21世纪高职高专系列规划教材 > 电类基础课
高职高专"十二五"规划教材

应用大学物理

YINGYONG DAXUE WULI

主　编　胡祥青
副主编　黄新华

北京理工大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

应用大学物理

主　编　胡祥青
副主编　黄新华
参　编　钱　晋　梅立雪　邵　娟

北京师范大学出版社

前　言

本书针对高专高职必修的重要基础课程——大学物理的内容和体系进行了创新。传统的教材大多系统详细地介绍物理学的概念和规律，而本书为适应经济社会发展对高职人才培养的新要求，为反映物理学对现代社会的巨大影响及渗透，以物理学在生活、生产中的应用为主线，将概念和规律的讲述融入鲜活的实际应用中，形成新的教材体系，故称为应用大学物理。

本书以提高学生的科学素养和综合职业能力为主要目的，注重培养学生分析问题和解决问题的能力，以期最大限度地让学生掌握必要的物理学知识，激发学生探索自然的兴趣。教材内容以经典理论——力学、热学、电磁学、光学为基础，紧密结合最新的现代技术；以基础知识为引导，突出介绍物理学的新发展、新技术。

教材编写特别注重以学生为中心，以就业为导向，既注意科学性，又注重实践应用，列举的例子大多是与现实生活、社会以及机电专业相联系的，实训项目贴近岗位技能需要。

本书充分考虑高职高专学生的认知程度，注意用简明扼要的叙述、丰富的实例、大量的图片引导学生对概念的理解；全书没有涉及微积分，尽量减少理论推导和计算过程，突出结论和结论的应用；全书图文并茂，力求通俗易懂。

本书由景德镇高等专科学校胡祥青老师任主编，黄新华老师任副主编。第 1 章由景德镇高专钱晋、黄新华老师编写；第 2 章由胡祥青老师编写；第 3 章由景德镇高专梅立雪老师编写；第 4 章由黄新华老师编写；第 5 章由景德镇高专邵娟老师编写；全书由胡祥青老师统稿。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，肯望同行和读者指正。

编　者

2011 年 1 月

目 录

第 1 章　古老而现代的力学 …… (1)
1.1　运动的描述 …… (1)
1.1.1　参照物、坐标系、质点 … (1)
1.1.2　位置矢量 …… (2)
1.1.3　位移 …… (3)
1.1.4　速度 …… (3)
1.1.5　加速度 …… (4)
1.2　机械运动的常见形式 …… (6)
1.2.1　平动 …… (6)
1.2.2　曲线运动 …… (6)
1.2.3　定轴转动 …… (7)
1.3　相对运动 …… (7)
1.4　牛顿运动定律 …… (8)
1.4.1　牛顿运动三定律 …… (8)
1.4.2　力的基本形式 …… (11)
1.4.3　牛顿三定律应用 …… (15)
1.4.4　机械中的应用 …… (17)
1.5　动量守恒、机械能守恒 …… (20)
1.5.1　动量定理及动量守恒定律 …… (20)
1.5.2　动能定理、机械能守恒定律 …… (22)
1.5.3　能量守恒定律 …… (25)
1.6　振动和波 …… (26)
1.6.1　简谐振动 …… (26)
1.6.2　平面简谐波 …… (28)
1.6.3　声学及其利用 …… (29)
实训 1-1　单摆的运动特性 …… (31)
实训 1-2　弦振动共振波形及波的传播速度测量 …… (32)
实训 1-3　转动惯量的测定 …… (35)
实训 1-4　简谐振动特性研究与弹簧劲度系数测定 …… (37)
习　题 …… (39)
第 2 章　功勋卓著的电和磁 …… (41)
2.1　静电场 …… (41)
2.1.1　电荷 …… (41)
2.1.2　电场 电场强度 …… (42)
2.1.3　电势 …… (44)
2.1.4　静电感应 …… (45)
2.1.5　静电应用 …… (47)
2.2　稳恒电流 …… (50)
2.2.1　部分电路欧姆定律 …… (50)
2.2.2　电路的连接 …… (52)
2.2.3　电功、电功率 …… (54)
2.2.4　全电路欧姆定律 …… (55)
2.2.5　高压输电 …… (58)
2.3　稳恒磁场 …… (59)
2.3.1　磁现象、磁场 …… (59)
2.3.2　带电粒子在磁场中的运动——霍尔效应 …… (62)
2.3.3　磁场对电流的作用——电动机 …… (65)
2.4　电磁感应 …… (68)
2.4.1　电磁感应 …… (68)
2.4.2　动生电动势　交流发电机 …… (70)
2.4.3　自感与互感现象 …… (71)
2.4.4　电磁炉 …… (72)
2.4.5　电磁学的应用 …… (73)

