

# 大学 物理学

第4版

学习辅导与习题解答

张三慧 编著

安宇 阮东 李岩松 修订

清华大学出版社

# 大学 物理学

第4版

学习辅导与习题解答

张三慧 编著

安宇 阮东 李岩松 修订

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是张三慧编著的《大学物理学》(第4版)(清华大学出版社2018年出版)一书的学习辅导用书。内容包括该教材各章的概念原理复习、解题要点、思考题选答和习题解答。本书习题内容广泛,事例新颖、典型、有趣,富有启发性,难度有低有高;复习内容重点突出,解题要点明确清楚,习题解答简明扼要。本书不但是学习所配套教材的好帮手,对于选用其他教材学习物理课程的大学生和自学大学物理的读者及中学物理教师也是很好的辅助材料。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学(第4版)学习辅导与习题解答/张三慧等编著.—4版.—北京:清华大学出版社,2019  
(2020.3重印)

ISBN 978-7-302-53387-0

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学—高等学校—教学参考资料 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第175990号

贵州师范学院内部使用

责任编辑:朱红莲

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:25

字 数:609千字

版 次:1990年10月第1版 2019年10月第4版

印 次:2020年3月第2次印刷

定 价:59.00元

产品编号:081555-01

# 致读者

## FOREWORD

### ——怎样学好物理

本书是张三慧《大学物理学》(第4版)(清华大学出版社2018年出版)一书的学习辅导用书。主教材包括两本书,其一为力学、热学,其二为电磁学、光学、量子物理。本书内容包括该书各章概念原理复习、解题要点、部分思考题和全部习题的解答。在具体内容展开之前,先就物理学习方法和要求向读者提出一些建议。

物理学是一门关于自然规律的科学。它是由许多概念和原理组成的,要学好物理就要首先注意理解和掌握有关概念和原理。这在一般情况下就是要掌握各个概念和原理是为什么提出的,它们各自的定义和含义是什么,它们各自的适用范围或条件如何,它们又各和哪些概念和原理有联系,等等。例如,对“功”的概念,就要了解它是考虑力的空间累积作用时提出的,它的定义是力和位移的标量积,力做功的效果是使物体的动能发生改变,而保守力的功是引进势能概念的基础等。概念和原理常常以数学公式的形式出现,对它们的理解绝不等同于仅仅记忆相关的公式,而必须理解如上所述的它们的“物理意义”。

思维是靠语言词句表达的,因此对叙述基本概念与原理的科学词句要记住,而且要能说出来、写下来,这样才能对物理现象进行科学和正确的思考、分析与描述。试问,如果对“做功与路径无关的力叫保守力”这样简明的定义都记不住、说不出来,那么怎么能算是理解了“保守力”这一概念呢?又怎么去理解“势能”的概念以及利用机械能概念去分析解决问题呢?

物理学的概念和原理很多,但它们并不是随意堆积起来的。有一些概念原理是基本的,另一些则是由这些基本概念衍生或推导出来的。学习物理不能只记住单个的概念或原理,而是要分清主次,理解和掌握基本的和导出的概念或原理之间的关系,并且要学会如何推导一些重要的概念和原理。例如要能够自己从功、动能和势能等概念导出机械能守恒定律,从质点的角动量定理导出刚体的定轴转动定律等。这样,才能从整体上系统地理解一定范围(如力学或电磁学)内的物理规律。

正是由于物理学理论是一个系统的整体,所以学习时要从前到后踏踏实实、一步一步地都学好。否则前面的没有学清楚,后面的学习就更困难了。例

如,只有将经典力学学清楚了,才能学好热学、电磁学等;经典力学不通,要学好量子物理是根本不可能的。

学习物理学的一个重要环节是要学习如何应用物理的概念原理来分析解决问题,这一“实践环节”在学习中主要是解答物理习题。关于各类(如力学的、热学的、电磁学的……)习题的具体解题要点,本书将分章予以介绍。下面就解答物理习题,具体到关于课外作业的一般方法和要求作一些说明。

