

力学名著译丛

非均匀气体的 数学理论

[英] S. 查普曼 著
T. G. 考林



科学出版社

力学名著译丛

非均匀气体的数学理论

〔英〕S. 查普曼 T. G. 考林 著

刘大有 王伯懿 译

陆志芳 校

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书阐述有关非均匀气体的粘性、热传导和扩散问题的数学理论。内容丰富,结构紧凑完整,论述严谨,是气体分子运动论方面的经典名著。

本书可供从事物理学、天体物理学、等离子体动力学、高速空气动力学、高层大气学以及物理化学和化学工程等方面工作的科技人员,高等院校的教师,研究生和高年级学生参考。

S. Chapman and T. G. Cowling

THE MATHEMATICAL THEORY OF NON-UNIFORM GASES

THIRD EDITION

Cambridge University Press, 1970

力学名著译丛

非均匀气体的数学理论

[英] S. 查普曼 T. G. 考林 著

刘大有 王伯懿 译

陆志芳 校

责任编辑 魏茂乐

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年10月第一版 开本: 850×1168 1/32

1985年10月第一次印刷 印张: 18 3/8

印数: 精 1—2,300 插页: 精 2
平 1—2,100 字数: 476,000

统一书号: 13031·2960

本社书号: 4046·13—2

定价: 布脊精装 6.00 元
平 装 5.20 元

第一版序言摘录¹⁾

本书叙述气体的粘性、热传导和扩散问题的数学理论。这门学科本身是完整的,并有其独特的研究方法。因此,可以将它从有关的一些学科(例如统计力学)中划分开来。对于这一点是无需多加解释的。

Maxwell 和 Boltzmann 首先建立了这门学科的精确理论,他们给出了基本方程;而这些方程的一般解,却是在四十多年以后才第一次得到的。当时 Chapman 和 Enskog 在大约一年时间里(1916—1917),各自独立地求得了其解。他们所用的方法,无论是思路还是细节,都大不相同;可是给出的结果却完全一样。尽管 Chapman 对一般理论的论述是完全有效的,但是其理论体系的建立偏于直观,而不是系统的与演绎的。Enskog 的论述则更侧重于数学形式和风格。本书选用了 Enskog 的处理方法,但是也有一些不同之处,其中较次要的差别是矢量和张量的符号不同²⁾。而较为重要的变更则是,我们仿效 Burnett(1935)的作法,采用了 Sonine 多项式展开法。我们阐述理论时还力图使它比 Enskog 的原著更加简明。在他那篇论文中,有些论证是难以领会的。

本书后几章讲述较为新近的研究工作,即关于稠密气体、碰撞量子理论(只限于它对气体输运理论的影响)以及有电场和磁场存在时电离气体的传导和扩散理论。

本书大部分内容为数学工作者和理论物理工作者撰写的。不过,我们也收集并尽可能清晰地叙述了由理论导出的主要公式,

1) 这是原作者的摘录。——译者注

2) 本书中所用三维笛卡尔张量的符号,是由 E. A. Milne 和 S. Chapman 在 1926 年共同提出的,此后又由他们运用到应用数学的许多分支中。

而且结合现有最好的实验数据进行了讨论，以便力求满足化学和物理学方面实验工作者的需要。

S. 查普曼

T. G. 考林

1939 年

第三版序言

迄今为止，本书大体上仍保持 1939 年版本的面目，只是在 1952 年的版本中作过某些修正，并增加了许多注释，用以指出这些年来取得的一些进展，在这一版本中，我们进行了更为彻底的修订。

