

## 双自由度磁悬浮式桥梁振动能量采集器 数值仿真和优化\*

邓露<sup>1†</sup>, 聂新民<sup>1</sup>, 毕涛<sup>2</sup>, 何维<sup>1</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082;2.四川电力设计咨询有限责任公司,四川成都 610041)

**摘要:**提出了一种能利用桥梁振动能量为传感器持续供电的双自由度磁悬浮振动能量采集器(TMEH),该系统的能量采集效率远高于传统单自由度磁悬浮振动能量采集器(SMEH).推导了TMEH系统的运动控制方程和机电耦合方程;建立了TMEH的多目标优化模型,提出了基于NSGA2算法的能量采集器参数优化设计方法;最后将TMEH和SMEH在简谐振动激励和桥梁随机振动激励作用下的响应特性和能量采集效率进行了对比.研究表明:1)通过NSGA2算法优化设计,TMEH能获得更宽的采能带宽和更高的输出功率;2)TMEH比SMEH的采能效率有明显提高.在简谐振动激励和桥梁随机振动激励作用下,TMEH的输出功率比SMEH增加了约2倍.

**关键词:**振动能量采集器;桥梁健康监测;车桥耦合振动;磁悬浮;多目标优化

**中图分类号:**TM919

**文献标志码:**A

## Numerical Simulation and Optimization of a Two-degree-of-freedom Magnetic Levitation Vibration Energy Harvester for Bridges

DENG Lu<sup>1†</sup>, NIE Xinmin<sup>1</sup>, BI Tao<sup>2</sup>, HE Wei<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co, Ltd, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** A two-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester (TMEH) was designed, which can use the bridge vibration energy to provide continuous power for the sensors. The energy harvesting efficiency of the TMEH is much higher than that of the traditional single-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester (SMEH). Firstly, the motion control equation and the electromechanical coupling equation of TMEH system were deduced. Then, the multi-objective optimization model of TMEH was established, and the design parameters were optimized by using the NSGA2 algorithm. Finally, the response characteristics of TMEH and SMEH under the harmonic excitation and normal vehicle-bridge vibration excitation were compared, respectively. The results show that: 1) After optimization by the NSGA2 method, TMEH can obtain a wider frequency band and higher output power; 2) The energy harvesting efficiency of TMEH is significantly higher than that of the SMEH. Under harmonic vibration excitation and normal vehicle-bridge vibration excitation, the output power of TMEH is about two times higher than that of SMEH.

\* 收稿日期:2016-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478176),National Natural Science Foundation of China(51478176);湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1014),Excellent Youth Foundation of Hunan Scientific Committee(14JJ1014)

作者简介:邓露(1984—),男,湖南娄底人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人,E-mail:denglu@hnu.edu.cn

**Key words:** vibration energy harvester; bridge health monitoring; vehicle-bridge interaction; magnetic levitation; multi-objective optimization

无线传感器技术的发展,为结构健康监测提供了一种很有前景的手段<sup>[1]</sup>.但无线传感器节点的内置电池容量低,需要频繁更换,长期监测维护成本较高<sup>[2]</sup>.有效的解决办法之一是利用能量采集装置把结构的振动转换成电能并采集起来,为无线传感器节点供电.

许多学者提出了不同类型的振动能量采集器<sup>[3]</sup>.桥梁振动能量采集器目前主要有压电式和电磁式两种.压电式能量采集器利用压电材料发生应变来产生电能,其整体性能和使用寿命受制于压电材料的电能转化效率和疲劳性能<sup>[4]</sup>.电磁式能量采集器通过磁场把机械能转化为电能,具有不受材料性能限制和环境适应性强等优点<sup>[5]</sup>,比压电式能量采集器更适用于桥梁结构.Ali等<sup>[6]</sup>建立了线性单自由度压电能量采集器模型,将车桥振动简化为二维简支梁移动力模型,分析了不同车速下能量采集器的输出功率.Sazonov等<sup>[7]</sup>设计了一种自供能的无线监测系统,通过实桥测试验证了电磁式能量采集器为传感器供电的可行性.该能量采集器在其共振频率处有较大的功率输出,但偏离其共振频率时,能量采集器的输出功率急剧下降.在实际应用时外部激励可能具有较宽的频带范围,导致该能量采集器采集效率不高<sup>[8]</sup>.为了拓宽能量采集器的工作频带,Mann等<sup>[9]</sup>提出了由三块磁极相对的磁铁组成的单自由度磁悬浮振动能量采集器(Single-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester,以下简称SMEH).Green等<sup>[10]</sup>分析了该能量采集器在某悬索桥振动激励下的响应特性,结果表明SMEH的采集带宽可通过改变其非线性刚度来改变,但并不能提高其输出功率.

针对以上不足,本文设计了一种能为桥梁健康监测传感器供电的双自由度磁悬浮振动能量采集器(Two-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester,以下简称TMEH).首先,推导了TMEH系统在非线性磁力和电磁阻尼力作用下的动力学方程和机电耦合方程;然后,建立了TMEH的多目标优化模型,运用NSGA2算法对其进行了参数优化,并对比了TMEH和SMEH在简谐振动激励作用下的输出功率;最后,通过数

值模拟车桥耦合振动,以桥梁随机振动响应作为激励,对比研究了TMEH和SMEH的输出功率等特性,并分析了路面平整度和车速等因素对两种能量采集器输出功率的影响.

