“燕山大学优秀学术著作及教材”基金项目

大学物理学（上册）

DaXue WuLiXue

燕山大学理学院大学物理系 编

燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

大 学 物 理 学

（上　册）

燕山大学理学院大学物理系 编

燕山大学出版社
·秦皇岛·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学/燕山大学理学院大学物理系编. —秦皇岛:燕山大学出版社,2024.2
ISBN 978-7-5761-0402-8

Ⅰ. ①大…　Ⅱ. ①燕…　Ⅲ. ①物理学—高等学校—教材　Ⅳ. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 178023 号

大学物理学

燕山大学理学院大学物理系 编

出 版 人:陈　玉
责任编辑:孙志强
责任印制:吴　波　　**封面设计**:吴　波
出版发行:燕山大学出版社 YANSHAN UNIVERSITY PRESS　　**电　　话**:0335-8387555
地　　址:河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号　　**邮政编码**:066004
印　　刷:涿州市般润文化传播有限公司　　**经　　销**:全国新华书店

开　　本:787 mm×1092 mm　1/16　　**印　　张**:27
版　　次:2024 年 2 月第 1 版　　**印　　次**:2024 年 2 月第 1 次印刷
书　　号:ISBN 978-7-5761-0402-8　　**字　　数**:530 千字
定　　价:98.00 元(全 2 册)

《大学物理学》编委会

主　编:王明利　王晓颖　张素红

副主编:侯岩雪　李子敬　曹立朋

前　　言

党的二十大报告指出，教育是国之大计、党之大计，强调要深化教育领域综合改革，加强教材建设，推进教育数字化，建设全民终身学习的学习型社会、学习型大国。在这一精神的指引下，本着以学生为中心、提升学生自主学习能力这一目标，编者结合多年的教学实践，编写了这套大学物理教材。

本教材是参照2010版和2023版《理工科类大学物理课程教学基本要求》，在总结编者多年教材改革实践的基础上，汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写的。教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容，又加强了近现代物理知识。本教材结合大学物理在线课程资源，添加了部分习题视频讲解，使全书内容更丰富、更符合新工科大学物理教学的需要。这套教材的主要特点是：

(1) 充分利用数字化在线学习。为了帮助师生提高效率和兴趣、增加教学手段和方法，我们对教材进行了互联网立体化建设，建设了重要知识点和典型例题的视频讲解在线资源。在学习过程中师生可以灵活利用互联网平台进行在线学习。

(2) 用现代观点审视和组织教材内容。在编写过程中，借鉴了国内外部分新版优秀教材，力求贯彻“理论体系精练、理论联系实际”的原则；内容达到“精炼经典物理，加强近代物理”的目标；同时做到在精炼基础理论知识的同时，加强对学生分析和解决实际问题能力的培养；重视物理原理在现代技术中的应用，以缩小学校教育与社会需求之间的差距。根据理工科各学科专业分布情况，既兼顾传统工程技术所需要的经典物理内容，又反映与现代工程技术相结合的近代物理内容，内容不与高中理科物理、工科物理实验、电工学重复，概念体系不与理论力学等工程技术型课程重叠。

(3) 以结构逻辑和教学逻辑科学地优化教材的体系结构。精炼每章的基础理论知识，内容图文并茂，从结构逻辑和教学逻辑上使教材体系更加科学完整，使教材层次分明，结构合理，系统性强，符合教学规律。

本教材分为上、下两册，共十五章。上册包括：力学、机械振动与机械波、波动光学；下册包括电磁学、热学、狭义相对论和量子力学。本教材可作为工科院校工科类学生的基本教材或选用教材，也可作为物理专业学生和大学物理教师的参考书。

本教材由燕山大学理学院大学物理系编写,参加编写工作的主要人员有:曹立朋(第一章、第二章、第三章、第四章、第五章),王晓颖(第六章、第七章、第八章),张素红(第九章、第十章),李子敬(第十一章),王明利(第十二章、第十三章),侯岩雪(第十四章、第十五章)。

