第 49 卷第 4 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 4
2021 年 4 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　April，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200548

梯度结构压电纤维复合材料动态能量采集仿真

杨　雄[1]，沈　杰[2]，张瑶瑶[1]，张　威[3]，蔡　辉[3]，周　静[2]

(1. 湖北工程学院化学与材料科学学院，湖北 孝感 432000；
2. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；3. 中国人民解放军 96901 部队)

摘　要：采用多物理场仿真软件建立梯度结构压电纤维复合材料能量采集动态仿真模型，研究了叉指电极结构、压电纤维复合结构层参数以及外加负载等对能量采集特性的影响及相关规律。结果表明：在相同宏观压电层结构参数条件下，梯度结构压电纤维复合材料可获得比传统结构更高的输出电压；保持梯度结构参数不变的前提下，聚合物弹性模量越小输出电压越高，随着压电纤维体积分数的增加输出电压先增加后降低，聚合物弹性模量越大则获得最大输出电压时的压电纤维体积分数也越高；合理调节系统的机械载荷频率和负载电阻，可以有效增强能量采集模型的电输出性能。

关键词：梯度结构；压电纤维；复合材料；能量采集；动态仿真
中图分类号：TN384　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)04–0659–07
网络出版时间：2021–03–17

Simulation of Dynamic Energy Harvesting of Gradient Structure Piezoelectric Fiber Composites

YANG Xiong[1], *SHEN Jie*[2], *ZHANG Yaoyao*[1], *ZHANG Wei*[3], *CAI Hui*[3], *ZHOU Jing*[2]

(1. School of Chemistry and Materials Science, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, Hubei, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Unit 96901 of the People's Liberation Army of China)

Abstract: A gradient structure piezoelectric fiber composite dynamic simulation model for energy harvesting was built using a multiphasics simulation software, and the effects of the interdigitated electrode structure, applied load and piezoelectric active layer parameter on the energy harvesting behavior were studied. The results show that under the same active layer structure parameters, gradient structure piezoelectric fiber composites can obtain larger output voltage than traditional structures. Under the fixed gradient structure parameters, the polymer elastic modulus is smaller, the higher the output voltage. And the output voltage increases first and then decreases as the volume fraction of the piezoelectric fiber increases. The larger the elastic modulus of the polymer, the higher the volume fraction of the piezoelectric fiber when the maximum output voltage is obtained. Reasonable adjustment of the mechanical load frequency and load resistance of the system can effectively enhance the electrical output performance of the energy harvesting model.

Keywords: gradient structure; piezoelectric fiber; composites; energy harvesting; dynamic simulation

压电材料是一类具备机械能与电能之间互相转换特性的智能材料，利用压电材料制作成自供电电源，可以采集自然环境中未被利用的机械能转化成可被利用的电能，为特殊环境中的微小型器件供电。相较于传统的电磁式[1–2]和静电式[3–4]等机械能采集方式，压电式[5–7]能量采集装置不受电磁干扰、结构简单、对环境依赖性较低、能量密度和集成度高等优点[8]，是一类可循环利用的新型绿色电源，长期以来受到众多研究者的关注。

压电材料是能量采集设备的核心部分，其结构与性能参数极大影响着电输出性能和能量采集效率，为了满足压电能量采集的多样化需求，国内外

收稿日期：2020–07–23。　修订日期：2020–08–22。
基金项目：国家自然科学基金项目(51572205)；湖北省自然科学基金(2019CFB237)，孝感市自然科学计划(XGKJ2019010054)。
第一作者：杨　雄(1980—)，男，博士，副教授。
通信作者：周　静(1970—)，女，博士，教授。

Received date: 2020–07–23.　**Revised date:** 2020–08–22.
First author: YANG Xiong (1980–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: yangx@hbeu.edu.cn
Correspondent author: ZHOU Jing (1970–), female, Ph.D., Professor.
E-mail: zhoujing@whut.edu.cn

