

文章编号 1004-924X(2017)06-1502-11

涡激振动式微型流体俘能器的研究现状与展望

阚君武, 富佳伟, 王淑云*, 张忠华, 陈松, 蒋永华, 王鸿云
(浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004)

摘要:随着微纳器件应用领域的日益拓展,微能源技术受到国内外研究人员的高度关注和重视,其中利用涡激振动进行流体能量收集是主要的研究热点。本文首先介绍了基于涡激振动的流体能量收集原理,归纳了涡激振动式微流体俘能器的典型结构、原理、特性和应用情况。其次,总结了国内外基于尾涡致动和钝体致振这两种主要涡激振动流体俘能技术的发展概况与研究进展,并简述了涡激振动压电式俘能器流固耦合数学模型的研究现状。最后,指出涡激振动能量收集尚缺乏统一的数学模型以及现有的俘能器存在结构可靠性低、稳定性较差等问题。在此基础上,分析了利用涡激振动实现流体能量收集接下来的发展趋势,以期推动涡激振动式微流体俘能器的进一步发展与应用。

关键词:流体能; 涡激振动; 俘能器; 压电

中图分类号: TN384, TM619 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1502

Research status and prospect of vortex-induced vibration micro-fluid energy harvester

KAN Jun-wu, FU Jia-wei, WANG Shu-yun*, ZHANG Zhong-hua,
CHEN Song, JIANG Yong-hua, WANG Hong-yun

(Institute of Precision machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

* Corresponding author, E-mail: jutwsy@163.com

Abstract: With gradually expansion of the application field for micro-nano devices, micro energy technology have been paying more and more concerns and attentions by domestic and oversea researchers, among which micro fluid energy harvester based on the vortex-induced vibration(VIFEH) has become a hotspot. First, the operational principle of the VIFEH was introduced and the typical structure, theory, features and application situation of VIFEH were generalized. Then, the relative technology development and research progress of the fluid energy harvester with wake-induced vibration and that with vibrational bluff body were summarized and the research status of fluid solid coupling mathematical model for VIFEH was briefly described. The analysis results show that VIFEH still lack the uniform mathematical model and there are low reliability and comparably low stability in the existing VIFEH structure. Moreover, further development trend of VIFEH was pointed out. It is expected to promote the research and applications of VIFEH through this work.

Key words: Fluid energy; vortex-induced vibration; energy harvester; piezoelectricity

收稿日期:2016-11-02;修订日期:2017-02-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(61574128, 51377147, 51577173, 51277166), 浙江省自然科学基金项目(LY17F010004, LY16F010003, LY15E050009)

1 引言

为满足微功率电子产品以及远程传感监测系统的实时供电需求、避免废弃电池造成的环境污染,基于压电及电磁原理的能量回收技术已成为国内外的研究热点^[1-3]。现有微能量回收技术主要针对环境中的各种能量,如振动能^[4-6]、人体运动能^[7,8]、旋转动能^[9,10]、风能^[11-13]、波浪能^[14-17]等方面的收集与转化,部分研究成果已逐步获得推广应用^[9,18,19]。

每类能量回收技术的诞生都有其自身的工程应用背景。风、水流等流体能是环境中广泛存在的清洁能源,其回收利用是为解决环境监测系统自供电问题而提出的,现已逐步应用于环境检测、森林防火预警、汽车电子、隧道、桥梁、建筑健康安全检测等领域^[20]。最初的流体俘能器主要是电磁式的,即采用电磁式转动涡轮装置进行能量收集^[21],该类俘能器结构复杂、体积大(微小化难度大)、能量收集密度较低,不能满足传感监测系统集成化与微小化的应用需求。随着微型压电振动俘能技术的发展,流致振动的微型压电流体俘能器的研究受到更广泛关注。根据外流诱发结构自激振动的方式,现有微流体俘能器可归为3类:(1)涡激振动式^[22],根据“卡门涡街”原理,流体绕过钝体(圆柱等)后便在其两侧形成有规则的旋向相反的交替旋涡,迫使流体俘能器产生振动并发电;(2)驰振(Galloping)式^[23],通过尖角状结构(方柱、三角柱等)产生流动作用力使攻角改变,诱发动气不稳定性的低频振动,实现自激发电;(3)颤振(Flutter)式^[24],作用在结构(柔性膜、薄平板等)上的流体压力与结构的振动方向一致时,结构就会从流体中吸收能量产生自激力,从而带动俘能器产生大振幅的振动;相较于涡激振动式,驰振式结构振幅大且发散,但振动频率远小于脱涡频率;颤振式发生在流速较高的条件下,难以在低风速环境和水体环境下工作。

目前国内外利用流致振动现象发电的研究正进入一个崭新的阶段。学者们逐步开展了关于涡激振动式、颤振式和驰振式能量收集的研究工作,为进一步利用风能、海洋能、河流水动能、航空航

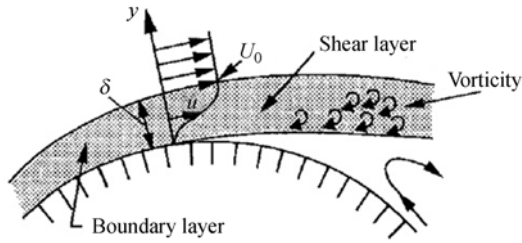
空中高速飞行器引起的气流能等发电提供了理论基础。相对而言,涡激振动式因其特定的属性和丰富的能量来源,有望被发展成为产业化的风能、海洋能、潮汐能等流体动能收集装置^[25,26]。其中涡激振动中的锁频效应可有效提高能量的收集效率,具有重要的研究价值。本文从涡激振动的原理出发,对涡激振动式微流体俘能器的研究现状和发展趋势进行了总结与分析,为该类俘能器的进一步研究与应用提供了参考。

