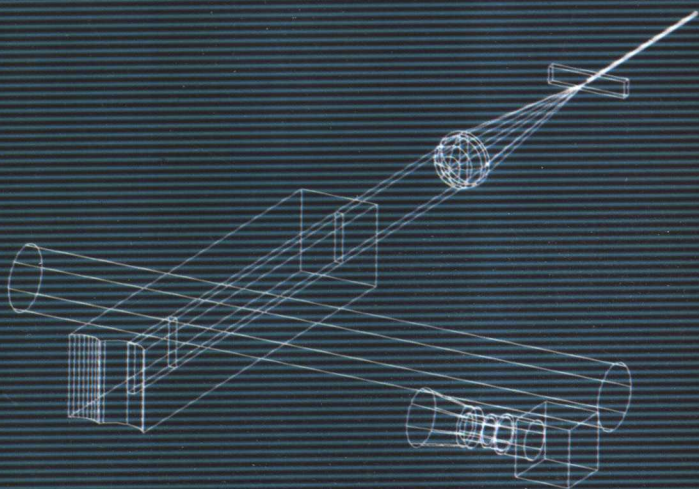


仪器科学与技术



# 瞬态流场参数测量

范宝春 叶经方 编著



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社



国防科工委“十五”规划专著

# 瞬态流场参数测量

范宝春 叶经方 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

## 内容简介

全书分为瞬态流场、信号采集、激光诊断、信号调理与测量系统五编。书中编入了一些较系统、较新的技术内容,以适应工业生产和科研工作对瞬态测量提出的更高、更严的要求。

第一编为瞬态流场。介绍流体的连续介质模型和描述流场特性的流场参数及其物理意义;讨论流动过程中流场参数的变化规律。最后,讨论方程的分类和适用性,以及相关的流动,以求对流场和流动形态有一基本了解。第二编为信号采集。着重介绍信号采集用的传感器。第三编为激光诊断。本编由光学理论和测试方法相互穿插、渗透而成。从光学角度讲,首先介绍光的传播和光的叠加,即干涉和衍射。然后介绍光与颗粒的作用,即光在颗粒上的衍射、频移和散射。最后讨论光与分子的作用,即瑞利散射、喇曼散射和诱导荧光。第四编为信号调理。介绍信号的放大,信号的传播,信号的处理。第五编为测量系统。介绍测试系统的静态特性和动态特性及其标定方法,简要介绍数字化测试系统。

本书除供能源动力类、环境与安全类、武器类、工程力学类专业学生使用外,也可供设计、使用等部门的本专业工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

瞬态流场参数测量/范宝春,叶经方编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2005  
ISBN 7-81073-664-7

I. 瞬… II. ①范…②叶… III. ①流场(流体力学) — 瞬态响应特性测量②流场(流体力学) — 参数测量 IV. ①O35②TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015247 号

## 瞬态流场参数测量

范宝春 叶经方 编著

责任编辑 罗东明 宋旭东

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈尔滨工程大学 11 号楼

发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001

新华书店经销

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:16 字数:400 千字  
2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷 印数:1 000 册  
ISBN 7-81073-664-7 定价:34.00 元



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天器为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改



革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相



关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科



技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

流体,包括气体和液体,是物质存在的主要形态,是构成物质世界的重要组成。

流体力学是自然科学中的一门基础学科,主要研究流体在平衡、运动及与边界作用时的规律,该规律通常用流场中的流体参数分布来描述,此分布可以通过理论计算或实验测量获得。

由实验获得流场参数的技术称为流场测量技术。若被测量在测量过程中迅速变化,则称相应的测量为瞬态测量。流场瞬态测量技术是研究流场必不可少的手段,它一方面受到流体力学发展过程中需求方面的挑战,另一方面又不断从现代科学技术的发展中获得支持,从而成为先进技术的一种表征。

