



高等院校物理教材

# 物理学

## 思考题解答

周雨青 编著

清华大学出版社

04  
4-5A2

2007

高等院校物理教材

# 物理学

## 思考题解答

周雨青 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是《物理学(第四版)》(马文蔚改编,高等教育出版社,1999)全部思考问题(即书中各章的“问题”)的解答。其中包括力(第一~五章)、热(第六、七章)、电磁(第八~十三章)、振动波动(第十四~十六章)、光学(第十七章)、相对论(第十八章)、量子物理(第十九章)和物理学与新技术(第二十章)。本书由教学一线的教师编写,解答内容准确,运用物理概念得当,阐述简明扼要,便于读者阅读和进一步思考。本书适合大学工科各专业学生和讲授普通物理的教师使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

物理学思考题解答/周雨青编著. —北京:清华大学出版社,2007.4  
ISBN 978-7-302-14680-3

I. 物… II. 周… III. 物理学—高等学校—教学参考资料  
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021287 号

责任编辑:朱红莲 洪英  
责任校对:刘玉霞  
责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社  
<http://www.tup.com.cn>  
[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)  
社总机:010-62770175  
投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座  
邮 编:100084

邮购热线:010-62786544  
客户服务:010-62776969

印 装 者:北京市清华园胶印厂  
经 销:全国新华书店  
开 本:140×203 印张:5.25  
版 次:2007年4月第1版  
印 数:1~3000  
定 价:12.50元

字数:130千字  
印次:2007年4月第1次印刷

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:020660-01

# 前 言

《物理学(第四版)》(马文蔚改编,高等教育出版社,1999)中的思考问题,起点不高,环环紧扣课本内容,对理解概念、深化内容、拓展思路有着很好的作用。在教学实践中,其中一些内容作为讨论和习题课的选题是合适的。将书中所有的思考问题给出比较明晰的解答,为使用该书的教师和学生提供参考,是我们多年的愿望。我们从2004年初开始着手组织这项工作,在众多老师的齐心协力下,2005年底完成了初稿,并进行了一轮教学实践。

应该说,参与写作的教师虽有一定的专业水平,但多数都很年轻,教学和写作经验不足。在编写过程中,大家不厌其烦地一次次积极切磋、一遍遍认真修改,付出了大量劳动。这项工作能够比较好地快速完成,与他们的辛勤工作和全力配合密不可分。

张勇、张玉萍、彭毅、蒋红燕、堵国安、殷实、林桂粉、谷云羲老师都参与了本书的编写工作,其中谷云羲老师还完成了前十九章修正后的文字、公式输入和校对工作。我的学生解文轶和姚学敏也为全书的最终定稿做了许多工作。写作过程中,我还多次与朱明老师探讨现代科学专题部分的相应内容,受到许多启发,在此一并向他们表示感谢!

编 者

2007年3月

于成贤园

# 目 录

第一章	质点运动学	1
第二章	牛顿定律	7
第三章	动量守恒定律和能量守恒定律	11
第四章	刚体的转动	21
第五章	万有引力场	26
第六章	热力学基础	32
第七章	气体动理论	40
第八章	静电场	50
第九章	静电场中的导体与电介质	58
第十章	恒定电流	68
第十一章	稳恒磁场	72
第十二章	磁场中的磁介质	86
第十三章	电磁感应 电磁场	88
第十四章	机械振动	100
第十五章	机械波	107
第十六章	电磁振荡和电磁波	116
第十七章	波动光学	121
第十八章	相对论	135
第十九章	量子物理	144
第二十章	物理学与新技术	155

# 第一章 质点运动学

1-1 在一艘内河轮船中,两个旅客有这样的对话:

甲:我静静地坐在这里好半天了,我一点也没有运动。

乙:不对,你看看窗外,河岸上的物体都飞快地向后掠去,船在飞快前进,你也在很快地运动。

试把他们讲话的含意阐述得确切一些,究竟旅客甲是运动,还是静止?你如何理解运动和静止这两个概念的。

答:① 如果以轮船为参考系,则甲、乙旅客都是静止的,而河岸上的物体都在向后运动;

如果以河岸为参考系,则轮船及甲、乙旅客都是运动的。

② 运动是绝对的,而静止是相对的。描述物体的运动情况时,首先要选定参考系,选取的参考系不同,对物体运动的描述也就不同。

1-2 有人说:“分子很小,可将其当作质点;地球很大,不能当作质点。”对吗?

