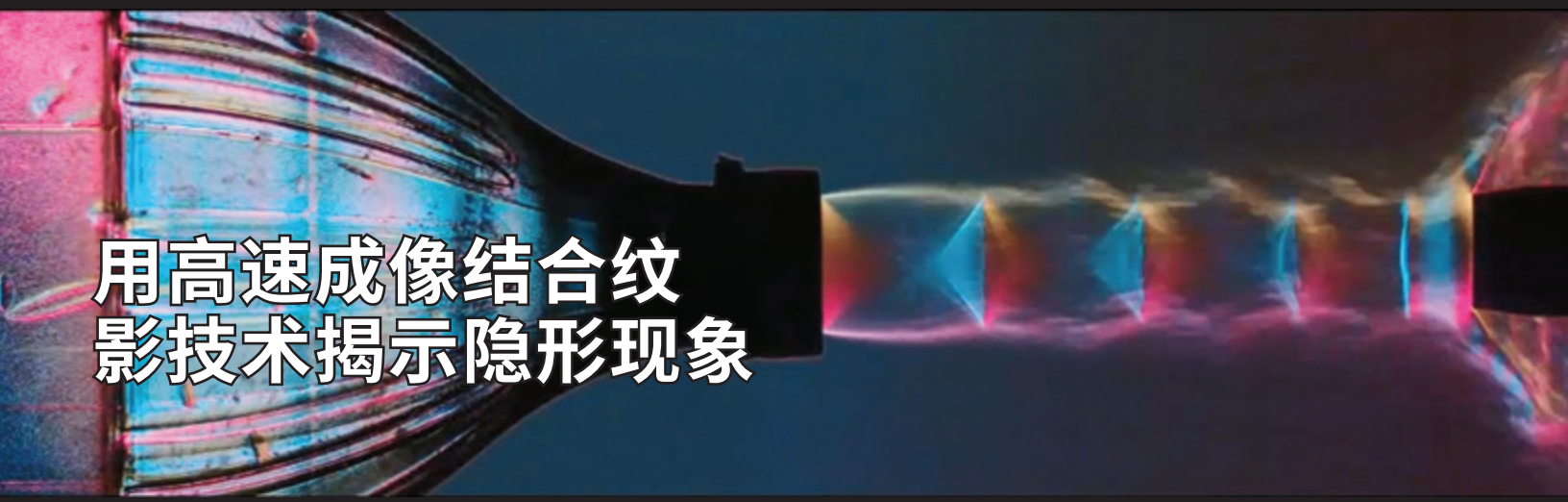
开发者:



用高速成像结合纹影技术揭示隐形现象

由Vision Research的现场应用工程师Phil Taylor撰写

科学家利用纹影成像技术(一种非侵入性的测试方法)来观察其他不可见流体中的密度梯度。纹影成像是一种用于观察风洞中机翼周围空气运动或燃烧室内气体相互作用的实用方法。在过去十年中,摄像机的速度和灵敏度得到显着提高,这极大地提高了纹影图像的质量和拍摄图像的速度。虽然现在这种先进的成像技术可以提供高动态过程的详细图像,但若要获得高质量的数据,还需要为应用选择最佳的高速摄像机并优化光学设备。

拍摄透明介质中的变化

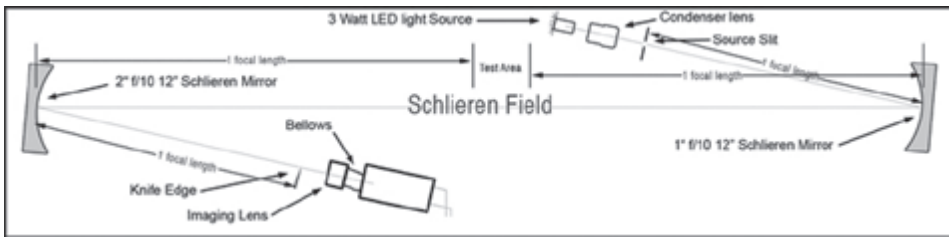
纹影成像有多种形式,它们都能在透明介质(如空气、水和玻璃)中拍摄通常看不见的密度梯度或"纹影"。纹影成像通常在实验室用于深入研究,与之相反,阴影照相的相关技术更常用于实地研究,因为其光学设备较为简单,更易于运输且不太可能被损坏。

空气或气体等介质的密度梯度或区域密度的空间变化由环境因素(如压力或温度)决定。当光线照射到介质上时,这种密度梯度的变化让光线以可成像的方式改变方向。用于纹影成像的最常见设备是z型系统。设备包括两个抛物面反射镜、一个点光源、一个摄像机和一个刀锋(图1)。它提供最高水平的图像质量,并可以快速转换为阴影照相系统或混合阴影照相/纹影系统。

纹影成像可用于研究空气动力学、流体力学、热交换和其他过程。例如,纹影成像可用于研究蜡烛的热烟流(图2)、氦气流(图3)和冲击波的形成过程(图4)。

获取高质量的数据

图1:在z型纹影成像系统中,第一反射镜(右)将光线准直射到第二反射镜(左),从而将光线导入摄像机。对于摄像机而言,视场被均匀地照亮,两个反射镜之间拍摄对象密度梯度的变化将改变光的折射率,这会出现在图像中。在第二反射镜的焦点处增加一个刀刃,可以均匀地阻挡进入摄像机的一部分光线。这将生成高对比度图像,使密度梯度的变化更加明显。可以改变光源和拦截处的组件,以改变图像的各种特征(如颜色)。



由于纹影成像采用小光源的方法拍摄极快的过程，因此高速摄像机需要有非常高的灵敏度。不需要较高的动态范围，因为纹影图像本身具有较高的对比度。使用带色调曲线自定义功能的摄像机，用户可以提取最佳的灰度级数据，这也是创建高质量图像的关键。此外，在成像过程中关闭摄像机风扇可以防止摄像机传感器发出的热量进入纹影场，以防止破坏数据的完整性。

用于拍摄纹影图像的光学设备即使对细微的变化也非常敏感。例如，几微米以内的刀锋位置变化或几度以内的环境温度变化可能会很明显地影响图像的亮度，从而降低系统的敏感度，并最终损坏所收集数据的质量。在比较高速摄像机时，灵敏度变化是衡量纹影系统的关键因素。切换摄像机的行为可能会改变设置，从而改变生成的图像。由于这种敏感性，在确定是否需要为特定应用修改设置之前，需要运行一些纹影测试。

一致性是纹影测试的关键，因此要求高速摄像机需要能够快速存储图像数据，允许在一次实验中执行多次测试，减少温度变化、对象变化或光学部件的移动。数据管理解决方案（如闪存或10Gb以太网）通过消除这些变量来帮助确保数据的完整性。

观察飞机机翼上的震动

传统z型系统的变化可用于获取特定类型的信息或研究特定的现象。例如，景深较浅的特殊纹影成像系统被证明是研究飞机不稳定性即抖振的理想系统。[1]飞机速度或迎角增加影响空气动力学行为和限制飞行包线，这也加剧了结构的振动。

为了研究抖振在飞机机翼上引起的震动运动，研究人员不仅需要拍摄冲击波，还需要拍摄帮助维持冲击振荡的压力波的传播方式。在这种情况下不能使用传统的纹影装置，因为气流的三维会因它对整个光路长度的敏感度让震动和压力波运动变得模糊不清。为了避免捕获不必要的三维流动结构，研究人员制作了一个景深更浅的系统。

实验装置扩散连续光，照亮了多个交替暗带和清晰孔径的源格栅，从而形成二维光源阵列。菲涅耳透镜是一种孔径较大和焦距较短的特殊透镜，放置在源格栅前方以增加光收集效率。带有大口径成像镜头的Phantom v710 CMOS摄像机以每秒7,000帧的速度拍摄冲击振荡，在单次实验中以20µs的曝光时间拍摄了8,345张图像。

研究人员使用这种装置来观察无源设备涡流发生器对抖振的影响，这些设备通常被用来控制冲击抖振（图5）。他们观察到在安装涡流发生器后飞机机翼周围气流的三维显著增加，这表明较浅的景深在这些情况下是用于精确捕捉震动特征的关键。可视化的聚焦纹影表明，在没有涡流发生器的情况下，迎角大于或等于5度时会出现冲击抖振。但在安装涡流发生器后，即使迎角超过6度，也未出现由

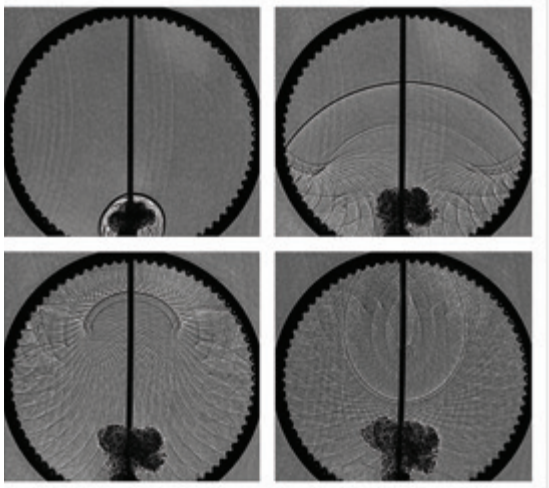
图2：热烟流。*图片由Phil Taylor提供。*



图3：氦气流动。*图片由Gavan Mitchell和Phil Taylor提供。*



图4：冲击波的形成。*图片由Phred Petersen提供。*



以上所有图片均在RMIT大学的纹影系统中制作完成。

抖振引起的冲击振荡。这些新发现为抖振物理学以及如何控制抖振以改善飞机空气动力学提供了新的见解。

在超音速流中进行
背景导向纹影测量

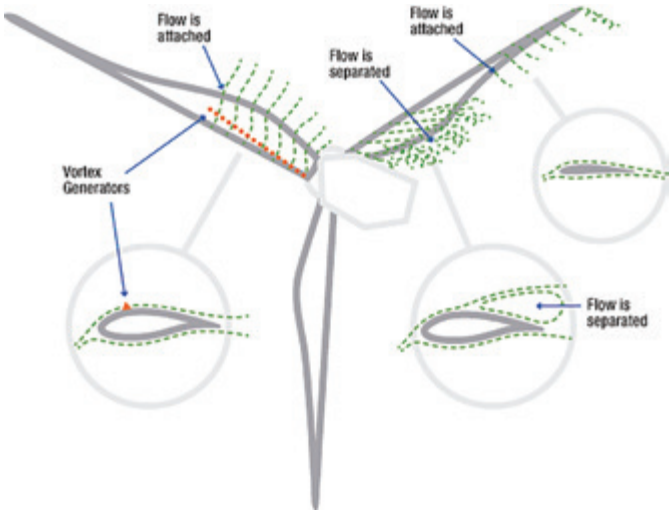
虽然传统的纹影成像技术可以提供非常详细的图像，但无法用这些图像来进行定量测量。纹影成像的最新方法 - 背景导向纹影（BOS）成像可以满足这种需求。4K分辨率（4,096 x 2,160像素）的新型摄影机一上市，研究人员便对它进行了测试，以看它是否可以与BOS相结合，从而获得比以前分辨率更高的精确定量密度测量。[2] 这些分辨率要求已在科学摄像机中得到满足。

与传统的纹影成像一样，BOS对随密度梯度变化而发生的光线弯曲进行成像。但BOS使用更简单的实验装置，只需一个背景和一台数码摄像机。BOS并不通过刀锋来控制灵敏度，而是在出现条纹前后将存在细微、几乎难以察觉的折射差异的图像与完全相同场景下的校准图像进行比较。

在实验测试中，研究人员使用高速Phantom Flex4K摄像机来BOS测量交叉流中喷射排气所产生的相互作用和动力学。这种类型的流场通常存在于工业环境中，例如向大气排放废气的烟囱以及火山喷发等自然过程。然而，由于分开流动、旋转运动、湍流和超音速冲击，可能难以分析这种流动场景。

在风洞运行的同时，研究人员打开阀门，试图拍摄相互作用场的增长，摄像机以每秒1000帧的速度拍摄图像，分辨率为4,096×2,160像素。在打开阀门之前，他们拍摄自由流状态下的参考图像。用640nm的激光照射背景，脉冲持续时间为50ns。实验表明，高速4K摄像机可用于定量测量交叉流中喷射排放所产生相互作用场的增长。这种流动场景正在被科学家研究，以为更好地理解各种自然和工业过程（图6）。

