

高超声速飞行中的 辐射输运和磁流体力学

王保国 黄伟光 著



科学出版社

高超声速飞行中的 辐射输运和磁流体力学

王保国 黄伟光 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分为五篇 13 章,分别从辐射流体力学和磁流体力学基本方程组的构成、离散与求解以及应用等方面进行了系统的研究。它是飞行器热防护、红外隐身以及磁流体控制的理论基础。书中给出了国内外著名科学家的重要著作与文献 882 篇,为读者提供了一个十分宝贵的文献参考平台。

本书可供从事流体力学、飞行器热防护、高温辐射和磁流体控制等专业的硕士生、博士生和相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高超声速飞行中的辐射输运和磁流体力学/王保国,黄伟光著. —北京:科学出版社,2018. 3

ISBN 978-7-03-056869-4

I. ①高… II. ①王…②黄… III. ①高超声速飞行器-气动传热-研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 048898 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张:33 1/4

字数:670 000

定价:200.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

山东临清是明清时期中国的 30 个大城市之一,素有“临清傍运河,富庶甲齐郡”、“繁华压两京”,并享有“南有苏杭,北有临张”的美誉。它是我国国学大师季羨林先生的故乡,也是本书第一作者出生的地方。作者儿时常听大人们讲:季羨林先生主张“天人合一”、关注人与大自然的和谐,“关爱地球家园”。尽管当时作者不懂其中的道理,更不知道天到底有多大、人体到底有多么复杂,但坚信:季先生的教诲一定是对的,一定有着它深奥的道理。作者儿时常喜欢抬头看满天闪烁的星星,但始终感到数也数不清,一种对太空充满着敬畏与好奇之心激励着儿时的成长。

20 世纪 60 年代,Albert Einstein(爱因斯坦)两部著作的中译本问世了:一部是《相对论的意义》(1961 年,科学出版社),另一部是《狭义与广义相对论浅说》(1964 年,上海科学技术出版社)。当时作者的父母将这两本书作为生日礼物送给本书的第一作者,父亲站在一旁双目盯着孩儿、母亲手捧这两本宝书交给王保国的情景,至今回想时仍热泪盈眶。作为中学生,那时对书中的内容读不太懂,但在朦胧中已使作者儿时感到相对论对学习理论物理、了解宇宙和从事航天科学研究是非常重要的理论基石,将来长大后要认真学习它。

Einstein 1905 年创立了狭义相对论,1915 年又在狭义相对论的基础上创建了广义相对论。狭义相对论的基本假设有两条:一条是狭义相对性原理,另一条是光速不变原理,该理论的核心方程是洛伦兹变换群。另外,狭义相对论只适用于惯性坐标系,它的时空背景是平直的四维时空。广义相对论的基本假设也有两条:一条是等效原理,另一条是广义相对性原理,该理论的核心方程是 Einstein 的引力方程,即

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}, \quad \mu, \nu = 1, 2, 3, 4$$

式中, $g_{\mu\nu}$ 为二阶度规张量的协变分量; $R_{\mu\nu}$ 为 Ricci 张量的协变分量; R 为曲率标量; $T_{\mu\nu}$ 为宇宙介质的能量动量张量的协变分量; G 为引力常数; Λ 为宇宙常数。这里应强调的是,广义相对论适用于包括非惯性系在内的一切参考系,它的时空背景是弯曲的 Riemann(黎曼)时空。

狭义相对论预言了牛顿经典物理学所没有的一些新效应,如时间膨胀、长度收缩、横向 Doppler(多普勒)效应、质速关系、质能关系。一切微观物理理论(如基本粒子理论)和宏观引力理论(如广义相对论)都满足狭义相对论的要求。这些相对性的动力学理论已经被许多高精度的实验所证实。另外,Einstein 的引力理论将

时-空几何和引力场统为一体,它第一次为宇宙学提供了动力学基础。因此,应用广义相对论可以根据宇宙的现在去研究宇宙的过去和未来。此外,广义相对论理论也像粒子物理学标准模型那样,也应为近代大量的科学实验和观测所证实。在粒子物理学中,1964年英国爱丁堡大学 Higgs 教授和比利时布鲁塞尔大学的 Brout 教授与 Englert 教授对 Higgs Bose 子的存在做出了预言并提出了 Higgs 机制。48年后,即2012年7月4日 CERN(欧洲核子研究中心)宣布了 Higgs Bose 子存在的坚实实验证据,从而粒子物理学标准模型所预言的62种基本粒子全部被实验证实。Higgs Bose 子被确认,这是100年来人类最伟大的发现之一,因此2013年10月8日,84岁的 Higgs 教授和81岁的 Englert 教授荣获2013年诺贝尔物理学奖。Brout-Englert-Higgs Bose 子简称 Higgs 粒子,又称为“上帝粒子”,它对解释为什么基本物质具有质量起着关键作用。同样,广义相对论的提出,也必须接受大量的科学实验与观测之后才能被学术界所接受。这里以广义相对论的实验验证和引力波探测为例:

