

基于介电弹性体的海洋能发电装置的研究进展

鄂世举¹, 李佳玲¹, 曹建波¹, 陈亦开¹, 潘 欣², 竺振才¹,
兰 猛¹, 陆刚强¹, 包昆伟¹

(1. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004; 2. 浙江师范大学 图书馆, 浙江 金华 321004)

摘 要:介电弹性体是一种新型功能材料,其能量收集作用主要应用在低频、大变形的能量源场合,与海洋能发电十分契合。该文描述了介电弹性体发电的基本原理及其材料特性和发电装置电极材料的研究进展。针对目前介电弹性体海洋能发电装置成本高,种类少,能量转换效率低等问题,该文总结了国内外不同类型的基于介电弹性体的海洋能发电装置及研究方案,对不同类型的发电机特点及适用场合进行了分析。结果表明,浮标式和管状水动力式发电机应用前景广。最后阐述了当前介电弹性体在海洋能应用上亟待解决的问题,并对进一步解决上述问题提出了建议。

关键词:海洋能;介电弹性体材料;电极材料;捕能方式;发电装置

中图分类号:TM910.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.05.027

Research Progress of Marine Energy Generation Device Based on Dielectric Elastomer Material

E Shiju¹, LI Jialing¹, CAO Jianbo¹, CHEN Yikai¹, PAN Xin², ZHU Zhencai¹,
LAN Meng¹, LU Gangqiang¹, BAO Kunwei¹

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Library, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: The dielectric elastomer is a new type of functional material, and its energy collection is mainly applied to low-frequency, large-deformation energy sources, which is very compatible with ocean energy generation. This paper describes the basic principle of dielectric elastomer power generation, its material properties and the research progress of electrode materials for power generation device. Aiming at the problems of high cost, few types and low energy conversion efficiency of current dielectric elastomer marine power generation devices, this paper summarizes different types of marine power generation devices based on dielectric elastomer and their research schemes at home and abroad, and analyses the characteristics and application occasions of different types of generators. The results show that the buoy-type and tubular hydro-dynamic generators have broad application prospects. Finally, the problems that need to be solved urgently in the application of dielectric elastomers to ocean energy are discussed, and some suggestions for further solving the above-mentioned problems are put forward.

Key words: ocean energy; dielectric elastomer material; electrode material; energy capture method; power generation device

0 引言

海洋的面积占据了全球的70%,其中蕴含了巨大的能源,有波浪能、潮流能、潮汐能及温差能等,大面积的开发对解决世界能源问题有很大的作用,世

界各国越来越重视海洋能的开发与利用^[1]。我国是一个海洋大国,海洋国土面积达 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$,利用海洋能发电能有效地缓解资源匮乏的问题。但我国目前在海洋能上的开发利用仍处于研究阶段,缺少

收稿日期:2019-01-26

基金项目:浙江省基础公益研究基金资助项目(LGG18E070005);浙江省自然科学基金资助项目(LY17E070001);国家自然科学基金资助项目(51377146,51407162)

作者简介:鄂世举(1970-),男,吉林长春人,教授,博士,主要从事新型功能材料驱动与发电方面的研究。E-mail: 276828373@qq.com。通信作者:曹建波(1980-),男,山东潍坊人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事介电弹性体发电技术的研究。E-mail: caojianbo2008@163.com。

商业化的实际应用^[2]。

介电弹性体(DE)作为一种新型电活性软体功能材料,具有柔性好,变形大,比能密度和能量转换效率高等优点^[3]。DE膜状基材的上、下表面涂覆柔性电极后,施加一定电压,它会在静电力的作用下发生形变,厚度减小,电压的电能为弹性体的机械能。反之,通过外力使涂覆柔性电极的介电弹性体膜状基材产生较大形变,在极化的状态下,当弹性体恢复原状时,外力的机械能转换为电能。介电弹性体的能量收集作用主要应用在低频、大变形的能量源场合。普通的海洋能发电设备机械转换器多,刚度大,易腐蚀,稳定性较差,而介电弹性体的杨氏模量低,耐冲击,抗疲劳,易与机械能量源直接耦合,在理论上不需机械转换环节。因此,DE的能量收集作用与海洋能发电十分契合。因此,基于DE材料进行海洋能发电已成为各国利用海洋能的研究热点之一。本文将对国内外现有的基于介电弹性体的海洋能发电装置进行分析、研究和总结,对其进一步发展提出了建议。

