

非定常流动的流体力学显示

H. Werlé

提 要 法国国家宇航研究院 (ONERA) 水力学模拟实验室, 多年来研究定常流动所采用的显示技术, 已成功地用来分析以边界层、分离和尾流为主要特征的非定常现象。

本文先简述实验装置、设备和方法, 然后举出在各基础研究、航天及工业领域中应用研究的例子¹⁾, 包括定常状态下观察到的不稳定性现象(例如尾流或射流); 定

¹⁾ 流动显示的一些例子已编入法国国家宇航研究院的第 666 号影片, 有关研究人员可以购买或租用这些影片。

[2] Krolkowski W. Einige Erscheinungen bei der Dehnung Von glasfaserverstärkten Polyestern.—*Plaste und Kautschuk*, 1973, 20, № 11, S. 822—829.

[3] Roskothen H.J., Brintrup H. Grenzverformung bei GFK ((GF-UP) und deren Ermittlung.—*Fortschritt Berichte VDI—Zeitschrift*, 1973, Reihe 5, № 16, S. 27—48.

[4] Dibenedetto A.T., Gauchel J.V., Thomas R.L., Barlow J.W. Nondestructive determination of fatigue crack damage in composites using vibration tests.—*J. of Materials*, 1972, 7, N2, P. 271—275.

[5] Саркисян Н.Е. Анизотропия статической и циклической деформативности стеклопластиков типа СВМ.—*Изв. АН АрмССР. Механика*, 1971, 24, № 3, 61—73.

[6] Филатов М.Я., Шленский В.Ф., Супруненко В.А., Копылевич Г.В. Закономерности изменения светорассеивающих свойств стеклоэкстолита при накоплении усталостных повреждений.—*Пробл. прочности*, 1978, № 2, с. 27—31.

[7] Рвачев В. П. Введение в биофизическую фотометрию.—*Львов.*; изд-во Львовского ун-та, 1966.—380с.

译自: Гарф, М.Э. и др., Приборы для изучения кинетики усталостного разрушения стеклопластиков по диффузному рассеянию световых потоков, *Проблемы прочности*, 6(1979), 82—84.

(程屏芬译 晏名文校)

常状态建立前的现象（例如起动）；与模型周期性运动有关的现象（例如振动机翼）；绕旋转模型的外部流动（例如直升飞机旋翼）；旋转系统中的内部流动（例如透平机械）。

引 言

在以图象资料作为了解和研究手段，并起着决定性作用的年代，流动显示对于认识流体力学基本现象的贡献是不可忽视的。

事实上，在这种实验过程中所进行的观察，在很多情况下能够弄清这些现象的物理图案，并能证实或指导其他地方进行的理论或实验研究。在定常状态下的上述优越性，在非定常状态下更为重要，因为尽管这种状态存在特有的困难，但此法却无需使装置、设备和方法复杂化。

法国国家宇航研究院空气动力学部的水力学模拟实验室⁽¹⁾，多年致力于通过在水中实现流动显示来研究模型的绕流。尽管由于实验雷诺数较小而使模拟的条件不够理想，但是所用的实验技术却是许多基础研究和航天及工业领域取得应用研究成果的源泉。

本文将叙述这个已被多次描述过⁽²⁾的技术的最新的应用：对非定常流动的研究。它是国际理论与应用力学联合会（IUTAM）魁北克会议（1971年5月）⁽³⁾上所发表论文的补充。

I. 实 验 技 术

I.1. 水力学装置

流动实验水洞（图1左上图）¹⁾的有关情况如下：它是垂直的开路式装置，靠重力作用排水而运行。装有实验段（方截面 220×220 ，高度1000），其中最大速度 $V_0 = 20 \text{ cm/s}$ ，能维持1分钟。

实验段流速由排水管中的阀门控制。迅速或缓慢地调整阀门，可以实现流场的起动和终止。

加速或减速的规律还不太清楚。事实上，连接有水位指示器（汞-水或水-空气）的节流器所给出的读数是平均的，有相位差的（响应时间）。

在极少数情况下，这种加速或减速的规律可由实验过程中所拍影片的判读和用于显示的示踪物的轨迹重新确定。

另一个实验装置是水槽，它用于固定模型（ $V_0 = 0$ ）的实验（包括汇或射流或运动元件）⁽⁴⁾（图1右上图）。

其实验截面更宽，因而没有壁面效应（方截面 800×800 ，有效高度1400），但实验的持续时间仍不变。这是由于射流或转子产生的流动碰到壁面或自由面后产生显著的再循环现象的限制所致。

这种水槽最近用于叶轮机械内部流动的显示⁽⁵⁾。事实上，这种水槽装上容量更大的蓄

¹⁾ 译文全部图略，请参看原文。

水池后，也可以当作水洞来运行（图1下图）。在实验轴流式透平机械时，集流器安装在模型上游，以保证模型所处的环形实验段（ $\phi_E = 292 - \phi_I = 200$ ）中在1分钟的时间内能保持最大速度20cm/s。

