

流谱实验装置及显示技术*

中国科学院力学研究所 郭学全

一、引言

流谱显示是实验流体力学中许多有用的工具之一。所谓流谱就是流体流动的物理图案。如果一个物理过程能够用肉眼或借助其他方法观察到它的图案,总是有助于更加深刻了解这一物理过程。例如,你如能想象出流体在渠道中或绕一障碍物流动的流体力学过程,而又能观察到稳定的或随时间变化的流动图案,那么你就能得到一个真实的完整的流动发展概念和流动全貌。流谱显示不同于其他实验方法就在于:它可以提供直接观察(目视)的流动状况。多数流体(例如气体、水)是透明的。为了辨认流体的运动,必须提供某些使流体流动看得见的方法。这种方法就叫做流谱显示技术。这种技术在了解流体力学问题中起重要作用,例如使我们能从得到的流动图案中推导出定量数据,在研究流体不受干扰的流动中,提供关于整个流动的信息。

雷诺和普朗特为了证明他们开创性的理论工作,进行了各种各样的流谱显示实验,得到了很好的结果。马赫最先懂得将纹影和干涉法及高速摄影用于流谱显示,对流谱显示技术的发展起了重要作用。此后,随着流体力学的发展,流谱显示技术(包括流谱实验装置)得到不断的发展。经过近百年的时间,流谱显示技术日益完善。今天已经可用激光全息来进行流谱显示了。同时流谱显示的内容也扩大了,包括简单翼型到复杂外形绕流流场。如果说,以前的流谱显示为基础理论和工程应用提供了直观有力的证据,那么,今天的流谱实验将发现新的流动现象,为探索新的理论服务。现在流谱显示重新受到科技工作者的重视。1977年在日本东京举行了第1次国际流谱显示讨论会,1980年将在西德召开第2次国际流谱显示讨论会。无疑这将促进流谱显示技术更快发展。总之,流谱显示技术已成为一门专门的实验技术科学。

本文将对流谱实验装置及流谱显示技术作一简要介绍。本文编写时,得到林同骥、卞荫贵同志的关心

和指导,还得到原流谱实验设备调研组同志的帮助,在此表示谢意。

二、流谱实验装置

所有流体力学的实验设备都能够采用一定的方法显示出流谱,但它们的主要任务是作流体力学动力特性实验。我们所说的流谱实验装置,是指以各种流谱显示实验来研究流体力学问题为主的实验设备。

1、流谱实验装置是理论和应用研究的必不可少的实验设备

近十年来航空航天技术的迅速发展,突出地表现在高机动性能的导弹、飞机及具有复杂外形的飞行器的出现和发展上。这就向流体力学和空气动力学工作者进一步提出了大量的分离流和旋涡流等问题。如在飞机和导弹上出现的翼面前缘分离,大攻角背风面分离,台阶、突起和底部分离以及各种复杂外形的交界面上形成的分离流动和相应的各种强烈的旋涡流场等等。因此,旋涡气体力学已成为利用实验或计算手段,来研究旋涡形成、输送、发展、破碎的机理、条件、影响因素以及工程应用的一个重要分支。

60年代和70年代设计的一些新型飞机(如美国1975年生产的F-16战斗机),广泛地利用了旋涡引起的非线性升力及其同主翼面的有利干扰,大大缩短了飞机的起飞滑跑距离,并提高了跨声速机动性能。所以分离流、旋涡流动的研究,无论在理论或应用方面都引起了人们的极大兴趣和重视。它们的研究又和三维边界层、转捩和湍流这些问题的深入研究紧密相关。同时,分离流和旋涡流还广泛存在于自然界,如大气污染、海洋流等。由此看来,开展三维粘性流动、分离、旋涡、转捩、湍流及水动力学中一些有关问题的研究,不仅有很大的理论意义,而且还有重要的应用价值。

