

湍流统计特性实验研究概况*

呼和敖德**

湍流运动作为自然界和工程中普遍存在的一种现象，人们研究它已有一百多年了。从早期涡粘性和混合长理论提出以后，对工程上解决湍流问题提供了一些经验的公式。后来有人不断地进行改进，想从物理的角度更合理地推动理论的研究。但是，由于对湍流机理仍缺乏基本的认识，所以理论工作的进展很缓慢，连最简单的均匀各向同性湍流的问题还未得到合理解决。因而目前在工程上仍然使用着从道理上讲不太合理的涡粘性和混合长理论的半经验公式。

正因为如此，所以需要进一步加强对湍流基本理论的研究。实验研究是进行湍流机理研究的一个重要手段。目前的实验多数还限于低速均匀湍流流场的测量。对剪切涡流运动如边界层、管流、射流和尾流等，由于流动复杂，测量结果很少。尤其缺乏高速高温涡流流场统计特性的测量。因而加强实验研究以进一步了解湍流的微结构，为理论分析工作提供物理模型，乃是当前从根本上解决湍流难题的一个重要环节。

实验研究的主要途径

实验研究的途径很多，室内可用各种设备进行测量，室外可直接探测大气。本文只限于介绍一般室内研究的主要途径。

(一) 试验设备

湍流的运动出现在各种复杂的环境里，如大气湍流、海洋湍流，各种工程上的湍流运动，航空方面的湍流运动，等等。如果模拟具体条件，问题很复杂。从基本理论的角度研究湍流，所需的试验研究要简单一些，主要目的是更好了解湍流本身的机理，所以用低湍流度风洞加网格的方法测量湍流特性。

另外，常用简单的管道流动，用光测方法进行一些简单的试验研究。如激光—多普勒测速仪测量，多数是在管道流动中进行的。

(二) 主要测量方法

1. 电学方法

* 1972年12月初稿，1973年6月11日收到修改稿。

** 在写作过程中曾与谢象春讨论。

电学方法是采用探头在流体中进行测量。这种仪器主要有热线风速仪和热膜风速仪，最近又提出了脉冲线测速技术。

热线风速仪是这方面最早发展起来的测速仪。它和新近发展起来的热膜风速仪一样，在流体动压力和总温不太高的流动中进行测量是十分成功的。文献〔9〕指出目前测量结果 M 数不超过4。常用的热线风速仪分为恒流和恒温两种。恒流线化热线风速仪多数用于低湍流强度的测量，如低湍流度风洞、边界层流动和管道流动。恒温线化热线风速仪多数用于射流的测量，比较容易操作，可靠，线性处理容易。

可以把热线和热膜组合起来建立一个新探头以进行测量。例如文献〔9〕中用了二热线一热膜交叉装置制成探头，测量了氦气引射流动中的湍流统计特性。最近文献〔12〕指出，可用复式热线阵列来进行高湍流速度的测量。

目前热线和热膜风速仪还只限于用在低速情况，如果用于高湍流速度会遇到很大困难，而且会产生严重的误差。这是由于：（1）这种仪器对大速度向量的扰动产生非线性反应；（2）仪器对流动方向的变化给予含糊不清的反应。文献〔12〕为了避免上述缺点，提出了脉冲线技术用于高湍流速度的测量。它由一根电脉冲线和两根感受线组成一个探头（中间是一根10微米直径的铂金丝脉冲线，两边是5微米直径的铂金丝感受线）。测量了速度和湍流强度，其结果与热线风速仪比较差别较大。引起误差的原因很多。如偏航反应，脉冲线尾流影响，忽略热和粘性扩散引起的误差等等。还有待进一步研究和完善。

一般用热线风速仪测量可给出纵向和横向湍流强度、两点空间关联和自关联、剪应力和关联系数、一维能谱、剪力关联谱、空间时间关联函数、泰勒微尺度以及其他一些积分尺度。对变密度湍流测量可给出浓度的扰动强度关联系数和密度扰动强度等。

由于理论研究中需要更高阶的速度关联数据，因而最近文献〔16，17〕用热线风速仪和高速数字计算机测量了格子产生的湍流纵向速度扰动的高阶关联。实验确定了两点高阶时间关联之间的关系。这些研究表明，当把不同时间的扰动假设为联合概率密度时，可以把所有两点偶次关联准确地由二次关联来表示，而非高斯、格拉姆—查利尔分布可以很好地描述奇次关联之间的一些关系（除了小的区分值外）。用高速数字计算机方法测量湍流，至今不是很容易见效。所以当前还在进一步进行探讨。

