前　言

为了适应高等工科学校本科少学时（90学时左右）物理课程的急需，编者在多年教学实践的基础上，编写了本书。在编写过程中，编者本着“精选内容，注意更新，联系实际，利于教学”的原则，注意了以下问题：

1．在保证打好基础的前提下，对教材的内容进行精选，突出主干，删去若干枝节内容，使本书的篇幅有大幅度的精简，以适合少学时教学的需要。

2．在一些经典物理内容中，本书适当介绍了物理学发展中的一些新概念和新观点，这是为物理教材内容的更新、使基础课教材能跟上科技发展的时代步伐做的一点尝试。

3．为了使学生能更多地了解物理学的基本原理在工程技术中的应用，本书增加了一些结合生产与生活实际的内容。

4．对重点、难点内容的论述力求透彻，着重物理概念和物理图象的建立。对一些容易误解或混淆的问题，一般均予以强调或注释。

5．为了使学生理解、消化和掌握物理学的基本概念、原理和定律，本书紧密结合课程内容选编了一批例题和习题。每章习题由填空题、选择题和计算题这三种题型构成。

本书物理名词使用全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》（1988年），物理量的单位使用国家法定计量单位。

本书讲授学时数（基础物理学部分）为90学时（含习题课），主要作为高等工科学校本科少学时的物理课程的教材，也可作为高等工程专科学校、职工大学的物理教材或参考书。

参加本书编写工作的有（按姓氏笔划为序）：马同茂、王玉凤、王江英、刘桂珍、沈乃敏、沈芸、吴春山、林中忖、林铁生、洪小

达、荣军、张世良、张国忠、高树本、郭文仪、徐劳立、黄源中、谢铁曾、蒋大权、潘明芳。蒋大权、张世良、林中忖担任本书的主编。张国忠、吴春山参加了审稿后的修改、加工、统稿工作。

北京理工大学王殖东教授（主审）、北方交通大学林铁生副教授（副主审）审阅了全部书稿；清华大学崔砚生教授、北京科技大学高哲教授、北京联合大学自动化工程学院赵大明教授和徐友平副教授审阅了部分章节，他们对本书提出了许多宝贵意见和建议，编者在此表示衷心感谢。

在本书编写过程中得到编者所在学校：北方交通大学、北京计算机学院、北京市电子仪表工业职工大学、北京市总工会职工大学、北京联合大学（文理学院、化学工程学院、电子工程学院、机械工程学院、航天工程学院）的支持和帮助，特别是北京联合大学自动化工程学院有关领导自始至终给予了大力帮助和支持，在此一并表示感谢。

本书的全部插图是由王瑞乘、贺明、黄源中等同志绘制的。陈征、高兴茹两同志解答了本书的全部习题。阎恒久同志对本书的出版给予了大力支持并做了大量工作，在此我们也表示由衷的谢忱。

由于我们的水平有限，时间仓促，书中难免有疏漏和错误，恳请读者和同行批评指正。

编　　者

1991年1月于北京

目　　录

第一章　物理学的力学基础

自然界中一切物质都处于永恒的运动之中，物质的运动形式也是多种多样的，其中最简单而又最基本的运动是机械运动。所谓机械运动，是指一个物体相对另一个物体，或一个物体的某些部分相对于其它部分位置的变化。例如行星绕太阳的转动、宇宙飞船的飞行、机器的运转等都是机械运动，它们都遵从一定的客观规律，力学就是研究物体机械运动的规律及其应用的科学。

力学对现代工程技术具有重大的实用价值。设计房屋、桥梁，制造飞机、轮船，发射人造卫星、宇宙火箭，都要以力学原理为依据。此外，在较高级、复杂的运动形式中都含有机械运动。所以学习力学的基本原理对于研究物理学的其它部分以及自然科学的其它学科也有重要意义。

通常把力学分为三部分：运动学、动力学和静力学。运动学研究物体位置随时间的变化规律，但不涉及变化发生的原因；动力学研究物体的运动和物体间相互作用的联系，阐明物体运动状态发生变化的原因；静力学研究物体在相互作用下的平衡问题，它可以看作是动力学的一部分。

