

基于压电纤维复合材料的洋流能发电装置发电性能分析

王海清¹, 刘龙建², 胡利民², 孙 斌², 余世科², 李 皓²

(1. 海装驻昆明地区第二军事代表室, 云南 昆明 650118;

2. 中国船舶重工集团公司 第七〇五研究所昆明分部, 云南 昆明 650118)

摘 要: 设计了一种基于压电纤维复合材料(MFC)的洋流能发电装置,并分析了其发电性能。以悬臂梁结构为分析对象,对影响发电性能的因素进行了分析,研究了基底材料的类型和厚度、频率、位移激励幅值、单晶和双晶结构对发电性能的影响规律。基于上述分析结论,设计了一种洋流能发电装置。分析了该发电装置的发电性能。分析结果表明,该发电装置在转子转速为 500 r/min 的工作条件下,最大输出功率为 9.31 W,能满足功率要求。

关键词: 洋流能发电装置; 压电纤维复合材料; 发电性能; 压电发电

中图分类号: TM 619 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0097-09

doi: 10.12177/emca.2020.101

Performance Analysis of an Ocean-Current Generator Based on Macro-Fiber Composite

WANG Haiqing¹, LIU Longjian², HU Limin², SUN Bin², YU Shike², LI Hao²

(1. The Second Military Representative Office of the Navy in Kunming, Kunming 650118, China;

2. Kunming Branch of 705 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Kunming 650118, China)

Abstract: An ocean-current generator based on macro fiber composite (MFC) is proposed, and the performance of the generator is analyzed. Firstly, the cantilever structure is taken as the research object to analyze the influencing factors of performance of piezoelectric generation. The laws of influences of substrate materials, thickness, frequency, displacement excitation, and single/double crystal structure are researched. Then, an ocean-current generator based on MFC is designed according to the performance analysis results. Finally, the electricity generation performance of the ocean-current generator is analyzed. The maximum output power of the generator is 9.31 W at a rotor speed of 500 r/min, which can meet the power requirements.

Key words: ocean-current generator; macro fiber composite (MFC); electricity generation performance; piezoelectric generation

0 引 言

中国洋流能资源丰富,但在深度较深的区域,洋流速度非常缓慢,使用传统的螺旋桨加发电机

的方式进行发电已不再适用。位于深远海区域的水下预置设备由于远离大陆或者水面岸岛,造成能源补给困难,因此需要就近布置发电装置。压电复合纤维材料(MFC)压电系数较高、柔韧性

收稿日期: 2020-05-24; 收到修改稿日期: 2020-07-13

作者简介: 王海清(1980—),男,硕士,工程师,研究方向为水下装置电力系统。

刘龙建(1989—),男,博士,工程师,研究方向为电气工程。

好、抗弯曲能力强、不易被破坏,在能量捕获领域获得越来越多的应用。基于 MFC 的发电装置可用于给微型电子设备(如 GPS 装置、微型传感器装置、无线发射接收传输装置)进行供电,或者给电池组进行充电、储能^[1-7]。因此,压电发电是实现深远海区域进行小型电力补给的一种优先选择。文献[8-9]研究了一种基于压电材料的风力发电装置。文献[10]研究了一种基于压电材料的波浪能发电装置。文献[11]研究了一种基于压电材料的柔性水力发电装置。

本文设计了一种基于 MFC 的洋流能发电装置,该发电装置结合了螺旋桨和 MFC 的优点。同时,分析了该装置的发电性能。

1 基于 MFC 的洋流能发电装置的原理

压电纤维层由圆柱形的压电纤维材料和环氧树脂组成,在压电纤维层上下 2 个端面覆盖着厚度为几十微米的铜电极,铜电极表面覆盖着聚酰亚胺材料。MFC 部分的厚度约为 0.3 mm,其中压电纤维层的厚度约为 0.13 mm。MFC 材料按其工作模式,大致可分为 d_{31} 、 d_{33} 、 d_{15} 3 种类型。其中,最常用的 2 种 d_{31} 和 d_{33} 型 MFC 结构示意图如图 1 所示^[12-16]。可以看出, d_{31} 模式下压电纤维的极化方向垂直于 MFC 的长度方向; d_{33} 模式下压电纤维的极化方向平行于 MFC 的长度方向。能量捕获领域使用的 MFC 材料多为 d_{31} 类型。

