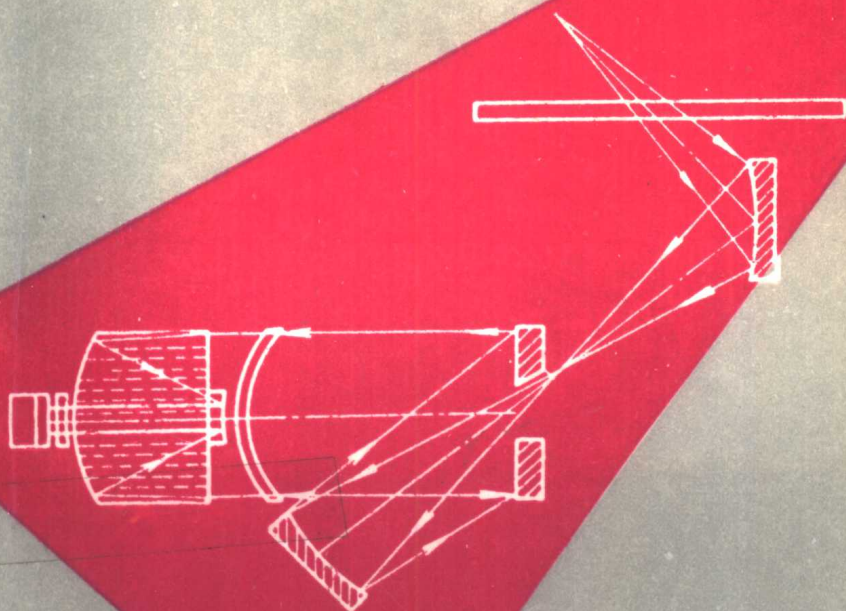


流动显示 与测量

范洁川 等编著



机械工业出版社

流动显示与~~测量~~

范洁川等 编著



机械工业出版社

本书阐述了流动显示与测量的基本原理和方法及其应用,内容包括示踪粒子空间流动显示技术、表面流动显示技术、流动显示的光学方法、流动的测量;详细阐明了近年来发展的新的流动显示与测量技术,如粒子图像测速(PIV)技术、激光诱导荧光(LIF)技术、激光超声技术(LUM)、全息照相和全息干涉技术、光学层析技术、电子束技术等;以大量精彩的流动图像表明了流动显示技术的应用并阐明了流谱分析的基本原理。本书所有彩图集中放在书后。

本书可供从事流体力学、空气动力学、飞行力学及其相关学科的科研工作者、工程技术人员和大专院校有关专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

流动显示与测量/范洁川等编著. —北京:机械工业出版社,1997

ISBN 7-111-05524-1

I. 流… II. 范… III. ①流动显示②流动测量 IV. TB93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 02870 号

出版人 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:李宜春 版式设计:杨丽华 责任校对:唐海燕

封面设计:李明 责任印制:侯新民

北京昌平环球印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年6月第1版 1997年6月第1次印刷

850×1168 mm¹/₃₂·17¹/₄ 印张·453千字

0 001-1000册

定价 35.50元

前 言

流动显示与测量是流体力学的重要组成部分,是发现新的流动现象、探索流动机理、显示与测量复杂流动和分析其绕流特性的重要手段。在工程上也有重要的实用价值。

近十几年来,我国在流动显示与测量研究方面取得了丰硕的成果。本书以反映我国在航空、航天等领域流动显示与测量研究取得的成果及其应用为主,适当地介绍目前国际上在流动显示与测量方面的新技术和发展趋势。

编著本书的目的是为了进一步推动我国流动显示与测量技术的发展,满足从事流体力学、空气动力学、飞行力学等广大科技人员学习和使用的需要。

本书是集体编著的。参加编著的人员和分工如下:绪论 范洁川;第一章 邓学莹、范洁川、洪金森;第二章 阎大鹏、贺安之;第三章 吴根兴、孙启明;第四章 屠兴、张彬乾、范洁川、明晓;第五章 申功炘、阎大鹏、贺安之、吴根兴、叶希超、张彬乾,范洁川;第六章 吴根兴、唐敏中。最后由范洁川负责统编。在清稿的最后过程中得到了陈玉高级工程师和范玉军高级工程师的许多帮助,在此表示衷心的感谢。