本章主要讨论质点运动学和质点动力学的基本概念和规律，刚体绕定轴转动，以及经典力学的适用范围。

1—1　质点运动的描述

一　参考系和坐标系　质点

由于机械运动是相对的，所以，要描写一个物体的运动，总得事

先选择另一其他物体作为参考标准，这样才能讨论被研究的对象相对于这个参考标准是怎样运动的，这个被选作参考标准的物体（或物体系）称为参考系。

在运动学中，参考系的选择可以是任意的，主要看问题的性质和研究的方便。例如，要研究物体在地面上的运动，最方便的是选地球为参考系；要研究地球绕太阳的公转运动，方便的是选太阳为参考系。

同一物体的运动，由于所选参考系的不同，对物体运动的描述也不相同。如坐在前进中的车厢里的乘客，以车厢为参考系，他是静止的；若以地球为参考系，他是运动的。因此，当我们研究物体运动时，必须指明这种运动是相对哪个参考系来说的，否则就无法确定物体的运动情况。

为了定量地描述物体位置的变化，还需要在参考系上选一个固定的坐标系。最常用的坐标系是直角坐标系。根据研究问题的方便，有时也选用极坐标或其它坐标系。坐标不同只是描述运动的参数不同，对物体运动的性质并无影响。

参考系和坐标系选定后，我们就有可能定量地描写物体的位置随时间的变化。但由于物体都有一定的大小和形状，物体运动时，其上各点的位置变化一般是不同的。因此，要精确描写一般物体的运动并不很容易，为使问题简化，我们采用下述抽象的方法：如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用，或所起的作用很小，这时，就可将物体的大小和形状忽略不计，而把它看作是一个具有一定质量而没有大小形状的物体，这样抽象后得出的物理模型，称为质点。

例如，在研究地球绕太阳公转时，由于地球的直径比地球到太阳的距离小很多，因此，地球上的各点相对于太阳的运动基本上可以看做是相同的。这时，就可以忽略地球的大小和形状，把它当作一个质点。但是，在研究地球自转时，就不能再把地球当作质点了。由此可知，一个物体是否可以抽象为一个质点，要根据问题的性质而定。

质点的运动是研究物体运动的基础。在进一步研究物体的运动

时，常把整个物体看作是由无数个质点组成，通过分析这些质点的运动，就可弄清整个物体的运动。

二　位置矢量和位移

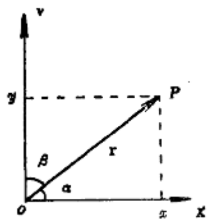


图　1—1

参考系和坐标系选定后，就可以定量地描述运动质点在某一时刻相对于坐标原点的位置。设在某一时刻，质点位于平面直角坐标系的P点，则它在P点的位置可用由坐标原点O引向P点的有向线段$\boldsymbol{r}$来表示如图1—1，这个矢量叫做位置矢量或矢径。矢径的端点就是质点的位置。质点运动时，矢径的大小和方向的变化，就反映了质点位置的变化。若矢径端点在二坐标轴上的坐标分别为x和y，则位置矢量可表示为

$$\boldsymbol{r}=x\,\boldsymbol{i}+y\,\boldsymbol{j} \qquad (1-1)$$

式中$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$分别为x、y轴正向的单位矢量。位置矢量的大小为

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

位置矢量的方向可由下式决定

$$\cos\alpha=\frac{x}{|\boldsymbol{r}|}，\text{或}\cos\beta=\frac{y}{|\boldsymbol{r}|}$$

式中α、β分别为$\boldsymbol{r}$与x轴、y轴的夹角。

一般把矢径$\boldsymbol{r}$随时间t的变化关系式$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$称为运动方程。若质点作平面运动，其运动方程的分量式可写成

$$x=x(t) \qquad y=y(t)$$

运动方程很重要，由它可得出质点运动的全部情况。

位移是描述运动质点在某段时间内位置变化的大小和方向的物理量。如质点从图1—2的A点运动到B点时，在坐标系中的矢径由$\boldsymbol{r}_A$变成$\boldsymbol{r}_B$，位置矢量的大小和方向都发生了变化，我们把从起始位置A引向终了位置B的有向线段$\Delta\boldsymbol{r}$，称为质点在这段时间内的位

移。由矢量加减法可知，

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \tag{1—2}$$

位移也可以用坐标值的差来表示。若质点在 XOY 平面上运动，它的位移可表示为

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{r} &= \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A = (x_B\,\boldsymbol{i} + y_B\,\boldsymbol{j}) - (x_A\,\boldsymbol{i} + y_A\,\boldsymbol{j}) \\ &= (x_B - x_A)\,\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\,\boldsymbol{j}\end{aligned} \tag{1—3}$$

应当注意，位移是描述质点位置变化的物理量，并非质点实际通过的路程。图 1 — 2 中的弧长 ΔS 是质点通过的实际路程，它只有大小而没有方向。在一般情况下，质点的位移和路程是不同的，如质点沿半径为 R的圆运动一周时，路程为 $2\pi R$，位移为零。只有当质点作方向不变的直线运动时，位移的大小才和路程相同。

位移和路程的单位都是m（米）。

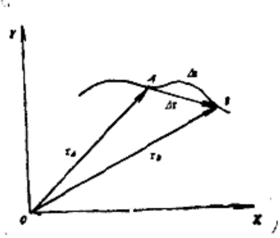


图　1—2

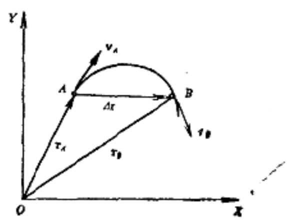


图　1—3

三　速度和加速度

1　平均速度与瞬时速度

在图 1 — 3 中，若质点在 t 时刻位于 A 点，在 $t+\Delta t$ 时刻运动到 B 点，即在 Δt 时间内质点的位移是 $\Delta \boldsymbol{r}$，我们就把质点的位移与发生这段位移所用时间之比定义为在这段时间内的平均速度，即

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1—4}$$

质点的平均速度是矢量。它的方向与位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向相同。平均

速度描述的是质点在某段时间内位置变化的平均快慢程度（包括方向）。因此，它的量值变化就与所取的时间间隔有关，即便是对同一运动质点，所取时间间隔不同，平均速度一般也不相同。因此，在计算平均速度时，必须指明是哪一段时间内的平均速度

若要精确反映在各个不同时刻质点位置变化的细节，还需引入瞬时速度的概念。我们仍以图1—3所示的质点运动为例，若 B 点比较接近于 A 点，则位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 较小，相应的从 A 点运动到 B 点所需要的时间 Δt 也较短，这样，它的平均速度就比较接近于质点通过 A 点时的实际速度，当时间 Δt 取得越来越短而趋近于零时，B 点趋近于 A 点，这时平均速度 $\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 趋近于某一极限，这个极限，就是质点通过 A 点时的瞬时速度，简称速度，用字母 $\boldsymbol{v}$ 表示有

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \qquad (1-5)$$

即瞬时速度是矢径对时间的一阶导数。

速度是矢量。它的方向是当 Δt 趋近于零时位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向。由图1—3可知，当 Δt 趋近于零时，B 点沿曲线接近于 A 点，割线 AB 的方向最后趋近于 A 点的切线方向。故 A 点的速度方向，就是沿着质点的运动轨迹在该点的切向并指向质点运动的一方。

在平面直角坐标系中，速度矢量也可表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v}&=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}=\frac{d}{dt}(x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j})\\&=\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dy}{dt}\boldsymbol{j}\\&=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}\end{aligned} \qquad (1-6)$$

