



绪论



1. 物理学研究的内容

物理学主要研究物质最普遍、最基本的运动形式及其相互转换规律。这些基本运动包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核及其他微观粒子的运动等,它们普遍存在于物质的其他高级的、复杂的运动形态之中。了解物质运动最基本形态的规律,是深刻认识复杂运动的起点和基础。

2. 物理学与其他学科

物理学的发展已经历了五次大突破,分别是牛顿力学体系、能量转换与守恒定律、麦克斯韦电磁场理论、狭义相对论和广义相对论、量子力学等的建立。继电磁相互作用和弱相互作用统一后,企图建立电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用和引力相互作用的大统一理论,乃是目前物理学探讨的最前沿问题。

物理学的基本概念、基本规律和基础研究方法(如实验和观察方法、归纳和演绎方法、分析和综合方法、模拟方法、类比方法、理想化方法、系统科学方法等)被广泛地应用于所有自然科学的各个学科,甚至社会科学,如行为科学、管理科学之中。物理学与其他自然科学相结合,形成了众多交叉学科,如粒子物理学、量子化学、量子电子学、量子生物学、生物物理学、遗传工程学、物理仿生学、大气物理学、海洋物理学、地球物理学、空间物理学、宇宙物理学等,这些推动了整个自然科学更加迅速地发展。物理学是其他自然科学的基础或支柱。

3. 物理学与新技术

科学是认识自然,是解决理论问题,而技术则是改造自然,是解决实际问题。人类千百年的实践证明,很多关键性新技术的应用都是建立在物理学创新成果上的。第一次技术革命开始于18世纪60年代,主要标志是蒸汽机的广泛应用,这是经典力学和热力学发展的结果。第二次技术革命发生在19世纪70年代,主要标志是电力的广泛应用和无线电通信的实现,这是麦克斯韦电磁场理论的建立带来的辉煌成果。20世纪以来第三次技术革命,其主要特点是以微电子技术为代表的一系列新学科、新材料、新能源、新技术的兴起和发展,是建立在相对论和量子力学的基础之上的。可以说,几乎所有重大的新技术领域的创立,事前都是经过物理学的长期酝酿,有了理论和实验上的大量积累才迸发出来的。

物理学和科学技术的关系,正如第三次世界物理学大会(2000年12月15—16日,德国柏林)决议所指出:“物理学是我们认识世界的基础……是其他科学和绝大部分技术发展的直接的或不可缺少的基础,物理学曾经是、现在是、将来还会是全球技术和经济发展的主要

驱动力。”

4. 物理学与人才培养

我国高等学校肩负着培养各类高级工程专门人才的重任,要使工程技术人员能在飞速发展的科学技术面前有所创新、有所前进,对人类做出较大的贡献,就必须加强基础理论特别是物理学的学习。通过学习物理能对物质最普遍、最基本的运动形式和规律有比较全面系统的认识,掌握物理学中的基本概念和基本原理以及研究问题的方法,同时能在科学实验能力、计算能力以及创新思维、探索精神和求实精神等方面受到严格的训练,培养分析问题和解决问题的能力,提高科学素质,努力实现知识、能力、素质的协调发展。



1901—2023 年诺贝尔物理学奖
内容与获奖者一览表

第一篇

力学



质点运动学

物体之间或同一物体各部分之间相对位置的变化称为**机械运动**。机械运动是自然界中最简单、最普遍的运动形式。研究机械运动规律的学科称为**力学**。在物质运动的所有形式中几乎都包含机械运动,因而力学成为物理学和许多工程技术学科的基础。把物体看成质点来处理的力学称为**质点力学**,它包括**质点运动学**和**质点动力学**。质点运动学主要是描述质点的运动状态,而不涉及引起运动和改变运动状态的原因;质点动力学则研究在力的作用下质点的运动状态是如何变化的。本章介绍质点运动学。主要内容为位矢、速度、加速度等的定义、在直角坐标系中的表示;平面曲线运动中的切向加速度和法向加速度;圆周运动的角量表示;围绕运动学的核心——运动方程,如何用微积分知识解决运动学问题。