作为一本介绍瞬态流场测量技术的规划教材,既不能过分倚重测量方法和测量仪器的介绍,使课程失去系统性和理论深度,又不能偏重理论的介绍,使之流于“枯燥”,失去应用特征。为此,本书分为五编,先介绍瞬态流场所包含的信息(第一编),再介绍信息的采集(第二,三编),然后介绍信号的调理,包括放大、调理、传输和处理等(第四编),最后讨论整个测量系统(第五编)。具体安排如下:

第一编为瞬态流场。首先介绍流体的连续介质





模型和描述流场特性的流场参数及其物理意义(第1章)。再讨论流动过程中流场参数的变化规律(第2章)。最后,讨论方程的分类和适定性,以及相关的流动,如理想流、激波、粘性流和湍流等(第3章)。以求对流场和流动形态有一个基本了解。

第二编为信号采集,分为3章,着重介绍信号采集用的传感器。其中,第4章介绍压阻式和压电式传感器,它可以将压力信号转换为电信号;第5章为热电传感器,将与热效应有关的信号转换为电信号;第6章为光电式和光纤传感器,前者将光信号转换为电信号,后者将各种流场信号转换为光信号。

第三编为激光诊断,实际也是一种信号采集系统。本编由光学理论和测量方法相互穿插、渗透而成。从光学角度讲,首先介绍光的传播(第8章)和光的叠加,即干涉(第9章)和衍射(第10章)。然后介绍光与颗粒的作用,即光在颗粒上的衍射(第11章)、频移(第12章)和散射(第13章)。最后讨论光与分子的作用,即瑞利散射(第14章)、喇曼散射(第15章)和诱导荧光(第16章)。从测量角度讲,光在流场中传播时,光速变化致使接收屏上的光强重新分布,可据此测量流场,如阴影法和纹影法(第8章)。通过流场的光,其位相将发生变化,从而形成特殊的干涉条纹,干涉法便基于这一原理(第9章)。在干板上记录物光与参考光的干涉条纹,再现光经干板衍射后,可使物像再现,称为全息照相



(第 10 章)。光经颗粒衍射,在接收屏上的光强分布与颗粒群的粒径分布有关,可用来测量粒径(第 11 章)。光在运动颗粒上的频移与颗粒运动速度有关,可用来测流场速度(第 12 章)。激光探头照射颗粒时,在空间形成与颗粒大小有关的干涉条纹,用来测量颗粒大小和速度,称为相位多普勒技术(第 13 章)。根据流场中被片光照射的播撒粒子的瞬间图像,测得颗粒的三维运动速度,此技术称为粒子图像测速技术(第 14 章)。流场分子被激光激活后,返回基态时,辐射光子,其频率和数密度与流场状态有关,根据辐射光谱可解读被测流场的信息,此为光谱测量技术(第 15 章和第 16 章),它在测量微量组分、温度以及流场成像等方面具有优势。上述测量技术大都须用高强度的单色光,即激光,第 7 章介绍激光的产生原理和特性。

第四编为信号调理,分为 3 章。第 17 章介绍信号的放大,讨论各类放大器的工作原理;第 18 章介绍信号的传播,包括信号的调制与解调、滤波和传输线路的设计;第 19 章介绍信号的处理,包括信号的各种描述与分析、模拟信号的数字化和 A/D 及 D/A 转换器。

第五编为测量系统,分为 2 章。第 20 章介绍测量系统的静态特性和动态特性及其标定方法,第 21 章简单介绍数字化测量系统。

该书第一编和第三编由范宝春编写,第二编、



第四编和第五编由叶经方编写,最后由范宝春统稿。作者希冀该书取舍得当、脉络清晰、便于讲授与阅读,但因学识和能力所限,恐一时难尽人意。书中错漏不妥之处,恳请读者批评指正。