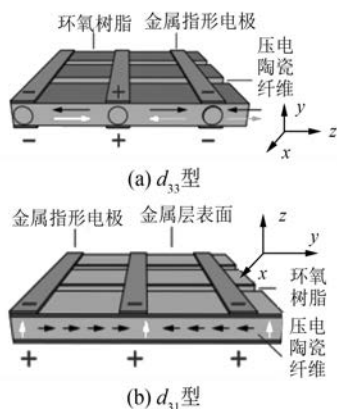


图 1 d_{33} 和 d_{31} 型 MFC 结构示意图

对于 d_{31} 型 MFC,当基底材料沿 z 方向发生弯

曲时,在基底材料的带动下,压电纤维层会产生 x 和 y 方向的应变。压电材料应变与电场之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ε 和 γ 为应变; d_{31} 、 d_{33} 和 d_{15} 为压电系数; E 为电场。

可以看出,在压电材料中, x 或者 y 方向的应变,会产生 z 方向的电场。因此,当 MFC 发生弯曲时,在上下 2 个电极之间会输出电压。

基于压电材料的能量捕获装置,目前比较常见的结构形式为悬臂梁结构。本文设计的洋流能发电装置如图 2 所示。其结构与风力压电发电装置比较相似,与悬臂梁结构有所不同。发电板一端固定,当螺旋桨带动转子旋转时,转子上的凸轮周期性地带动发电板的自由端做来回运动。这种结构下,发电板自由端的位移取决于转子凸轮的尺寸参数,而悬臂梁结构的位移与施加的激震加速度和悬臂梁结构的谐振状态有关。

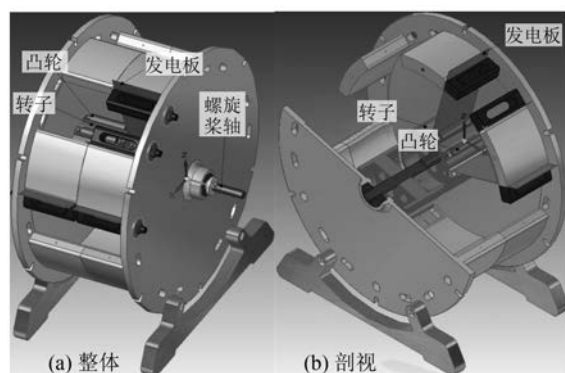


图 2 基于 MFC 的洋流能发电装置结构示意图

对于该洋流能发电装置,当螺旋桨带动转子旋转时,相当于转子上的凸轮给发电板自由端施加了一个循环往复的位移激励,使得发电板循环往复得发生弯曲形变,发电板长度方向会产生关于时间周期性的应变,因此发电板能输出交流电。用于压电发电的 MFC 一般为 d_{31} 型,其发生应变

的方向为 y 方向。由式(1)可以看出, 电场 E_z 与 y 方向的应变之间的关系为

$$E_z = \frac{\varepsilon_y}{d_{31}} \tag{2}$$

由式(2)可知, 电场 E_z 与 y 方向的应变成正比。对于选定的 MFC, 其厚度值与压电系数 d_{31} 均为常数, 因此发电板的输出电压值与 y 方向的应变成正比。由文献[6]的分析结论可知, 应变大小与激励位移幅值(弯曲形变量)、基底材料的类型和厚度、发电板的结构等因素有关。

因此, 发电板输出电压与激励位移幅值之间的关系为

$$U_o = k u_z \tag{3}$$

式中: U_o 为输出电压值; k 为常数, 与基底材料的类型和厚度、发电板的结构等因素有关; u_z 为发电板自由端 z 方向的位移。

从压电材料的原理可以看出, 其相当于一个电压源串联一个电容。在交变电路中, 电容等效的电抗与频率成反比例。当频率越高时, 相当于电源的内阻越小, 从而最大输出功率越大。由洋流能发电装置的原理可以看出, 其发电性能与激励位移幅值、基底材料的类型和厚度、频率、发电板的结构等因素有关。为了研究发电装置的发电性能, 需要对这些影响因素进行分析。

2 发电性能影响因素分析

洋流能发电装置的发电原理与悬臂梁结构压电发电原理类似, 能够以悬臂梁结构为对象来分析影响发电性能的因素。单晶结构, 以铝材料作为基底时, 使用 ANSYS 软件对其进行建模分析^[16-17], 如图 3 所示。一端固定, 在另一端施加 z 方向位移激励。单晶结构的尺寸参数如表 1 所示。压电材料由压电纤维层($h_1=0.17\text{ mm}$)、铜电极层以及双边聚酰亚胺材料($h_2=h_3=0.065\text{ mm}$)组成, 基底材料为铝材料, 厚度 $h_4=0.5\text{ mm}$ 。由于铜电极层厚度很薄, 对应变的影响较小, 可以忽略铜电极的影响, 不用对其进行建模。当施加 z 轴方向的位移为 3 mm 时, 基底材料发生弯曲形变, 在基底材料的带动下, 使得压电材料产生 y 方向的收缩形变。仿真得到 y 方向的位移如图 4 和 5 所示, y 方向的应变如图 6 所示。可以看出, y 方向的位移沿 z 轴方向符号相同, 因此在压电材料

