

MODERN MATHEMATICS AND MECHANICS

现代

数学和力学

MMM-IX

戴世强 周哲玮 程昌钧 主编
郭兴明 卢东强

上海大学出版社

现代数学和力学

MMM-IX

戴世强 周哲玮 程昌钧 主编
郭兴明 卢东强

上海大学出版社

·上海·

内 容 简 介

本书是中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会的系列会议——第九届全国现代数学和力学学术会议(MMM-IX会议)的论文集,收录了近代力学、力学中的近代数学方法以及力学史和方法论的论文138篇,其中邀请报告29篇,固体力学类文章42篇,一般力学类(动力学与控制)文章22篇,流体力学类文章30篇,应用数学及力学中的数学方法类文章15篇.内容涉及理论和应用力学以及力学中的数学方法等几乎所有领域的若干前沿问题.

论文集反映了我国力学和力学中的数学方法研究的近况和水平,是相关学科的研究者了解我国在该领域的最新进展而必读的重要资料.

本书读者范围:理工科大学生、研究生、教师、科研工作者和工程技术人员.

图书在版编目(CIP)数据

现代数学和力学(MMM-IX): 第九届全国现代数学和力学(MMM-IX)会议论文集 戴世强,周哲玮,程昌钧,郭兴明,卢东强主编. —上海:上海大学出版社, 2004.10

ISBN 7-81058-776-5

I. 现... II. ①戴... ②周... ③程... ④郭...
⑤卢... III. ①数学—学术会议—文集 ②力学—学术会议—文集 IV. ①O1-53 ②O3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 098967 号

责任编辑:王悦生 曾 卓 俞 瑶 孙定一

封面设计:谷夫平面设计工作室

现代数学和力学(MMM-IX)

戴世强 周哲玮 程昌钧 郭兴明 卢东强 主编

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200436)

(E-mail: sdcbs@citiz.net 发行热线 66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海市印刷七厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 41.25 字数 1 068 千

2004年10月第1版 2004年10月第1次印刷

印数:1~600

ISBN 7-81058-776-5/O·027 定价:100.00元

第九届全国现代数学和力学学术会议

学术委员会

主 任	戴世强						
副主任	谢和平	何国威	郑泉水	黄筑平			
委 员	程昌钧	郭兴明	周哲玮	梅凤翔	李家春	刘宇陆	缪国平
	张善元	黄永念	符 松	张若京	王铁军	陈树辉	顾国庆
	宁建国	郑晓静	霍永忠	彭向和	张 伟	尚新春	刘 桦
	唐少强	陈少华	顾元宪	魏德敏	杨 骁	刘曾荣	陈立群
	张俊乾	李 星	田振夫				
秘 书	卢东强						

第九届全国现代数学和力学学术会议

组织委员会

主 任	周哲玮						
副主任	刘宇陆	郭兴明					
委 员	张俊乾	董力耘	卢志明	麦穗一	王 端	孙 畅	钟汉明
秘 书	卢志明						

序 言

1986年夏天,在北京大学召开了第一届全国现代数学和力学学术会议(MMM-I会议),迄今已经走过了18个年头.在此期间,我国的应用数学和力学事业取得了长足的进步和发展,我们这个MMM系列会议见证和记录了这一进程.系列会议的组织者——中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会,在钱伟长院士的率领下,组织举办了四届国际非线性力学会议和八届MMM会议,团结了数以千计的应用数学和力学界人士,学术会议的与会者队伍不断壮大,一些优秀的学术成果得以广泛深入的交流,大批杰出的人才脱颖而出,从而为祖国力学事业的兴旺发达尽了微薄之力.

今年国庆节期间,第九届全国现代数学和力学学术会议将在上海大学召开,与历届会议一样,本届会议的宗旨仍是促进现代数学在力学中的应用,发展力学中的数学方法,以推进现代力学科学的发展.我们将检阅和交流在MMM-VIII会议和第四届国际非线性力学会议之后我国现代数学和力学领域涌现的新成果.本届会议依然得到了我国应用数学和力学界的广泛支持,200余位作者给我们发来了175篇稿件,经过筛选,录用了138篇,编成了这本文集.

编完这本文集,掩卷沉思:这本新文集有什么特点?吹来了什么新风?我们认为至少有如下几个特色:

1. “推陈出新”.文集所收录的论文反映了新世纪力学发展的新动向.这就是,与国民经济建设紧密结合,以现代力学和现代数学为武器,深入探索各方面涌现的重大的复杂问题;力学进入更为广阔的应用领域,与其他学科交叉的趋势更为明显.本文集所涉猎的内容,遍及“上天、入地、下海”的各个门类,牵涉到机械、化工、环保、能源、生物医学、神经科学等领域;远至火星探测、大气环流,近至日常交通、污染治理;大至行星尺度,小至纳米尺度;分岔、混沌、孤立子、复杂性分析等等,进入了各个力学分支,已成为寻常事情.总而言之,从这本文集可以看出,现代力学正与现代数学、现代科技更为密切地交缘,正在向前所未有的广度和深度进军.