习题是用来帮助理解和巩固物理概念原理的事例,因此要具体分析每一道题的给定条件,然后选择适当的概念和原理进行解答。做题不在“多”,而在“精”,即对每个题目都要真正弄清楚为什么要利用这个而不是那个概念或原理来解答。不要不顾条件就直接套用公式。在书面解答中,要把解题的思路和应用的物理概念原理,即做题的“道理”尽可能简明地写出来。不要小看在解答习题过程中的这种书面表达,它实际上是对思维和表达能力的难得的训练。以后大家在工作中总是要把自己的想法告诉他人而进行交流的,而科学和正确的表达,包括书面表达自己思想的能力是人们必备的一种素质。

很多习题需要数值计算。在这种情况下最好根据题设条件先应用公式进行文字推导,得出求未知量的最终文字表达式,然后再代入数值(注意各代入量的单位)进行计算求出数字结果。这样做,一方面便于从理论根据上进行检查分析,另一方面也便于检查数字计算可能出现的错误。由于许多习题中涉及的物理量是矢量,所以在文字推导过程中要注意矢量和标量的区别,特别是要注意矢量不能按标量只考虑数值来运算,在同一方程式中不能出现矢量项和标量项相等的情况。数字结果位数的取舍要注意有效位数,一般取3位有效数字即可,切不可把计算器上显示的8位数字都照抄到答案中。

在学习方法上,对大学生来说,自学已显得非常重要了。一定要仔细阅读教材(必要时还要选读一些其他参考书),要注意体会其中关于概念原理的表述,特别是定义、定律及其推导过程。书上的例题一般都是教材作者精心选择的具有典型意义的事例,一定要仔细研究其解答过程的思路与根据,并在自己解答习题时模仿应用。如果做课外作业时遇到困难,有必要参考本书的习题解答时,也要真正弄懂解题思路,在作业本上给出自己的解答,切不可照抄应付,学习是来不得半点虚假的。

除自学外,在校大学生也要注意向教师学习,注意课堂听讲。对于教材内容,教师总会有独到的、重点的分析。聆听教师的讲解并从中获得教益是难得的学习方式,应该自觉地珍惜把握。在自学的基础上,就教师的讲解有重点地记一些心得笔记是一种很好的学习方法。

常听说“物理难学”,事实并不完全如此。只要学习得法、刻苦认真,物理课将是一门引人入胜、启迪思维、收获丰硕、终身受益的课程。

这里,向大家介绍一些当年我们学习的情况。那是半个世纪以前的事了,当时我们同王竹溪先生学习热学。图1是现今仍保存的我的作业本,封面上我的学号就是王先生补写上去的。作业解答除理论分析外,还常有计算题。例如图2所示的那个题目要求6位有效数字。当时用于计算的工具有计算尺,但计算尺只给出3位有效数字,除它以外就只好用对数表了。学生用4位对数表不符合要求,那就只能用已有的8位对数表,取其结果的6位作为答数。这一个题就要求计算108个数目。当时我们都认真地用8位对数表一个一个地计算了,未曾稍有马虎。从图2中还可以看出王先生教学是如何认真。对于计算结果的每个数字,他都认真地核对,哪怕最后一位错了,他也认真地改正,图2中十几处改动就是他的亲笔

批注。每当回忆起王先生这样的教风,我都深深为之感动,并在自己的教学中,奉为圭臬,奋力相从。



图 1

6 L. Helmholtz and J. Otto used 1 mg Hg as the unit of pressure and the volume at 1 m Hg and 0°C as the unit of volume. If quantities in these units are denoted by a star, then the equation of state is

$$p^* V^* = A^* + B^* p^* + C^* p^{*2} + \dots$$

Suppose that Amagat units are used in the unstarred quantities, that is, the unit of pressure is 1 atm and the volume at 1 atm and 0°C is the unit of volume. Let the relations between the starred and unstarred pressure and volume be  $p^* = ap$ ,  $V^* = bV$ . Find the values of  $a$  and  $b$  and express the unstarred virial coefficients in terms of the starred ones. Reduce the following sets of the starred virial coefficients to unstarred ones  $C$  see Zeit. f. Phys. vols. 33 and 38 (1935-6).

