高等学校函授教材(兼作高等教育自学用书)

物理学面授提纲与自学指导

严导淦 刘云龙 主编

同济大学出版社

高等学校函授教材

（兼作高等教育自学用书）

物理学面授提纲与自学指导

严导淦　刘云龙　主编

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是配合严导淦编的《物理学》函授教材(高等教育出版社，1982年出版)的一本面授提纲和自学指导教学用书。可作为高等工业学校函授各专业的面授教材，兼供同类专业高等教育自学考试及其他各类成人高等院校(职工大学、电视大学等)在教学上选用或参考。书中每章包括教学要求、自学指导、面授提纲、面授示例和自我检查练习题等五个部分；书末编入"常用物理公式和基本要点汇总"，供读者复习小结参考，并撰编了一套新的"物理学测验作业题"，以便于教学上更换作业内容。本书叙述简明易懂，重点突出，便于教学和自学。

责任编辑　冯时庆
封面设计　王肖生

物理学面授提纲与自学指导
严导淦　刘云龙　主编
同济大学出版社出版
(上海四平路1239号)
新华书店上海发行所发行
晨光印刷厂印刷

开本：850×1168　1/32　印张：14.25　字数：410千字
1989年6月第1版　1989年6月第1次印刷
印数：1—11700　定价：5.50元
ISBN 7-5608-0315-6/O·37

前　言

本书是配合严导淦所编《物理学》函授(自学)教材的一本面授提纲和自学指导用书。它是修读物理学课程的函授生在自学过程中所必备的；也是担任本课程函授教学的教师进行平时面授和集中复习、考试时的主要教学参考书。

本书是在同济大学函授学院编印的《函授物理学面授提纲》的基础上，参照王少杰、刘云龙主编的《大学物理学习指导》讲义，针对当前函授教学特点和函授生的自学规律，重行编写而成的。

全书各章均由五个部分组成，各部分的编写意图简介如下：

一、教学要求　紧扣教学大纲和基本要求，提纲挈领地指出本章的重点内容和一般性内容以及相应的教学要求，使函授生学习教材时主次分明，目标明确。

二、自学指导　这部分内容旨在对每章内容从总体上作一次鸟瞰式的扫描，并指引读者理顺全章内容的脉络，提出学习该章内容所应注意之处。使读者在自学每章内容时，能做到全局在胸，线索清晰。

三、面授提纲　系供任课教师在平时面授或集中面授时讲授之用。对无法进行面授或因故不能参加面授的函授生可自学这部分内容，以弥补不能参加面授的缺陷。

四、面授示例　每章列举了大量具有一定难度或综合性的典型例题，着重指导函授生的解题思路和分析方法；并指出函授生在解题中常见的普遍性错误。这些例题可供教师在课堂面授时选讲或读者在复习时自学。

五、自我检查练习题　旨在通过读者自行解答这类小型题目，帮助读者复习、消化全章的教学内容。

以上五个部分是统一的整体，互不重复，相得益彰。

本书最后还整理出教材中主要内容的公式和要点，列有"常用物理公式和基本要点汇总"部分①，供读者平时或考试前的复习、自我检查和小结之用。此外，还撰编了一套新的"物理学测验作业题"，以便于教学上更新作业内容和轮换选用。

在本书的上述各部分中凡打有*号的内容，均为机动内容，供学有余力的读者参考。

本书由严导淦、刘云龙主编。参加编写的有金正明（第一章～第四章），刘云龙（第五章～第六章、第十二章～第十七章），王少杰（第七章～第八章、第十八章～第二十章），张莹（第九章～第十一章、）严导淦（"常用物理公式和基本要点汇总"和"物理学测验作业题"两部分）；刘云龙和严导淦先后对全书初稿进行统稿，严导淦负责全书的审订、定稿。

在本书的编写、印刷和出版过程中，得到了高等教育出版社、全国普通高校和成人高等院校物理教育界同行的关注，得到了同济大学函授和继续教育学院、物理系以及函授物理教研室同仁的协助，在此一并表示深切谢意。

