

气体运动论

——王承书论文选集

原子能出版社

气体运动论

——王承书论文选集

科学出版社

气体运动论

——王承书论文选集

应纯同 译
张存镇

原子能出版社

(京)新登字 077 号

图书在版编目(CIP)数据

气体运动论——王承书论文选集:英文/王承书著;应纯同,张存镇译·—北京:原子能出版社,1994.12

ISBN 7-5022-1179-9

I. 气… II. ①王…②应…③张… III. 气体分子运动论—文集 IV. O354.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 03976 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:张立均

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张 8 字数 215 千字

1994 年 12 月北京第一版 1994 年 12 月北京第一次印刷

印数:1-600

定价:15.00 元(精)

内 容 简 介

本文集收入了我国著名物理学家、中国科学院院士王承书教授早年在美国所发表的部分科学论文。这些文章集中反映了王承书教授在气体运动论方面所做的贡献；它们不但对气体运动论的发展起到了重要作用，就是今天读来仍使人获益匪浅。文集中有她得到的多原子气体方程，这是玻耳兹曼方程的推广，在国际上被广泛地称为 WCU 方程。从 50 年代直到目前许多国家的学者在他们的有关气体运动论的著作中相当多的地方引用和介绍了王承书教授的工作。

本文集是有关专业的科技工作者、研究生及大学生极有价值的参考文献。

王承书

(C. S. WANG CHANG)



王承书(1912. 6. 26—1994. 6. 18), 女, 湖北武昌人。1930 年入燕京大学物理系。获该校理学士(1934)和硕士(1936)学位。1934—1937 年任该校物理系助教。1938—1939 年任湘雅医学院讲师。1941 年赴美国深造, 1945 年获 Michigan 大学哲学博士。1946—1956 年任该校副研究员、研究员。其间两度(1945 夏, 1948—1949 年)在普林斯顿高级研究所工作。1956 年 10 月回国, 历任中国科学院原子能研究所研究员(1956—1964), 并先后任理论研究室、热核聚变研究室、铀同位素分离研究室副主任, 兼任北京大学教授(1957—1958); 核工业部第三研究院研究员兼副院长(1964—1978), 核工业部科技局总工程师(1978—1986)和科技委常委。1978 年起兼任清华大学工程物理系教授。1981 年当选为中国科学院学部委员(院士)。

王承书的重要研究工作有三方面: 一是在美国从事统计物理学和稀薄气体动力学的研究, 根据 Boltzmann 方程研究稀薄气体中的输运过程, 声波在单元和多元气体中的传播和衰减, 并发现了线性化的 Boltzmann 积分算符的本征函

数及本征值,提出了被称作 WCU 方程(王-Uhlenbeck 方程)的多原子分子气体的修正 Boltzmann 方程。二是回国后在中国科学院原子能研究所筹建等离子体与热核聚变研究室,培训了这方面的理论队伍。三是进行铀同位素分离的研究,包括扩散工厂的启动、运行的级联理论分析和经济性分析;扩散机的改进和新型扩散机的设计;以及离心法和激光法分离铀同位素的研究。其间培养了一大批铀同位素分离的理论研究人员,为我国铀同位素分离事业作出了极大贡献。

前言

这本文集收入了我国著名物理学家、中国科学院学部委员王承书教授于40—50年代在美国所发表的部分科学论文。文集内容展示了王承书教授富有开创性的工作和在科学上的成就。

十几年前我在王先生指导下在清华大学就Chapman和Cowling的《非均匀气体的数学理论》一书举办的读书班上介绍了该经典著作的主要内容。从此开始我对王先生在气体运动论研究中的贡献有所了解。在我更多地阅读有关气体运动论方面的著作和文章及与国外的一些学者接触后愈来愈了解到王承书先生在气体运动论的发展中作出了很多贡献。然而王承书与Uhlenbeck教授一起所进行的工作由于种种原因在国内却没有得到应有的反映。王先生所写的有关论文与文章就目前所知已达15篇(目录附后)。然而这些文章有的在国内外几乎找不到,有的甚至在美国也很难找到。这种种情况促使我们更坚定了要出版王承书文集的决心。但是王先生本人一直不愿出版她的文集。在文章的搜集和出版上她采取“不合作”态度。经我们多方努力终于搜集到王先生的一部分著作。其原文都是英文,经我们翻译后编成此文集,在原子能出版社大力支持下得以出版。