编写适合教学要求、符合现代化教学手段的教材是一种新的探索,由于编者水平有限,虽经多次审校,书中的疏漏和错误之处在所难免,敬请广大教师、读者批评指正。

编者

2023年8月

目　　录

第一章　质点运动学

力学中描述物体运动的内容叫作运动学，运动学的任务是研究物体的空间位置随时间的变化关系。实际物体由于结构复杂，形状各异，其运动状态通常是复杂的。为了简化物体的运动，引入质点模型，则物体运动可以抽象为质点或质点系的运动。本章首先引入质点和参考系的概念，然后重点介绍描述质点运动的物理量——位矢、位移、速度、加速度等，并讨论如何解决质点运动学中的问题。

第一节　质点　参考系　坐标系

一、质点

实际物体都有一定的大小和形状，物体在运动时，其大小和形状可能会发生变化，因此要描述实际物体的运动规律通常比较复杂。当物体在做某些特定的运动时，物体的大小和形状对于所研究的问题没有影响，或影响很小而可以忽略时，就可以将物体看作**质点**，即只有质量而不考虑大小和形状的几何点。

质点是一个理想物理模型，能否把物体看作质点取决于问题本身，需要具体问题具体分析。例如研究地球绕太阳公转时，由于地球与太阳的间距远大于地球的直径，因此可以将地球看作质点。当研究地球表面附近物体的运动时，通常就不能把地球看作质点了。在研究刚体、流体等运动时，不能把研究对象看作质点，但是可以将其看成由大量质点组成的质点系。因此质点运动学是研究一般物体运动的基础。

二、参考系

运动是绝对的，一切物质都在永不停息地运动。但是对运动的描述是相对的，运动是相对于某个物体（或几个保持相对静止的物体群）为基准而言的。例如，坐在匀速行驶的汽车上的人，相对于地面在做匀速运动，而相对于汽车则保持静止。描述物体运动时所参考的物体

或物体群,称为**参考系**。研究运动学问题时,参考系可以任意选择,但是一般以分析问题方便为准。例如,研究地球表面附近的物体运动,通常选取地球作为参考系,而研究地球绕太阳公转时,则可以选择太阳作为参考系。

三、坐标系

要定量地研究物体的运动,需要在参考系上建立一个坐标系,从而确定物体的位置。在力学中常用的坐标系包括**直角坐标系**、**自然坐标系**、**平面极坐标系**。

直角坐标系是最为常见的,若已知某质点在直角坐标系中的位置坐标(x,y,z),就可以确定该质点在空间中的位置。

如果物体的运动被约束在固定的轨道上,例如火车沿铁轨的运动,车辆沿固定的路线行驶等,处理这类曲线运动时用自然坐标系较为方便和直观。所谓自然坐标系就是选定运动轨道上任意一点 O 为原点,规定一个正方向,用质点和 O 点之间的轨道长度及其正负来确定质点的位置。如图 1-1 所示,用 s 表示 P 点的自然坐标,s 是一个代数量。

平面极坐标系,如图 1-2 所示,在某个平面内建立极点 O 和极轴 Ox,则平面内质点 A 的位置可以用OA 的间距r 和OA 与Ox 轴的夹角θ 表示,即 A 点的平面极坐标为(r,θ),其中 r 称为极径,取正值,θ 称为角坐标,从极轴沿逆时针方向旋转时,θ 为正,反之为负。若质点在平面内以 O 点为中心做圆周运动,则 r 为常数,变量只有角坐标 θ,因此用平面极坐标是较为方便的。

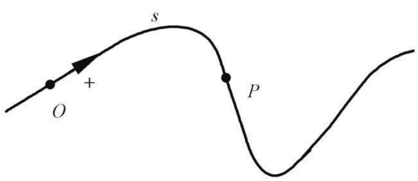

图 1-1 自然坐标系

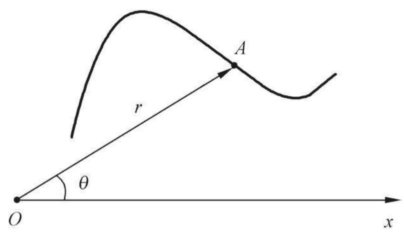

图 1-2 平面极坐标系

第二节 直角坐标系中质点运动的描述

一、位置矢量

质点在某一时刻位于 P 点,为了描述质点位置,选定 O 点为参考点。由参考点 O 指向 P

点的有向线段 $\overrightarrow{OP}$，以 $\boldsymbol{r}$ 表示，称为该时刻质点的**位置矢量**，简称**位矢**。以 O 为原点建立直角坐标系，如图 1-3 所示，P 点的坐标为 (x,y,z)，则位矢 $\boldsymbol{r}$ 表示为