诸多学者和研究机构在能量采集用压电材料的设计和制备等方面做出了大量的工作。可以应用于压电能量采集的材料种类众多，其中压电复合材料[9–10]克服了单一的压电晶体[11–12]与压电陶瓷[13–14]材料本征的脆性和压电聚合物[15]与压电陶瓷薄膜[16]等材料在性能上存在不足的问题，同时具备高压电性和柔韧性好等优良特性[17–18]，特别适宜于可穿戴式柔性能量采集设备[19]。压电复合材料类型众多，性能表现各异，压电纤维复合材料[20–21]由于其优异的单向性能和可设计性而备受关注，其中，以矩形截面压电陶瓷纤维为功能相的 MFC (Macro fiber composite)结构压电纤维复合材料，可以充分利用陶瓷纤维轴向压电性能，提高电输出性能，是压电能量采集领域研究的热点。

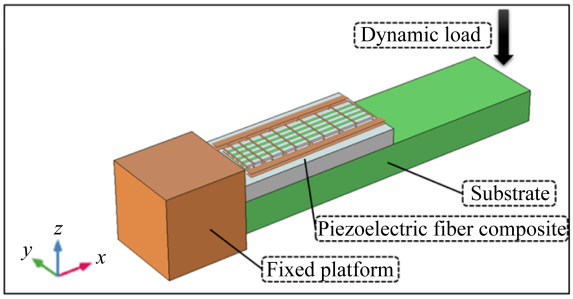
使用 MFC 进行压电能量采集时最常用的结构为悬臂梁，而悬臂梁结构振动过程中压电材料的不同位置受力不均匀，影响压电材料性能的有效发挥，对复合材料进行梯度化设计可以在一定程度上客服此问题，提高能量采集效率。

本研究以 MFC 结构压电纤维复合材料模型为基础，在前期工作[22]的基础上，建立梯度结构压电纤维复合材料能量采集仿真模型，在动态机械载荷条件下，探索了材料结构和性能参数对梯度结构复合材料电输出性能的影响及规律，为梯度结构压电纤维复合材料的设计、制备及应用提供参考。

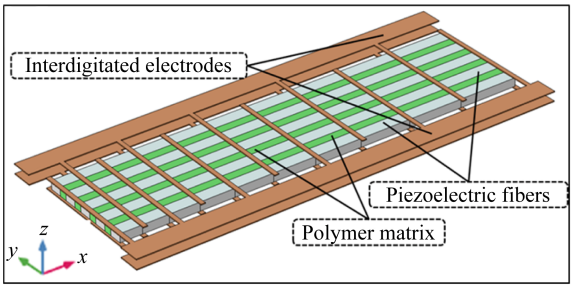
1 多物理场建模

多物理场建模过程中主要涉及固体力学和静电 2 个模块，二者进行多物理场耦合即产生压电效应，外加机械载荷施加于悬臂梁结构而产生弯曲振动，悬臂梁结构将机械载荷以应力的形式传输给压电材料，利用正压电效应将外加的机械载荷转变成可输出的电能。压电能量采集模型由固定台、压电材料和基板等 3 个部分组成，其中压电材料附着于基板上，基板一端固定于固定台上形成悬臂梁结构，其结构示意图如图 1a 所示。模型中压电材料为梯度结构压电纤维复合材料，包括压电纤维、聚合物基体和柔性叉指电极 3 个部分组成，其中相邻叉指电极之间的间距沿 X 轴方向呈梯度变化，梯度结构复合材料结构如图 1b 所示。

压电能量采集模型中基板的尺寸固定为长×宽×高=54 mm×3 mm×1 mm，基板弹性模量固定为 10 GPa。压电材料与基板左侧对齐。本研究中所涉及结构参数包括叉指电极、压电纤维以及聚合物基



(a) Cantilever structure



(b) Gradient piezoelectric fiber composites

图 1 压电能量采集模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric energy harvesting model

体等相关的结构参数，其中压电纤维的长度和压电层的总宽度保持不变，建立模型所需结构参数对应位置如图 2 所示，其名称及相应标识符号和初始值如表 1 所示。梯度结构压电纤维复合材料中电极间距梯度与其他电极参数的关系见式(1)：

$$\Delta S = S_{n+1} - S_n = \frac{L_{\text{cer}} - W_{\text{ide}} - (N_{\text{ide}} - 1) \times S_0}{(N_{\text{ide}} - 1) \times (N_{\text{ide}} - 2)} \quad (1)$$

其中：ΔS 为电极间距梯度；S_{n+1} 和 S_n 分别表示相邻的电极间距；S_0 为初始电极间距；L_{cer} 为压电纤维总长度；W_{ide} 为电极宽度；N_{ide} 为叉指电极数量(对数，Z 轴方向 2 个对齐电极为 1 对)。

