

湍流中的相干结构

王发民*

【摘要】 30年来,对湍流的研究出现了不少新的研究手段,如大涡模拟、混沌、分叉及相干结构等。但是,目前在湍流机理上最有希望突破的是大尺度相干结构的研究和把大型计算机作为湍流研究工具。本文综述了近年来相干结构研究发展概况,讨论了在相干结构的理论研究方面应该开展的工作。

一、引言

1. 计算机作为湍流研究工具被广泛应用,对湍流研究的进展起着重要作用

目前,在湍流研究领域计算机不仅作为实验设备的一部分应用于实验控制、数据采集和分析,而且应用于稳定性和相干结构的数值模拟。更重要的是,目前直接求解时间相关的完全 Navier-Stokes 方程已经成为现实。

计算机模拟可以系统地改变和有效地控制流场的初始及边界条件,从而可较为细致地讨论它们在流体运动中的影响和所起的作用;也可以较为准确地计算涡量、压力、耗散等在实验中难以测量准确的量。但是就目前情况看,计算机所能模拟的流场的雷诺数大大低于实际雷诺数,而且所能模拟的流体运动时间也是比较短的,这些都有待于实验研究来完善。同时,计算机的数值结果也需要实验结果验证。

2. 湍流中相干结构的发现是湍流研究的一个新的突破

相干结构的发现使我们从湍流运动形式上的无规律的混乱现象中找出内在的有序现象。Kline-Reynolds(1967), Crow 和 Champagne(1971), Cantwell(1981), Lumley(1981), Colles(1981, 1985), Antonia(1981), Lanfer(1983), Regollo 和 Moin(1984), Keffer(1982), Hassian(1978, 1983, 1986)等都在这方面做了重要工作。

早在 Prandtl 和 Taylor 的混合长度和涡量传输理论中已经隐含了大尺度结构的输运。而在 Brawn(1935), Anderson(1954), Bradshaw(1964)和其他人的研究中也明显地指出该有组织的结构存在。但是相干结构在湍流现象中所起的作用和广泛认识是通过 Kline, Klebanoff, Roshko, Crow, Coles 等人的工作才变得更加清楚的。尽管由于相干结构的发现和研究,使得湍流的基本观念有所变化或者需要修正完善,但是关于相干结构使湍流重新定义的提法是夸大其词的。无论如何,相干结构确实为湍流研究注入了新的动力。

二、相干结构的概念

对于湍流中的相干结构,20年来人们做了许许多多的理论解释。鉴于各人的实验条件不同,

* 中国科学院力学研究所

理论解释必然各异,很难归纳出一种完善的模式。Klene 等人认为相干结构可以用一种三维涡旋元的变形、拉伸和破碎过程来描述。而 Willmarth(1972)认为,猝发过程开始时,先形成一种“涡对结构”,而当该涡对向下游移动时,由于壁面的作用使得涡对不断抬高而离开壁面并变形,内部涡量剧增而导致破裂。Praturi 和 Brodkey(1981)认为相干结构是边界层外来流与区内流体相互作用的结果。Hussain(1983)给相干结构以一个比较广泛的定义:相干结构是某一特定区域上的具有瞬时相位相关的涡旋的相互衔接的湍流质。即在随机的决定湍流特性的三维涡中,存在着一个瞬时拟序的相干结构特殊区域上的大尺度涡量分量。我们称这种在空间和相位上瞬时相关的涡量为相干涡量,它们有不同的边界和各自独立的领域,是区分相干结构的主要内容。

根据 Hussain 的定义,一个湍流剪切流可以分为相干结构和非相干湍流。显然,这样的区分是十分精细的,然而不唯一,因为非相干湍流中既包含有小尺度湍流,又包含了大尺度的无旋运动。

诱导的目的是区分相干结构和非相干结构。我们应用相位平均运算来表示相位排列的整体平均。它是一个在同一相位或同一级别上的一连串结构的平均,而不是所有相位的平均。那么,同一参数尺寸同一模型的一个结构的相位平均就是一个相干结构,而瞬时意义下的从相位平均中分离出来的量表示非相干湍流。

什么是相干结构的主要特征呢?一般人都从量上去区分,包括速度、压力、间隙现象等,但这些都不是主要的。Praturi 和 Brodley(1978)通过对不同实验的观察指出,自由来流中速度和湍流度的不同,导致流动中事件的大小、速度与压力强度的差别,但是事件的基本性质不变。

