

# 湍流实验研究中的某些进展

颜大椿\*

**[摘要]** 本文介绍过去十年我们在湍流实验研究中取得的某些进展,如边界层湍流中的高阶共振干涉,二维混合层中的转换过程,拟序结构和近声场的相互作用,不稳定波辐射噪声,自由气流中的湍流对湍流分离的影响等。某些关于湍流模式理论以及粒子群和湍流相互作用的实验研究将在不久可得到某些有意义的结果。

## 一、引言

从本质上讲,湍流是迄今为止仍未能被人类真正认识的自然现象之一,因而可以说,湍流研究基本上是一门实验科学。湍流研究的第一个里程碑是雷诺实验<sup>[1]</sup>,它使人们认识到流体中竟然有如此杂乱无章的运动。随后,许多学者企图用随机函数理论的数学方法去解释它,即所谓的小尺度理论,但无能为力。湍流研究的第二个里程碑是拟序结构的发现<sup>[2]</sup>,它使人们认识到在湍流运动中起主要作用的是一些大尺度结构。大尺度结构占有湍流能量的主要部分,它们的出现是有规律的,但周期是不确定地在一定范围内变动。这是近二十年来湍流研究中的一个焦点。随着近代数学和计算机技术的迅速发展,湍流统计理论、稳定性理论、湍流模式理论、大涡数值模拟、混沌理论和格子气技术等均有长足的进步。但是,湍流研究的根本性的突破有待于对湍流运动规律的更全面的认识和分析方法的进一步完善,而实验研究显然处在十分关键的地位。

概括地说来,湍流流动取决于以下几方面的因素及它们之间的关系:拟序结构、小尺度结构、流动稳定性和湍流噪声。其中,特别是对于拟序结构的认识是很不充分的。它和其它物理因素之间的关系也没有完全搞清,更无法用某一种理论模式或数值模拟来取代。以下我们对上述各方面的发展现况和我们的工作做简单的介绍。

## 二、拟序结构和流动稳定性理论

拟序结构的研究已有近三十年的历史,至少在许多方面,可以认为流动稳定性理论是可望用来解释拟序结构的一种途径。在转捩前期,流动稳定性理论给出开始转捩的条件,不稳定波增长率的变化范围,以及共振干涉所造成的亚谐波之间的能量传递。近年来,我们系统地安排了关于射流、混合层和边界层的实验,以探讨实际流动中的拟序结构和流动稳定性理论之间的一致性和差异。

在自由湍流方面,实验研究的结果表明:射流和混合层中存在不稳定波的分叉现象,每次分叉均伴随着湍流成分的迅速增加,因此分叉次数不可能无限制增加,通常不过3、4次后便能形成较充分的湍流。大涡的增长和脱落规律与流动稳定性理论的预测一致,基波的增长伴随

\* 北京大学力学系教授

着大涡的生长,分叉对应于涡对卷并,但特征频率受初始条件的影响,与理论上的最大增长率频率之间常常有40%的偏差。实际流动中经常有多种振型交替出现的现象(剪流层振型、优选振型、螺旋振型),当单一振型为主导时出现规则的不稳定波,在多种振型混杂并以一定概率交替出现时便得到所谓的拟序结构,每种振型出现的概率取决于初始条件和实验的雷诺数<sup>[3,4]</sup>。

在壁湍流方面,我们的实验研究着重于高阶分叉现象的探讨。由于在三波共振理论之后人们更多地注意湍斑、猝发、马蹄涡和发夹涡等各种具体流动结构和现象,并将转捩过程的完成看作是这些流动结构无限增多的结果,因而壁湍流中是否存在高阶分叉是至关重要的问题。实验结果表明,在原始湍流度为0.05%的低湍流风洞中可以观察到第二、三次分叉。饶有兴趣的是中性曲线的不同区段分别对应于分叉的不同阶次,托勒明-许立庭波的亚谐波分量沿着中性曲线上下两支之间的增长区逐级将能量由高频向低频方向传递,并在每一次分叉的过程中湍流成分迅速增长,因而在三次分叉之后托勒明-许立庭波的各个亚谐波分量已经几乎淹没在湍流成分的宽带谱之中<sup>[5,6]</sup>。由此表明,转捩过程经过几次分叉后才能完成取决于原始湍流度和每次分叉中的湍流成分的增长速度。至于在充分发展湍流中是否存在拟序结构以及它们的生长消亡规律等问题,实验研究尚无定论;关于壁湍流在充分发展条件下的流动结构在理论上就更难下手了。