1 介电弹性体发电原理及研究现状

DE材料本身的材料参数影响介电常数及电容,所用电极影响电能转换效率,而电容、介电常数及电能转换效率影响介电弹性体发电机(DEG)的能量收集性能。因此,国内外研究者在材料改性及电极制备、涂覆工艺方面开展了研究,进行了多种DE材料和不同电极的对比实验,以寻求最适用海洋能能量收集的DE材料及电极。

1.1 介电弹性体的发电原理

DEG的发电原理是驱动原理的逆过程^[4-10]。DEG可看作是可变电容器,中间是DE膜,上、下两表面涂覆柔性电极,形成“三明治”结构。当DE受外力拉伸,即机械能输入,厚度减小,DE的电容增大,此时在偏置电源作用下施加初始电荷 V_D ,如图1(a)所示。撤去外力后,DE由于其本身的弹簧收缩力,DE恢复原状,厚度增大,DE膜上、下表面电极内的异性电荷因厚度增加被推离,同性电荷因面积减小被挤压靠近,提高了电荷电压,即电容减小,电荷不变,输出电压 $V(t)$ 增大,如图1(b)所示。此时若通过接线端子引出,接在回路中,便能产生更大的电流,达到发电的效果。从能量的角度来说,即外力的机械能转换为发出的电能。

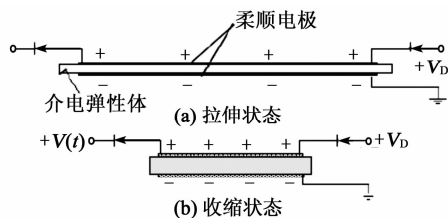


图1 DEG的发电原理

1.2 介电弹性体材料研究现状

目前常用的DE材料有硅橡胶、硅树脂、聚氨酯、丁腈橡胶、丙烯酸、天然橡胶、亚乙烯基氟化三氟乙烯及其复合材料。DE的特性影响因素主要有介电常数、介电强度、杨氏模量、体积电阻率、响应速率、剪切模量及延伸率等。

Kaltseis等^[11]实验得出,天然橡胶比聚丙烯酸酯有更高的杨氏系数、断裂能及介电强度。因此,天然橡胶应用于能量收集器将具有更长的寿命及耐疲劳特性。Vucong T等^[12]对双面胶带与硅胶管进行了对比,分析介电强度和介电常数发现,在低温大变形条件下,双面胶带VHB能量收集性能更优,反之,在高温小变形的条件下,硅橡胶的性能更好。Graf等^[13]对聚氨酯与聚丙烯酸酯材料进行比较,结果表明,聚氨酯具有更高的介电强度和介电常数。在同等条件下,聚氨酯收集到能量是聚丙烯酸酯材料的10倍以上。同时提出,未来能在不影响其他材料性能的前提下,通过改变材料某个特定参数来提升其能量收集性能。Vertechy R等^[14]对一种合成橡胶材料进行实验研究表明,其能量收集性能优于天然橡胶。

目前,橡胶和VHB是最主流的介电弹性体材料,其变形较大,耐腐蚀,耐冲击。与硅胶管相比,VHB更适合应用于海洋环境,而合成橡胶和聚氨酯具有更优的能量收集性能。针对不同的海洋环境和发电装置,选择合适的介电弹性体材料是提高发电效率的关键^[15]。

1.3 介电弹性体电极材料研究现状

DEG理想的柔性电极材料应具备柔性好,刚度低和较好导电性。DEG主要是依靠DE膜的变形来实现机械能到电能的转换,所以其表面所涂覆的电极材料必须具有柔性,且涂覆工艺不能影响DE膜的变形。另外,DE导电性直接影响DEG的机电转换特性。因此,电极材料的制备和涂覆工艺影响着DEG的能量收集性能。

