



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus  
新核心

理工基础教材

# 大学物理教程

(上册)

第三版

上海交通大学物理教研室 组编



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

要對容內

# Nucleus 新核心

理工基础教材

# 大学物理教程

(上册)

# 第三版

上海交通大学物理教研室 组编



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

林娃收财退案国杯本育娃等高职普 “正二十”



林娃收财退案国杯本育娃等高职普 “正二十”

## 内容提要

本书由上海交通大学物理教研室教师根据多年教学经验和实践编写而成。本书内容简练,重点突出,基础扎实。全书分为上、下两册。上册内容包括:力学、机械振动、机械波和热物理学;下册内容包括:电磁学、波动光学和量子物理。

本书为非物理专业的大学物理教程,可作为高等院校工科各专业的大学物理教科书,也可作为综合性大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 上册 / 上海交通大学物理教研室组编. —3版. —上海:上海交通大学出版社,2019  
ISBN 978-7-313-22047-9

I. ①大… II. ①上… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 219513 号

## 大学物理教程(上册)(第三版)

组 编:上海交通大学物理教研室

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:常熟市文化印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:466 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版 2019 年 10 月第 3 版

书 号:ISBN 978-7-313-22047-9

定 价:45.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:23.5

印 次:2019 年 10 月第 8 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



# 前 言

根据 2010 年教育部颁发的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”，为了适应物理学和科学技术的发展，结合多年的教学实践，我们编写了这套大学物理教材。在编写过程中，我们借鉴了部分国内外新版优秀教材，力求贯彻理论体系的少而精、理论联系实际的原则，在做到加强理论基础的叙述、加强对学生分析与实际问题能力培养的同时，增加对近现代物理知识和观点的介绍。在教材编写过程中，我们注重把培养学生具有科学的思维能力、辩证分析的能力和科学的研究方法作为目标。同时，我们还注重加强工科大学生的科学素养的培养，拓宽学生的科学视野。

全书采用国际单位制，书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

全书分为上、下两册。上册包括力学、机械振动、机械波和热物理学。下册包括电磁学、波动光学和量子物理。本书另配有一套完整的电子教案，与主教材内容对应。电子教案提供 PowerPoint 格式的文件，在此基础上，可以进行二次开发并形成教师具有个人特色的电子教案。

本书内容全部讲授大约需要 140 学时，教师可以根据学时要求选讲其中部分内容。

本书由高景主编，参加编写工作的有：袁晓忠（第 1~4 章），高景（第 5, 6 章和第 16, 17 章），董占海（第 7~9 章和第 18~21 章），李铜忠（第 10~15 章和第 22 章）。

由于编者水平有限，编写时间较仓促，书中存在的错误之处，期望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2019 年 6 月

