

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180027

练继建,燕翔,刘昉.流致振动能量利用的研究现状与展望[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):176-188. LIAN J J, YAN X, LIU F. Development and prospect of study on the energy harness of flow induced motion[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 176-188. (in Chinese)

流致振动能量利用的研究现状与展望

练继建,燕翔,刘

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:流致振动现象是典型的流固耦合现象,其在空气动力学、水动力学及海洋动力学中均有涉及。近年来,随着流致振动发电设备的不断涌现,学术界又掀起了新一轮的流致振动研究浪潮。目前,有关流致振动发电的研究内容纷繁多样,并未形成系统的研究体系,因此有必要对流致振动能量利用现状及存在的问题进行系统的整理与分析。首先,详细梳理了圆柱绕流及非圆柱绕流的流致振动研究现状,指明了流致振动能量汲取在海流及风能利用上的巨大潜力;随后,基于现有的研究成果介绍了近几十年来主要的流致振动发电设备的种类、工作原理及应用现状;然后,基于现有的流致振动发电理念全面阐述了流致振动能量转化的研究现状,并剖析了研究当中存在的各类问题;最后,对流致振动能量利用的研究方向提出了建议。

关键词:流致振动;涡激振动;驰振;能量利用

中图分类号:TV7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)01-0176-13

Development and prospect of study on the energy harness of flow induced motion

LIAN Jijian, YAN Xiang, LIU Fang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Flow-induced motion (FIM) is a typical fluid-structure interaction (FSI) phenomenon, and is involved in aerodynamics, hydrodynamics, and ocean dynamics. Recently, as lots of FIM power converters emerged, the study on FIM thrived again. Until now, there are lots of unsystematic directions in the research of FIM and its energy conversion. Thus, it is necessary to systematically analyze and discuss the situation and the problems in this research field. To this end, four parts are summarized and discussed in this study. First, the current situation of the study on the FIM for circular and non-circular cylinders is summarized. This paper points out that capturing the energy from FIM greatly benefits the utilization of current and wind energy. Then, it introduces the types, working principles, and applications of the main FIM power converters in recent decades. Furthermore, based on the theories of FIM, it introduces and analyzes the current situation of FIM energy conversion research, and discusses the problems in the research. At last, some suggestions are proposed on the future study of FIM energy conversion.

Key words: Flow induced motion; Vortex induced vibration; Galloping; Energy conversion

流致振动(Flow-induced Motion, FIM)是指流体流经固体时会对固体表面施加交替相间的流体力,使得固体发生往复运动,而固体的往复运动又改变流体流态,进而改变作用于固体表面的流体力,这种流体与固体相互作用的现象被称为流致振动^[1]。

流致振动现象广泛地存在于空气动力、水动力及海洋动力等相关的工程领域当中,其对工程结构物具有巨大的破坏作用,高耸建筑物^[2]、海洋结构物^[3]、大跨柔性结构物^[4]等结构物的疲劳破坏,多是由于流致振动的原因造成的。由于流致振动对工程的强

收稿日期:2017-07-06 修回日期:2017-11-07 网络出版时间:2017-12-27
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1821.048.html>
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401900)
Fund: National Key Research and Development Plan(2016YFC0401900)
作者简介:练继建(1965),男,福建建瓯人,教授,博士生导师,主要从事水利水电工程安全与优化应用方面研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn

大破坏力,使得其在工程领域中具有相当可观的研究价值。

在流致振动现象的研究初始阶段,学者们大多关心流致振动现象的预测方法与抑制手段,从而可有效保证结构物的安全稳定^[1-4]。近30年来,随着电子技术领域及海洋能源领域的飞速发展,人们发现流致振动当中所蕴含的能量可通过某些设备有效利用,且该类能量的利用前景十分良好。从此,各种流致振动能量转换设备不断涌现,且流致振动的研究方向也逐渐由抑制振动逐渐发展为加强振动。目前,流致振动获能的主要方式包括两种,压电式^[5]与电磁式^[6]。上述两种获能方式的获能原理与供电目标差异较大。压电式采用压电材料,一般可作为传感器、微电子设备及微型医疗设备的电能来源;而电磁式则基于切割磁感线这一基本原理,利用振子的运动实现流场的能量获取,能量的利用能力一般较高。

现阶段,流致振动发电的研究还并未形成完整的理论体系。为此,本文较为全面的整理了流致振动的研究现状,系统梳理了现有流致振动发电设备的主要种类、基本原理及应用情况,并提出了未来流致振动获能研究的主要内容。本文的目的在于为后续流致振动发电设备的研发及能量汲取的研究提供良好的参考。

1 流致振动的研究现状

流致振动中比较典型的且拥有能量利用先例的两种现象为涡激振动(Vortex Induced Vibration, VIV)与驰振(Galloping)。涡激振动的研究内容较为系统,但研究主要针对圆柱绕流;驰振则一般出现在非圆柱截面的钝体绕流中,其激发条件很可能是涡激振动。为了较为全面的分析流致振动的研究现状,本节将分别从圆柱绕流与非圆柱绕流两个方面进行梳理与总结。

1.1 圆柱绕流涡激振动

涡激振动是流致振动研究内容开展最为完善的研究方向。该现象是由于流体黏性作用使得其在绕流柱体后侧产生了交替脱落的漩涡,从而引起了柱体横向的往复运动^[1],比较经典的当属圆柱结构的涡激振动现象。涡激振动是一个双向耦合的复杂问题,其具有非线性、自激性、自限性等多个特点^[7]。当流速处于共振区间(锁定区间)范围内,振动频率基本与自振频率相当,振幅较大,可获取的振动能量较大;当流速处于锁定区间范围外时,振动失谐,振动频率基本等于斯特罗哈尔频率(固定圆柱的脱涡频率),振幅很小,可获取的振动能量很小。从15世

纪中期,达芬奇首次发现了涡激振动现象后,学者们纷纷投入到涡激振动的相关研究工作当中。

早期,由于受制于计算机技术的发展,涡激振动问题主要通过理论推导与试验验证的方法进行研究,试验的手段包括自由振动与强迫振动两种。1968年,Feng^[8]开创性的通过风洞试验方法掌握了弹性支撑的刚性圆柱的振幅、频率、升力系数及相位差等基本响应规律,并运用折合流速 $U^* = U/(f_n \cdot D)$ (U 为真实流速, f_n 为振动系统的自振频率, D 为圆柱截面直径)预测了涡激振动的非线性共振区间,即锁定区间(Lock-in 或 Synchronization Region)。根据Feng的研究结果,圆柱涡激振动的非线性共振区间,即锁定区间(Lock-in 或 Synchronization Region)。根据Feng的研究结果,圆柱涡激振动随流速的响应可分为两个分支:初始分支(Initial Branch)和下部分支(Lower Branch),最大振幅比为 $A^* = A/D = 0.56$,如图1所示。在锁定区间内,振动频率、自振频率及脱涡频率基本保持一致。随后20年中,更多研究者诸如Griffin与Ramberg^[9]、Bearman^[10]、Sarpkaya^[11]、More与Wu^[12]、Gopalkrishnan^[13]等人都进行了类似的试验。其中,Sarpkaya^[11]提出了预测振幅与频率响应的半经验公式,而Griffin^[9]则揭示了影响涡激振动响应的综合参数为质量阻尼比, $m^* \zeta$ 或者 $(m^* + C_a) \zeta$ (m^* 为质量比, ζ 为阻尼比, C_a 为附加质量系数),且绘制了的Griffin Skop曲线。

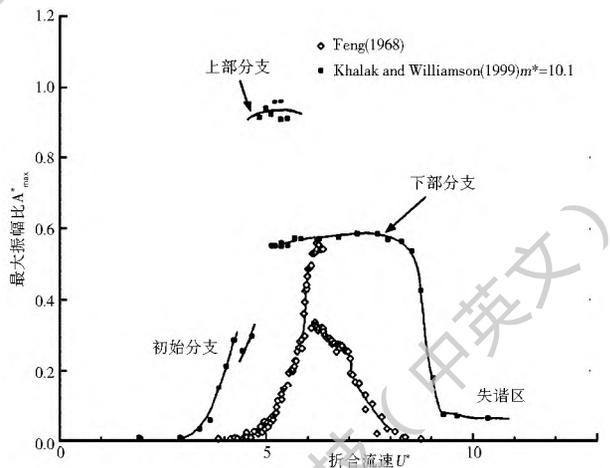


图1 Feng^[8]和Khalak等^[20]得出的振幅比变化规律
Fig. 1 The variations of amplitude ratios in Feng's^[8] and Khalak's^[20] studies

