

国外流动显示技术进展*

中国科学院力学研究所 罗明晖 呼和敖德

一、概 述

流动显示是流体力学、空气动力学的一种重要实验手段。由流动显示的信息所形成的流谱，对于流体力学基本现象的发现与认识，对于理论研究数学模型的建立，对于生产实际中大量流体力学应用问题的解决，都有着巨大的作用。同时，流谱也有助于人们建立对流动现象的感性认识。

流动显示是一门古老而又正在发展着的技术。在流体力学领域内，其最早的出现是1879年 O. Reynolds 在水平圆管内利用直接注入颜色水方法所进行的层流、湍流及其转捩的实验^[1]。自此以后，这一技术便不断地完善与发展。但是作为一个实验技术领域而真正地形成自己独立的体系，那还是近一、二十年的事。1960年美国机械学会主持召开了流动显示技术会议。这个会议为流动显示技术的广泛应用与发展，创造了一个良好的开端。从1973年开始，日本每年举行一届全国流动显示学术会议，而1977年第5届会议时，就作为第1届国际流动显示学术会议在东京召开^[2]。这次会议有8个国家参加，共宣读论文54篇(详见表1)。1980年在西德召开了第2届国际流动显示学术会议^[3]。这次会议比上次会议规模大得多，有18个国家参加，共宣读论文120篇(详见表2)。

表 1 第1届国际流动显示学术会议论文统计表

	日 本	捷 克	西 德	美 国	印 度	法 国	加 拿 大	荷 兰	总 计
一 般	1	1	1	1					4
壁面示踪法	3								3
直接注入示踪法	8		3	3	1	2	1		18
化学、电控方法	9			1					10
光 学 方 法	3		4	4	1	1	2	1	16
其 他	2			1					3
总 计	26	1	8	10	2	3	3	1	54

* 本文根据1982年4月第1届全国流动显示及应用学术会议(厦门)上的同名报告整理改写而成。

表 2 第 2 届国际流动显示学术会议论文统计表

	澳大利亚	加拿大	中 国	捷 克	法 国	西 德	匈 牙 利	印 度	英 国	日 本	荷 兰	墨 西 哥	波 兰	瑞 士	美 国	总 计	
按 课 题 性 质 分 类	综 述					1			1						1	3	
	燃 烧				1	1	1		1	1					1	6	
	传 热				1	2	1		1	3	1					9	
	分 离 流	1	1			1	1		1	4					2	11	
	多 相 流		1			1	2	1					2		3	10	
	分 层 流					1	3			1					1	6	
	边 界 层		1			1			1	1					2	6	
	尾 流、旋 涡					3	1		1	3				1	1	10	
	激 波		1				1			1						3	
	流 变					1	1			1					1	4	
	超 音 速 流			1		1									1	3	
	表 面 流						1			1	1				3	6	
	流 体 工 程				1		3				5	1	1			11	
	医 学		1				3								1	5	
	设 备	1					1				3					5	
	方 法			2		2	7				2				6	19	
总 计	2	5	3	3	14	27	1	3	4	26	2	1	2	1	23	117	
按 显 示 方 法 分 类	一 般	1				2	4		2	3					2	14	
	壁 面、丝 线 法								1	4					3	8	
	直 接 注 入 示 踪 法	1	2		2	6	5		2	1	12	1	1		1	9	43
	电 控、化 学 方 法					2	3		1		3				4	13	
	光 学 方 法		3	2	1	4	15	1			3			2	4	35	
	其 他			1							1	1			1	4	
	总 计	2	5	3	3	14	27	1	3	4	26	2	1	2	1	23	117

从两届学术会议上宣读的论文来看，第 1 届学术会议的论文大部分是关于显示技术方面的文章，约占 64.8%；而第 2 届会议的文章则偏重于应用性课题，其文章数量约占 77%。从显示方法方面来看，应用最多的是直接注入示踪法，两届会议共有文章 61 篇，占 35%；其次是光学方法，共有文章 51 篇，占 29%；化学方法和电方法的文章也不少，占 13.2%。从各参加国宣读的文章数目来看，日本宣读的论文最多，两届共 52 篇，占总数的 29.9%；其次是美国和西德，各是 33 篇，均占 18.9%；法国共宣读论文 17 篇，占 9.8%；中国 3 篇，占 2.5%。

目前，世界各国流动显示技术发展很不平衡，少数几个国家发展较快，日本比较突出。

日本最早是在二次世界大战以前,从利用烟流进行二冲程发动机流动显示开始,后来便利用风洞、水洞及其他设备不断地进行显示工作。第二次大战后又不断地进行改进与提高技术水平。目前流动显示技术已广泛地应用于航空、海洋、机械、建筑、传热、化学、物理、气象以及医学等许多领域。在显示技术方面,主要致力于下述四个方面的工作:1)扩大流动显示应用的流体速度范围,从低速自然流到超音速流;2)从定性的流线显示,扩展到给出定量数据;3)速度分布的显示;4)从定常流显示扩展到非定常流显示^[4]。