1.1 位矢 位移 速度和加速度的定义



1.1.1 参考系 坐标系 质点

宇宙中的物体总是处于永恒的运动之中。为了描述一个物体的运动,总要选取其他物体作为参照,被选取的参照物体称为**参考系**,也称**参照系**。例如研究地球绕太阳公转,常选太阳为参考系;研究人造地球卫星的运动,常选地球为参考系。

为了把运动物体相对于参考系的位置定量表示出来,需要在参考系上建立适当的坐标系。常用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、极坐标系、柱坐标系和球坐标系等。

- 说明**
- (1) 选取的参考系不同,对物体运动情况的描述也就不同,这说明运动的描述具有相对性。
 - (2) 在同一个参考系中,可以选择不同的坐标系,但对描述物体的同一运动来说,其运动形式(如轨迹、速度、加速度等)还都是相同的,不同的只是对运动形式的数学描述。
 - (3) 在求解力学问题时,需要将各类物理量变换到同一参考系中进行。

一般说来,物体的大小和形状的变化,对物体的运动是有影响的。但在有些问题中,如能忽略这些影响,就可以将物体当作一个只有质量的几何点(**质点**)来处理。这将使所研究

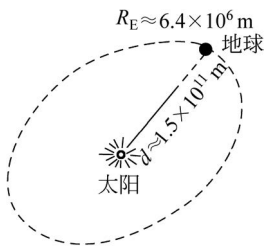


图 1-1 地球绕太阳公转

的问题简化。

需要注意的是,能否将一个物体视为质点,并不是根据它的绝对大小,而是要具体问题具体分析。例如地球的半径 $R_E \approx 6.4 \times 10^6 \text{ m}$,地球到太阳的距离 $d \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$,研究地球绕太阳公转时就可将地球视为质点(图 1-1)。但是在研究地球自转时,如果仍然把地球看作一个质点,就无法解决实际问题。

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是有重要意义的。当所研究的物体不能视为质点时,可以将物体分割成许多足够微小的部分(微元),使每一部分内部各点的运动情况基本相同,从而可将它视为质点处理,弄清这些质点的运动,就可以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。

质点是一种理想化的力学模型,它突出了物体具有质量和占有空间位置这两个主要因素,而忽略了形状、大小及内部运动等次要因素。在物理上,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是常用的,如刚体、点电荷、平衡态、理想气体等。

1.1.2 位矢 位移

为了描述质点 P 的运动,在参考系中任选一固定点 O (原点),从原点 O 向点 P 作有向线段 $\boldsymbol{r}$,称 $\boldsymbol{r}$ 为质点的位置矢量,简称位矢,也叫矢径(图 1-2)。位矢 $\boldsymbol{r}$ 从原点 O 指向点 P ,它既指明了质点 P 相对于原点 O 的空间方位,也指明了质点 P 到原点 O 的空间距离。

质点 P 沿曲线 L 运动过程中,位置要发生变化,位矢 $\boldsymbol{r}$ 是时间 t 的单值连续函数,即

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1-1)$$

上式称为质点运动方程的矢量表示。位矢 $\boldsymbol{r}$ 的端点的轨迹即运动质点在空间经过的路径,如图 1-2 中的曲线 L ,称为质点的运动轨迹。

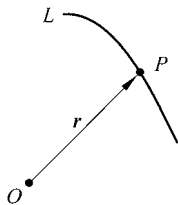


图 1-2 位矢

注意 式(1-1)中的 t 是时刻,但一般把运动的开始时刻作为计时零点, t 也就表示时间了。

设质点沿图 1-3 所示的曲线 L 运动,质点在 t 和 $t + \Delta t$ 时刻分别通过点 A 和点 B ,位矢分别为 $\boldsymbol{r}_A$ 和 $\boldsymbol{r}_B$ 。在此过程中,质点位矢的变化可用从点 A 到点 B 的有向线段 $\Delta \boldsymbol{r}$ 即位矢的增量来表示,称 $\Delta \boldsymbol{r}$ 为质点由 A 到 B 的位移矢量,简称位移。位移的方向表明点 B 相对于点 A 的空间方位,其大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 表明点 B 到点 A 的直线距离。从图 1-3 中可看出

