

绪 论

物理学研究自然界中各种最基本的运动形态及其规律，物理学为自然界的物质结构、相互作用和运动规律提供了一幅幅绚丽多彩、结构严谨的图画。物理学作为一门独立的学科是从经典力学开始的。在经典力学时代，物理学最基本的追求和目标是自然界的统一，时至今日它依然是物理学发展的主线，执着地寻找支配宇宙万物的最基本、最统一的规律。今天的物理学，大体上仍沿着牛顿所开创的研究途径，寻找统一的力，或统一的相互作用。因此，几乎所有基本的物理理论都称为某种力学，如牛顿力学、电动力学、色动力学等等。每一种新的力学的确立，都标志着人们在追求统一的过程中达到了一个新的水平。

物理学发展史上第一次大的统一是牛顿力学和万有引力定律。牛顿(I. Newton)通过研究发现，天体的运动和地面落体运动遵从相同的规律，它们都是由引力引起的。这样，牛顿用他的力学打破了天界和世俗的界限，找到了两个世界的统一，牛顿称引力为万有引力，就是强调这种统一。19世纪60年代麦克斯韦(J. C. Maxwell)完成了物理学第二次大的统一，他所建立的电磁理论，将电、磁和光学现象统一起来，这就是电动力学。20世纪初，爱因斯坦(A. Einstein)摒弃了绝对时空观，提出了狭义相对论，使电磁学和力学在新的时空观的基础上达到了协调和统一。爱因斯坦还曾企图把引力和电磁力二者统一起来，但他的努力没有成功。然而，他却找到了能与麦克斯韦电磁理论相协调的引力理论——广义相对论。广义相对论和麦克斯韦电磁理论构成了我们今天称为经典物理的理论基础。

与经典物理相对应的是量子论。量子力学最初是作为原子、分子的统一的力学而发展起来的。这种新的力学在解释微观粒子的许多现象(如光谱、元素周期表和分子键合等)时，取得了极大的成功，但在将它应用于电磁场时遇到了困难。这本质上是由于电磁场是相对论性的。直到20世纪40年代末，发展了重整化方法解决了上述的困难，使量子论与电磁理论得到了统一，产生了量子电动力学。

自然界物质间相互作用表现形式繁多，但可以将它们归结为四种基本相互作用，按它们的强度顺序排列是：强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用。表0-1列出了四种基本相互作用的特点，这四种相互作用在粒子之

间都是存在的，但它们的强度和力程相差十分悬殊。此外，还可根据基本粒子的反应和转化过程的迅速程度来表征相互作用的强弱，相互作用越强，作用时间越短；四种基本相互作用都是通过交换某些规范粒子来实现相互作用的。表 0-1 表示了上述的两个问题。

表 0-1 四种基本相互作用的特点

相互作用类型	强度*	力程(m)	作用时间(s)	传递媒介粒子	举例
强	1	$\leq 10^{-15}$	10^{-23}	介子和胶子	核力
电磁	10^{-2}	∞	$10^{-21} \sim 10^{-15}$	光子	原子核和电子
弱	10^{-13}	$< 10^{-17}$	$> 10^{-10}$	W^{\pm}, Z^0	β 衰变
引力	10^{-39}	∞		引力子	天体

* 在距源 10^{-15} m 处,该相互作用相对于强相互作用的相对强度

1967 年温伯格 (S. Weinberg) 和萨拉姆 (A. Salam) 先后成功提出了电磁相互作用和弱相互作用的统一理论。这一新的成功，促使许多人努力地去寻找电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的统一理论，通常称为“大统一理论”。这种统一理论已取得一些积极成果和令人感兴趣的预言，但也存在一些严重的困难和问题。20 世纪 80 年代有人提出超引力理论和超弦理论，试图将四种基本相互作用统一起来，目前还没有得到有实际意义的结果。引力虽然是物理学最早讨论的一种基本相互作用，但由于引力有一系列很特别的性质（例如这种力只有引力却无斥力），它与其它力的统一最难。建立一种支配宇宙万物的最基本的统一理论将继续鼓舞人们不断深入地顽强探索自然的奥秘。

自然界中所有的物理对象可以分为两大类，一类就是上述的“四种基本相互作用”；另一类是“物质”。人类对物质结构的认识是不断深化的。公元前四世纪我国哲学家墨翟和希腊哲学家德莫利特 (Democritus) 都曾提出，物质的构成有一个最小的单位，这就是古代朴素的原子论。1810 年英国自学成才的化学家道尔顿 (J. Dalton) 创立了原子论，认为一切元素都由微小的原子量相同的不可分割的粒子（原子）组成。1897 年汤姆孙 (J. J. Thomson) 在研究阴极射线过程中发现了电子；1911 年卢瑟福 (E. Rutherford) 由 α 粒子散射实验结果提出了原子的有核模型；1932 年查德威克 (J. Chadwick) 用钋源和威尔逊云室做了大量实验，发现了卢瑟福所预言的中子；不久，海森伯 (W. K. Heisenberg) 就提出原子核是由质子和中子构成的主张。

