

在我国发展湍流研究的设想

周恒*

湍流研究是物理乃至全部自然科学中最重要的问题之一。例如应美国科学基金会的要求,美国科学、工程和公共政策委员会在1983年提出的有关科学技术的前沿学科展望中,就将湍流与生命、材料等学科并列八个最重要的科技领域之一。其原因就是湍流运动普遍存在于自然界和工程技术问题中。湍流研究的突破可在经济与国防等广泛领域引起重大的技术进步,并使人类对自然的认识水平产生巨大的飞跃。

湍流的研究经历了几个重大阶段。首先是上世纪末雷诺提出了湍流平均运动的方程。到本世纪20年代有了最简单的理论模型。当时主要是着眼于湍流的平均运动及一些整体的性质,如流体与固体间的传热系数等。从30年代开始提出了湍流的统计理论,认为湍流是完全随机的运动,研究深入到了湍流内部的结构,这可以说是对湍流认识的第一次深化。在这一阶段,除了重点研究均匀各向同性湍流这一理想情况外,由我国的周培源教授奠基,还大量开展了其他各种模式的研究。其中的一些模式已被工程技术界大量采用。到了60年代,从实验中发现了湍流并非完全是随机的,而是在具有随机性的同时,存在着一种有序或拟有序的结构,这一事实已为大多数人所接受。这是湍流研究的又一个里程碑。现把这种有序或拟有序的结构称为湍流的相干结构。在剪切湍流,如射流、边界层流等流动中,相干结构对整个湍流的发生、发展及维持起着极重要的作用。稍晚一些,从流体力学的研究开始,迅速在其他学科中引起巨大反响的混沌理论的提出,又在确定性和随机性这两个看来截然相反的现象中架起了一座理论的桥梁。

由于湍流的研究已经历了一个世纪而至今还未完全解决,所以给人造成一种印象,认为这是一个几乎无望在短期内取得重大进展,因而不必十分重视的问题。其实这是不正确的。所有发达国家,无不给湍流的研究以极大的重视,因为一旦湍流的研究有所突破,将对许多自然科学和工程技术问题,带来巨大的影响。而且自从发现相干结构,事实上湍流的研究正在酝酿着重大的突破。例如近三、五年来,美国在湍流的研究上就大大地增加了投资强度。而且象湍流这样历来被认为是基础研究,不应保密的课题,目前也有一部分对社会主义国家保密。在这种形势下,我国实在有必要密切注视这一领域的发展,很好地利用我国原有的基础,给以必要的支持,使得我国在这方面也像高技术那样,能够跟踪世界上发展的势头。否则到头来,势必影响我国高技术以及其他重大工程技术问题的进展。

当前湍流的研究,大体可以分为三个层次:(1)继续进行模式理论的研究,改进原有模式,使之能适用于更多的情况。这一层次,基本上是属于应用或应用基础的研究。对于工程技术问题具有重要的意义。按目前的水平来说,需要针对不同的流动或具体的工程技术问题,寻找

* 天津大学教授。

合理的模式,以使计算结果更符合实际,或寻找适用范围更广的模式。(2)以相干结构的研究为重点,深入探讨湍流的发生、发展和维持的机制。这一层次属于基础性的研究,但又有重大的应用前景。因为一方面,如果弄清了相干结构的发生、发展及其演化的规律,就有可能提出更可靠的湍流模式。另一方面,还提供了通过控制相干结构,从而控制湍流运动的途径。事实上,这一途径已经在喷气噪声控制、减阻技术等重要应用领域显示了很大的发展前景。由于实验手段、计算技术的发展,以及各种相干结构理论模型的提出,这一领域正在酝酿着重大的突破,也是整个湍流研究最有发展前景的一部分。(3)把湍流看成是确定性的非线性系统产生的混沌,通过发展动力系统的分叉、突变及混沌理论,来认识湍流的本质。虽然由于混沌理论本身还不成熟,湍流运动的自由度数极大。据估计有实际意义的湍流,其自由度应在 10^{10} 的量级,而目前混沌理论所研究的,只是很小自由度的系统,推广到很大自由度的系统,还有很大的困难。因此这一层次的研究在结合湍流研究方面,近期不大可能取得重大突破,但从长远来讲,如果在这方面能取得突破,将对整个社会带来巨大的影响。这是由于混沌理论的研究已经涉及自然科学(包括数学、力学、物理、化学、天文学、气象学、地质学、生物学、医学)甚至社会科学的一些领域,它是目前非线性科学研究中最活跃的中心课题之一。