相干结构在热量传导、质量和动量传输以及产生汽动噪音中起着重要作用,但是它本身并不需要很高的能量(Bradshaw, 1983)。在转换段,相干结构是高能级的,而且它在湍流现象中起主导作用,而在完全发展湍流中,相干结构与非相干湍流带有同一量级的能量。

用涡量定义相干结构一直是争论的焦点,而且目前逐步地被人们承认。然而,目前大多数相干结构的研究者既没有寻找相干涡量又没有用它来诱导相干结构。

三、相干结构的理论分析

1. 稳定性分析

相干结构起源于稳定性问题,一般有 Kelvin-Helmholtz 自由面剪切流稳定性, Tollmien-Schlichting 和 Görlter 边界层稳定性等。而每一种不稳定性都可能产生一种特殊的相干结构,最简单的例子是 Couette 流的 Taylor 涡。由于相干结构的尺寸大小可以不随时间改变,线性理论可以说明一些问题。而对于剪切流,特别是在完全发展阶段,这些线性理论是不完全合适的。这是因为:(1)湍流的基本流是不稳定的,而且存在着大尺度运动的高能量级的非线性交换。这些非线性相互作用是引起不稳定性的主要因素;(2)时间平均谱不稳定性理论是建立在时间特征量和长度特征量都大大小于所讨论的波的假定上的。但是在剪切湍流中,湍流特征量和讨论的波是同一量级,这样如果转换的不稳定波碰不到平均流速谱时,它们的稳定性就不能同一而语了;(3)即使平均流谱线形状不变,但若大小随着时间变化,它们的稳定性也会有很大差别。可以说线性理论不能完全解决完全发展了的湍流的稳定性问题。非线性,非定常稳定性的研究对于相干结构的研究是很必要的。

2. 波、孤波、奇异吸力引子

不少理论工作者 (Tam 和 Morris, 1985) 把相干结构当成波来研究, 其中有一些人还认为相干结构是单波 (Fielder, 1980)。由于相干结构与湍流质紧密相关, 显然将它看成波是不合适的, 特别是从相干结构的相互作用中不断有不同尺度的新结构出现, 无论怎样都不能将它视为单波。相干结构是不是吸力引子呢? 在封闭湍流场的转换段, 例如 Taylor-Couette 流中, 已经通过实验得到吸力引子特性。但是对于自由剪切流等流场, 还没有看到有这方面的工作。从理论上讲, Navier-Stokes 方程是非线性的, 同其他非线性方程一样, 可以寻找出具有奇异吸力引子特性的解, 特别是相干结构在相空间的时间转换可能有吸力因子特性, 但是目前还没有这样的工作。

3. 涡力动力学

相干结构用涡量来研究不仅是将湍流运动模式的直观理解演变成涡旋实体, 而且可望通过涡力动力学的概念解释相干结构的转换和相互作用。涡环, 或者更一般地说涡量架, 是研究相干结构最有力的候选者 (Saffman, 1985)。Oshima 和 Asaka (1975), Oshima (1975) 讨论了涡环和涡架的相互作用。Saffman (1975) Scole (1970) 的研究指出涡线的破裂和重新形成在涡环的相交中起着关键作用。

为了弄清相干结构的相互作用, 三维涡对 (或者涡线列) 的研究是很重要的, 目前 Schlayer 和 Rosenhead 等都作了一些初步的工作。Crow (1970) 和 Jimenez (1975) 应用 Biot-Savart 规律分别计算了沿轴线波长 $k\delta \ll 1$ 时, 反向旋转涡对与同向旋转涡对的稳定性问题, Crow 对充分小的 k 发现了弱不稳定性, Jimenez 则发现, 对于长波逼近理论, 涡对的外形总是稳定的。这两个结果与 Karman 涡街和混合边界层涡关于三维干扰波的慢慢变化的稳定性是一致的。

然而湍流相干结构的形状是很复杂的, 而且与流体粘性密切相关, 而涡力动力学、涡量的相互作用等都是建立在 Euler 流和简单的几何形状之上。因此, 在涡量的研究中必须考虑流体的粘性。这些都有待于进一步的工作。

