



大学物理教程

(上册)

主编 张晚云 江遴汉 沈曦 曹慧

高等教育出版社

大学物理教程

主编 张晚云 江遴汉 沈曦 曹慧

(上册)

高等教育出版社·北京

内容提要

本教程是国防科学技术大学梁林梅等教授主讲的“大学物理”MOOC的配套教材。上册主要介绍实物形态的相互作用及其基本运动规律,包括力学、机械振动与机械波、热学三个部分共8章;下册主要介绍场与物质的相互作用及其基本运动规律,包括电磁学、波动光学、量子物理基础三个部分共11章。

本书注重物理概念的准确性,在物理概念、物理规律的阐述上力求做到深入浅出,在内容安排中介绍一些与大学物理知识密切相关的军事高科技应用实例或未来军事装备发展的前沿知识。本书军事特色鲜明同时富有知识性、趣味性、应用性与启发性。

本书可作为高等学校非物理类专业大学物理课程的教材,也可供广大科技工作者参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 上册 / 张晚云等主编. -- 北京 :
高等教育出版社, 2018.2

ISBN 978-7-04-047098-7

I. ①大… II. ①张… 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 321578 号

策划编辑 高 建	责任编辑 程福平	封面设计 张志奇	版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹	责任校对 李大鹏	责任印制 刘思涵	

DAXUE WULI JIAOCHENG

出版发行 高等教育出版社	网 址 http://www.hep.edu.cn
社 址 北京市西城区德外大街4号	http://www.hep.com.cn
邮政编码 100120	网上订购 http://www.hepmall.com.cn
印 刷 山东鸿君杰文化发展有限公司	http://www.hepmall.com
开 本 787 mm×1092 mm 1/16	http://www.hepmall.cn
印 张 21.5	
字 数 540千字	版 次 2018年2月第1版
购书热线 010-58581118	印 次 2018年2月第1次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 42.80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 47098-00

前言

物理学是研究物质的基本结构、基本相互作用和物质运动最基本、最普遍的形式及其相互转化规律的科学。它既是基础学科,又是带头学科,是绝大部分新学科、新技术、新思维及新方法产生、发展的主要源泉。大学物理学所讲授的内容是物理学基本概念、基本理论与基本方法的提炼与概括。作为高等院校本科人才培养链条中的一门通识性必修基础课,大学物理学为后续课程及日后的再学习打下必要的物理基础、使学生在获得必要的自然科学知识的同时,还能使本科生受到良好的物理学思想和科学方法的培养训练。

本教程的编写初衷,一是为国防科学技术大学梁林梅教授主讲的“大学物理”MOOC (<http://www.icourse163.org/course/nudt-193001#/info>) 提供一套内容精练的配套教材,二是希望为中等学时大学物理教学提供一套难度适中、易教易学的教材。为了兼顾以上两点,同时结合当前日新月异的信息技术发展,本教程在国防科学技术大学李承祖等主编的《大学物理学》(上、下册,2009年版)基础上进行了以下几个方面的改革尝试:

1. 在知识体系方面,本书主要按“实物”与“场”两大模块来建立大学物理知识体系。上册主要介绍实物形态的相互作用及其基本运动规律,具体包括“力学”(含第4章:狭义相对论——本章内容虽然属于近代物理学内容,但其研究的对象仍主要是实物,特别是在经典的时空观之后,紧接着介绍全新的狭义相对论时空观,有助于形成鲜明的对比)、“机械振动与机械波”及“热学”三个部分共8章;下册主要介绍场与物质的相互作用及其基本运动规律,具体包括“电磁学”“波动光学”与“量子物理基础”三个部分共11章。这样的章节及内容编排,既体现了大学物理教学内容的系统性与完整性,也便于教学进度的安排。

