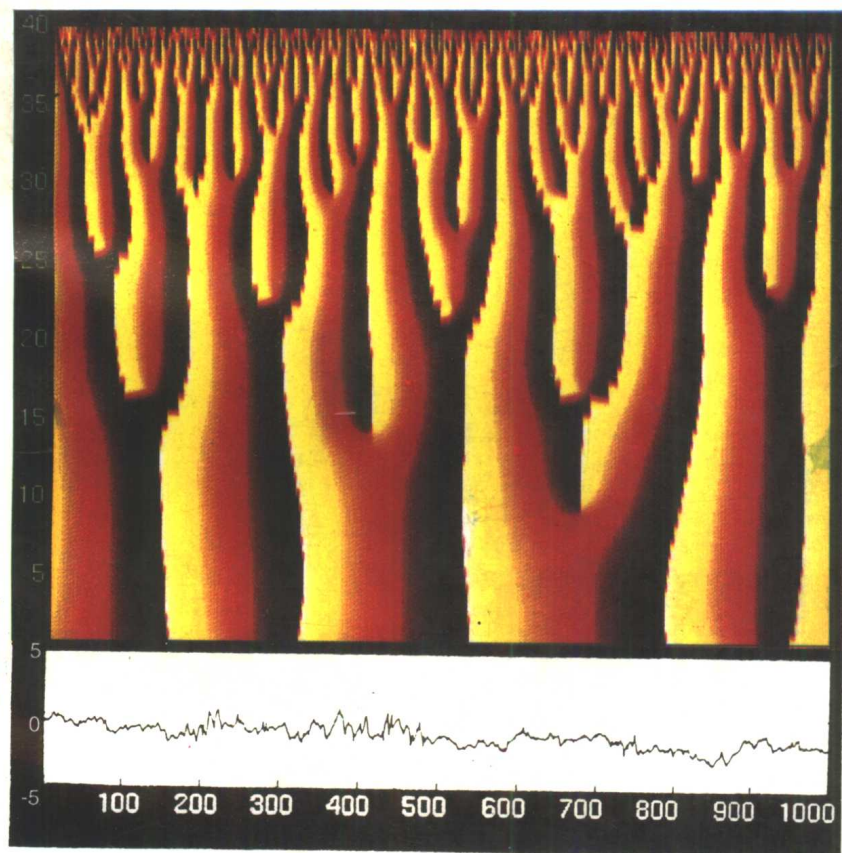


湍流、间歇性与大气边界层

胡 非 著



科学出版社

湍流、间歇性与大气边界层

胡 非 著

科 学 出 版 社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

随着非线性科学的迅猛发展,湍流这一自然科学经典难题的研究已经步入了一个新阶段。本书着重反映了当前湍流、尤其是湍流的间歇性等问题的若干前沿进展。

全书共分 13 章,其中约有 10 章是作者几年来的研究所得的一些结果,包括几个基本问题、湍流的内间歇性与外间歇性以及大气湍流边界层的研究等。

书中还回顾了湍流(包括大气湍流)研究的历史发展,并给出了三个重要的附录,即“周培源教授的湍流理论”、“湍流的重正化群理论”以及“湍流向何处去?”。书中特别指出了中国学者对湍流理论研究所作出的贡献。

本书内容新颖、物理概念清晰、参考文献翔实,可供从事科研、教学和应用的广大科学工作者以及高等院校理工科大学学生和研究生参考。

湍流、间歇性与大气边界层

胡 非 著

责任编辑 方开文

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 9 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995 年 9 月 第一次印刷 印张: 9 1/2