## 1 磁悬浮振动能量采集器建模与分析

### 1.1 磁悬浮振动能量采集器结构模型

双自由度磁悬浮式能量采集器由4块磁极相对的圆柱形磁体组成,如图1(a)所示,其中2块磁铁固定于外壳两端,另外2块磁铁在排斥力相互作用下悬浮,相邻2块磁铁之间的空隙缠绕了线圈.由电磁感应定律可知,当悬浮磁体在外界激励作用下振动时,外部线圈中会产生感应电流.

与单自由度磁悬浮式能量采集器相比,双自由度磁悬浮式能量采集器不仅具有由相邻磁体相互排斥所产生的非线性刚度的特性,而且2块悬浮磁铁又形成了相互耦合的双自由度非线性系统<sup>[11]</sup>.双自由度系统具有2种不同频率的振动,且增加了一个线圈,为能量采集器拓宽频率带宽和增大输出功率创造了条件.

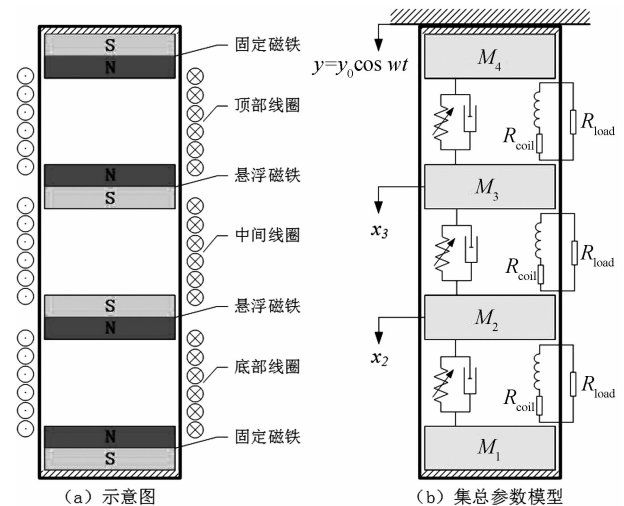


图1 双自由度磁悬浮振动能量采集器结构模型

Fig.1 Structure model of TMEH

### 1.2 系统动力学控制方程

双自由度磁悬浮式能量采集器的集总参数模型如图1(b)所示.图中 $y$ 为基座的振动位移, $x_2$ 和

$x_3$  分别为悬浮磁铁  $M_2$  和  $M_3$  相对基座的振动位移。

已知 2 个圆柱形磁铁 S 和磁铁 T 的体积分别为  $V_s$  和  $V_t$ ,  $M_s$  和  $M_t$  分别为磁铁 S 和磁铁 T 的磁化强度,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率,  $d$  为磁铁 S 和磁铁 T 之间的距离, 则这 2 个圆柱形磁铁间的磁力为<sup>[12]</sup>:

$$F_{\text{mag}}(d) = \frac{3\mu_0 M_s M_t V_s V_t}{2\pi d^4}. \quad (1)$$

悬浮磁铁在外界激励作用下运动时, 磁铁 2 和 3 所受到的回复力为:

$$\begin{cases} F_{r2} = F_{\text{mag}}(d_0 + x_2 - x_3) - F_{\text{mag}}(d_0 - x_2) + m_2 g, \\ F_{r3} = F_{\text{mag}}(d_0 + x_3) - F_{\text{mag}}(d_0 + x_2 - x_3) + m_3 g, \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d_0$  为相邻磁体间的初始距离. 磁铁 2 和 3 所受到的黏滞阻尼力为:

$$\begin{cases} F_{\text{cv}2} = C_{12}\dot{x}_2 + C_{32}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3), \\ F_{\text{cv}3} = C_{43}\dot{x}_3 + C_{23}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $C_{12}$ 、 $C_{32}$  分别为磁铁 1 和 3 对磁铁 2 的黏滞阻尼系数;  $C_{23}$ 、 $C_{43}$  分别为磁铁 2 和 4 对磁铁 3 的黏滞阻尼系数。

磁悬浮振动能量采集器线圈的自感系数很小, 因此可忽略由线圈产生的自感<sup>[10]</sup>. 对整个电路应用基尔霍夫电压定律可得系统的机电耦合方程:

$$i(R_{\text{load}} + R_{\text{coil}}) - \alpha\dot{x} = 0. \quad (4)$$

式中:  $\dot{x}$  为磁铁相对线圈振动的速度;  $i$  为感应电流;  $R_{\text{coil}}$  为线圈内阻;  $R_{\text{load}}$  为外部负载电阻;  $\alpha = NB_{\text{rad}}l$  是机电耦合系数,  $N$  是线圈匝数,  $l$  是一圈线圈的长度,  $B_{\text{rad}}$  是悬浮磁铁的径向磁感应强度。