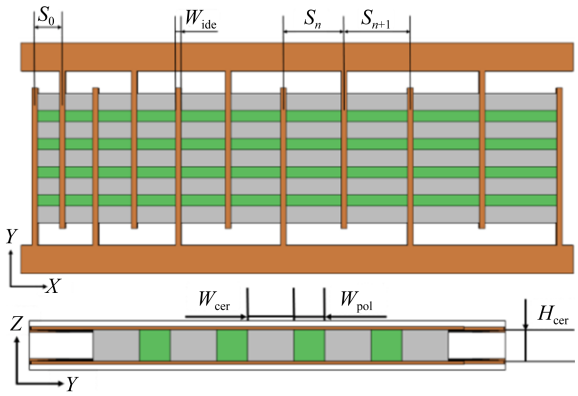


图 2 梯度结构压电复合材料的电极及组元结构参数

Fig. 2 Electrode and component structure parameters of gradient structure piezoelectric fiber composites

表 1　梯度结构压电纤维复合材料结构参数的标识符号和初始值

Table 1　Identification symbols and initial values of structural parameters of gradient composites

Structure parameter	Items	Symbol	Initial value
Interdigitated electrode	Initial electrode spacing/mm	S_0	0.50
Interdigitated electrode	Electrode width/ mm	W_{ide}	0.01
Interdigitated electrode	Number of electrodes	N_{ide}	11.00
Piezoelectric fiber	Length/mm	L_{cer}	18.00
Piezoelectric fiber	Width/mm	W_{cer}	0.20
Piezoelectric fiber	Height/mm	H_{cer}	0.20
Piezoelectric layer	Piezoelectric fiber volume fraction/%	V_{fiber}	40.00
Piezoelectric layer	Piezoelectric layer width/mm	W_{piezo}	3.00

梯度结构压电纤维复合材料模型的建立过程中涉及 3 种材料，分别为压电纤维采用 PZT-5H 体系，叉指电极的导电相采用金属 Cu，聚合物基体采用环氧树脂，其相应性能参数如表 2 所示，压电相压电应力常数矩阵如式(2)所示。

$$e\begin{bmatrix}0&0&0&0&e_{15}\\0&0&0&e_{24}&0\\e_{31}&e_{32}&e_{33}&0&0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&17.03\\0&0&0&17.03&0\\-6.62&-6.62&23.24&0&0\end{bmatrix} \tag{2}$$

表 2　梯度结构压电纤维复合材料组元性能参数

Table 2　Component performance parameters of gradient structure piezoelectric fiber composite

Material type	Density/ (kg·m^{-3})		Dielectric constant	Elastic stiffness coefficient/ GPa				
PZT-5H	7 750	ε_{11}	ε_{33}	c_{11}	c_{12}	c_{33}	c_{44}	c_{66}
	1 960	1 700	1 430	12	7.5	11	2.1	2.3
Polymer			5			1		
Cu	8 960					120		

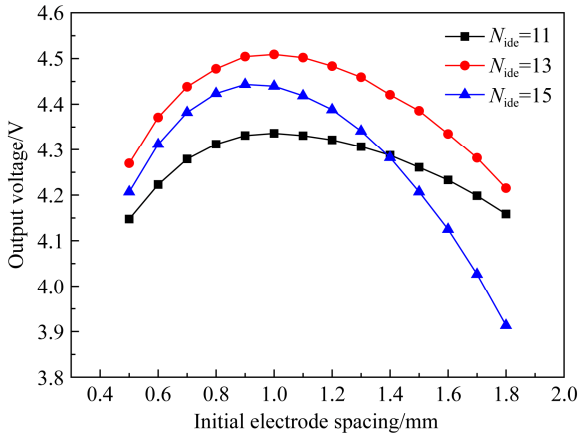
多物理场模型的建立基于均匀场理论，模型为完整梯度结构压电纤维复合材料，同一电极平面上相邻叉指电极的极性相反，模型中压电纤维均沿 X 轴方向极化，且任意电极两侧的压电纤维极化方向相反。能量采集模型中施加的机械载荷为沿 Z 方向的动态体载荷，载荷设定为悬臂梁结构总质量乘以振动加速度(默认为加速度为 1 倍重力加速度，即 1g=9.8 m/s^2)，初始机械载荷频率 25 Hz，初始负载电阻 1×10^8 Ω。主要研究固定复合材料宏观尺寸和振动加速度时，复合材料电极结构、压电纤维尺寸、聚合物基体的机械性能以及机械负载频率和负载电阻等外加负载对能量采集模型输出电性能的影响。

