

“十三五”规划教材

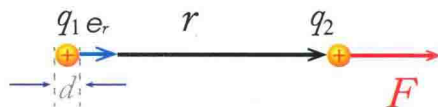
# 大学

# 物理学教程

# 下

## DAXUE WULIXUE JIAOCHENG

主 编 孔晋芳 居家奇 谭默言



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

高等教育“十三五”规划教材



# 大学物理学教程

## (下)

主 编 孔晋芳 居家奇 谭默言



北京邮电大学出版社  
· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书参照教育部物理基础课程教学指导分委会制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》编写。考虑到应用技术型本科院校的实际特点,本书内容在涵盖基本要求核心内容的同时补充了阅读材料。本书分为上、下两册。上册包括力学基础、振动和波动、波动光学、狭义相对论基础;下册包括热学、电磁学和量子物理基础。

本书可作为高等院校工科的大学物理课程教材,也可供文理科相关专业阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学教程. 下 / 孔晋芳, 居家奇, 谭默言主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5635-5124-8

I. ①大… II. ①孔… ②居… ③谭… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 114833 号

- 
- 书 名 大学物理学教程(下)  
主 编 孔晋芳 居家奇 谭默言  
责任编辑 沙一飞  
出版发行 北京邮电大学出版社  
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)  
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)  
网 址 www.buptpress3.com  
电子信箱 ctrd@buptpress.com  
经 销 各地新华书店  
印 刷 北京时捷印刷有限公司  
开 本 787 mm×960 mm 1/16  
印 张 13.5  
字 数 300 千字  
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
- 

ISBN 978-7-5635-5124-8

定价: 36.00 元

如有质量问题请与发行部联系  
版权所有 侵权必究

# 广益教育“九斗”App 操作说明

本书为“互联网+”立体化教材,配有广益教育助学助教平台——“九斗”App。

使用前,请按照以下步骤操作使用。

步骤一,先使用智能手机扫描本书封面图标中的二维码(见下图),下载安装免费的“九斗”APP。提示:下载界面会自动识别安卓或苹果手机。




步骤二,安装成功之后,点击“九斗”APP 进入使用界面。

步骤三,首次使用 APP 需注册。注册时,如果您是教师用户,请提交相关资料进行审核,审核通过后即可获得教师用户的相关功能。

步骤四,注册成功后,使用时,请按照软件提示或宣传视频操作即可。

提示:

1. 浏览资源前请先扫描封底二维码进行教材验证;
2. 对教材中带有  标志的图形图像,使用 AR 扫描即可显示相关资源;
3. 教材中的二维码资源请使用“九斗”APP 中的扫一扫功能进行浏览。

在使用过程中,如有疑问,请随时与我们联系!

联系电话:010-82330186、13811568712

客服 QQ:2158198813

电子邮箱:kf@guangyiedu.com

# 前 言

本书是基于应用技术型本科院校实际特点及当前教学改革要求而编写的。编写过程中总结了编者所在教学团队多年教学改革的经验并借鉴了国内外优秀教材成果。本书力求主干突出、论证简明、理论联系实际。本书内容选择参照了教育部物理基础课程教学指导分委会制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》。在涵盖基本要求核心内容的同时补充了物理学发展史及物理学在工程技术中应用方面的阅读材料。

本书分为上、下两册。上册包括力学基础、振动和波动、波动光学、狭义相对论基础；下册包括热学、电磁学和量子物理基础。各章均配有提要及习题，供学习和复习使用。本书可作为授课时数为100~120学时的高等院校工科大学物理课程教材，也可供文理科相关专业阅读。