四、相干结构的数学描述

1. 相干结构的描述

在相干结构的描述中应该用平均时间的方法引入相位平均的概念。

$$\langle f \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(\underline{x}, t + t_i)$$

式中 t 表示与相位参照系相关的时间, t_i 表示所选择的相位列发生的随机时刻, $\langle f \rangle$ 表示从相位排列角度出发的整体平均。

一个剪切湍流可以分为时间平均量和时间相关量两部分, 而后一部分又可看成相关扰动叠加上非相关的湍流。于是, 一个瞬时流场的变量 f 可以写为: $f(\underline{x}, t) = F(\underline{x}) + f_c(\underline{x}, t) + f_r(\underline{x}, t)$, $F(\underline{x})$ 表示时间平均量, f_c 和 f_r 分别表示相干与不相干的湍流分量, 则,

$$\langle f \rangle = F + f_c \quad f_r = f - \langle f \rangle$$

Reynolds 和 Hussain (1972) 应用上述三分量表示式, 讨论了平行剪切湍流中相干波的力学属性。Zhang 和 G. M. Lilley (1983) 应用与 Reynolds 相似的方法讨论了平板边界层相干

波的二次失稳问题,得到了与实验比较一致的结果。但上述工作都没有考虑非线性相互作用的影响,因而不能解释相干结构中涡旋破裂—重新组合等重要现象。

三维分量表示式是基于把相干结构看作平均流的扰动波的,有时相干结构是一个实实在在的流而非扰动,这样三分量表示式就不合适了,应引入两分量表示式

2. 相干结构的数值模拟

目前计算机直接模拟剪切湍流中的相干结构,已经取得一些实验室很难做出来的结果。如 Metcalf(1986)使用拟谱方法在 $64 \times 64 \times 64$ 个节点上求解了完全的三维 N-S 方程。他在流向和径向平面应用了周期边界条件和自由吸力假设,平均流场谱线是二次正切曲线及三维扰动波的叠加。图 1 绘出了混合边界层的数值模拟结果。图中 (a) 表示 $x-z$ 平面的瞬时涡量; (b) 表示在小扰动力作用下的同一湍流量; (c) 表示径向涡量总平均,上部是情况 (a) 时,下部是情况 (b) 时。(d) 表示流向速度的等值线。