1.2. 试验设备

图2，3集中了主要的实验模型，以及它们在实验段中的装配夹具的类型和主要特点：

装在两个侧面之间的“平面流”模型；

装在一侧壁上的半模型；

回转体或三维模型，常用后面的榫头或侧向翼剖面状支撑元件安装；

最后，内部流动的模型是用透明的有机玻璃做外壳，必要时可以全部用有机玻璃，或根据情况采用收缩式集流器或环状集流器，后者适用于周向流动。

在前两种情况中，壁面处于实验段边界层之外。壁面大小应该尽可能减小对流动的影响，特别是对它们本身边界层分离的影响。

所有这些设备的支架上都装有管路系统，作为显示用染料的通道，以便需要时可在模型表面吸入或喷出液体。

另一方面，这些固定元件可使模型结构改变（取攻角，翼面倾斜等等），以保证运动的传递（旋转、振动等等）。

在下面还将说明有关设备的其他细节。

1.3. 显示方法

把以前用于定常流动的方法⁽²⁾用于非定常流动并没有多大的困难。

在大多数情况下，按示踪物的性质可分类如下。

固体示踪法 聚苯乙烯最好是白色球状，这适于拍照片。它的密度在经过适当的处理后可与水的密度相等（图15下）。Hostafion粉末较轻，只能用于有自由面的流动（图9和10）。

液体示踪法 有色液体喷射剂由下述混合物构成：乳浆 + 乙醇 + 染料 + 水，其密度及粘度与水相同；这种方法对于显示模型附近以及边界层内外的流动很适合（图4左）。在非定常状态时，有色流束（喷射剂线）仅在极少数情况下表现为流线，但是它一般可以正确地显示模型周围形成的分离、尾流和涡旋（图19和20）。主要的困难是正确地选择喷射的位置以及正确地调配染料的流量。

气体示踪法 当乳化剂介质充满水槽时，水中出现悬浮的微小空气泡，这些空气泡（ $\phi = 0.05 - 0.1$ ）给出了实验段有效部分的纵向（图7和13）和横向（图16和17右）薄层的流动图象。非定常状态时，气泡的轨迹与流线不一致，然而它们很清楚地显示了涡旋和分离区的存在（图14），显示了这些现象的总形态（图23和24）及其作为时间和所有研究参数的函数的演化。

如大家所了解的那样⁽⁶⁾，对于奇异流动和非定常流动，这种示踪法由于质点和它所代表的流体元的轨迹的偏离（附加质量效应，显示物的注射，强烈弯曲的轨迹，等等）而受限制。但在某些情况下，在照片底片或实验时拍的影片上来作测量，可定出轨迹以及某些特征涡旋的移动速度，等等（见图12，18，20）。

II. 所得结果举例

II.1. 定常状态下观察到的不稳定性

II.1.1. 分离和尾流

整体不稳定性对有限障碍物上的层流分离影响的一个例子,是无攻角的扁平椭圆体下游端所出现的情况。事实上,如果用有色喷射剂来显示(图4左),则会发现在同一个实验过程中分流的汇合点处的脉动。

同一个图给出尾流的例子,它具有典型的非定常特征。

在均匀定常层流流场中,零攻角的单个二维、对称障碍物的经典情况下,只要流速足够高,在模型端部脱落的两个边界层就汇合而形成尾流,其特点是众所周知的 Bénard Karman⁽⁸⁾交错涡旋现象(图4右上)。人们已知这些涡街的形成,其特点和稳定性,其速度和涡旋的频率,不仅依赖于雷诺数⁽⁹⁾,而且依赖于模型端部的形状和外部流动的特点^(10,11)(图25F)。

孤立圆柱体的情况与不太熟悉的交替排列的管簇情况近似(图4右下):实验时的间距 $e/d = 2$, 雷诺数 $Re_d \approx 2500$; 我们看到每排圆柱体之间形成的正常流层,在遇到下一排圆柱体形成的障碍物时分为两股,两两成对,一排排地顺序通过。这种合流促使圆柱尾流闭合(最后一排除外)。从上游到下游,这些流层和有限的尾流从层流逐渐地变为湍流,最后成为交替的涡旋。当圆柱由于轴上的微小间隙而活动时,圆柱向第二排运动,其振动频率与涡旋的相同,而同排圆柱的振动相位相反⁽¹¹⁾。

在研究振动对单个障碍物绕流的影响之前(II.3节),让我们首先考查三维固定障碍物尾流的情况。

图5上方是一个固定不动的塔形设计模型。它安装在壁面上(设想为地面),放置的方式是使对气流攻角的变化保持与地面的坡度一样。其底部稍宽,整个上部较窄,水平截面呈矩形,但随着高度有少许变化。

流动显示使塔的尾流的三维特征和它随气流攻角的演变明朗化⁽¹²⁾。棱的出现保证了分离区的某种稳定性,而涡旋只出现在尾流上游部分,气流迎面而来或是穿过。

第二个例子是图5下方给出的烟囱模型。对这种模型给出了更多的图示。由于“马蹄”型⁽¹³⁾(障碍物效用)弯曲涡旋的形成和尾流的交错特征的出现(但不包括烟囱顶部,因为在该处,由于自由端的吸附效应使得驻定的涡旋出现),使我们能比前述的例子更好地分辨出圆柱体前地面上流动的分流:

在模拟烟囱的流量时,这种效应显著地加强。在大流量时,形成一股射流,它因主流而向下游弯曲,其结构变成涡旋的(与图6下方的射流对比)。

II.1.2. 射流和边界层控制

对单个轴向射流所引起的流动,无论是在固定点的流动还是随气流方向的流动,都做了很多理论的和实验的研究,见文献[14, 15]以及见文献[16]中给出的参考文献。

已知在物体周围所形成的混合层趋于显现某种不稳定性的特征⁽⁶⁵⁾。图6上方给出的流场显示使我们可把平面射流与轴对称射流作比较,尤其显出了它们的脉动(闪光照片)以及所引起的汇效应(横排成对)(参见图25A和B)。