不过,随着海洋工程的不断发展,人们发现水中的涡激振动现象与风洞试验结论上存在一定差异。为此,20世纪90年代,Khalak与Williamson^[14-18]等学者通过大量的理论分析与试验验证揭示了上述差异的根本原因。其研究结论指出,若圆柱在水流中发生涡激振动现象,则由于其质量比偏低的原因(Feng^[8]试验在空气中进行,质量比 $m^* = 248$;而Khalak与Williamson在水中进行,质量比 $m^* =$

10 1), 所获得的涡激振动随流速的响应分支会从两个增加到了三个, 分别为: 初始分支 (Initial Branch)、上部分支 (Upper Branch) 和下部分支 (Lower Branch), 如图 1 所示。响应中, 最大振幅比达到了 $A^* = 0.9$, 且出现在上部分支。振动的锁定区间范围明显扩大。进一步, 在 Williamson^[16] 的研究当中发现, 质量阻尼比 $m^* \zeta$ 决定了圆柱涡激振动最大振幅, 但质量比 m^* 却决定了非线性共振区间的范围及频率的锁定能力。质量比 m^* 越大, 对应共振区间越大, 但锁频能力却越弱。

随着工业技术的进一步发展, 人们发现雷诺数的变化会显著影响涡激振动的响应特性。Khalak 和 Williamson^[16] 发现雷诺数在 $5 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^3$ 范围内系统的升力系数会显著提高。Williamson 和 Jauvtis^[19] 的研究则指出, 当系统的质量比 $m^* < 6$ 且雷诺数处于 $1 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^4$ 范围时, 最大的振幅比达到了 $A^* = 1.5$, 这远远超过了 $A^* = 0.9$ 的试验结果。为此, Williamson 与 Govardhan 等人^[20-21] 进行了大量的试验研究, 并详细梳理了以往的研究结果, 重新绘制了考虑雷诺数 Re 影响的修正后 Griffir-Skop 曲线, 并得到了相应的修正公式, 如图 2 所示。近几年, Raghavan 和 Bernitsas 等人^[22-25] 深入全面的开展了低质量、高阻尼、高雷诺数 ($8 \times 10^4 < Re < 1.32 \times 10^5$, 亚临界区与临界区, 即 TrSL2、TrSL3 和 TrBL 区间^[26]) 下的圆柱涡激振动与能量转化研究。值得注意的是, 其试验结果的最大振幅比达到了 $A/D = 1.9$, 这也是目前学术界通过试验得到的圆柱最大响应振幅比。可见, 对于涡激振动而言, 除了系统的质量、阻尼外, 雷诺数是一个不可忽略的参数。

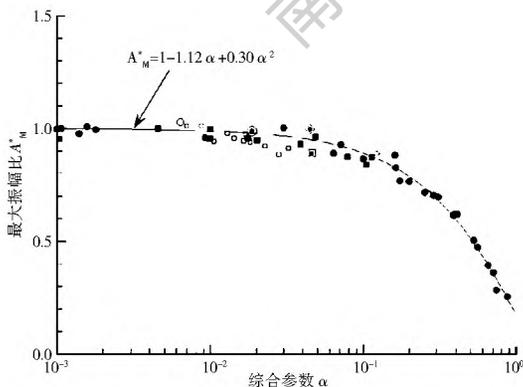


图 2 修正后的 Griffir Skop 曲线^[20-21]
Fig. 2 The modified Griffir Skop curve^[20-21]

除了振幅、频率、相位、升力外, 另一个重要的涡激振动研究内容即为尾流特征。而尾流也是解释振动现象的本源。20 世纪 90 年代以后, 随着粒子成像技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 的不断发

展, 涡激振动的尾流研究逐渐得以开展。1988 年, Williamson 与 Roshko^[27] 阐明了两种典型的漩涡脱落模式, 即 2S 模式 (Single pattern) 与 2P 模式 (Pair pattern)。所谓 2S 模式是指每半个圆柱涡激振动周期在其尾流区域仅会产生一个旋涡, 在每个圆柱涡激振动周期内会出现两个独立漩涡, 该模式一般出现在振动较小的情况下。2P 模式是指每半个涡激振动周期内会出现一对正负旋涡, 即方向相反的旋涡, 该模式稳定性小于 2S 模式, 一般出现在振动较大 (上部分支) 的情况下。此外, 圆柱振动过程中由于流态与振幅的差异还会出现 P+S 模式和 2P+2S, 当然这类模式一般都是 S 与 P 模式的组合, 且稳定性较低。在随后的研究中, Fleming 和 Williamson^[28] 指出在可旋转的圆柱涡激振动试验中会出现 2C 模式 (Coalescence pattern)。2C 模式是指在每一个振动周期内柱体上下两侧均有两个同向的旋涡脱落, 该模式出现的情况更为特殊, 需保证圆柱有旋转自由度。由此, 对上述尾流模式进行总结与梳理, 即可得到圆柱涡激振动尾流漩涡形态图谱, 如图 3 所示。目前, 随着高雷诺数涡激振动研究的开展, Williamson 和 Jauvtis^[19] 又发现了一种新的漩涡脱落模式, 2T 模式 (Triplet pattern)。2T 模式是指半个振动周期内会出现三个同侧脱落旋涡, 其中包含一个大漩涡与两个小漩涡, 该模式更为特殊, 对应的振幅比 A^* 很大, 超过了 $A^* = 1.5$ 。

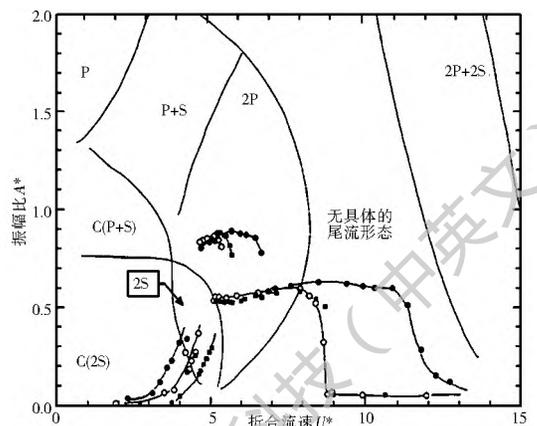


图 3 尾流形态、振幅比与折合流速的关系^[28]
Fig. 3 The variations of wake pattern and amplitude ratio versus reduced velocity^[28]

现阶段, 随着涡激振动研究的不断深入, 涡激振动的研究内容及相关的衍伸方向越来越多。总结起来, 可归纳为如下几个主要方面: (1) 针对海洋立管的长细柔性圆柱结构的涡激振动研究; (2) 刚性圆柱的多自由度涡激振动研究; (3) 考虑三维效应的涡激振动研究; (4) 双圆柱、多圆柱串并列的涡激振动及尾流驰振研究等。另一方面, 随着计算机技术的不断

断发展,采用数值手段进行涡激振动研究的内容也在不断深入,目前主要的几种数值方法包括:离散涡法(Discrete Vortex Method, DVM)、雷诺平均法(Reynolds Average Numerical Simulation, RANS)、大涡模拟方法(Large Eddy Simulation, LES)和直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)等。至此,对于圆柱绕流的涡激振动已经形成较为完整的研究体系。

1.2 非圆柱体的流致振动

学术界对流致振动的研究并非仅局限于圆形截面振子,其他形状振子的研究也在不断开展,其中以四棱柱的研究内容最为丰富,三棱柱、椭圆柱及其他棱柱的研究次之。不同于圆柱体的流致振动响应,非圆形截面柱体(尤其是具有尖角的截面柱体)的流致振动相当复杂,很可能发生两种不同的振动模式,即涡激振动与驰振。对于涡激振动,其与圆柱类似但也存在一定差异;而对于驰振,不论从振动机理还是振动响应上,其与圆柱涡激振动都截然不同。对于绕流钝体而言,若升力抑制结构振动,则结构是稳定的;反之,则结构是失稳的^[1]。而当来流速度达到某一临界值时,升力将克服结构的阻尼作用而发生高幅、低频振动,此时的振动即为驰振^[29]。相对涡激振动而言,驰振不存在锁定区间(或锁定区间无穷大),随着流速的不断增大,驰振强度不断攀升,振动能量也不断增强。

