

上册

# 大学物理

主编 陈宜生 李增智  
编者 王 莱 周佩瑶 吴亚非

天津大学出版社

D-75 / 3  
内 容 提 要

大学物理(上册)的内容包括力学、狭义相对论、热学基础及静电学。书中注意联系现代科学技术,章末附有开阔视野、活化内容的阅读资料;习题分成 A、B、C 三类,编排了相当多的估算题和思考题,其中,C类编排了用计算机解的题和联系实际的综合应用题。书末附有指导学生进一步学习的参考文献。内容的编排有很大的弹性,以方便教师取舍。

本书可作为工科大学物理教材。

大学物理(上册)                      陈宜生 李增智 主编

出版发行:天津大学出版社(电话:022-27403647)

地     址:天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

印     刷:河北省昌黎县印刷总厂

经     销:新华书店天津发行所

开     本:850mm×1168mm 1/32

印     张:11.75

字     数:306 千

版     次:1999 年 2 月第 1 版

印     次:1999 年 2 月第 1 次

印     数:1~5000

书     号:ISBN 7-5618-1140-3/O·104

定     价:16.00 元

如有印装质量问题,请与本社发行部门联系调换。

# 前 言

本书根据高等学校工科大学物理课程教学指导委员会制定的工科大学物理课程基本要求和重点高等学校工科大学物理课程教学改革指南,吸取我校杨仲著等所编《大学物理学》、李金锷等所编《工科大学物理基本教材》的经验,参考国内外先进教材,积多年教学体验编写而成。

物理学中介绍的自然规律和知识,无孔不入地渗透到了各个学科和技术领域。大学物理已成为工科院校各专业必不可少的重要基础课。在这世纪之交编写教材,理应考虑如何适应 21 世纪科技发展的需要。我们也意识到,尽管当今科学技术发展、更新很快,但自然规律并未老化,高新技术的发展更证实了物理理论的重要性和在技术发展中的原动力作用。这表明前辈们将本课程定位于阐述基本运动形式的基本规律是很正确的。据此,本教材首先立足于准确地向读者介绍物理学的基本概念、基本规律和基本方法。但是,也特别注意以现代科技发展为背景,介绍物理学的基本规律和进行本教材的内容选择,尽量使它具有鲜明的现代感,以使读者领会到高新技术与物理学的密切联系。

为了将内容活化和现代化,部分当代新成果和新技术已有机地融入基本内容中。当这种理论与实际的结合,可能有碍基本内容阐述的连贯性和教学顺畅时,便以“阅读资料”的形式放在每章之末,以便读者在掌握基本内容的前提下,开阔视野,活化物理内容。

考虑到 21 世纪人类将面临能源、环境、人口三大问题,同时考虑到科学技术正在走向综合和交叉,本书加强了对热运动规律,特别是熵的介绍。为了使读者突破根深蒂固的决定论观念,树立非

决定论观念,本书对热运动的概率描述和处理随机事件的一般思路给予足够重视。

扫描隧道显微镜的发明,标志着当今科学技术已进入了操纵原子及在原子、分子水平上生产材料或器件的时代,各种量子器件不断涌现,相干原子束已经得到,量子计算机和自旋晶体管等也在设想之中。鉴于这一发展趋势,本书加强了对量子力学基础的阐述。最末一章介绍了原子核和基本粒子,使读者初步了解构造物质的砖块和核能。

考虑到当前科学研究正由线性领域转向非线性领域,因此,我们将以往线性统辖的大学物理适当地向非线性作了延伸,如对混沌、分形、孤子等概念也适度提及,但严格限制在大学生能接受的范围内,坚持“点到为止、引发兴趣”的原则。

大学物理不仅是一门基础课,也是一门素质课,要尽量做到在传授知识的同时传授科学思维、科学态度和品德以及培养分析、解决问题的能力。在内容的陈述中,适当结合一些物理学史,并在关键之处明确提示方法的普遍性。做习题仍是物理课训练学生分析问题的重要手段,本书精选了习题,大幅度增加了估算题和联系实际的习题。考虑到计算机正在逐渐普及,书中还编入了一些用计算机求解的习题。本书将习题编排成A、B、C三类:A类是思考题和估算题;B类是在基本要求范围内巩固所学知识的计算题;C类是用计算机解的习题和综合运用、更为结合实际的习题,以培养学生的计算机解题能力和综合运用所学知识的能力。