第十一章已经全部重新改写过，现在它讨论的是具有内能的一般分子模型。这一章的讨论根本上讲还是属于经典力学的，但是它所采用的形式很适合于作量子力学推广。第十七章作了这一推广，同时还讨论了低温下氢和氦的输运性质的量子效应(它比前两版更加详尽)。第十章把输运理论应用于新增加的一些分子模型，而第十二章到第十四章，则将这些理论结果与实验值进行了比较。我们期望这些章节的讨论能够达到最大程度的简明性，同时又不失其应有的精确性。本版第十六章对稠密气体的 BBGKY 理论进行了简短综述，并对这一理论的困难作了评论。第十八章是新增添的，讨论的是多种气体组成的混合气体。第十九章(原先是第十八章)讲述电离气体中的各种现象。近些年来，人们在这一方面做了大量研究工作。因此，即使我们把注意力限制在只与输运现象有关的方面，这一章也依然已大为扩充。最后，在第六章和其它一些地方，我们对于近似理论，特别是对于能够阐明普遍理论某些特征的那些近似理论，均给予了更加详细的说明。

为了容纳新的题材必须对原来的版本作某些删节。有关金属中电子-气体的早期近似理论，以及附录 A 和附录 B 已全部删去。发展简史和关于 Lorentz 近似法的讨论也都作了压缩。此外，对某些其它题材的讨论也作了修改，特别是根据 Kihara, Waldmann, Grad 和 Hirschfelder, 以及 Curtiss 和 Bird 等人的工作进行了修改。在符号方面亦有微小变更。这些都在符号表末尾列

出¹⁾。

第三版始终是在 D. Burnett 教授协助下准备的。承蒙他提出了大量宝贵的改进意见,并且经常指出可能疏忽的细节,对此,我们深表谢意。长期以来,他一直慷慨地协助我们开展工作。

我们还感谢其它许多人的关切和鼓励,特别应当提到的是 Waldmann 教授和 Mason 教授的有益关怀。象过去一样,我们也要感谢剑桥大学出版社的职工们,他们在本版付印前后给予我们诚挚的帮助和纯熟的技术指导。

S. 查普曼

T. G. 考林

1969 年

1) 在此译本中已将新老版本的符号对照表略去。——译者注

符 号 表

本书中,矢量用黑体字母表示,单位矢量用黑正体字母表示,而张量则采用匀粗黑体字母表示.括号符号[,]和{, }的定义在正文中第 111, 112 页中给出.一般地说,只在书中连续几页内出现的符号,本表内均未列出.希腊字母符号置于英文符号的后面.表中的斜体数字表明该符号最先引进时所在的页数.

a_p , 172, 196 a_{pq} , 173, 197 a'_{pq} , a''_{pq} , 220 $A_l(\nu)$, 232 $A(\mathcal{C})$,
166 $\mathcal{A}^{(m)}$, $\mathcal{A}_{pq}^{(m)}$, 173, 198 $\mathcal{A}'^{(m)}$, $\mathcal{A}_{pq}'^{(m)}$, 198 $\mathbf{a}^{(p)}$,
172 $\mathbf{a}_1^{(p)}$, $\mathbf{a}_2^{(p)}$, 196 $\mathbf{A}$, 165 $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$, 187, 283 $\tilde{\mathbf{A}}_1$, $\tilde{\mathbf{A}}_2$,
192 $\mathbf{A}_s$, 460 $\tilde{\mathbf{A}}_s$, 466 $\mathbf{A}$, 221 $\mathbf{A}_{st}$, 470

b , 75 b_p , 175, 199 b_{pq} , 175, 199 b'_{pq} , b''_{pq} , 220 $B(\mathcal{C})$, 167
 B_1 , B_2 , 283 $\mathcal{B}^{(m)}$, $\mathcal{B}_{pq}^{(m)}$, 176, 199 $\mathbf{b}^{(p)}$, 175 $\mathbf{b}_1^{(p)}$, $\mathbf{b}_2^{(p)}$,
199 $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$, 187, 283 $\mathbf{B}_s$, 460 $\mathbf{B}$, 221 $\mathbf{B}_{st}$, 470

