热面传热强化、颗粒床混合和流动性好、烟气净化较简单、功率消耗省等优点。用于多相化学反应器也具有极好的性能，因此值得推广采用。文中阐述了机械振动流化床中水平及垂直布置的单根埋管传热性能的试验结果，并与对振动进行了修正的 Anderson 修正模型进行了比较，指出水平埋管具有最佳的传热性能。

除以上介绍的以外，在多相流应用与测试方面还有不少论文。在会议期间还对沸腾与凝结、气液二相流流型与压降、反应堆与化工厂安全、气固二相流与传热、动力与化工过程中二相流设备等问题组织了专题讨论。一致认为多相流与传热在能源、动力、化工等许多部门有广泛应用，目前还有许多问题未解决。各国学者应加强合作，使研究工作日益深入。我国在多相流研究方面原有基础比较薄弱，随着大型动力、原子能、石油化工的发展，在这方面的研究工作应予以加强。

流体中的湍流

W·V·R·Malkus

运动的流体，无论是气体还是液体，在人类的许多事务中，如在气动装置和船舶的性能方面；在通过管线从阿拉斯加北坡流来的石油里；在我们的空气和河流的污染方面；在我们的活动范围受到限制以及有时因大气和海洋的难以预测的变化给我们的生活带来威胁方面；甚至在漂移着的大陆当它们刺激并激发起圣·海伦山的喷发中，都扮演着一个极为重要的角色。运动的流体在特性上又是湍流的，因此，了解湍流流动在科学和技术的许多努力中都是必不可少的。

目前我们所知道的湍流流动几乎全是经验性的。100多年的科学研究中，在理论上几乎没有引出什么湍流的定量预测。但是新近从实验和理论中的发现已经产生了有希望的、研究流体中湍流过程性质的新方向。进展不会来得很快，不过下的赌注是大的。在包括设计飞行器、压气机、涡轮机、化学反应器和混合器以及许多其他产品的实际活动中，计算近海和海岸结构的流动因素、改进对气候和洋流的预测等实际活动中，对湍流的较基本的了解都会使我们得到显著的收益。

流体力学家把湍流定义成连续不断地紊乱的流动。例如，在湍动的空气团或河流内，任何点上流体运动的速度和方向都在连续不断地、反复无常地改变着；但是同时，成块的流体又是沿着其约定的方向运动的。在平滑流动的流体中，湍流的发展是一个相继出现的过程；一次或几次初始的不稳定激发起混乱流动的发作，并且继续增强，直至完全发展成为湍流那样的非常混乱无序的现象。

乘坐在保持不了航线的飞机和轮船中的颠簸是湍流的体现。用较为专门的术语来说，湍流显著地增强了流体中质点、热量和动量的输运。这种增强，在诸如工业过程的化学混合或热量传递中可能是合乎需要的，而在诸如管道内或透平内流动着的流体的阻力方面又可能是不合需要的。总而言之，控制和预测湍流影响的能力是一个突出的、实际的目标。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

湍流的发生

湍流观测向流体力学家提出了两个性质不同的问题：一个是了解平滑流动着的流体中导致湍流发生的不稳定性。另一个是了解湍流充分发展时流体的性状。导致流动转换为混乱无序运动的原因是不稳定性，它可以引起剪切流动。可以把剪切流动显示成互相滑动的流体层。流体从下面加热也会产生不稳定而导致湍流。两种类型的不稳定是不同的，由此所得到的流动分别称为剪切湍流和热湍流。肉眼看不见的风速随海拔高度的变化而变化说明前者，肉眼看得见的夏天的云改变着其结构形状说明后者。

就是在最简单的实验室装置中，我们对湍流流体运动的了解也是相当肤浅的。这并不是由于没有坚实的数学基础。基本流体方程[1]体现了根本的分子运动的局部的或小尺度的平均，并且定量地描述了任何指定点处的流体运动。问题在于流体力学方程是非线性的，即流体中速度的变化依赖于速度本身的平方（参看附注中加框的项），还依赖于压力，粘性系数（即内摩擦），以及管壁之类的流体边界上的条件。这种非线性是使得甚至最简单的湍流运动在空间上和时间上错综复杂的根源。

非线性的一个主要后果是使基本方程的定常解不稳定。在发展了的湍流状态的整个流体中，其速度增长、衰减、不断变化和互不一致的图象，使详细的数学描述难以实现。原则上，从基本方程出发的直接数值计算，可以借综合湍流流体中许多小尺度流动的特征，来确定实验观测到的大尺度流动。然而，这种计算却复杂得使当今最大的计算机甚至对剪切流动中的初始不稳定问题都不能够编址。即使计算机飞速发展，它在我们这一生中也不能够解决管内充分发展的湍流这样一个比较简单的问题。

统计理论

计算机能够做得很好的是帮助检验流动统计理论的有用性。大多数湍流理论建立在提出近似的假设或在基本方程中替换非线性项上。目标是使大尺度流动的特征与基本的小尺度流动的平均性质联系起来。寻求用一个简单的统计模型来代替一个复杂的过程，以期发现一个通用的、定量的、最终可以从基本方程推得的、在理论上和实验上都能得到证实的，在一个有效范围内近似的理论或模型。然后，在这种模型的有效范围内预测各种工程或其他实用场合中的湍流的影响。