此后，人们从宇宙射线和加速器实验中发现了更多的粒子，至今发现的粒子已多达 700 余种，其中绝大多数是强子。强子分为介子和重子，重子又分为核子（中子和质子）和各种超子。除了强子一类粒子外，还有轻子，轻子总共有六种，

即电子、 μ 子、 τ 子、电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子和它们的反粒子。高能碰撞实验表明，强子和轻子的区别之一是强子一类的粒子具有一定的大小并有内部结构。例如，以高能电子轰击质子，发现质子的电荷有一定的分布，其半径约为 $0.7 \times 10^{-15} \text{ m}$ ；中子虽然整体上是中性的，但其内部仍有电荷分布（大体上内部和外部带正电，中部带负电）分布半径约为 $0.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ 。而对轻子，尚未观测到它们的内部结构，仍然可以把它们当作点粒子来看待。由此可见，原来称之为基本粒子的强子和轻子并不属于同一层次。因而，如今将基本粒子改称为粒子。

由于强子有内部结构，从 20 世纪 50 年代中期开始出现了多种有关强子结构的模型，其中以 1964 年盖尔曼 (M. Gell-Mann) 提出的“夸克模型”最为人们接受。此后又有许多物理学家不断完善这个模型。夸克模型认为所有的强子都可用六种基本夸克中的几个组成。这六种夸克是 \bar{u} (上夸克)、 \bar{d} (下夸克)、 s (奇异夸克)、 c (粲夸克)、 b (底夸克) 和 t (顶夸克)，它们称为夸克的“味”。质子是由二个上夸克和一个下夸克组成，即 $p \equiv (uud)$ ，而中子 $n \equiv (ddu)$ 。为了确保泡利不相容原理始终得到满足，又引入夸克的“色”；每一味夸克都有三色（这里的三色借用红、黄、蓝三基色）。总之，夸克有六“味”，每“味”有“红、黄、蓝”三色，再加上它们的反粒子，即反夸克，共有 36 种。夸克最大的特点之一是所谓的“夸克禁闭”，即在平常条件下无法把夸克从它们的束缚态中释放出来。至今所有试图产生和发现自由夸克的实验都未成功。值得一提的是，美籍华人物理学家丁肇中 (B. Richter) 于 1974 年各自独立发现 J/ψ 粒子，从而证实了粲夸克的存在。1976 年荣获诺贝尔物理学奖。

原子是由电子、中子和质子组成。今天我们知道，它们可以形成 111 种原子和 1 300 多种同位素。原子可以组成品种繁多的分子，人们至今还在实验室里制造出新的分子。有些分子只几个原子，而蛋白质、酶和核酸 (DNA 和 RNA) 等的分子却可以包含几百个乃至几十亿个原子。例如果蝇染色体天然 DNA 分子，长度可达 4 cm，而直径仅 2 nm。

分子聚集起来就形成一个五彩缤纷、复杂多变的物质世界。它们具有气态、液态、固态和等离子态四种状态。根据宇宙大爆炸理论，整个宇宙起源于 150 亿年前的一次大爆炸。在最简单的大爆炸理论中，在每个 10^{-34} s 间隔内宇宙尺度就扩大 1 倍，那么在 100 个如此小的时间间隔后，一个原子核大小的区域就会扩大到大约 1 光年的直径！宇宙诞生的初期温度是很高的，刚爆炸瞬间温度为 10^{28} K ，1 s 后各处的温度约为 10^{10} K ，这样的温度对现有的原子核合成来说是太高了，那时物质犹如一锅粒子（诸如质子、中子和电子）汤。随着宇宙的迅速膨胀，温度逐渐下降，在大爆炸后约 3 min 时，宇宙的温度降到 10^9 K ，这时中子开

始失去自由存在的条件，它要么衰变，要么与质子合成氦核，大约有 1/4 物质的质量聚合成氦核，余下没有聚合的质子，自然就成了氢核。又过了几十万年，宇宙的温度降到 3 000 K 以下，电子与原子核结合成稳定的原子，它们组成的气体由于万有引力的作用而形成气团，最后凝聚为今天宇宙里的恒星和星系。

还需要指出的是，从物理学研究对象的线度、时间间隔和质量来看，它们跨越的幅度是很大的。拿线度来说，质子的半径约为 10^{-15} m，而可探测宇宙的边缘为 10^{26} m 二者跨越 42 个数量级；时间间隔可跨越 65 个数量级， Z^0 和 W^\pm 粒子的寿命为 10^{-25} s 而质子寿命为 10^{39} s 质量跨越了 84 个数量级，电子的质量为 10^{-30} kg 现在所知宇宙的总质量为 10^{53} kg。