编者

1988年12月12日于同济大学

①这部分内容系参照严导淦提供的素材，由史久桥、王金焕整编的《物理学习题和思考题选解》（大连海运学院函授部印）一书的有关内容稍作增删改编而成的。

目 录

第一章 质点运动学

（面授 3 学时）

一、教学要求

1．掌握描述物体运动的物理量——位置矢量、位移、速度和加速度的概念以及这些物理量之间的联系。

2．掌握从已知的运动方程求运动质点在任一时刻的位置、速度和加速度；以及从已知加速度或速度，求运动方程的方法。

3．掌握匀变速直线运动和匀速率圆周运动的规律。

二、自学指导

在物质的各种运动形式中，最简单而又最基本的运动形式是机械运动。本章讨论如何描述物体（视作质点）的机械运动——质点的空间位置随时间的改变，而不涉及到物体间的相互作用，这部分内容称为质点运动学。本章内容分为三部分：首先认识运动的相对性和建立物体的理想模型——质点。然后介绍描述质点运动的物理量——位置矢量、位移、速度和加速度等概念，特别要注意，其中位置矢量和速度是用来描述质点运动状态的，加速度是描述质点运动状态改变的物理量。最后运用上述基本概念重点讨论直线运动和圆周运动。

在自学本章教材内容时，始终要注意运动的相对性、瞬时性和矢量性。并应具备有关的矢量运算和微积分知识。必要时，可先阅读一下教材第 0 篇 §0-3～ §0-6 各节的内容。

三、面授提纲

1．机械运动的描述方法

物质的运动是绝对的，但描述物体的机械运动则是相对的，即总要选定一个或几个假设为“不动的”物体作为标准，称为参照系；参照系的选择是任意的。参照系一经选定：就可描述物体的运动。然而要对运动物体作定量描述，还必须在参照系上选定坐标系，用坐标确定质点的位置及其运动。

在所研究的问题中，如果与物体运动的空间范围相比，物体的大小和形状可以忽略不计，那么，就可认为物体是一个具有质量的点，称为质点。质点是一种理想的模型。质点突出“质”(量)和“点”(位置)；突出平动，忽略转动。

2．描述质点运动的基本物理量

(1) 位置矢量(矢径)

为了确切描述质点的位置，例如质点 P 的位置，可用坐标 $(x、y、z)$ 来确定(见图1-1)，亦可以用由坐标原点 O 指向 P 点的矢量 $\vec{r}$ 表示，它唯一地代表了质点的位置，此矢量称质点的位置矢量(或矢径)。位置矢量 $\vec{r}$ 与坐标的表示法是等效的，两者存在着如下关系，即

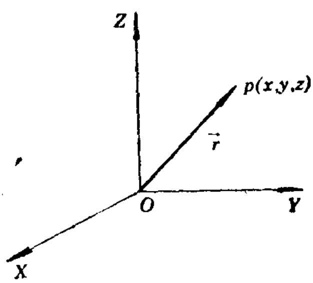


图 1-1

$$\vec{r}=x\vec{i}+y\vec{j}+z\vec{k} \quad (1-1)$$

如果知道质点在任何时刻的位置，就能够描述质点的运动全过程。若用矢量表示，就必须知道矢径 $\vec{r}$ 与时间 t 的函数关系，即

$$\vec{r}=\vec{r}(t) \quad (1-2)$$

上式称为质点的运动方程，它也可以用相应的分量式来表示：

$$x=x(t),\ y=y(t),\ z=z(t) \quad (1-3)$$

(2) 位移

研究质点的运动，不仅要知道它在不同时刻的位置，而且要知道它的位置变化。如果质点从时刻 t_1 的位置 $\vec{r}_1$ 变动到时刻

t_2 的位置 $\vec{r}_2$，则用位置矢量的增量 $\Delta\vec{r}$ 可以表示出质点在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 这段时间内的位置变化，即

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \tag{1-4}$$

$\Delta\vec{r}$ 称为位移。图 1-2(a)表示质点从位置矢量为 $\vec{r}_1$ 的 A 点沿着 $\vec{r}_1$ 的方向前进，在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的时间内改变了位置 $\Delta\vec{r}$，到达了位置矢量为 $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \Delta\vec{r}$ 的 B 点。图1-2(b)表示在时间 Δt 内质

