



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



面向 21 世纪 课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 大学物理学

(第二版)(下册)

主编 吴 柳



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



面向 21 世纪 课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 大学物理学

Daxue Wulixue

(第二版)(下册)

主 编 吴 柳

副主编 刘爱红 唐 莹



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是吴柳教授主编的“面向21世纪课程教材”和普通高等教育“十五”国家级规划教材《大学物理学》的第二版。修订工作依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)开展,并充分考虑了与现行中学物理教学的衔接。

全书分上、下两册,共20章,涵盖了基本要求的核心类和大部分拓展类内容,每册教学内容大约对应64学时。上册包括绪论,质点运动学,动量守恒定律,能量守恒定律,角动量守恒定律,刚体力学基础,流体力学简介,相对论,静电场,磁场,变化的电磁场;下册包括气体动理论,热力学基础,振动,波动,几何光学,波动光学,量子物理基础,原子、分子与固体,原子核简介。

本书突出物理学的基本思想方法,反映科技发展前沿和物理学基本原理的应用实际,文字简洁,彩版印刷,图文并茂,贴近生活,版式新颖,使用方便。

本书可作为高等学校理工科类各专业大学物理课程的教材或教学参考书,也可供其他学科专业的教师和学生及社会读者阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册 / 吴柳主编. -- 2版. -- 北京:  
高等教育出版社, 2014.10  
ISBN 978-7-04-039930-1

I. ①大… II. ①吴… 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(2014)第111407号

|      |     |      |     |      |     |      |    |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|
| 策划编辑 | 张海雁 | 责任编辑 | 张海雁 | 封面设计 | 张楠  | 版式设计 | 张楠 |
| 插图绘制 | 杜晓丹 | 责任校对 | 刘娟娟 | 责任印制 | 朱学忠 |      |    |

|      |                   |      |                                                                   |
|------|-------------------|------|-------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社           | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>         |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街4号      |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>         |
| 邮政编码 | 100120            | 网上订购 | <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>       |
| 印 刷  | 北京信彩瑞禾印刷厂         |      | <a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a> |
| 开 本  | 850mm×1168mm 1/16 |      |                                                                   |
| 印 张  | 19.25             | 版 次  | 2003年10月第1版                                                       |
| 字 数  | 360千字             |      | 2014年10月第2版                                                       |
| 购书热线 | 010-58581118      | 印 次  | 2014年10月第1次印刷                                                     |
| 咨询电话 | 400-810-0598      | 定 价  | 41.70元                                                            |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 39930-00

| 国际单位制（SI）中的基本单位 |       |          |     |                                                                                                     |
|-----------------|-------|----------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 物理量名称           | 单位名称  |          | 符号  | 定 义                                                                                                 |
|                 | 中文    | 英文       |     |                                                                                                     |
| 长度              | 米     | metre    | m   | 米是光在真空中（1/299 792 458）s 时间间隔内所经路径的长度                                                                |
| 质量              | 千克    | kilogram | kg  | 千克等于国际千克原器的质量                                                                                       |
| 时间              | 秒     | second   | s   | 秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间                                              |
| 电流              | 安[培]  | ampere   | A   | 在真空中，截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7}$ N，则每根导线内的电流为 1 A     |
| 热力学温度           | 开[尔文] | kelvin   | K   | 开尔文是水的三相点热力学温度的 1/273.16                                                                            |
| 物质的量            | 摩[尔]  | mole     | mol | 摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数目与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等                                                   |
| 发光强度            | 坎[德拉] | candela  | cd  | 坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}$ Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为（1/683）W/sr（sr 是立体角的单位，称为球面度） |