的 2 个端面上能够产生电压差, 如图 7 所示。

表 1 单晶结构的尺寸参数 mm

长度	宽度	压电纤维层	聚酰亚胺厚度	基底材料
L	W	厚度 h_1	h_2 和 h_3	厚度 h_4
85	57	0.17	0.065	0.5

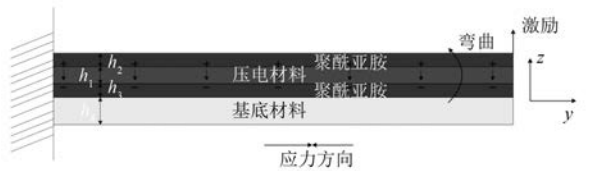


图 3 单晶压电结构模型示意图

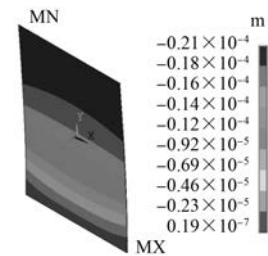


图 4 铝基底(0.5 mm), 施加 z 轴方向 3 mm 位移时, y 方向的位移

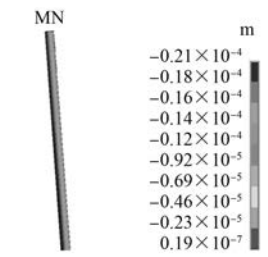


图 5 铝基底(0.5 mm), 施加 z 轴方向 3 mm 位移时, y 方向的位移(z 轴方向放大)

2.1 不同基底材料和厚度对电压输出的影响

为了研究基底选取不同材料和厚度时对输出电压值的影响, 选取了铝、铜以及钢 3 种不同材料对比, 基底厚度选取 $0.25, 0.5, 0.75, 1.0\text{ mm}$ 4 个不同厚度值, 施加位移激励均为 z 轴方向位移 3 mm 。当铝基底的厚度为 0.75 mm 时, 应变如图 8 所示。对比图 8 和图 6, 可以看出, 基底厚度越厚, 应变越大, 输出电压越高。当铜基底的厚度为 0.5 mm 时, 应变如图 9 所示。对比图 9 和图 6 可以看出基底材料的弹性模量越大, 则应变越大,