当圆形截面射流由平壁面垂直地喷射而在下游由于外部流动而弯曲时,不稳定性加剧(图6中图)。实验证明弯曲射流的结构特征是两个反向旋转的涡旋⁽¹⁶⁻¹⁸⁾。此外实验表明,分流在射流前方没有分离(由于汇效应),相反,射流下方的下游,分离变成两个对称的涡旋。

在某些情况下,尤其是速度比 V_1/V_0 较大时,涡旋所形成的弯曲射流对于周期性交替运动不再是对称的,在喷口的上、下游处壁面边界层中流动的不稳定性加剧(图6下)⁽⁶⁵⁾。

另一个例子说明,机翼的偏转襟翼上边界层没有完全被控制而分离时不稳定性加剧。

如果控制的特性参数值低于机翼上的流动完全贴合的临界值,则周期性脉动发展。在 $C\mu$ 不足时,机翼吹气就是这样^(19,66)。

当通过机翼铰链而实现边界层控制⁽²⁰⁾且折合转速 ω 值很小时,会出现同样的现象(图7左)。

在大攻角直翼翼背上出现完全分离时,在前缘平行地喷出射流的办法也属于此种情况^(21,22,67)(图7右)。

II.1.3. 涡旋

流体力学的另一个基本现象是涡旋的破碎^(23,65),它同样有显著的非定常特征。

事实上,在逆向梯度时,涡旋的粘性核心是紊乱的,呈螺旋状,半径增大,按涡旋的反方向成团地旋转(见图8上方和图25G)。

在大攻角三角机翼上破碎是自然产生的。在没有侧斜的小后掠机翼中⁽²⁴⁾,翼尖的两个涡旋被正常的流动中介区分开,避免了在距翼尖相等距离上的两次破碎之间产生相互干扰。当前缘后掠角和机翼攻角很大时,中介区消失而破碎区之间的均衡使它们变得不稳定⁽²⁵⁾(图8上方是在同一试验时拍的照片)。

另一个非定常涡旋结构的例子是“Ranque管”模型中的流动⁽²⁶⁾。沿内壁面的切面及垂直于轴向出口的母线而射出的湍流射流在模型内造成整体的旋转运动(图8下)。

当塞住管子一端时(见左图),分流的螺旋会合点在底部形成并产生单个涡旋,它绕模型轴缓慢地进动。

逐渐打开模型底部,则涡旋数增加,最后形成绕湍流轴心转动方向一样的涡旋环(见右图)。

II.2. 定常状态建立前的现象

II.2.1. 旋转的起动或停止

实验用的装置是用来检验Prandtl-Batchelor理论的⁽²⁷⁾,而最后是要用来研究弹体下游的底部尾流回流区⁽²⁸⁾。

实验说明了绕自身轴转动的圆柱形水池中的旋转流体的经典问题。为了便于实验,管子装在水洞的垂直实验段中(图2)。在旋转速度不太高时($N=0.1$ 转/秒),观察Hostaf-lon粉粒移动的自由表面实际上是平的。图9这组照片可用来比较涡旋的形成和衰减,涡旋逐渐从壁面运动到突然停止。

对于较高的转速,比如说 $N=3$ 转/秒(图10),自由表面显著变形,在圆柱轴附近凹下去。起先它保持旋转对称,但由于很小的脉动,比如说是模型运动所必然带来的转动,就会使这种对称性破坏而出现进动。这类流动与利用陀螺效应使液体燃料稳定的液体火箭发动机旋转相位有关⁽²⁹⁾。

II.2.2. (平动) 起动

绕对称模型的无攻角绕流(为获得一个均匀的流动)的研究首先是在平面流上进行(图11)。

在翼型的情况下,实验不同阶段的特点为:在起动的最初阶段,边界层不分离,并且是逐渐增厚;在实验的第二阶段,尤其是当翼型很薄而雷诺数不太高时(图11上),出现层流分离,这种分离局限于后缘处两个边界层之间;而这两个边界层汇合形成层流尾流。

层流分离继续演化并向上游扩展,在后缘处⁽³⁰⁾两个对称涡旋开始形成并发展,当翼型较厚,雷诺数较高时(图11中),在定常状态的最后阶段扩展受到向活动涡旋尾流延伸的分离区的限制。

根据图11可以把孤立圆柱^(31,32)和管簇两种情况作比较。可以看到,两种情况下起动涡旋相似。但正如II.1.1.节中看到的那样有重大差别。

对轴对称流动也作了同样的研究(图12)。一个是正圆柱底的回转体(图12上),另一个是尖边缘的垂直于气流的圆盘(图12下)。

对于这两种模型,直径剖面显示出环形的涡旋,它出现在模型的边缘处,从起动一开始就马上向前发展并向下游移动,涡旋变得紊乱。而当定常状态建立时^(33,34)为湍流边缘的死水区留下位子,见图25 C和D。

在圆盘情况中,可根据所拍的实验电影确定出完成起动过程的规律,涡旋中心的轨迹及其速度的演化,见图12下给出的例子。

最后,应注意起动涡旋和定常状态下围绕圆盘形成的涡旋之间的相似性,而圆盘下游沿支架长度发射出一个轴向射流⁽¹⁰⁾(图12右上照片)。

II.3. 与模型周期运动有关的现象

II.3.1. 平面流动试验

较为简单的形状是均匀流中带有振荡的孤立的圆柱体,见图13。在 $Re_d \approx 3000$ 时做的实验表明,当周期运动的折合频率 $\omega^* = 2\pi Nd/V$ 增大时,交替涡旋在越来越接近圆柱的旁边形成,它们的频率增大,尺寸减小而具有湍流特征的有限分离区最后在两行涡旋中间形成。