### 三、噪声和湍流的相互作用

在湍流的发展过程中,除了流动稳定性的影响外,还需考虑噪声和湍流的相互作用,如声对于增强和抑制湍流成分的作用<sup>[7]</sup>;声对于加速边界层转捩的作用;以及直接影响拟序结构向有序转换的声反馈作用<sup>[8]</sup>等。因此,严格说来,忽略声辐射的湍流运动方程是不封闭的方程;不考虑声场作用和自身辐射场反作用的湍流理论是不完整的理论。湍流噪声的研究应是湍流基础研究的有机组成,而决不是湍流理论的应用。

早期的湍流噪声的研究认为,声源是由瞬态雷诺应力项产生的。因而在射流下游是连续分布的。因此,实验研究着重于对所谓声辐射强度与射流速度的八次方规律。符合这种规律的射流称作“纯净”射流。并且认为射流中大尺度结构的影响是无足轻重的。

我们的实验结果表明,大尺度结构和不稳定波在射流声辐射中通常起主导作用,因而真正“纯净”的,亦即无大尺度结构的射流是不存在的;而声对大尺度结构的生长同样起着重要作用<sup>[9]</sup>。这些结果只有通过声源区和声辐射场对应关系的仔细测量才能得到的,而过去在声源强度测量上一直是长期未能解决的问题。不稳定波辐射噪声主要集中在射流出口附近的较小的区域内;声源是固定的,因而不存在过去理论分析中通常采用的多普勒频移的假定;声辐射场具有明显的天线效应,因而它的方向特性和小尺度湍流有明显的区别。另一方面的结果表明:当射流噪声足以锁定拟序结构的初相时,可以得到具有稳定的单一大涡脱落频率的不稳定性波,这时对宽带湍流分量具有明显的抑制作用;而当射流噪声的声反馈作用较弱时则有可能有多种振型交替出现,大涡脱落频率分布在较宽的频段中。以上实验结果表明,利用各种声场可以控制不稳定波的主导振型以至射流的整个流动特性,而利用天线效应可以控制声反馈效应的强度并有效地抑制宽带湍流和相应的噪声。这些方面正是目前湍流研究的薄弱环节,理论研究鞭长莫及,是急需实验研究加以开拓的领域。

#### 四、湍流对分离流的作用

分离流是目前流体力学中十分活跃的课题,包括分离条件在内均有较大的争议。对于湍流分离来说,在分离点或线之前是壁湍流,分离之后便可以看作特殊条件下的自由湍流,因此射流亦被称作一种分离流。分离点的位置对于内流或绕流体的流动特性有很大的影响,而来流的湍流特性对分离点的位置又有直接的影响。因此,在强湍流自由来流下的钝体和流线体的绕流问题在风工程和飞行安全研究中都引起人们极大的重视。在来流为强湍流的条件下对于钝体背风面的大涡具有明显的抑制作用,因而使流体运动方程中的雷诺应力项的影响明显大于粘性项,使雷诺效应的作用近乎可以忽略<sup>[10,11]</sup>。这些结果在高层建筑和构筑物绕流问题中湍流特性的模拟方面已取得较好的结果<sup>[12]</sup>。机翼在强湍流来流作用下由于分离点位置的大幅度变化而产生升力特性在一定范围内往返切换的现象在实验中也得到证明<sup>[13]</sup>。由此可以说明,飞行器通过强湍流和相应的剪切层时荷载系数达到 $\pm 2g$ 以上的实际原因。这方面的工作目前主要依靠实验手段进行开拓,关于强湍流作用下湍流分离问题的理论研究还未能很好开拓。

