

# 相干结构的研究应是 当前湍流研究的重点

周 恒\*

**【摘要】**以对工程技术有重要意义的剪切流中的混合层流和边界层流为例,说明了在这些流动中存在着相干结构以及这种相干结构在湍流的发生、发展及维持中所起的作用。尽管由于实验资料的不完备,目前还没有一个有关相关结构本质的一致认识,但有不少理由表明,在不太长的将来对相干结构的理解可能会有所突破。这无疑对完全解决湍流这一难题将是一个巨大的推动。

湍流的研究已经历了 100 多年的历史。最初的几十年,大家的兴趣在于计算各种流动的平均速度剖面,提出了一些简单的模式,如混合长理论、涡量输运理论等。由于平均速度剖面一般是确定的,所以这个第一阶段的研究可以说是用确定论的观点对待湍流。

到本世纪 30 年代,兴起了湍流的统计理论,认为湍流是一种随机过程。这是观点的一个大的转变。按照当时的设想,湍流的统计理论可以按由简到繁的程序,先研究均匀各向同性湍流,然后是均匀剪切湍流,最后是一般的剪切湍流。但是就在均匀各向同性湍流阶段,已遇到了方程不封闭的问题,以至直至今日,仍是一个没有完全解决的问题。当然,在均匀各向同性湍流的研究中,确实得到了不少普遍有用的知识,如湍流能谱的分区,高波数区的普遍形式等。均匀各向同性湍流的一个很大缺陷是没有说明大尺度结构是如何产生的,只是在承认已有大尺度结构存在时,研究能量在不同尺度结构中的传递规律。而且大尺度结构从统计的角度看,也应是均匀各向同性的。

从研究确定性的问题到研究随机性的问题,这在认识上是一个大的变化。如果做一个对比,有如光学理论从最初的粒子论发展到波动论一样。

其实在 40 年代, Townsden 已经发现剪切湍流中有大尺度结构存在,但这对湍流理论的研究并未产生很大的影响。到了 60 年代后期,由于斯坦福大学一些人的实验研究,可能也由于大家已开始认识到单纯地统计理论这条路看来走不通,湍流边界层中不断地、间歇地、近似周期性地发生于近壁区的猝发现象,引起了人们的极大注意,因为它对湍流的发生、发展及维持起了极重要的作用。以下试以自由剪切流中的混合层及壁湍流中的平板边界层这两种最简单的情况来说明这一点。

自由剪切层的情况大体上如图 1 所示。它的速度剖面示于图 1(a)中。图中有一个拐点。剪切层的层厚沿流向大体上是线性增加的。就一般的实验装置中所产生的混合层来说,无论原始的背景湍流度有多大,在开始的一段总可以观测到基本上是二维的大尺寸涡。涡的演化是相当有规则的,基本上是确定性的。这可以说是一种很有代表性的相干结构(见图 1

\* 天津大学力学系教授

(b)。随着涡向下流的传输,还可能发生涡的合并、撕裂等现象,也基本上是确定性的。再往后就观测到显著的三维扰动或三维的结构。再往下游就没有明显的大尺度(混合层厚度量级的)结构,湍流逐步转变成接近于各向同性的,最后逐渐衰减。

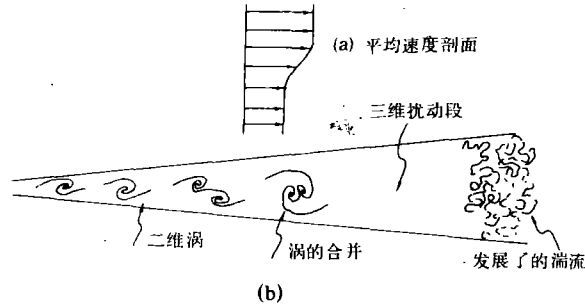


图 1

从混合层中湍流的演化可以看出首先是大尺度相干结构从平均流中得到能量,然后产生较小一点的三维结构,再逐步转化为更小的湍流结构。在后期已接近于各向同性的,但在前期显然不是各向同性的。在这里,大尺度的相干结构起着从平均流中吸取能量,然后传送给小尺度结构的中介作用。从实验知道,在相当下游的地方,仍可检测到上游相干结构的余留影响。