Sol.  $a = 76/100 = 0.76000$ .

$$b = V_{(p^*=1b)}^* = \frac{1}{.76} [A^* + B^* a + C^* (a.76)^2 + \dots]$$

Substituting  $V^* = bV$ ,  $p^* = ap$  into  $p^* V^* = A^* + B^* p^* + C^* p^{*2} + \dots$

we get  $pV = \frac{A^*}{ab} + \frac{B^*}{b} p + \frac{C^*}{b} p^2 + \dots$

Comparing this expression with  $pV = A + BP + Cp^2 + \dots$

we get  $A = A^*/ab$ ,  $B = B^*/b$ ,  $C = C^*/b$ , ...

Applying these formula to the numerical examples, we have the following sets of coefficients, where  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$  are given values:

(1) Helium. $b = 1.31556$						
$T$	$A^*$	$B^* \times 10^4$	$C^* \times 10^7$	$A$	$B \times 10^4$	$C$
400	2.46244	5.9451	0	2.46244	4.5399	0
300	2.09665	6.1600	0	2.09778	4.6724	0
200	1.73091	6.4933	0	1.73124	4.7352	0
100	1.36518	6.6894	0	1.36541	5.0750	0
50	1.18223	6.8887	0	1.18243	5.2862	0
0	0.99930	6.9543	0	0.99947	5.2862	0
-50	0.81642	7.0000	1.63	0.81656	5.3209	1.63
-100	0.63352	6.9900	2.85	0.63364	5.3133	2.85
-150	0.45062	6.7000	4.49	0.45071	5.0924	4.49
-183	0.32492	6.2286	7.35	0.32498	4.7345	7.35

(2) Hydrogen. $b = 1.31553$						
$T$	$A^*$	$B^* \times 10^4$	$C^* \times 10^7$	$A$	$B \times 10^4$	$C$
200	1.73066	9.2168	0	1.73100	7.0061	0
100	1.36506	9.1400	0	1.36533	6.7477	0
50	1.18212	8.9000	0	1.18235	6.7653	0
0	0.99918	8.0044	0.375	0.99938	6.244	0.375
-50	0.81631	7.1000	0.887	0.81647	5.3477	0.887
-100	0.63344	6.3700	1.551	0.63356	4.8677	1.551
-150	0.45057	1.7300	2.469	0.45066	1.3155	2.469
-183	0.32488	-3.2500	6.600	0.32494	-2.4710	6.600

图 2

我们当时不但学习认真,而且有错就改正,从不搞虚假自欺欺人。图3是该习题本的一页,打“\*”号的解答是对上面解答的补充。这一补充我当时做不出来,是请教了顾之雨同学后做出的。据实相告,我在本页下面注明了“来自顾之雨的习题本”。

$$T = \frac{N_1 T_1 + N_2 T_2}{N_1 + N_2} = \frac{P V_1 + P V_2}{R(N_1 + N_2)}$$

$$P = \frac{P V_1 + P V_2}{V_1 + V_2}$$

The change of entropy is

$$\begin{aligned} \Delta S &= N_1 \int_{T_1}^T c_p \frac{dT}{T} + N_2 \int_{T_2}^T c_p \frac{dT}{T} - N_1 R \ln \frac{P}{P_1} - N_2 R \ln \frac{P}{P_2} \\ &= \frac{N_1 R}{\gamma-1} \ln \frac{T}{T_1} + \frac{N_2 R}{\gamma-1} \ln \frac{T}{T_2} - N_1 R \ln \frac{P}{P_1} - N_2 R \ln \frac{P}{P_2} \\ &= \frac{N_1 R}{\gamma-1} \ln \frac{P_1^{1/\gamma} (V_1 + V_2)^{\gamma-1}}{P (N_1 + N_2)^{\gamma-1}} - \frac{N_2 R}{\gamma-1} \ln \frac{P_2^{1/\gamma} (V_1 + V_2)^{\gamma-1}}{P (N_1 + N_2)^{\gamma-1}} \\ &\quad - N_1 R \ln \frac{P}{P_1} - N_2 R \ln \frac{P}{P_2} \end{aligned}$$