在本书编著和出版过程中得到了国防科工委王政礼高级工程师、中国气动研究与发展中心杨其德研究员、陈正才高级工程师和中国航空工业总公司樊玉辰研究员及有关单位的大力支持,在此一并表示感谢。

本书不妥之处恳请读者批评指正。

编著者

1996年8月

目 录

前 言

绪 论	1
-----------	---

第一章 示踪粒子空间流动显示技术	10
------------------------	----

1.1 概述	10
1.2 示踪粒子流动显示技术的基本概念和原理	11
1.3 染色线显示技术	19
1.4 氢气泡显示技术	25
1.5 烟线显示技术	50
1.6 彩色氦气泡显示技术	58
1.7 蒸汽屏显示技术	62
1.8 片光流动显示技术	78
主要参考资料	87

第二章 流动显示的光学方法	89
---------------------	----

2.1 概述	89
2.2 阴影法	91
2.3 纹影法	95
2.4 干涉法	105
2.5 莫尔偏折法	133
主要参考资料	146

第三章 表面流动显示技术	147
--------------------	-----

3.1 概述	147
3.2 表面油流显示技术	148
3.3 丝线流动显示技术	156
3.4 升华法	166
3.5 液晶流动显示技术	168
3.6 红外热像技术	178
主要参考资料	184

第四章 流动的测量	186
-----------------	-----

4.1	概述	186
4.2	压力测量	187
4.3	热线风速仪	205
4.4	热线(热膜)探头及其应用	216
4.5	激光测速仪	250
4.6	计算机控制的流场自动测量与显示技术	286
	主要参考资料	290
第五章 流动显示技术的新发展		294
5.1	概述	294
5.2	粒子图像测速技术	296
5.3	激光诱导荧光(LIF)流动显示与测量技术	333
5.4	全息照相和全息干涉术	349
5.5	激光—超声法	377
5.6	光学层析术	383
5.7	流场干涉图的图像处理技术	436
5.8	电子束流动显示与测量技术	460
	主要参考资料	490
第六章 流动显示的应用		496
6.1	概述	496
6.2	流谱分析的基本理论	497
6.3	物面流动和边界层分离显示	524
6.4	尾流和涡流显示	526
6.5	非定常流动显示	531
6.6	其他流动显示	534
6.7	数值模拟流动显示	537
	主要参考资料	537

绪 论

流体的流动、热量和质量的传输可以用实验和理论两种方法研究。实验的方法包括流动显示 (Flow Visualization) 和流动测量 (Flow Measurement); 理论的方法包括分析和计算。本书阐述了流动显示与流动测量实验方面的基本原理、基本设备、关键技术和应用。

流动显示的任务是使流体传输的过程可视, 而流动测量的任务是获得流体传输的定量信息, 它们是相辅相成的, 是流体力学的重要组成部分。通过各种流动显示与测量实验, 可以了解复杂的流动现象, 探索其物理机制和运动规律, 为人们发现新的流动现象, 建立新的概念和物理模型提供依据。流动显示与测量技术本身也是解决实际工程问题的重要手段。

流动显示与测量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。可以说, 流体力学发展中任何一次学术上的重大突破, 及其应用于工程实际, 几乎都是从对流动现象的观察开始。1883 年的 Reynolds 转捩实验; 1888 年的 Mach 关于激波现象的观察; 20 世纪初期 Prantl 用金属粉末做示踪粒子, 获得了一张沿平板的流谱图, 提出了边界层的概念; 1912 年 V. Karman 对水槽中圆柱体绕流的观察和 Karman 涡街的提出; 以及 60 年代对脱体涡流型的研究, 70 年代湍流拟序结构的发现; 80 年代对大迎角分离流的研究和分离流型的提出等等, 无一不是以流动显示和测量的结果为基础的。而对流动现象的深入分析又是建立和验证新的概念, 发现新的流动规律的关键。