这些湍流统计理论所提出的是流体运动的概貌，这些概貌对流体中实际发生的细节可能是敏感的，也就是说，统计的结果是湍流详细机理的效应的平均。与机械论相反，这个湍流运动的统计特征的探索，在调整这个领域内传统的研究方向方面是很重要的。

在最初的简单模型中，提出用一个“经验确定的粘性系数”代替出现在流体方程中的粘性系数，以体现非线性项的最重要影响。这一模型及其推广，在定性地解释某些大尺度流动中找到了值得重视的应用。然而，这类模型对每个新的应用都必须用新的实验重新校准。例

1）Navier-Stokes 偏微分方程

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \boxed{\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{v}$$

式中 $\mathbf{v}$ 是速度，P 是压力，ρ 是密度，ν 是运动粘性系数．这个方程完整地描述了不可压缩、等温流体的湍流流动．加框的非线性项是不稳定的根源，也是使流动问题非常难以对付的恶魔．

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如，可以有把握地把湍流流动的特征内插而将这类模型用于同一类型但有不同尺寸的涡轮机中，但是不能把这样的特征外推到新类型涡轮机的设计中去。

第二类统计模型是从湍流流动是完全混乱无序这一假定引出的。在此，人们把有序性强加于这种无序状态以探索基本方程的首要影响。这种处理方法是本文后面讨论的封闭性假设的特征。然而，这些模型象前节中提到的那些一样与基本方程缺乏足够的形式上的联系，难以预测它们的有效范围。

重视机理

最近湍流研究的突出特点是，集中在湍流流动机理上的注意力要比做上面两类统计理论的多得多。强调了能为理论研究所接受的比较简单的机理。因此，新的研究涉及充分发展的湍流这一非常困难的中心问题似乎比较少，而对边缘附近较易处理的问题则注意得比较多。还有，一个新的希望是，较深入地了解流体的机理将有可能建立改进较大的统计理论。

在以前的研究和往后工作的关系方面，我们将叙述三个发现，它们正激起当前湍流流动研究中的热门工作。它们处于三个不同的领域：剪切流动中向湍流的转捩；由热不稳定引起向湍流的转捩；以及简单力学系统与电子系统中的无序行为，它可以为建立转捩和完全湍流的联系提供线索。所论及的这些结果，看来涉及湍流的基础和可能推广的方面，并因此可能对近期的研究和发展给予重大的影响。

剪切流动的不稳定性

传统上湍流研究一直集中在剪切流动中观测到的混乱无序现象上。这种湍流是造成例如飞机上阻力增大、几种化学物品或几种气体飞快混合以及管内流动流体上的大部分阻力的主要原因；因此，它是一个重要的实际问题。从而已经得出大批实验数据并被结合进各种模型当中，用以描述各种有关的工程过程。然而直至最近，理论上的进展还没有出现允许把这种湍流的基本特征加以定量地确定或者提出可能控制它的手段。况且，工程模型无助于推广到适用于这两个目的。因此，寻求较精确地反映由于湍流机理所施加限制的统计模型的工作，将会继续进行下去。

转捩斑

这些限制是些什么东西呢？任何边界附近的剪切流动中流体的平均性质，主要是混乱无序流动的很少一些强烈猝发的结果。流体力学家几乎不怀疑这些猝发演化成图 1 所示的初始剪切流动转捩斑的形式。转捩斑是在一条0.6 cm 深、1 m 宽、5 m 长的充满流动着的水的封闭渠道里面发生的。照片是透过渠道的塑料壁面拍摄的，平均流动是从照片的顶部流向底部。用悬浮在水中、由转捩斑的通过来定向的小云母片的反射光使照相机看得见转捩斑的拟序结构。所观察到的波长——波与波间清楚的间距——与渠道的深度相差不大。

现在相信，这样的一些转捩斑是导致整个流体中大部分动量传递、热和质点混合的流动原型。对转捩斑的观察已有几十年。然而，这些快速而不常发生的现象的结构细节，由于它们是在那样小的尺度上开始发生，又由于只有少数科学家明白它们在热、动量和质点的输运中充当重要的角色，所以在过去大部分时间内没有得到充分的探索。只是在近几年里，才开始有可能在转捩斑的实验观察与从基本方程的数值计算之间得到定量的一致。比如说，在先进的计算机上作计算，现在可以预测到图 1 所示的转捩斑结构的某些特征。因而理论和实验中

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的明显改进是可以预料的了。

这些奇特的、波状的转捩斑因为流动中的扰动而在流体中突然出现。“突然”的含义随系统的特征而定——例如，在图1的实验中可能是毫秒，在流动缓慢的河流中可能是几秒。当从基本的流体运动中摄取动能时，转捩斑就能够很迅速地形成。在充分发展的湍流中，可以设想许多逐渐形成的斑，由于不很频繁出现的新的剧烈扰动而相互作用着和衰减着，从而使无序得以维持。因此，把这样的斑作为孤立的、非线性的现象来研究，看来是一条有希望对湍流过程的核心现象取得较深了解的路线。