2　结果与讨论

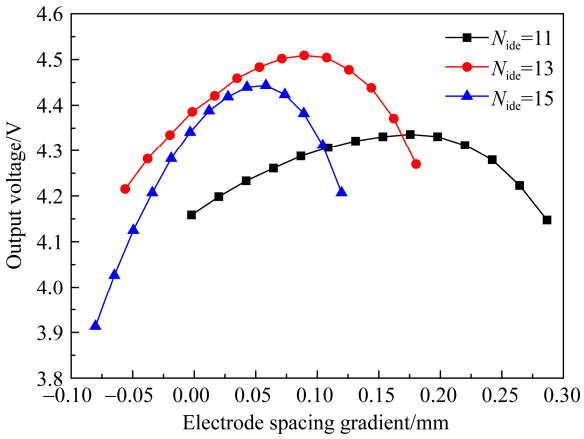
2.1　叉指电极结构的影响

叉指电极结构参数是压电纤维复合材料中结构梯度的来源，为了优化设计梯度结构压电纤维复合材料，将固定压电活性层性能参数和宏观尺寸(长×宽)等结构参数，探索在初始机械载荷频率和负载电阻时，电极数量、初始电极间距和电极间距梯度等参数对压电能量采集装置动态输出电压。

图 3 为叉指电极数量固定时初始电极间距以及相应电极间距梯度对输出电压的影响。从图 3a 可以看出，电极数量固定时，输出电压随着初始电极间距的增加而呈现先上升后下降的趋势。结合式(1)可



(a) Initial electrode spacing



(b) Electrode spacing gradient

图 3　初始电极间距和电极间距梯度的影响

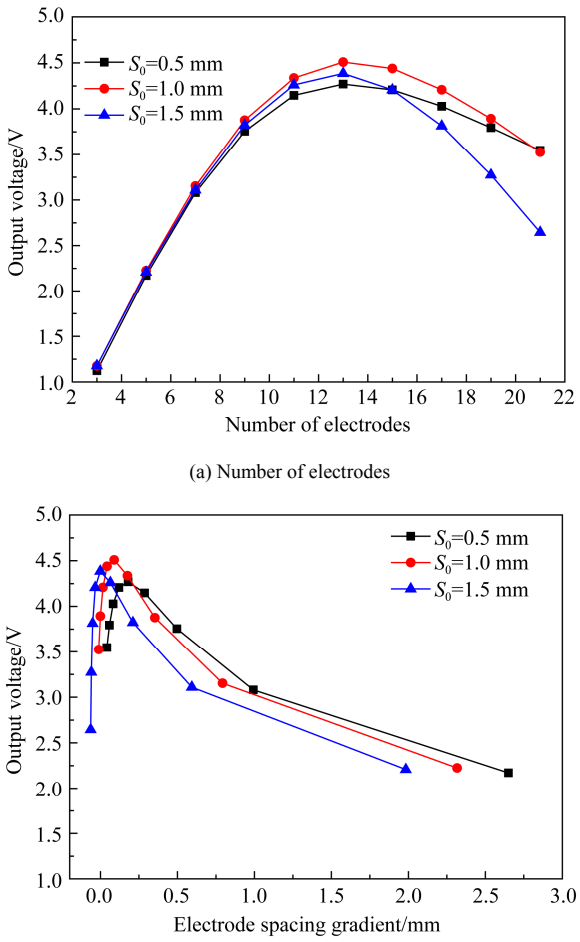
Fig. 3　Effect of initial electrodes spacing and electrode spacing gradient on output voltage

知，叉指电极间距的梯度值与叉指电极数量和初始电极间距三者之间相互关联，电极数量固定情况时，电极间距的梯度值随着初始电极间距的调整而变化，电极间距梯度为 0 时，压电纤维复合材料的电极结构变成传统的非梯度结构。从图 3b 可以看出，输出电压随电极间距梯度的增加均呈先增加后降低的趋势，且电极数量越小则获得最大输出电压时的电极间距梯度会更大。结合图 3a 可以看出，电极间距梯度随初始电极间距的降低从负梯度向正梯度方向变化，且获得最大输出电压时的电极间距梯度为正梯度，电极数量固定的情况下，梯度结构压电纤维复合材料可以获得比传统非梯度结构更高的输出电压。