线圈感应电流通过产生洛伦兹力  $F_{\text{coil}} = \alpha i$  将悬浮磁铁振动的机械能转化为电能. 故磁铁 2 和磁铁 3 所受到的电磁阻尼力分别为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} F_{\text{ce}2} = C_{e1}\dot{x}_2 + C_{e2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3), \\ F_{\text{ce}3} = C_{e3}\dot{x}_3 + C_{e2}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C_{ej} = \frac{\alpha_j^2}{R_{\text{load}} + R_{\text{coil}}}$  ( $j=1, 2, 3$ ) 为第  $j$  个线圈的电磁阻尼系数。

至此, 由动力平衡条件可得磁铁 2 和 3 的运动方程:

$$\begin{cases} m_2\ddot{x}_2 = F_{r2} - F_{\text{cv}2} - F_{\text{ce}2} - m_2\ddot{y}, \\ m_3\ddot{x}_3 = F_{r3} - F_{\text{cv}3} - F_{\text{ce}3} - m_3\ddot{y}. \end{cases} \quad (6)$$

利用四阶龙格库塔法对式(6)进行求解, 即可得磁铁 2 和 3 的振动响应。

### 1.3 磁悬浮振动能量采集器输出功率

当悬浮磁铁在外界激励作用下通过线圈时, 线圈传递到外部负载电阻的瞬时功率为<sup>[13]</sup>:

$$P(t) = i^2 R_{\text{load}} = \frac{\alpha^2 R_{\text{load}}}{(R_{\text{load}} + R_{\text{coil}})^2} \sum_{j=1}^{n+1} [\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j]^2. \quad (7)$$

式中:  $j$  为磁铁的编号;  $n$  为线圈编号. 当能量采集器系统稳定时, 外部负载电阻上产生的平均功率为:

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \frac{\alpha^2 R_{\text{load}}}{(R_{\text{load}} + R_{\text{coil}})^2} \sum_{i=0}^T \left[ \sum_{j=1}^{n+1} (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j)^2 \Delta t \right]. \quad (8)$$

### 1.4 简谐振动激励下的典型算例

取简谐激励振动幅值为  $A_1 = 0.5$  m/s<sup>2</sup>、 $A_2 = 1$  m/s<sup>2</sup> 和  $A_3 = 1.5$  m/s<sup>2</sup>, 激励频率范围为 [3, 10] Hz. 为进行对比, 设计了 2 个磁铁总体积和采集器装置的总体积相同的单自由度磁悬浮振动能量采集器 SMEH0 和双自由度磁悬浮振动能量采集器 TMEH0, 其他参数保持一致. 图 2 所示为 SMEH0 和 TMEH0 在简谐振动激励下典型的频率与功率曲线。

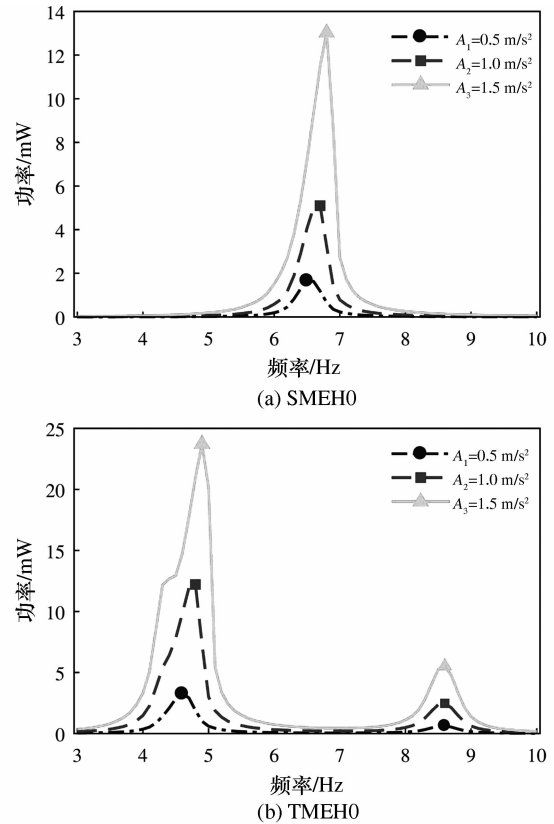


图 2 SMEH0 和 TMEH0 在简谐振动激励下的输出功率

Fig.2 Output power of SMEH0 and TMEH0 under harmonic excitation

由图 2 可知, 激励幅值越大, 采集器系统获取的

振动能量越多,磁悬浮振动能量采集器的输出功率越大.SMEH0 只有 1 个共振峰,而 TMEH0 存在 2 个共振峰.由于 TMEH0 的 2 块悬浮磁铁相互耦合形成了双自由度非线性系统,2 块悬浮磁铁的尺寸参数会影响 TMEH0 的共振峰值和共振频率,故未优化的 TMEH0 可能会出现 2 个共振峰值相差较大的情形.实际应用中,可对双自由度能量采集器的尺寸参数进行优化,以提高能量采集器系统针对目标频率的采能效率.