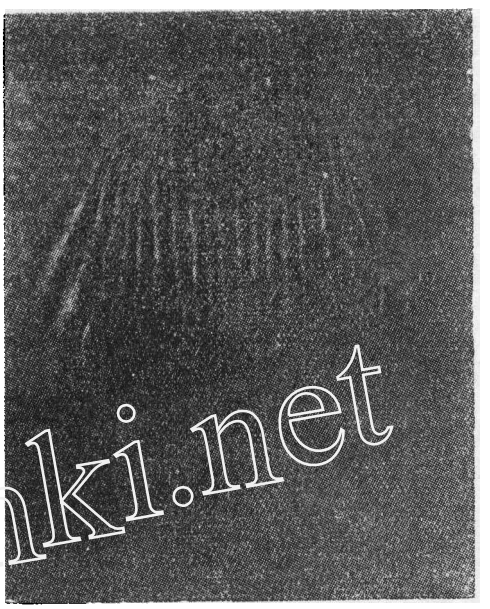

图1 剪切流动的转捩“斑”[来源，Carlson, D.,et al, A flow visualization study of the transition in plane Poiseuille flow, *J.Fluid Mech.*, 121 (Aug. 1982): 487—505]

即使对于眼睛没有经过训练的人，图1中的转捩斑也会使他联想起它与海上航行的轮船的头波相类似。不过，转捩斑的波系是自推进的。混乱无序的流团看来充当了船的地位，它追随在第二和第三个头波上的小扰动之后。于是，对流体力学家提出了困难的任务：了解剪切流中波的性质，这些波的稳定性，二次不稳定性的作用，以及导致产生无序流动的波的破碎。这些问题提供了直接导致当前研究中一个重要部分的研究工作的简明历史综述。

波状运动

关于定常的或非湍流的剪切流动中波状运动的最早研究，在1900年以前就开始了。但是直到本世纪50年代才出现关于管道或渠道中（对平均速度呈现初始小偏离的）波的不稳定性的完整数学理论。这一理论正确地预言了一个给定定常剪切流动中具有显著波峰的长波的性状。它还预言了在图1的流动条件下所有小速度的波必定衰减和消失。这一预言意味着，为了处理这种流动的向湍流转捩，其理论必须考虑大速度波。这类问题要困难得多，仅在最近几年才出现新想法并借助于计算机得到了一些进展。

湍流模型

在发展剪切流动中波的理论这一漫长而备受挫折的时期内，许多科学家和工程师根据完全发展的湍流中实际出现情况所作的各种各样的假设，逐渐发展了一些统计模型。其中最早的模型提出这样一种观点：流体中质量、动量和热量的有序传递，将作为基本无序运动的一种初级近似而出现。这种想法最简单的实现就是涡粘性系数。流体中许多小尺度涡会充分扰乱流动，其结果等价于一个大尺度粘性，涡粘性系数就是根据这种概念得出的。

涡粘性系数是一种选来表示观察到的平均流动上涡脉动性状的统计近似。从涡粘性概念出发，为线性微分方程数值求解所允许的广泛的模拟已经引出各种各样有用的结果。一般地说，这种近似提供了整理实验资料的框架；在许多实际工程条件下，计算结果能够和实验观察到的流动相当符合。因此工程设计手册包含了这类适合特定目的的，例如设计航空器或操纵流体的系统(如泵)的种种数值模型。即使所处的物理环境和用来证实模型的实验环境有些

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不同。这类模型仍然具有可用的预测价值。但是从涡粘性概念基础上建立起来的模型所得出的结果，并没有为更深刻地了解湍流提供定量的依据。

了解剪切湍流统计性状的更基本的尝试是建立在一种称为“封闭”的数学想法基础上的。封闭是指一种解一连串方程的方法，这一连串方程把流动的一些平均性质和另一些平均性质联系了起来。这一连串方程中的每一个都要求对更深一层的未知平均量有所了解，而解的类型及其数量之大又要是可以接受的。封闭需要一个允许这一连串方程截止在一个可处理的数目上的假设。如果这假设是一个良好的近似，则封闭是一种有用的方法；但在封闭程序中未曾建立起一种试验其正确性的数学方法。对于大多数的封闭方案来说是用实验来验证其正确性的。由于这些方案常常包含着许多可调整的常数，因此要裁决某些封闭和物理规律的不相容是不容易的。

近年来一类叫做二阶封闭的封闭方法已变得十分流行并已找到它的几个有希望的应用。其中一个例子就是从地面到往上1公里的近地层大气内污染物流动的模拟，这是一层湍动最强烈的大气。但是对实验室中受控剪切流动二阶封闭的定量应用尚未成功。

也许最深奥的封闭——原则上它是定量的——是直接相互作用近似。这种近似用于描述很小尺度、很小振幅的流动不太正确，但它给出了满意地描述大尺度湍流的低阶统计矩（这在数学上较不复杂）的希望。寻求描述聚变等离子体湍流方法的理论家们近来已频繁地重新发现了直接相互作用近似。即使按近来作了改进和简化的表达形式，这种近似仍然极为复杂，但已通过高速计算机用它来对流体湍流的衰减提供合理的估计。更快的计算机和进一步的简化，将允许对它的定量精度和应用范围作追加的试验。