$\mathbf{c}$, c , 34 $\mathbf{c}_0$, c_0 , 36, 59 c_v , 53 c_p , 53 $\mathbf{c}_s$, 59 $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$, $\mathbf{c}'_1$, $\mathbf{c}'_2$,
73 c_1 , c_2 , c'_1 , c'_2 , 73 c'_v , c''_v , 298 $(c'_v)_s$, $(c''_v)_s$, 278 C_v ,
 C_p , 54 $\mathbf{C}$, $\mathbf{C}'$, $\mathbf{C}$, 37 $\mathbf{C}'$, 38 $\mathbf{C}_s$, 59 C_s , 60 $\mathcal{C}$, $\mathcal{C}$,
165 $\mathcal{C}_1$, $\mathcal{C}_2$, $\mathcal{C}_1$, $\mathcal{C}_2$, 186 c , 163 c_{st} , 471

d_p , 196 D_{12} , 138 D_{11} , 139 D_T , 191 D_{int} , 300 D_{Tr} , 462 D_{st} ,
147, 464 $\mathcal{D}f$, $\mathcal{D}f_s$, 63 $\mathcal{D}_{1f_1}$, $\mathcal{D}_{2f_2}$, 180 $\mathcal{D}_1^{(r)}$, $\mathcal{D}_2^{(r)}$,
181 $\frac{\partial cf}{\partial t}$, 63 $\frac{\partial cf_s}{\partial t}$, 63 $\left(\frac{\partial cf_1}{\partial t}\right)_1$, 83 $\left(\frac{\partial cf_1}{\partial t}\right)_1$, 83 $\frac{\partial r}{\partial t}$, 156 $\frac{D}{Dt}$, 65

$\frac{D_0}{Dt}$, 157 $d\mathbf{r}$, 16 $d\mathbf{c}$, 34 $d\mathbf{k}$, 17 $d\mathbf{e}$, 84 $d\mathbf{e}'$, 80 $d\mathbf{Q}_s$, 268

$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$, 15 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{C}}$, 16 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{c}}$, 34 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{P}_s}$, $\frac{\partial}{\partial \mathbf{Q}_s}$, 268 $\frac{\partial(\mathbf{u})}{\partial(\mathbf{v})}$, 27 d_{12} , d_{11} ,

186 d_r , 282, 460 $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$, 187, 283 $\mathbf{D}_s^{(i)}$, 460