图 4 为叉指电极初始电极间距固定时电极数量对输出电压的影响。从图 4a 可以看出，叉指电极初始间距固定时，输出电压均随叉指电极数量的增加而先上升后下降。当电极数量相对较小时，电极初始间距的影响不大，当电极数量逐渐增加时，不同电极初始间距条件下的输出电压差距不断变大。从图 4b 可以看出，随着电极间距梯度的上升，输出电压先快速升高后缓慢下降，获得最大输出电压时的电极间距梯度均比较小，梯度结构(电极间距梯度不等于 0)压电纤维复合材料可以获得的输出电压要高于传统的非梯度结构(电极间距梯度为 0)。压电材料电能输出来源于悬臂梁结构的弯曲振动，而悬臂梁弯曲所产生的应力从固定端到自由端不断减弱，使得压电材料沿着 X 轴向不同位置输出电压也不同，同时叉指电极间距的大小也对压电材料输出电压产生影响，将压电材料所受应力不同的区间采用不同的电极结构设计方案可使应力较大区域的输出电压更高。由式(1)可知，叉指电极初始间距固定时，电极数量越大，电极间距梯度越小，结合图 3 和图 4 可以得出，合理调节初始电极间距和电极间距梯度可获得最优化的电压输出方案，表 3 为电极数目 N_{ide} 或者初始电极间距 S_0 选定的前提下，获得最大输出电压 V_{max} 时的梯度结构参数。

2.2 压电纤维复合层的影响

梯度结构压电纤维复合材料宏观几何参数固定的情况下，对电输出性能影响主要来源于压电纤维复合层所受激励振动的情况，而压电纤维复合层的振动状态主要受压电纤维的体积分数、压电纤维与聚合物纤维的宽度以及聚合物基体的弹性模量等参数的影响。



(a) Number of electrodes

(b) Electrode spacing gradient

图 4 电极数量和电极间距梯度的影响

Fig. 4 Effect of number of electrodes and electrode spacing gradient on output voltage

表 3 获得最大输出电压时的梯度结构参数

Table 3 Parameters of gradient structure at the peak values of output voltage

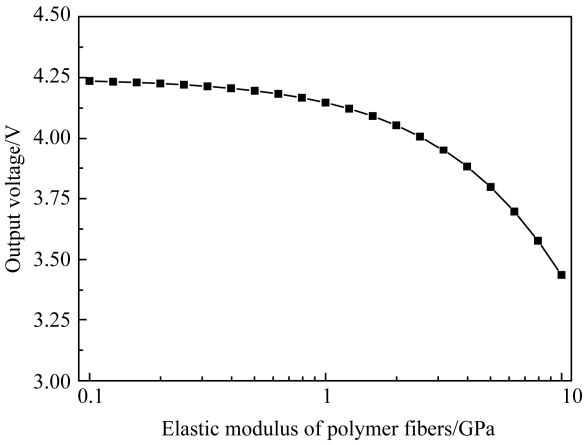
Preconditions	N_{ide}	S_0/mm	ΔS/mm	V_{max}/V
N_{ide} is fixed	11	1.0	0.176 0	4.34
N_{ide} is fixed	13	1.0	0.890 0	4.51
N_{ide} is fixed	15	0.9	0.580 0	4.44
S_0 is fixed	13	0.5	0.180 0	4.30
S_0 is fixed	13	1.0	0.890 0	4.51
S_0 is fixed	13	1.5	–0.001 5	4.38

压电纤维体积分数可以通过改变压电纤维复合层中压电纤维的数量和宽度进行调整，探索聚合物基体弹性模量、压电纤维宽度以及压电纤维体积分数与输出电压的影响，压电纤维体积分数计算方法可参考式(3)：

