工科大学物理学习指导书

许丽敏　包曼玲　黄天祥　编著

华东化工学院出版社

工科大学物理学习指导书

许丽敏 包曼玲 黄天祥 编著

华东化工学院出版社

(沪)新登字 208 号

工科大学物理学习指导书
Gongke Daxue WuLi Xuexi Zhidaoshu
许丽敏　包曼玲　黄天祥　编著
华东化工学院出版社出版
(上海市梅陇路 130 号)
新华书店上海发行所发行
商務印書館上海印刷厂印刷
开本 850×1168　1/32　印张 8.125　字数 216 千字
1992 年 10 月第 1 版　1992 年 10 月第 1 次印刷
印数 1—8000 册

ISBN 7-5628-0237-8/O·29　定价 3.70 元

内容简介

本书是根据国家教委物理课程指导委员会制定的《工科大学物理课程基本要求》精神，配合本校《工科大学物理》教材而编写的学习指导书，配合课堂教学、供学生复习和准备考试之用。内容包括力学、相对论、机械振动、机械波、气体分子运动论、热力学基础、静电场、稳定电流磁场、电磁感应、波动光学和近代物理等。

本书选编了若干典型例题和问题，采用讨论的方式来讲述力、热、电、光和近代物理各部分的重点和难点，并总结了解题方法。每章均由“基本要求”、“复习框图”、“解题方法与例题”和“问题讨论”四个部分组成，所讨论的问题均来自作者在长期教学实践中积累的材料，各部分内容均在保证基本要求的基础上稍有提高。

本书可供工科院校非物理专业的本科生使用，也可供非物理专业的夜大、业余工大的学生参考。

本书编写组人员

(以姓氏笔画为序)

包曼玲　刘宝坤　许丽敏，李燮里
施善定　黄天祥　戴坚舟

主编　戴坚舟
主审　张兆奎

前言

大学物理是工科大学中一门重要的基础理论课程，但对刚进大学的一年级学生来说，在学习这门课时，常会遇到这样或那样的困难。为了更好地贯彻少而精、学到手的原则，让学生能用较少的时间，掌握较多的物理知识，我们根据《工科大学物理课程基本要求》和工科院校的实际情况，编写了《工科大学物理学习指导书》，与戴坚舟等编写的《工科大学物理》教材配套使用。

本书在编写过程中，力求做到既复习物理概念，又讲解如何应用这些概念分析问题和解决问题的思路。每章均由“基本要求”、“复习框图”、“解题方法与例题”和“问题讨论”四个部分组成。“基本要求”部分使读者了解每章的重点内容；“复习框图”部分引导读者总结基本概念和规律并找出各规律之间的联系，把每章的主要内容和各部分的联系概括在方框图上。“解题方法与例题”部分则通过对典型例题的分析，总结出各种类型习题的解题方法，也讨论一些解题技巧性较高的题目和综合性题目，让读者学会解题技巧，开阔解题思路，提高分析问题和解决问题的能力。“问题讨论”部分把学生在学习中不易理解，或经常混淆的问题，以及在习题中经常出现的错误编成思考题的形式进行讨论。通过讨论使读者对学过的概念有更深层次的理解。本书末还附有自测题和参考答案，供读者自我检查。

本书中的力学、相对论、振动与波动、热学、电磁学部分由许丽敏执笔，波动光学部分由包曼玲执笔，量子理论部分由黄天祥执笔。书中的全部插图由黄天祥绘画，全书由许丽敏统稿，由编写组共同讨论和审定，张兆奎教授和戴坚舟副教授审阅。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有不妥之处，望读者批评指正。

编者

目　　录

1　质点的运动……………………………………………………(1)

　1.1　质点运动学………………………………………………(1)

　1.2　质点动力学………………………………………………(10)

2　守恒定律……………………………………………………(24)

　2.1　机械能守恒定律…………………………………………(24)

　2.2　动量守恒定律……………………………………………(32)

　2.3　角动量守恒定律…………………………………………(39)

　2.4　守恒定律的综合应用……………………………………(43)

3　刚体的定轴转动……………………………………………(50)