## 2 车桥耦合振动响应分析

### 2.1 桥梁有限元模型

选用一座常见的 24 m 跨径预应力混凝土筒支梁桥作为例子进行分析,桥梁的基频为 4.6 Hz.使用通用有限元软件 ANSYS 建立桥梁有限元模型,选用 3D 实体单元 Solid45 模拟桥体.车辆沿桥梁中心线行驶,桥梁横截面及车辆加载位置如图 3 所示.

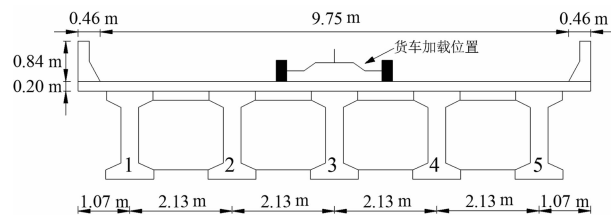


图 3 桥梁横截面及车辆加载位置

Fig.3 Bridge cross section and loading position

### 2.2 车辆有限元模型

本研究采用的车辆模型为一辆三轴货车,该车辆模型具有很好的代表性,已在先前研究中被广泛应用.车辆示意图见图 4,车辆详细参数见文献[14].

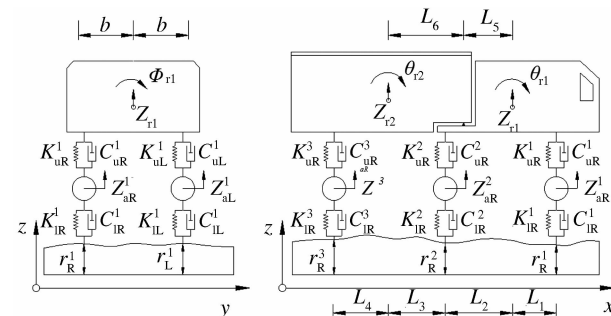


图 4 三轴货车车辆模型

Fig.4 Analytic model for 3-axle truck

### 2.3 车桥耦合振动方程

通过车轮与桥面接触点处的位移和接触力之间的关系,可建立车桥耦合系统的动力学方程如下:

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_b \\ \ddot{d}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b & C_{bv} \\ C_{vb} & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_b \\ \dot{d}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b & K_{bv} \\ K_{vb} & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{br} \\ F_{vr} + F_{vg} \end{Bmatrix}. \quad (9)$$

式中:车辆和桥梁分别由下标 v 和 b 表示;车辆自重及路面平整度分别由下标 g 和 r 表示; $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为质量、阻尼、刚度矩阵; $d$  为系统位移向量; $F_{vg}$  为车辆自身重力; $F_{br}$  和  $F_{vr}$  表示桥梁和车辆体系之间的相互作用力.

本文采用自行开发的 Matlab 程序,在时域内通过四阶龙格库塔方法求解耦合方程.文献[15]介绍了方程求解的详细过程,此处不再赘述.

### 2.4 路面平整度模拟

路面不平整是车辆-桥梁系统耦合振动的主要激励源.研究表明,路面平整度的生成可视为零均值的 Gauss 随机过程,可根据功率谱密度函数通过傅里叶逆变换生成.国际标准化组织将路面平整度从“非常好”到“非常差”分为 5 个等级[16].本文选用其中“好(good)”“中(average)”“差(poor)”3 种.对每个计算工况,为降低路面不平整随机性的影响[17],生成 20 个路面平整度样本并计算能量采集器的输出功率,将这 20 个输出功率的平均值作为每种路面平整度下能量采集器的输出功率分析值.

### 2.5 桥梁振动响应分析

图 5 所示为车辆过桥时,在桥梁跨中产生的典型竖向振动响应.能量采集器在受到桥梁竖向振动加速度的强迫激励后,将产生并输出电能.一个典型的桥梁竖向振动加速度响应的幅值谱如图 6 所示.从图 6 可知,与简谐振动单一的激励频率不同,在真实车辆荷载作用下的桥梁可能有多阶模态被激发,频带分布范围较宽.

对所建立的桥梁有限元模型进行模态分析, $f_1 \sim f_4$  为前四阶固有频率,其相应的模态振型如图 7 所示.可看出,桥梁的第一阶竖向弯曲模态和第三阶双向弯曲模态对跨中处的竖向振动贡献较大,而第二阶扭转模态和第四阶横向弯曲模态对桥梁跨中竖向振动响应贡献较小.

当振动能量采集器安装于桥梁跨中主梁上时,桥梁的第一阶模态和第三阶模态对能量采集器的输入激励影响最大,所以当能量采集器的 2 个共振频率  $f_{m1}$ 、 $f_{m2}$  与桥梁振动的第一阶频率  $f_{b1}$  和第三阶频率  $f_{b3}$  相对应时,能量采集器获得的桥梁振动能量最大.