2.4.6 最完美的一首诗：麦克斯韦方程组 …… (77)
2.5 电磁波与人类文明 …… (79)
实训 2-1 安装简单的照明电路 … (82)
实训 2-2 两处控制电灯的线路安装 …… (85)
实训 2-3 日光灯的安装及其检修 …… (86)
实训 2-4 霍尔效应及其应用 …… (89)
实训 2-5 指针式电表的改装与校准 …… (91)
实训 2-6 电子在电磁场中运动规律的研究 …… (95)
习 题 …… (100)
第 3 章 绚丽多彩的光 …… (106)
3.1 几何光学 …… (106)
3.1.1 光的反射、折射 …… (107)
3.1.2 全反射、光导纤维 …… (108)
3.1.3 棱镜、透镜 …… (110)
3.1.4 光学仪器、放大镜、照相机、望远镜 …… (114)
3.1.5 光的色散 …… (119)
3.2 波动光学 …… (122)
3.2.1 光的干涉、检测、镀膜 …… (122)
3.2.2 光的衍射 …… (130)
3.2.3 平面衍射光栅、光盘 …… (133)
3.2.4 光的偏振、立体电影 …… (137)
实训 3-1 薄透镜焦距的测量 …… (140)
实训 3-2 迈克尔逊干涉仪 …… (142)
实训 3-3 用衍射光栅测光波波长 …… (143)
实训 3-4 光的偏振现象的研究 … (144)
习 题 …… (145)
第 4 章 无处不在的热 …… (147)
4.1 温度与温标 …… (147)
4.1.1 状态参量、平衡态、准静态过程 …… (147)
4.1.2 温度 …… (148)
4.2 热力学第一定律 …… (152)
4.2.1 准静态过程、功、热量、内能 …… (152)
4.2.2 热力学第一定律 …… (155)
4.3 热力学第二定律 …… (162)
4.4 热工 …… (163)
4.4.1 热加工和冷加工 …… (163)
4.4.2 金属热处理 …… (164)
4.4.3 金属热处理工艺 …… (165)
4.4.4 冷处理 …… (167)
实训 4-1 固体导热系数的测量 … (167)
实训 4-2 气体比热容比的测定 …… (169)
实训 4-3 温度传感器的温度特性测量 …… (170)
实训 4-4 金属线膨胀系数的测量 …… (173)
习 题 …… (176)
第 5 章 神通广大的通信技术 … (177)
5.1 电磁波与现代通信 …… (177)
5.1.1 通信的地位和作用 …… (177)
5.1.2 通信系统 …… (177)
5.1.3 无线电通信 …… (178)
5.2 现代通信技术应用 …… (179)
5.2.1 无线电的诞生过程 …… (179)
5.2.2 无线电广播和电视 …… (180)
5.2.3 无线移动通信 …… (183)
5.2.4 微波与卫星通信 …… (185)
5.2.5 激光—光纤通信 …… (188)
5.3 计算机通信网络 …… (190)
习 题 …… (193)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 1 章　古老而现代的力学

【本章要点】

1. 运动的描述；
2. 机械运动的常见形式，牛顿运动定律；
3. 动量守恒、能量守恒；
4. 振动和波。

在各种形态的物体运动中，最简单而又最基本是物体位置随时间而变化的运动，称为机械运动。行星绕太阳转，宇宙飞船的航行，机器的转动，水和气体的流动等都是机械运动。力学的研究对象是机械运动。我们学习的力学主要内容是指经典力学，通常包括运动学、动力学和静力学。运动学只描述物体的运动，不涉及引起运动和改变运动的原因；动力学则研究物体的运动与物体间相互作用的内在联系；静力学研究物体在相互作用下的平衡问题。其中动力学的基本定律和定理是本章的主要内容。

1.1　运动的描述

1.1.1　参照物、坐标系、质点

1. 参考系

在自然界中所有的物体都在不停地运动，绝对静止不动的物体是没有的。在观察一个物体的位置及位置的变化时，总要选取其他物体作为标准，选取的标准物不同，对物体运动情况的描述也就不同，这就是运动描述的相对性。

为描述物体的运动所参照的物体叫做参考系。不同的参考系对同一物体运动情况的描述是不同的。一个物体，不论是运动还是静止，都是相对于某个参考系而言的。参考系的选择是任意的。在讨论地面上物体的运动时，通常选地球作为参考系。对于同一个运动，选择不同参考系，运动情况是不一样的。

例如，对于船上的人抛出的小球，选人为参考及选地面为参考系，对小球的运动情况描述不一样。图 1-1 中选小女孩为参考系，球是竖直上抛运动；图 1-2 选河岸为参考系时则小球的运动为斜抛运动。



图 1-1　选小女孩为参考



图 1-2　选河岸为参考

2. 坐标系

为了把物体在各个时刻相对于参考系的位置定量地表示出来，还需要在参考系上选择适当的坐标系。坐标系的种类很多，常用的坐标系有：笛卡尔直角坐标系、自然坐标系、平面极坐标系、柱面坐标系(或称柱坐标系)和球面坐标系(或称球坐标系)等。物理学中常用的坐标系为直角坐标系，也称为正交坐标系。