本文集共收集了王承书的一篇博士论文及九篇文章。这些著作集中反映了王承书教授在气体运动论方面所作的贡献。为了便于读者阅读与了解,这里以极少篇幅介绍一下气体运动论的发展简史。气体运动论是根据微观粒子的运动来解释所观察到的气体的宏观性质,特别是解释气体的输运现象,并计算有关的输运系数。19世纪中R. Clausius, J. C. Maxwell和L. Boltzmann三位学者在气体运动论方面所进行的工作为这一学科奠定了基础。Clausius于1858年提出了平均自由程的概念。这一概念在了解气体的某些输运特性如热传导、

粘性及扩散中仍然起重要作用。Maxwell 于 1859 年提出了速度分布函数 f 的概念,同时利用 Clausius 提出的平均自由程概念求得了气体输运系数的表达式。他还推导了输运方程。然而 Maxwell 只能对一种特殊的被称作 Maxwell 气体的气体求得输运系数。Maxwell 气体是指分子之间作用力为斥力而其大小正比于两分子间距离 r 的负 5 次方,即 r^{-5} 。对于 Maxwell 气体无需解出 f 本身就能计算输运系数。1872 年 Boltzmann 在他的文章中证明了著名的 Boltzmann 的 H 定理,并用此定理求证了平衡态的速度分布函数。在他的文章中还给出了非平衡态速度分布函数 f 满足的方程——Boltzmann 方程。它是一个非线性积分微分方程。如果能够求得 f 的解,则气体的各个输运系数都可求得。遗憾的是 Boltzmann 在其后发表的一系列文章中声称 Boltzmann 方程只对 Maxwell 气体容易求解,而对所有别的分子模型,特别是对刚性球模型,求解是很困难的。他还讲,要得到他的方程的一般情况下的解几乎是令人绝望的。从 1866 年到 1916 年的 50 年中,几乎所有的物理学家只讨论 Maxwell 气体。D. Hilbert 在 1912 年发表了关于 Boltzmann 方程研究的文章,他指出了 Boltzmann 方程等价于第二类积分方程。对这样的积分方程有一系列严格的数学理论。这一工作也是 Boltzmann 方程能得到一般情况下解的基础。在 Hilbert 的工作基础上,D. Enskog 和 S. Chapman 两人在 1912—1916 年几乎同时相互独立地进行了 Boltzmann 方程的求解工作。他们两人从不同的方程出发却得到了相同的结果。两人所用的逐级近似解法被称为 Chapman-Enskog 方法。这个方法以 Knudsen 数,即气体平均自由程与气体流动的特征尺度之比,作为小参量展开。如果速度分布函数只取到零级近似,相应地可得到描述气体运动规律的 Euler 方程。如果速度分布函数取到一级近似,相应地可得到描述气体运动规律的 Navier-Stokes 方程,同时得到描述热传导、粘性及扩散现象的定律,并且还可求得各有关的输运系数与分子间作用力模型的关系。D. Burnett 在 1935 年建议将速度分布函数按 Sonine 多项式展开,由此他比较容易地得到速度分布函数取到二级

近似的结果。Sonine 多项式的应用使得速度分布函数可取到更高阶近似。

以上介绍的只是与王承书所作贡献有关的气体运动论发展史的一部分。王承书在 40 年代后期指出了 Chapman 和 Cowling 在《非均匀气体的数学理论》一书中展开到二级近似所得某些系数中出现的错误。这些错误将直接影响到理论与实验的比较。后来该书第二版中这些错误得到了纠正。王承书还进行了三级甚至部分四级展开的工作。王承书对线性化 Boltzmann 方程的碰撞算子从本征值和本征函数方面进行了研究。这是一项开创性的工作。她证明了 Sonine 多项式就是 Maxwell 气体情况下线性化 Boltzmann 方程碰撞算子的本征函数。这方面的工作不但在理论的完整性上也在实用上对 Boltzmann 方程的研究作出了贡献。自然界中实际存在的气体绝大部分是多原子分子组成的。然而到 50 年代前没有多原子分子气体所适用的 Boltzmann 方程。王承书与 Uhlenbeck 一起利用半经典的方法提出了考虑分子间不同形式能量存在转换情况下的 Boltzmann 方程。这一方程被广泛地称为 WCU 方程(王承书的英文名为 C. S. Wang Chang)。她在气体运动论方面所进行的工作得到了广泛的承认与引用。无论是 50 年代、60 年代还是最近出版的有关气体运动论的重要著作中,都有相当多的地方介绍了王承书所做的工作。这些著作的作者属于美国、英国、意大利、苏联等各个国家。

以上的简要介绍指出了王承书所做工作的几个主要部分。为了使读者对本文集所收集的文章有一概括了解,下面再详细些介绍各篇文章的主要内容。

王承书的博士论文《双原子气体第二维里系数的量子理论》完成于 1944 年,导师是 Uhlenbeck 教授。论文研究了双原子分子间作用力与分子间的方位及距离有关时的第二维里系数。在论文中对单原子气体的 Kirkwood 展开式进行了推广,从而正确地得到转动量子校正项。王承书将双原子分子看成具有质量 m 及惯性矩 I 的刚性球。每个分子有五个自由度,三个属于平动运动二个属于转动运动。她不

但求得了经典理论的转动双原子分子的维里系数,还求得了考虑量子理论的第二维里系数。所得到的量子校正项由两部分组成,即平动部分及转动部分。在论文中列出了普遍情况下的第二维里系数表达式。在论文中王承书还将她的理论与实验结果主要是氢的第二维里系数进行比较。他们符合得是很好。

《多原子气体的热传导和粘滞性》一文是以三位作者,即王承书, Uhlenbeck 和 de Boer,联合署名正式发表的。实际上,文章反映了王承书和 Uhlenbeck 一起及 de Boer 互相独立地完成的工作。在 1948 年及 1951 年王承书和 Uhlenbeck 写出了关于具有内能自由度分子组成的气体的输运特性的系统的研究报告。de Boer 在二次大战期间也独立地得到了类似的理论结果。后来在互相比对并修正了一些小的错误后,三位作者在 1954 年完成了一个共同的手稿。但由于某种原因此手稿没有发表。直至 1964 年才以共同手稿的原始形式在《Studies in Statistical Mechanics》第二卷中正式发表。该文用了半经典的方法处理了具有内能的多原子气体的 Boltzmann 方程中的碰撞项。只是由于这样的处理方法才得以讨论多原子气体。而自然界存在的气体中绝大多数是多原子气体。多原子气体,即有内能的分子组成的气体,由于有可能出现分子平动能和内能之间的能量交换将存在更多的输运系数,比如体膨胀系数。其他的输运系数也变得更为复杂。该文还将体膨胀系数与弛豫时间联系起来。王承书关于方程的处理方法及求解方法都属于开创性的工作。不仅对多原子气体有用,而且对其它的情况也是很有用处的。王承书在这方面的工作得到广泛的承认与应用。她所得到的方程被称为 WCU 方程,这一方程是 Boltzmann 方程的推广。

《论稀薄气体中的输运现象》,《氦气中声音的色散》,《弱激波厚度的理论》,《在单原子气体中声音的传播》和《在交变外力场中的气体运动论:Rayleigh 问题的推广》共五篇文章收集在《Studies in Statistical Mechanics》第五卷中。该卷书出版于 1970 年。五篇文章完成的时间从 1948 年到 1956 年。当初是以报告的形式写成。这些报告

由于涉及气体分子运动论的一些基本问题与处理方法,特别是反映了王承书和 Uhlenbeck 的某些开创性的工作,所以在 1970 年前,已被广泛地介绍与引用。至于到 1970 年才出版,正如 Uhlenbeck 所述,是因为他认为这些文章仍然具有生命力,也是对大学生们介绍气体分子运动论的很好的材料。他还指出所有这些工作没有王承书的坚韧不拔及奉献精神是不可能完成的。这五篇文章可以说组成了一个整体。它介绍了稀薄气体输运过程的理论与处理方法。下面分别介绍一下各篇文章。

《论稀薄气体中的输运现象》介绍了稀薄气体情况下求解 Boltzmann 方程的逐级近似法。讨论了求解的限制条件。文中还列出了速度分布函数取到二级近似所得的一些结果。王承书发现热流矢量表达式中有两个系数在 Chapman 和 Cowling 所写的《非均匀气体的数学理论》《The Mathematical Theory of Nonuniform Gases》第一版中是错误的。 θ_2 应该是负值而被写成正值, θ_5 中的一部分有错误。R. Schenberg 等在 1946 年根据 Chapman 第一版书中的公式计算了空气中声音的色散问题。他们的结论是即使在极端情况下,也不会观察到声音的色散问题。然而王承书 1948 年在找出了 Chapman 书中的错误后发现他们所得的结论是错误的。当错误被纠正后色散比原来计算的结果大 6—7 倍。因而有可能在实验中被观察到。在 Chapman 和 Cowling 出第二版书时改正了这一错误。文章还介绍了对多原子分子气体研究所得的一些结果。文中还提出了尚未解决的问题如处理过渡区的问题及边界条件的考虑等等。

《氦气中声音的色散》一文是在纠正了 Chapman 书中的错误后以氦气作为例子计算声音在氦气中的色散。由于氦气分子间作用力模型被广泛地研究过,王承书选择了氦气作为算例。文中给出了考虑二级近似所得的公式。在计算中还算到了三级近似。计算结果显示声音的色散若以高频声速和零频声速之差与零频声速之比 $\Delta V/V_0$ 表示,在一定条件下 $\Delta V/V_0$ 可达 20.8%。而用 Chapman 原来给的错误公式所求得的结果 $\Delta V/V_0$ 只有 3%。

《弱激波厚度的理论》一文进行了有关激波厚度的理论研究。激波厚度和声音的色散是最适合于用高阶近似所得流体力学方程研究的两个问题。这是因为它们不涉及附加的边界条件。也就是说在 Knudsen 数不太小时可以研究高阶近似对所得结果的改善情况。文中讨论了一组近似的结果,即 Navier-Stokes 方程解的结果。接着讨论二级近似,即 Burnett 方程的结果。还讨论了三级近似的结果。最后对单原子气体进行了计算。王承书发现如果将激波厚度按 $M - 1$ 的幂级数展开(M 为来流 Mach 数),在 $M - 1$ 不大时收敛就很慢,也就是说对弱激波就收敛得不快。王承书的这一工作是用 Chapman-Enskog 逐级近似解激波厚度的系统研究。在弱激波情况下,比如 $M - 1 = 0.2$ 情况能明显地看到考虑高阶近似后结果有明显的差别。然而对于强激波来讲就不能再用 Chapman-Enskog 逐级近似法了。

《在单原子气体中声音的传播》一文是将 Boltzmann 方程线性化后研究声音在单原子气体中的传播。文中既讨论了色散也讨论了吸收问题。该文最重要的贡献在于研究了线性化 Boltzmann 方程碰撞算子的本征值和本征函数。王承书是进行这方面工作的首创者。过去 Hilbert-Enskog 在用逐级近似法解 Boltzmann 方程时对速度分布函数是按速度平方的幂级数展开的。后来 Burnett 指出按 Sonine 多项式展开的优越性,可使收敛性得到改善。王承书证明了对 Maxwell 气体的线性化 Boltzmann 方程的碰撞算子的本征函数是 Sonine 多项式。这一点无论从理论上还是从实用上都有重要意义。文章证明了一本征值和本征函数的某些性质,如所有本征值为非正值等。文中列出了最初的一些本征值和本征函数。对于非 Maxwell 气体的情况也提出了解决问题的方法。本征值和本征函数的方法自 50 年代以来一直是气体运动论中研究探讨的一个重要方面。

《在交变外力场中的气体运动论:Rayleigh 问题的推广》一文讨论的是 Rayleigh 问题的推广。如果有一粒子被周围气体所包围。当粒子受交变外力作用时粒子所吸收能量将和此粒子固有频率 ω 。外

力作用频率 ω 及粒子与气体分子的质量比有关。文中讨论了各种质量比的情况及不同分子作用力模型的吸收能量和 ω 的关系。而 Rayleigh 问题只是 $\omega_0=0$ 及无外力存在时的一种特殊情况。王承书研究了普遍情况。

《论气体近壁处的特性——Kramers 问题》一文是王承书回国前完成的最后一篇论文。气体在固体壁处的特性是重要的边界条件。文章从线性化 Boltzmann 方程出发利用碰撞算子的本征函数研究了存在无穷大平板和没有此板时速度或温度分布的差异。文中得到了含有无穷行列式组成的形式解。可以用逐级近似法求得不同阶的结果。由于收敛比较快一级近似就已经是相当好的结果。从文中结果可知在固体壁附近存在着速度或温度的跳跃。