2 涡激振动的原理

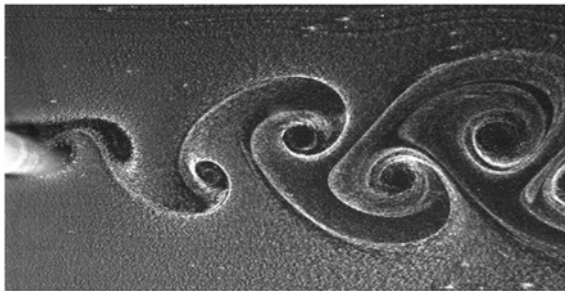
涡激振动是典型的流固耦合问题(Fluid-Structure Interaction, FSI),属气动弹性力学的研究范畴。关于涡激振动问题,1878年Strouhal就发现了琴弦的振动频率与琴弦和风速间的关系,1921年冯·卡门进行了比较系统的理论研究,随后国内外学者开展了大量的风/水洞试验、研究了空气/水中结构的涡激振动特性。但在航空航天和工程领域,涡激振动因具有较强的破坏性而被视为有害现象予以积极消除。然而,近年来国内外出现的利用涡激振动进行能量收集的理论和成果^[27,28,31],为其应用于能量回收的可行性提供了理论基础。

从机理上讲,涡激振动(Vortex-Induced Vibration: VIV)是由于流体在结构边界层分离过程中表面压力分布不均而形成的脉动水动力,当结构为柔性或被弹性支撑时将会发生振动;同时,结构的振动对流体脱离还会产生影响,即结构和流体间存在耦合现象。由于激励力与流体阻尼的平衡,涡激振动体现出了稳定的自激特性^[29]。在结构下游,通常会形成交替脱落的旋涡,即“卡门涡街”(Karman vortex street,如图1所示),其特点在于:稳定、非对称性、旋转方向相反且随主流向下游运动。

以往的研究表明,涡激振动具有很强的非线性特征^[30]:①钝体共振时,脱涡频率可锁定于结构固有频率的次谐波和超谐波分量;②随着振幅的增大,旋涡泻放强度增加,旋涡结构的改变将导致一个周期内出现更多的旋涡,旋涡的总环量随振幅的增大而增加;③钝体最大涡激振幅由系统



(a) 剪切层
(a) The shear layer



(b) 卡门涡街
(b) Karman vortex street

图 1 剪切层与卡门涡街

Fig. 1 The shear layer and Karman vortex street

所能支撑的旋涡结构所决定,而旋涡结构与振动自由度、频率比、阻尼比、质量比及雷诺数等密切相关。当脱涡频率 f_s 很接近结构振动频率 f_n 时,脱涡频率不再随流速增加而升高,而是与结构频率保持相等,结构所承受的横向升力显著增强(提高 2~3 倍,如图 2 所示^[22]),这种涡致振动现象被称为“锁频”(Lock-in)或“同步化”;当柱体振动去同步化后,脱涡频率重新按照脱涡主导频率

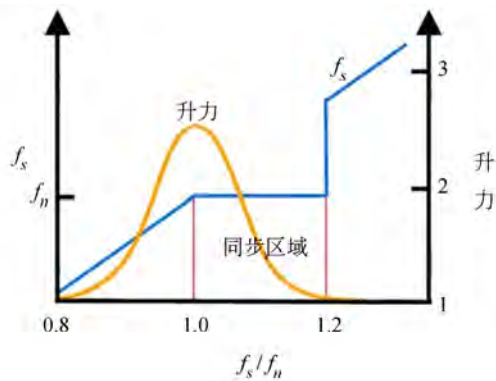


图 2 同步化现象

Fig. 2 The synchronization

公式变化。

随着微能量收集技术的发展以及应用领域的扩展,涡激振动流体俘能技术逐步受到国内外学者的重视,并形成新的研究领域。涡激振动过程中,涡街形成的反作用力可带动非流线型物体大幅度摆动,由此构造的俘能器可大大提高发电效率。目前基于涡激振动的流体俘能技术虽取得了一定的进展,但有关俘能器结构及其流固耦合振动发电机理的研究尚需进一步深入与完善。

3 涡激振动流体俘能技术研究现状

3.1 尾涡致动式流体俘能器

尾涡致动式流体俘能器(简称尾涡致动俘能器),其基本结构如图 3 所示,主要由固定的刚性钝体和压电振子构成。根据卡门涡街的原理,当流体雷诺数(由结构及流体参数确定)大于 60 时,流体流经钝体,产生了一系列旋向相反的交替旋涡尾流区域。这种非定常压力分布的流场迫使钝体后方压电振子产生弯曲振动,并通过压电效应将流体动能转换成电能。现有尾涡致动俘能器包括压电薄膜式尾涡致动俘能器(利用 PVDF 压电膜)和压电片式尾涡致动俘能器(利用 PZT 压电晶片)两种。