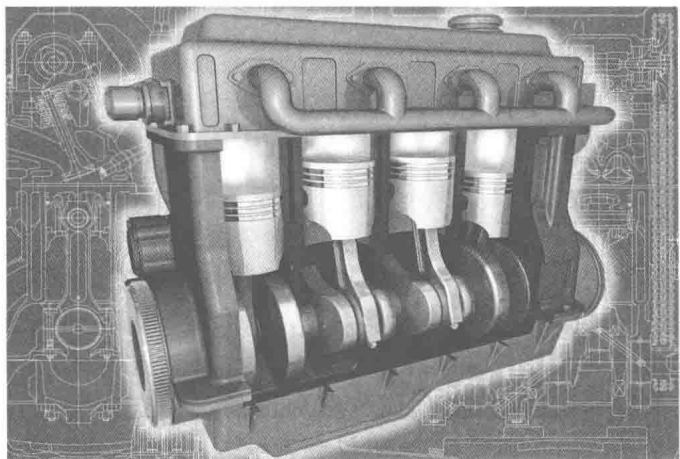
本书(下册)由孔晋芳,居家奇,谭默言主编,李桦、林晓艳老师仔细审阅了全书,大学物理教研室其他老师均参与了每一章节的审阅。参与编写和审阅的老师均为具有一线教学经验的教师。本书在编写过程中得到了所在教学团队的大力支持,也得到了院系领导和校领导的关心和指导,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,错漏不当之处在所难免,诚盼老师和同学们批评指正。

编 者

第 8 章 气体动理论 .....	1
8.1 平衡态 气体的状态参量 理想气体状态方程 .....	2
8.2 物质的微观模型 统计规律性 .....	5
8.3 理想气体的压强和温度的微观解释 .....	9
8.4 麦克斯韦气体分子速率分布律 .....	13
8.5 能量均分定理 理想气体的内能 .....	18
8.6 分子平均碰撞频率和平均自由程 .....	22
第 9 章 热力学基础 .....	31
9.1 准静态过程 功和热量 .....	32
9.2 内能 热力学第一定律 .....	35
9.3 理想气体的等值过程 .....	37
9.4 绝热过程和多方过程 .....	43
9.5 循环过程 卡诺循环 .....	46
9.6 热力学第二定律 .....	52
*9.7 熵 熵增加原理 .....	56
第 10 章 真空中的静电场 .....	67
10.1 电荷的量子化 电荷守恒定律 .....	68
10.2 电场强度 .....	70
10.3 电场强度通量 高斯定理 .....	78
10.4 静电场的环路定理 电势能 .....	88
10.5 电势 .....	91
10.6 电势和电场强度的关系 .....	96

第 11 章 稳恒磁场 .....	108
11.1 磁场 磁感应强度 .....	109
11.2 毕奥-萨伐尔定律 .....	112
11.3 磁场中的高斯定理 .....	118
11.4 安培环路定理 .....	122
11.5 磁场对运动电荷的作用 .....	128
11.6 磁场对载流导线的作用 .....	133
第 12 章 电磁感应 .....	146
12.1 电源 电动势 .....	147
12.2 电磁感应现象 楞次定律 .....	148
12.3 动生电动势 感生电动势 .....	153
12.4 自感 互感 .....	160
12.5 磁场的能量 磁场能量密度 .....	165
第 13 章 量子物理基础 .....	173
13.1 热辐射 .....	174
13.2 光电效应 .....	179
13.3 康普顿效应 .....	184
13.4 氢原子的玻尔理论 .....	188
13.5 粒子的波动性 .....	193
13.6 不确定关系 .....	196
习题答案 .....	204



## 第 8 章

# 气体动理论

气体动理论的建立和发展标志着物理学进入了分子世界。作为第一个微观理论,它采用的概率概念和统计平均方法已为尔后的统计理论继承。但是,由于气体动理论以分子为统计的个体,它的进一步发展需要对分子模型和分子间相互作用作出相当具体而又并无根据的假设和猜测,这是一个根本的困难。1902年,J. W. 吉布斯在系统概念的基础上建立了统计物理,避免了气体动理论的困难。气体理论的研究方法是从物质结构和分子运动论出发,运用力学规律和统计平均方法,解释与揭示气体宏观现象和宏观规律的本质,并确定宏观量气体的压强、温度、内能等与微观量之间的关系,和给出与之相应的微观量平均值之间的关系。