我们经常把具有原子尺度的研究对象称为微观系统。而 1 m 上下几个数量级范围的研究对象称为宏观系统。所以宏观系统比微观线度大了 8 个数量级左右 按体积计算 则大 10^{24} 倍。一般来说，在非相对论情况下，宏观系统可用经典力学来处理，而微观系统需要用量子力学来处理。但是量子力学可以证明，对那些能量比较大且处于比较缓慢变化力场中的微观粒子，仍然可用经典力学来描述它们的运动。所以 笼统地说“经典力学不适用微观粒子”是不妥的。例如 讨论显像管内电子运动的轨迹，依然可用经典力学，而讨论原子中电子的运动就需要用量子力学来处理了。还如，在低温下超导体（宏观系统）呈现出磁感应通量的量子化。英国物理学家伦敦(F. London)说“超导电性是在宏观尺度上量子力学的表现”。

20 世纪 80 年代以来，人们对线度在 0.1~100 nm 的样品进行研究时，发现它们具有许多特殊性质。这些特殊性质已引起广大科学家的浓厚兴趣，并投以很大的精力进行研究。我们将呈现出微观特征的具有上述样品尺寸的系统称为介观系统。研究介观系统行为的介观物理学已发展成物理学中一个新分支。介观物理学的发展导致纳米技术的产生。由于纳米材料具有许多奇异特性，它们可在许多学科和技术领域里得到应用，产生新的交叉学科，纳米生物学就是其中之一。不难预见，纳米技术将在 21 世纪得到蓬勃的发展。

随着科学的发展 物理学和其它学科的相互渗透产生了一系列的交叉学科，例如化学物理、生物物理、地球物理、海洋物理、天体物理等等。宇宙的结构和演化与粒子物理学之间的密切关系鲜明地表达了这一相互渗透过程。在物理学基础性研究过程中形成和发展出来的基本概念、基本理论、基本实验手段和精密的测试方法已成为许多学科的重要组成部分，并产生了良好的效果。这对于许多学科，包括农业科学都是如此。

物理学及其技术在农业上的应用日趋广泛，本书的附录里作了一些介绍，供对这方面情况有兴趣的读者阅读。

第 1 篇 力 学

自然界中的一切物质都处在永恒的运动中，运动的形式多种多样。在各种运动形式中，最简单、最直观的一种是物体间（或物体各部分之间）相对位置随时间的变化。例如，各种交通工具的行驶，大气和河水的流动，天体的运行等，称为机械运动。在物理学中，研究机械运动规律的学科称为力学。在力学中，也常将机械运动简称为运动。

研究力学和研究其它学科一样，采取由现象到本质的步骤。通常是先研究运动的描述，即物体的位置如何随时间的变化，这称为运动学。然后进一步研究运动的规律，即物体的运动与物体间相互作用的内在联系，这称为动力学。通常所说的静力学，可看做为动力学的一部分，它是研究物体在相互作用下的平衡问题。

本篇讨论的力学属于经典力学，它所研究的物体都是由大量原子构成的宏观物体，并且它的速度比真空中光的速度，约 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 要小得多。图 0-1 非常定性地指出了经典力学在空间尺度、速率方面的有效范围和局限性。但是，值得指出的是，量子力学可以证明，对那些能量比较大且处于比较缓慢变化的力场中

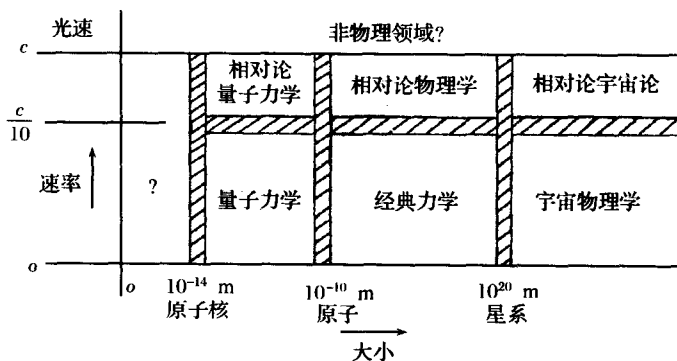


图 0-1 经典力学的有效范围和局限性

的微观粒子，仍然可以运用经典力学描述它们的运动；在低温下，具有宏观尺寸的超导体的一些物理性质具有量子化的特征。还有经典力学所涉及的时间尺度为 $10^{-3} \sim 10^{15} \text{ s}$ ，这对应着从声振动的周期到太阳绕银河系中心振动的周期。