2. “会当临绝顶,一览众山小”.文集体现了很高的学术水平.与往届一样,本届会议邀约了近30个精彩纷呈的大会报告,其内容大多是报告者多年来的心血结晶,代表了所涉及的力学分支中的最高水平.总体看来,文集的作者们已经不仅把注意力专注于机械运动研究,许多论文涉及力-热-电-磁的多场耦合,深入到微观、细观领地,计及了更多的复杂因素.统计下来,固体力学论文中,约有三分之一讨论了热、电、磁等效应;流体力学的许多论文论及百年难题——湍流,呈献给大家一批令人欣喜的最新进展和最新思路,特别在层流-湍流转捩、湍流结构的研究方面有新的突破;一般力学的论文已涉及非线性动力学方法的实用化,推出一些新观念,并深入到神经科学等领域.

3. “江山代有才人出”.文集表明,年轻一代数学力学工作者正在茁壮成长,一批年轻有为的学科带头人已经活跃在现代数学和力学的前沿领域.本届会议的大会报告中,有超过60%的报告人是近年来成长起来的优秀青年学者,他们大多有国家杰出青年基金或重大、重点项目的资助,其思想之敏锐深邃,治学之踏实严谨,成果之非同凡响,令人击节赞赏.有理由相信,只要他们戒骄戒躁,继续求真务实,一定能够在现代数学和力学领域创造出更为优异的业绩,老

一辈应用数学和力学家开创的事业肯定后继有人。

4. “海纳百川”。文集的内容有新的扩充。钱伟长院士提倡：应用力学的研究工作要做到理论分析与实验研究紧密结合，本届会议中，实验力学的稿件有大幅度的增加，其中不乏真知灼见；还有，这本文集中包含了几篇有关力学史和方法论的力作，探讨了应用力学研究与教学中的基本方法，总结了我国前辈应用数学和力学家的治学理念，提出了一些崭新的论点，对广大应用数学和力学工作者来说，会有振聋发聩的启迪作用。

如同往届，本届会议得到了方方面面的积极支持。我们收到了国内（包括香港地区）50余个单位发来的稿件，许多老专家一如既往地给予种种支持，其中年逾七旬的周恒、钟万勰、刘高联院士送来了高水平的论文；很多中青年学者为会议送来了他们最好的新成果；中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会的部分成员认真地审阅了所有来稿；上海大学、宁夏大学给会议以慷慨的资助；上海大学出版社为出版本文集付出了辛勤的劳动；上海市应用数学和力学研究所承办会议的人员，特别是卢志明、麦穗一、王端等同志做了很多细致的工作。在这里，谨向上述单位和人士致以深切的感谢！

最后，特别要提到的是，会议期间正逢上海市应用数学和力学研究所的20周年所庆，我们祝愿这个研究所乘风破浪，继续前进，在今后的日子里取得更为令人瞩目的成就。而会议结束之时，正值上海大学校长、上海市应用数学和力学研究所所长钱伟长院士92寿辰，让我们在一起，向这位为我国的科学、教育事业贡献毕生精力的老科学家、老教育家表示我们崇高的敬意和美好的祝愿，祝愿老先生福体康泰，精神矍铄，继续率领我们披荆斩棘，勇攀新的高峰！