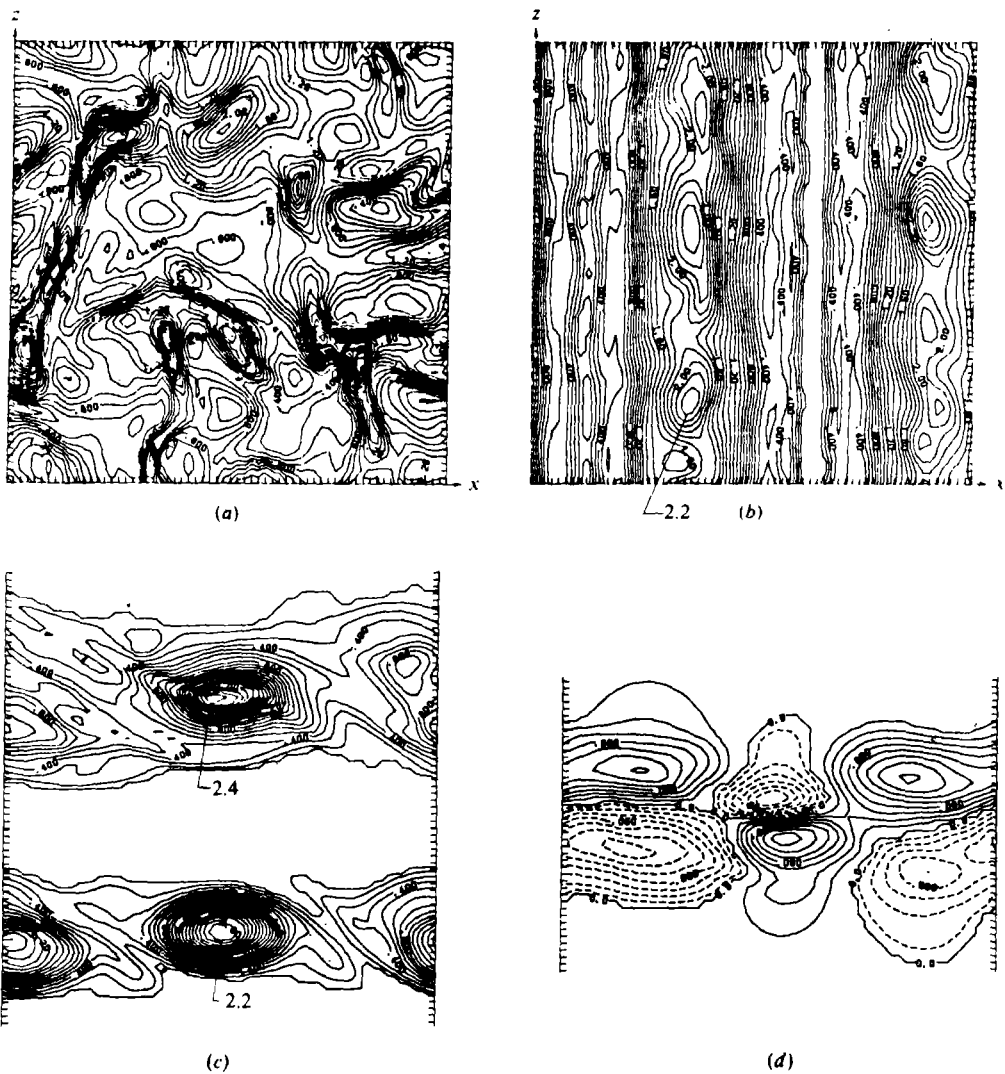


图1 混合边界层的数值模拟结果

应用计算机数值模拟,还可以执行将随机脉冲叠加在初始条件上激发涡结构的卷起。如,用小振幅基波和一次谐波激发单涡结构,用小振幅基波和一次谐波二次谐波激发涡对等(Michalke 1965),

五、相干结构的利用

1. 反向热量与动量传递——负产生

应用相干结构的概念可以解释一直不十分清楚的负产生现象。在一般剪切流中,平均流场速度梯度和雷诺应力保持同一负号,它们的乘积保持正号。但是对于壁面射流和不同表面粗糙度的管道流等,平均流的零梯度点与雷诺应力的零梯度点不完全重合,形成了平均流速度与湍流的平均动量梯度相反的负产生区。负产生现象一直是人们研究的重要课题之一(Hinze, 1970), (Begnier, 1977)

Hussain 和 Zaman(1980, 1985)的研究表明,在混合边界层中,负产生的出现需要一个在径向截面上的非圆形的而且向液体流动方向倾斜的涡结构。图2以椭圆结构为例说明了这个观点。 A 的长轴与流动方向相反,没有负产生现象, B 则产生反向的动量传输速度。

另一个例子是两个涡的配对过程。如在图3的4步相位相连的涡配对过程中,经过细致测量, F 在边界层厚度一半的地方的低速区产生明显的反向雷诺应力梯度。

2. 产生结构

通过对混合边界层,圆形或椭圆形射流中相干结构的实际测量,发现最大的湍流产生区是在具有低涡量特征的鞍点。“鞍”被认为是由沿着分隔线排列的一组径向涡组成。我们称为“带”。在带上伴随着环量相反的涡,整体结构的纯环量为零,被称为“肋”。Jimenes 和 Cogolles(1985)在实验中显示了上述流场现象。Metcalfe(1986)给出了数值结果。

在“带”和“肋”的径向涡的子结构带动下,外面的无旋流体在没有任何诱导的情况下进入混合层而渗入“带”区。由于角动量守恒,“肋”的不断拉伸使旋转加快。而粘性扩散又将涡量传递给周围流向剪切层的流体。作为初始结构拉伸的结果,旋转湍流从“带”区平移出去,而新的湍流又在这儿产生,形成一个不断再补充的湍流结构的过程。由于“肋”环绕着“带”,则“带”的作用就是带着这些湍流进入结构的中心。

3. 螺旋和耗散

另一个有趣的相干结构拓扑例子是螺旋拓扑结构。Moffatt(1969)给出了螺旋量的定义,Kerr 和 Gibson(1985),Metcaff 和 Hussain(1985)对混合边界层中湍流螺旋量和耗散量进行了数值模拟。图4给出了Metcaff的计算结果,图中绘出了 $x-y$ 平面的径向速度(a);螺旋量的正值(实线)和负值(虚线)(b);湍流耗散(c);耗散(虚线)和螺旋量(实线和点画线)的对比(d)。

4. 涡相互作用中的“切断-衔接”过程

涡结构的相互作用的研究,对于认识转换过程中渗混、传输、及湍流产生等湍流基本现象是十分重要的。而最有意义的涡相互作用现象是在涡相遇后伴随的裂开和重新衔接过程,称为“剪开-衔接”过程。

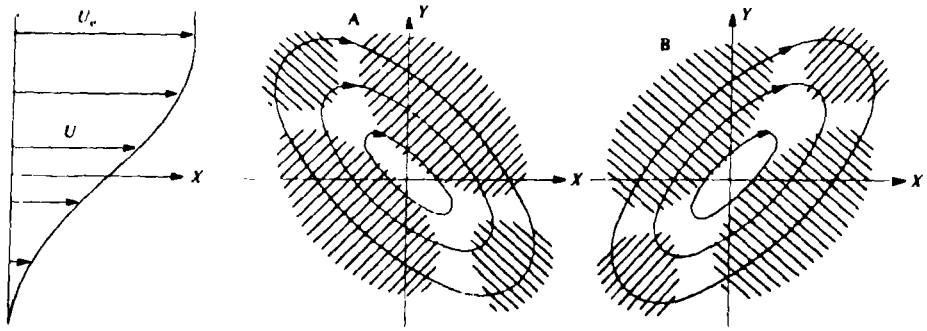


图2 混合边界层中负产生现象

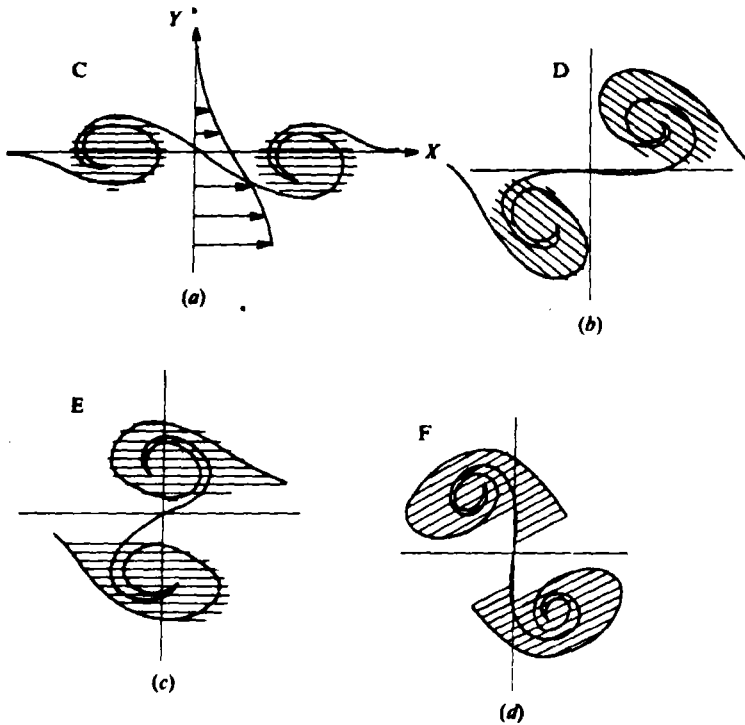


图3 4步相位相连的涡配对过程

在这里介绍一下 Takaki 等的工作可能是有趣的。他利用了涡量方程和轴对称性建立了一个理想模型,并用它预报了湍流射流的噪声。作为初始条件,在相交区叠加了一个抵消涡管涡量的小涡环,并使他们相衔接。由于在涡相互作用中冲量守恒,而叠加的小涡环具有向下的冲量,我们必须再叠加一个具有向上冲量的反作用涡环。

利用对称条件,将速度和涡量在初始和最后位置展开为幂级数,展开式的系数则由开始和最后的位置和三维涡量方程确定。

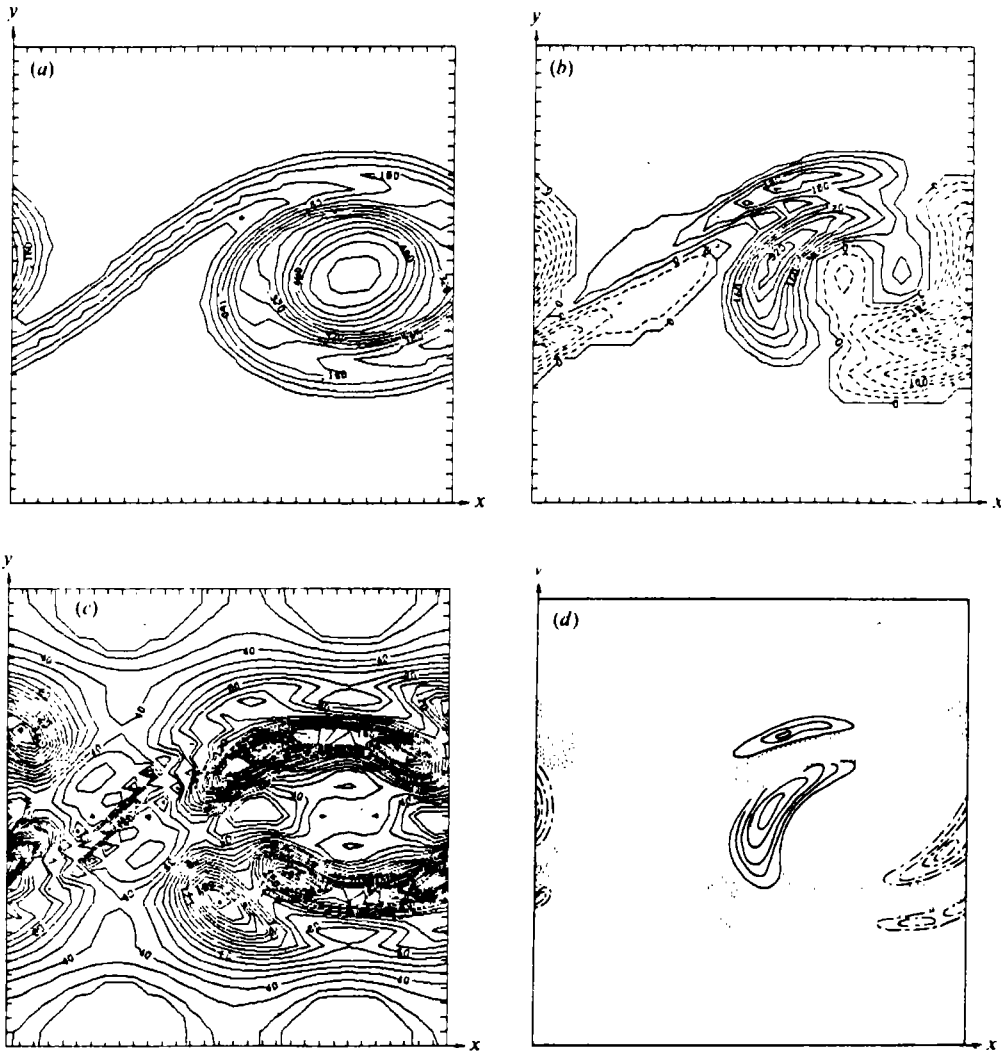


图 4 混合边界层螺旋和耗散数值结果

六、在理论研究方面应该开展的工作

1. 综合近年来许多研究者的工作,相干结构反映了许多剪切湍流的特征,但目前还没有这方面的工作。
2. 尽管相干结构已经被广泛的研究,但是目前还没有统一的理论解释,如能得出大家都承认的定义,则是很有益的。
3. 对于二分量相干结构表示式的方程封闭问题可以归纳为一般的雷诺平均概念的模式封闭问题。将这些理论应用到相位相关的相干结构中,可能会有很大的进展,目前还没有这方面的工作。
4. 相干结构在剪切湍流中的出现,是由一系列各自转捩和阻尼的结构组成,是一个明显

的不稳定结构。目前这个问题还没有一个理论解释。而考虑不稳定因素的非线性影响的稳定性工作是很重要的。

5. 在剪切湍流中可能都存在相干结构,但相干结构不一定是剪切湍流的决定条件,它仅在一些特殊情况,如转捩、共振或壁面湍流中是决定因素。而非相干湍流在完全发展的湍流中也是一个重要因素。