本篇共分四章，其中第 1 章属力学的基础知识，虽然有些内容属中学物理的范围，由于这部分内容涉及到物理学中许多重要的概念，掌握它对学好物理学其它部分是至关重要的。例如动量、角动量和能量的三个守恒定律不仅对宏观物体是成立的，同样对微观客体也是对的。所以，现在将它们的主要内容列出来，并且在推导公式时使用矢量运算和浅近的高等数学知识，这样就可以起到复习和承上启下的作用。

1 运动和力

【内容提要】

- 质点、参考系、坐标系
- 位置矢量和位移矢量
- 速度和加速度
- 惯性参考系，伽利略变换
- 牛顿第一、第二、第三定律
- 几种力 重力、万有引力、弹性力、压力和张力、摩擦力
- 非惯性参考系、惯性力
- 国际单位制中 7 个基本单位

1.1 质点运动学

1.1.1 质点、参考系和坐标系

在物理学中，为了突出研究对象的主要性质，而不考虑一些次要的因素，经常引入一些理想化的模型来代替实际的物体，“质点”就是一个理想化的模型。任何物体都有一定的大小和形状。若物体在运动过程或与其它物体相互作用过程中，它的形状和大小在研究的现象中所起的作用可忽略不计。这样一来，物体的形状和大小与研究的问题无关，可以把它们当作一个具有质量的几何点（质点）来处理^[1]。例如，人们常将弹簧振子的物体、单摆的摆球、绕日公转的地球等看做为质点。但是，同一个地球，在研究它的自转问题时，就不能把它当作质点来处理了。

当我们研究某一物体的运动时，必须具体指明，运动是相对于哪一个物体或哪一个物体群的。这种选用具体研究物体运动的依据的物体或物体群，称为参考系。例如，研究地球相对于太阳的运动，则太阳就是参考系。若研究月球相对于地球的运动，则地球就是参考系。研究某一物体的运动，究竟选用哪一个物体或哪一个物体群为参考系，要看问题的性质和计算的方便。

选定了参考系后，要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。常用的三维坐标系有直角坐标系 (x, y, z) 、球面坐标系 $(\gamma, \theta, \varphi)$ 和圆柱面坐标系 (γ, φ, z) 。例如，在研究行星相对于太阳的运动时可选用二维极坐标 (γ, φ) 。

1.1.2 时间和空间的计量

在一定的参考系和坐标系中观察和描述运动，需用时间和空间两个物理量。

时间表征物质运动的持续性，凡已知其运动规律的物理过程，都可以用来作时间的计量，通常采用能够重复的周期现象来计量时间。自然界中存在着许多重复的周期现象就可作为时间的计量标准。例如，太阳的升落表示天；四季的循环称做年；月亮的盈亏是农历的月等。在国际单位制（SI）中时间的单位为秒。原来，国际上统一用1900年回归年的 $1/31\,556\,925.974\,7$ 为1秒（1 s）。回归年是指地球连续两次通过春分点所需的时间。当前则认为最精密的时间标准为原子标准。1967年10月在第13届国际度量衡会议上，规定1秒（1 s）的时间为位于海平面上的 ^{133}Cs 原子的基态的两个超细能级在零磁场中跃迁辐射的周期 T

的 9 192 631 770 倍。

空间反映物质运动的广延性。在三维空间里的位置可由三个相互独立的坐标来确定。空间中两点的距离为长度，任何长度的计量都是通过某一长度基准比较而进行的。18 世纪末，法国规定通过巴黎的子午线从北极到赤道距离的千万分之一为 1 米 (1 m)。1889 年第一届国际计量大会通过，将保存在法国的国际计量局中铂铱合金棒在 0.00 时两刻线间的距离定义为 1 米 (1 m)。由于长度的实物基准很难保证不随时间改变和意外的灾害，1960 年第 11 届国际计量大会曾决定用 ^{86}Kr 的橙黄色波长多少倍来定义“米”。如今“米”的新定义是 1983 年 10 月第 17 届国际计量大会通过的“米”是光在真空中 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内运行路程的长度。

物理学研究的对象从微观到宏观，跨越了巨大的数量级范围，单一的单位（如秒、米）用起来就很不方便了。通常的做法是采用一些词头来代表一个单位的十进倍数或十进分数，如千 (kilo) 代表倍数 10^3 ，厘 (centi) 代表分数 10^{-2} 等等。国际单位制所用的词冠如表 1-1 所示。

表 1-1 国际单位制所用的词冠

因数	英文	符号	中文	因数	英文	符号	中文
10^{-1}	deci	d	分	10	deca	da	十
10^{-2}	centi	c	厘	10^2	hecto	h	百
10^{-3}	milli	m	毫	10^3	kilo	k	千
10^{-6}	micro	μ	微	10^6	mega	M	兆
10^{-9}	nano	n	纳[诺]	10^9	giga	G	吉[咖]
10^{-12}	pico	p	皮[可]	10^{12}	tera	T	太[拉]
10^{-15}	femto	f	飞[母托]	10^{15}	peta	P	拍[它]
10^{-18}	atto	a	阿[托]	10^{18}	exa	E	艾[可萨]
10^{-21}	zepto	z	仄[普托]	10^{21}	zetta	Z	泽[它]
10^{-24}	yocto	y	幺[科托]	10^{24}	yotta	Y	尧[它]