近代流体力学和空气动力学的发展以及分离流型在新一代飞行器研制中的应用, 为人们对复杂流动 (例如, 分离流、旋涡流、湍流、非定常流等等) 研究提出了新的课题, 包括其机理研究和

应用研究。这些复杂流动一般是三维、非定常、非周期性、拟序的，其性态随时间和空间都发生变化，或具有复杂的空间结构，或流动是非定常的，往往二者兼而有之。应该指出，至今人们对这些复杂流动现象的捕捉和流动机理及规律的研究还很不够，其中重要原因之一是缺乏显示和测量复杂流动的手段。近十几年来，由于工程实践的迫切需要以及近代光学、激光技术、计算机技术、电子技术、信息处理技术的发展，为流动显示与测量技术带来了生机和活力，特别是在显示空间流动和流动内部结构的能力以及流动信息定量提取和分析处理方面有了长足的进步，可望在不久的将来取得对三维、非定常复杂流动定量显示与测量的重大突破。

1. 流动显示与测量技术的现状

至今出现的流动显示与测量方法繁多，通常把它们分成常规的和计算机辅助的两大类。前者又称第一代流动显示与测量方法，即传统的方法；后者又称第二代流动显示与测量方法，即流动显示和测量与计算机图像处理相结合的方法。

第一代流动显示与测量技术按其性质可分为四组：壁面显迹法、丝线法、示踪法和光学法，见表 0-1。它们分别适用于不同的速度范围。

表 0-1 常规的流动显示方法

方法	壁面显迹法	丝线法	示 踪 法			光学法
			直接注入	化学反应	电 控	
类 型	液体膜	表面丝线	固体粒子	化学的	氢气泡	阴影
	升华	丝网阵	液体	电解的	火花	纹影
	热敏涂层	荧光微丝	气体	化光的	烟线	干涉
	电浸蚀					全息照相
	可溶性化学膜					气流双光折射
						莫尔法
						液晶

(1) 壁面显迹法

壁面显迹法一般在物面涂以薄层物质, 当其与流体相互作用时, 在物面上产生一定的可见流型, 用以定性地, 在某些情况下甚至可以定量地推断物面的流动特性, 如层流、湍流和转捩位置, 分离点和分离区等。表面油流和荧光油流是较常用的方法, 借助于拓扑准则进行流谱识别; 升华技术常用于确定附面层转捩、分离流动、近壁面流动结构和壁面质量交换。热敏深层用于显示表面热交换。

(2) 丝线法

将细丝线、羊毛和尼龙丝等一端贴在物面上, 另一端顺气流摆动, 以显示物面的流态。可以显示层流、湍流和分离区的位置及涡核的位置等。做成丝网阵还可以显示空间流场。

80 年代初期, 发展了一种荧光微丝法。荧光微丝是染有荧光物质和经过抗静电处理的尼龙单丝, 直径只有 $0.01 \sim 0.04\text{mm}$, 将它贴在模型表面, 在紫外线的照射下, 可以清晰地显示模型表面流态。

(3) 示踪法

把示踪物质直接注入流场作为对比介质, 或利用化学反应在流体中产生示踪物质, 或利用电控产生示踪物质, 这些介质跟随流体一起运动, 使流动变成可视。烟迹(含烟丝)法, 染色线法, 氢气泡法, 氦气泡法, 激光—荧光法, 蒸汽屏法等等都属于示踪法。由于在流体中注入了粒子, 存在粒子跟随性问题, 用于定常流动显示效果较好, 用于非定常流动显示误差较大。

(4) 光学方法

传统的光学流动显示方法, 如阴影法、纹影法(含彩色纹影)、干涉法等用于有密度变化的流场。利用光的折射效应或利用不同光线相对的相位移形成图像, 显示某些流动现象, 如激波、旋涡、边界层转捩、激波—边界层干扰等。干涉法则可以定量地给出其密度场的变化。光学方法对流场没有干扰, 但有较大的局限性。阴影、纹影、干涉仪所得的图像是光线穿过流场路径上折射积累的结果, 虽然理论上可以从图像还原求出流场的密度分布, 但