## 平衡态 气体的状态参量

### 8.1 理想气体状态方程

#### 8.1.1 平衡态

##### 1. 热力学系统

热学把大量微观粒子组成的宏观物体作为它的研究对象,这一研究对象称为热力学系统,简称系统。而把系统以外的物质称为外界。以气缸内的气体作为研究对象,该气体我们称为研究的系统,而气缸周围的物质就称为外界。热力学系统的热现象规律,不仅和系统本身有关,也和系统所处的环境有关。一般来讲系统和外界之间有相互作用(如热传递、质量交换等)。根据系统和外界的交换特点,我们可以把系统分为三类:开放系统(系统与外界之间,既有物质交换,又有能量交换)、封闭系统(系统与外界之间,没有物质交换,只有能量交换)和孤立系统(系统与外界之间,既无物质交换,又无能量交换)。

##### 2. 平衡态

热力学系统中大量的粒子不停地作无规则的热运动,经过一段时间后,在不受外界影响(不做功、不传热)的条件下,系统所有可观测的宏观性质不随时间改变的状态,称为平衡态。其他状态称为非平衡态。

有一封闭容器,用隔板将它分为A、B两部分。如图8-1(a)所示,A部分装有气体,B部分抽成真空。当隔板抽去以后,由于A、B两部分压强不相同,A部分的气体会向B部分运动。在这个过程中,气体的状态是随着时间变化的,各部分的宏观性质不相同,这样的状态为非平衡态。但经过一段时间以后,容器中气体的宏观量趋于一致,容器中的状态不再随时发生变化,此时如果没有外界的作用,气体将

保持这一状态,如图 8-1(b)所示。

需要指出的是,处在平衡态的大量分子仍在作热运动,而且因为碰撞,每个分子的速度经常在变,但是系统的宏观量不随时间改变,因此平衡态是一种动态平衡。系统达到平衡态时,其宏观性质不随时间改变,但并不意味着系统的所有宏观状态值处处相同。例如,由于重力的影响,大容器中处于平衡态的气体在不同高度处的压强和密度并不相同。只有这种差别可以忽略时,方可认为系统的宏观状态量处处相同。自然界中一个完全不受外界影响的系统实际上是不存在的,因此平衡态是一个理想化模型。

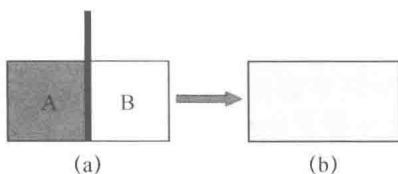


图 8-1 平衡态

### 8.1.2 气体的状态参量

当系统处于平衡态时,其宏观性质可以用一组确定的宏观量来描述,这些宏观量我们称为状态参量。对一定量的气体,我们常用气体所占的体积  $V$ 、气体的压强  $p$  和气体的温度  $T$  来描述处于平衡态的系统的状态参量。

气体的体积是指气体分子所能达到的全部空间,实际上,气体所占的体积即为容器容积。在国际单位制中,气体体积的国际单位为  $\text{m}^3$ (立方米),有时也用 L(升)作为单位,换算关系为  $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$ 。

压强是指气体碰撞容器壁时对单位面积容器壁的作用力,是大量气体分子撞击容器壁的宏观效果。设作用在容器壁上的总压力为  $F$ ,容器壁的总面积为  $S$ ,则气体压强为  $p = \frac{F}{S}$ 。在国际单位制中,压强的单位是帕斯卡,简称 Pa(帕),有时也用 atm(大气压强)和 mmHg 作为单位。换算

关系为  $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$ 。通常人们把  $45^\circ$  纬度海平面处测得的  $0^\circ \text{C}$  时大气压值称为一个标准大气压。

温度是表示物体冷热程度的物理量。温度的数值标定方法称为温标。热力学温标为最基本的温标,一切温度的最终测量以热力学温标为准。在国际单位制中,热力学温度的单位为开尔文(K),它是物理学七个基本量之一。在工程上和日常生活中,我们常常使用摄氏温标( $^\circ\text{C}$ ),摄氏温度与热力学温度之间的换算为  $T = t + 273.15$ 。