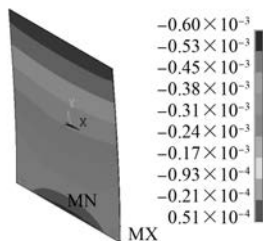


图6 铝基底(0.5 mm),施加 z 轴方向3 mm位移时,应变 y 轴分量

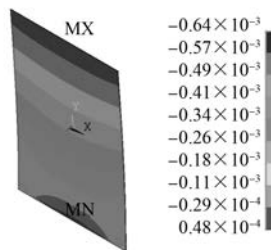


图9 铜基底(0.5 mm),施加 z 轴方向3 mm位移时,应变 y 轴分量

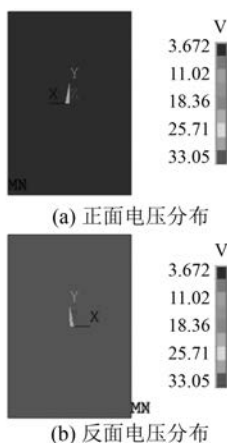


图7 铝基底(0.5 mm),施加 z 轴方向3 mm位移时,电压分布

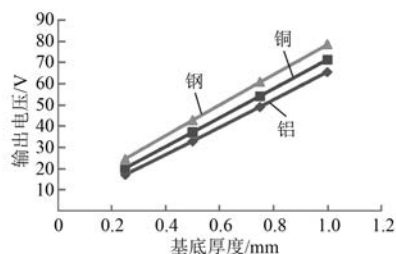


图10 单晶结构,不同基底材料,电压输出值和厚度的关系

致时,所需的驱动力最小。

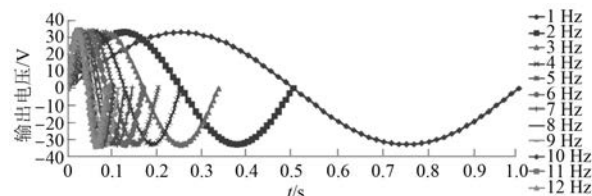


图11 不同频率下的输出电压响应

因此输出电压越高。单晶结构,基底材料不同时,输出电压值与厚度的关系如图10所示。

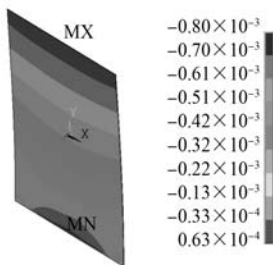


图8 铝基底(0.75 mm),施加 z 轴方向3 mm位移时,应变 y 轴分量

2.2 不同频率下的输出电压响应

当位移激励为正弦激励时,不同频率下的电压输出响应如图11所示。可以看出,在不同频率下,电压幅值基本一致,即当激励为位移激励时,输出电压幅值与频率无关。但产生不同频率的位移,所需的驱动力不同,当频率与固有谐振频率一

2.3 不同位移激励下的输出电压响应

当基底材料分别为铝、铜、钢,基底厚度分别为0.25、0.5、0.75、1.0 mm时,不同位移激励下的输出电压响应如图12所示。可以看出,发电板的电压输出值与位移激励近似成正比例关系。基底厚度越厚、基底材料的弹性模量越大,则输出电压值越高。

2.4 双晶结构与单晶结构电压输出对比

双晶结构示意图如图13所示。可以看出,双晶结构可以输出两路电压,双路输出根据需要可以组成并联或者串联结构。因此,同样的位移激励条件下,双晶结构输出功率更高。施加 z 轴方向的位移为3 mm时,仿真得到 y 方向的位移如图14和15所示。 y 方向的应变如图16和17所示。可以看出,双晶结构,2个压电层的 y 轴分量

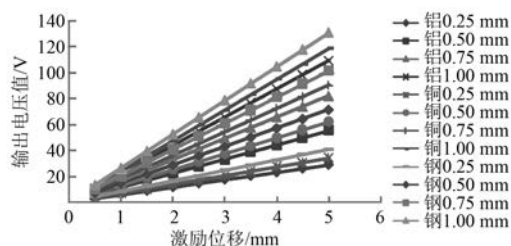


图12 不同位移激励下的输出电压响应

位移或者应变刚好相反。双晶结构,基底材料不同时,电压输出值与厚度的关系如图18所示。可以看出,双晶结构,单路输出电压比单晶结构稍大。由于双晶结构为两路输出,并联或者串联后,输出功率比单晶结构更大,输出功率约为单晶结构的两倍。

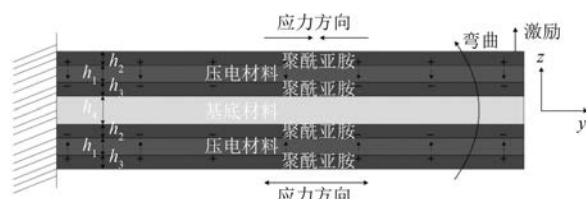


图13 双晶压电结构模型示意图

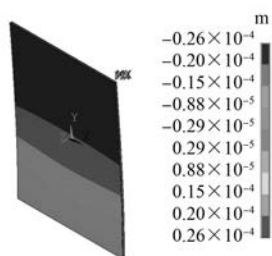


图14 双晶结构,铝基底(0.5 mm),施加z轴方向3 mm位移时,y方向的位移

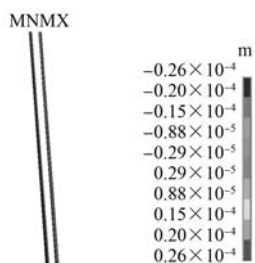


图15 双晶结构,铝基底(0.5 mm),施加z轴方向3 mm位移时,y方向的位移(z轴方向放大)

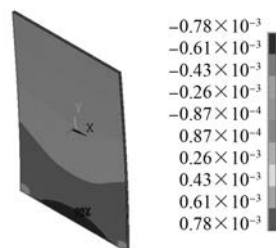


图16 双晶结构,铝基底(0.5 mm),施加z轴方向3 mm位移时,y方向的应变

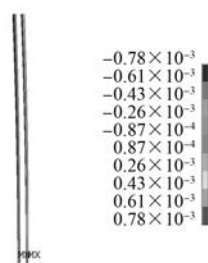


图17 双晶结构,铝基底(0.5 mm),施加z轴方向3 mm位移时,y方向的应变(z轴方向放大)