工程实际中,非圆形截面柱体几乎不可能仅发生涡激振动或驰振。两种振动模式之间可能耦合存在,也可能独立出现,涡激振动很可能成为驰振的主要诱因。因此,判别驰振的发生条件及涡激振动与驰振的转变成为了非圆形截面柱体的流致振动研究的关键内容。1956年,Den Hartog^[30]首次提出了驰振稳定性的判断准则,即

$$H(\alpha_c) = \left[\frac{dC_y(\alpha)}{d\alpha} + C_d(\alpha_c) \right]_{\alpha_c = \alpha_a} < 0 \quad (1)$$

式中: C_y 为升力系数, C_d 为阻力系数, α_c 为入射角, α_a 为攻角。所谓攻角,实际为柱体在振动过程中截面与来流和速度之间的夹角(和速度为来流速度与相对运动速度之和)。那么根据式(1)可知, $H(\alpha_c)$ 与升力系数 C_y 对攻角 α_a 斜率的正负值相关,当斜率为负值时,潜在的驰振失稳可能发生。值得注意的是,驰振的发生在某种程度上取决于流体边界层的分离情况:当流体边界层未发生分离时,升力随攻角增大而增大,斜率为正,驰振失稳不会发生;但当流体边界层发生分离时,升力随攻角增大而减小,斜率为负,从而使得驰振易于出现。由此可见,驰振一般出现在

流速较大、雷诺数较高及湍流度较大的环境条件。

自Den Hartog之后,一系列针对四棱柱的驰振研究内容逐渐开展。1961年,Parkinson^[31]提出了一套准静态的理论方法来预测四棱柱的驰振响应。随后,Parkinson^[32]与Bearman^[33]等人又将该理论方法运用在后续模型试验与长细结构的流致振动研究当中。Ziller^[34]等人提出了一种新的方法用于预测驰振不稳定发生的初始流速。Lee等人^[35]则运用 $k\varepsilon$ 模型预测了正四棱柱的驰振不稳定性。Barrero^[36]在低质量比矩形截面柱体的流致振动试验中观察到了涡激振动与驰振共存的现象,Manzoor^[37]指明质量会影响四棱柱从涡激振动向驰振的转变方式。Nemes和Zhao等人^[38-39]进行了类似Williamson圆柱试验的正四棱柱试验研究。结果表明:来流角度为 0° 时,正四棱柱表现为驰振,来流角度为 45° (Diamond形态)时,正四棱柱表现为涡激振动;来流角度在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 时,正四棱柱振动出现高于上部分支的更高分支(High Branch)。

相对四棱柱而言,针对三棱柱的涡激振动与驰振的响应及转变的研究内容并不丰富。Alonso等人^[40-42]进行了大量的三棱柱流致振动风洞试验,用于确定三棱柱驰振的失稳问题。研究中,Alonso依据Den Hartog的判定条件,确定了三棱柱的驰振失稳关系图,如图4所示。图中, β 为三角形截面的顶角, θ 则为流体入射角。结果表明:当 $\theta = 180^\circ$ 时,来流方向将垂直于三棱柱截面的底面,此时, $H(\alpha_c) < 0$,会发生驰振失稳现象。此外,近期Iungo与Bursti^[43]也运用风洞试验讨论了三棱柱的驰振失稳条件,其重点在于解释不同来流角度与不同高宽比(高宽比的变化也就影响了截面顶角的变化)对三棱柱振动的影响。

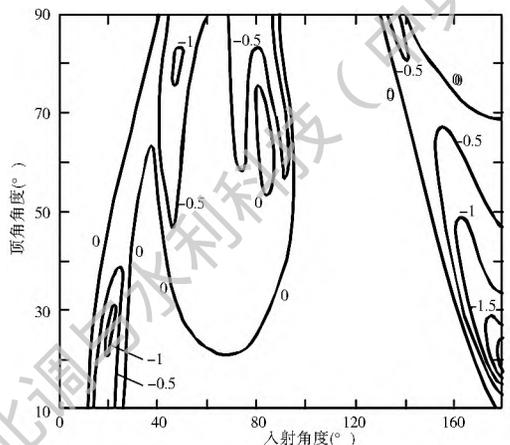


图4 三棱柱的流体入射顶角与柱体稳定性关系图^[40-42]

Fig. 4 The relationships of the incident angle and the section angle with the stability of the triangular prism^[40-42]

近年来,随着计算机技术的日新月异,针对三

棱柱的流致振动研究更多的采用数值模拟的方法进行。徐枫等人^[44]采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的方法模拟了低雷诺数下($Re = 200$)正三棱柱的二维流致振动响应特征,确定了涡激振动与驰振之间的临界转化点。重庆大学的丁林^[45]、王军雷^[46]及李恒^[6]等人基于能量利用的理念,运用非定常的雷诺平均 N-S 方程模拟了较高雷诺数下三棱柱流致振动响应规律。其中,丁林^[45]确定了三棱柱从涡激振动向驰振转变的雷诺数,并对比其他棱柱的响应规律,指明了三棱柱在流致振动能量提取中的优越性;李恒^[6]则进一步阐明了三棱柱的振幅、频率及尾流特征;而王军雷^[46]则在其基础上进一步确定了三棱柱顶角对流致振动响应的影响。

对于非圆形截面柱体,由于振动存在涡激振动与驰振两种模式,且其转化过程复杂多变,故尾流模式相较于圆柱体也是复杂多变的。目前,一些学者通过了试验与数值的方法对非圆形截面柱体进行了不同程度的探讨。Tu 等人^[47]的研究指出,在锁定区间内,尾流模式会随着来流角度的变化而发生变化,当来流角度为 0° 时,尾流主要表现为 2S 和 P+S 模式,而当来流角度为 60° 时,尾流主要表现为 2S 模式。丁林^[45]的研究则指出:当正三棱柱(来流角度为 0° ,截面底边与来流方向垂直)振动处于涡激振动初始分支时,尾流呈 2P 模式;当柱体振动位于涡激振动上端分支时,尾流呈 2P+4S 模式;当柱体进入驰振以后,尾流呈 2T+2P 模式(单周期内的脱涡数量多达 10 个)。王军雷^[46]的研究指出:三棱柱在顶角较小时,漩涡尺度较长,且容易出现“切割”现象,主要呈现为 2S 模式;当顶角增大,“切割”现象逐渐消除,漩涡尺度变短,但上下漩涡间距变大,尾流模式逐渐出现 2P、P+S、2C 模式等。可见,不同

的截面形式、不同的振动分支其对应的尾流模式差异显著。因此,对于尾流的研究,应针对不同的情况独立分析。

1.3 流致振动的能量利用潜能

由于流致振动对结构物的强大破坏力,使得学者们的研究大多关注振动的预测、控制与抑制。不过,随着绿色可再生能源的不断发展,工程界逐渐意识到流致振动也可作为一种优质的能量来源。而这一振动发电的理念逐步在海流与风能发电中得以应用。

全球海流能蕴藏量巨大,根据 2010 年的统计,全世界可开发的海流能量超过了 5×10^6 MW^[48]。而在我国,有近 5000 多公里的海岸线拥有较为丰富的海流能储量,理论可开采量达到了 1.4×10^5 MW^[49]。可见,海流能逐渐成为未来绿色可再生能源开发的重要趋势之一。目前,海流发电的装置多样,主流的为桨叶式电机(Turbine)。该类设备依靠流体带动桨叶旋转进而带动电机发电,主要的形式包括水平轴与垂直轴^[50]两种类型。所谓水平轴是指发电机旋转轴线方向与来流方向平行,典型的设备例如 Marine Current Turbine(MCT)、Verdant Power 及 Lunar power 等^[51],如图 5 所示。上述设备的各项参数如表 1 所示。MCT 与 Verdant Power 为独立的旋桨发电设备,桨叶数量 2~3 个,Lunar power 的设计中则引入了来流流道,其使得水流即便在与桨叶轴线成 40° 条件下也可有效发电。垂直轴则是指发电机旋转的轴线方向与来流方向垂直。垂直轴式的海流发电机的应用相对较少,比较有名的当属意大利阿基米德桥公司研制的 ENERMAR 系统,其核心为 Kobold 涡轮机^[52],该装置经过在意大利墨西拿海峡测试后,于 2005 年并入当地电网。