3. 质点

物体都有大小和形状，运动方式又都各不相同。例如，太阳系中，行星除绕自身的轴线自转外，还绕太阳公转；从枪口射出的子弹，它在空中向前飞行的同时，还绕自身的轴转动；有些双原子分子，除了分子的平动、转动外，分子内各个原子还在振动。这些事实都说明，物体的运动情况是十分复杂的。物体的大小、形状、质量也都是千差万别的。

如果我们研究某一物体的运动，可以忽略其大小和形状，或者可以只考虑其平动，那么，我们就可把物体当作是一个有一定质量的点，这样的点通常叫做质点。

质点是经过科学抽象而形成的物理模型。把物体当作质点是有条件的、相对的，而不是无条件的、绝对的，因而对具体情况要作具体分析。例如研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离约为地球半径的 10^4 倍，故地球上各点相对于太阳的运动可以看做是相同的，所以在研究地球公转时可以把地球当作质点。但是，在研究地球上物体的运动情况时，就不能再把地球当作质点处理了。

应当指出，把物体视为质点这种抽象的研究方法，在实践上和理论上都有重要意义的。当我们所研究的运动物体不能视为质点时，可把整个物体看成是由许多质点组成的，弄清这些质点的运动，可以弄清楚整个物体的运动。所以，研究质点的运动是研究物体运动的基础。

1.1.2 位置矢量

1. 位置矢量

为了描述运动质点的位置，首先应该选择一个参考系，然后在参考系上选定坐标系，并规定它的原点和坐标轴。例如图 1-3 所示的直角坐标系中，在时间 t，质点 P 在坐标系里的位置可用从原点 O 到质点 P 的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 来表示，且 $\overrightarrow{OP}=\boldsymbol{r}$，把矢量 $\boldsymbol{r}$ 叫做位置矢量，简称位矢。它是一个有向线段，其始端位于坐标系的原点 O，末端则与质点 P 在时刻 t 的位置重合。从图中可以看出，位矢 $\boldsymbol{r}$ 在 Ox 轴、Oy 轴和 Oz 轴上的投影(即质点的坐标)分别为 x、y 和 z。所以，质点 P 在直角坐标系中的位置，既可以用位矢 $\boldsymbol{r}$ 来表示，也可以用坐标 x、y 和 z 来表示。那么位矢 $\boldsymbol{r}$ 亦可写成

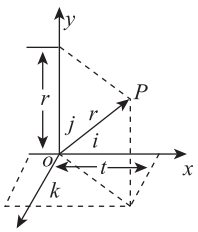


图 1-3 位置矢量

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}$$

其值为

$$|\boldsymbol{r}|=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向余弦由下式确定

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

2. 运动学方程和轨迹方程

质点的机械运动是质点的空间位置随时间而变化的过程，这时质点的坐标 x、y 和 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学方程，写做：$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$，与之对应的三个标量函数是：$x=x(t)$，$y=y(t)$，$z=z(t)$为质点运动学方程的标量形式。

质点运动时描述的轨迹称为质点为运动的轨迹。质点位置坐标 x、y 和 z 所满足的方程，称为轨迹方程。联立上述三个标量方程，消去参数 t，可得质点的轨迹方程。

例如：质点的标量函数为 $x=5\cos t$，$y=5\sin t$，消去 t 得轨迹方程为 $x^2+y^2=25$，显然质点的轨迹是一个半径为 5 的圆。

1.1.3 位移

位置矢量随时间而变时，为描述质点在一定时间间隔内位置的变动，用位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 表示物体(质点)的位置变化，在如图 1-4 的 Oxy 平面直角坐标系中，有一质点沿曲线从时刻 t_1 的点 A 运动到时刻 t_2 的点 B，质点相对原点 O 的位矢由 $\boldsymbol{r}_A$ 变化到 $\boldsymbol{r}_B$。显然，在时间间隔 $\Delta t=t_2-t_1$ 内，位矢的长度和方向都发生了变化。我们将由起始点 A 指向终点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 称为点 A 到点 B 的位移矢量，简称位移。位移 $\overrightarrow{AB}$ 反映了质点位矢的变化。如把 $\overrightarrow{AB}$ 写做 $\Delta\boldsymbol{r}$，则质点从 A 点到 B 点的位移为：

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A$$

位置矢量和位移在量值上都表示长度，常用的单位为米(m)、千米(km)和厘米(cm)。

应当注意，位移是描述质点位置变化的物理量，它只表示位置变化的实际效果，并非质点所经历的路程。当质点经一闭合路径回到原来的起始位置时，其位移为零，而路程则不为零。

1.1.4 速度

研究质点的运动，不仅要知道质点的位移，还有必要知道在多长的一段时间内有了这一位移，亦即要知道运动的快慢程度。

1. 平均速度

如图 1-4，质点从 A 到 B 的过程中，经历 Δt 的时间，质点的位移为 $\Delta\boldsymbol{r}$，那么，$\Delta\boldsymbol{r}$ 和 Δt 的比值，就称为质点在时间 Δt 内的平均速度。