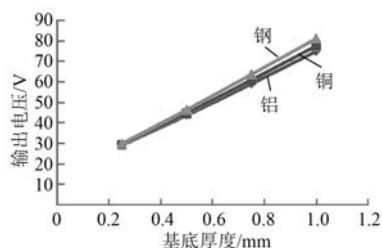


图18 双晶结构,不同基底材料,电压输出值和厚度的关系

2.5 模态分析

考虑到压电材料的弹性模量比基底材料要低得多,则发电板的模态频率主要取决于基底材料。因此,发电板开路 and 短路状态对模态频率的影响较小,可以近似认为开路状态时的模态频率即为发电板工作时的模态频率。

开路状态下,当基底材料分别为铝、铜、钢时,仿真计算得到的一阶模态频率与基底厚度的关系如图19所示。可以看出,基底厚度越厚,模态频率越高。基底厚度相同时,铜基底的模态频率最低,铝基底的模态频率最高,钢基底的模态频率次之,但与铝基底相差较小。这是因为,模态频率与刚度、质量比值的平方根值成正比,铜材料虽然弹性模量大,但其质量密度最大。因此,铜基底的模

态频率最低,铝材料虽然弹性模量最小,但其质量密度也最小,铝基底的模态频率最高。

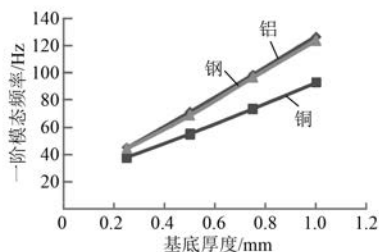


图 19 一阶模态频率

3 基于 MFC 的洋流能发电装置设计

通过查阅文献可知,采用螺旋桨带动转子旋转的传动结构形式的优点有:洋流能发电装置工作在上百米深的海洋环境中,由于洋流流速非常缓慢,螺旋桨捕获洋流能的效率要高于其他捕获能量方式,经过对螺旋桨的流体结构及转速匹配进行优化设计,其效率最高可达约 45%。因此,在上百米深的海洋环境中,采用螺旋桨捕获洋流能的效率要明显优于其他方式。

本文设计的洋流能发电装置结构如图 2。发电装置的转子外圆上具有均匀分布的凸轮,转子输出轴与螺旋桨的轴相连。发电板一端通过定子压板固定住,而另一端在垂直于发电板的方向上可自由运动。与传统的电机相比,发电板和压板及发电装置外壳可以看成电机的定子,而发电板则相当于电机的电枢绕组。当转子旋转时,在转子外圆上的凸轮的带动下,发电板的自由端将做来回运动。因此发电板将产生 z 方向的周期性的弯曲形变,在基底材料的带动下,发电板压电材料进而产生 y 方向的周期性应变,从而在压电材料 2 个端面产生交流电压。

当发电板处于谐振状态时,其发生弯曲形变所需的驱动力最小,此时发电板的发电效率最高。因此,应使得发电板的工作频率应尽可能地接近发电板一阶模态频率。

发电装置转子的工作转速由螺旋桨的转速决定,当螺旋桨的转速为 500 r/min 时,螺旋桨捕获洋流能的效率最高。因此,设计的转子工作转速为 500 r/min。

根据前文的分析结论,双晶结构的电路输出

功率为单晶结构的两倍。为了获得更大的功率输出,发电板采用双晶结构。

转子上一共有两排凸轮,每排 12 个凸轮,对应的发电板一共 24 块。每个凸轮半径约 4.5 mm,转子旋转时,凸轮带动压电板自由端做近似的简谐运动,简谐运动的幅值约为 3 mm。转子每转动一圈,发电板自由端简谐运动的次数为 12,因此发电板输出交流电的频率为转子机械旋转频率的 12 倍。当转子转速为 500 r/min 时,发电板输出交流电的频率为 100 Hz。

由于发电板 MFC 的最大负工作电压为 60 V,为了使发电板能安全可靠地工作,在 3 mm 的位移激励下,需要保证发电板的最大输出电压不超过 60 V。同时,为了使发电板一阶模态频率尽可能地接近发电板的工作频率,基底应选择合适的材料与厚度。由模态分析可知,同样基底厚度下,铝和钢基底的一阶模态频率比铜基底高,应采用铝或者钢材料作为发电板的基底。另一方面,由于铝材料杨氏模量和质量密度均比钢材料小,其发生弯曲所需的驱动力更小,为了减轻发电装置的重量以及提高发电效率,需要采用铝材料。当基底材料为铝材料,基底厚度为 0.76 mm,由图 18、图 19 可以看出,位移激励为 3 mm 时,发电板的输出电压值约为 60 V;一阶模态频率约为 99.8 Hz,此时发电板的工作频率与发电板的一阶模态频率相接近。