Pelrine 等^[16]使用厚 1 mm 的硅树脂弹性体材料作为 DE 材料。将其预拉伸 32%, 采用石墨喷涂的方式将碳粉喷洒在 DE 的两面, 制作成 DEG。这种涂覆工艺使电极涂覆更均匀。Schlaak 等^[17]使用的 DE 材料为厚 25 mm 的硅树脂弹性体材料, 无预应变。其电极的涂覆方式是喷涂, 对比喷涂与刷涂方式发现, 石墨喷涂的电极比碳粉刷涂的电极导电率低, 但碳粉刷涂的实际操作难度较大。Kinoshita 等^[18]将科琴黑与橡胶混合, 制成橡胶柔性电极。Low 等^[19]使用双面胶带 VHB F9473PC 制成 DE 膜, 膜厚为 250 mm。其电极并不是主流的碳粉, 而是基于化学镀膜技术而制作的一种褶皱银薄膜电极。在预拉伸 2.5 倍, 电压 1.8 kV 的条件下, 其应变率可达 128%。张冬至等^[20]用 DE 材料与碳纳米管电极结合制成手套式可穿戴发电机, DE 膜厚为 28 mm。发电机依靠手指的弯曲, 当弯曲角度为 90° 时, 电压输出达到最大(为 3.7 V)。陈鹿民等^[21]使用 DowCorning186 硅橡胶制成 DE 膜, 以银纳米颗粒和导电石墨掺杂硅橡胶制作成的橡胶电极作为 DE 膜的柔性电极材料, 研究了不对称电极下, DE 膜的电致动响应。

碳粉电极制作简单, 喷涂工艺技术成熟, 但刷涂实际操作难却具有更好的导电率。橡胶电极防水特性及褶皱银薄膜电极导电性能高, 且适合大变形, 对介电弹性体在海洋能上的应用具有重要意义。

2 DE-海洋能发电的国外研究现状

2.1 DE-振荡水柱式发电装置

图 2 为振荡水柱式波浪能发电机示意图。该类发电机具体工作过程^[22]: 当海浪波峰进入腔内时, 腔内气体受到压缩, 腔内气压增大, 气体通过上端气流通道向外排, 此时 DE 膜被拉伸; 反之 DE 膜恢复原状或向下鼓起。此过程中波浪的机械能转换为空气的机械能, 通过 DE 膜的拉伸收缩再转化为电能。

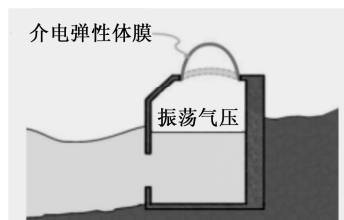


图2 基于 DE 的振荡水柱型波浪能发电机

Vertechy 等^[23-24]设计的基于 DE 的振荡水柱式

海浪能发电机, 如图 3 所示。其整体结构底部固定在海底。随着海浪的起伏, 带动装置随其发生运动起伏, 半球状 DE 换能元件拉伸或收缩, 将海浪流动的机械能转换为电能。

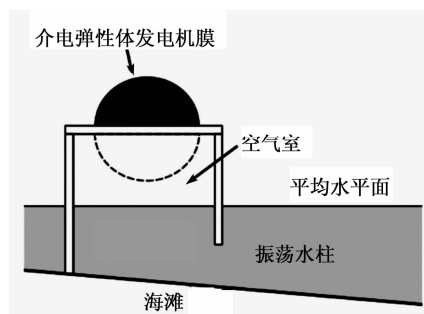


图3 基于 DE 的半球状结构海浪能发电机

2.2 DE-浮标式发电装置

Kornbluh 等^[25]设计的海上浮标式发电装置是使用轧辊和 DE 组合的换能器, 换能器“悬挂”在浮体上, 如图 4 所示。尽管在发电机原型的透明外壳内温度高达 55 °C, 环境湿度偶尔接近 100%, 但介电弹性体和轧辊在海道中仍能保持运转。浮标的波浪运动引起的惯性力使轧辊拉伸或收缩, 从而使面包卷上的 DEG 发生变形, 将波浪的机械能转换成电能。发电机主要结构如图 5 所示, 包括 DEG 铰接系统与轧辊传感器、发生器模块及浮标。发电设备转换输出的电能可为远程海洋传感器(如海啸预警传感器等)及海基局部电源的系统供电。