　3.1　刚体运动学………………………………………………(50)

　3.2　刚体动力学………………………………………………(53)

4　狭义相对论…………………………………………………(68)

　4.1　相对论的时空观…………………………………………(68)

　4.2　相对论动力学……………………………………………(74)

5　机械振动和机械波…………………………………………(79)

　5.1　机械振动…………………………………………………(79)

　5.2　机械波……………………………………………………(95)

6　热学…………………………………………………………(106)

　6.1　气体分子运动论…………………………………………(106)

　6.2　热力学基础………………………………………………(113)

7　静电学………………………………………………………(125)

　7.1　真空中的静电场…………………………………………(125)

　7.2　静电场中的导体和介质…………………………………(138)

8　稳恒电流的磁场……………………………………………(153)

　8.1　真空中的磁场……………………………………………(153)

　8.2　磁介质中的磁场…………………………………………(166)

9　电磁感应和电磁场…………………………………………(172)

9.1 电磁感应……………………………………………………(172)
9.2 电磁场…………………………………………………………(183)
10 波动光学……………………………………………………(188)
10.1 光的干涉………………………………………………………(188)
10.2 光的衍射………………………………………………………(201)
10.3 光的偏振………………………………………………………(210)
11 量子理论基础…………………………………………………(220)
11.1 波和粒子………………………………………………………(220)
11.2 玻尔氢原子理论…………………………………………………(226)
11.3 物质波与薛定谔方程……………………………………………(229)
自测题…………………………………………………………(233)
自测题参考答案…………………………………………………(248)

1 质点的运动

1.1 质点运动学

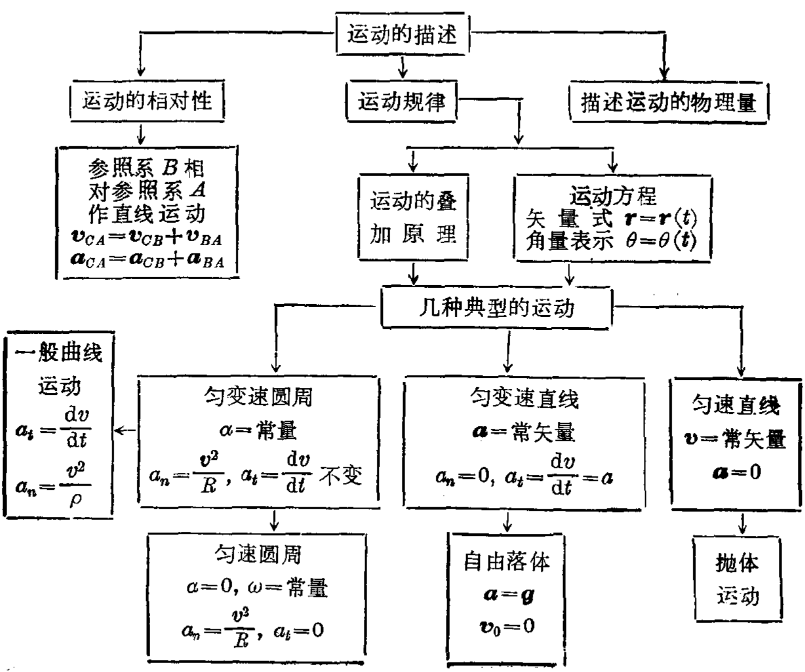
1.1.1 基本要求

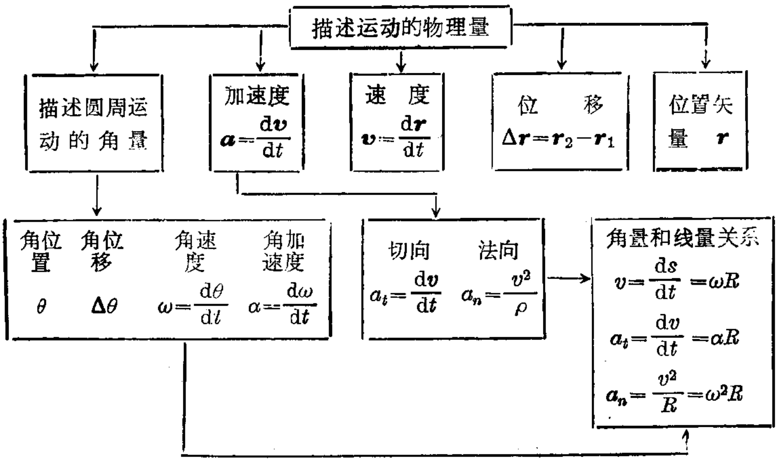
(1) 确切理解位置矢量、位移、速度和加速度等概念。搞清位移与路程、速度与速率的区别；