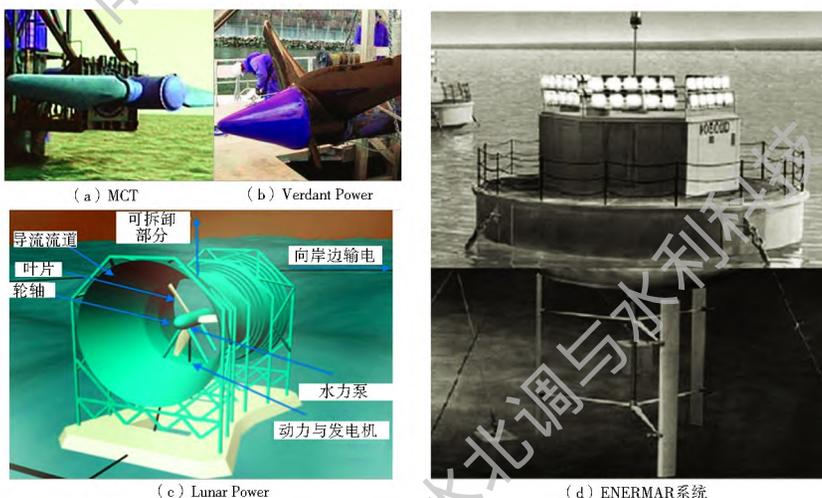


图 5 桨叶式海流发电设备^[51-52]

Fig. 5 Paddle current turbines^[51-52]

由于桨叶式海流发电机的设计具有丰富的理论

基础,使得该类设备最早也最广泛的应用于海流能

量的开发。不过,由于海流流速的限制(多数地区的流速小于 1 m/s,小于桨叶式海流发电机的启动流速),使得该类设备在海流发电中的实际运用性能并不突出。因此,海流发电领域急需推出一款新型的可利用低速海流能量的高效海流发电设备。

表 1 典型的水平轴式海流发电机参数^[51]

Tab. 1 The parameters of typical horizontal axis current converters^[51]

发电机名称	桨叶直径/m	长度/m	宽度/m	最小水深/m	单机体积/m ³
MCT	18	4	46	38	6 992
Verdant Power	5	4	5	15	300
Lunar power	21	27	16	42	23 814

20 世纪末,学者们已经开始试图将流致振动这一概念引入到海流发电当中了,较经典的设备当属“摆旗式”(或“鳗鱼式”)压电发电装置(eel)^[53]。虽然 eel 的理念使得海流发电设备启动流速得以有效降低,但 eel 的发电能力并不可观,未能达到大规模开发的程度。而 2009 年,密歇根大学的 Bernitsas 和 Raghavan 所提出的涡激振动低速海流发电装置(Vortex Induced Vibration for Aquatic Clean Energy, VIVACE)^[22,51,54]理念可谓是充分解决的上述问题。首先,VIVACE 的正常发电流速一般都低于 1 m/s,且其启动流速最低可降低至 0.2 m/s,这极大增强了海流能源的利用范围。其次,利用圆柱共振的运动直接带动电机进行发电,有效的增强了设备的能量利用能力,能量密度(单位体积内流体的能量转化大小)得以显著提高。经过评估,第一代 VIVACE 原型机的能量密度达到 0.0691 kW/m³,为 Verdant Power 设备的 16 倍以上,见图 6。

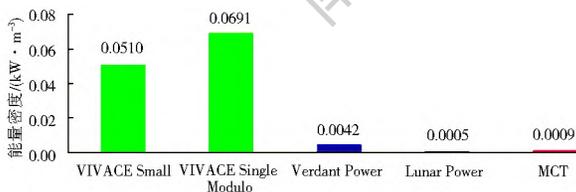


图 6 VIVACE 装置与其他海流装置的能量密度^[51]

Fig. 6 The power densities of VIVACE and other current converters^[51]

相比于海流,风能的开发更为深入。我国拥有丰富的风能资源,据估算总储量约 32 26 亿 kW,其中陆地可开发利用风能资源储量约 2.5 亿 kW(离地 10 m 高度资料计算),海上可开发利用风能储量约 7.5 亿 kW,合计约 10 亿 kW,风能开发的前景十分广阔^[55]。与海流发电类似,目前的风力发电设备主要依靠旋桨式风机结构,即由风动能带动桨叶旋

转进而发电。与海流发电机类似,目前主要的风机类型包括水平轴式与垂直轴式,见图 7,相对来说水平式的风力发电机更广泛的应用于大型风电场的建设当中。



图 7 桨叶式风力发电机

Fig. 7 Paddle wind turbines

不过,现有的风机结构形式存在两个弊端:(1)由于叶片旋转半径较大,在工作过程中对鸟类生存环境的影响较为显著;(2)为了保证各风机的风场条件,风机之间的间距较大,从而影响了整个风场的发电能力。可见,有必要提出一些新的发电装置用以解决上述问题。

2015 年,一家名为 Vortex Bladeless 西班牙公司基于流致振动的基本原理成功推出了一款“无叶片”风力发电机^[56],命名为 Vortex。相对于传统的叶片风力发电机,Vortex 具有如下几个显著的优势:(1)成本低,Vortex 的总成本比传统风机降低近 40%;(2)振荡半径小,降低鸟类生物的危害;(3)获能效率高,能获取到空气中 40% 的风能;(4)占地面积小,相同的占地面积 Vortex 的布置数量可达到传统风机的 2~3 倍。

由此可见,流致振动发电理念不论在海流能利用方面还是风能利用方面都表现出了良好的潜能,具有良好的开发前景,值得深入研究。

2 流致振动发电设备

自 20 世纪 90 年代,流致振动发电设备逐渐开始研制与开发,至今已取得了一定的研究成果。按照电能的汲取方式划分,流致振动发电装置可分为压电式与电磁式两种类型。本节将从这两个类型出发,着重介绍典型的流致振动发电装置的原理、构件及应用情况。

2.1 压电式

压电俘能技术的研究开展相对较早,其大多是利用压电材料在阻流过程中产生变形导致的电压变化来汲取能量的。比较典型的流致振动压电俘能结构包括悬臂梁式^[57]、eel 式(鳗鱼式或摆旗式)^[53,58]、树式^[59-61]等,如图 8 所示。

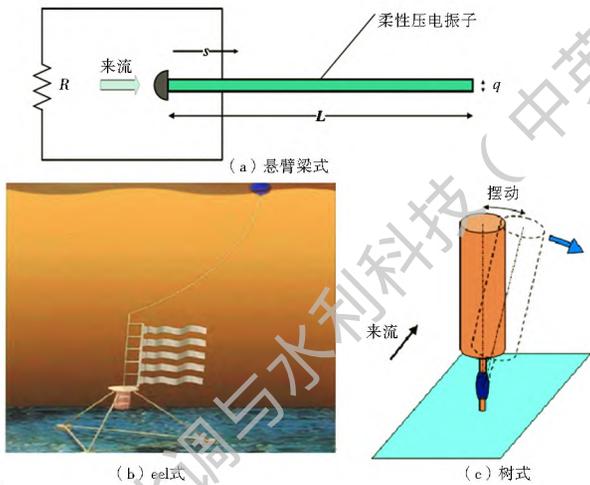


图 8 典型的流致振动压电俘能装置^[53, 57-61]

Fig. 8 Typical FIM piezoelectric energy harvesters^[53, 57-61]

悬臂梁式原理: 流体绕过钝体时产生的卡门涡街会以脉冲形式作用于压电梁材料, 从而使得梁结构发生高频往复变形, 最终实现发电。该类装置因其简单的结构, 被成功的运用在各类微型、小型传感器及其他电子设备^[61-62]的供电系统上, 取得一定的经济效益。不过该类设备电能输出量很低, 一般仅在 μW 或 mW 级别^[6]。

eel 式原理: 流体绕过钝体时产生的卡门涡街会带动后侧的柔性压电材料发生扭动或摆动, 进而实现发电。由于该类设备压电材料类似于鳗鱼的游动与旗帜的飘动, 故学术界将其命名为“鳗鱼式”或“摆旗式”。该类设备最初使用于水中能量的获取^[53, 58], 后续逐渐加以改进, 并逐渐运用于空气中的能量获取^[63], 其具有较高的能量密度。

树式原理: 流体使得顶部(或侧边)的钝体结构发生流致振动, 致使其所连接的压电材料随之变形, 进而改变压电材料的性态而最终实现发电。该类设备的结构形式多样, 改进装置也是层出不穷^[59, 60, 64]。不同于悬臂梁式与 eel 式, 树式结构振子的振动并非脱落漩涡带动而是漩涡的脱落作用带动, 其共振过程中所汲取的能量相对较高, 能量的利用能力较高。

当然, 不论是何种压电俘能装置, 也不论是利用水中能量还是利用空气能量, 其设备的核心都在于压电材料本身。因此, 材料技术的改善与突破才是提高该类设备运用前景的关键所在。