这种现象无论是在垂直于流动方向上作往复移动(图左),或在绕模型轴作角度振动情况下(图右)都可以观察到。在小雷诺数⁽³⁵⁻³⁷⁾或大雷诺数⁽³⁸⁾情况下,对振动的孤立圆柱都做了显示和测量。

这种加有振动的实验使人们能认识液体和气体作用下自由振动圆柱附近的现象以及产生的共振。对于换热器⁽³⁹⁾,建筑物及烟囱⁽⁴⁰⁾经常会提出这个问题。

第二个例子是翼型由于俯仰而引起周期性振动,它模拟了直升飞机桨叶螺距的循环变化(见图14和图25I)。

人们知道,对固定翼型,当攻角达到临界值时,叶背都会出现分离。在这个值的附近,振动会改变分离特征,此时它是非定常的和有旋的。图14右照片说明平均攻角 $\bar{\alpha}$ 等于 125° 时循环的各个阶段(相):前缘抬升时,分离大大减少;前缘处于高位时,出现由涡旋形成的分离泡,它位于前缘处;当前缘向下运动时,涡旋发展并向后缘移动;最后,当前缘处于低位时,尾流中的涡旋脱落。

这些现象的存在已由水洞中进行的显示和测量所证明^(41,42,68,69),它们说明了滞后

效应，此效应对于记录非定常状态下的最大平均升力是有益的。

在水洞中拍下的一些实验的影片可用来定出振动时涡旋位移的轨迹和速度⁽⁴³⁾。

把图14上的不同照片组作比较，再次得出了参数的演化以及下列现象的演化：

分离显著地依赖于折合频率 ω^* ：如参数增加（右下照片），则涡旋频率增大；

平均攻角 \bar{i} 的影响同样是重要的：因此，对于 $\bar{i} = 0$ 的翼型看不到分离（左上照片），涡旋在同一后缘处脱落；

前缘的倾斜影响（比较照片下）不是不重要的： ω^* 和 \bar{i} 同样时，涡旋稍有发展而在翼型下游处显示更清楚。

第三个例子是图15的模拟绕叶片的“平面流动”，特别是指处于拍动的翼型（即没有攻角变化的，垂直于气流往复平动的）（左方照片）。这种情况的特征是：上升时翼面流动完全贴合，下降时翼面上的流动骤然完全脱开。

筛动（即平行于往复平动）的翼型实验（图右），可与绕向前或向后运动以及有或没有俯仰角的谐振动的翼型的流动比较。我们可看到折合频率高时，在后退的机翼上产生流动的逆转，它从后缘向前缘运动，在前缘前方形成尾流（模拟环形件内流动的逆转）。

最后一个“平面流动”实验是有关等环量的非定常运动的理论问题⁽⁴⁴⁾。用来检验这种理论的运动的特征是⁽⁴⁵⁾：

翼型放在均匀流中；位于翼型后段四分之一处俯仰轴的均匀旋转；攻角按理论规律作循环变化；实验已证明在这样的运动中⁽⁷⁰⁾涡旋不会脱落，而相反，当环量变化时却是周期性脱落，见图15下。

II.3.2. 三维试验

选用的例子是均匀流中有攻角而无侧滑的箭形三角翼。图16可比较翼背流动的涡旋构造，尤其是以下情况中尖顶涡旋的位置及其破碎点：一种是定常状态时（左照片）；一种是非定常状态时（右照片）：

当机翼作俯仰振动时（涡旋比定常状态时更紊乱而且更接近前缘）；

当模型作横滚振动时（涡旋位置不对称）；

最后，当机翼处于拍动时：在这种情况下，我们看到涡旋区强化，在机翼下降时涡旋向破碎点顶峰处上升（实际攻角增大）；反之，在连续上升过程中，可看到涡旋的耗散（实际攻角减小）。

这些结果与同样条件下用完整飞机作试件，尤其是在陆地上得到的结果近似^(23, 46, 71)，见图25E。

另外，还补充了在水洞中做的类似实验^(47, 48)。

II.4. 绕旋转模型的外部流动

II.4.1. 纺锤体模型的旋转

图17给出的显示表明绕活动直底的尖顶圆柱在绕自身的轴匀速转动时流动的准定常特征。

转速的增加有以下主要效应：

攻角很小时，形成模型附近流场的螺旋线的螺距减小（照片上）；

攻角较大时，上表面涡旋的耗散处于试件“上升”边缘；相反，沿旋转方向发展移动时（下、中照片），上表面的涡旋耗散处于机身“下降”边缘。

这种显示会有助于研究Magnus效应⁽⁴⁹⁾。

另一个同类的实验目的是模拟在旋进运动的活动进口头部横滚旋转的现象^(50,51)。

图18是横滚演化规律的实验，所用模型是能绕自身轴自由转动的扁平底的回转体，攻角为 15° 。此结果由某些显示加以补充并与试件的定常分离和尾流比较（2个对称涡旋），尾流引出随旋进运动情况下观察到的流动，其特征是旋转使分离和尾流形成螺旋形。

II.4.2. 带翼模型的旋转

图19给出了模拟横滚或螺旋运动的绕均匀旋转模型的流动⁽⁷²⁾。

在没有攻角的机翼情况下，我们知道，这样的旋转使两个对于运动轴对称的涡旋出现（在边缘处或从翼尖处出现），就是说，在下降的半叶片的上表面上和上升的半叶片的下表面上出现⁽⁵²⁾；恰如下降半叶片的实际攻角增大，而上升半叶片的攻角减小。