1.1.3 位置矢量位移

质点的位置也可以用矢量来表示，如图 1-1 所示。设质点在时刻 t 的位置为 A 。如果从坐标原点 o 向 A 点作一有向线段 oA 并记作矢量 r ，则 r 的方向表明了 A 点相对于坐标轴的方位， r 的长度表明 A 点到 o 点的距离。方位和距离都知道了， A 点的位置也就确定了。因此称 r 为位置矢量，简称位矢，也叫矢径。

质点在一段时间内位置的改变，称为质点在这段时间内的位移。由于质点

的位置用位矢表示，所以位移就是位矢的增量。如图 1-2 所示，设质点在时刻 t 和 $t+\Delta t$ 分别在 A 点和 B 点，它们的位矢分别为 r_A 和 r_B ，则在 Δt 时间间隔内质点的位移为

$$\Delta r = r_B - r_A, \quad (1-1)$$

位移只描述质点末位置 B 相对于初位置 A 的方向和距离，并不一定能反映质点在这一段时间内的运动路程，只有当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，位移的数值与质点运动路程相同。

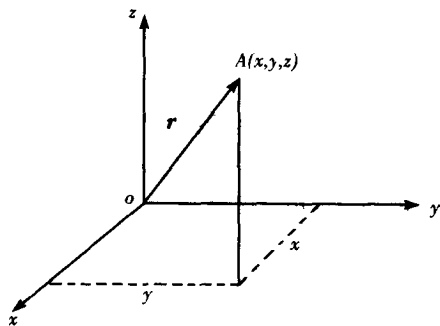


图 1-1 位置矢量

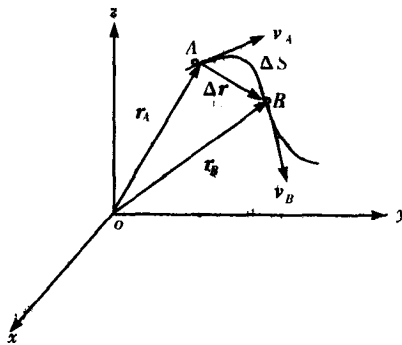


图 1-2 位移

1.1.4 速度 加速度

描述质点运动快慢和运动方向的物理量是速度 v 。质点的位移 Δr 和发生这段位移所经历的时间 Δt 的比，称为质点在这段时间内的平均速度 \bar{v} 。

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}, \quad (1-2)$$

平均速度是矢量，它的方向与位移的方向一致。平均速度只是质点在 Δt 时间内位置的平均变化率。为了反映质点在某一瞬时的运动情况，还需引入瞬时速度的概念。瞬时速度 v 定义为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}, \quad (1-3)$$

速度也是一个矢量。用 ΔS 表示质点在 Δt 时间内沿轨迹所经过的路程，那么当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时， $|\Delta r|$ 和 ΔS 趋于一致。于是有

$$v = |\mathbf{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}, \quad (1-4)$$

即速率等于质点所经路程对时间的变化率。质点运动经过的路程 S 可通过速率对时间的积分得到 即

$$S = \int_0^t v dt. \quad (1-5)$$

在一般情况下，质点的速度也是随时间变化的，为了描述速度的变化情况，需要引入加速度的概念。设质点在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的速度分别为 \mathbf{v}_A 和 \mathbf{v}_B 在 Δt 时间内的速度增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A,$$

则定义在这段时间内的平均加速度为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}, \quad (1-6)$$

同理 质点在时刻 t 的瞬时加速度（简称加速度） \mathbf{a} 定义为

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (1-7)$$

加速度是描述速度变化的物理量，也是一个矢量。如果速度的大小和方向都保持不变，则加速度为零；反之，不论速度大小或方向有变化，加速度就不为零。

在讨论质点的曲线运动时，常将加速度 \mathbf{a} 分解成两个分量，一个沿曲线的切线方向，称为切向加速度 \mathbf{a}_t ，一个沿曲线的法向方向 称为法向加速度 \mathbf{a}_n ，即

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n, \quad (1-8)$$

因而有

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}, \quad (1-9)$$

切向加速度 \mathbf{a}_t 的作用是改变速度的大小，而法向加速度的作用是改变速度的方向。显见 在 $a_n = 0$ 而 $a_t \neq 0$ 时 质点作变速直线运动 在 $a_t = 0$ 而 $a_n \neq 0$ 时 质点作匀速率曲线运动。