分辨率不高，而且限于二维流场。基于干涉原理的一些方法能直接反映密度的变化，给出定量的结果，特别引起人们的重视，因此发展了多种型式的干涉术，如激光全息干涉，外差干涉，激光散斑干涉等。光学方法多用于高速流场测量中。

第二代流动显示与测量方法以含有计算机辅助技术为标志。图 0-1 给出了计算机辅助流动显示与测量技术包括的内容。在实验方面，以常规的流动显示设备和图像设备（常常是机械装置）为基础，用计算机图像处理系统作图像处理，然后用彩色显示参数的变化，给出丰富的流场信息和高质量的图像。在计算方面，注重实验与计算的结合，用流动显示或流场测量给出某些边界条件或进行全流场测量，然后用数值模拟方法进行计算，用计算机作图，最后以图像显示其结果。

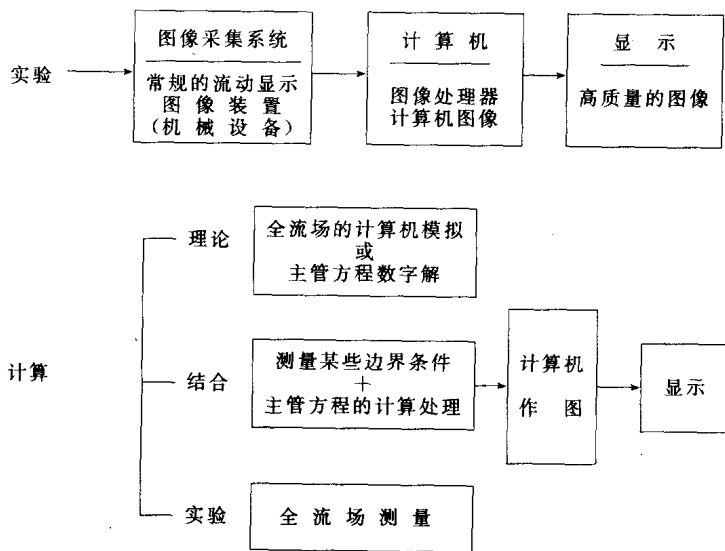


图0-1 计算机辅助流动显示技术

第二代流动显示与测量技术的关键是应用图像处理技术，它不仅提高了流动显示与测量数据处理的速度和精度，而且提高了显示图像的质量，把流动显示与测量技术提高到了一个新水平。

2. 新一代流动显示和测量技术

由于新一代飞行器研制和其他工程对复杂流动认识的迫切需要和激光技术、计算机技术、信息处理技术等巨大进步,促进了新一代流动显示和测量技术的问世和发展。近十几年来发展起以粒子图像测速(PIV)、激光诱导荧光(LIF)、层析技术(CT)、激光分子测速技术和光学表面测压技术为代表的新一代流动显示与测量技术,它们一般兼有定性显示和定量测量的能力,估计在90年代末期有可能实现对非定常复杂流动的空间瞬态结构的显示与测量,从而使对复杂流动的研究取得突破性的进展。

(1) 粒子成像测速

粒子成像测速(Particle Image Velocimetry)技术,简称PIV,80年代以来有迅速发展,目前已处于技术基本成熟的应用阶段。

PIV的基本原理是实验时在流场中播入粒子,用脉冲激光器发出的激光束经过一系列光学元件形成可调制的激光照射流场,用多次曝光记录粒子场在不同时刻的图像,测出在 Δt 时间间隔每个粒子的位移 Δl ,即可算出粒子的速度,在粒子的跟随性满足要求的条件下,粒子的运动速度可以代表流体的运动速度。

(2) 激光诱导荧光流动显示与测量技术

激光诱导荧光(Laser Induce Fluorescent)流动显示与测量技术,简称LIF,是80年代发展起来的一种光致发光流动显示与测量技术,它作为定性地显示流动结构,技术已相当成熟,然而它作为定量地测量流动参数,仍处在研究阶段。

