

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.017

# 船舶推进轴系传递力的自适应主动控制研究

徐 晖, 祝长生\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对船舶航行过程中,螺旋桨处受到的多频扰动力通过推进轴系传递到船体,对船舶产生一系列不良影响的问题,对在支承轴承基座处并联安装作动器的多频力主动抑制方法进行了研究。首先利用有限单元法建立了推进轴系的动力学模型,分析了螺旋桨处的扰动力对整个轴系振动的影响,对通过并联安装作动器进行传递力抑制的可行性作了分析;然后在传统神经网络控制器的基础上,在考虑误差通道的影响下,提出了一种基于神经网络的控制器,控制器带有误差通道辨识模块的自适应控制算法,通过力传感器传递来的误差信号实时迭代权重参数,对轴系产生对应的最优控制力;最后在 Matlab/Simulink 中搭建了转子模型,进行了仿真验证。研究表明:提出的控制算法可以对推进轴系横向多频振动产生的传递力进行有效地抑制。

**关键词:**推进轴系;主动隔振;有限单元法;神经网络;辨识模块

**中图分类号:**TH113.2<sup>+</sup>2;TP24

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2019)08-0857-05

## Active vibration isolation with neural network for ship propulsion shafting

XU Hui, ZHU Chang-sheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the multi-frequency forces caused by the propeller transmitted to the hull through the propulsion shafting, which has a series of bad effects on the ship, in order to suppress the transmission forces, a method of multi-frequency forces active vibration isolation was proposed, which was achieved by installing actuators at the bearing base. Firstly, the influence on the whole shafting and the feasibility of the proposed method were analyzed by the established dynamic model of the propulsion shafting. Then, considering the influence of error channel, a neural network controller with error channel identification module was proposed. The weights of the optimal control force for the shafting were iterated by the error signal. Finally, the shafting model and simulation platform were built in Matlab/Simulink. The results indicate that the transmission force can be effectively isolated by using the proposed method.

**Key words:** propulsion shafting; active vibration isolation; finite element; neural network; identification module

## 0 引 言

由于船舶壳体的外形不对称或有突出物等因素,在船舶行进过程中,会造成船尾螺旋桨处的尾流相对于螺旋桨叶片不对称和不均匀。当螺旋桨旋转时,螺旋桨叶片会切割这些不均匀的尾流,产生大小不同的叶片推力,使各叶片的合力并不通过螺旋桨中心线,进而对螺旋桨产生周期性的扰动力和弯矩。这部分扰动

力通过船舶的推进轴系传递到整个船体,对船舶产生很多不利影响。

典型螺旋桨推力脉动干扰频率范围为 1 Hz ~ 100 Hz 的低频段。传统的被动隔振装置,在高频段可以取得不错的隔振效果,但在低频段则隔振效果一般<sup>[1-3]</sup>。因此,主动隔振装置受到了越来越多国内外学者的关注。宋春生等<sup>[4]</sup>利用电磁作动器在单自由度的隔振平台上取得了不错的隔振效果;侯军芳等<sup>[5]</sup>基于 Riccati 不等式设计了具有鲁棒性的隔振控制器;

收稿日期:2018-12-28

作者简介:徐晖(1995-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事轴系传递力抑制方面的研究。E-mail:15605176312@163.com

通信联系人:祝长生,男,教授,博士生导师。E-mail:zhu\_zhang@zju.edu.cn

ALUJEVIĆ N<sup>[6]</sup> 等利用压电作动器,通过 Fx-LMS 算法,在转子系统中取得了不错的隔振效果。近年来,虽然越来越多的学者基于神经网络对低频主动隔振系统进行了一系列的研究<sup>[7-10]</sup>,但这些研究大多针对的是单自由度的隔振平台,直接考虑整个推进轴系系统的隔振效果的文献则很少。

本文针对船舶推进轴系的横向振动,首先建立多支点轴系回旋振动的动力学模型,分析螺旋桨处扰动力对整个推进轴系横向振动的影响;然后在传统神经网络控制器的基础上,提出一种带有离线辨识模块的神经网络控制器;最后通过仿真对轴系横向振动多频扰动力抑制算法的有效性进行验证。