答:这种说法不对。“质点”是经过科学抽象而形成的物理模型。物体能否当作质点是有条件的,相对的。当研究某物体的运动,可以忽略其大小和形状,或者只考虑其平动,那么就可把物体当作质点。例如,分子虽小,但研究分子内部结构时,分子就不能当作质点;地球虽大,但研究地球自转现象时,地球也不能当作质点,而当研究地球绕太阳的公转时,地球就可当作质点。

1-3 已知质点的运动方程为  $r = x(t)i + y(t)j$ ,有人说其速度和加速度分别为

$$v = \frac{dr}{dt}, \quad a = \frac{d^2r}{dt^2}$$

其中  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。你说对吗？

答：题中说法不对。根据定义  $v = \frac{dr}{dt} = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j$ ,  $a = \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}i + \frac{d^2y}{dt^2}j$ , 所以, 由  $r = x(t)i + y(t)j$ , 可得如下结论:  $v = |v| = \left| \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j \right| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$ ,  $\frac{dr}{dt} = \frac{d|r|}{dt} = \frac{d\sqrt{x^2 + y^2}}{dt} = \frac{x \frac{dx}{dt} + y \frac{dy}{dt}}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ , 显然,  $v \neq \frac{dr}{dt}$ ,  $a = \left| \frac{dv}{dt} \right| = \left| \frac{d^2x}{dt^2}i + \frac{d^2y}{dt^2}j \right| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2}$ ,  $\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{d^2|r|}{dt^2} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dr}{dt}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{x \frac{dx}{dt} + y \frac{dy}{dt}}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$ ,

显然,  $a \neq \frac{d^2r}{dt^2}$ 。

#### 1-4 略。

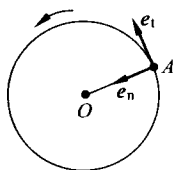
1-5 如果一质点的加速度与时间的关系是线性的, 那么, 该质点的速度和位矢与时间的关系是否也是线性的呢?

答: 据题意, 加速度与时间的关系是线性的, 则可以设  $a = kt$  (其中  $k$  为常矢), 由  $\frac{dv}{dt} = kt$ , 得  $dv = kt dt$  (设  $t=0$  时,  $v = v_0, r = r_0$ ), 两边积分, 有  $\int_{v_0}^v dv = \int_0^t kt dt$ , 所以  $v = v_0 + \frac{1}{2}kt^2$ , 即速度与时间的关系不是线性的。同理, 由  $v = \frac{dr}{dt}$ , 有  $\int_{r_0}^r dr = \int_0^t (v_0 dt + \frac{1}{2}kt^2 dt)$ , 所以  $r = r_0 + v_0 t + \frac{1}{6}kt^3$ , 即位矢与时间的关系也不是线性的。

**1-6** 一人站在地面上用枪瞄准悬挂在树上的木偶。当击发枪机,子弹从枪口射出时,木偶正好从树上由静止自由下落。试说明为什么子弹总可以射中木偶?

答:本题要射中木偶有一个前提必须满足:若设木偶离地的距离为  $h$ ,枪口离木偶的连线距离为  $s$ ,子弹出口的初速率为  $v_0$ ,则要在  $\frac{s}{v_0} \leq \sqrt{\frac{2h}{g}}$  的条件下才有可能击中。在此条件下,因为  $v_x = v_0 + gt$ ,  $v_y = gt$ ,所以任意时刻两者的相对速度  $v_x - v_y = v_0$ ,只要初始时刻  $v_0$  方向指向木偶(对准),则任意时刻子弹都向着木偶相对运动。因此一定能够击中木偶。

**1-7** 一质点作匀速率圆周运动,取其圆心为坐标原点,试问:质点的位矢与速度、位矢与加速度、速度与加速度的方向之间有何关系?



问题 1-7 图

答:如问题 1-7 图所示,  $A$  为圆周上运动的质点,设质点沿  $O$  为圆心,半径为  $r$  的圆周做逆时针方向的匀速率圆周运动。

以动点  $A$  为原点,建立如问题 1-7 图所示自然坐标系,则由图可知

① 质点的位矢  $\vec{OA}$  沿法向单位矢量的负方向,速度  $\vec{v}$  沿切向单位矢量正方向,所以质点的位矢与速度方向相互垂直,即  $\vec{r} = -r\vec{e}_n$ ,  $\vec{v} = v\vec{e}_t$ ,所以  $\vec{r} \perp \vec{v}$ 。