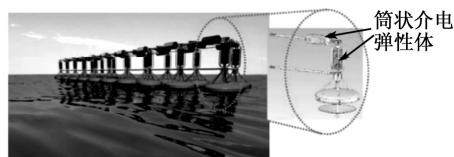


图4 海上浮标式发电装置



图5 海上浮标式发电装置发电机主要结构

Prahlad H 等^[26]设计了一种浮标式介电弹性体发电装置, 如图 6 所示。浮标和底座中间用介电弹性体连接, 浮标随着海浪起伏, 使介电弹性体发生拉伸与收缩, 从而发电。它所产生的分布式电能可给个人手机及 GPS 系统充电等, 也可供给局部的独立电站。

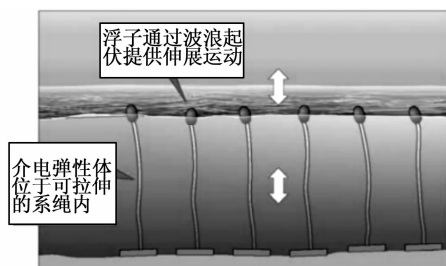


图6 浮标式介电弹性体发电装置

2.3 DE-水轮式发电装置

Chiba S 等^[27-28]设计了基于 DE 的水轮式能量收集器,如图 7 所示。该水轮直径为 $\varnothing 30$ cm。其具体的工作原理:用一个小水泵(流量 280 mL/s)供水,使水轮旋转,水轮旋转后带动水轮中心的推杆,从而使 DEG 发生周期变形。实验表明,轮子每转 1 圈提供 35 mJ 的电。根据估算,若水轮直径增大到 $\varnothing 80$ cm,则水轮每转动 1 圈,有望产生 5.4~6.0 J 的电。

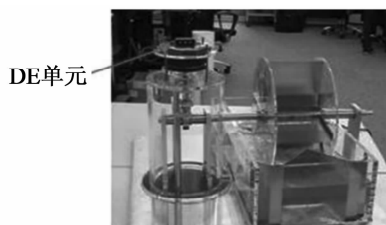


图7 基于DE的水轮式能量收集器

2.4 DE-管状发电装置

Jean P 等^[29]设计了一种驻波管能量收集装置,如图 8 所示。管塞中是加压的海水,圆形 DEG 发电环设计为多层 DE 膜组件,形成独立的环形结构。当海浪波传来时,柔性载体管发生变形,从而使发电环发生变形将机械能转换为电能。

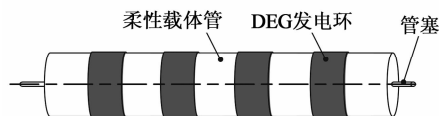


图8 柔性管海洋能发电机

Mass 等^[30]设计了一种流量能量收集装置,如图 9 所示。在机械循环开始时(见图 9(a)),水沿箭头所示方向流过,此时管子被预拉伸。在第一步(见图 9(b))时,主动机构关闭管子出口,使管内水压增加,DE 材料沿着流动方向伸展,动能被转换为应变能。流动能量转换器在图 9(c)处开始充电,在图 9(e)处释放。管子由图 9(d)处的低于初始长度伸展到其初始长度图 9(f),然后机械循环再次开始图 9(a)。该转换器适用于具有低流速的流域。