可以证明 a_t 和 a_n 的数值为

$$\left. \begin{aligned} a_t &= \frac{dv}{dt}, \\ a_n &= \frac{v^2}{\rho}. \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中 ρ 为质点所在点曲线的曲率半径。

在国际单位制 (SI) 中, 速度的单位为米 / 秒 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 加速度的单位为米 / 秒² ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

如果质点作匀速直线运动, 质点速率 v 为常量, 则由 1-5 式可得

$$S = vt, \quad (1-11)$$

如果质点作匀变速直线运动, 质点加速度为常量, 则对 (1-7) 式积分可得

$$v = v_0 + at, \quad (1-12)$$

将上式代入 (1-5) 式并积分得

$$S = v_0 t + \frac{1}{2} at^2, \quad (1-13)$$

由上二式消去参数 t 可得

$$v^2 - v_0^2 = 2aS. \quad (1-14)$$

1.2 牛顿运动定律

1.2.1 牛顿第一定律 惯性系

牛顿在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》一书中写道：“每个物体继续保持其静止或沿一直线作匀速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态”。这正是牛顿第一定律。它正确地说明了力和运动的关系，运动并不需要力去维持，只有当物体的运动状态（速度）发生变化，即产生加速度时，才需要力的作用。还有牛顿第一定律实质上提出了惯性的概念。物体所以能保持静止或匀速直线运动，是在不受力的条件下，由物体本身的特性来决定的。物体所固有的、保持原来运动状态不变的特性称为惯性。物体不受力时所作的匀速直线运动也称为惯性运动。牛顿第一定律有时也称为惯性定律。

牛顿第一定律能成立的参考系称为惯性参考系或惯性系。由于牛顿第一定律为一经验定律，所以一个参考系是否为惯性系要根据观测和实验来判断。根据天文观测，可以认为太阳相对于银河系中心的速度约为 $3 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。如果认为太阳是在绕着银河系中心的圆形轨道上运动，而银河系中心距太阳约为 10^{20} m 左右，那么太阳绕银河系中心转动的加速度 $a = v^2/R \approx 3 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ 。这个值是

很小的，所以太阳是一个很好的惯性系。在分析地面上物体的运动时，如果地球的自转效应在分析的问题中可忽略不计，则可认为地球是一个足够精确的惯性系。

1.2.2 牛顿第二定律

牛顿第二定律表述如下：物体在受到外力作用时，它所获得的加速度大小与外力的大小成正比，并与物体的质量成反比，加速度的方向与外力的方向相同，

即

$$a \propto \frac{F}{m},$$

写成等式有

$$F = kma,$$

式中比例系数 k 决定于力、质量和加速度的单位。如果选用适当的单位，可令 $k=1$ 于是上式简化为

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}, \quad (1-15)$$

上式为牛顿第二定律的数学表示式，它是质点动力学的基本方程。

(1-15式中的力 F 是一个矢量，它和速度、加速度一样，它的合成、分解遵守矢量代数运算法则。在 SI 制中，力的单位是牛顿 N)，1 N 力使质量 1 kg 的物体产生 1 m/s^2 的加速度。

1.2.3 牛顿第三定律

牛顿第三定律表述如下：两物体 1、2 相互作用时，作用力和反作用力大小相等、方向相反，并在一直线上。用公式表示有

$$F_{12} = -F_{21}. \quad (1-16)$$

一般说来，牛顿第三定律的表述只对接触物体间相互作用和万有引力才成立。对于相隔一定距离的两个物体之间的电磁作用，由于相互作用通过场以有限速度传播，要考虑推迟效应，对于这类情况，研究表明包括电磁场动量在内的动量守恒定律则是更普遍的规律，它适用于从低速到高速，从宏观到微观的各种相互作用，也包括了牛顿第三定律。不过在本书中只分析接触物体之间相互作用力和万有引力。

牛顿第三定律并非对所有参考系都成立，它们只在惯性参考系中成立。

1.3 力学相对性原理 伽利略变换

日常经验告诉我们，坐在匀速直线运动的车厢内的乘客，若不看窗外，他就无法断定车厢是运动还是静止。这就是说，对于一个相对于惯性系作匀速直线运动的系统，其内部所发生的一切力学过程，都不受到系统作为整体的匀速直线运动的影响。或者说，不可能借助于任何力学实验来确定惯性系作匀速直线运动的速度。这一原理称为力学相对性原理，也称为伽利略相对性原理。于是力学相对性原理告诉我们，相对于一个惯性系作匀速直线运动的一切参考系都是惯性系 或者说 从力学观点来看，一切惯性系都是等价的。