| 一些常用物理常量的计算用值                                                                                                                    |               |                                                                                  |                        |       |                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------|
| 真空中的光速 $c$                                                                                                                       |               | $299\,792\,458\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$                                      | 元电荷 $e$                |       | $1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19}\,\text{C}$                 |
| 普朗克常量 $h$                                                                                                                        |               | $6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$                      | 电子质量 $m_e$             |       | $9.109\,382\,91(40) \times 10^{-31}\,\text{kg}$                 |
| $\hbar\,(h/2\pi)$                                                                                                                |               | $1.054\,571\,726(47) \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$                     | 阿伏伽德罗常量 $N_A$          |       | $6.022\,141\,29(27) \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$            |
| 牛顿引力常量 $G$                                                                                                                       |               | $6.673\,84(80) \times 10^{-11}\,\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ | 玻耳兹曼常量 $k$             |       | $1.380\,648\,8(13) \times 10^{-23}\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| *上表数值是 CODATA2010 年最新国际推荐值 ( <a href="http://physics.nist.gov/constants">http://physics.nist.gov/constants</a> )，计算时一般可取 3 位有效数字 |               |                                                                                  |                        |       |                                                                 |
| 真空磁导率                                                                                                                            | $\mu_0$       | $4\pi \times 10^{-7}\,\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$                                | 维恩位移定律常量               | $b$   | $2.898 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}$                   |
| 真空电容率 $1/(\mu_0 c^2)$                                                                                                            | $\epsilon_0$  | $8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$           | 地球表面重力加速度              | $g$   | $9.8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$                               |
| 静止质子 / 中子质量                                                                                                                      | $m_p$         | $1840 m_e = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg}$                                     | 太阳质量                   | $m_s$ | $1.989 \times 10^{30}\,\text{kg}$                               |
| $\alpha$ 粒子质量                                                                                                                    | $m_\alpha$    | $6.64 \times 10^{-27}\,\text{kg}$                                                | 太阳半径                   | $R_s$ | $6.96 \times 10^8\,\text{m}$                                    |
| 玻尔磁子                                                                                                                             | $\mu_B$       | $9.27 \times 10^{-24}\,\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$                               | 太阳总辐射功率                | $P_s$ | $4 \times 10^{26}\,\text{W}$                                    |
| 电子磁矩                                                                                                                             | $\mu_e$       | $-9.28 \times 10^{-24}\,\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$                              | 地球质量                   | $m_E$ | $5.976 \times 10^{24}\,\text{kg}$                               |
| 核磁子                                                                                                                              | $\mu_N$       | $5.05 \times 10^{-27}\,\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$                               | 地球赤道半径                 | $R_E$ | $6.378 \times 10^6\,\text{m}$                                   |
| 质子磁矩                                                                                                                             | $\mu_p$       | $1.41 \times 10^{-26}\,\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$                               | 日地平均轨道半径               | AU    | $1.496 \times 10^{11}\,\text{m}$                                |
| 中子磁矩                                                                                                                             | $\mu_n$       | $-0.966 \times 10^{-26}\,\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$                             | 月球质量                   | $m_M$ | $0.0123 m_E = 7.35 \times 10^{22}\,\text{kg}$                   |
| 玻尔半径                                                                                                                             | $a_0$         | $0.529 \times 10^{-10}\,\text{m}$                                                | 月球半径                   | $R_M$ | $1.74 \times 10^6\,\text{m}$                                    |
| 经典电子半径                                                                                                                           | $r_e$         | $2.82 \times 10^{-15}\,\text{m}$                                                 | 月地平均轨道半径               |       | $3.84 \times 10^8\,\text{m}$                                    |
| 磁通量子 $h/(2e)$                                                                                                                    | $\Phi_0$      | $2.068 \times 10^{-15}\,\text{Wb}$                                               | 哈勃常量                   | $H$   | $2.5 \times 10^{-18}\,\text{s}^{-1}$                            |
| 电导量子 $2e^2/h$                                                                                                                    | $G_0$         | $7.748 \times 10^{-5}\,\text{S}$                                                 | 摩尔气体常量                 | $R$   | $8.31\,\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$          |
| von Klitzing 常量 $h/e^2$                                                                                                          | $R_K$         | $25.812\,807\,\Omega$                                                            | 理想气体摩尔体积               | $V_m$ | $22.4 \times 10^{-3}\,\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$           |
| 精细结构常量的倒数 $2\pi\alpha c R_K$                                                                                                     | $\alpha^{-1}$ | 137                                                                              | (273.15 K, 101 325 Pa) |       |                                                                 |
| 里德伯常量 $\alpha^2 m_e c/(2h)$                                                                                                      | $R_\infty$    | $1.10 \times 10^7\,\text{m}^{-1}$                                                | 电子伏                    | eV    | $1.602 \times 10^{-19}\,\text{J}$                               |
| 康普顿波长 $h/(m_e c)$                                                                                                                | $\lambda_C$   | $2.43 \times 10^{-12}\,\text{m}$                                                 | 原子质量单位                 | u     | $1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg} = 931.5\,\text{MeV}/c^2$       |
| 斯特藩-玻耳兹曼常量                                                                                                                       | $\sigma$      | $5.67 \times 10^{-8}\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$              | 标准大气压                  | atm   | 101 325 Pa                                                      |

# 目 录

## 第12章 气体动理论

|         |                 |    |
|---------|-----------------|----|
| 12-1    | 理想气体的物态方程       | 02 |
| 12-1-1  | 平衡态 状态参量        | 02 |
| 12-1-2  | 温度              | 03 |
| 12-1-3  | 理想气体的物态方程       | 05 |
| 12-2    | 理想气体的压强和温度的微观解释 | 08 |
| 12-2-1  | 理想气体的微观模型和统计假设  | 08 |
| 12-2-2  | 压强的微观解释         | 09 |
| 12-2-3  | 温度的微观解释         | 10 |
| 12-2-4  | 能量按自由度均分定理      |    |
|         | 理想气体的内能         | 12 |
| 12-3    | 平衡态的经典统计分布      | 15 |
| 12-3-1  | 概率分布函数          | 15 |
| 12-3-2  | 重力场中粒子按高度的分布    | 17 |
| 12-3-3  | 麦克斯韦速率分布律       | 18 |
| *12-3-4 | 麦克斯韦速度分布律       | 21 |
| 12-4    | 分子碰撞和气体的输运现象    | 23 |
| 12-4-1  | 分子碰撞的统计规律       | 23 |
| *12-4-2 | 气体内的输运现象        | 24 |
| *12-5   | 范德瓦耳斯方程         | 27 |
| 12-5-1  | 分子间的相互作用        | 27 |
| 12-5-2  | 真实气体的等温线        | 28 |
| 12-5-3  | 范德瓦耳斯方程         | 29 |
|         | 习题              | 30 |

## 第13章 热力学基础

|         |                      |    |
|---------|----------------------|----|
| 13-1    | 热力学第一定律              | 34 |
| 13-1-1  | 内能 热力学第一定律           | 34 |
| 13-1-2  | 准静态过程的功和热量           | 35 |
| 13-1-3  | 定容热容和定压热容            | 36 |
| 13-2    | 热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用 | 39 |
| 13-2-1  | 理想气体的等值过程            | 39 |
| 13-2-2  | 绝热过程                 | 42 |
| *13-2-3 | 多方过程                 | 43 |
| 13-3    | 循环与效率                | 46 |
| 13-3-1  | 热机和热机效率              | 46 |
| 13-3-2  | 制冷机和制冷系数             | 49 |
| 13-3-3  | 卡诺循环                 | 50 |
| 13-4    | 热力学第二定律              | 52 |
| 13-4-1  | 热力学过程的方向性            | 52 |
| 13-4-2  | 热力学第二定律的两种表述         | 53 |
| 13-4-3  | 卡诺定理                 | 55 |
| 13-4-4  | 克劳修斯熵 熵增加原理          | 56 |
| 13-4-5  | 玻耳兹曼熵 热力学第二定律的统计意义   | 61 |
| *13-4-6 | 熵概念的应用举例             | 63 |
| *13-5   | 热力学第三定律 热力学负温度       | 66 |
| 13-5-1  | 热力学第三定律              | 66 |
| 13-5-2  | 热力学负温度               | 66 |
|         | 习题                   | 68 |