美国和加拿大的流动显示工作主要是在一些大学和专业研究机构进行。课题研究广泛,大部分偏重于工程实际。在显示方面,较侧重光学方法和直接注入示踪法^[5]。

西欧各国以西德为主,主要致力于定量的研究、灵敏度的提高和技术应用等方面,比较擅长光学显示方法特别是激光技术显示^[6]。

法国在流动显示技术方面比较突出的单位是ONERA,主要致力于用低速水流显示模拟高速飞行器的气动问题。至今已有20余年的历史,获得了大量的彩色流谱照片。尽管相似条件比较困难,但还是有助于对基本问题的解决^[7]。

二、流动显示技术的发展

流动显示技术本身包括流动显示设备、流动显示方法、流动显示的记录手段和流动显示的图像处理与数据分析等几个方面。

1. 设备 目前,世界各国所应用的流动显示设备种类繁多,大小不一。有通用的设备,也有专用的装置。但,显示用的设备发展到现在,大体上可分做两大类,即水介质设备和气动设备。在水介质设备中包括有各种水洞、水槽、水池以及管流装置等;气动设备中则包括有各种常规风洞、烟风洞、特种风洞以及各种气流装置。

水洞 已建成的水洞种类很多,有二维的,也有三维的;有卧式水洞,也有竖式水洞;有回流水洞和开路水洞,还有空泡水洞等。这些水洞大部分是为水利工程、船舶工程建造的。然而法国1952年建成的竖式水洞,却用来为航空工程服务。

水槽 可分为回流水槽,开路水槽和拖曳水槽等几种。世界上最早的水槽是1897年由Hele Shaw建成的。1926年又建成了一座只有1厘米的窄水槽。水槽的工作介质不仅可以是水,还可以用油或石油等。目前应用最多的是拖曳水槽。这种水槽动力小,运转费用低廉,测量方便,但是由于结构尺寸都不大,所以主要用于基础性课题的显示实验中。回流水槽大部分服务于船舶、海洋、环境等科研领域。日本海洋环境技术研究所的回流水槽实验段为 3.8×4.8 米,长60米;功率为200千瓦。此外,还有各种尺寸的船池。有的船池附有造波机构和海气相互作用实验装置。英国一座船池长度为400米。

烟风洞 烟风洞已有几十年的历史,最初只是供流动现象的表演用。现在已被应用于一些课题的研究。有的烟风洞实验段尺寸在1米 \times 1米以上,最大风速可到50米/秒或更高。

各种常规风洞 流动显示是常规风洞的一种重要实验手段。常规风洞包括低速风洞、跨音速、超音速和高超音速风洞。目前世界各国的常规风洞数量相当多。这些风洞大部分为航空、航天服务,也有一部分是为工业空气动力学,环境保护服务。

各种特殊风洞 包括激波风洞、电弧风洞、管风洞以及炮风洞,弹道靶等设备。这些风洞都各有特点。一般都是高速、高温、高雷诺数。因此,在这类风洞中主要是应用光学方法

进行显示, 对于其他方法的应用, 则受到一些限制。

2. 显示方法 显示方法的发展尤为迅速。古老的方法至今仍然被广泛地应用着, 而新的方法、新的技术又不断在涌现。自从 1879 年古老的注入染色水示踪法出现以后, 1880 年 Dvorak 提出的阴影法, 1892 年 M-Z 干涉仪的制成以及 A. Toepler 在 1906 年重新发表的纹影法, 为光学方法在显示技术领域内的应用打下了坚实的基础。1914 年 H. L. Rubach 利

表 3 流动显示方法一览表

	方法名称	介质	流速范围	适 用 例	
壁面示踪法	油膜法	气、水	5米/秒— $M=7$	物面流、圆柱面层流分离	水10—30厘米/秒 水0.5—4米/秒
	油点法	气、水	20米/秒— $M=20$	"	
	升华法	气	10米/秒— $M=2$	物面流; 射流与物面相互作用	
	药膜溶解法	水	1厘米/秒—4米/秒	物面流, 边界层, 水面波	
	电解腐蚀法	水	1—10厘米/秒	物面流	
	感温涂料法	气	150米/秒— $M=7$	物面流, 边界层, 热传导	
丝线法	表面丝线法	气、水	10厘米/秒— $M=1$	物面流	水—1.5米/秒
	网格丝线法	气		内部流、物体绕流、建筑物绕流	
	纵深丝线法	气		物体尾流、管流、通风	
	细棒丝线法	气		"	
直接注入示踪法	流脉显示法	气、水	10厘米/秒— $M=1.5$	物体绕流、尾流、管流、射流	水—10米/秒 水—10米/秒
	流迹显示法	气、水	1—20米/秒	"	
	悬浊法	气、水	0—50米/秒	"	
	表面浮游法	水	0—5米/秒	船波、风波、振动物体	
	时线法	气、水		速度分布	
	其他方法				
化学示踪法	物面涂膜发色法	气、水	5—30米/秒	物面流、机械内流	水0.4—5米/秒
	物面注入反应法	气、液		物面流、绕流	
	流体反应发色法	气、液		射流、涡轮运动	
	流体反应消色法	气、液		物体绕流、尾流	
	延迟发色法	水	0.5—5厘米/秒	死水区	
	电解沉淀法	水		定常、非定常绕流	
	电解液发色法	液	0—4厘米/秒	低速管流速度分布、热对流	
电控法	氢气泡法	水	0.05—7米/秒	定常、非定常流、速度分布、尾流	
	火花追踪法	气	7米/秒— $M=3$	"	
	烟丝法	气	0.3—4米/秒	"	
	纹影法	气		密度变化、激波、物体绕流	
	阴影法	气		"	
	干涉法	气		"	
	激光全息法	气		流场	
	蜃景法	水		自然对流	
	放电法	气		激波、稀薄气体	
	双折射法	液		剪切流	
	水面干涉法	水		表面流	
	温度分布法	固、水		表面温度分布	