### 8.1.3 理想气体状态方程

当系统处于热平衡态时,描写气体该状态的三个状态参量压强、体积和温度之间存在一定的函数关系,各个状态参量之间的关系式我们称为气体的状态方程式。气体状态方程式的具体形式与其性质和所处的条件有关,一般来讲这个方程的形式是比较复杂的。本书我们只讨论理想气体的状态方程。

一般气体,在压强不太大(与大气压相比)和温度不太低(与室温相比)的条件下,遵守三大实验定律:玻意耳-马略特定律、查理定律和盖-吕萨克定律。我们把遵从上述三大实验定律的气体称为理想气体。

由气体的三大实验定律得到一定质量的理想气体状态方程为

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \quad (8-1)$$

式(8-1)中  $p, V, T$  为理想气体在某一平衡态下的三个状态参量; $m$  为气体的质量; $M$  为气体的摩尔质量; $\nu$  为气体物质的量; $R$  为普适气体常量,也称摩尔气体常数。在国际单位制中,

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

由式(8-1)可知,只要知道三个状态参量中任意两个量,便可求出第三个量。

由阿伏伽德罗常量

$$N_A = 6.022\ 136\ 7(36) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

引入玻耳兹曼常量

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

因此可以把式(8-1)改写为

$$pV = \nu N_A \cdot kT = NkT \quad (8-2)$$

或

$$p = nkT \quad (8-3)$$

式中,  $N$  为容器中总的气体分子数;  $n = \frac{N}{V}$  是单位体积内的气体分子数, 也称为分子数密度。

理想气体实际是不存在的, 它只是真实气体的初步近似。一般气体在温度不太低、压强不太大时, 都可近似为理想气体。因此研究理想气体各状态参量之间的关系, 即理想气体状态方程, 仍有重要意义。

#### 8.1.4 热力学第零定律

在与外界影响隔绝的情况下, 有 A、B 两个系统, 各自处在一个平衡态。现使 A、B 两系统相互接触, 则两系统之间可以发生热交换。一般来说, 两个系统的状态都会发生变化。经过一段时间后, 两个系统的状态不再发生变化。我们说, 它们达到了热平衡态。

大量实验表明, 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个系统的同一平衡态处于热平衡态, 则此二系统必定处于热平衡。这一结论称作“热力学第零定律”。热力学第零定律又叫热平衡定律, 它是建立温度概念的基本定律。

## 8.2 物质的微观模型 统计规律性

热力学系统是由大量的、不停息地运动着的、彼此间或强或弱地相互作用着的分子或原子组成, 要想推导出系统

的宏观状态参量(如压强、温度等)与这些微观粒子运动的关系,我们应首先明确平衡态下理想气体分子的模型和性质。

## 8.2.1 分子的线度和分子力

### 1. 分子的线度

气体由大量的分子和原子组成,在标准状态下  $1 \text{ mol}$  气体所含的分子(或原子)有  $6.022\ 136\ 7 \times 10^{23}$  个,这些分子和原子统称为微观粒子。不同结构的分子,其尺度是不一样的。我们以氧气分子为例进行讨论,实验表明,在标准状态下,气体分子的线度约为  $10^{-10} \text{ m}$ ,分子之间的距离约为分子自身线度的 10 倍,这样每个氧分子占有体积  $V$  约为氧分子本身体积的 1 000 倍。因此,对于气体,在标准状态下,可以忽略分子大小,把分子看作是一个质点。应该指出,随着气体压强的增加,分子间的距离要变小,但在不太大的压强下,每个分子占有的体积仍比分子本身的大小要大得多。

### 2. 分子力

既然组成物质的分子总是不停地、无规则地运动,为什么固体和液体的分子会聚集在一起而不分散开? 那是因为分子之间有相互吸引力。例如,切削一块金属或锯开一段木材时都必须用力,要使钢材发生形变也需要用力。这都说明物体各部分之间存在着相互吸引力。另一方面,我们知道液体和固体都很难压缩,这表明物质之间不但存在引力,而且还有斥力,阻止它们相互靠拢。

