

湍流(Turbulence)的实验研究

厉 良 辅

湍流是世界上研究基本理论课题中,少数最困难的问题之一。一个多世纪以来,在湍流及其相关领域内,一直紧张地进行着大量的科学研究工作。但至今在湍流的基本物理概念,和其应用方面,有很多问题仍未能获得解决。本文试图说明湍流研究的目前概况,我们在实验室研究方面取得的一些成果,以及今后研究的方向。

一、湍流研究的现状

湍流具有下列特性,首先它是非定常的,在时域与空域内它具有杂乱无章的紊动特性。在一个完全发展了的湍流中,充满了各种不同比尺的紊动,从为流动边界所允许的最大比尺,到为耗散过程所允许的最小比尺,各种不同比尺的紊动均有。而且湍流也是高度发展了的漩涡流。

低粘度流体的层流在雷诺数超过一定临界值后,就要转变为湍流。在考虑层流的不稳定性问题时,一般都是研究在均匀流条件下,小扰动线性叠加对稳定性的影响。用富里哀叠加法来分析较普遍的扰动影响。考虑较大振幅的扰动对不稳定过渡过程影响时,在理论上主要遇到了非线性问题的困难。仅仅能在少数几个简化了的模型上取得了成功。如有限振幅波对平行剪切流不稳定过程的影响,有限振幅波对异重交界流影响等。比较困难的问题是分析在时域与空域中缺乏周期性的不具有波动性质的有限振幅扰动,对不稳定性的影响。

由于湍流杂乱无章的紊动特性,人们又把气体动力学的方法运用于湍流现象从而建立了湍流的统计理论,湍流统计理论对均匀各向同性湍流模型进行了深入的理论探讨,取得了不少理论成果。但是统计平均的方法使不少有利于了解湍流机理的信息损失掉了,特别是相位关系。在我们试图了解湍流强烈地间隙发作机理,也可以称为爆发机理时,相应关系似乎应该起主要作用。因此用统计平均的技术达不到这个目的。近年来发展起来条件抽样实验技术,在固体边界流与自由剪切流方面均取得了湍流结构的新信息。

把湍流当作层流来处理并在流体某些特性上加以适当修正,这个领域的成果当推雷诺,布西涅斯克等人,他们引入了湍流应力的概念,认为流体除具有粘性剪应力外还具有湍流剪应力。普朗特引入了混合长度的概念。不过到今天仍然无法从理论上直接解出雷诺方程。这个从纳维斯托克方程导出的,用紊动平均速度来表示的雷诺方程仍然需要凭籍经验数据才能获得它的解。

实验室中对充分发展了的剪切湍流,进行了大量的观测,通过热线流速仪,近年来的激光流速仪在观测中均获得不少资料。

本文1986年11月24日收到

最近二十年人们特别注意到湍流的强烈间隙看作现象,这个现象发生在靠近固体边界的湍流边界层中与明渠流中。在研究这个现象的同时也建立了一套条件取样的实验方法。但是到今天这些实验资料仍然没有能够得到理论上的分析成果。

二、我们最近在实验室工作中研究湍流方面取得的成果

我们水力学实验室最近两年在研究明渠闸后水跃实验中用激光测速仪与旋浆式光电流速仪(MZL-A型)对水跃后紊动流速与大尺度紊动动量进行量测取得了湍流的一些资料,通过理论分析作者得到如下几点结论:

1. 跃后紊动速度并不符合正态分布

从全部处理资料证明计算的偏倚系数 C_s 的变化范围在 -0.10 到 0.4 之间,平均值为 0.17

$$\text{偏倚系数} \quad C_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [v(n \cdot \Delta t) - \bar{v}]^3 (\bar{v}')^2)^{3/2}$$

而正态分布曲线的 $C_s = 0$

$$\text{峰型系数} \quad C_E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [v(n \cdot \Delta t) - \bar{v}]^4 / (\bar{v}')^2)^2$$

的变化范围为2到4其平均值为2.8,而正态分布时 $C_E = 3$,详细资料见文献1表(5—2)。作者见到的几乎所有研究工作者在这种情况下都作出紊动流速基本符合正态分布的结论。作者认为做出这种结论应当慎重。因为紊动流速常常是不按正态规律分布的。一个流体质点在运动的过程中得到的动量增量并非与先前的过程完全独立无关可以把它们看作自由分子运动。紊动流速不按正态分布规律和正态分布有差异,正是湍流机理的重要特征。尤其应该注意的是最大可能流速的出现对水跃后的冲刷起着巨大的作用。因此粗心地把紊动流速当作正态分布,错误地估计可能出现的最大流速,会带来不可忽视的后果。

2. 紊动强度与流速梯度密切相关,平均流速梯度越大,即 $\frac{du}{dy}$ 越大,紊动强度 t_i 就愈大。

纵向流速 $u = \bar{u} + u'$

$$D = \overline{u'^2}, \quad t_i = \sqrt{D} / \bar{u}$$

紊强极小值 $t_{i \min}$ 发生在 $\frac{d\bar{u}}{dy} = 0$ 处,但 $t_{i \min} \neq 0$,见文献1、图5—6至5—13,这个结果符合普朗特混合长度假定,普朗特假定 $u' = l' \frac{d\bar{u}}{dy}$

朗特混合长度假定,普朗特假定 $u' = l' \frac{d\bar{u}}{dy}$

l' ——混合长度。说明紊动强度是与平均流速梯度成正比的。

3. 跃后大涡旋的尺度与水深同级,证明在充分发展的湍流中,涡旋的最大尺度为水流边界条件容许的最大尺度。

涡旋的最大尺度沿用均匀紊流中的公式来估计,纵向大比尺 L_t ,即 $L_t = \bar{V} T_E$

$$\text{而 } T_E = \int_0^{\infty} \widetilde{R}(\tau) d\tau = \frac{1}{R(0)} \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau$$

T_E 的计算结果见文献1, 看表5—2

对于所有的测点 $\frac{L_t}{h_2} = \frac{\overline{V} T_E}{h_2}$ 匀在1.0左右变化。

这就证明了上述结果。

4. 从上述实测资料的理论分析成果看出, 国产激光测速仪和MZL—A型光电流速仪对湍流的实验室研究提供了可贵的资料, 证明它们是有效的手段, 但是我们目前采用的国产激光测速仪只能进行一维流速的量测, 频率跟踪器尚不够灵敏。旋桨式光电流速仪不能够辨别流速方向, 每一数据输出有时间间隔, 不能够连续输出信号。这些缺点均影响我们进一步深入地探索湍流动力学过程机理。有待研究改进。

三、对湍流研究的今后设想

湍流研究之所以成为世界未能突破的难题, 一方面在于实验量测技术没有发展到足够的水平, 使能够探明湍流发生、发展过程的全部机理, 未能从物理本质上揭露其规律。另一方面人们从观察到的不完善的物理现象与规律建立起来的大量数学模型在推理方面做了大量研究工作, 这当中又遇到了数学上的许多难题。有的试图从建立起来的复杂的微分方程来探讨不稳定性问题, 从而了解湍流产生的机制, 但是遇到了非线性难题。有的从数理统计手段出发, 企图阐明湍流的根本规律, 却又把湍流质点当作自由分子来处理。所以均未获得理论上的突破。现在由于激光流速仪的出现, 用电子计算机现在已可以分析输出的信号数据得出需要的分析图形。作者认为现在已经有条件集中力量于湍流量测技术的突破, 把激光量测技术与电子计算机技术结合起来, 找出湍流形成发展的本质规律, 尤其应当研究清楚湍流“爆发”的特殊机制, 再建立更为完善的数学模型加以总结分析提高。这样才能最后解决一个多世纪以来未解决的世界难题。

参 考 文 献

- [1] 辛玉传 郑州工学院硕士研究生论文《低弗汝德数水跃特性的实验研究》 1984.11
- [2] 奥国仁 紊流力学 1982 人民教育出版社
- [3] J.O.Hinze Turbulence 2 edition 1975