

了解湍流

同时应用 PIV 和 PLIF 测量技术是如何揭示湍流夹带机理的, 以及这可以为石油泄漏、风力发电场等带来什么启发。

尽管湍流在流体动力学中起着非常重要的作用, 但仍有很多东西是未知的。高速成像系统, 以及粒子图像测速 (PIV) 和平面激光诱导荧光 (PLIF) 等流量测量技术, 可以揭示湍流机理, 使流体动力学专家能够看到他们以前无法看到的東西。

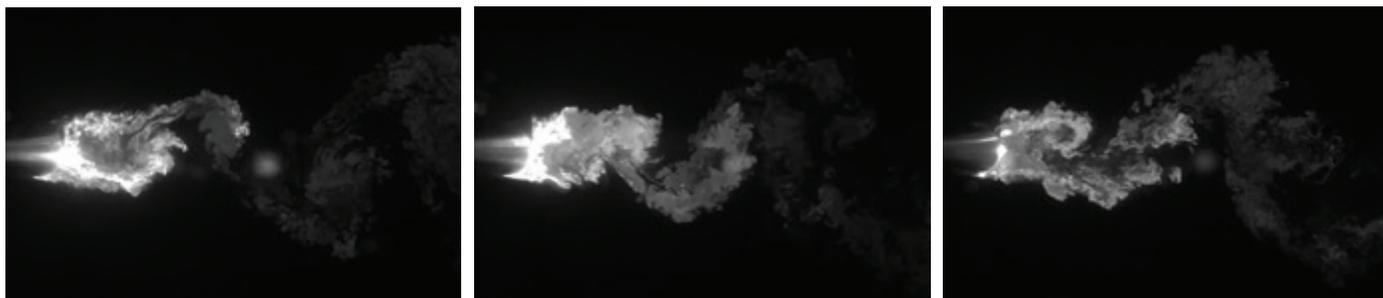
Oliver Buxton 是伦敦帝国理工学院航空系的一名研究员, 他专注于应用激光诊断技术来观察可压缩和不可压缩流动系统中的湍流。他的其中一个研究领域是夹带, 或一种流体的质量被转移到另一种流体中的过程。“想象一下, 一缕烟从烟囱中升起,” Buxton 解释说。“烟羽变得越来越厚是因为空气进入了烟羽中。这就是夹带。”

了解这一过程, 以及湍流流体周围区域的增长率, 对于石油泄漏、风力发电场等许多环境应用都很重要。Buxton 特别感兴趣的是后一种应用, 这促使他进一步研究湍流背景流体的夹带。

湍流与非湍流背景流体

尽管非湍流背景流体在目前的夹带研究中占了很大一部分,但在现实世界的流动系统中,不乏存在湍流背景流体。“例如,在风电场就有湍流背景流体,它在大气湍流时出现”Buxton说。“了解风尾流从湍流背景流体中扩散的速度可以帮助我们更好地布置涡轮机,以优化风电场的性能。”

为了研究湍流背景流体对夹带过程的影响,以及两种流体之间的界面区域的性质或总接触面积,Buxton 将一个圆筒置于自由流湍流中进行了实验。然后,他用同步 PIV 和 PLIF 流量测量技术测量了结果,这两种技术都是利用高速成像。