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1-1}$$

式中，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为 x、y、z 轴方向的单位矢量。位置矢量的大小为

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

位置矢量的方向由 $\boldsymbol{r}$ 和 x、y、z 轴的夹角 α、β、γ 的余弦来表示

$$\cos\alpha=\frac{x}{r},\cos\beta=\frac{y}{r},\cos\gamma=\frac{z}{r}$$

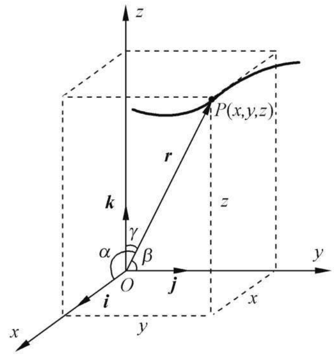

图 1-3 位置矢量

二、运动学方程

质点在运动过程中，位置随时间变化的函数关系，称为质点的**运动学方程**。在直角坐标系中用坐标 (x,y,z) 表示质点位置，则运动学方程表示为

$$\begin{cases}x=x(t)\\ y=y(t)\\ z=z(t)\end{cases} \tag{1-2}$$

用位矢表示质点位置，则运动学方程表示为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1-3}$$

质点运动的路径称为质点的运动轨道，表示该轨道的函数称为**轨道方程**。从式(1-2)中消去参量 t，得到直角坐标系中 x、y、z 之间的关系 $f(x,y,z)=0$，即为质点运动的轨道方程。

三、位移

如图 1-4 所示，质点沿曲线运动，在 t 时刻位于 A 点，位矢为 $\boldsymbol{r}_A$，$t+\Delta t$ 时刻位于 B 点，位矢为 $\boldsymbol{r}_B$，则质点在 Δt 时间内的位移为

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A \tag{1-4}$$

即质点在某一时间段内的**位移**等于质点在该时间段内位矢的增量。位移是矢量，描述质点位置的变化，只与质点始末位置有关，而与坐标原点的选取无关。

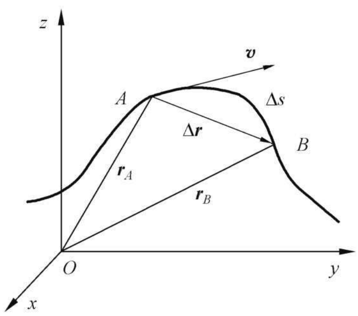

图 1-4 位移和速度

在直角坐标系中,位移表达式为

$$\Delta \boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}+\Delta z\boldsymbol{k} \tag{1-5}$$

位移的大小为

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

其方向由 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和 x、y、z 轴的夹角 α、β、γ 的余弦来表示

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

位移的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 为线段 AB 的长度,注意与位矢大小的增量 $|\Delta r|=|\boldsymbol{r}_B|-|\boldsymbol{r}_A|$ 进行区分,$|\Delta r|$ 为线段 OB 和 OA 的长度差。

质点在 Δt 时间内经过的路径长度 Δs 称为路程,一般情况下,$\Delta s\neq|\Delta \boldsymbol{r}|$。

四、速度

速度是描述质点位置变化快慢的物理量。如图 1-4 所示,在 Δt 时间内,质点的位移为 $\Delta \boldsymbol{r}$,则定义质点在 Δt 时间内的**平均速度** $\bar{\boldsymbol{v}}$ 为质点位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 与发生这一位移所经历的时间 Δt 之比,即

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

平均速度是矢量,反映了一段时间内质点位置矢量随时间的平均变化率。

若质点在 Δt 时间内,运动的路程为 Δs,类似的,定义质点在 Δt 时间内的**平均速率** $\bar{v}$ 为质点的路程 Δs 与经历这段路程所用时间 Δt 之比,即

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

一般情况下,$\bar{v}\neq|\bar{\boldsymbol{v}}|$。

为了反映质点在某个时刻的运动情况,取平均速度在 $\Delta t\to 0$ 的极限,该极限值就反映了质点在 t 时刻运动的快慢和方向,这一极限值称为质点在该时刻的**瞬时速度**,简称**速度**,以 $\boldsymbol{v}$ 表示,即

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

速度是矢量,等于位矢对时间的一阶导数,方向为运动轨道上该点的切线方向。

速度的大小称为**速率**,速率是标量,恒取正值,即

$$v=|\boldsymbol{v}|=\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right| \tag{1-7}$$

在国际单位制(SI)中,速度与速率的单位均是米·秒$^{-1}$(m·s^{-1})。

在直角坐标系中,速度的表达式为

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k} \tag{1-8}$$

式中,v_x、v_y、v_z 分别表示速度 $\boldsymbol{v}$ 在 x、y、z 轴的投影。速度的大小(速率)为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$$

速度的方向由 $\boldsymbol{v}$ 和 x、y、z 轴的夹角 α、β、γ 的余弦来表示

$$\cos\alpha=\frac{v_x}{v},\cos\beta=\frac{v_y}{v},\cos\gamma=\frac{v_z}{v}$$

五、加速度

加速度是描述质点速度变化快慢的物理量。如图 1-5 所示,t 时刻质点位于 A 点,速度为 $\boldsymbol{v}_A$,$t+\Delta t$ 时刻质点位于 B 点,速度为 $\boldsymbol{v}_B$,则 Δt 时间内质点速度的增量为 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$,定义质点在 Δt 时间内的**平均加速度** $\bar{\boldsymbol{a}}$ 为

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

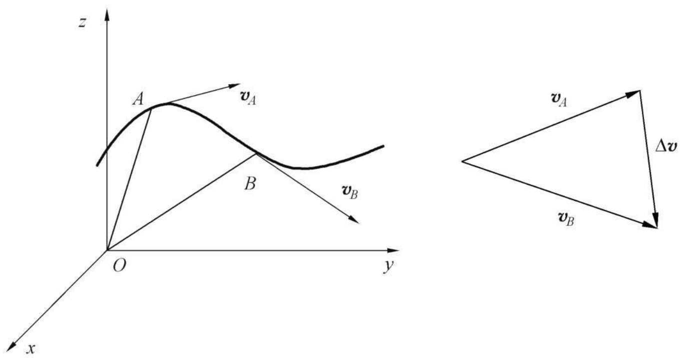

图 1-5　加速度

平均加速度为矢量,反映了质点在 Δt 时间内速度对时间的平均变化率。与瞬时速度的定义相似,为了反映质点在某个时刻速度的变化情况,定义质点的**瞬时加速度**(简称**加速度**)为 $\Delta t\to 0$ 时平均加速度的极限值,即

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-9}$$

加速度是矢量,等于速度对时间的一阶导数,或等于位矢对时间的二阶导数,方向为速度增量 d$\boldsymbol{v}$ 的方向,一般情况下,加速度的方向与速度方向不一致。在国际单位制(SI)中,加速

度的单位是米·秒$^{-2}$(m·s^{-2})。

在直角坐标系中,加速度的表达式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a} &= \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \\ &= \frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k} \\ &= a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-10}$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

其方向由 $\boldsymbol{a}$ 和 x、y、z 轴的夹角 α、β、γ 的余弦来表示

$$\cos\alpha = \frac{a_x}{a}, \cos\beta = \frac{a_y}{a}, \cos\gamma = \frac{a_z}{a}$$

例 1-1

一质点在 xy 平面上运动,运动学方程为 $x=2t$,$y=4t^2-8$(SI)。

(1) 求质点运动的轨道方程;

(2) 求 $t_1=1$ s 和 $t_2=2$ s 时,质点的位置、速度和加速度。

解 (1)在运动学方程中消去 t,可得轨道方程为

$$y = x^2 - 8$$

(2) 由

$$\boldsymbol{r} = 2t\boldsymbol{i} + (4t^2 - 8)\boldsymbol{j}$$

得

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = 2\boldsymbol{i} + 8t\boldsymbol{j}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = 8\boldsymbol{j}$$

可得,$t_1=1$ s 时,

$$\boldsymbol{r}_1 = 2\boldsymbol{i} - 4\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{v}_1 = 2\boldsymbol{i} + 8\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{a}_1 = 8\boldsymbol{j}$$

$t_2=2$ s 时,

$$\boldsymbol{r}_2 = 4\boldsymbol{i} + 8\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{v}_2 = 2\boldsymbol{i} + 16\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{a}_2 = 8\boldsymbol{j}$$

例 1-2

有一个小球在某液体中沿 y 方向由原点开始轴竖直下落,其初速度大小为 v_0,它的加速度为 $a=-kv$(SI),其中 k 为大于 0 的常数。

（1）求任意时刻小球的速度大小；

（2）小球的运动方程。

解　(1)由

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv$$

得

$$\frac{\mathrm{d}v}{v}=-k\,\mathrm{d}t$$

$$\int_{v_0}^{v}\frac{\mathrm{d}v}{v}=-\int_0^t k\,\mathrm{d}t$$

积分可得任意时刻小球的速度大小为

$$v=v_0\mathrm{e}^{-kt}$$

（2）由

$$v=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=v_0\mathrm{e}^{-kt}$$

得

$$\mathrm{d}y=v_0\mathrm{e}^{-kt}\mathrm{d}t$$

$$\int_0^y\mathrm{d}y=\int_0^t v_0\mathrm{e}^{-kt}\mathrm{d}t$$

解得小球的运动方程为

$$y=\frac{v_0}{k}(1-\mathrm{e}^{-kt})$$

例 1-3

一质点沿 x 轴正向运动过程中，其加速度为 $a=-2x$。试求该质点的速度 v 与位置坐标 x 之间的关系。假设当 $x=0$ 时，$v_0=4\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$。

解　依题意

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}=-2x$$

$$\int_0^x-2x\,\mathrm{d}x=\int_{v_0}^{v}v\,\mathrm{d}v$$

积分得

$$-x^2=\frac{1}{2}(v^2-v_0^2)$$

$$v=\sqrt{v_0^2-2x^2}=\sqrt{16-2x^2}$$

第三节　自然坐标系中质点运动的描述

一、自然坐标系中的速度

如图 1-6 所示，质点沿某曲线运动，t 时刻在 P 点处，自然坐标为 $s(t)$，速度为 $\boldsymbol{v}$，$t+\Delta t$ 时刻，在 Q 点处，自然坐标为 $s(t+\Delta t)$。$\boldsymbol{\tau}$ 和 $\boldsymbol{n}$ 分别表示 P 点切向正方向和法向正方向（指向轨道曲率中心）的单位矢量。质点运动时，自然坐标以及切线和法线方向都将发生变化。用自然坐标表示的质点的运动学方程为

$$s=s(t) \tag{1-11}$$

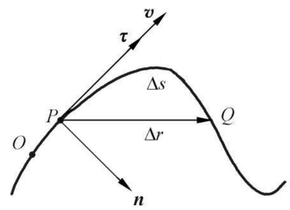

图 1-6　自然坐标系中的速度

由于质点速度的方向始终沿轨道的切线方向，因此速度只有切向分量，没有法向分量。根据速度定义 $\boldsymbol{v}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$，如图 1-6 所示，$\Delta t\to 0$ 时，$\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向趋于位移起点处的切线，其大小趋于对应的弧长 $|\Delta s|$，其中 $\Delta s=s(t+\Delta t)-s(t)$，$\Delta s$ 为代数量。因此当 $\Delta t\to 0$ 时，$\Delta \boldsymbol{r}\to \Delta s\boldsymbol{\tau}$，则

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

因此自然坐标系中质点的速度表示为

$$\boldsymbol{v}=v\boldsymbol{\tau}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau} \tag{1-12}$$

式中，$v=\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$ 为速度沿切线方向的投影。

二、自然坐标系中的加速度

根据式(1-12)，质点在曲线运动过程中，速度的大小和方向均会发生变化，因此质点运动的加速度可以表示为

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(v\boldsymbol{\tau})}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}+v\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\tau}}{\mathrm{d}t}$$

即加速度可以写为两项的矢量和。第一项 $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$ 的方向沿切线方向，因此称该项为**切向加速度**，其值为速度的值对时间的一阶导数，反映速度大小的变化情况。切向加速度用 $\boldsymbol{a}_{\tau}$ 表示，即