混合层所以会产生相干结构的原因已经相当清楚。混合层的速度剖面有一个拐点。从流动稳定性的角度看,这是一种不稳定的剖面。因而只要有小的背景扰动,它就会起一个带动放大器的作用而将某一频带中最易被放大的模式,也就是最不稳定的模式选择性地放大,这样就使原来沿流向只是渐变的涡量重新分配而形成大尺度涡。这一过程目前已能较好地用稳定性理论来解释其机理。从二维扰动占优势转变为三维扰动占优势的过程,目前还不能很好地说明其机理。再往下游,速度剖面已变得相当平缓,不稳定的机制已不强烈,因此已不再形成新的大尺度涡。总的来说是湍流逐步衰变的阶段。

再以平板边界层为例(见图 2)。如果边界层内外的原始扰动都很小,则在前段应该是层流。但超过某一临界雷诺数处,就可能自背景扰动中演化出二维小扰动波(称为 Tollmien-Schlichting 波,或 T-S 波)。在向下游演化的过程中,当其幅值达到来流 1% 的量级,就将出现波数有选择性的三维波,伴之以周期性(流向及展向都有)的纵向涡。三维波的增长远较二维波快,大体在 4—5 个 T-S 波波长的范围内,流场中就会出现高频扰动而呈不规则状,很快就转为完全的湍流。

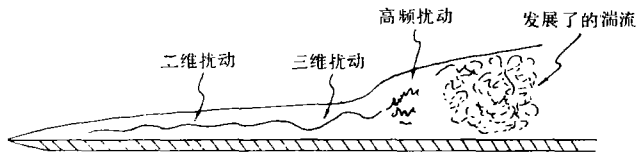


图 2

与自由剪切流不同的是,由于有边壁的存在,在到达完全湍流区后,上游的不稳定波对下游的影响很有限。因此下游湍流能量不是简单地来自上游的大尺度扰动。事实上除了来自上游的大尺度影响外,还在当地有产生新的相干结构的可能。

从实验中已经发现,在平板边界层的湍流区的每一处,都可能产生新的相干结构。它与

上、下游较远处的相干结构并不一定有很大的关联性。但是由于实验手段和理论模型的不足,不同的学派对于相干结构的本质有不同的看法,不像自由剪切流那样有比较一致的意见。

比较一致的意见是,在靠近边界层底层处(约 $<60y^+$ 处, $y^+$ 为摩擦长度)有准周期性的猝发现象,而在 $<30y^+$ 处可以检测到展向间隔约为 $100y^+$ 的低速条纹。在边界层外区,即约 $>100y^+$ 的那部分(低速风洞湍流边界层的名义厚度约在 $1000-2000y^+$ 的范围),则存在尺度与边界层厚度同量级的大结构(有人也称之为大涡),这也可以从边界层边沿的间歇现象中间接地感受到。有人认为底层的猝发与外区的大涡扫过有关。H.Fiedler把这两种尺度的结构形象地表示成图3的样子(我们做了点修改)。

底层区的猝发现象对湍能的产生有很大的贡献。实验结果表明湍能产生最强烈的区域是近壁 $<20y^+$ 处,这与早年关于湍流边界层的概念中认为近壁区应是层流有根本的区别。

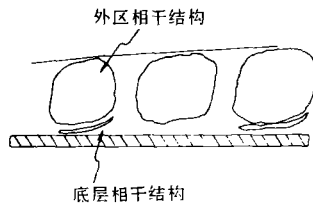


图3

由此可见,平板边界层湍流中的相干结构,对湍流的发生、发展和维持,同样起着重要的作用。

图2的层流段中的扰动波的产生和演化,包括二维和三维波的问题,目前就机理而言已经基本清楚了,大部分的问题已有正确的理论模型和计算方法。出现高频扰动的那一段机理尚不十分清楚,完全湍流部分存在的问题更多。但是有人综合分析大量实验资料后发现,湍流段底层猝发阶段检测到的瞬时流速分布及尺度等,如果和层流区三维波出现的那一段比较,只要二者都以壁面参数(摩擦长度及摩擦速度)来度量,有很多相似之处。这提示我们湍流边界层底层的相干结构也有可能是由某种机制触发的一种不稳定波。事实上,近年来国内外都有人从这一观点提出了底层相干结构的理论模型。虽然还不能肯定说一定正确,但确实显示了一定的前景。