分子之间的引力和斥力是同时存在的,分子力就是引力和斥力的合力,如图 8-2 所示。从图 8-2 中可以看出,当分子之间的距离  $r < r_0$  ( $r_0$  约在  $10^{-10} \text{ m}$ ) 时,分子力主要表现为斥力,并且随  $r$  的减小,斥力急剧增加。当  $r = r_0$  时,分子力为零。 $r > r_0$  时,分子力主要表现为引力。 $r$  继续增大到大于  $10^{-9} \text{ m}$  时,分子间的作用力就可以忽略不计了。可见,分子力的作用范围是极小的,分子力属短程力。一般气

体在压强不太高时,分子之间间距远大于  $r_0$ ,此时气体可以看作是理想气体。

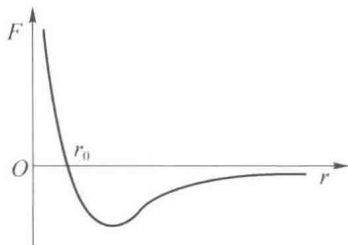


图 8-2 分子力

### 8.2.2 分子热运动的无序性及统计规律性

一切宏观物体都是由大量分子组成的,分子之间有作用力,同时大量实验事实表明,这些分子都在不停地作无规则的热运动。粗略统计一秒内一个分子与其他分子碰撞次数的数量级约为  $10^9$  次,即每秒钟碰撞的次数达几十亿次之多,从而使气体内各部分分子的平均速率趋于相同,气体内各部分的温度、压强趋于相等,从而达到平衡态。所以说,无序性是气体分子热运动的基本特征。另一方面,物质内的分子在分子力的作用下欲使分子聚集在一起,形成有序排列,而分子的热运动则要使分子尽量分开。这样一来,物质内的分子究竟是聚集还是散开,起决定作用的就是它所处环境的温度和压强。由于环境的差异,从而导致物质形成气、液、固以及等离子态等不同的集合体。

由于分子运动的无序性,就单个分子的运动情况而言,它可以杂乱无章,使得气体分子在某一时刻的位置、速度和运动轨迹无法确定。事实上大量分子的热运动本身就是一种比较复杂的物质运动形式,它与质点的运动有着本质的区别,我们没有办法对每一个分子的运动细节进行描述。实际上我们只需要关心它们整体的平均效果即可,因为是整体的平均效果决定了系统的宏观性质。因此对于热运动和热现象的问题需要采取新的研究方法,即统计的方法。

下面我们通过举例来解释统计规律性。

如图 8-3 所示,在一块竖直木板的上部规则地钉上铁钉,木板的下部用竖直隔板隔成等宽的狭槽,从顶部中央的漏斗形入口处可以投入小球,板前覆盖玻璃使小球不致落到槽外,这个装置称为伽尔顿板。若在入口处投一个小球,小球在下落过程中将与铁钉发生多次碰撞,最后落入某一槽中。我们通常是分别多次投入单个小球或者同时投入许多小球,观察比较小球在各个槽中的分布。实验结果发现:投入单个小球,小球与铁钉碰撞后落入哪个槽中完全是偶然的或者随机的。大量小球同时投入或单个小球分别多次投入,最终落入中间部位槽中的小球总是较多,而落入两侧槽中的小球总是较少,出现如图 8-3 所示的有规律分布。当小球的总数越多,重复性越好,当小球的总数足够多时,每次得到的分布规律几乎相同。

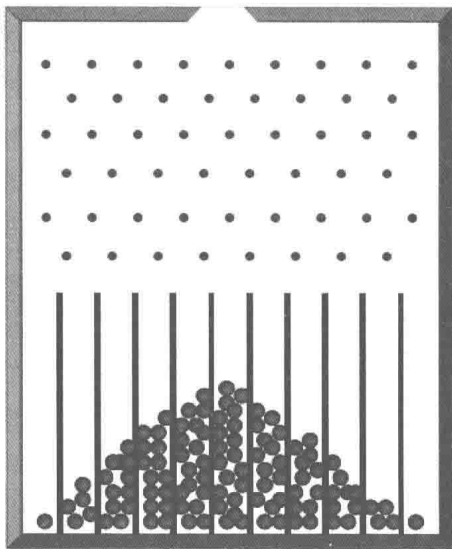


图 8-3 伽尔顿板

上述实验表明,尽管单个小球落入哪个狭槽是完全偶然的,少量小球在各个槽中的分布也带着偶然性,但是投入大量的小球或一个小球重复投入多次,则小球在各个狭槽内的分布则是近似确定的,小球的分布具有统计规律性。