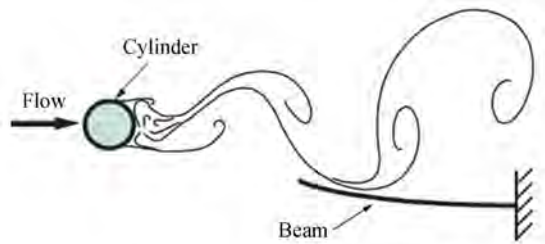


图 3 尾涡致动式流体俘能器原理

Fig. 3 Schematic of flow energy harvester with wake-induced vibration

3.1.1 压电薄膜式尾涡致动俘能器

早期研究者主要将压电薄膜式俘能器用于河流水动能和海洋能的收集。2001 年,Allen^[31]提出了一种表面带有 PVDF 表层的弹性薄膜鳗鱼“eel”型俘能器,将薄膜置于垂直水流方向的平板后方,其最佳耦合条件出现在共振条件下,此时薄膜在卡门涡街中的阻尼效应可忽略不计。同年,Taylor^[32]等将“eel”型俘能器应用于海洋能收集,将压电薄膜阵列置于钝体后方(如图 4 所示),有

效地提高了发电能力。上述研究表明,PVDF 薄膜的拍动频率接近涡脱频率时的能量收集性能会有所提升,流速 0.5m/s 条件下获得的输出电压达 3 V。

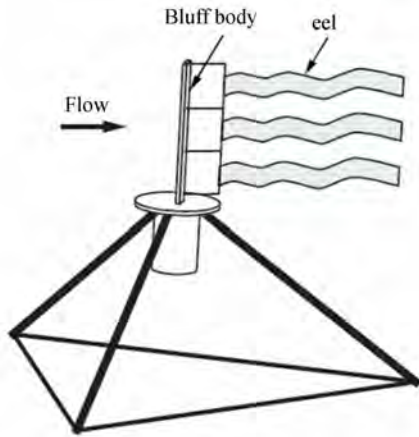


图 4 “eel”型俘能器
Fig. 4 eel energy harvester

随后研究者对用于风能收集的尾涡致动俘能器进行了研究。2006 年,美国明尼苏达大学 Robbins 等人^[33]将 PVDF 压电膜(203 mm×279 mm×0.5 mm)连接在钝体后(如图 5 所示),在 6.7m/s 的风速下的输出功率达 10 mW(50 V、250 kΩ),但器件体积较大、功率密度低。2010 年,美国纽约城市大学 Akaydin 等人^[34]将柔性 PVDF 压电膜(30 mm×16 mm×0.2 mm)安装在圆柱钝体后面的涡街内(自由端在前、固定端在后,如图 6 所示)并进行了试验测试。结果表明,该俘能器在高雷诺数下的俘能效果较好,风速为 6.8 m/s 时获得的最大输出功率达 4 μW。

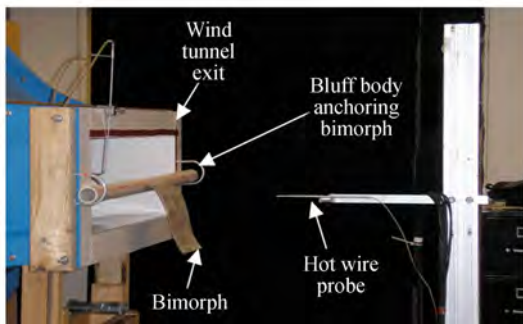


图 5 压电膜连接于钝体上
Fig. 5 PVDF fixed on the bluff body

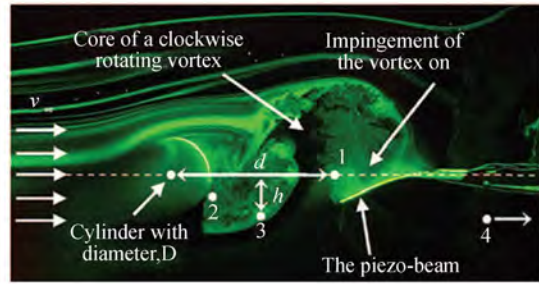


图 6 压电膜置于钝体后
Fig. 6 PVDF placed behind the bluff body

3.1.2 压电片式尾涡致动俘能器

因 PVDF 压电系数 d_{31} 小,故压电薄膜式尾涡致动俘能器的输出电压小且匹配的阻抗大(MΩ 数量级),从而导致后续电源管理电路复杂且功耗高;而 PZT 压电常数 d_{31} 大(比 PVDF 的高一个数量级),故输出电压高、阻抗小(仅几百或几十千欧),更适于构建高功率尾涡致动俘能器。

2009 年,德国慕尼黑科技大学 Pobering 等人将 14 mm×11.8 mm×0.35 mm 的 PZT 压电双晶片安装在矩形柱后面构造尾涡致动俘能器^[35],其结构原理如图 7 所示。在 45 m/s 风速下,该俘能器的输出电压和最大功率分别为 0.8 V 和 0.1 mW。2012 年,Weinstein 等人^[36]则将自由端带柔性叶片的 PZT 压电片置于圆柱后方的涡街内构造尾涡致动俘能器(结构原理如图 8 所示),它在 5 m/s 风速下的输出功率高达 3 mW,不足之处是体积较大。

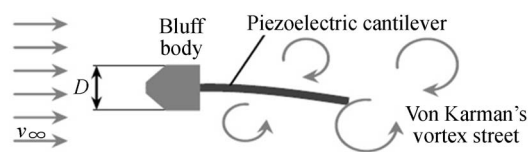


图 7 压电片连接于钝体上
Fig. 7 Piezo-cantilever fixed on the bluff body

上述俘能器中,钝体后面的压电片对流体具有分隔效应(压电振子实为分隔板),从而可以抑制钝体涡激振动和涡街的形成^[37,38];当分隔板的惯性和刚度足够小时,分隔板对涡激振动和涡街的形成抑制作用就会减弱,并随着钝体后旋涡的脱落一起运动^[31]。

2013 年,Hai-Dang Tam Nguyen 等人^[39]提出了一种如图 9 所示的微型气动俘能器,利用尾

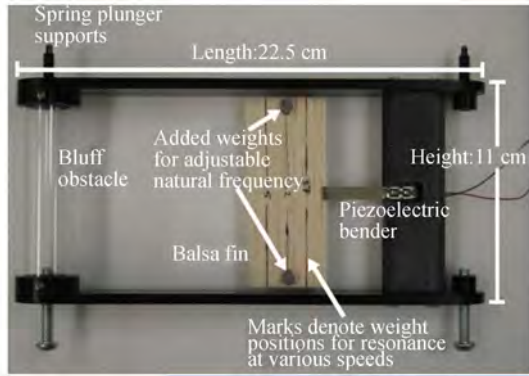


图 8 压电片置于钝体后

Fig. 8 Piezo-cantilever placed behind the bluff body

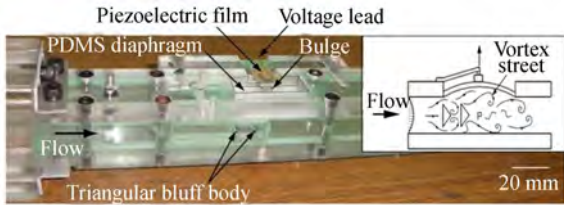


图 9 微型气动俘能器

Fig. 9 A photo of pneumatic energy generator

涡压力变化激励硅橡胶,再通过硅橡胶间接激励管道外侧压电片振动发电。风速为 20.7 m/s 时,试验测得管道内气体压力变化幅值和频率分别为 70 Pa 和 872 Hz,相应的输出功率为 0.59 nW。该方法虽能避免分隔板效应及其对涡街形成的抑制作用,但同时也降低了流动能的传递效率及压电片的发电能力。

3.2 钝体致振式流体俘能器

众所周知,钝体在一定流速的流体中会出现振动频率锁定效应(即较长时间的保持某一阶模态共振),此时钝体绕流与振动同步、振幅及振动强度均较大,但这种钝体的振动锁频效应却无法在尾涡致动俘能器中实现。因此,人们提出了直接由钝体振动激励的流体俘能器(钝体致振式流体俘能器)。最初的研究主要集中在理论模型和有限元仿真两方面,从理论上分析/探讨尾涡分离模式、结构非线性振动、流-机-电多场耦合以及俘能可行性等相关问题。目前,研究工作已逐步由单纯的理论分析转向试验测试(风洞和水池试验)^[40,41]、结构优化以及特定流体环境中的应用等方面。取得较多研究成果的钝体致振式流体俘能器主要是电磁式及压电式两类。

3.2.1 电磁式钝体致振俘能器

2008 年, Bernitsas 等人提出了一种由圆柱形钝体及动力传输系统构成的 VIVACE 俘能器,其原理及照片如图 10 所示^[42,43]。在一定速度范围内,流体横向绕过圆柱时会使其产生垂直于流向和圆柱轴向的往复振动(流致振动),再经齿轮-齿条机构带动电磁发电机发电。该俘能器通过被动控制装置 PTC 提高圆柱振幅及发电能力,但体积较大、适于大规模海流发电。

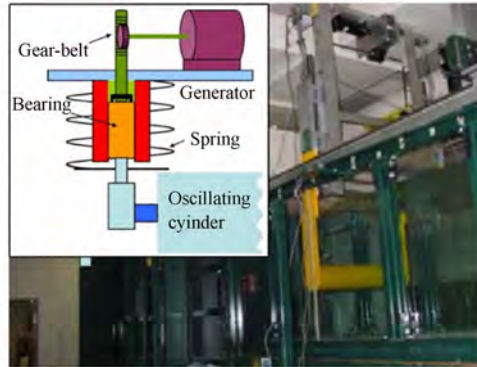


图 10 VIVACE 俘能器

Fig. 10 VIVACE energy harvester

2011 年, Lobo V 等人提出了一种管状直线电磁式流体俘能器^[44],其结构原理如图 11 所示。该俘能器中,流体绕过圆柱时将使圆柱产生左右方向的涡激振动,并通过支撑杆带动永磁铁作往复直线运动、使置于管壁上的线圈切割磁感线发电。该方案俘能器无需复杂的传动机构,结构简单、体积小,但所需激振力较大,适于较高流速的场合。

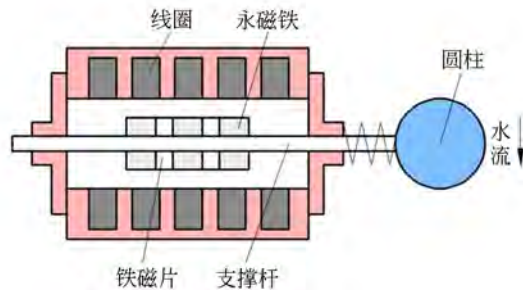


图 11 管状直线电磁式流体俘能器

Fig. 11 A tubular linear magnetic energy harvester

3.2.2 压电式钝体致振俘能器

与电磁式钝体致振俘能器相比,压电式钝体致振俘能器无需定动转子及传动机构,故结构简

单、易于微小化与集成化;此外,压电式钝体致振俘能器能量密度高且无电磁干扰,尤其适于无线传输系统的自供电需求。图 12 为典型的压电式钝体致振俘能器,其中悬臂型压电片的自由端装有圆柱形钝体,流向与圆柱轴线垂直的水平流绕过圆柱时使其产生上下往复振动,进而迫使压电片产生弯曲变形并发电。为适于不同的流体环境,人们已提出了多种形式的改进型压电式钝体致振俘能器。

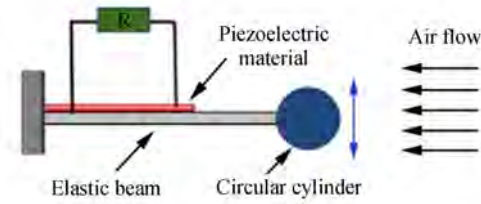


图 12 钝体致振俘能器原理

Fig. 12 Schematic of energy harvester with vibrational bluff body

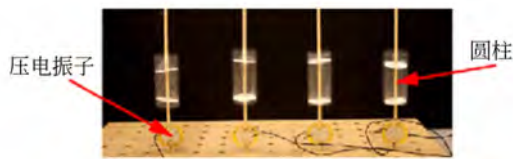


图 13 “Tree”状压电俘能器

Fig. 13 The tree-like piezoelectric energy harvester

2010 年,美国佐治亚理工学院的 Hobbs 研制了图 13 所示的“Tree”状压电俘能器^[45],即将圆柱体通过橡胶棒安装在压电振子的自由端,构成阵列式俘能器。圆柱体在风中发生涡激振动,并通过橡胶棒带动压电振子弯曲变形发电。该方案易于实现多模块同步工作,当风速为 1~3 m/s、频率比(涡激频率 f_s /固有频率 f_n)为 1.6、尺寸比(柱长 L /柱径 D)为 3.3 时,4 个压电模块同时工作的最大输出功率为 96 μ W。

2012 年,H D Akaydin 等人提出了一种图 14 所示的单圆柱式压电俘能器,着重研究了不同的圆柱和梁尺寸下分隔板的抑制作用和锁频效应^[46]。结果显示,当风速为 1.192 m/s 时风洞测试所得的振动频率和振幅分别为 3.14 Hz 和 ± 14 mm、最大输出功率为 0.1 mW。该类俘能器仅适用于低速层流,在高速流冲击时易因变形过大而发生疲劳损坏和压电片碎裂,稳定性、可靠性差。

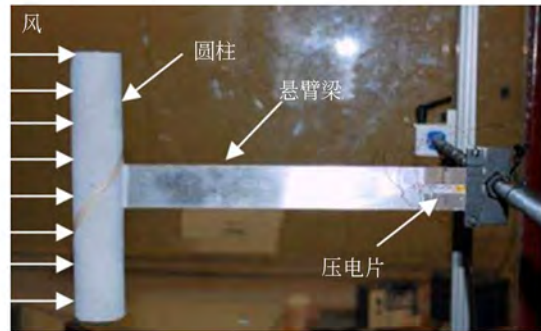


图 14 单圆柱式压电俘能器

Fig. 14 The cylinder piezoelectric energy harvester

2016 年,Dai H L 等人对图 15 所示的单圆柱压电俘能器在不同圆柱安装方式下的发电效果进行了实验研究^[47]。试验发现,圆柱轴向与压电振子长度方向平行且圆柱自由端向下(Case1)、向上(Case2)和水平(Case3)时,都在风速为 1.5 m/s 左右时出现振动同步现象;而圆柱与压电振子垂直安装(Case4)时则在风速为 3.5 m/s 时出现同步现象,且输出功率更大(0.17 mW)。作者认为,产生上述现象的原因是垂直安装时系统刚度及固有频率升高,故需更高的风速(涡激频率与之成正比)才能实现振动同步。

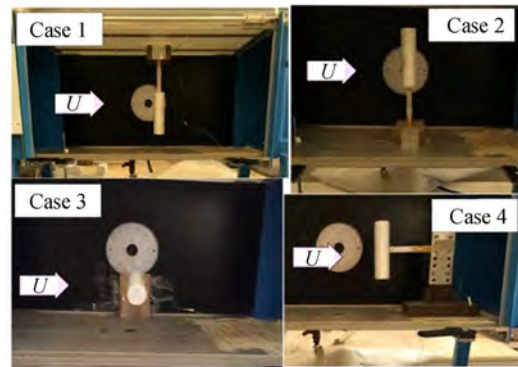


图 15 不同方向的圆柱式压电俘能器

Fig. 15 VIV-based energy harvester with different configurations

2015 年,宋汝君等人提出了图 16 所示的双圆柱式压电俘能器,它通过圆柱体产生的涡激振动和尾涡致动带动压电片发电^[48]。试验结果表明,上游圆柱体振动模式为 VIV(涡激振动),下游圆柱体的振动模式随着间隙直径比(L/D)的变化而呈 VIV 模式或 WIV(尾涡致动)模式,且下游压电片的输出功率随流速的增加而增加;此外,还可通过匹配负载电阻和圆柱体直径来提高压电

俘能器的输出性能,理想试验条件下的最大功率为 $21.86 \mu\text{W}$ 。同年,宋汝君等人还对图 17 所示的垂直式动圆柱俘能器(VIPEH)进行了研究^[49]。该俘能器的最佳负载为 $100 \sim 150 \text{ k}\Omega$,水流速度为 0.35 m/s 时的最大输出功率为 $84.49 \mu\text{W}$ (能量密度为 60.35 mW/m^2),该俘能器的缺点是需将压电振子与流体隔离、不便于深海环境中应用。

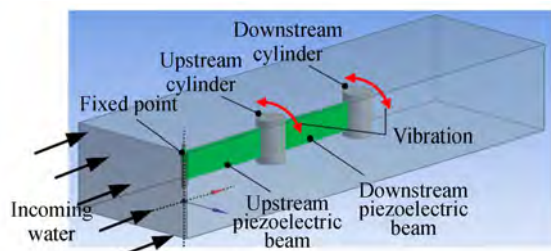


图 16 双圆柱式压电俘能器

Fig. 16 Bicylinder piezoelectric energy harvester

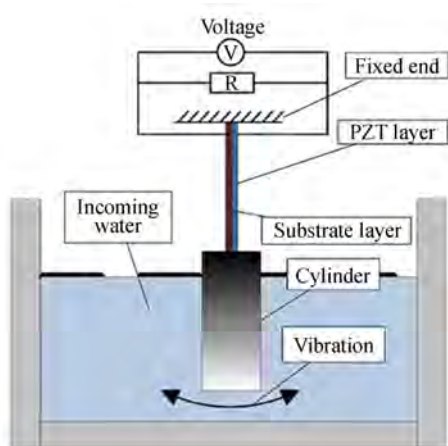


图 17 垂直式动圆柱俘能器

Fig. 17 The vortex-induced piezoelectric energy harvester

除前面介绍的尾涡致动式流体俘能器与钝体致振式流体俘能器外,法国学者 Grouthier C 等人^[50]还于 2014 年提出了采用悬挂缆线涡激振动的俘能方案,其优点是可在缆线上布置多个俘能器,为深海中较大功率系统供电提供了新方法。同年,JiaCheng Hu 等人提出了一种基于离子导电性高分子金属聚合物(IPMC)的涡环致动的环形 IPMC 俘能器,它在低速水流环境下具有较好的俘能效果^[51]。

上述结果表明,现有涡激振动俘能器虽可实现流体能量的有效回收,但从实际应用的角度讲,其有效流速范围、结构可靠性、稳定性及环境适应

能力等均有待进一步提升。因此,一些学者提出了基于圆柱群的流致振动俘能器^[52,53],即通过多个圆柱在空间上的尺寸组合和位置优化拓宽工作的雷诺数区间、实现大规模能量收集。研究结果表明,该类俘能器环境适应性较好,在流体流速较低时也具有较好的能量回收效果。但目前国内外的研究报道相对较少,对其机理的认识也不够深入,尚未形成系统的理论体系^[54]。

3.3 涡激振动压电俘能器的流固耦合模型

涡激振动压电流体俘能器是一个涉及流固耦合及机电耦合的复杂系统,通过一个完整的数学模型来描述其结构振动和发电特性难度很大。黏性流场中发生涡激振动时,其横向振动(与来流垂直方向)比流向振动剧烈,以往对刚体涡激振动的研究大都是针对横向振动的。1995 年,Wei 等使用 Fluent 软件进行了圆柱涡激振动的数值模拟、使用有限元方法研究了圆柱横向振动位移特性^[55]。1998 年,Jadic 等建立了流固耦合数学模型,使用动力学对方程进行迭代求解、通过 MATLAB 数值分析软件研究了基于流固耦合的弹性支撑机翼问题,发现了流固耦合问题的非线性机理^[56]。1999 年,Zhou 等采用离散涡法分析圆柱的涡激振动,将流场分布转化成离散的旋涡作用,使用迭代法计算流固耦合过程,揭示了雷诺数小于 200 的黏性流场中涡激振动的影响因素,证明了结构振动的幅值是由涡街升力与相位差共同决定的^[57]。2004 年,Williamson 等总结了单个圆柱涡激振动规律,探究了涡激振动的影响因素以及涡街脱落的动力学特性,并对涡街脱落模态进行了分析、得到了质量比与阻尼比对其的影响规律^[58]。

2008 年,Meiling Zhu 等人通过研究微型压电俘能器提出了将压电本构方程进行降维的理论与方法^[59]。2013 年,Akaydin^[60]等进行了从高雷诺数湍流边界层和旋涡尾迹中回收能量的研究工作,并设计了一种计算框架,可将结构和发电控制方程耦合进流场求解器,他们的计算结果与实验结果较一致。2015 年,浙江大学的王军雷等^[61]为提高涡激振动能量收集效率,研究了外载荷对三相耦合圆柱绕流涡激振动能量转换的影响。使用矩阵法研究了外载荷对涡激振动能量转换系统阻尼及固有频率的影响,并使用准稳态近似理论求得了机电耦合系统电压输出的准稳态解析式。

在此基础上,再应用 openFOAM 开源平台对 Navier-Stokes、二阶范德波尔方程和高斯定律进行了涡激振动耦合计算。

上述研究工作主要围绕涡激振动非线性机理、流固耦合模型算法优化等问题展开,但由于涡激振动俘能器工作环境复杂、随机因素众多,通过单一的数学模型难以有效解决存在的问题,因此,各类俘能器的流固耦合模型还需要进行深入系统地研究。利用涡激振动现象进行压电能量收集的研究工作具有较强的科研和实际应用价值^[26]。

4 结 论

目前涡激振动式微型流体俘能器的机电转换方式以压电式为主,对于单圆柱涡激振动俘能技术,研究者已基本掌握了其工作机理及特性,并取得

了一定成果。同其他国家相比,我国对微流体俘能技术的研究较晚,有关理论与试验尚处于起步阶段,在未来的几年里我们应该着重解决涡激振动式微流体俘能器的实用性方面的问题,主要包括:

(1)结构分析及参数优化设计:主要包括钝体及压电振子形状/尺寸因素分析与设计,多钝体连接与空间布置等;

(2)压电振子性能优化:设计高可靠性、流速适应性好、能量密度高、易于集成化的高品质压电振子;

(3)不同流体环境下的俘能结构设计:对于非均匀流(紊流)、高黏度流体(石油类)、管道流(均匀流、空间受限)等特殊流体环境,设计可有效工作的俘能结构。

参考文献:

- [1] SAADON S, SIDEK O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1):500-504.
- [2] KIM H S, KIM J H, KIM J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(6): 1129-1141.
- [3] 袁江波,谢涛,单小彪,等. 复合型悬臂梁压电振子振动模型及发电试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(9): 87-92.
YUAN J B, XIE T, SHAN X B, *et al.*. Vibrated model and experiments of multiple piezoelectric cantilevers in energy harvesting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9):87-92. (in Chinese)
- [4] RATHINAMALA S, MANOHARAN S. Vibration powered generators and power processing circuits for energy harvesting: A survey [J]. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, 3(5):9597-9564.
- [5] CUI Y, ZHANG Q, YAO M, *et al.*. Vibration piezoelectric energy harvester with multi-beam[J]. *Aip. Advances*, 2015, 5(4): 4495-4498.
- [6] PARK J C, KHYM S, PARK J Y. Micro-fabricated lead zirconate titanate bent cantilever energy harvester with multi-dimensional operation [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(4):731-775.
- [7] SUE C Y, TSAI N C. Human powered MEMS-based energy harvest devices [J]. *Applied Energy*, 2012, 93(SD):390-403.
- [8] PILLATSCH P, YEATMAN E M, HOLMES A S. Real world testing of a piezoelectric rotational energy harvester for human motion [C]. *13th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications(Powerments 2013)*, 2013.
- [9] 闫世伟,杨志刚,罗洪波,等. TPMS用压电发电装置研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(5): 774-777.
YAN SH W, YANG ZH G, LUO H B, *et al.*. Research on piezoelectric generator device for TPMS [J]. *Piezoelectrics&Acoustooptics*, 2010, 32(5): 774-777. (in Chinese)
- [10] HSU J C, TSENG C T, CHEN Y S. Analysis and experiment of self-frequency-tuning piezoelectric energy harvesters for rotational motion [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(7): 075013.
- [11] LUONG H T, GOO N S. Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small-scale windmill [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(2): 025017.
- [12] KARAMI M A, FARMER J R, INMAN D J. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact

- wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 977-987.
- [13] YANG Y, SHEN Q, JIN J, *et al.*. Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 053901.
- [14] 张永良, 林政. 海洋波浪压电发电装置的进展 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 145-148.
ZHANG Y L, LIN ZH. Advances in ocean wave energy converters using piezoelectric materials [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 145-148. (in Chinese)
- [15] XIAO Q, ZHU Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 46: 174-191.
- [16] MUTSUDA H, WATANABE R, HIRATA M, *et al.*. Elastic floating unit with piezoelectric device for harvesting ocean wave energy [C]. *ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, *American Society of Mechanical Engineers*, 2012: 233-240.
- [17] XIE X D, WANG Q, WU N. Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2014, 81: 41-48.
- [18] WEI X, LIU J. Power sources and electrical recharging strategies for implantable medical devices [J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2008, 2(1): 1-13.
- [19] FARINHOLT K, BROWN N, SIEGEL J, *et al.*. Energy harvesting to power embedded condition monitoring hardware [C]. *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, *International Society for Optics and Photonics*, 2015: 94330W-7.
- [20] 赵兴强. 基于颤振机理的微型压电风致振动能量收集器基础理论与关键技术 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
ZHAO X Q. *Basic theory and key technologies of micropiezoelectric wind-induced-vibration energy harvester based on flutter* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [21] WANG S J, YUAN P, LI D, *et al.*. An overview of ocean renewable energy in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 91-111.
- [22] 丁文镜. 自激振动 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- DING W J. *Self-Excited Oscillation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [23] ABDELKEFI A, YAN Z, HAJJ M R. Modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from transverse galloping [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 025016.
- [24] MICHELIN S, DOARE O. Energy harvesting efficiency of piezoelectric flags in axial flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 714: 489-504.
- [25] WANG C K, LU D C. Division of marine resources in coastal rural area of China. Beijing [J]. *State Oceanic Administration, Ministry of Resources and Electric Power*; 1989.
- [26] 王军雷. 基于流机电多物理场耦合下涡激振动能量收集模型及特性 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
WANG J L. *Modeling and characteristics of the vortex-induced vibration piezoelectric energy harvesting based on the aero-electro mechanical multi-physics field coupling* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [27] CHEN X R, YANG T Q, WANG W, *et al.*. Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(S1): S271-S274.
- [28] HOBBS W B, HU D L. Tree-inspired piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 28: 103-114.
- [29] TAHERZADEH D, PICIOREANU C, KUTTLER U, *et al.*. Computational study of the drag and oscillatory movement of biofilm streamers in fast flows [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, 105(3): 600-610.
- [30] RAGHAVAN K, BERNITSAS M M. Experimental investigation of reynolds number effect on vortex induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(5-6): 719-731.
- [31] ALLEN J J, SMITS A J. Energy harvesting eel. [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(3-4): 629-640.
- [32] TAYLOR G W, BURNS J R, KAMMANN S A, *et al.*. The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 539-

- 547.
- [33] ROBBINS W P, MARUSIC I, MORRIS D. Wind-generated electrical energy using flexible piezoelectric materials[C]. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, United States*, 2006: 1-9.
- [34] AKAYDIN HD, ELVINN, ANDREOPOULOS Y. Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(1): 291-304.
- [35] POBERING S, EBERMEYER S, SCHWESINGER N. Generation of electrical energy using short piezoelectric cantilevers in flowing media [C]. *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics*, 2009:728807-8.
- [36] WEINSTEIN L A, CACAN M R, SO P M, *et al.*. Vortex shedding induced energy harvesting from piezoelectric materials in heating, ventilation and air conditioning flows [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(4): 045003.
- [37] HWANG J Y, YANG K S, SUN S H. Reduction of flow-induced forces on a circular cylinder using a detached splitter plate [J]. *Physics of Fluids (1994-present)*, 2003, 15(8): 2433-2436.
- [38] DEHKORDI B G, JAFARI H H. On the suppression of vortex shedding from circular cylinders using detached short splitter-plates [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(4): 044501.
- [39] NGUYEN H D T, PHAM H T, WANG D A. A miniature pneumatic energy generator using Kármán vortex street [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 116: 40-48.
- [40] LI S, YUAN J P, LIPSON H. Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(2): 026104-3.
- [41] PEREZ M, BOISSEAU S, GASNIER P, *et al.*. An electret-based aeroelastic flutter energy harvester [J]. *Smart Materials & Structures*, 2015, 24(3):035004.
- [42] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K, BEN-SIMON Y, *et al.*. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, 130(4): 041101.
- [43] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K. Fluid motion energy converter,US:7493759[P]. 2009.
- [44] LOBO V, MAINSAH N, BANERJEE A, *et al.*. Design feasibility of a vortex induced vibration based hydro-kinetic energy harvesting system [C]. 2011 *IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)*, IEEE, 2011: 1-6.
- [45] HOBBS W B. Piezoelectric energy harvesting: vortex induced vibrations in plants, soap films, and arrays of cylinders [J]. *Georgia Institute of Technology*, 2010.
- [46] AKAYDIN H D, ELVIN N, ANDREOPOULOS Y. The performance of a self-excited fluidic energy harvester [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(2): 025007.
- [47] DAI H L, ABDELKEFI A, YANG Y, *et al.*. Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(5): 053902.
- [48] SONG R, SHAN X, LV F, *et al.*. A novel piezoelectric energy harvester using the macro fiber composite cantilever with a bicylinder in water [J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 1942-1954.
- [49] SONG R, SHAN X, LV F, *et al.*. A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: S768-S773.
- [50] GROUTHIER C, MICHELIN S, MODARRES-SADEGHI Y, *et al.*. Energy harvesting using vortex-induced vibrations of a hanging cable[C]. *ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers*, 2014: V004T04A015.
- [51] HU J C, CHA Y, PORFIRI M, *et al.*. Energy harvesting from a vortex ring impinging on an annular ionic polymer metal composite [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(7): 074014.
- [52] SABER K. Energy from slow-moving rivers and ocean currents could power the entire world[EB]. <http://www.altdotenergy.com/2008/12/energy-from-slow-moving-rivers-and-ocean-currents-could-power-the-entire-world/>, 2008-12-3.
- [53] 丁林. 被动湍流控制下多柱体流致振动研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.

- DING L. *Research on flow induced motion of multiple circular cylinders with passive turbulence control* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [54] 杨立红. 低雷诺数下串列多圆柱流致振动的数值模拟及其机理研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
YANG L H. *Numerical investigation on flow-induced vibrations of multiple circular cylinders in tandem arrangement at a low Reynolds number* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [55] WEI R, SEKINE A, SHIMURA M. Numerical analysis of 2d vortex-induced oscillations of a circular cylinder [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1995, 21(10): 993-1005.
- [56] JADIC I, SO R M C, MIGNOLET M P. Analysis of fluid-structure interactions using a time-marching technique [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1998, 12(6): 631-654.
- [57] ZHOU C Y, SO R M C, LAM K. Vortex-induced vibrations of an elastic circular cylinder [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 13(2): 165-189.
- [58] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 413-455.
- [59] ZHU M, LEIGHTON G. Dimensional reduction study of piezoelectric ceramics constitutive equations from 3-D to 2-D and 1-D [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(11): 2377-2383.
- [60] ABDELKEFI A, NUHAIT A O. Modeling and performance analysis of cambered wing-based piezoaero elastic energy harvesters [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9): 095029.
- [61] 王军雷, 冉景煜, 张智恩, 等. 外界载荷对圆柱涡激振动能量转换的影响 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(6): 1093-1100.
WANG J L, RAN J Y, ZHANG ZH E, et al.. Effects of external load on energy conversion of vortex-induced vibrating cylinder [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(6): 1093-1100. (in Chinese)

作者简介:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面的研究。E-mail: jutkjw @163.com

通讯作者:



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面的研究。E-mail: jutwsy @163.com