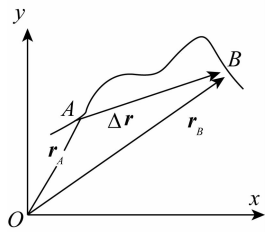


图 1-4 位移

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A}{\Delta t}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$$

平均速度反映一段时间内物体运动的平均快慢程度，它与一段位移或一段时间相对应。



图 1-5 汽车里程表显示的平均速度

速度在国际单位制的最基本单位是米每秒，国际符号是米/秒(m/s)，常见单位还有千米/小时(km/h)。如图 1-5 汽车里程表所示的平均速度为 27.1km/h。

一些常见的速度有：步行的速度约 1.4m/s、游泳的速度约 1.7m/s、骑自行车的速度 8m/s、电动车 11m/s、汽车速度约 22m/s、列车速度 40m/s、飞机速度 250m/s、卫星速度 7.9km/s、光在真空中的速度是 3×10^8m/s。

2. 瞬时速度

运动物体在某一时刻或某一位置时的速度，叫做瞬时速度(简称速度)，通常把瞬时速度的大小又称为速率。瞬时速度是矢量，某一时刻(或经某一位置时)瞬时速度的方向，即是这一时刻(或经过一位置时)物体运动的方向。如果物体做匀速直线运动，它在运动过程中速度保持不变，那么它任何时刻的瞬时速度和整个运动过程的平均速度也相同。

当 $\Delta t \to 0$ 时，平均速度 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 的极限值叫做瞬时速度(简称速度)，用 $\boldsymbol{v}$ 表示，可用数学式

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$$

表示，亦即速度等于矢径对时间的一阶导数。

瞬时速度简称速度(通常说的速度是指平均速度)，但是在解题时碰到“速度”一词，如果没有特别说明均指瞬时速度，如图 1-6 所示的仪表盘显示的瞬时速度。



图 1-6　仪表盘显示瞬时速度

1.1.5　加速度

上面已经指出，作为描述质点状态的一个物理量，速度是一个矢量，所以，无论是速度的数值发生改变，还是其方向发生改变，都表示速度发生了变化。为衡量速度的变化，我们将从曲线运动出发引出加速度的概念。

在时间间隔 Δt 内，如果质点的速度增量为 $\Delta \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_2-\boldsymbol{v}_1$，它在单位时间内的速度增量即平均加速度为

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

当 $\Delta t \to 0$ 时，平均加速度的极限值叫做瞬时加速度，用 $\boldsymbol{a}$ 表示，有

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$$

$\boldsymbol{a}$ 的方向是 $\Delta t \to 0$ 时 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向，而 $\boldsymbol{a}$ 的数值是 $|\Delta \boldsymbol{v}/\Delta t|$ 的极限值，单位：$\mathrm{m/s^2}$(米每秒平方)。

应当注意，加速度 $\boldsymbol{a}$ 既反映了速度方向的变化，也反映了速度数值的变化。所以质点做曲线运动时，任一时刻质点的加速度方向并不与速度方向相同，即加速度方向不沿着曲线的切线方向。在曲线运动中，加速度的方向指向曲线的凹侧。

加速度的物理意义：表示物体速度变化的快慢的物理量。

图 1-7 所示为强动地震仪；图 1-8 所示为世界最小的加速度感应器

加速度与速度无必然联系，加速度很大时，速度可以很小，速度很大时，加速度也可以很小。例如：在地面上反复弹跳的皮球，在和地面接触的极短时间内，速度接近于零(或者说由向下的速度变为零再变为向上的速度)，但是因为速度在很短的时间内作了极大的变化，因此加速度很大。又如，以高速直线匀速行驶的赛车，速度很大，但是由于是匀速行驶，速度的变化量是零，因此它的加速度也是零。



图 1-7　强动地震仪测量的物理量是直接与地震力相关的加速度



图 1-8　世界最小的加速度感应器

加速度为零时，物体静止或做匀速直线运动(相对于同一参考系)。任何复杂的运动都可以看做是无数的匀速直线运动和匀加速运动的合成。

加速度因参考系选取的不同而不同，一般取地面为参考系。

当运动的方向与加速度的方向之间的夹角小于 90°时，即做加速运动，加速度是正数；反之则为负数。

特别地，当运动的方向与加速度的方向之间的夹角恰好等于 90°时，物体既不加速也不减速，而是匀速率的运动，如匀速圆周运动。

我们来介绍一个常见的加速度——重力加速度。

地球表面附近的物体因受重力而产生的加速度叫做重力加速度，也叫自由落体加速度，用 $\boldsymbol{g}$ 表示。重力加速度 $\boldsymbol{g}$ 的方向总是垂直向下的。在同一地区的同一高度，任何物体的重力加速度都是相同的。重力加速度的数值随海拔高度增大而减小。当物体距地面高度远远小于地球半径时，$\boldsymbol{g}$ 值变化不大。而离地面高度较大时，重力加速度 $\boldsymbol{g}$ 数值显著减小，此时不能认为 $\boldsymbol{g}$ 值为常数。