$c_1, c_2, 239$ $c_s, 480$ $e, e', 80$ $E, \bar{E}, 50$ $\bar{E}, 481$ $e, \hat{e}, 24$
 $\mathcal{E}_s, \mathcal{E}_s^{(i)}, 278$ $E, 221$
 $(c, r, t), 28$ $f(C, r, t), 29$ $f_s(c_s, r, t), 59$ $f^{(0)}, f^{(1)}, f^{(2)}, \dots,$
 149 $f_1^{(r)}, f_2^{(r)}, 181$ $f^{(r)}(c_1, \dots, c_s, r_1, \dots, r_s, t), 419$ $f, 136$
 $F, 62$ $F_s, 63$
 $g_{12}, g_{21}, g'_{12}, g'_{21}, G, 73$ $g_{12}, g_{21}, g'_{12}, g'_{21}, g, g', G, 73$ $\mathcal{J}, \mathcal{J}', \mathcal{J},$
 $\mathcal{J}', 202$ $G, 202$ $G_0, 202$ $\mathcal{G}_0, \mathcal{G}_0, 202$ g (重力), 305
 $H, 90$ $H_{12}(\chi), 203$ $H_1(\chi), 211$ H (Hamilton 函数), 266 $H_s,$
 $H_s^{(F)}, 268$ $h_s, 273$ $H, 484$
 $I(F), 110$ $I_1(F), I_2(F), 111$ $I_{st}(K), 111$ $I_s, 277$
 $i, 434$ $j, 2$ J (雅可比行列式), 27 $J(ff_1), 150$ $J^{(0)}, J^{(r)}, 151$
 $J_1(f_1f), J_{12}(f_1f_2), J_2(f_2f), J_{21}(f_2f_1), J_1^{(r)}, J_2^{(r)}, 181$ $J_s(\Phi), 281$
 $j, 480$
 $k, 50$ $k_T, 191$ $k_{Ti}, 463$ $K_1, K_2, K_0, 292$ $k, 17, 75$
 $l, l_1, 118$ $l_1(c_1), 124$ $l(C_2), 257$ $l(c_2), 515$ $L_{12}(\chi), 204$ $L_1(\chi),$
 211
 $m, 36$ $m_s, 59$ $m_0, m_1, m_2, 72$ $M, 51$ $M_1, M_2, 72$
 $n, 36, 59$ $n_s, 59$ $N, 57$ $N_{11}, 117$ $N_{12}, 116$ $N_s, 278$ $N_1, N_2, \dots,$
 290 $n^{(r)}, 419$
 $p, 46$ $p_0, 281$ $p_{xx}, p_{xy}, \dots, 45$ $p_1, p_2, p_{12}, 223$ $P^\alpha, 266$ $p_n,$
 43 $P, P, 230$ $P_s^\alpha, P_s, P_s^{(i)}, 267$ $p, 45$ $p_s, 60$ $p^{(0)}, p^{(r)}, 155, 183$
 $Q_1, Q_2, Q_{12}, 223$ $q, 58$ $q^{(0)}, q^{(r)}, 155, 183$ $Q^\alpha, 266$ $Q_s^\alpha, Q_s,$
 $Q_s^{(i)}, 267$ $Q, 542$
 $r, 15$ $R_1, R_2, R_{12}, R'_{12}, 225$ $R, 52$
 $s, 170$ s (指数), 234 $s_1, s_2, s_{12}, 320$ $s'_{12}, 351$ $S_m^n(x), 171$
 $S, S_{12}, 246$ $S, 170$ $s_1, s_2, 225$ $S, 55$
 $t, 15$ $T, 171$ $T, 50$
 $U, 19$ $u, 132$ $u'_{11}, 139$ $u, v, w, 34$ $u_0, v_0, w_0, 37$ $U, V, W, 37$
 $V_{12}(r), 231$ $V(r_{ij}), 421$ $V, 51$
 $\bar{W}_+, 96$ $\mathscr{W}_{12}^{(i)}(r), \mathscr{W}_1^{(i)}(r), 227$

$x_1, x_2, 186 \ x_s, 460$

$Z_r, 277, 454$

希腊字母符号

$\alpha_q, 172, 197 \ \alpha_{12}(g, b), 81 \ \alpha_1(g, b), 82 \ \alpha_{12}(g, \chi), 433 \ \alpha_1(g, \chi), 437 \ \alpha_{KL}^{K'L'}, 452 \alpha_{12}(\text{热扩散因子}), 191 \ \alpha_0, 367$

$\beta_q, 175, 199$

$\gamma, 54$

$\delta_q, 197 \ \Delta, 223 \ \Delta, 378 \ \Delta\bar{\phi}, 64 \ \Delta\bar{\phi}_s, 64$

$\Delta_1\bar{\phi}_1, \Delta_2\bar{\phi}_1, 81 \ \Delta_{st}, 462 \ \nabla, 15$

$\epsilon, 75 \ \epsilon_{12} \ 244$

$\theta, 16 \ \vartheta, 481$

$\iota(=\sqrt{-1}), 435$

$\kappa_{12}, 232 \ \kappa, 234 \ \kappa'_{12}, 244$

$\lambda, 136 [\lambda]_1, \dots, 217 \ \lambda_{st}, 147 \ \lambda', \lambda'', 298 \ \lambda_{(1)}, \lambda_{(2)}, 341 \ \lambda_{(s)}, 469$

$\mu, 133 [\mu]_1, \dots, 217 \ \mu_{st}, 146 \ \mu_{(1)}, \mu_{(2)}, 324 \ \mu_{(s)}, 472$