2. 在内容风格方面,突出普物风格与军事特色。本书一方面坚持平易近人的普物风格,全书统一按照“从现象引出概念,由

实验总结规律”的思路进行组织,在注重物理概念准确性的基础上,尽可能地避免复杂的数学推证,采用图形图像,突出物理本质,在物理概念、物理规律的阐述上力求做到由浅入深、由易到难、由具体到抽象、由特殊到一般;另一方面也突出编者所在院校的军事特色,例如,在大部分的章节的开头设有“引子”、章后设“本章原理应用选讲”等阅读材料,介绍一些与大学物理知识密切相关的军事高科技应用实例或未来军事装备发展的前沿知识,既体现军事特色,又充满知识性、趣味性、应用性与启发性,从而更好地促进学习者理论联系实际、提升科技素质乃至激发创新思维。

3. 在知识呈现方面,采用“纸质教材+数字资源”的新形态编写模式,充分利用网络平台,学生可通过扫描纸质教材中的二维码,观看或查阅相关的动画演示、教学视频、习题解答、拓展阅读材料等多种形式的媒体资源,极大地丰富了知识的呈现形式,有效地破解学习难点、开阔学习视野。在提升课程教学效果的同时,为学生学习提供思维与探索的空间。

本书由国防科技大学的张晚云、江遴汉、沈曦、王雁桂、陈菊梅与曹慧共同编写。具体分工如下:张晚云负责第1、2、3章、各章习题及解答;江遴汉负责第4、7、8章;沈曦负责第6、13、14、15章;王雁桂负责第9、10、11、12章;陈菊梅负责第16、17、18、19章;曹慧负责第5章;另外沈曦也参与了第5章的编写。全书由张晚云统稿核定。

本书在编写、出版过程中,始终得到编者所在单位各级领导的关注、帮助与支持,得到了高等教育出版社物理分社领导的大力帮助与支持。另外,本书的编写参考了许多资料和兄弟院校的教材,在此一并表示诚挚的谢意。

因编者水平所限,加上时间紧,书稿中的错误和不足在所难免,请读者提出宝贵意见,以便再版时作进一步修改,在此预先表示感谢!

编者

2015年12月16日

目 录

第一篇 力 学

第 1 章 质点运动学	3	3.2 刚体定轴转动的角动量和转动 惯量	134
1.1 参考系 时间和空间的计量	3	3.3 刚体定轴转动的角动量定理和 角动量守恒定律	140
1.2 质点运动的描述	7	3.4 刚体定轴转动的功能原理	148
1.3 相对运动	31	* 3.5 刚体平面运动动力学	154
本章内容提要	37	本章内容提要	156
习题	39	习题	158
第 2 章 质点(系)动力学	41	第 4 章 狭义相对论	162
2.1 牛顿运动定律	41	4.1 狭义相对论产生的历史背景 和实验基础	162
2.2 动量定理与动量守恒定律	73	4.2 狭义相对论的基本原理及其 时空性质	168
2.3 动能定理和机械能守恒定律	91	4.3 洛伦兹变换	173
2.4 角动量定理与角动量守恒 定律	111	4.4 狭义相对论质点力学简介	176
本章内容提要	120	本章内容提要	184
习题	122	习题	185
第 3 章 刚体力学	128		
3.1 刚体运动学	128		

第二篇 机械振动与机械波

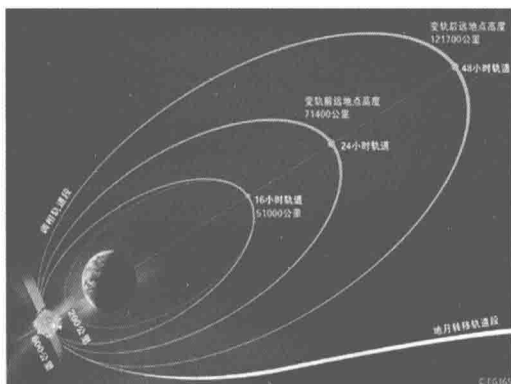
第 5 章 振动	191	本章内容提要	210
5.1 简谐振动	191	习题	212
5.2 简谐振动的合成	197	第 6 章 机械波	216
5.3 阻尼振动 受迫振动和共振	204	6.1 机械波的产生和传播	217
* 5.4 非线性振动 混沌	208		

6.2 简谐波	221	6.6 波的相干叠加 驻波	235
6.3 波动方程	225	6.7 多普勒效应	240
6.4 机械波的能量和能流	227	本章内容提要	247
6.5 惠更斯原理 波的衍射、反射和 折射	232	习题	250