② 因为质点作匀速率圆周运动,则其切向加速度  $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$ ,所以加速度  $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n = \vec{a}_n$  沿法向单位矢量正方向。

③ 由以上分析可知,质点速度方向沿切向,而加速度沿法向,所以,质点速度方向与加速度方向垂直。

**1-8** 在《关于两门新科学的对话》一书中,伽利略写道:“仰角



(即抛射角)比  $45^\circ$  增大或减小一个相等角度的抛体,其射程是相等的。”你能证明吗?

证明:由给定初速  $v_0$ 、抛射角  $\alpha$  的抛体射程公式

$$d_0 = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha$$

则抛射角分别为比  $45^\circ$  增大  $\theta$  和比  $45^\circ$  减小  $\theta$  的抛体,其射程分别为  $d_1 = \frac{v_0^2}{g} \sin 2(45^\circ + \theta)$ ,  $d_2 = \frac{v_0^2}{g} \sin 2(45^\circ - \theta)$ , 则  $d_1 = \frac{v_0^2}{g} \sin(90^\circ + 2\theta) = \frac{v_0^2}{g} \cos 2\theta$ ,  $d_2 = \frac{v_0^2}{g} \sin(90^\circ - 2\theta) = \frac{v_0^2}{g} \cos 2\theta$ , 即  $d_1 = d_2$ 。

1-9 下列说法是否正确:

- (1) 质点作圆周运动时的加速度指向圆心;
- (2) 匀速圆周运动的加速度为恒量;
- (3) 只有法向加速度的运动一定是圆周运动;
- (4) 只有切向加速度的运动一定是直线运动。

答:质点作圆周运动时,其加速度  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n$ , 其中  $\mathbf{a}_t = \frac{dv}{dt} \mathbf{e}_t$ ,

$$\mathbf{a}_n = \frac{v^2}{R} \mathbf{e}_n.$$

(1) 不准确。若  $\frac{dv}{dt} \neq 0$  时  $\mathbf{a} \neq \mathbf{a}_n$ , 即不是匀速率圆周运动时, 加速度就不指向圆心。

(2) 不对。因匀速圆周运动时, 加速度  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_n = \frac{v^2}{R} \mathbf{e}_n$ , 而  $\mathbf{e}_n$  为大小为 1、方向不断变化的变矢量。所以, 匀速圆周运动时, 加速度大小不变, 而方向不断变化, 但始终指向圆心。

(3) 不对。只有法向加速度, 则切向加速度  $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$ , 则, 速

率  $v$  不变,且加速  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_n = \frac{v^2}{R} \mathbf{e}_n$ 。若为圆周运动,则必有  $R$  不变,从而法向加速度大小也不变。所以,应该说,只有法向加速度且其大小不变的运动一定是圆周运动。

(4) 正确。只有切向加速度,则  $a_n = \frac{v^2}{\rho} = 0$ , 一般  $v \neq 0$ , 则  $\rho \rightarrow \infty$ , 所以是直线运动。

**1-10** 在地球的赤道上,有一质点随地球自转的加速度为  $a_E$ ; 而此质点随地球绕太阳公转的加速度为  $a_S$ 。设想地球绕太阳的轨道可视为圆形。你知道这两个加速度之比是多少吗?

答: 设地球赤道半径为  $r$ , 地球公转半径为  $R$ , 由向心加速度公式, 有:  $a_E = r \frac{4\pi^2}{T_E^2} = r \frac{4\pi^2}{24^2}$ ;  $a_S = R \frac{4\pi^2}{T_S^2} = R \frac{4\pi^2}{365 \times 24^2}$ , 所以  $\frac{a_E}{a_S} = \frac{365r}{R}$ , 取  $r \approx 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ,  $R \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ , 则  $\frac{a_E}{a_S} = 1.6 \times 10^{-2} \approx \frac{1}{100}$ , 因此在研究地球公转时, 若精度要求不高时, 可以忽略地球的自转运动。