2.2 电磁式

相对于压电俘能技术, 采用电磁俘能技术获取流致振动能量的设备要少得多。所谓电磁俘能, 即为水流带动振子发生振动, 而振子振动带动转子切割磁力, 进而产生感应电动势, 最终实现发电。该类设备一般设有电磁发电机(旋转、直线等), 而振子的

振动也会通过某些传动装置进行转化, 进而满足切割磁力线的要求。

2009 年, 密歇根大学 Bernitsas 教授及其研发团队所开发提出的 VIVACE^[22, 54] 可谓是电磁式流致振动能量转化研究的突破点与里程碑。VIVACE 具有良好的能量汲取潜能, 并满足加利福尼亚能源委员会(CEC)和美国能源部(DOE)^[22, 54]对海洋能源利用装置提出的 8 个基本要求, 分别为: (1) 高能量密度; (2) 不影响通航; (3) 不减少珍贵的岸线资源; (4) 对海洋生物和海洋环境友好; (5) 维护费用低; (6) 耐用; (7) 满足生命周期成本目标; (8) 至少 10~20 年的寿命。VIVACE 的原理图及装置示意图如图 9 所示, 其主要由三部分组成: (1) 振动圆柱, 用于将海流能量转化为振动机械能; (2) 传动结构, 包括弹簧、滑轨、立柱、支撑等结构部分, 用于保证振子在垂直水流方向的持续振动与运动传递; (3) 发电机, 将传动结构传递的机械能部分转化为电能。VIVACE 的振动原理与压电式中树式结构的发电原理类似, 都是由漩涡的脱落作用带动圆柱体发生横向振动, 从而带动传动齿条上下运动, 并迫使发电机转子旋转进行切割磁力线的运动, 从而产生感应电动势最终发电。需要说明的是, 该类设备受到的水流升力远大于压电设备振子受到的流体力, 其对阻尼的克服强度远大于压电设备, 因此更有利于获取水流中更多的能量, 也更利于大规模进行开发。目前, VIVACE 设备已成功申请专利^[65], 其配套的增加能量汲取能力的圆柱被动湍流装置(Passive Turbulence Control, PTC)也已成功申请专利^[66]并进行了相应的研究工作。可见, 利用类似 VIVACE 的发电设备进行海流能量的汲取与利用具有相当可观的实际运用前景。

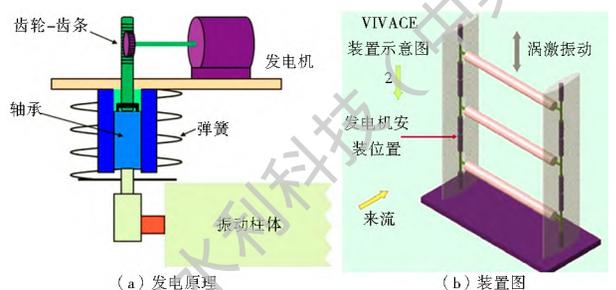


图 9 VIVACE 原理与装置图^[22, 54]

Fig. 9 The schematic and setup diagrams of VIVACE^[22, 54]

2012 年, 台湾中兴大学的 Wang 等人^[67]设计了一种利用永磁体振动发电的装置, 如图 10 所示。该设备的获能原理与压电悬臂梁设备的类似, 是由绕流钝体后侧产生的交替脱落漩涡迫使顶梁结构发生形变, 推动永磁体切割磁力线进行发电。不过, 由于

该设备仅利用了一侧的脱落漩涡,使得能量的转化效率很低,其瞬时输出功率仅达到 1.77 μW。

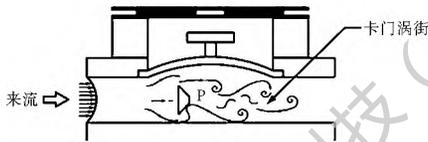


图 10 Wang 提出的流致振动发电装置

Fig. 10 The FIM energy converter proposed by Wang

当然,1.3 节所提及的无叶片风力发电机(Vortex)^[56]也是一款电磁式的流致振动发电装置,见图 11。该发电设备同样借鉴了树形压电俘能装置的理念研制而成,但底部的压电材料改成了电磁发电机。其通过上部“风柱”的摆动带动底部切割磁感线进而发电。其摆动的“风柱”为质量很轻的加长的圆锥体,材料为玻璃纤维与碳纤维复合材料,柱子底部有两圈相斥的磁铁用于切割磁感线发电。Vortex 的设计内部不存在齿轮、螺栓或是其他机械的运动部件,从而极大的降低了成本,也有效的提升了系统的发电效率。

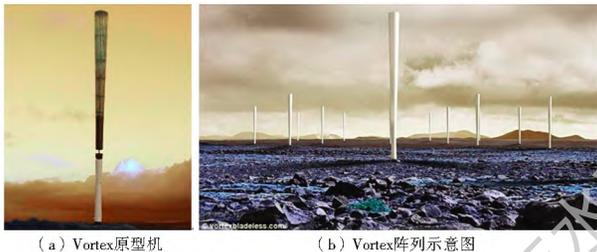


图 11 “无叶片”风力发电机^[56]

Fig. 11 Vortex Bladeless^[56]

当然,Vortex 的研究目前还处于理念阶段,其发电的利弊也存在诸多争议。Vortex 的振动频率不超过 20 Hz,此属次声范围,从而很可能造成潜在的次声灾害。Vortex 目前仅停留在试验样机的研究阶段,其若进行商业开发,尺度放大后的振动特性与能量汲取能力是否能达到原型机的效果,这点有待进一步评估。

除了上述典型的设备外,近年来,我国也有不少学者相继提出了不同类型的流致振动获能装置。马良等人^[68]则提出了一种摆臂式的涡激与升力混合发电设备。丁林等人^[69]基于压电材料的原理提出了一种利用并列双圆柱流致振动收集电能的装置。及春宁等人^[70]则利用柔性弹力材料开发了一种基于可变形支座的流致振动发电装置。燕翔等人^[71-72]则提出了可利用圆柱尾流驰振效应的同振式与对振式涡激振动发电装置。相比而言,电磁俘能方式可获得的能量更大,能量密度更优,且具有显著的可扩展性与灵活性,产业化前景更为广阔。当然,上述设

备当中大部分仍处于研究初始阶段,甚至一些设备仍处于基本概念阶段。关于设备的能量汲取能力及适应环境的能力需要进一步探索。

3 流致振动的能量转化的研究现状

由于流致振动现象的复杂性与未知性,导致针对流致振动能量汲取的研究存在较大的挑战性。相对而言,因压电俘能技术的开展相对较早,其相关的研究进展超前于电磁式的流致振动获能研究。目前,对压电式流致振动能量转化较为全面的研究当属 Muhanmood^[73]、Dai 等人^[74-75]的研究。他们通过理论分析、数值计算及试验验证等方法对流致振动压电俘能机理进行了深入剖析,并将负荷电阻引入了发电系统进行了讨论,得到了压电式流致振动能量的变化规律。

当然,大多数压电式流致振动发电设备都是获取空气中的风能,捕获能量的能力很弱,不适合大规模开发。相比而言,由于电磁式的流致振动获能设备具备更强的获能能力与能量密度,更有利于大规模的电能开发。不过现阶段,电磁式的流致振动获能研究仍处于起步阶段,研究内容十分缺乏。Bernitsas 团队基于其开发的 VIVACE,探讨了圆柱体涡激振动发电的功率与效率,指明了功率与效率取决于振子振幅与频率的乘积^[22,54],如下式所示:

$$P = 8\pi^3 (m_c + m_a) \zeta (A f_{osc})^2 f_n \quad (2)$$

式中: P 为发电功率; m_{osc} 为振子振动质量; m_a 为附加质量; ζ 为阻尼比; A 为振动振幅; f_{osc} 为振动频率; f_n 为系统的自振频率。近期,练继建等人^[76]通过试验的方法验证了上述等式的准确性,进一步指明了式(2)通用于任意截面的柱体(包括非圆柱)。而该结果也进一步说明:对于流致振动发电设备,振子振幅越大频率越高越有利于系统的能量利用。