Buxton 使用 Phantom VEO 640 摄像机拍摄的高速圆筒实验照片。

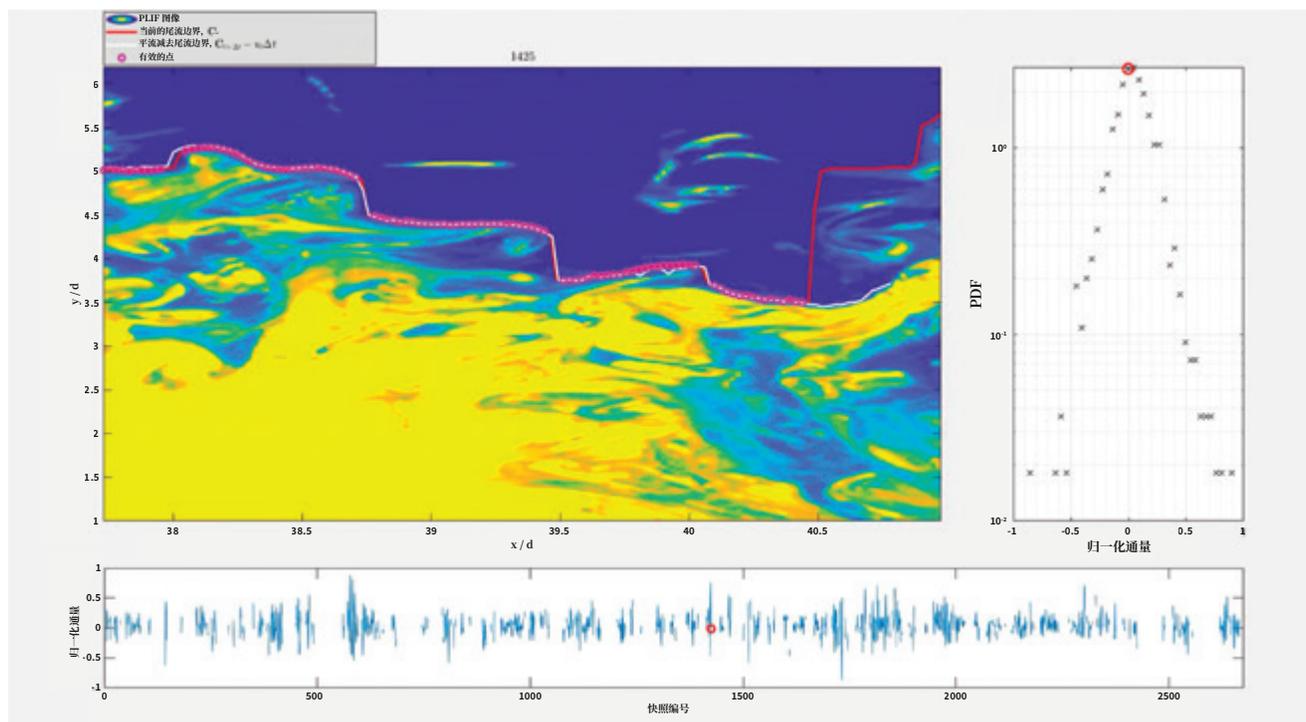
用 PIV 和 PLIF 方法观察流动

作为一种非侵入性的成像方法,PIV 使研究人员能够对流场进行观察和量化。利用这种技术,Buxton 在实验中测量了夹带速度。用于产生湍流的网格被放置在圆筒的上游,它在系统内产生了自由流湍流,雷诺数达到 4000。Buxton 将一些空心玻璃球放入气流中,它们就像风暴输送尘埃粒子一样输送示踪粒子。他用一个 527 纳米 (nm) 的激光器照亮了感兴趣的区域,并用一台 Phantom 高速摄像机对荧光粒子进行了成像。

通过给摄像机配备一个带通滤波器,Buxton 防止了来自染料(罗丹明 6G)的任何反射光对他的测量结果造成影响。获得 PIV 图像后,他通过运行互相关算法测量了粒子在 500 微秒 (μs) 内的位移。“知道粒子在这段时间内的位移后,我们就能测量出底层流体的速度,”Buxton 说。

PIC 实验参数		
光片	激光类型	Nd:YLF
	波长	527 nm
	频率	1,400 Hz
摄像机	分辨率	1600 x 2560 px
	像素大小	10 μm
成像	观察区域	32.0 x 51.3 mm
	f_{aq} (采集频率)	225 Hz
	dt (两帧之间的时间间隔)	500 μs
	N_{aq} (捕获的双帧总数)	2,676
PIV 分析	询问区域	24 x 24 px
	窗口重叠	50%

PLIF 是 Buxton 使用的第二种光学诊断技术,对于检测两种湍流流体之间的界面位置至关重要。只有在研究湍流背景流体的夹带时,才有必要进行这种测量,它会使用一个被动标量,Buxton 解释说,“这是一种可以被流动输送而不影响流动本身的东西”。在测量过程中,他在感兴趣的区域放入了荧光物质,用激光片照亮了该区域,然后用 Phantom 高速摄像机对荧光进行了成像。通过使用一个低通滤波器,Buxton 确保了 PLIF 摄像机只捕捉该实验中的示踪剂数据,而忽略 PIV 实验的示踪粒子。



对夹带行为的后处理分析。

高速成像的成功秘诀

在 Buxton 的湍流夹带实验中,他使用了两台 Vision Research Phantom 高速摄像机:一台用于 PIV,另一台用于 PLIF。多年来,他的实验室一直使用的是 400 万像素 (Mpx) 的 Phantom v641 摄像机,但 Buxton 说他最近购买了更紧凑的新款 Phantom VEO 640 型号。他说:“我们的湍流实验需要大视野,因此,400 万像素的摄像机对我们来说是非常有用的,”他还指出,该摄像机在高速拍摄时可提供出色的时间分辨率。

得益于其专有的 4 Mpx CMOS 传感器,VEO 640 在全分辨率下每秒可捕获超过 1400 帧,是 PIV、PLIF 和其他科学成像应用的理想选择。凭借其快速帧速率和高分辨率,摄像机使 Buxton 能够在每个球体通过视场时捕捉到它的流场。此外,12 位传感器的 ISO 值为 6400D,可以在保证灵敏度的同时提供出色的对比度,以便在 PIV 分析期间将示踪粒子与背景区分开来并分析流场。

在硬件方面,Buxton 使用了 VEO L 型,它的重量很轻,只有 5 磅,并且具有 I/O 接口,方便在实验室环境中进行科学研究。这款摄像机还支持各种可更换的镜头卡口。Buxton 在 PIV 中使用了 200 mm 的尼康镜头,在 PLIF 中使用了 100 mm 的图丽镜头。



Phantom
VEO 640 L 型

展望未来

Buxton 的 PIV 和 PLIF 实验的结果证明,湍流与湍流之间的界面确实是存在的。通过分析尾流边界的结构, Buxton 还得出结论,背景湍流强度的增加会导致界面面积增加。在完成这项关于湍流夹带的研究之后, Buxton 现在正在参与一个更大的、为期五年的项目,目标是优化风电场的布局。他说:“我们将进行更复杂的湍流夹带研究,因此 Phantom VEO 640 摄像机对我们来说将比以往任何时候都更重要。”

要了解更多信息,请访问:www.phantomhighspeed.com。

更多信息

Kankanwadi, K., & Buxton, O. (2020). 从湍流背景进入圆筒尾流的湍流夹带研究. 流体力学杂志, 905, A35. doi:10.1017/jfm.2020.755



某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息,请访问 www.phantomhighspeed.com/export。