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \quad (1-2)$$

即质点从点 A 运动到点 B 的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 等于末、始位置的位矢 $\boldsymbol{r}_B$ 与 $\boldsymbol{r}_A$ 的差。

质点在 Δt 时间内所经历的弧长 Δs 称为质点的路程。

位矢、位移和路程的单位均为米(m)。

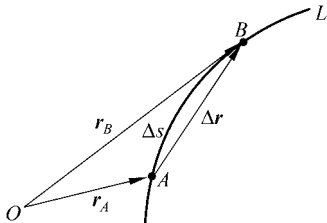


图 1-3 位移

1.1.3 速度

速度是描述质点运动的快慢和方向的物理量。设质点 P 在时间 Δt 内位移为 $\Delta \mathbf{r}$, 经历的路程为 Δs , 质点在时间 Δt 内的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 定义为 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-3)$$

$\bar{\mathbf{v}}$ 的方向即 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向。

质点在时间 Δt 内的平均速率 $\bar{v}$ 定义为 Δs 与 Δt 的比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-4)$$

如果 Δt 趋近于零, 即对式(1-3)取极限, 就是位矢对时间的变化率, 叫作质点在时刻 t 的瞬时速度, 简称速度, 用 $\mathbf{v}$ 表示, 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-5)$$

可见速度等于位矢对时间的一阶导数。

考察质点在 Δt 时间内沿图 1-4 所示的曲线 L 从点 A 运动到点 B 这一过程, 随着时间 Δt 的逐渐缩短, 点 B 逐渐靠近点 A , 位移分别变为 $\Delta \mathbf{r}'$ 、 $\Delta \mathbf{r}''$ 、…。当 Δt 趋近于零时, 位移的方向趋近于曲线在点 A 的切线方向。所以质点在某点速度的方向就是曲线在该点的切线方向, 并指向质点前进的一侧。

把 Δt 趋近于零时平均速率的极限称为时刻 t 的瞬时速率, 简称速率, 用 v 表示, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-6)$$

速度和速率的单位均为米/秒(m/s)。

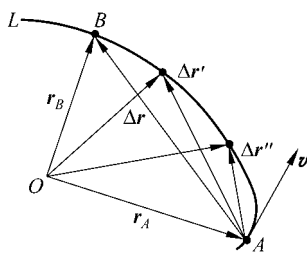


图 1-4 速度矢量

注意 (1) $\Delta \mathbf{r}$ 的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 一般不等于 Δs , 由此 $\bar{\mathbf{v}}$ 的大小 $|\bar{\mathbf{v}}| = \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right|$ 一般不等于 $\bar{v} =$

$\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 。例如质点沿闭合曲线运动一周, $\Delta \mathbf{r}$ 与其大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 为零, $\bar{\mathbf{v}}$ 与其大小 $|\bar{\mathbf{v}}|$ 也为零, 而质点的 Δs 不为零, 因此 $\bar{v}$ 不为零。

(2) 由高等数学可知, 空间曲线的元弧长 ds 可以认为等于对应的弦长 $|d\mathbf{r}|$ (图 1-3), 从

而速度的大小 $|\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right|$ 等于速率 $v = \frac{ds}{dt}$, 所以通常将 $|\mathbf{v}|$ 也写成 v 。

问题 1-1 回答下列问题: (1) 位置矢量 $\mathbf{r}$ 与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的区别和联系; (2) 平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 与平均速率 $\bar{v}$ 的区别与联系; (3) 速度 $\mathbf{v}$ 和平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 的区别和联系; (4) 速度与速率的区别和联系; (5) $|\Delta \mathbf{v}|$ 和 $\Delta |\mathbf{v}|$ 的区别; (6) 速率和平均速率的区别和联系; (7) ds 、 $|d\mathbf{r}|$ 的大小

关系。

问题 1-2 说明位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 、路程 Δs 、位矢的大小的变化量 Δr (或记为 $\Delta |\mathbf{r}|$) 的物理意义, 比较在一般情况下它们的大小关系, 并尽可能地列举这三者两两相等, 或三者均相等的特殊情况。

*** 问题 1-3** 在一段时间间隔 Δt 内, 当 (1) $\Delta \mathbf{r} = 0$, (2) $\Delta r = 0$, (3) $\Delta s = 0$ 时, 质点分别可能作怎样的运动? 在每一瞬时, 当 (1) $d\mathbf{r} = 0$, (2) $dr = 0$, (3) $ds = 0$ 时, 质点分别可能作怎样的运动?

