

湍流的拟序结构

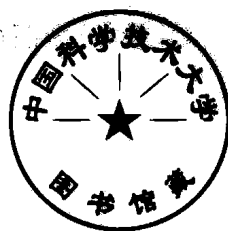
林建忠 编著



机械工业出版社

湍流的拟序结构

林建忠 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书的第一章简单地回顾了湍流研究的历史,接着叙述了湍流场中拟序结构的由来和发展、特性和作用、拓扑形式和包含拟序结构的湍流场的分解。第二章重点介绍了在拟序结构研究中所采用的理论、计算和实验方法。第三章详细给出了对自由剪切层,尤其是斜向自由剪切层中拟序结构研究的成果。第四章主要介绍了边界层流场中拟序结构的特点以及相应的研究成果。第五章叙述了与湍流及其拟序结构有关的新兴学科——分维的理论及其应用。

图书在版编目(CIP)数据

湍流的拟序结构/林建忠编著.-北京:机械工业出版社,1995
ISBN 7-111-04356-1

I.湍… II.林… III.湍流结构IV.0357.5

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第06648号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:林松 版式设计:霍永明 责任校对:樊中英

封面设计:方芬 责任印制:卢子祥

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1995年3月第1版·1995年3月第1次印刷

787mm×1092mm1/32·8.625印张·187千字

印数 001—750册

定价:11.50元

序

湍流是流体力学中最重要而又最困难的问题之一，近30年来，流场中的拟序结构成了湍流理论研究的一大热点。已有研究表明，拟序结构在湍流场中是个很普遍的现象，流场中的拟序结构对流场的混合、燃烧、化学反应过程、热的输运、噪声的产生和放射以及切应力变化等起着重要作用。另据分析，在自由剪切湍流场中，拟序结构所包含的能量大约占流场总能量的20%，可见对湍流场中拟序结构的研究具有十分重要的意义。

作者在北京大学攻读博士学位期间，曾阅读了大量有关对湍流场中拟序结构研究的文献资料，并做了一些实验和计算方面的研究工作，后来作者所从事的研究课题“斜向自由剪切层拟序结构的实验和数值计算”又得到国家自然科学基金委员会的资助，使作者能进一步开展有关拟序结构方面的研究工作，在此作者对有关部门的支持以及魏中磊、是勋刚、黄永念、黄文生等老师表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足和疏漏之处，敬请读者赐教指正。

作 者

1993年10月

目 录

序

第一章	湍流与拟序结构	1
第一节	湍流概述.....	1
第二节	拟序结构的由来和发展.....	12
第三节	拟序结构的特性和作用.....	14
第四节	拟序结构的拓扑形式与临界点理论.....	20
第五节	包含拟序结构的流场的分解.....	29
第二章	拟序结构的研究方法	36
第一节	协同学的应用.....	36
第二节	理论计算方法.....	41
第三节	实验方法.....	61
第三章	自由剪切层中的拟序结构	89
第一节	前言.....	89
第二节	自由剪切层拟序结构研究的回顾.....	91
第三节	自由剪切层的数值计算方法.....	103
第四节	斜向自由剪切层流动特性的研究.....	132
第五节	粘弹性二阶流体自由剪切层流场的研究.....	149
第四章	边界层中的拟序结构	164
第一节	概述和研究回顾.....	164
第二节	边界层拟序结构的一般描述.....	171
第三节	涡结构和模式.....	185
第四节	本征正交分解及其应用.....	195
第五节	结论和将来的工作.....	211
第五章	湍流结构与分数维	218

第一节	分数维概述.....	218
第二节	湍流场中的分数维及一些测量方法.....	235
第三节	多分形(Multifractals).....	253
第四节	湍流场中的多分形谱.....	258
第五节	湍流中分数维的有关结论.....	263