印数: 1—1000

字数: 242000

ISBN 7-03-004672-2/O · 802

定价: 19.60 元

序

湍流是流体运动中一种非常普遍而又极其复杂的基本形态。不管是自然界的大气、海洋和泥沙运动,还是工业技术中的射流和流化床中的流动等,都会遇到湍流。自雷诺提出湍流应力概念、普朗特提出边界层概念、泰勒提出湍流统计理论、柯尔莫哥洛夫提出局域均匀各向同性湍流理论以及周培源提出剪切湍流的应力方程模型等以来,人们对于求解具有湍流流态的许多自然界或工业技术中的流体力学问题已经取得不少成就,研究成果也已获得广泛应用。但由于湍流结构及其演变的复杂性,许多基本问题至今尚未得到解决,甚至连对湍流给一个严格定义都很困难。从这个意义上说,湍流研究还是很年轻、很不成熟的科学领域。

一百多年来,有众多著名的科学家对湍流问题投入了极大的注意力,如上面提到的几位以及朗道、海森伯、冯·卡门、钱德拉塞卡、李政道、林家翘和奥布霍夫等等。然而湍流研究所留下来的难题,今天对于学者们来说仍被视为畏途,更不必说对于青年人了。百年间所积累下来的浩如烟海的湍流文献和成百上千种关于湍流的假说或理论,仅仅学习和了解它们就不是一件容易的事,就需要有顽强的毅力和锲而不舍的恒心。可喜的是,毕竟有志于献身科学的大有人在。无论是在物理、力学和数学界还是在大气科学和地球物理学界,均有不少年轻的科学工作者勇于投身湍流研究,本书作者胡非博士就是其中的佼佼者之一。

作者在从事大气边界层物理研究的过程中,意识到湍流问题是大气边界层物理的核心问题,所以对湍流理论、特别是对大气湍流理论进行了系统的学习和研究,虚心向我国许多湍流研究前辈请教,结果写成本书,是极有价值和难能可贵的。书中内容广泛而

且非常新颖,既对前人的成果作系统的评述和总结,又深入地叙述作者多年潜心研究而尚未发表的新理论及其在大气湍流中的应用(包括对大气湍流边界层结构的剖析本身)。全书突出了湍流的间歇性这一前沿课题,其中内容大多是作者的创新,例如“最邻近最大作用假设”、湍流速度场几何性质与柯尔莫哥洛夫能谱指数的关系、用自回避随机行走涡管模型解释湍流与非湍流交界面的分形几何特征、用相似级串模型研究湍流温度场的结构等等。书中还以三章的篇幅讨论大气边界层问题,包括观测资料的整编和分析、近地层剪切湍流能谱动力学方程的推导和求解,以及地形大气边界层的有限元数值模拟等等。尤其是作者整编的我国北京 325 米气象塔观测资料,这些资料在全世界都是不可多得和极其宝贵的,随着时间的推移,相信会得到越来越多的应用,本书例示的只是其中极小的一部分。还应指出,湍流信号的子波分析是目前国际上最热门的课题,作者初步运用子波法处理我国资料所获得的十分鲜明清晰的结果可以从本书封面上看到。

本书具有独特的风格,读者从中可以获得很多启发。希望读者(特别是广大青年湍流研究工作者)和作者共同努力,来日方长,探索的路更长,总会有所发现,有所发明,有所前进!



(曾庆存)

1995 年 7 月 18 日

前 言

湍流问题的研究具有十分重要的科学意义,湍流尤其是大气边界层物理研究的核心问题,因为大气边界层内的流体运动几乎总是处于湍流状态。然而湍流作为一个经典的自然科学难题是众所周知的,虽经几代科学工作者们一百多年的持续努力,湍流的基本机理至今仍不十分清楚。

例如到目前为止,已有的湍流理论均不能很好地解释湍流是如何发生的?也不能很好地解释在充分发展的湍流中已成定论的一些观测事实,如湍流能谱的“ $-5/3$ 定律”、湍流中拟序结构的存在、湍流的间歇性以及湍流运动中能量反向级串或所谓“负涡旋粘性”现象等等。

我在进行了几年大气边界层湍流的实测资料分析和数值模拟工作之后,迫切感到必须对湍流的基础理论有深入扎实的了解。但在是否选择与湍流有关的某些基本问题作为研究内容之前,我曾经十分踌躇。虽然我已对湍流问题感兴趣很多年并已研读了我所能收集到的大量有关湍流(特别是大气湍流)的书籍和论文,但我深知自己的知识和能力还不足以去真正触及这样艰巨的课题。

由于曾庆存教授和洪钟祥教授两位导师的鼓励和引导,使我最终做出了决定。我知道我国老一辈科学家以周培源教授及其学生为代表早在四、五十年代就做出了国际上公认领先的湍流理论工作,我非常敬佩他们不畏困难、几十年矢志不渝地探索湍流问题的科学精神,我希望能学习和掌握先驱者们的思想和方法,并用自己的具体工作更加充分地加以消化和说明,也许侥幸能有一点点发现或发展,那将是对我莫大的鼓舞。

本书根据我几年来的研究工作写成,共分十三章,除第一到第三章外,其余的实际上是十篇既有相互联系又相对独立的论文,其

中绝大部分结果都是从未发表过的。书中每一章开头都给出了内容提要。

第一章和第二章介绍湍流现象及其理论基础,其中穿插着许多自己的观点;第三章详细介绍湍流的直接相互作用理论,因为这个理论在国际上很著名,而国内文献中未见有详细介绍;第四章研究 Lamb 矢量、螺旋度及其在湍流中的作用,给出 Taylor 微尺度物理意义的一种新的解释,并证明 Kolmogorov 理论在二维情形下是严格成立的,不论是否存在间歇性;第五章至第九章论证了间歇性湍流中速度场的相位相干性,导出考虑间歇性后 Landau 所提出的湍流自由度数目的修正表达式;用涡子模型并提出“最邻近最大作用假设”从理论上导出了湍流速度场概率密度分布函数的渐近表达式;通过研究湍流速度场的几何性质解释 Kolmogorov 能谱指数的几何意义,并证明 Poincare 不等式对湍流运动的约束是产生间歇性的原因之一;将 Monin 和 Yaglom 提出的相似级串模型推广应用到研究间歇性湍流中温度场的结构,导出了与实验相符的理论公式;提出用自回避随机行走涡管模型解释湍流与非湍流交界面的分形几何特性,并对圆管中湍流的间歇性因子与 Reynolds 数的关系提出了理论公式。

第十至第十二章研究大气湍流边界层问题,给出大气边界层与一般空气动力学边界层的比较,导出夜间逆温高度随时间演变的公式,给出气象塔观测资料处理过程及湍流信号的子波分析结果,导出近地层均匀剪切湍流的谱动力学方程并求解这些方程,以及应用有限元方法对复杂地形条件下的大气边界层流动进行数值模拟等等。

第十三章回顾了湍流理论研究的历史发展,包括一般湍流理论和大气湍流理论,以及中国学者对湍流研究所做出的贡献。这一章还包含了三个重要的附录,即“周培源教授的湍流理论”、“湍流的重正化群理论”以及“湍流向何处去?”。书末给出的参考文献按

作者姓名的字母顺序排列。

本书是在中国科学院院士曾庆存教授和中国科学院大气物理研究所所长洪钟祥教授的指导和关怀下完成的,在此谨对他们表示衷心的感谢!中国科学院院士黄荣辉教授、中国科学院大气物理研究所赵松年教授和杨培才教授也对作者给予了热情的鼓励和指导,特别是赵松年教授为本书的出版提供了很多帮助,花费了很多心血和时间,在此一并对他们表示深深的谢意!

北京大学力学系湍流研究中心是勋刚教授、黄永念教授,数学系黄敦教授以及地球物理系刘式达教授曾给予作者极为宝贵的指导和鼓励,他们还审阅过本书的初稿,在此谨对这些老师们表示最诚挚的感谢!

我还要感谢我国已故大气湍流专家、我攻读硕士学位时的导师苏从先教授,是他首先把我带领到大气边界层物理和大气湍流研究这个科学领域。

最后,我衷心地希望各位湍流研究前辈和青年同行对本书中的任何错误和不当之处给予批评和指正。通讯地址是:北京100029,中国科学院大气物理研究所,大气边界层物理和大气化学国家重点实验室。

作者

1995年7月

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 湍流现象	(1)
1.2 四个重要概念	(4)
1.3 湍流的自由度	(8)
1.4 湍流的“不封闭性”问题	(9)
1.5 湍流发生机理——Landau 猜想	(10)
1.6 湍流与混沌	(12)
1.7 湍流研究的困难	(16)
第二章 湍流理论基础	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 Navier-Stokes 方程和 Reynolds 方程	(22)
2.3 半经验理论和统计理论	(24)
2.4 Karman-Howarth 方程和 Loitsianskii 不变量	(27)
2.5 Heisenberg 理论	(29)
2.6 Kolmogorov 理论	(30)
2.7 偏斜度和陡峭度	(32)
2.8 准正则近似	(34)
2.9 随机模型	(35)

2.10	湍流统计理论关联图	(35)
2.11	各态历经假设和 Taylor“冻结”假设	(37)
2.12	分形几何	(38)
2.13	中心极限定理	(42)
第三章	直接相互作用湍流理论	(44)
3.1	引言	(44)
3.2	波数空间中的 Burgers 方程	(44)
3.3	脉冲响应函数	(51)
3.4	直接相互作用近似	(54)
3.5	三阶矩	(58)
3.6	确定 Green 函数	(62)
3.7	小结	(65)
第四章	几个基本问题	(67)
4.1	引言	(67)
4.2	Lamb 矢量、螺旋度及其在湍流中的作用	(68)
4.3	Taylor 微尺度的物理意义	(76)
4.4	Kolmogorov 方程的数值解	(78)
4.5	二维湍流的讨论以及二维湍流中 Kolmogorov 理论 严格成立的证明	(81)
第五章	湍流的间歇性	(87)
5.1	引言	(87)
5.2	内间歇性和外间歇性	(88)

5.3	Landau 质疑	(93)
5.4	对数-正态模型	(96)
5.5	β 模型	(99)
5.6	分形和多标度分形湍流模型	(102)
5.7	非分形湍流模型	(105)
5.8	湍流自由度数目的修正	(106)
5.9	间歇性湍流中速度场相位的相干性	(107)
5.10	湍流级串与 Saint-Venant 原理	(111)
第六章	间歇性湍流速度场的概率分布	(114)
6.1	引言	(114)
6.2	涡子	(116)
6.3	最邻近最大作用假设	(117)
6.4	讨论	(119)
第七章	间歇性湍流速度场的几何性质	(121)
7.1	引言	(121)
7.2	函数图像的分形维	(122)
7.3	湍流能谱指数的几何解释	(126)
7.4	非 Kolmogorov 标度指数与速度图维数的上界	(129)
7.5	Poincare 不等式对湍流运动的约束	(130)
第八章	间歇性湍流中温度场的结构	(132)
8.1	引言	(132)
8.2	硬湍流和软湍流	(134)

8.3	温度场的联合对数-正态模型和 β 模型	(136)
8.4	温度场的相似级串模型	(139)
8.5	小结	(142)
第九章	湍流外间歇性的研究	(143)
9.1	引言	(143)
9.2	湍流与非湍流交界面的分形特征	(145)
9.3	界面分维 $D = 7/3$ 的另一种解释——自回避随 机行走涡管模型	(149)
9.4	圆管中的湍流	(152)
第十章	大气湍流边界层研究(一)	(160)
10.1	引言	(160)
10.2	大气边界层的基本特征	(161)
10.3	湍流交换对夜间逆温高度的影响	(164)
10.4	气象塔观测资料处理	(170)
10.5	关于不稳定层结条件下通量-廓线关系的一点 注记	(182)
10.6	湍流信号的子波分析	(184)
第十一章	大气湍流边界层研究(二)	(194)
11.1	引言	(194)
11.2	均匀剪切和层结湍流的二点相关及谱动力学方 程	(196)
11.3	应用 Heisenberg 理论求解湍流谱方程	(201)

