

湍流多重尺度结构理论

周祖巍*

【摘要】 湍流的多重尺度理论可以根据几类典型的失稳机理产生不同的大尺度运动计算湍流流场,从而使湍流流场的实际计算找到可信的理论依据,改进目前已有的过于偏重经验关系或经验常数的计算模式,使其能比较普遍地解决一些湍流问题。

湍流是自然界和工程技术中最普遍的流动现象,许多实际问题需要定量确定湍流流场并进而控制它使之向有利方向发展。为了解决这些问题人们对湍流作了大量实验研究,归结出许多用于计算具体环境下湍流场的工程模式,但是对湍流机理的认识尚未取得突破性的进展。近年来,湍流研究最值得注意的一个方向是关于相干结构的研究。早在30年代末和40年代就有人观察到湍流中存在着拟序的相干结构。随着可视化技术、热线和激光的发展以及计算机的应用,从60年代后期至今的20年间,相干结构实验研究取得了一系列令人瞩目的成果,揭示了湍流运动并非象早期所推测的那样是一种完全杂乱无章的随机运动,其中还存在着相当有次序的大尺度运动,这种大尺度运动是湍流物理量输运的主要部分。在自由剪切湍流的两层流体的交界面上,典型地存在着颇有规律的涡结构,在壁湍流的近壁区,通过条件采样方法可以检测出一对反向旋转的纵向涡。这些被大量实验所一再重复的拟序现象,启发人们认识到只把湍流运动看成是由平均运动和脉动运动两部分构成是不够的,而应该把脉动运动再进一步分解成为拟序的大尺度运动和基本上是小尺度的随机运动。1972年W.C.Reynolds首先作了这样的尝试,在此基础上发展了湍流计算模式的大涡模拟方法。由于这种方法是在湍流中确实存在着大尺度结构的背景下提出的,因而其最大的优点是避免了其它湍流计算模式中必须通过实验确定的一些经验常数(或经验函数),而计算量又比直接从N-S方程求解少得多,因此借助于大型计算机用它来解决工程技术问题是完全可能的。但是这种方法毕竟还不能作为一种理论来解释湍流结构,因为它只是说明了湍流的大尺度运动是怎么样的,并没有说明为什么是这样的。70年代T.Tatsumi(巽友正)发表了一个多重尺度展开的湍流理论,由于是在谱空间研究湍流,均匀性就成为必要条件。上述相干结构实验研究都是在剪切湍流中进行的,因此Tatsumi的理论是难以解释相干结构的。

为了阐明湍流机理,形成比较完整的理论,相干结构的基础实验是很必要的,特别是要弄清楚自由剪切湍流的间歇区和核心区、壁湍流的底层和外区结构及其相互关系等。近年来为了解决实际问题,做了不少复杂湍流的实验,如关于湍流边界层中的分离和再附,湍流控制等。实验技术的发展使得新的实验结果不断出现。湍流的数值模拟可以说是另一种形式的湍流“实验”,一个好的湍流计算模型比实验研究有更好的再现性和更易于控制流动条件。所

* 复旦大学力学系

以实验研究和数值模拟都是弄清相干结构必不可少的工作。如今人们已经有了大量实验结果,对于近期内湍流研究将取得突破性进展,持乐观的观点。

由于湍流的基本特性是三维性和非线性,特别是非线性乃是湍流发生和发展的基本原因,也是湍流理论最困难的地方。10多年来浑沌现象的研究从非线性入手揭示了非线性现象的内在随机性,这无疑对认识湍流机理是极有帮助的,在某种意义上这是对湍流本质更高层次的认识。只是目前浑沌理论只能较好地解决几种简单非线性方程所描述的现象,要解决自由度高的湍流现象还有相当的困难,用于解决实际湍流问题则更是困难。