从以上的简单介绍可看到王承书教授在30多年前进行的卓越的工作。本文集收集的文章不但对气体运动论的发展起到了重要作用，就是到今天读来仍然有很大收获。从中不仅能了解到气体运动论的重要内容，还可以学到王承书教授坚韧不拔，治学严谨的可贵作风。

附带说明一下，本文集中的文章都是老文章，少量涉及计量单位的地方使用的自然都是 CGS 制单位，为保持图、文原貌，计量单位均不做更动，只是在文中首次出现某一 CGS 制单位时，在页下注出相应的国际单位制单位。

另，原子能出版社副编审张立均同志对促进本文集的出版及译稿的审定等付出很大努力，做了很多工作，特此致谢。

清华大学

应纯同

1993. 10

附： 王承书(C. S. Wang Chang)部分著作目录

- [1] C. S. Wang Chang, The quantum theory of the second virial coefficient of the diatomic gas. 博士论文. Michigan Univ. Ann Arbor. 1944
- [2] C. S. Wang Chang & G. E. Uhlenbeck, On the transport phenomena in rarefied gases. Univ. of Michigan. 1948. 1970年正式出版在 Studies in Statistical Mechanics V. 5 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)
- [3] C. S. Wang Chang, On the dispersion of sound in helium, Univ. of Michigan. 1948. 1970年正式出版在 Studies in Statistical Mechanics, V. 5 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)
- [4] C. S. Wang Chang, On the theory of the thickness of weak shock waves. Univ. of Michigan. 1948. 1970年正式出版在 Studies in Statistical Mechanics, V. 5 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)
- [5] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, Transport phenomena in very dilute gases I, 1949. Univ. of Michigan, Report.
- [6] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, Transport phenomena in very dilute gases II, 1950. Univ. of Michigan, Report.
- [7] C. S. Wang Chang and Falkoff, On the continuous Gamma-Radiation accompanying the beta-decay of nuclei. Physical Review, V. 76 p. 364, 1949
- [8] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, Transport phenomena in polyatomic molecules, Univ. of Michigan Publication, CM-681, 1951
- [9] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, On the propagation of sound in monatomic gases. Univ. of Michigan, 1952. 1970年正式出版于 Studies in Statistical Mechanics V. 5 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)
- [10] G. E. Uhlenbeck and C. S. Wang Chang. Is there a neutral μ -Meson? Physical Review (L) V. 85 p. 684, 1952
- [11] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, The heat transport between two parallel plates as function of the Knudsen number. Project M999, Eng. Res. Inst., Univ. of Mich. 1953
- [12] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck. The Couette flow between two parallel plates as function of the Knudsen number. Project M999, Eng. Res. Inst., Univ. of Mich. 1954
- [13] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, The kinetic theory of a gas in alternating outside force fields: a generalization of the Rayleigh problem. Univ. of Michigan 1956.

1970年正式出版于 Studies in Statistical Mechanics V. 5 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)

- [14] C. S. Wang Chang and G. E. Uhlenbeck, On the behavior of a gas near a wall; a problem of Kramer's. Univ. of Michigan 2457-1-T. 1956
- [15] C. S. Wang Chang, G. E. Uhlenbeck and J. de Boer, The heat Conductivity and Viscosity of polyatomic gases. 在 Studies in Statistical Mechanics V. 2中1964

目 录

双原子气体第二维里系数的量子理论(博士论文,1944)

..... (1)

第一章 引言和问题说明..... (3)

第二章 单原子气体的结果综述..... (8)

第三章 关于双原子分子的已有结果的综述 (13)

第四章 转动量子效应理论 (29)

第五章 与实验的比较 (54)

多原子气体的热传导和粘滞性(1964)..... (71)

气体运动论 (98)

前言 (98)

第一章 论稀薄气体中的输运现象(1948)..... (100)

第二章 氦气中声音的色散(1948)..... (114)

第三章 弱激波厚度的理论(1948)..... (123)

第四章 在单原子气体中声音的传播(1952)..... (137)

第五章 在交变外力场中的气体运动论:Rayleigh 问题的推广(1956)..... (169)

论气体近壁处的特性——Kramers 问题(1956) (192)

有没有中性 μ 介子?(1952) (223)

伴随核 β 衰变的连续 γ 辐射(1949) (226)