11.4	小结和讨论.....	(208)
第十二章	大气湍流边界层研究(三).....	(211)
12.1	引言.....	(211)
12.2	二维地形上边界层的控制方程.....	(213)
12.3	有限元方程的建立.....	(216)
12.4	算例及结果分析.....	(219)
12.5	小结.....	(225)
第十三章	湍流理论研究的历史回顾.....	(227)
13.1	引言.....	(227)
13.2	普通湍流理论研究的历史发展.....	(227)
13.3	大气湍流理论研究的历史发展.....	(241)
13.4	中国学者的湍流研究工作.....	(244)
13.5	结语.....	(248)
附录 A	周培源教授的湍流理论	(250)
附录 B	湍流的重正化群理论	(257)
附录 C	湍流向何处去?	(262)
参考文献		(271)

第一章 引 论

本章介绍湍流现象的十个基本特征和湍流理论的四个基本概念,以及湍流的“不封闭性”问题。介绍和讨论 Landau 提出的湍流自由度的概念和湍流发生机理的理论以及湍流与非线性动力学中混沌现象的关系,并对湍流研究的困难提出了自己的观点。

1.1 湍流现象

自然界中的流体存在着两种不同的流动形式。一种是层流,看上去平顺、清晰,没有掺混现象,例如靠近燃烧着的香烟头附近细细的烟流;另一种则显得杂乱无章,看上去毫无规则,例如烟卤里冒出来的滚滚浓烟,这就是湍流。在日文文献中叫“乱流”,更容易顾名思义。湍流与我们的生活密切相关,例如“晴空湍流”就是飞机失事的重要原因,湍流诱发的振动可以导致桥梁或其它建筑物破坏。另一方面,例如在化工设备中,为了增加化学反应的速度,我们又要求参加反应的流体保持湍流状态。如果缺乏湍流,那么工厂的废气将难以扩散,从而造成严重的空气污染。总之,湍流是一种极常见的自然现象,相对来说层流却是很少见的。由于湍流现象与航空航天、水利、气象、化工、建筑、交通、医学以及高能物理等众多的领域有关,湍流运动规律的研究成了与国家经济建设有重大关系的自然科学的基本问题之一。

人类对湍流运动现象观察的最早记载可以追溯到 15 世纪意大利著名画家达·芬奇的一幅画(图 1.1),这幅画曾被后人无数次地提到,Tennekes 和 Lumley(1972)的名著《湍流导论》甚至用这幅画作为封面。达·芬奇在这幅画中对湍流做了如下的描述:

“乌云被狂风卷散撕裂,沙粒从海滩上扬起,树木弯下了腰”。如果用近代湍流语言表达的话,就是“乌云的运动是随机的,不规则的。湍流涡旋的尺度在不断地降级,海滩上沙粒被夹带着运动,树木受到地面附近强大的湍流剪切而弯折”(陈景仁,1989)。



图 1.1 达·芬奇描绘的湍流

科学工作者对湍流的系统研究则自 Reynolds 在 19 世纪末才开始(周培源,1959a)。Reynolds 于 1883 年第一次在实验室里对湍流进行了观察,得到决定流动是层流还是湍流的重要判据,即 Reynolds 数 Re , $Re = UL/\nu$, 式中 U 代表特征速度, L 代表特征长度, ν 则代表分子动力粘性系数。那个著名实验就是至今还在向每一个学流体力学的大学生演示的“Reynolds 实验”。从那以后到今天,一百多年过去了。在此期间,许多数学、物理学、力学和工程领域的科学家和工程师对湍流进行了持续不断的研究,虽然取得了不少成果,但在了解湍流到底是怎样产生的,其发展变化的行为又如何等实质性的问题上,依然没有什么大的进展。到目前为止,科学界还无法给出湍流的严格的科学定义。“日本每年要举办一次湍流年会,每次会议的讨论总是要集中于‘什么是湍流’这个问题,而每到这时,会场也总是像炸了锅似的争论起来,结果呢? 还是谁也

说不清楚湍流究竟应当怎么定义。”¹⁾ Reynolds 曾称湍流为“波动”, Taylor 和 von Karman 则定义湍流为“不规则的运动”, Hinze 认为只提不规则运动不全面,“湍流的各个量在空间、时间上表现出具有随机性”,周培源先生则一贯主张湍流为一种不规则的涡旋运动,众说不一,如同在波动光学建立以前人们只能说出一件衣服、一朵花是“红”色的,但反过来究竟什么是“红”却无法定义一样。湍流这一似乎不可测量而难以捉摸的东西,由于其运动的极端复杂性,成了摆在人们面前的跨世纪的科学难题,是“对理论和实验的挑战”(Frisch and Orszag, 1990)。

虽然不能给出严格定义,但是我们可以列举出湍流的一些主要特征:

(1) 不规则性或随机性 这是湍流的重要性质,从动力学的观点来看,湍流必定是不可预测的,研究湍流大多是用统计方法;

(2) 扩散性 这是湍流的另一个重要性质,如果某种流动虽然是随机的,但是它在周围的流体中不出现扩散现象,那么肯定不是湍流,例如喷气式飞机的尾迹。湍流具有比分子运动强得多的扩散能力,这一点正是大多数人感兴趣的,因为人们在实际问题中特别关心湍流传热、传质和阻力(动量传递),这“三传”现象都与湍流扩散有关;

(3) 大 Reynolds 数性质 湍流是一种在大 Reynolds 数条件下才出现的现象,即非线性起主导作用, Re 越高,越容易出现湍流,例如大气边界层内的 Re 非常大,可达 10^8 , 因此一般总是处于湍流状态;

(4) 涡旋 湍流中充斥着大大小小的涡旋,湍流是以高频扰动涡为特征的有旋的三维(有时是准二维)运动,单个的涡旋,例如大气中二维的龙卷风不是湍流运动;

(5) 耗散性 湍流运动由于分子粘性作用要耗散能量,只有不

1) 魏庆鼎,《国际航空》1983 年第 3 期第 6 页。

断从外部供给能量,湍流才能维持,太阳辐射加热或风切变就是大气湍流的能源,风洞网格后的湍流在发展过程中由于不再获得外部能量,所以渐渐衰减为层流,可以说,湍流是一个耗散系统。大气中的随机波动,如随机重力波,随机声波(噪声)等,虽然也是无规则的,但几乎没有能量的粘性耗损,所以也不是湍流;

(6)连续性 湍流是一种连续介质的运动现象,因此满足连续介质力学的基本规律,例如 Navier-Stokes 方程;

(7)流动特性 湍流不是流体的物理属性,而是流动的运动性质,所以不同的流体其湍流特征往往也不一样,例如边界层湍流与尾迹湍流,正因为如此(湍流依赖于外部环境,如边界条件),所以工程上很难对湍流进行统一的模式处理,但是湍流的一些本质特性是普适的,寻找这些普遍规律正是湍流理论研究的中心任务;

(8)记忆特性(相关性) 湍流运动在不同的时刻或空间不同点上并不是独立的,而是有相互关联,但这种关联随着时间间隔或空间距离的增大而变小,最后趋近于零;

(9)间歇性 这是近代湍流研究的重大发现之一,有内间歇和外间歇之分,前者系指充分发展的湍流场中某些物理量(特别是高阶统计量)并不是在空间(或时间)的每一点上都存在的,即有奇异性;后者指湍流区与非湍流区边界的时空不确定性,例如积云与蓝天之间的界面,湍流边界层与外层之间的界面。间歇现象(尤其是内间歇)的研究是目前湍流理论研究的前沿课题;

(10)猝发与拟序结构 这也是近代湍流研究的重大发现,实验表明,在湍流混合层和剪切湍流边界层中存在大尺度的相干结构和猝发现象,说明湍流不是完全无秩序、无内部结构的运动,这促使人们改变了对湍流的某些传统观念。

1.2 四个重要概念

现代湍流理论中,有几个基本的概念占有核心的地位,它们是