## 第14章 振动

|              |                  |    |
|--------------|------------------|----|
| <b>14-1</b>  | 简谐振动             | 72 |
| 14-1-1       | 简谐振动方程           | 72 |
| 14-1-2       | 简谐振动的特征量         | 73 |
| 14-1-3       | 简谐振动的旋转矢量表示法     | 75 |
| 14-1-4       | 简谐振动的能量          | 77 |
| <b>14-2</b>  | 振动的合成和分解         | 80 |
| 14-2-1       | 同方向同频率简谐振动的合成    | 80 |
| 14-2-2       | 同方向不同频率简谐振动的合成 拍 | 81 |
| *14-2-3      | 两个垂直方向简谐振动的合成    | 82 |
| *14-2-4      | 傅里叶分解 频谱分析       | 84 |
| <b>*14-3</b> | 阻尼振动 受迫振动与共振     | 86 |
| 14-3-1       | 阻尼振动             | 86 |
| 14-3-2       | 受迫振动 共振          | 88 |
| 14-3-3       | 电磁振荡             | 90 |
| <b>*14-4</b> | 交流电及其简单电路        | 91 |
| 14-4-1       | 交流电及元件特征         | 91 |
| 14-4-2       | 交流电路的矢量图解法       | 94 |
| 14-4-3       | 交流电的功率           | 97 |
|              | 习题               | 97 |

## 第15章 波动

|             |           |     |
|-------------|-----------|-----|
| <b>15-1</b> | 平面简谐波     | 102 |
| 15-1-1      | 机械波的形成    | 102 |
| 15-1-2      | 简谐波的特征量   | 103 |
| 15-1-3      | 平面简谐波的表达式 | 105 |
| *15-1-4     | 介质与波速     | 109 |
| <b>15-2</b> | 机械波的强度    | 111 |
| 15-2-1      | 简谐波的能量    | 111 |
| 15-2-2      | 简谐波的能流    | 113 |

|             |                 |     |
|-------------|-----------------|-----|
| *15-2-3     | 声波与声强           | 114 |
| *15-2-4     | 波的吸收            | 116 |
| <b>15-3</b> | 电磁波             | 117 |
| 15-3-1      | 电磁波的理论预言        | 117 |
| 15-3-2      | 平面电磁波的性质        | 119 |
| *15-3-3     | 电磁波的辐射与波谱       | 121 |
| <b>15-4</b> | 惠更斯原理 波的衍射      | 123 |
| 15-4-1      | 惠更斯原理           | 123 |
| 15-4-2      | 波的反射和折射         | 124 |
| 15-4-3      | 波的衍射            | 125 |
| <b>15-5</b> | 波的叠加原理 干涉现象     | 126 |
| 15-5-1      | 波的叠加原理          | 126 |
| 15-5-2      | 波的干涉            | 127 |
| 15-5-3      | 驻波              | 130 |
| *15-5-4     | 波的色散            | 133 |
| <b>15-6</b> | 多普勒效应           | 135 |
| 15-6-1      | 波源不动而观察者运动      | 136 |
| 15-6-2      | 观察者不动而波源运动      | 136 |
| 15-6-3      | 波源和观察者同时相对于介质运动 | 137 |
| *15-6-4     | 电磁波的多普勒效应       | 138 |
| *15-6-5     | 船波与马赫锥          | 139 |
|             | 习题              | 140 |

## 第16章 几何光学

|             |             |     |
|-------------|-------------|-----|
| <b>16-1</b> | 几何光学基本定律    | 144 |
| 16-1-1      | 光的传播规律      | 144 |
| 16-1-2      | 全反射         | 145 |
| *16-1-3     | 费马原理        | 146 |
| *16-1-4     | 棱镜与色散       | 146 |
| *16-1-5     | 介质中光的吸收和散射  | 147 |
| <b>16-2</b> | 成像基本概念和平面成像 | 147 |

|               |             |     |               |               |     |
|---------------|-------------|-----|---------------|---------------|-----|
| 16-2-1        | 物和像         | 147 | 17-3-3        | 等厚干涉          | 183 |
| 16-2-2        | 光在平面上的反射和折射 | 148 | *17-3-4       | 迈克耳孙干涉仪       | 185 |
| *16-2-3       | 负折射率介质      | 149 | <b>17-4</b>   | 光的衍射          | 187 |
| <b>16-3</b>   | 光在球面上的反射和折射 | 150 | 17-4-1        | 惠更斯-菲涅耳原理     | 187 |
| 16-3-1        | 球面折射成像      | 150 | 17-4-2        | 夫琅禾费单缝衍射      | 188 |
| 16-3-2        | 横向放大率       | 152 | 17-4-3        | 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 | 192 |
| 16-3-3        | 光在球面上的反射    | 153 | <b>17-5</b>   | 衍射光栅          | 194 |
| <b>16-4</b>   | 薄透镜         | 154 | 17-5-1        | 光栅衍射          | 194 |
| 16-4-1        | 薄透镜的物像公式    | 154 | 17-5-2        | 光栅光谱          | 198 |
| 16-4-2        | 薄透镜的焦距和焦点   | 156 | *17-5-3       | 晶体的 X 射线衍射    | 200 |
| 16-4-3        | 薄透镜的作图求像法   | 157 | <b>17-6</b>   | 偏振光的产生和检验     | 201 |
| * <b>16-5</b> | 光学仪器        | 159 | 17-6-1        | 自然光 偏振光       | 201 |
| 16-5-1        | 人眼          | 159 | 17-6-2        | 反射光和折射光的偏振    | 202 |
| 16-5-2        | 照相机         | 160 | 17-6-3        | 起偏和检偏         | 203 |
| 16-5-3        | 放大镜         | 160 | *17-6-4       | 双折射现象         | 204 |
| 16-5-4        | 显微镜         | 161 | * <b>17-7</b> | 偏振光的干涉        | 207 |
| 16-5-5        | 望远镜         | 162 | 17-7-1        | 波片            | 207 |
|               | 习题          | 164 | 17-7-2        | 偏振光的干涉        | 209 |
|               |             |     | 17-7-3        | 人为双折射 旋光现象    | 210 |
|               |             |     |               | 习题            | 211 |