作者于南京

2004.11

# 目 录

## 第一编 瞬态流场

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 连续介质 .....       | 2  |
| 1.1 速度分布函数 .....       | 2  |
| 1.2 平衡体系 .....         | 4  |
| 1.3 连续介质 .....         | 7  |
| 本章小结 .....             | 9  |
| 第 2 章 流动方程 .....       | 10 |
| 2.1 流体和流场 .....        | 10 |
| 2.2 雷诺输运原理 .....       | 11 |
| 2.3 守恒方程 .....         | 13 |
| 2.4 化学反应流的守恒方程 .....   | 17 |
| 本章小结 .....             | 20 |
| 第 3 章 理想流、粘性流和湍流 ..... | 22 |
| 3.1 理想流 .....          | 22 |
| 3.2 粘性流 .....          | 25 |
| 3.3 湍流 .....           | 30 |
| 3.4 湍流模式理论 .....       | 32 |
| 本章小结 .....             | 36 |

## 第二编 信号采集

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 4 章 压阻式和压电式传感器 ..... | 40 |
| 4.1 固态压阻式传感器 .....     | 40 |



|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 4.2 压电式传感器 .....              | 46        |
| 4.3 压力传感器动态性能 .....           | 53        |
| 本章小结 .....                    | 57        |
| <b>第5章 热电式传感器 .....</b>       | <b>58</b> |
| 5.1 热电偶 .....                 | 58        |
| 5.2 热电阻 .....                 | 62        |
| 5.3 温度传感器的动态特性 .....          | 69        |
| 5.4 热线风速仪 .....               | 73        |
| 本章小结 .....                    | 81        |
| <b>第6章 光电式传感器和光纤传感器 .....</b> | <b>82</b> |
| 6.1 光电效应 .....                | 82        |
| 6.2 光电式传感器 .....              | 84        |
| 6.3 光纤传感器 .....               | 98        |
| 本章小结 .....                    | 101       |

### 第三编 激光诊断

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>第7章 激光原理 .....</b>    | <b>104</b> |
| 7.1 激光 .....             | 104        |
| 7.2 激光的产生 .....          | 107        |
| 7.3 激光的特性 .....          | 112        |
| 本章小结 .....               | 115        |
| <b>第8章 纹影法和阴影法 .....</b> | <b>116</b> |
| 8.1 光波 .....             | 116        |
| 8.2 光强 .....             | 122        |
| 8.3 折射率 .....            | 123        |
| 8.4 光线偏折 .....           | 127        |
| 8.5 纹影法 .....            | 129        |
| 8.6 阴影法 .....            | 135        |
| 本章小结 .....               | 139        |
| <b>第9章 干涉法 .....</b>     | <b>140</b> |



|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 9.1 光的干涉 .....              | 140        |
| 9.2 干涉仪 .....               | 143        |
| 9.3 全息干涉 .....              | 147        |
| 9.4 双曝光全息干涉 .....           | 151        |
| 本章小结 .....                  | 154        |
| <b>第 10 章 全息照相</b> .....    | <b>156</b> |
| 10.1 光的衍射 .....             | 156        |
| 10.2 夫琅禾费衍射 .....           | 160        |
| 10.3 菲涅耳衍射 .....            | 164        |
| 10.4 全息照相 .....             | 168        |
| 10.5 同轴全息和离轴全息 .....        | 171        |
| 本章小结 .....                  | 175        |
| <b>第 11 章 粒径测量</b> .....    | <b>177</b> |
| 11.1 颗粒衍射 .....             | 177        |
| 11.2 马尔文粒度仪 .....           | 180        |
| 11.3 颗粒群的复衍射 .....          | 183        |
| 11.4 透明颗粒的衍射 .....          | 186        |
| 本章小结 .....                  | 190        |
| <b>第 12 章 激光多普勒测速</b> ..... | <b>191</b> |
| 12.1 光拍和外差技术 .....          | 191        |
| 12.2 多普勒频移 .....            | 193        |
| 12.3 激光多普勒测速仪(LDV) .....    | 195        |
| 12.4 高斯光束 .....             | 200        |
| 12.5 多普勒信号 .....            | 203        |
| 12.6 多维测速系统 .....           | 206        |
| 本章小结 .....                  | 211        |
| <b>第 13 章 相位多普勒技术</b> ..... | <b>213</b> |
| 13.1 瑞利散射 .....             | 213        |
| 13.2 米散射 .....              | 215        |
| 13.3 颗粒散射的几何光学理论 .....      | 218        |
| 13.4 双光束颗粒散射的干涉条纹 .....     | 222        |