由于圆柱涡激振动的响应(振幅、频率等)取决于系统的各项参数,为了寻求增强振动的方法,Bernitsas 团队进行了如下几个方面的工作:(1)增大圆柱截面,考察高雷诺数下的振动强度与功率效率^[24,25];(2)开发了弹簧-阻尼-质量模拟器(Virtual damping and stiffness system, VCK)^[77-78],分析阻尼、刚度及质量对振动强度的影响;(3)开发 PTC 装置^[23,66,79],改变圆柱截面属性,增强泻涡能力,提高振动强度与发电功率。归纳上述三个方面的研究内容,可总结得到如下研究结果:(1)增大雷诺数,使得圆柱处于 TrSL3 和 TrBL 区间,升力得以显著提升,从而加大了振动的强度,试验所得的最大振幅达到振幅比 $A^* = 1.9$,如图 12 所示;(2)随着阻尼的

增大, 振幅是不断缩小的, 但功率与效率呈现出先增大再减小的基本规律(图 13), 说明存在一个最优的阻尼使得效率最大; (3) PTC 设备的增加使得圆柱表面粗糙度发生异变(图 14), 故使得升力作用变大, 振动强度升高, 最终使得圆柱由涡激振动自发的转变为驰振, 能量利用得到了较大的提升。

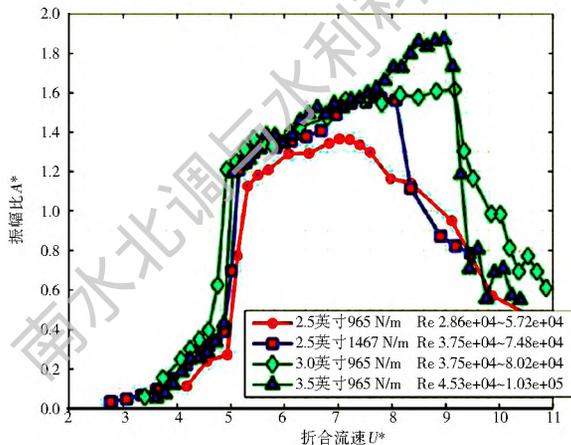


图 12 不同雷诺数下的振幅规律^[25]
Fig. 12 The variations of amplitude under different Reynolds Numbers^[25]

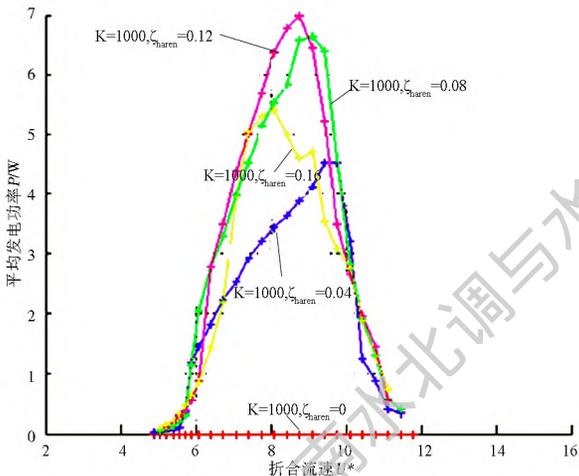


图 13 不同阻尼比条件下发电功率的变化规律^[24]
Fig. 13 The variations of harness power under different damping ratios^[24]

以上的研究都是基于圆柱绕流这一经典问题进

行研究的。随着流致振动能量汲取研究的不断深入, 学者们开始思考, 涡激振动属于自限制性振动, 只能在一定流速范围内拥有良好的振动特性; 相比之下, 驰振强度更大, 且属于非自限制振动, 随着流速的增大振动强度不断增大。那么, 是否驰振能量拥有更好的利用前景。为此, Barrero Gil 及 Alonso^[80-81] 等人基于准静态理论的方法首次推导了异形截面驰振响应下能量转化效率。不过遗憾的是, 由于缺乏发电及相关的试验设备, 并没有得到准确的效率数值, 只提出了影响效率的基本因素: 阻尼比、质量比及截面参数。

为了切实掌握驰振条件下的发电功率与效率, 练继建、张军、燕翔等人^[76, 82] 通过试验方法对三棱柱的流致振动发电能力进行了系统评估, 而丁林^[45]、王军雷^[46] 等人则通过数值方法进行了系统的模拟与计算。张军^[82] 的试验结果表明, 在适当的刚度、质量、阻尼的配比条件下, 三棱柱在驰振条件下的发电效率达到近 40%; 丁林^[45] 的数值计算则指出, 类梯形截面的最大发电效率(也出现在驰振条件下)达到了近 45%, 超过了光滑圆柱、PTC 圆柱、三棱柱及正四棱柱, 当然这也是目前流致振动能量利用研究当中达到的最高效率。

值得注意的是, 在 Park 与 Kumar^[79] 的对 PTC 圆柱的流致振动能量获取研究当中, 发现了柱体的两种不同的驰振模式: 软驰振(Soft Galloping, SG)与硬驰振(Hard Galloping, HG), 见图 15。所谓软驰振, 即为随着流速的增大, 柱体可自激励由涡激振动转变为驰振; 而所谓硬驰振, 则是随着流速的增大, 柱体不可自激励由涡激振动转变为驰振, 但可在较大流速下通过较大的外界激励转变为驰振。张军^[82] 在三棱柱的研究中也发现了这一现象, 并进一步发现了 I 型硬驰振与 II 型硬驰振, 见图 16。试验结果还指明: 随着阻尼的增大, 三棱柱的振动模式逐渐由软驰振演化为硬驰振, 并最终演化为涡激振动。

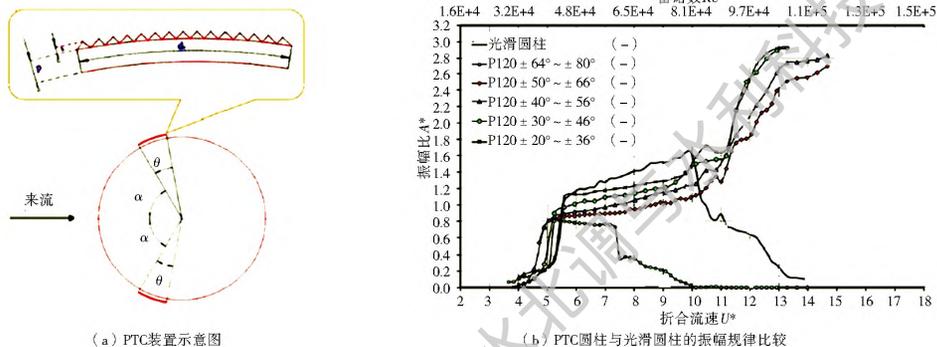


图 14 PTC 圆柱的应用^[33]
Fig. 14 The applications of circular cylinders with PTC

不过, 就目前而言, 针对硬驰振、软驰振问题的研究相当不完善, Park 与张军都是在偶然条件下发

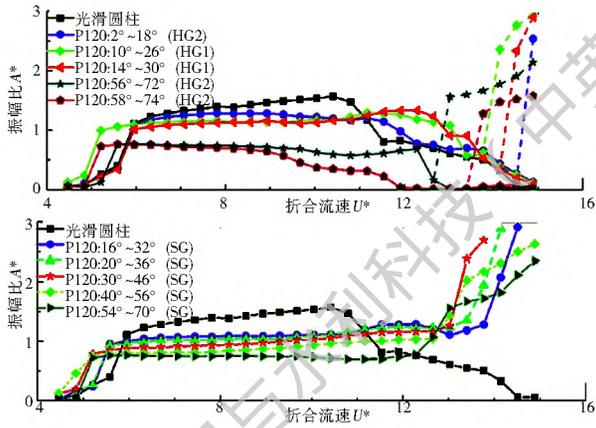


图 15 PTC 圆柱的软驰振(SG)与硬驰振(HG)响应^[78]

Fig. 15 The SG and HG responses of circular cylinders with PTC^[78]

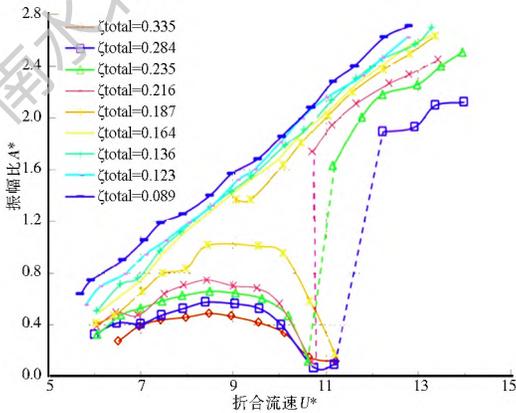


图 16 三棱柱软驰振(SG)与硬驰振(HG)响应^[81]

Fig. 16 The SG and HG responses of triangular prism^[81]