## 第 17 章 波动光学

|             |                |     |
|-------------|----------------|-----|
| <b>17-1</b> | 光波的叠加与干涉       | 168 |
| 17-1-1      | 光波概述           | 168 |
| 17-1-2      | 叠加与干涉          | 170 |
| 17-1-3      | 获得相干光的方法       | 171 |
| <b>17-2</b> | 分波前干涉          | 172 |
| 17-2-1      | 杨氏双缝实验         | 172 |
| 17-2-2      | 其他分波面干涉实验      | 176 |
| *17-2-3     | 光波的空间相干性和时间相干性 | 178 |
| <b>17-3</b> | 分振幅干涉          | 180 |
| 17-3-1      | 薄膜干涉概述         | 180 |
| 17-3-2      | 等倾干涉           | 181 |

## 第 18 章 量子物理基础

|             |            |     |
|-------------|------------|-----|
| <b>18-1</b> | 光的量子性      | 216 |
| 18-1-1      | 黑体辐射       | 216 |
| 18-1-2      | 光电效应       | 219 |
| 18-1-3      | 康普顿效应      | 222 |
| 18-1-4      | 氢原子光谱与玻尔理论 | 224 |
| 18-1-5      | 光的波粒二象性    | 228 |
| <b>18-2</b> | 物质波        | 229 |
| 18-2-1      | 德布罗意假设     | 229 |
| 18-2-2      | 波函数        | 231 |
| 18-2-3      | 海森伯不确定关系   | 233 |

|             |         |     |
|-------------|---------|-----|
| 18-2-4      | 薛定谔方程   | 236 |
| <b>18-3</b> | 一维定态问题  | 238 |
| 18-3-1      | 一维方势阱   | 238 |
| 18-3-2      | 势垒与隧道效应 | 242 |
| *18-3-3     | 一维谐振子   | 244 |
|             | 习题      | 246 |

## 第 19 章 原子 分子与固体

|              |                |     |
|--------------|----------------|-----|
| <b>19-1</b>  | 原子             | 250 |
| 19-1-1       | 氢原子            | 250 |
| 19-1-2       | 电子的轨道磁矩        | 253 |
| 19-1-3       | 电子自旋           | 254 |
| 19-1-4       | 原子的壳层结构        | 255 |
| *19-1-5      | 全同粒子系 交换对称性    | 258 |
| *19-1-6      | 量子统计           | 259 |
| <b>*19-2</b> | 分子与固体          | 261 |
| 19-2-1       | 化学键            | 261 |
| 19-2-2       | 分子光谱           | 264 |
| 19-2-3       | 生物大分子          | 265 |
| 19-2-4       | 固体的能带          | 266 |
| 19-2-5       | 介观物理           | 268 |
| <b>*19-3</b> | 激光             | 270 |
| 19-3-1       | 受激吸收、自发辐射与受激辐射 | 270 |

|              |        |     |
|--------------|--------|-----|
| 19-3-2       | 粒子数反转  | 271 |
| 19-3-3       | 光学谐振腔  | 272 |
| <b>*19-4</b> | 宏观量子现象 | 273 |
| 19-4-1       | A-B 效应 | 273 |
| 19-4-2       | 超流     | 275 |
| 19-4-3       | 超导     | 276 |
|              | 习题     | 279 |

## \*第 20 章 原子核简介

|             |          |     |
|-------------|----------|-----|
| <b>20-1</b> | 原子核的一般性质 | 282 |
| 20-1-1      | 核的组成和大小  | 282 |
| 20-1-2      | 核的质量和结合能 | 283 |
| 20-1-3      | 核的自旋与磁矩  | 284 |
| 20-1-4      | 核力       | 286 |
| <b>20-2</b> | 核衰变与核反应  | 287 |
| 20-2-1      | 原子核的稳定性  | 287 |
| 20-2-2      | 放射性衰变的模式 | 288 |
| 20-2-3      | 衰变的规律    | 290 |
| 20-2-4      | 核反应      | 292 |
|             | 习题       | 294 |

|               |     |
|---------------|-----|
| <b>习题参考答案</b> | 295 |
|---------------|-----|





静止云层内部的大量水蒸气分子并不是静止的，而是以不同的速度向各个方向运动；而且受到重力的影响，越高处分子数密度越小，气压也越低，海拔越高越缺氧就是这个原因，所以攀登高峰时往往需要携带氧气。图中远处为世界最高峰珠穆朗玛峰。

# 12

## 气体动理论

12-1 理想气体的物态方程

12-2 理想气体的压强和温度的微观解释

12-3 平衡态的经典统计分布

12-4 分子碰撞和气体的输运现象

\*12-5 范德瓦耳斯方程

组成宏观物体的大量微观粒子都在作永不停息的无规则运动，由于这种无规则运动的剧烈程度在宏观上表现为温度的高低，因此称为热运动。

热学(heat)的研究对象是大量微观粒子(分子、原子等)组成的系统(固体、液体、气体等)，它的任务是研究物质热运动的规律。热学理论分为热力学和统计物理学。热力学(thermodynamics)是通过实验总结得到的关于热现象的宏观理论，统计物理学(statistical physics)则是关于热现象的微观理论。

统计物理学从物质的微观结构出发，应用微观粒子的基本运动规律和统计方法寻求表征系统状态宏观量与描述微观粒子状态的微观量的统计平均值之间的关系，从而揭示热现象的微观本质。

统计物理学是在气体动理论的基础上发展起来的。关于气体动理论和理想气体在中学已有初步了解，本章在理想气体模型的基础上运用统计方法给出温度和压强的微观解释和能量均分定理，然后重点讨论平衡态的经典统计分布，最后简单介绍内迁移现象和描述非理想气体的范德瓦耳斯气体方程。

## 12-1-1 平衡态 状态参量

热学所研究的对象称为热力学系统 (thermodynamic system), 简称系统, 它是由大量微观粒子构成的有限的宏观物质体系; 系统所处的外部环境称为外界 (surroundings). 一般而言, 外界和系统之间存在着相互作用, 并使系统和外界的状态发生改变. 例如, 研究气缸中的气体时, 气缸和活塞等就是外界, 通过加热气缸或移动活塞都会改变缸内气体的状态. 如果一个热力学系统与外界没有任何能量和物质交换则称为孤立系统; 如果只有能量交换而没有物质交换则称为封闭系统; 如果与外界既有能量交换也有物质交换则称为开放系统.