① 在水星近日点的进动中,每百年43s的剩余进动长期无法得到解释,但应用广义相对论便得到完美的解答。

② 光线在引力场中的弯曲,用广义相对论计算的结果比牛顿理论正好大一倍,Eddington(爱丁顿)的观测团队借助1919年5月29日的日全食进行观测的结果证实了广义相对论是正确的。

③ 光谱线的引力红移。按照广义相对论,在引力场中的时钟要变慢,因此从恒星表面射到地球上的光线其光谱线会发生红移。目前,人类仅知道两种红移机制:一种是 Doppler 红移,它是由于光源在空间中运动造成的;另一种是引力红移,它是由于空间膨胀造成的。因此两种红移有着不同的本质,引力红移又称宇宙学红移,这种现象也在很高精度上得到了证实。

④ 人类首次探测到引力波信号。2015年9月14日激光干涉引力波探测(laser interferometer gravitational wave observatory, LIGO)团队直接探测到两个质量分别为36倍与29倍太阳质量的黑洞合并成单一黑洞(合并后质量变为62倍的太阳质量)时释放的引力波信号(又简称双黑洞合并的引力波信号),所获得的观测数据与广义相对论的预测完全吻合。上述两个黑洞的合并过程中,将有大约3个太阳质量转化成以引力波形式散发出去的能量。

⑤ 人类第二次探测到引力波信号。2015年12月26日, LIGO 合作组(LSC)和 Virgo 合作组的科学家探测到两个质量分别为14倍和8倍左右太阳质量的黑洞合并成一个质量约为21倍太阳质量的黑洞所释放的引力波信号。人类两次在地球上探测到引力波信号,这就为更加精确地检验爱因斯坦的广义相对论并对黑洞的各项参数做出了更加精确的估算。

⑥ 黑洞是广义相对论的预言之一,黑洞物理与量子理论联系密切。黑洞理论

涉及德国天文学与物理学家 Karl Schwarzschild(史瓦西, 1873—1916)的度规和半径。如果将任何一个天体的全部质量都“塞进”它的史瓦西半径以内, 这个天体便成为一个黑洞。可以计算: 太阳的史瓦西半径大约是 3km, 而地球的史瓦西半径只有 9mm。在黑洞理论研究方面, John Wheeler(惠勒, 1911—2008)、Yakov Borisovich Zeldovich(泽尔多维奇, 1914—1987)和 Dennis Sciama(夏玛, 1926—1999)是三位领衔大师, 其中惠勒是 Richard Phillips Feynman(费曼, 1918—1988)的老师, 夏玛是 Stephen William Hawking(霍金)的导师。

广义相对论诞生至今已 100 多年了。在过去的 100 多年里, 与相对论同时创建的量子理论取得了长足的进展, 相比之下, 广义相对论却发展得较为缓慢。这一方面是由于广义相对论在数学上以及物理内容的本身上都不好理解, 另一方面更重要的是在 20 世纪初期与中期还缺少检验引力理论的大量实验数据, 而且至今也未捕捉到引力子的存在。

20 世纪中叶, 远程遥感技术和航天飞行技术获得了巨大的发展, 航天飞行技术的飞速发展使得天文学家和天体物理学家能够把高精度的远程遥感设备放置在地球大气层的上方。以 NASA 建造的著名四大观测台为例, 自从 Hubble(哈勃)太空望远镜 1990 年发射升空以来, 它对天文学的发展做出了巨大贡献; 另外 Compton(康普顿)伽马射线观测台于 1991 年升空, 它对伽马射线天文学的发展做出了巨大贡献; 还有 Chandrase(钱德拉)X 射线观测台于 1999 年升空, 它对 X 射线天文学的发展做出了巨大贡献; 此外, Spitzer(斯皮策)太空望远镜于 2003 年升空, 它对红外天文学的发展做出了巨大贡献。毫无疑问, 上述四大观测台以及 James Webb(韦伯)太空望远镜(将于 2019 年升空)构成了 NASA 最重要的五大观测工具, 其探测领域从光学扩大到紫外、X 射线、 γ 射线等波段, 从而使现代天文学真正走向了“空间天文”和“全波段天文”, 用它们去观测宇宙、去证实物理学中的相关理论与定律便有了实验量测上的可靠保障。

随着空间技术的发展, 在地球大气层外进行观测已成为一种基本方式。空间观测设备与地面观测设备相比, 具有极大的优势: 以光学望远镜为例, 望远镜可以接收到宽得多的波段, 短波甚至可以延伸到 100nm。由于没有大气抖动, 分辨本领得到了很大提高。事实上, 在大气层外的观测, 只受衍射极限的限制, 角分辨率可以比地面观测提高近 10 倍, 达到 0.1 角秒, 这相当于能够分辨出约 10km 之外的一枚 5 分的硬币, 为了更充分地展示这方面空间天文望远镜的进展, 以下列举 NASA 在 2003~2014 年间升空的四个重大空间项目:

(1) Spitzer 太空望远镜主镜口径为 84cm, 配备有极高灵敏度的红外探测元件, 能够穿越气团和尘埃看到恒星的诞生和死亡, 还能够观测那些宇宙大爆炸之后不久形成的星系, 让科学家了解宇宙早期的模样。Spitzer 太空望远镜于 2003 年升空。