距离地面同一高度的重力加速度，也会随着纬度的升高而变大。由于重力是万有引力的一个分力，万有引力的另一个分力提供了物体绕地轴做圆周运动所需要的向心力。物体所处的地理位置纬度越高，圆周运动轨道半径越小，需要的向心力也越小，重力将随之增大，重力加速度也变大。地理南北两极处的圆周运动轨道半径为 0，需要的向心力也为 0，重力等于万有引力，此时的重力加速度也达到最大。

由于 $\boldsymbol{g}$ 随纬度变化不大，因此国际上将在纬度 45°的海平面精确测得物体的重力加速度值 $g=9.80665\text{m/s}^2$ 作为重力加速度的标准值。在解决地球表面附近的问题中，通常将 g 作为常数，在一般计算中可以取 $g=9.80\text{m/s}^2$。理论分析及精确实验都表明，随纬度的提高，重力加速度 $\boldsymbol{g}$ 的值略有增大。

如表 1-1 所示为各地区的重力加速度。

表 1-1　各地区的重力加速度

地区	重力加速度(m/s^2)	地区	重力加速度(m/s^2)
赤道	9.780	北京	9.801
广州	9.788	武汉	9.794
上海	9.794	纽约	9.803
莫斯科	9.816	北极地区	9.832
东京	9.798	月球	1.62

1.2　机械运动的常见形式

1.2.1　平动

平动也称平移(translationalmotion)，即平行移动。它是机械运动的一种特殊形式，是刚体的一种最基本的运动。

运动物体上任意两点所连成的直线，在整个运动过程中，始终保持平行移动，这种运动叫做平动。

如图 1-9 和图 1-10 所示为平动。另如升降机的运动，汽缸中活塞的运动，刨床上刨刀的运动，车床上车刀的运动等等，都是平动。在同一时刻，运动物体上各点的速度和加速度都相同。因此在研究物体的平动时，可不考虑物体的大小和形状，而把它作为质点来处理。



图 1-9　双轨平动系统折叠式天棚吊



图 1-10　平动式密集档案柜

1.2.2　曲线运动

物体运动轨迹是曲线的运动，称为曲线运动。当物体所受的合外力和它速度方向不在同一直线上，物体就是在做曲线运动。常见的曲线运动有：平抛运动，斜抛运动，匀速圆周运动三种。例如：图 1-11 中的过山车，还有射出枪膛的子弹，离弦的箭，抛出的铅球，投出去的球都做曲线运动。

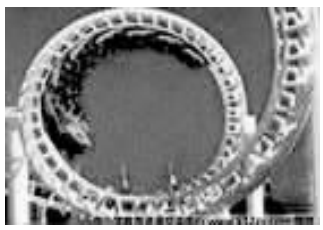


图 1-11　过山车

在曲线运动中当力矢量与速度矢量间的夹角等于 90°

需要全本请访问 www.ertongbook.com

时，作用力仅改变物体速度的方向，不改变速度的大小，例如匀速圆周运动；当夹角小于 90°时，作用力不仅改变物体运动速度的方向，还增大速度的量值；当夹角大于 90°时，同样改变物体运动速度的方向，但是却减小速度的量值。

在曲线运动中物体运动到某一点时，物体所受的合外力可以分解为沿速度方向和垂直速度方向两个分量，其中沿速度方向的分量改变速度的大小，垂直速度的分量改变速度的方向。曲线运动中速度的方向时刻在变，因为是个矢量，既有大小，又有方向。不论速度的大小是否改变，只要速度的方向发生改变，就表示速度矢量发生变化，也就具有了加速度，所以曲线运动是变速运动。加速度也可以分解为沿速度方向和垂直速度方向两个分量，其中沿速度方向的分量描述速度大小变化的快慢，垂直速度方向的分量描述速度方向变化的快慢。

1.2.3 定轴转动

刚体也是力学中常用的一种模型。它是指在外力作用下，形状和大小均不会发生变化的物体。实际上，在外力作用下，物体的形状和大小都会发生一些变化。如果这些变化对我们研究的问题影响很小，可忽略不计，这物体就可看成刚体。如飞轮、门窗等都可看作刚体。

如果刚体的各个质点在运动中都绕同一直线做圆周运动，称刚体的转动。这一直线称为转轴。转动也是刚体的基本运动形式之一。转动中最基本的是定轴转动，即运动中各质点均做圆周运动，且各圆心都在同一条固定的直线(转轴)上。

如图 1-12 表示刚体轴转动的例子，拖拉机上的皮带轮、齿轮和驱动轮，自行车的车轮等，它们相对于机体的运动都是定轴转动。



图 1-12 定轴转动

1.3 相对运动

质点的运动轨迹依赖于观察者(即参考系)的例子是很多的。例如一个人站在做匀速直线运动的车上，竖直向上抛出一块石子，车上的观察者看到石子竖直上升并竖直下落。但是，站在地面上的另一人却看到石子的运动轨迹为一抛物线。从这个例子可以看出，石子的运动情况依赖于参考系。在描述物体的运动时，总是相对选定的参考系而言的。如图 1-13 所示卫星和卫星外的探测仪器相对静止，但是他们对于地球来说都是运动的。如图 1-14 两个行人相对运动，两人对于地面也是运动的，但是骑车的行人和自行车是相对静止。所以，在描述物体是否运动时，观察者必须选择一个参照物，然后根据所选定的参照物来确定物体是否运动。