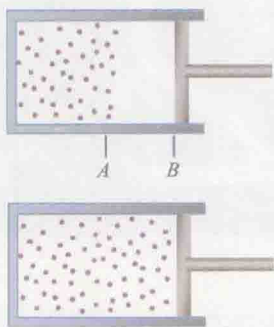


图 12-1 封闭在绝热气缸中的气体开始时处于左边, 右边为真空, 随着时间推移, 气体迁移到右边并最终达到各处均匀、宏观性质不变的平衡态

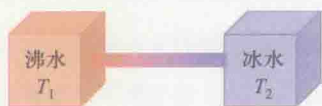


图 12-2 两端分别置于沸水和冰水中的铜棒达到稳定态时, 其上温度分布不变

实验表明, 孤立系统经过足够长的时间后最终会达到一个宏观性质不随时间变化的状态, 这个状态称为平衡态 (equilibrium state). 例如, 如图 12-1 所示的绝热气缸中封闭有一定量的某种气体, 现突然让活塞从  $A$  移动到  $B$ . 显然, 此后气体的状态将发生变化, 处于气缸左边的气体分子将向右边的真空迁移, 形成宏观粒子流, 气体的宏观性质也随之变化. 这个过程的每一个中间状态都不是平衡态, 称为非平衡态. 经过足够长的时间后, 气体分子将均匀充满活塞封闭的整个气缸内, 气体分子的宏观流动停止, 系统也就达到了平衡态.

平衡态的特征是系统内没有宏观粒子流动和能量流动. 对于非孤立系统, 系统在外界影响下也可能达到某个不随时间变化的状态, 但这时仍然存在宏观粒子流或能量流, 所以不是平衡态, 我们把它称为稳定态. 例如, 如图 12-2 所示的一根两端分别置于冰水和沸水中的均匀铜棒, 经过足够长的时间后, 棒上各点的温度呈线性分布且不随时间变化, 但棒中仍然有能量 (热量) 流从高温端流向低温端, 所以并不是平衡态. 平衡态是一种理想状态, 在实际中绝对地排除外界影响是不可能的, 但在外界影响和系统的宏观性质的变化可以忽略的情况下, 则可以视为平衡态. 今后若不特别说明, 系统的状态均指平衡态. 系统处于平衡状态时, 虽然其宏观性质不随时间变化, 但从微观上看, 系统内的分子仍在不断交换着能量、动量, 所以我们说系统的平衡态是一种热动平衡.

在平衡态下, 热力学系统的各种宏观性质都不随时间变化, 描述系统宏观状态的物理量都具有确定值. 我们把可以独立变化又足以确定热力学系统平衡态的一组宏观物理量称为状态参量 (state parameter). 以气体为例, 一定质量的气体的状态参量为体积  $V$  和压强  $p$ . 气体没有固定形态, 气体的体积是指气体分子所能到达的空间, 它与气体分子自身总体积不同. 对于盛在容器中的气体, 如图 12-3 所示,

气体分子所能到达的空间是容器的容积与气体分子自身占有的总体积之差.可见气体的体积比容器的容积小,只有当气体分子自身体积可以忽略时,其体积才等于容器的容积.在SI中,体积的单位是 $\text{m}^3$ ,它与常用单位升(L)的换算关系为 $1\text{ L}=10^{-3}\text{ m}^3$ .气体的压强是指气体作用于气体内或器壁上单位面积的正压力.在SI中,压强的单位是帕斯卡,简称帕(Pa), $1\text{ Pa}=1\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .压强单位还有标准大气压(atm),简称大气压,现已废弃. $1\text{ atm}=1.013\times 10^5\text{ Pa}$ .

一般而言,描述热力学系统的状态参量包括:几何参量(如体积)、力学参量(如压强)、化学参量(例如系统中各种成分的质量或物质的量)、电磁参量(例如极化强度、磁化强度).但这四类参量都不是热力学所特有的,它们的测量属于力学、电磁学和化学的范围.以状态参量为自变量,由平衡态确定的其他宏观物理量(例如温度、内能等)都可以表示为这四类参量的函数,称为态函数.描写热力学系统的状态参量和态函数等宏观物理量中,凡是与质量成正比的,称为广延量,它们具有可加性,例如体积、内能等;凡是与质量无关的量称为强度量,它们不具有可加性,例如压强、温度等.

在外界作用下,热力学系统的状态将发生变化.系统状态变化的历程称为热力学过程,简称过程.系统状态的变化必然破坏原来的平衡态,例如,如图12-4所示,当压缩气缸中的气体时,活塞附近的压强会比其他部位的大,因而气体处于非平衡态.显然,系统处于非平衡态时不存在统一的态参量,而到达新的平衡态需要一定时间,这个时间称为弛豫时间.在实际过程中,往往在新的平衡态建立以前系统就在外界作用下继续下一步变化,所以系统经历的是一系列非平衡态,这样的过程称为非静态过程.但如果过程进行得足够缓慢,而系统建立新的平衡态所需的弛豫时间又很短,则可以认为系统经历的过程是由一系列平衡态组成的,这样的过程称为准静态过程(quasi-static process).例如,气缸内压缩气体的弛豫时间小于 $10^{-3}\text{ s}$ ,而内燃机中气体经历一次压缩的时间约 $10^{-2}\text{ s}$ ,故可以当作准静态过程.由于平衡态具有确定的状态参量,在状态参量构成的坐标空间中,体系的一个状态对应一个点,一个准静态过程则对应于一条曲线.例如,图12-5所示为一定质量的气体的 $p$ - $V$ 图(图中纵坐标为 $p$ ,横坐标为 $V$ ),点 $a(p_1, V_1)$ 和 $b(p_2, V_2)$ 表示气体的初、末两个状态,曲线 $ab$ 表示由状态 $a$ 到状态 $b$ 的某一个准静态过程.

| 思考题12.1: 气体的非平衡态和非静态过程能否在 $p$ - $V$ 图上表示出来?