#### 五、湍流模式理论的实验研究

模式理论是一种以某些典型实验结果为依据并试图推广到一般湍流流动中去的高级半经验理论。它的应用十分广泛,但是计算精度和适用范围是需要实验验证的,如对于流场中拟序结构的作用较强、相关性明显、雷诺应力变化迅速的区域往往完全失效。而所谓的典型实验多数是在某些简单流畅中完成的,因此所定的常数仅适用于某些范围,不具有普遍性。忽略模式理论的局限性和所用常数的适用性而盲目用模式理论去处理各类问题是不妥当的。然而模式理论的大量应用表明,它对于解决一般工程问题来说确实可以起到较好的作用。

关于模式理论的实验研究早期主要是对某些工程问题中平均流速、湍流强度和雷诺应力的分布进行校核。但是,对于一般的流场来说,平均流速和湍流强度并不敏感。在处理来流湍流强度较高的内流计算时,则上述的通用常数常常要另行确定了。更直接的研究是对特定流场的  $K$  和  $\epsilon$  进行测量,这时理论计算和实验测量的差别就十分明显,模式理论的适用范围也就十分清楚。这方面的研究对于通用常数的选用是十分重要的,也是目前实验研究迫切需要解决的一个问题。

#### 六、湍流和柱群颗粒群的相互作用

在大量的自然现象和工程应用的湍流流动中,涉及到许多不同尺度的柱群和颗粒群,例如换热器、防风林、网格和流化床、固体输送等。研究带颗粒的流动属于多相流的研究范畴,但是研究湍流和柱群颗粒群的相互作用则应是湍流中很有意义的课题。它的问题是柱群颗粒群怎样在较低雷诺数下产生湍流;以及湍流怎样使柱群颗粒群在较低雷诺数下处于超临界状态,从而大幅度地影响各个柱体和颗粒的阻力。实验结果表明,在单体的雷诺数仅为数百的条件下柱群和颗粒群便已处于湍流分离状态,进入超临界区,并能产生很强的湍流<sup>[14]</sup>。这时流动中的颗粒分布已不单纯是被流动携带的颗粒的浓度分布问题,而是直接影响流动特性的湍流问题了。随着湍流强度的变化,粒子阻力相应改变,可以解释管流中如何产生柱塞流;也可以解

释在某种气流条件下树叶分布趋于均匀而另一种条件下趋于集中,从而导致它们加速生长和脱落的自然环境。这方面的研究具有较大难度,但是正在逐步展开并引起人们越来越大的兴趣。

## 七、结 语

综上所述,对于湍流的研究涉及到湍流内部拟序结构的生长衰变规律以及它和小尺度湍流之间的能量传递,也涉及到拟序结构和流动稳定以及噪声之间的相互作用,还应包括关系到壁湍流和自由湍流分界的湍流分离现象与自由湍流之间的关系。其中很大部分的研究领域有待于实验研究去开拓和认识。因此很多国家都把绝大部分力量集中在各种湍流现象的实验研究上。这种具有开拓精神而又面向实际湍流现象的观念显然有值得我们借鉴的地方。