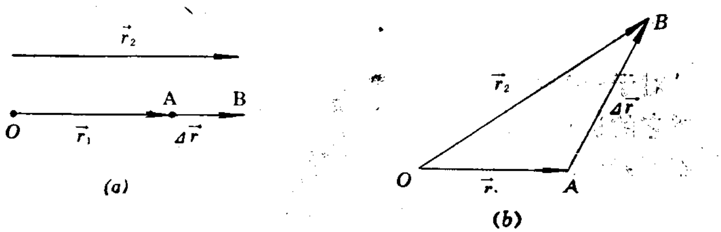


图 1-2

点位置从 A 点变动到 B 点，相应的位置矢量从 $\vec{r}_1$ 改变到 $\vec{r}_2$，而 $\vec{r}_1$ 和 $\vec{r}_2$ 不在同一方向，则可从位置 $\vec{r}_1$ 出发，作一矢量 $\Delta\vec{r}$，$\Delta\vec{r}$ 的端点就确定了新的位置 $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \Delta\vec{r}$。

位移反映了质点位置的改变，但是它并不一定反映质点经历的实际路径。如图 1-3 所示，质点从 A 点移到 B 点，相应的位置矢量从 $\vec{r}_1$ 变为 $\vec{r}_2$，不管它是沿曲线 1、2 运动还是沿曲线 3 运动，它们的位移 $\Delta\vec{r}$ 都是一样的，而质点实际经历的路径长度、即路程是不同的。显然，位移 $\Delta\vec{r}$ 与路程是两个不同的概念。还须指出：①位移是矢量，而路程是标量；②如果时间 Δt 趋近于零，则两点位置愈来愈接近，此时，位移的大小 $|d\vec{r}|$ 与质点经过的相应路程 ds 相等，位移的方向将趋向在 t_1 时刻质点所在处的轨道切线方向，如图 1-4 所示。

(3) 速度

物体运动的快慢，称为速率。速率就是物体所经过路程长度对时间的变化率，即

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \tag{1-5}$$

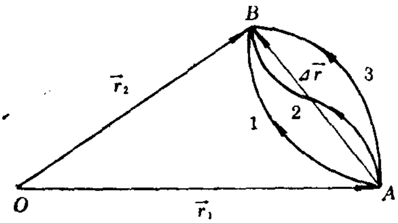


图 1-3

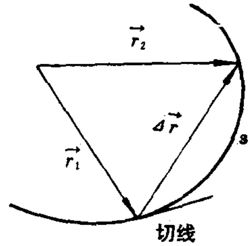


图 1-4

对于一个运动的物体，不仅要知道它运动的快慢，而且还要知道它的运动方向，所以仅用速率描述它的运动是不够的，还需要全面考察它的位置变化率。

质点位置的变化率，可用它在单位时间内的位移表示。如图1-5所示，假如质点从某一时刻t开始，在时间间隔Δt内（即从时刻t到$t+\Delta t$）位置改变了$\Delta\vec{r}$，即位移为$\Delta\vec{r}$。那么，平均地说，$\dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$就反映了在$\Delta t$这段时间内位置的变化率，将它定义为$\Delta t$这段时间内的平均速度，即

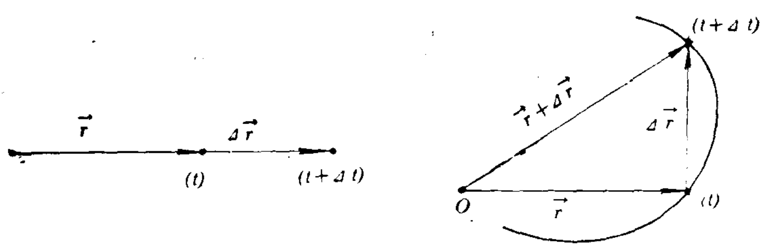


图 1-5

$$\overline{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \tag{1-6}$$

$\overline{\vec{v}}$与Δt的大小有关，它描述了在Δt时间内位置的平均变化率。然而，我们研究物体的运动时，通常需要知道物体在某一时刻的运动情况，这可借助极限的概念，令$\Delta t\to 0$，取平均速度$\overline{\vec{v}}=$

$\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$在$\Delta t \to 0$时的极限，这个极限称为时刻$t$的瞬时速度$\vec{v}$（简称速度）即

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{\bar{v}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

用它来描述质点在t时刻的运动状态。因此，瞬时速度就是$\vec{r}$对时间t的导数（这是一个矢量导数），即

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \tag{1-7}$$

位移$\Delta \vec{r}$是矢量，是有方向的量，它不仅表示运动质点位置变化的大小，还包含方向变化的意义。速度$\vec{v}$也是矢量，它不仅表示质点运动的快慢，还表示质点运动的方向。$\vec{v}$的方向指向质点运动轨道的切线方向。由于$\vec{v}$是具有大小和方向的矢量，所以在具体研究问题时，常常需要写出它们的分量式。对于给定的直角坐标系OXYZ中，有

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

式中$\vec{i}$、$\vec{j}$、$\vec{k}$分别为沿X、Y、Z轴的单位矢量，其大小均为一个单位，在对时间求导时，可以把它们看作常矢量，故

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

$$= v_x\vec{i} + v_y\vec{z} + v_z\vec{k} \tag{1-8}$$

速度矢量的大小$v = |\vec{v}|$反映质点运动的快慢，就是通常所说的速率，不涉及运动方向，即$v = |\vec{v}| = \left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right|$，而前面讲过，质点在$dt$时间内，$|d\vec{r}|$与对应的路程线元$ds$相等，因此，

$$v = |\vec{v}| = \frac{ds}{dt}$$

若已知速度矢量的分量，就可得出速度$\vec{v}$的大小（速率）为

$$v=\sqrt{v^2_x+v^2_y+v^2_z} \qquad (1\text{-}9)$$

（4）加速度

质点在运动中，一般不仅位置发生改变，而且它的速度也是随时间而改变的，速度对时间的变化率，就是加速度。设质点（如图 1-6 所示）在t_1时刻的速度为$\vec{v}_1$，在时刻 $t_2(=t_1+\Delta t)$ 的速度为$\vec{v}_2$，则速度在 Δt 内的平均变化率为

$$\vec{\bar{a}}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \qquad (1\text{-}10)$$

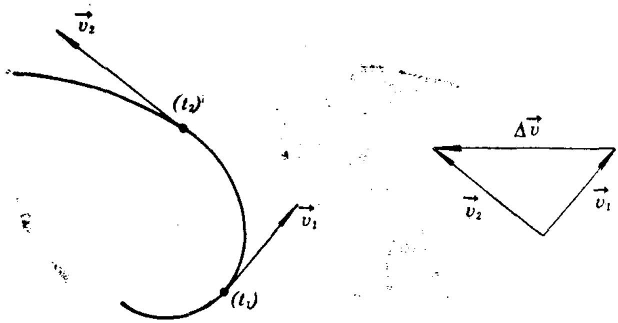


图 1-6

式中，$\Delta\vec{v}=\vec{v}_2-\vec{v}_1$ 即为时间间隔 Δt 内的速度增量。上式表示质点在这段时间内的平均加速度。它只能反映在这段时间内速度的平均变化情况。为了精确地反映某一时刻的速度变化的情况，也与定义瞬时速度相仿，取平均加速度在$\Delta t\to 0$ 时的极限，它等于速度对时间的导数，即为瞬时加速度（简称加速度），可表示为

$$\vec{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}=\frac{d\vec{v}}{dt}$$

由于速度是矢径$\vec{r}$对时间t的导数，故加速度为矢径对时间 t 的二阶导数

$$\vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \qquad (1\text{-}11)$$

在给定的直角坐标系 $OXYZ$ 中，它的分量为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2},\quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2},$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \tag{1-12}$$

于是，有

$$\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k}$$

应当指出，在一般情况下，加速度 $\vec{a}$ 的方向总是与速度变化率 $\frac{d\vec{v}}{dt}$ 的方向一致的，而与速度 $\vec{v}$ 的方向不一定一致，即使在直线运动中，加速度 $\vec{a}$ 的方向与速度 $\vec{v}$ 的方向也不一定一致。

以上讲了描述质点运动的几个基本物理量，若已知质点运动方程 $\vec{r} = \vec{r}(t)$，即可求出任意时间间隔内的位移和任意时刻的速度和加速度；从而，可以了解质点的全部运动情况。因此，运动学方程是运动学的核心。反之，也可以由已知加速度和初始条件求速度和质点的运动方程。

3. 直线运动

特点：位移、速度、加速度矢量全在同一直线上，因此，这些矢量都可用标量来处理，以量值定大小，以正、负定方向。

设质点沿 X 轴作直线运动，如图 1-7 所示。则有

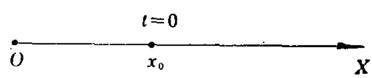


图 1-7

(1) 直线运动的一般公式

运动方程 $\quad x = x(t) \qquad$ (1-13)

速度 $\quad v = \frac{dx}{dt} \qquad$ (1-14)

加速度 $\quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \qquad$ (1-15)

(2) 匀变速直线运动的基本方程

运动方程 $$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \tag{1-16}$$

式中，x_0 为 $t=0$ 时刻运动质点离坐标原点的位置，v_0 为 $t=0$ 时刻运动质点的初速度。

速度公式 $$v = v_0 + at \tag{1-17}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \tag{1-18}$$

4．平面曲线运动

运动方程 $\vec{r} = \vec{r}(t)$

在 XOY 坐标系中，也可表示为

$$\vec{r} = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} \tag{1-19}$$

由此可得速度

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} \tag{1-20}$$

及加速度

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y}{dt}\vec{j} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} \tag{1-21}$$

通常，采用自然坐标系，如图 1-8 所示，这时，$\vec{a}$ 可表述为切向加速度 $\vec{a}_t$ 和法向加速度 $\vec{a}_n$ 的矢量和，即

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_t \tag{1-22}$$

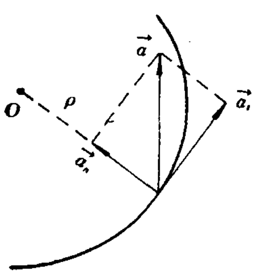


图 1-8

其中，法向加速度 $\vec{a}_n$ 的大小为

$$a_n = \frac{v^2}{\rho} \tag{1-23}$$

方向在曲线凹侧指向该点的曲率中心。它是由速度 $\vec{v}$ 的方向变化所引起的。切向加速度 $\vec{a}_t$ 的大小为

$$a_t = \frac{dv}{dt} \tag{1-24}$$

方向沿曲线上运动质点所在处的切线，若 $\frac{dv}{dt} > 0$，则 $\vec{a}_t$ 与 $\vec{v}$ 同

向；反之，$\frac{dv}{dt}<0$，则 $\vec{a}_t$ 与 $\vec{v}$ 反向。它是由速度 $\vec{v}$ 的大小变化而引起的。

（1）圆周运动

（i）质点作匀速率圆周运动——只存在法向加速度 $\vec{a}_n$（切向加速度 $\vec{a}_t=0$）。$\vec{a}_n$ 的大小为

$$a_n=\frac{v^2}{R} \tag{1-25}$$

方向沿半径指向圆心。它是由速度 $\vec{v}$ 的方向变化所引起的。

（ii）质点作变速圆周运动——同时存在 $\vec{a}_n$ 和 $\vec{a}_t$。

$\vec{a}_n$ 的大小为 $a_n=\frac{v^2}{R}$；方向沿半径指向圆心；这是由速度 $\vec{v}$ 的方向改变所引起的。

$\vec{a}_t$ 的大小为 $a_t=\left|\frac{dv}{dt}\right|$；方向指向圆周上切线方向，若 $\frac{dv}{dt}>0$，则 $\vec{a}_t$ 与 $\vec{v}$ 同向；反之，$\vec{a}_t$ 与 $\vec{v}$ 反向；这是由速度 $\vec{v}$ 的大小改变所引起的。

质点在任一时刻的总加速度 $\vec{a}$ 为

$$\vec{a}=\vec{a}_n+\vec{a}_t$$

$\vec{a}$ 的大小为

$$a=\sqrt{a^2{}_n+a^2{}_t} \tag{1-26}$$

$\vec{a}$ 的方向：指向圆弧的凹侧，可用 $\vec{a}$ 与 $\vec{v}$ 的夹角 θ 表示，即

$$\theta=\operatorname{arctg}\frac{a_n}{a_t} \tag{1-27}$$

（2）圆周运动的角量描述（下述各个角量都是相对于圆周轨道的圆心而言的）

角位置——运动方程　　$\theta=\theta(t)$　　(1-28)

角速度　　$\omega=\frac{d\theta}{dt}$　　(1-29)

