

Principles of Turbulence Control

湍流控制原理

范宝春 董刚 张辉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

湍流控制原理

Principles of Turbulence Control

范宝春 董刚 张辉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

湍流控制原理 / 范宝春, 董刚, 张辉编著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 7

ISBN 978 - 7 - 118 - 07359 - 1

I. ①湍... II. ①范... ②董... ③张... III. ①湍流理论 IV. ①O357.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 108719 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 21 1/4 字数 374 千字

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

凡是涉及运动的领域,都存在流动控制和减阻问题。高效减阻可以提高推进效率,减少燃料损耗、减轻运动物体的重量和提高运动的稳定性。此外,流动控制技术还用于流体混合、液体雾化、污水治理以及湍流燃烧等领域,故具有广泛的应用价值。

运动物体的阻力来自边界层,特别是湍流边界层。随着壁湍流的拟序结构的发现,以及此后对该结构的特征和本质的深入理解,流动控制和减阻技术的研究终于可以在科学的层面上展开,并不断取得实质性的进展。近年来,随着科学技术的发展(如湍流理论、数值方法、控制理论、材料科学和 MEMS 技术等)以及实践的需求,流动控制已经成为流体力学的前沿和热点问题。

一本系统阐述流动控制原理和控制技术的书籍,对于从事此类研究的科研人员及有关专业的高校师生来讲是非常有价值的。

《湍流控制原理》一书分 3 篇,每篇 2 章,共 6 章。第 1 篇壁湍流为本书的基础。其中,第 1 章为统计方法和谱方法,介绍壁湍流直接模拟的谱方法,以及用于处理和分析湍流研究中实验和计算结果的统计分析和谱分析。这些是贯穿全书的,讨论流动控制所必需了解和掌握的基本知识。第 2 章壁湍流的拟序结构,介绍壁湍流拟序结构的形成、演变和结构特征,以及拟序结构与壁面阻力的关系。本书内容是围绕壁湍流的控制展开的,故壁湍流的拟序结构是本书最基本的物理概念。

第 2 篇介绍壁湍流的开环控制,讨论壁湍流的控制方法和机理。壁湍流具有周期变化的拟序结构,只需给其中任一环节以适当的干扰,就可以改变其结构,控制其壁面流动。壁湍流控制技术的种类繁多,为方便讨论,先将其分类。从数学上讲,流场是由守恒方程和初始、边界条件确定的,故控制流动有两类基本思路,一是改变守恒方程,如形成电磁场、形成等离子体或加入高聚物等,给守恒方程添加源项,或使流体改性;另一是改变流场的边界条件,如吹/吸壁面,振荡壁面,变形壁面和柔性壁面等,使边界上的某些参数按一定规律变化。本篇第 3 章涉及边界条件控制问题,介绍振荡壁面和变形壁面对流动的控制,包括实验研究、数值研究和利用边界条件控制流动的机理,以及 MEMS 系统。第 4 章涉

及方程控制问题,介绍电磁力对边界流动的控制,包括实验研究、数值研究和体力控制流动的机理。

第3篇介绍壁湍流的闭环控制。无论用何种技术来控制流动,总希望提高控制效率,减少能量损耗,这涉及流动的优化控制问题。处理流动优化控制大致有两个方向:一是简化流动方程,使之与线性优化控制的标准方程一致,如本篇第5章介绍的流动的线性优化控制,先介绍线性优化,特别是线性二次性优化的基本理论,然后介绍流动的线性优化控制。二是发展优化控制理论使之适用于流动系统,如本篇第6章介绍流动的非线性优化控制,包括次优化控制和协态优化控制,前者又分为谱分析方法和神经网络方法,后者引进协态流场,使N-S方程约束下的性能指标的条件极值问题转化为协态流场和感度方程的求解问题。

本书第1章、第3章、第4章和第5章由范宝春编写,第2章由董刚编写,第6章由范宝春和张辉共同编写。作者力求使该书内容新颖,脉络清晰,于读者有所裨益,但因学识和能力所限,恐一时难尽人意。这次有幸付印出版,恳请读者批评赐教。