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 目 录                 |    |
| 第 1 章 力与运动          | 1  |
| 1.1 质点运动学           | 1  |
| 1.1.1 质点运动的描述       | 2  |
| 1.1.2 直线运动          | 6  |
| 1.1.3 曲线运动          | 10 |
| 1.1.4 运动学的两类问题      | 25 |
| 1.2 质点动力学           | 29 |
| 1.2.1 牛顿运动定律        | 30 |
| 1.2.2 相互作用力         | 33 |
| 1.2.3 牛顿运动定律的应用     | 38 |
| 1.2.4 非惯性系 惯性力      | 49 |
| 1.2.5 质心和质心运动定理     | 56 |
| 习题 1                | 60 |
| 思考题 1               | 66 |
| 第 2 章 时空理论          | 70 |
| 2.1 牛顿时空观           | 70 |
| 2.1.1 伽利略变换和牛顿绝对时空观 | 70 |
| 2.1.2 力学相对性原理       | 72 |
| 2.2 狭义相对论时空观        | 74 |
| 2.2.1 狭义相对论的基本假设    | 74 |
| 2.2.2 狭义相对论的时空观     | 78 |
| 2.2.3 洛伦兹坐标变换       | 83 |
| 2.2.4 洛伦兹速度变换公式     | 87 |
| 习题 2                | 92 |
| 思考题 2               | 93 |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第3章 运动定理 .....                | 95  |
| 3.1 冲量与动量 .....               | 95  |
| 3.1.1 动量和冲量 .....             | 95  |
| 3.1.2 动量定理 .....              | 96  |
| 3.1.3 动量守恒定律 .....            | 100 |
| 3.1.4 质点系总动量与质心坐标系 .....      | 103 |
| 3.1.5 火箭的运动 .....             | 105 |
| 3.2 功与能 .....                 | 108 |
| 3.2.1 功 动能定理 .....            | 108 |
| 3.2.2 保守力做功与势能 .....          | 117 |
| 3.2.3 机械能守恒定律 .....           | 130 |
| 3.2.4 碰撞问题 .....              | 139 |
| 3.2.5 相对论能量和动量 .....          | 144 |
| 3.3 冲量矩与角动量 .....             | 152 |
| 3.3.1 质点的角动量 角动量守恒定律 .....    | 152 |
| 3.3.2 质点系的角动量定理与角动量守恒定律 ..... | 158 |
| 3.4 对称性与守恒定律 .....            | 160 |
| 3.4.1 对称性 .....               | 160 |
| 3.4.2 物理定律的对称性 .....          | 161 |
| 3.4.3 对称性与守恒定律 .....          | 161 |
| 习题3 .....                     | 162 |
| 思考题3 .....                    | 169 |
| 第4章 刚体力学基础 .....              | 172 |
| 4.1 刚体运动学 .....               | 172 |
| 4.1.1 刚体运动的基本形式 .....         | 172 |
| 4.1.2 刚体定轴转动的运动学描述 .....      | 174 |
| 4.2 定轴转动 .....                | 175 |
| 4.2.1 刚体定轴转动定理 .....          | 175 |
| 4.2.2 刚体转动惯量的计算 .....         | 181 |
| 4.2.3 定轴转动角动量守恒定律 .....       | 186 |
| 4.2.4 定轴转动中的功能关系 .....        | 189 |
| 4.3 陀螺的运动 .....               | 194 |
| 4.4 刚体平面平行运动 .....            | 198 |
| 习题4 .....                     | 202 |
| 思考题4 .....                    | 208 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第5章 机械振动               | 209 |
| 5.1 简谐振动               | 209 |
| 5.1.1 简谐振动的判据          | 209 |
| 5.1.2 描述简谐振动的物理量       | 212 |
| 5.1.3 简谐振动的速度、加速度      | 214 |
| 5.1.4 简谐振动的能量          | 215 |
| 5.1.5 简谐振动的几何表示        | 216 |
| 5.2 微振动近似              | 221 |
| 5.2.1 单摆和复摆            | 221 |
| 5.2.2 微振动近似            | 223 |
| 5.3 阻尼振动 受迫振动          | 224 |
| 5.3.1 阻尼振动             | 224 |
| 5.3.2 受迫振动             | 228 |
| 5.4 振动的叠加与分解           | 229 |
| 5.4.1 同方向同频率振动的叠加      | 229 |
| 5.4.2 两个同方向不同频率振动的叠加 拍 | 231 |
| 5.4.3 振动的频谱            | 232 |
| 5.4.4 相互垂直振动的叠加        | 233 |
| 习题5                    | 236 |
| 思考题5                   | 238 |
| 第6章 机械波                | 240 |
| 6.1 机械波的产生与传播          | 240 |
| 6.1.1 机械波的产生条件         | 240 |
| 6.1.2 机械波的传播特点         | 241 |
| 6.1.3 波长、频率和波速         | 241 |
| 6.1.4 波的几何描述           | 243 |
| 6.2 简谐波                | 244 |
| 6.2.1 一维平面简谐波的表达式      | 244 |
| 6.2.2 行波表达式的意义         | 245 |
| 6.2.3 弦的波动方程           | 248 |
| 6.3 简谐波的能量             | 250 |
| 6.3.1 有平面简谐波传播介质中质元的能量 | 250 |
| 6.3.2 能流和能流密度          | 251 |
| 6.3.3 声强 声强级           | 253 |
| 6.4 波的传播与叠加            | 254 |

