



工程湍流

梁在潮 著

华中理工大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY PRESS



0357.5

L48

447934



工程湍流

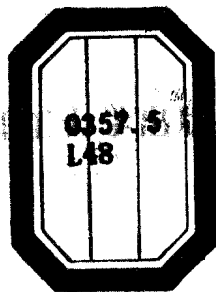
梁在潮 著



00447934

3

华中理



社

图书在版编目(CIP)数据

工程湍流/梁在潮著

武汉:华中理工大学出版社, 1999. 4

ISBN 7-5609-1920-0/O · 186

I. 工…

II. 梁…

III. 工程湍流

IV. O357.5

工程湍流

梁在潮 著

责任编辑:湛柏琼

责任校对:朱 霞

封面设计:刘 卉

监 印:张正林

出版发行者:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销者:新华书店湖北发行所

录排者:华中理工大学出版社照排室排版

印刷者:武汉市青联彩印印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:10.125

插页:2

字数:241 000

版次:1999年4月第1版

印次:1999年4月第1次印刷

印数:1-1 200

ISBN 7-5609-1920-0/O · 186

定价:14.60 元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

本书系统地阐述“工程湍流”的概念、理论和特征；详细介绍了湍流的基本概念和基本方程。主要内容有边界层、拟序结构、半经验理论、模式理论、实验与数据处理、传热与传质、减阻技术和脉动壁压等。书中包含了作者长期从事湍流研究，特别是工程湍流研究所取得的新成果。本书的特点是，将湍流理论与工程中的湍流问题紧密结合，建立了工程湍流的新体系，为解决工程中的湍流问题提供了理论依据和解决问题的途径。

本书内容新颖，概念清晰，理论紧密结合实际。可作力学、水利、化工、国防、机械等专业的研究生和高年级大学生的参考。

在我国开展工程湍流研究的设想

代 序

1 问题提出的背景

工程中绝大多数流体流动都是湍流。严格讲,大多数工程中的流体力学问题都应当用湍流理论进行处理。由于实际工程中的流动甚为复杂,目前湍流理论和计算技术都未达到可以大量解决实际工程中流体力学问题的水平,因而工程上目前主要仍采用传统的方法(如水力学的方法)。但随着湍流理论和计算技术的发展,有些涉及到流体内部结构的工程流体力学问题,不用湍流理论不可能较好地得到解决,如环境工程、水利工程中的高速水流和挟沙水流等就是如此,因而近 20 年来,国内外都在研究如何用湍流理论解决工程中的湍流问题。就其内容讲,它可分为三个层次:

①湍流理论中一些比较成熟的概念,用于解释一些流动现象和某些局部问题;

②湍流模式的应用,特别是两方程模式,在预测工程中的一些流体力学问题时,已成为较普遍的方法;

③以湍流理论为依据,提出了一些解决工程问题的新理论和新方法。例如空化空蚀的研究,湍流边界层理论是其重要研究理论之一。正是由于湍流理论已广泛地用于解决工程问题,因而反过来又促进了湍流理论本身的发展,特别是与直接服务于工程有关的理论,如湍流模式理论,更是发展迅速。

湍流理论创始人之一,著名科学家周培源教授为第 3 届全国湍流与流动稳定性学术会议论文集题词:“积极开展流体湍流运动

的实验、理论与应用的研究,为祖国社会主义建设服务。”周培源教授在题词中正确地指出了当前我国湍流研究的方向和研究的目的。

从当前国际湍流研究的趋势看,除对湍流基本结构大力进行研究外,结合工程中的问题进行工程湍流研究,已成为国际湍流研究的重要方面。如湍流模式、湍流控制、湍流测量、湍流与传质传热等。而且成立了“工程湍流”方面的有关组织,并定期召开国际会议,推动其发展。

英国剑桥大学的 J. C. R. Hunt 指出(1993),以后几年内流体力学最大的追求,应是发展和利用已有的湍流和其它类型随机流动的知识解决实际技术问题,以产生新的技术、产品并帮助解决全球的环境问题。要达到此目的,还需要使用更多的人力和物力。

综上所述,提出开展我国工程湍流研究的历史背景有三:①湍流理论和测试技术已大大发展,可为工程中的湍流问题的解决提供一定的理论依据和预测方法;②工程中广泛地应用湍流理论已取得了丰富经验,为解决工程湍流问题提供了实践基础;③社会主义建设迫切需要用湍流理论解决工程问题,但由于湍流本身的复杂性,基础研究难度很大,至今仍处在摸索阶段,还不能为工程应用提供成熟的理论基础。因此,需要开展直接服务于工程问题的湍流研究。

2 工程湍流研究的内容和特征

众所周知,湍流的研究是物理学乃至全部自然科学中当今最重要的问题之一。1983年,美国科学工程和公共政策委员会向美国国会建议,将“流体中的湍流”作为科学技术八大生长点之一,因为湍流是自然界普遍存在的一种流体流动状态。而工程湍流理论是直接服务于工程的,是湍流理论的一个特殊部分。

2.1 工程湍流研究的主要内容

分析综合了国内外关于工程湍流的研究,它将包含四个部分:

• I •

①湍流理论的概念在工程中的应用;②湍流模式理论;③湍流测量;④湍流控制。所包含的内容,既有湍流基础研究,更有湍流的应用研究。这正符合周培源教授指出的“积极开展流体湍流运动的实验、理论与应用的研究”。

2.2 工程湍流研究的特点

工程湍流研究的特点,总的说来应是直接服务于工程,具体讲可认为具有以下几个特点:

(1) 湍流场中的平均量是主要研究对象。工程中所要求的湍流物理量,一般是湍流统计平均行为的各物理量,如 $\overline{u_i}$, $\overline{p}$, $\overline{u'_i u'_i}$, $\overline{u'_i u'_j}$ 等,往往不追求了解湍流的内部机理及其演变过程。除一些特殊工程,如燃烧火焰场、火箭发射尾部流场等外,一般都不需要求瞬时流场。

(2) 所求的物理量的精度,以工程的要求为标准。一般讲工程上要求的物理量,其精度的要求随工程的重要程度而定,因而为了满足工程的要求,有时对湍流的物理量不追求其理论上的严密性和普遍性,只求得有足够精度的计算结果。例如 Prandtl 的动量传递理论,尽管多少年来一直受到“理论不完善”的评论,但在工程中仍广泛地应用,其原因是:一方面该理论的计算式简单,便于工程师们应用;另一方面在一些情况下计算结果的精度能满足工程的要求。

(3) 在处理方法上更多的注意宏观控制。如尺度分析,数量级比较,突出主要项,略去次要项等分析方法,在工程湍流中是处理问题的主要手段之一。

(4) 实际问题的解决,更多地依靠实验或含有一定经验成分的模式理论。例如湍流理论中当前存在的一个核心问题——尚未找到统一的概率分布律,因而造成湍流方程不封闭,但是根据实验资料,可认为充分发展的湍流区可应用正态分布律;而在近壁区等强剪切湍流区可用对数正态分布律;这样就可在实验的基础上部分地解决工程中的湍流问题。

3 开展工程湍流研究的设想

工程湍流研究所包含的四个方面的内容,需要总结、完善和发展,使其成为直接服务于工程的湍流理论的分支。

3.1 湍流理论的概念在工程中的应用

湍流理论在工程中的应用,在当前更多的是指“湍流统计理论”和“湍流拟序结构理论”在工程中的应用。湍流理论中的一些比较成熟的观点和方法已广泛地在工程中得到应用,如湍流是由大小不同尺寸的涡体所组成,能量的输运主要是大涡体,能量的耗损主要是小涡体;切变湍流中存在一种有组织结构——拟序结构;条带结构、猝发结构和涡旋结构构成近壁区湍流结构的特征;其它还有大量的经过实验证明的基本概念已成为工程中处理传质、传热、能量输运等问题的重要指导观点。例如随着大型水电站的修建,高速水流问题已成为迫切需要解决的课题之一。高速水流是高雷诺数充分发展的湍流,它的特殊工程问题,可概括为“两动、两气”,即“脉动压力和振动”、“掺气”和“气蚀”,这些问题都涉及到湍流结构,因而必须用湍流理论来研究。近十几年来,我们用湍流拟序结构理论为指导,解决了脉动壁压力的分布规律、模型比尺和计算方法等问题;对高速泄流产生的雾化,提出了一套完整的理论和计算方法,这些研究成果已被工程单位广泛地采用。事实证明,虽然湍流研究还没有根本性突破,但不可否认的是湍流研究已取得了重大进展,不少理论内容和处理问题的方法,得到了实验和实际工程的验证。这些成熟的内容完全可以用于解决工程问题,一些对湍流研究当前水平的错误估计需要纠正。例如一谈到湍流问题就觉得束手无策,或认为解决实际问题还遥遥无期等论点都是不全面的。现在面临的问题是:

(1) 对湍流理论中已有的概念和处理问题的方法,需进行可靠程度的分析和鉴别,也要不断地完善和深化。例如脉动壁压的强度和频率,都是工程设计需要考虑的物理量,过去工程界一般将脉

动壁压看成是平稳各态历经随机过程,脉动量是时间和空间坐标的随机函数,因而用长时间统计平均求其平均值。但近期实验资料表明,脉动壁压不完全是随机的,而是存在拟序性,即其时间样本历程上,脉动量具有明显而强烈的间歇性,间歇地处于活动期和平静期的交替过程,其间歇性正反映湍流拟序结构对脉动壁压的作用,因此,传统的用长时间统计平均求平均值的方法,恰好抹去了工程上特别关心的大振幅低频率的脉动值。

(2) 需要研究将湍流理论用于解决工程问题的途径。工程中的湍流一般都比较复杂,当前还难以用严密的理论公式计算得到。因而,除了广泛地用湍流模型外,尺度分析也是解决工程湍流问题的主要方法。今后应在深入了解各种工程湍流特性的基础上,将问题进行简化,得出工程上可以接受的处理方法。Von. 卡尔曼的相似理论是解决工程湍流问题的典范。

3.2 湍流模式理论

湍流模式理论广泛地应用于环境工程、水利工程、空间工程、船舶工程,也可说应用于各种工程,而且取得了很大的成功,尤其是 $K-\epsilon$ 等两方程模型应用得更广泛。反之,湍流模式理论在工程中的广泛应用,又大大促进了湍流模式理论的发展。

就当前湍流模式理论的水平 and 工程应用的需要来看,湍流模式理论还必须大力发展才能满足需要。它应包括:

(1) 完善现有的湍流模型。当前应用得比较普遍的湍流模型,都存在一些基本弱点,它们缺少健全的理论基础和物理基础,有很强的经验性和局限性,具体说共同存在如下三个问题:①在引入封闭假定时,通常引入梯度型,也就是说没有考虑历史记忆效应,只决定于当时当地的平均量的梯度。这对弛豫时间很长的湍流来说,除少数流体质点的径迹线比较平直的情况可近似适用外,一般都不符合。②各种湍流模型中都包含有“常数”,实际上有些“常数”并不是真正的常数,而是随着情况不同而改变的变数。在确定这些所谓的常数时,是采用简单流态下实验所得的数据。因此将这些数据

作为常数用到复杂的流态中,计算的结果必然会出现较大的误差。

③现有的湍流模型,其适用范围尚需准确的了解,避免随意套用计算模型。

由于存在上述的一些问题,需针对不同的流动或具体的工程技术问题寻找合理的湍流模型,以便使计算结果更符合实际,或寻找适用范围更广的模型,提高模型的通用性。

(2) 研究新领域的湍流模式理论,如多相流、变密度流,有化学反应的湍流等复杂湍流的模式理论,以满足国民经济建设和国防建设的需要。

3.3 湍流测量

湍流测量包括湍流基础理论研究时的实验研究和工程实际中的湍流物理量的测量两方面。因而湍流测量是湍流理论发展和解决工程实际问题的基础。近 20 年来,无论在湍流结构实验研究和直接对工程湍流物理量的测量,都取得了重大进展,从而也推动了湍流实验技术的发展,包括观察、测量技术、数据和图像处理等。从测量技术讲,有探头测试技术、激光测试技术、超声测试技术、流场显示技术、流动显示和图像处理技术等。从测试范围来说,由单点测量发展到了多点测量,从一维发展到同一时刻记录下整个信息场的有关信息,提供流动的丰富的空间结构。

热线与激光测速主要用于流动结构中的时间序列统计量的测量,一般是固定点测量,用多点或扫描方法,扩展到空间分布。

流动显示技术的种类繁多,最近 20 多年来发展很迅速,大致可分为光学成像和示迹物成像两类。光学成像最常用的是阴影、纹影、干涉法,它们都是利用流场中折射率分布不均匀,使光折射,造成代表流场折射率(密度或浓度)分布的图像。示迹物成像,一般有很高的空间分辨率,能显示复杂流动的较细结构。早期的示迹物有烟风洞、色液法等,60、70 年代出现了氢气泡法和微烟丝法,大大降低了“历史效应”,提高了显示流动较细结构的能力。近年来发展的散斑法和 PIV (Particle Image Velocimetry) 法,具有定性观测

流动结构和定量测取流动参数空间分布的能力,是当前国际上新发展的技术。

直接测量工程湍流物理量的技术虽有一定的发展,如脉动壁压、浓度分布的测量和数据处理,其精度和速度都有较大的提高,但总的讲由于工程实际的复杂性,其测试技术仍提高得较慢。

对工程湍流研究而言,当前迫切需要解决的有以下几个问题:

(1) 工程模型试验的模型比尺问题

已有的工程模型比尺,如雷诺比尺,佛汝德数比尺等,都没有反应湍流结构的特征,因而实验的结果往往与原型观测值有差距,甚至趋势都相反,例如高速水流中的脉动壁压模型比尺,一直没有统一。从客观讲,工程中许多问题都与湍流结构特征有紧密关系,如挟沙水流中的泥沙起动,其起动的频率和机理与湍流近壁区猝发结构紧密相关,因而其模型律应尽可能地反映湍流特性。

(2) 工程湍流物理量的测量问题

工程湍流边界一般都较复杂,流态变化大,难于用计算得到湍流物理量,而这些湍流特征量往往对工程的设计又具有重要作用,如判断是否出现空化空蚀问题,该处的脉动压力的确定正确与否,将是具有关键性的。可惜当前直接测取工程湍流特征量的技术都很落后,远远无法满足工程的要求。因此,工程湍流物理量的测量问题,是迫切需要解决的问题。

3.4 湍流控制

湍流控制在国际上已成为湍流研究的重要课题,其主要内容是通过控制湍流结构达到工程需要的目的。边壁上加肋减阻是湍流控制的一个重要内容。它的作法是在边壁表面,沿流向开纵向小槽,呈锯齿形排列,利用这些小槽控制近壁区的湍流结构,减少阻力,实验结果表明:其表面阻力与平板光滑表面阻力比较,可减少4%~7%。Woush 和 Lindemann(1984)设计了一种湍流减阻最佳肋条,槽的深度和间距大致为30倍边壁单位(即 $\nu/u_\tau = 30$, ν 为流体运动粘性系数),比粘性附层中慢速条带的间距要小,这样设计

的肋条减阻对偏航角不敏感,偏航角可到 30° 。我们的试验也发现,慢速条带寿命的长短和数量的多少,与湍流的紊动强度密切相关,慢速条带寿命愈短,也就是猝发频率愈高,湍流的紊动强度愈大。我们进行了纵向加肋和横向加肋的水槽试验,发现纵向加肋可控制慢速条带的数量,慢速条带基本上出现在肋的顶部;横向加肋则控制慢速条带的长度,肋愈高,条带长度愈短,因此可通过控制条带结构以达到工程需要的目的。

聚合物减阻是湍流控制的另一课题。它利用粘弹性流的减阻效应,在工程技术上和节约能源方面已取得重要效果。

除了控制湍流结构而进行减阻外,在传质传热方面也进行了大量的湍流控制研究。

湍流控制的研究,在我国是值得大力开展的课题。

4 几点结论

根据上面的分析,可得出以下几点结论:(1)在我国发展工程湍流有较好的理论和应用基础,而且工程建设迫切需要工程湍流的发展。(2)工程湍流包括四方面的内容,即湍流理论在工程中的应用、湍流模型、湍流测量和湍流控制。(3)工程湍流的特征有:①湍流场中的平均量是主要研究对象;②所求的物理量的精度,以工程要求为标准;③在处理方法上更注意宏观控制;④实际问题的解决,更多地依靠实验或含有一定经验成分的模式理论。这些方面需要总结、完善和发展,使其成为直接服务于工程的湍流理论分支。

目 录

代序	(I)
第一章 湍流的基本概念	(1)
第一节 湍流的定义和特征	(2)
第二节 湍流的特征量	(7)
第三节 湍流的特征尺度	(19)
第四节 湍流分类	(21)
第五节 局部各向同性和局部相似性理论	(24)
第二章 湍流运动基本方程	(32)
第一节 Navier-Stokes 方程对湍流的有效性	(32)
第二节 雷诺平均运动方程与脉动运动方程	(35)
第三节 湍流能量关系	(37)
第四节 二维均匀湍流的能量方程及能量输运过程	(42)
第五节 湍流输运方程	(49)
第六节 涡量方程	(52)
第三章 湍流边界层	(54)
第一节 湍流边界层的基本概念	(54)
第二节 边界层方程	(60)
第三节 层流边界层	(72)
第四节 湍流边界层内的流速分布	(75)
第五节 溢流湍流边界层	(80)
第四章 湍流拟序结构	(91)
第一节 近壁区湍流拟序结构	(91)
第二节 外区的流动结构	(110)
第三节 湍流拟序结构的控制方程及统计参数	(117)
第四节 湍流拟序结构理论在工程中的应用	(121)
第五章 湍流半经验理论	(127)

第一节	Boussinesq 假定及涡体粘性系数	(127)
第二节	混合长理论	(129)
第三节	Von. Karman 相似性理论	(133)
第四节	二维定常均匀湍流流速分布公式 (湍流半经验理论应用之一)	(138)
第五节	自由湍流的计算(湍流半经验理论应用之二)	(142)
第六章	湍流模式理论	(158)
第一节	能量方程模型	(160)
第二节	$K-\epsilon$ 两方程模型	(162)
第三节	雷诺应力方程模型	(168)
第四节	标量通量 $u_i\bar{\gamma}$ 方程和 $\bar{\gamma}^2$ 方程模型	(173)
第五节	雷诺应力和标量通量代数方程模型	(176)
第六节	深度平均计算模型	(178)
第七节	双尺度二阶湍流模型	(182)
第八节	湍流的时间效应和边界效应	(183)
第七章	湍流实验和数据处理	(188)
第一节	流动显示技术	(188)
第二节	湍流测量技术	(193)
第三节	条件采样技术	(194)
第四节	条件平均和事件检测	(202)
第五节	模式识别	(212)
第六节	湍流实验的缩尺效应	(217)
第八章	脉动壁压	(222)
第一节	脉动压强的泊松方程	(222)
第二节	脉动壁压的成因	(224)
第三节	脉动壁压的特征值	(226)
第四节	脉动壁压的点压和面压关系	(232)
第五节	脉动壁压模型律	(238)
第九章	湍流的传热与传质	(242)
第一节	湍流中两个流体质点的相对扩散	(242)
第二节	湍流输运过程	(247)

第三节	湍流的传热与对流	(254)
第四节	异质粒子在湍流场中的跟随性问题	(255)
第五节	切变湍流中的弥散及弥散系数	(260)
第十章	湍流减阻	(269)
第一节	肋条减阻概念的形成	(269)
第二节	肋条表面的阻力测量	(273)
第三节	肋条对湍流结构和平均流动的影响	(278)
第四节	肋条与其它减阻技术联合减阻	(285)
第五节	肋条减阻应用的几点建议	(288)
附录	笛卡儿张量	(291)

第一章 湍流的基本概念

湍流(又称紊流)是自然界普遍存在的一种流体流动。研究其运动规律和结构特征,从而找到一种合理解决湍流问题的方法,对于改善生活环境,推动工农业建设的发展,以及开拓基础学科中的新领域都有非常重要的意义。例如水利工程中所遇到的湍流问题,主要有以下几方面:

1. 物质扩散

含沙水流、掺气水流及其它二相流,都要涉及到水流中的扩散问题;在这些二相流中,水流所以能携带物质(如泥沙或气泡等),主要是湍动水流中的涡体混杂,将泥沙或气泡从含量多的地方输运到含量少的地方;同时湍流的扩散作用,抵制泥沙的重力下沉或气泡的上浮作用,从而形成含沙水流或掺气水流等二相流。泥沙在水流中的含量分布,或掺气浓度分布,都决定于水流的湍动强度分布,所以,湍动扩散是物质扩散的前提。

2. 能量耗损

水流流动必然耗损能量,这是事物的必然规律。能量的耗损,主要是湍流中湍动频率高、尺度小的涡体混杂,通过粘性作用造成的,要深入认识能量损失的规律,必须深入研究湍流的内部结构,现有水力学中所介绍的沿程和局部能量损失系数,基本上都是实验得到的经验值,尚待进一步从理论上完善;不仅如此,人们根据需要,有时要减小能量损失,而在另外一些地方又要加大能量损失,随着人们对湍流认识的加深,一般都知道,要控制水流的能量损失程度,就需要控制湍流内部的湍动强度。例如,国内外为了降低动力消耗,正在进行减阻的研究,利用聚合物或加肋控制流体的湍动,降低能量损失,而有些工程中又要增加能量损失,最明显的

例子就是水工建筑物中的消能措施。

3. 脉动量的作用

湍流最基本的特征是“湍动”，即具有脉动运动，在处理一些工程中的问题时，往往需要考虑脉动流速、脉动压力等脉动量，例如解决高速水流中的气蚀、掺气和振动等问题，就必须考虑脉动壁压的振幅、频率和湍流边界层的发展。

其它工程技术中同样遇到大量类似的湍流问题。因此，作为从力学角度研究湍流运动的工程湍流，将成为一门重要学科分支。

第一节 湍流的定义和特征

一、湍流流态和定义

流体力学或水力学中已经介绍过，当流体流动的雷诺数大于下临界雷诺数 Re_c 时，流体运动为湍流运动。如管流的雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu} > Re_c = 2320$ ，明渠流 $Re = \frac{vR}{\nu} > Re_c = 500$ 时，水流为湍流运动。

层流中，流体质点沿其轨迹层次分明地向前运动，其轨迹是一些平滑的随时间变化较慢的曲线。湍流中流体质点的轨迹杂乱无章，互相交错，而且迅速地变化，流体微团（或称涡体）在顺流向运动的同时，还作横向、垂向和局部逆向运动，也与它周围的流体发生混掺。

图 1-1 为管流湍流的瞬时流动图；图 1-2 是湍流边界层的瞬

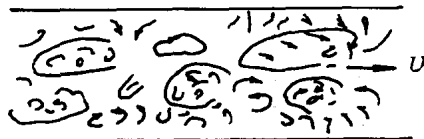


图 1-1 管流湍流瞬时流动图