表 4 油膜组分

	油	颜 料	填 料	混 合 比	流 速 范 围	备 注
空	柴 油	TiO ₂	油酸	100克 : 135cm ³ : 2 cm ³	100米/秒	
	浓 机 械 油	TiO ₂	"	—	M=0.7-1.61	
	液 体 石 蜡	"	"	—	40-80米/秒	
	轻 机 械 油	"	"	—	100米/秒	
气	"	"	月桂酸	2 : 1 : 微量(V)	M=0.3-1.2	
	液 体 石 蜡	油烟	油酸	3 : 1 : 微量	M=0.45	
	硅 油	油烟	"	—	M=5.6	
	石蜡加亚麻籽油	TiO ₂	"	35cm ³ : 25克 : 5 cm ³	50米/秒	
水	泵 油	TiO ₂	油酸	10-30 : 10	3-15米/秒	
	润 滑 油	Pb ₃ O ₄	油酸	2 : (3+3)	2米/秒	
	油 脂	Pb ₃ O ₄	—	3 : 1 (V)	10米/秒	
	液体石蜡加润滑油	油烟	油酸	—	0.4-1米/秒	
	柴 油	Pb ₃ O ₄	—	—	1.0米/秒	

用铝粉在静止的水中显示了圆柱突然运动时的流动状态；同年 C. Wieselsberger 利用烟在风洞中进行了球的边界层转换实验，这就是固体粒子示踪和气体粒子示踪法的开始。

1920年 J. A. G. Haslan 首先利用丝线法观测了实际机翼的流动状态，紧接着这种方法便不断地被应用于风洞的显示实验中。1927年富冢利用燃烧氧化镁的方法在风洞中进行了气流观测。1930年出现了化学反应示踪法，但是化学方法的真正被采用还是在50—60年代。1932年 Farren 利用烟风洞进行了物体绕流显示；同年 Townend 在风洞中成功地应用火花追逐法给出了边界层内速度分布。K. W. Clark 在1933年又将丝线法与油流法同时使用，进行显示。到1950年烟丝法由 Raspet 和 Moore 研究成功。Geller 于1955年在水介质中首先用氢气泡法进行了显示。到了60年代，激光技术的兴起为流动显示增添了新的力量。激光干涉仪的应用要比马氏干涉仪的应用广泛得多；而在1966年 Heflinger 又把激光全息技术应用到了风洞中。到目前为止，各种各样的显示方法已有几十种。对如此众多的显示方法如何进行分类，国际上尚未统一。有人分成为“静态法”和“动态法”两大类；有人则分为示踪物法、壁面法和光学方法三大类。本文则参照日本浅沼强教授的分类方法，将各种显示方法列如表3所示。

不同的显示方法所得的流谱照片图案也不尽相同。但对同一模型，尽管采用不同的方法，而其显示结果的图案规律还是一致的。

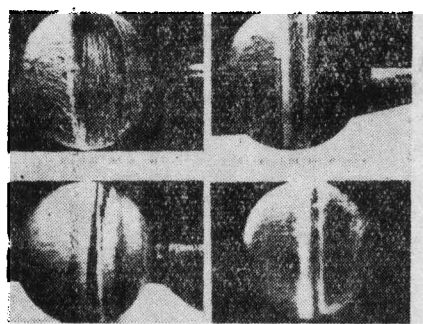


图 1 球体绕流（油膜法）^[8]

壁面示踪法 这种方法就是把示踪用的涂料涂布到物面上，或浸泡在物面上。这样，当流体流过时，涂层便可显示出流动状态。这种方法主要用来显示物体表面的流动，适合于气体或液体的定常流，对于非定常流只能观察到时间的平均流态。所用的涂料不同，方法的名称及其适用范围也不同。油膜法、油点法所用的涂料为各种油，如表4所示。升华法则采用樟脑等。药品涂膜溶解法的涂料主要是一些化学药

品,如安息香酸等。感温涂料法则是利用液晶对温度敏感的特性来显示物面的温度分布。图 1 是采用油膜法显示的球体表面流谱。

丝线法 在物体表面上安放一些丝线,一端固定在物面上,另一端随流体自由飘浮,或气流的通道上布置一些网格,将丝线的一端拴于其上,由此便可判断流动方向。这种方法最初只限于在气体介质中使用,后来也有人在水中利用此法进行显示,这种方法目前还只是适用于亚音速流。近些年来又出现一种荧光丝线法,该法与一般丝线法的区别主要在于所用的丝线表面涂有一层荧光物质,这样在紫外光照射下便可发光,从而更利于观测。