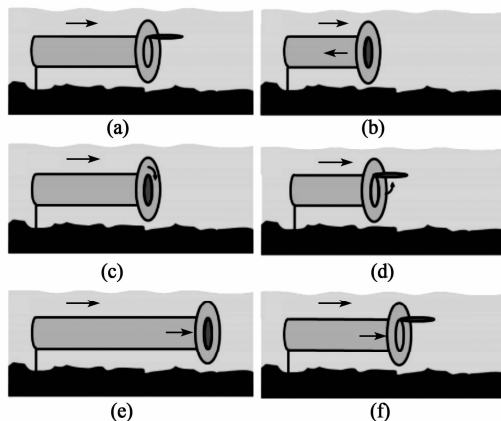


图9 管状水力式DEG

Farley F J M 等^[31-33]提出了在海上用硅胶与 DE 结合的想法,并对其进行了研究认证,如图 10 所示。带有弹性壁的硅胶管沿海浪行进的方向浸入海中,管壁上根据波浪参数缠绕 DEG 收集能量。当单波浪产生凸起时,管子随着波浪径向凸起,此时缠绕的 DEG 拉伸。但单波浪流过时,DEG 恢复原状。由管子的可扩张性决定的速度传播。如果凸出速度接近波的相速度,则能量从海浪到凸出部共振转移。在管的末端,可提取有用的能量。

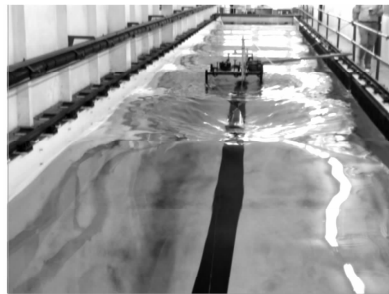


图10 基于介电弹性体的硅胶管发电装置

2.5 DE-摆式发电装置

Moretti G 等^[34]在 DEG 海洋能发电方面也进行了深入的研究,提出了一种新颖的振荡体系结构波浪能转换器。该结构包括底部铰接的摆动桨叶,其枢轴位于海床旁边,配有平行四边形形状的 DEG。系统渲染图如图 11 所示。

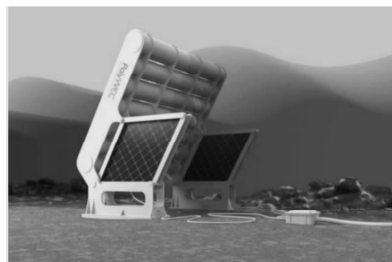


图11 摆式介电弹性体发电机

总之,基于介电弹性体的海洋能捕获装置种类较多。5 种海洋能装置的特点、适应场合及应用前景的比较如表 1 所示。

表 1 DE-海洋能发电装置的特点、适应场合及应用前景

装置名称	优点	缺点	适用场合及应用前景
振荡水柱式	无水下活动部件,方便安装和维护,可靠性好	转换效率低,发电成本高	可作为大型发电装置,适合多台风天的中国,应用前景广
浮标式	结构简单,建造难及发电成本较低;	转换效率一般,对浮标刚度要求高	可供给予局部的独立电站等。适合小容量发电的场合,应用前景广
水轮式	系统稳定,可靠性好	结构复杂,不易维修,转换效率低	适合有流水冲击海岸,应用前景一般
管状水动力式	结构简单,发电成本低	系泊难,相对建造费用较高	适合浪形稳定流域,应用前景广
摆式	发电成本较低,转换效率较高	可靠性差,易损坏,不易维护,转换效率不稳定	可与防浪堤结合,应用前景一般

3 DE-海洋能发电的国内研究现状

陈东旺等^[35]研制出一款涡激振动潮流能发电装置,发电原理示意图如图 12 所示。该装置根据涡激振动现象的机理,对涡激振动获能装置进行研究,并对获能装置进行水槽实验,总结出涡激振动获能装置在水流中的振动规律及实验研究了介电弹性体换能单元的弹性和发电性能。