对上述课题,国外进行了大量的理论和实验研究。研究的方法有水洞(或水槽)实验、风洞实验、简

•1979年11月26日收到。

• 56 •

化计算和精确求解N-S方程这四种途径。在这些问题的研究中,重要的一步是要搞清楚这些流动的物理图案,了解其规律,然后才可能提出适当的物理、数学模型,进行分析、计算并与实验结果比较。在流体力学中,所研究的流动物理图案一旦被显示出来,问题就往往得到较快的解决。例如,边界层、湍流、旋涡等现象都是流谱显示出来而观察到的。流谱显示无论在理论研究和实验研究上曾经起过很大的作用,将来还会发挥它应有的作用。例如近年来在绕圆柱体流动背后产生的涡流显示方面有一些新的发现^[14,15]。为了深入研究上述问题,就必须有一套显示流谱的技术和设备,即流谱实验装置。它是这些基础理论和实验研究的必不可少的流体力学实验设备。

2、从兼用实验设备发展到专用流谱实验装置

一般来说,各类风洞也可用来进行流谱显示,如用光学方法(阴影、纹影、干涉、全息等)观察流场并拍摄流谱图;用化学方法(如液晶)显示边界层转捩等。同时还可引进烟流进行流场显示。但风洞毕竟还是以作气动力特性实验为主。另外,在气体中流谱显示不那么容易,特别在低密度风洞中更为困难(用注入能量的方法,如辉光放电法可进行流谱显示)。因此,目前一般用水作介质进行流谱显示较多。这是因为用水作介质不仅成本低,而且流谱显示比用空气作介质更为容易、清晰、直观,显示的方法也远比风洞中的显示方法多。由此,从兼用流谱显示的流体力学实验设备,发展到一种以流谱显示为主的兼作他用的流谱实验装置。我们把初步调查到的这类装置列于表1。流谱实验装置有水槽、油槽、水池、水洞和烟洞。它们各有其特点。例如,油槽对边界层的研究特别有利,流谱显示容易、观测方便。因为油(如甘油)的粘度高,边界层大大增厚,相当于把看不见的很薄的边界层放大了。

烟洞是风洞的一种特殊形式。它也是一种直观流谱显示装置^[16]。不过它的雷诺数较低,且湍流度较高。有的烟有毒,易附着在模型和洞壁表面上,污染空气。烟洞所显示的流谱不够精细,效果不如水中的好。

现在多采用水作工作介质,如水槽、水池和水洞。这类设备作为流谱实验装置,其特点是显示的流谱逼真,流纹清晰,层次分明。它是一种能够观察各种流谱的非常直观的工具。它的显示方法多样而灵活,例如,在流场的某些适当部位放置电阻丝,通电使水电解产生氢气泡,可观察流场情况;在模型能观察流动的一些特征位置上注射色液可清楚地显示流动

图案,观察其规律(如涡的形成与输送);如果注射多种不同颜色的液体,还可观察各流束的流动方向及其细节(图1A);在水洞中还可局部放大某一流动特性,研究某一局部流动规律。另外,在风洞中难以区分几股互相旋绕的流束(如翼端面的旋绕流束)。而在水洞中采用上述方法,可以十分清楚地将互相旋绕的流束分辨开来(图1B)。所以水洞能对各种流动状态(分离流、旋涡、尾流等),采用多种显示方法,提供比风洞、烟洞更为清晰和详细的流谱。这是水洞的最大特点之一。

更为重要的是,以水作为工作介质,在线尺寸和速度相同的情况下,可获得比空气大20倍的雷诺数,有利于湍流的研究。这也是一个很大的优点。

图1 在竖直式水洞中所得流谱照片

A. 厚三角机翼上的流动, 攻角 8° ,
显示螺旋的会聚点(见文献^[13]
第24页图30)

B. 直角翼翼端涡侧视图, 攻角 8°
(见文献^[13]第33页图60)

3、几种简单的流谱实验装置

水洞、水槽一般分为高速和低速两大类。高速水洞、水槽多为循环式,流速高(约10米/秒以上),用于水动力学以及空蚀和空穴的形成、发展、消失的过程及其规律的研究。它要求有一定的水动力学模拟参数和一定的空穴数K。它除了气泡(空穴)显示外,不作其他流谱显示。作为流谱实验装置的水洞、水槽一般速度较低(0.1—1米/秒左右),因而不要求很高的功率,结构比高速水洞、水槽简单得多。这类水洞(水槽)多为开放式或外循环式(流经洞体的水放入贮水池,后用水泵泵入水洞上游的水箱)。下面举出几个流谱实验装置实例。