第三篇 热 学

第 7 章 气体动理论	257	第 8 章 热力学基础	285
7.1 平衡态 温度 理想气体物态 方程	257	8.1 热力学第一定律	286
7.2 理想气体的压强和温度的微观 本质	264	8.2 热力学第一定律在理想气体准 静态过程中的应用	290
7.3 能量均分定理 理想气体的 内能	268	8.3 循环过程	297
7.4 麦克斯韦分布律	270	8.4 热力学第二定律	304
7.5 玻耳兹曼分布律	275	8.5 克劳修斯熵 熵增加原理	313
7.6 气体分子的平均碰撞频率和平均 自由程	277	8.6 热力学第二定律的微观统计 意义	321
本章内容提要	279	本章内容提要	327
习题	282	习题	330

附录 常用物理常量表	335
------------------	-----



2007年10月24日,我国在西昌卫星发射中心成功发射“嫦娥一号”,标志着中国人的千年梦想——探月工程,迈出了关键的一步。

“嫦娥一号”等航天器的轨道运动是典型的机械运动.其理论基础主要是经典力学。

第一篇 力学

广泛而言,不论是宏观世界的斗转星移、风起云涌、电鸣雷闪,还是微观世界的离子反应、原子裂变、基因重组等一切变化与过程,均可称为运动.在各种各样、千变万化的物质运动形式中,最普遍、最基本的一种运动形式是物体之间或物体各部分之间相对位置的变化,这种运动形式称为机械运动,如人体的运动、车辆的行驶、机器的转动、河水的流动、星体的运动等。

我们将研究机械运动及其规律的物理学分支学科称为力学.力学知识起源于古代人对自然现象的观察及日常生活、劳动中的经验认识.但力学作为一门科学理论的真正开端,始于17世纪伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)对惯性运动的论述、落体定律的发现与科学推理法的运用.此后,牛顿(Issac Newton, 1643—1727)在前人大量工作的基础上,对力学现象进行了深入的实验和理论研究,成功地总结出三条运动定律和万有引力定律,并提出了绝对时空观,从而奠定了经典力学的基础.后来在伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)、欧拉(Leonhard Euler, 1707—1783)、达朗贝尔(D'Alembert, 1717—1783)、拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736—1813)、哈密顿(William Rowan Hamilton, 1805—1865)等人的进一步努力下,建立了系统的力学理论,并发展出分析力学、流体力学和固体力学等分支,现统称为经典力学。

随着人们对物质运动规律认识的不断深入,爱因斯坦(Albert Einstein, 1879—1955)、玻尔(Niels Henrik David Bohr, 1885—1962)、薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887—1961)、海森伯(Werner

Karl Heisenberg, 1901—1976) 与狄拉克 (Paul Adrien Maurice Dirac, 1902—1984) 等人于 20 世纪初建立了相对论力学和量子力学, 把对物质和运动、空间和时间等基本问题的认识推上新高峰。人们开始认识到, 经典力学不过是相对论力学和量子力学在宏观低速(相对于真空中的光速而言)情况下的极限。尽管如此, 由于人们的日常生活及一般的技术领域都是宏观低速领域, 而且物理学其他分支学科, 如热力学、电磁学, 乃至相对论与量子力学的许多概念、规律和思想都是在经典力学的相关概念、规律与思想的基础上发展或改造而成的, 因此经典力学在今天的科学研究与工程技术研发中仍有着广泛的实用价值和重要意义。

在本篇中, 我们将展开以下 4 章内容的学习:

第 1 章: 质点运动学。主要介绍如何描述物体的运动, 以及各运动学量之间的关系, 不涉及引起和改变运动的原因

第 2 章: 质点(系)动力学。主要介绍质点之间的相互作用, 以及这种相互作用与质点运动的变化的内在联系。

第 3 章: 刚体力学基础。主要介绍刚体定轴转动的基本规律。

第 4 章: 狭义相对论。主要介绍相对论的时空观、运动学基本问题以及狭义相对论质点动力学的初步知识。

力学不仅是物理学的起点与“基石”, 也是土木工程、机械制造、航空航天技术等相关课程的基础, 因此, 学好力学对学好整个物理学以及理工科相关专业课程极其重要。

第 1 章

质点运动学

1.1 参考系 时间和空间的计量

1.1.1 参考系

1.1.2 时间的计量

1.1.3 长度的计量

1.2 质点运动的描述

1.2.1 质点

1.2.2 位置矢量

1.2.3 位移 路程

1.2.4 速率 速度

1.2.5 加速度

1.2.6 质点运动学的两类基本问题

1.2.7 平面曲线运动的自然坐标描述

1.2.8 圆周运动的角量描述

1.3 相对运动

1.3.1 经典力学的时空观

1.3.2 经典相对运动公式

本章内容提要

习题

A 基础题

B 提高题



引子：从“东风五号”的发射话洲际导弹

1.1 参考系 时间和空间的计量

1.1.1 参考系

自然界中不存在绝对静止的实际物体，一切物质都在不停地运动着，因此运动是普遍的与绝对的。但人们观察和描述物体的运动却是相对的。例如，相对于从飞机竖直下落的空降物品，在地面的人看来，却在做平抛运动。可见，选择不同的参考物体，对同一个运动描述的结果一般也是不同的。因此，我们描述物体的运动时，必须首先要选定某一物体或物体系作为参考标准。这种为描述某一物体的运动而选作参考标准的其他物体（或彼此不做相

对运动的物体系),称为**参考物**。

参考物所在并与之固连的空间称为**参考空间**。而参考空间与固定于其中的同步钟系列(即时间组)合称**参考系**。实际中,参考系通常以所用的参考物命名,并不特别指出与之固连的参考空间和同步钟。例如,以地面为参考物的参考系称为**地面参考系**;以地心为参考物的参考系叫作**地心参考系**;以太阳(中心)的参考系叫作**太阳参考系**。在运动学中,参考系的选择原则上是任意的,主要根据问题的性质和研究的方便程度而定。例如,描述地面上物体的运动,通常选取地面参考系或实验室参考系;在讨论远程导弹(如洲际导弹)或人造地球卫星的运动时,常选取地心参考系;而在研究行星绕太阳的运动时,则常选取太阳参考系。在描述物体的运动时,必须指明参考系,若不指明参考系,则默认以地面为参考系。

确定了参考系之后,为了定量描述物体相对参考系的位置,还需要在参考系上固定一组坐标轴及相应的坐标,即**坐标系**。可见,物理学中的坐标系实质上是由实物构成的参考系的数学抽象,所以,在物理学中一旦建立了坐标系,意味着参考系也已选定。最常用的坐标系是直角坐标系,有时考虑到讨论问题的方便,也可选用极坐标系、球坐标系及柱坐标系等。例如,轮船在海洋里航行时任意时刻的位置,可由它在地球上的经度与纬度来确定,这种表示方法实际上是在地心参考系中采用了以地心为坐标原点的球坐标系,如图 1.1.1 所示。

关于参考系需要注意的是:

(1) 运动的相对性决定描述物体运动时必须选取参考系,但不存在绝对参考系,只存在相对参考系;

(2) 参考系的选择,原则上是任意的,主要根据问题的性质和研究的方便程度而定;

(3) 在不同参考系中,对于同一运动的描述一般不同,因此求解运动学问题时,需将各类物理量变换到同一参考系中分析求解;