问题 1-4 物体合速度的数值是否可以等于分速度的数值, 或者甚至小于分速度的数值?

1.1.4 加速度

质点在某时刻的运动情况, 主要由位矢和速度确定, 所以位矢和速度是描述质点运动状态的两个基本物理量。

速度的变化是用加速度描述的。一般情况下, 质点运动速度的大小和方向都随时间而改变。设质点沿图 1-5(a) 所示的曲线运动, 在 t 时刻, 处于点 A , 其速度为 $\mathbf{v}_A$, 经时间 Δt 后, 运动到点 B , 速度为 $\mathbf{v}_B$ 。在此过程中, 质点速度的增量 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$, 如图 1-5(b) 所示。

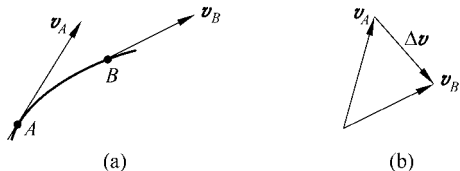


图 1-5 速度的增量

定义该段时间 Δt 内质点运动的平均加速度为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

如果 Δt 趋近于零, 把式(1-7)的极限, 叫作质点在时刻 t 的瞬时加速度, 简称加速度, 用 $\mathbf{a}$ 表示, 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-8)$$

式(1-8)表明: 质点的加速度等于速度对时间的一阶导数, 或位矢对时间的二阶导数。加速度的单位为米/秒² (m/s^2)。

注意 加速度是矢量, 它的方向是当时间 Δt 趋近于零时速度增量的极限方向, 一般不是速度的方向。

如图 1-6 所示, 对于质点作曲线运动情形, 加速度的方向一般与速度的方向不同, 当两者成锐角时, 速率增加; 两者成钝角时, 速率减少; 两者成直角时, 速率不变。

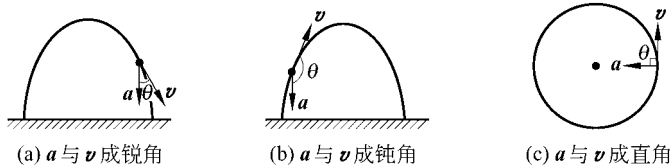


图 1-6 曲线运动中的加速度与速度的方向

问题 1-5 (1)一质点具有恒定的速率,但仍有变化的速度,是否可能?(2)一质点具有恒定的速度,但仍有变化的速率,是否可能?如判断为可能,试举例说明。

问题 1-6 分析以下五种说法是否正确。(1)物体的加速度越大,则速度也越大;(2)物体在直线上向前运动时,若其向前的加速度减小了,则前进的速度也随之减小;(3)质点加速度的值很大,而质点速度的值即速率可以不变;(4)一物体具有加速度而其速度可能为零;(5)当物体具有大小、方向不变的加速度时,物体速度的方向仍可能改变。

问题 1-7 物体在某一时刻开始运动,在 Δt 时间后,经任一路径回到出发点,此时速度的大小和开始时刻相同,但方向不同。试问在 Δt 时间内平均速度 $\bar{v}$ 是否为零? 平均加速度 $\bar{a}$ 是否为零?

1.2 位矢 位移 速度和加速度的直角坐标表示



本节介绍位矢、位移、速度和加速度等物理量在直角坐标系中的表示,然后,作为特例讨论直线运动中的速度和加速度。

1.2.1 位矢 位移

在直角坐标系中,设 i 、 j 、 k 分别是沿坐标轴 Ox 、 Oy 和 Oz 方向的单位矢量。如图 1-7 所示,某时刻质点在点 P ,其坐标分别为 x 、 y 和 z ,则它的位矢 r 可表示为