其中 $v_x=\frac{dx}{dt}$，$v_y=\frac{dy}{dt}$。

它们分别表示速度 $\boldsymbol{v}$ 在 x、y 方向上的两个分量。

在描述质点运动时，也常用到速率这个物理量。如图1—2所示，在 Δt 时间内，质点行经的路程为曲线 AB。设曲线 AB 的长度为 ΔS，我们把路程 ΔS 与通过这段路程所用时间 Δt 之比称为在 Δt 时间内的平均速率，即

$$\overline{v}=\frac{\Delta S}{\Delta t}$$

平均速率为标量，它在数值上等于质点在单位时间内所通过的路程。因平均速率不反映运动的方向，所以不能把平均速率与平均速度等同起来。例如，在某一段时间内，质点环行了一个闭合路径，显然质点的位移为零，平均速度也为零。但质点的平均速率（路径长度除以时间）并不为零。

尽管如此，在 Δt 趋近于零的极限情况下，曲线 AB 的长度 ΔS 与直线 AB 的长度 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 是近似相等的，我们把当 Δt 趋近于零时平均速率的极限值，称为瞬时速率，用字母 v 表示有

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta S}{\Delta t}=\frac{dS}{dt} \qquad (1-7)$$

由图1—2可知，当 Δt 趋近于零时，$\Delta \boldsymbol{r}$ 的量值 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 趋近于 ΔS，所以有

$$v=\frac{dS}{dt}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}=|\boldsymbol{v}|$$

即瞬时速率只是质点在该时刻瞬时速度的大小而不考虑方向。

速度与速率在量值上都是长度与时间之比，它们的单位都是 $m\cdot s^{-1}$（米·秒$^{-1}$）。

2　平均加速度和瞬时加速度

加速度是描述质点速度变化的物理量，它既描述了速度大小的变化，同时也反映了方向的改变。如图1—4所示，设在某一时刻 t 质点经过 A 点，速度为 $\boldsymbol{v}_A$，经 Δt 时间后，质点经过 B 点，速度为 $\boldsymbol{v}_B$。在 Δt 时间内速度增量为

$$\Delta \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A \qquad (1-8)$$

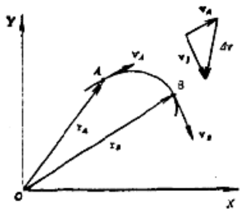


图 1—4

则 Δt 时间内的平均加速度为

$$\overline{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad (1-9)$$

平均加速度是矢量，平均加速度反映的是在某段时间内速度大小、方向的平均变化。它的方向是速度增量 Δv 的方向。它的量值也和时间间隔 Δt 有关。

当 Δt 趋近于零时，平均加速度的极限就是质点在 A 点处的瞬时加速度，也是质点在 t 时刻的瞬时加速度，简称加速度。其表示式为

$$a=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2r}{dt^2} \qquad (1-10)$$

即加速度等于速度对时间的一阶导数，或矢径对时间的二阶导数。在平面直角坐标系中

$$a=\frac{dv_x}{dt}i+\frac{dv_y}{dt}j=\frac{d^2x}{dt^2}i+\frac{d^2y}{dt^2}j$$

$$=a_x i+a_y j \qquad (1-11)$$

其中 $a_x=\frac{dv_x}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}$ 和 $a_y=\frac{dv_y}{dt}=\frac{d^2y}{dt^2}$ 分别是加速度 a 在平面直角坐标系中的两个分量表示式。

加速度的方向就是当 Δt 趋近于零时，速度增量 Δv 的极限方向。值得注意的是，Δv 的方向和 Δv 的极限方向一般不同于速度 v 的方向，因而在一般情况下，加速度的方向与同一时刻速度的方向并不一致。例如，质点作直线运动时，如果速率增加（$|v_2|>|v_1|$），a 与 v_1 同向；反之若速度减小（$|v_2|<|v_1|$），则 a 与 v_1 反向。可见，在直线运动中，加速度和速度在同一直线上，可以有同向和反向两种情况。若质点作曲线运动，加速度 a 的方向与速度 v 的方向不在同一直线上。加速度总是指向曲线凹的一边。