角加速度 $$\beta=\frac{d\omega}{dt}=\frac{d^2\theta}{dt^2} \tag{1-30}$$

匀变速圆周运动的基本方程为

$$\theta=\theta_0+\omega t+\frac{1}{2}\beta t^2 \tag{1-31}$$

$$\omega=\omega_0+\beta t \tag{1-32}$$

$$\omega^2={\omega^2}_0+2\beta(\theta-\theta_0) \tag{1-33}$$

角量与线量有下列关系

$$v=R\omega \tag{1-34}$$

$$a_t=\frac{dv}{dt}=R\beta \tag{1-35}$$

$$a_n=\frac{v^2}{R}=R\omega^2 \tag{1-36}$$

四、面授示例

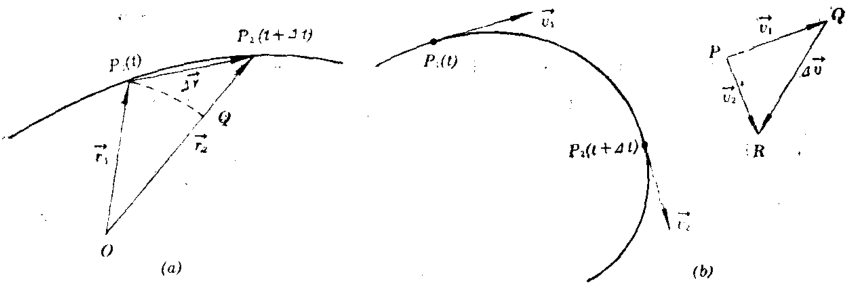
例一 在曲线运动中，$|\Delta\vec{r}|$与$|\Delta r|$和$|\vec{v}|$与$|\Delta v|$是否分别相同？

解 在运用速度与加速度的定义式$\vec{v}=\frac{d\vec{r}}{dt}$和$\vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}$进行计算时，往往容易发生下述的错误，即把速度的大小$v=\left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right|$认为就是$v=\left|\frac{dr}{dt}\right|$，把加速度的大小$a=\left|\frac{d\vec{v}}{dt}\right|$认为就是$a=\left|\frac{dv}{dt}\right|$。产生这种错误，关键是不善于区分$|\Delta\vec{r}|$和$|\Delta r|$、$|\Delta\vec{v}|$和$|\Delta v|$。

我们知道，$\Delta\vec{r}$是表示质点在t到$t+\Delta t$时间内的位移，而$|\Delta\vec{r}|$表示在该段时间Δt内位移的大小，即$|\Delta\vec{r}|=|\vec{r}_2-\vec{r}_1|$，它是两个矢量（位置矢量）之差的大小，可用图（$a$）的线段$P_1P_2$表示。

而$|\Delta r|$表示从 t 到 $t+\Delta t$ 时间内位置矢量的大小的增量，即$|\Delta r|=|r_2-r_1|$，就是两位置矢量的大小之差的绝对值，如图(a)的线段 QP_2 所示。

由图(a)可见，一般来说，$|\overrightarrow{\Delta r}|\neq|\Delta r|$。例如，质点作圆周运动时，以圆心为坐标原点，则质点的位置矢量就是沿圆的半径，在任意的 t 到 $t+\Delta t$ 时间内，它的 Δr 始终为零，而它的位移的大小$|\overrightarrow{\Delta r}|$，就是从初位置到末位置的弦长，一般并不为零(从初位置开始运动，再回到初位置的情况除外)。



例一图

同理，$\Delta\vec{v}$ 表示在 t 到 $t+\Delta t$ 时间内速度的增量，$|\Delta\vec{v}|$ 表示该段时间Δt内这增量的大小，即$|\Delta\vec{v}|=|\vec{v}_2-\vec{v}_1|$，它是两个速度矢量之差的大小，如图(b)中的线段 QR 所示。

而 Δv 表示在该段时间 Δt 内速度大小的增量，所以$|\Delta v|=|v_2-v_1|$，就是两个速度矢量的大小之差的绝对值。

由图(b)可见，一般来说，$|\Delta\vec{v}|\neq|\Delta v|$。例如，当质点作匀速圆周运动时，由于质点运动的速度大小相等，所以在任意一段时间 Δt 内，$|\Delta v|$始终等于零。而$|\Delta\vec{v}|$并不等于零(质点运动一周回到初始位置情况除外)。

例二 已知质点沿 x 轴作直线运动，其运动方程为

$$x=6t^2-2t^3$$

式中，x 以m计，t 以s计。求：