\* We now proceed to prove  $\Delta S > 0$ . Write in another form

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{(N_1 + N_2) R}{\gamma-1} \log(\gamma^{\gamma-1}) - \frac{N_1 R}{\gamma-1} \log(\gamma^{\gamma-1} P_1^{-\gamma}) - \frac{N_2 R}{\gamma-1} \log(\gamma^{\gamma-1} P_2^{-\gamma}) \\ &= \frac{N_1 + N_2}{\gamma-1} R \log \left[ \gamma^{\gamma-1} \left( \frac{P_1 + P_2}{P} \right)^{\gamma} \right] - \frac{N_1 R}{\gamma-1} \log \left[ \gamma^{\gamma-1} \left( \frac{P_1}{N_1} \right)^{\gamma} \right] - \frac{N_2 R}{\gamma-1} \log \left[ \gamma^{\gamma-1} \left( \frac{P_2}{N_2} \right)^{\gamma} \right] \end{aligned}$$

since  $\frac{T}{P} = \frac{1}{R} \frac{V_1 + V_2}{N_1 + N_2}$ .

Lemma: Given  $0 < m < 1$ ,  $0 < n < 1$ , and  $m+n=1$ , and two positive reals  $a, b$ .

If  $b > a$ ,  $\left[1 + \frac{b-a}{a}\right]^m < 1 + m \frac{b-a}{a}$ ,  $\rightarrow a \left(\frac{b}{a}\right)^m < (m)a + mb$   
or  $a^n b^m < na + mb$ .

If  $a > b$ ,  $\left[1 + \frac{a-b}{b}\right]^m < 1 + m \frac{a-b}{b}$ ,  $\rightarrow a^n b^m < na + mb$ .

Then we have  $a^n b^m < na + mb$

Set  $n = \alpha / (\alpha + \beta)$ ,  $m = \beta / (\alpha + \beta)$   
then  $a^{\alpha/\beta} b^{\beta/\alpha} < \frac{\alpha a + \beta b}{\alpha + \beta}$

Hence  $a^\alpha b^\beta < \left[ \frac{\alpha a + \beta b}{\alpha + \beta} \right]^{\alpha + \beta}$

\* From exercise of 顾之雨

图 3

我在每一届我教的班上都要出示这本习题本,并向同学们说明当时情况以激励同学。课后常听到回应:“深受感动,受益匪浅。”

最后希望大家都认真学习,取得实实在在的好成绩!

张三慧

# 目 录

## CONTENTS

### 第 1 篇 力 学

第 1 章	质点运动学	3
第 2 章	运动与力	17
第 3 章	动量与角动量	35
第 4 章	功和能	49
第 5 章	刚体的转动	68
第 6 章	振动	84
第 7 章	波动	99
第 8 章	狭义相对论基础	114

### 第 2 篇 热 学

第 9 章	温度和气体动理论	129
第 10 章	热力学第一定律	147
第 11 章	热力学第二定律	165

### 第 3 篇 电磁学

第 12 章	静电场	179
第 13 章	电势	194
第 14 章	静电场中的导体	210
第 15 章	静电场中的电介质	218
第 16 章	恒定电流	234
第 17 章	磁场和它的源	242

第 18 章	磁力 .....	254
第 19 章	磁场中的磁介质 .....	269
第 20 章	电磁感应 .....	277
第 21 章	麦克斯韦方程组和电磁辐射 .....	290

## 第 4 篇 光 学

第 22 章	光的干涉 .....	301
第 23 章	光的衍射 .....	310
第 24 章	光的偏振 .....	317
第 25 章	几何光学 .....	325

## 第 5 篇 量 子 物 理

第 26 章	波粒二象性 .....	343
第 27 章	薛定谔方程 .....	355
第 28 章	原子中的电子 .....	361
第 29 章	固体中的电子 .....	375
第 30 章	核物理 .....	381
数值表	.....	391

第

1

篇

力 学

---

贵州师范学院内部使用



# 质点运动学

## 一、概念原理复习

### 1. 参考系

描述质点运动时用的,固定在参考物上的空间坐标系(如笛卡儿直角坐标系)和配置在各处的一套同步的钟构成一个参考系,通常就以选定的参考物命名,如太阳坐标系、地心参考系、地面参考系等。