## 参 考 文 献

- [1] Reynolds, O., *Proc. Royal Soc.*, **22**, (1874)531.
- [2] Brown G.L. & Roshko, A., *J. Fluid Mech.*, **64** (1974)775.
- [3] 颜大椿, 流动稳定性和湍流化问题, 第二届全国近代数学和力学讨论会文集(1987, 上海)429.
- [4] 钮珍南、颜大椿等, Transitional Process of a mixing layer, Symp. 4th Asian Conf. Fluid Mech. (1989. 香港)
- [5] 诸乾康、颜大椿等, 平板边界层中 Tollmien-Schlichting 波的共振干涉, 力学学报, **9**, 6(1988)。或见颜大椿等, Resonant interaction of Tollmien-Schlichting waves in the boundary layer on a flat plate, *Acta Mechanica Sinica*, **4**, 4 (1988).
- [6] 颜大椿等, On the bifurcation phenomena of Tollmien-Schlichting waves in the boundary layer on a flat plate, symp. 4th Asian Conf. Fluid Mech. (1989. 香港).
- [7] 颜大椿, 李晨兴, Wind tunnel Simulation of wind effect on a group of high cooling towers, *Acta Mechanica Sinica*, **4**, 4 (1987)36.
- [8] 颜大椿, 陈凌, On the flow around twin circular cylinders at sub- and supercritical regimes, Proc. intern. Conf. Fluid Mech. (1987. 北京)1162.
- [9] 颜大椿, 大气边界层模拟的湍流相似。力学进展, **16**, 4 (1986)47.
- [10] 颜大椿, 孙仁, 丁一凡, 剪切流中机翼的空气动力特性, 第二届北京航空学会综合科研报告会。
- [11] Laufer J., 颜大椿, Noise generation by a low-Mach number jet, *J. Fluid Mech.*, **134** (1983)1.
- [12] 颜大椿, 射流外围的声场和声反馈机制, 力学学报, **18**, 6(1986)502.
- [13] 颜大椿, 不稳定波辐射噪声, 力学学报, **17**, 1(1985)16.
- [14] 颜大椿, 李晨兴, Some typical flow pattern in the flowfield around a group of circular cylinders, Proc. 1st China-Japan Symposium on Flow Visualization (1988. 北京)98.

## SOME ADVANCES IN EXPERIMENTAL TURBULENCE RESEARCHES

Yan Dachun

(Department of Mechanics, Peking University)

### Abstract

Some progresses in experimental turbulence researches in our laboratory during last ten years are summarized such as: the higher-order resonant interactions in the boundary-layer

turbulence; the mutual influence between coherent structures and instability waves in the transitional process of a planar mixing layer; the interaction between coherent structures and near-field sound; the noise generation by instability waves; the effect of free-stream turbulence on the turbulent separation, etc. Some experimental researches concerning the turbulent modelling theory and the influences between turbulence and particles will be hopeful to get some interest results in the near future.

· 信息 ·

## 生命科学部抓紧青年科学基金评议工作

生命科学部 1989 年共受理青年科学基金申请项目 379 项, 占全委受理总数的 29.7%。该科学部于 5 月 23—25 日连续三天召开委内专家评议会, 对各学科推选的项目逐项进行了介绍和讨论。对有争议的项目通过查阅资料和档案材料, 对申请人的素质、合作的专业、学术思想、技术方法、予期目标等进行了认真的评议, 并与申请者本人所申请项目的同类研究工作和其导师的研究工作进行了比较, 找出其特点和创新性, 对重复项目予以剔除, 最后选出 83 项, 将在专家评审组会上进行答辩和评审。

1989 年生命科学部青年基金申请项目

情况统计表

(按学科组统计)

学 科 组	申请数	申请金额 (万元)	形 式 筛除数	学科评议 筛 除 数	学科评议 筛 除 数	推 荐 答 辩 数	经费 (万元)
微生物学	24	100.54	6	22	2	9	33
植物学	15	65.66					
动物学昆虫学	12	42.36	6	12	5	7	23.3
生态学	18	73.90					
生物化学和分子生物学	13	55.90	7	11	4	7	22.1
生物物理学、生物医学工程	16	59.94					
生理学、心理学	50	199.24	8	27	5	10	32
细胞学	12	55.38	5	16	1	4	16.5
遗传学	14	56.84					
农业科学	70	305.37	5	46	3	16	51
预防医学与卫生学	30	107.68	15	80	10	30	95.4
基础医学与临床医学基础	73	303.82					
药理学与中医、中药学	32	128.02					
总计	379	1554.65	52	214	30	83	273.30

(生命科学部供稿 摘自本委“信息”)