



中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 3 8

大气湍流基础

张宏昇 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 38

大气湍流基础

张宏昇 编著

藏书



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大气湍流基础/张宏昇编著. —北京:北京大学出版社,2014.12
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25144-7

I. ①大… II. ①张… III. ①大气湍流 IV. ①P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272381 号

书 名: 大气湍流基础

著作责任者: 张宏昇 编著

责任编辑: 曾琬婷

标准书号: ISBN 978-7-301-25144-7/O · 1028

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62767347

出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米 × 980 毫米 16 开本 13 印张 270 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系” 编委会

主 任：王恩哥

副主任：夏建白

编 委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌，是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物

理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是，在把西方物理的精华要义“请进来”的同时，也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻，引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态，可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面，改革开放几十年来，我国的物理学研究取得了长足发展，一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域，使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解，不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”，也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”，对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是，“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20 世纪以来，中国物理界诞生了很多经典作品，但当时大都分散出版，如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中，读者们对这些论著也都是“只闻其声，未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫，对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值，不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献，充分发挥其应有的传世育人的作用，更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统，真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在 2006 年中国科学技术大会上指出，“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径，是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新，而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信，这套“中外物理学精品书系”的出版，不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣，也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展，为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士，北京大学教授
王恩哥

2010 年 5 月于燕园

本书序

湍流是流体力学有名的难题，也是自然科学著名的难题之一。大气湍流学科是大气科学学科的重要分支，是大气边界层物理、大气污染和扩散、地气相互作用研究的理论基础和核心问题。大气湍流是一种具有强烈涡旋性的不规则运动，明显存在于边界层大气中，在自由大气的积云中和强风速切变区也明显存在。大气湍流与天气预报、气候变化、空气污染、环境工程等实际应用的关系非常密切。当今，全球气候变化和环境演变是各国政府、科学家关注的焦点问题，与其相关联的环境污染和雾霾天气更是公众关心的热点问题。而气候变化预测、污染形成机理和预报水平提高的瓶颈之一是对大气边界层过程的理解有待深入，这就涉及大气湍流的基础理论、实验技术和数值模拟水平的提高。可以说，对大气湍流运动机理缺乏全面和深刻的认识是大气模式预报和污染过程描述不准确的重要原因之一。地面和大气间进行着动量、水热和物质交换与湍流输送，其过程直接影响和决定大气边界层的形成和发展，进一步加深对气候变化和大气环境问题的认识、改进预报预测模式，必须深入认识大气湍流特征。

大气湍流运动的性质决定了大气湍流具有多种形式的结构，导致了研究方法、研究理论的多样性和复杂性。大气湍流的研究方法包括外场实验观测、实验室物理模拟、理论研究和数值模拟等，涉及大气科学、电子学、物理学、力学、仪器学、计算机科学、工程学等学科。其中，外场实验观测是研究各种大气湍流问题的基础。20世纪50年代以来，大气湍流的野外观测实验研究十分活跃，获得了丰富而有意义的结果。例如，1968年的Kansas实验和1973年的Minnesota实验，为研究均一、平坦地形条件的大气湍流结构提供了数据基础，证明和发展了Monin-Obukhov相似性理论和混合层相似性理论。大气湍流的理论研究，有20世纪二三十年代发展的 K 理论，40年代Kolmogorov建立的湍流统计理论，50年代Monin和Obukhov建立的Monin-Obukhov相似性理论，60年代的Rossby数相似性理论及用于混合层研究的大涡模拟方法。随后，又陆续发展了混沌、分岔、突变、协同学、碎性、分数维等新概念和数学工具，但至今对大气湍流发生机制与运动结构并没有完全弄清楚。例如，随着城市化进程，需要解决更有现实意义的非均一、非平坦、复杂下垫面的湍流问题。这就亟须新的探测技术、研究方法或理论分析手段的引入。

我与张宏昇教授初识于 20 世纪 90 年代的“第二次青藏高原大气科学试验”，在研究过程中他所表现出的扎实的理论基础、清晰的逻辑思维和很强的实验能力给我留下了深刻印象。他所具有的物理学、无线电电子学、环境空气动力学、大气物理学的专业背景，令其在大气湍流与大气边界层研究中有着学科综合优势和开放的思维。其博士研究生学位论文《近地面层湍流输送观测仪器和方法研究》曾获赞：大气边界层观测要以此为规范。20 年来，他一直从事大气湍流观测法研究，开展大气湍流结构的理论和分析方法的探讨，试图解决复杂地形条件下的湍流问题，近年来又在大气扩散数值模拟方面有所建树。

《大气湍流基础》一书是他及所在研究团队科研和教学的结晶，综合了大气湍流的基本理论与实验技术，有外场实验支持和科学创见，同时展现了自 20 世纪 90 年代的黑河试验(HEIFE)以来，我国科学家对大气湍流研究领域的贡献。书中关于湍流资料质量控制和湍流数据处理方法具有独特性和新颖性，也是相关研究和应用领域所关注和迫切需要的，目前国内少见类似的著述。该书集理论性和实验性于一体，很值得相关人员一读。我相信，读者一定会从中有所收获和启发。该书的一个创新点是在国内率先将希尔伯特-黄变换(HHT)引入到大气湍流和大气边界层研究中，尝试给出解决非均一、非平坦、复杂下垫面湍流问题的新方法，并有最新的研究成果支撑。我十分期待该方法在“第三次青藏高原大气科学试验”、城市群地区气候变化研究、雾霾天气研究中有良好表现，在科学方法和理论上有所创新和突破。



2014 年 8 月 6 日于北京

前 言

湍流是流体力学有名的难题，也是自然科学著名的难题之一，在“10000个科学难题”中位置显要。湍流既是基础理论问题，也是学科优先发展问题、前沿问题和国际研究热点问题。湍流研究具有极大的理论意义和实际价值。

大气湍流是一种具有强烈涡旋性的不规则运动，大气边界层中几乎总是存在湍流运动。要给湍流下个完善和恰当的定义是十分困难的，故至今尚无严格统一的定义。然而，人们已很好地认识到湍流的存在和它的性质。除了边界层大气中存在明显的湍流外，在自由大气的积云中或风速随高度变化很大的强风速切变区，也存在明显的湍流。湍流会对大气折射性质产生影响，导致电波和声波被散射，从而对建筑物、桥梁、铁塔、飞机、火箭等产生作用和影响。

大气湍流是理论与实验相结合的实验性学科，涉及面很广，如涉及大气科学、电子学、物理学、力学、仪器学、计算机科学、工程学等等，其相应的课程也是大气科学领域的教学中反映最难学的课程之一。力学系的一位老先生曾说：容易学的就不是湍流了。大气湍流与实际应用非常密切，可应用于天气预报、气候、空气污染、环境、工程等诸多方面。

本书以介绍大气湍流基本理论和研究方法为主，兼顾大气湍流基本理论、实验以及大气边界层的基本观测事实，主要涉及大气湍流的基本概念、基本理论、近地面层相似性理论、湍流通量与湍流输送、大气湍流观测法。本书既考虑了大气物理学的有关知识，也兼顾了大气环境学科和工程学科的需要，而对于一些前瞻性但尚不成熟的研究成果，例如涉及边界层顶云、复杂下垫面的内容没有介绍。

20世纪80年代前后，北京大学陈家宜先生、刘式达先生、张霭琛先生开设了“大气湍流”“边界层物理”“空气污染学”等相关课程，其教学和讲义对本书的编写、条理和结构有着重要影响和参考作用。本书是在“大气湍流”“大气边界层原理与技术”等相关课程教学的基础上完成的，其结构和内容也是经过反复调整和实践，并与蔡旭晖教授多次讨论后决定的。宋宇教授和康凌高级工程师对本书的内容和章节安排提出了很多富有建设性的意见。本书的撰写是在李万彪副教授的建议和鼓励下开始的，郭晓峰博士、朱好博士、李晓岚博士、霍庆博士、黄昕博士、叶鑫欣博士，以及王雪、常迪、高祥、张鹏、石惠、朱雷和刘晓等研究生提供了部分章节的素材，魏伟博士、张贺博士和葛红星博士

对有关章节做了校核和修改,蔡旭晖教授对全书做了审核和最后的审定。

本书可为大气科学相关领域人员的科研和业务工作以及高等院校大气物理学与大气环境专业研究生的学习提供参考,也可供高年级本科生及相关专业,如环境保护、地理、农业、林业,以及风能和核能利用等工程科学的工作者参考。在用作教材时,可视需要对本书内容做适当取舍。

北京大学物理学院大气与海洋科学系大到一个专业和研究方向的设置,小到一门课程的具体章节内容,都是几代人不断探索、反复实践和长期积累的结果。因此,前人大量的心血和劳动的结晶,为本书的出版创造了有利条件和打下了坚实的基础。在本书的编写过程中,物理学院大气与海洋科学系和环境科学与工程学院环境科学系的同事们给予了大力支持和切实帮助。另外,本书的完成得到了国家自然科学基金委员会和教育部的大力支持,得到国家基础科学人才培养基金的资助。在此一并表示衷心的感谢。

大气湍流是既古老又年轻的学科,内容丰富、涉及面广,许多方面仍在不断探索和研究中。我们的学识水平有限,谬误、疏漏和不妥在所难免,敬请读者给予批评指正。

张宏昇

2014年2月

内 容 简 介

本书系统论述了大气湍流的基本理论及其研究方法,并尽可能反映该领域最新的科学研究成果。全书分为八章,内容包括:大气湍流概论、大气湍流基本控制方程、大气湍流运动、湍流统计描述、近地面层相似性理论、近地面层大气湍流及地表参数、大气湍流观测法与数据处理、非定常大气湍流及其分析方法。大气湍流及其运动与大气科学各部分联系密切,本书既考虑了大气物理学的有关知识,也兼顾了大气环境学科的需要。

本书可为大气科学相关领域的科研和业务工作以及高等院校大气物理学与大气环境专业研究生的学习提供参考,也可供高年级本科生及相关专业,如环境保护、地理、农业、林业以及风能和核能利用等工程学科的工作者参考。

目 录

第一章 大气湍流概论	1
1.1 湍流现象与雷诺实验	1
1.2 大气湍流的基本特征	2
1.3 大气湍流的产生和维持	5
1.4 大气湍流的研究	6
第二章 大气湍流基本控制方程	8
2.1 雷诺平均	8
2.1.1 平均量与平均法则	8
2.1.2 雷诺平均	10
2.2 湍流宏观统计参数	10
2.2.1 方差与湍流强度	10
2.2.2 协方差	11
2.2.3 湍流动能	11
2.2.4 相关函数与相关系数	11
2.3 大气运动方程组	13
2.3.1 气体状态方程	13
2.3.2 连续性方程(质量守恒方程)	13
2.3.3 动量守恒方程	14
2.3.4 热量守恒方程	16
2.3.5 水汽守恒方程	17
2.3.6 物质属性守恒方程	17
2.4 雷诺平均方程	17
2.4.1 平均状态方程	17
2.4.2 平均连续性方程	18
2.4.3 平均动量方程	19
2.4.4 平均热量方程	20
2.4.5 平均水汽方程	21
2.4.6 平均物质属性方程	21
2.4.7 雷诺平均方程组	21

2.5	湍流动能守恒方程	22
2.6	平均运动动能方程	25
2.7	Boussinesq 近似	26
2.8	湍流闭合技术	26
2.8.1	零阶闭合	28
2.8.2	半阶闭合	28
2.8.3	局地一阶闭合	28
2.8.4	高阶闭合	29
第三章	大气湍流运动	30
3.1	大气湍流的平稳性、均匀性、各向同性和各态历经性	30
3.1.1	随机过程与平稳随机过程	30
3.1.2	大气湍流的平稳性和均匀性	31
3.1.3	大气湍流的各态历经性	31
3.1.4	大气湍流的各向同性	32
3.2	泰勒“冰冻”假设	32
3.3	科尔莫戈罗夫的局地均匀各向同性湍流理论与湍流动能的 串级输送	34
3.4	湍流混合长理论	36
3.5	大气湍流的稳定性判据	37
第四章	大气湍流统计描述	42
4.1	概率密度函数与特征函数	42
4.2	湍流尺度(积分尺度和微尺度)	44
4.3	时间序列的湍流能谱	45
4.4	湍流协方差和湍流通量的定义	47
4.5	湍流通量的确定	48
4.5.1	通量-方差法	48
4.5.2	涡旋累积法	49
4.5.3	松弛涡旋累积法	51
4.5.4	分离的涡动相关法	56
4.6	斜坡结构	57
第五章	近地面层相似性理论	68
5.1	近地面层的定义和性质	68
5.1.1	近地面层的定义和特性	68
5.1.2	近地面层的厚度	68

5.1.3	非定常性对常通量近似的影响	69
5.2	莫宁-奥布霍夫相似性理论	70
5.2.1	莫宁-奥布霍夫相似性条件	70
5.2.2	奥布霍夫长度	70
5.2.3	莫宁-奥布霍夫相似性理论	71
5.3	近地面层通量-廓线关系	75
5.3.1	近地面层通量-廓线关系	75
5.3.2	近地面层通量-廓线关系普适函数的确定	76
5.3.3	近地面层近中性层结下的通量-廓线关系	81
5.3.4	von Karman 常数 κ	82
5.3.5	利用非中性层结资料确定 von Karman 常数 κ	85
5.3.6	通量-廓线关系普适函数确定的实例	86
5.4	空气动力学法计算湍流通量	89
5.5	湍流交换系数	92
5.6	Bowen 比	94
5.7	逆梯度输送与湍流通量	95
第六章	近地面层大气湍流与地表参数	98
6.1	近地面层大气湍流统计特征	98
6.2	近地面层大气湍流能谱特征	106
6.3	近地面层空气动力学参数——零值位移 d	116
6.3.1	零值位移 d 的定义	116
6.3.2	零值位移 d 确定的传统方法	116
6.3.3	零值位移 d 确定的温度方差法	118
6.4	近地面层空气动力学参数——地表粗糙度 z_0	120
6.4.1	地表粗糙度 z_0 的定义和确定	120
6.4.2	地表粗糙度 z_0 确定的湍流方法	124
第七章	大气湍流观测法与数据处理	128
7.1	风杯风速仪测风	128
7.1.1	风杯风速仪测风的误差	128
7.1.2	风杯风速仪测风过高效应的数值分析	132
7.1.3	风杯风速仪测风 DP 误差的修正	133
7.2	超声风温仪测风	136
7.3	超声风温仪测温	137
7.4	湍流数据处理系统	145

7.4.1	湍流数据的数字滤波	146
7.4.2	湍流数据的野点剔除	146
7.4.3	湍流数据的坐标旋转(倾斜修正)	147
7.4.4	湍流数据的趋势项剔除	150
7.4.5	湍流谱的高频段修正	150
7.4.6	湍流谱的低频段修正	151
7.4.7	WPL 修正	151
7.4.8	平流修正	156
7.5	湍流数据的插补	157
第八章	非定常大气湍流及其分析方法	161
8.1	小波分析	161
8.2	伪小波分析	165
8.3	伪小波变换与大气相干结构	165
8.4	希尔伯特-黄变换	166
8.5	希尔伯特-黄变换在大气湍流中的应用	171
8.6	希尔伯特-黄变换在大气边界层中的应用	178
参考文献		181

第一章 大气湍流概论

湍流是一种宏观尺度上无序的、非确定性的流体运动。流体物理量的变化是无规则的，日语把“湍流”称作“乱流”，则更形象地说明了湍流运动的高度随机性。地球大气无时无刻不处于湍流运动状态，湍流现象与人们的日常生活以及航空航天、水利、气象、化工、建筑、交通、医学、高能物理等众多领域密切相关。大气运动及其物理参数经历着空间与时间各种尺度上的不规则变化，这种变化引起大气中能量、动量与物质成分等输送过程，称为湍流输送，其输送速率比分子热运动引起的输送要大几个数量级。大气湍流运动比一般湍流要复杂得多，其湍流尺度范围非常宽，小到几毫米，大则可能到上百千米。由于大气湍流常常处于非常复杂的边界条件(如草原、森林、山地、城市、沙漠、水面等)和大气条件(如层结分析、风切变状态等)，使得大气湍流具有多种形式的结构。大气湍流是一个既古老又前沿的学科，至今仍在不断地发展。

1.1 湍流现象与雷诺实验

自然界中，物质一般具有三个形态：固态、液态和气态。固体是具有一定体积和一定形状，质地较坚硬的物体。液体和气体没有一定形状，易流动。流体的流动有两种形式：层流和湍流。1983年，雷诺(Reynolds)将一根又长又直的圆玻璃管水平放置，并仔细地不使玻璃管受到震动，将水缓慢、均匀地注入。然后在管子入口处注入染色的细流。实验发现，如果玻璃管中水的流动足够慢，染色的细流由玻璃管的入口到出口维持一条完整的直线，从玻璃管外看到的带颜色的细流顺流而下，并不增宽，即染色的细流平行于玻璃管壁流动，与相邻流体间没有相互混合；如果玻璃管中水的流动速度增大，并超过某一速度数值时，染色的细流很快断裂，且明显与周围未染色的水混合，到玻璃管下游时，玻璃管中的水已变成淡淡的颜色，分不出带有颜色的细流了，即染色的细流与整个玻璃管内的流体充分混合，流经任何一点的路径均为不规则的(见图1.1.1)。雷诺把前一种流体的运动类型称为“层流”，后一种称为“湍流”。

同时，雷诺还发现了由层流运动向湍流运动转换的判据——雷诺数，即黏性副层尺度 $d \propto \nu/U$ 与流动特征尺度 L 之比：

$$Re = \frac{LU}{\nu}, \quad (1.1.1)$$