竖直式水洞 它的特点是利用水的重力(或位能)作用,不需驱动设备,结构简单,观测方便,占地面积小。作为专门流谱显示装置的比较典型的例子是法国国家宇航研究院(ONERA)的一个竖直式水洞(图2)。它主要由三大部分组成:贮水箱、收缩段(装有蜂窝栅)和试验段。贮水箱上装有溢水管,使水箱中的水保持一定的水位。具体参数见表2。

图2 竖直式水洞(见文献^[13]第16页图1)

1.溢水管; 2.水位指示计; 3.供水管; 4.照明灯; 5.试验段延长部分; 6.收缩段; 7.吹风或吸气管; 8.测流速的主流量计; 9.试验段; 10.着色水的调节装置; 11.阀门流量系统; 12.上游收缩段(装有蜂窝栅); 13.贮水箱; 14.着色液贮箱

表 1 国外的一些流场显示设备

设备名称	国家(机构)	试验段尺寸(米)	工作介质	工作方式及性能	观测手段	用途(举例)	参考文献
水	法国 (ONERA)		油			二维高粘流场显示	[1]
	法国 (Göttingen Max-Planck研究院)	宽0.010	水			二维流场显示	[1]
	美国 (NACA)	长×宽×深 = 8.5×0.5×1	甘油	循环式, $v = 0.2$ 米/秒	热膜探头	湍流研究, 测量 u, v, w 及流场显示	[2]
	英国 (伦敦大学)	长×宽×水深 = 36.6×4.44×1.525	水	开口槽, 模型拖动	电子应变仪天秤	模型试验, 测量升力、阻力、俯仰力矩	[3]
	美国 (Stanford大学)	10×25, 深: 宽 = 1 : 5	水		250幅/秒 电影机	壁面粗糙度对湍流的影响; 测量 u, v 及 τ ; 间隙效应	[4]
	日本 (岐阜大学)	宽×深 = 0.915×0.254	水		热线测量, 氦气泡显示	湍流研究及流场显示	[5]
	英国 (NPL)	长×宽×深 = 2.7×0.7×0.7	水	池, 模型拖动	氦气泡显示	圆柱体绕流的非定常边界层及外流场显示及测量	[14]
	英国 (NPL)	0.33×0.229	水		光泽塑料珠、气泡表面涂油、丝绸示踪	流场显示	[6]
	美国 (ORL, 宾西法尼亚大学)	2.74×2.135	水	$v = 1.5$ 米/秒 $Re = 1.3 \times 10^6$	固体粒子、气泡示踪	观察机翼后掠影响、流动特性及自由涡层性质	[7]
	加拿大 (NAE)	1.22×4.27	水	$v = 24.4$ 米/秒, 试验段压力 8 psia $\leq p \leq 60$ psia		基础研究, 空泡发生, 旋成体变攻角下的流动特性	[8]
	美国 (NASA, 兰利研究中心)	直径×长 = 0.3×0.76 0.508×0.114×0.76	水	循环式, 上面大水管的补充		噪声、湍流的应用研究	
	洞	美国 (霍普金斯大学)	0.33×0.254	水	$v_{max} = 4$ 米/秒	铝粒子示踪	流场显示
美国 (NASA, 兰利研究中心)		长×宽×高 = 2.5×0.45×0.70	油	循环, $0.02 \leq Re \leq 2000$ $v = 0 - 0.03$ 米/秒		平板绕流速度及力的测量, 流场显示	[10]
	美国 (霍普金斯大学)	长×高 = 0.584×0.102	盐水	循环, 分层流		研究分层流	[11]
	美国 (NASA, 兰利研究中心)	0.127×0.127	水	循环 $v = 0.076 - 0.305$ 米/秒		流场显示	[12]

表 2 法国ONERA竖直水洞的一些参数

试验段尺寸(米)	流 速	工 作 时 间
0.22×0.22	v = 0.1米/秒, 最大0.15米/秒	2 分 钟
0.10×0.22	v = 0.22米/秒, 最大0.33米/秒	2 分 钟
1.56×0.22		
0.10×0.10	v = 0.1—0.5米/秒, 最大0.70米/秒	2—10 分 钟
0.10×0.16	v = 0.1—0.5米/秒, 最大0.60米/秒	12—60 分 钟

卧式水洞 它由水罐(总容积5米³)、收缩段(带有蜂窝栅)和试验段组成(图3)。这是一个开放式水洞。自来水灌满水罐后,用压缩空气(最大达8大气压)作压力源,驱动洞体内的水流动,经过试验段,放出至下水道。有机玻璃试验段,长3米,矩形截面为450×40毫米²,水流速度为0.1—1米/秒。该装置可作二维流谱显示。由于气源的压力可以调节,能够获得所需要的雷诺数,因而可作湍流和减阻等方面的研究。

水池 这是一种最简单的流谱实验装置。水池一般为长方体,水不动,由马达拖动模型在水池中运动,可作定常和非定常流谱显示。日本有一个宽70厘米、深70厘米、长270厘米的水池作了不少实验,得到了比较好的结果^[14,16]。图4就是这个水池的示意图。

米、深70厘米、长270厘米的水池作了不少实验,得到了比较好的结果^[14,16]。图4就是这个水池的示意图。

三、流谱显示和观测技术

为了显示流谱,我们在流场各个分散点上将色液、烟或固体粒子加入流体中。这些添加物粒子同流体一道运动,添加物的运动可用适当的照明摄影的方法来观测。要说明观察到的这些添加物的运动,不得不区分下述定义。

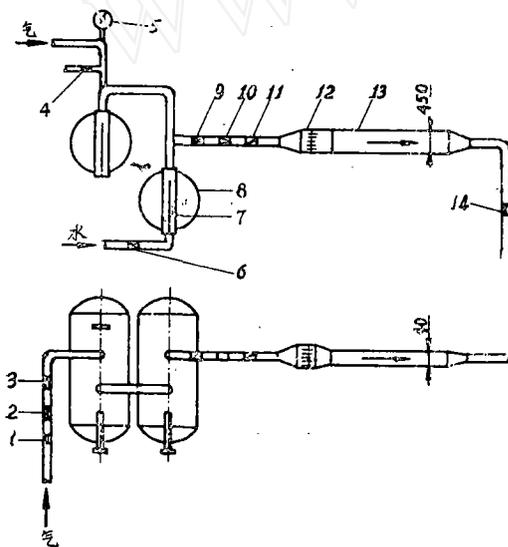


图3 二维流谱实验装置示意图

- 1.空气过滤器; 2.气源切断阀; 3.气压调节阀; 4.排气阀; 5.压力表; 6.水源切断阀; 7.液面计; 8.水罐; 9.截流阀; 10.调压阀; 11.流量计; 12.收缩段; 13.试验段; 14.放水阀

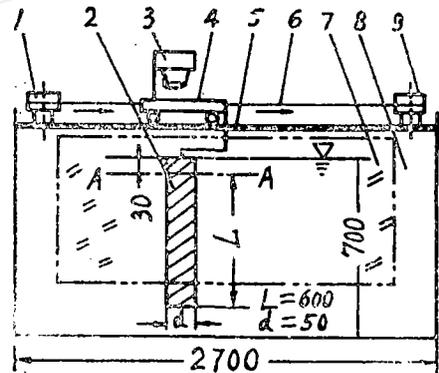


图4 水池^[14]

- 1.驱动转筒; 2.试验圆柱; 3.照相机; 4.拖车; 5.导向铁轨; 6.金属丝; 7.观察窗; 8.水池; 9.张力滑轮

流线 在某一瞬间同时相切于流场所有点上的流速方向的线称为流线。在我们考虑的某一瞬间没有流体横过流线运动。如果我们用很小的随流体一起运动的粒子给流体打上标记,用适当的曝光时间对流场拍照,可以显示出流线。

流丝 通过流场个别固定点的所有流体粒子的瞬时轨迹称为流丝(或丝纹线)。如果从选定的点连续向流动着的流体注入色液或其他可见物质,这种流丝就

可以显示出来。

粒子的轨迹 个别流体粒子在流场中作为时间的函数所走的曲线叫做该粒子的轨迹。粒子轨迹包含了单个流体粒子的运动时间经历。如果我们对某个引进到流动中的外来粒子长时间曝光照相, 这条轨迹就可显示出来。如果是定常流动, 上述这三条线是同一条线。

流动显示方法, 大致可分为三类: 外加物质示踪法, 光学方法和注入能量方法。第一类方法适用于气态和液态流体流动。外加微粒必须是可见的, 而且必须足够小, 其比重应与流体比重相当。这样, 我们可以认为这些外加粒子的运动在速度和方向上同流体的运动一样。因为我们观察到的运动是外加粒子的运动, 所以这是一种间接显示法。我们可将外加粒子的速度与流体速度之差减小到最小程度, 但不能完全消除。这是因为外加粒子的密度总是与流体的密度差不多相等, 而不能完全相等。这种方法对定常流能给出很好结果。由于外加粒子的有限尺度和它不同于流体的热力学性质, 它将给非定常流和可压缩流带来较大误差。因此, 这种方法对可压缩流不太适用。流体的可压缩性引起流体的密度变化, 而密度是光折射率的函数。可压缩流可用某种光学方法(如纹影等)显出来。这是一种完全无干扰的直接显示法。第三类方法比较适用于低密度流场显示。例如向气流放射电子束, 使气体分子激发, 发出荧光, 显示出流动图案。流谱显示实验装置, 多以水作介质; 它是不可压流体, 所以主要用第一类方法。下面我们简略地介绍一下这方面的显示方法。

1. 固体粒子示踪法 如果要显示某一特定流场, 则可在其上游用探头注入固体粒子示踪物, 如铝粉, 光泽球形塑料珠、玻璃珠和细云母片, 用电解装置在阴极上发射碲粒子。在水中用固体粒子示踪, 能得到动画片的效果(图5)。

2. 液体示踪法 这是一种用带色的液体(如乳液、稀释的牛奶、墨水、染料、四氯化碳和高锰酸钾溶液)来显示流谱的方法。从模型里面或位于上游的喷射器放出这些示踪物, 可以清楚地显示流动的物理图案(图1B), 效果很好。如果利用不同颜色的液体, 在模型的不同部位释放出来, 可以得到这个物体下游的三维流谱(图6)。

染料的选取决定于所研究的流体试验中的特定条件。如在水中研究模型后面的低速尾流、剪切流和涡流的稳定性问题, 用牛奶的效果较好。

图5 用塑料珠显示的绕翼型流动的生动图案(见文献[17]第30页图15)

图6 偏航圆柱后面的涡流染色线

流体为水, 染料为墨水、乳汁和酒精的混合物。原色线的颜色为红、黄和白色(见文献[20]第80页上图, 或文献[19]第9页)

注射色液时必须注意: 如果色液从模型表面的小孔放出, 那么就需保证色液无垂直于模型表面的分量, 否则放出的色液将同绕模型的主流相干扰。由于注入质量和动量使物壁上的边界层性质发生变化, 这种方法不大适宜于边界层的研究。染色方法对循环水洞不适用, 因为色液经过再循环, 污染了工作介质——水。

3. 气体示踪法 这是用气泡来显示流谱的方法。这种气泡包括自然形成的空气泡(汽泡), 如空穴和氢气泡。这个方法对研究边界层很有用, 它可显示边界层的速度分布, 同时还可用氢气泡法测定速度。一种由喷射器喷出来的空气泡也能显示流场(图7)。

4. 悬浮物示踪法 在有自由表面的水上散布悬浮示踪物, 如轻质的粉末(如铝粉)、五彩纸屑和羽毛等。这种方法对大面积自由表面运动图谱的显示很有用。

5. 激光全息法 随着激光全息技术的发展, 有可能将全息技术应用于水流流谱显示。由于全息具有三维特性, 可为不对称性流谱提供详细资料。

图7 在一定攻角下三角翼背风面的流动图案(空气泡显示)

a. 背面近处的流动(见文献[18]第32页图16a)

c. 沿平行于翼轴看去的横截面流动(见文献[18]第32页图16c)

激光测速技术的发展为流谱显示提供定量分析的可能性, 如测定旋涡场的速度大小和方向, 为旋涡结构分析提供数据。

流谱显示中, 一般照相和高速摄影是不可少的。把显示出的流谱用照相的方法记录下来, 便于分析研究。高速摄影能拍摄流动的瞬态过程, 是研究非定常流动的必要手段。

四、结束语

上述介绍只是流谱显示实验中的很小部分, 但由此可看出这一研究的轮廓。流谱显示已经发展成一门应用广泛的实验技术科学, 并得到广泛的重视。流谱显示为理论研究提供必要的依据, 同时它还能发现新的现象, 为理论研究提出新的更深入的课题, 促使理论的发展。流谱显示不仅应用于流体力学, 而且在物

理学(如超流体现象)中也有不少应用。另外,流谱显示广泛用于教学实验,它能给人以直观的流动概念。因此,流谱显示(包括实验装置和显示技术)还有发展的潜力。

参 考 文 献

- [1] Annual Review of Fluid Mechanics, 5 (1973), 361—382。
[2] Eckdmann, H., *J. Fluid Mech.*, 65 (1974), 437。
[3] NACA TN 3957 (March 1957)。
[4] Grass, A. J., *J. Fluid Mech.*, 50, Part 2 (1971), 233。
[5] Kim, H. T., et al., *J. Fluid Mech.*, 50, Part 1 (1971), 133—160。
[6] Lambourne, N. C., Pusey, P. S., N. P. L., R&M, №3106 (1959)。
[7] ARC, R&M 3106 (1959)。
[8] Lehman, A. F. and Peirce, T. E., *Astronautics & Aeronautics*, 2, 5 (May 1964)。
[9] Wardlaw, R. L. & Mceachern, N. V., NRC, №7013, Ottawa Canada (1962)。
[10] Dumitreson, D. & Cazam, M., *ZAMM*, 50 (1970), 257—80。
[11] Odell, G. & Kovaszny, L., *J. Fluid Mech.*, 50 (1971), 535—43。
[12] Smith, E. H., *J. Fluid Mech.*, 50 (1971), 513—34。
[13] Werlé, H., ONERA, NT, №48 (1958)。
[14] 永田拓等, 机论, 41—341 (昭50—1), 161。
[15] 永田拓, 松井辰弥, 安田治夫, 机论 (B编), 45—397 (昭54—9)。
[16] Modern Developments in Fluid Dynamics, Vol. 1, Oxford (1950)。
[17] Werlé, H., ONERA, NT, №180 (1971)。
[18] Werlé, H., ONERA, NT, №175 (1971)。
[19] Merzkirch, W., Flow Visualization (1974)。
[20] Fiechter, M., Wirbelsysteme Schlan-ker Rotationskörper, Jahrb. (1969), D. Ges. Luft-Raumfahrt, pp. 77—85。

我国太阳能利用及研究简况*

刘登瀛 金家骅 陈祥林

自1975年全国第一次太阳能利用经验交流会以来,我国太阳能利用的研究与试制推广工作有了较大的发展。

一、推广应用

1. 热水器 1975年全国实际使用热水器的采光面积不足2000米²,到1979年8月,据不完全统计,已增加到67300米²,使用水平也有提高。目前,我国北方地区,热水器一般可从5月初使用到10月份;南方地区可从3月份使用到11月份。平均循环效率一般为30—40%。若按每平方米热水器每年节煤300公斤计算,则全国每年可节煤约2万吨。推广应用热水器的另一特点是使用地区和行业更加广泛。目前我国绝大

多数省、市、自治区都已开展了热水器的推广使用工作,用途由提供生活用热水,发展到锅炉水预热,养护混凝土构件、发酵、养鱼、育秧等工农业生产的许多方面。

2. 太阳灶 近两年来,甘肃、河北、河南等地先后研制出抛物面偏轴聚光式太阳灶。这种太阳灶比相同采光面积的箱式太阳灶功率大、效率高,适用于蒸、焖、煮、炒等各种烹调方式,制作工艺也不复杂,成本虽比箱式灶贵1倍左右(一个2.5米²的聚光灶,造价为35—40元),但寿命长得多(10年以上)。目前我国实际长期使用的聚光太阳灶有2100个。

3. 干燥器 目前全国已有一半的省、市、自治区开展了太阳能干燥系统的应用研究。其中,河北邢台、山

*1979年10月16日收到。