(4) 同一参考系中的不同坐标系对于同一物体运动性质或规律的描述是相同的,而仅是描述的参量变了,因此在不同坐标系中对同一运动的数学描述是不同的。

物体的机械运动总是在一定的时间和空间范围内进行,因此研究机械运动的规律离不开对时间和空间(长度)的计量。下面简要介绍它们的计量方式。

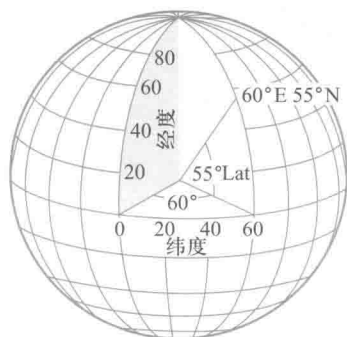


图 1.1.1 以地心为坐标原点的球坐标系

1.1.2 时间的计量

时间是表征物理事件之间先后顺序和持续性的概念. 时间的计量主要是一个计数的过程. 因此, 凡是已知其运动规律的物理过程, 都可用时间来计量. 但实际中, 通常采用能够重复的周期性现象来计量时间. 如我们熟悉的“年、月、日”, 就是分别以四季的循环、月亮的盈亏与昼夜的更替(日升日落)进行计量. 为了更精确地计量时间, 我国古代将1日分为12个时辰, 每个时辰又分为4刻; 到近代, 人们又将1日分为24个小时, 1小时分为60分钟, 1分钟又分为60秒.

随着科学技术的进步, 上述以天文观测为基础所确定的时间标准已不能满足现代科技发展的需要. 因此, 在1967年第十三届国际计量大会上, 科学家们决定以 ^{133}Cs 原子基态两个超精细能级之间跃迁时的辐射周期 T 作为计时标准, 并规定1秒等于该周期的9 192 631 770倍. 此时间标准称为原子时(或原子钟), 它的测量精度高达 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ s}$. 这就有可能对许多具有重大科学意义和实践意义的问题进行研究, 如地球自转周期的变化, GPS导航系统的校正以及航天技术的改进等.

在国际单位制(SI)中, 时间的单位是s(秒). 在一些高新技术领域中, 可能用到“纳秒”“皮秒”“飞秒”与“阿秒”, 它们的符号及与“秒”的关系如下:

$$1 \text{ s(秒)} = 10^9 \text{ ns(纳秒)} = 10^{12} \text{ ps(皮秒)} = 10^{15} \text{ fs(飞秒)} = 10^{18} \text{ as(阿秒)}$$

自然界中的任何事物均有一定时间尺度. 例如, 根据现代标准宇宙模型, 宇宙诞生于 $1.0 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^{10}$ 年前的一次大爆炸中, 即其年龄具有 10^{18} s 的数量级; 据估计, 太阳的寿命可达 10^{10} 年, 而它现在的年龄约为 5.0×10^9 年, 正处于其半命期; 同样据估计, 地球的年龄约为 4.9×10^9 年, 即 10^{17} s 的数量级; 而人的寿命通常不超过100年(10^9 s 数量级). 在微观世界中, 绝大多数已发现的粒子是不稳定的, 即粒子经过一定时间后就衰变为其他粒子. 如中子寿命约为 15 min (10^3 s 数量级), μ 子寿命约为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ s}$, 普通光源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质子寿命的下限, 约 10^{38} s 数量级; 涉及的最小的时间是普朗克时间, 为 10^{-43} s , 在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.

在物质运动的描述中, 我们通常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; 将两个时刻 t_1 和 t_2 间的一段

时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 称为时间间隔,简称时间. 显然,时刻与物体的某一空间位置相对应,而时间则与物体的位置变化相对应.

1.1.3 长度的计量

空间是反映物质运动的广延性的概念. 空间中任意两点间的距离即长度,因此对空间的度量建立在对长度的计量的基础上. 任何长度的计量都是通过与某一长度比较而进行的. 日常生活中,人们常以人体的某部位或某活动范围作为单位和标准,如“一臂长”“齐腰深”“几步路”等,这显然是不准确的. 目前,国际通用的长度基准是“米”(m). 历史上,“米”最初定义为通过巴黎的子午线从北极到赤道之间长度的千万分之一,但精确的测量表明,这一基准与其理想值相差约 0.023%;因此,1889 年第一届国际计量大会将保存在国际计量局中的一根铂铱合金棒在 0 °C 时两条横刻线之间的距离定义为 1 m. 这是长度计量的实物基准,它被称之为国际米原器. 其他各种量具的刻度都是以这种国际米原器的精确复制品为根据的.