4 基于 MFC 的洋流能发电装置发电性能分析

4.1 压电发电的等效电路模型

压电发电材料的等效电路模型如图 20 所示。可以看成电压源串联一个电容构成^[6-7]。 U_0 为开路电压, C_b 为压电材料的电容值,由压电效应仿真得到仿真值为 450 nF。由于仿真模型认为压电材料是连续的,与实际有所差别,仿真得到的电容值比产品手册上给出的电容值参考值大,偏大 343 nF。

根据等效电路,由电路分析很容易得出,当负载电阻值与压电发电材料的等效内阻抗相等时,负载上得到的功率达到最大值,即:

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{\omega_n C_b} \quad (4)$$

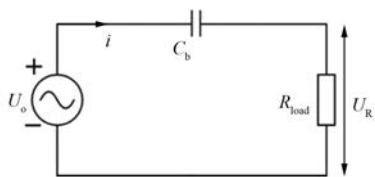


图 20 压电发电材料的等效电路模型

设计时,应尽可能使负载电阻值与压电发电材料的等效内阻抗相等。但实际中,由于转速变化导致频率会变化,偏离设计频率,负载电阻值与压电发电材料的等效内阻抗不再相等。此时,负载上得到的功率为

$$P_R = \frac{\omega_n^2 C_b^2 R}{1 + \omega_n^2 C_b^2 R^2} U_{\text{eff}}^2 \quad (5)$$

以单晶结构,铝基底厚度为 0.5 mm,位移激励幅值为 3 mm 为例分析。此时最大开路电压值为 33.05 V,即有效值 U_{eff} 为 23.37 V。假设设计频率为 10 Hz,则根据式(4)和式(5)可得,最优负载电阻值为 46.4 k Ω ,最大输出功率为 5.885 mW。固定负载电阻值为 46.4 k Ω 保持不变,负载上得到的功率与频率的关系如图 21 所示。其中, f_n 为 10 Hz。可以看出,随着频率的升高,负载上得到的功率越来越大。从式(5)和图 21 还可以看出,输出功率极限值为 11.77 mW。

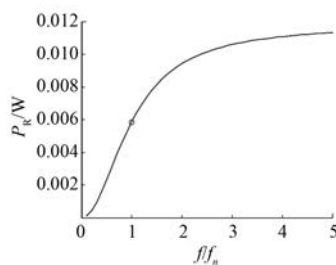


图 21 固定负载电阻不变,负载得到的功率与频率的关系

4.2 发电性能分析

24 块发电板,共 48 路输出,采用并联结构形式输出。根据电容并联计算公式,24 块发电板等效的电容值为 16.464 μF 。

4.2.1 电阻性负载

当负载为电阻负载,转速为 500 r/min 时,根据式(4)和式(5)可得,最优负载电阻值为 96.67 Ω ,负载端得到的最大功率为 9.31 W。输出功率与负载电阻值的关系如图 22 所示。可以看

出,当负载电阻为 96.67 Ω 时,输出功率最大,与计算公式相吻合。固定负载电阻不变,输出功率与频率(转速)的关系如图 23 所示。可以看出,频率(转速)越高,输出功率越大,极限功率为 18.62 W。当频率(转速)变化时,最优负载电阻值、最优负载电阻时的输出电流和功率如图 24 所示。可以看出,最优负载电阻与频率成反比,最优负载电阻时的输出电流和功率与频率成正比。由此说明,当负载为电阻负载时,发电装置的最大输出功率与频率(转速)成正比例关系。