现的这一现象。对于造成的原因,有些学者认为是阻尼非线性造成的,而有些学者则认为是涡激振动的自激励特性造成的。目前,学术界就这一问题并未达成统一共识,有待进一步的研究。不过,这一问题的悬而未决必然造成流致振动(尤其是驰振)能量利用上的不确定性。若振动处于硬驰振状态,其在流速增大过程中不可能自激发成为驰振,那么驰振的能量不能被有效利用,从而造成能量的巨大浪费。因此,软、硬驰振的演化规律,造成软、硬驰振的根本原因已经成为流致振动能量获取领域后续应重点研究的问题。

除了上述的研究内容外,一些学者也从其他角度探讨了流致振动发电的一些问题。Dhanwani 等人^[83]通过理论推导的方法,将二维振动的想法引入 VIVACE,探讨了在双自由度条件下振子的运动情况与能量获取能力,评价了 Bernitsas 所提出了原始模型的合理性。而 Nishi 等人^[84-85]则构想了在圆柱后侧加装尾流干扰器,使得柱体的振动得以加强,从而增大系统的能量获取能力。这些研究成果都在一定程度上推动了流致振动及其能量获取研究的发展,但都需要进一步的试验验证与全面评估。

4 研究展望

目前,流致振动及其能量利用的研究已经取得了长足的进步,一系列流致振动能量转化装置相继被提出,压电式的电能转化装置的研发及相关机理的研究正逐步完善,而电磁式的电能转化装置的研究也已经起步且逐步开展。可以说,流致振动能量利用的整体研究内容正在稳步推进。本文详细梳理了圆柱绕流、非圆柱绕流的流致振动研究现状,指明了流致振动发电装置在海流与风能利用中的巨大潜力;同时,较为全面的整理了现有流致振动发电设备的主要种类、基本原理及应用情况,并整理了流致振动能量转化的研究现状。在此,作者就流致振动能量利用的研究提出以下几点建议,以为将来的研究内容提供参考。

压电设备的现有研究内容相对系统,且压电设备的电能供应对象为微型电子设备,故其研究重心应尽量放到压电材料本身。如何有效的降低压电材料的成本,提高压电材料的电能转化能力与使用寿命,应是未来压电设备的主要研究方向。相对而言,电磁式的流致振动发电设备具有较高的能量密度与转化效率,更适合大规模的开发应用。不过,由于电磁式设备的研究刚刚起步,其研究重点应在于如何增强振动强度、如何达到最优负荷、系统参数如何配比以及截面优化等研究内容。

对于近期在试验当中发现软、硬驰振的现象,学术界对其认知还仅停留在现象本身。然而,流致振动发电设备在运行过程需要保证良好的电能输出,对柱体的振动模式要求相对较高,软、硬驰振的未知性势必造成电能利用的未知性。因此,有必要深入探究这一现象发生的根本原因,掌握软、硬驰振发生的预测方法,从而良好控制软硬驰振的发生,以保证电能输出的稳定性。

不少学者已经开展了多柱体相互干扰下的流致振动特性研究。但就目前而言,考虑电能转化的多柱体研究内容相对较少。对于大规模开发的流致振动能量转化装置,各装置之间必然存在相互干扰。那么,干扰现象是否有利于电能的转化(如尾流驰振现象的发生),何种布置方式才可达到能量利用的最优,干扰现象是否能保证设备运行的安全与稳定,这类问题都需要进一步的探索研究。

参考文献(References):

[1] BLEVINS R D. Flow-Induced Vibration[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

- [2] D'ASDIA P, NOE S. Vortex induced vibration of reinforced concrete chimneys: in situ experimentation and numerical predictions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74: 765-776.
- [3] TRIM A D, BRAATEN H, LIE H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. *Journal of fluids and structures*, 2005, 21(3): 335-361.
- [4] SONG M T, CAOD Q, ZHU W D. Vortex-induced vibration of a cable stayed bridge[J]. *Shock and Vibration*, 2016, 1928086.
- [5] 袁江波, 谢涛, 单小彪, 等. 压电俘能技术研究现状综述[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 36-42. (YUAN J B, XIE T, SHAN X B, et al. A review of current situation for piezoelectric energy harvesting[J]. *Shock and vibration*, 2009, 28(10): 36-42. (in Chinese))
- [6] 李恒. 不同截面形状柱体流致振动及能量转换特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. (LI H. The Flow-induced motion and energy harvesting characteristics of a cylinder with different cross sections[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese))
- [7] SARPKEYA T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19(4): 389-447.
- [8] FENG C C. The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders [D]. Kelowna: University of British Columbia, 1968.
- [9] ZDRAVKOVICH M M. Modification of vortex shedding in the synchronization range[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(4): 513-517.
- [10] BEARMAN P W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1984, 16(1): 195-222.
- [11] SARPKEYA T. Fluid forces on oscillating cylinders[J]. NASA STI/Recon Technical Report A, 1978, 78: 46523.
- [12] MOE G, WU Z J. The lift force on a cylinder vibrating in a current[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1990, 112(4): 297-303.
- [13] GOPALKRISHNAN R. Vortex-induced forces on oscillating bluff cylinders [R]. Woods Hole Oceanographic Institution Ma, 1993.
- [14] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1996, 10(5): 455-472.
- [15] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1997, 11(8): 973-982.
- [16] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1996, 10(5): 455-472.
- [17] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Investigation of relative effects of mass and damping in vortex induced vibration of a circular cylinder[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69: 341-350.
- [18] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass damping[J]. *Journal of fluids and Structures*, 1999, 13(7): 813-851.
- [19] WILLIAMSON C H K, JAUVTIS N. A high amplitude 2T mode of vortex induced vibration for a light body in XY motion[J]. *European Journal of Mechanics B/ Fluids*, 2004, 23(1): 107-114.
- [20] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, 36: 413-455.
- [21] GOVARDHAN R N, WILLIAMSON C H K. Defining the 'modified Griffin plot' in vortex-induced vibration: revealing the effect of Reynolds number using controlled damping[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 561: 147-180.
- [22] BERNITSAS M M, BEN-SIMON Y, RAGHAVAN K, et al. The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 105[J]. *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering*, 2009, 131(1): 011102.
- [23] CHANG C C J, KUMAR R A, BERNITSAS M M. VIV and galloping of single circular cylinder with surface roughness at $3.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(16): 1713-1732.
- [24] LEE J H, BERNITSAS M M. High damping, high Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(16): 1697-1712.
- [25] 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): 719-731.
- [26] ZDRAVKOVICH M M. Flow around circular cylinders volume 1: fundamentals [M]. Oxford: Oxford Science Publications, 1997.
- [27] WILLIAMSON C H K, ROSHKO A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1988, 2: 355-81.
- [28] FLEMING F, WILLIAMSON C H K. Vortex-induced vibrations of a pivoted cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 522: 215-252.
- [29] 徐枫. 结构流固耦合振动与流动控制的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. (XU F. Numerical simulation of fluid solid coupling vibration and flow control of structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese))
- [30] DEN HARTOG J P. Mechanical Vibrations, Fourth Edition [M]. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1956.
- [31] PARKINSON G V, BROOKS N P H. On the aeroelastic instability of bluff cylinders[J]. *Journal of applied mechanics*, 1961, 28(2): 252-258.
- [32] PARKINSON G V, SMITH J D. The square prism as an aeroelastic nonlinear oscillator[J]. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1964, 17(2): 225-239.
- [33] BEARMAN P W, GARTSHORE I S, MAULL D J, et al. Experiments on flow-induced vibration of a square section cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1987, 1(1): 19-34.