$$r = xi + yj + zk \quad (1-9)$$

若用 r 表示位矢 r 的大小,则有

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-10)$$

对运动的质点,其坐标 x 、 y 和 z 是时间的单值连续函数,它的运动方程可写成

$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1-11a)$$

或写成分量形式

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-11b)$$

式(1-11a)和式(1-11b)即运动方程的直角坐标表示。消去式(1-11b)中的时间 t ,即可得到质点的轨迹方程

$$f_1(x, y, z) = 0, \quad f_2(x, y, z) = 0 \quad (1-12)$$

即质点的轨迹为两个空间曲面的交线。式(1-11b)也称为轨迹方程的参数表示。

如质点在 xOy 平面上运动,则运动方程为

$$r(t) = x(t)i + y(t)j \quad (1-13a)$$

或

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad (1-13b)$$

轨迹方程为

$$f(x, y) = 0 \quad (1-14)$$

即质点的轨迹为 xOy 平面上的曲线。

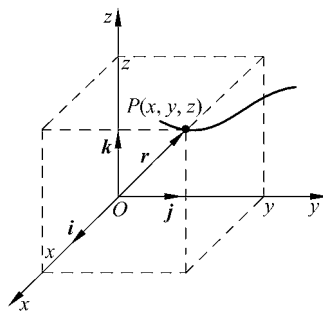


图 1-7 直角坐标系

由式(1-2)得位移在直角坐标系中的表达式

$$\Delta \mathbf{r} = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \quad (1-15)$$

大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (1-16)$$

问题 1-8 运动方程与轨迹方程的关系如何?

例 1-1 已知质点的运动方程为 $\mathbf{r} = a \cos \omega t \mathbf{i} + b \sin \omega t \mathbf{j}$, 式中 a, b, ω 均为常数。求质点的轨迹方程。

解 质点运动方程的分量为

$$x = a \cos \omega t, \quad y = b \sin \omega t$$

消去时间 t , 得到轨迹方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

质点的轨迹是一个以原点 $O(0,0)$ 为中心、以 a 与 b 为两半轴的正椭圆。

1.2.2 速度

将式(1-9)代入式(1-5), 可得质点速度的直角坐标表示

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \quad (1-17)$$

用 $v_x = \frac{dx}{dt}$ 、 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 和 $v_z = \frac{dz}{dt}$ 分别表示速度在 x 、 y 和 z 轴上的分量, 则

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \quad (1-18)$$

速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-19)$$

问题 1-9 如图 1-8 所示, 设质点作半径为 R 、周期为 T 、逆时针的匀速率圆周运动, 从点 $A(R, 0)$ 运动到点 $B(0, R)$ 。求该过程中, 质点的(1)路程 Δs ; (2)位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的矢量表达式; (3)平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 的矢量表达式; (4)平均速率 $\bar{v}$ 。如果质点作顺时针的匀速率圆周运动, 从点 $A(R, 0)$ 运动到点 $B(0, R)$, 再回答上述问题。

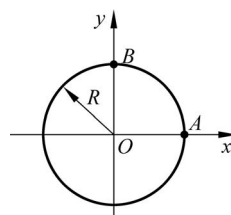


图 1-8 问题 1-9 图

问题 1-10 在 xOy 平面上运动的质点在某瞬时位矢为 $\mathbf{r}(t)$, 说明下列 4 个量的意义。

$$(1) \frac{d\mathbf{r}}{dt}; \quad (2) \frac{d\mathbf{r}}{dt}; \quad (3) \frac{ds}{dt}; \quad (4) \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}.$$

例 1-2 已知质点的运动方程为 $\mathbf{r} = (t^2 \mathbf{i} + 2t \mathbf{j}) \text{ m}$, 求质点: (1) $t = 1 \text{ s}$ 与 $t = 2 \text{ s}$ 时的位矢; (2) 在第 2 s 内的平均速度; (3) 速度的表示式及 1 s 末的速度。

解 (1) $t = 1 \text{ s}$ 时, $\mathbf{r}(1) = (\mathbf{i} + 2\mathbf{j}) \text{ m}$

$$t = 2 \text{ s 时}, \mathbf{r}(2) = (4\mathbf{i} + 4\mathbf{j}) \text{ m}$$

(2) 第 2 s 内的位移 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(2) - \mathbf{r}(1) = (3\mathbf{i} + 2\mathbf{j}) \text{ m}$