书末附有供学生进一步学习的参考文献,以打破“一本书主义”,引导读者自己去获取知识。

本书第一、二章由王莱执笔,第三、四、六、七章由陈宜生执笔,第五章及第九章第四节由吴亚非执笔,第八、九(不包括第四节)、十章由李增智执笔,第十一、十二、十三章由周佩瑶执笔。最后由陈宜生统稿并修改。全书插图由吴亚非用计算机绘制。

成稿之后,经博士生导师马世宁教授审定全部书稿,并提出了

宝贵的修改意见。编者对审稿人的认真和严谨深表敬佩,对其为提高成书质量所给予的支持和帮助表示衷心感谢。

在制定编写大纲之时,薛天缘副教授参加了讨论,并提出了许多意见和看法,对编写工作颇有参考价值;工科物理课委员会委员孙永达博士阅读了部分书稿,提出了建设性的意见,在此一并表示谢意。

水平所限,缺点、错误恭请读者不吝指正。

编者

1998年10月

# 目 录

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第一章 质点力学 .....     | (2)  |
| 第一节 时间与长度的计量 ..... | (2)  |
| 第二节 质点运动的描述 .....  | (5)  |
| 参考系与坐标系 .....      | (5)  |
| 质点模型 .....         | (6)  |
| 位矢与运动方程 .....      | (6)  |
| 位移与速度 .....        | (9)  |
| 加速度 .....          | (13) |
| 运动描述的相对性 .....     | (20) |
| 第三节 牛顿运动定律 .....   | (23) |
| 牛顿第一定律 .....       | (23) |
| 牛顿第二定律 .....       | (27) |
| 动量定理 .....         | (29) |
| 牛顿第三定律 .....       | (31) |
| 惯性系与非惯性系 .....     | (35) |
| 角动量定理 .....        | (42) |
| 第四节 机械能和功 .....    | (46) |
| 功 .....            | (46) |
| 动能定理 .....         | (49) |
| 功能关系 .....         | (50) |
| 第五节 质点组及守恒定律 ..... | (55) |
| 质点组动能定理 .....      | (55) |
| 机械能守恒定律 .....      | (56) |
| 质点组动量定理 .....      | (59) |
| 动量守恒定律 .....       | (60) |
| 质点组角动量定理 .....     | (64) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 角动量守恒定律 .....            | (66)  |
| 守恒定律与对称性 .....           | (66)  |
| 习题一 .....                | (67)  |
| 阅读资料                     |       |
| 量纲 .....                 | (77)  |
| 四种基本力 .....              | (78)  |
| 行星运动与引力理论 .....          | (80)  |
| <b>第二章 刚体</b> .....      | (82)  |
| 第一节 刚体运动的描述 .....        | (82)  |
| 自由度 .....                | (82)  |
| 刚体的基本运动形式 .....          | (83)  |
| 描述刚体转动的物理量 .....         | (83)  |
| 质心、质心运动定理 .....          | (85)  |
| 平面平行运动 .....             | (88)  |
| 第二节 刚体的定轴转动 .....        | (90)  |
| 定轴转动定律 .....             | (90)  |
| 转动惯量及其计算 .....           | (93)  |
| 定轴转动刚体的能和功 .....         | (101) |
| 第三节 纯滚动 .....            | (104) |
| 第四节 陀螺 .....             | (109) |
| 习题二 .....                | (111) |
| 阅读资料                     |       |
| 宇宙 .....                 | (119) |
| <b>第三章 狭义相对论基础</b> ..... | (123) |
| 第一节 经典力学的绝对时空观 .....     | (123) |
| 第二节 狭义相对论基本原理 .....      | (126) |
| 迈克耳孙—莫雷实验 .....          | (127) |
| 爱因斯坦两个基本假设 .....         | (130) |
| 洛伦兹变换 .....              | (131) |
| 爱因斯坦速度变换 .....           | (134) |
| 第三节 时间空间的相对性 .....       | (138) |

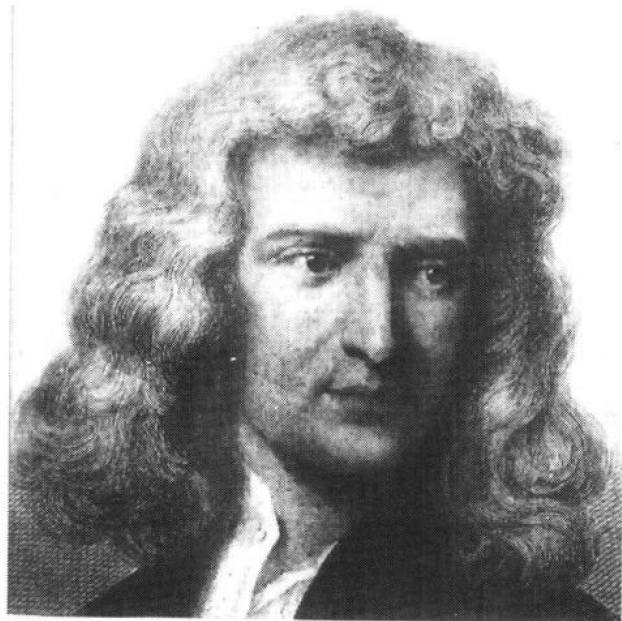
|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 同时性的相对性 .....            | (138) |
| 时间的相对性 .....             | (139) |
| 空间的相对性 .....             | (143) |
| 第四节 闵可夫斯基的四维世界 .....     | (146) |
| 第五节 相对论动力学 .....         | (148) |
| 质—速关系 .....              | (148) |
| 质—能关系 .....              | (152) |
| 能量—动量关系 .....            | (156) |
| 第六节 广义相对论简介 .....        | (157) |
| 等效原理 .....               | (158) |
| 广义相对性原理 .....            | (159) |
| 弯曲的时空 .....              | (159) |
| 广义相对论的实验验证 .....         | (163) |
| 广义相对论与黑洞 .....           | (166) |
| 习题三 .....                | (167) |
| <b>第四章 热学基础</b> .....    | (174) |
| 第一节 分子动理论的基本观点 .....     | (175) |
| 宏观物体由大量分子组成,分子间有间隙 ..... | (175) |
| 分子间存在相互作用力——分子力 .....    | (176) |
| 分子永不停息地运动 .....          | (179) |
| 第二节 微观量与宏观量 .....        | (181) |
| 理想气体压强公式 .....           | (182) |
| 温度的微观统计意义 .....          | (185) |
| 理想气体内能与分子自由度 .....       | (186) |
| 实际气体状态方程 .....           | (191) |
| 第三节 微观量的概率分布 .....       | (194) |
| 麦克斯韦分子速率分布 .....         | (195) |
| 玻尔兹曼分布 .....             | (200) |
| 理想气体分子在相空间的分布 .....      | (202) |
| 分子自由程的分布 .....           | (203) |
| 第四节 气体内的线性输运过程 .....     | (206) |



|                     |       |
|---------------------|-------|
| 扩散 .....            | (206) |
| 热传导 .....           | (208) |
| 内摩擦力(粘滞力) .....     | (211) |
| 第五节 热力学第一定律 .....   | (212) |
| 改变系统状态的方式 .....     | (213) |
| 内能 .....            | (214) |
| 热力学第一定律的数学表达 .....  | (215) |
| 功、热量、内能增量的计算 .....  | (216) |
| 理想气体绝热过程方程式 .....   | (222) |
| 理想气体自由膨胀过程 .....    | (225) |
| 节流过程与焦耳—汤姆孙效应 ..... | (226) |
| 卡诺循环 .....          | (227) |
| 第六节 热力学第二定律 .....   | (234) |
| 热力学第二定律的文字表述 .....  | (235) |
| 卡诺定理 .....          | (239) |
| 克劳修斯不等式 .....       | (241) |
| 新的态函数——熵 .....      | (243) |
| 热力学第二定律的数学表达 .....  | (244) |
| 熵与系统混乱度 .....       | (246) |
| 熵与信息 .....          | (247) |
| 熵增加原理 .....         | (248) |
| 能“质”的衰退 .....       | (250) |
| 不可逆过程的建设性作用 .....   | (252) |
| 第七节 热力学方程 .....     | (256) |
| 热力学方程 .....         | (256) |
| 理想气体的熵函数 .....      | (257) |
| 热力学第三定律 .....       | (258) |
| 习题四 .....           | (259) |
| 阅读资料                |       |
| 分维 .....            | (275) |
| 温室效应 .....          | (276) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>第五章 静电场</b> .....      | (279) |
| <b>第一节 电荷与静电场</b> .....   | (279) |
| 两种电荷 .....                | (279) |
| 库仑定律 .....                | (280) |
| 静电场 .....                 | (281) |
| 电场强度 .....                | (282) |
| 电场强度的计算 .....             | (283) |
| 电偶极子模型 .....              | (285) |
| <b>第二节 静电场的性质</b> .....   | (293) |
| 电场线 .....                 | (293) |
| 电通量 .....                 | (294) |
| 静电场的高斯定理 .....            | (295) |
| 静电场的环路定理 .....            | (302) |
| <b>第三节 电势</b> .....       | (303) |
| 电势能 .....                 | (304) |
| 电势 .....                  | (305) |
| 电势计算 .....                | (306) |
| 电势与场强的关系 .....            | (307) |
| 等势(位)面 .....              | (308) |
| <b>第四节 静电场力的应用</b> .....  | (311) |
| <b>第五节 静电场中的导体</b> .....  | (315) |
| 静电平衡条件 .....              | (316) |
| 导体的静电平衡性质 .....           | (316) |
| 静电屏蔽 .....                | (319) |
| <b>第六节 静电场中的电介质</b> ..... | (322) |
| 电介质的极化 .....              | (323) |
| 电极化强度 .....               | (324) |
| 电介质中的电场 .....             | (327) |
| 介质中的高斯定理 .....            | (330) |
| 静电场的边界条件 .....            | (331) |
| <b>第七节 电容 电场的能量</b> ..... | (333) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 孤立导体的电容 .....          | (334) |
| 电容器的电容 .....           | (334) |
| 电容器的串并联 .....          | (338) |
| 静电场的能量 .....           | (340) |
| 习题五 .....              | (342) |
| 阅读资料                   |       |
| 点电荷系或导体系的电势能 .....     | (354) |
| 驻极体与铁电体 .....          | (356) |
| 压电效应与电致伸缩效应 .....      | (357) |
| 库仑阻塞效应与单电子学 .....      | (359) |
| 附录一 进一步阅读的参考书目 .....   | (361) |
| 附录二 各章进一步阅读的参考文献 ..... | (362) |



真理是在简单性中发现的,而不是在事物的多样性和纷乱中发现的。至于世界,它向肉眼展示出客观事物极其多种多样,在用哲学的理解去概观时,会显示出其内部组成是很简单的,以致理解得如此之好,从这些眼光来看它就是这样。正是上帝工作的完美,以最大的简单性将它们全都创造出来。

——牛顿

# 第一章 质点力学

世界万物处于永恒的运动中,而运动的形式又多种多样,其中物体之间,或同一物体各部分之间相对位置的变化是最简单、最普遍的一种,这种运动形式称为机械运动。研究物体机械运动规律的学科称为力学。

力学的发展是很早的。在古代,人们就从生产实践中总结出了大量的基本知识和基本原理。随着历史的进程,生产技术的发展极大地促进了对力学规律的研究,许多科学家为此做出了很大的贡献,如开普勒、伽利略、笛卡尔、惠更斯等人。牛顿总结了前人的工作并加以概括,为经典力学奠定了坚实的基础。

经典力学可以分为运动学和动力学。运动学讨论如何描述物体的运动;动力学则讨论物体运动和运动变化的原因。

## 第一节 时间与长度的计量

物理学是一门实验的科学,它是以测量为基础的。力学作为它的一个分支,其规律是基于对大量现象的不断观察和测量,通过总结、归纳或推理得出的。

运动是与时间、空间紧密相连的,因此有必要首先讲述一下关于时间和空间的计量。时间被用来描述运动的持续性,它的计量有赖于周期性的现象。历史上,人们曾经用一天的长短作为计量时间的单位,再利用沙漏将一天分成小时;伽利略曾经利用人的心跳快慢测定单摆的周期。在对地球以外的星系有所认识后,人们发现太阳系中地球、木星等行星围绕太阳的运转、月球围绕地球的运转都是有周期性的,其周期都可以被用来作为计量时间的基准。

长期以来,人们规定太阳相继两次中天所经历的时间为一个太阳日,由于太阳在黄道上运行速度不均匀,一年中最长和最短的太阳日相差约 51 秒(s),所以取其平均值并称为平太阳日。一平太阳日分为 24 平太阳小时,一平太阳小时分为 60 平太阳分,一平太阳分又分为 60 平太阳秒。近年来,人们发现地球自转速率在变慢,每经过一个世纪,一个平太阳日增加 0.001s。后来,随着人们对微观世界的认识和深入,认识到原子内部能级跃迁所发射或吸收的电磁波频率极为稳定,以此为基础建立的计量时间系统比以地球自转周期为基准的系统准确得多。1967 年第十三届国际计量大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准——原子时,规定 1 原子秒等于铯 133 原子基态两个超精细能极之间跃迁辐射周期的 9 192 631 770 倍。

科学的进步是无止境的,目前又有许多科学家建议用射电脉冲星辐射来校正时间基准。

空间被用来描述运动的广延性。空间的大小是以长度的计量为基础的,国际上以米作为计量长度的基准。1889 年,第一届国际计量大会将保存在巴黎国际计量局中的铂铱合金棒在摄氏零度时两条刻线间的距离定义为 1 米(m)。然而这种方式的基准存在着较大的缺陷。首先,很难精确地保持所控制的温度;另外,在不同地点使用这种基准时,必须有这个米原器的复制品,但是没有有一个复制品能够达到理想的准确程度。后来,1960 年第十一届国际计量大会更改了用实物作为长度基准的作法,规定氪 86 原子橙黄色光波波长的 1 650 763.73 倍为 1m。近年来,随着激光器的发展,人们发现激光频率的复现性比氪 86 光谱灯定义米的精度又高许多,1983 年,第十七届国际计量大会又一次做出新的决定,将光在真空中于 1/299 792 458s 的时间间隔内通过的路程长度定义为 1m。

在表 1-1 和表 1-2 中分别列出了一些典型的时间及典型的长度和距离。

表 1-1 典型的时间

s

|            |                      |                |                     |
|------------|----------------------|----------------|---------------------|
| 宇宙年龄       | $10^{18}$            | 最高声频周期         | $5 \times 10^{-5}$  |
| 地球年龄       | $1.3 \times 10^{17}$ | 中频无线电波周期       | $1 \times 10^{-6}$  |
| 镭半衰期       | $5.2 \times 10^{10}$ | 分子转动周期         | $1 \times 10^{-12}$ |
| 地球公转周期(一年) | $3.2 \times 10^7$    | 中性 $\pi$ 介子半衰期 | $2 \times 10^{-16}$ |
| 月球公转周期     | $2.6 \times 10^6$    | 光穿越原子的时间       | $\approx 10^{-18}$  |
| 地球自转周期     | $8.6 \times 10^4$    | 核振动周期          | $\approx 10^{-21}$  |
| 超快速摄影曝光时间  | $1 \times 10^{-4}$   | 光穿越核的时间        | $\approx 10^{-24}$  |

表 1-2 典型的长度和距离

m

|             |                       |           |                     |
|-------------|-----------------------|-----------|---------------------|
| 宇宙的尺度       | $\approx 10^{26}$     | 长人的高度     | $2 \times 10^0$     |
| 地球到太阳的平均距离  | $1.49 \times 10^{11}$ | 一张纸的厚度    | $1 \times 10^{-4}$  |
| 地球到月球的平均距离  | $3.8 \times 10^8$     | 氢原子的直径    | $1 \times 10^{-10}$ |
| 地球半径        | $6.37 \times 10^6$    | 电子的康普顿波长  | $8 \times 10^{-13}$ |
| 喷气式飞机典型飞行高度 | $1 \times 10^4$       | 质子的近似“半径” | $1 \times 10^{-15}$ |

由表 1-1 和表 1-2 列举的数据表明,现代人们研究过的时间、空间尺度大小的范围跨越了相当大的数量级。在实验和理论中,单一的单位用起来就很不方便了。因此,通常用十进倍数或十进分数与物理量的单位组合在一起,构成大小十分悬殊的各种单位。表 1-3 列出国际单位制中对十进倍数、十进分数的表示。

表 1-3 国际单位制中的量级表示

| 数量级        | 英文缩写符号 | 中译名 | 数量级       | 英文缩写符号 | 中译名 |
|------------|--------|-----|-----------|--------|-----|
| $10^{-1}$  | d      | 分   | 10        | da     | 十   |
| $10^{-2}$  | c      | 厘   | $10^2$    | h      | 百   |
| $10^{-3}$  | m      | 毫   | $10^3$    | k      | 千   |
| $10^{-6}$  | $\mu$  | 微   | $10^6$    | M      | 兆   |
| $10^{-9}$  | n      | 纳   | $10^9$    | G      | 吉   |
| $10^{-12}$ | p      | 皮   | $10^{12}$ | T      | 太   |
| $10^{-15}$ | f      | 飞   | $10^{15}$ | P      | 拍   |
| $10^{-18}$ | a      | 阿   | $10^{18}$ | E      | 艾   |
| $10^{-21}$ | z      | 仄   | $10^{21}$ | Z      | 泽   |
| $10^{-24}$ | y      | 幼   | $10^{24}$ | Y      | 尤   |

表 1-4 和表 1-5 中分别列出某些短时间间隔和小尺度长度的单位名称。

表 1-4 某些短时间间隔的名称

| 名 称 | 符 号           | 持续时间               |
|-----|---------------|--------------------|
| 皮秒  | ps            | $10^{-12}\text{s}$ |
| 纳秒  | ns            | $10^{-9}\text{s}$  |
| 微秒  | $\mu\text{s}$ | $10^{-6}\text{s}$  |
| 毫秒  | ms            | $10^{-3}\text{s}$  |

表 1-5 小尺度长度单位

| 名 称 | 符 号           | 米制长度       |
|-----|---------------|------------|
| 微米  | $\mu\text{m}$ | $10^{-6}$  |
| 纳米  | nm            | $10^{-9}$  |
| 埃   | $\text{\AA}$  | $10^{-10}$ |
| 皮米  | pm            | $10^{-12}$ |
| 飞米  | fm            | $10^{-15}$ |

在大尺度长度范围,如太阳系内,天体间距离的计量通常用“天文单位”(符号为 AU)作为计量单位, $1\text{AU}=1.495\,978\,7\times 10^{11}\text{m}$ ;太阳系以外的天体间距离通常用“光年”作为计量单位(“光年”是光在一年里走过的距离,符号为 l. y.), $1\text{ l. y.}=9.460\,730\times 10^{15}\text{m}\approx 10^{16}\text{m}$ 。

## 第二节 质点运动的描述

### 参 考 系 与坐标系

世界上一切物体均处于运动之中,运动的这种普遍性和永恒性被称为运动的绝对性。正因为是这样,在对物体的运动进行观测并加以描述时,就必须选择另外一个物体作为参照,把这个参照

物体称为参考系。然而,如果选了不同的参考系,对物体运动会得出不同的观测结果和不同的描述。例如,坐在汽车上的人说,从其手中落下的硬币沿着直线下降;而站在路边的人却说,硬币是沿曲线运动。如此的例子很多,也很常见,这表明,人们对运动的描述具有相对性。这种相对性正是由运动的绝对性所造成的,运动是



绝对的,而运动的描述是相对的。

为了对物体的位置及运动状态作定量的描述,还必须在参考系上建立合适的坐标系。最常见的坐标系有直角坐标系、极坐标系,有时候也选用球坐标系,或者自然坐标系等。

### 质点模型

物体总是有大小和形状的。在运动中,物体上各部分的运动情况并不一定相同,因此,描述物体运动不是容易的事情。通常,有必要根据具体情况情况进行合理的简化。例如,在描述地球围绕太阳运转、带电粒子在电磁场中运动及炮弹飞行时,有时仅仅关注物体整体运动的情况,对它的形状、大小、形变及转动等方面暂时不考虑;又如,物块沿斜面滑动一类的运动,物体上任何一点的运动都相同,只需取一点作为代表。这些情况,就可以把物体当做是一个具有质量的几何点来研究,并称之为质点。有时候,需要描述物体的转动、物体的形变,就不能将物体视为质点。这时,可以将物体分为许多微小部分,而把每个微小部分视为质点,整个物体可看成为一大群质点的集合,称为质点组。分析其中每个质点的运动,就可弄清整个物体的运动。所以,描述质点的运动是研究物体运动的基础。在力学中质点是实际物体的一个简化的理想模型。为描述质点运动,需引入下列物理量。

### 位矢与运动方程

定量地表示质点的位置是描述质点运动的基础。在选择了合适的参考系之后,再在参考系内任意选取某一固定点作为坐标系的原点,通常记为 $O$ 。从原点指向质点所在处 $P$ 点的矢量 $\overrightarrow{OP}$ ,即可描述质点的位置, $\overrightarrow{OP}$ 被称为质点在 $P$ 处的位置矢量,简称位矢。矢量 $\overrightarrow{OP}$ 的大小表示质点与原点的距离,其方向表示质点相对原点的方位,通常将位矢 $\overrightarrow{OP}$ 简记为 $r$ 。

在运动中,质点的位置随时间不断改变,可将位矢随时间的变化情况表示为时间函数的形式