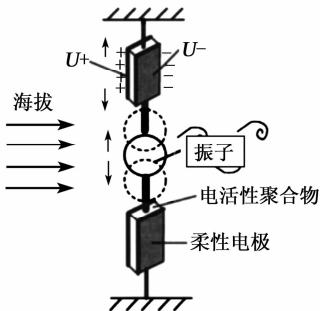


图 12 涡激振动潮流能发电原理示意图

鄂世举等^[36]发明了一种利用潮汐能的 DE 发电机结构,结构示意图如图 13 所示。通过该结构可将潮汐能带动的扇叶涡轮的旋转运动转化为导杆的直线运动,从而实现 DE 膜的拉伸与收缩,将潮汐能

转化为电能收集起来。

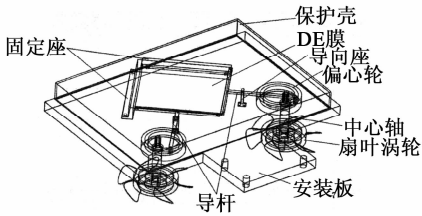


图 13 一种利用潮汐能的介电弹性体发电机结构示意图

鄂世举等^[37]发明了一种 DE 薄膜发电的潮汐能发电机结构,结构示意图如图 14 所示。当涨潮时,海水推动扇叶涡轮转动,从而实现 DE 膜的拉伸;当退潮时,海水带动扇叶涡轮反转,从而实现 DE 膜的收缩。DE 膜的拉伸与收缩过程实现了潮汐能与电能的转换。

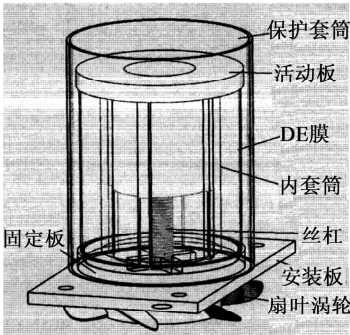


图 14 一种 DE 薄膜发电的潮汐能发电机结构示意图

刘立武等^[38-39]设计了一种海洋能 DE 换能装置,实物图如图 15 所示。当有波浪时,浮体将上、下驱动套筒,从而导致 DE 膜的拉伸、收缩,将海洋能转换成电能。

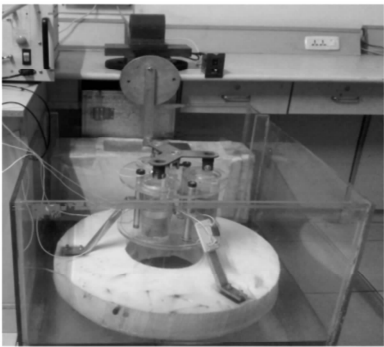


图 15 一种海洋能 DE 换能装置实物图

通过对比国内外的发展现状发现,国内在基于介电弹性体的海洋能发电方面起步较晚,结构和种类都不全。近些年介电弹性体发电虽成为研究热点,但缺乏规模化和商业化,主要是研究所和高校在实验室进行研究实验,和企业对接较少。

4 结 论

海洋能是一种蕴藏丰富的清洁能源,近年来受到越来越多国家的重视,尤其是在解决国家的重大战略问题上意义重大。随着环境恶化及能源短缺问题越来越凸显,可再生能源的开发利用越来越重要。国家也出台了相应的鼓励政策,还设有专门的资金用于海洋可再生能源的开发。我国在基于介电弹性体材料的海洋能发电这一领域中也提出了一些新思路并研发出了一些新装备,相信在以后的研究道路上,海洋能发电产业会更成熟。

目前,国内外对 DE 用于能量收集进行了大量的理论及应用研究,但在这一领域仍存在较多亟待解决的问题:

1) DEG 需依靠 DE 的伸缩运动来进行发电。因此,柔性电极材料需满足柔性好、刚度小的需求,而满足这一要求的电极材料大多导电性较差,柔性电极的电阻仍处于千欧级,会造成 DEG 大量的能量损耗,建议未来能采用更细密的导电填料颗粒,增加粒子在电极中的分散均匀度和紧密粘合力,以此来降低柔性电极的损耗。

2) 海洋能转换是较复杂的过程,恶劣的海洋环境难以预测、海洋生物附着易造成发电过程某些环节的失效,以及海洋能的不稳定性使发电装置发出的电能质量较差。建议首先要提高海洋能发电装置的可靠性,再者可在发电装置中添加储能机构,使捕获装置俘获的海洋能稳定的输入到发电装置,从而实现电能的稳定输出,提高电能的质量。

3) 基于介电弹性体材料的海洋能发电装置具有结构简单,成本低,转换效率高等特点,国内在基于介电弹性体的海洋能发电这一方面起步较晚,结构和种类都不全。建议加大在这方面的研究力度,相关技术研究一旦成熟,在海洋能发电领域将有较大潜力和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王世明,任万超,吕超. 海洋潮流能发电装置综述[J]. 海洋通报, 2016,35(6):601-608.
- [2] 刘玉新,王海峰,王冀,等. 海洋强国建设背景下加快海洋能开发利用的思考[J]. 科技导报,2018,36(14):22-25.
- [3] VERTECHY R,ROSATI G,FONTANA M. Reduced model and application of inflating circular diaphragm dielectric elastomer generators for wave energy harves-

- ting [J]. Journal of Vibration and Acoustics,2015,137(1):011004.
- [4] 金丽丽,鄂世举,曹建波,等. 介电弹性体材料研究现状综述[J]. 机电工程,2016,33(1):12-17.
- [5] 钟林成,王永泉,陈花玲. 基于介电弹性软体材料的能量收集:现状、趋势与挑战[J]. 中国科学:技术科学,2016,46(10):987.
- [6] 刘立武. 电话性介电弹性体的本构理论和稳定性[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. Science,2000,287(5454):836-839.
- [8] EITZEN L, GRAF C, MAAS J. Bidirectional HV DC-DC converters for energy harvesting with dielectric elastomer generators [C]//New York: Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2011:897-901.
- [9] 戈风行,杨丹,田明,等. 可将机械能转变成电能的介电弹性体研究进展[J]. 材料科学与工艺,2016,24(5):1-8.
- [10] 鄂世举,竺振才,曹建波,等. 拉伸模式对介电弹性体发电性能影响的研究[J]. 压电与声光,2018,40(4):594-598.
E Shiju, ZHU Zhencai, CAO Jianbo, et al. Investigation of the effects of tensile mode on the performance of dielectric elastomers generators [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(4):594-598.
- [11] KALTSEIS R, KEPLINGER C, KOH S J A, et al. Natural rubber for sustainable high-power electrical energy generation [J]. RSC Adv, 2014, 4:27905-27913.
- [12] VUCONG T, JEANMISTRAL C, SYLVESTRE A. New operating limits for applications with electroactive elastomer: effect of the drift of the dielectric permittivity and the electrical breakdown [C]//Bologna: SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2013:793-806.
- [13] GRAF C, HITZBLECK J, FELLER T, et al. Dielectric elastomer-based energy harvesting: Material, generator design, and optimization [J]. Intell Mat Syst Str, 2014, 25:951-966.
- [14] VERTECHY R, FONTANA M. Electromechanical characterization of a new synthetic rubber membrane for dielectric elastomer transducers [J]. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 2015, 9430:94300K-1-7.
- [15] 王超,杨静,李昊,等. 一种基于人体运动的发电装置研究与设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017(5):137-142.
WANG Chao, YANG Jing, LI Hao, et al. Research and design of a power generation device based on human