一种统计上极端理想化的湍流叫做均匀各向同性湍流，在这种湍流中流动的平均性质沿任何方向都是相同的。在实验室中即使近似地产生这样的流动都是困难的。但是从它的对称性中许多科学家已经找到有所发现的希望。这些发现就它们的简单性和可应用性来说大概是通用的。在相当长时间内对这种理想化的湍流所包含的内容进行了探索。然而，根据下面这样一个物理假设已得到最有意义的结果：湍流能量在大尺度运动到小尺度运动的级串方式传递中要通过中间尺度或范围的运动，反之亦然。在浴盆中能够观察到如下的现象：由扰动生成的大涡逐渐地产生较小的涡。从基于这个假设的一个简单论点直接得出如下的结果：在远离边界的流体内，中间尺度运动的能量密度是以这一尺度的5/3次幂变化的。大量观察到的证据支持这一定性结果，但是理论处理却得不到定量的能级，而且还有一个保留，即其结果只能用于“含能”区之外的小运动尺度。这似乎是对5/3幂次结果普适性所付出的高昂代价。不过，希望根据类似想法的新研究将揭示质量输运区域和含能区域运动的统计性状，而这些区域的运动将只是微弱地依赖于流体中实际出现的机理的细节部分，从而它们将更精确地描绘平均流动的性质。

通过计算机模拟得到的发现

在本节开头叙述的剪切流动转捩过程及其剧烈变化性质的观测，可以提出有关流体机理的一些情况。这种机理应该反映在有用的湍流统计处理中。近来从关于剪切流动的大振幅波上小扰动增长的数值实验中，已出现了对这种转捩机理的更深刻的了解。这些研究只记录了解释自推进波系总体上如何工作这一课题的部分内容，但从初始不稳定性的波长和相位角的计算结果看来是正确的（见图1第三头波）。可以把头波和无序流动之间的转捩斑区域比作

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是一个水跃——例如具有高而陡峭锋面的潮流——但在这里是处于两个波系之间的跃变。波的能量向跃变区域的流动可以解释该区域中异于寻常的二次扰动振幅增长率。

从和本文后面讨论的简单系统类似的性状中可以找到随这些二次波出现的无序流动的第一个合理的解释。无疑地，图1中转捩斑的许多其它性状不久将会在计算机的数值实验中重新产生，然后在理论上仔细分析，以建立对于完全发展湍流是重要的转捩斑的特征。

湍流的控制

了解不稳定性的机理将提供对不稳定性实行某种程度控制的希望。尽管对这种机理只得到了很肤浅的了解，仍然成功地实现了一定程度的控制。在剪切流动的流体里加入百万分之几的某种聚合物，就会发现阻力显著减小和流动性质改变，而以前认为这些性质是流动的基本性质。在一个实验中，适当加入几种聚合物中的每一种，都会对流体的平均速度产生相同的最大增量。这些结果表明，对速度增加起基本作用的过程是依赖于流体的性质而不是添加物的性质。在剪切流动中改变不稳定性的进一步研究工作，无疑对从总的过程中分离出基本过程是有价值的，另一方面对实用上控制这些基本流动也是有价值的。减阻添加剂目前正在应用于石油管道运输中降低泵的费用，以及在消防设备中增加水的喷射高度。

因此，虽然我们有许多在工程上有用的剪切湍流的统计模型，但进一步取得重大进展看来还需要更好地掌握基本过程。湍流的起始总是包含着转捩斑，对它进一步研究可能有助于掌握基本过程。同时，对第二大类的无序现象——热湍流即对流湍流的研究，或多或少有更大的希望来搞清楚基本机理。

对流湍流

除了研究剪切湍流，长期以来这一领域的科学家还研究了导致流体从底面加热产生湍流的不稳定性。热湍流，即对流湍流，和剪切湍流一样也是非线性过程，不过初始对流流动较容易用数学分析方法处理，并且已从理论上获得很好的关于不稳定性的图象。平滑流动向无序流动转捩的最近理论认为，在这两类湍流中，热湍流可能在一般了解向湍流转捩方面更接近于成功的起点。

同剪切流动中不稳定性所产生的复杂过程比较，大多数人能够更好地从直观上想象出热所诱发的流体运动的性质。大家对热辐射器上面热空气的上升或空中飘浮着的羽状云（这种羽状云可以在夏天产生晴天积云）都很熟悉。因此，当一些科学家仍在奋力研究剪切流动的不稳定性的时候，另一些科学家已在理论上了解了大多数类型的导致对流的不稳定性。

理论预言了从下面加热和从上面冷却一层流体会发展出简单的翻滚式涡胞形状的上升运动，它们把重力势能转换为流体运动的能量。仅当穿过流体层的温度差显著增加时才从实验上观察到这些运动变为无序的运动。不过，现在已经得知的对流不稳定性刚一开始时就可出现无序现象，这一点在这些早期实验研究中却没有观察到。

旋转系统

图2是对流初始阶段无序现象的一个例子。六张照片按时间顺序依次排列。整个实验系统绕一根铅垂轴缓慢而稳定地旋转，这些照片是在该系统中对流层上方某一位置拍摄的（每张照片中心的圆圈是轴的顶视图）。每张照片相隔一个相同的旋转角，全部照片一起则显示了对流运动水平结构的发展。系统中的流体是甲醇，其折射率随温度变化而变化。照片中阴