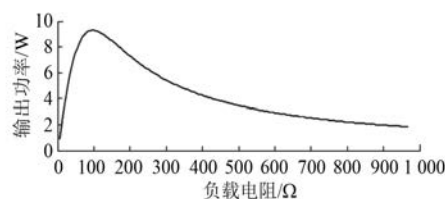


图 22 固定转速,输出功率与负载电阻值的关系

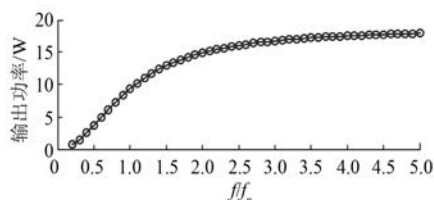


图 23 固定负载电阻值,输出功率与频率的关系

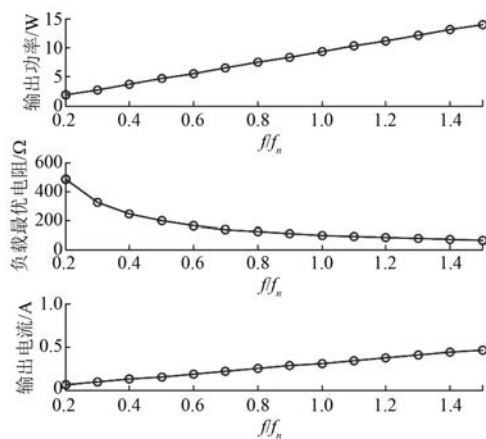


图 24 最优负载电阻值、最优负载电阻时的输出电流和功率与频率的关系

4.2.2 整流电阻性负载

当负载为整流负载,转速为 500 r/min,整流桥直流侧负载电阻为 96.67 Ω 时,由 MATLAB/

Simulink 仿真得到的负载电流、负载电压、发电板电流波形如图 25 所示。改变负载电阻值, 仿真得到的输出功率与负载电阻值的关系与图 22 相同。由此说明, 当负载为整流负载时, 最优负载电阻值和最大输出功率与前文分析结论相同。

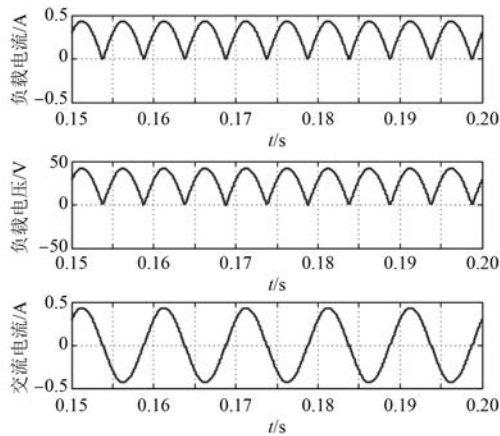


图 25 整流电阻负载, 负载电流、负载电压、发电板电流波形

4.2.3 电池负载

当负载为电池负载时, 发电装置通过不控整流桥对电池进行充电。当转速为 500 r/min, 电池电压为 30 V, 电池内电阻为 0.1 Ω 时, 由 MATLAB/Simulink 仿真得到的充电电流、负载电压、发电板电流波形如图 26 所示。改变电池电压值, 仿真得到的平均充电电流、充电功率与电池电压值之间的关系如图 27 所示。可以看出, 当电池电压为 30 V (最大开路电压的一半) 时, 充电功率最大, 为 5.55 W, 能满足充电功率的要求。当电池电压值保持为 30 V 不变时, 充电电流平均值和

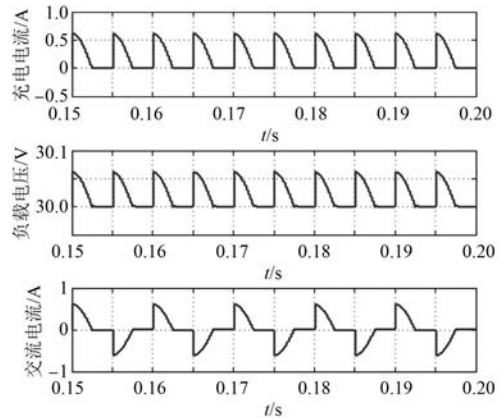


图 26 电池负载, 充电电流、负载电压及发电板电流波形

充电功率与频率之间的关系如图 28 所示。可以看出, 充电电流平均值和充电功率与频率成正比。由此说明, 当负载为电池负载时, 最大充电功率与频率 (转速) 成正比例关系, 与前文负载为电阻时的分析结论相同。需要说明的是, 电池电压可能与发电装置最大开路电压的一半不相等。

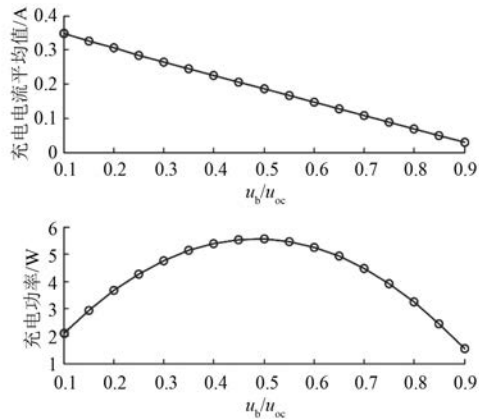


图 27 平均充电电流、充电功率与电池电压之间的关系 (u_b/u_{oc} 电池电压与开路电压幅值的比值)