通常，我们选地面或相对于地面静止的物体作为参考系，但是有时为了方便起见，往往也改选相对于地面运动的物体作为参考系。由于参考系的变换，就要考虑物体相对于不同参考系的运动及其相互关系，这就是相对运动问题。

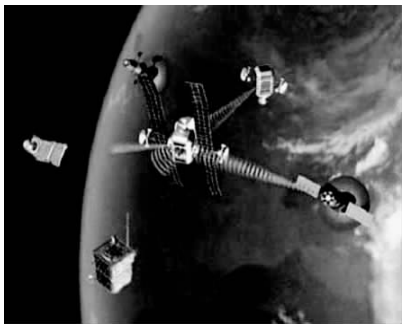


图 1-13　卫星相对运动



图 1-14　行人相对运动

1. 相对位移

如图 1-15 所示，先选定一个基本参考系 K（地面），如果另一个参考系（车）相对于基本参考系 K 在运动，则称为运动参考系 K'。设一运动物体（球）P 在某一时刻相对于参考系 K 和 K' 的位置，可分别用位矢 $\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{r}'$ 表示；而运动参考系 K' 上的原点 O' 在基本参考系 K 中的位矢为 $\boldsymbol{r}_0$，它们之间有如下的关系，即

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{r}'$$

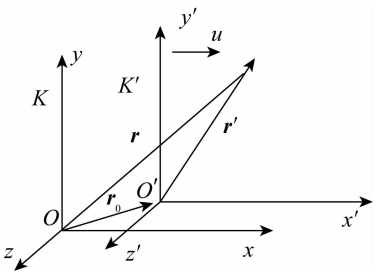


图 1-15　相对位移

2. 相对速度

将上式对时间 t 求导，得

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_0}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}'}{\mathrm{d}t}$$

式中：$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$ 为物体在基本参考系 K 中观察到的速度，称为物体的绝对速度，用 $\boldsymbol{v}_{绝}$ 表示；$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}'}{\mathrm{d}t}$ 为物体在运动参考系 K' 中观测到的速度，称为物体的相对速度，用 $\boldsymbol{v}'_{相}$ 表示；$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_0}{\mathrm{d}t}$ 为运动参考系自身相对于基本参考系 K 的速度，称为物体的牵连速度，用 $\boldsymbol{u}_{牵}$ 表示。

于是，上式可以写成

$$\boldsymbol{v}_{绝}=\boldsymbol{u}_{牵}+\boldsymbol{v}'_{相}$$

即绝对速度等于相对速度与牵连速度的矢量和，这一结论称为速度合成定理，它表述了不同参考系之间的速度变换关系。在实际解题过程，一般将矢量公式投影到坐标系中，写出标量公式。

1.4　牛顿运动定律

1.4.1　牛顿运动三定律

17 世纪，近代科学的先驱者伽利略首创用实验方法研究力学问题，由此推论出：若消除摩擦力的影响，物体将无需依赖外力的不断推动，而永远保持其运动状态不变。

后来，牛顿对机械运动的规律作了审慎而又深入的研究（如图 1-16 所示），根据伽利略的思想和当时对某些力学规律的认识，总结成第一和第二定律。在惠更斯研

究物体弹性碰撞的基础上，牛顿又提出表述作用力与反作用力关系的第三定律。最后牛顿于 1687 年在他的不朽巨著《自然哲学的数学原理》一书中发表了这三条定律。



图 1-16　艾萨克·牛顿

1. 牛顿第一定律

按照古希腊哲学家亚里士多德的说法，静止是物体的自然状态，要使物体以某一速度做匀速运动，必须有力对它作用才行。在亚里士多德看来，这确实是真理。人们的确看到，在水平面上运动的物体最后都要趋于静止，从地面上抛出的石子最终都要落回地面。在亚里士多德以后的漫长岁月中，这个概念一直被许多哲学家和不少物理学家所接受。直到 17 世纪，伽利略指出，物体沿水平面滑动趋于静止的原因是有摩擦力作用在物体上的缘故。他从实验中总结出在略去摩擦力的情况下，如果没有外力作用，物体将以恒定的速度运动下去。力不是维持物体运动的原因，而是使物体运动状态改变的原因。牛顿继承和发展了伽利略的见解，并第一次用概括性的语言把它表达了出来。

牛顿第一定律表述为：任何物体在不受任何外力的作用下，总保持匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。

