathbf{A} = A_n \mathbf{e}_n + A_t \mathbf{e}_t \quad (1.7)$$

### 3. 极坐标系

在参考系上选取一点  $O$  作为平面极坐标系的原点 (常称为极点), 在物体运动平面内以  $O$  点为端点引一条有刻度的射线  $Ox$  为极轴, 这样就建立了一个平面极坐标系 (图 1.3). 在极坐标系中, 用  $(r, \theta)$  来确定一点  $P$  的位置,  $r$  表示  $P$  点距原点的距离,  $\theta$  表示极轴与  $OP$  直线的夹角.

在无限小时间范围内, 矢量  $\mathbf{A}$  的变化率可表示为 (图 1.4)

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{d(A\mathbf{e}_r)}{dt} = \frac{dA}{dt}\mathbf{e}_r + A\frac{d\theta}{dt}\mathbf{e}_t \quad (1.8)$$

其中  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_t$  分别表示沿径向和切向的单位矢量.

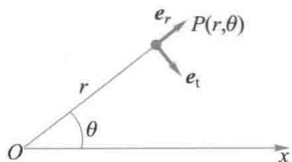


图 1.3 极坐标系

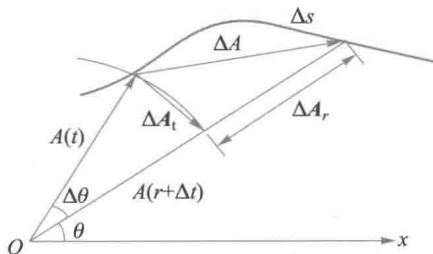


图 1.4 矢量变化率

总的说来, 当参考系选定后, 无论选择何种坐标系, 物体的运动性质都不会改变. 然而, 坐标系选择得当, 可使计算简化.

#### 1.1.3 物理模型

任何一个真实的物理过程都是极其复杂的. 为了寻找某过程中最本质、最基本的规律, 总是根据所提问题 (或所要回答的问题), 对真实过程进行理想化的简化, 然后经过抽象提出一个可供数学描述的物理模型.

现在所提的问题是确定物体在空间的位置. 当物体的线度比它运动的空间范围小很多时, 例如绕太阳公转的地球和调度室中铁路运行图上的列车等; 或当物体作平动时, 物体上各部分的运动情况 (轨迹、速度、加速度) 完全相同. 这时可以忽略物体的形状、大小, 而把它看成一个具有一定质量的点, 并称之为质点.

若物体的运动在上述两种情形之外, 还可推出质点系的概念. 即把这个物体看成由许许多多满足第一种情况的质点所组成的系统. 如果弄清楚了组成这个物体的各个质点的运动情况, 那么也就描述了整个物体的运动.

在力学中除了质点模型之外, 在后续章节中还会遇到刚体、理想流体、谐振子及理想弹性介质等物理模型.

综上所述:选择合适的参考系,以方便确定物体的运动性质;建立恰当的坐标系,以定量地描述物体的运动;提出较准确的物理模型,以确定所提问题最基本的运动规律.

## 1.2 位置矢量 位移 速度 加速度

### 1.2.1 位置矢量

为了表示运动质点的位置,首先应该选参考系,然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴,参看图 1.5. 质点  $P$  在直角坐标系中的位置可由  $P$  所在点的三个坐标  $x, y, z$  来确定,或者用从原点  $O$  到  $P$  点的有向线段  $\overrightarrow{OP} = \boldsymbol{r}$  来表示,矢量  $\boldsymbol{r}$  叫作位置矢量(简称位矢,又称径矢).相应地,坐标  $x, y, z$  也就是位矢  $\boldsymbol{r}$  在坐标轴上的三个分量.

在直角坐标系中,位矢  $\boldsymbol{r}$  可以表示成

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1.9)$$

式中  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$  分别表示沿  $x, y, z$  三轴正方向的单位矢量. 位矢  $\boldsymbol{r}$  的大小为

$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.10)$$

位矢的方向余弦是

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$

质点的机械运动是质点的空间位置随时间变化的过程. 这时质点的坐标  $x, y, z$  和位矢  $\boldsymbol{r}$  都是时间  $t$  的函数. 表示运动过程的函数式称为运动方程,可以写作

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.11a)$$

或

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.11b)$$

知道了运动方程,就能确定任一时刻质点的位置,从而确定质点的运动. 力学的主要任务之一,正是根据各种问题的具体条件,求解质点的运动方程.