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

暗的区域是正在上升的热流体，明亮的区域是正在下降的冷流体。

这些照片表明，作为整个系统旋转的结果，比较平滑的翻滚式的运动已经变为在空间和时间上都是不稳定的。这类无序现象具有湍流过程所预期的许多特征，但它又和剪切流动中所看到的波动图案很不相同。对理论家来说，旋转系统中这种无序流动的特殊优点，在于它是紧接着数学上易于处理的导致对流运动的不稳定性而出现的。实际上，最近的研究就认为，这类无序现象可能是第一个完全遵从理论分析的无序现象。

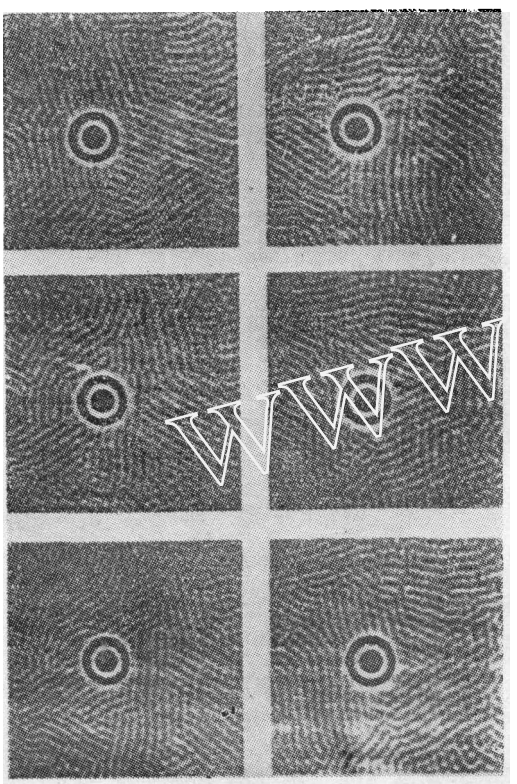

图2　旋转系统中的翻滚式不稳定性[来源：Busse, F.H., Heikes, K.E., Convection in a rotating layer: A simple case of turbulence, *Science*, 208, 4440 (Apr. 11, 1980): 174]

多个扰动

在最简单的一类对流过程中，初始不稳性的第一个分析得出这样一个结论：横跨流体层的温度差超过一个临界值时，许多不同大小的扰动可能增长并相互作用。后来对超过临界温度差的流体性状的研究解释了在通常对流过程中观察到的不断增长的涡胞状扰动。为了研究定常涡胞对流的二次不稳定性，必须把完全非线性问题的某些方面结合进不稳定性的近似数学描述中。在一系列用这类方法的研究中决定了许多类不稳定的流体运动，它们能够在各种各样条件下从定常的对流中取得能量。这些不稳定运动的名称有：振动型，偏斜的静脉曲张型，交叉翻滚型，绳结型和锯齿型。但不管是哪一种运动，都不会直接导致湍流的突然发生。

流体中的热湍流必须立即跟随着初始不稳定性而出现的想法，许多年前就放弃了。代之以这样一种观点：当横跨流体层的温度差增加时，第二、第三以及许多程度更高的不稳定将跟随第一不稳定出现。一个个不稳定叠加上去，运动立即变得很复杂，观察者就把它解释为湍流。这种热湍流起源的观点持续了许多年，并有着大量的实验支持。但是，即使在大量相继的不稳定出现之后，这一过程在理论上将得不出具有连续运动谱的无序流动，而在实验上观察到了运动的连续谱。

只在最近才重新评价了这种导致热湍流的过程。对不稳定系统的性质的理论探讨提出了：若一个系统经历第一不稳定并随之出现第二不稳定，则第三不稳定将直接导致一个可被解释为湍流的无序流动。实验观察结果支持这一观点，这些实验观察包括了流体中热流通量即热传递率的测量。通过在热流通量数据中看到的第三次转捩，流动已具有同时间有关及无序的特征。另一方面，剪切流动中的无序现象则是在第一次突然的剪切流动转捩中出现的。因此，显然存在着不止一条向湍流转捩的途径。

统计近似

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

处理了导致无序对流的开头几个不稳定之后，数学上的复杂性使我们不得不求助于湍流的统计理论。为剪切流动而发展起来的一些理论也可用于湍流对流。

包括了对流的统计理论的第一个和最简单的应用是以“平均场”方程为基础的。这些方程是从完整的运动方程中，通过只考虑脉动对改变流体中平均速度场和温度场所起的作用，撇开脉动对流动的其它效应而得到的。平均场近似的好处在于它总是定量的，因此，通过和实验数据比较就可以容易地确定精度。

当流体粘性小时，由剪切流动产生的不稳定性成为一个因子，平均场计算就相当不精确。然而，当粘性大时，流体中相对地缺少无序现象的剪切来源，平均场计算所预测的热流通量同平均实验观察值看来在计算值不超过观察直1倍的范围内是符合的。因此，尽管从初始对流到完全湍流有巨大的跃变，平均场的定量结果有时是近似地正确的。迄今为止，数学上的复杂性妨碍了对剪切流动的类似研究，但在1年左右或许将重新做这种研究工作。