|            |                 |            |
|------------|-----------------|------------|
| 6.4.1      | 惠更斯原理           | 254        |
| 6.4.2      | 波的干涉            | 255        |
| 6.4.3      | 驻波              | 258        |
| 6.5        | 多普勒效应           | 262        |
| 6.5.1      | 波源静止,观察者运动      | 262        |
| 6.5.2      | 波源运动,观察者静止      | 262        |
| 6.5.3      | 波源和观察者都运动       | 263        |
|            | 习题6             | 264        |
|            | 思考题6            | 267        |
| <b>第7章</b> | <b>平衡态</b>      | <b>269</b> |
| 7.1        | 平衡态             | 270        |
| 7.1.1      | 平衡态             | 270        |
| 7.1.2      | 热力学第零定律         | 271        |
| 7.1.3      | 温标              | 272        |
| 7.1.4      | 状态方程            | 275        |
| 7.2        | 气体分子热运动的统计分布律   | 276        |
| 7.2.1      | 热力学系统的微观模型      | 276        |
| 7.2.2      | 速率分布函数与速度分布函数   | 279        |
| 7.2.3      | 麦克斯韦速度分布律和速率分布律 | 285        |
| 7.2.4      | 玻耳兹曼能量分布        | 289        |
|            | 习题7             | 294        |
|            | 思考题7            | 297        |
| <b>第8章</b> | <b>热力学定律</b>    | <b>300</b> |
| 8.1        | 热力学第一定律         | 300        |
| 8.1.1      | 准静态过程           | 300        |
| 8.1.2      | 功、内能和热量         | 301        |
| 8.1.3      | 热力学第一定律         | 304        |
| 8.1.4      | 热力学第一定律的应用      | 305        |
| 8.1.5      | 循环过程和热机的效率      | 313        |
| 8.2        | 热力学第二定律         | 318        |
| 8.2.1      | 热力学第二定律         | 318        |
| 8.2.2      | 可逆过程和不可逆过程      | 320        |
| 8.2.3      | 卡诺定理            | 322        |
| 8.2.4      | 熵               | 325        |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 8.2.5 熵增加原理 .....            | 331 |
| 8.2.6 玻耳兹曼熵 .....            | 333 |
| 习题 8 .....                   | 338 |
| 思考题 8 .....                  | 341 |
| <b>第 9 章 相变与气体输运过程</b> ..... | 345 |
| 9.1 相变 .....                 | 345 |
| 9.1.1 气-液相变 .....            | 345 |
| 9.1.2 固-液相变和固-气相变 .....      | 352 |
| 9.2 气体的输运过程 .....            | 354 |
| 9.2.1 气体三种输运过程的宏观规律 .....    | 355 |
| 9.2.2 三种输运过程的微观解释 .....      | 357 |
| 习题 9 .....                   | 363 |
| 思考题 9 .....                  | 364 |

考虑到物体的实际形状和大小,对物体运动的描述将是相当复杂的,因为需要考虑到物体大小和形状的变化,还要考虑物体的整体平移和整体转动。物理学中一个非常重要的方法就是对于实际系统,需要找出问题的主要方面,把实际问题进行简化,建立一定的理想模型。在理想模型的基础上研究问题,这是物理学研究问题的基本方法,即从复杂到简单的方法。

当物体大小和形变可以忽略,且只有平动时,物体上所有点的运动都是相同的,我们就可以用其中一个点的运动来替代对物体整体运动的描述,这就是质点这个理想模型的物理基础。研究物体的运动时,可以把物体看成是所有质量都集中在一个几何点上。而对真实的物体,可以通过数学上的无穷分割方法,把它分成无穷多个小的质量元,每一个质量元可以看成是一个质点,从而可以把一个真实的物体看成由无穷多个质点组成的质点系。因此,真实物体的运动可以看成是该质点系的运动。这种方法即所谓从简单到复杂的方法。