- body motion[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2017(5):137-142.
- [16] PELRINE R E, KORNBLUH R D, JOSEPH J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. Sensors and Actuators A:Physical,1998,64(1):77-85.
- [17] SCHLAAK H F, JUNGSMANN M, MATYSEK M, et al. Novel multilayer electrostatic solid state actuators with elastic dielectric[C]//San Diego, CA: International Society for Optics and Photonics, Smart Structures and Materials,2005:121-133.
- [18] KINOSHITA Y, TSUCHITANI S, KIKUCHI K. Development of flexible rubber electrode for dielectric elastomer actuator [C]//Sendai; System Integration (SII),2010:282-286.
- [19] LOW S H, LAU G K. Bi-axially crumpled silver thin-film electrodes for dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures,2014,23(12):125021.
- [20] 张冬至,童俊,刘哲,等. 基于电活性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2151-2158.
- [21] 陈鹿民,王晨,王才东,等. 不对称电极介电弹性体的电致动响应与有限元分析[J]. 功能材料,2017,48(6):6074-6079.
- [22] 鄂世举,金建华,曹建波,等. 波浪能捕获及发电装置研究进展与技术分析[J]. 机电工程,2016,33(12):1421-1427.
- [23] VERTECHY R, FONTANA M, PAPINI G, et al. Oscillating-water-column wave-energy-converter based on dielectric elastomer generator[J]. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering,2013,8687(36):127-132.
- [24] VERTECHY R, FONTANA M. In-tank tests of a dielectric elastomer generator for wave energy harvesting [J]. Electroactive Polymer Actuators and Devices(EAPAD),2014,9056:90561G.
- [25] KORNBLUH R D, PELRINE R, PRAHLAD H, et al. From boots to buoys: Promises and challenges of dielectric elastomer energy harvesting[M]. Springer US: Electroactivity in Polymeric Materials,2012:67-93.
- [26] PRAHLAD H, KORNBLUH R, PELRINE R, et al. Polymer power: Dielectric elastomers and their applications in distributed actuation and power generation [C]//Bangalore, India: Proceedings of ISSS 2005 International Conference on Smart Materials Structures and Systems,2005,100-107.
- [27] CHIBA S, WAKI M, KORNBLUH R, et al. Innovative wave power generation system using electroactive polymer artificial muscles [C]//Bremen: IEEE, 2009: 143-145.
- [28] CHIBA S, WAKI M, KORNBLUH R, et al. Innovative wave power generation system using electroactive polymer artificial muscles[C]//Bremen; IEEE, 2009: 1-3.
- [29] JEAN P, BAR-COHEN Y, WATTEZ A, et al. Standing wave tube electro active polymer wave energy converter[J]. Proc Spie,2012,8340:83400C-1-83400C-21.
- [30] MAAS J, GRAF C. Dielectric elastomers for hydro power harvesting [J]. Smart Materials & Structures, 2012,21(6):371-378.
- [31] FARLEY F J M, CHAPLIN J R. Rubber tubes in the sea[J]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci,2011,370(1959):381-402.
- [32] CHAPLIN J R, HELLER V, FARLEY F J, et al. Laboratory testing in the anaconda [J]. Philosophical Transactions,2012,370(1959):403.
- [33] FARLEY F J M, PRENTICE M E. Development of the ANACONDA all-rubber WEC [C]//Porto: Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference,2007:3-8.
- [34] MORETTI G, FOREHAND D, VERTECHY R, et al. Modeling of oscillating wave surge converter with dielectric elastomer power take-off [J]. Asme International Conference on Ocean,2014: V09AT09A034.
- [35] 陈东旺. 涡激振动潮流能转换装置中的介电弹性体发电技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
- [36] 鄂世举,刘爱飞,郑初星,等. 一种利用潮汐能的介电弹性体发电机结构设计:ZL201410485573. 8[P]. 2015-04-01.
- [37] 鄂世举,葛彩军,郑初星,等. 一种基于介电弹性体的潮汐能发电机结构设计:ZL201410485574. 2[P]. 2015-04-07.
- [38] LIU Yanju, LIU Liwu, ZHANG Zhen, et al. Analysis and manufacture of an energy harvester based on a mooney-rivlin- type dielectric elastomer [J]. Europhysics Letters,2010,90(3):1303-1324.
- [39] LIU Yanju, LIU Liwu, ZHANG Zhen, et al. Dielectric elastomer film actuators: characterization, experiment and analysis[J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(9):95010-95024.
- [39] LYU Xiongfei, LIU Liwu, LIU Yanju, et al. Dielectric elastomer energy harvesting; maximal converted energy, viscoelastic dissipation and a wave power generator [J]. Smart Material Structures,2015,24(11):115036.