

们的代表,前者为输运法,后者在工程学领域为MRS法,在地球物理学领域为LES法。至于电子计算机能否超过风洞而领先[47],用本文开头提到的Heavside的话结合作者的想法代为回答:“当然不,但别忘掉你所积累的经验的局限性!”

参 考 文 献(略)

(刘廷增译 陈国伟校)

湍流理论基本思想发展

C. C. Кутателадзе院士

长期以来湍流物理性质的研究未得到物理学家的应有的注意[1]。准连续介质(液体、稠密气体、稠密等离子体、弥散系统)的湍流流动的特征,是某种有秩序的平均流动内无秩序的宏观混乱运动。因此,就这种现象的实质来说,湍流理论应当是统计的理论,于是人们在这里便不期而然地想到同气体分子运动论的类比。在上世纪末这种类比是十分自然的,而实际上,在O. Reynolds [2]的著作中,后来20世纪在L. Prandtl [2]及其他许多研究工作者的许多著作中,都已经利用了这种类比。可是这种类比非常肤浅。这里有两个情况很重要。第一个情况,在分子的系综中,它们的各元素(分子、原子)的个性不变或只按已知的化学相互作用定律变化,可是湍流的构成却随空间和时间而变化。第二个情况,在一阶近似下气体分子的总动能守恒,可是湍流流动的能量却通过分子摩擦机制耗散为热。

很自然,湍流理论的发展导致统计流体力学的诞生[3]。然而,现在与其声称已或多或少完成了逻辑地描述湍流流动的基本规律,不如说是形成了某种新的方向。最初明确认识到湍流问题的存在的,是上述Reynolds的著作,尽管在更早的时候,G. Hagen [2]的实验已明确指出,存在着由液体的平行波纹状(层流)流动(阻力按线性律增加)向内部没有秩序的湍流流动(阻力几乎按平方律增加)转换的现象。后来搞清楚,光滑管内压力降同流速的平方关系有一些偏离,这是由于紧靠管壁处具有薄薄一层准层流层。Reynolds引进了湍流理论中的两个基本概念,一是流动状态稳定性的判据,一是把所讨论的流动分解成平均部分和脉动部分。

稳定性的判据为Reynolds数 $Re = UL/\nu$ (1)

在平均运动方程中出现具有关联形式 $\overline{u_i' u_j'}$ (2)

的一些附加项。关联 $\overline{u_i' u_j'}$ 可以看成是表观湍流应力张量的分量;在这种情形下,不可压缩流体平均运动的全部应力分量为

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3)$$

由于研究湍流,产生了一系列基本问题:层流流动稳定性问题和它们转换成湍流流动的机制;甚至在最简单的不可压缩流体流动中确定临界Re值的不唯一性,这是因为,存在着由稳定的层流流动转换成表征掺混现象的平稳湍流流动的转换区域[4];对于具有变物理性质的系统,确定Reynolds判据中物理参数 ρ, μ 的不唯一性;由于出现表观湍流应力张量的分量而引起的Reynolds方程的不封闭;在湍流扰动的影响下出现同介质物理性质脉动有关的效应;关于边界条件,在湍流

动的边界上,特别是具有固体的边界上,在紧靠固壁处出现准层流流动区域,其下边界上是流体粘附
在固壁上的条件,其上边界上是湍流能量达最大值的条件;湍流能量耗散为热的机制,这发生在湍流
非均匀性的最小的(Колмогоров的)线性尺度 $\lambda_{min} \sim \nu/\sqrt{\varepsilon}$ (4)

上;用湍流Prandtl数

$$Pr_T = \nu_T/a_T \quad (5)$$

来描述的冲量、能量和掺入物质的湍流输运之间的关系;导电介质(液态金属、等离子体、电解液)
的湍流同电磁场的相互作用;非牛顿流体,即物理性质依赖于流动的那些介质的湍流的发展;有结构
的添加物,例如某些聚合物对湍流的影响;非均匀介质,特别是气液混合物的结构的湍流和稳定性问
题;对于自然界的噪声,按照湍流流动结构的变化来诊断湍流的形态(踪迹);等等。

Reynolds的著作中已试图根据能量的想法来计算稳定性判据(1)的临界值。后来此想法为H.
Lorentz,V.Orr等[5]所发展。T.Karman[2]的论文把这个方向的工作作了总结,但长期阻
碍了它的继续发展。已经查明,稳定性的能量判据要比实验确定的临界Re值小得多。可是还在30年
代就指出,存在一个固有的Re数,它表示湍流边界层近壁准层流区域(粘性底层)的尺寸。最近这种
观点还在继续发展。

在Rayleigh[6],Orr, A.Sommerfeld以及其后H.Schlichting,林家翘[5]等的著
作中,阐述了相对小扰动的流体动力学稳定性理论。经过H.Dryden的实验证实了此理论的基本结论
之后,特别在应用了最新的计算数学方法之后,许多年来此理论已成为这方面的统治理论(目前仍是这
样)。小扰动理论得到了最大可能临界Re值(例如,对于圆管内不可压缩流体流动, $Re_{临界} = \infty$;对
于平面槽流, $Re_{临界} = 3850$)。