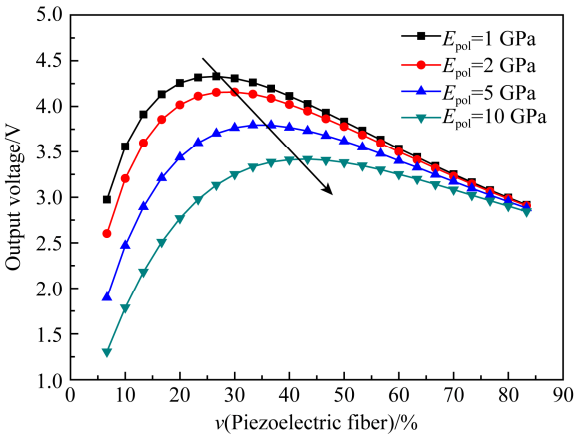
$$V_{fiber}=\frac{N_{fiber}\times W_{cer}}{W_{piezo}} \tag{3}$$

其中：V_{fiber} 为压电纤维体积分数；W_{piezo} 为压电层总宽度；N_{fiber} 为压电层中压电纤维根数；W_{cer} 为单根压电纤维的宽度。

图 5 为聚合物基体弹性模量对输出电压的影响，其中压电纤维宽度 0.1 mm，其他结构参数和外加负载均使用初始值，变量仅为复合材料中聚合物基体的弹性模量。从图 5a 可以看出，随着聚合物基体弹性模量的增加，输出电压逐渐下降，基体弹性模量越高，输出电压的变化越明显。从图 5b 可以看出，聚合物基体弹性模量不同的情况下，随着压电纤维体积分数的增加，输出电压均遵循先升高后降低的趋势，聚合物弹性模量越大输出电压相对则越低，且获得最高输出电压时的压电纤维体积分数也随之不断增加。聚合物弹性模量的增加会提升复合材料的平均弹性模量，从而抑制悬臂梁结构所承受的激励振动，因此聚合物弹性模量的增加会提高输出降低输出电压；压电纤维体积分数的增加会同时



(a) Elastic modulus



(b) Piezoelectric fiber volume fraction

v is volume fraction.

图 5　聚合物弹性模量的影响

Fig. 5　Effect of piezoelectric fiber volume fraction and matrix elastic modulus on output voltage

提升复合材料的平均弹性模量和平均密度，而平均密度的提升将增强悬臂梁结构所承受的激励振动，这种抑制和增强将随着压电纤维体积分数的调整而达到平衡，从而获得最佳的电压输出方案，表 4 所示为聚合物基体弹性模量 E_{pol} 改变时的最大输出电压 V_{max} 及对应的压电纤维体积分数 V_{fiber}。

表 4　最大输出电压时的压电纤维体积分数和聚合物弹性模量

Table 4　Elastic modulus of polymer fiber and piezoelectric fiber volume fraction at the peak values of output voltage

E_{pol}/GPa	V_{fiber}/%	V_{max}/V
1	26.7	4.33
2	30.0	4.16
5	33.3	3.80
10	43.3	3.42

为了进一步探索压电纤维体积分数的影响，将压电宽度分别固定为 0.1~0.3 mm，结合式(3)调节压电纤维体积分数范围为 6.7%~93.3%，其他结构参数均使用初始值，研究压电纤维体积分数对输出电压的影响，结果如图 6 所示。