加速度的单位是 $m\cdot s^{-2}$（米/秒^2）。

例1—1 已知质点的运动方程为 $x=3+8t-2t^2$，求：（1）质点的速度、加速度；（2）质点在 x 轴正方向运动的最远距离；（3）质点在 $t_1=1.0s$ 到 $t_2=3.0s$ 时间内的平均速度、位移和路程。

解 （1）由式（1—6）和式（1—11）可知

$$v=\frac{dx}{dt}=(8-4t)\mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

$$a=\frac{dv}{dt}=-4\mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

（2）质点沿 x 轴正方向作匀减速运动，所以，它运动最远的条件为 $v=0$，由此可求出运动最远距离所需的时间，即

$$8-4t=0,\ 由此得\ t=2s$$

所以质点在 x 轴正方向运动的最远距离

$$x_{max}=3+8t-2t^2=3+8\times2-2\times2^2=11\mathrm{m}$$

（3）因 $x(t)=3+8t-2t^2$，所以当 $t_1=1.0s$ 时，$x_1(1.0)=3+8-2=9\mathrm{m}$，当 $t_2=3.0s$ 时，$x_2(3.0)=3+8\times3-2\times3^2=9\mathrm{m}$，在这段时间内的位移为

$$\Delta x=x_2-x_1=9-9=0$$

平均速度为

$$\overline{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{\Delta t}=\frac{x_2(3.0)-x_1(1.0)}{3.0-1.0}=0$$

由（2）可知，2.0 s 后质点速度改变方向，此后质点开始沿 x 轴负方向运动，故在1.0～3.0 s 时间内，位移 Δx 与路程 ΔS 不等，路程

$$\begin{aligned}\Delta S&=\Delta S_1+\Delta S_2\\&=|x(2.0)-x(1.0)|+|x(3.0)-x(2.0)|\\&=|11-9|+|9-11|=4\mathrm{m}\end{aligned}$$

请读者考虑：在 $t_1=1.0s$ 到 $t_2=3.0s$ 这段时间内，质点的平均速率是多少？

例1—2 已知质点的运动方程为

$\boldsymbol{r}(t)=[5\cos(4t)\ \boldsymbol{i}+5\sin(4t)\ \boldsymbol{j}]$(SI制)，求(1)质点的速度$\boldsymbol{v}$和速率$v$；(2)质点的加速度$\boldsymbol{a}$和加速度的大小$a$。

解 由运动方程可知，该质点作二维平面运动。由式(1—6)得质点的速度为

$$\boldsymbol{v}=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}=-20\sin(4t)\ \boldsymbol{i}+20\cos(4t)\ \boldsymbol{j}$$

速率为

$$\begin{aligned} v&=\sqrt{v_x^2+v_y^2}\\ &=\sqrt{[-20\sin(4t)]^2+[20\cos(4t)]^2}=20\mathrm{m\cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

由式(1—10)得质点的加速度为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a}&=\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=-80\cos(4t)\ \boldsymbol{i}-80\sin(4t)\ \boldsymbol{j}\\ &=-16[5\cos(4t)\boldsymbol{i}+5\sin(4t)\ \boldsymbol{j}]=-16\boldsymbol{r} \end{aligned}$$

加速度的大小为

$$\begin{aligned} a&=\sqrt{a_x^2+a_y^2}\\ &=\sqrt{(-80\cos(4t)]^2+[-80\sin(4t)]^2}=80\mathrm{m\cdot s^{-2}} \end{aligned}$$

1—2 圆周运动

圆周运动是一种常见的曲线运动，如机器上的飞轮转动时，轮上各点(转轴中心除外)都在作半径不同的圆周运动。掌握了圆周运动的规律，再去讨论一般的曲线运动就方便得多了。同时，圆周运动也是研究刚体绕定轴转动的基础。

一 匀速率圆周运动

质点作圆周运动时，如果在任意相等的时间内通过的弧长都相等，即在每一时刻质点的速率都相等，这种运动称为匀速率圆周运动，简称为匀速圆周运动。然而质点作这种运动时，虽然速度的大小