## 1 推进轴系动力学模型

船舶推进轴系横向振动的主动控制系统包括:螺旋桨、艉轴、联轴器、推进轴、推进主机、机械轴承、作动器、控制器等单元,如图 1 所示。

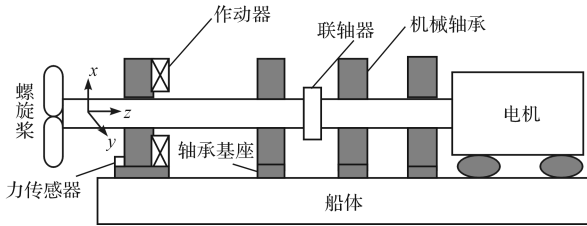


图 1 舰船推进轴系简化模型

为了建立轴系系统的动力学模型,本文特作如下假设:

- (1) 轴承的特性用对应的刚度及阻尼特征来表示,水平和垂直方向上的参数相同;
- (2) 仅仅考虑转子的弯曲振动,轴向振动及扭转振动对弯曲振动的影响忽略不计;
- (3) 轴承座按刚体处理,不考虑轴承本身的动力学特性;
- (4) 螺旋桨的工作转速为常数。

利用拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{q}}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial \bar{q}_s} + \frac{\partial U}{\partial \bar{q}_s} + \frac{\partial L}{\partial \dot{\bar{q}}_s} = \{Q^e\} \quad (1)$$

即可得到轴系系统的动力学方程:

$$[M] \{\ddot{\bar{q}}\} + ([C] + [G]) \{\dot{\bar{q}}\} + [K] \{\bar{q}\} = \{R\} \quad (2)$$

式中:  $\{\bar{q}\}$ —节点位移列向量,  $\{\bar{q}\} = [\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_n]^T$ ;  $\{\dot{\bar{q}}\}$ —结点速度列向量;  $q_i = [x_i \ \theta_{yi} \ y_i \ \theta_{xi}]^T$ ;  $\{\ddot{\bar{q}}\}$ —加速度列向量;  $M$ —质量矩阵;  $C$ —阻尼矩阵;  $G$ —陀螺矩阵;  $K$ —刚度矩阵;  $\{R\}$ —轴系各单元处受到的力(包

括螺旋桨切割不均匀尾流产生的周期性扰动力,整个轴系由于不对中以及安装误差产生的不平衡力,以及电磁作动器对轴系施加的控制力)。

由于推进轴系系统是一个对称的转子,转子在  $yoz$  平面上的各个矩阵参数与  $xoz$  平面一样。因此,整个轴系系统运行过程中的动力学方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} + \Omega \begin{bmatrix} 0 & G \\ -G & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{Ux} \\ F_{Uy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{a,x} \\ F_{a,y} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

在轴系运行过程中,螺旋桨处会受到与转速同频的轴频力、叶频力及其倍频力叠加而成的周期性扰动力的影响。为了不失一般性,这部分扰动力可以表示为:

$$d_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n d_i \sin(i\omega t + \varphi_i) \\ \sum_{i=1}^n d_i \cos(i\omega t + \varphi_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\omega$ —螺旋桨的转速。

这部分扰动力作用于推进轴系,使得轴系产生横向振动。在未施加主动控制时,机械轴承基座  $i$  处的传递力与轴承处轴系的振动位移  $q_i$ ,以及支承轴承的刚度  $k$ 、阻尼  $c$  有关,具体可以表示为:

$$F_{Ti} = \begin{bmatrix} kx_i + c\dot{x}_i \\ ky_i + c\dot{y}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $k$ —轴承刚度系数;  $c$ —轴承阻尼系数。

当机械轴承  $i$  处并联安装电磁执行器后,轴承座传递到基础上的传递力  $F_{Ti}$  等于机械轴承的传递力与电磁执行器控制力  $F_{ai}$  的和,具体表示为:

$$F_{Ti} = \begin{bmatrix} kx_i + c\dot{x}_i \\ ky_i + c\dot{y}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{axi} \\ F_{ayi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

主动隔振的目标就是通过控制并联安装在各机械轴承处电磁执行器的控制力  $F_{ai}$ ,使得转子通过各轴承座传递到基础上的总力  $F_{Ti}$  最小。

## 2 含有辨识模块的神经网络控制器

### 2.1 传统的神经网络控制器

神经网络控制器框图如图 2 所示。

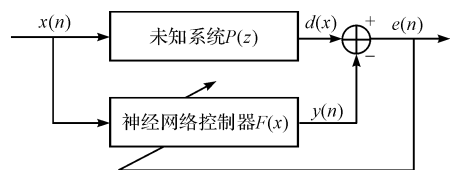


图 2 神经网络控制器框图

从图 2 中可以看出:整个神经网络控制器可以看作是通过自寻优得到的输入到输出的函数。神经网络控制器的目标函数为:

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - F[x(n)] \quad (7)$$

第  $i$  个神经元的梯度为:

$$\nabla n = \frac{\partial \left( \frac{1}{2} e^2(n) \right)}{\partial w_i} = e(n) * \frac{\partial F(x)}{\partial w_i} \quad (8)$$

神经网络控制器原理图如图 3 所示。

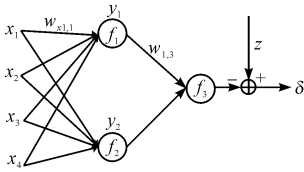


图 3 神经网络控制原理图

图 3 是只含有一个中间层的神经网络模型。 $x_1, x_2, x_3, x_4$  为控制器的输入信号,加权求和后,分别通过激励函数  $f_1, f_2$  产生相应的输出信号  $y_1, y_2$ 。 $y_1, y_2$  作为最后一个神经元的输入信号,进而产生控制器的输出信号  $y$ 。 $z$  为参考信号, $\delta$  为误差信号。

其中:

$$y_1 = f_1(w_{1,1}x_1 + w_{1,2}x_2 + w_{1,3}x_3 + w_{1,4}x_4) \quad (9)$$

$$y_2 = f_2(w_{2,1}x_1 + w_{2,2}x_2 + w_{2,3}x_3 + w_{2,4}x_4) \quad (10)$$

$$y = f_3(w_{1,3}y_1 + w_{2,3}y_2) \quad (11)$$

$$\delta = z - y \quad (12)$$

$$\delta_1 = w_{1,3}\delta, \delta_2 = w_{2,3}\delta \quad (13)$$

各权重更新采用 BP 算法。BP 算法是一种通过误差反向传播来调节各神经元之间权重的方法,其更新过程如下:

$$w_{1,3}' = w_{1,3} + u\delta \frac{df_3}{dx}y_1 \quad (14)$$

$$w_{2,3}' = w_{2,3} + u\delta \frac{df_3}{dx}y_2 \quad (15)$$

$$w_{x_1,1}' = w_{x_1,1} + u\delta_1 \frac{df_1}{dx}x_1, w_{x_1,2}' = w_{x_1,2} + u\delta_2 \frac{df_2}{dx}x_1$$

$$w_{x_2,1}' = w_{x_2,1} + u\delta_1 \frac{df_1}{dx}x_2, w_{x_2,2}' = w_{x_2,2} + u\delta_2 \frac{df_2}{dx}x_2$$

$$w_{x_3,1}' = w_{x_3,1} + u\delta_1 \frac{df_1}{dx}x_3, w_{x_3,2}' = w_{x_3,2} + u\delta_2 \frac{df_2}{dx}x_3$$

$$w_{x_4,1}' = w_{x_4,1} + u\delta_1 \frac{df_1}{dx}x_4, w_{x_4,2}' = w_{x_4,2} + u\delta_2 \frac{df_2}{dx}x_4 \quad (16)$$

式中: $u$ —学习率; $f$ —神经元的激活函数。

从式(14 ~ 16)可以看出:利用在各层神经元之间误差的反向传播,就可以调节各神经元之间权重。其

更新过程本质上还是采用梯度下降法,只不过整个神经网络控制器是由多个函数组合而成,其中每个神经元对最终的误差下降的梯度的贡献率不同,需要通过误差的反向传播来确定每个参数的梯度大小。

## 2.2 带有误差通道辨识模块的神经网络控制器

在实际控制中,由于控制器与被控对象之间存在着 D/A、功率放大器、主动执行机构、被控系统、误差传感器和 A/D 等环节,误差  $e(n)$  不再为参考信号  $d(n)$  与神经网络控制器的输出  $F[x(n)]$  的简单叠加。因此,如果继续采用式(7)中的误差  $e(n)$  作为 BP 算法中反向传播的误差  $\delta$ ,会影响整个神经网络控制器中各个参数的更新过程,甚至导致自适应过程失稳。为了消除误差通道的影响,本文提出了一种带有误差通道辨识模块的神经网络算法。辨识模块采用 LMS 算法。