$\nu, 232 \ \nu', 244$

$\xi(f), \xi^{(0)}(f^{(0)}), \xi^{(1)}(f^{(0)}, f^{(1)}), \dots, 149$

$\bar{\omega}_{12}(c_1), 127 \ \bar{\omega}_{12}, 128 \ \bar{\omega}, 288, 411$

$\rho, 36, 59 \ \rho_s, 59$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}, 77 \ \sigma, 118 \ \sigma_{12}, \sigma_1, 227$

$\tau_1, 118 \ \tau_1(c_1), 123 \ \tau, 140, 289 \ \tau_{12}, 143 \ \tau_r, 335$

$\nu, \nu_0, \nu_{00}, 232 \ \nu_{01}, 240$

$\varphi, 16 \ \phi, \phi(c), \dots, 38 \ \bar{\phi}, 39 \ \bar{\phi}_s, 59 \ \phi_{12}^{(t)}, 210 \ \Phi^{(r)}, 154 \ \bar{\Omega}_1^{(1)}, \Phi_2^{(1)}, 185$

$\chi(\text{偏转角}), 75 \ \chi(\text{稠密气体}), 399$

$\psi, 78 \ \phi^{(1)}, \phi^{(2)}, \phi^{(3)}, 67 \ \phi^{(i)}, 68 \ \Psi, 103 \ \phi^{(4)}, 273$

$\mathcal{Q}_{12}^{(l)}(r), 209 \ \mathcal{Q}_1^{(l)}(r), 214 \ \omega_s, \omega_s, 277$

符号 r_q 表示乘积 $r(r-1)\cdots(r-q+1)$, 例如第 171 页和第 234 页。

目 录

第一版序言摘录

第三版序言

符号表

绪论	1
1. 分子假说	1
2. 分子热运动论	1
3. 物质的三态	2
4. 气体理论	3
5. 统计力学	4
6. 分子运动论结果的解释	7
7. 一些宏观概念的解释	8
8. 量子论	10
第一章 矢量和张量	12
1.1. 矢量	12
1.11. 矢量的和与积	13
1.2. 位置的函数	15
1.21. 体积元和球表面元	16
1.3. 并矢式和张量	17
1.31. 矢量与张量及张量与张量的乘积	20
1.32. 关于并矢式的几个定理	22
1.33. 带有微分算符的并矢式	23
一些积分结果	26
1.4. 含有指数的积分	26
1.41. 多重积分的变换	26
1.411. 雅可比行列式	27
1.42. 含有矢量或张量的积分	28

• ▼ •

1.421. 一个积分定理	29
1.5. 反称张量	31
第二章 气体的属性: 定义和定理	34
2.1. 速度及速度的函数	34
2.2. 密度及平均运动	35
2.21. 分子速度的分布	37
2.22. 分子速度的函数之平均值	38
2.3. 分子诸属性的通量	40
2.31. 应力及应力张量	43
2.32. 流体静压强	46
2.33. 分子间作用力和应力	47
2.34. 分子速度的数值	48
2.4. 热	49
2.41. 温度	50
2.42. 状态方程	51
2.43. 比热	52
2.431. 分子运动论温度和热力学温度	55
2.44. 比热的数值	56
2.45. 热传导	58
2.5. 混合气体	58
第三章 Boltzmann 方程和 Maxwell 方程	62
3.1. Boltzmann 方程的推导	62
3.11. 分子属性的变化方程	64
3.12. 用特定速度表示 ϕf	65
3.13. $\int \phi \phi f d\mathbf{c}$ 的变换	65
3.2. 碰撞后守恒的分子属性; 总和不变量	67
3.21. 分子属性变化方程的几种特殊形式	68
3.3. 分子碰撞	70
3.4. 二体碰撞的动力学	72
3.41. 碰撞过程的动量方程和能量方程	72
3.42. 碰撞过程的几何学	74
3.43. 极距线和相对速度的变化	75