遵照上节所述的封闭方法可能会改进热湍流的定量平均结果。但有一类和封闭十分不同的称为“开放”的湍流理论，也为定量的了解提供了希望。开放和封闭一样，是考虑完整的流体运动方程的统计平均。但它不是用假设来截断一连串方程，而是探索满足开头几个统计矩方程全部可能存在的流体运动。在这许多可能性中寻求给出流动某些重要特征的上界即极大值的解。在对流中是寻求热流通量的上界。原则上借追加高阶统计矩方程以减少可能存在的流体运动的个数，可使计算出来的上界值越来越接近于真实的对流热流通量。

上界理论已经给出唯一可信的定量结果，这些定量结果可用于所有湍流理论。计算得到的上界——例如热流通量的——保证是高于实验上得到的数值。然而，迄今算出的上界并不特别接近实验值。不过在大粘性湍流对流的情况下，对于完全发展的对流，上界理论和平均场的结果完全一致。这种一致性确定了平均场近似中所略去的那些流体脉动起了减少热流通量的作用。

只有一些科学家用上界理论进行了研究，但它看来提供了用于更复杂流动情况的值得重视的机会，当用这种理论得出的结论在形式上是正确时，就有可能通过加入更高阶统计矩方程的办法改进算得的上界的精度。从前，上界结果的这种推广是不可行的，但随着计算工具越来越有效，上界理论提供了一条独特的用有序的方式处理湍流统计特征的途径。

反湍流

在图2的旋转系统中，对流不稳定在其最初阶段就出现无序现象。除了这种初始现象外，增加横跨流体层的温度差导致更进一步的无序。但是在最近某些值得注意的正好进入湍流范围的实验中，也已观察到一个导致产生持续的大尺度有序流动的不稳定。

实验是在一充满水的容器中做的。在相距10厘米的两平板间有一个对流区域。加热底平板产生了小尺度的非常混乱无序的对流猝发，但无大尺度运动。然后出乎意料地出现了大尺度的有序运动，并且稳定地按相同方向环绕容器流动达几天之久，而小的无序猝发也持续地出现和消亡。这种发现可以解释为反湍流，因为大尺度流动显然与时间无关，但它是被非常混乱无序的小尺度对流猝发所驱动的，而这种猝发在时间和空间上都不停地出现和消亡。

紧密耦合理论和实验

各种情况下的对流早期阶段，由于它们易于进行定量的理论研究，已在增加我们对流体中湍流的出现和发展的了解上取得具有令人振奋的新的作用。然而，热湍流仅是湍流过程的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一种现象，而且对湍流发生的数学描述还根本谈不上是对完全湍动流动的描述。我们的目标，既作为一种理论上也作为实际上值得注意的重要事情的，仍是要确定完全发展流动（不管是热流动还是剪切流动）的统计结构。

简单系统中的无序现象

有精确解（它可视为显示了无序的行为）的简单的力学和数学系统的发现，部分地起因于关于对流以及和它有关的不复杂的模型的研究。事实上，对这些系统的研究并未直接导向湍流的传统问题。但这些系统提出了了解自然界中的无序现象，特别是湍流过程的新路径，并且在近10年来已经在科学家中产生了不断增长的刺激。

许多科学家以前相信：一个力学系统的无序现象是噪声或者由外部干扰引起的外来效应的结果。可以是热力学噪声或者甚至是在远处振动地面的卡车的影响。然而新的观察显示：在某些系统里的基本过程会导致可精确重复发生的无序现象。这类系统称为含有一个“怪引子”——一种特征，它吸引系统去保持无序行为。无序是与时间有关的，它并不象流动中速度和温度情况那样还是位置的函数。这种现象逐渐被称为短暂浑沌（temporal chaos）。希望在于，这种短暂浑沌的可普遍化的特征，将给出在说明时间和空间上都完全发展的无序现象的新线索，而这种完全发展的无序现象是远离其发生阶段的剪切湍流和热湍流的特征。

发电机中的无序现象

表现出能重复产生无序现象的系统的例子是单极发电机（图3），它是一种简单发电机的形式。发电机将机械能转换成电能。图3中金属盘的轴由一定常扭矩驱动。当盘达到某一定的转速（W）时，盘下线圈中的电流（J）的无穷小脉动产生一个磁场，此磁场又由于在盘中流动的电流（I）穿过该磁场的运动而得到加强。这个系统可呈现任一磁极的磁不稳定

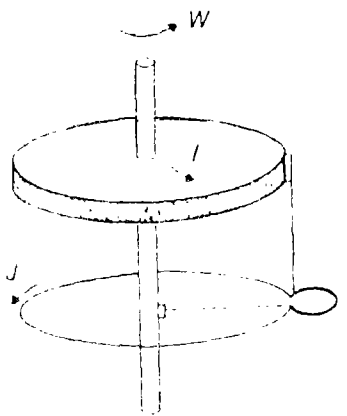

图3　一个发电机（W为金属盘的转动速度，I为盘中电流，J为静止线圈中电流）[来源：Robbins, K.A., A moment equation description of magnatic reversals in the Earth, *Proc. of the National Academy of Sciences*, 73, 12 (Dec, 1976): 4298]