对于本章要讨论的大量气体分子系统,情况类似。对单个分子而言,它的运动是无规律、偶然的,但从大量分子的集体表现来看,在总体上却存在着确定的统计规律。本章所讨论的气体的压强公式和温度公式、能量均分定理、麦克斯韦速率分布律、玻耳兹曼能量分布律等都是大量气体分子统计规律性的表现。

## 理想气体的压强和温度的

### 8.3 微观解释

系统宏观量和微观量之间存在着内在的联系,虽然单个分子的运动是无规则的,但是从大量分子的集体表现来看,却存在着一定的统计规律。本节应用统计的方法,求出大量分子的一些微观量的统计平均值,从而导出理想气体的压强公式和温度公式。

#### 8.3.1 理想气体的压强公式

从气体的动理论来看,理想气体是一种最简单的气体,我们可以为理想气体建立如下的分子模型:

(1) 分子本身的大小与分子间平均距离相比可以忽略不计,分子可以看成质点。

(2) 除碰撞的瞬间外,分子间的相互作用力可忽略不计。因此在两次碰撞之间,分子的运动可当作匀速直线运动。

(3) 气体分子间的碰撞以及气体分子与器壁间的碰撞可看作是完全弹性碰撞。

这个模型告诉我们,在讨论单个分子运动时,可以将分子看作质点,用经典力学规律来处理。

下面我们以理想气体微观模型为对象,运用牛顿定律,采取求平均值的统计方法来导出理想气体的压强公式。

以长方体容器内部的气体分子为例,如图 8-4 所示。容器壁三边长分别为  $l_x, l_y, l_z$ , 里面充满了  $N$  个气体分子。设每个分子的质量为  $m'$ , 它们以大小不同、方向各异的速度



在容器中运动, 气体对器壁的压强是大量分子对器壁作用力的统计平均效果。

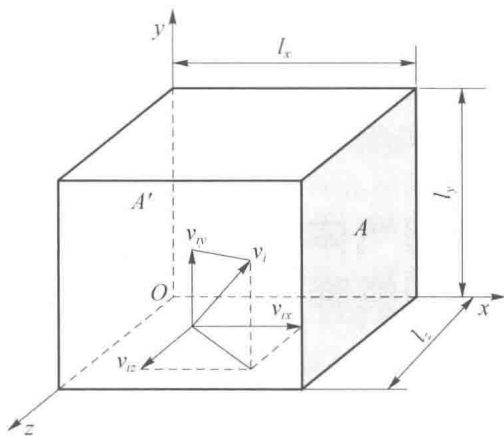


图 8-4 长方体容器的气体分子

平衡态下的气体分子沿各个方向运动机会均相等, 不应在某个方向更占优势, 因此全部分子速度分量  $v_x$ 、 $v_y$  和  $v_z$  的平均值:

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0$$

因为方向相反两个的速度分量取平方后, 它们的和是沿一个方向速度平方值的两倍。因此速度分量平方平均值之间的关系为

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \quad (8-4)$$

因为

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

所以有

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

将式(8-4)代入上面两式, 可得

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (8-5)$$

现在我们来研究速度为  $v_i$  的第  $i$  个粒子, 它的速度被投影到了三维方向向。当它在运动中撞到与  $x$  轴垂直的  $A$  面时, 由于碰撞是弹性的, 因此它沿  $x$  轴方向的速度分量由  $v_{ix}$  变成  $-v_{ix}$ 。假设分子的质量为  $m'$ , 所以碰撞过程中  $A$  面