### 12-1-2 温度

温度是热力学系统所特有的物理量,它是在人们对物体冷热感觉的基础上形成的概念.经验告诉我们,冷热程度不同的两个物体相互接触时,如果不受外界影

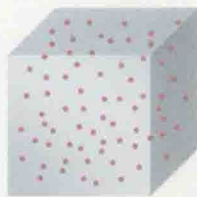


图 12-3 气体的体积是容器的容积与气体分子自身占有的总体积之差,当气体分子本身的大小可以忽略时则为容器的容积



图 12-4 压缩气体时活塞附近分子密度大,压强也大

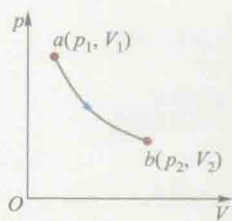


图 12-5  $p$ - $V$ 图上的准静态过程曲线



响, 则冷的物体变热, 热的物体变冷, 最终将达到两个物体冷热程度一致的平衡态, 称为热平衡状态. 实验表明, 如果系统A和系统B分别与系统C处于热平衡, 则系统A和系统B也彼此处于热平衡. 这个结论称为热力学第零定律. 热力学第零定律意味着处于同一热平衡状态的系统具有一个共同的宏观特征, 描述这一宏观特征的物理量称为温度. 即温度 (temperature) 是表征系统热平衡状态的宏观物理量, 彼此处于热平衡的系统具有共同的温度.

**思考题 12.2:** 如果系统A和系统B先后与系统C接触后达到热平衡, 则系统A和系统B是否彼此处于热平衡?

温标 (thermometric scale) 是温度的数值表示法. 我们可以利用物质的某种随温度发生显著的、单值的变化特性, 并赋予选定的固定标准点以一定数值来标示温度的数值, 这样的测温装置称为温度计. 例如, 水银温度计、气体温度计、电阻温度计就是分别利用水银柱长度、气体体积、电阻值随温度变化的特性来测定温度的. 常用的摄氏温标是瑞典天文学家摄尔修斯 (A.Celsius) 1742年建立的, 用  $t$  表示, 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ ). 摄氏温标把水的冰点 ( $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  下纯水和纯冰达到平衡时) 的温度规定为  $0^{\circ}\text{C}$ , 把水的沸点 (纯水和水蒸气在  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  蒸汽压下达到平衡时) 的温度规定为  $100^{\circ}\text{C}$ , 并在  $0^{\circ}\text{C}$  和  $100^{\circ}\text{C}$  之间等分为 100 个格, 每格温度差为  $1^{\circ}\text{C}$ . 可见, 温标有三个要素, 即测温物质的测温属性、固定点的选取和规定测温特性随温度变化的关系. 这样的温标依赖于测温物质, 称为经验温标. 显然, 不同测温物质或测温属性所确定的经验温标并不严格一致. 为此, 需要引入一种与测温物质或测温属性无关的温标, 这种温标称为绝对温标或热力学温标. 热力学温标是国际单位制中的基本温标, 常记为  $T$ , 单位为开 (K), 它是以英国物理学家开尔文 (Lord Kelvin) 的名字命名的. 热力学温标与具体的测温物质无关, 它将水的三相点 (冰、水和水蒸气共同处于平衡态时) 的温度的  $1/273.16$  定义为  $1 \text{ K}$ . 摄氏温度与热力学温度之间的关系为

$$T / \text{K} = 273.15 + t / ^{\circ}\text{C} \quad (12-1)$$

**思考题 12.3:** 水的三相点的温度分别为几开和几摄氏度?

有了温标就可以给出温度的操作性定义了. 让温度计与待测物体接触, 达到热平衡后通过温度计读出的温度值就是待测物体的温度. 而且, 按照热力学第零定律, 要确定两系统是否处于热平衡状态, 并不需要二者接触, 只需要通过温度计这个第三者来比较它们的温度就行了. 图 12-6 所示是物质世界的温度大观.

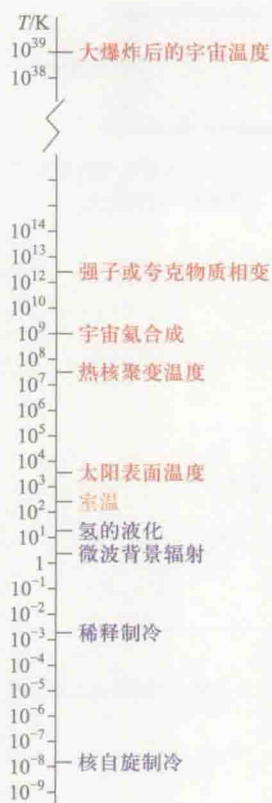


图 12-6 温度大观

### 12-1-3 理想气体的物态方程

温度是一个态函数,它可以表示为前面所说的四类状态参量的函数.对于一定量的气体,前面说过它的状态参量为体积 $V$ 和压强 $p$ ,因而温度 $T$ 和 $V$ 、 $p$ 之间的函数关系可以表示为

$$f(p, V, T) = 0$$

这个关系称为气体的物态方程.一般而言,气体物态方程的具体形式与气体的性质有关,需要通过实验确定.但在温度不太低(与室温相比),压强不太大(与大气压强相比)的条件下,各种气体具有共同的特性,都遵守下面三个实验定律.

(1) 玻意耳(R. Boyle)定律:一定量的气体,当温度保持不变时,其压强与体积成反比,即 $pV = \text{常量}$ .

(2) 查理(J.A.C. Charles)定律:一定量的气体,当体积保持不变时,其温度与压强成正比,即 $T/p = \text{常量}$ .

(3) 盖-吕萨克(L.J. Gay-Lussac)定律:一定量的气体,当压强保持不变时,其温度与体积成正比,即 $T/V = \text{常量}$ .