- [34] ZILLER C, RUSCHEWEYH H. A new approach for determining the onset velocity of galloping instability taking into account the nonlinearity of the aerodynamic damping characteristic[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69-71: 303-314.
- [35] LEE S. Unsteady aerodynamic force prediction on a square cylinder using $k\epsilon$ turbulence models[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67: 79-90.
- [36] BARRERO-GIL A, FERNANDEZ-ARROYO P. Maximum vortex induced vibrations of a square prism[J]. *Wind and Structures*, 2013; 16: 34F-54.
- [37] MANZOOR S, KHAWAR J, SHEIKH N A. Vortex-induced vibrations of a square cylinder with damped free end conditions[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013. 204974: F12.
- [38] NEMES A, ZHAO J, LO JACONO D, et al. The interaction between flow induced vibration mechanisms of a square cylinder with varying angles of attack[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 710: 102-30.
- [39] ZHAO J, LEONTINI J S, JACONO D L, et al. Fluid structure interaction of a square cylinder at different angles of attack[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 747: 688-721.
- [40] ALONSO G, MESEGUER J, PÉREZ-GRANDE I. Galloping instabilities of two dimensional triangular cross section bodies[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 38: 789-95.
- [41] ALONSO G, MESEGUER J. A parametric study of the galloping stability of two dimensional triangular cross section bodies[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94: 24F-53.
- [42] ALONSO G, MESEGUER J, PÉREZ-GRANDE I. Galloping stability of triangular cross sectional bodies: a systematic approach[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95: 928-40.
- [43] IUNGO G V, BU RESTI G. Experimental investigation on the aerodynamic loads and wake flow features of low aspect ratio triangular prisms at different wind directions[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25: 1119-35.
- [44] 徐枫, 欧进萍, 肖仪清. 不同截面形状柱体流致振动的 CFD 数值模拟[J]. *工程力学*, 2009, 26(4): 7-15. (XU F, OU J P, XIAO Y Q. CFD numerical simulation of flow-induced vibration with different cross section cylinder[J]. *Engineering mechanics*, 2009, 26(4): 7-15. (in Chinese))
- [45] DING L, ZHANG L, WU C M, et al. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015(91): 416-426.
- [46] 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 aeromechanical multiphysics field coupling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [47] TU J H, ZHOU D, BAO Y, et al. Flow characteristics and flow induced forces of a stationary and rotating triangular cylinder with different incidence angles at low Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014(45): 107-123.
- [48] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_energy.
- [49] 刘美琴, 仲颖, 郑源等. 海流能利用技术研究进展与展望[J]. *可再生能源*, 2009, 27(5): 78-81. (LIU M Q, ZHONG Y, ZHENG Yuan, et al. Research status and prospects of marine current energy utilization technology[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5): 78-81. (in Chinese))
- [50] 吕新刚, 乔方利. 海洋潮流能资源估算方法研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(1): 98-108. (LYU X G, QIAO F L. Advances in study on tidal current energy resource assessment methods[J]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(1): 98-108. (in Chinese))
- [51] RAGHAVAN K. Energy extraction from a steady flow using vortex induced vibration[D]. Ann Arbor: The University of Michigan, 2007.
- [52] BEDARD R, PREVISIC M, SIDDIQUI O, et al. Survey and characterization tidal in stream energy conversion (TISEC) devices[J]. EPRI North American Tidal In Stream Power Feasibility Demonstration Project, 2005.
- [53] ALLEN J J, SMITS A J. Energy harvesting eel[J]. *Journal of fluids and structures*, 2001, 15(3): 629-640.
- [54] BERNIT SAS 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.
- [55] 贺聪. 基于风资源合理化利用的山地风电场建设规模研究[D]. 广西: 广西大学, 2015. (HE C. Research on the scale of the mountain wind farm construction based on reasonable utilization of wind resources[D]. Guangxi: Guangxi University, 2015. (in Chinese))
- [56] <http://www.cnbeta.com/articles/394303.htm>.
- [57] ERTURK A, INMAN D J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations[J]. *Smart materials and structures*, 2009, 18(2): 025009.
- [58] 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.
- [59] HOBBS W B, HU D L. Tree inspired piezoelectric energy harvesting[J]. *Journal of fluids and Structures*, 2012, 28: 103-114.
- [60] HOBBS W B. Piezoelectric energy harvesting: vortex induced vibrations in plants, soap films, and arrays of cylinders[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [61] MURALT P. Ferroelectric thin films for micro sensors and actuators: a review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2000, 10(2): 136-146.
- [62] GU RAV S P, KASYAP A, SHEPLAK M, et al. Uncertainty based design optimization of a micro piezoelectric composite

- energy reclamation device[C]. 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Albany, NY: 2004: 3559-3570.
- [63] ROBBINS W P, MORRIS D, MARUSIC I, et al. Wind generated electrical energy using flexible piezoelectric materials[C]. ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition [A]. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 581-590.
- [64] GAO X, SHIH W H, SHIH W Y. Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1116-1118.
- [65] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K. Fluid motion energy converter: USA, 7493759[P]. 2009[2016-10-05].
- [66] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K. Enhancement of vortex induced forces and motion through surface roughness control: USA, 8047232B2[P]. 2011[2016-10-05].
- [67] WANG D A, CHIU C Y, PHAM H T. Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Kármán vortex street[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 746-756.
- [68] 马良, 李凤来, 李鹏, 等. 涡激振动与升力混合动力型水流发电装置: 中国, 102979660A[P]. 2015-03-11[2016-10-05]. (MALLI, LI F L, LI P, et al. Vortex induced vibration and lift hybrid power flow generating unit: China, 102979660A[P]. 2015-03-11[2016-10-05]. (in Chinese))
- [69] 丁林, 张力, 毛心茹, 等. 一种利用并列双圆柱流致振动收集电能的装置: 中国, 103762894A[P]. 2015-08-12[2016-10-05]. (DING L, ZHANG L, MAO X R, et al. A device to collect electrical energy from parallel double cylindrical flow induced vibration: China, 103762894A[P]. 2015-08-12[2016-10-05]. (in Chinese))
- [70] 及春宁, 许栋, 张金凤. 一种基于可变形支座的流致振动发电装置: 中国, 204376674U[P]. 2015-06-03[2016-10-05]. (JI C N, XU D, ZHANG J F. A flow induced vibration generator based on deformable support: China, 204376674U[P]. 2015-06-03[2016-10-05]. (in Chinese))
- [71] 燕翔, 练继建, 刘卓, 等. 一种基于多振子的同振式涡激振动发电装置: 中国, 104061111A[P]. 2016-08-31[2016-10-05]. (YAN X, LIAN J J, LIU Z, et al. A same vibration type vortex induced vibration generator based on multiple oscillators: China, 104061111A[P]. 2016-08-31[2016-10-05]. (in Chinese))
- [72] 燕翔, 练继建, 张军, 等. 一种基于多振子的对振式涡激振动发电装置: 中国, 104005901A[P]. 2016-02-24[2016-10-05]. (YAN X, LIAN J J, ZHANG J, et al. A vibration induced vortex induced vibration generator based on multiple oscillators: China, 104005901A[P]. 2016-02-24[2016-10-05]. (in Chinese))
- [73] MEHMOOD A, ABDELKEFI A, HAJJ M R, et al. Piezoelectric energy harvesting from vortex induced vibrations of circular cylinder[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(19): 4656-4667.
- [74] DAI H L, ABDELKEFI A, WANG L. Theoretical modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(14): 1861-1874.
- [75] DAI H L, ABDELKEFI A, WANG L. Piezoelectric energy harvesting from concurrent vortex induced vibrations and base excitations[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(3): 967-981.
- [76] LIAN J, YAN X, LIU F, et al. Analysis on flow induced motion of cylinders with different cross sections and the potential capacity of energy transference from the flow[J]. Shock and Vibration, 2016.
- [77] LEE J H, XIROS N, BERNITSAS M M. Virtual damper spring system for VIV experiments and hydrokinetic energy conversion[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(5): 732-747.
- [78] SUN H, KIM E S, BERNITSAS M P, et al. Virtual Spring Damping System for Flow-Induced Motion Experiments[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2015, 137(6): 061801.
- [79] PARK H, KUMAR R A, BERNITSAS M M. Enhancement of flow induced motion of rigid circular cylinder on springs by localized surface roughness at $3.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ [J]. Ocean Engineering, 2013; 72: 403-415.
- [80] BARRERO-GIL A, ALONSO G, SANZ-ANDRES A. Energy harvesting from transverse galloping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(14): 2873-2883.
- [81] BARRERO-GIL A, PINDADO S, AVILA S. Extracting energy from vortex-induced vibrations: a parametric study[J]. Applied mathematical modelling, 2012, 36(7): 3153-3160.
- [82] ZHANG J, LIU F, LIAN J, et al. Flow Induced Vibration and Energy Extraction of an Equilateral Triangle Prism at Different System Damping Ratios[J]. Energies, 2016, 9(11): 938.
- [83] DHANWANI M A, SARKAR A, PATNAIK B S V. Lumped parameter models of vortex induced vibration with application to the design of aquatic energy harvester[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 43: 302-324.
- [84] NISHI Y. Power extraction from vortex induced vibration of dual mass system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1): 199-212.
- [85] NISHI Y, UENO Y, NISHIO M, et al. Power extraction using flow induced vibration of a circular cylinder placed near another fixed cylinder[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(10): 2863-2880.