3.44. 相互作用规律的具体类型	77
3.5. 分子碰撞的统计力学	78
3.51. $\Delta\bar{\phi}$ 的表达式	81
3.52. 计算 $\partial_e f / \partial t$	82
3.53. $n\Delta\bar{\phi}$ 的其它表达式及其相等性的证明	86
3.54. 一些积分的变换	86
3.6. 分子影响范围的有限性	88
第四章 Boltzmann 的 H 定理和 Maxwell 的速度分布律	90
4.1. Boltzmann 的 H 定理: 均匀稳恒状态	90
4.11. Maxwell 状态下的气体属性	94
4.12. Maxwell 对速度分布问题的原始处理	96
4.13. 光滑容器中的稳恒状态	98
4.14. 存在外力时的稳恒状态	100
4.2. H 定理和熵	104
4.21. H 定理和可逆性	106
4.3. 混合气体的 H 定理; 特定运动的动能均分	108
4.4. 积分定理; $I(F)$, $[F, G]$, $\{F, G\}$	110
4.41. 与括号表达式 $[F, G]$, $\{F, G\}$ 有关的不等式	113
第五章 自由程, 碰撞频率及速度残留现象	115
5.1. 光滑弹性刚球分子	115
5.2. 碰撞频率	116
5.21. 平均自由程	117
5.22. 碰撞频率的数值	118
5.3. 碰撞中相对速度的分布及能量的分布	119
5.4. 碰撞频率和平均自由程与速率的关系	121
5.41. 自由程为指定长度时的几率	124
5.5. 碰撞后的速度残留现象	125
5.51. 平均残留比	128
第六章 输运现象的初等理论	131
6.1. 输运现象	131

6.2. 粘性	131
6.21. 低压下的粘性	133
6.3. 热传导	135
6.31. 壁面处的温度跃变	136
6.4. 扩散	137
6.5. 自由程理论的缺陷	139
6.6. 碰撞间隔理论	140
6.61. 弛豫时间	142
6.62. 弛豫和扩散	143
6.63. 混合气体	146
第七章 单组元气体的非均匀状态	149
7.1. Boltzmann 方程的解法	149
7.11. $\xi(f)$ 的逐次分解;一级近似 $f^{(0)}$	150
7.12. 完全形式解	152
7.13. 可解性条件	154
7.14. $\mathcal{Q}f$ 的逐次分解	155
7.15. Enskog 解法的参数表示	159
7.2. f 中的任意参数	161
7.3. f 的二级近似	163
7.31. 函数 $\Phi^{(1)}$	165
7.4. 热传导系数	168
7.41. 粘性系数	169
7.5. Sonine 多项式	170
7.51. A 和 λ 的形式计算	172
7.52. B 和 μ 的形式计算	175
历史情况的说明	176
第八章 二组元混合气体的非均匀状态	178
8.1. 二组元混合气体的 Boltzmann 方程和输运方程	178
8.2. 求解方法	180
8.21. $\mathcal{Q}f$ 的逐次分解	183
8.3. f 的二级近似	185

8.31. 函数 $\Phi^{(1)}, A, D, B$	187
8.4. 扩散和热扩散.....	189
8.41. 热传导.....	191
8.42. 粘性.....	194
8.5. 四个基本的气体系数.....	195
8.51. 热传导系数、扩散系数和热扩散系数.....	196
8.52. 粘性系数.....	199
第九章 粘性,热传导和扩散: 一般表达式	201
9.1. $[\alpha^{(p)}, \alpha^{(q)}]$ 和 $[\mathbf{b}^{(p)}, \mathbf{b}^{(q)}]$ 的计算.....	201
9.2. 速度变换.....	201
9.3. 表达式 $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_2^2)\mathcal{C}_2]_{12}$ 和 $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ\mathcal{C}_1,$ $S(\mathcal{C}_2^2)\mathcal{C}_2^\circ\mathcal{C}_2]_{12}$	203
9.31. 积分 $H_{12}(X)$ 和 $L_{12}(X)$	204
9.32. $H_{12}(X)$ 和 $L_{12}(X)$ 作为 s 和 z 的函数.....	207
9.33. $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_2^2)\mathcal{C}_2]_{12}$ 和 $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_2^2)\mathcal{C}_2^\circ\mathcal{C}_2]_{12}$ 的计算.....	209
9.4. $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1]_{12}$ 和 $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ$ $\mathcal{C}_1]_{12}$ 的计算.....	211
9.5. $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1]_1$ 和 $[S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ\mathcal{C}_1, S(\mathcal{C}_1^2)\mathcal{C}_1^\circ$ $\mathcal{C}_1]_1$ 的计算.....	213
9.6. 公式表.....	214
9.7. 单组元气体中的粘性和热传导.....	216
9.71. Kihara 近似法.....	218
9.8. 混合气体的行列式元素 a_{pq}, b_{pq}	220
9.81. 扩散系数 D_{12} ; 一阶近似值 $[D_{12}]_1$ 和二阶近似值 $[D_{12}]_2$	222
9.82. 混合气体的热传导系数;一阶近似值 $[\lambda]_1$	223
9.83. 热扩散系数.....	224
9.84. 混合气体的粘性系数;一阶近似值 $[\mu]_1$	225
9.85. 混合气体的 Kihara 近似式.....	225
第十章 粘性,热传导和扩散: 一些特殊分子模型的理论公式	227