参 考 文 献

- [1] Antonia, R.A., 1981, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 131.
- [2] Bradshaw, P., 1966, *J. fluid Mech.*, **26**, 255.
- [3] Brandstater, A., Swift, J., Swinney, H.I. & Wolf, A., 1983 *Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids* (ed. T. Tatsumi) P. 179, North-Holland.
- [4] Cantwell, B., 1981, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 457.
- [5] Cantwell, B. & Coles, D., 1983, *J. Fluid Mech.*, **136**, 321.
- [6] Champagne, F. H., 1978, *J. fluid Mech.*, **86**, 67.
- [7] Coles, D., 1985, Dryden Lecture, A.I.A.A.
- [8] Crow, S.C. & Champagne, F. H., 1971, *J. Fluid Mech.*, **48**, 547.
- [9] Hussain, A.K.M.F., 1983, *Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids* (ed. T. Tatsumi) 179, North-Holland.
- [10] Hussain, A.K.M.F. & Zaman, K.B.M.Q., 1981, *J. Fluid Mech.*, **110**, 39.
- [11] Hussain, A.K.M.F. & Zaman, K.B.M.Q., 1985, *J. Fluid Mech.*, **159**, 85.
- [12] Jimenez, J., Cogollos, M. & Bernal, L.P., 1985, *J. Fluid Mech.*, **152**, 125.
- [13] Kline, S. J., Reynolds, W. D., Schraub, F. A. & Runstadler, P.W., 1967, *J. Fluid Mech.*, **30**, 741.
- [14] Laufer, J., 1983, *J. Appl. Mech.*, **50**, 1079.
- [15] Lumly, J.L., 1965, *Phys. Fluids*, **8**, 1056.
- [16] Lumly, J.L. 1985, *J. Fluid Mech.*, **159**, 359.
- [17] Matcalf, R.W., Hussain, A.K.M.F., Menon, S. & Hayakawa, M., 1986, *Turbulent Shear Flow*, Springer.
- [18] Moffatt, H.K., 1983, *Transition and Turbulence* (ed. R.E.Meyer), P. 223 Academic.
- [19] Moin, P. & Kim, J., *J. Fluid Mech.*, **155**, 441.
- [20] Moore, D.W. & Saffman, P.G., 1975, *J. Fluid Mech.*, **69**, 465.
- [21] Reynolds, W.C. & Hussain A.K.M.F., 1972, *J. Fluid Mech.*, **117**, 425.
- [22] Reynolds, W.C. & Bouchard 1981, *Unsteady Turbulent Shear Flows* P. 402, Springer.
- [23] Saffman P.G., 1978, *J. Fluid Mech.*, **84**, 625.
- [24] Saffman P.G. & Baker G.R., 1979, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **11**, 95.
- [25] Takaki, R. & Hussain, A.K.M.K., 1985, *Turbulent Shear Flows*, vol. 5, P. 3.19. Cornell University.
- [26] Wgnaski, I., Oster, D. & Fiedler, H. 1979, *Turbulent Shear Flows II*. Imperial College.
- [27] Zaman, K.B.M.Q. & Hussain, A.K.M.F., 1984, *J. Fluid Mech.*, **138**, 325.

COHERENT STRUCTURES AND TURBULENCE

Wang Famin

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

The significance of turbulence in most natural and technological flows as well as its inherent complexity cannot be overemphasized. Despite dedicated efforts many able scientists over the decades, Turbulence continues to persist one of the least understood arenas of the natural sciences. New ideas and interpretations are highly desirable, but also must be carefully examined. Turbulence research has experienced two revolutions in past decade. The first, rather profound, is the discovery of large-scale coherent structures. The second is the integration of the digital computer as an active component of the turbulence research arsenal.

Purpose of this paper is a statement on the present state of understanding of coherent structures, in particular their spatial details and dynamical significance. The definitions or its dynamical implications are discussed. The recent analytical treatments of coherent structures, such as triple and double decompositions, instability of free shear layer or boundary layer, waves, solitons, strange attractor and vortex dynamics, are reviewed and commented. We also briefly discussed some benefits of coherent structures, including the negative production, the mechanism of production of turbulence in shear flow layers and cut-and-connect interaction of coherent structures.