光致发光流动显示与测量技术是把某些物质(如碘、钠或荧光染料等)溶解或混合于流体中,这些物质的分子在特定波长的光线照射下吸收光子而受激发光。实验时用脉冲激光片光照射,利用激发出的光不仅能显示流动结构,又可利用吸收和发射谱线的Doppler频移效应测量速度。其光强又是受激区气流密度和温度的函数,故可在显示流动结构的同时,用来测量密度、温度、速度、压力和浓度等参数。

目前,一般用激光诱导荧光方案。因为它有较强的亮度,也

便于做瞬时显示和测量。作为定性显示,它可以清晰地显示流场断面的流态,充分地揭示流动的内部结构。它也是非接触式瞬态流场很有潜力的测量手段,特别是用于高速流和大速度梯度流中。在这种情况下,由于粒子不能完全跟随流体一起运动,因而基于粒子散射的 Doppler 测速法不再适用,而基于分子发光的 LIF 技术则无此限制,因为 LIF 不存在粒子跟随性问题。

(3) 光学层析技术

层析 (Tomograph) 技术是 1967 年出现的,开始用于医疗诊断和材料的无损探伤,即所谓 CT (Computed Tomograph), 80 年代中期开始用于流动显示。它是一种先进的计算机辅助流动显示与测量技术。

层析技术是由多方位对流场进行观测所得到的“投影”重建三维图像的一种方法,主要用于三维流场的结构分析。目前已用于重建流速中某些标量的空间图像,如温度、密度、浓度分布等。

光学层析是流动显示中最常用的。阴影、纹影、干涉法等都可以用来得到多方位的“投影”,但目前比较流行的是干涉仪与计算机层析结合显示和测量三维流场。利用常规的干涉仪层析技术可以得到三维密度场和浓度场;利用全息干涉层析技术还可以得到三维温度场。不同断面的图像可以在不同瞬时得到,也可以在同一瞬时用多方位的干涉照相得到。前者只能用于定常流,后者亦可用于非定常流。图像重建可采用代数方法、卷积逆变换 Fourier 方法等。

层析技术用于流动显示目前仍处于研究阶段,由于多方位照射不是一次完成,或受时间分辨率的限制,一般只能用于定常流动。如果采用同一瞬时多方位高速层析照相 (时间间隔小于 $300\mu\text{s}$), 可望扩展到用于非定常流。

(4) 激光分子测速技术

激光 Doppler 技术通常分为两组:一组是依赖于随流体运动的 Doppler 频移,包括经典的激光 Doppler 测速法、激光移动风速测量法和激光 Doppler 光谱法等;另一组是直接测量与聚集分子

运动相关的 Doppler 频移, 包括激光诱导荧光法和相干喇曼光谱法的瞬时速度测量。

众所周知, 粒子投放技术是激光 Doppler 测速中的关键之一。研究表明, 即使是微米量级的动态粒子也可能给测量结果带来可观的误差, 特别是在流场中存在激波的情况。一般认为, 由于一些与粒子滞后的相关难题, 使得以粒子为基础的测速技术不能用于高速、低密度的流场中, 因此, 近年来以分子为基础的测速技术得以迅速发展。

激光分子测速的光谱技术依赖于被测流场介质组分的吸收谱线频率或荧光发射或散射光谱中的 Doppler 频移, 由于这种方法直接从分子运动中获得速度, 从而避免了由于投放粒子带来的弊病, 不仅测速真实, 精度较高, 而且适用于高速。

基于上述原理, 目前发展了多种光学测速技术, 如激光诱导 Doppler 综合测速 (DGV), 滤波瑞利散射法 (FRS), 相干喇曼光谱法 [包括相干反斯托克喇曼光谱法 (CARS), 反喇曼光谱法 (IRS), 受激喇曼增益光谱法 (SRGS)] 等。相干喇曼法比自发喇曼法具有更高的信噪比, 可以用大量存在于风洞中的氮分子做为介质组分, 因此在风洞测量中很有吸引力。此外, 它能在测速的同时测量压力和温度, 也是一大优点。

