



评介《稀薄气体动力学》

胡振华

航天科工集团二院二〇七所, 北京 100854

从上世纪末期开始, 由我国空气动力学工作者共同编著的《近代空气动力学丛书》陆续出版了。这是庄逢甘院士和张涵信院士等领导的丛书编委会组织空气动力学工作者发挥集体智慧编著的一套跨世纪的丛书。丛书较好地总结和反映了 40 多年来中国空气动力学工作者的研究成果和经验, 是空气动力学界乃至整个力学界的一件值得关注的大事。我们欢迎丛书的出现, 希望正如丛书编辑委员会主任委员庄逢甘院士在序言中所说的那样, 这套丛书的出版不仅能促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展, 对世界航空航天事业也有所贡献。我们在这里提出评介的是丛中沈青研究员的《稀薄气体动力学》一书。

航天飞行器在高空 (70km 高程以上) 的机动飞行和制动, 要求空气动力学回答低密度气流绕流时飞行器的受力、受热问题, 要采用间断的而非连续介质的方法即分子动力学的方法, 或稀薄气体动力学的方法; 而 21 世纪技术的许多前沿领域, 如: 微电子蚀刻、微机电系统、真空等离子体加工等, 又使得低速稀薄气体流动的研究变得重要。从这两方面科技发展的需要来看, 我国都应该加强气体力学细观水平的研究。《稀薄气体动力学》一书全面系统地介绍了学科的基础和现代进展, 使读者可以迅捷地到达分子气体动力学学科发展的前沿, 相信将对稀薄气体动力学的普及和发展起到推进作用。

《稀薄气体动力学》包括: 分子结构与能态, 分子动理论基础, 分子表面相互作用, 自由分子流, 连续介质模型, 过渡领域和直接模拟 Monte Carlo 方法等内容, 共七章。

前两章是学科的基础。其中第二章分子动理论基

础, 介绍速度分布函数、分子碰撞、 Boltzmann 方程和气体的平衡态等内容, 是一般稀薄气体动力学和分子动理论都要引入的章节。但在本书中, 对于分子模型与气体的输运特性的关系以及对 VIIS 模型等多种分子模型的引入和叙述则更为集中和清晰, 使读者对于唯象论分子模型的物理概念和应用有系统深入的理解。而第一章分子结构与能态, 则以极小篇幅概述了空气的分子能态结构和能态分布。这样的内容引入稀薄气体动力学书中还是第一次, 这是了解稀薄气体非平衡现象所必须的量子力学和统计力学的知识。从叙述的简练和达到的效果看, 尝试是成功的。

第三章分子表面相互作用, 除了通常的概念外, 还给出了互易性原理的简明推导, 引进了基于此原理的 CLL 分子表面相互作用模型。这是同类文献中对于现代分子表面相互作用有较全面、深入讲解的专著。

第四章对于较成熟定型的自由分子流作了简练的叙述。

第五章叙述滑流领域流动的处理方法, 介绍了从 Boltzmann 方程推导 Euler 方程、 Navier-Stokes 方程、 Burnett 方程和 Grad 十三矩方程的途径以及 Sone 的小 Kn 数渐近理论。书中以滑移速度和温度跳跃的推导为例, 演示了通过 Knudsen 层内通量守恒推导多组分化学非平衡条件下的滑流边界条件的现代方法, 给出了一些简单解和圆球热泳问题的解。

第六章综述了求解过渡领域的各种方法。对于它们的基础、发展现状、适用范围和优缺点都有较全面的介绍。

第七章讲述了直接模拟 Monte Carlo (DSMC) 方法. 给出了用 DSMC 方法求解问题的实例 (附有 FORTRAN 程序). 介绍了处理内能激发松弛和化学反应的方法, 包括作者发展的处理内能分配出现奇异性情况的推广取舍法以及从依赖空间取向化学模型出发, 对于 Kooij-Arrhenius 化学反应速率常数的推导. 介绍了复杂流场通用程序的进展和位置元方法. 随着微机电系统 (MEMS) 的发展, 对低速稀薄气体流动的模拟是现实而紧迫的任务. 书中介绍了樊青研究员与沈青研究员发展的信息保存 (IP) 方法, 尤其是介绍了长微槽道模拟所碰到的出入口边界条件的互相影响问题和解决方法, 即: 守恒形式的质量守恒方程和加快收敛的超松弛方法.

总之, 《稀薄气体动力学》一书系统而简明扼要地介绍了稀薄气体动力学的基本概念和各种方法, 其中许多章节介绍了作者和他的同行在过去多年中的研究成果和创新贡献, 包括带有奇异性分布的内能松弛的模拟和化学反应的模拟及 Kooij-Arrhenius 式的推导, 处理低速微型流动的信息保存法及其最新进展, 求解流体力学问题的动理论图式等. 与已有的稀薄气体动力学书籍相比, 本书对于学科的物理方面给予了更多的强调, 如分子能态分布物理基础的引入, 对于与黏性系数关联的分子模型引入的系统清晰的讲解, 一般滑移边界条件的物理推导, 热泳概念的引入等. 而现有稀薄气体动力学书籍多注重强调数学方面, 这往往会使许多学生较容易地迷失方向. 与之相反, 本书因其物理取向, 对于工程师、物理工作者和希望对本领域有一清晰概念理解的学生将大有裨益.

作者多年来活跃在稀薄气体动力学前沿领域的

科学实践中, 他把取得的丰硕成果和宝贵经验写入本书中, 热诚地奉献给气动事业和后来者. 本书的叙述系统而深入, 对于分子动力学的许多基本问题总是从物理概念的深入讲解出发, 同时又注重方程、公式的严格推导, 使得具有一般高等工业院校数学、物理基础的读者完全可以独立掌握书中讲解的内容, 用之解决一些实践中碰到的问题, 并开展前沿课题的研究.

现有的稀薄气体动力学书籍多集中注意于高超声速流动, 而近年来 MEMS 的制造应用发展十分迅速, 构成 21 世纪科技发展的前沿. 因其尺寸纤细, 气体在其中的流动进入了滑流和过渡领域, 这给稀薄气体动力学提出了新的课题. 在国际文献中, 现有 G.E. Karniadakis 和 A. Beskok 的 *Micro Flows, Fundamentals and Simulation* (Springer-Verlag, 2002) 一书涉及了低速微流体力学问题. 可惜其中介绍的较成熟的解题工具主要是针对滑流领域的, 如加滑移边界条件求解 Navier-Stokes 方程和用于整理管道流动数据的比例换算法. 而本书则较多地注意了对于低速稀薄气流的各个领域的问题的解决方法, 尤其包括求解低速微流动各个领域的信息保存法的系统介绍, 求解一般内部流动问题所遇到问题和克服的方法等. 这使之成为现有稀薄气体动力学书籍中有独到之处的专著, 如能有英文译本出版在国际上也会受到欢迎. 届时, 我们希望能对一些本领域现有方法, 如 Lattice Boltzmann 方法、间断速度方法、高阶方程方法, 如 Burnett 方程方法以及信息保存法等的基本概念、方法论、边界处理进行深入分析, 并加上可能的向有温度变化情况的推广等, 这将使本书成为对于本领域工作的学者非常有益的、不可或缺的参考书.