(2) 熟练掌握和运用变速直线运动、抛体运动和变速圆周运动的规律；

(3) 掌握相对运动的速度合成公式。

1.1.2 复习框图





运动学的主要任务是解决运动的描述问题，描述运动的主要物理量是位置矢量 $\boldsymbol{r}$、速度 $\boldsymbol{v}$ 和加速度 $\boldsymbol{a}$。对于这些概念我们是从一般曲线运动出发引出的，因此讲得比中学里更深入，我们应该着重理解它们的瞬时性、矢量性和相对性。在研究运动规律时，我们首先研究一些重要的特例，如直线运动、抛体运动和圆周运动等，然后再推广得出一般曲线运动的规律。要学好运动学，必须抓住基本概念和运动规律这两条线索，做到基本概念清楚，规律应用熟练。运动学的要点和研究问题思路可用第1页、第2页的方框图表示。

1.1.3 解题方法与例题

运动学中研究的问题主要有两类：

A 已知质点的运动方程，利用求导的方法得到质点在任何时刻的速度和加速度。

[例 1-1] 已知质点的运动方程为 $x=R\cos\omega t$，$y=R\sin\omega t$，式中，R 和 ω 均为常数。试求：

(1) 轨道方程；

(2) 任意时刻的速度和加速度。

[解] (1) 由已知的运动方程消去 t 求得轨道方程为

$$x^2+y^2=R^2$$

可见，质点的轨道是以坐标原点为圆心，R 为半径的圆。如图 1-1 所示。

(2) 求任一时刻的速度和加速度。

由质点的运动方程可知，质点在任一时刻的位置矢量。

$$\boldsymbol{r}=R\cos\omega t\boldsymbol{i}+R\sin\omega t\boldsymbol{j}$$

质点在任一时刻的速度矢量

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=-R\omega\sin\omega t\boldsymbol{i}+R\omega\cos\omega t\boldsymbol{j}$$

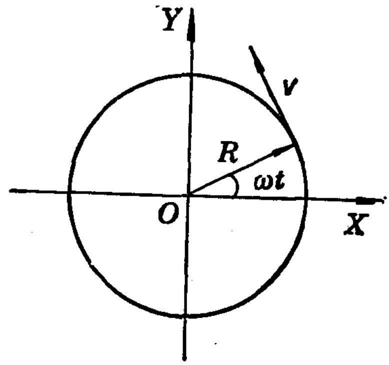


图 1-1

因此，速度的大小

$$v=\sqrt{R^2\omega^2\sin^2\omega t+R^2\omega^2\cos^2\omega t}=R\omega$$

速度方向可用 $\boldsymbol{v}$ 和 x 轴的夹角 θ 表示

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{R\omega\cos\omega t}{-R\omega\sin\omega t}=-\mathrm{ctg}\,\omega t$$

由此式可知，速度的方向与半径垂直，即为圆上某点的切线方向。

同样可求得质点的加速度

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=-R\omega^2\cos\omega t\boldsymbol{i}-R\omega^2\sin\omega t\boldsymbol{j}=-\omega^2\boldsymbol{r}$$

可见，任一时刻的加速度的大小为

$$a=\sqrt{(R\omega^2\cos\omega t)^2+(R\omega^2\sin\omega t)^2}=R\omega^2$$

加速度的方向沿半径指向圆心。这就是质点作匀速圆周运动时的向心加速度。

求质点的加速度还可用另一种更简便的方法，即先用上述方法求得速度的大小

$$v=R\omega$$

再求得切向和法向加速度

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=0,\quad a_n=\frac{v^2}{R}=R\omega^2$$

