

C12

# 尾迹诱导振动能量收集与流场结构

杨文超<sup>1,2</sup>, Mark Stremler<sup>2</sup>

(1 中国科学院力学研究所, 北京市北四环西路 15 号 邮编: 100190)

(2 Department of Biomedical Engineering and Mechanics, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA)

**摘要:** 自然界存在大量低速流动有待开发, 而基于流固耦合原理的流致振动可在较广的流速和雷诺数范围内产生有效的能量输出, 因而近些年来受到越来越多的关注。美国密歇根大学 Michael Bernitsas 教授研究团队最早提出基于涡激振动原理的能量转换装置, 命名为 VIVACE(vortex induced vibrations aquatic clean energy)。VIVACE 的发电原理为: 圆柱体在来流作用下, 其脱落涡旋产生的周期性升力诱导圆柱产生横向振动, 通过电磁捕能器从涡激振动中获取能量。该装置可以在流速为 0.25m/s 的海流或河流中启动发电, 流速 0.84m/s 时能量转化效率可达 22%。但该涡激振动系统存在两个显著问题: 其一是自锁问题, VIVACE 振动装置在竖直方向做直线往复振动, 因此需要竖直方向的两条平行导轨作为约束支撑机构, 当来流方向垂直冲击圆柱时, 圆柱沿着两侧平行双轨做上下往复的直线运动, 平行双轨容易产生自锁的问题; 其二, VIVACE 的振子只能固定在单一方向运动, 即两条平行导轨延伸的竖直方向。河道中较容易满足振动方向垂直于来流方向, 但海底洋流等会随着季节产生方向的变化, 由于 VIVACE 振动装置不能随着季节的变化而改变振子运动方向, 在实际应用中存在某些流向下能量输出较低的情况。

针对以上问题, 美国弗吉尼亚理工大学 Mark Stremler 教授团队提出了一种基于摆动的尾迹诱导振动(wake-induced vibration, WIV)能量收集系统, 目的在于避免传统涡激振动装置滑轨带来的自锁问题、该装置能够自适应流向改变, 可在各种流向下实现流体动能的高效回收。该装置的设计主要基于串行圆柱的尾迹相互作用, 并将振子运动由平动改为转动, 主要包含两个垂直于水面串行布置的双圆柱体系: 上游圆柱固定并作为主要结构支撑部件, 下游圆柱通过摆臂连接上游圆柱并可以绕上游圆柱中心自由摆动; 上游圆柱作为涡发生器产生流动涡旋结构, 下游圆柱受到上游圆柱的尾迹诱导作为振子持续进行往复摆动。该方法避免了竖直平行轨道可能存在的自锁、摩擦力大等问题, 通过将直线振动改为单摆式旋转摆动, 显著减小了摩擦力, 适合在较低流速启动而发电。同时该设计中, 下游圆柱可以不固定摆动的平衡位置, 自适应 0-360 度范围的任何流动方向, 随着上游圆柱尾迹的发展方向变化自适应往复摆动的运动范围, 从而解决了以往很多涡激振动能量收集装置的流向自适应难题。

理解尾迹诱导振动流动机理首先需要深入了解串行物体尾迹的相互作用。即便两个串行圆柱静止不动, 它们之间尾迹的相互作用也会带来复杂的流动结构, 这一问题看似简单, 但实验及数值模拟结果还是存在一定分歧。大量相关工作表明, 当流体经过等直径、光滑串行圆柱时会存在一个无量纲特征间距, 各种流动特征会在临界间距附近发生剧烈突变, 如圆柱间的尾迹结构、脱涡频率和升阻力等。本研究通过实验探究了串行圆柱尾迹结构随间距变化的演化过程, 发现了各种流动模态随间距变化的迟滞现象。并且通过建立基于降阶模型的单圆柱尾迹涡形成距离新定义, 预测了串行圆柱尾迹的临界间距。本研究随后基于新定义的涡形成距离, 分析了串行圆柱尾迹诱导振动随间距变化的演化过程, 发现了振动模态与流动模态的相互对应关系。该研究成果可以用于尾迹诱导振动中的尾迹相互作用分析, 揭示出尾迹相互作用对下游圆柱振动特性的影响, 为后续的尾迹诱导振动能量收集的应用发展提供重要的研究基础。

关键词: 流致振动, 尾迹诱导振动, 能量收集