刚体和质点一样,是物理学中的一个理想模型,在任何情况下,其形状和大小都不会发生变化。实际物体的大小和形状在运动过程中或多或少会有变化,物体内部的各个部分的运动情况往往不同,这就使问题变得相当复杂。但是在很多情况下物体形变非常小,形变对物体运动规律的影响可以忽略不计。因此,对这些物体,就可以用刚体这个理想化的模型来替代。

## 1.1 质点运动学

力学研究的是物体机械运动的规律,机械运动是自然界中物质运动最简单和

# 第1章 力与运动

自然界中的物质都处于不停的运动和变化之中。物质的运动形式多种多样,主要包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和其他微观粒子的运动等等,其中最为简单的是物质的机械运动。牛顿力学(经典力学)就是研究物质机械运动的学科。

经典力学的理论基础是牛顿的三个运动定律,并由此引入了力、力矩、动量、冲量、角动量、功和能等概念,得到了动量、角动量和机械能等的守恒定律。经典力学只适用于物体做低速(与光速相比)运动的情形。当物体的速度接近于光速时,经典力学就失效了。此时需要用相对论力学来作研究,经典力学只是相对论力学在低速时的近似。

考虑到物体的实际形状和大小时,对物体运动的描述将是相当复杂的,因为需要考虑物体的大小和形状的变化,还要考虑物体的整体平移和整体转动。物理学中一个非常重要的方法就是对于实际系统,需要找出问题的主要方面,把实际问题进行简化,建立一定的理想模型。在理想模型的基础上研究问题,这是物理学研究问题的基本方法,即从复杂到简单的方法。

当物体大小和形变可以忽略,且只有平动时,物体上所有点的运动都是相同的,我们就可以用其中一个点的运动来替代对物体整体运动的描述,这就是质点这个理想模型的物理基础。研究物体的运动时,可以把物体看成是所有质量都集中在一个几何点上。而对真实的物体,可以通过数学上的无穷分割方法,把它分成无穷多个小的质量元,每一个质量元可以看成是一个质点,从而可以把一个真实的物体看成由无穷多个质点组成的质点系。因此,真实物体的运动可以看成是该质点系的运动。这种方法即所谓从简单到复杂的方法。

刚体和质点一样,是物理学中的一个理想模型,在任何情况下,其形状和大小都不会发生变化。实际物体的大小和形状在运动过程中或多或少会有变化,物体内部的各个部分的运动情况往往不同,这就使问题变得相当复杂。但是在很多情况下物体形变非常小,形变对物体运动规律的影响可以忽略不计。因此,对这些物体,就可以用刚体这个理想化的模型来替代。

## 1.1 质点运动学

力学研究的是物体机械运动的规律,机械运动是自然界中物质运动最简单和

最常见的形式,其主要特征是一个物体相对另一个物体或物体的一部分相对另一部分位置随时间有相对变化。

对于有形状和大小的实际物体而言,其一般的运动非常复杂。为了简化问题,可以先不考虑物体的形变和转动,将其看成一个形状和大小都可以忽略不计但具有一定质量的物体,这样的物体称为质点。

对于机械运动的研究,通常可分为两个方面。一是单纯地关注如何描述物体的运动状态,对于质点而言,主要研究如何描述其在空间的位置、运动轨道、运动速度、加速度等,称为运动学。二是考虑物体间的相互作用,以及由此引起物体运动状态变化的规律,称为动力学。本节我们将首先讨论对物体运动的基本描述,引入描述物体运动的基本物理思想和方法,讨论质点的运动学问题。下一节我们讨论物体间相互作用规律以及运动状态的变化与物体间相互作用的关系,即牛顿运动定律。

### 1.1.1 质点运动的描述

#### 1.1.1.1 参考系

为了描述一个物体的运动而选作参考的另一个物体或一组相对静止的物体称为参考系,又称为参考物。就运动学的角度而言,参考系的选取具有任意性,任何物体都可以被选作参考系来研究其他物体的运动。在一个具体问题中,到底选择哪个物体作为参考系,这要由问题的性质和研究的方便来决定。比如火箭发射卫星上太空,发射阶段通常以地面为参考系来研究火箭的运动;如果最终火箭将卫星送入绕太阳运行的轨道,成为一颗人造行星,则选择太阳为参考系就比较方便了。