### 2. 运动函数

相对于一定参考系表示的质点位置随时间变化的函数,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}$$

其中  $\mathbf{r}(t)$  为质点在时刻  $t$  的径矢,即从坐标系原点指到时刻  $t$  质点所在位置的长度矢量。 $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  分别为径矢沿  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的分量,也表示沿三个轴的分运动。上式表示运动的合成。

### 3. 位移和速度

质点在时间  $\Delta t$  内的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$$

一般地

$$|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$$

质点在时刻  $t$  的速度

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

速度的方向沿质点运动轨道的切线方向且指向运动的前方。 $\frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dy}{dt}$ ,  $\frac{dz}{dt}$  为速度沿  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的分量,为代数值,其正负表示该分量与相应的坐标轴的方向相同或相反。

### 4. 加速度和匀加速运动

质点在时刻  $t$  的加速度

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k}$$

匀加速运动:  $a$  为常矢量, 由积分可得

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

式中  $(\boldsymbol{r}_0, \boldsymbol{v}_0)$  为初始条件。

匀加速直线运动: 取运动轨道为  $x$  轴, 初始条件为  $x_0=0$  和  $v_0$ , 则

$$v = v_0 + at, \quad x = v_0t + \frac{1}{2}at^2, \quad v^2 - v_0^2 = 2ax$$

### 5. 抛体运动

抛体运动为平面运动, 设运动平面为  $x$ - $y$  平面,  $y$  轴竖直向上, 则有  $a_x=0, a_y=-g$ , 以抛出点为原点, 抛出时开始计时, 则有

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \cos\theta, & v_y &= v_0 \sin\theta - gt \\ x &= v_0 \cos\theta \cdot t, & y &= v_0 \sin\theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned}$$

抛体运动可以看成是沿竖直方向的匀加速运动和水平方向的匀速运动的合成。

### 6. 圆周运动

线速度或速率  $v = \frac{ds}{dt}$

角速度  $\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{R}$

角加速度  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

加速度  $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_n + \boldsymbol{a}_t, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}$

法向加速度  $a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$  (指向圆心)

切向加速度  $a_t = \frac{dv}{dt} = R\alpha$ , 沿轨道的切线方向。  $a_t > 0$  表示  $\boldsymbol{a}_t$  与  $\boldsymbol{v}$  的方向相同, 质点速率不断增大。

### 7. 相对运动

运动的描述随所用的参考系的不同而不同。对于相对速度为  $\boldsymbol{u}$  的两个参考系, 同一质点的

位移变换:  $\Delta \boldsymbol{r}_{SE} = \Delta \boldsymbol{r}_{SV} + \Delta \boldsymbol{r}_{VE}$

速度变换:  $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{u}$

加速度变换:  $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{a}_0, \quad \boldsymbol{a}_0 = \frac{d\boldsymbol{u}}{dt}$

$\boldsymbol{a}_0 = \mathbf{0}$  时,  $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$

以上变换式都是根据绝对时空概念导出的, 只适用于  $u$  远小于光速  $c$  的情形。它们称为伽利略变换。

## 二、解题要点

(1) 解题的一般原则是先仔细审题, 了解题意, 构思出题述的物理图像, 明确已知和要

求；然后根据题目给出的条件选择合适的数学公式求解。解题时如涉及数字运算，要注意有效位数，一般取三位有效数字即可。还要注意公式中各量的单位。本教材的公式与计算都用国际单位制的单位。对计算的数字结果要判断其是否合乎实际。对不合乎实际的结果，要仔细审查解题的过程以纠正其错误。

(2) 本章题目只涉及质点的运动，题目中所指的物体都当质点看待。对直线运动或其合成，一般要画出坐标系以帮助表达和思考，本章习题所涉及的直线运动(或直线分运动)都是匀加速的，即加速度保持不变。代公式时要注意这一条件。