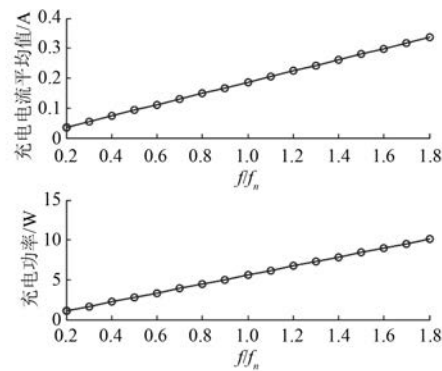


图 28 平均充电电流、充电功率与频率之间的关系

与文献[7]相似, 此时为了获得最大充电功率, 需要在整流桥与电池之间增加一个 Buck 电路, 如图 29 所示, 通过调节占空比使得电压与最大开路电压的一半相等。

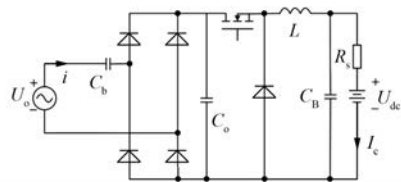


图 29 发电装置, 电池充电电路示意图

5 结 语

本文设计了一种基于 MFC 的洋流能发电装置,并分析了其发电性能。首先以悬臂梁结构为分析对象,分析了影响发电性能的因素,研究了基底材料的类型和厚度、频率值、位移激励幅值、单晶和双晶结构对发电性能的影响规律。基于上述分析结论,设计了一种洋流能发电装置。最后,分析了该发电装置的发电性能。分析结果表明,该发电装置在转子转速为 500 r/min 的工作条件下,最大输出功率为 9.31 W,能满足功率要求。

【参考文献】

- [1] FANG H, LIU J, XU Z, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator for low frequency vibration energy harvesting[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(3): 732.
- [2] LIU J, FANG H, XU Z, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39(5): 802.
- [3] ZHANG H, AFZALUL K. Design and analysis of a connected broadband multi-piezoelectric-bimorph-beam energy harvester[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(6): 1016.
- [4] SONG H, CHOI Y, PUREKAR A S, et al. Performance evaluation of multi-tier energy harvesters using macro-fiber composite patches[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(17): 2077.
- [5] YAN Z. Modeling of a piezoelectric/piezomagnetic nanoenergy harvester based on two dimensional theory [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 27(1). doi: 10.1088/1361-665X/aa9bbd.
- [6] ZHANG L. Analytical modeling and design optimization of piezoelectric bimorph energy harvester [D]. Tuscaloosa: The University of Alabama, 2010.
- [7] OTTMAN G K, HOFMANN H F, BHATT A C, et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 669.
- [8] 陈扬东, 龚俊杰, 吉灵龙, 等. 新型风力压电发电装置设计及发电性能[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 515.
- [9] 陈立, 李茂军, 王鼎湘, 等. 基于压电效应的风力发电方法研究[J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 361.
- [10] 欧阳嘉艺, 弓新洁, 闫泽霖, 等. 新型波浪压电发电装置研究及改进[J]. 水电与新能源, 2017(8): 75.
- [11] 崔宜梁, 王海峰, 段爱波, 等. 基于 ANSYS Workbench 的柔性压电发电装置的仿真分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2016, 29(4): 58.
- [12] Smart Material Company. MFC datasheet [EB/OL]. [2011-07-11]. <http://www.smart-material.com>.
- [13] PRASATH S S, AROCKIARAJAN A. Effective electromechanical response of macro-fiber composite (MFC): analytical and numerical models[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77: 98.
- [14] 黄丹丹, 陈勇. 压电纤维复合材料有限元模拟及其试验研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(2): 234.
- [15] 谢焰. MFC 压电纤维复合材料的制备及电输出性能研究[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [16] 刘永刚. 基于 ANSYS 的交叉指形电极压电纤维复合材料仿真研究[M]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [17] 胡世军, 杨志云, 李小强. 基于 ANSYS 的悬臂梁压电陶瓷单晶片发电特性仿真分析[J]. 机械制造, 2017, 55(1): 55.

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |