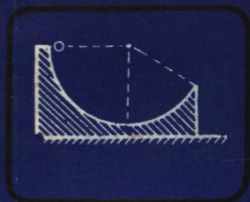




中学物理教学参考丛书



物体的运动



上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

物 体 的 运 动

于彝陵 林在珩

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

物体的运动

于彝陵 林在珩

上海教育出版社出版

(上海永福路123号)

新华书店上海发行所发行 江苏南漕印刷厂印刷

开本 787×1032 1/32 印张 5.25 字数 115,000

1982年7月第1版 1982年7月第1次印刷

印数 1—17,300本

统一书号: 7150·2698 定价: 0.44元

编 者 的 话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有二十本左右，将陆续出版。

《物体的运动》的主要内容是论述有关物体运动的规律。

全书共分六章：第一章阐述速度和加速度的基本概念，第二章对物体的各种运动状态进行分析，第三章讨论直线运动的规律，第四章讨论曲线运动的规律，第五章讨论刚体运动的规律，第六章综述有关物体运动的解题规律和分析方法。

目 录

第一章 速度和加速度	1
一、参照系	1
二、位移	4
三、速度	7
四、加速度	16
第二章 物体运动状态的分析	21
一、作用在运动物体上的力	21
二、质点运动状态的分析	23
三、质点系运动状态的分析	31
第三章 质点的直线运动	36
一、匀速直线运动	37
二、匀变速直线运动	41
三、自由落体运动	53
四、竖直上抛运动	56
五、相对运动	62
第四章 质点的曲线运动	69
一、运动的迭加原理	69
二、抛体运动	70
(一) 斜抛运动	71
(二) 平抛运动	80
三、圆周运动	83
(一) 向心加速度	83

(二) 向心力	88
第五章 刚体的运动	102
一、平动和转动	102
二、定轴转动的角速度和角加速度	104
三、转动刚体上各点的速度和加速度	109
第六章 解题分析	114
一、位移-时间图象和速度-时间图象	114
二、匀变速直线运动	118
三、相对运动	124
四、抛体运动	130
五、圆周运动	137
习题	146
习题答案	158

第一章 速度和加速度

自然界的一切物质都不断地在运动着、变化着，物质运动的形式是多种多样的。物体与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。如飞机对于地面的运动、车床上工件对于车刀的运动、流动的血液对于人体的运动等都在作机械运动。机械运动是自然界各种运动中最简单，但又是最普遍的一种运动形式。

物体位置的变化用位移来描述，物体的运动状态用速度来描述，物体运动速度的变化用加速度来描述，通过对位移、速度和加速度等概念的研究，可以加深对运动具有相对性、瞬时性、矢量性和迭加性等基本性质的认识。

一、参 照 系

自然界的任何物体都在不停地运动着，要描述一个物体的运动，必须选择另一个运动物体或几个保持相对静止的物体群作为参考。例如，研究火车的运动常常以地面作参考，研究列车员在车内的运动，通常选择火车车厢作为参考，这种被选作参考的物体或物体群称为参照系。

选定参照系后，如果物体的位置相对于参照系的位置在变化，说明物体相对于参照系在运动；如果物体相对于参照系的位置不变，则说明物体相对于参照系是静止的。

选择不同的参照系来考察同一物体的运动情况，可能会

得到不同的结果。坐在火车内的乘客，以地面为参照系是运动着的，但以车厢为参照系则是静止的。研究汽车的外形与所受空气阻力的关系，常常是在风洞中做实验，汽车对地面虽是不动的，但以强大的气流作参照系，汽车是在高速地向前运动。因此，当我们研究某一物体的运动时，必须指出它的运动是相对于哪一个参照系说的，否则就无法确定物体的运动情况。

研究和描述物体的运动，应该选择哪个参照系，要看问题的性质和研究起来是否方便而定。对于地面上物体的运动，一般都以地面作参照系。今后在描述物体的运动时，如果没有加以说明，就是以地面作为参照系。

在自然界里，绝对不动的物体是没有的，自然界中一切物质都处于永恒运动之中，运动和物质是不可分割的。运动是物质存在的形式，是物质的固有属性，物质运动存在于人们意识之外，所以说物质的运动是绝对的。但在判定一个物体的运动时，必须选定另外一些被认为静止不动的物体作参照系，这些被认为静止不动的物体实际上都是运动的，从这个意义上说，所有的运动都是相对的。

在各种各样的运动中，如果运动着的两个物体彼此间的相对位置不变，这样的运动状态叫做相对静止。相对静止只是相对运动的特殊情况，由于自然界中一切物体都处于运动状态，所以任何静止也都是相对的。

要明确地描述一个物体的运动，只有在选取某一确定的参照系后才有可能，由此而作出对物体运动情况的描述总是具有相对性的。

为了从数量上确定物体对于参照系的位置，把运动物体在各个时刻相对于参照系的位置定量地表示出来，这就需要

在参照系上选取一个适当的坐标系。一般在参照系上选定一点作为坐标系的原点,取通过原点的直线作为坐标轴,常用的坐标系是直角坐标系。如果物体作直线运动,我们可以取这条直线作为 x 轴,取直线上的一点作为坐标的原点,用箭头表示出 x 轴的正方向,运动物体的位置用坐标 x 就能予以确定。

实际物体都有一定的大小、形状、质量和固定的内部结构。物体运动时,内部各点的位置变化一般是各不相同的,而且物体的大小和形状也可能会发生变化,因此要描写物体的运动的实际情况并不是一件简单的事。如果物体的大小和形状跟所研究的问题无关或者关系很小可以忽略不计,我们就可以近似地把这个物体看作是一个理想模型。把复杂的物体用简单的抽象模型来代替,这样可以突出所要研究的问题的主要矛盾,便于找出物体的运动规律。例如,刨床上工件在运动时它各部分的运动情况都相同,工件上任意一点的运动情况可以用来代替整个工件的运动情况。又如研究地球绕太阳的公转时,地球上各点在公转时的运动情况是各不相同的,由于地球的平均半径比地球与太阳间的距离小得很多,这时就可以忽略地球的大小和形状而把地球当作一个质点。但是在研究地球自转时,就不能忽略地球的大小和形状而把它简化作质点来处理。原子、分子等物质微粒虽然很小,但在研究其内部结构时,也不能把它们看成是质点。由此可知,一个物体是否可以抽象地当作一个质点来处理,应根据具体问题的不同情况来决定。

研究质点的运动规律是研究物体运动的基础,把一个物体看作由无数个质点所组成,分析这些质点的运动情况,就有可能了解整个物体的运动规律。我们以后所研究的运动,一般都看作是质点的运动。

二、位 移

在平面上运动的质点,要确定质点的位置,我们可以在平面上建立坐标系,选定原点 O 和坐标轴 OX 、 OY ,质点的位置由它的坐标就可以确定了。如图 1-1 中,质点 O 的位置是 $(0,0)$,质点 A 的位置是 $(-3,2)$,质点 B 的位置是 $(2,5)$ 。

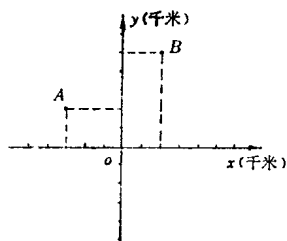


图 1-1

运动质点在空间所经过的路径称为轨迹,质点运动轨迹的长度称为路程。质点位置的变化称为位移,位移的大小等于终点和起点之间的直线距离,位移的方向是位置变化的方向。如图 1-2 所示,一个质点沿 x 轴正方向作直线运动,在时刻 t 时,质点位于 A 点处, A 点的坐标为 x_A , 在时刻 $t + \Delta t$ 时,质点到达 B 点, B 点的坐标为 x_B 。在 Δt 这段时间内,质点位置的变化可以用从 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示, $\overrightarrow{AB}$ 称为质点在 Δt 这段时间内的位移。 $\overrightarrow{AB}$ 除了表明 B 点与 A 点之间的距离外,还表明了 B 点相对于 A 点的方位。质点作直线运动时,位移 $\overrightarrow{AB}$ 的大小和方向完全可以用坐标 x_B 和 x_A 之差 $\Delta x = x_B - x_A$ 来描述,从 Δx 的正、负可以知道位移的方向, Δx 的绝对值等于位移的大小。位移是矢量。

运动质点在空间所经过的路径称为轨迹,质点运动轨迹的长度称为路程。质点位置的变化称为位移,位移的大小等于终点和起点之间的直线距离,位移的方向是位置变化的方向。如图 1-2 所示,一个质点沿 x 轴正方向作直线运动,在时刻 t 时,质点位于 A 点处, A 点的坐标为 x_A , 在时刻 $t + \Delta t$ 时,质点到达 B 点, B 点的坐标为 x_B 。在 Δt 这段时间内,质点位置的变化可以用从 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示, $\overrightarrow{AB}$ 称为质点在 Δt 这段时间内的位移。 $\overrightarrow{AB}$ 除了表明 B 点与 A 点之间的距离外,还表明了 B 点相对于 A 点的方位。质点作直线运动时,位移 $\overrightarrow{AB}$ 的大小和方向完全可以用坐标 x_B 和 x_A 之差 $\Delta x = x_B - x_A$ 来描述,从 Δx 的正、负可以知道位移的方向, Δx 的绝对值等于位移的大小。位移是矢量。

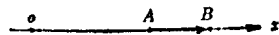


图 1-2

如图 1-3,质点从 O 沿 OA 曲线运动到 A ,路程等于曲线 OA 的长度而位移的大小等于线段 OA 的长度,方向由 O 指向 A ;质点从 O 沿折线 OBC 运动到 C ,路程等于 OB 与 BC 长度之和,

而位移的大小等于线段 OC 的长度, 方向由 O 指向 C ; 质点从 O 沿直线运动到 D , 路程等于线段 OD 的长度, 位移的大小也等于线段 OD 的长度, 方向由 O 指向 D 。

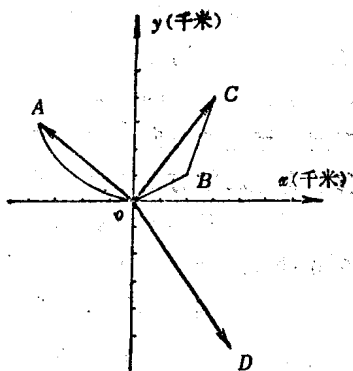


图 1-3

在直线运动中, 位移的方向总是沿着直线的。我们可以任意选定沿直线的一个方向为正, 如果位移的方向与所选定的方向一致, 位移是正值, 如果位移的方向与所选定的方向相反, 位移是负值。位移的正负值与有些标量的正负值意义不同, 位移的正负值是表明它的方向与所选定的方向一致还是相反, 而有些标量的正负值如摄氏温度的正负值则是表示它的温度比冰水混合物的温度高些还是低些, 没有方向的意义。

物体作简谐振动时, 在运动过程中所通过位移的方向和位置移动的方向必须予以严格的区别。如果我们对位移的概念理解得不透彻, 就可能会错误地认为物体从平衡位置 O 向右边的 A 点运动时, 它的位移跟物体从 A 向 O 运动时的位移方向相反。产生这种错误看法的原因是对物体作简谐振动的位移是相对于平衡位置而定的认识不够清楚, 物体在平衡位置时位移为零, 物体在平衡位置 O 的右边时, 不论物体是向右运动还是向左运动, 位移的方向总是指向右方, 同样, 物体在平衡位置 O 的左边时, 不论物体是向右运动还是向左运动, 位移的方向总是指向左方。因此, 物体作简谐振动时, 物体相对于平衡位置 O 的位移总是背向平衡位置 O 的。

几个同一直线上的位移的和，是它们的代数和。每一位移如果与选定的方向一致，取正值，如果与选定的方向相反，取负值。所求得的结果是正值，表示这几个位移的合位移的方向跟选定的方向一致，所求得的结果是负值，表示这几个位移的合位移的方向跟选定的方向相反。

〔例〕 从离地面高 25.0 米的平台上竖直向上抛出小球，2.0 秒内小球上升了 20.0 米，2.0 秒末开始下落，第 3.0 秒内下落了 5.0 米，第 4.0 秒内下落了 15.0 米，最后 1.0 秒内又下落了 25.0 米，求抛出后 (1) 3.0 秒内；(2) 4.0 秒内；(3) 5.0 秒内小球的路程和位移。

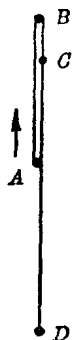


图 1-4

【解】 设竖直向上为正方向，向下为负方向。

(1) 抛出后 3.0 秒内小球通过的路程

$$20.0 \text{ 米} + 5.0 \text{ 米} = 25.0 \text{ 米};$$

小球的位移(图 1-4)

$$s = s_{AB} + s_{BC} = 20.0 \text{ 米} + (-5.0 \text{ 米}) = 15.0 \text{ 米}.$$

3.0 秒内小球通过的路程是 25.0 米，小球的位移 AC 是竖直向上 15.0 米，这时小球的位置在平台上方 15.0 米

处。

(2) 抛出后 4.0 秒内小球通过的路程

$$20.0 \text{ 米} + 5.0 \text{ 米} + 15.0 \text{ 米} = 40.0 \text{ 米};$$

小球的位移

$$s = s_{AB} + s_{BC} + s_{CA} = 20.0 \text{ 米} + (-5.0 \text{ 米}) + (-15.0 \text{ 米}) = 0.$$

4.0 秒内小球通过的路程是 40.0 米，小球的位移是零，这时小球又回到平台上。

(3) 抛出后 5.0 秒内小球通过的路程

$$20.0 \text{ 米} + 5.0 \text{ 米} + 15.0 \text{ 米} + 25.0 \text{ 米} = 65.0 \text{ 米};$$

小球的位移

$$\begin{aligned}
 s &= s_{AB} + s_{BC} + s_{CA} + s_{AD} \\
 &= 20.0 \text{ 米} + (-5.0 \text{ 米}) + (-15.0 \text{ 米}) + (-25.0 \text{ 米}) \\
 &= -25.0 \text{ 米}。
 \end{aligned}$$

5.0 秒内小球通过的路程是 65.0 米,小球的位移 AD 是 -25.0 米,这时小球的位置在平台下 25.0 米处,即恰好在地面上。

[例] 图 1-5 中 $OABC$ 是物体运动的轨迹图,物体从 O 出发向东北运动到 A ,再向南运动到 B ,又向西运动到 C 。求物体通过的路程和位移。

【解】 物体通过的路程

$$\begin{aligned}
 &\sqrt{3.0^2 + 3.0^2} \text{ 千米} + 6.0 \\
 &\text{千米} + 6.0 \text{ 千米} = 3\sqrt{2} \text{ 千米} \\
 &+ 12.0 \text{ 千米} \approx 16.2 \text{ 千米}。
 \end{aligned}$$

物体位移 OC 的大小等于起点与终点之间的距离,等于 4.2 千米,位移的方向是 O 指向 C 。所以物体从 O 出发向东北运动到 A ,再向南运动到 B ,又向西运动到 C 的位移是西南 4.2 千米。

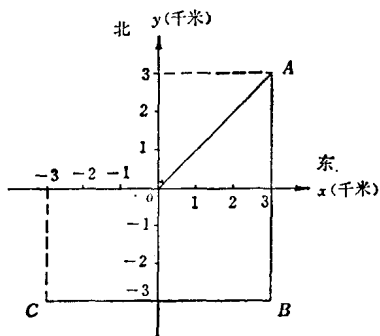


图 1-5

求互成角度的几个位移的合位移跟求一切矢量的和一样,必须用矢量合成的方法,即用平行四边形法则。

三、速 度

物体的运动是有快慢的,我们用速度来表示物体运动的快慢。

不同物体的运动有快慢,同一物体运动的快慢也常常是变化的,自由下落物体的运动越来越快,火车从车站出发,它

的运动越来越快,而在进站时,它的运动就越来越慢。

沿直线作变速运动的质点,它的速度不断地在变化,我们用平均速度来近似地表示质点运动的快慢。质点在某段时间内的位移和所用时间的比称为质点在这段时间内的平均速度。如果质点在 Δt 时间内的位移是 $\mathbf{AB}$, 则质点在这段时间内的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 是

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{AB}}{\Delta t}.$$

平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 是矢量,方向与位移 $\mathbf{AB}$ 的方向相同,平均速度的量值可以用 Δs 和 Δt 的比值来表示,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Δs 为正值时, $\bar{v}$ 也为正值,表示平均速度的方向与选定的方向相同。当 Δs 为负值时, $\bar{v}$ 也为负值,表示平均速度的方向与选定的方向相反。用平均速度描述质点运动的快慢是相当粗略的,它只能说明在 Δt 这段时间内质点运动的平均快慢程度和运动的方向。

质点作曲线运动,曲线 $\widehat{AB}$ 是质点运动轨道的一部分(图 1-6)。时刻 t 质点在 A 点,时刻 $t + \Delta t$ 质点到达 B 点。在时间 Δt 内,质点的位移可以用从 A 到 B 的有向线段 $\mathbf{AB}$ 来表示,

它的量值 Δr 等于割线 AB 的长度。质点通过的路程等于曲线 AB 的长度 Δs ,路程是标量, Δs 和 Δr 并不相等。质点作曲线运动时的速度与直线运动一样,可以把质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与时间 Δt

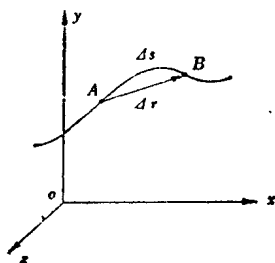


图 1-6

的比值,称为质点在 Δt 这段时间内作曲线运动的平均速度,平均速度的方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}。$$

在描述质点运动时,我们把路程 Δs 与时间 Δt 的比值称为质点在 Δt 这段时间内的平均速率,平均速率是标量,等于质点在单位时间内所通过的路程。例如,质点在 Δt 这段时间内,围绕半径为 R 的圆环行一周,质点的位移等于零,平均速度等于零,而平均速率等于 $\frac{2\pi R}{\Delta t}$ 。

设一列火车在 5.0 小时内从甲城开到乙城,甲城和乙城之间的距离是 300 千米,则火车在 5.0 小时这段时间内的平均速度是

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{300 \text{ 千米}}{5.0 \text{ 小时}} = 60 \text{ 千米/小时}。$$

火车在 5.0 小时这段时间内的平均速度是 60 千米/小时。可以这样来理解,如果另外有一辆匀速开行的火车,从甲城开往乙城,所用的时间也是 5.0 小时,这列匀速开行火车的速度就等于作变速运动火车在这 5.0 小时内的平均速度。

同一列火车,在不同的时间内所确定的平均速度是不同的,取火车在两站中途某段时间内的平均速度就较大,取出发或进站某段时间内的平均速度就较小,因此,在讲火车的平均速度时必须指明是在哪一段时间内的平均速度。

利用平均速度公式 $\bar{v} = \frac{s}{t}$, 可以求位移 $s = \bar{v}t$ 或时间 $t = \frac{s}{\bar{v}}$, 在运算过程中必须注意时间 t 、位移 s 与平均速度 $\bar{v}$ 之间的相互联系。例如, 火车从甲城到乙城 5.0 小时内的平均速

度是 60 千米/小时, 不能从这个平均速度求 3.0 小时内火车的位移或发生 120 千米位移所需要的时间, 因为火车在 3.0 小时内或火车发生 120 千米位移的平均速度不一定是 60 千米/小时。

〔例〕 物体沿直线 ABC 运动, AB 的距离是 100 米, BC

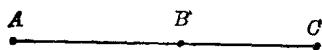


图 1-7

的距离是 80 米, 物体以 10.0 米/秒的速度从 A 匀速运动到 B , 接着改为 16.0 米/秒的速度从 B 匀速运动到 C , 求物体从 A 运动到 C 的平均速度。(图 1-7)

【解】 平均速度不能理解为速度的平均, 否则便会错误地得出物体从 A 运动到 C 的平均速度是

$$\bar{v} = \frac{v_{AB} + v_{BC}}{2} = \frac{10.0 \text{ 米/秒} + 16.0 \text{ 米/秒}}{2} = 13.0 \text{ 米/秒}.$$