根据查理定律和盖-吕萨克定律,可以分别制成定容气体温度计和定压气体温度计.如果与热力学温标一样规定纯水三相点的温度为 $273.16\text{ K}$ ,并以 $p_u$ 和 $V_u$ 分别表示封闭在温度计中的气体在该三相点的压强和体积,则有

$$T(p) = (273.16\text{ K}) \frac{p}{p_u} \quad (\text{定容情况}) \quad (12-2)$$

$$T(V) = (273.16\text{ K}) \frac{V}{V_u} \quad (\text{定压情况}) \quad (12-3)$$

以定容气体温度计为例,如图12-7所示,测温泡B内充有一定量的气体,经毛细管与水银压强计的左臂M相连,测温时使B与待测系统作热接触,上下移动右臂M'使M中的水银保持在位置O处,即保持气体体积不变,通过水银面的高度差可以得到气体压强值 $p$ 从而确定温度 $T$ .

我们把服从上述三个实验定律的气体称为理想气体(ideal gas).理想气体是实际气体在压强趋于零时的极限情况,当压强趋于零时不论以什么气体作为测温物质,也不论是定容气体温度计和定压气体温度计,所测得的温度值都一样,即

$$T = \lim_{p \rightarrow 0} T(p) = \lim_{p \rightarrow 0} T(V)$$

这就是理想气体温标.理想气体温标与测温物质无关,固定点的规定也与热力学温标一样,所以在理想气体温标适用的范围内(目前约 $1 \sim 1200\text{ K}$ ),它与热力学温标

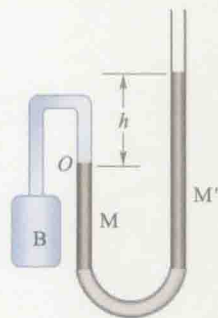


图 12-7 定容气体温度计



完全一致。

一定量气体的物质的量用 $\nu$ 来表示, 在SI中, 物质的量的单位为摩尔(mol)。我们知道, 每摩尔的任何物质含有的分子数都为 $6.022 \times 10^{23}$ 个,  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 称为阿伏伽德罗常量(Avogadro number)。设1 mol某种气体的质量(即摩尔质量)为 $M$ , 则质量为 $m$ (分子数为 $N$ )的该种气体的物质的量为

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \quad (12-4)$$

下面来讨论理想气体的物态方程, 即找出平衡态 $(p, V, T)$ 下 $T$ 和 $V$ 、 $p$ 之间的函数关系。为此, 设物质的量为 $\nu$ 的理想气体由态 $(p_0, V_0, T_0)$ 经等体过程变化到 $(p', V_0, T)$ , 再经等温过程变化到 $(p, V, T)$ , 如图12-8所示。对等体过程, 根据理想气体温标的定义, 由式(12-2)有

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p'}{p_0} \quad (12-5)$$

对等温过程, 则根据玻意耳定律, 有

$$p'V_0 = pV \quad (12-6)$$

式(12-5)和式(12-6)联立消去 $p'$ , 可得

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0}$$

即 $pV/T$ 为一常量。根据阿伏伽德罗定律: 在温度和压强相同的条件下, 任何气体的摩尔体积 $V_m$ 都相同。注意 $V_0 = \nu V_m$ , 则该常量为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} = \nu \frac{p_0V_m}{T_0} = \nu R$$

或者

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT \quad (12-7)$$

上式就是理想气体物态方程, 通常情况下实际气体都可以看作理想气体。式中 $R$ 称为摩尔气体常量(molar gas constant), 根据实验, 在标准状态(即 $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_0 = 273.15 \text{ K}$ )下测得 $V_m = 22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 故有

$$R = \frac{p_0V_m}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273.15} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

由式(12-7)可知, 理想气体的准静态等压和等体过程在 $p-V$ 图上为直线, 而等温过程则为双曲线, 如图12-9所示。

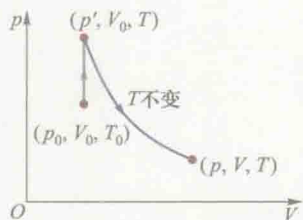


图 12-8 理想气体物态方程的导出

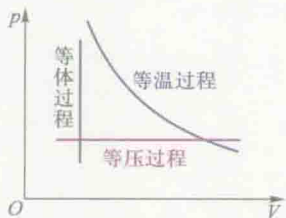


图 12-9 理想气体的三个等值过程

利用式(12-4), 理想气体的物态方程(12-7)可改写为

$$p = \frac{1}{V} \nu RT = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T$$

即

$$p = nkT \quad (12-8)$$

式中  $n = \frac{N}{V}$  为单位气体中的分子数, 称为分子数密度;  $k = \frac{R}{N_A}$  称为玻耳兹曼常量

(Boltzmann constant). 在SI中,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

**例题 12-1** 容积  $V_1 = 32 \text{ L}$  的氧气瓶储有压强  $p_1 = 1.30 \times 10^7 \text{ Pa}$  的氧气. 规定瓶内氧气压强减小到  $p_2 = 10^6 \text{ Pa}$  时就需要充气, 以免开启阀门时混入空气而需洗瓶. 若车间每天需用  $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ 、 $V = 400 \text{ L}$  的氧气, 问这瓶氧气使用几天后就需充气?

**解:** 设氧气可视为理想气体, 且使用过程中温度不变. 若使用前和需充气时瓶内氧气的质量分别以  $m_1$  和  $m_2$  表示, 每天用去的氧气以  $m$  表示, 则由理想气体物态方程可得

$$m_1 = \frac{Mp_1V_1}{RT}, \quad m_2 = \frac{Mp_2V_2}{RT}, \quad m = \frac{MpV}{RT}$$

所求天数为

$$N = \frac{m_1 - m_2}{m} = \frac{(p_1 - p_2)V_1}{pV} = \frac{(1.30 \times 10^7 - 10^6) \times 32}{10^5 \times 400} = 9.6 \text{ (天)}$$

**例题 12-2** 标准状态下  $1 \text{ cm}^3$  气体所含的分子数称为洛施密特常量 (Loschmidt constant), 求该常量值并估算分子间的平均距离.

**解:** 由式(12-8)得标准状态下气体的分子数密度为

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.013 \times 10^5}{1.38 \times 10^{-23} \times 273.15} \text{ m}^{-3} = 2.687 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} = 2.687 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

设分子间的平均距离为  $\bar{l}$ , 则  $\bar{l}^3 = V/N = 1/n$ , 得

$$\bar{l} = \sqrt[3]{\frac{1}{n}} \approx 10^{-9} \text{ m}$$

分子有效直径的数量级为  $10^{-10} \text{ m}$ . 估算表明, 常温常压下气体分子间的平均距离约为分子直径的 10 倍.