在目前国家财力有限的情况下,当然不可能对湍流研究的所有方面都给以很大的支持,因此我们应该有所侧重。以下我们要说明为什么当前或近期第二层次的研究最有希望取得重大进展。

以自由剪切流(如混合层、射流等)为例,无论原始来流的湍流度是大是小,在初始阶段,总会由于流动的不稳定性、生成大涡,即相干结构。在向下游传播过程中,这些相干结构本身将经历一个演化过程,同时将逐步破碎而形成下游的强烈湍流。因此相干结构的产生及演化,显然是下游湍流的根源。

再以壁湍流,如边界层流来说,其湍流的形成及维持也从两个方面受到相干结构的制约。首先,边界层从层流形态转化为湍流形态,就是由于层流边界层中产生了不稳定波——一种确定性的相干结构。这种不稳定波在演化过程中从二维的转化为三维的,更进一步产生各种频率的谐波而最终转捩为湍流边界层。即使已经转捩为湍流边界层,仍然有一个湍流能量不断生成的机制问题,否则将由于粘性耗散作用在下游又恢复为层流。从实验的结果看,有证据说明湍流边界层的近壁区出现的相干结构及其随后的破碎是湍流能量的最主要来源。正是相干结构所起的中介作用,将边界层外的来流能量转化为边界层内的湍能。

由此可见,相干结构的研究实在是深入了解剪切湍流这种自然界和工程技术中最普遍的流动形态的本质的必要和有效途径。

当前在相干结构的研究上有可能取得突破性进展的理由有以下几点:

经过20年左右的实验研究,对于相干结构的存在和本质有了比较深入的了解。而且通过对湍流边界层近壁区相干结构和层流向湍流过渡的转捩区的不稳定波的对比,可以认为二者在本质上有相似之处。而近十几年来,对流动稳定性的研究有了相当大的实质性进展,这就为相干结构的理论模型提供了一条思考的途径。流动稳定性研究中的非线性理论及三维扰动研究成果,都有助于相干结构理论模型的建立。在这里,实验和理论的相互促进是很明显的。由于实验的发现,才有了相干结构的概念。但由于目前实验手段还不完善,还不可能测得整个流场,使得完整地认识相干结构有困难。而且即使有了完整的流场数据,要从中提炼出有规律

的现象,仍有赖于提出数据处理的正确准则,而正确的理论模型,正是有助于建立这种正确的数据处理准则。

另一方面,由于计算机及计算方法的改进,使得用数值方法求解高雷诺数下的 Navier-Stokes 方程逐渐成为可能。目前在最大的计算机上,已能对雷诺数为 10^3 量级,边界十分简单的流动用直接求解 N-S 方程的办法算出湍流流场的一些细节。这和实验又成为互相补充的两个方面。目前虽然能计算的例子还很有限,而且即使是简单流动,计算量也十分惊人(在 Crag-OMP 机上 CPU 时间为 250 小时左右)。但随着计算技术的飞速发展,数值计算的方法必将对湍流的研究起着越来越重要的作用。目前我国还不具备这样的大计算机,但已有的机器用于做大涡模拟,低雷诺数湍流或转捩过程的数值模拟的计算还是有可能的。大涡模拟的计算方法虽不如直接解 M-S 方程,但仍可给出湍流流场的一些细节。有可能从计算结果中找到具有规律性的结构。

如果能在实验、理论研究及数值计算这三方面很好地组织队伍,协同配合,就完全有可能在近几年内,在相干结构的研究上取得重大进展,某些方面还可能站在世界湍流研究的最前沿。

通过几十年来湍流统计理论的研究,我们对均匀各向同性湍流中湍流能量的级串传递过程有了相当深入的了解。如果我们能在相干结构的研究上有实质性的进展,那么通过二者的结合(其中当然还有困难的问题),我们对剪切湍流的发生、发展及维持就有了一个比较完整的了解。也可以说湍流的一大部分问题就清楚了。在此基础上再去建立更为合理的湍流模式用于工程技术问题的湍流计算,也就更为可靠。

前面提到,控制湍流中的相干结构是控制湍流的一种有效途径。由于相干结构是从平均流中吸取能量的,控制相干结构所需的能量与相干结构本身的能量相比只是一个小量,所以这是一种很经济而有效的途径。近年发现,射流对周围流体的卷吸效果明显地依赖于其中的相干结构,而相干结构又可通过人为引入小扰动来加以控制,这样就提供了以小的控制能量为代价,取得提高燃烧室内喷咀效率的结果。人们还发现喷气噪声的主要来源是喷气射流中的相干结构,因此控制射流中的相干结构,就有可能减小喷气噪声。又如飞行器某些部位涡的生成有助于增大升力,而涡实际也是一种相干结构,可以通过引入小的人为扰动加以控制。物体在流体中运动时,摩阻是阻力的主要组成部分,有可能通过控制边界层近壁处的相干结构而减小摩阻,这一技术已在试用之中,由此种种可以看出,相干结构的研究不仅有着基础研究的意义,而且也有重要的应用前景。

综上所述,当前我国湍流的基础研究应以相干结构的研究为核心,采取三管齐下的方法,即实验、理论模型分析、数值计算这三方面协同作战。而这三方面在我国都已有相当的基础。其中实验技术和方法的研究还应加强,以便取得更完整全面的流场数据。如果没有实验作为基础,理论分析就缺乏根据,数值计算的正确性也无从证实。在理论模型分析方面,我国在流动稳定性的研究上有较好的基础。起初对流动稳定性的研究主要侧重转捩问题,这本身也是研究湍流发生机制的一个重要方面。近年来逐步应用于研究完全发展湍流中的相干结构,已显示出有很好的前景。因此应继续加强流动稳定性的理论及应用研究。当然也应探索相干结构的其它可能的理论模型,有了正确的理论模型,就有可能对实验的重点做出更正确的选择,对数值模拟所得的数据分析重点也更明确。在数值模拟方面,目前尽管受到我国计算机条件

的限制,但在直接数值模拟与大涡模拟工作方面都已经有所开展,在方法上也有一定创新。这一工作应该支持,使之至少能跟踪国际的发展,在某些具体的方法或模式上,也有可能走在前面。谱方法是数值模拟中的一个有效方法,我国在这方面已开展的工作也应继续下去,以期在计算条件改善的基础上,迅速追赶国际发展前沿。计算结果的显示技术,是数值模拟的一个重要分支,而且对实验结果的数据整理后的显示也会有很大的好处,也应列入发展规划。

对于其他两个层次的研究,由于模式理论是以直接应用为目的,因此如果在模式上有所创新,能改进现有模式或扩大其应用范围,例如在提出模式时考虑到大、小尺度涡的不同影响,或在原有的线性模式上考虑非线性影响等,都是值得尝试的途径。也应给予适当的支持。

对于从分叉、混沌的观点来研究湍流的这一层次,由于这是一个比较新的思想,国际上正是热门,显然在我国也应在现有基础上继续做下去。当前除了在研究方法及一些有普遍意义的规律的发现上可以继续研究外,为了解决湍流问题,似应着重考虑如何以低维系统去逼近高维系统而又能得到主要特征的降维问题。否则由于湍流自由度的巨大数量级,将不可能对湍流的研究起到直接的影响。当然,从混沌理论得到的一些新的概念,对湍流的研究也是有指导意义的。也许可以使湍流的研究避免走一些弯路。从非平衡态统计力学的观点来研究,也有类似的作用。

总之,湍流研究有着极大的科学价值及应用前景。当前正在酝酿重大突破。在我国已有相当的基础,有一支精干的献身于科学事业的队伍。只要给以支持,选准重点,协同攻关,同时照顾到虽非重点但也可起到支援作用的方面,完全有可能在不远的将来取得重大进展。在某些重要方面站在世界前沿,为我国的四化做出重要的贡献。

编后语 国家自然科学基金委员会数理学部于1988年10月在北京召开了一次“湍流发展研讨会”,就湍流研究的若干主要方面及其发展现状和前景组织了10余篇学术报告。本文是周恒教授对本次研讨会内容所做的综述。鉴于湍流研究在自然科学和实际应用中所具有的重要意义,本刊将在今年第1—3期连续刊登这些论文,以供有关部门领导和科技工作者参阅。

TENTATIVE IDEAS ON DEVELOPING RESEARCH OF TURBULENCE IN CHINA

Zhou Heng

(Tianjin University)