**1-11** 一只鸟在水平面上沿直线以恒定速率相对地面飞行, 有一汽车在公路上行驶, 在什么情况下, 汽车上的观察者观察到鸟是静止不动的? 在什么情况下, 他观察到小鸟似乎往回飞?

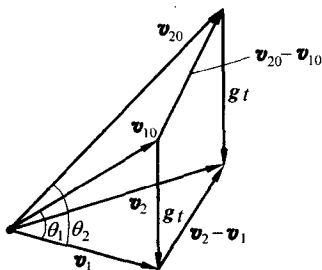
答: 当汽车相对地面运动的速度大小和方向均与鸟相对地面运动的速度大小和方向相同时, 汽车上的观察者观察到鸟是静止不动的; 当汽车相对地面运动的速度方向与鸟相对地面运动的速度方向相同, 且汽车相对地面运动的速度大小比鸟相对地面运动的速率大时, 汽车上的观察者观察到鸟似乎往回飞。

**1-12** 一人在以恒定速度运动的火车上竖直向上抛出一块石子, 此石子是否能落回人的手中? 如果石子抛出后, 火车以恒定的加速度前进, 情况又如何?

答：当火车以恒定速度运动时，一人竖直向上抛出石子，由于惯性，则此石子能落回人手中，这也正是惯性参考系中的相对性原理所决定的结果；当石子抛出后，火车以恒定加速度前进，则此石子落到人的后方，这也正是非惯性系中惯性力产生的必然结果。

1-13 如果有两个质点分别以初速  $v_{10}$  和  $v_{20}$  抛出， $v_{10}$  和  $v_{20}$  在同一平面内且与水平面的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。有人说，在任意时刻，两质点的相对速度是一常量。你说对吗？

答：题中说法正确。若在任意时刻  $t$ ，两质点的速度分别为  $v_1, v_2$ ，并且只在恒定重力场中运动，则有  $v_1 = v_{10} + gt$ ， $v_2 = v_{20} + gt$ 。由问题 1-13 图可知，任意时刻，两质点的相对速度  $v_2 - v_1 = v_{20} - v_{10}$  为常量。



问题 1-13 图

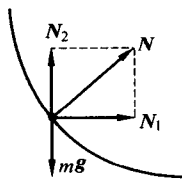
## 第二章 牛顿定律

2-1 在略去空气阻力的情况下,轻重不等的两物体在地球表面附近从同一高处自由下落。亚里士多德认为:“重的物体应比轻的物体先落地。”对于亚里士多德的这一观点,你觉得怎样?

答:亚里士多德有此看法,是因为在实际落体过程中,重物所受到的重力与阻力之差和自身重量(质量)的比值( $\frac{G-f_{阻}}{m}$ )往往大于轻物的该比值。由牛顿第二定律知,此时重物的加速度大于轻物的加速度,因而“重的物体应比轻的物体先落地”。但若是理想情况,不考虑阻力,则重物与轻物的加速度一样大,所以应该同时落地。

2-2 一车辆沿弯曲公路运动。试问作用在车辆上的力的方向是指向道路外侧,还是指向道路的内侧?

答:由运动学知识,速度变化的方向总是沿轨道的弯曲方向的内侧,因此,加速度乃至物体受合力方向也为曲线内侧。所以本题所问的车辆受力方向一定指向道路的内侧(见问题 2-2 图),若公路是有倾斜度的,则受到指向内侧的力可能来自地面的支持力和摩擦力;若公路无倾斜度,则车受到指向内侧的力只能来自地面的摩擦力。



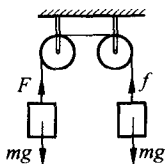
问题 2-2 图

2-3 将一质量略去不计的轻绳,跨过无摩擦的定滑轮。一只猴子抓住绳的一端,绳的另一端悬挂一个质量和高度均与猴子相

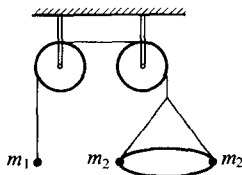
等的镜子。开始时,猴子与镜子在同一水平面上。猴子为了不看到镜中的猴像,它作了下面三项尝试:(1)向上爬;(2)向下爬;(3)松开绳子自由下落。这样猴子是否就看不到它在镜子中的像?