直接注入示踪法 将示踪物质直接注入到流体中,从而示踪流线、迹线或流脉。示踪物质有气体、固体或液体。这虽然是一种古老的方法,但却又是目前应用最广的一种方法。适

表 5 直接注入示踪法一览表

直接注入示踪法	流脉显示法	烟法	{ 香烟 卫生香
		雾法	{ 煤油、石蜡油 干冰法 四氯化钛
		彩色流脉法	
		炼乳法	
	流迹显示法	气泡法	{ 肥皂泡(气)、氦泡(气) 空气泡(水)
		油滴法(水)	
		发光粒子法(水)	
	气体示踪法(水)	空气泡法	
		气穴法	
	液体示踪法(水)	悬油法	{ 铝粉法(水) 聚苯乙烯粒子法(水)
		固体示踪法	{ $(C_{17}H_{35}CO_2)_2Zn$ 法(气) 炭粉法(气) 玻璃粉法(水)
	表面浮游法		
	时线法	烟时线	
		彩色时线	{ 彩色线 激光发色法
生物体显示法	{ X光透视 显微镜观察		
其他法	臭氧法		
	光致发光		

于气流，也适于水流。速度范围可从每秒几毫米到超音速流。在直接注入法中，根据示踪物质的不同，又可分成若干种方法（见表5）。从目前情况看，用得最多的是烟流法、铝粉法和彩色液体法。

· 化学反应示踪法 利用物体与流体之间或流体与被注入流体之间发生化学反应时所出现的颜色变化，如产生颜色、消去颜色或延迟产生颜色等特点来进行显示流动状态。这种方法主

表 6 化学 反应 法 分 类

化学 反应 法	非 电 解 法	物 面 反 应 法	物 面 涂 膜 发 色 法	气 流	1. pH 试剂、氨法
					2. pH 试纸、盐酸、氨法
					3. 铅化物、硫化氢法
					4. 甘汞、氨法
					5. 晒图纸、氨法
			水 流	1. 铅白、硫化铵法	
				2. 甘汞、氨法	
				3. 茚满三酮、环氧树脂、氨法	
				4. 氯化铁、焦赝酚法	
				5. 碘化钾淀粉、硫代硫酸钠	
物 面 注 入 反 应 法	气 流	1. 四氯化钛、湿气法			
		2. 四氯化锡、湿气法			
		3. 四氯化硅、湿气法			
		4. 四氯化硅、氨法			
	液 流	1. 金属、百里酚兰、盐水法			
2. 金属、酚酞、盐水法					
流 体 间 反 应 法	流 体 反 应 发 色 法	气 流	1. 氨、盐酸法		
			2. 氨、二氧化碳法		
			3. 氟化硼、湿气法		
	液 流	1. $C_8H_7N_3O_2$ 法			
		2. pH 试剂法			
流 体 反 应 消 色 法	水 流 液 流	1. 酚酞法			
		2. 百里酚兰法			
		3. 高锰酸钾法			
延 迟 发 色 法	水 流	1. 淀粉、亚硫酸钠、碘化钾法			
		2. 过硫酸钠、碘化钾淀粉、亚硫酸钠			
电 解 法	电 解 微 粒 子	水 流	1. 电解沉淀法		
			2. 碲法		
	电 解 液 发 色 法	液 流	3. 电解 pH 试剂法		
			4. 电解 $C_8H_7N_3O_2$ 法		
			5. 电解碘化钾淀粉法		

要适于低速、低雷诺数流动的显示。其中用得较多的是电解沉淀法和指示药法(即酚兰法)。在化学反应示踪方面,日本应用得较多。近些年来又出现光化学方法,即利用物质的光化反应特性来显示流动。有关化学反应示踪法的细致分类,如表6所示。

电控示踪法 严格地讲,象电解一类的方法也应归属此法中,但目前习惯上只把氢气泡法、火花追迹法和烟丝法作为电控法。氢气泡法只适用于水流中。它是在水流中的适当位置放一细金属丝(一般约 $5\mu-200\mu$)作为阴极,在另一处放一阳极,通以直流电,在阴极处便产生氢气小泡,随水流动,从而便可示踪。作为阳极的金属丝形状不同,则产生的流谱图案形式也不同。目前常用的电极形状如表7所示。火花追迹法是在气流中放置适当形状的电极,电极间施以高压高频电流。极间气体放电形成电火花,利用此火花进行示迹。由于火花频率很高,因此可适于高速气流显示。图2是典型的显示照片。烟丝法与烟风洞显示不同。烟丝法是利用一根电阻丝,涂上一层石蜡或石蜡与机油的混合物,然后通以大电流,这样便产生白烟,供气流显示用。



图2 机翼绕流(火花追迹法)^[1]

表7 电极形状与氢气泡图案

名称	直线形电极	锯齿形电极	斑斑形电极	梯形电极
形状	阴极丝 支杆	阴极丝	阴极丝 绝缘层	阴极丝 绝缘层
直流电源	气泡	气泡	气泡	观察窗 气泡
脉冲电源				