含有辨识模块的神经网络控制器如图 4 所示。

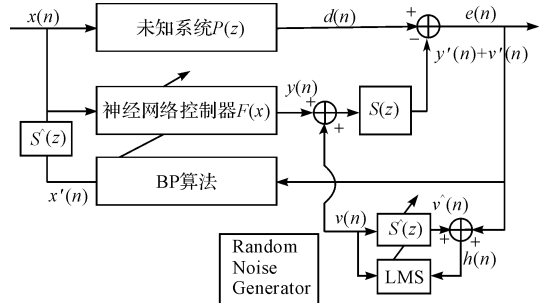


图 4 含有辨识模块的神经网络控制器

图 4 中:在控制开始前,控制器没有输入信号,即  $x(n) = 0, d(n) = 0, y(n) = 0$ 。此时通过噪声生成器产生噪声信号  $v(n)$ ,这部分噪声信号通过误差通道  $S(z)$  产生信号  $v'(n)$ 。此时的误差信号  $e(n)$  为:

$$e(n) = d(n) - y'(n) - v'(n) = -v'(n) \quad (17)$$

$$\hat{S}(z) = s_0 + s_1z^{-1} + \cdots + s_{L-1}z^{-(L-1)} \quad (18)$$

式中: $\hat{S}(z)$ —误差通道的辨识模块; $L$ —数字滤波器的阶数。

此时滤波器的误差信号为:

$$h(n) = v(n) + e(n) = S^T v(n) - v'(n) \quad (19)$$

由梯度下降法可知:

$$S(n+1) = S(n) - 2uh(n)v(n) \quad (20)$$

式中: $S(n)$ —滤波器的权重向量。

此时,控制器的反馈误差信号为:

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y(n) * s(n) = \\ &= d(n) - F(S^T x(n)) = \\ &= d(n) - F(x'(n)) \end{aligned} \quad (21)$$

从式(21) 可以看到:通过在输入信号  $x(n)$  与 BP 算法之间加入误差通道的辨识模型  $\hat{S}(z)$ ,就可以解决误差通道对反向传播的梯度的影响,保证算法的收敛性。

3 推进轴系多频力抑制结果分析

3.1 推进轴系仿真模型

推进轴系主动隔振系统参数表如表 1 所示。

表 1 推进轴系主动隔振系统参数表

| 参数                                               | 参数                    |
|--------------------------------------------------|-----------------------|
| 螺旋桨直径(①)/mm                                      | 300                   |
| 桨叶数                                              | 5                     |
| 螺旋桨宽/mm                                          | 30                    |
| 螺旋桨密度/(kg·m <sup>-3</sup> )                      | 7 753                 |
| 轴直径/mm                                           | 60                    |
| 艏轴长/mm                                           | 1 200                 |
| 推进轴长/mm                                          | 900                   |
| 轴密度/(kg·m <sup>-3</sup> )                        | 7 853                 |
| 杨氏模量/(N·m <sup>-2</sup> )                        | 2.07×10 <sup>11</sup> |
| 泊松比                                              | 0.3                   |
| 艏轴前轴承位置(②)/mm                                    | 300                   |
| 艏轴后轴承位置(③)/mm                                    | 1 000                 |
| 联轴器位置(④)/mm                                      | 1 000                 |
| 联轴器质量(⑤)/kg                                      | 1                     |
| 推进轴前轴承位置(⑥)/mm                                   | 1 400                 |
| 推进轴后轴承位置(⑦)/mm                                   | 1 800                 |
| 机械轴承等效刚度/(N·m <sup>-1</sup> )                    | 2×10 <sup>7</sup>     |
| 机械轴承等效阻尼/(N·(m·s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ) | 3×10 <sup>3</sup>     |

整个轴系系统由两根柔性轴段组成,每根轴分别支承在两个机械动轴承上,另外,每个轴承座的一端安装了电磁执行器;前端轴段 A 的一端带有一个悬臂盘,盘上存在与转速同频的不平衡激励力以及多频激励力;后端轴段 B 为均匀的轴,轴段 B 与电机之间用柔性联轴器连接。