在机翼模型情况中或有攻角的三角翼飞机情况中（图19上），旋转涡旋的效应与攻角的效应相叠加；在这些条件下可观察到沿下降的前缘处，相反，沿上升的前缘处，可见到涡旋的部分或完全的耗散。另外⁽²³⁾可看到这些效应引起涡旋的破碎。

在攻角很大时，例如 $i = 80^\circ$ （图19下）时，模型的旋转是模拟水洞中研究过的“平螺旋”⁽⁵³⁾。这证明了上表面是完全分离，只有机身尖锥形前段保持了有结构的涡旋特征。螺旋运动没有改变上表面分离的宽度。

相反，在下表面，流动是正常的，没有涡旋和分离，旋转引起从模型两侧流过的分流线移动；它在 $N = 0$ 时是对称的，但是没有明显地改变驻点的位置。

II.4.3. 转子和螺旋桨

图20是直升飞机的旋翼在固定状态（水槽）和在平动状态（水洞）下^(43,73)进行研究得到的测试和显示结果，参见图25H。

处于静止流体中的旋翼的转动特征是一个类似于以前在起动过程中观测过的环形涡旋的形成并向下移动。

在稳定状态下，每个桨叶发出一个螺旋形翼尖涡，其半径逐渐缩小，而节距先是增大，然后可保持完全不变（右上照片）。

实验确定了叶片数量、安装角及在转子上的安装方式的影响。

此外，这种显示可确定涡旋的轨迹，并与A. Lehman⁽⁵⁴⁾在海洋工程学水洞中所得的结果进行比较。在三桨叶螺旋桨情况下（图右下）所得到的实验点虽然有点分散，但还是相当满意地聚集在Sikorsky⁽⁵⁵⁾用螺旋桨在空气中所作的曲线周围。

最后，我们来看看以攻角 $i = 12^\circ$ ，相对于桨距 $\mu = V_0/V_p = 0.3$ 旋进的螺旋桨所发出的涡旋在螺旋平面中的形状（图20左下）。在从转轴旁通过的纵向平面剖示图中，涡旋轨迹的位置已很接近空气放烟试验的结果，尤其是在Modane的法国国家宇航研究院的大型声速水洞中的结果⁽⁴³⁾。

图21是螺旋桨转子实验。当无罩螺旋桨迎风安装时（照片上）⁽⁷⁴⁾，所用的显示方法象非定常现象（涡旋和来自叶片的尾流）那样考虑了叶片和轮毂上的平均流动（直径平面）和局部流动。

地面效应工作台上（ $i = 90^\circ$ ）有罩螺旋桨的情况是同样的，此效应采用的实验是在固定点状态（地面流体的扩展）和平动状态（在螺旋成弯曲流前的“地面效应”的涡旋）下做的^(56,75)，见图21下。这些结果和在空气中、水中做的相似实验结果一样^(57,59)。

II.5. 旋转系统的内部流动

II.5.1. 有罩的螺旋桨

安装在圆柱形罩内螺旋桨的情况在这里仅作简单的回顾。由于参数的提高（螺旋桨的运转状态），外形、叶片安装角、边缘射流等等干扰了模型内流动现象特征的研究。

如上述无罩螺旋桨的情况，空气泡和旋放的染料示明了叶片端部涡旋的重要性，罩和轮毂上边界层的图象以及尾流外形，见图22。

II.5.2. 透平机械

第一个例子是Bertin-Rateau委员会的圆周压气机模型。压气机有一个矩形截面的圆通道，一个有48个径向叶片的动轮在通道中转动。流体通过 Pitot 型进气口流入模型而后从弯管出去，弯管用来在外部流动情况下再注入流体（见图23上）。

当机器当作压气机运行时（中间照片），流谱显示出湍流特征和在通道中流动的涡旋结构。我们可观察到两个对称的涡旋在外部的环壁旁形成。由轮子转动方向出现向流体外的离心作用。

当轮子当作涡轮运转时，涡旋趋于轮轴相反的侧面，它们的方向逆转（见下照片）。

最后一个例子是图1下方的轴流透平机械模型，目前这样的实验正在进行中⁽⁵⁾。

从第一轮实验中得到的显示（图24）给出了和非定常现象形态一样的平均流动图象。非定常现象的形态是指轮毂和罩旁的局部流动以及动轮叶片附近的流动。图24比较了绕固定轮的流动（上图）和当机器在适用范围运转时观察到的流动（中图），以及带旋转的分离流动⁽⁶⁰⁾，此流动具有在适用范围外运转的特征。

II. 展 望

从所举出的大量例子说明，用固体、液体、气体示踪的方法保证了水流甚至是非定常状态下的圆满显示。它确切地指示了这些现象中所特有的奇异性（如分离、尾流、涡旋，等等）。

在法国国家宇航研究院所进行研究范围内，尤其是非定常领域，水力学模拟实验室将象以往一样继续对水洞实验和理论研究做出贡献。

对旋转模型的流动现象的观察将会大大简化，因为今后可采用转子棱镜⁽⁶¹⁾，见图1下。事实上如果光学装置中包括一个旋转的Wollaston三棱镜，就可使动叶的象驻定下来，可随意观察定常现象或不是由叶片所产生的图象，如叶尖涡旋，离心力对局部流动的效应和旋转分离，等等。