我们认为通过探索相干结构发生的原因,研究其发展规律是一条理论研究的比较可行的途径,也许可以在不太长的时间内取得一些成果。1983年 Ron F. Blackwelder 把边界层过渡、凹壁边界层流动的 Gortler 不稳定性和湍流边界层的相干结构作了比较,指出它们之间存在着十分明显的相似性。80年代初一些湍流实验检测到完全湍流中的大尺度运动和相应层流失稳时最不稳定的简正模态在振幅和波数上都十分接近。我们进一步注意到壁湍流相干结构中的纵向涡不仅和凹壁边界层流动的 Gortler 不稳定性结果相似,而且和流动稳定性理论中的非中性共振三波的发生发展过程和形状结构更为相似。由于湍流的非线性,即 N-S 方程中的对流项,表示了它对上游流动的记忆,特别是存在一个主要流动方向的流动,因而在完全湍流中保留着层流向湍流过渡时流动失稳的残迹并不令人奇怪,而且这应该是湍流的流动特征。相干结构所反映的正是这一流动特征,特别是对于壁湍流,紧靠壁面的粘性层必然是不断重复着层流向湍流过渡过程。在自由剪切湍流中两层流体交界面上可能呈现另一种图象。从流动稳定性理论可以知道,基本流动形态不同,其失稳机理也是各不相同,因而最不稳定模态的具体形式也不相同。如果湍流的相干结构确实反映了这种流动上游的某些特征,那末不同流动条件下湍流的大尺度结构就一定会有很大差异,这就可以解释实际湍流何以会千差万别以及在湍流的模式计算中不会存在普适的经验常数或经验函数。

从以上的认识,我们认为把流动稳定性理论和湍流大尺度结构联系起来,开发一种湍流新理论是可行的,这种理论应该可以解释相当一部分的湍流实验结果。尽管前人对此作过一些推测(如 Ron F. Blackwelder),但是明确地把湍流大尺度结构作为层流失稳的残迹来处理还没有见到相当成功的结果。因为线性稳定性理论虽然已经公认比较完备,但湍流的基本特性是非线性,把这种理论用于湍流的发生和发展估计不会有太好的结果,而非线性稳定性理论又是十分困难的。为了揭示湍流基本结构,尽可能把流动条件先限制在比较简单的情况,平行(或近平行)湍流就是这样一种情况。前面曾讲过我们注意了非中性共振三波和湍流边界层内区相干结构的相似性,周恒的人为中性共振三波理论为这一课题提供了数学工具。同时边界层湍流内区相干结构的实验数据也最为丰富,可以用来验证新理论是否可行。因此我们首先尝试了平板湍流边界层的大尺度结构的理论推算,设想如果没有失稳和过渡边界层的速度剖面应该维持着层流的 Blasius 剖面。现在流动处于存在着共振三波形状的大尺度结构的湍流状态,这个共振三波是由非线性失稳产生的。但是共振波的必要条件是中性波,从物理上说这个不定常运动要从平均运动中吸收能量才能维持着,Blasius 剖面不能满足中性波条件,实际上的非中性共振三波可以在人为中性条件下共振,于是 Blasius 剖面必须变形,拿出一部分能量维持共振三波。所以湍流边界层的平均速度剖面就是这个变形后的速度剖面。如果我们的理论在相当程度上是正确的话,那末由此计算出来的一对斜波的横向波长,应该和反应一对反

向旋转的纵向涡横向间隔的低速流条间隔相当(因为这对斜波是反向传播的,和反向旋转相当是没问题的)。计算出来的平均速度剖面也应该和实测的湍流速度剖面相同或相近。又由于湍流能量和剪应力主要来自大尺度结构,所以由此而计算的相应结果也应该和实测结果接近。

为了证实我们的设想是否合理,进行了一些计算。因为湍流的相干结构只是具有共振三波的主要特征并不就是共振三波,在计算中只考虑了一级近似。主要结果有:以共振三波为大尺度结构的平均速度剖面在 $y/\delta < 0.20$ 区域和对数律(Karman 常数取为 $1/\delta_0 \approx 0.408$, 另一个常数 $B = 5.5$) 相差不超过 2% (Re_x 从 8.8×10^5 到 3.1×10^6)。横向间隔为 102—115, 而实验值为 88—151。湍流能量和剪应力的最大生成区和实验一致,都在 $y^+ = 15—25$ 之间。峰值比实验结果约低 5%, 变化趋势也是一致的。除此之外对流速度为 0.79—0.82, 实验值为 0.8 左右, 周期和实测的猝发周期基本相同。这些计算结果说明, 用共振三波来解释平板湍流边界层的大尺度结构在许多方面是可行的。当然要建立比较完整的非线性流动稳定性——湍流理论还需要做许多工作。对于平板湍流边界层来说似乎还可以用拐点不稳定性来说明猝发的发生, 但是要进一步说明扫掠阶段(sweep phase)外区对内区作用还有一定困难, 同时纵向流条间隔和实验结果有较大差异需要作出解释; 对于自由剪切湍流, Poiseuille 流要寻找和其相干结构对应的非线性失稳模态; 湍流的大尺度场如果可以用流动稳定性的非线性理论来刻画其主要特征, 那末湍流的小尺度场用准平衡态统计力学方法来计算似乎也是合理的; 完整的湍流理论除了比较正确地定量预测大尺度场和小尺度场的主要特征之外, 还要揭示它们之间的相互关系, 从而为控制湍流奠定基础。最后, 作为应用基础, 对于比较成功地解释简单湍流的理论应该能够用于比较复杂的流动, 当然此时应该考虑多种不稳定性机理的综合效应, 特别希望这种理论有着实际应用的前景。

以相干结构的研究作为突破点, 实验、数值模拟和理论三管齐下探索湍流的奥秘有可能在不太长时间内收到比较明显的实效。实验和数值模拟的重要性已在前面简单论述过, 作为文章的结尾我们想简单地强调理论研究的重要性。理论结果可以更更全面更清晰地了解湍流流动的基本特征, 而实验结果往往局限于实验条件下的流动和数值结果, 难以有较全面的结果; 理论可以应用于实际课题发展新的工程计算模式, 由于这类计算模式具有合理的理论背景, 因此不需要包含过多的经验常数或经验函数。虽然我们所计划开发的理论从认识论上也许没有混沌理论那末高深, 但却更为实用; 还有一个十分明显的理由是, 这种借助于弱非线性稳定性的理论研究, 不仅研究费用远比实验和数值模拟省, 而且也比进行多自由度非线性的混沌系统节省计算费用, 所以相对于实验和数值模拟, 用适当力量投入理论研究是更值得做的事情。

参 考 文 献

- [1] Corrsin, S., NACA Wartime Report No.94 (1943).
- [2] Kim, H.T., Kline, S.J. & Reynolds, W.C., *J. Fluid Mech.*, **50** (1971) 133—160.
- [3] Reynolds, W.C., *J. Fluid Mech.*, **54** (1972) 481—488.
- [4] Tatsumi, T., *Adv. Applied Mech.*, **20** (1980) 39—133.
- [5] Blackwelder, Ron F., *Phys. Fluid* **26** (1983) 2807—2815.
- [6] Ho, C.M. & Patrick, H., *Ann., Rev. Fluid Mech.*, **16** (1984), 365—424.
- [7] 周恒, 力学学报, **16** (1984), 1—9.

THE THEORY OF MULTIPLE-SCALES STRUCTURE IN TURBULENCE

Zhou Zuwei

(*Fudan University*)

During the last twenty years the advances about coherent structures have been made in experiment and numerical computation field. In the presence of coherent structures one may consider that an instantaneous variable consists of three components: the time-independent component, which is the time average, the large-scale component, which is the phase average and the small-scale component. Recently, many researches have discovered the similarity between transitional phenomena and coherent structures in turbulence. As well-known the main characteristic of turbulence is nonlinear, so there must be some memory about upstream motion in downstream. The coherent structure in turbulence may be traced the hydrodynamic instability particularly nonlinear instability. On this basis the theory of multiple-scales structure in turbulence has been explored. In the flat plate turbulent boundary layer it is guessed that the counter-rotating streamwise vortices are the tracks of the resonant waves in nonlinear instability. This guess has been verified by some numerical computations: the time-average velocity is consistent with the logarithm law; the nondimensional spanwise wavelength of the triple resonant waves closes the average value of spanwise distance between the low-speed streaks; Reynolds stress and kinetic energy are comparable with the measured results during a bursting period and so on. All of these shows that the theory of multiple-scales structure is hopeful of success.