答:①从二者受力情况看,如问题2-3图所示, $F$ 为绳子对镜子的拉力, $f$ 为猴子受到的绳子对它的摩擦力,且 $F=f$ 。所以由牛顿第二定律知:二者的运动状态相同。

②从角动量守恒看,二者在任意时刻的速度 $v_1 = v_2$ 。所以,题中三种情况猴子皆能看见自己的像。



问题 2-3 图

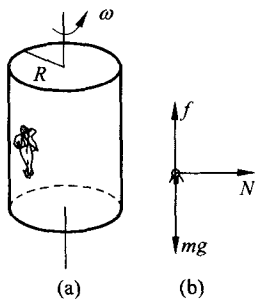


问题 2-4 图

2-4 如问题2-4图所示,轻绳与定滑轮间的摩擦力略去不计,且 $m_1 = 2m_2$ 。若使质量为 $m_2$ 的两个物体绕公共竖直轴转动,两边能否保持平衡?

答:当 $m_2$ 的转动稳定时,两边能保持平衡。因为 $m_2$ 的运动是在水平面内,两边绳所受拉力在竖直方向的分量相等,且皆等于两小球的重力,所以两边平衡。

2-5 如问题2-5图(a)所示,一半径为 $R$ 的木桶,以角速度 $\omega$ 绕其轴线转动。有一人紧贴在木桶壁上,人与木桶间的静摩擦因数为 $\mu_0$ 。你知道在什么情形下,人会紧贴在木桶壁



问题 2-5 图

上而不掉下来吗?

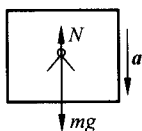
答: 人的受力情况如问题 2-5 图(b)所示。令  $f = \mu_0 N = \mu_0 ma_n = \mu_0 m\omega^2 R$ , 当  $f \geq mg$  时, 人不会掉下, 即  $\mu_0 \omega^2 R \geq g$ , 所以  $\omega \geq \sqrt{\frac{g}{\mu_0 R}}$  为人不掉下的旋转条件。注意:  $\omega \geq \sqrt{\frac{g}{\mu_0 R}}$  时, 出现的摩擦力为静摩擦力。

2-6 一人站在电梯中的磅秤上, 在什么情况下, 他的视重为零? 在什么情况下, 他的视重大于他在地面上的体重?

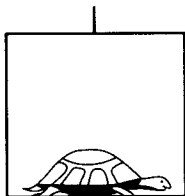
答: 人的受力情况如问题 2-6 图所示。 $N + mg + F_i = 0$  ( $F_i$  是惯性力),  $N + mg - ma = 0$  ( $a$  是电梯加速度), 所以  $a = g$  时, 视重  $N = 0$ 。 $a$  与  $g$  反向, 即  $a$  向上时, 视重大于他在地面上的体重。

2-7 在升降机中有一只海龟, 如问题 2-7 图所示。在什么情况下, 海龟会“飘浮”在空中?

答: 由题 2-6 知, 升降机以重力加速度下降时, 海龟会“漂浮”在空中。



问题 2-6 图



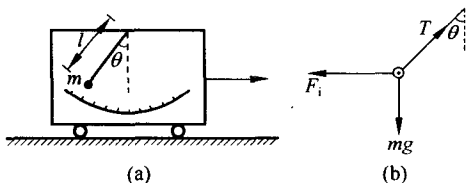
问题 2-7 图

2-8 略。

2-9 为测量车厢的加速度, 有人提出这样一个办法, 在车厢顶上悬挂一根长为  $l$  的细绳, 绳下系一质量为  $m$  的小球, 并在竖直位置放一量角器(如问题 2-9 图(a)所示)。通过测量绳与竖直线的摆角  $\theta$  可测出车厢的加速度。你知道其物理原理吗?