为了研究小尺度湍流结构，近来文献〔14〕用测速度高次关联的方法，测量给出了高达八阶的纵向湍流速度梯度的高阶关联。同时对高雷诺数下反应湍流小尺度结构的间隙特性进行了测量。因为间隙特性的研究涉及对大气和海洋湍流的研究问题，当前很受重视。

关于热线风速仪的材料，一般用铂金丝、钨丝和铑丝等，直径几微米，感受部分长度与阔尔莫戈罗夫湍流微尺度同量级。热膜材料也与热线相同，但其尺寸比热线大一个量级。

2. 光学测量

电测方法本身就有弱点，所以随着激光技术的发展，激光—多普勒测速仪开始应用于湍流测量。

激光提供了单色的相干强光束，可以用来测量频差，具有以下几个优点：

- （1）激光比热线风速仪有较好的空间分解性能。
 - （2）由于多普勒频移正比于测点流体速度分量，所以可以直接测量速度分量。
 - （3）探头式仪器对流场产生干扰，激光没有这个问题，因而适合于测量高速湍流扰动。
- 由于用其他仪器设备测量非牛顿流时会引起一些其他问题，例如热膜设备很难校准，并

且由于一些物质（即非牛顿流中的附加物）阻塞在膜上而引起损坏，所以激光—多普勒测速仪用于测量非牛顿流也是很好的。

激光—多普勒速度测量原理见图1。

流体内部湍流强度和平均速度是通过观测激光散射光束的多普勒频移得到的。从激光源发射的单色光束经过光分离板，分成散射和参考两条光束，再用透镜把这两条光束聚焦在实验段内所要测量的点上。散射光被流体内的散射体所散射，沿参考光束被散射的那部分光在光电放大管的光阴极上引起光混合或光外差作用。从光外差作用可得到多普勒频移 $f_D = (2u/\lambda_r) \sin\theta$ （ λ_r 是激光波长， θ 是散射光束和参考光束夹角， u 是流体速度即流体内部散射体速度）。由 f_D 可直接得到流体速度。

所用的激光器多数是低功率的氩—氖激光器，也有氦激光器，输出功率低的有零点几毫瓦，高的达几百毫瓦。做为散射体的物质有很多种，如滑石粉、光泽塑胶、丁二烯、橡胶、苯乙烯等。在超声速风洞中，气体经过膨胀段形成小冰粒，所以将小冰粒作为散射体进行测量。也可采用油的小滴作为散射体。

激光—多普勒测速仪测量也存在一些问题，如采用怎样的散射体才能保证散射体与流体不发生相对运动。另外，散射容积内的散射体在任一瞬间的浓度变化和散射体进入和离开边纹图案的随机状态，都会引起信号振幅的很大变化，相应于这些变化的是干涉频率对其时间平均的扰动。这就引起输出频谱的散布，通常把这看作是不明确点或含糊点的增宽。

最早是文献〔3〕用激光—多普勒测速仪测量了水管流内的速度扰动值，采用了0.557微米的光泽塑胶作散射体（容积浓度为1:30000），观测了轴向速度和扰动速度。然而这样一种有效的技术几年来没有得到很好应用。如雷诺应力 $\langle u'v' \rangle$ 的测量最近才在冯·卡门流体力学实验室进行。到目前为止，用这种手段所能测的量只有 $\langle u'^2 \rangle$ ， $\langle v'^2 \rangle$ ， $\langle u'v' \rangle$ 和 $\langle u \rangle$ 。

在分子聚合物溶液内用激光—多普勒测速仪测量也有许多人研究，如冯·卡门流体力学实验室就在作这种研究。

关于两点扰动速度相关的测量，文献〔5〕指出可用两个不同的激光—多普勒测速仪进行。其具体测量结果还未见到。

正如上面所指出的，激光测速仪适合于高速湍流的测量。但是，在高速下进行测量会产生新的困难，如频率改变大。所以要求避免由纵向振荡型所产生的放大信号的紊乱。因而当前在高速湍流测量方面的结果不多，有人测到1300米/秒的速度。

