

《国防科研试验工程技术系列教材》
空气动力系统

流动显示技术

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

流动显示技术/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出版社, 2002.9

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统
ISBN 7-118-02844-4

I. 流... II. 中... III. 流动显示—教材
IV. 0354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 025917 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{5}{8}$ 245 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺
刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清
桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

《国防科研试验工程技术系列教材》 总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠
委 员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 皞 陶有勤 郭詮水

钱玉民

流动显示技术

主 编 杨祖清
副 主 编 郭隆德 胡成行
主 审 贺德馨

编写人员

第 1 章	杨祖清	蒋光裕			
第 2 章	胡成行	张维智			
第 3 章	胡成行	张维智			
第 4 章	孙启明	蒋光裕	杨祖清	杨 辉	徐中华
	张 龙	谢为民	王庆歆	王小蕾	
第 5 章	郭隆德	岳 斌	张维智	苏 铁	

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业 40 年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科

书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

前 言

《流动显示技术》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》第13册,主要介绍了用于空气动力试验流场的流动显示技术。全书共5章。第1章为概论,主要介绍了流动显示技术的发展简况、基本分类及其应用。第二章介绍了示踪粒子流动显示技术中的5种试验技术。第3章介绍了表面流动显示技术中的3种试验技术。第4章介绍了流动显示光学方法中的14种试验技术和干涉图图像处理。第5章介绍了3种流动显示的近代技术。

本书是根据国防科研试验工程技术系列教材要求编写的。编写人员来自中国空气动力研究与发展中心所属的低速空气动力研究所、高速空气动力研究所、设备设计与测试技术研究所、超高速空气动力研究所,他们都是从事空气动力试验流场的流动显示与测量的专家或科研人员。本书既吸收了国内外共识的流动显示技术的基本原理,又结合自身的工作,将其用于风洞试验的各种试验方法、实践经验写进了书中,并提供了各自的流场照(图)片。全书内容进行了多次反复修改,力求正确、实用。它是一本供从事空气动力试验流场的流动显示与测量的科技人员阅读的专业书籍。

本书在中国空气动力研究与发展中心及其所属超高速空气动力研究所组织下编写,编写过程中得到了中心领导、各研究所领导、机关、资料室的大力支持,蒋光裕、王庆歆、向莉对本书的编排以及公式、图表的规范和打印等付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

由于水平有限,错误之处在所难免,请读者批评指正。

编 者

2001年11月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 流动显示技术发展简况	1
1.2 流动显示方法基本分类	2
1.2.1 流动显示的基本目的	2
1.2.2 流动显示方法的基本分类	2
1.3 流动显示技术的应用与发展	6
1.3.1 流动显示技术的应用	6
1.3.2 流动显示技术的发展	7
参考文献	8
第 2 章 示踪粒子流动显示技术	9
2.1 概述	9
2.2 色线技术	10
2.2.1 流线、迹线和色线	10
2.2.2 色线在液体流动显示中的作用	11
2.2.3 染色液的配制与注入	11
2.2.4 染色线技术的应用	13
2.3 氢气泡技术	16
2.3.1 氢气泡技术的基本原理	17
2.3.2 氢气泡技术试验方法	18
2.3.3 氢气泡显示的定量测速方法	21
2.3.4 氢气泡技术的应用实例	27
2.4 烟线技术	29
2.4.1 烟流显示方法	29
2.4.2 烟线技术的试验装置	30
2.4.3 烟线技术的应用实例	34

2.5 蒸汽屏技术	35
2.5.1 蒸汽屏技术的基本原理	36
2.5.2 蒸汽屏技术的基本装置	36
2.5.3 水汽对流场的影响	41
2.5.4 蒸汽屏流动图像的辨识	44
2.5.5 蒸汽屏技术的应用实例	45
2.6 激光多普勒测速技术	50
2.6.1 激光多普勒测速技术的基本原理	50
2.6.2 激光多普勒测速仪的光学系统	53
2.6.3 激光多普勒测速的信号处理	55
2.6.4 散射微粒	56
2.6.5 两种多维激光多普勒测速仪	56
2.6.6 激光多普勒测速技术的应用	58
参考文献	62
第3章 表面流动显示技术	64
3.1 概述	64
3.2 壁面丝线技术	65
3.2.1 壁面丝线技术的试验方法	65
3.2.2 丝线法考虑的基本因素与操作技术	65
3.2.3 丝线技术的实际应用	69
3.3 油流技术	76
3.3.1 油流技术的基本原理	76
3.3.2 油流涂料与操作技术	76
3.3.3 油流技术应用中的几个问题	79
3.3.4 油流图像的识别与分析	80
3.3.5 油流技术的应用实例	85
3.4 升华技术	88
3.4.1 升华技术的基本原理	88
3.4.2 升华涂料与操作技术	88
3.4.3 应用升华技术时的注意事项	90
3.4.4 升华技术的应用实例	90
参考文献	92

