



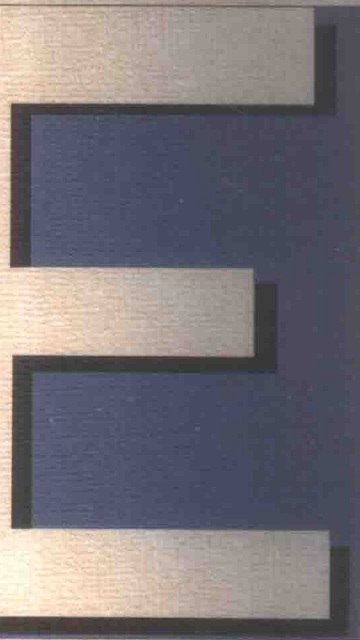
国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



大气热力动力学导论

——大气非平衡态线性和非线性热力学

胡隐樵 著



Earth

地质出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

大气热力动力学导论

——大气非平衡态线性和非线性热力学

胡隐樵 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是第一部根据大气系统物理特征而建立的大气非平衡态热力学理论专著,是作者尚未发表的科研成果。本书首次分析了经典非平衡态热力学对大气系统的适用性问题;将大气基本物理特征同非平衡态热力学基本原理相结合,重建了适合于大气系统的熵平衡方程。克服了经典非平衡态热力学应用于大气系统的原则性困难。不仅有重要理论价值,而且对分析大气系统状态特征以及天气、气候及环境系统的预报和预测有重要应用价值。全书既论证严谨,又由浅入深;考虑了多方面读者的需要,全书自成体系,各方面读者可不借助于其它参考书读懂它。本书主要读者对象是大气科学、海洋科学、环境科学和非线性热力学理论等学科领域大专院校广大师生、研究生和科研人员以及其他对此感兴趣的广大读者。

图书在版编目(CIP)数据

大气热力动力学导论/胡隐樵著. -北京:地质出版社, 2002.9

ISBN 7-116-03658-X

I. 大… II. 胡… III. 大气动力学: 热力学 IV. P433

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 063901 号

Daqi Reli Donglixue Daolun

大气热力动力学导论

责任编辑: 杨友爱

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787mm×1092mm^{1/16}

印 张: 26.25

字 数: 640 千字

印 数: 1—800 册

版 次: 2002 年 9 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 60.00 元

ISBN 7-116-03658-X/P·2292

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

序

上世纪末对非线性现象的研究已引起人们的广泛关注。任何大气动力过程或热力过程，本质上都属于非线性过程。大气非线性动力过程和非线性热力过程已经成为当代大气科学研究的最前沿领域。时至今日，虽然大气非线性动力学研究已有重要进展，但非线性热力学研究却进展甚微，远落后于非线性动力学研究。为究其原因，作者深入分析了大气系统的基本物理特征和非平衡态热力学对大气系统的适用性问题。Prigogine 等为代表发展起来的非平衡态线性热力学和非平衡态非线性热力学，所研究的热力系统是以分子为基本粒子的宏观系统；其耗散过程是分子粘性效应；未考虑大气系统的基本物理特征。而大气热力系统是空气微团组成的地球尺度的(巨)宏观系统。它的基本物理特征是重力场和地转 Coriolis 力等动力因子以及热力层结所控制，大气输运过程主要是湍流输送过程。作者在考虑大气系统的基本物理特征基础上，将大气动力学方程同非平衡态热力学基本原理相结合，重新建立了适用于大气系统的熵平衡方程。使熵平衡方程不仅包括湍流输送热力过程而且包括动力过程。克服了经典非平衡态热力学直接应用于大气系统的原则性困难。以此为基础，将 Prigogine 等仅在热力学线性区得以证明的最小熵产生原理在热力学非线性区得到证明；并证明强迫耗散大气动力系统广义能量极小值原理，及其同最小熵产生原理的一致性。又将 Prigogine 等以小扰动假设条件下证明的 Lyapounov 热力学系统稳定性判据，推广到仅有理想流体限制条件，使之具有更强的普遍性。在线性热力学方面，证明了大气系统线性唯象关系，并证明了大气系统湍流强度定理和涡旋定理。这一系列结果不仅有重要理论价值；对分析大气系统状态特征以及天气、气候及环境系统的预报和预测也有重要应用价值。

应该说大气非平衡态热力学的研究仅仅开始，我相信本书的出版会引起更多大气科学家对此的关注。促进我国大气非平衡态热力学研究并结出更丰硕的成果。

丑纪范 院士

2002年3月2日于北京

前 言

任何大气动力过程或热力过程,其本质都属于非线性过程。大气非线性动力过程和非线性热力过程已经成为当代大气科学研究的最前沿领域。时至今日,大气非线性动力学研究虽已有重要进展,而非线性热力学研究却进展甚微,远落后于非线性动力学研究。

此外还有三个值得注意的事实,即:①大气非线性动力学研究与非线性热力学研究利用完全不同的理论体系和思想方法,各自独立而孤立地发展,几乎很少涉及它们之间的内在联系及各自的优点和缺点。②目前,大气非线性热力学研究,基本上是直接引用理论物理中非平衡态热力学(以后我们称之为理论热力学)的结论。由于上述原因,将非平衡态热力学直接应用于非线性大气热力系统研究常感不便或发生困难,有时会得到一些相互矛盾的结论,甚至陷入“佯谬”的窘境。③理论热力学主要是指诺贝尔物理学奖获得者 Prigogine 等为代表的学者发展起来的非平衡态线性热力学和非平衡态非线性热力学,并形成了耗散结构理论。这一理论主要是基于物理和化学现象研究而形成的。可以认为,这些现象是实验室尺度的物理和化学现象,基本上未考虑大气系统的一系列重要物理特征。这就提出了理论热力学对大气系统的适用性问题:理论热力学所研究的热力系统是以分子为基本粒子的宏观系统,其耗散过程是分子粘性效应,未考虑大气系统的动力过程。大气热力系统是由空气微团组成的地球尺度的(巨)宏观系统,其耗散过程是湍流粘性效应,并受重力场和地转 Coriolis 力等动力因子和热力层结的热力因子控制。

基于以上原因,建立适用于大气热力系统的非平衡态热力学体系势在必行。本书就是在这种背景下诞生的。

本书取名为“大气热力动力学导论”有双重含义:其一,理论热力学中常称经典的平衡态热力学为热力静力学,而称非平衡态热力学为热力动力学。本书的重点是研究大气非平衡态条件下所发生的线性和非线性问题。其二,研究时,必须将大气动力学方程组融入非平衡态热力学理论中,并将二者结合起来,建立大气系统熵平衡方程,构成非平衡态大气热力学基础。所以称之为“大气热力动力学”是适宜的。

本书内容,除绪论外,共分八章。第1章,平衡态热力学——热力学基础;第2章,大气热力学基础;第3章,平衡方程和大气动力学基础;第4章,大气系统熵平衡方程;第5章,大气系统非平衡态线性热力学;第6章,大气非平衡态非线性热力学;第7章,大气系统非线性动力学及动力学稳定性理论;第8章,大气边界层的非线性过程和耗散结构。前三章为热力学和动力学的基础概念,也是第4章建立大气系统熵平衡方程的基础。第4章将大气动力学方程组同热力学第二定律相结合,建立了大气系统熵平衡方程,成为大气系统非平衡态热力学的理论基础。第5章导出了大气系统线性唯象关系并证明了大气热力系统非平衡态线性区的最小熵产生定理。第6章在相当普遍的条件下,证明了大气热力系统非平衡态非线性区的最小熵产生定理,揭示了非平衡态热力学最小熵产生原理的物

理本质,并导出超熵在大气系统中的表达式,以及大气非线性系统定态的 Lyapounov 稳定性判据。该章是全书的核心内容。第 7 章利用大气动力学方程组算子的泛函性质,证明了大气强迫耗散动力系统相空间广义能量极小值原理,并且证明了:大气动力系统广义能量极小值的状态是一个强迫耗散动力系统定常的终态;大气动力系统广义能量极小值的状态也正好是大气热力系统熵产生极小值状态。这种状态也就是强迫耗散系统动力强迫同热力耗散相互达到动态平衡的状态,或者说是一个系统不可逆过程最弱的状态。最后研究了大气系统非线性动力学的基本结论及其同大气系统非线性热力学的关系。据目前所掌握的国内外文献,以上结果是作者首次得到的。第 8 章以大气边界层的非线性过程和耗散结构为例,讨论了非线性热力学和非线性动力学分析方法,以便更好地理解耗散结构理论。

本书的主要内容都是作者近年来尚未发表的研究成果。本书可能是目前第一部考虑大气系统的一系列重要物理特征而建立的非平衡态大气热力学理论的专著。它为今后非平衡态大气热力学的理论研究和应用奠定了较坚实的理论基础。该书的出版将在学术上有助于推动非线性大气热力学的理论研究和应用研究。

目前,有关非平衡态热力学方面的专著总结了 Prigogine 等为代表的学者发展起来的非平衡态线性热力学和非平衡态非线性热力学。可以认为,这是限于研究实验室尺度的流体热力学。而一些非平衡态大气热力学方面的专著仍主要偏重于向大气科学领域介绍上述非平衡态热力学的理论成就或直接引用其理论结果应用于大气系统研究,尚未研究理论热力学对大气系统的适用性问题。本书第一次从研究理论热力学对大气系统的适用性问题开始,进一步从大气系统的物理特性出发,将大气动力学方程组融入非平衡态热力学理论中,并将二者结合起来,建立大气系统熵平衡方程。这就克服了将非平衡态热力学的理论应用于大气系统研究的实质性困难。另外,目前理论热力学中非线性热力系统的最小熵产生定理和稳定性判据都是在小扰动假设下证明的。本书却是在更宽的条件下,利用动力学方程的性质证明了最小熵产生定理和稳定性判据,所以更具普遍性。可以说,与国内外已出版的同类书籍比较,上述是本书学术思想上的主要特点和独到之处,具有重要的理论价值。

任何一个系统同环境的相互作用,例如地气相互作用或海气相互作用等,无不涉及非线性动力过程和非线性热力过程。同国民经济发展密切相关的,气象上所关心的预报和预测问题,其本质上是一个大气系统的稳定性问题。因为在一个时间系列中,目前或近期历史所处的或观测到的相对稳定的大气状态,正是非平衡态热力学的一个定态和非线性热力学的一个有组织的有序结构。预报和预测并不是关心现在这个有序结构的延续,而是关心这个有序结构什么时候失稳,从而产生出新的有序结构。这正是非线性热力学所研究的热力系统的稳定性问题,诸如天气系统的转型、气候的突变及生态环境不可逆转的荒漠化等。国民经济发展所关心的预报和预测问题无不属于热力系统的稳定性问题。再如人工增雨或人工消雹等天气的人工影响及人工小气候或局地小气候的人工影响等,并非用人工改变整个天气系统或小气候系统的能量或物质状态(目前对人类的能力来说这是困难或不可能的),而是用最小的能量或物质改变天气或小气候系统的稳定性,从而触发天气或小气候系统内部能量或物质状态改变。当然,这也是一个有代表性的热力系统稳定性问题。可以说,非线性热力学稳定性分析方法为天气或气候的预报和预测以及为天气或小气候的人工影响开辟了一种新思路和新方法。预期该书的出版将在上述各方面得到广泛的应用。

本书的特点如下。

首先,既注意充分发挥数学论证的严谨性,又注意物理概念的清晰性。本书的主要任务是利用理论物理现代非平衡态热力学的理论和思想方法,结合大气系统的物理特性,建立非平衡态大气热力学的理论框架。显然,这是一个既艰难又严肃的任务。保证数学论证的严谨性和物理概念的清晰性是至关重要的。

其次,在结合大气系统的主要物理特性改造非平衡态热力学时,必须保证物理推理和认证的严谨性和结论的普遍性,这是本书的第二个特点。因此,在建立大气系统熵平衡方程及证明最小熵产生定理和导出热力学稳定性判据时,严格从能量守恒定律、物质不灭定律、动量守恒定律(Newton 第二定律)和热力学第二定律出发,尽可能作最少的假设,以便保证物理结论的普遍性。引入的基本假设也是大气科学中普遍接受的观测事实和理论事实。其中,主要用了三个基本假设:①建立大气系统熵平衡方程时,用 Taylor 湍流冻结假设取代理论热力学的局域平衡假设。Taylor 湍流冻结假设是大气观测的理论基础。②证明最小熵产生定理时,假设位温度梯度决定热量输送,湿度梯度决定水汽输送,速度梯度决定动量输送,并假设这些输送之间没有交叉耦合。这些假设都是大气观测精度范围之内的事实。③导出热力学稳定性判据时,用了 Boussinesq 近似假设。这是大气科学中普遍接受的理论事实。

第三,本书既注意了理论的严谨性,也充分考虑到理论的实用性。因此,尽力将抽象的理论概念转换成大气科学通用的概念。热力学稳定性理论是非线性热力学在大气系统中最有应用前景的理论。其中的超流及超力是非线性热力学中最抽象的理论概念之一。为此,导出了超流及超力同大气科学通用的距平概念之间的联系;建立起热力学稳定性理论应用于大气系统的桥梁。最小熵产生定理也是一个非线性热力学中抽象的理论概念。通过论证最小熵产生定理同大气动力学广义能量极小值定理的关系,证实了最小熵产生的定态就是能量极小值的定态,即不可逆过程最弱的热力耗散同动力强迫平衡的状态,从而揭示了最小熵产生定理的物理本质。

第四,本书尽力做到循序渐进,由浅入深,顾及各类读者群的需要和阅读的方便。虽然本书是一部大气非平衡态线性和非线性大气热力学专著,但是其中的许多理论结论和方法对于其他学科领域的非线性热力学,甚至理论物理非线性热力学研究,都有一定的普遍性,具有相当的参考价值。特别是环境流体非线性热力学,例如海洋流体非线性热力学有着重要的参考价值。考虑到如此大跨度地学科交叉,大气科学领域的读者可能对一些热力学理论,特别是非线性热力学不一定熟悉,而其他学科领域的读者可能对大气科学的基本概念不熟悉,所以第 1 章和第 4 章对平衡态热力学理论和非平衡态热力学做了系统论述,第 2 章和第 3 章对大气热力学和动力学做了系统介绍,尽可能做到各类读者在不翻阅其他参考书的情况下能阅读本书。通过第 1 章至第 4 章的论述,又为建立大气平衡态热力学作好了理论准备。

本书的主要读者对象是从事大气科学、海洋科学、环境科学和非线性热力学理论研究的广大科技人员及大专院校有关专业的广大教师、大学生和研究生,以及有关的研究人员,也可作为参考书和教科书使用。

由于本书的内容学科跨度大,错误难免,望批评指正。愿本书能为促进该学科领域发展尽微薄之力。

本书的出版,首先要感谢中国国家自然科学基金项目“绿洲与沙漠相互作用的非线性

过程研究”(49675249)和基金重点项目“稀疏植被下垫面与大气相互作用研究”(49835010)对本项研究的支持;还要感谢国家自然科学基金成果专著出版基金和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新工程的资助。此外,感谢同仁的热心鼓励和周秀云女士对本书全文输入计算机所付出的辛勤劳动。最后,感谢爱妻吴芝英女士的理解和支持,使本项研究和本书得以顺利完成。

作者 胡德樵

2001年4月于兰州

· 地 · 球 · 科 · 学 · 系 · 列 ·

国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助

目 录

第 0 章 绪 论	(1)
0.1 热力学特点和热力学发展史	(1)
0.1.1 热力学的特点	(1)
0.1.2 非平衡态热力学发展史	(2)
0.2 大气热力学和动力气象学	(3)
0.3 建立大气热力动力学的必要性	(4)
第 1 章 平衡态热力学——热力学基础	(6)
1.1 基础概念	(6)
1.2 能量守恒与转化定律；热力学第一定律	(8)
1.3 热力学第二定律和熵增加原理	(9)
1.3.1 不可逆过程	(9)
1.3.2 热力学第二定律、熵和熵增加原理	(11)
1.3.3 熵的意义	(12)
1.4 热力学函数和热力学关系	(14)
1.4.1 发甫方程和完全可积定理	(14)
1.4.2 比热容、潜热和化学势	(15)
1.4.3 热力学函数和热力学第一定律不同表达形式	(16)
1.4.4 热力学关系	(20)
1.5 热力学函数的确定和特性函数	(23)
1.5.1 热力学函数的确定	(23)
1.5.2 特性函数	(25)
1.6 平衡态的标志和平衡态稳定性	(27)
1.6.1 Carnot-Clausius 不等式和热力学第二定律；平衡态的标志	(27)
1.6.2 平衡态的稳定性	(30)
1.7 考虑动力过程的体系	(34)
第 2 章 大气热力学基础	(38)
2.1 理想气体热力学	(38)
2.1.1 一些定义和关系	(38)
2.1.2 理想气体的状态方程	(39)
2.1.3 理想气体的内能和焓	(40)
2.1.4 理想气体的熵和化学势的计算	(41)
2.2 经典大气热力学	(43)

2.2.1	干空气的热力学性质和状态方程	(43)
2.2.2	湿度参数以及湿空气的状态方程和湿空气的热力学性质	(43)
2.2.3	未饱和湿空气热力过程	(46)
2.2.3.1	绝热过程, 位温	(46)
2.2.3.2	未饱和湿空气的多元过程	(47)
2.2.4	水相变热力学和 Clapeyron-Clausius 方程	(49)
2.2.5	饱和湿空气的绝热过程	(51)
2.2.6	大气温度递减率和大气热力层结稳定度	(54)
2.2.7	大气的熵和化学势的计算	(55)
2.3	大气系统热力学定律的数学表述	(59)
2.3.1	大气系统非平衡态热力学物理基础: 局域平衡假设和 Taylor 假设	(59)
2.3.2	大气系统热力学第一定律和热力学第二定律的数学表述	(61)
2.3.3	饱和湿空气大气系统的热力学定律表述	(64)
2.3.3.1	相变过程的熵变化以及温度、压力变化过程系统的吸热或放热	(64)
2.3.3.2	系统组分变化引起的熵变以及相变潜热同化学势的关系	(66)
2.3.3.3	饱和湿空气相变过程热力学第一定律的表述	(67)
2.4	大气系统的平衡态标志和稳定性	(69)
2.4.1	大气系统平衡态的标志	(69)
2.4.2	大气系统平衡态的稳定性	(70)
第 3 章	平衡方程和大气动力学基础	(77)
3.1	平衡方程	(77)
3.1.1	连续性方程	(77)
3.1.2	质量平衡方程	(78)
3.1.3	动量平衡方程	(81)
3.1.4	能量平衡方程	(83)
3.1.4.1	动能平衡方程	(84)
3.1.4.2	势能平衡方程	(85)
3.1.4.3	内能和焓平衡方程	(87)
3.1.4.4	大气温度平衡方程	(90)
3.2	化学反应和相变	(91)
3.2.1	化学反应进度和化学反应速度	(91)
3.2.2	化学亲合势	(93)
3.2.3	大气中水的相变过程	(96)
3.2.3.1	相变潜热同化学亲和势的关系	(96)
3.2.3.2	相变速率和相变产生率	(97)
3.2.3.3	相变加热率	(98)
3.3	大气动力学方程组的建立和简化	(99)
3.3.1	大气动力学基本方程组	(99)
3.3.1.1	状态方程	(99)
3.3.1.2	速度平衡方程 (动量守恒方程)	(99)
3.3.1.3	温度平衡方程 (内能平衡方程)	(99)

3.3.1.4	大气组分平衡方程	(100)
3.3.1.5	相变同相变潜热	(102)
3.3.1.6	连续性方程	(103)
3.3.2	动力学的一些基本概念	(103)
3.3.2.1	Reynolds 平均法则和各态历经条件	(104)
3.3.2.2	浅水近似、不可压缩近似和 Boussinesg 近似	(106)
3.3.2.3	大气控制方程的一些基本简化	(108)
3.3.2.4	正压大气和斜压大气, 热成风	(112)
3.4	Reynolds 平均方程组和湍流闭合问题	(115)
3.4.1	Reynolds 湍流平均方程组	(115)
3.4.1.1	状态方程	(116)
3.4.1.2	连续性方程	(116)
3.4.1.3	平均动量平衡方程	(116)
3.4.1.4	平均温度平衡方程	(117)
3.4.1.5	平均水分平衡方程	(117)
3.4.1.6	Reynolds 平均动力学方程组	(118)
3.4.2	湍流通量平衡方程和方差方程	(119)
3.4.2.1	动量通量平衡方程和湍流动能平衡方程	(119)
3.4.2.2	湍流热通量平衡方程和热量(位温)方差方程	(122)
3.4.2.3	湿度通量平衡方程和湿度方差方程	(123)
3.4.3	湍流闭合问题和湍流通量参数化	(123)
3.4.3.1	湍流闭合问题	(123)
3.4.3.2	湍流通量参数化	(124)
3.4.4	脉动运动方程组	(124)
3.5	流体相似性准数和大气系统动力学方程的尺度分析	(125)
3.5.1	相似性准则和归一化动力学方程	(126)
3.5.1.1	相似性准则	(126)
3.5.1.2	大气动力学归一化方程及其相似性准数	(126)
3.5.1.3	其他特征尺度下的归一化方程	(128)
3.5.2	归一化热对流方程	(129)
3.5.3	特征尺度比较和大气运动的分类	(130)
第 4 章	大气系统熵平衡方程	(133)
4.1	熵平衡方程以及熵流和熵产生的导出	(133)
4.1.1	理论热力学中的经典熵平衡方程	(133)
4.1.2	熵流和熵产生	(134)
4.1.3	力学平衡和扩散熵产生	(136)
4.1.4	动能扩散以及力场中熵平衡方程的修正; 动力熵产生概念	(137)
4.1.5	熵平衡方程在大气系统中的适用性	(141)
4.2	大气系统熵平衡方程和大气中的不可逆过程	(142)
4.2.1	大气系统熵平衡方程的导出	(142)
4.2.2	化学反应亲和力和不可逆过程驱动力及其推广	(144)

4.2.3	大气系统的不可逆过程和可逆过程以及熵产生	(144)
4.2.4	大气系统的热力动力学控制方程组	(148)
4.3	大气热力系统熵平衡方程同理论热力学的比较	(149)
4.4	平衡态热力学以及非平衡态线性和非线性热力学	(153)
4.5	基于分子动力学统计理论的讨论	(155)
4.5.1	Boltzmann 方程	(155)
4.5.2	流体动力学方程	(157)
4.5.3	熵平衡方程; Boltzmann H 定理	(159)
4.5.4	求解 Boltzmann 方程的 Enskog 方法	(161)
4.5.5	Enskog 近似解的通量和熵平衡方程	(163)
4.5.6	结论	(166)
第 5 章	大气系统非平衡态线性热力学	(168)
5.1	非平衡态线性热力学的基本概念	(168)
5.1.1	非平衡态热力学中线性关系的实验例证	(168)
5.1.2	线性关系中唯象系数的性质	(169)
5.1.2.1	热力学第二定律对唯象系数的限制	(169)
5.1.2.2	空间对称性限制——Curier (居里) 原理	(170)
5.1.2.3	时间对称性限制——Onsager 倒易关系	(171)
5.1.3	线性非平衡态热力学对分子输送现象的应用	(171)
5.1.3.1	单一不可逆过程和扩散现象	(171)
5.1.3.2	交叉耦合和热扩散效应	(174)
5.1.3.3	定态耦合	(177)
5.1.3.4	粘滞性	(180)
5.1.4	最小熵产生原理	(181)
5.2	非平衡态线性热力学理论	(183)
5.2.1	最小熵产生原理的一般证明	(183)
5.2.2	热力学线性区定态的稳定性	(185)
5.2.3	最小熵产生原理的物理意义	(188)
5.2.4	熵产生时间变率的一般表达式	(189)
5.2.5	定态的一般理论	(189)
5.2.5.1	Prigogine 最小熵产生的态	(189)
5.2.5.2	Le Chatelier 原理的推广和定态的稳定性	(191)
5.2.5.3	m 级定态时的熵产生及熵产生的时间变率	(191)
5.2.5.4	各级定态	(193)
5.2.5.5	定态熵的性质	(195)
5.2.6	非平衡态线性热力学在大气热力系统中的适用性问题	(195)
5.3	大气系统中的线性唯象关系	(196)
5.3.1	湍流热量输送和湍流水汽输送	(196)
5.3.1.1	湍流热量输送	(196)
5.3.1.2	湍流水汽输送	(197)
5.3.1.3	水汽湍流输送同热量湍流输送之间的交叉耦合现象	(198)

5.3.1.4	非平衡态线性唯象关系和湍流 K 闭合理论	(201)
5.3.2	动量湍流输送和涡旋定理	(202)
5.3.2.1	动量输送的线性唯象关系	(202)
5.3.2.2	各向同性湍流中的湍流动量通量和速度方差	(203)
5.3.2.3	涡旋定理和环流定理	(204)
5.3.2.4	动量湍流输送和涡旋定理的适用条件	(206)
5.3.3	相变过程	(206)
5.3.4	气流和大气系统的动力平衡	(208)
5.4	大气系统中最小熵产生的态和大气定态	(210)
5.4.1	大气系统中最小熵产生原理的证明	(210)
5.4.2	大气系统最小熵产生态的稳定性	(214)
5.4.3	大气系统无源态或定态稳定性的物理意义	(217)
5.4.3.1	空气体积元温度对热量源和汇的响应	(217)
5.4.3.2	体积元水汽量对水汽源和汇的响应	(218)
5.4.3.3	体积元速度(动量)对动量源和汇的响应	(221)
5.4.4	结论	(222)
5.5	大气系统的平衡态分析	(222)
5.5.1	大气系统平衡态的条件分析	(222)
5.5.2	大气平衡态的基本特征	(225)
5.5.3	大气平衡态佯谬	(227)
5.5.4	大气系统热力学态的层次	(229)
5.6	大气边界层线性湍流输送系数和线性唯象系数的性质	(231)
5.6.1	近地面层线性湍流输送系数和线性唯象系数	(232)
5.6.2	行星边界层线性湍流输送系数和线性唯象系数	(233)
5.6.3	结论	(235)
第 6 章	大气非平衡态非线性热力学	(236)
6.1	非平衡、非线性和耗散结构	(236)
6.1.1	平衡态的稳定性和自组织现象的矛盾	(236)
6.1.2	非平衡、非线性和耗散结构	(236)
6.1.2.1	非平衡和耗散结构的关系	(236)
6.1.2.2	非线性过程和耗散结构	(238)
6.1.2.3	结论	(238)
6.1.3	大气非线性热力学系统的广义流和湍流闭合	(239)
6.1.4	热力学非线性问题	(243)
6.2	Lyapounov 稳定性理论	(243)
6.3	大气系统非平衡态非线性稳定性理论	(247)
6.3.1	非平衡态非线性区大气系统的最小熵产生原理	(247)
6.3.1.1	非平衡态非线性区大气系统的最小熵产生原理的证明	(247)
6.3.1.2	最小熵产生态和定态	(249)
6.3.1.3	最小熵产生态和定态的稳定性	(250)
6.3.1.4	最小熵产生态广义流对广义力的 Taylor 级数; 湍流输送系数的热	

力学性质	(252)
6.3.2 体系熵产生时间全微分的性质和一般发展判据	(255)
6.3.3 组分变化系统的熵产生时间全微分	(260)
6.3.4 超流、超力和超熵产生以及超熵的概念	(261)
6.3.4.1 超熵产生、超流和超力的概念	(261)
6.3.4.2 超熵及非线性系统稳定性判据	(263)
6.3.4.3 大气系统的超熵产生的计算	(267)
6.3.5 大气系统超熵和热力学系统的稳定性	(269)
6.3.5.1 大气系统的超熵和非线性热力学系统的稳定性判据	(269)
6.3.5.2 超熵稳定性判据适用的普遍性及限制条件	(274)
6.3.5.3 关于热力学系统稳定性判据的讨论	(276)
6.4 大气系统热力学稳定性分析	(278)
6.4.1 大气系统的超熵和超熵产生以及动力超熵产生概念	(278)
6.4.2 大气系统热力学稳定性判据	(282)
6.4.3 大气系统的失稳条件和发展方向	(284)
6.4.3.1 大气系统非平衡态热力学线性区的稳定性	(284)
6.4.3.2 大气系统非平衡态热力学非线性区的稳定性	(289)
6.4.4 边界对系统稳定性的影响	(291)
6.5 大气系统耗散结构和自组织过程概念	(296)
第 7 章 大气非线性动力学及动力学稳定性理论	(300)
7.1 大气动力学系统的广义能量极小值原理	(300)
7.1.1 大气动力学相空间及其泛函性质	(300)
7.1.2 广义能量极值原理——大气动力学方程组解的存在性、唯一性和稳定性	(307)
7.1.2.1 广义能量极值原理	(307)
7.1.2.2 大气动力学方程组解的存在性——广义能量极值的存在条件	(309)
7.1.2.3 解的稳定性——广义能量极小值原理	(311)
7.1.3 广义能量极小值原理同最小熵产生原理的一致性	(312)
7.1.4 大气动力学线性系统的拓扑性质	(315)
7.2 大气动力学方程组的求解及解的稳定性	(317)
7.2.1 Galerkin 方法和高截断的谱模式	(318)
7.2.2 常微分方程组解的拓扑性质	(319)
7.2.3 吸引子和吸引域; 解的稳定性	(321)
7.2.4 Lyapounov 稳定性判据第二方法	(323)
7.2.4.1 Lyapounov 稳定性定理	(323)
7.2.4.2 Lyapounov 渐近稳定性定理	(324)
7.2.4.3 Lyapounov 不稳定性定理	(325)
7.2.4.4 利用 Lyapounov 第二方法直接证明广义能量极小值原理	(325)
7.2.5 稳定性的线性分析法	(327)
7.3 线性稳定性分析和奇异点的分类	(330)
7.3.1 反应——扩散方程	(330)
7.3.2 一维反应——扩散方程的线性稳定性分析	(332)

7.3.3 奇异点分类和极限环	(336)
7.4 分支理论——带变参数的动力系统稳定性	(342)
7.4.1 带变参数的动力系统	(343)
7.4.2 一维动力系统的分支及分支解的稳定性	(344)
7.4.3 动力系统分支解的存在性和稳定性原理以及高级分支	(351)
7.5 非线性热力学和非线性动力学的关系和比较	(355)
第8章 大气边界层的非线性过程和耗散结构	(357)
8.1 Benard 对流——Lorenz 奇异吸引子——湍流	(357)
8.1.1 热对流 Navier-Stokes 方程组及非线性热力学稳定性分析	(358)
8.1.2 Benard 热对流系统的线性稳定性分析	(362)
8.1.3 Lorenz 动力系统	(366)
8.1.4 大涡对流——大气系统中的 Benard 对流	(372)
8.1.4.1 大涡对流系统的动力学稳定性分析	(372)
8.1.4.2 大涡对流触发机制的数值模拟	(376)
8.2 对流边界层负粘性和夜间边界层间歇性湍流	(381)
8.2.1 大气边界层结构以及对流边界层的负粘性现象和夜间边界层的间歇性湍流现象	(381)
8.2.2 大气边界层动力——热力学模式及边界层发展过程	(383)
8.2.3 对流边界层的发展, 大涡的自组织过程和负粘性现象	(385)
8.2.3.1 对流边界层发展的初始阶段	(385)
8.2.3.2 失稳阶段及大涡的触发	(386)
8.2.3.3 湍涡自组织阶段及负粘性现象	(387)
8.2.4 对流边界层的衰亡与夜间稳定边界层的发展, 以及稳定边界层中的间歇性湍流现象	(389)
8.2.4.1 湍流衰变阶段	(389)
8.2.4.2 夜间稳定边界层的发展和间歇性湍流	(390)
8.2.5 边界层发展中的不可逆过程及其熵流和熵产生	(390)
8.2.6 结论	(391)
8.3 绿洲耗散结构和临界尺度	(391)
8.3.1 绿洲与沙漠环境的相互作用——绿洲热力内边界层	(392)
8.3.2 绿洲热力内边界层动力、热力学模式	(393)
8.3.3 绿洲耗散结构和临界尺度	(397)
8.3.3.1 “冷岛”空间结构	(397)
8.3.3.2 “湿岛”强度对“冷岛”结构的影响, “冷岛效应”形成的热力学机制	(398)
8.3.3.3 绿洲尺度对地表蒸发率的影响、绿洲临界尺度	(400)
8.3.4 结论	(402)
结束语	(403)
参考文献	(404)

第 0 章

绪 论

0.1 热力学特点和热力学发展史

0.1.1 热力学的特点

热力学的显著特点是它的普适性。它可以在几个一般原理和假设基础上经过演绎 (deduction) 建立热力学体系, 其结论可应用于由完全不同物质(原子、分子甚至宏观物体……) 组成的体系。热力学的普适性是由热力学方法本身的特点决定的, 与近代科学中那种将研究对象越分越细的分析思维方式相比, 热力学采用了相反的思想——综合。它抓住宏观对象的一个共同特点, 即它们都由大量的结构单元组成, 不管这些结构单元是什么, 也不管这些结构单元的运动是什么力学来描述的。

为了具备这种普适性, 经典热力学付出了一定的代价。它通常假定其处理对象处于平衡的, 并且所考虑的过程是无限缓慢的。同时, 这一假设也限制了经典热力学的运用范围, 使经典热力学只能应用于孤立体系或封闭体系。

按照经典热力学的观点, 非平衡只是一种暂时的现象, 不可逆过程总是起一种耗散体系内部能量和破坏有序结构的作用。可是人们实际关心的体系通常是开放的非平衡体系, 这类体系中发生的过程通常是不可逆过程。事实上, 自然界丰富多采的宏观有序结构, 都是开放体系中在非平衡和有不可逆过程条件下通过体系同外界环境间的物质和能量交换才能形成和维持的。

对于非平衡体系和不可逆过程, 经典热力学只能由热力学第二定律提供一组描述变化方向的不等式, 而任何实际过程的定量描述均需要等式才能实现。因此, 为了描述实际体系的实际过程, 必须将经典热力学的概念和方法延伸到非平衡的和有不可逆过程的情况, 用等式来代替经典热力学的不等式, 以便能定量地描述不可逆过程, 这就要求发展非平衡态热力学。在非平衡态热力学中, 这是通过局域平衡假设实现的。为了实现描述非平衡体系和不可逆过程, 另一条路径是抛弃热力学方法而采用动力学方法。

动力学方法对于阐明具体不可逆过程的行为无疑是必不可少的。但是, 要对一个具体的现象进行适当的动力学描述, 通常需要对现象的细节有充分地了解, 这实际上是不容易实现的; 另外, 动力学描述通常只是限于具体问题, 因而不易得到像热力学方法所能得到的一般性结论。可能正是因为这个缘故, 尽管在不同领域内人们早已对宏观有序现象作了具体的动力学研究, 但一直没有形成统一的普适性理论。这说明热力学方法对非平衡体系和不可逆过程的研究同样是重要的。