物体所固有的、保持原来运动状态不变的特性叫惯性。物体不受力时所做的匀速直线运动也叫惯性运动，牛顿第一定律也叫惯性定律。

牛顿第一定律阐明力的作用是迫使物体运动状态改变，而物体的惯性企图保持物体的运动状态不变。力是物体之间相互作用，是改变运动状态的原因。第一定律明确了力和运动的关系。物体的运动并不是需要力来维持，只有当物体的运动状态发生变化，即产生加速度时，才需要力的作用。

牛顿第一定律是物理学中一条基本定律。此定律主要是从天文观察中，间接推导而来，是抽象概括的结论，不能单纯按字面定义而用实验直接验证。在自然界中完全不受其他物体作用的物体实际上是不存在的，物体总要受到接触力或场力的作用。因此，第一定律不能简单地直接用实验加以验证。

谈论运动时，离不开参考系。那么惯性运动是选择什么为参考系呢？为了描述惯性运动，使惯性定律能成立，为此我们定义：对某一物体惯性定律能成立的参考系叫惯性参考系，也叫惯性系。否则叫非惯性参考系。大量的实验和观察表明，以太阳为参考物的参考系是精确度很高的惯性参考系；在一定精确度内，地球也是较好的惯性参考系。当然相对于惯性参考系做匀速直线运动的参考系也为惯性参考系。

2. 牛顿第二定律

(1)牛顿第二定律的内容

物体的加速度与物体所受的合外力成正比，与物体的质量成反比，加速度的方向与合外力的方向一致。

在国际单位制中

$$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$$

这就是牛顿第二定律的数学表达式，它是矢量式。$\boldsymbol{F}$ 为合外力，合外力产生的加速度等于各分力产生的加速度的矢量和。$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{a}$ 的关系为瞬时关系。

牛顿第二定律则进一步说明物体在外力作用下运动状态的变化情况，并给出力、质量(惯性的量度)和加速度三者之间的定量关系。

(2)牛顿第二定律的理解

对于牛顿第二定律的理解应注意以下几点：

①力(作用在物体上的合外力，适用力的叠加原理)是产生加速度的原因，两者间存在因果关系；

②力的方向就是加速度的方向，两者间存在矢量对应关系；

③若力是变化的，则产生的加速度也是变化的，两者间存在瞬时对应关系；

④牛顿第二定律只适用于研究宏观物体、低速运动问题，同时所用参照系是惯性参照系。

3. 牛顿第三定律

力是物体对物体的作用，当甲物对乙物施加力的作用的同时，也受到乙物对它施加方向相反的力作用，因此，物体间的作用总是相互的，成对出现的。我们把两个物体间相互作用的这对力叫做作用力和反作用力。它们遵从的规律就是牛顿第三定律，又叫作用力和反作用力定律。它的内容为：

两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。

$$\boldsymbol{F}_{12}=-\boldsymbol{F}_{21}$$

应用说明：

(1)牛顿第三定律的成立与物体的运动状态无关。

(2)作用力和反作用力的性质：

①相对性：作用力和反作用力没有绝对意义，是相对而言的。我们可以把这一对力中任意一个叫做作用力，另一个力叫做反作用力。

②同时性：作用力和反作用力同时产生，同时消失，同时变化。

③同性质：作用力和反作用力是同一性质的力。

④等大、反向、共线性：这是牛顿第三定律所揭示的。还要注意的是：无论相互作用的两物体的质量是相等，还是相差十分悬殊，它们间的相互作用力总是等大、反向、共线的。

⑤不平衡性：作用力和反作用力虽然等大，反向，共线，但是因为不是作用在同一个物体上，不存在力的平衡问题，也就是它们不是一对平衡力。这里要注意的是：一对平衡力与一对作用力和反作用力，虽然具有等大，反向，共线性，但是平衡力是作用在同一物体上的。

(3)牛顿第三定律是用穷举法(或不完全归纳法)，通过大量的实验归纳和总结得出的一条实验定律。

牛顿三个定律的表述、要点、相互关系及适用范围详见表 1-2：

表 1-2　牛顿定律的表述、要点、相互关系

	第一定律	第二定律	第三定律
表述	自由质点有保持静止或匀速直线运动的性质，直到其他物体对它作用的合力迫使它改变这种状态 若$\sum \boldsymbol{F}=0$，则$\boldsymbol{a}=0$ 若$\sum \boldsymbol{F}\neq 0$，则$\boldsymbol{a}\neq 0$	质点受力作用其加速度大小与合外力大小成正比，与物体的惯性质量成反比，加速度的方向与合外力方向相同 $\sum \boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$	两质点间的相互作用力，总是沿同一直线等值反向的 $\boldsymbol{F}_{12}=-\boldsymbol{F}_{21}$
要点	1. 惯性：质点具有保持其速度不变的性质 2. 力：物体之间的相互作用，是改变运动状态的原因	1. 惯性质量 m，是惯性大小的量度，它与速度有关，低速运动时，可认为是恒量 2. 反映$\sum \boldsymbol{F}$、m、$\boldsymbol{a}$之间的定量关系 3. $\sum \boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$ 具有瞬时性、矢量性、叠加性	1. 作用力和反作用力是成对出现，成对消失的 2. 作用力和反作用力必定属同一性质，作用在不同质点上
关系	给出了运动状态改变，惯性及受力的定性关系，是三大定律中的前提和基础	给出了运动状态改变，惯性及受力的定量关系，是三大定律中的核心	给出了相互作用力之间的定量关系，是对第二定律的补充