还要明确这样一个事实,即运动描述的相对性和运动的绝对性。研究和描述同一物体的运动,取不同的参考系,结果往往是不同的。比如,相对于地面做匀速直线运动的车厢里,有一个自由下落的物体,若以车厢为参考系,物体的运动是直线运动。如果以地面为参考系,物体的运动就是曲线运动。所以,要方便地描述一个物体的运动,我们需要选择一个合适的参考系,使我们对物体运动的描述尽量简单。这正是建立在物体运动描述的相对性这个事实的基础上的。另一方面,一切物质均处于永恒不息的运动之中,运动的这种普遍性和永恒性又称为运动的绝对性。大到日月星辰,小到微观粒子,世界万物每时每刻都在做不同形式的运动,运动是绝对的,静止是相对的。

#### 1.1.1.2 坐标系

为了定量地描述一个物体相对某参考系的位置,还必须在参考系上固定一组坐标轴,建立所谓的坐标系。最常见的坐标系有直角坐标系,相应的坐标为  $x, y, z$ , 如图 1-1 所示;平面极坐标系,相应的坐标为  $r, \theta$ , 如图 1-2 所示;还有球坐

标系和柱坐标系等。物体的运动状态完全由参考系决定,与坐标系的选取无关。对于不同的坐标系,只是描述运动的变量不同而已,对应物体的运动状态不会因坐标系的选择不同而有所不同。

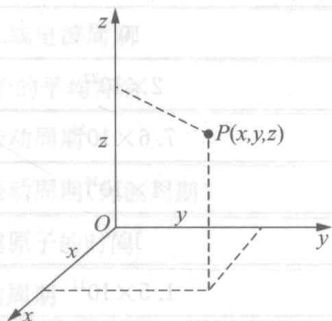


图 1-1

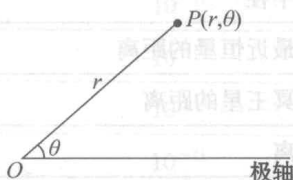


图 1-2

### 1.1.1.3 空间和时间

要在一定的参考系中定量地描述物质的运动,需用时间和空间两个物理量。

人们对时间和空间的认识是从对周围物质世界和物质运动的感知开始的,时间反映物质运动的持续性和顺序性,持续性是指物质运动经历的或长或短的过程,顺序性是指物质运动过程中的不同事物或现象出现的先后顺序。时间是不可逆的,一维的。空间反映了物质的广延性,是与物体的体积和物体位置的变化联系在一起的。随着科学的进步,人们的时空观经历了从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的相对论时空观的转变,从时空的有限与无限的哲学思辨到可以用科学的手段来探索时空的阶段。在牛顿的时代人们认为,空间和时间是独立于物质和物质运动的客观存在;而现今人们已经认识到,空间和时间与物质及物质的运动是密切相关的。

人们通常采用能够重复的周期现象来计量时间,目前时间单位“秒”是1967年10月第13届国际计量大会上定义的:“1秒(s)是铯-133原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。”而长度单位“米”是1983年10月第17届国际计量大会上定义的:“1米(m)是光在真空中(1/299 792 485)s时间间隔内所经路径的长度。”对于微小的长度,常用微米( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}\text{m}$ ),纳米(nm,  $10^{-9}\text{m}$ )和埃( $\text{\AA}$ ,  $10^{-10}\text{m}$ )作单位。天文上对于很长的距离常用光年作单位。光年是光在1年中行进的距离,常用符号l. y. 表示,约合  $9.46 \times 10^{12}\text{km}$ 。