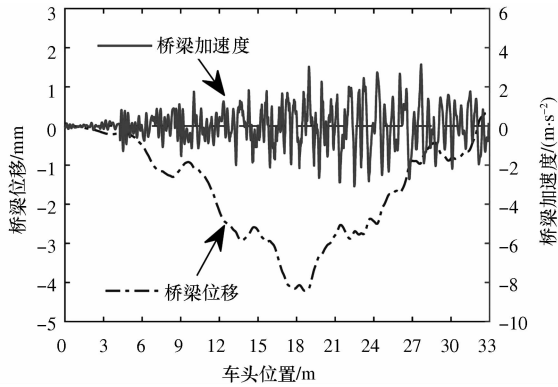


图 5 桥梁跨中处竖向位移和加速度曲线

Fig.5 Vertical displacement and acceleration at bridge midspan

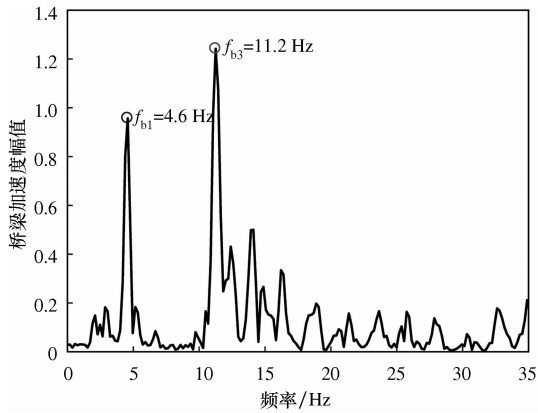


图 6 桥梁跨中竖向加速度幅值谱

Fig.6 Amplitude spectrum of vertical accelerations at bridge midspan

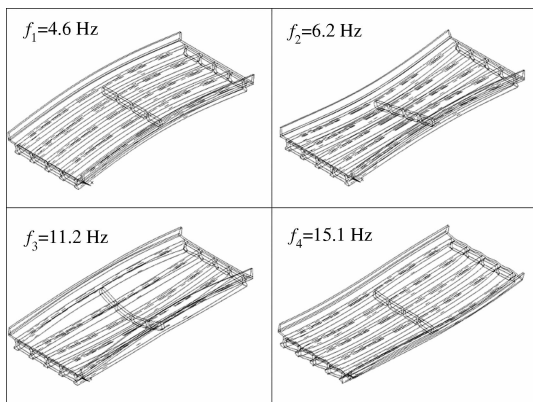


图 7 桥梁前四阶模态振型

Fig.7 First four vibration modes of bridge

在不同桥面平整度(好、中、差)和车辆速度(10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s、30 m/s)的情况下,桥梁的随机振动响应不同,能量采集器采集获取的振动能量也会随之改变.因此,通过分析桥梁在不同工况下振动加速度的幅值谱,统计桥梁在第一阶频率和第三阶频率振动下的加速度幅值比例,为

优化桥梁振动能量采集器提供设计参数.

记  $\theta = \frac{A_{f_{b1}}}{A_{f_{b3}}}$  为桥梁的第一阶和第三阶频率处加速度幅值谱的比例.将不同工况下的  $\theta$  进行统计分析,发现  $\theta$  服从对数正态分布(lognormal),其概率分布密度函数如式(10)所示.公式(10)的拟合优度判断准则值为:残差平方和(SSE)=0.005,判定系数(R-square)=0.863.统计结果和拟合分布曲线如图 8 所示.

$$f(\theta) = \frac{1}{0.8\theta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln\theta + 0.63]^2}{1.28}\right). \quad (10)$$

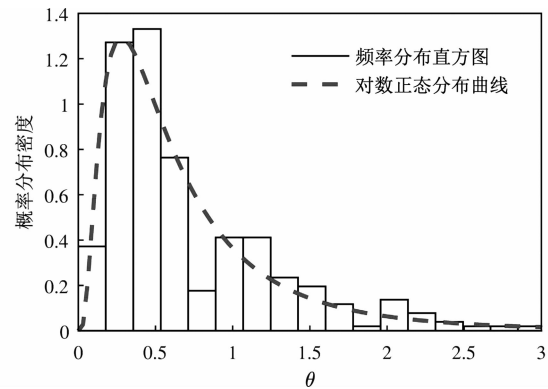


图 8 频率直方图和分布曲线

Fig.8 Frequency histogram and distribution curve

### 3 双自由度磁悬浮振动能量采集器在桥梁随机振动激励下的优化分析

#### 3.1 磁悬浮振动能量采集器优化模型

磁悬浮振动能量采集器建模分析采用的钕铁硼磁铁型号为 N35,其剩余磁感应强度  $B_r = 1.2 \text{ T}$ .通过前述分析可知,当磁铁材料确定以后,能量采集器装置中磁铁的尺寸和磁铁间距将直接影响装置的振动能量采集能力.为此,本文将双自由度磁悬浮振动能量采集器在桥梁随机振动激励下产生的总输出功率以及材料用量作为优化目标,对其尺寸参数进行优化,并使能量采集器单位输出功率所需材料用量最少.