质点在空间的运动路径称为轨道. 质点的运动轨道为直线时,称为直线运动. 质点的运动轨道为曲线时,称为曲线运动. 从式(1.11a)中消去  $t$  即可得到轨道方程. 式(1.11a)就是轨道的参数方程.

轨道方程和运动方程最明显的区别,就在于轨道方程不是时间  $t$  的显函数. 例如,已知某质点的运动方程为

$$x = 3 \sin \frac{\pi}{6} t, \quad y = 3 \cos \frac{\pi}{6} t, \quad z = 0$$

式中  $t$  以秒(s)计,  $x, y, z$  以米(m)计. 从  $x, y$  两式中消去  $t$  后,得轨道方程

$$x^2 + y^2 = 9, \quad z = 0$$

其表明质点是在  $z=0$  的平面内,作以原点为圆心,半径为 3 m 的圆周运动.

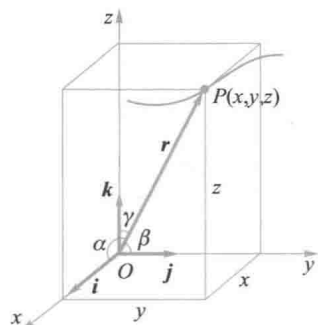


图 1.5 直角坐标系下的位矢

### 1.2.2 位移

如图 1.6 所示, 设质点沿曲线轨道  $\widehat{AB}$  运动, 在  $t$  时刻, 质点在  $A$  处, 在  $t+\Delta t$  时刻, 质点运动到  $B$  处,  $A, B$  两点的位矢分别由  $r_1$  和  $r_2$  表示, 质点在  $\Delta t$  时间间隔内位矢的增量

$$\Delta r = r_2 - r_1 \quad (1.12)$$

称为位移, 它是描述物体位置变动大小和方向的物理量, 在图上就是由起始位置  $A$  指向终止位置  $B$  的一个矢量. 位移是矢量, 它的运算遵守矢量加法的平行四边形法则(或三角形法则).

如图 1.7 所示, 位移的模只能记作  $|\Delta r|$ , 不能记作  $\Delta r$ .  $\Delta r$  通常表示位矢模的增量, 即  $\Delta r = |r_2| - |r_1|$ , 而  $|\Delta r|$  则是位矢增量的模(即位移的模), 而且在通常情况下  $|\Delta r| \neq \Delta r$ .

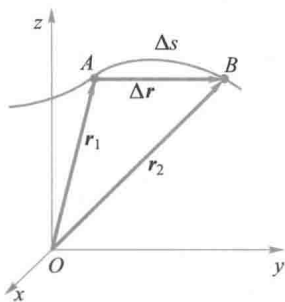


图 1.6 位移

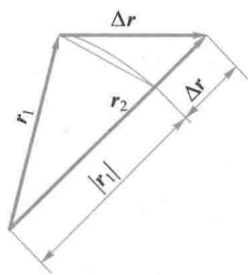


图 1.7 位移的大小

必须注意, 位移表示物体位置的改变, 并非质点所经历的路程. 例如在图 1.6 中, 位移是有向线段  $\overrightarrow{AB}$ , 它的量值  $|\Delta r|$  为割线  $AB$  的长度. 路程是标量, 即曲线  $\widehat{AB}$  的长度, 通常记作  $\Delta s$ . 一般来说,  $|\Delta r| \neq \Delta s$ . 显然, 只有在  $\Delta t$  趋近于零时, 才有  $|dr| = ds$ . 应当指出, 即使在  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $|dr| = dr$  这个等式也不成立.

在直角坐标系中, 位移的表达式为

$$\Delta r = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1.13)$$

位移的模为

$$|\Delta r| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1.14)$$

位移和路程的单位均是长度的单位, 国际单位制(SI)中为米(m).

### 1.2.3 速度

研究质点的运动, 不仅要知道质点的位移, 还必须知道在多长时间通过这段位移, 亦即要知道质点运动的快慢程度.

如图 1.6 所示, 在时刻  $t$  到  $t+\Delta t$  这段时间内, 质点的位移为  $\Delta r$ , 那么  $\Delta r$  与  $\Delta t$  的比值, 称为质点在  $t$  时刻附近  $\Delta t$  时间内的平均速度: