

清华大学优秀博士学位论文丛书



tsinghua
theses

封闭槽道紊流 相干结构研究

陈槐 著 Chen Huai

Coherent Structures in Turbulent Channel Flows

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

封闭槽道紊流 相干结构研究

陈槐 著 Chen Huai

Coherent Structures in Turbulent Channel Flows



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本文运用旋转强度法研究了槽道中流体流动的紊流相干结构,推导给出了二维和三维旋转强度的理论解,分析了时均剪切对涡旋识别的影响以及 DNS 槽道紊流中二维和三维涡旋属性的差异,建立了可用于预测方腔内污染物滞留及泥沙淤积的唯象模型。

本书适合高校和科研院所水利、力学等专业的师生阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

封闭槽道紊流相干结构研究/陈槐著. —北京:清华大学出版社,2018
(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-47467-8

I. ①封… II. ①陈… III. ①水力学—管道—流体流动—研究 IV. ①TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 136012 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:7.25 字 数:122 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

产品编号:071576-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

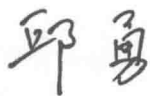
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

自然界和工程中绝大部分流动都是紊流,例如地球大气层的运动、海洋中的洋流和湾流、河流湖泊中的水流、燃烧过程中的热流等。相比分子布朗运动的输运作用,紊流对热量、物质及动量的输运能力要高三个量级以上,紊流的研究对流体力学基础理论和工程应用都具有重要价值。

早期的研究(1910—1940年)将紊流作为随机现象,认为瞬时速度由平均速度及随机脉动速度叠加而成,可以利用马尔可夫过程类的随机理论进行描述。随着实验及计算机技术的发展,1950年后,尤其是1990年后二维PIV(粒子图像测速)的广泛应用,通过一系列的试验,透过看似杂乱的紊流场可以发现,紊流中蕴含着非常丰富的有组织的结构(即相干结构)。迄今为止,相干结构主要分为以下几种类型:高低速条带、喷射和清扫组成的猝发现象、涡旋结构(流向涡、发夹涡及手杖涡等)、大尺度结构和超大尺度结构。随着研究的推进,逐步认为涡旋结构是产生以上几种相干结构类型的本质原因(如发夹涡群模型)。将紊流视为涡丝的缠绕体,是全频谱内各种尺度的涡旋叠加的结果,很多紊流现象都可以用涡动力学进行解释。

虽然在过渡流及人工激振流中比较容易识别涡旋结构,但在常规紊流中,由于涡旋结构被淹没在杂乱的紊动场中,较难捕捉及提取。针对如何提取涡旋结构,前人进行了大量的研究,主要方法可以归纳为三类:(1)建立在直观理解基础上的经典方法,如旋转的流线;(2)建立在各种理想模型上的模式匹配法,如Oseen涡模型法;(3)建立在局部速度梯度张量基础上的参数阈值法,如第二不变量、梯度矩阵的判别式及旋转强度。由于经典法和模式匹配法的局限性,参数阈值法应用更为广泛,其中又以旋转强度最为突出;旋转强度法具有明确的物理意义,能区分背景剪切,提取涡旋的旋转平面及旋转角速度,且涡结构可视化时对阈值的要求较低。

迄今为止,研究人员几乎普遍采用数值方法计算旋转强度,除个别文献提到倾斜平面内二维旋转强度的表达式外,几乎没有关于三维旋转强度显式理论解的报道,更没有与之相关的应用研究,仅凭数值解很难定量研究其

他因素对旋转强度及与之相关的涡旋结构识别的影响。有鉴于此,本论文推导得出旋转强度的理论解,应用于研究时均剪切对涡旋识别的影响,并分析了二维与三维旋转强度的联系及两者在提取涡旋结构属性方面的差异。

该论文的主要创新成果包括:

(1) 首次推导得出了旋转强度的理论解及用于表征涡旋方向的实特征向量的理论解;

(2) 首次得出时均流速梯度影响涡旋识别的作用项及影响条件(当时均剪切强度大于逆向涡旋中心涡量的一半时,将无法在瞬时流场中识别此涡旋);

(3) 首次得出了二维和三维旋转强度的理论关系,并得出槽道紊流中二维旋转强度及线变形率对三维旋转强度的贡献率;

(4) 首次同时对槽道紊流中三个切面内二维与三维涡旋的密度、半径及方向进行对比,分析两者的联系及差异。

这些创新成果,将有助于深入理解涡旋提取方法及涡旋三维结构形态。

泥沙的运动与水流紊动密切相关,紊流的许多研究成果都可以用来分析泥沙的运动。关于涡旋结构和泥沙输移的相互作用,前人已进行了不少研究,但主要停留在用涡旋假说去定性地解释物理现象,如发夹涡群引发紊动猝发(喷射和清扫),进而导致泥沙的起悬和输移。关于两者的定量研究很少,如涡旋结构与泥沙颗粒的相对空间位置分布,涡旋结构与泥沙浓度分布的定量关系等问题都尚未进行探索。利用已有的涡旋结构理论及分析结果,深入研究这些问题,对于突破传统的泥沙输移及扩散理论具有重要的意义,对提升现有泥沙数学模型的预测精度也有重要价值。

王兴奎

清华大学水利水电工程系

2016年4月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究的背景和意义	1
1.2 槽道紊流相干结构研究现状	3
1.2.1 壁面紊流相干结构	3
1.2.2 涡旋识别方法	5
1.2.3 槽道紊流的涡旋属性	7
1.3 本文研究内容	9
第 2 章 涡旋旋转强度的理论解及应用	11
2.1 旋转强度理论解	11
2.2 二维与三维旋转强度的分析	13
2.2.1 DNS 槽道数据简介	13
2.2.2 两者的统计值比较	15
2.2.3 两者的代数关系	18
2.2.4 两者比值与涡旋倾角的关系	20
2.3 时均剪切对涡识别的影响	24
2.3.1 二维槽道及 Oseen 涡案例	24
2.3.2 三维槽道及 Burgers 涡案例	25
2.3.3 三维 DNS 槽道紊流数据验证	27
2.4 小结	29
第 3 章 槽道紊流中涡旋的数量和尺度	31
3.1 术语定义和计算方法	31
3.1.1 术语定义	31
3.1.2 涡旋的密度和半径	32
3.2 涡旋的密度	37
3.2.1 二维涡旋密度	37
3.2.2 三维涡旋密度	38

3.3	涡旋的半径	39
3.3.1	二维涡旋半径	39
3.3.2	三维涡旋半径	41
3.4	小结	43
第4章	槽道紊流中涡旋的方向	45
4.1	术语定义和计算方法	45
4.2	涡旋的方向	47
4.2.1	倾角	51
4.2.2	投影角	52
4.2.3	倾角与投影角的 JPDF	55
4.3	Ω 形发夹涡模型	58
4.4	小结	60
第5章	方腔槽道紊流相干结构	61
5.1	实验系统和实验条件	61
5.2	多级窗口迭代的定网格图像变形算法	64
5.3	时均流场	67
5.4	大尺度环流	71
5.5	涡旋的空间分布	75
5.6	POD 分析	78
5.6.1	主要含能模态	79
5.6.2	含能模态的谱分析	80
5.7	方腔槽道紊流相干结构的唯象模型	82
5.8	小结	83
第6章	结论与展望	85
6.1	结论	85
6.2	创新点	87
6.3	展望	88
参考文献		89
名词索引		97
作者简介		101
致谢		103

第1章 引言

1.1 研究的背景和意义

自然界及工程中绝大部分的流动都是紊流,例如地球大气层的运动、海洋中的洋流和湾流、河流湖泊中的水流、燃烧过程中的热流等(Tennekes 和 Lumley, 1972)。生活中亦不乏各种紊流的例子,如天然气和自来水管线内的流动、绕过车辆或高楼的气流、通过动脉的血液流动等。教科书中一般用雷诺 1883 年的染色剂试验来说明层流、紊流间的差异,其实生活中我们也可以亲身体会到紊流。烟囱向外冒出的滚滚浓烟,使我们看到紊流;风吹电线发出的呜呜声(由紊流中的卡门涡街引起),使我们听到紊流;当飞机遇到紊流,机身发生的轻微摇摆及振动,使我们触摸到紊流。

相比分子布朗运动的输运,紊流对热量、物质及动量的输运能力是前者的三个量级以上(Holmes et al., 1998),所以紊流具有非常重要的作用。紊流使得大气及海洋中的气体和养分得以输运,使得地表温度得以均衡。比如,森林中的氧气与城市产生二氧化碳就是依靠紊流才得以快速交换。但紊流也会带来一些负面作用,如在管道或渠道内的流动、空气或水流中行驶的交通工具,有大约一半的能量被紊流耗散在了壁面附近(Jiménez 和 Kawahara, 2013)。研究紊流将对生活和工程产生重要的价值,如可以得出飞机及车辆上的作用力和热损耗、提供不同天气条件下火电站的合理选址、预测制作芯片的硅坯料中杂质的波动情况、揭示河流及海岸中泥沙的输移规律等(Holmes et al., 1998)。

早期的研究(1910—1940 年)将紊流作为随机现象,认为瞬时速度由平均速度及随机脉动速度叠加而成,可以利用马尔可夫过程类的随机理论进行描述;在此期间获得了许多显著的成果,如著名的 Kolmogorov 局部各向同性紊流的统计理论(Alfonsi, 2006)。

1950 年后,尤其是 1990 年后二维粒子图像测速(PIV)广泛使用,一系列的试验发现,紊流是有组织的,但这些有组织(相干结构)被淹没在杂乱的紊动流场中。例如,紊流流场中某些空间或时间点之间的流速存在

极大的相关性,人们很容易联想到,这是由那些隐藏在看似随机紊动的流场中有组织的结构所引起(Bernard 和 Wallace,2002)。

流速是表征紊流最基本的物理参数,也是推求其他参数(如速度梯度、涡量、环量等)和提取相干结构的基础。流速测量一般可以分为以下几种:压力测速、热力测速及粒子测速(Tropea et al.,2007)。压力测速依据伯努利方程中压力水头和流速的关系进行测速,如毕托管,但其为插入式仪器,会干扰局部流场。热力测速依据热敏传感器的电阻与温度间的相关关系进行测速,如热线风速仪,其在风速测量方面具有广泛的应用,但由于热线难以承受液体对它施加的作用力,故应用热膜流速仪测量水流速度。粒子测速利用与流体介质跟随性很好且具有良好散光性能的示踪粒子进行测速,如激光多普勒测速仪(LDA,LDV)、粒子图像测速仪、多普勒全场测速仪(DGV)及激光输运测速仪(LTV),它们不仅能获得单点的流速脉动,而且能提供一定时间及空间分辨率下的平面流场。LDV 适用于测量液体流速,而 PIV 广泛适用于液体及气体的流速测量。值得一提的是,虽然现在有测量三维流场的 PIV,如全息和快速平扫三维 PIV,但这些方法都价格昂贵且较难实施(Bernard 和 Wallace,2002)。

随着计算机科学技术的发展,直到 20 世纪 80 年代,求解紊流条件下的 Navier-Stokes(N-S)方程才成为可能。紊流数值模拟主要分为以下三种,分别为雷诺平均的 N-S 方程(RANS)、大涡模拟(LES)和直接数值模拟(DNS)(Robinson,1991)。RANS 将 N-S 方程进行时均化,采用相关矩或涡模型进行封闭,可以求解高雷诺数下的时均流场,但无法获得对应的紊动流场。LES 假设小尺度结构在紊流中具有各向同性的属性,并不直接计算,而是通过模型求解;而与流体参数及几何边界具有极强的相关性,采用 N-S 方程进行三维求解。DNS 不凭借任何经验或理论的紊流模型,而是直接对 N-S 方程进行数值求解。故 DNS 比 LES 具有更高的分辨率,DNS 的三维速度及压力场为提取紊流的小尺度结构及统计参数提供了充足的数据,但 DNS 还不能求解工程设计中高雷诺数下的流动,因为这需要极大的内存并且无法使用对称边界条件下的加速算法(Bernard 和 Wallace,2002)。

从最初通过随机变量和定性流动显示(如染色剂及烟线)推测相干结构,到新试验设备及数值模拟技术出现后,采用高时间及空间分辨率的二维及三维流场数据定量研究相干结构,从某种程度上可以说,紊流的研究内容(尺度、运动及动力特性)和研究手段是随着数据采集设备、数字信号处理和计算机的发展所不断推进的。

无论是流体流经各种自然和人造边界,或是各种物质、生物及交通工具在流体中运动,流体总是和边界形影不离,所以常见的紊流总与边界(如壁面)相关。壁面对紊流具有极其重要的影响,表现为:壁面会衰减垂直于壁面方向的流速分量,使紊流得以各向异性;壁面剪切产生涡量,涡量向下游扩散和增强的传输过程中,使紊流得以不断产生(Bredberg, 2000)。

固壁边界对紊流存在深远的影响,壁面紊流内相干结构的产生和演化将有可能阐明紊流动能耗散至热能的机理,研究者认为它是理解流体物理本质和进行紊流模拟并控制紊流现象(质量及热量输移、掺混、燃烧、阻力及噪声)的关键(Bonnet, 1996)。三种典型的壁面紊流分别为无压力梯度的平板边界层流,充分发展的槽道及管道流。虽然边界条件不同,但壁面紊流近壁区内黏性占主导地位,按黏性尺度归一化后的统计参数(如时均流速、紊动强度等)都基本相互吻合。Marusic 和 Adrian(2013)认为一般将内外区分为以下四层,分别为黏滞底层($y^+ < 5$)、缓冲层($5 < y^+ < 30$)、对数区($30 < y^+ < 0.15Re_\tau$)及尾流区($y^+ > 0.15Re_\tau$),其中 y^+ 为用内尺度(摩阻流速及运动黏滞系数)归一化的壁面距离, Re_τ 为摩阻雷诺数。黏滞底层中速度分布呈线性规律,缓冲层中黏性占主导但同时也是紊动的最高产量区,对数区是内外区的交叠部分,而外区中黏性作用可以忽略不计。槽道流由于具有最为简单的边界条件,且最易于进行实验及数值模拟,得到了广泛的研究。

1.2 槽道紊流相干结构研究现状

1.2.1 壁面紊流相干结构

相干结构(coherent structure)又被称为有组织的运动(organised motion)或相关漩涡(coherent eddy)(Bonnet, 1996)。正如 Marusic 和 Adrian(2013)所说,“结构”和“运动”这两个词本身就暗示着,我们对这种模式所知甚少,所以只能用一些粗略的词语去形容。到目前为止,“相干结构”还没有精确的定义,已有文献中的定义如下:Townsend(1976)定义相干结构为存在局部涡量分布且形式相对简单的一种流动模式;Hussain(1986)认为相干结构是在其空间范围内存在瞬时相位相关的紧密关联的流团;Robinson(1991)认为相干结构是流场中这样一类区域,至少有一个变量(如流速、密度、温度等)与其自身或者其他变量间在远大于流动最小尺度的时间和空间间隔内存在极大的相关性;Bernard 和 Wallace(2002)认为相干结构是具有相当程度的有组织的和重复性的流体单元;Marusic 和 Adrian

(2013)认为相干结构首先必须存在旋转运动,同时其在时间及空间域内广泛存在,且其生存周期大于涡旋(vortex)旋转一周的时间。

壁面紊流内的相干结构主要有以下几种类型:高低速条带、喷射和清扫组成的猝发现象、涡旋结构(流向涡、发夹涡、手杖涡、发夹涡群)、大尺度结构和超大尺度结构。Kline et al. (1967)使用氢气泡显示出低速条带结构,并发现其平均间距约为 100^+ ; Bogard 和 Tiderman (1987)认为喷射事件可能源于单根低速条带的不稳定性,且先发生的喷射事件强度要远高于其后的喷射事件,猝发(喷射和清扫循环过程)是导致紊动应力的主要来源; Theodorsen (1952)提出不可压紊流边界层中充满着附着在壁面的发夹状的涡结构; Blackwelder 和 Eckelmann (1979)及 Robinson (1991)发现实验及数值模拟中存在着很多非对称的单边发夹涡(即手杖涡和准流向涡); Adrian et al. (2000)提出发夹涡群模型,并利用该模型解释了其他几种相干结构,如发夹涡两腿间斜向上运动的流体会导致喷射事件,而发夹涡头部斜向下的流体会导致清扫事件,发夹涡群在空间的排列可能产生大尺度结构; Kim 和 Adrian (1999)及 Del Alamo 和 Jimenez (2003)利用数值模拟从一维、二维能谱中发现了大尺度、超大尺度结构。

由于二维 PIV 的广泛使用,相干结构中的涡旋结构受到了广泛的关注。紊流被视为是涡丝的缠绕体,是全频谱内各种尺度的涡旋叠加的结果,很多紊流现象都可以用涡动力学进行解释(Tennekes 和 Lumley, 1972)。涡旋常被视为是紊流的肌腱、肌肉和声音(Küchemann, 1965; Schram, 2003)。Robinson (1991)认为涡旋结构处于紊流研究的核心位置,有以下几点原因:(1)涡旋具有越过时均流速梯度输运质量及动量的能力;(2)涡旋几乎在任何环境中都能持续存在;(3)涡旋本身具有的高低压分布能导致压力脉动,从而诱导周围的流体。Chakraborty et al. (2005)认为涡旋之所以受到流体动力学界的推崇,是因为它使研究者仅利用毕奥-萨法尔定理及涡旋动力学就能理解“涡如何诱导产生流场”。

自从 Theodorsen 于 1952 年进行了开创性的工作,提出不可压紊流边界层中充满着附着在壁面的发夹状的涡结构后,壁面紊流中涡旋结构的重要性就得到了认可。这些结构对低动量流体的输运及雷诺应力的产生起着主导作用。Townsend (1976)发现紊流边界层等应力区的紊动是由壁面附着涡所引起的。Perry et al. (1986)认为,边界层是由 Λ 形状的发夹涡森林所组成,通过对几何尺寸分级的涡群应用毕奥-萨法尔定理进行计算,得出的时均流速剖面、雷诺应力、紊动强度及能谱结果与实际情况吻合良好。