另外，某些至今在水洞中没有模拟过的热效应（如热圆柱，等等），今后可以用很简单的方法做些定量的研究，因为法国国家宇航研究院采用了全息干涉法对透明介质作了研究⁽⁵²⁾。

最后，流动中微粒速度的瞬态测量问题，根据Doppler效应用交叉的两束激光的光学方法已得到解决⁽⁶³⁾。目前这种方法已在水洞实验中拍下照片。将来可做无干涉的而且也不是平均性的非定常定量测量（如起动和周期性振动，等等）。

参 考 文 献

- [0] WERLÉ H.-*Visualisation hydrodynamique d'écoulements instationnaires*. Mémoire Présenté au Colloque IUTAM, Québec (mai 1971).
- [1] WERLÉ H.-*Le Laboratoire des Analogies Hydrauliques de la Direction Aérodynamique de l'O.N.E.R.A.* Publication n°103(1961).
- [2] WERLÉ H.-*Visualisation en tunnel hydroaérodynamique*. Rech. Aéron. n°33, (1953).
- *Méthodes d'étude, par analogie hydraulique, des écoulements subsoniques, supersoniques et hypersoniques*. AGARD Rapport 399(1960).
- *Méthodes de visualisation des écoulements hydrauliques*. La Houille Blanche, n° 5, (1963).
- [3] WERLÉ H.-*Aperçu sur les possibilités expérimentales du tunnel hydrodynamique à Visualisation de l'O.N.E.R.A.* Note Technique n° 48, (1958).
- [4] WERLÉ H. et GALLON M.-*Cuve hydraulique pour la visualisation des écoulements au point fixe*. La Rech. Aérop., n° 129, (1969) et T.P. n° 708, (1969).
- [5] WERLÉ H. et GALLON M.-*Adaptation de la cuve hydraulique à la visualisation de l'écoulement dans les turbomachines*. La Rech. Aérop. (à paraître).
- [6] FAUREJ.-*Quelques limitations théoriques des procédés de visualisation*. La Houille Blanche, n° 3, (1963).
- [7] EICHELBRENNER E.A.-*Décollement laminaire en trois dimensions sur un obstacle fini*. Publication O.N.E.R.A. n°89, (1957).
- [8] WILLE R.-*Karman Wirbelstrassen*. Z.F.W. Bd 9, (1961).
CHANG P.-*Séparation of flow*. International series of monographs in interdisciplinary and advanced topics in science and engineering, Vol.3 Pergamon Press(1970); voir page 439 et suivantes.
- [9] MORKOVIN M.-*Flow around circular cylinder—a kaleidoscope of challenging fluid phenomena*. Symposium on fully separated flows(ASME). May 1964.
- [10] CARRIERE P.-*Notions générales sur les problèmes de confluence*. Revue Française de Mécanique n° 24, (1967) et T.P.O.N.E.R.A. n°555, (1968).
- [11] WERLÉ H.-*sur l'écoulement autour d'un faisceau tubulaire*, Revue Fra-

- naise de Mécanique(à paraître).
- [12]WERLÉ H.-*Le tunnel hydrodynamique au service de l'industrie.* Sciences et Techniques, n° 17, (1969) et T.P.O.N.E.R.A. n° 791, (1970).
- [13]WOOTTON L.R.-*The oscillations of model circular stacks due to vortex shedding at Reynolds numbers from 10^5 to $3 \cdot 10^6$.* N.P.L. Aero. rep. 1267. (1968).
- SACKMANN L.-*L'écoulement des fluides au voisinage des points singuliers des obstacles.* P.S.T. Min. de l'Air, n° 92, (1936).
- [14]WYGNANSKI I.-*The effect of jet entrainment on loss of trust for a two dimensional symmetrical jet flap airfoil.* The Aeron. Quart. XVII, feb. 1966-Part 1.
- [15]FLORENT P.-*Sur une nouvelle représentation analytique du profil des vitesses dans un jet subsonique turbulent à symétrie de révolution débouchant dans une atmosphère initialement immobile.* Journal de Mécanique, vol. 4, n° 2, (1965).
- [16]CARRIÈRE P.-*Effets de l'écoulement interne sur le comportement aérodynamique d'un avion à réaction.* 6^e Congrès ICAS, Munich (septembre 1968) et T.P.O.N.E.R.A. n° 601, (1968).
- [17]JORDINSON R.-*Flow in a jet directed normal to the wind.* ARC. Rep. & Mem. n° 3074, (1968).
- [18]TAGANOV G.-*On an interaction effect of a spatial turbulent jet with a transversal flow.* Fluid Dynamics Transactions; Vol. 4, P. 783-791. Inst. of fundam. techn. research. Polish Acad. of Sci., Warsaw.
- [19]CARRIÈRE P.-EICHELBRENNER E. et POISSON-QUINTON Ph.-*Contribution théorique et expérimentale à l'étude du contrôle de la couche limite par soufflage.* Advances in Aeron. Sciences, Vol. II, Pergamon Press (1959) (Proceedings of the ICAS Madrid 1958).
- [20]BROWN D.A.-*Peruvians study rotating-cylinder flap.* Aviation Week et Space Technology (Décembre 1964).
- [21]DIXON C.J.-*Lift augmentation by lateral blowing over a lifting surface.* AIAA Paper n° 69-193 (Feb. 1969) AHS VTOL Research Design, and Operations Meeting.
- CORNISH III J.J.-*High lift applications of spanwise blowing.* ICAS, 7^e Congrès, Rome (Sept. 1970).
- [22]WERLÉ H. et GALLON M.-*Contrôle d'un écoulement par jet transversal.* La Rech. Aérop. (à paraître).
- [23]WERLÉ H.-*Sur l'éclatement des tourbillons.* Note Technique O.N.