由于实物基准的稳定性与安全性无法得到永久保证. 1960 年第十一届国际计量大会决定以长度的自然基准代替实物基准,并以 ^{86}Kr 原子 2P_{10} 与 5D_5 两个能级之间跃迁时所发出的橙黄光的波长 λ 作为长度标准,并规定 1 m 等于该波长的 1 650 763.73 倍.

随着激光技术的发展,物理学家们发现利用光速来定义“米”能获得更高的精度. 于是,1983 年第十七届国际计量大会通过了米的新定义:米是光在真空中 $(1/299\,792\,258)\text{ s}$ 时间间隔内所经路径的长度(同时规定了真空中光速为 $c = 299\,792\,258\text{ m/s}$). 可见,由于真空中的光速 c 为常量,所以上述米的新定义将长度标准与时间标准统一起来,并使长度的计量与时间的计量具有相同的精度.

在国际单位制中,长度的单位是 m(米). 在微观领域中,常用到“nm(纳米)”;天文学中计量天体之间的距离时,还常用到“AU(天文单位)”“l.y.(光年)”等长度单位,它们与 m 的关系如下:

$$1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$$

$$1\text{ AU} \approx 1.496 \times 10^{11}\text{ m}$$

$$1\text{ l.y.} \approx 9.460 \times 10^{15}\text{ m}$$

自然界中的任何客体均有一定的空间尺度,按照由小到大,通常分为微观、介观、宏观、宇观四大领域. 通常把分子、原子

($10^{-9} \sim 10^{-10}$ m 尺度)以及后来发现的更深层次的客体(如电子、核子、中微子、夸克等各种粒子)叫作微观物体;介于纳米和微米(即 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m)尺度之间的客体,如蛋白质、DNA 等生物大分子,称作介观物体;介于 $10^{-3} \sim 10^{13}$ m(即日常可见直至到太阳系范围)的客体(或系统),基本可用牛顿力学解决其机械运动规律,称为宏观物体(或系统);而需要考虑到相对论效应的大尺度空间则属于宇观. 目前,物理学最大的研究对象是整个宇宙,最远观察极限是哈勃半径,尺度达 $10^{26} \sim 10^{27}$ m 的数量级;已达到的最小长度为 10^{-20} m,它是弱电统一的特征尺度. 而理论上的最小长度称为普朗克长度(10^{-35} m),在比该长度更小的范围内,长度的概念可能不再适用了.

1.2 质点运动的描述

在军事侦察领域,为了有效地获取敌方运动目标的战场情报信息或对其进行电子干扰,并为最终摧毁该目标提供有力的保障,我们需要全面掌握该目标的整体运动状况,以便对其进行精确定位,这不仅需要知道它在任意时刻的空间位置,还必须获知它运动的快慢程度和运动方向,以及它运动快慢的变化程度与方向等. 下面首先引入描述物体整体运动的一个理想模型——质点,随后引入描述质点运动的几个基本物理量,并给出它们在直角坐标系中的表达式,接着讨论质点平面曲线运动的自然坐标描述,最后给出圆周运动的角量描述.

1.2.1 质点

1. 质点的概念

任何实际物体都有大小和形状. 一般说来,物体在机械运动时,它各部分的位置变化是不同的,其运动情况可能是非常复杂的. 例如反坦克导弹和便携式导弹的一种优秀弹种——旋转导弹在飞行过程中,与枪、炮弹一样绕中心轴线旋转,这时,旋转弹上各点相对地面的运动既有平动又有转动,情况比较复杂,但在研究其弹道与射程(即只关心弹体的飞行轨迹与距离)时,由于弹体的尺度远小其射程,导弹上各点绕其中心轴线的转动可忽略,



MOOC 链接 1-2-1

故只需考虑它们的平动,此时由于整个弹体的运动可以看作是相同的,所以可用一个具有导弹全部质量的点来代替整个导弹,于是,导弹的飞行便可简化为这个点的运动. 这样的—个没有大小和形状但具有物体的全部质量的点,称为质点.

显然,质点只是现实物体在一定条件或情况下的合理抽象,是为简化问题、突出问题的主要方面而引进的理想模型. 这种根据所研究问题的性质,抓住主要矛盾,忽略次要因素,建立一个理想化的模型来代替实际的研究对象,从而使得复杂问题简化的研究方法,称为理想模型法,这是一种科学抽象的方法,是科学研究中的一种基本方法. 在实际的科学研究中,往往先建立起描述理想模型的基本概念和规律,然后再以此为基础,作出适当的修正,逼近复杂的实际问题.