目前,人们可量度的空间范围,从宇宙范围的尺度  $10^{26}\text{m}$  到微观粒子的尺度  $10^{-15}\text{m}$ ,从宇宙的年龄  $10^{18}\text{s}$  到微观粒子的最短寿命  $10^{-24}\text{s}$ 。根据已知的物理理论,极端的时间和空间间隔为普朗克时间  $10^{-43}\text{s}$  和普朗克长度  $10^{-35}\text{m}$ 。也就是说,小于普朗克时空间隔时,空间和时间的概念就不再适用了。表1-1和表1-2分别列出了一些典型的空间和时间尺度,即物理学研究所涉及的空间和时间范围。

表 1-1 一些典型的空间尺度 单位: m

| 事 件        | 空 间 尺 度            |
|------------|--------------------|
| 已观测到的宇宙范围  | $10^{26}$          |
| 星系团半径      | $10^{23}$          |
| 星系间距离      | $2\times10^{22}$   |
| 银河系半径      | $7.6\times10^{22}$ |
| 太阳到最近恒星的距离 | $4\times10^{16}$   |
| 太阳到冥王星的距离  | $10^{12}$          |
| 日地距离       | $1.5\times10^{11}$ |
| 地球半径       | $10^6$             |
| 无线电中波波长    | $10^3$             |
| 核动力航空母舰长   | $3\times10^2$      |
| 小孩高度       | 1                  |
| 尘埃线度       | $10^{-3}$          |
| 人类红细胞直径    | $10^{-6}$          |
| 细菌线度       | $10^{-9}$          |
| 原子线度       | $10^{-10}$         |
| 核的线度       | $10^{-15}$         |
| 普朗克长度      | $10^{-35}$         |

表 1-2 一些典型的时间尺度 单位: s

| 事 件         | 时 间 尺 度            |
|-------------|--------------------|
| 宇宙年龄        | $10^{18}$          |
| 太阳系年龄       | $1.4\times10^{17}$ |
| 原始人时期至今     | $10^{13}$          |
| 出现最早文字至今    | $1.6\times10^{11}$ |
| 人的平均寿命      | $10^9$             |
| 地球公转(一年)    | $3.2\times10^7$    |
| 地球自转(一天)    | $8.6\times10^4$    |
| 太阳光到地球的传播时间 | $5\times10^2$      |
| 人的心脏跳动周期    | 1                  |



(续表)

| 事 件             | 时 间 尺 度    |
|-----------------|------------|
| 中频声波周期          | $10^{-3}$  |
| 中频无线电波周期        | $10^{-6}$  |
| $\pi^+$ 介子的平均寿命 | $10^{-8}$  |
| 分子转动周期          | $10^{-12}$ |
| 原子振动周期(光波周期)    | $10^{-15}$ |
| 光穿越原子的时间        | $10^{-18}$ |
| 核振动周期           | $10^{-21}$ |
| 光穿越核的时间         | $10^{-24}$ |
| 普朗克时间           | $10^{-43}$ |

#### 1.1.1.4 质点

实际物体有形状和大小,其一般的运动非常复杂。在特定情况下,为突出主要矛盾可以不计其形状和大小,将其看成具有质量的几何点,这样的物体称为质点。质点是一个理想模型,严格而言在自然界中并不存在。提出质点概念的意义可以从下面三个方面去理解。

(1) 如果一个物体在运动中既不转动也不变形而只有平动,此时物体上各点的运动必然相同,整个物体的运动可以用物体上任一点的运动来替代。因此,当一个物体做平动时,可将其看作质点,如图 1-3 所示。平动可以这样来定义(判别):在运动过程中,物体内部任意一个固定箭头所指的方位始终不变,则物体在此过程中做的是平动。物体做平动时,可以是直线运动,也可以是曲线运动。

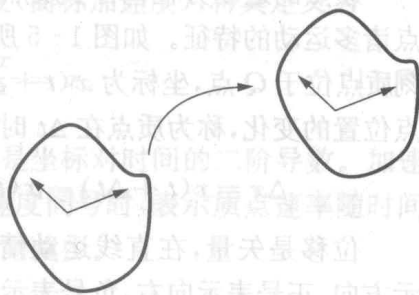


图 1-3

(2) 如果一个物体的尺寸很“小”,其转动和形变在相关问题中完全不重要时,也可将其看作质点。当然,大小是相对的,地球很大,其平均半径约为  $6\,378\text{ km}$ ,但在研究地球绕太阳公转时,由于地球与太阳间的距离(约为  $1.5 \times 10^8\text{ km}$ )远大于地球平均半径,因此地球上各点运动情况的差异对所研究问题而言可以忽略,地球可视为质点。对于尺寸很小的物体,如微粒、分子、原子等,如果相关问题涉及它们的振动和转动,就不能够把它们看成质点。