作者
2011年于南京

目 录

第 1 篇 壁 湍 流

第 1 章 统计方法和谱方法	1
1.1 频谱和能谱	1
1.1.1 周期函数的频谱	1
1.1.2 非周期函数的频谱和傅里叶变换	3
1.1.3 周期函数的傅里叶变换	3
1.1.4 能谱	5
1.2 统计方法	5
1.2.1 平均值	5
1.2.2 概率密度分布函数和统计矩	6
1.2.3 相关函数	9
1.3 湍流的统计方法	11
1.3.1 雷诺(Reynolds)应力和湍动能	11
1.3.2 条件平均技术	13
1.4 函数的谱展开	16
1.4.1 傅里叶(Fourier)级数	17
1.4.2 契比雪夫(Chebyshev)多项式	19
1.5 谱方法	24
1.5.1 谱方法基础	24
1.5.2 亥姆霍兹(Helmholez)方程的契比雪夫- τ 方法	27
1.6 纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程的谱方法	30
1.6.1 时间积分方法	30
1.6.2 基于时间推进的谱方法(1)	32
1.6.3 基于时间推进的谱方法(2)	40
1.6.4 基于时间分步的谱方法	41

1.7 本章小结	43
参考文献	44
第2章 壁湍流的形成及其拟序结构	46
2.1 边界层流动及其稳定性	47
2.1.1 边界层流动	47
2.1.2 流动稳定性的基本概念	48
2.1.3 流动的线性稳定性理论	50
2.2 边界层流动的转捩	52
2.2.1 基本过程	53
2.2.2 感受性阶段	53
2.2.3 线性失稳阶段	56
2.2.4 非线性失稳阶段	59
2.2.5 湍斑的形成和发展	68
2.3 壁湍流的拟序结构	70
2.3.1 近壁湍流的统计特性	71
2.3.2 条带的结构特征与识别	74
2.3.3 涡结构特征与识别	76
2.4 拟序结构的形成与演化	83
2.4.1 条带的形成与失稳	83
2.4.2 涡结构的形成	86
2.4.3 拟序结构的产生与自维持	92
2.4.4 拟序结构的动力学演化	95
2.5 湍流的猝发与阻力的形成	97
2.6 本章小结	99
参考文献	100

第2篇 壁湍流的控制

第3章 壁湍流的壁面控制	103
3.1 第二斯托克斯(Seokes)问题	106
3.2 壁湍流展向振动控制的实验研究	108

3.2.1	不可压流动的壁面展向振动控制	108
3.2.2	可压缩流动的壁面展向振动控制	113
3.3	壁湍流展向振动控制机理	119
3.3.1	展向振动壁面控制的数值计算	119
3.3.2	展向振动壁面的控制机理	123
3.3.3	展向行波振动壁面控制的数值计算	127
3.3.4	流向行波振动壁面控制的数值计算	130
3.4	变形壁面	135
3.5	变形壁面控制的实验研究	138
3.5.1	不可压缩流动的变形壁面控制	138
3.5.2	可压缩流动的变形壁面控制	139
3.6	变形壁面控制机理	142
3.6.1	流向行波变形壁面控制的数值计算	142
3.6.2	展向驻波变形壁面控制的数值计算	151
3.6.3	变形壁面反向控制的数值计算	155
3.6.4	MEMS 控制的数值计算	161
3.6.5	变形壁面控制机理	164
3.7	本章小结	168
	参考文献	169

第4章 壁湍流的体积力控制 172

4.1	洛伦兹力	172
4.2	展向电磁力控制的实验研究	174
4.2.1	展向振荡电磁力控制的实验研究	174
4.2.2	展向波动电磁力控制的实验研究	179
4.3	展向电磁力控制机理	185
4.3.1	展向电磁力及其诱导的运动	185
4.3.2	展向电磁力的湍流控制	189
4.3.3	展向行波电磁力的湍流控制	201
4.3.4	流向行波电磁力的湍流控制	207
4.3.5	黏性次层流向涡的电磁抑制	215
4.4	法向电磁力控制的实验研究	220

4.4.1	单元法向电磁力激活板	220
4.4.2	组装机向电磁力激活板	221
4.5	法向电磁力控制的数值研究	223
4.5.1	三维洛伦兹力场的数值计算	223
4.5.2	法向电磁力控制的数值研究	225
4.6	本章小结	226
	参考文献	226
第 3 篇 流动优化控制		
第 5 章	线性优化控制	229
5.1	优化控制	231
5.1.1	优化控制理论	231
5.1.2	常微分方程的优化控制	236
5.2	线性二次型的优化控制	239
5.2.1	线性二次型的优化控制	239
5.2.2	离散系统的线性二次型	245
5.2.3	随机输出反馈调节的优化控制(LQG)	246
5.3	二维流动的线性优化控制	248
5.3.1	N-S 方程的线性优化	248
5.3.2	线性优化方程的谱方法	250
5.3.3	线性优化流场的标准状态空间方程	254
5.3.4	槽道流的线性优化控制	256
5.4	三维流动的线性优化控制	260
5.4.1	非线性效应和线性耦合效应	260
5.4.2	壁湍流的线性优化控制	263
5.5	本章小结	265
	参考文献	266
第 6 章	非线性优化控制	268
6.1	流动优化控制的基本问题	268
6.2	次优化控制的谱方法	271

6.2.1	吹/吸壁面控制的谱方法	271
6.2.2	后台阶流动吹/吸控制的谱方法	276
6.2.3	圆柱绕流吹/吸控制的谱方法	279
6.3	次优化控制的神经网络法	292
6.3.1	吹/吸壁面控制的神经网络法	293
6.3.2	变形壁面控制的神经网络法	296
6.3.3	法向电磁力控制的神经网络法	299
6.4	协态优化控制	301
6.4.1	基本问题	301
6.4.2	协态优化控制	303
6.4.3	吹/吸壁面的协态优化控制	306
6.4.4	圆柱绕流的电磁优化控制	308
6.5	本章小结	318
	参考文献	319

Contents

Part I Wall Turbulence

Chapter 1 Statistical Analysis and Spectral method	1
1.1 Frequency Spectrum and Energy spectrum	1
1.1.1 Spectrum of Periodic Function	1
1.1.2 Spectrum and Fourier Transform of Non-Periodic Function	3
1.1.3 Fourier Transform of Peoredic Function	3
1.1.4 Energy Spectrum	5
1.2 Statistical Method	5
1.2.1 Mean value	5
1.2.2 Propability Distribution Fuction and Statistical Moments	6
1.2.3 Correlation Function	9
1.3 Statistical Analysis of Turbulence	11
1.3.1 Reynolds Stress and Turbulence Kinnetic Energy	11
1.3.2 Variable-Interval Time Average Method	13
1.4 Spectral Series Expansion of Function	16
1.4.1 Fourier Series	17
1.4.2 Chebyshev Polynomials	19
1.5 Funderments of Spectral method	24
1.5.1 Introduction	24
1.5.2 Chebyshev- τ Method of Helmholtz Equation	27
1.6 Spectral Method of Navier-Stokes Equations	30
1.6.1 Time Integration Method	30
1.6.2 Spectral Method based on Time Marching Algorithms(1)	32
1.6.3 Spectral Method based on Time Masching Algorithms(2)	40
1.6.4 Spectral method based on Time-Split method	41

1.7	Closing Remarks	43
	References	44
Chapter 2	Wall turbulence formation and coherent structures	46
2.1	Boundary layer flow and its stability	47
2.1.1	Boundary layer flow	47
2.1.2	Basic concept of flow stability	48
2.1.3	Linear stability theory of flow	50
2.2	Transition of boundary layer flow	52
2.2.1	Basic process	53
2.2.2	Receptivity stage	53
2.2.3	Linear instability stage	56
2.2.4	Nonlinear instability stage	59
2.2.5	Formation and evolution of turbulent spot	68
2.3	Coherent structures of wall turbulence	70
2.3.1	Statistical characteristic of wall turbulence	71
2.3.2	Streak structures characteristic and identification	74
2.3.3	Vortex structures characteristic and identification	76
2.4	Formation and evolution of coherent structures	83
2.4.1	Formation and instability of streaks	83
2.4.2	Formation of vortex structures	86
2.4.3	Generation and self-sustaining of coherent structures	92
2.4.4	Dynamical evolution of coherent structures	95
2.5	Turbulence bursting and drag formation	97
2.6	Closing Remarks	99
	References	100

Part II Control of Wall Turbulence

Chapter 3	Control of Turbulence with Moving or Deformed Wall	103
3.1	Second Stoks Problem	106
3.2	Experiments of Wall Turbulence with Spanwise Wall Oscillation ...	108

3.2.1	Incompressible Flow with Spanwise Wall Oscillation	108
3.2.2	Compressible Flow with Spanwise Wall Oscillation	113
3.3	Control Mechanism of Wall Turbulence with Spanwise Wall Oscillation	119
3.3.1	Numerical Simulation of Turbulence Control by Spanwise Wall Oscillation	119
3.3.2	Control Mechanism of Wall Turbulence with Spanwise Wall Oscillation	123
3.3.3	Numerical Simulation of Turbulence Control by Spanwise- Travelling Waves of Spanwise Wall Velocity	127
3.3.4	Numerical Simulation of Turbulence Control by Streamwise- Travelling Wave of Spanwise Wall Velocity	130
3.4	Deformed Wall	135
3.5	Experiments of Wall Turbulence with Deformed Wall	138
3.5.1	Incompressible Flow with Deformed Wall	138
3.5.2	Compressible Flow with Deformed Wall	139
3.6	Control Mechanism of Wall Turbulence with Deformed Wall	142
3.6.1	Numerical Simulation of Turbulence Control by Streamwise- Travelling Wave of Flexible Wall	142
3.6.2	Numerical Simulation of Turbulence Control by Spanwise Steady Wave of Flexible Wall	151
3.6.3	Numerical Simulation of Opposite Control by Deformed Wall	155
3.6.4	Numerical Simulation of MEMS Control	161
3.6.5	Control Mechanism of Deformed Wall	164
3.7	Closing Remarks	168
	References	169
	Chapter 4 Control of Wall Turbulence by Body Force	172
4.1	Lorentz force	172
4.2	Experiments of Wall Turbulent with Spanwise Lorentz force	174
4.2.1	Control with Spanwise Oscillating Lorentz Force	174

4.2.2	Control with Spanwise Oscillating Wave Travelling along Spanwise Direction Induced by Lorentz Force	179
4.3	Control Mechanism of Wall Turbulence with Spanwise Lorentz Force	185
4.3.1	Spanwise Lorentz Force and Its Induced Flow	185
4.3.2	Wall Turbulent Control by Spanwise Oscillating Lorentz Force	189
4.3.3	Wall Turbulence Controlled by Spanwise Oscillating Wave Travelling along Spanwise Direction Induced by Lorentz Force	201
4.3.4	Wall Turbulence Controlled by Spanwise Oscillating Wave Travelling along Streamwise Direction Induced by Lorentz force	207
4.3.5	Streamwise Vortex in Viscous Sublayer Controlled by Lorentz Force	215
4.4	Experiments of Wall Turbulent with Wall-Normal Lorentz Force	220
4.4.1	Actuator Unit of Wall-Normal Lorentz Force	220
4.4.2	Assemble Actuator of Wall- Normal Lorentz Force	221
4.5	Numerical Simulation of Turbulent Control by Normal Lorentz Force	223
4.5.1	Three Dimensional Lorentz Force Field	223
4.5.2	Turbulent Control by Normal Lorentz Force	225
4.6	Closing Remarks	226
	References	226

Part III Optimal Flow Control

Chapter 5	Linear Optimal Flow Control	229
5.1	Optimal Control	231
5.1.1	Introduction	231
5.1.2	Optimal Control for Ordinary Differential Equations	236
5.2	Optimal Control of Linear Quadratic Systems	239

5.2.1	Linear Quadratic Systems	239
5.2.2	Discrete Linear Quadratic Systems	245
5.2.3	Linear Quadratic Gaussian Control	246
5.3	Linear Optimal Control of Two-Dimension Flow	248
5.3.1	Linearization of N-S Equations	248
5.3.2	Spectral Method of linearized Flow	250
5.3.3	Standard State-Space Representations of Linearized Flow	254
5.3.4	Linear Optimal Control of Channel Flow	256
5.4	Linear Optimal Control of Three-Dimension Flow	260
5.4.1	Non-Linear and Linear Coupling Effects	260
5.4.2	Linear Optimal Control of Wall Turbulence	263
5.5	Closing Remarks	265
	References	266

Chapter 6 Non-Linear Optimal Flow Control 268

6.1	Fundamentals of Optimal Flow Control	268
6.2	Spectral Method in Suboptimal Control	271
6.2.1	Control of Channel Flow	271
6.2.2	Control of Backward-Facing Step Flow	276
6.2.3	Control of Cylinder Flow	279
6.3	Neural Network in Suboptimal Control	292
6.3.1	Control by Blowing-Suction Wall	293
6.3.2	Control by Deformed Wall	296
6.3.3	Control by Wall-Normal Lorentz Force	299
6.4	Adjoint-Based Optimal Control	301
6.4.1	Fundamentals of Adjoint-Based Optimal Control	301
6.4.2	Adjoint-Based Optimal Control	303
6.4.3	Control by Blowing-Suction Wall	306
6.4.4	Cylinder Flow Controlled by Lorentz Force	308
6.5	Closing Remarks	318
	References	319