按平均速度的定义, 物体从 A 运动到 C 的平均速度应该是物体从 A 到 C 的位移与从 A 运动到 C 所用时间的比。

$$t_{AB} = \frac{s_{AB}}{v_{AB}} = \frac{100 \text{ 米}}{10.0 \text{ 米/秒}} = 10.0 \text{ 秒},$$

$$t_{BC} = \frac{s_{BC}}{v_{BC}} = \frac{80 \text{ 米}}{16.0 \text{ 米/秒}} = 5.0 \text{ 秒},$$

$$t_{AC} = t_{AB} + t_{BC} = 10.0 \text{ 秒} + 5.0 \text{ 秒} = 15.0 \text{ 秒},$$

$$s_{AC} = s_{AB} + s_{BC} = 100 \text{ 米} + 80 \text{ 米} = 180 \text{ 米},$$

$$\bar{v}_{AC} = \frac{s_{AC}}{t_{AC}} = \frac{180 \text{ 米}}{15.0 \text{ 秒}} = 12.0 \text{ 米/秒}.$$

物体从 A 运动到 C 的平均速度是 12.0 米/秒。

〔例〕 B 在 A 的右方, AB 间距离是 24.0 米, 物体从 A 运动到 B 用去 5.0 秒, 接着沿 BA 向左运动, 3.0 秒后到 C 点,

BC 的距离是 12.0 米, 物体继续向左运动, 又 4.0 秒回到 A 点, 求物体从 (1) A 到 B; (2) A 到 B 到 C; (3) A 到 B 回到 A 的平均速率和平均速度。(图 1-8)

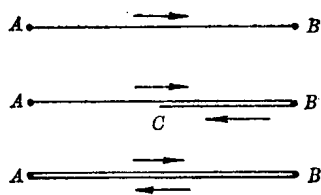


图 1-8

【解】 平均速率是路程与时间的比, 是标量, 平均速度是位移与时间的比, 是矢量。

(1) 物体从 A 运动到 B,

$$\text{平均速率 } \bar{S} = \frac{s_{AB}}{t_{AB}} = \frac{24.0 \text{ 米}}{5.0 \text{ 秒}} = 4.8 \text{ 米/秒},$$

$$\text{平均速度 } \bar{v} = \frac{s_{AB}}{t_{AB}} = \frac{24.0 \text{ 米}}{5.0 \text{ 秒}} = 4.8 \text{ 米/秒, 方向向右.}$$

(2) 物体从 A 运动到 B, 再反方向运动到 C,

$$\text{平均速率 } \bar{S} = \frac{s_{AB} + s_{BC}}{t_{AB} + t_{BC}} = \frac{24.0 \text{ 米} + 12.0 \text{ 米}}{5.0 \text{ 秒} + 3.0 \text{ 秒}} = 4.5 \text{ 米/秒},$$

$$\begin{aligned} \text{平均速度 } \bar{v} &= \frac{s_{AC}}{t_{AB} + t_{BC}} = \frac{24.0 \text{ 米} + (-12.0 \text{ 米})}{5.0 \text{ 秒} + 3.0 \text{ 秒}} \\ &= 1.5 \text{ 米/秒, 方向向右.} \end{aligned}$$

(3) 物体从 A 运动到 B, 再返回 A,

$$\begin{aligned} \text{平均速率 } \bar{S} &= \frac{2s_{AB}}{t_{AB} + t_{BC} + t_{CA}} = \frac{2 \times 24.0 \text{ 米}}{5.0 \text{ 秒} + 3.0 \text{ 秒} + 4.0 \text{ 秒}} \\ &= 4.0 \text{ 米/秒,} \end{aligned}$$

因位移为零, 平均速度 $\bar{v} = 0$ 。

可以看出, 平均速率与平均速度是不同的两个量。

平均速度只能近似地描述质点在某段时间内运动的快慢程度。质点在作加速直线运动或减速直线运动的过程中, 质点在不同时刻的快慢程度是不相同的。为了精确地描述质点