编者谨识

2004年8月

目 录

序言.....	(1)
---------	-------

邀 请 报 告

层流-湍流转捩的突变过程的内在机理	罗纪生 王新军 周 恒 (3)
应用力学体系改革——辛对偶方法.....	钟万勰 (9)
旋成面叶栅气动力学反命题解的惟一性定理.....	刘高联 (20)
论经典连续统力学基本定律和均衡方程体系.....	戴天民 (23)
分层湍流和旋转湍流的大涡模拟研究.....	董宇红 刘难生 陆夕云 (34)
湍流中相干结构的 POD 分析	符 松 唐 敏 何 江 (42)
关于非线性与复杂性.....	傅新楚 (52)
复杂液体中旋转颗粒的电荷弛豫理论.....	顾国庆 余建华 (57)
软弹性固体表面吸附分子的相互作用.....	何陵辉 (63)
非线性时滞系统的动力学与控制.....	胡海岩 王在华 王怀磊 (67)
有限变形热-粘弹性本构理论的分子网络模型	黄筑平 王建祥 程荷兰 (75)
马氏体相变的形变与能量及其极小化问题.....	霍永忠 (81)
应用力学方法初探.....	嵇 醒 仲 政 戴 瑛 (88)
杂交反演分析方法在复合材料界面力学参数识别中的应用	亢一澜 林雪慧 王燕群 (97)
铁电体的本构关系.....	匡震邦 (103)
Numerical Solution for the Bonded Problem of Two Anisotropic Half Planes	Li Xing (111)
湍流逆梯度运输的几个问题.....	刘宇陆 卢志明 邱 翔 (117)
非线性神经动力学的研究进展.....	陆启韶 (127)
功能梯度圆板的轴对称弯曲行为和稳定性研究.....	马连生 王铁军 (132)
世界范围的军事变革与海军舰艇设计的新趋势.....	缪国平 (140)
昆虫飞行的力学机理.....	孙 茂 (146)
Direct Numerical Simulation of Particulate Flows	Decheng WAN Stefan TUREK (153)
经典力学发展的两条路径.....	武际可 (160)
弹塑性系统的异常动力行为.....	杨桂通 (164)
Micromechanical Modeling of Multi-Phase Composites	Zhang Jinmin (170)
在热/机械循环载荷作用下金属基复合材料多纤维断裂问题	张俊乾 张万平 吴 坚 (181)
碳纳米管的力学和器件研究.....	郑泉水 王立峰 徐志平 刘 哲 蒋 庆 (189)
电磁固体材料和结构的多场耦合行为.....	郑晓静 (195)

功能梯度热释电材料矩形板的精确分析·····	仲 政	尚尔涛	(202)
------------------------	-----	-----	-------

固体力学类论文

考虑轴向变形的空心圆柱自由振动·····	丁皓江	王惠明	(211)
平衡单元法及其在纳米薄膜材料分析中的应用·····	丁巨岳	冯 伟	(215)
弹性基体上轴对称压电陶瓷片的力电耦合模型·····	段辉淑	张俊乾	(218)
非线性铁磁矩形板的磁弹塑性力学行为·····	高原文	周又和	郑晓静 (221)
Toward a Mathematical Justification of Linear "Intrinsic" Shell Equations ·····	Liliana GRATIE		(225)
温度对圆柱体中的孔洞化不稳定性的影响·····	郝玖锋	宁建国	黄筑平 (229)
Uniformly Valid Asymptotic Solutions of the Nonlinear Bending for Orthotropic Rectangular Thin Plate of the Opposite Sides Clamped and Others Free ·····	黄家寅		(234)
纤维增强复合材料的非线性本构理论·····	黄争鸣		(238)
水箱减震结构的随机响应分析及参数研究·····	雷胜梅	殷祥超	徐 杰 (241)
地层破裂压力计算公式研究·····	李培超	宋振云	孔祥言 (245)
两种沸石分子筛单晶的力学性能的直接测定·····	林 江	树学锋	(249)
坚硬顶板系统力学分析及运动方程建立的能量余法·····	刘传孝		(253)
Kirchhoff 弹性杆的准坐标表达 ·····	刘延柱	薛 纭	(259)
脆性岩石中压实带的热塑性演化发展·····	鲁晓兵	王淑云	王义华 崔 鹏 (263)
分散度对向列型液晶 Freedericksz 转变的效应 ·····	陆章基	胡 挺	孙张凤 刘文娟 (267)
胆甾型液晶磁场问题中的分散度效应·····	陆章基	郑广平	(270)
非线性弹性动力学的非传统 Hamilton 型变分原理 ·····	罗 恩	姜凤华	(274)
材料比例定律的内涵及功能的扩展·····	罗培林	张志平	佟福山 (276)
双壁碳纳米管的屈曲分析·····	钱 浩	徐凯宇	(281)
高温下混凝土的水力、热及变形耦合数学模型 ·····	沈新普	沈国晓	(284)
非线性损伤粘弹性薄板的动力学行为分析·····	盛冬发	程昌钧	(288)
非保守系统的两类 Reissner 型广义拟变分原理研究 ·····	宋海燕	梁立孚	马 月 (291)
由细观参数预测钨合金的宏观抗拉强度·····	宋顺成	刘筱玲	史洪刚 尚福军 (295)
A Two-Dimensional Theory for Analysis of Surface Acoustic Waves in Finite Elastic Plates ·····	王 骥	林静波	(298)
关于小波在力学计算中应用的几个例子·····	王振亭	郑晓静	周又和 (302)
颗粒增强复合材料中波的有效传播常数·····	魏培君		(306)
三维弹塑性流体力学数值计算的高精度新自由面格式·····	吴开腾	宁建国	(310)
Winkler 地基上正交各向异性板的无网格法分析 ·····	熊渊博	龙述尧	(314)
超细长弹性杆平衡问题的 Jourdain 原理 ·····	薛 纭	刘延柱	陈立群 (319)
非局部热平衡饱和多孔介质的动力学数学模型和变分原理·····	杨 骁	刘雪梅	(323)
压电材料圆环问题的一个精确解·····	杨昌锦	李尧臣	(327)
粘弹性运动梁受迫振动幅频响应的稳定性·····	杨晓东	陈立群	(332)