- E.R.A. n° 175, (1971).
- [24] WERLÉ H. - *Sur l'éclatement des tourbillons d'apex d'une aile delta aux faibles vitesses*. La Rech. Aeron., n° 74 (1960).
- [25] LOWSON M.V. - *Some experiments with vortex breakdown*. J. Ray. Aeron. Soc., (Mai 1964).
- [26] ENTOV V. - KALACHNIKOV V. et RAISKII Y. - *Les paramètres caractérisant l'effet tourbillonnaire*. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. - Mécanique du Liquide et du Gaz, n° 3 (1967).
- [27] FRANCOIS Cl. et WERLÉ H. - *Vérification expérimentale de la théorie de Prandtl Batchelor*. La Rech. Aerosp., n° 128 (1969).
- [28] TRAN CAM THUY - *Résolution numérique des équations de Navier-Stokes bidimensionnelles dans un domaine fermé*. Thèse de Docteur-Ingénieur (Faculté des Sciences de Paris), 1970.
- [29] GOLLER H. et RANOV T. - *Ecoulement tournant instationnaire dans un cylindre avec une surface libre*. ASME Paper. n° 68-FE-18(5/68).
- [30] ECK B. - *Technische Strömungslehre*. Springer Verlag (1966).
- [31] GÖRTLER H. - *Grenzschichtentstehung an Zylinder bei Anfahrt aus der Ruhe*. Arch. Math., Vol. 1, p. 138, (1948).
- [32] HONJI H. et TANEDA S. - *Time-dependent flow around a circular cylinder accelerated uniformly from one steady speed to another*. Rep. of Res. Inst. for Applied Mechanics. Vol. XVII, n° 59, (1969).
- [33] PIERCE D. - *Photographic evidence of the formation and growth of vorticity behind plates accelerated from rest in still air*. R.A.E. - TN. n° Aero. n° 2745 (1961).
- [34] ANTON L. - *Formation of a vortex at the edge of a plate*. NACA T.M. 1398, (Mars 1956).
- [35] KOOPMAN G. - *The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds number*. J. Fluid. Mech., Vol. 28, n° 3, (1967).
- [36] TOEBES G. - *L'écoulement non stationnaire et le sillage au voisinage d'un cylindre oscillant*. ASME Paper, n° 68-WA/FE23(12/68).
- [37] POPOV S. - *Dependence between the Strouhal and Reynolds numbers in two-dimensional flow past a circular cylinder*. NASA-TT F-11 763 (1968).
- [38] JONES G.W. - *Unsteady lift forces generated by vortex shedding about a large, stationary, and oscillating cylinder at high Reynolds numbers*. ASM Paper n° 68-FE-36(5/68).
- [39] LEGENDRE R. - *Rôle de la mécanique des fluides dans les échangeurs de chaleur*. Revue Française de Mécanique. n° 30 (1969) et T. P.O.N.E.R.A. 768 (1969).

- [40] NAUMAN A. et QUADFLIEG H. - *Über die Wirkung des Windes auf zylindrische Bauwerke*. Abhandlungen aus dem aerodynamischen Institut Aachen. Heft. 19 (1968).
- [41] LIIVA J. - *Unsteady Aerodynamic an Stall Effects on Helicopter Rotor Blade Airfoils Sections*. AIAA 6^e Aero.Spat.Scient.Meeting, New-York (Jan. 1969).
- [42] PHILIPPE J.J. - *Le décrochement instationnaire d'un profil*. Communication au 7^e Colloque AFITAE à Lyon (Nov. 1970), L'Aéronautique et l'Astronautique, n^o 27, (1971-3), P. 51-57.
- [43] WERLÉ H. et ARMAND Cl. - *Mesures et visualisations instationnaires sur les rotors*. Communication au 6^e Colloque AFITAE à Toulouse (Nov. 1969) - T.P.O.N.E.R.A. n^o 777 (1969).
- [44] COUCHET G. - *Les mouvements plans non stationnaires à circulation constante*. Publication O.N.E.R.A. n^o 31 (1949).
- [45] WERLÉ H. *Les mouvements plans non stationnaires à circulation constante. Comparaison entre résultats théoriques et expérimentaux*. La Rech. Aéron., n^o 26, (1952).
- [46] WERLÉ H. - *Visualisation de l'effet de sol à basse vitesse autour d'une maquette d'avion*. La Rech. Aérop., n^o 1970-2-T.P.O.N.E.R.A. n^o 834, (1970).
- [47] LAMBOURNE N.C. - *Some current and proposed investigations into the flow for slender delta, and other, wings in unsteady motion*. ARC Rep. n^o 21 844, (1960).
- [48] LAMBOURNE N.C.-BRYER D.W. et MAYBREY J. - *The behavior of the leading-edge vortices over a delta wing following a sudden change of incidence*. N.P.L. Aero. 1294, (March 1969).
- [49] RENEVIER J. et GIRAUD M. - *Contribution à l'étude expérimentale de l'effet Magnus*. I.R.S.L. Note de documentation n^o D2/67.
- [50] VAUGHN H. R. - *Spin-up and roll reversal of re-entry vehicles*. Sandia Laboratories SC-RR-68-219, (1968).
- [51] GLINIASTY W.de - *Synthèse des résultats d'essais en vol hypersonique de corps de révolution*. Aéronautique et Astronautique, n^o 8, (1969-1).
- [52] HARVEY J. K. - *A study of the flow field associated with a steadily rolling slender delta wing*. J. Roy. Aeron. Soc. (Feb. 1964).
- [53] SCHERER M. et LOUIS B. - *Etude analytique de la vrille*. 1^{er} Colloque AFITAE, Paris (Nov. 1964). T.P. O.N.E.R.A. n^o 187.
- [54] LEHMAN A. - *Model studies of helicopter rotor flow patterns in a water tunnel*. 24th Annual Nation. Forum proceedings Washington of