## 12-2-1 理想气体的微观模型和统计假设

从微观上看,热力学系统是由大量分子(或原子)组成的,这些分子都在永不停息地作无规则运动,分子之间存在相互作用力,描述这些分子的质量、速度、动量和能量等物理量称为微观量,而热力学系统中所有分子的运动状态构成了系统的微观态.为了进一步理解宏观量的物理本质,需要在热力学系统具体的微观模型基础上,通过统计方法建立微观量和宏观量之间的关系.而由此得出的宏观规律是否与实验得出的宏观性质符合,又可以反过来检验所建立的微观模型是否合理.

**思考题 12.4:** 查找有关布朗运动(Brown motion)的知识,布朗运动实验中,藤黄粉颗粒的运动是不是分子运动?为什么说藤黄粉颗粒的运动反映了液体分子的无规则热运动?

理想气体的微观模型是经过实验检验的,它由下列假设构成:

- (1) 与气体分子间平均距离相比,气体分子的大小可以忽略;
- (2) 由于气体分子间的平均距离甚大,所以除碰撞的瞬间外,分子间的相互作用力可忽略不计;
- (3) 分子间的碰撞以及分子与器壁的碰撞可以看作是完全弹性的.

由例题12-2可知,在标准状态下,气体分子间的距离大约是分子有效直径的10倍,可见假设(1)是合理的,可以把分子当质点看待;至于假设(2),由于分子间的力随距离增加而很快衰减,而气体分子间的距离远大于分子的有效作用距离,因而除碰撞的瞬间外,分子可以认为是“自由”的,即不受力;最后,若分子间的碰撞不是完全弹性的,即有能量损失,那么碰撞的结果将使分子的动能最终耗尽而静止,这显然与实验不符.

热力学系统中,由于分子热运动和不断地相互碰撞,某一时刻某个分子的运动状态是不确定的.但对组成系统的大量分子而言,当理想气体处于平衡态时,还可作如下统计假设:① 若忽略重力影响,每个分子在容器中任一点处出现的概率相同,即分子的空间分布是均匀的,平均而言分子数密度  $n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V}$  处处相同(尽管在某个瞬时处于某处的数密度  $n$  可能是变化的);② 气体分子沿各个方向运动的概率是相同的,没有任何一个方向气体分子的运动比其他方向更占优势,因此,从一个体积元飞向上、下、左、右、前、后的平均分子数也可以粗略地认为各占1/6,且沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴的分子速度分量的统计平均值相等,都等于零

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

速度分量平方的平均值也相等,  $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ , 由于  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ , 所以

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (12-9)$$

## 12-2-2 压强的微观解释

压强是一个宏观量.处于平衡态的气体,在忽略重力的情况下其内部各处的压强相等.对容器器壁而言,压强是大量气体分子对器壁不断碰撞的统计结果.设容器(形状任意)体积为 $V$ ,气体分子的质量为 $m_0$ ,分子总数为 $N$ .下面我们分三步来推导平衡态下理想气体的压强公式.

第一步,求速度为 $v_i$ 的分子单位时间内对器壁面积元 $dS$ 的平均冲力.考虑器壁上某一微小面积元 $dS$ ,取直角坐标系 $Oxyz$ ,使 $x$ 轴垂直于 $dS$ ,如图12-10所示.由于理想气体分子与器壁的碰撞是完全弹性的,速度为 $v_i$ 的某个分子与 $dS$ 碰撞后动量的增量为 $\Delta p_i = -2m_0 v_{ix} i$ ,按动量定理, $\Delta p_i$ 即为面积元 $dS$ 作用于该分子的冲量.根据牛顿第三定律,该分子施于 $dS$ 的冲量则为 $2m_0 v_{ix} i$ ,方向垂直于 $dS$ .

第二步,求各种速度分子对面积元 $dS$ 的平均冲力.我们把所有 $N$ 个分子按其速度分为若干组,并设速度为 $v_i$ 的一组分子数为 $\Delta N_i$ ,它们中在 $dt$ 时间内能够与 $dS$ 相碰的,是以 $dS$ 为底、以速度 $v_i$ 为轴线的高为 $v_{ix} dt$ 的斜柱体内的那部分分子,其数目为

$$\frac{\Delta N_i}{V} v_{ix} dt dS$$

$dt$ 时间内这部分分子施于 $dS$ 的平均冲力为

$$F_i = \frac{1}{dt} (2m_0 v_{ix}) \left( \frac{\Delta N_i}{V} v_{ix} dt dS \right) = \frac{2m_0}{V} \Delta N_i v_{ix}^2 dS$$

上式对所有 $v_{ix} > 0$ 的分子求和( $v_{ix} < 0$ 的分子不会与 $dS$ 相碰),注意到平衡态下 $v_{ix} > 0$ 和 $v_{ix} < 0$ 的分子数各占 $\Delta N_i$ 的一半,即得各种速度分子施加在 $dS$ 上的平均冲力,即

$$\begin{aligned} F &= \sum_{v_i > 0} F_i = \frac{1}{2} \sum_i F_i = \frac{1}{2} \sum_i \frac{2m_0}{V} \Delta N_i v_{ix}^2 dS \\ &= m_0 \frac{N}{V} \left( \frac{\sum_i v_{ix}^2 \Delta N_i}{N} \right) dS \end{aligned}$$

括号中的量为 $v_x^2$ 的平均值,即 $\overline{v_x^2}$ ,而 $n = N/V$ ,于是

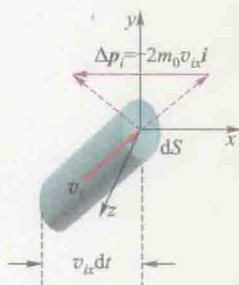


图 12-10 气体分子与器壁相碰撞