2. 实际物体可视为质点的条件

值得注意的是:在处理实际问题时,一个物体能否被抽象为质点,关键不在于物体的大小,而在于所研究问题的性质. 如在讨论轨道运动时,即便大如天体也可将它们抽象为质点;而当研究自转运动时,即便小如电子,也不能将之视作质点. 总之,一般情况下,在描述物体的运动时,如果物体的大小、形状对所研究的问题影响不大而可以忽略时,那么就可以将其理想化为质点;另外,如果物体不转动、不变形,只有平移运动,其上各点运动情况都相同,这时,物体的整体运动也可用一个质点的运动来代替.

当一个物体不能当作质点时,可以将整个物体看作是由许多质点组成的质点系. 分析这些质点的运动,就可以弄清楚整个物体的运动. 因此研究质点的运动是研究实际物体复杂运动的基础.

尽管描述质点在某参考系中的位置及其变化状况,可以用质点在其坐标系中的坐标及其相应的变化状况来表示,但这类表示方法在给定了参考系时还与坐标形式有关,不便于作一般性的定义陈述与关系式推导. 因此,下面引入矢量来描述质点的运动.

1.2.2 位置矢量

1. 位置矢量的定义

要描述质点的运动,即质点位置的变化,首先要描述质点的位置. 而确定一个质点的位置,必须明确质点在同一时刻的两个信息:方向与距离.

首先以二维的运动场景为例,假设有一不明目标(可视为质

点)进入了某警戒水域,并且被观测站中的监控雷达实时跟踪,则观察员可根据雷达探测的结果随时报告该目标(称作“目标 P ”)的位置.例如,“ t 时刻目标 P 的位置是北偏西 30° ,距观测站 $1\,200\text{ m}$ ”,这句话中,同时包含了描述目标 P 在 t 时刻的位置的两条信息:(1)目标 P 相对观测站的方位——北偏西 30° ;(2)目标 P 到观测站的距离—— $1\,200\text{ m}$.根据这两条信息,我们就可以知道目标 P 在 t 时刻的确切位置.

综合上述两条信息,在数学上可用从观测站(记为 O 点)指向 t 时刻目标 P (记为 P 点)的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 更加简洁清楚地表示,并记作矢量 $\boldsymbol{r}$,如图1.2.1所示. $\boldsymbol{r}$ 的方向说明了 P 点的方位, $\boldsymbol{r}$ 的大小(即它的“模”)表明了 P 点到参考点 O 点的距离.这一矢量 $\boldsymbol{r}$ 即为质点 P 在 t 时刻相对参考点 O 的位置矢量,简称位矢.

在三维空间,质点 P 在任意时刻的位置同样可用从参考点 O 指向 P 点的矢量 $\boldsymbol{r}$ 来确定质点 P 的位置.只是在三维空间中,确定位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向(即 P 点的方位)需要两个方位角.例如,要确定飞行中的洲际导弹(视为质点,记为 P)在地心参考系中的方位,必须同时知道它的两个方位角:经度角 φ 与纬度角 θ ,如图1.2.2所示.

2. 位矢在直角坐标系中的解析表达

在坐标系(此时参考系已确定)中,通常是以坐标原点为参考点,以某坐标轴为参考方向.由坐标系的量化特性,可写出位矢 $\boldsymbol{r}$ 在坐标系中的解析表达式.下面给出其在直角坐标系中的表达式.