不变，但速度的方向时刻都在变化，所以匀速圆周运动是一种变速运动。

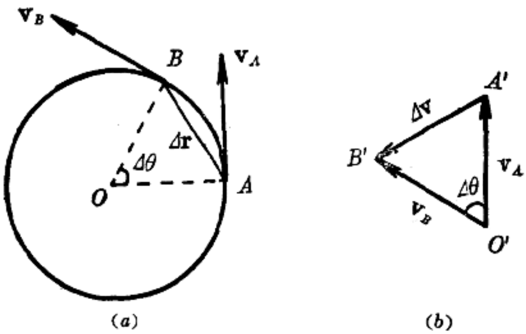


图 1—5

设一质点沿半径为 R 的圆周作匀速圆周运动，见图 1—5 (a)，它在 A、B 两点时的速度分别为$\boldsymbol{v}_A$和$\boldsymbol{v}_B$（注意，这时 $|\boldsymbol{v}_A|=|\boldsymbol{v}_B|=v$ 并且分别与半径 OA 和 OB 垂直），从 A 点到 B 点经过的时间为 Δt，所以速度的增量为 $\Delta \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$。按加速度的定义，质点过 A 点时的加速度为

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A}{\Delta t}$$

这个加速度的大小和方向可用下述几何关系求得。将$\boldsymbol{v}_A$和$\boldsymbol{v}_B$平移至 O' 点，如图1—5(b)。容易看出，三角形 OAB 和速度三角形$O'A'B'$是两个相似的等腰三角形，它们的对应边成比例，即

$$\frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{v}=\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{R}$$

两边各除以 Δt 有

$$\frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t}=\frac{v}{R}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$$

当 Δt 趋近于零时，B 点趋近于 A 点，弦长$|\Delta \boldsymbol{r}|$趋近于弧长 ΔS，

于是加速度的大小为

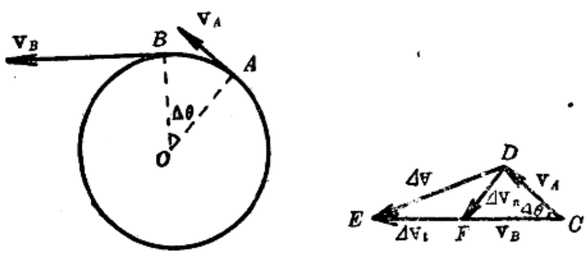
$$|\boldsymbol{a}| = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{v}{R}\cdot\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \to 0}\frac{v}{R}\cdot\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{v}{R}\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{v^2}{R} \qquad (1-12)$$

可由速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向确定加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向。从图 1 — 5 中可以看出，当 Δt 趋近于零时，$\Delta\theta$ 趋近于零，B 点也趋近于 A 点，$\Delta \boldsymbol{v}$的极限方向垂直于 $\boldsymbol{v}_A$。即 A 点的加速度方向垂直于 $\boldsymbol{v}_A$ 且沿半径指向圆心。故称向心加速度，也称法向加速度，常用 $\boldsymbol{a}_n$ 表示。

二　变速圆周运动

如果质点作圆周运动时，速度的大小也随时间不断改变，这种运动称变速圆周运动。如图 1 — 6 所示，质点沿圆周从 A 点运动到 B 点，经过的时间为 Δt，速度从 $\boldsymbol{v}_A$变为$\boldsymbol{v}_B$，它们不但方向不同，而且大小也不相等。现在，我们来计算变速圆周运动的加速度。



（a）　　（b）

图　1—6

将 $\boldsymbol{v}_A$和$\boldsymbol{v}_B$ 平移至 C 点如图1—6(b)，若以 C 为圆心，以$\boldsymbol{v}_A$为半径作圆弧交$\boldsymbol{v}_B$ 于 F 点，就可将速度增量 $\Delta\boldsymbol{v}$分解成 $\Delta \boldsymbol{v}_n$ 和$\Delta \boldsymbol{v}_t$两部分。由矢量三角形可知

$$\Delta \boldsymbol{v} = \Delta \boldsymbol{v}_n + \Delta \boldsymbol{v}_t$$