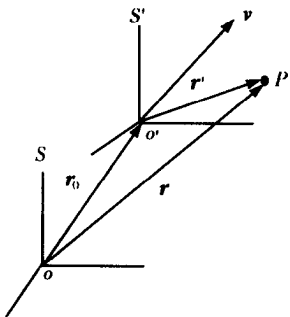


图 1-3 伽利略变换

根据力学相对性原理，对于同一力学过程可以选用不同的惯性系来描述，但却遵从同一基本规律，也就是所采用的运动方程的形式是相同的。这样就会提出一个问题，选择不同的惯性系来描述同一力学过程时相应的坐标和时间变量应作如何的变换。

图 1-3 表示惯性系 S' 相对于惯性系 S 作匀速直线运动 速度为 v 质点 P 在 S 系和 S' 系的位置矢量分别为 r 和 r' 用 t 和 t' 分别表示 S 系和 S' 系观察同一事件发生的时刻，选择 S 系和 S' 系重合时作为计时的起点。如果质点 P 的运动速度远小于真空中的光速，那么两参考系之间的时空变换为

$$\left. \begin{aligned} r' &= r - vt, \\ t' &= t. \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

这一时空变换关系称为伽利略变换。值得指出的是，伽利略变换是在一个重要的假定之下得到的，即在作相对运动的、不同的坐标系中测定的时间是相同的，即 $t' = t$ 。

由 (1-17) 式不难证明 在 S 和 S' 系中质点 P 具有相同的加速度 即

$$a' = \frac{d^2 r'}{dt'^2} = \frac{d^2 r}{dt^2} = a,$$

若再考虑到质点 P 的速度远小于真空中光速，则其质量在 S 和 S' 系中也具有相同的质量，即 $m = m'$ 。上述说明了同一物体在两个彼此作相对匀速直线运动的

参考系中质量和加速度都相同，就保证了一切力学过程的规律在两个参考系中都相同。所以，对于描述力学规律来说，所有的惯性系都是等价的。

1905年爱因斯坦 (A. Einstein) 进一步发展了相对性原理 提出物理 (包括力学的、电磁的、原子的等) 定律在所有的惯性系中都有相同的形式。经过推广了的相对性原理称爱因斯坦相对性原理，它是狭义相对论两条基本原理之一。

1.4 惯性力

前面已经说明，牛顿运动定律只有对惯性系成立，不同的惯性系之间可以有相对运动，但没有相对加速度。反之，相对任一惯性系有加速度的参考系就不是惯性系 称为非惯性系。非惯性系可分为两大类，一类是相对于惯性系平动的非惯性系，另一类是相对于惯性系转动的非惯性系。

若车厢以加速度 a 相对于地面作直线运动，如图 1-4 所示，则车厢为非惯性系。车厢内小球 m 虽受到弹簧的水平拉力 F 的作用，但小球相对于车厢却是静止的，说明牛顿第二定律不再成立。若在非惯性系中仍沿用牛顿第二定律来说明静止这一现象，可设想小球受到一惯性力 f' 方向与 a 相反 大小等于 ma 即

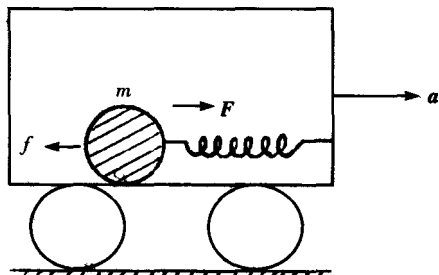


图 1-4 车厢是非惯性系

$$f' = -ma, \quad (1-18)$$

这个假想的惯性力与弹簧拉力 F 平衡。

一个相对于惯性系固定的轴作转动的盘也是一个非惯性系，在这样一个非惯性系中应用牛顿第二定律也需要引入一个设想的惯性力。图 1-5 中的盘绕定轴匀速转动，盘上的细线的两端分别连着固定轴和质点 m 。若以盘作为参考系观测，小球受到细线的拉力 T 的作用 却静止不动 不符合牛顿第二定律。为了保持牛顿第二定律的形式不变，设想小球受到一个与力 T 相平衡的惯性力 f_c ，它的大小为

$$f_c = m \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R, \quad (1-19)$$

对于盘 (非惯性系) 来说 f_c 属于一种离心方向的惯性力，所以可称它为惯性离

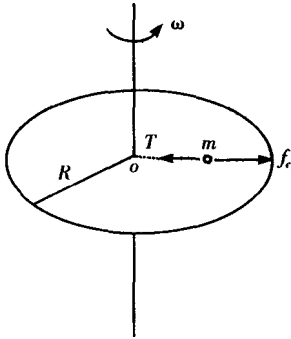


图 1-5 绕定轴转动的盘是非惯性系

心力 简称离心力。

有人撰文认为不宜把惯性力简单地看成虚构的，对惯性力不是物体之间的相互作用这一说法也应谨慎看待。惯性力虽不是某个具体物体的作用，却是整个宇宙恒星系统的总作用。广义相对论已对此作出定性的尚未定量的证明^[2]。