设某导弹(视为质点)沿图1.2.3所示的曲线路径运动, t 时刻运动至 P 点,此时它的位矢 $\boldsymbol{r}$ 在 x, y, z 轴的投影分别为 x, y, z (均可正可负),如果以 $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量(即其大小是一个单位的矢量),则可将位矢 $\boldsymbol{r}$ 在直角坐标系中表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1.2.1)$$

位矢 $\boldsymbol{r}$ 大小记为 r ,它在直角坐标系中的表达式为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2.2)$$

位矢 $\boldsymbol{r}$ 在直角坐标系中的方向可由下面三个方向余弦确定:

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r} \quad (1.2.3)$$

式中 α, β, γ 分别为位矢 $\boldsymbol{r}$ 与 x, y, z 轴正方向之间的夹角(图1.2.3),它们满足

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1.2.4)$$

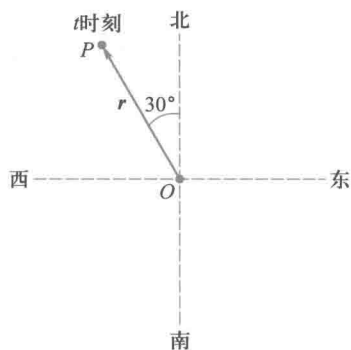


图 1.2.1 质点 P 在二维空间的位置矢量 $\boldsymbol{r}$

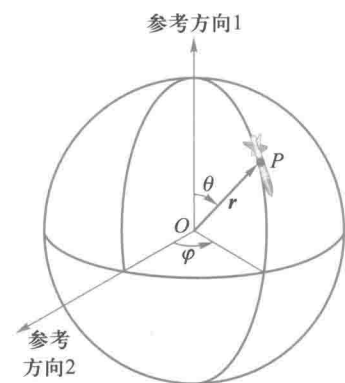


图 1.2.2 质点 P 在三维空间的位置矢量 $\boldsymbol{r}$

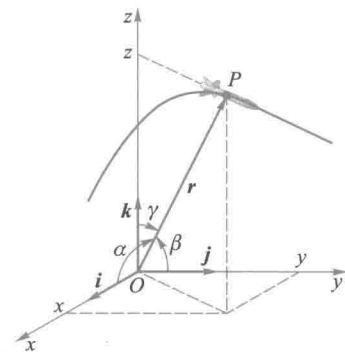


图 1.2.3 质点 P 在直角坐标系的位矢 $\boldsymbol{r}$ 及其分量

可见,要确定位矢 $\mathbf{r}$ 在三维空间的方位,只需知道任意两个方位角即可.

3. 位矢方程(运动方程)

质点在运动时,其位矢 $\mathbf{r}$ 随时间变化, $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数. 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.2.5)$$

上式称为质点的位矢方程,它详细描述了质点在任一时刻 t 相对于选定参考点的距离与方位,包含了质点如何运动的全部信息,因此它通常又称为质点的运动方程.

在直角坐标系中,质点的运动方程一般可表示为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1.2.6)$$

式中, $x(t), y(t), z(t)$ 是 t 时刻位矢 $\mathbf{r}$ 沿直角坐标系中 x, y, z 轴方向的分量,一般情况下都是时间 t 的函数. 故质点的位矢方程也可用时间 t 作为参量,表示成分量式即为

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.2.7)$$

式(1.2.7)表明:质点在每一时刻的位置可由三个独立坐标函数决定,每个坐标函数都可单独表示一个运动,因此质点的一般运动可以看成是质点沿各坐标轴的分运动的合成,这一性质称为运动的叠加性. 例如,不计空气阻力的平抛运动都可以看作水平方向的匀速直线运动与竖直方向的匀加速直线运动的叠加.

4. 轨迹与轨迹方程

质点运动时所经过路线叫作轨迹(或轨迹曲线). 轨迹在坐标系中的函数表达式称为轨迹方程,它可由运动方程的分量式中消去时间 t 而得到. 例如,已知某质点的运动方程(分量表达式)为

$$x = 3\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right), \quad y = 4\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right), \quad z = 0 \quad (\text{SI 单位})$$

则该运动质点的轨迹方程为

$$\left(\frac{x}{3}\right)^2 + \left(\frac{y}{4}\right)^2 = 1, \quad z = 0 \quad (\text{SI 单位})$$

上式表明质点在 Oxy 平面内做长半轴为 4 m、短半轴为 3 m 的椭圆运动.

1.2.3 位移 路程

1. 位移的定义

如前所述,机械运动就是物体的位置变化. 在一般情况下,质