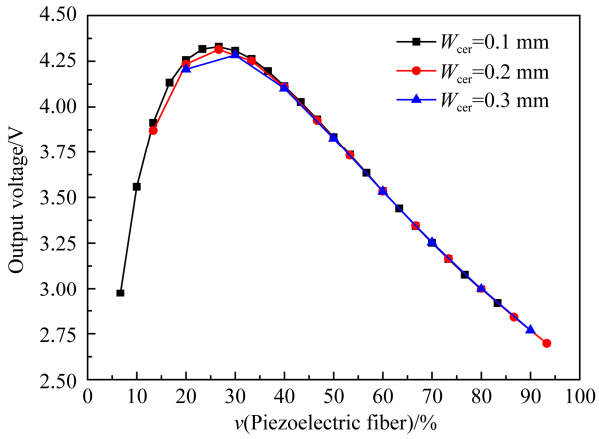


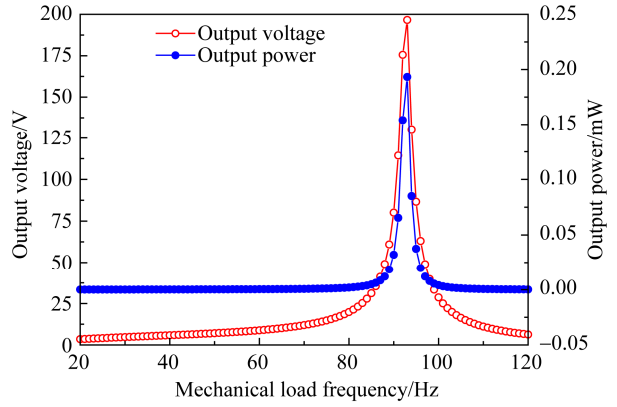
图 6　压电纤维体积分数对输出电压的影响

Fig. 6　Effect of piezoelectric fiber volume fraction on output voltage

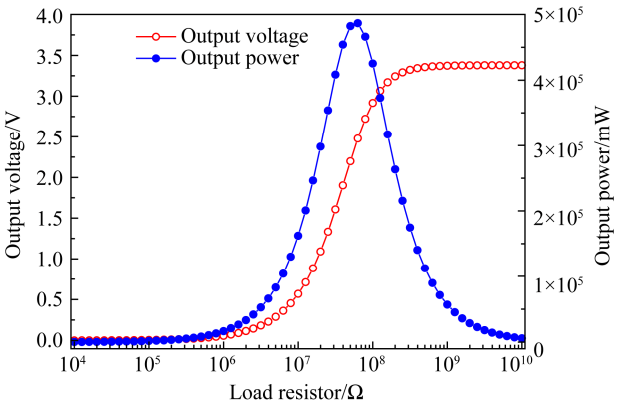
由图 6 可以看出，随着压电纤维体积分数的不断提高，输出电压均呈现先增加后降低的趋势，且压电纤维宽度不同时，输出电压随压电纤维体积分数改变而变化的趋势均保持一致，压电纤维体积分数约为 26.7%时可获得最大输出电压 4.33 V，压电纤维复合层宽度固定化情况下，可以通过改变压电纤维宽度和压电纤维数量可以大范围精确地调节复合材料中纤维的体积分数及相应的输出电压。

2.3 外加负载的影响

图 7 为负载频率和负载电阻对输出电压和输出功率的影响，模型中结构与性能参数均采用初始值。从图 7a 可以看出，机械载荷频率较低时，输出电压和输出功均随频率的增加而缓慢上升，当频率接 90 Hz 时则会迅速增加，并于 93 Hz 处获得最大输出电压和输出功率，随后快速下降并逐渐趋于平缓，此频率对应为悬臂梁系统的谐振频率，悬臂梁结构振动时的变形很大，可以极大增强压电相的电输出效果。从图 7b 可以看出，随着负载电阻的不断增加，输出电压不断增加，负载超过 1×10^8 Ω 后逐渐趋于平缓，能量采集模型的输出功率则先增加后降低，负载约 6.3×10^7 Ω 时可获得最大输出功率。结合以上研究结果可知，合理调节系统的机械载荷频率和负载电阻，可以有效增强能量采集模型的电输出性能。



(a) Mechanical load frequency



(b) Load resistance

图 7 外加负载对电输出性能的影响

Fig. 7 Effect of applied load on the output voltage and power

3 结论

以 MFC 结构压电纤维复合材料为基础，采用多物理场仿真软件建立了梯度结构压电纤维复合材料动态能量采集模型，探索了复合材料电极结构、压电纤维尺寸、聚合物基体的机械性能以及机械载荷频率和负载电阻等外加负载对能量采集性能的影响。固定复合材料宏观尺寸的前提下，调节叉指电极初始间距和电极的数量可以使压电纤维复合材料获得不同的结构梯度，调节初始电极间距和电极间距梯度可使梯度结构压电纤维复合材料获得比传统 MFC 结构更高的电输出性能；复合纤维复合层中聚合物基体的弹性模量和压电纤维体积分数均对输出电压影响很大，聚合物弹性模量越小则获得输出电压越高，且获得最大输出电压时的压电纤维体积分数也随之降低；机械负载频率和负载电阻等外加负载对能量采集模型输出电性能的影响较大，负载电阻为 6.3×10^7 Ω 时，在谐振频率附近加载机械载荷时，可以有效增强梯度结构压电纤维复合材料的电输出性能。

参考文献:

[1] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. A coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching[J]. Smart Mater Struct, 2009, 18(9): 095029.