这样也可以得到加速度的大小

$$a=\sqrt{a_t^2+a_n^2}=R\omega^2$$

方向沿法线，即沿半径指向圆心。

求一般曲线运动的加速度，总可通过上述两种方法来求得。这两种方法的区别只是在计算加速度时所取的坐标不同。前者用公式 $a=\sqrt{a_x^2+a_y^2}$，是取平面直角坐标；后者用公式 $a=\sqrt{a_t^2+a_n^2}$，是取曲线的切线和法线方向为坐标，通常称为自然坐标。对圆周运动，用后一种方法比较方便。对一般曲线运动，用前一种方法方便。因为对一般的曲线运动 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}$，求曲线上任一点的曲率半径是比较麻烦的。

［例 1-2］ 已知质点的运动方程为 $x=2t$，$y=4-t^2$。式中时间以 s 计，距离以 m 计。试求任一时刻质点的切向加速度和法向加速度。

［解］ 由运动方程可求得质点速度的 x 和 y 分量

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=2\,\mathrm{m/s},\qquad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=-2t$$

速度的大小

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=2\sqrt{1+t^2} \tag{1}$$

同样可求得质点加速度的 x 和 y 分量

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=0,\qquad a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=-2\,\mathrm{m/s^2}$$

加速度的大小

$$a=a_y=2\,\mathrm{m/s^2} \tag{2}$$

对式(1)求导得切向加速度

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{2t}{\sqrt{1+t^2}} \tag{3}$$

由式(2)和式(3)得法向加速度

$$a_n=\sqrt{a^2-a_t^2}=\frac{2}{\sqrt{1+t^2}}$$

从本题的求解过程可以看出，当质点作一般曲线运动时，用公式 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}$ 求法向加速度是比较麻烦的，因为曲率半径不容易计

算。但是先求出质点的切向加速度和总加速度再利用公式

$$a_n=\sqrt{a^2-a_t^2}$$

求法向加速度却很方便。

B 已知加速度以及初位置 $\boldsymbol{r}_0$ 和初速度 $\boldsymbol{v}_0$，利用积分方法求得质点的运动方程或轨迹。

[例 1-3] 已知重力加速度为 $\boldsymbol{g}$，忽略空气阻力，试分析质点以初速 $\boldsymbol{v}_0$，向与水平线成 θ_0 角方向抛出时，质点的运动方程。

[解] 由于 $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{g}$ 因此

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{g}$$

即

$$\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{g}\,\mathrm{d}t$$

根据初始条件对上式两边取积分

$$\int_{\boldsymbol{v}_0}^{\boldsymbol{v}}\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\int_0^t\boldsymbol{g}\,\mathrm{d}t$$

得

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{g}t$$

再由

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{g}t$$

两边乘 $\mathrm{d}t$ 后，取积分

$$\int_{\boldsymbol{r}_0}^{\boldsymbol{r}}\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_0^t(\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{g}t)\mathrm{d}t$$

得

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{v}_0t+\frac{1}{2}\boldsymbol{g}t^2$$

如取起抛点为坐标原点，则 $\boldsymbol{r}_0=0$，即有

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}_0t+\frac{1}{2}\boldsymbol{g}t^2$$

这就是质点的运动方程的矢量式。如取水平方向为 x 轴，竖直向上方向为 y 轴。则位置矢量可写为

$$\boldsymbol{r}=v_0\cos\theta_0t\boldsymbol{i}+(v_0\sin\theta_0t-\frac{1}{2}gt^2)\boldsymbol{j}$$

所以有

$$x=v_0\cos\theta_0t$$

$$y=v_0\sin\theta_0t-\frac{1}{2}gt^2$$

这是质点运动方程在平面直角坐标系中的分量式。

从上面所得的运动方程的矢量式

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}_0t+\frac{1}{2}\boldsymbol{g}t^2$$