图5：纹影成像可以用来研究涡流发生器对飞机不稳定性即抖振的影响。
由Robert Bergqvist CC BY-SA 3.0通过维基共享资源提供。



用高速成像结合纹影成像揭示隐形现象

纹影成像的进步为研究人员带来了新的数据收集技术。选择正确的技术并将其与适当的高速摄像机相结合，可以满足人们对更详细和准确数据的要求。在高质量图像和数据收集中优化设置和执行辅助。

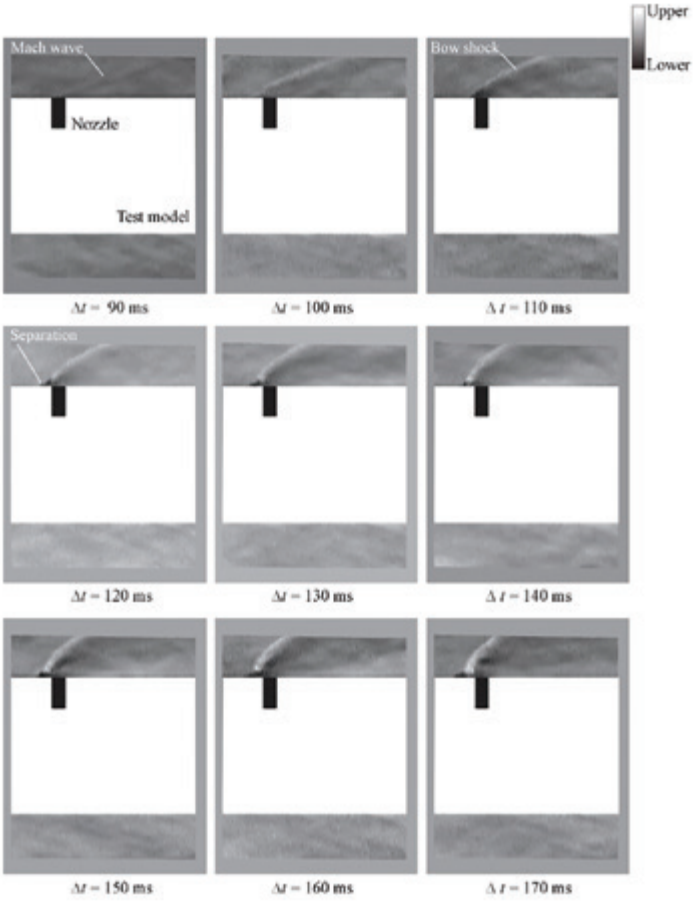
参考文献

1.T. Kouchi, S. Yamaguchi, S. Koike等。“使用涡流发生器在二维翼型上进行跨音速抖振的小波分析。”Exp Fluids (2016) 57: 166.doi:10.1007/s00348-016-2261-2

2.M. Ota, K. Kurihara, H. Arimoto等。“用4K高速摄像机在超音速流中进行背景导向纹影 (BOS) 测量”, Proc.SPIE 10328，第31届国际高速成像与光子学大会精选论文，103281E (2017年2月20日)；dol：10.1117/12.2271019; http://dx.doi.org/10.1117/12.2271019

封面图片由Phred Petersen和Phil Taylor提供，用Phantom v2511拍摄。

图6：侧向射流打开时，在喷嘴口产生微弱的马赫波（以声速传播的压力波）。十秒钟后，在射流的上游看到一个微弱的冲击波，然后形成相互作用场并观察到分离激波。最后，弓形激波（在超音速流通过有限体时发现的弯曲固定冲击波）变强，相互作用场也不断形成。*转载自SPIE会刊，已获许可。*



关于VISION RESEARCH

Vision Research设计并制造可用于各种纹影成像技术的数字高速摄像机。Vision Research是AMETEK公司材料分析部的一个业务部门。

AMETEK Vision Research的某些Phantom摄像机持有出口许可。欲了解更多信息，请访问：www.phantomhighspeed.com/export