(5) 光学表面测压技术

最近, 由美国华盛顿大学、麦道公司、俄罗斯 TsAGI 研制和使用的光学表面测压技术引起了人们的极大关注和兴趣, 被认为是流动测量的一项重大革新。

光学表面测压的基本原理是将一种压力敏感涂料涂于模型表面, 在紫外线光或其他给定波长光的照射下, 涂层发出可见波长的荧光, 其亮度与作用在涂层表面空气或任何含氧气体的绝对压力成反比, 用 CCD 摄像机记录模型表面的图像, 并通过计算机处理, 可以给出模型表面的压力分布。

光学表面压力测量要求光源具有足够的亮度和照射的均匀度, 模型表面涂层的亮度用绝对压力进行标定并存储在计算机中,

在风洞“不吹风”和“吹风”两种状态对每一个模型姿态记录表面的图像,通过计算机与标定压力数据比较获得模型表面的压力分布。最近麦道公司用可见光代替紫外光,更有利于现场观测和保护眼睛。

目前,该项技术在国外已用于多种型号的风洞模型试验,但还存在许多问题。例如,由于对低 Ma 数流场不敏感,用于低速测压还有困难,对测压环境(例如灰尘、振动等)要求很高,长时间稳定性较差,对模型表面加工和同一颜色均有很高的要求。

在本书的第一、二、三章主要阐述经典流动显示的原理、方法和应用;第五章重点阐述新一代的流动显示和测量技术,由于激光分子测速技术尚不成熟,光学表面测压技术仍处在发展阶段,故在本书中未做阐述。

3. 流动显示与测量技术的发展趋势

(1) 多种流动显示与测量方法的综合使用

目前,可使用的流动显示与测量方法很多,这些方法各有所长,又各有一定的使用条件和流速范围。在一个研究项目中往往把多种流动显示和测量方面综合使用,互相补充,相互验证,以获得丰富而可信的复杂流动信息。例如,美国在航天飞机气动设计研究中,就用油流、升华、液晶,荧光微丝、红外热像等多种方法显示和测量表面流动和热状态,而用烟流、蒸汽屏、阴影、纹影、全息干涉等多种方法显示和测量空间流动。

(2) 以瞬时、定量、三维流动显示与测量为目标,发展多种新的流动显示与测量技术

目前,最引人注目的是 PIV、LIF 和光学表面测压技术。PIV 已进入实用阶段,能够测量三维瞬时的速度矢量场,受脉冲式激光器功率的限制,目前在生产性风洞中使用尚有困难。LIF 既能定性显示流场又能定量地测量速度、温度和密度等参数;既可用于低速流动,又可用于高速流动,虽然技术难度较大,投资费用也很高,但确实是一种很有发展前途的流动显示与测量技术。光学表面测压的最大优点是模型测力和测压可以同时进行,节省了

制造常规测压模型和单独进行模型测压试验的费用，又能得到用常规打孔测压模型试验难以得到的某些模型部位（如机翼前、后缘附近）表面的压力信息，因此这项新的测量技术是很有吸引力的。

（3）流动显示和测量技术与计算机结合

包括用计算机对流动显示与测量系统实施控制；用图像处理系统处理后得到清晰的图像；把二维图像进行三维重建，获得空间流动结构和定量的结果；把用照相机或摄像机记录的图像用图像处理系统进行 A/D 转换和数据处理，最后以等值线或其他直观的形式显示在计算机屏幕上或用绘图仪给出相应的图形。

（4）流动显示和测量与计算流体力学（CFD）结合

用各种流动显示与测量方法提供必要的边界条件和物理模型，例如，涡核的位置，附面层转捩位置，分离点和分离区，激波位置等等，以提高数值模拟精度；同时，数值计算的结果又有助于对流动图像的分析。

主要参考资料

- [1] Wen-jei Yang. Handbook of Flow Visualization. Chapter 1. 1989
- [2] 崔尔杰，洪金森. 流动显示技术及其在流体力学研究中的应用. 空气动力学学报. 1991. 9 (2)
- [3] Fan Jiechuan et al. Several Flow Visualization and Survey Techniques Developed Recently in HARI. Conference of the First China-Russia Aerodynamics, 1991. 3
- [4] 范洁川. 流动显示技术的若干现状与发展. 气动实验与测量控制, 1995 9 (1)

第一章 示踪粒子空间流动显示技术

1.1 概述

示踪粒子空间流动显示技术是在透明无色的气流或水流中加入一些可见的粒子，如果这些外加的示踪粒子能跟随流体微团一起流动，人们就可以通过可见的外加粒子的运动来观察流体的运动，从而使各种流动现象显示出来。这样，人们能通过目视或照相等方法对气流或水流的运动状态进行直接观察，使我们在感性上获得整个绕流流场的直观形象及其流动发展全过程的流谱图画。该类显示技术已成为理解流动现象和建立反映流动主要特征的理论模型的重要手段。

尽管示踪粒子空间流动显示技术在实验流体力学中是一项十分古老的技术，但是随着近代流体力学和空气动力学的发展，特别是对各种复杂流动现象深入研究的需要，近年来该类流动显示技术得到了新的发展。随着计算机应用的引入，流动显示技术由定性向定量化方向发展，由显示定常流场向显示非定常流场发展。

在学习各种空间流动显示技术中，除应很好掌握其本身的实验技术、方法和技巧外，还必须深入理解和掌握下述三个基本问题：

(1)人们在显示实验中直接看到的是示踪粒子的流谱图画，它是否真实地反映绕流流动的实际流谱？如果它能反映实际绕流的真实流动，那么由示踪粒子显示的流谱是代表了真实绕流流动现象中的哪个流动特性参数？

(2)由于在流场中加入示踪粒子，由此往往对真实绕流带来附加的干扰，所以在应用中还必须掌握显示技术的使用条件、范围及显示结果的误差量级。

(3) 流动显示的目的在于了解复杂流动的各种绕流现象和流动结构, 所以我们应通过对所显示的流谱进行理论分析, 以揭示复杂流动的现象、结构和机理。

为了清楚和全面地揭示一个复杂绕流的流动现象和流动结构, 往往不能依靠单一的显示技术, 而需要多种显示手段从各个不同的侧面和角度去揭示复杂绕流流场中的各种特性。有时甚至还应与其他各种测量技术如测压技术、空间流场测量技术等一起配合进行。特别是对一些新的流动现象的揭示和新的流动机理的认识, 这种显示手段和测量手段的互相配合与互相验证显得格外重要。

目前, 外加示踪粒子的流动显示技术应用十分广泛, 特别是和数字图像处理技术相结合, 近年来正在发展的多种瞬态全流场测量技术, 例如粒子图像测速技术 (PIV), 激光诱导荧光测速技术 (LIF) 等将成为今后流体力学中测量复杂的三维非定常流动的有力手段。这些先进测量技术建立和发展都是以示踪粒子的流动显示技术为基础的。本章将首先讨论示踪粒子流动显示技术的一些基本概念和原理, 在此基础上介绍各种示踪粒子的显示方法, 并以氢气泡显示技术为典型, 详细讨论了示踪粒子显示技术的测速方法、影响测量精度和准确度的诸因素分析。其他的各种显示方法, 在测量原理上和精、准度分析原理都基本类似, 不再逐个作详细分析。在介绍每种示踪粒子显示方法特点的基础上, 还对它们在流体力学和空气动力学中的实际应用进行简要讨论。

1.2 示踪粒子流动显示技术的基本概念和原理

1.2.1 迹线、流线和脉线

为了描述流场中流体的运动, 通常有两种方法。一种是沿用描写刚体运动的方法来描述流场中每个流体微团的运动, 这就是拉格朗日法。它着眼于每个特定的流体微团。由于流场中有无穷多个流体微团, 就需要给每个微团命名, 通常就取某个特定时刻 t_0 时各个微团所在的坐标 (a, b, c) 来标注它, 不同的 $(a, b,$