还可以看出，斜抛运动可看为沿初速方向的匀速直线运动和自由落体运动的叠加，如图 1-2 所示。

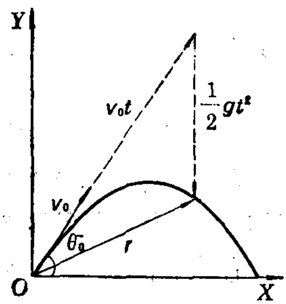


图 1-2

1.1.4 问题讨论

A 基本概念讨论

[问题 1] 想一想 $\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ 是瞬时速度的大小吗？如已知质点的运动方程为 $x=x(t)$，$y=y(t)$，能否先用 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ 求出 r，再根据 $v=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ 求得质点的瞬时速度的大小？

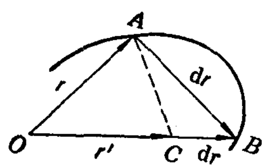


图 1-3

[解答] 初学的同学往往认为 r 是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的大小，那么 $\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ 一定是瞬时速度 $\boldsymbol{v}$ 的大小$\left(\text{因为 } \boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)$。产生这个问题的原因在于搞不清 $\mathrm{d}r$ 和 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$ 的区别。从图 1-3 可以看出，质点作曲线运动时，位置矢量的大小和方向都在变化。在 $\mathrm{d}t$ 时间内质点的位移矢量 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的大小

$$|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|=\overline{AB}$$

而位置矢量大小的变化

$$\mathrm{d}r=|\boldsymbol{r}'|-|\boldsymbol{r}|=\overline{CB}$$

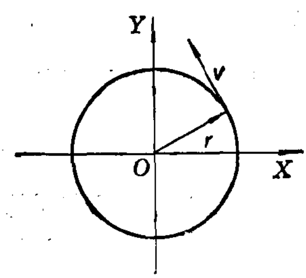


图 1-4

可见，$\mathrm{d}r\neq|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$。例如，质点作圆周运动，取圆心为坐标原点，如图 1-4 所示。质点在运动过程中 $\mathrm{d}r=0$，但瞬时速度的大小 $v=\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right|$ 却不等于零。因此 $\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ 只能表示位置矢量大小随时间的变化

率，不能表示瞬时速度的大小。瞬时速度的大小应为

$$v=\left|\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right|=\left|\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dy}{dt}\boldsymbol{j}\right|$$

$$=\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$$

却不能写为 $$v=\frac{dr}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)$$

读者可用同样方法自己分析 $a\neq\frac{dv}{dt}$。

[问题 2] 想一想下列两句话是否正确：

(1) 质点作直线运动位置矢量的方向一定不变。

(2) 质点作圆周运动位置矢量的大小一定不变。

[解答] 初略一看，好像两句话都对，仔细想一想就会发现这两句话都是错误的。错误的原因在于他们想问题太片面。讲第一句话的人认为质点一定是沿通过坐标原点的直线运动的。讲第二句话的人认为坐标原点一定在圆心。但是坐标原点可以任意选定，而位置矢量的大小和方向与坐标原点的选取有关。如图 1-5 所示的直线和圆周运动，位置矢量的大小和方向都在改变。

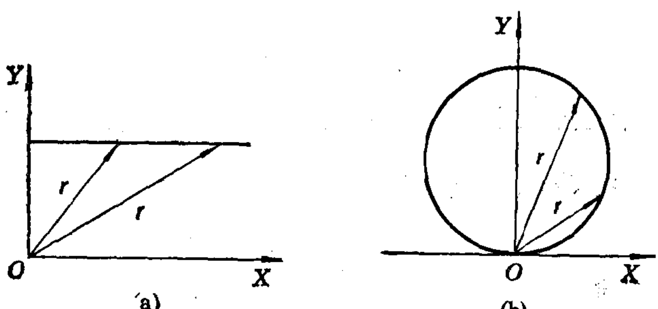


图 1-5

B 抛体问题

[问题] 一人在离地面高度为 H 的平台上，以初速 $\boldsymbol{v}_0$ 掷手榴弹。试问他以多大的投射角扔出时，其射程最大？

[解答] 若把抛体运动看为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的竖直上抛运动的叠加，则此问题的求解会变得很麻烦。若把抛体运动看为沿初速方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的叠加（如图1-6所示），问题的求解会方便得多。