除上述光测法以外，最近文献〔13〕用纹影方法探测了密度梯度扰动和密度扰动的均方根值和密度谱。也有采用光的交叉光束进行测量。这些研究还不很成功。

几点看法

几点看法

1. 近几年来科学技术的发展，尤其是激光技术的广泛使用，使湍流实验技术也有很大发展。然而这些新技术新仪器的研制还处于初期阶段，它们所能测量的范围还不小，提供的

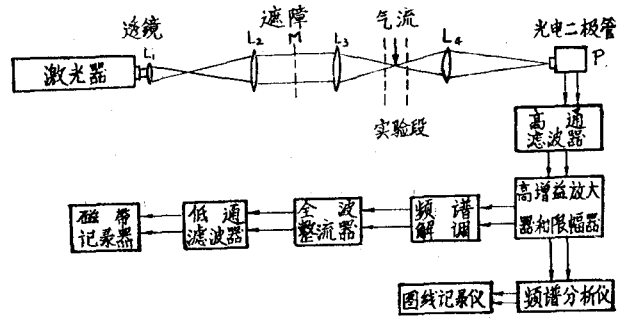


图1 光的结构和信号分析系统

数据还不多。所以一些关联量的测量目前还是靠热线风速仪来作。

2. 在可压缩高速湍流的研究方面进展不大。这是热线风速仪本身的弱点所致。新的仪器尚不成熟, 还不能测量较高的速度。

3. 随着高速数字计算机的发展, 怎样将速度计测量和高速数字计算机配合起来共同进行测量和分析, 对理论研究提供更多的依据, 也是一个研究方向。

4. 当前除了进行大风洞实验外, 还应重视在管流和射流中进行一些实验研究, 因为设备简单, 测量方便。

参 考 文 献

- [1] Logan, S. E., A laser velocimeter for Reynolds stress and other turbulence measurements, *J. AIAA*, 10, 7, 933 (1972) .
- [2]——, Laser velocimeter measurement of Reynolds stress and turbulence in dilute polymer solution, *J. AIAA*, 10, 7, 962 (1972) .
- [3] Goldstein, R. J. and Hagen, W. F., Turbulent flow measurements utilizing the Doppler shift of scattered laser radiation, *The Physics of Fluids*, 10, №6 (1967) .
- [4] Chung, J. S. and Graebel, W. P., Laser anemometer measurements of turbulence in non-newtonian pipe flows, *The Physics of Fluids*, 15, №4 (1972) .
- [5] Penner, S. S., Use of laser for local measurements of velocity components species densities and temperatures, AIAA 6th Aerodynamic Testing Conference, 1971.
- [6] Duggan, J. B. and Shih, C. C., Development of a laser Doppler instrumentation system for velocity measurements in subsonic and supersonic jets, AIAA 6th Aerodynamic Testing Conference, 1971.
- [7] Jackson, D. A. and Paul, D. M., Measurement of supersonic velocity and turbulence by laser anemometry, *J. of Phys. E. Scient. Instr.*, 4, p. 173 (March 1971) .
- [8] Greated, C., Measurement of turbulence statistics with a laser velocimeter, *J. of Scient. Instr., Series 2*, 3, №2 (1970) .
- [9] Way, J. and Libby, P. A., Application of hot-wire anemometry and digital techniques to measurements in a turbulent helium jet, *J. AIAA*, 9, №8 (1971) .
- [10] Champagne, F. H., Harris, V. G. and Corrsin, S., Experiments on nearly homogeneous turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, 41, Part 1 (1970) .
- [11] Van Atta, C. W. and Yeh, T. T., Some measurements of multi-point time correlations in grid turbulence, *J. Fluid Mech.*, 41, Part 1 (1970) .
- [12] Bradbury, L. J. S. and Castro, I. P., A pulsed-wire technique for velocity measurements in highly turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, 49, Part 4 (1971) .
- [13] Davis, M. R., Measurements in a subsonic turbulent jet using a quantitative schlieren technique, *J. Fluid Mech.*, 46, Part 4 (1971) .
- [14] Frenkiel, F. N. and Klebanoff, P. S., Statistical properties of velocity derivatives in a turbulent field, *J. Fluid Mech.*, 48, Part 1 (1971) .
- [15] Snyder, W. H. and Lumley, J. L., Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, 48, Part 1 (1971) .
- [16] Frenkiel, F. N. and Klebanoff, P. S., Higher-order correlations in a turbulent field, *Phys. Fluids*, 10, p.507 (1967) ; Correlation measurement in a turbulent flow using high-speed computing method, *Phys. Fluids*, 10, p. 1737 (1967) .
- [17] Van Atta, C.W. and Chen, W. T., Correlation measurements in grid turbulence using digital harmonic analysis, *J. Fluid Mech.*, 34, P. 497 (1968) .