1.4.2　力的基本形式

自然界的相互作用可归结为四种基本相互作用，其他的力都是这几种力的不同表现。进一步分为两类，万有引力和电磁力在相距较远时仍发挥作用，叫做长程力；另一类强相互作用力和弱相互作用力，它们的作用距离很短，叫做短程力。短程力只有在微观现象中才发挥明显作用，如表 1-3 所示。

表 1-3　四种基本力

类型	相互作用的物体	强度	作用距离	宏观表现
引力相互作用	一切微粒和物体	10^{-38}	长	有
弱相互作用	大多数微粒	10^{-13}	短($\sim 10^{-18}$ m)	无
电磁相互作用	电荷微粒或物体	10^{-2}	长	有
强相互作用	核子、介子等	1	短($\sim 10^{-15}$ m)	无

为了便于力学的分析，我们将力分为主动力和被动力。

1. 主动力

重力、弹簧弹性的力、万有引力等有其“独立自主”的方向和大小，不受质点其他力的影响，处于“主动”地位，称为主动力。

(1)重力

一般地，将地球对地球表面附近物体的吸引力称为重力，重力的大小叫重量，重力的方向为垂直向下。物体因受重力作用而具有的加速度是重力加速度 $\boldsymbol{g}$。根据牛顿第二定律，质量为 m 的物体所受重力的大小为

$$\boldsymbol{W}=m\boldsymbol{g}$$

重力加速度 $\boldsymbol{g}$ 的大小近似为 $9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$。实际上，地球不是真正的球体，而微呈扁球型，地球表面不同纬度处的重力加速度值略有差异。此外，由于地球各部分地质构造不同，使地球的质量分布也不完全是对称的。例如地球内某处存在大型矿藏因而破坏了地球质量的对称分布时，会使该处的重力加速度值表现异常。因此可以通过重力加速度来探矿，这种方法称为重力探矿法。

应该指出，严格说来物体所受重力无论是大小还是方向都不同于地球对物体的万有引力，两者间存在微小差别，这是由于地球自转引起的，这个问题本课程不做深入的讨论。

另外，不能将重量和质量混为一谈。质量反映物体被当作质点时的惯性，是任何物体本身所固有的属性；而重量是物体所受重力的大小，属于相互作用的范畴，这是质量和重量最本质的区别。物体总是具有质量的，但若物体失去重力作用，例如当星际飞船远离地球和其他行星的时候，处于失重状态，重量就没有意义了。如图 1-17 所示宇航员处于失重的状态。



图 1-17　宇航员的失重

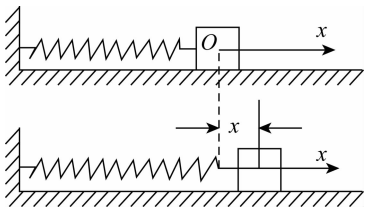


图 1-18　弹簧振子

(2)弹簧的弹性力

弹性力是由物体形变而产生的。弹簧被拉伸或压缩时产生了弹簧弹性力。弹簧受力后有明显的、可以确定的形变，其弹性力的大小，可以利用胡克定律，由形变来确定。图 1-18 表示一弹簧振子，弹簧一端固定，另一端与一质点相连。弹簧既不伸长也不缩短的状态叫自由伸展状态。弹簧自由伸展时质点的位置称为平衡位置，以平衡位置为坐标原点，沿弹簧轴线建立坐标轴 Ox，x 表示质点坐标(即自原点开始的位移)，用 f 表示作用于质点的弹性力，实验证明，在 x 不太大的条件下，有

$$\boldsymbol{f}=-k\boldsymbol{x}$$

这个关系式叫做胡克定律，即弹簧弹性力的大小与物体相对于坐标原点的位移成正比，方向指向平衡位置。比例系数 k 叫作弹簧的劲度系数，与弹簧的匝数、直径、线径和材料等因素有关。

式中的负号表示力 $\boldsymbol{f}$ 总是与位移 $\boldsymbol{x}$ 反向，即促使质点返回平衡位置。例如，当 $x<0$时，弹簧受压缩，$f>0$，弹簧弹性力指向平衡位置；当 $x>0$ 时，弹簧受拉伸，$f<0$，弹簧弹性力还是指向平衡位置。

(3)万有引力定律

17 世纪初，德国天文学家开普勒分析第谷观察行星所得的大量数据，提出了行星绕太阳作椭圆轨道运动的开普勒定律。牛顿继承了前人的研究成果，通过深入研究，提出了万有引力定律。牛顿利用万有引力定律不仅说明了行星运动规律，而且还指出

需要全本请访问 www.ertongbook.com