横观各向同性材料中三维裂纹的超奇异积分方程方法·····	余荷根	陈梦成	(335)
考虑转动梯度的压电本构理论和微极理论与尺度效应 ·····	余寿文	王刚峰	(340)
生物探针纳米力学行为的连续介质力学模型·····	张能辉	郑 晋	(343)
分子力学方法在碳纳米管力学解析研究中的应用·····	张田忠	郭兴明	(346)
多芯片整体封装器件结构翘曲的数值分析·····	张伟伟	郑百林	(350)
涡动条件下预弯钻柱的失效分析·····	张小柯	丁巨岳	(354)
大挠度问题中的无网格伽辽金算法·····	赵光明	宋顺成	(359)
圆内平面弹性问题(位移法)的自然边界元方法·····	赵慧明	董正筑	(362)
一类超弹性材料杆方程的奇异行波解·····	赵晓华	戴晖辉	(366)
横向强脉冲磁场下四边简支矩形导电薄板力学分析·····	朱林利	郑晓静	(369)

一般力学(动力学与控制)类论文

有慢变切向力的广义单摆·····	蔡建平	李怡平	(375)
基于微分方程不变性原理的混沌同步控制及应用·····	陈付广	黄德斌	(378)
八维非线性动力系统三阶规范形的计算·····	陈 祎	张 伟	(380)
一例边界周期振荡的台球模型及其类耗散性·····	戴 俊	傅怀梁	(383)
类摆系统的极限轨道分析·····	黄永念	祝成民	(385)
具有可变耦合强度的大规模神经元群活动的演化模型·····	焦贤发	王如彬	(388)
两端固定输流管道在脉动内流作用下的稳定性和参数共振 ·····	金基铎	邹光胜	(392)
神经自发放电的周期、混沌节律和节律分岔序列 ·····	李 莉	古华光	(396)
系数无界的 Lurie 间接控制系统的绝对稳定性 ·····	廖福成	刘贺平	(401)
多中心网络的研究·····	刘曾荣	董程栋	(405)
基于混沌科学的压实理论与实践·····		龙运佳	(408)
火星探测器发射中的月球近旁转向加速方法·····	王志刚	卢征仁	(411)
机电网耦合系统失稳振荡的分岔研究·····	邱 宇	段昊昱	(415)
几何非线性粘弹性柱纵横向运动中的混沌运动·····	任九生	程昌钧	(420)
四自由度传动带系统非线性动力学的研究·····	宋春枝	张 伟	(423)
固有频率密集结构的主动控制·····	孙红灵	张培强	(426)
Experiment on Feedback Control of Rotating Disk Flutter ·····	Wang Xingzhe	Huang Xiaoyang	(430)
Physical Meaning of Stable and Unstable Solutions of Rotating Tri-Axial Body ·····	Wang Wenjun(王文均)		(434)
动态规划在梁横向振动反问题中的应用·····	谢永亮	兰泽武	(440)
两个模态高频耦合 Ginzburg-Landau 方程的同步化 ·····	徐振源	胡爱花	(445)
粘弹性传动带的多脉冲轨道和混沌动力学分析·····	姚明辉	张 伟	(447)
主动式电磁轴承非线性动力学理论研究及应用·····	展雪萍	张 伟	(450)

流体力学类论文

广州市全城交通污染宏观仿真模拟研究.....	包 芸	陈胜祥	(455)
上海地铁通道行人流的实测和数值模拟.....	陈 然 郁文剑	董力耘 戴世强	(460)
近自由表面水平椭圆柱尾流流场的 PIV 测量及 POD 分析	代 钦	李尚峻	(464)
自由面槽道热分层剪切湍流的直接数值模拟.....	董宇红	陆夕云	(469)
波流相互作用下副高环流平衡态的缓变与突变.....	董兆俊 张 韧	何金海	(472)
Two Novel Lattice Traffic Models with ITS Consideration	葛红霞 戴世强 董力耘 薛 郁		(475)
两相旋拧射流的线性稳定性及表面张力的影响.....	胡国辉		(480)
基于密度、速度与温度为原始变量的流体力学预处理方法	黄典贵		(484)
用分数微分对流-弥散方程模拟吸附性溶质的运移	黄权中 黄冠华		(486)
垂直激励圆柱形容器中的非线性表面波的不稳定性	管永军 鄂学全 冯六林		(491)
A Novel Microscopic Particle Image Velocimetry System	李 宋 吴文权		(497)
湍流中的三种结构函数.....	刘 薇 姜 楠		(499)
Dispersion Relation for Steady Viscous Ship Waves	卢东强		(504)
Free-Surface Waves due to an Oscillating Stokeslet	卢东强		(506)
Generation of Lump Solitons by a Bottom Topography in a Surface-Tension-Dominated Flow	卢志明		(510)
Pipe Flow Traffic Model	欧忠辉 吴 正 陶明德		(516)
均匀剪切湍流的谱动力方程和三阶结构函数.....	钱 俭		(520)
废气再循环炉内气体成分浓度新的检测方法的研究	沈远胜 刘永杰 李本文 王德永		(524)
用“量才录用”和“量体裁衣”的原则来选用流速测量仪器.....	盛森芝 刘宗彦		(527)
变形多孔介质不定常渗流的摄动解.....	宋付权		(531)
研究流场中运动着的椭圆柱与振动的圆柱之间的相互作用.....	孙 仁		(535)
应用耦合映象格子模型模拟 Rayleigh-Bénard 对流中的结构形态	王 亮 章光华 符 松		(538)
加热平板下湍流边界层的逆转捩.....	李轶明 颜大椿		(544)
螺旋型旋风分离器二维两相流场的数值模拟.....	易 林 王 磊 王灿星		(549)
两层流体中水波与刚性垂直薄板的相互作用	尤云祥 缪国平 程建生 朱仁传		(553)
颗粒对气固两相射流中流体特性影响的数值研究.....	张 燕 樊靖郁 王道增		(559)
关于湍流大尺度相干结构的起源.....	章光华 符 松 王明皓		(562)
Spatial Decay Estimates in Time-Dependent Stokes Flow of an Incompressible Viscous Fluid	钟柳强 林长好		(568)
机场道面热流识别有限元反问题.....	庄惠平 于 康 谢永亮 李艳丽		(574)
湍流层次结构模型的几个理论问题.....	苏卫东		(578)

应用数学类论文

各向异性的 Ginzburg-Laudan 泛函极小元的渐近分析与奇点分布	包立平	(585)
Well-Posedness of Velocity Equation	Chen Min Chen Dengyuan	(589)
一类三阶半线性方程边值问题的奇摄动	陈育森 黄蔚章	(593)
广义函数的几个极限公式及应用	董正筑 李顺才 余德浩	(596)
使用费变化下的交通系统成本演化方程	冯苏苇	(600)
Two Efficient Determinant Formulas of Function-Valued Padé Approximation for Solution of Fredholm Integral Equations	Gu Chuanqing Wu Beibei Pan Baozhen	(605)
随机扰动对拟小波方法求解对流扩散方程的影响	何文平 封国林 董文杰 李建平	(609)
非上三角型无穷维 Hamilton 算子的连续谱	黄俊杰 阿拉坦仓	(611)
用 Lie-Bäcklund 对称方法求非线性扰动方程的解	牛晓花 潘祖梁	(614)
双旋度 Poisson 方程零阶积分表述的数值研究	覃新川 杨本洛	(618)
一类具有转点的奇摄动二阶椭圆方程的边值问题	魏雪蕊 包立平	(623)
On the Stability of the Mann Iterative Process with Random Errors for the Solution of Equation with Nonlinear Strongly-Accretive Operator	Xu Yuguang Liu Xibiao Zhang Huili	(627)
BBM 方程一类精确解的确定	张宝善	(630)
连续和离散非线性系统的变量分离方法	张 隽 沈守枫 潘祖梁	(633)
哥廷根应用力学学派及其对我国近代力学发展的影响	冯秀芳 戴世强	(637)
作者索引		(643)

邀请报告

层流-湍流转捩的突变过程的内在机理*

罗纪生 王新军 周 恒**

(天津大学力学系,南开大学天津大学刘辉应用数学中心)

摘 要 层流向湍流的转捩是一个古老却依旧没能解决的问题. 有关转捩的成果大都集中在以下几个方面: (1) 扰动演化的线性与非线性理论; (2) 感受性问题; (3) 对转捩的实用性预测. 尽管人们对转捩的研究付出了巨大的努力, 但是有一个重要的问题并没有被涉及到, 这就是最终导致转捩的突发(breakdown)过程的内在机理是什么? 传统的看法是, 转捩开始于扰动幅值的放大, 并且随着扰动幅值的增长, 非线性作用将导致高波数的谐波, 使流动变得越来越复杂, 最终变成湍流. 这一过程似乎非常清楚, 但漏掉了一个环节: 转捩的突发过程中究竟发生了什么? 下面我们将用直接数值模拟结果分析说明, 在转捩突发过程中, 平均流剖面的稳定性特征起到了关键性的作用.

关键词 层流-湍流转捩, 突变, 稳定性, 平均流剖面

首先, 我们列出一些有关湍流和转捩的公认的事实, 然后给出一些有关槽道流转捩数值模拟的分析结果, 这一结果将揭示转捩突发过程的关键机理.

1 基于一些公认事实的讨论

平均流剖面的变化在转捩中起关键作用的一个浅显的解释是, 层流与湍流具有截然不同的平均流剖面. 但是这并没有给出转捩突然发生的内在机理.

从流动稳定性理论的观点来看, 当雷诺数足够大时, 层流的平均流剖面具有不稳定的特征解, 它们在流动法向分布于整个区域, 即具有整体的特性.

与层流相反, 湍流平均速度剖面不具有整体的不稳定特征解. 从 20 世纪 60 年代发现相干结构以来, 经过 30 多年的研究, 人们已普遍认识到, 对平板槽道流和边界层流等带有固壁边界的湍流流动, 存在两种不同的流动区域, 即壁面区与边界层外区或槽道流核心区. 前者仅占整体流动区域的一小部分, 而后者通常占据整体流动区域的 90% 以上. Tsujimoto 与 Miyake^[1]的研究结果表明, 虽然没有外区扰动, 湍流将不能维持, 但壁面区内湍流具有自身的动力学特性, 例如湍流强度、雷诺应力分布等都主要依赖这一动力学特性, 而不依赖于外区激励的性质. 内区的动力学的特征是产生相干结构的根源, 而相干结构又从平均流中吸收能量, 并通过所谓的喷发和扫掠与边界层外区相互作用. 根据这一事实, 周恒^[2~5]与他的同事提出了近壁区产生相干结构的动力学模型.

湍流平均速度剖面的一个明显的特征是法向的速度梯度在壁面区很大, 而在边界层外

* 国家自然科学基金委(项目批准号: 10232020)及南开大学天津大学刘徽应用数学中心资助项目

** 通讯作者

区或槽道流核心区却非常小. 这两个区域中间有一个缓冲区, 在这里速度梯度从很陡变得平缓. 由于速度梯度过渡得太快, 两个性质截然不同区域将导致不稳定波的整体特性的破损. 如周恒等所述, 相干结构本质上是由于流动的某种形式的不稳定性产生的, 他们用流体动力学不稳定模式描绘了相干结构. 然而, 不稳定性具有强烈的局部特性, 描述相干结构的特征解在壁面外区衰减得非常快, 因此它与远离壁面的区域的扰动没有联系. 所以, 槽道湍流是三个截然不同的区域中的扰动相互作用的结果, 这三个区域即两个壁面区和一个中心区. 湍流能量主要是由两个壁面区域中相干结构的生成过程提供的. 中心区充当相对被动的角色, 即通过喷发作用从边界区域接受湍流能量, 并将一些扰动反馈给壁面区, 从而产生新的相干结构. 性质截然不同的壁面区和边界层中的外区或槽道流中的核心区的存在显然是平均流修正的结果.

2 槽道流转换的直接数值模拟

我们用平面槽道流来研究转换. 数值方法为伪谱方法, 即在流向和展向采用 Fourier 变换, 而在法向采用四阶精度、两点紧致差分格式来解由 Fourier 展开所产生的方程.

计算起始于具有抛物线型平均速度剖面的层流, 然后引入扰动, 扰动由三个 T-S 波组成, 形式如下:

$$a_1 u_1(y) e^{i(\alpha_1 x + \beta_1 z)} + a_2 u_2(y) e^{i(\alpha_2 x + \beta_2 z)} + a_3 u_3(y) e^{i(\alpha_3 x + \beta_3 z)}$$

其中, x 是流向坐标, z 是展向坐标, y 是法向坐标; α_i 与 β_i ($i=1, 2, 3$) 分别是 x 和 z 向的波数. u_i ($i=1, 2, 3$) 是解层流剖面的 Orr-Sommerfeld 方程特征值问题得到的特征速度矢量, 其归一化条件为 $\max |u_i| = 1$, u_i 是扰动的流向速度分量, a_1 , a_2 与 a_3 是扰动幅值.

表 1 各种情况的初始扰动参数

参数 情况	α_1	β_1	α_2	β_2	α_3	β_3	a_1	a_2	a_3	雷诺数
情况 1	1.0	0	0.8	0.6	1.0	0.3	0.002	0.002	0.002	8 000
情况 2	1.0	0	0.8	0.6	1.0	0.3	0.002	0.002	0.002	7 000
情况 3	1.0	0	0.8	0.6	1.0	0.3	0.08	0.08	0.01	8 000
情况 4	2.1	0	1.5	0.9	1.5	0.3	0.08	0.08	0.01	7 000
情况 5	2.7	0	2.1	0.9	1.5	0.3	0.08	0.08	0.01	7 000
情况 6	1.0	0	0.8	0.6	1.0	0.3	0.18	0.18	0.18	8 000

一共考察了六种情况, 具体参数如表 1 所示. 根据初始扰动的幅值大小, 这几种情况或者属于常规转换, 即开始于小扰动逐步放大的转换, 或者属于旁路转换, 即具有突变特性的转换. 但是不管属于哪种转换, 在突发转换的过程中它们的平均流剖面的特征是相同的, 因此后面我们仅给出了第一种情况的详细数据.

其中雷诺数是参照槽道层流速度剖面的中心速度和半槽宽得出的. 情况 1 中所加入的前两个波是不稳定的. 扰动开始部分是逐渐增长的, 如图 1(a) 所示, 在无量纲时间 $t=340$ 之前是

有规律的. 图中给出的是与引入的第二个扰动波有相同波数的速度 u 分量在某点的值. 从图 1(b) 中可以看出, 这时的平均流速度剖面与抛物线形速度剖面还是极为接近的. 另外, 图 1(b) 中还包括了随后的其他几个瞬时的平均速度剖面. 从图 1(c) 中可以看出, 壁面处的速度梯度也从 $t=340$ 开始急剧增长. 图 2 分别显示了 $t=340$, $t=400$ 和 $t=500$ 时刻的某一 $y-z$ 平面内的速度矢量分布, 其中图 2(a) 显示扰动还非常有规律, 并且如前所述保持着整体特征. 图 3(a) 与图 2(a) 相对应, 显示的是对于每一对 x, z , 扰动速度 w 的最大值的谱值, 图中仅出现几个孤立的谱值. 图 2(b) 对应 $t=400$ 时刻的情况, 此时正处于转捩突发过程中, 扰动充斥了整个平面, 表明所有的谐波几乎具有相同的大小量级, 相应地, 从图 3(b) 中也可以看到这一现象. 图 2(c) 显示了转捩突发过程结束后情景, 这时扰动主要表现为靠近两个壁面的没有相互联系的涡或相干结构, 这是典型的湍流特征. 相应的图 3(c) 中的谱值分布得更加均匀, 但是与 $t=400$ 时刻相比, 不同谐波的量级却明显减小.

虽然在 $t=800$ 时, 平均流剖面与湍流剖面已很相似, 并且壁面处的平均流速度梯度也已从其峰值迅速降了下来, 似乎主要的转捩过程已经完成, 但这时还远没有达到最终的平衡湍流状态. 因为我们在数值模拟中采用了定常的压力梯度公式, 所以我们可以从以下两个平衡湍流的事实来判断是否达到平衡, 即对于层流雷诺数为 8 000 的流动达到平衡湍流时的平均速度最大值约为 0.28, 或者壁面处平均速度梯度为 2, 与层流时相同. 流动之所以很长时间才能达到最终的平衡状态是因为平均流的修正是被一个扩散项系数很小的扩散方程所控制. 在转捩突发的过程中, 由于扰动较大, 如图 2(b) 和图 3(b) 所示, 才使得平均流得以较快修正.

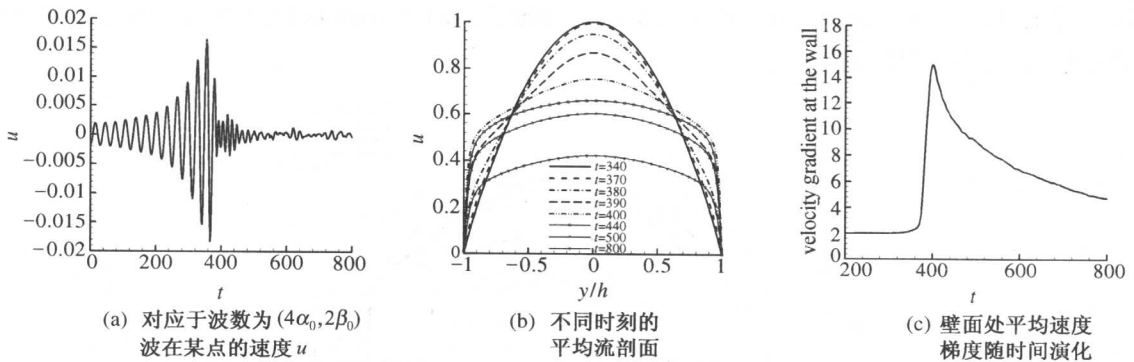


图 1

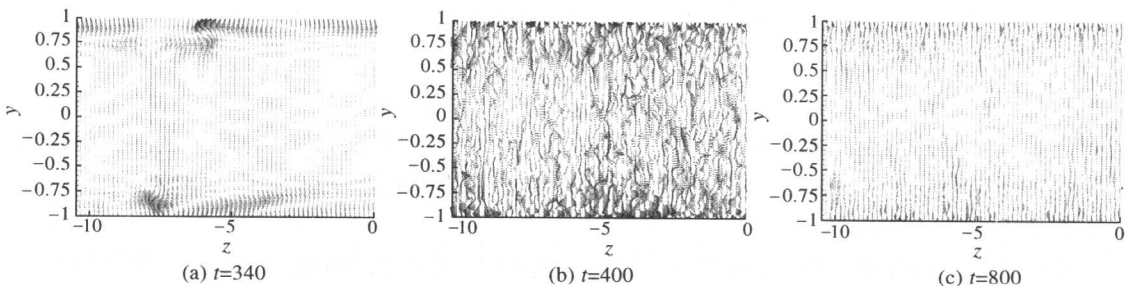


图 2 $y-z$ 平面的速度矢量图
(对于(a), 实际矢量长度应为图中显示的 $1/3$)

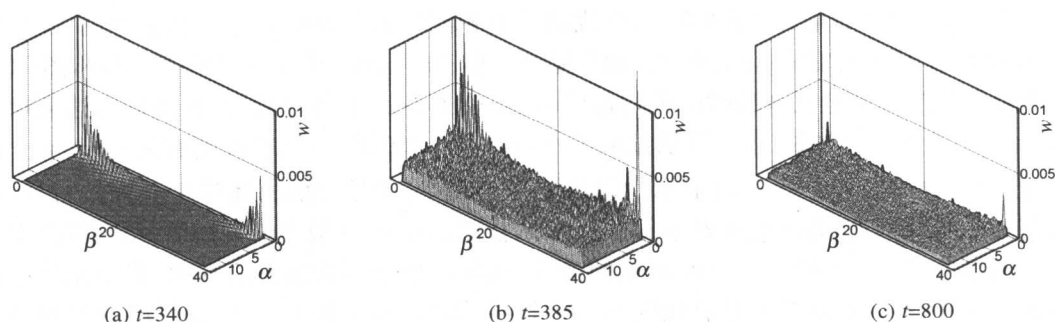


图3 α - β 平面 $\max|w|$ 的傅立叶谱
(对于每一对给定的 α, β , $\max|w|$ 是 w 的绝对值的最大值)

以上结果包括了一个以前不知道的事实,即在转换突发过程中,不管是与转换前还是与转换后相比,不同谐波都被剧烈放大了.这也是为什么转换突发能够在相对短暂的时间内完成的原因.很自然,这里又提出了一个新的问题,即在转换突发的过程中,导致许多谐波迅速增强的关键机理是什么?这并不能简单地用不同谐波之间的非线性相互作用来解释.

由图1可以看出,在 $t=370$ 时,平均流剖面开始产生可以察觉到的变化,而且有弱拐点出现.我们对转换突发过程中 $t=375, 380, 385$ 和 390 时刻的平均流速剖面进行了线性稳定性分析,图4显示了以上各时刻以及层流剖面的 α - β 平面的中性曲线.相对于抛物线层流剖面,上述四个时刻的中性曲线所包围的不稳定区域增大了很多.而且扰动的最大增长率也增大很多.相对于层流的 0.002735 ,以上四时刻的最大增长率分别为 $0.00507, 0.01570, 0.01552$ 与 0.01791 .不稳定区域的扩大以及放大率的增大导致了如图2(b)所示的众多谐波的迅速增长的基础,并最终导致湍流的产生.

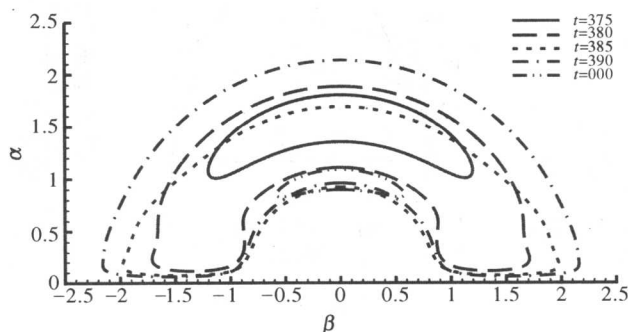


图4 α - β 平面的中性曲线
($t=000$ 曲线对应层流情况)

从图1的平均流剖面还可以发现,转换突发过程开始于 $t=340$ 至 $t=370$ 之间,此时速度剖面开始与原始的抛物线剖面分离.结束于 $t=400$ 至 $t=440$ 之间,此时的速度剖面已经拥有了剖面中部比较平坦这一湍流剖面的典型特征.转换过程总共历时 $40 \sim 50$ 个时间单位,约两个基本 T-S 波的周期.

在所研究的六种情况中,有四种属于常规转换,两种属于旁路转换.但是,不管属于哪种转换方式,转换突发过程中的平均流剖面的变化过程都相似.

对于所有的情况,壁面速度梯度在转换突发过程中总是比平衡湍流的速度梯度大很多,相应地,湍流能量也在此过程中取最大值.