[2] ZHANG Q, LIANG Q, ZHANG Z, et al. Electromagnetic shielding hybrid nanogenerator for health monitoring and protection[J]. Adv Funct. Mater., 2018, 28(1): 1703801

[3] WANG Z L, WANG A C. On the origin of contact-electrification[J]. Mater Today, 2019, 30: 34–51.

[4] SUZUKI Y, MIKI D, EDAMOTO M, et al. A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications[J]. J Micromech Microeng, 2010, 20(10): 104002.

[5] 郑木鹏, 侯育冬, 朱满康, 等. 能量收集用压电陶瓷材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(3): 359–366.
ZHEN Mupeng, HOU Yudong, ZHU Mankang, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(3): 359–366.

[6] SODANO H A. Comparison of Piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries[J]. J. Intell Mater Syst Struct, 2005, 16(10): 799–807.

[7] RENATO C, RONGALA U, CAMBONI D, et al. Piezoelectric energy harvesting solutions[J]. Sensors, 2014, 14(3): 4755–4790.

[8] SAADON S, SIDEK O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters[J]. Energy Convers Manage, 2011, 52(1): 500–504.

[9] ZHANG Y, SUN H, JEONG C K. Biomimetic porifera skeletal structure of lead-free piezocomposite energy harvesters[J]. ACS Appl Mater Interf, 2018, 10: 35539–35546.

[10] BOWEN C R, TOPOLOV V Y, ISAEVA A N, et al. Advanced composites based on relaxor-ferroelectric single crystals: from electromechanical coupling to energy-harvesting applications[J]. Cryst Eng Comm, 2016, 18(32): 5986–6001.

[11] HWANG G T, PARK H, LEE J H, et al. Self-powered cardiac pacemaker enabled by flexible single crystalline PMN-PT piezoelectric energy harvester[J]. Adv Mater, 2014, 26(28): 4880–4887.

[12] ZENG Z, XIA R, GAI L, et al. High performance of macro-flexible piezoelectric energy harvester using a 0.3PIN-0.4Pb($Mg_{1/3}Nb_{2/3}$)O_3-0.3$PbTiO_3$ flake array[J]. Smart Mater Struct, 2016, 25(12): 125015.

[13] SEO I T, CHA Y J, KANG I Y, et al. High energy density piezoelectric ceramics for energy harvesting devices[J]. J Am Ceram Soc, 2011, 94(11): 3629–3631.

[14] GAO X, WU J, YU Y, et al. Giant piezoelectric coefficients in relaxor piezoelectric ceramic PNN-PZT for vibration energy harvesting[J]. Adv Funct Mater, 2018, 28(30): 1706895.

[15] OH S R, WONG T C, TAN C Y, et al. Fabrication of piezoelectric polymer multilayers on flexible substrates for energy harvesting[J]. Smart Mater Struct, 2013, 23(1): 015013.

[16] 商鑫亭, 艾彩娇, 李伟, 等. 烧结气氛对 BNT-BKT-ST 薄膜结构和性能影响[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(3): 19–23.
SHANG Xinting, AI Caijiao, LI Wei, et al. J Liaocheng Univ (Nat Sci Ed, in Chinese), 2018, 31(3): 19–23.

[17] ARRIETA A F, DELPERO T, BERGAMINI A E, et al. Broadband vibration energy harvesting based on cantilevered piezoelectric bi-stable composites[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(17): 173904.

[18] NUNES P J, SENCADAS V, CORREIA V, et al. Energy harvesting performance of piezoelectric electrospun polymer fibers and polymer/ceramic composites[J]. Sens Actuators, A, 2013, 196: 55–62.

[19] SWALLOW L M, LUO J K, SIORES E, et al. A piezoelectric fibre composite based energy harvesting device for potential wearable applications[J]. Smart Mater Struct, 2008, 17(2): 025017.

[20] SHAN X, SONG R, BO L, et al. Novel energy harvesting: A macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex[J]. Ceram Int, 2015, 41: S763–S767.

[21] KASHIWAO T, IZADGOSHASB I, LIM Y Y, et al. Optimization of rectifier circuits for a vibration energy harvesting system using a macro-fiber composite piezoelectric element[J]. Microelectroni J, 2016, 54: 109–115.

[22] 杨雄, 沈杰, 王锋, 等. 压电纤维复合材料能量采集仿真[J].硅酸盐学报, 2019, 47(9): 1283–1287.
YANG Xiong, SHEN Jie, WANG Feng, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(9): 1283–1287.