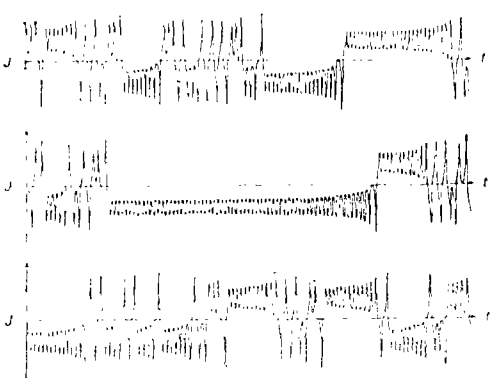

图4　当加到发电机中的载荷是纯阻抗性的时，在图3中发电机的线圈内流动的电流(J)与时间(t)关系的记录曲线，记录指示出，磁场按随机的时间间隔逆转，但此现象可以一次又一次地由湍流发电机行为的方程完全相同地再现出来，换句话说，看来完全随机的东西，却是完全可以重复的无序现象[来源：Robbins, K.A., A moment equation description of magnetic reversals in the Earth, *Proc. of the National Academy of Sciences*, 73, 12(Dec. 1976): 4299]

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性——即在系统外的磁场中“北极”既可在上面也可在下面。

数年来就已知道，这个发电机的行为在时间上可表现得非常奇特。如果右下方的代表发电机载荷的外部小线圈是纯阻抗型的，则系统变得不稳定，振荡不断增大。图4是一个以线圈中流动的电流作为时间的函数的记录。这些资料表明，磁场极性以显然随机的时间间隔逆转。然而，此现象并不是系统外的外加扰动的结果：它可以一次又一次地由描述该发电机行为的方程完全相同地再现出来。极性的逆转在不稳定出现的极端最低扭矩时最不均匀；此过程已提出来作为地球液核深处的地球发电机中发生的磁性逆转的一种解释，它引起南、北磁极每15,000年互换位置。

这种无序状况的有意义的特点是，它可以发生在仅有三个自由度或三个变量的系统中，三个变量是发电机轴的角速度、盘中的电流和线圈中的电流。换言之，这系统是非常易于用数学分析加上计算机辅助进行详细研究的。这种易于接近性增加了对这类无序的了解，一旦成功的话，可以有助于弄清流体系统在时间和空间上更复杂得多的无序现象。

描述单极发电机的方程比描述流体系统的方程简单得多。如上所说，发电机方程的变量只是时间的函数，而不象流体系统中的速度和温度场那样还是位置的函数。但是发电机方程也描述了不稳定点后对流过程的最初阶段。这些方程称为 Lorenz 方程[1]。探索了许多用于描述可在实验室中建立的连续物理过程的方程，还没有一个显得比 Lorenz 方程更简单。

在这些方程中，a，b 和 c 代表单极发电机中与时间有关的变量 W，I 和 J。出现在前三个符号上方的点（$\dot{a}$，$\dot{b}$ 和 $\dot{c}$）表示这些量对时间的变化率。当变化率为零时，三个方程成为确定 a，b，c 的定常态解的三个代数关系式。R 是实验控制常数，在对流情况下它由横跨流体层的热流的多少来确定，在发电机情况下它由施于发电机轴的扭矩的大小来确定。P 在对流情况下是热对粘性扩散系数的比，在发电机情况下是电路中两个时间常数的比。

趋向于浑沌

描述发电机现象的 Lorenz 方程的解经由一个突发的转变而达到浑沌状态。这类从有序到无序的转变，类似于在剪切流动的流体中观察到的向无序的突发转捩。

简单系统通过一系列关于运动的振荡部分的周期倍增也可能趋向于浑沌。这种现象的一个例子已经在包含有液氦的一个小对流涡胞的实验中发现：在底部加热涡胞并测量氦内一点上的热流。当横跨涡胞的温度差达到一个临界值时，热流开始以时间周期 t 振荡。在横跨此涡胞的第二个更大的温度差时热流不再以时间周期 t 重复而是以 $2t$ 重复。继续增加温度差，振荡周期继续倍增，一直到最后运动变成浑沌时为止。

这个周期倍增序列似乎可推广到湍流问题以外。那些发生周期倍增情况的参数值，例如温度，会产生出一个比值，它不仅在这些实验数据中出现，而且在纯数学研究中也出现（例如单位区间的映照）。

持续的有序

尽管在简单系统中看到了短暂浑沌，但一定程度的有序还是存在的。例如，当我们把在单极发电机线圈中流动的电流对时间绘图时，它就非常随机地出现脉动或改变方向。然而当绘出每个脉动的最大电流序列时，其结果就是一条有序的尖点曲线。这类图线的一个有意义

1）Lorenz 方程为：$\dot{a}+a-bc=0$，$\dot{b}+b+ac=R$，$P\dot{c}+c-a=0$.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的特征是，它们并不为小扰动或噪声所改变。加在单极发电机上的小量噪声会使得电流对时间的脉动图线变得与原始图线毫无相同之处。但是所得的尖点曲线——那些最大电流的图线——甚至在连续地施加噪声时仍会显得与原始图线无甚改变。因此，这类图线不仅显示出短暂浑沌中的内在有序而且显示出这种有序在外加扰动下的一种稳定性。