利用表 1 中的参数可得到推进轴系有限元模型,如图 5 所示。

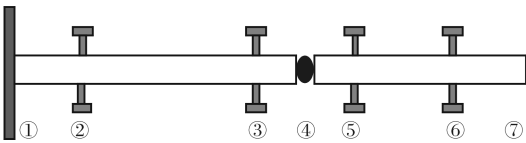


图 5 推进轴系有限元模型

为了减少计算的工作量,轴系系统共被划分成 7 个节点,28 个自由度。

3.2 推进轴系主动隔振系统研究结果

推进轴系传递力控制框图如图 6 所示。

由于舰船航行时螺旋桨处的扰动力无法直接测得,因此控制器不能直接采用扰动信号  $x(n)$  为参考信号。本文采用的控制器输入的参考信号  $d'(n)$ ,由力传感器传递来的误差信号  $e(n)$  与辨识通道得到的作动器输出的力信号  $y(n)$  叠加而成。

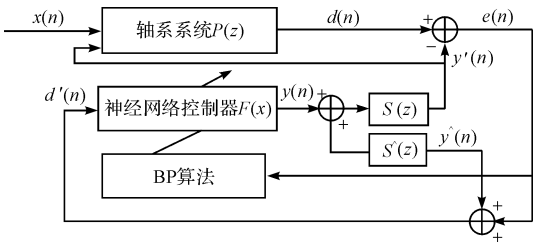


图 6 推进轴系传递力控制框图

$x(n)$ —轴系系统收到的扰动力; $d(n)$ —未施加控制时轴系的传递力; $y'(n)$ —作动器施加的主动控制力; $e(n)$ —轴系总的传递力; $S(z)$ —实际的次级通道传递函数; $S^{\wedge}(z)$ —辨识模块得到的次级通道传递函数

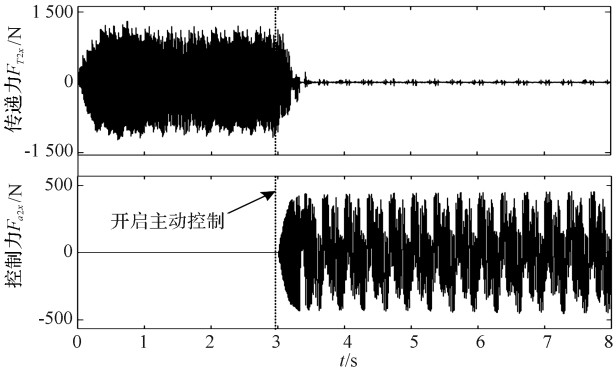
本文采用的神经网络控制器是一个两层的神经网络。其中:输入层有 4 个神经元,中间层有 2 个神经元,中间层采用 tanh 函数作为激活函数,学习率  $u = 2e - 4$ ,辨识通道的滤波器阶数  $L = 8$ 。

辨识得到的次级通道传递函数为:

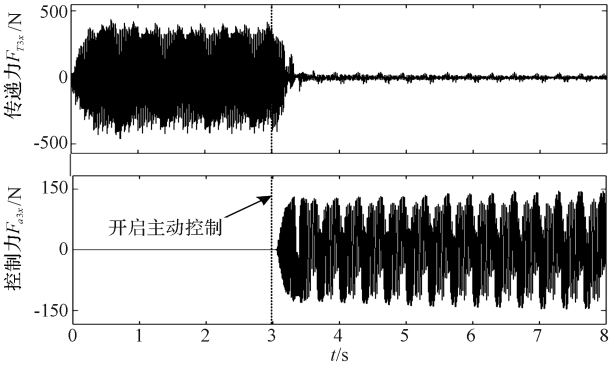
$$S^{\wedge}(z) = 0.67z^{-1} + 0.22z^{-2} + 0.07z^{-3} + 0.02z^{-4} \quad (22)$$

为了验证本文所提出的算法有效性,笔者利用表 1 推进轴系主动隔振系统的参数进行仿真。假设轴系转速为 180 r/min 时,考虑轴频力、叶频力及其倍频力的影响,螺旋桨处的扰动力由 3 Hz、6 Hz、15 Hz、30 Hz、45 Hz,幅值为 50 N、50 N、20 N、20 N、20 N 的周期性扰动力,以及幅值为 20 N 的白噪声叠加而成。

开启主动控制后,各个轴承基座  $x$  方向传递力与控制力的波形图如图 7 所示。



(a) 艏轴前轴承基座传递力  $F_{T2x}$  与控制力  $F_{a2x}$



(b) 艏轴后轴承基座传递力  $F_{T3x}$  与控制力  $F_{a3x}$

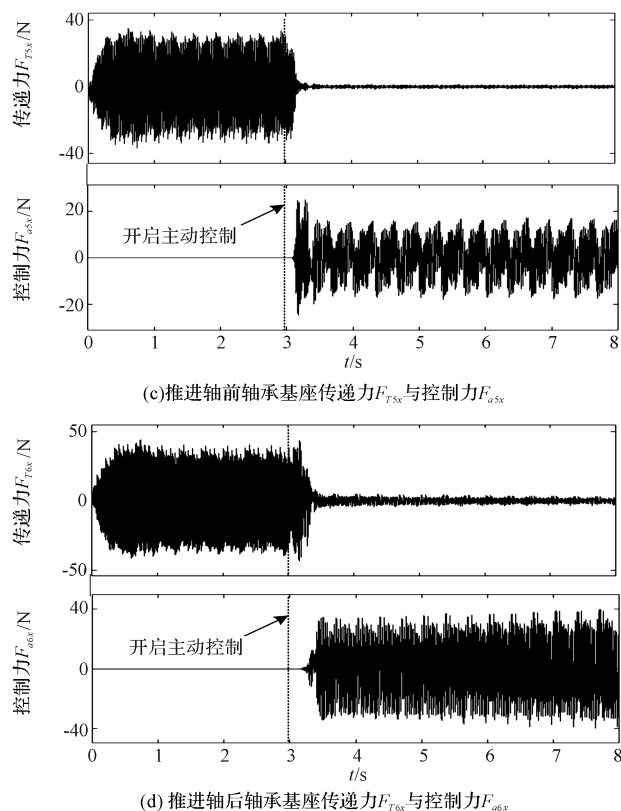


图7 各轴承基座  $x$  方向控制后传递力与控制力波形图

由图7可以看出:在控制器开启控制后,各个轴承处的传递力得到了明显的抑制。此外,越靠近螺旋桨的轴承处传递力越大,控制力也越大。

## 4 结束语

本文提出了一种基于神经网络的含有误差通道辨识模块的船舶推进轴系横向多频振动的抑制算法,通过理论与仿真验证,得出结论:所提出的船舶推进轴系横向多频振动的抑制算法,可以有效地降低轴系振动时通过轴承基座传递到船体的扰动力。

同时,需要指出的是,本文采用的方法是在轴系的

4个支撑轴承处都并联安装作动器。是否可以通过选择合适的安装位置,从而在保证控制效果的情况下减少所需作动器的数量,还有待进一步研究。

## 参考文献 (References):

- [1] ALUJEVIC N, ČAKMAK D, WOLF H, et al. Passive and active vibration isolation systems using inerter [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2018(418):163-183.
- [2] ZHOU N, LIU K. A tunable high-static-low -dynamic stiffness vibration isolator [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2010, 329(9):1254-1273.
- [3] 董子瑜,丁振宇,陈冰冰,等.带TMD减振装置的高耸设备模型风洞试验[J].压力容器,2016,33(5):9-14,25.
- [4] 宋春生,胡业发,周祖德.差动式磁悬浮主动隔振系统的控制机理研究[J].振动与冲击,2010,29(7):24-27.
- [5] 侯军芳,白鸿柏,赵海涛,等.基于Riccati不等式的微动隔振平台鲁棒性能控制器设计[J].振动工程学报,2009,22(4):340-344.
- [6] ZHAO G, ALUJEVIC N, DEPREAETERE B, et al. Experimental study on active structural acoustic control of rotating machinery using rotating piezo-based inertial actuators [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2015(348):15-30.
- [7] AHN K G, PAHK H J, JUNG M Y, et al. A hybrid-type active vibration isolation system using neural networks [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1996, 192(4):793-805.
- [8] YOUSEFI H, HIRVONEN M, HANDROOS H, et al. Application of neural network in suppressing mechanical vibration of a permanent magnet linear motor [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(7):787-797.
- [9] LV S, LV S. Applying BP neural network model to forecast peak velocity of blasting ground vibration [J]. *Procedia Engineering*, 2011(26):257-263.
- [10] 孙承顺,包继华,张建武,等.用神经网络对柴油机振动主动控制的试验研究[J].上海交通大学学报,2003,37(5):781-784.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

徐 晖,祝长生.船舶推进轴系传递力的自适应主动控制研究[J].机电工程,2019,36(8):857-861.

XU Hui, ZHU Chang-sheng. Active vibration isolation with neural network for ship propulsion shafting [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(8):857-861.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>