- the American Helicopter Society, (May 1968), n° 207.
- [55] JENNEY D. S. - OLSON J. R. and LANDGREBE A. J. - *A reassessment of rotor hovering performance prediction methods*. American Helicopter Society, 23rd Annual National Forum proceedings Washington DC (May 1967).
- [56] WERLÉ H. - *Essais de soufflage au tunnel hydrodynamique à visualisation*. Note Technique O.N.E.R.A. n° 61, (1966).
- [57] GILMORE A. W. et GRAHAME W. E. - *Research studies on a ducted fan equipped with turning vanes*. IAS rep. n° 59-59, (Jan. (1959).
- [58] WARDLAN R. L. and Mc EACHERN N. V. - *A wing-submerged lifting fan : wind tunnel investigation and analysis of transition performance*. Nat. Res. Council of Canada. Aero. Rep. L. R. 243 (April 1959).
- [59] HICKEY D. H. and ELLIS D. R. - *Wind tunnel tests of a semi span wing with a fan rotating in the plane of the wing*. NASA T. N. D. 38, (Oct. 1959).
- [60] FABRI J. - *Quelques problèmes d'aérodynamique interne des turbomachines*. Communication au 6^e Colloque AFITAE à Toulouse (Nov. 1969) - Aéronautique et Astronautique, 1970-1.
- [61] CHINCHOLLE L. - *Visualisation des écoulements relatifs dans les machines tournantes. Rotoscope*. La Houille Blanche n° 1, (1968).
- [62] SURGET J. - *Interférométrie holographique pour l'étude des milieux transparents*. Communication au Symposium sur les Applications de l'holographie à Besançon (juillet 1970). T. P. O. N. E. R. A. n° 851 (1970).
- [63] PHILBERT M. - BOUTIER A. - TARAN J. P. et BEAUPOIL R. - *Méthodes optiques utilisées pour la détermination des trajectoires et des vitesses de particules dans un écoulement aérodynamique*. Discussion technique O.N.E.R.A. du 8/4/71 et article à paraître dans La Rech. Aérop.

影 片 目 录

- [64] Film O.N.E.R.A. n° 666 - *Écoulements instationnaires* (1971) (16 mm, sonore, 20 mn, en couleur).
- [65] Film O.N.E.R.A. n° 575 - *Écoulements à grandes fluctuations de vitesse* (1968) (16 mm, sonore, 17 mn, en couleur).
- [66] Film O.N.E.R.A. n° 266 - *Soufflage sur volets* (1958) (16 mm, muet, 5 mn, en couleur).
- [67] Film O.N.E.R.A. n° 649 - *Soufflage latéral sur voilure* (1970) (16

关于突然起动时圆柱尾流中形成的二次涡

M. Coutanceau et R. Bouard

前文〔1, 2〕已指出, 利用我们改进过的显示技术, 能确定速度场和附体尾流的主要几何特征。此尾流是产生在圆柱(直径 D)下游, 圆柱在流体中突然起动并以常速 V_0 在垂直于母线方向上运动。雷诺数 $Re (=V_0 D/\nu, \nu$ 为动粘性系数)为5—40之间。不论对于定常流动或对于非定常流动(即圆柱是突然起动)情况, 我们的测量都是足够准确的, 他们与理论结果比较都是符合的。这样便首次证实了〔3〕的预计。

mm, muet, 5 mn, en noir et blanc).

[68] Film O.N.E.R.A. n° 621 - *Recherches sur les pales d'hélicoptères* (1970) (16 mm, muet, 11 mn, en couleur).

[69] Film O.N.E.R.A. n° 647 - *Simulation < courant plan > de l'écoulement autour d'une pale d'hélicoptère* (1970) (16 mm, muet, 3 mn, en couleur).

[70] Film O.N.E.R.A. n° 174 - *Quelques exemples d'écoulements visualisés au tunnel hydrodynamique* (1958) (16 mm, sonore, 14 mn, en couleur).

[71] Film O.N.E.R.A. n° 412 - *Simulation de l'effet de sol* (1971) (16 mm, sonore, 20 mn, en couleur).

[72] Film O.N.E.R.A. n° 485 - *Écoulement autour d'un avion delta en virille* (1964) (16 mm, sonore, 6 mn 1/2, en couleur).

[73] Film O.N.E.R.A. n° 605 - *Écoulement autour de rotors d'hélicoptères* (1969) (16 mm, sonore, 15 mn, en couleur).

[74] Film O.N.F.R.A. n° 432 - *Visualisations d'écoulements hydrauliques* (1963) (16 mm, sonore, 16 mn 1/2, en couleur).

[75] Film O.N.E.R.A. n° 333 - *Effet de sol sur une plate-forme à hélice* (1960) (16 mm, sonore, 10 mn 1/2, en couleur).

译自: Henri Werlé, *Visualisation hydrodynamique d'écoulements instationnaires*, Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, O.N.E.R.A., Note Technique N° 180 (1971).

(栗小华译 黄瑞新校)