10.1. 函数 $Q(r)$	227
10.2. 无外力场作用的弹性刚球分子	228
10.21. 单组元气体的粘性系数和热传导系数	228
10.22. 混合气体; $[D_{12}]_1, [D_{12}]_2, [\lambda]_1, [k_T]_1, [\mu]_1$	230
10.3. 力心点分子	230
10.31. 幂次反比律作用力	231
10.32 单组元气体的粘性系数和热传导系数	234
10.33. Maxwell 分子	235
10.331. 本征值理论	237
10.34. 平方反比律的相互作用	239
同时具有引力场和斥力场的分子	243
10.4. Lennard-Jones 模型	243
10.41. 弱引力场	245
10.42. 非弱吸引力; 12, 6 模型	248
10.43. exp; 6 模型以及其它的模型	251
10.5. Lorentz 近似法	254
10.51. 相互作用力与 r^{-n} 成正比	258
10.52. 由一般公式导出 Lorentz 结果	259
10.53. 准 Lorentz 气体	261
10.6. 力学上相似的分子的混合物	261
10.61. 同位素分子的混合物	264
第十一章 具有内能的分子	265
11.1. 可传递的内能	265
11.2. Liouville 定理	266
11.21. 广义 Boltzmann 方程	267
11.22. $\partial_e f_e / \partial t$ 的计算	269
11.23. 分布函数的平滑化	270
11.24. 输运方程	271
11.3. 静止的均匀稳恒状态	273
11.31. Boltzmann 闭链	275
11.32. 更一般的稳恒状态	276

11.33. 均匀稳恒状态的性质	277
11.34. 能量均分	279
11.4 非均匀气体	280
11.41. f_i 的二级近似	283
11.5. 单组元气体中的热传导	284
11.51. 粘性: 体积粘性	287
11.511. 体积粘性与弛豫现象	288
11.52. 扩散	290
11.6. 粗糙球	291
11.61. 粗糙球的输运系数	293
11.62. 粗糙球模型的缺陷	295
11.7. 球柱体模型	296
11.71. 加载球模型	297
11.8. 近于光滑的分子: Eucken 公式	297
11.81. Mason-Monchick 理论	299
第十二章 粘性: 理论与实验比较	303
12.1. 各种分子模型的粘性系数 μ 的公式	303
12.11. 粘性对密度的关系	304
12.2. 粘性和等效分子直径	306
粘性对温度的关系	307
12.3. 弹性刚球	307
12.31. 力心点模型	308
12.32. Sutherland 公式	311
12.33. Lennard-Jones 12, 6 模型	314
12.34. exp; 6 模型和极性气体模型	317
混合气体	318
12.4. 混合气体的粘性	318
12.41. 粘性随组分的变化	319
12.42. 粘性随温度的变化	323
12.43. 近似公式	324
12.5. 体积粘性	326