(3) 对圆周运动除会计算法向(向心)加速度外，还要会计算切向加速度。注意切向加速度  $dv/dt$  是速率的变化率，即速率对时间的导数，而速率又是时间的函数。

(4) 在速度变换的计算中，要十分明确各个速度是“谁对谁”的速度，要会用速度变换的“串联”法则(即伽利略变换)：

$$\boldsymbol{v}_{SE} = \boldsymbol{v}_{SV} + \boldsymbol{v}_{VE}$$

(5) 在本章和以后的力学题目的分析与计算中要特别注意矢量与标量的区别，并能用适当的文字标志来表示它们：矢量在书中用黑斜体表示，手写体请在相应字符的正上方标以箭头。

(6) 解题要能正确表达思路，写出各步骤的根据，不能只写公式和数字。只有写出正确的文字表达才能说明自己真正理解了物理概念和定律。

### 三、思考题选答

1.7 根据开普勒第一定律，行星轨道为椭圆(图 1.1)。已知任一时刻行星的加速度方向都指向椭圆的一个焦点(太阳所在处)。分析行星在通过图中  $M, N$  两位置时，它的速率分别应正在增大还是正在减小？

答 行星越过  $M$  点时，其切向加速度  $a_t$  沿轨道的切线方向而和其速度方向相反， $dv/dt < 0$ ，所以速率在减小。行星越过  $N$  点时， $a_t$  的方向与速度的方向相同， $dv/dt > 0$ ，速率在增大。

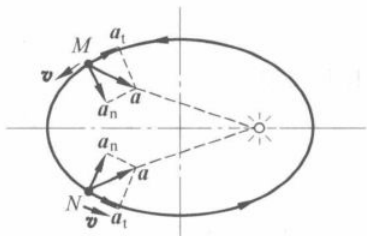


图 1.1 思考题 1.7 答用图

1.8 一斜抛物体的水平初速度是  $v_{0x}$ ，它的轨道最高点处的曲率圆的半径是多大？

答 斜抛物体的轨道最高点处的斜率是水平的，该处的曲率圆的半径沿竖直方向，该处物体的速度方向为水平方向。由于物体在水平方向没有加速度，所以在此处物体的切向加速度为零。物体的总加速度即法向加速度沿竖直方向向下，此加速度就是重力加速度  $g$ 。由法向加速度公式  $a_n = v^2/R$  可得所求曲率圆的半径为

$$R = v^2/a_n = v_{0x}^2/g$$

1.11 如果使时间反演，即把时刻  $t$  用  $t' = -t$  取代，质点的速度(原书式(1.7))、加速度(原书式(1.15))、运动学公式(以原书式(1.21)和式(1.22)的第二式为例)等将会有何变化？电影中武士登上高墙的运动形象是武士跳下动作的实拍录像倒放的结果，为什么看起来和“真正的”跃上动作一样？

答 以  $t' = -t$  代替  $t$  后,原书式(1.7)将变为  $\boldsymbol{v}' = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt'} = -\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = -\boldsymbol{v}$ ,即速度与原来的方向相反。原书式(1.15)将变为  $\boldsymbol{a}' = \frac{d\boldsymbol{v}'}{dt'} = -\frac{d\boldsymbol{v}}{dt'} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt'^2}$ ,即加速度不变。由此可知,质点运动将逆向重复原来的运动,即如倒放电影片时所看的。武士由高处向下跳,是加速运动,倒放时,速度反向,而加速度方向不变,则运动表现为向上减速,和真的直接用同样初速上抛时的运动一样。这样编辑电影时,就可以用原来下跳的影片倒录成情节要求的向上跃的影片以“欺骗”或“迷惑”观众了。

这一解答也说明了“纯粹”的机械运动是可逆的,即一旦把质点的速度逆过来,它的运动就可以逆向重复原来的运动过程,如时间倒流了一样。

## 四、习题解答

1.1 木星的一个卫星——木卫1——上面的珞玑火山喷发出的岩块上升高度可达200 km,这些石块的喷出速度是多大?已知木卫1上的重力加速度为  $1.80 \text{ m/s}^2$ ,而且在木卫1上没有空气。

$$\text{解 } v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 1.80 \times 200 \times 10^3} = 849 \text{ (m/s)}$$

1.2 一种喷气推进的实验车,从静止开始可在1.80 s内加速到1600 km/h的速率。按匀加速运动计算,它的加速度是否超过了人可以忍受的加速度  $25g$ ?这1.80 s内该车跑了多长距离?

解 实验车的加速度为

$$a = \frac{v}{t} = \frac{1600 \times 10^3}{3600 \times 1.80} = 2.47 \times 10^2 \text{ (m/s}^2\text{)} = 25.20g$$

基本上超过了  $25g$ 。

1.80 s内实验车跑的距离为

$$s = \frac{v}{2}t = \frac{1600 \times 10^3}{2 \times 3600} \times 1.80 = 400 \text{ (m)}$$

1.3 一辆卡车为了超车,以90 km/h的速度驶入左侧逆行道时,猛然发现前方80 m处一辆汽车正迎面驶来。假定该汽车以65 km/h的速度行驶,同时也发现了卡车超车。设两司机的反应时间都是0.70 s(即司机发现险情到实际刹车所经过的时间),他们刹车后的减速度都是  $7.5 \text{ m/s}^2$ ,试问两车是否会相撞?如果会相撞,相撞时卡车的速度多大?

解 已知  $v_{10} = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_{20} = 65 \text{ km/h} = 18 \text{ m/s}$ ,  $s_0 = 80 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.70 \text{ s}$ ,  $a = 7.5 \text{ m/s}^2$ 。两车开始刹车时,它们之间的距离为

$$s'_0 = s_0 - (v_{10} + v_{20})\Delta t = 80 - (25 + 18) \times 0.70 = 50 \text{ (m)}$$

卡车到停止需继续开行的距离

$$s_1 = \frac{v_{10}^2}{2a} = \frac{25^2}{2 \times 7.5} = 41.7 \text{ (m)}$$

汽车到停止需继续开行的距离

$$s_2 = \frac{v_{20}^2}{2a} = \frac{18^2}{2 \times 7.5} = 21.7 \text{ (m)}$$

因为  $s_1 + s_2 > s'_0$ , 所以两车会相撞。

以  $t$  表示两车刹车后到相撞所用的时间, 则有

$$s'_0 = v_{10}t - \frac{1}{2}at^2 + v_{20}t - \frac{1}{2}at^2 = (v_{10} + v_{20})t - at^2$$

代入已知数, 为

$$50 = (25 + 18)t - 7.5t^2$$

解此方程可得

$$t = 1.62 \text{ s}, 4.11 \text{ s (舍去)}$$

由此得碰撞时卡车的速度为

$$v_1 = v_{10} - at = 25 - 7.5 \times 1.62 = 12.9 \text{ (m/s)} = 46 \text{ (km/h)}$$

**1.4** 跳伞运动员从 1200 m 高空下跳, 起初不打开降落伞作加速运动。由于空气阻力的作用, 会加速到一“终极速率”200 km/h 而开始匀速下降。下降到离地面 50 m 处时打开降落伞, 很快速率会变为 18 km/h 而匀速下降着地。若起初加速运动阶段的平均加速度按  $g/2$  计, 此跳伞运动员在空中一共经历了多长时间?

**解**  $h_0 = 1200 \text{ m}$ ,  $v_1 = 200 \text{ km/h} = 55.6 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 18 \text{ km/h} = 5 \text{ m/s}$ ,  $h_2 = 50 \text{ m}$ 。  
运动员加速下落的时间

$$t_1 = \frac{v_1}{g/2} = \frac{2 \times 55.6}{9.8} = 11.3 \text{ (s)}$$

加速下落的距离

$$h_1 = \frac{v_1^2}{2g/2} = \frac{v_1^2}{g} = \frac{55.6^2}{9.8} = 315 \text{ (m)}$$

以速率  $v_1$  匀速下落的时间

$$t'_1 = \frac{h_0 - h_1 - h_2}{v_1} = \frac{1200 - 315 - 50}{55.6} = 15.0 \text{ (s)}$$