答: 以车厢为参考系, 小球受三个力作用(见问题 2-9 图(b)):

绳子拉力  $T$ 、重力  $mg$ 、惯性力  $F_i$ ，由三力平衡，得  $\tan \theta = F_i/mg = ma/mg$ ，所以  $a = g \tan \theta$ 。



问题 2-9 图

**2-10** 在火车车厢中的光滑桌面上，放置一个钢制小球，如问题 2-10 图所示。当火车的速率增加时，车厢内的观察者和铁轨上的观察者看到小球的运动状态将会发生怎样的变化？如果火车的速率减小，情况又将怎样？你能对上述现象加以说明吗？

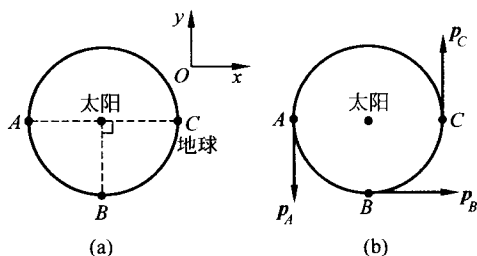


问题 2-10 图

答：①以铁轨为参考系，由牛顿第二定律知小球的运动状态不会变，因为没有受到外力作用（竖直方向的平衡力不考虑）。②以车厢为参考系，小球受惯性力  $F_i$  的作用。 $F_i = -ma$  ( $a$  为车厢加速度)。当车厢加速向前时，小球在加速向后运动。反之，当车厢加速度向后时（减速率向前运动），小球作加速向前运动。

### 第三章 动量守恒定律和 能量守恒定律

3-1 如问题 3-1 图(a)所示,设地球在太阳引力的作用下,绕太阳作匀速圆周运动。试问:在下述情况下,(1)地球从点 A 运动到点 B,(2)地球从点 A 运动到点 C,(3)地球从点 A 出发绕行一周又返回点 A,地球的动量增量和所受的冲量各为多少?



问题 3-1 图

答:由动量定理可知,物体在某段时间内所受的冲量等于物体在这段时间始末动量的增量  $I = \Delta P$ 。设地球以  $v_E$  绕太阳作匀速圆周运动,由万有引力提供向心力,则

$$G \frac{m_S m_E}{R_{SE}^2} = m_E \frac{v_E^2}{R_{SE}}$$

所以  $v_E = \sqrt{G \frac{m_S}{R_{SE}}}$ ,在如图所示的坐标系中,A,B,C 三点处地球的动量分别为  $p_A = -m_E v_E j$ ,  $p_B = m_E v_E i$ ,  $p_C = m_E v_E j$ ,所以(1)地



球从点  $A$  到点  $B$  的动量增量和所受的冲量为  $I_{AB} = p_B - p_A = m_E v_E i + m_E v_E j$ , 同理 (2)  $I_{AC} = p_C - p_A = 2m_E v_E j$ , (3)  $I_{AA} = p_A - p_A = 0$ 。

**3-2** 假使你处在摩擦可略去不计的覆盖着冰的湖面上, 周围又无其他可资利用的工具, 你怎样依靠自身的努力返回湖岸呢?

**答:** 此题应了解动量守恒定律。当系统所受外力可以忽略时, 系统的动量保持不变。

当人处于摩擦可以略去不计的冰面上, 周围又无其他可以利用的工具时, 初始动量为零, 可向背离湖岸的方向扔一自身携带的物体, 从而使人获得朝向湖岸的动量。

**3-3** 质点系的动量守恒, 是否意味着该系统中, 一部分质点的速率变大时, 另一部分质点的速率一定会变小。

**答:** 不一定。当质量系内动量守恒时,  $\sum_i m_i v_i = C$ 。说明当质点系所受合外力为零时, 各质点动量的矢量和(而非代数和)保持不变。所以, 当一部分质点的速率变大时, 另一部质点的速率可以变小(同方向时), 也可以变大(反方向时)。

**3-4** 一人在帆船上用电动鼓风机正对帆鼓风, 企图使帆船前进, 但他发觉, 船非但不前进, 反而缓慢后退, 这是为什么?

**答:** 此题需理解动量定理, 了解空气在离开鼓风机到达帆过程中动量的变化。

以一定质量的空气为研究对象, 空气在鼓风机作用下, 在  $\Delta t$  时间内动量从 0 增加到  $p_1$ , 受到的平均冲力为  $F_1$ , 由动量定理,



问题 3-4 图

$F_1 \Delta t = p_1 - 0 = p_1$ , 空气到达帆时垂直于帆面的动量为  $p_2$ , 由于气流的“发散”(见问题 3-4 图)作用, 垂直于帆面的动量一定有  $p_2 < p_1$ , 空气与帆作用  $\Delta t$  后, 从  $p_2$  减少为 0。