第一章 湍流与拟序结构

要叙述流场中的拟序结构，不能不对流场中的湍流运动及其湍流的研究进行一番回顾。由于对湍流的研究已有很长的历史，并取得了很大的成就，所以这里不可能都涉及到，只能作一个概述。

第一节 湍流概述

在流体力学中，层流只不过是流体运动中较简单而又欠普遍的状态，更普遍的却是湍流。湍流的研究与国防建设和国民经济中的航空、造船、环境保护、气象、化工、冶金、水利、医学等学科密切相关，如果能掌握它的运动规律，对它进行有效的控制和合理的应用，那么对基础研究与实际应用将有重大的意义。正因为如此，湍流研究领域吸引了众多的力学、物理、数学、气象等学科的工作者。在一个多世纪中，特别是本世纪60年代以来，人们对湍流结构、湍流边界层、湍性剪切流、湍流的传热传质、湍流扩散、湍流统计模型、大气湍流、晴空湍流、等离子湍流、湍流测量等问题进行了广泛的研究，并取得了丰硕的成果。

一、湍流的一般定义和描述

尽管湍流中存在很小的湍动尺度，但这种尺度比大气条件下气体分子的平均自由程大得多，所以湍动时的流体仍可作为连续介质处理。现有的实验结果还表明，在与最小湍动尺度相当的距离以及与最小脉动周期相近的时间内，湍流中

的特征量呈现连续的变化，在空间和时间上是可微的，因而可用常规的描述一般流体运动的方法来建立数学模型。所以，一个多世纪以来，人们将N-S方程作为湍流运动的基本方程。换言之，湍流场中任一空间点的速度、压强、密度等瞬时值都必须满足该方程。虽然长期以来，有些学者对这一数学模型产生过疑问，也试图另辟蹊径，寻找其它数学模型，但都没有令人信服的依据和结果。而基于N-S方程所得的一些湍流理论、计算结果却和实验结果吻合得很好。

由于湍流的复杂性，至今还没有一个定义能全面表述湍流的所有特征，人们对湍流的认识是一个不断积累的过程。从19世纪开始，普遍被人们接受的经典看法是——湍流是完全不规则的随机运动，因此 Reynolds 首创统计平均方法来描述湍流运动。1937年，Taylor 和 Von Karman 也指出，湍流是一种不规则运动，它于流体流过固壁或相邻不同速度流体层相互流过时产生。后来 Hinze 在此基础上予以补充，说明湍流的速度、压强、温度等量在时间与空间坐标中是随机变化的。从70年代初开始，很多人认为湍流并不是完全随机的运动，而是存在一种可以被检测和显示的拟序结构，亦称大涡拟序结构。它的机理与随机的小涡旋结构不同，它在切变湍流的脉动生成和发展中起主导作用。但是人们对这个说法仍存在争议，有人认为这种大尺度结构不属于湍流的范畴，而有人认为这是湍流的一种表现形式。目前大多数人的观点是：流体的湍流运动是由各种大小和涡量不同的涡旋叠加而成的，其中最大涡尺度与流动环境密切相关，最小涡尺度则由粘性确定；流体在运动过程中，涡旋不断破碎、合并，流体质点轨迹不断变化。在某些情况下，场中的流体呈非线性完全随机的运动；在另一些情况下，场中

的流体随机运动和拟序运动并存。

二、湍流研究的简单回顾

湍流研究的正式开始是在本世纪初, 20~30年代初期, 各种唯象学理论, 尤其是动量和涡量输运理论占主导地位。到了30年代和40年代, 人们的注意力转到了均匀湍流的统计理论上, 在实验中, 湍流动能平衡是主要研究对象, 它后来成了湍流模式理论的基础。60年代后期以来发现的大涡拟序结构成了近年来湍流研究的一大热门。

纵观湍流研究史, 人们把研究重点放在湍流运动的两个不同阶段上。一是从层流到湍流的转换以及湍流的发展前期, 该时期的湍流具有较大的涡旋结构, 湍流特性与流动环境以及产生流动的装置有直接关系。二是充分发展的湍流, 包括均匀各向同性湍流和自由剪切湍流的自模拟区, 该阶段湍流结构一般不受流动环境以及外部尺寸的直接影响, 是属于经典定义的湍流, 从中得到的有关湍流的结论更具有普适性。

(一)以雷诺方程为基础的湍流研究

鉴于湍流的随机性, 人们花了很长时间去寻找湍流动力学方程的统计解。1894年, 现代湍流理论的创始人 O. Reynolds, 将满足动力学方程的湍流瞬时运动分解为平均运动和脉动运动两个部分, 得到了包含雷诺应力的湍流时均方程——雷诺方程。从此以后, 人们的研究大多数都围绕着雷诺方程进行, 相应产生了统计理论和半经验理论, 后者发展成后来的湍流模式理论。

1. 湍流的统计理论

统计理论把研究重点放在湍流的脉动结构上, 通过建立不同随机量之间的关联函数, 得到随机变量的统计特性, 以

此了解湍流的内部结构，掌握湍流平均流动变量的空间分布与时间演变的情况。

1921年，G. I. Taylor 首先提出两点间脉动流速相关矩的概念。从30年代开始，热线风速仪等测量技术的发展，使湍流脉动速度等量的测量成为可能，这就促进了统计理论的迅速发展。1935年，G. I. Taylor 在研究风洞网格后的均匀各向同性湍流中，首次提出湍流速度是空间和时间的连续随机函数，通过讨论两点间的关联函数，他得出湍流衰减定律。1938年，Von Kármán 和 L. Howarth 导出了含有二阶、三阶脉动速度关联系数的均匀各向同性湍流动力学方程式，即著名的 Kármán-Howarth 方程。在1938年和1948年，G. I. Taylor 和 W. Heisenberg 分别由关联函数和谱函数间的关系，给出一维和三维湍谱，导出K-H方程在谱空间的相应形式。由于N-S方程的非线性，以上关联函数所满足的方程不封闭，只有在一些极限的情况下，这些方程才能近似求解。对于一般情形，围绕着如何使方程封闭，几十年来人们进行了大量的工作，其中有各种人为的假定和近似，比如假定四阶累积量等于零；也有的将关联函数变换到谱空间，再对能谱变换函数作假定，在这些假定之上所得到的结果，有些与实验结果相吻合。

50年代以后，一些物理学家和数学家分别应用物理学中的统计力学、量子力学等一些现代物理中的新概念和数学中的概率的计、泛函、拓扑、群论等现代数学工具，提出了一些其它的理论模型，如E. Hopf于1952年根据湍流脉动速度场的随机性，引进了脉动速度场的分布泛函数和特征泛函数，然后从连续性方程和N-S方程出发推导得到一个对特征泛函数是线性的积分微分方程。该方程很复杂，难以被采用。

R. H. Kraichnan 于 60 年代提出了直接相互作用近似理论, 其推导出的能谱函数和脉冲响应函数所满足的一组封闭的联立积分微分方程组, 由于所含的假设缺乏足够的依据, 特别是在理论中修改了 N-S 方程的形式, 计算所得的结果又不满意, 所以该理论一直没有被接受。

1974 年, Tsuge 也曾从气体分子运动论的微观角度出发, 得到用来研究湍流运动的广义玻耳兹曼方程。然而, 这种从微观角度来研究属于宏观运动的湍流运动方法缺乏说服力。Meecham 等曾于 1968 年提出无穷级数理论, 该理论把脉动速度这种随机场用一组相互正交的由白噪声函数的 Hermite 多项式组成的理想随机函数, 作为它的基展开成无穷级数, 然后根据 N-S 方程和连续性方程得到这个无穷级数的系数所满足的一组积分微分方程, 再利用统计平均的方法找出相应的关联函数和能谱函数。该方法要解更复杂的积分微分方程, 所以至今也没有满意的结果。

此外, 还有 Grossmann 等人于 70 年代中期提出的重正化群理论和 S. M. Chen 的统计动力学重复级串理论等。由于都存在某些欠缺, 因而很少被采纳应用。

2. 半经验理论

半经验理论着重研究时均流的运动规律, 它能给出工程应用中人们最感兴趣的一些物理量, 具有很强的实用性。但是该理论不考虑湍流运动本身的特点, 即脉动场的结构问题, 回避了湍流运动的物理本质, 因而在理论上欠完善。

在描述时均流的雷诺方程中包含一项二阶脉动速度关联函数, 正是该函数使得方程组不封闭。半经验理论的核心就是通过理论与经验的结合, 引进适当的假设, 从而给出二阶脉动速度关联项的表达式。

1877年, Boussinesq 在分子运动论思想的启发下, 首先提出了用涡团粘性系数来表征湍流切应力的观点, 其中粘性系数要由实验确定。虽然这一提法早于雷诺方程的出现, 但却为后来求解雷诺方程的半经验理论的出现奠定了基础。1925年, Prandtl 在 Boussinesq 假设的基础上, 引入与气体分子自由运动长度类似的湍流混合长度, 并认为在该长度内, 被输运的流体动量保持不变, 进而给出了由混合长度和时均速度梯度表示的雷诺应力表达式, 而雷诺应力正是雷诺方程中二阶脉动速度关联项与流体密度的乘积。1932年, Taylor 在其 1915年给出的在一定距离内, 涡量在湍流交换过程中保持不变这一理论的基础上, 提出了涡量转移理论, 用一个涡旋混合长度取代 Prandtl 的混合长度来表达雷诺应力, 他认为在涡旋混合长度内, 湍流输运时的涡量保持不变。以上两种理论中出现的混合长度是一未知数, 必须引进一定的假设才能确定, 为此 Karman 力图通过对湍流场的假设来给出特征长度与时均流速间的关系。1930年, 他提出了局部运动相似理论, 由假定脉动流速场相似, 得到了雷诺应力表达式。

此外, 马卡维耶夫将湍流看成一个复杂的自振动体系, 通过给出不同的脉动流速表达式, 得到相应的一般形式的流场应力公式, 形成了自振动理论。40年代, 根据已有的试验资料, Reichardt 采用归纳法, 对自由湍流得出了便于求解的脉动关联量的线性方程, 用来研究时均流的规律, 被人们称之为归纳理论。

3. 湍流模式理论

半经验理论是用较简单的代数关系来确定一阶湍流统计量的动力学微分方程, 故称之为“一阶封闭模式”。这种模式只

能用于较简单的流场，对于比较复杂的流场，必须引进高阶的封闭模式，这就是近几十年来发展起来的并且现在仍很重要的湍流模式理论。该理论有很强的工程实用意义，所以是湍流研究中一个很重要的部分。

1951年，Rotta 就提出了完整的雷诺应力模式。60年代以后，随着计算机技术和数值方法的迅速发展，各种各样的模式理论也相应产生。无论怎样的模式，它的形成都是在充分了解湍流现象的基础上，引出一系列假设，按照一定的原则实现的。这些假设包括：湍流量的扩散与该量的梯度成正比；所有湍流量均可由脉动速度、压力、密度、粘性系数、热扩散系数、脉动速度的二阶关联、脉动速度与脉动温度的二阶关联、湍流动能等量来表示；湍流尺度是湍流动能和湍流动量耗散率的函数；小涡是各向同性的，其尺度由湍流动能耗散率和粘性系数来表示。而一定的原则指的是：建立的模式必须满足张量的对称性、不变性和转置性，模式中出现的常数必须由实验确定。

目前比较常用的模式有雷诺应力模式、代数应力模式、湍流动能方程模式以及涡粘性模式。其中涡粘性模式和代数应力模式比较简单，在工程上应用甚广；雷诺应力模式最复杂，实用性不如其它模式，但却可用来计算简单模式不能胜任的复杂流场。

(二) 稳定性理论

针对不同阶段、不同类型的湍流，人们采用了一些相应的研究办法，稳定性理论就是其中之一。和湍流运动有关的稳定性包括：层流稳定性、热流稳定性、不同流体交界面的稳定性等，在此只叙述层流稳定性。

层流和湍流是两种不同的流态，不少学者想通过了解由

层流过渡到湍流的机理，从而加深对充分发展的湍流的认识。从 19 世纪开始，Reynolds 就已经进行这方面的工作，然而只是到本世纪中叶，经过 Rayleigh、Dryden、C. C. Lin、Schlichting 等人的研究，才有了突破。当流场处于层流状态时，对应某个低于临界值的雷诺数，如果由外部引入微小的扰动，该扰动随着时间的增长而逐渐衰减，层流状态保持不变，这时流场是稳定的。当流场雷诺数高于临界雷诺数，同样由外部引进的扰动将随着时间推移而逐渐增大，层流变得不稳定了，这时流场中有可能出现湍流。所谓稳定性理论正是研究不同流场中层流失稳时的临界雷诺数。根据不同的扰动形式，可以分为线性和非线性稳定性理论。

1. 层流稳定性线性理论

该理论选择一个无穷小的扰动，在基本流动解之上加一扰动量后，代入 N-S 方程，便可得到扰动量满足的方程。在这方程中略去扰动量及其导数二阶以上的小量，就得到关于扰动量的线性偏微分方程。对于二维的简单层流流场，就是相应的著名 Orr-Sommerfeld 方程。忽略该方程中的粘性项，再将方程用于分析平行流的稳定性，可以得到两个结论：一是流动不稳定时，流速分布必定有拐点，反之亦然，该结论也适用于粘性流；二是在边界层中，中性扰动波速小于基本层流的最大流速。对于 Orr-Sommerfeld 方程，一般都采用近似解法，包括常用的渐近线解法和数值积分，目的是求该方程在给定边界条件下的本征值问题。通过求解可以给出雷诺数和扰动波数间的关系，这一关系在以雷诺数为横轴，波数为纵轴的坐标系中呈现的曲线称中性曲线，又称拇指曲线，可用来区分稳定与不稳定区。该曲线上所具有

的最小雷诺数称为临界雷诺数的理论值，超过该值是层流向湍流过渡的必要条件。

线性理论用于一些实际的流场，如 Poiseuille 流，平板边界层等，可以得到相应的中性曲线。但对于某些流场，如圆管中的 Hagen-Poiseuille 流，平面 Couette 流等，由于该理论的局限性，得不到中性曲线。

2. 层流稳定性非线性理论

线性稳定性理论只能给出层流失稳的条件，为了解失稳后的流场，从40年代开始，人们发展了非线性理论。在这方面，Stuart、Landau、Sattinger、Herbert、Benney、Craig、Gustavasson 以及周恒等做了大量工作，出现了 Landau 理论、保形假设理论、弱非线性理论，以及三维的二次失稳理论、共振三波理论、一般共振理论、直接共振理论。

值得一提的是分叉理论，分叉概念是 Landau 和 Hopf 于 40 年代提出的，后来由 Sattinger 加以概括。内容是当雷诺数小于某个临界值时，可由定常的 N-S 方程得到层流适定的解；而雷诺数超过临界值时，适定性将失去，此时层流解虽存在却不稳定，稳定解被另一定场解取而代之，这时产生一个分叉。雷诺数再超过另一临界值时，原来稳定的解失去稳定，另一更复杂的稳定解又产生，如此反复，分叉逐渐增多。数学家们从数学角度将这种分叉现象与湍流等同起来，相应地提出一些理论模型，如 Lorenz 的奇异吸引子理论。用分叉点的增多来表示湍流的产生这一观点并未得到实验的证实，实际上在一些实验中，在分叉三次后，流场已呈现湍流特征。因此，奇异吸引子理论还只限于在数学上用来研究常微分方程，要解决湍流问题尚有一定距离。

(三)其它一些理论和方法

随着各学科间相互渗透的日趋加强以及一些研究技术和设备的日益完善,近20年来又出现了不少新的湍流研究理论和方法,如60年代的直接干扰近似法;始于60年代末的剪切湍流的大涡结构理论以及该理论中所采用的三重分解法,即把湍流场分解为平均场、拟序场和完全随机场;70年代中期以来, Mandelbrot 提出的分数维理论; 70 年代末发展起来的现代混沌理论等。虽然这些理论中有的只是研究其它领域中出现的与湍流可以相比拟的现象,但无疑对湍流的研究起到促进作用。

三、湍流研究技术的发展

在计算机出现以前,湍流的计算只能对一些简单的流态经过近似简化后进行。在实验方面,本世纪20年代以前,只有测平均流速的毕托管。20年代后,热线风速仪的出现使测量雷诺应力、湍谱、低于四阶的矩等量成为可能,但这种能由电模拟法测得的量还是不多,而且进一步发展比较困难。至于其它实验手段,如流场显示技术等,由于受其它配套设备的牵制,又只能给出定性结果,所以当时只能起参考作用。

计算机的出现,对湍流的研究是个很大的促进,它提供了解决湍流问题的新途径。例如直接对N-S方程进行数值模拟,既可以避免由构造湍流模式带来的困难和误差,又可以提供流场中所有量的信息,给分析流场和发展新理论提供依据,还可以方便地通过对计算中某个量的控制,了解该量对流场的影响。另外,由计算机得到的数值解,经过图象处理后,能模仿实验室所得到的流动显示图案,既直观又方便。

由于计算机的容量和速度有限,既要使网格小到能描绘

湍流的Kolmogorov微尺度，又要使网格多到能覆盖与平均运动特征尺度相当的最大涡，这在一般情况下是不可能的。所以到目前为止，直接数值模拟还只能计算较低雷诺数的简单湍流。为了暂时摆脱计算机能力的限制，一种折衷的办法相应产生，这就是亚格子封闭模型法，它的计算网格尺度没必要比Kolmogorov微尺度小，这就可以减少网格数。对于比网格尺度大的大涡运动，通过直接求解N-S方程得到；比网格尺度小的小涡运动对大涡运动的影响，仍采用建立模式的方法来模拟。该方法是建立在小涡运动接近于各向同性这一重要特征之上的，目前它已得到广泛的应用。谱方法也是直接计算N-s方程的一种方法，该方法应用快速Fourier变换，将物理空间的方程变换到谱空间求解，具有速度快、获得信息多的特点。

在实验方面，现在的计算机控制实验已起到重要的作用，热线风速仪配之以计算机采样和数据处理加工，加上数字滤波技术，以及离散快速Fourier变换等先进数学方法的出现，使得湍流实验有了重大突破。计算机控制实验不仅能很快地处理高频信号和大批数据，还能自动精确地校准探头、条件采样、多变量的同时记录和结构分类等等；它还能改善信号处理的精度，减少操作干扰。在复杂的实验中，计算机控制实验能消除实验中的某些偏移，探索细微的性质。

此外，70年代出现的激光多普勒测速仪以及近30年迅速发展起来的流场显示技术，极大地丰富了湍流实验手段，拓宽了实验的功能。值得一提的是90年代出现的粒子图象速度场仪，这是超出单空间点的测量技术，能在瞬间测出几千乃至上万个点的速度，提供丰富的流动空间结构的信息，有可能获得流动中的小尺度结构逼真的图象，兼备热线风速仪的