这些系统的其他性质也显示出浑沌中令人感兴趣的有序现象。其例子是对流中的热流和发电机中的平均磁场强度。这两个过程都会随着施加更大的外力，譬如增加横跨对流的温度差而以相同的方式进行加速。关于这种关系的探究以及关于发电机和简单对流保持方程定常解的这些品质的原因的探究尚待进行。事实上，短暂浑沌的许多现象仍是难以理解的。然而它们确实无疑是数学上可接近的，在不久的将来应可得到澄清。

已经把这些向短暂浑沌的转变与由较为有序的状态转变为不很有序的状态的热力相变作了比较。差别是值得注意的；还没有可衔接这两种过程的基础理论。但是被称为重正化群理论的数学方法的发现，为解释凝聚物质（一般为固态）相变的热力现象提供了有力的工具。该理论使得识别物理过程包括湍流现象的新的普适特性成为可能。一个例子就是前面提到的周期倍增比。

该理论对简单动力系统的统计定常状态的应用，已证明在某些情况下是有价值的，但对其他情况则不行。例如重正化方法可用于阐明较有序的现象，例如浑沌状态之前的周期倍增过程。但是重正化群理论用于湍流的传统问题仅得到有限的成功。

寻找有代表性的框架或用此新技术可获得充分发展湍流统计特性的特殊问题的工作正在进行中。由研究发电机问题得到的一个有意义的指示是，所认识到的浑沌状态，与所期待的相反，可以在数学上证明并不是产生最大能量耗散率的状态。

很难预测当前简单系统的研究将导向何方，但它们正开始有可能分离出引起无序现象的基本因素。现今易于分析的简单系统现象并不处于完全发展湍流传统问题的中心。尽管如此，简单动力学系统中的无序现象的研究还是有希望对湍流过程的新的了解作出根本性的贡献。

展　　望

最近几年，导致浑沌现象的力学的和可精确求解的数学系统的发现，为了解流体的，不管是气体还是液体的湍流提供了新途径。飞机飞行颠簸，工业过程中化学物质的迅速混合，输油管道中石油流动阻力的增加，以及其他种种合乎或不合乎人类需要的现象，它们的原因都是湍流。关心湍流的科学家和工程师们正在开始更多地考虑所包含的机理，而不是其统计表示，即更多地考虑流体中实际发生了什么，而不是什么发生了的统计近似。这类工作正在产生一种新的科学语言——一种考虑湍流的新方法——，它有希望在探求湍流过程的普遍适用的特性上取得进一步的了解。

基于实验数据的统计近似也是必要的，因为我们还没有另外的处理工程设计和其他实际用途中的湍流的办法。经过了100多年的科学研究，这个非常复杂的过程的理论只得到极少的关于湍流的定量预测。倾向于机理思考的趋向将不会很快带来对完全发展湍流这个中心问题的彻底的或接近底彻的了解。但是它提供了导向构造更精确反映过程基本机理的统计假设的一切可能的希望。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在近期和中期，目标是增加我们的控制不稳定性的技术，以及取得关于湍流统计模型的广泛预测能力。这种能力在重新设计泵系统、压气机、涡轮机、飞行器、化学反应器和混合器，以及许多其他产品方面，将有可能既节约能源、又改善性能。对天气和海洋流的大尺度无序的可预测限度的新了解，可能是对简单系统中浑沌的研究的早期报偿。关于自然界过程中无序的起源的新认识，将可能在建立经济学、政治学和生态学等方面的模型作出如同在流体湍流中一样重要的贡献。

参 考 文 献

Busse, F.H., The optimum theory of turbulence, *Adv.in Appl.Mech.*, 18 (1978): 77—121.

Lanford, O.E., Ⅲ, The strange attractor theory of turbulence, *Ann.Rev.Fluid Mech.*, 14 (1982): 347—364.

Orszag, S.A., The statistical theory of turbulence, in Fluid Dynamics, Edited by R.Balian et al, Paris and New York: Gordon & Breach Science Pubs., Inc. (1977).

周慧良　周祖巍　周一凡　叶敬棠译自：Frontiers in Science and Technology, The National Academy of Science, USA (1983): 137—158.

（**叶敬棠　董务民**校）

水在植物中的作用

N. C. Turner　　G. J. Burch

符 号 表

ψ_w	总水势或水势
ψ_τ	基质势
ψ_π	渗透势
ψ_p	膨压势
ψ_w^l	叶水势
ψ_w^s	土壤水势
P_n	光合作用率
P	压力
P_r	径向压力
P_c	横截面压力
F_n	垂直于探头顶端的力
r_a, r_a'	横跨叶片边界层的气体交换的扩散阻力
r_l, r_l'	横跨叶片表皮的气体交换的扩散阻力
r_m'	细胞内表面与叶绿体间二氧化碳交换的残余阻力或叶肉阻力
r_c	横跨叶片角质层的气体交换的扩散阻力
r_s	横跨气孔的气体交换的扩散阻力
r_S	水运动时的土壤阻力
r_P	水运动时的植物阻力
r_T	根吸收水分时的总阻力
f_T	经过根的木质部运输水分时的总阻力
T_P	蒸腾量
Q	流量
e, e_0	水汽压
R	气体常数
T	Kelvin 温度

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net