

如鸟类展翅, 如飞机翱翔: 压电风扇周围的气流形态仿真

为了寻求安静、可靠、低能耗的散热方案, 诺基亚贝尔实验室的工程师使用多物理场仿真捕捉压电风扇在振动过程中与周围气流之间的相互作用。

作者 SARAH FIELDS

从蛇蜿蜒的身姿、壁虎牢固的攀附力, 到猎豹飞奔的步幅, 仿生设计已逐渐进入机器人、电子产品和医疗设备等领域的创新制造中, 推动着科技的发展。近年来倍受关注的压电风扇, 就是受鸟类翅膀振动的启发而设计的。

如今的电子产品在体积上日趋小巧, 然而运行时间却不断增加, 导致设备的内部热负荷越来越大, 小巧紧凑的新型散热方案成为了应对此问题的关键。压电风扇包含一类特殊的压电材料, 当受到外加电压时, 这种材料会发生膨胀和收缩, 引起悬臂叶片的振动, 进而产生

“COMSOL 帮助我们大幅提升了全新几何模型的构建效率, 加快对设计的优化。”

— AKSHAT AGARWAL,
诺基亚贝尔实验室研发人员

气体流动。用压电材料制造的风扇具有性能稳定、功耗低以及噪音小等特点, 显示出了良好的应用前景。

来自诺基亚贝尔实验室 (NokiaBellLabs) 的研究人员 Akshat Agarwal 也加入了压电风扇技术的科学研究中, 他正在尝试对风扇周围的气流运动进行表征。这一研究不仅可以解释振动的扇叶周围的气流模式, 也适用于那些具有相似气流模式的其他应用领域。

» 自然对流与强制对流之间的跳板

针对长时间工作的电子设备, 设计人员一般依靠自然对流或由风扇产生的强制对流来进行散热。然而自然对流效率过低; 强制对流需要大量的电力维持, 难以按比例缩小以适应当下小巧的电子产品。

压电材料的散热原理介于自然对流和强制对流之间: 在外加电压的作用下, 压电材料反复膨胀与收缩, 引起相连的扇叶发生振动, 从而产生气流。Agarwal 解释说: “自然对流通常是首选的散热方式, 但是在某些情况下, 我们需要加入主动部件来激发空气的流动。压电风扇便充当了跳板的角色。” 诺基亚贝尔实验室使用的风扇叶片由粘结在醋酸酯叶片上的压电材料和聚酯薄膜垫片构成 (图 1)。

对小尺度动态系统的流

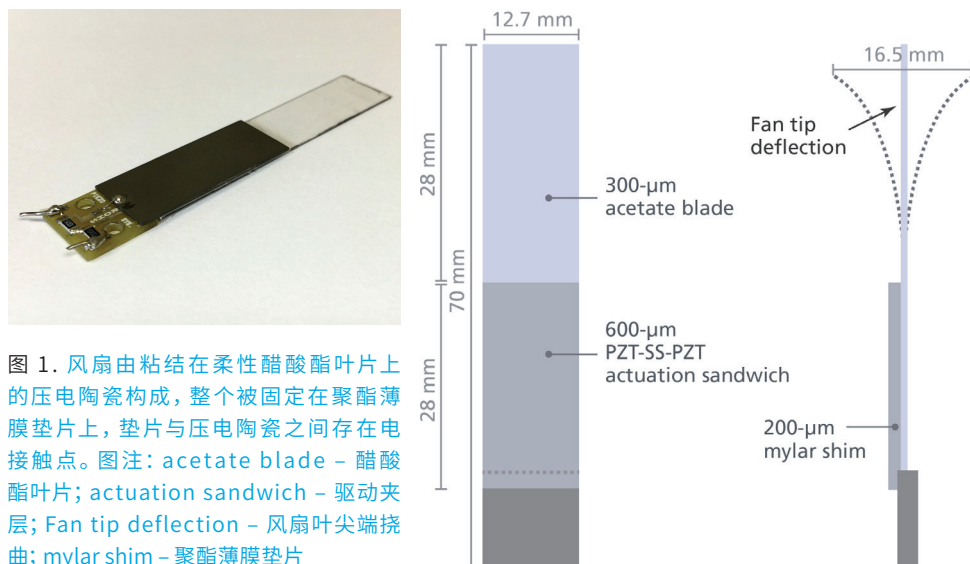


图 1. 风扇由粘结在柔性醋酸酯叶片上的压电陶瓷构成, 整个被固定在聚酯薄膜垫片上, 垫片与压电陶瓷之间存在电接触点。图注: acetate blade – 醋酸酯叶片; actuation sandwich – 驱动夹层; Fan tip deflection – 风扇叶尖端挠曲; mylar shim – 聚酯薄膜垫片

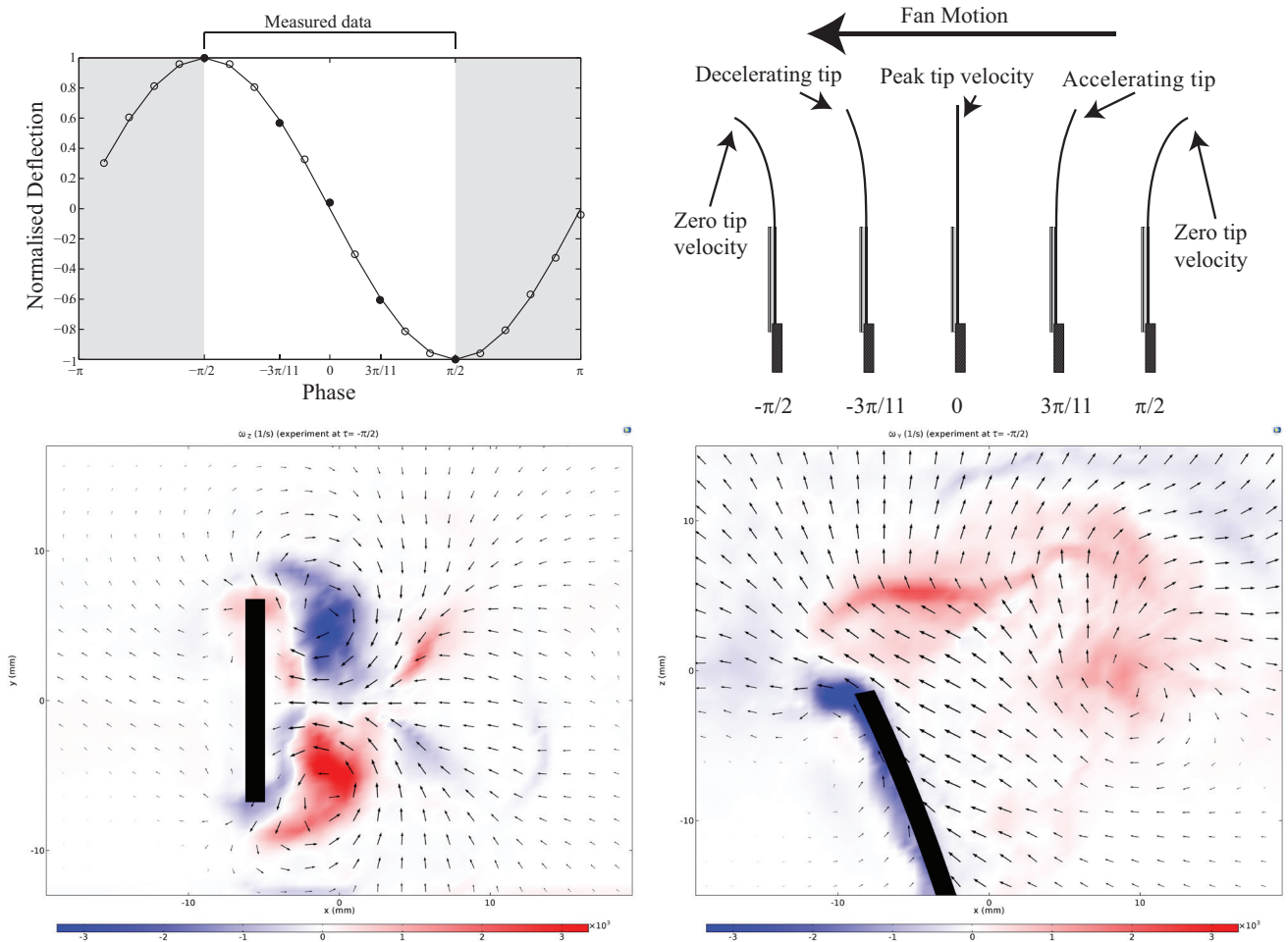


图2. 左上图:锁相测量值绘图显示了风扇叶尖的无量纲位移。右上图:绘图显示了风扇在半周期内的偏转情况。下图:相位锁定 PIV 测量值展示了无约束的风扇产生的涡量(等值线图)和面内速度(矢量场)。图注:Zero tip velocity - 叶尖速度为零; Decelerating tip - 叶尖降速; Peak tip velocity - 叶尖峰值速度; Accelerating tip - 叶尖加速; Fan Motion - 风扇运动

体动力学特性进行描述是一件十分困难的事情。为了有效地捕捉叶片振动时周围的气流，诺基亚的工程师需要将二维仿真研究拓展为三维，并引入物理测试。

» 判断气流模式

作为实验的第一步，诺基亚贝尔实验室的工程师使用了粒子图像测速技术

(particle image velocimetry, 简称 PIV) 对流场进行锁相测量，以得到不受约束的风扇在自由空间的涡量和面内速度(图2)。叶片在振动过程中共有 11 处位置，工程师在每个位置上采集了五个 x-y 平面和五个 x-z 平面的数据，由此获得了三维流场。

第二步是模拟叶片与空气的相互作用，借此进一步

深入了解系统。在选定仿真方法时，速度和准确性是两个需要考虑的关键因素。

“对于我们而言，能够尽快对叶片周围的流体流动进行准确模拟是非常重要的。” Agarwal 说，“这让我们能对设计执行虚拟迭代，进而研究扇叶在各种情景下表现出来的性能。”

工程师首先考察了相关

文献中的建模方法，这些方法的计算量很大，他们因而决定必须选择其他的方法。COMSOL® 软件占用计算资源较少，而且内置了任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 方法，此方法结合了基于欧拉 (Eulerian) 方法表述的流体流动方程与基于拉格朗日 (Lagrangian) 方法表述的

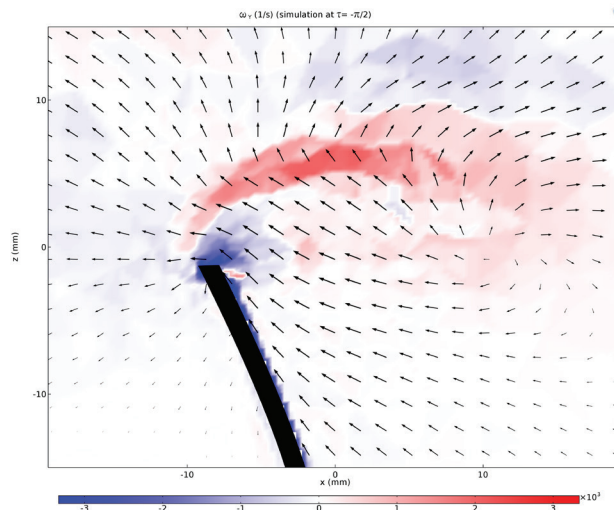
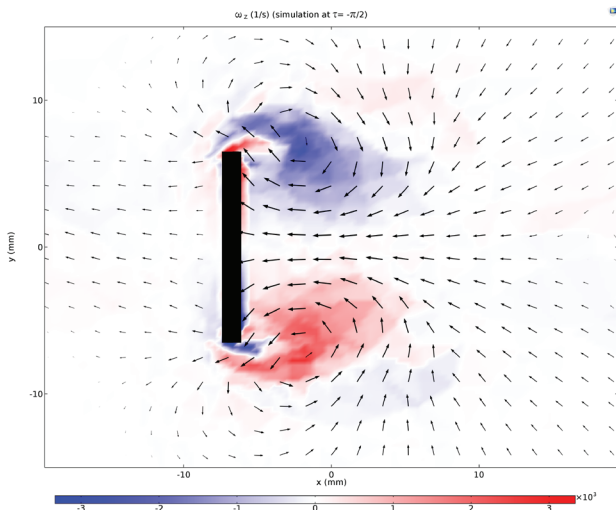


图 3. COMSOL 仿真显示了叶片振动过程中两处位置的涡量和速度场。

固体力学方程，正是求解此类问题的首选方法。

Agarwal 使用 COMSOL 软件对振荡叶片的受力和周围空气的流动执行了三维双向流固耦合分析，以精确捕捉系统内发生的物理现象。受益于 COMSOL 出色的灵活性，Agarwal 能够有选择的简化系统中的某些设计，以便在仿真中对研究的各个方面选用最优方式。

为了简化研究、提高计算效率，工程师重点模拟了风扇在运动中所受的剪切力和流体压力，并没有考虑风扇的压电驱动。模拟结果显示了叶片周围流体的速度、漩涡的结构和运动(图 3)。

“我们通过仿真获取了叶片附近的气流分布，其解析度要高于实验结果。在气流图中，空气流动基本上发生在叶片边缘，故此处的动量最大。在实验中，我们可

以查看测速图像并捕捉运动面，然后将平面拼接在一起，获得漩涡形状。但是实验只能获取一定数量的平面，所以解析度会受到限制。” Agarwal 补充道，“相比之下，如果你选择对此类问题进行全三维模拟，就能研究靠近和远离风扇的气流速度，还能绘制许多不同的变量。”

“软件还可以提取基于用户定义的网格或栅格计算的数据，我们可以将这些数据应用在任何我们想要的地方，比如导入到其他软件，或者使用脚本程序处理数据。” Agarwal 特别提到他如何通过执行后处理操作，他直观地描绘了叶片周围的气流涡量。

» 仿真分析与物理实验：高效组合

诺基亚贝尔实验室的团

队发现，他们的仿真模型可以捕捉系统运行时丰富的细节和动态过程，相比于单一的物理实验方法，仿真能够更加详细地分析叶片周围的气流和运动。该项研究中模型的准确性得到了实验的验证，研究团队期望将其作为基准模型用于后续设计。此项研究成果也可以应用于其他领域，无人机的设计便是

其中一例。“COMSOL 帮助我们大幅提升了全新几何模型的构建效率，加快对设计的优化。我可以自由地修改设计，并从中选出最佳的设计方案。” Agarwal 总结道。在后续的研究中，他们将对多个振动叶片周围的气流和流体动力学进行分析，并以此探索多台风扇同时工作时的散热效果。☺



从左至右依次为：Nicholas Jeffers、Kevin Nolan、Diarmuid O'Connell, 和 Akshat Agarwal。