(3) 有大小和形状的物体做一般运动时,其各部分的运动是不相同的,整体不能够看成质点。但如果设想将物体分割成许多足够微小的部分,总能使每一部分



内部各点的运动基本相同,从而可将它作为一个质点处理,通过分析这许多质点的运动就能弄清整个物体的运动情况。所以分析质点的运动是研究实际物体复杂运动的基础。

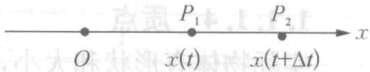
质点是力学中关于物体的一个理想模型,它突出了物体具有质量和占有位置这两个主要因素,但忽略了形状、大小及内部运动等次要因素。这种突出研究对象的主要特征而忽略其次要特征的理想模型在物理学中是经常使用的,例如刚体、理想气体、理想流体、点电荷等。

1.1.2 直线运动

1.1.2.1 直线运动质点的运动方程

质点始终沿同一条直线的运动称为直线运动,直线运动可用一维坐标描述。如图 1-4 所示,坐标轴为  $x$  轴,取  $O$  为坐标原点,质点在任意时刻的位置可表示为

$$x = x(t), \tag{1-1}$$



此式称为质点的运动方程。

图 1-4

1.1.2.2 速度

质点的运动方程包含了质点所有运动学的信息,由运动方程出发可以得到质点诸多运动的特征。如图 1-5 所示,  $t$  时刻质点位于  $P$  点,坐标为  $x(t)$ ,  $t + \Delta t$  时刻质点位于  $Q$  点,坐标为  $x(t + \Delta t)$ ,我们用  $P$  到  $Q$  的有向线段表示  $\Delta t$  时间内质点位置的变化,称为质点在  $\Delta t$  时间内的位移,写为

$$\Delta x = x(t + \Delta t) - x(t). \tag{1-2}$$

位移是矢量,在直线运动情况下其正负表示方向,正号表示向右,负号表示向左。

$\Delta t$  时间内质点的平均速度  $\bar{v}$  定义为位移  $\Delta x$  与  $\Delta t$  的比值,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \tag{1-3}$$

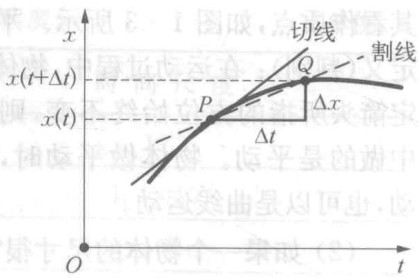


图 1-5

平均速度是矢量,其方向与位移方向相同。

平均速度不够精细,只能粗略地描述一段时间内质点运动的快慢。但只要  $\Delta t$  足够小,该段时间内质点运动快慢的差异也将足够小。为了精确描述质点的瞬时运动情况,取平均速  $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  在  $\Delta t \rightarrow 0$  时的极限,此极限称为质点的瞬时速度,简称速度,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (1-4)$$

这一极限在数学上称为坐标  $x$  对时间  $t$  的导数, 用  $dx/dt$  或者  $\dot{x}$  表示。于是

$$v = dx/dt = \dot{x}。$$

以  $x$  为纵坐标,  $t$  为横坐标, 则  $x(t)$  可用图 1-5 中的曲线表示。显然平均速度  $\bar{v}$  就是割线  $PQ$  的斜率, 瞬时速度则是过  $P$  点曲线切线的斜率。速度是矢量也有方向, 当速度为正时, 表示质点沿  $x$  轴正向运动; 当速度为负时, 表示质点沿  $x$  轴反方向运动。速度的大小称为速率。