对外区的结构的意见更不一致,但大尺度结构的存在则无人怀疑。事实上,近年已有不少有关利用“大涡破碎装置”(实际是设置在边界层外区的剖面为机翼型的装置)破坏外区的大涡结构,以减少边界层内法向不同层间的交换而达到减阻目的的报道。目前缺少的首先是更充分的实验资料及正确的理论模型。已有的资料表明其尺度与边界层厚同量级,流向尺寸更大一些。其输运速度为来流速度的 $0.83-0.93$ 倍。由于大涡结构的产生,自然要从平均流中吸取能量,有理由猜想它也是由某种不稳定机制产生的。最近天津大学的一个硕士研究生以不稳定波的观点来研究大尺度结构,在对涡粘系数(湍流的最简单模式)做了一定的假设后,得到了一些可喜的结果。是否还可以从其他观点来说明大尺度相干结构的产生,正是一个广阔的研究天地。

对相干结构的研究,不仅可以“消极地”说明湍流,而且对湍流施加主动控制有指导意义。湍流的现象是极其复杂的,但R.Narasimha说过:“人们几乎不能想象对湍流进行控制是如何

的容易”。而控制湍流的途径就是改变其相干结构,因为相干结构至少是准确定性的,而它对湍流的产生、发展及维持起着重要的、决定性的影响。

近年来人们在减阻技术的研究中通过实验发现,有减阻作用的方法几乎都对湍流边界层底层的猝发频率或低速条纹的间距改变有作用。高分子减阻也是如此,而且只需高分子添加剂存在于边界层底层就行。对于在技术上有重要应用价值的自由剪切流,如射流等,也可以通过对其相干结构的产生及演化加以控制。例如通过引入小能量扰动而强制相干结构中涡的合并,就有可能大大增强射流对周围流体的裹挟作用。对于燃烧室中的喷咀来说,这就可以提高燃料与助燃剂的混合而使燃烧效率提高。又如对于射流产生的气动噪声来说,起主要作用的是射流中的大尺度相干结构而不是小尺度湍流,这也给控制噪声提供了一种途径。

如果我们仍以光学的发展作一对比。则相干结构的发现表明了不能用纯粹的随机运动理论去说明湍流现象,必须再次把确定论的观点引入湍流的研究,但同时也应保留统计理论的有用部分。正如在光学中,由于波动说不能解释黑体辐射的现象,因而粒子论的更高层次,即经典的量子论又被引入光学一样。问题是现在已知统计理论还不能完全解决湍流问题,但又还提不出相应的准确定性理论的合理模型。一旦这个模型被建立,则湍流的两个重要方面,即随机的和确定的两方面,就都有了自己的基础。如果再进一步能把二者有机地联系起来,我们对湍流的认识就可以说基本完成了,就如在光学中粒子论和波动论被现代量子理论统一那样。因此我们完全有理由认为,当前湍流的研究应当以对相干结构的研究作为突破口,而且这个突破将不是在遥远的将来。

## EMPHASIS SHOULD BE PUT ON THE UNDERSTANDING OF THE COHERENT STRUCTURES IN THE RESEARCH OF TURBULENCE AT THE PRESENT STAGE

Zhou Heng

(Tianjin University)

### Abstract

With mixing layer flow and boundary layer flow as two examples of technically important shear flows, the evidences of the existence of coherent structures and the role they play in the origine, evolution and maintenance of the turbulent shear flows were given. Notwithstanding the non-existence of an universally acknowledged idea about their nature due to the inadequacy of experimantal informations, there are plenty reasons that a breakthrough on the understanding of the coherent structures is possible before too long, which will certainly be a great impetus for the complete solution of the difficult problem of turbulence.