由图 6 和图 7 可知,对桥梁跨中竖向响应影响最大的是桥梁的第一阶频率  $f_{b1}$  和第三阶频率  $f_{b3}$ .记能量采集器在简谐振动下,激励频率为  $f_{b1}$  和  $f_{b3}$  时的输出功率分别为  $P_1$  和  $P_2$ .由图 2 可知,能量采集器的输出功率会随着激励幅值的增大而增大,故  $\theta = A_{f_{b1}} / A_{f_{b3}}$  反映了  $P_1$  和  $P_2$  的比例关系.因此可定义  $p_\theta = (\theta P_1 + P_2)$  来衡量  $\theta$  取不同值时,能量

采集器在桥梁某振动工况下的总输出功率,并且  $p_\theta$  同样服从对数正态分布.将  $f(\theta)p_\theta$  在区间  $[0, \theta_{\max}]$  积分可得能量采集器在所有桥梁振动工况下的总输出功率,用  $P_{\max}$  表示.故本模型的目标函数可写为:

$$\begin{cases} P_{\max} = \int_0^{\theta_{\max}} f(\theta)(\theta P_1 + P_2) d\theta = \alpha P_1 + \beta P_2, \\ V_{\min} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  分别为  $P_1$  和  $P_2$  的比例系数,由式(10)积分可得: $\alpha=0.64, \beta=0.97$ .

由此,优化设计的具体参数和约束条件如下:

1)设计变量:磁铁体积  $V_i$  和磁铁间距  $d$ ;

2)设计域:由能量采集器装置的空间尺寸要求决定,根据工程经验将磁铁体积和间距限定如下:

$$V_i \in (0, 40] \text{ cm}^3, d \in (0, 10] \text{ cm}, i = [1, 4]. \quad (12)$$

3)约束条件:由图 6 可知,桥梁振动在第一阶频率和第三阶频率处的加速度幅值半带宽(half-prominence width)约为 0.2 Hz,因此将能量采集器共振频率与桥梁主要振动频率的差值不大于 0.2 Hz 作为优化的约束条件:

$$\begin{cases} |f_{m1} - f_{b1}| \leq 0.2 \text{ Hz}, \\ |f_{m2} - f_{b3}| \leq 0.2 \text{ Hz}. \end{cases}$$

### 3.2 优化设计方法

在本多目标优化问题中,目标函数  $P_{\max}$  和  $V_{\min}$  之间是相互制约的,其中一个目标函数值的增大往往会导致另一个目标函数值的减小,使得 2 个目标函数不能同时达到各自的最优值.因此,只能通过优化算法对 2 个目标函数进行协调,最终得到 1 组非劣解,从中选取输出功率达到最大的解作为最优解.

本文采用第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II,以下简称 NSGA2 算法)<sup>[18]</sup>对磁悬浮振动能量采集器的目标函数进行参数优化,其基本思想是:在每个迭代步,让设计变量满足所有约束条件的同时,找出使能量采集器输出功率达到最大且材料用量最小的最优解集.并通过非支配遗传算法进行排序以获取下一代的子种群,逐步逼近多目标优化函数的最优解.算法的主体流程如图 9 所示.

在把双自由度磁悬浮振动能量采集器应用到实桥上之前,可先根据桥梁在随机车流作用下的加速度幅值谱特征(图 6 和图 8)并利用简谐振动激励对采集器的结构参数进行优化.NSGA2 算法的参数选取见表 1.考虑到车辆引起的桥梁振动的加速度范围为  $0.5 \text{ m/s}^2$  到  $1.5 \text{ m/s}^2$ <sup>[19]</sup>,因此取简谐振动激励幅值为  $1 \text{ m/s}^2$ .值得注意的是,对不同桥梁来说,

只需改变对桥梁竖向振动响应贡献最大的两阶振动频率和加速度幅值比例  $\theta$  来优化模型中的设计参数,故本优化方法对各种类型的桥梁具有通用性.

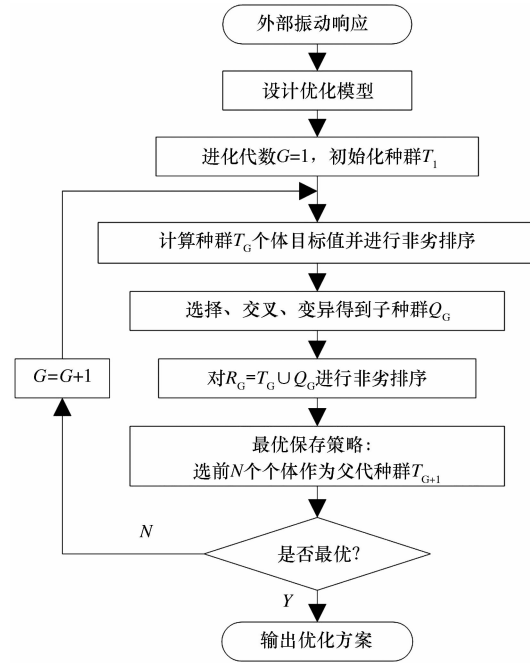


图 9 优化流程图

Fig.9 Optimization process

表 1 NSGA2 算法参数设置

Tab.1 Parameter setting of NSGA2

参数	数值
目标函数	2 个
设计变量	5 个
约束条件	2 个
种群规模	100
迭代步数	200
交叉系数	0.8
变异系数	0.4

作为对比,设计了 2 个单自由度磁悬浮振动能量采集器 SMEH1 和 SMEH2,它们的共振频率分别为桥梁的第一阶频率  $f_{b1}$  和第三阶频率  $f_{b3}$ .SMEH1 和 SMEH2 中 3 块磁铁总体积与 TMEH 的 4 块磁铁总体积相等,其他参数相同,并通过参数优化使其在式(12)的约束条件下输出功率最大.

### 3.3 优化结果分析

表 2 为优化后的各设计变量值和目标函数值,优化后的 SMEH1、SMEH2 和 TMEH 在简谐振动激励作用下的激励频率与输出功率曲线如图 10 所示.由图 10 可知,SMEH1 在频率  $f_{b1}$  处有较高的功率输出,在频率  $f_{b3}$  输出功率很小;SMEH2 则与 SMEH1 相反;而 TMEH 在频率  $f_{b1}$  和频率  $f_{b3}$  都有较大的功率输出,且均大于 SMEH1 或 SMEH2 的

输出功率.相比于 SMEH1 和 SMEH2,TMEH 的峰值输出功率分别增加了 198%和 179%,而 SMEH1 和 SMEH2 的输出功率比较接近.说明在磁铁材料用量相同的情况下,TMEH 的输出功率能得到大幅提高.

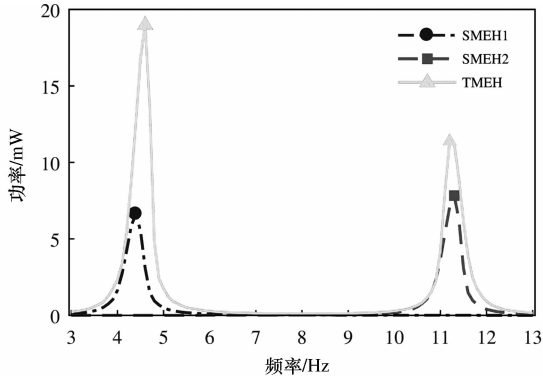


图 10 能量采集器在简谐振动激励下的输出功率  
Fig.10 Output power of the energy harvester under harmonic excitation

采用表 2 所列的 2 组参数作为磁悬浮能量采集器装置的设计参数,以桥梁跨中的竖向加速度作为激励,来模拟分析能量采集器安装于桥梁上的采能效率.分析了不同路面平整度和车辆速度对采集器输出功率的影响.各磁悬浮振动能量采集器输出功率的计算结果如图 11 所示.

表 2 能量采集器设计参数

Tab.2 Design parameters of the energy harvester

采集器	$V_1/cm^3$	$V_2/cm^3$	$V_3/cm^3$	$V_4/cm^3$	$d/cm$	$P_{max}/mW$	$V_{min}/cm^3$
SMEH1	9.7	38.4	28.6	—	8.7	5.9	76.7
SMEH2	18.9	35.1	22.7	—	7.5	6.3	76.7
TMEH	1.5	25.9	35.4	13.9	8.1	23.2	76.7
区间	(0,40]	(0,40]	(0,40]	(0,40]	(0,10]	—	—

由图 11 可知,桥梁随机振动激励下 TMEH 的输出功率比 SMEH 有明显的提高.路面平整度越差,桥梁的振动越剧烈,采集器的输出功率越大.在 3 种不同的路面平整度下,TMEH 的峰值输出功率比 SMEH1 和 SMEH2 分别平均增加了约 5 倍和 2 倍.

由图 11(a)(b)可知,SMEH2 比 SMEH1 的输出功率大,这是因为单自由度磁悬浮振动能量采集器只有一个共振峰,其输出功率受外部激励在共振频率处的幅值影响.从图 8 可知, $\theta$  在 0.5 附近的分布概率最大,说明在大多数情况下,桥梁在第三阶频率下的振动幅值大于第一阶频率下的振动幅值,从而使 SMEH2 能够比 SMEH1 采集到更多的振动能量.

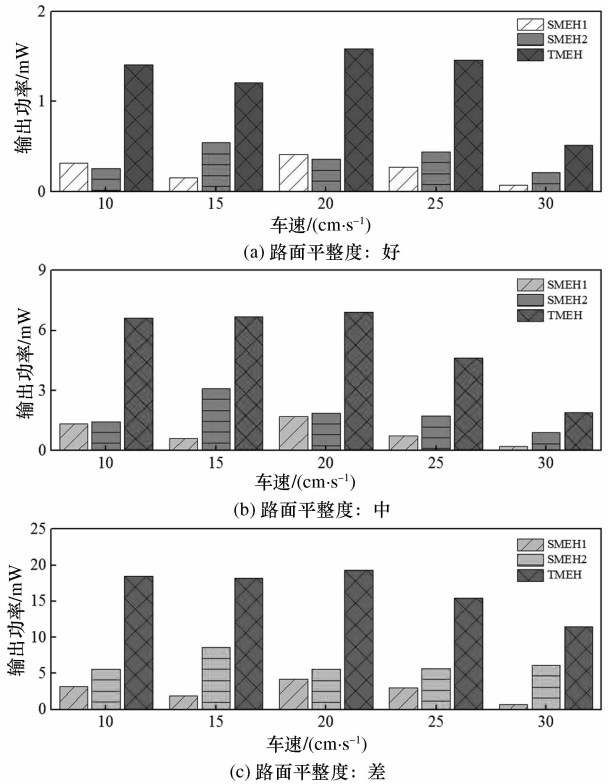


图 11 采集器在桥梁随机振动激励下的输出功率  
Fig.11 Output power of the energy harvester under random vibration excitation of bridge