以速率  $v_2$  匀速下落的时间

$$t_2 = \frac{h_2}{v_2} = \frac{50}{5} = 10 \text{ (s)}$$

运动员在空中总共经历的时间为

$$t = t_1 + t'_1 + t_2 = 11.3 + 15.0 + 10 = 36.3 \text{ (s)}$$

**1.5** 由消防水龙带的喷嘴喷出的水的流量是  $q = 280 \text{ L/min}$ , 水的流速  $v = 26 \text{ m/s}$ 。若这喷嘴竖直向上喷射, 水流上升的高度是多少? 在任一瞬间空中有多少升水?

**解** 水流上升的高度

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{26^2}{2 \times 9.8} = 34.5 \text{ (m)}$$

同一滴水在空中运动的时间

$$t = \frac{2v}{g} = \frac{2 \times 26}{9.8} = 5.31 \text{ (s)}$$

在时间  $t$  内喷嘴喷出的水即在任一瞬间空中所有的水。这些水的总体积是

$$V = qt = 280 \times 5.31/60 = 24.7 \text{ (L)}$$

1.6 在以初速率  $v_0 = 15.0 \text{ m/s}$  竖直向上扔一块石头后,

(1) 在  $\Delta t_1 = 1.0 \text{ s}$  末又竖直向上扔出第二块石头,后者在  $h = 11.0 \text{ m}$  高度处击中前者,求第二块石头扔出时的速率;

(2) 若在  $\Delta t_2 = 1.3 \text{ s}$  末竖直向上扔出第二块石头,它仍在  $h = 11.0 \text{ m}$  高度处击中前者,求这一次第二块石头扔出时的速率。

解 (1) 设第一块石头扔出后  $t$  秒末被第二块击中,则

$$h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

代入已知数得

$$11 = 15t - \frac{1}{2} \times 9.8t^2$$

解此方程,可得二解为

$$t_1 = 1.84 \text{ s}, \quad t'_1 = 1.22 \text{ s}$$

第一块石头上升到顶点所用的时间为

$$t_u = v_{10}/g = 15/9.8 = 1.53 \text{ (s)}$$

由于  $t_1 > t_u$ , 这对应于第一块石头回落时与第二块相碰; 又由于  $t'_1 < t_u$ , 这对应于第一块石头上升时被第二块赶上击中。

以  $v_{20}$  和  $v'_{20}$  分别对应于在  $t_1$  和  $t'_1$  时刻两石块相碰时第二石块的初速度, 则由于

$$h = v_{20}(t_1 - \Delta t_1) - \frac{1}{2} g(t_1 - \Delta t_1)^2$$

所以

$$v_{20} = \frac{h + \frac{1}{2} g(t_1 - \Delta t_1)^2}{t_1 - \Delta t_1} = \frac{11 + \frac{1}{2} \times 9.8 \times (1.84 - 1)^2}{1.84 - 1} = 17.2 \text{ (m/s)}$$

同理,

$$v'_{20} = \frac{h + \frac{1}{2} g(t'_1 - \Delta t_1)^2}{t'_1 - \Delta t_1} = \frac{11 + \frac{1}{2} \times 9.8 \times (1.22 - 1)^2}{1.22 - 1} = 51.1 \text{ (m/s)}$$

(2) 由于  $\Delta t_2 = 1.3 \text{ s} > t'_1$ , 所以第二石块不可能在第一块上升时与第一块相碰。对应于  $t_1$  时刻相碰, 第二块的初速度为

$$v''_{20} = \frac{h + \frac{1}{2} g(t_1 - \Delta t_2)^2}{t_1 - \Delta t_2} = \frac{11 + \frac{1}{2} \times 9.8 \times (1.84 - 1.3)^2}{1.84 - 1.3} = 23.0 \text{ (m/s)}$$

1.7 一质点在  $xy$  平面上运动, 运动函数为  $x = 2t, y = 4t^2 - 8$  (采用国际单位制)。

(1) 求质点运动的轨道方程并画出轨道曲线;

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

解 (1) 在运动函数中消去  $t$ , 可得轨道方程为

$$y = x^2 - 8$$

轨道曲线为一抛物线如图 1.2 所示。