光学方法 光学方法的特点是不扰动流场,属于非接触性测量。因此适于可压缩流动中的显示。同时,光学方法的测量精度也较高。也正因如此,古老的经典光学方法虽然已有一百年的历史,但是至今在流动显示中仍具有强大的生命力。而激光技术又为经典的光学方法增添了新的内容。阴影法表征位置差,阴影法与正面光相结合,成功地观测了弹道靶模型的边界层等。采用激光光源,增加了阴影法的测量范围。纹影法表征方向差,这种方法也不断在发展。为解决跨音速开孔风洞的流场显示,有多孔壁纹影仪出现;此外还研制成功了彩色纹影仪、高速纹影仪、干涉纹影仪等;在定量方面有“定量纹影仪”的出现;单向放大纹影可以提高垂直于气流方向上的放大倍率,对于薄边界层的观察起了很大作用。干涉仪,长期以来均因其造价昂贵而未得大量发展。但是从它与激光技术结合后,便迅速发展。这主要是

由于激光的单色性好，使干涉法做定量测量比较方便，且设备也简单。

激光全息可以记录下流场中的全部信息，包括位置差、方向差、光程差等。这样一张全息照片便包括有多种经典光学方法所得到的结果。同时，全息术对于三维流场的显示有着重要意义。

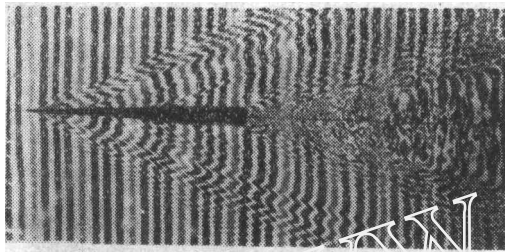


图3 尖劈绕流(表面干涉法)

此外还有蜃景法，主要用来显示温度场，显示中有海市蜃楼之景，故而取名；放电法，利用气体放电发光的原理，根据发光强度来观察密度差，可用来显示激波现象等；温度分布法，根据固体表面或液体表面发出的红外线强度不同，用红外接收仪记录；表面干涉法，利用物体在液面上运动时造成的液面波纹，对光线折射情况不同的原理，产生类干涉

状条纹进行显示，如图3所示。

综上所述，显示设备和显示方法种类很多，对于不同的课题，则需选择不同的设备和方法。没有十全十美的设备，也没有十全十美的方法，各有各的适用范围。当然，这众多方法中应用最多的还只是几种方法，尤其是直接注入法和光学方法。

三、流动显示技术的应用

流动显示技术的应用范围很广，除流体力学基础课题研究以外，还包括有航空、海洋、大气、船舶、医学、机械、农业、建筑、化工等各领域。

1. 流体力学基础研究 随着生产和科研的发展，许多旋涡流、分离流等问题被提了出来，如三维分离、非定常分离、非定常涡系的发生、发展和破碎过程等问题，均属尚未完善而有待解决的问题。在边界层实验方面，尽管有人曾对边界层的风洞实验结果提出质疑，但是流动显示在揭露边界层的流动物理图案方面却颇为有效。壁面示踪法、正面光显示等均是对边界层显示行之有效的方法。湍流和剪切湍流是流体力学尚未完全解决的难题之一。对于其机理的实验方面，流动显示方法起了重大作用。壁面剪切湍流的有序结构就是Kline等人在1967年用氢气泡方法发现的。目前，湍流结构的实验观测仍在进行着。有关多相流、分层流的显示实验也进行了很多。总之，流动显示技术对于流体力学基础研究有着广泛的应用。从第2届国际流动显示学术会议的论文数量看，这方面的文章共占总数的60%左右。图片4—7是典型的显示结果。

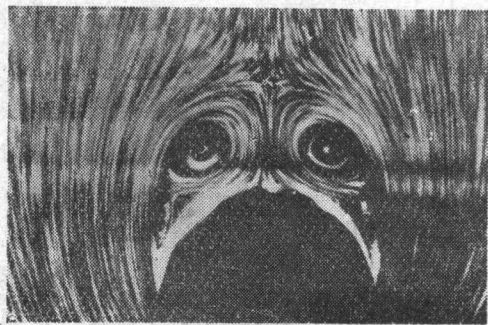


图4 圆柱绕流猫眼涡^[10]

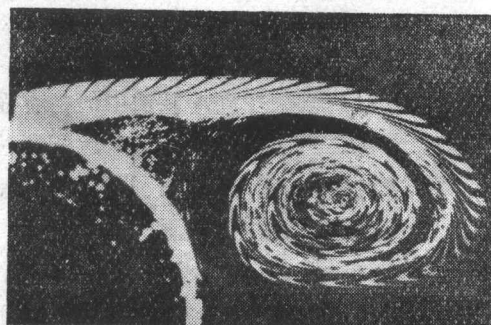


图5 圆柱非定常起动涡(氢气泡法)^[11]

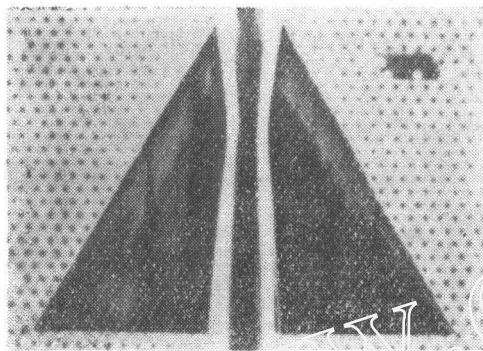


图6 翼面边界层的转换(液晶法)^[12]