### 1.1.2.3 加速度

一般情况下质点的速度随时间变化, 而我们用加速度来表示速度变化的快慢。 $\Delta t$  时间内质点速度的增量定义为

$$\Delta v = v(t + \Delta t) - v(t)。 \quad (1-5)$$

$\Delta t$  时间内质点的平均加速度  $\bar{a}$  定义为速度的增量  $\Delta v$  与  $\Delta t$  的比值, 即

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}。 \quad (1-6)$$

平均加速度只是粗略描述速度在一段时间内的大致变化情况, 为了精确描述质点在任意时刻  $t$  速度的变化率, 引入瞬时加速度(简称加速度), 将其定义为

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x}。 \quad (1-7)$$

由此可见, 加速度是速度对时间的一阶导数, 是坐标对时间的二阶导数。加速度也可正可负, 正负用来表示方向。当加速度与速度同号时, 表示质点速率随时间增加; 当加速度与速度异号时, 表示质点速率随时间减少。

下面讨论位移、速度、加速度之间的相互关系。

通过上面的介绍我们看到, 已知质点运动方程  $x = x(t)$ , 则  $v = \frac{dx}{dt}$ ,  $a =$

$\frac{d^2 x}{dt^2}$ 。如果已知  $v(t)$ , 则  $a = \frac{dv}{dt}$ 。反之, 如果知道  $t=0$  时刻质点的位置  $x_0$ , 也可以由  $v(t)$  来求  $x(t)$ 。首先将  $t_0=0$  到  $t=t$  这段时间分为  $n$  段, 相应的时刻表示为  $t_0(=0)$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\dots$ ,  $t_i$ ,  $\dots$ ,  $t_{n-1}$ ,  $t_n(=t)$ , 使每一小段时间间隔  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  都足够小, 以至该时间段内质点的运动可以近似看成匀速直线运动, 而其速度可取该时间段起始时刻的速度值  $v(t_i)$ 。这样每小段时间间隔质点的位移为

$$\Delta x_i \approx v(t_i) \Delta t_i。$$

质点在  $0 \sim t$  时间内的位移为

$$x(t) - x_0 = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta x_i \approx \sum_{i=0}^{n-1} v(t_i) \Delta t_i.$$

让  $n$  趋向于无穷并所有  $\Delta t_i$  都趋向于零, 则上式右边的极限就精确等于质点在  $0 \sim t$  时间内的位移  $x(t) - x_0$ , 此极限就是数学上的定积分, 记为  $\int_0^t v dt$ , 于是

$$x(t) - x_0 = \int_0^t v dt, \quad (1-8)$$

类似可以通过  $a(t)$  求  $v(t)$ 。如果  $t=0$  时刻质点的速度为  $v_0$ , 则有

$$v(t) - v_0 \approx \sum_{i=0}^{n-1} a(t_i) \Delta t_i,$$

对上式右边取极限, 并用定积分表示, 则有

$$v(t) - v_0 = \int_0^t a dt. \quad (1-9)$$

**【例 1-1】** 一质点沿  $x$  轴做直线运动, 其加速度为  $a = -A\omega^2 \cos \omega t$ , 其中  $A$  与  $\omega$  都为正值常数。如果  $t=0$  时, 质点的速度  $v=0$ , 位置  $x=A$ , 求  $t$  时刻该质点的位置和速度。

**解** 加速度为速度对时间的一阶导数, 故有  $\frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos \omega t$ , 由此得

$$dv = -A\omega^2 \cos \omega t dt.$$

根据初始条件, 两边同时取定积分有

$$\int_0^v dv = -\int_0^t A\omega^2 \cos \omega t dt,$$

积分后有速度时间关系

$$v = -A\omega \sin \omega t,$$

直线运动情况下, 坐标  $x$  对时间  $t$  的导数即为速度, 故

$$\frac{dx}{dt} = -A\omega \sin \omega t,$$

由此得

$$dx = -A\omega \sin \omega t dt.$$

根据初始条件, 两边同时取定积分有