利用离心力的概念，可制成快速分离悬浮液中不同微粒的机械——离心机。近代超速离心机的转速可达 1 000 r/s 若以 $R=10\text{ cm}$ 计算 则向心加速度约为重力加速度的 40 万倍 即 $4 \times 10^5 g$ 这样的高速离心机可分离线度小于几个微米的病毒和蛋白质分子。

思考题

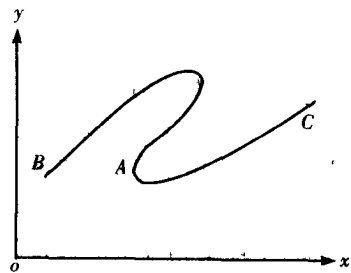
1. 路程和位移有什么区别？矢径和位移有什么区别？若一物体绕半径为 R 一周后回到原位置，试问它的路程和位移各为多少？

2. 一物体具有加速度而其速度为零，是否可能？

3. 分析以下三种说法是否正确？(1)物体的加速度越大，物体的速度也越大；(2)物体在直线上向前运动时，若物体向前的加速度减小了，则物体前进的速度也随之减小；(3)物体加速度的值很大，而物体速度的值可以不变，这是不可能的。

4. 下雨时，有人坐在车内观察车外雨点的运动，试说明在下列情形中他所观察到的结果。设雨点相对于地面是匀速直线落下的。(1)车是静止的；(2)车以匀速沿水平轨道运动；(3)车以匀加速沿水平轨道运动。

5. 一质点以匀速率在 $x-y$ 平面中运动，其轨迹如图所示，试问该质点在哪个位置的加速度最大？



思考题 1-5

6. 已知一质点的位矢为

$\mathbf{r} = a \cos \omega t \mathbf{i} + a \sin \omega t \mathbf{j} + v_0 t \mathbf{k}$ 其中 a, ω, v_0 为常量。(1)试定性描述该质点的轨迹；(2)该质点在哪个方向上无加速度；(3)该质点有切向加速度吗？

7. 用一外力 F 水平压在质量为 m 的物体上(如图)，由于物与墙之间有静

摩擦力，此时保持其静止，其静摩擦力为 f ，若外力增加一倍为 $2F$ ，则此时静摩擦力是否也增加一倍为 $2f$ ？

8. 摩擦力是否一定阻碍物体的运动？试举例说明之。

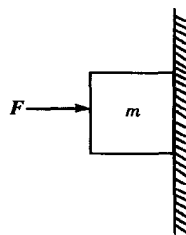
9. 绳的一端系着一个小球，以手握另一端使小球作圆周运动。(1) 当每秒的转数相同时，长的绳子容易断还是短的绳子容易断？为什么？(2) 当小球的线速度相同时，长的绳子容易断还是短的绳子容易断？为什么？

10. 有人认为牛顿第一定律是牛顿第二定律的特例，即合力为零的情形，那么为何还要单独的牛顿第一定律呢？

11. 试依据引力常量和重力加速度值估算地球的质量。已知地球的半径为 6.4×10^3 km。

12. 已知地球绕太阳公转的轨道半径约为 1.50×10^8 km，试估算太阳的质量。

13. 给你一根弹簧和一个小铁球，你能否做一个在汽车内测量汽车加速度的“加速度计”？根据什么原理？



思考题 1-7

习 题

1. 一质点在平面上运动，其位矢为 $\mathbf{r} = a \cos \omega t \mathbf{i} + b \sin \omega t \mathbf{j}$ 其中 a, b, ω 为常量。求：(1) 该质点的速度和加速度；(2) 该质点的轨迹。

2. 一质点平面运动的加速度为 $a_x = -A \cos t, a_y = -B \sin t, A \neq B, A \neq 0, B \neq 0$ 初始条件 ($t=0$ 时) 有 $v_{0x} = 0, v_{0y} = B, x_0 = A, y_0 = 0$ 。求质点的运动轨迹。

3. 设质点的运动方程为 $x = x(t), y = y(t)$ 。在计算质点的速度和加速度时，有人先求出 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ，然后根据 $v = \frac{dr}{dt}$ 和 $a = \frac{d^2 r}{dt^2}$ 求得结果；又有人先计算

速度和加速度的分量，再合成而求得结果，即 $v = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$ 和

$a = \sqrt{\left(\frac{d^2 x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{dt^2}\right)^2}$ 。你认为哪一种方法正确？为什么？

4. 一个人站在山坡上，山坡与水平面成 α 角，他扔出一个初始速度为 v_0 的小石子，与水平面成 θ 角，如图所示。

(1) 如空气阻力不计，试证小石子落在斜坡上距离为

$$S = \frac{2v_0^2 \sin(\theta + \alpha) \cos \theta}{g \cos^2 \alpha}$$