(2) 空间干涉测量飞行任务(space interferometry mission, SIM)测量仪, 2009年送入近地轨道。它是一个在空间释放的由 7 架 30cm 口径镜面排列而成长达 10m 的望远镜阵。运用 Michelson 光学干涉技术, 其最终的空间分辨率可比哈勃太空望远镜(Hubble space telescope, HST)高近千倍, 它能够提供毫角秒级精度的恒星的绝对精度定位的测量, 能够产生高分辨率的图像, 用于实现搜索其他行星的科学研究。

(3) 新一代太空望远镜(next generation space telescope, NGST)也是专为红外观测设计的, 配有一块直径 7m 的反射镜。NGST 的造价仅为 HST 的 1/4, 但它对天体结构的分辨率提高了近 10 倍, 探测遥远星光的灵敏度则激增 100 倍, 它可以捕捉到来自首代恒星和星系形成时的“第一缕星光”; 它和 SIM 都是 NASA 探讨“起源计划”的关键项目, 可用于探索宇宙最早期形成的第一批星系、星团。NGST 于 2011 年升空, 它将人们对银河系的结构和演化的了解跨入一个新的境界。

(4) 地外行星发现者(terrestrial planet finder, TPF)是集空间望远镜技术之精粹, 用来探测 45 光年以内邻近恒星周围的类地球型行星, 为人类寻觅太空知音。TPF 于 2014 年升空, 它的设计思路与 SIM 相仿, 但 TPF 的镜面阵列可达数百米尺度。利用 TPF, 人们足以探明在太阳系邻近数十光年内, 是否存在与地球条件相似的行星。显然, 能够探测到这些类地行星, 正是人类从事航天研究所急需的。2017 年, NASA 第一次宣布一颗体积与地球相似的行星, 可能适合人类居住, 它距离地球约 490 光年。天文学家估计, 在银河系就存在着数十亿个类似的可能存在生命的行星。

从 20 世纪 90 年代起, 天文学研究进入一个信息时代。例如, 大型巡天望远镜(large synoptic survey telescope, LSST)项目与搜索引擎业 Google 的合作将人类的视野带入一个全新的层次。LSST 每月都将对半球天空进行多次扫描, 并借助功能强大的统计分析和数据挖掘技术进行数据的归纳与处理, 进而去搭建虚拟的数字天文台, 以便为人类提供更加丰富的宇宙数据库。

另外, 国外科学家还提出一个更加宏伟的设想: 建议在月球表面安放一台射电望远镜, 并同地球表面上的望远镜进行干涉测量, 由于基线长达 38 万 km 以上, 测量精度和分辨率必然会极大地提高。科学家提出如此宏伟的设想, 绝对不是用于人类的战争, 而是使用它去揭示宇宙中更多的奥秘, 去寻找那些处于可居住带的类地球型的行星。

此外, 天体物理的全天球天体测量干涉仪(global astrometric interferometry for astrophysics, GAIA)项目属于欧洲空间局(ESA)的“地平线(Horizon)2000”长期科学规划的一部分, 该干涉仪于 2013 年 12 月 19 日升空, 造价 32 亿美元。其目的是用中等基线的光学干涉测量对银河系的总体几何结构及其运动规律做全面的

普查,并在精细测量的基础上再次精密检验广义相对论理论。2016年9月23日,GAIA公布首批测量数据。

GAIA是采用Fizeau像平面干涉方案工作的,它由3个共面的干涉仪组成。Fizeau干涉的主要优点是视场大,有利于空间成图。更重要的是,GAIA和SIM在性能上形成互补性:GAIA能够提供参考恒星的大角度网,形成一个均匀的参考系,这对SIM来讲十分有用。SIM除了能观测极限星等较暗的天体和具有较高的精度外,还有一些性能是GAIA所没有的,例如,它可对复杂源(多重点源或者点源加展源)成图,能观测有时间要求的源(如变源、双星、突发天象等)。因此,GAIA、NGST以及SIM等关键项目的开展,将使人类对宇宙起源的探索推上一个更新的台阶。

射电望远镜比光学望远镜的优越之处,在于射电波可以穿过光波无法通过的尘埃。例如,在银河系的中心方向存在大量的尘埃,这时使用射电天文手段就可以观测到以往单凭光学方法所不能观测到的地方。事实上,20世纪60年代时天文学上的四大发现(即类星体、脉冲星、星际空间中的有机分子和微波背景辐射)都是采用射电天文方法才发现的,其中脉冲星和微波背景辐射的发现还分别获得了1974年和1978年的诺贝尔物理学奖。

对于各类望远镜,其中包括光学望远镜、射电望远镜和其他各类空间望远镜来讲,总的发展趋势是镜的口径做得越来越大。就射电天文观测来说,用它可以监听最微弱的太空电波,即使远在135亿km之外以及处于太阳系边缘的“旅行者1号”和“旅行者2号”探测器所发出的电波也可以监听到。

人类为了探索宇宙,除了需要各种大型太空巡天高端望远镜(如光学望远镜、红外望远镜、射电望远镜、Keck干涉仪、射频望远镜等)、引力透镜以及粒子物理方面的相关测试仪器和设备之外,高超声速飞行器便是目前人类进行上述科学研究和实现人类飞天梦想时最为关心的运输工具。

现代宇宙学家和天文学家根据天文卫星最新测量数据已经可以精确地给出如下结论:我们的宇宙已经有137亿年的历史,误差不超过2亿年。另外,最近的观测结果也表明:宇宙物质密度与临界密度之比为1.02,误差只有 ± 0.02 ,因此我们的宇宙是平直的。此外,宇宙学界也普遍认为:Gamow(伽莫夫)的宇宙起源和演化的大爆炸标准理论模型能够完美地解释哈勃星系退行、宇宙微波背景辐射以及宇宙元素丰度的观测事实,并且还认为Guth(古斯)的宇宙暴涨理论成功地解决了宇宙大爆炸标准理论模型所无法解释的两道难题。按照Guth的暴涨理论,在大爆炸刚刚发生后的 10^{-35} s时,宇宙发生了暴涨,宇宙以极大的速度向各个方向暴涨。暴涨前的宇宙极其微小,大约尺度为 10^{-25} cm,完全处于光的作用范围之内,所以宇宙在暴涨前已有足够的时间达到均匀,这样暴涨理论解释了均匀问题。另外,暴涨的时间很短暂,只有 10^{-33} s,但体积却增大了 10^{26} 倍,暴涨结束时宇宙的半径才

仅有 10cm,以后宇宙又变为正常的膨胀,直至今日成为一个半径达 10^{28} cm 的浩瀚宇宙。

上面谈到宇宙的早期模样,这里必然会联想到宇宙微波背景辐射问题的发现:1964年,美国贝尔实验室的 Penzias 和 Wilson 发现了宇宙微波背景辐射。1989年和 2001 年美国分别发射了宇宙背景探测卫星(COBE 卫星)和威尔金森微波背景辐射各向异性探测器(WMAP),准确地测定了背景辐射温度为 2.725K,而且宇宙不同方向上的微波背景辐射几乎相同,差别不超过十万分之一。宇宙微波背景辐射如此均匀使广义的宇宙暴涨理论找到了强有力的证据。另外,2001年6月30日发射的威尔金森微波背景辐射各向异性探测器在做了一年观测后发表了观测的结果,它证实了宇宙各种成分的比例是:4%的重子物质、23%的暗物质、73%的暗能量。

谈到暗物质与暗能量问题,这里很有必要讲一下李政道先生在清华大学的演讲和丁肇中先生历时二十多年的暗物质研究工作。2005年10月25日,李政道先生在清华大学的演讲中指出:“21世纪初科学最大的谜团是暗物质和暗能量。暗物质存在于人类已知的物质之外,人们目前知道它的存在,但不知道它是什么,它的构成也和人类已知的物质不同。”他鼓励大家要勇于探索,加强暗物质和暗能量的研究,他指出:“21世纪对暗物质和暗能量的研究,也会产生令今天的人类无法想象的新发明。”事实上虽然近些年来西方科技发达国家的财政吃紧,但却不愿意放弃对暗物质研究的投入,如 AMS-01 和 AMS-02 项目就是一个典型的例证。1998年6月2日发现号航天飞机和 2011年5月16日奋进号航天飞机分别将阿尔法磁谱仪 I 号和 II 号送到国际空间站去寻找反物质和暗物质。阿尔法磁谱仪重 7.5 吨,价值 20 亿美元。丁肇中先生从 1994 年开始一直在寻找暗物质,这种持之以恒奋斗的精神为我们树立了光辉的榜样。

对于人类为什么要进行太空的探索,北京系统工程研究所黄志澄先生 2013 年 7 月 1 日在《中国青年报》发表的文章中讲了三方面的理由,其大意可概括为:①解答“宇宙从哪儿来”、“人类是怎么产生”等哲学问题;②要爱护和珍惜地球家园;③要树立“天人合一”的理念、努力保护太空生态。对于黄志澄的上述观点,我们表示赞同,但还有一点是应该强调的:在地球一旦遇到危难之时,如何将地球上的人类(哪怕是其中的极少数)尽快地移居到可适宜居住的外星球,也应是地球上的人类进行太空探索的目的之一,也是取之不尽的动力源泉。

在广袤浩瀚的宇宙空间,有太阳系、银河系、河外星系等,适应于人类生存的星球也绝对不可能仅有地球一个。大量的现代宇宙学的研究表明:人类自己所居住的星球在宇宙中并无任何特殊地位,地球也不过是宇宙中平淡无奇的行星,它围绕着一颗名叫太阳的恒星运转着,而太阳仅仅是银河系的星群中无数恒星里的一颗。而银河系也只不过是散布在广袤穹宇中无数星系的一支。另外,著名德国

宇宙生物学家 Gerda Horneck 院士在 2007 年与 Petra Rettberg 合著的 *Complete Course in Astrobiology* 一书中给出了具体的数据,她明确指出:目前人类已经检测到 380 颗可居住的太阳系外行星,甚至可以探测到 20 光年以外行星上的生物信号。

宇宙学界一致认为:Gliese 581C 是人类探测到的第一颗类地行星。在已观测到的太阳系外行星中,位于飞马座(Pegasus)中的 HD209458b 使众多科学家倍感兴趣。但要指出的是:尽管人类借助于现代各种高精度的望远镜可以看到 120 亿光年之外接近 137 亿光年的星系,并且人类还能够不断地发现一个接一个的类地行星,但这些行星距离地球太远了。要到达这些星球上居住,乘坐目前人类制造的航天器所花费的时间太长了。因此科学家才建议要发展以核聚变技术为支撑的新型航天器动力装置或采用激光推进技术以及反物质星际火箭去取代目前人类使用的化学火箭,这正是本书在前言中想告诉读者的第一个不能回避的客观现实。

2004 年 3 月 2 日欧洲空间局(European Space Agency,ESA)发射 Rosetta(罗塞塔)探测器及搭载的 Philae(菲莱)登陆器,它飞行了 10 余年之后于 2014 年 11 月 12 日在 Churyumov-Gerasimenko 彗星(简称 C-G 彗星)成功着陆。这里必须强调的是,这次 Philae 在 C-G 彗星上的着陆,其风险非常大。这颗彗星最宽也只有 4km,最窄只有 1.3km,可是彗星的移动速度超过每小时 4 万 m,而且彗星的引力非常微弱,例如,地球上 100kg 重的东西,在该彗星表面将只有 1g 重。Philae 在地球上有 100kg 重,因此它在 C-G 彗星表面便只有 1g 重,这也是导致 Philae 登陆器在 C-G 彗星上着陆时不稳定的重要原因之一。Philae 成功登陆彗星的技术与经验,为人类登陆太阳系的有关行星或者去一些星球上进行资源探测和挖掘活动提供了十分宝贵的经验。另外,Philae 发射的十多年来,2000 多名 ESA 的科学家一直坚守岗位,用足够的耐心和毅力参与、追踪这个探测器的飞行,他们这种为人类航天科学的奉献精神值得发扬光大,这也是本书前言中想告诉读者的第二个问题——探索在小天体上着陆的经验非常宝贵,而且更需要持之以恒、要有奉献精神。

此外,在登月与火星之旅的探索方面,美国 NASA 已积累了十分宝贵的登月经验,这里不妨以 Orion(猎户座)载人探测飞船(crew exploration vehicle,CEV)的试飞为例说明人类在探索登陆火星以及探测小行星方面所做出的不懈努力。美国东部时间 2014 年 12 月 5 日早 7 时 5 分,Orion CEV 由 Delta-4 重型运载火箭搭载从肯尼迪航天中心(Kennedy Space Center,KSC)发射升空。升空后 Orion CEV 距离地球的最大高度为 5790km,这个高度要比 Mercury(水星)号飞船(美国第一代载人飞船)和 Gemini(双子座)号飞船(美国第二代载人飞船)试飞时高度都高,它比目前国际空间站的飞行高度还高出 15 倍,已飞出了近地球轨道。这次试飞之所以选择这个高度,是为了保证飞船再入地球大气层时的速度提高到

8.89km/s(即 3.2×10^4 km/h), 以此去有效地校核航天器隔热罩的气动热防护设计。这也是过去 42 年间 NASA 第一次将一艘旨在为载人航天设计的飞船发射到离地球 5790km 的宇宙深空之中, 而上一艘这样的飞船是 1972 年的 Apollo-17 号。Orion CEV 高 3.35m, 宽 5m, 这个尺寸超过了 Apollo 飞船。Orion 飞船可容纳 6 名航天员, 它比 Apollo 的“三人间”大得多。

Orion CEV 在经过 4.5h 的测试飞行即绕地球飞行两圈之后安全降落到美国加州海岸外的太平洋着陆区。当飞船再入大气层后经过 7min 的时间, 飞船的速度由 3.2×10^4 km/h 降到 32km/h, 以保证飞船能够平稳坠入太平洋着陆区。显然, 在 7min 的时间里飞船的速度由 3.2×10^4 km/h 降到 32km/h, 这需要高深的高超声速气动热力学专门知识和十分精细的控制技术之间的巧妙配合, 只有这样才能保证飞船的安全返回和准确着陆。这次试飞耗资 3.75 亿美元, NASA 强调, 这次飞行是火星探测之旅的“重大里程碑”。Orion CEV 是继航天飞机之后美国新一代载人航天工具, NASA 希望 Orion 能够成为未来太空探索活动的多面手, 即承担起美国重返月球、完成载人探测火星, 甚至探测小行星(如 Apophis)的多重任务。

这里我们想介绍一下科学家对于基础理论的探索, 不妨以理论物理中的 M 理论的研究与探索为例。20 世纪 80 年代, 基于量子场论发展起来的超弦理论第一次将广义相对论和量子力学这两大基础理论统一起来, 建立了量子引力理论。人们常把 1984~1985 年间的超弦理论称为弦理论发生的第一次革命, 而把 1994~1995 年弦理论发生的革命称为弦理论的第二次革命。第二次弦理论革命主要由著名物理学家 Edward Witten 率领, 并且学术界将完善与统一后的弦理论称为 M 理论。为此, 剑桥大学著名理论物理学家 Stephen Hawking 在 2010 年所著的 *The Grand Design* 一书中写道: “M 理论是 Einstein 希望找到的统一理论。”Hawking 教授和 Mlodinow 教授为写这部重要的著作, 他们花费了整整十年的宝贵时光。尤其是 Hawking 教授, 近些年来他身体状况一直不佳, 但他仍能为人类科学的研究如此拼搏, 难道这种精神不值得我们这些身强力壮的后生学习吗?

在广义相对论中, Einstein 方程决定了由于质量与能量的存在所造成的时空曲率。但在 Planck 尺度(即长度约为 10^{-33} cm, 时间约为 10^{-43} s, 能量约为 10^{28} eV, 质量约为 10^{-8} kg)时由于度规系数的剧烈变化, 在此尺度时由广义相对论无法得到合理的引力值。而采用 10 维的弦论和 11 维的 M 理论, 可以在大尺度下获得与广义相对论相容的结果, 而且在小尺度下还可以得到与量子力学分析相一致的数据。这里应强调的是, M 理论中的时空是 11 维的, 当其中的 7 维蜷缩成内空间后, 留下 4 维时空及其表现规律。对于蜷缩的内空间, 世界著名数学家丘成桐教授曾分别于 2003 年和 2010 年出版过两部英文版专著, 并且较详细地从微分几何与现代流形的角度上阐述了蜷缩的内空间与 Calabi-Yau manifold 之间的关联。换句话说, 理论物理中的弦论与现代微分几何学之间建立了密切的联系。因此, 使用 M

理论便可以成功地解释微观物理中存在的大量客观问题和浩瀚宇宙天体间所发生的复杂现象。

高超声速气动热力学是气体动力学与热力学、化学动力学、统计力学和量子物理相结合所形成的新分支学科。由于飞行器进行高超声速再入飞行,通常会涉及四个流区(自由分子流区、过渡流区、滑移流区、连续介质流区),书中提出了从适用于上述四个流区的力学方程——Liouville 方程出发,根据飞行器再入时 Knudsen 数的大小,引入适当的近似之后便可推出 Boltzmann 方程;再借助于 Chapman-Enskog 逐级逼近展开,又可得到 Euler 方程、Navier-Stokes 方程以及 Burnett 方程等。因此,在某些近似假设下,不同流区所服从的 Boltzmann 方程或者 Navier-Stokes 方程在理论上都是自洽的、协调的、统一的。典型算例选取了再入地球大气层以及进入火星、土卫六大气层的 18 种国际著名高超声速飞行器的 242 个飞行工况,并将我们高速气动热与人机工程中心(Aerothermodynamics and Man Machine Environment Laboratory, AMME Lab)团队的计算结果与国际上公开的相关飞行试验数据进行了详细比较,充分显示了书中所提方法的可行性与有效性。

在高超声速飞行与再入的过程中,要涉及高超声速气体的流动、高温气体动力学以及“声障”、“热障”和“黑障”等问题,涉及辐射输运以及磁流体力学中的诸多方面。因此,如何在统一的框架下求解上述问题正是本书所研究的核心内容。

飞行器在高超声速飞行时,高温气体的辐射输运问题十分重要。如何较准确地计算高温气体各组分的吸收系数和散射系数,需要理论物理、微观力学的支撑。另外,磁流体力学方程在高温状态下的求解,其中许多物性参数的确定,也离不开原子分子理论。尤其是等离子问题采用动理学方程(如 Fokker-Planck 方程以及热等离子体的 Vlasov-Maxwell 方程组等)求解时更是如此。因此,本书提出了物理化学气体动力学(physicochemical gasdynamics, PCGD)的原子分子理论,它涵盖了高超声速气动热力学、输运理论和辐射流体力学、电磁学和磁流体力学、气动光学这四个分支学科。本书着重讨论了高超声速飞行中的辐射输运与磁流体力学,全书分为五篇 13 章:

第一篇是高超声速飞行中的气体动理学、输运理论和气动热力学基本方程组。这篇包括三章,分别讨论 Boltzmann 方程、辐射输运方程以及广义 Navier-Stokes 方程。

第二篇是辐射流体力学基本方程组及其数值求解方法。这篇也包括三章,分别讨论非定常可压缩湍流计算的高效高分辨率算法、吸收和散射系数的确定以及全光谱 K 分布辐射输运方程、高超声速飞行中辐射流体力学基本方程组的耦合求解。

第三篇是电磁流体力学基础与矢量辐射输运方程。这篇包括四章,分别讨论 Maxwell 方程组的数学结构以及电磁场中带电粒子的运动、磁流体力学的一维和

多维流动以及稳定性理论、狭义相对论下磁流体力学方程组的构成、考虑辐射偏振特性的矢量辐射输运方程。

第四篇是磁流体力学基本方程组的数值求解方法。这篇虽仅包含一章,即磁流体力学基本方程组的高精度、高分辨率解法,但涵盖了现代计算磁流体力学的主要内容,其中包括磁场伪散度问题的处理、有限体积法中的高效率 LU 算法以及 Gauss-Seidel 迭代法、非结构网格下有限体积法的双时间步长迭代格式、高精度、高分辨率 RKDG 有限元方法等,内容十分丰富,充分展示了我们两个团队(即王保国团队和黄伟光团队)在磁流体计算方面所完成的工作。

第五篇是两类基本方程组的典型应用,这里两类基本方程组是指辐射流体力学基本方程组和磁流体力学基本方程组。这篇仅包含一章(即辐射与磁流体的典型算例以及红外隐身与磁流体控制技术),但讨论的内容十分丰富,其中包括典型飞行器表面 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段红外辐射特性的计算、发动机尾喷管 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段 K 分布辐射输运的计算、飞行马赫数分别为 23.9 和 25.9 绕著名 RAM-CII 飞行器时热化学非平衡态流动的光辐射计算(其中包括 $0.2\sim 0.4\mu\text{m}$ 的紫外光谱辐射和 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的红外光谱辐射)、一维磁流体力学激波管典型问题、MHD 非定常 Rayleigh 问题、磁流体力学二维 Riemann 问题、二维 MHD 强扭转的 Rotor 问题以及飞行马赫数分别为 28.3、25.9、15.0、10.6 和 5.0 时高超声速钝体磁流体力学绕流计算的问题等。另外,这章还讨论了飞行器和发动机尾喷管的红外隐身以及飞行器的磁流体力学流动控制问题。应当讲,这些内容十分新颖,它反映了我们两个团队近 20 年间在基础研究方面所取得的重要成果。

两位作者衷心地向一直关心与支持他们两个团队工作的流体力学界、计算物理界以及工程热物理界老前辈卞荫贵先生、秦元勋先生、周毓麟先生、童秉纲先生、陈乃兴先生、俞鸿儒先生、陈懋章先生、吴承康先生、王仲奇先生、陶文铨先生、周力行先生、庄逢甘先生、刘高联先生、崔济亚先生、叶大均先生、吴文权先生、沈孟育先生和周盛先生等表示深深的感谢!另外,本书的第一作者还想将本书献给带领他迈进这个领域并引导他夯实好理论物理和化学物理基础的老师与恩人王竹溪先生、李政道先生、彭桓武先生、郭永怀先生和钱学森先生;献给几十年来一直在外流气动热力学和内流气动热力学两大方面精心培育与直接指导的恩师卞荫贵先生(1978~2005 年)和吴仲华先生(1978~1992 年)。令本书第一作者十分荣幸的是,1978 年作为中国科学院研究生院首届研究生,并分别拜吴仲华先生和卞荫贵先生为师。如今,中国科学院研究生院已更名为中国科学院大学,将会有更多师弟、师妹在母校茁壮成长、培养成才,这是本书第一作者所希望并感到欣慰的。此外,本书的第一作者还万分感谢季羨林先生,是他使作者有幸与王竹溪先生相识与请教并受益终生。

李成勤博士负责书稿的文字录入和整理工作,在此表示衷心的感谢。

本书在出版期间得到科学出版社,尤其是该社刘宝莉编辑的大力支持,正是她一丝不苟的敬业精神才使得本书得以如期出版,在此表示衷心的感谢。

最后,本书的第一作者还要特别祝福他的小孙儿艺宸、小孙女筠溪、艺颖、Ellen 和珂怡以及小外孙女巍琳、巍宇健康快乐。爷爷盼望他(她)们健康快乐地成长,长大后为人类航天科学的发展以及人类社会的和平与进步多做贡献。

由于本书涉及面广、两位作者水平有限,书中可能会存在疏漏与不妥,敬请广大读者及专家批评指教。E-mail:bguowang@163.com。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高超声速飞行与再入问题中 PCGD 的原子分子理论	2
1.2 本书的范围、内容和意义	6

第一篇 气体动理学、输运理论和气动热力学基本方程组

第 2 章 Boltzmann 方程和广义 Boltzmann 方程	11
2.1 Boltzmann 方程的守恒性质和宏观守恒方程	11
2.2 单原子分子、多组元气体的 Boltzmann 方程	15
2.3 单组元、多原子分子、考虑量子数和简并度的 Boltzmann 方程	17
2.4 多组元和多原子分子的广义 Boltzmann 方程	19
2.5 BGK 模型方程及其局限性	20
2.6 小 Knudsen 数特征区的主要特点及其分析	24
第 3 章 粒子输运方程、Lorentz 变换和辐射输运方程	29
3.1 粒子输运方程和中子输运方程	29
3.2 辐射输运方程	32
3.3 Lorentz 变换	34
3.4 辐射输运方程的 Lorentz 变换及其近似处理	36
第 4 章 高超声速非平衡广义 Navier-Stokes 方程组	38
4.1 Navier-Stokes 方程组的积分与微分形式	38
4.2 广义的 Navier-Stokes 方程组	40
4.3 高温、高速、热力学与化学非平衡态流动的控制方程组	45

第二篇 辐射流体力学基本方程组及其数值求解方法

第 5 章 非定常可压缩湍流计算的高效高分辨率算法	53
5.1 基于 Favre 平均的可压缩湍流基本方程组	53
5.2 可压缩湍流的大涡数值模拟及其基本方程组	55
5.3 RANS 与 LES 组合的杂交高效方法	57
5.4 RANS、DES 和 LES 方法中 ν_t 的计算	60

5.5	可压缩湍流的 $k-\omega$ 模型	61
5.6	RANS 计算与局部 DES 分析相结合的高效算法	62
5.7	非定常流的高分辨率高效率算法及其处理策略	79
第 6 章	吸收和散射系数的确定及全光谱 K 分布的辐射输运方程	92
6.1	辐射的本质和电磁辐射的波谱范围	92
6.2	辐射输运方程的扩散近似和散射相函数截断的方法	97
6.3	辐射输运方程中吸收系数的计算	105
6.4	K 分布方法与关联 K 分布方法	123
6.5	平衡态与非平衡态时粒子数布居的方程	129
6.6	散射系数计算的主要步骤和 5 种典型的散射过程	137
6.7	考虑电子散射效应的 Fokker-Planck 方程	139
6.8	考虑介质折射率的辐射输运方程	145
6.9	辐射输运方程的有限体积法及其与能量方程的耦合求解	150
6.10	全光谱 K 分布的辐射输运方程	155
第 7 章	高超声速飞行中辐射流体力学基本方程组的耦合求解	159
7.1	考虑辐射时平衡态与非平衡态的流体力学方程组	160
7.2	定解条件的提法和飞行器壁表面温度的确定	165
7.3	一维非定常辐射流体力学基本方程组	174
7.4	二维非定常辐射流体力学方程组	181

第三篇 电磁流体力学基础与矢量辐射输运方程

第 8 章	Maxwell 方程组的数学结构和电磁场中带电粒子的运动	187
8.1	“黑障”问题的出现和气动电磁学的内涵	187
8.2	电磁场的重要定律及其场的规范变换	190
8.3	Maxwell 方程组的数学结构及其边界条件	193
8.4	电磁流体力学基本方程组及其数学结构	197
8.5	狭义相对论下 Maxwell 方程组的协变性	201
8.6	电磁场中带电粒子运动的 Lagrange 函数与 Hamilton 函数	207
8.7	运动点电荷的电磁场及其带电粒子的加速运动	211
8.8	电子的电磁质量与辐射阻尼力	214
8.9	Vlasov 方程和耦合的方程组	216
第 9 章	磁流体力学的一维和多维流动及其稳定性理论	224
9.1	带电体运动与电磁场相互作用的经典理论	225
9.2	磁流体力学的基本标度及其多组元模型	228

9.3	磁流体力学的双组元模型	232
9.4	单组元模型及其简化时的限制条件	233
9.5	一维、定常和磁流体的 Hartmann 流动及其通解	239
9.6	二维、定常和磁流体的 Hartmann 流动及其 Shercliff 解法	243
9.7	磁流体力学中小扰动方程及其简单波流动的特征	246
9.8	磁流体力学的激波关系	259
9.9	冷和热等离子体中的波及其色散关系	264
9.10	磁流体活塞问题和拟一维流动	279
9.11	超声速定常磁流体绕楔流动	284
9.12	可压缩、有电导率、理想完全气体的小扰动流动	292
9.13	不可压缩与可压缩磁流体定常流动边界层问题的方程组	294
9.14	高超声速磁流体绕平板的边界层流动及其 Crocco 变换	303
9.15	理想磁流体力学稳定性问题的一般方程及其应用	306
9.16	磁流体的不稳定性分类和等离子体中的非线性效应	312
第 10 章	狭义相对论下磁流体力学方程组的构成	321
10.1	Minkowski 四维时空与 Lorentz 协变性原理	321
10.2	Minkowski 四维时空中的速度、加速度与四维动量	323
10.3	Minkowski 时空中的四维力及其四维动量守恒	325
10.4	狭义相对论流体力学中的能动张量和守恒律方程组	326
10.5	Minkowski 四维时空中电磁场的场强张量和能动张量	328
10.6	狭义相对论下理想磁流体力学基本方程组	333
第 11 章	考虑辐射偏振特性的矢量辐射输运方程	336
11.1	入射电磁波的椭圆偏振分析及其 Stokes 参数的几种表达	336
11.2	入射波具有带宽时 Stokes 参数的表达	339
11.3	标量的 RT 方程和矢量的 RT 方程	340
11.4	Stokes 矩阵和 VRT 方程中相矩阵的表达	344

第四篇 磁流体力学基本方程组的数值求解方法

第 12 章	磁流体力学基本方程组的高精度、高分辨率解法	351
12.1	磁流体力学数值方法研究的某些进展和应用背景	351
12.2	磁流体力学的基本方程及其基本假设	354
12.3	两类守恒型磁流体力学基本方程组	359
12.4	求解磁流体力学的数值方法及其存在的问题	360
12.5	磁场伪散度问题处理的投影方法	362