|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 13.5 相位多普勒技术 .....                | 225        |
| 本章小结 .....                        | 231        |
| <b>第 14 章 颗粒图像测速仪 (PIV) .....</b> | <b>232</b> |
| 14.1 基本原理 .....                   | 232        |
| 14.2 子图判读 .....                   | 236        |
| 14.3 三维 PIV 技术 .....              | 241        |
| 本章小结 .....                        | 247        |
| <b>第 15 章 喇曼散射 .....</b>          | <b>248</b> |
| 15.1 原子分子光谱 .....                 | 248        |
| 15.2 谱线加宽 .....                   | 250        |
| 15.3 喇曼散射的经典理论 .....              | 256        |
| 15.4 波函数 .....                    | 259        |
| 15.5 原子和分子的量子理论 .....             | 261        |
| 15.6 喇曼散射的半量子理论 .....             | 269        |
| 15.7 选择定律 .....                   | 271        |
| 15.8 振动和转动光谱 .....                | 274        |
| 15.9 喇曼散射强度 .....                 | 276        |
| 15.10 自发喇曼光谱仪 .....               | 279        |
| 15.11 相干反斯托克斯喇曼散射 .....           | 283        |
| 15.12 三阶 CARS 极化率 .....           | 287        |
| 15.13 CARS 光谱仪 .....              | 289        |
| 本章小结 .....                        | 292        |
| <b>第 16 章 激光诱导荧光法 .....</b>       | <b>294</b> |
| 16.1 激光诱导荧光 .....                 | 294        |
| 16.2 稳态线性荧光 .....                 | 296        |
| 16.3 稳态饱和荧光 .....                 | 298        |
| 16.4 非稳态线性荧光 .....                | 301        |
| 16.5 LIF 测量系统 .....               | 304        |
| 16.6 激光光谱成像技术 .....               | 309        |
| 本章小结 .....                        | 315        |



## 第四编 信号调理

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第 17 章 信号放大 .....  | 318 |
| 17.1 运算放大器 .....   | 318 |
| 17.2 放大器频率特性 ..... | 322 |
| 17.3 测量放大器 .....   | 326 |
| 17.4 电荷放大器 .....   | 329 |
| 本章小结 .....         | 340 |
| 第 18 章 信号传输 .....  | 342 |
| 18.1 调制与解调 .....   | 342 |
| 18.2 滤波 .....      | 351 |
| 18.3 模拟信号传输线 ..... | 367 |
| 本章小结 .....         | 385 |
| 第 19 章 信号处理 .....  | 386 |
| 19.1 信号的描述 .....   | 386 |
| 19.2 信号数字化 .....   | 406 |
| 19.3 模拟与数字转换 ..... | 419 |
| 本章小结 .....         | 430 |

## 第五编 测量系统

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第 20 章 测量系统特性 .....     | 432 |
| 20.1 测量系统的静态特性 .....    | 432 |
| 20.2 测量系统的动态特性 .....    | 438 |
| 20.3 典型输入的动态响应 .....    | 449 |
| 20.4 不失真测量 .....        | 452 |
| 20.5 静态特性和动态特性的标定 ..... | 454 |
| 本章小结 .....              | 460 |
| 第 21 章 数字化测量系统 .....    | 461 |
| 21.1 计算机测量系统的基本组成 ..... | 461 |





|                    |            |
|--------------------|------------|
| 21.2 总线技术 .....    | 465        |
| 21.3 虚拟仪器 .....    | 478        |
| 21.4 网络化测量仪器 ..... | 483        |
| 本章小结 .....         | 488        |
| <b>参考文献</b> .....  | <b>490</b> |