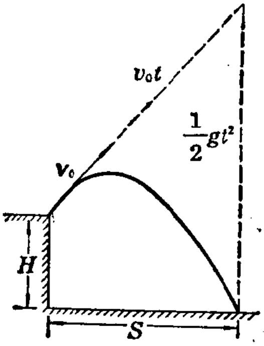


图 1-6

从图1-6可知，射程

$$S=\sqrt{v_0^2t^2-\left(\frac{1}{2}gt^2-H\right)^2}\qquad(1)$$

因为 S^2 最大，S 也最大。所以对 S^2 求极值，由

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(S^2)=2v_0^2t-2\left(\frac{1}{2}gt^2-H\right)gt=0$$

得

$$\frac{v_0^2}{g}=\frac{1}{2}gt^2-H\qquad(2)$$

解得

$$t^2=\frac{2v_0^2+2gH}{g^2}\qquad(3)$$

如把式(3)代入 $\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}(S^2)$ 的表示式中，得到

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}(S^2)<0。$$

因此，当 $t^2=\frac{2v_0^2+2gH}{g^2}$ 时，S^2 有极大值，则射程 S 也有极大值。把式(2)、式(3)代入式(1)得到 S 的极大值

$$S_{\max}=\frac{v_0}{g}\sqrt{v_0^2+2gH}$$

这时投射角

$$\alpha=\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\frac{1}{2}gt^2-H}{S_{\max}}\right)$$

$$=\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\frac{v_0^2}{g}}{\frac{v_0}{g}\sqrt{v_0^2+2gH}}\right)=\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{v_0}{\sqrt{v_0^2+2gH}}\right)$$

C 速度图线问题

[问题] 甲、乙两人在 $t=0$ 时，从同一地点出发，向同一方向作直线运动。他们的速度图线如图 1-7 所示。问他们两人何时再相遇？A、B 两人分别回答了这个问题。

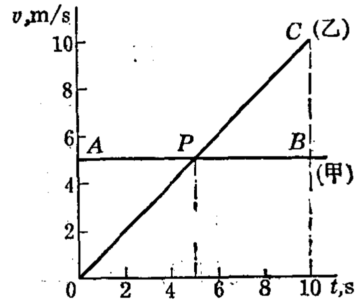


图 1-7

A 答：由图 1-7 可以看出，$t=5s$ 时甲、乙两人的速度图线相交，所以他们在 5 秒时相遇。

B 答：由速度图线可知，在 $t=10s$ 时，乙速度图线下的面积($S_{\triangle OCD}$)等于甲速度图线下的面积($S_{\square ABDO}$)。因此在 $t=10s$ 时甲和乙相遇。

试问他们两人谁回答得对？

[解答] B 回答正确，A 回答错了。因为速度图线上的交点 P 只说明这时刻甲、乙的速度相等，并不说明甲、乙相遇。在速度图线上位移的意义是 $v\sim t$ 线下的面积。两速度图线下面积相等，说明这时甲、乙两人通过的位移相等，即他们相遇。

D 相对运动问题

[问题] 假定某日刮北风，风速为 u，一运动员在风中跑步，他对地面的速度为 $v\left(v=\frac{u}{2}\right)$，试问当他向什么方向跑时，会感到风从他的正右方吹来？

[分析] 由已知条件可知，$v_{风地}=u$，方向由北向南。$v_{人地}=v=\frac{u}{2}$，方向待求。如设 $v_{风人}=v'$，因人感到风从正右方吹来，因此 $\boldsymbol{v}'\perp\boldsymbol{v}$。按相对运动的速度合成公式则有

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{v}'+\boldsymbol{v}$$

因此矢量 $\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{v}'$ 和 $\boldsymbol{u}$ 组成一个直角三角形。现在已知 $\boldsymbol{u}$ 的大小和方向及 $\boldsymbol{v}$ 的大小，则此直角三角形的位置能被确定，故 $\boldsymbol{v}$ 的方向也能确定。