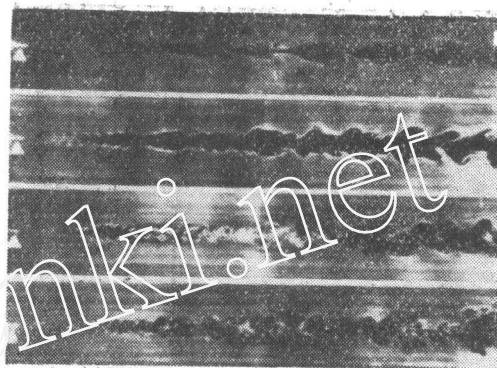


图7 圆柱体尾流(卫生香法)^[13]

2. 在生产方面的应用 流动显示技术在工程实际、生产等方面的应用尤为广泛。

航天、航空 各种风洞对飞行器气动特性的实验起着巨大的作用。在20年代就已经用丝线法在风洞中显示了机翼的流动状态。从50年代开始,法国ONERA又在水洞中利用直接注入彩色液体的方法进行了机翼、机身的流动显示,获得十分漂亮的流谱照片(图8)。而当代流行的新的亚跨超战斗机,大攻角、细长机身以及高机动飞行的身翼,都将产生非常复杂的前缘涡系并存在着各涡系的相互作用问题。有的战斗机就是利用了这一特性,从而大大提高了机动性能,并缩短了滑跑距离。流动显示技术在这方面有着极大的优越性。

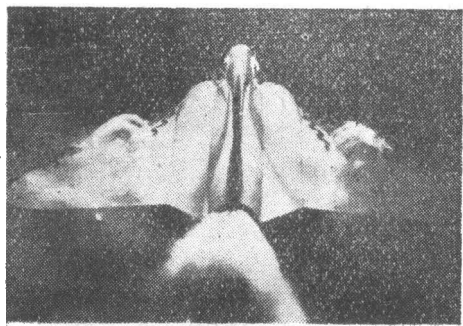


图8 飞机模型流动显示
(彩色流脉法)^[14]

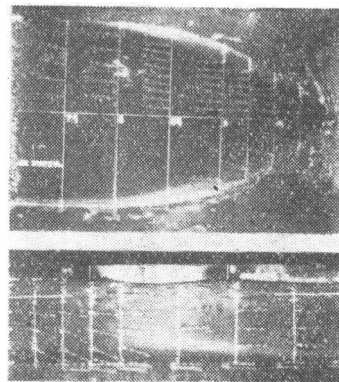


图9 船体模型表面流动(上)(涂膜溶解法)船身模型流谱(下)(丝线法)^[15]



图10 排烟实验(烟着色方法)^[16]

船舶工程 船舶的实验除了在大型船池内进行外,还可在水洞、水槽中进行。日本在利用回流水槽进行船舶外形的实验方面取得了很大的成就。所用的显示方法主要有丝线法、荧光涂料法、药品涂膜溶解法(图9)等。

海洋工程 海洋工程问题相当复杂,有关的流体力学问题,用显示方法可以有助于问题的解决。海洋平台支撑的流动特性是重要的,其他诸如海水的流动、密度的分布、海气相互作用、港湾波的传播与滞止等问题,均有重大意义。

环境 环境包括有大气、土壤、水域等,近些年来主要问题之一便是环境污染问题。其中排烟污染最为重要(图10)。排烟问题包括烟对大气湍流的影响,烟粒子运动轨迹,风烟影响等问题。排烟实验可以在现场进行实地观测,也可以在实验室利用设备进行。在对于河流污染,建筑物污染方面也进行了显示研究。

大气 大气湍流、台风形成等也都进行了显示。图11所示是天空中所形成的一个问号形式涡卷。上方直径约3000公里,下方的一个点,直径约500公里。



图 11 大气中的“问号” [17]

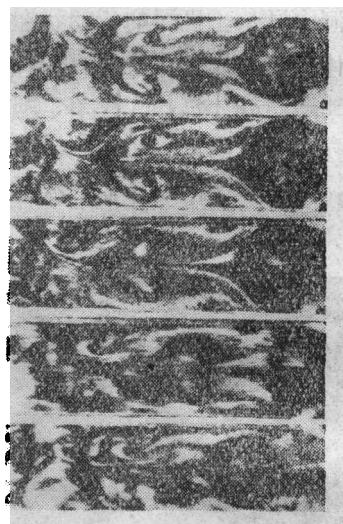


图 12 血管中血栓流显示
(铝粉示踪法) [18]

医学 广义地讲,在医学领域内所应用的X光透视、血管造影、钡餐、显微观测等均是属于显示的范畴。但更为明显的,还是近些年来所进行的体外模型实验。用氢气泡方法对人工心脏瓣膜进行了显示,用铝粉法显示了血栓存在时血管内的流动(图12)。对于动脉硬化、动脉瘤、血管支叉及细部的流动也进行了显示研究。在这些情况下均可观察到旋涡、分离等现象。

机械工业 各种旋转机械、发动机、汽车、水轮机、空压机、油压机等均存在有大量的流体力学问题,内部流动相当复杂。这些问题的解决对于提高机械的性能,有着重要意义。因此,在国外的机械领域研究中,流动显示技术有着广泛的应用。泵、水车的叶片,其回转状态已用油膜法清楚地进行了显示。而且有人用染色水、气泡法进行了轴流泵的流动实验。压缩机、风机主要是涡轮的流动特性显示,所用的方法有丝线法、电控法等,对于超音速轴流压缩机可以用光学进行显示。火花追迹法对于给出离心压缩机内的速度分布比较有效。关

于各种热机，比较著名的是用马氏干涉仪进行翼栅显示(图13)。可以看出气流速度的变化，边界层的发展与分离，当然还可看到尾流激波等。图14是对汽车内暖风流动情况的显示实验；图15是汽车外形流动实验；图16是对汽缸内气流过程的实验。可见流动显示对于汽车工业也有着重要作用。

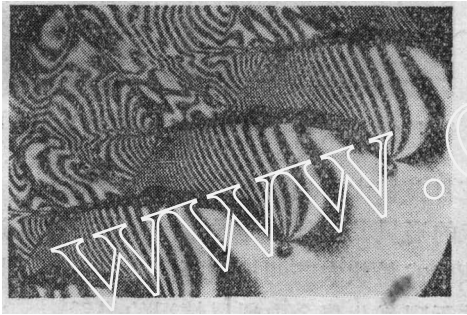


图 13 蒸汽透平翼栅流动
(干涉法) [19]

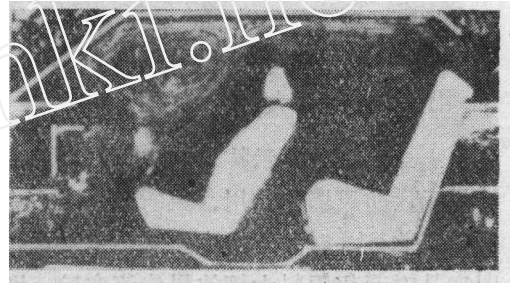


图 14 汽车驾驶室内暖风流动
(水槽内铝粉法) [20]

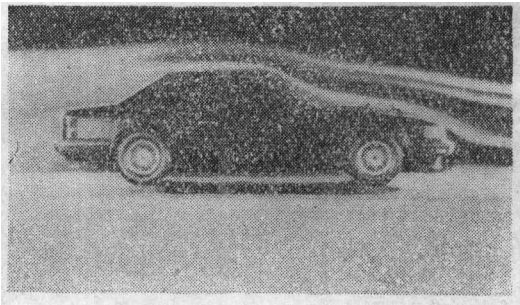


图 15 汽车外型流动(注入彩液法) [21]

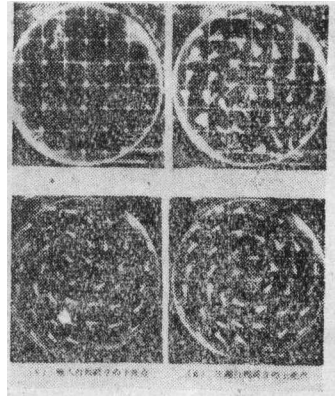


图 16 汽缸内流动(丝线法) [22]

建筑 包括建筑群平面布局与风的作用、房屋内空调设计、桥墩与河水的相互作用，均可用大型环境风洞或水洞等设备进行研究。图17是建筑群中高层建筑物周围的流动，可以看出建筑物上部和侧方发生的分离。图18是房间内空调效果的显示。

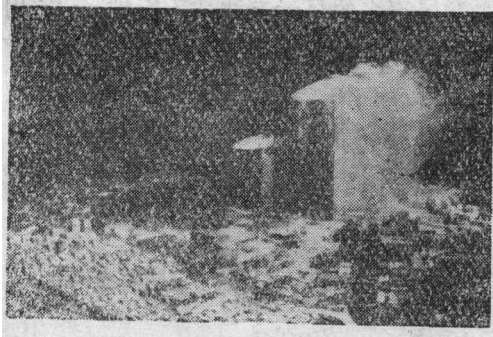


图 17 建筑群中高层建筑物绕流
($TiCl_4$ 法) [23]

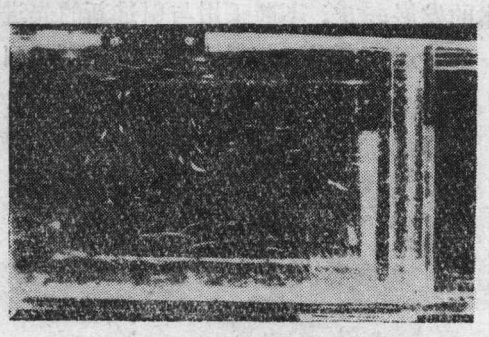


图 18 房间通风显示
(悬浊法) [24]

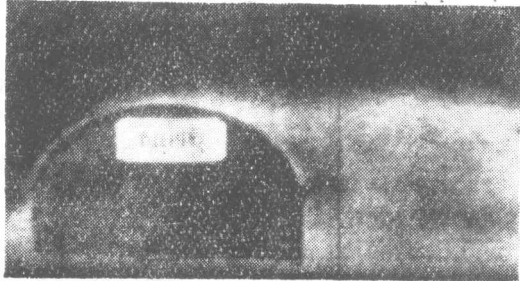


图 19 植物大棚绕流(烟流法)^[25]

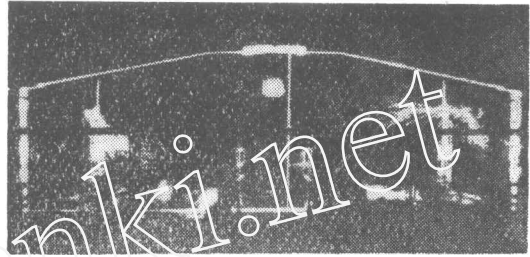


图 20 猪舍内通风显示(肥皂泡法)^[26]

农业 流动显示技术在农业方面的应用也在日益扩大。植物塑料大棚的绕流、光合作用的显示,防风墙的作用、风的绕流、畜舍内最佳的通风及换气口的设置等问题都有人进行了显示。此外,对于土壤中空气与水分的流动、液状或粉状农药的扩散等问题也进行了显示。图19是对蔬菜塑料大棚的风绕流实验;图20是关于现代化猪舍内通风情况的显示。

此外,显示技术对于动物运动规律的研究方面,也占有重要地位。例如鸟与昆虫的飞行、水中动物的游泳动作以及陆生动物的奔跑动作等。在研究中可以采用自然状态观测、约束状态观测以及模型等方式。图21是鱼在水中游动时的绕流,可以看出形成的卡门涡街。

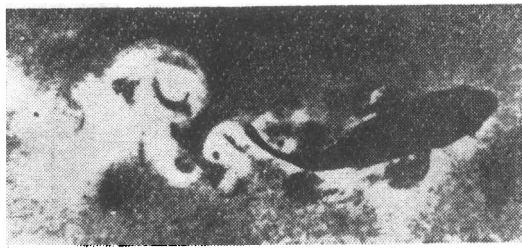


图 21 鱼的游泳运动(直接注入法)^[27]

随着科学技术的发展和生产的进步,流动显示技术的应用今后必定有一个更大的进步。从目前情况看,今后的发展方向是: 1. 进一步扩大流动显示技术的适用范围,从定常流到非定常流,从低速到极高速流均能进行显示; 2. 从定性观察逐步发展为定量测量; 3. 在某些情况下,可以从模型显示过渡到实物显示; 4. 加强与计算流体力学的联系,促进显示技术的发展; 5. 不断采用与引进新的先进技术,发展更多的显示方法,不断扩大应用领域; 6. 逐步实现图象判读与数据处理的自动化、电子计算机化。

参 考 文 献

- 1 Reynolds, O., An experimental investigation of circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 174(1883).
- 2 Asanuma, T., Flow visualization, *Proc. Int. Symp. on Flow Visualization (Oct., 1977)*.
- 3 Merzkirch, W., *Int. Symp. on Flow Visualization*, (Sept. 9—12, 1980).
- 4 浅沼强编, 流れの可視化ハンドブック (1979).
- 5 Yang, W. J., *Preprints of ISFV, Bochum(1980)*.
- 6 Merzkirch, W., 近年の西欧における流れ可視化研究の諸例, *日本機械学会志*, 81, 716 (1978).
- 7 Werle, H., Hydrodynamic flow visualization, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 5(1973).
- 8 Raithby, G. D., Eckert, E. R. G., The effect of support position and turbulence intensity on the flow near the surface of a sphere, *Warme-und Staffubertragung*, 1(1968).
- 9 中山泰喜等, 火花追跡法による流れの可視化, *日本第四回流れの可視化シンポジウム講演集(1976)*.
- 10 Werle, H., Hydrodynamic flow visualization, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 5(1973).
- 11 永田拓等, 流れの可視化, 1, 3(1981).
- 12 河合伸坦等, 境界層遷移位置の液晶による可視化法, *日本第二回流れの可視化シンポジウム講演集(1974)*.
- 13 奥出宗重, 低レイノルズ数における丹柱后流の煙による可視化, 同上.
- 14 ONERA, N. T. 175.
- 15 田古里哲夫等, 肥大船船尾ビルジ渦に関する実験研究, *日本造船学会论文集*, 123(1968):49.
- 16 四方浩, 流れの可視化, 1, 3(1981).
- 17 EOS. 62 8(1981).
- 18 福嶋孝义等, 血流の攪乱に関するモデル実験, *日本第三回シンポジウム講演集(1975)*.
- 19 Nagayama, Y., *Joint Gas Turbine Congress, Paper №36(1977)*.
- 20 早川正一等, 流れの可視化, 1, 1(1981).
- 21 Hucho, W. H., *Proc. of ISFV(1977)*.
- 22 浅沼强, 燃烧室内の渦流に関する研究, *日本自動車研究所研究速報* 2 (1971).
- 23 村上周三等, 流れの可視化, Vol. 1, №1(1981).
- 24 胜田高司等, 集合住宅における通风時の气流パターンの可視化, *日本第一回流れの可視化シンポジウム講演集(1973)*.
- 25 中崎昭人等, 丸型1棟建ハウス周囲の風圧分布特性, *农业土木学会论文集*, 46(1973):56.
- 26 Boon, C., Airflow patterns and temperature distribution in experimental piggery, *J. Agr. Eng. Res.*, 23(1978).
- 27 安部二郎等, 流れの可視化, 1, 2(1981).

DEVELOPMENT OF INVESTIGATION IN FLOW VISUALIZATION

Luo Ming-hui Huhe Ao-de

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)