## 4 结 论

本文首先提出了一种为桥梁健康监测传感器供电的双自由度磁悬浮振动能量采集器(TMEH),推导了系统运动控制方程,并提出了基于 NSGA2 算法的双自由度磁悬浮振动能量采集系统参数优化设计方法.最后对比分析了双自由度磁悬浮振动能量采集器和单自由度磁悬浮振动能量采集器(SMEH)分别在简谐振动和桥梁随机振动激励作用下的响应特性和输出功率.得到以下结论:

1)本文提出的优化设计方法能根据具体的外部振动激励特征来优化能量采集器的设计参数,对各种类型的桥梁具有通用性.且该方法可推广到多自由度磁悬浮振动能量采集器的参数优化设计.

2)TMEH 系统有 2 个共振峰,增宽了能量采集器采能的频带范围.并可通过调整能量采集器装置的尺寸参数,来增强能量采集器的共振峰值,从而提高能量采集器的采能效率.

3)TMEH 系统比 SMEH 系统的输出功率明显增强.在简谐振动激励和模拟的桥梁随机振动激励

下, TMEH 的峰值输出功率比 SMEH 都增加了约 2 倍.

## 参考文献

- [1] 裴强, 郭迅, 张敏政. 桥梁健康监测及诊断研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2):61-67.  
PEI Q, GUO X, ZHANG M Z. A review of health monitoring and damage detection of bridge structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2003, 23(2): 61-67. (In Chinese)
- [2] SIMJEE F I, CHOU P H. Efficient charging of supercapacitors for extended lifetime of wireless sensor nodes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3):1526-1536.
- [3] 邱清泉, 肖立业, 辛守乔, 等. 振动式微型发电机的研究进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9):191-195.  
QIU Q Q, XIAO L Y, XIN S Q, *et al.* Research progress on vibration powered microgenerator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 191-195. (In Chinese)
- [4] BEEBY S P, TUDOR M J, WHITE N. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(12):R175-R195.
- [5] 王佩红, 戴旭涵, 赵小林. 微型电磁式振动能量采集器的研究进展[J]. 振动与冲击, 2007, 26(9):94-98.  
WANG P H, DAI X H, ZHAO X L. A survey of micro electromagnetic vibration energy harvesters [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(9):94-98. (In Chinese)
- [6] ALI S F, FRISWELL M I, ADHIKARI S. Analysis of energy harvesters for highway bridges[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2011, 22(16):1929-1938.
- [7] SAZONOV E, LI H, CURRY D, *et al.* Self-powered sensors for monitoring of highway bridges[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1422-1429.
- [8] 何青, 毛新华, 褚东亮. 二自由度双稳态振动能量采集器输出性能分析[J]. 微纳电子技术, 2015(12):779-785.  
HE Q, MAO X H, CHU D L. Analysis of the output performance on a micro two-degree-of-freedom bistable vibration energy harvester [J]. Micronanoelectronic Technology, 2015(12):779-785. (In Chinese)
- [9] MANN B, SIMS N. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1):515-530.
- [10] GREEN P L, WORDEN K, ATALLAH K, *et al.* The benefits of Duffing-type nonlinearities and electrical optimisation of a mono-stable energy harvester under white Gaussian excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(20):4504-4517.
- [11] ABEDI, KACEM N, BOUAZIZI M, *et al.* Nonlinear 2-DOFs vibration energy harvester based on magnetic levitation [C]// Shock & Vibration, Aircraft/Aerospace, and Energy Harvesting: Volume 9. Cham:Springer, 2015:39-45.
- [12] FOISAL A R M, HONG C, CHUNG G S. Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 182(15):106-113.
- [13] STEPHEN N G. On energy harvesting from ambient vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(1/2):409-425.
- [14] 邓露, 王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9):52-58.  
DENG L, WANG F. Study of dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(9): 52-58. (In Chinese)
- [15] 殷新锋, 邓露. 随机车流作用下桥梁冲击系数分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9):68-75.  
YIN X F, DENG L. Impact factor analysis of bridges under random traffic loads [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9):68-75. (In Chinese)
- [16] ISO8608-1995(E) Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data[S]. Geneva: International Organization for Standard, 1995:2-8.
- [17] LIU C, HUANG D, WANG T L. Analytical dynamic impact study based on correlated road roughness[J]. Computers & Structures, 2002, 80(20):1639-1650.
- [18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [19] ZOU Q, DENG L, GUO T, *et al.* Comparative study of different numerical models for vehicle-bridge interaction analysis [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 16(9): 155-157.