第 4 章 流动显示的光学方法	93
4.1 概述	93
4.1.1 气流中的密度变化及其检测方法	93
4.1.2 光线在非均匀媒质中所受的扰动	95
4.1.3 气体的折射率与其密度的关系	98
4.2 阴影技术	101
4.2.1 阴影技术的基本原理	101
4.2.2 阴影技术的应用实例	103
4.3 纹影技术	105
4.3.1 泰普勒纹影技术	106
4.3.2 彩色纹影技术	126
4.3.3 纹影视频摄录技术	129
4.4 马赫干涉技术	131
4.4.1 单波长 M-Z 干涉仪	131
4.4.2 双波长 M-Z 干涉仪	138
4.5 基于纹影系统的干涉技术	143
4.5.1 偏振光干涉技术	143
4.5.2 光栅干涉技术	153
4.5.3 点衍射干涉技术	160
4.5.4 莫尔干涉技术	165
4.6 全息干涉技术	176
4.6.1 全息照相技术	176
4.6.2 全息干涉技术	179
4.6.3 全息干涉技术的应用实例	185
4.7 干涉图图像处理	189
4.7.1 干涉图像计算	192
4.7.2 流场干涉图的图像处理技术	193
4.7.3 干涉条纹位移量的判读与处理	200
4.7.4 全息图的处理	205
4.7.5 干涉图图像的其他处理方法	209
4.8 辉光放电显示技术	213
4.8.1 辉光放电显示原理	213

4.8.2 辉光放电显示方法	214
4.8.3 应用实例	215
4.9 高速摄影	215
4.9.1 普通高速摄影技术	217
4.9.2 高速阴影、纹影、干涉摄影技术	226
参考文献	236
第5章 几种流动显示的近代技术	239
5.1 概述	239
5.2 粒子图像测速技术	241
5.2.1 PIV 技术原理	241
5.2.2 PIV 系统组成	242
5.2.3 PIV 系统部件	243
5.2.4 PIV 系统主要技术指标	251
5.2.5 PIV 应用	254
5.3 压敏漆技术	259
5.3.1 PSP 测压的基本原理	260
5.3.2 测试系统	262
5.3.3 数据处理	263
5.3.4 应用简介	265
5.4 激光诱导荧光技术	267
5.4.1 LIF 技术国内外发展概述	267
5.4.2 LIF 技术测量基本原理	268
5.4.3 LIF 技术流场参数的测量方法	271
5.4.4 应用举例	276
参考文献	288

第 1 章 概 论

1.1 流动显示技术发展简况

大部分气态或液态的流体都是透明介质,它们的运动用人眼直接观察往往是不可见的。为了辨认流体的运动,必须提供一套使流动可视化的技术,这种技术称之为流动显示技术。流动显示技术已有一百多年的历史,它是随着流体力学的发展而发展起来的。1883 年雷诺(Reynolds)把染色液注入长的水平管道中的水流中,详细研究了从层流转变为湍流的情况,发现了相似律并定义了雷诺数(Re 数);1888 年马赫(Mach)对激波现象的观察;1912 年卡门(Karman)通过观察水槽中圆柱体绕流提出了卡门涡街;1940 年普朗特(Prantl)用示踪粒子获得了水沿平板的流谱图,观察表明靠近壁面有一薄层,其速度比距离薄层较远处的速度显著减小,这一观察使他发现了边界层的概念,并用同样的流动显示技术进行了几种边界层控制的实验;20 世纪 60 年代脱体涡流型的研究,80 年代大迎角分离流的研究和分离流型的提出;以及近代对三维、非定常复杂流动显示与测量的研究等等,这些以流动显示和测量为基础,从对流动现象的观察开始,不但在流体力学发展中取得了一次又一次的学术上的重大突破,并且应用于工程实际。

流动显示技术是试验流体力学中许多有效的试验技术之一,在风洞试验技术中也占有重要的位置。试验空气动力学中的流动显示技术的研究与发展简况,现以中国空气动力研究与发展中心为例作一些简单介绍。1968 年以来,该中心的流动显示技术随着空气动力试验设备建设与试验研究的发展而配套、完善和提高,它

经历了从无到有、从单项技术到综合技术的研究和发展过程。先后开展了表面流动显示技术、示踪粒子显示技术和光学方法等数十种流动显示试验技术的研究,并且配套了相应的流动显示仪器与设备(装置)。而且随着电子技术、光学技术、材料技术、自动控制技术和计算技术等的发展,流动显示技术也有了长足的进步和发展,例如,从定性显示到定量测量,激光蒸汽屏技术、激光多普勒测速技术和干涉、全息技术等,不但直观定性地演示了流场的流动图谱,而且也获取了流场中诸如速度分布、密度分布、旋涡大小和位置、激波位置等定量的试验数据;从定常(静态)显示到非定常(动态)显示,高速纹影摄影技术为诸如流场建立过程、喷流干扰过程、激波振荡等非定常流动提供了流动序列图;从局部(二维)流场测量到全(三维)流场测量研究等,应用莫尔干涉术、光栅干涉术实现了通过旋转模型拍摄不同方向的干涉图,开展了三维流场的显示与测量研究。从而,不但对气动试验研究起到了“眼睛”的作用,而且为试验流场的分析提供了直观可靠的依据以及某些定量的试验结果,也推动了流动显示技术和计算流体力学(CFD)技术的发展。

1.2 流动显示方法基本分类

1.2.1 流动显示的基本目的

流动显示的目的是使流场的流动过程可视,它与其他试验方法的不同之处在于,它使流场的某些特征可视化以及获得整个流场物理现象的信息。借助它,可以获得有关流动状态的直观形象及流动的发展过程,有些显示方法还能给出流动参数的定量结果,这对于了解流动现象、建立新的概念与物理模型和验证数值计算结果等都具有十分重要的意义。同时,流动显示技术本身也是解决实际工程问题的重要手段。

1.2.2 流动显示方法的基本分类

针对不同的流体,流动显示方法大体上可划分为几大类,第一