G.I.Talor首先指出物理上可以实现的湍流发生机制,是绕流物体表面的边界层的可能微小分
离,是与此有关的相当大扰动的发展。这种过程的数学模型实际上尚未深入研究。

最后,近些年来出现了由于平稳流动丧失稳定性而发展起来的自振理论。已经指出,在中性曲线
最左边区域内可能有同层流流动中自振的发展有关的分叉。在某些假定下可以指出,存在一个这些流
动在其中是稳定的区域(“物体”),并且此区域的最小Re数,要比依据小扰动理论得到的更接近实
验临界值。在层流流动稳定性理论的许多实际应用中,这里我们仅指出可渗透表面上的边界层稳定性问
题。去掉通过固壁的部分流体会提高流动的稳定性,并能使在没有抽吸情况下发生的湍流边界层层流
化。这时可以大大减小流体动力阻力。不过,这个问题,从理论方面来看是显然的,在工程技术上却
是极难解决的。

Reynolds方程的不封闭产生湍流理论的两个基本方向。第一个方向是半经验唯象理论。此理论的
产生和富有成果的发展,同Taylor,Prandtl,Karman,Колмогоров[7],A.M.Обухов等[8]的
著作有关。第二个方向是湍流的统计描述。它是Keller,Friedmann[9]和E.Burgers提出的。在上
述Колмогоров的著作以及某些新思想[10]的影响下,此方向目前得到越来越广泛的发展。由于
进行了深入的湍流研究,已经积累了湍流流动结构方面的大量经验材料。同时出现了许多巧妙测量瞬
时流动参数的新方法(热线风速计,电子频闪观测仪,电化学压力测速计,激光测速计,等等),对所
得测量结果必然要进行统计的分析。这些测量结果使我们能够在湍流统计理论中引进某些经验函数并
进行确定的实际计算。但是,如果在湍流边界层的最简单半经验理论中含有不少于两个实验确定的
“湍流常数”,那么,在现有统计方法中不仅这些常数的个数要大大增加,而且会出现一组经验函数
[11]。

近来M.Д.Миллионщиков推广了粗糙表面湍流绕流的半经验理论[12]。

平均湍流流动稳定性的研究是湍流理论发展的一个重要领域。只在最近一些年来才开始系统地进
行此领域的研究工作。但已经获得了一系列没有引进经验系数的重要结果[13]。在这方面按新的方式

成功提出了 Re 数很高时($Re \rightarrow \infty$)的边界层问题,此问题在本质上说明了整个边界层理论的特点。

这里要强调一个重要问题。无限减小粘性并不能从Euler方程得到解,这是因为它同理想流体($\mu=0$)理论及粘性消失流体理论的边界条件问题的不同提法有关。例如,对于第二种情况,不管粘性多么小,都可以提出确定流体粘附在固壁上的条件的问题。

同湍流流动守恒性的一般概念也密切相关的一个新方向是湍流边界层的准层流稳定性理论,应当指出,在一阶近似下平均湍流流动的小扰动方程,类似于描述层流流动的二维小扰动的Orr-Sommerfeld方程。但在 $Re > Re_{\text{临界}}$ 的区域内,一切比较平坦的速度分布形状(同Poiseuille抛物线分布相比而言),在通常的小扰动分析意义上来说是稳定的。如果假定在这些速度分布的集合的性质中,可以实现某种意义上的最大稳定性,那就可以不要任何经验系数而建立固体附近的平均湍流流动理论。于是,看来对整个平均湍流流动进行流体动力学稳定性的分析,就成为湍流理论基本发展方向之一。

最后我们谈谈同一般描述湍流问题有关的一个崭新思想[14]。文献[14]试图把具有强烈相互作用涨落的热力学系统的相似性质搬到湍流理论中。分析附壁湍流的一些新方法,导致发现一系列具有极重要实际意义的新效应。这里我们只举出两个例子。

利用具有粘性消失的边界层理论来预言把可渗透表面上的湍流边界层排挤掉的效应,已在实验上证实并进行了研究。所建立的计算方法使我们能够了解具有复杂边界条件的许多流动,包括物理-化学变化和边界层流化问题。

电弧等离子体发生器中等离子体束的湍流化,可得到解决高温化工装置结构问题的重要新方法。湍流流动同电磁场的相互作用,弥散介质中的湍流,目前都是物理流体力学新分支的研究对象。

参 考 文 献 (略)

译自: Кутателадзе, С.С. (1990), Развитие основных идей теории турбулентности, Вопросы истории естествознания и техники,

4 : 112 - 116.

(董务民译)

生物力学的发展

——第1届全国生物力学学术会议述评

复旦大学 柳兆荣

一、概 况

第1届全国生物力学学术会议于1981年7月20—23日在上海复旦大学举行。这次会议由中国力学学会、中国生物医学工程学会主办,并委托上海力学学会、上海生物医学工程学会与复旦大学联合召开。

这次学术会议是我国生物力学学术界的一次空前盛会。参加这次会议的有来自各高等院校、科研机构、医院以及其他有关部门的代表156名(包括列席代表65名),他们中有力学工作者、医学生理学工作者以及其他有关方面的专家。中国生物医学工程学会理事长、中国医学科学院院长黄家驷出席并指导了这次会议。著名生物力学家、美国加州大学圣地亚哥分校冯元桢教授热情关怀我国生物力学