

双层气囊隔振装置多目标协同姿态控制方法*

卜文俊^{1,2}, 施亮^{1,2}, 何琳^{1,2}, 徐伟^{1,2}

(1. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 船舶振动噪声重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对双层气囊隔振装置高精度姿态平衡控制需求,提出多目标协同姿态控制方法。通过建立双层隔振装置动力学模型、充放气控制等效作用力模型,建立了控制响应特性分析模型。并基于多目标满意优化方法建立了多目标协同姿态控制方法,使得双层气囊隔振装置能够较好地适应上下层气囊隔振装置姿态耦合,实现姿态平衡控制,并可有效抑制结构弹性变形对姿态平衡控制的影响。在双层气囊隔振装置上验证了该控制方法的可行性。该方法将用于某型船舶大型发电机组双层气囊隔振系统,实现双层气囊隔振装置柔性支撑状态下的姿态平衡控制。

关键词: 双层气囊隔振装置;多目标协同;姿态控制

中图分类号:0328 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)06-070-05

Multi-objective coordinated attitude control method for dual layer air spring vibration isolation mounting

BU Wenjun^{1,2}, SHI Liang^{1,2}, HE Lin^{1,2}, XU Wei^{1,2}

(1. Institute of Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. National Key Laboratory on Ship Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A multi-objective coordinated attitude control method was studied, which is aimed at the high precision attitude control of the dual layer air spring vibration isolation mounting. After establishing the dynamics model of dual layer air spring vibration isolation mounting and the equivalent model of charge and discharge control, the control response characteristic model was established. Then the multi-objective coordinated attitude control model was brought out based on the multi-objective satisfactory optimization method. This control method can adapt to the attitude control coupling of the superstratum and the substratum air spring vibration isolation mounting. And it can also restrain the elasticity distortion influence on the attitude equilibrium control. This control method was verified on a dual layer air spring vibration isolation mounting experimental system. It can be used in a dual air spring vibration isolation mounting for some large ship generator set and can realize the high vibration isolation efficiency.

Keywords: dual air spring vibration isolation mounting; multi-objective coordinated; attitude control

近年来,气囊隔振装置技术在船舶动力设备隔振领域获得广泛应用^[1],具有隔振效果好、工作状态智能可控等优点。工程应用基本为单层气囊隔振装置,其隔振效果约为 25 dB^[2],采用橡胶隔振器与气囊隔振器结合的浮筏隔振装置,隔振效果可达 35 dB 以上^[3]。随着新型船舶声学性能指标要求的提升,对主要噪声源设备的隔振效果要求达到 40 dB 以上。现有浮筏隔振装置的上层橡胶隔振器需选用固有频率更低的气囊隔振器,因此,迫切需要开展双层气囊隔振装置技术研究。目前,尚未有相关文献涉及该技术的研究。

为使得双层气囊隔振装置在全寿期具备良好的隔振性能,需要通过一套自动控制系统,监测气囊隔振器工作压力及上下层气囊隔振装置姿态,并通过对气囊隔振器充放气控制,实现姿态平衡控制,确保隔振装置处于设计工作状态附近。

由于双层气囊隔振装置的上下层隔振器均为柔软的以空气为工作介质的气囊隔振器,且隔振器数目较多(一般多达几十个),从而造成上下层气囊隔振装置姿态协同控制难度大。一方面由于隔振器数目众多,控制通路繁杂,造成姿态控制难度大;另一方面上下层气囊隔振装置姿态控制存在较强耦合,且面临筏架弹性变形等不确定因素

* 收稿日期:2018-08-20

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(61422040601-162204004)

作者简介:卜文俊(1979—),男,江苏泰州人,副研究员,博士,E-mail:bwj_2005@163.com

影响。

本文建立了双层气囊隔振装置力学特性分析模型,在分析上下层气囊隔振器姿态控制响应特性的基础上,研究提出协同姿态控制方法,使得隔振装置能够适应复杂的筏架等结构弹性变形影响,自主实现较高精度的协同姿态平衡控制。

1 双层气囊隔振装置姿态平衡控制

图1为双层气囊隔振装置结构示意图,上层设备子系统坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 原点位于设备重心,筏架子系统 $OXYZ$ 坐标系原点位于筏架的重心;通过4套位移传感器(#1~#4)监测筏架相对基座的垂向工作高度偏差,即下层气囊隔振装置工作高度偏差,假设可用数列 $\{h_1, h_2, h_3, h_4\}$ 表示;通过4套位移传感器(#5~#8)监测设备机脚相对筏架的高度偏差,即上层气囊隔振装置工作高度偏差,假设可用数列 $\{h_5, h_6, h_7, h_8\}$ 表示。若各测点高度偏差均在设定范围内,则判定双层气囊隔振装置处于姿态平衡状态。

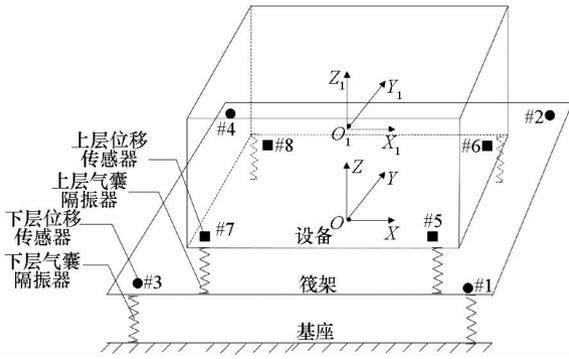


图1 双层气囊隔振装置结构示意图

Fig.1 Configuration of double layer air spring vibration isolation mounting

双层气囊隔振装置主要由上层气囊隔振子系统、下层气囊隔振子系统、智能控制子系统三部分组成,工作原理如图2所示。

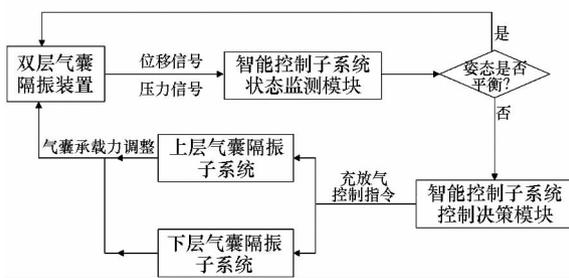


图2 双层气囊隔振装置工作原理

Fig.2 Work principle of double layer air spring vibration isolation mounting

装置工作原理如下:智能控制子系统状态监测模块实时采集位移传感器、气囊工作压力数据,计算出上下层气囊隔振装置各测点工作高度偏差,判断装置的姿态平衡状态;如果姿态平衡状态超出设定控制精度要求,则由控制决策模块决策出充放气控制指令,协调上下层气囊隔振的姿态控制;通过气囊隔振器充(放)气控制改变气囊隔振器工作压力(即承载力)实现装置姿态平衡控制。

因此,双层气囊隔振装置协同姿态控制方法研究可以归结为:获取不同安装位置气囊隔振器充放气控制作用下的各测点工作高度偏差变化,即获取姿态控制响应特性;建立多目标上下层气囊隔振装置协同姿态控制模型,可从任意初始状态出发,决策出优化的充放气控制动作序列,实现上下层隔振装置的协同姿态平衡控制。

2 控制响应特性分析模型

上层气囊隔振装置支撑的设备子系统运动方程^[4-6]为:

$$M^1 \ddot{x}_c^1 + \sum_{j=1}^{n_1} G_j^{1T} K_j^1 G_j^1 x_c^1 = F^1 + \sum_{j=1}^{n_1} G_j^{1T} K_j^1 G_j^i x_c^i \quad (1)$$

式中: M^1 为设备的质量矩阵; $x_c^1 = [x_c^1, y_c^1, z_c^1, \alpha^1, \beta^1, \gamma^1]^T$ 为设备重心在 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系中的平动位移和设备坐标轴的转动位移; n_1 为上层气囊隔振装置隔振器数量; G_j^1 为上层隔振器 j 的位置变换矩阵,其作用是将隔振器产生的弹性力转化为对设备的作用力; K_j^1 为上层气囊隔振器 j 的刚度矩阵; $F^1 = [F_x^1, F_y^1, F_z^1, M_x^1, M_y^1, M_z^1]^T$ 为作用于设备重心的力(矩)向量; G_j^i 为将上层隔振器的作用力转换为对筏体的作用力的变换矩阵; x_c^i 为筏体重心在 $OXYZ$ 坐标系中的位移向量。

下层气囊隔振装置支撑的筏架子系统运动方程为:

$$M^1 \ddot{x}_c + \left(\sum_{k=1}^{n_k} G_k^T K_k G_k + \sum_{j=1}^{n_1} G_j^{iT} K_j^i G_j^i \right) x_c = F^1 + \sum_{k=1}^{n_k} G_k^T K_k x_k^b + \sum_{j=1}^{n_1} G_j^{iT} K_j^i G_j^1 x_c^1 \quad (2)$$

式中: G_k 为下层气囊隔振器 k 的位置变换矩阵,其作用是将隔振器产生的弹性力转化为对筏架的作用力; n_k 为下层气囊隔振装置隔振器数量; K_k 为下层气囊隔振器 k 的刚度矩阵; x_k^b 为下层隔振器下端点的位移,通常可将船体基座视为刚性,则 $x_k^b = 0$ 。

将充放气控制等效为沿气囊主支撑力方向作

用力 F_i , 可得到充放气控制对系统的等效作用力^[7]。 F_i 及充放气控制引起的气囊压力变化 ΔP_i 可表示为:

$$\begin{cases} F_i = \Delta P_i (1 - \eta_1 \Delta r_i) S_{e_{0i}} \cdot \text{sgn} \Delta r_i \\ \Delta P_i = \frac{0.1 q_2 t (P_i + 0.1)}{(P_i + 0.1 - \eta_2 \Delta r_i) V_{0i}} \cdot \text{sgn} \Delta r_i \end{cases} \quad (3)$$

其中: i 为充放气控制对应的气囊编号; q_2 为满足超音速流动条件的空气管路流量; t 为充放气时间; P_i 为 i 气囊的工作压力; Δr_i 为 i 气囊沿主支撑方向的变形量; η_1, η_2 为根据试验数据提取的气囊主支撑方向变形对有效面积、容积的影响系数; $S_{e_{0i}}, V_{0i}$ 分别为 i 气囊额定工作高度状态的有效面积、容积; $\text{sgn} \Delta r_i$ 为符号函数, 充气控制取 +1, 放气控制取 -1。

采用“准静态”过程进行控制响应特性分析, 去掉二阶导数项, 将充放气控制等效为系统的作用力, 充放气控制时间不妨假设为一固定宽度的脉冲 t_0 , 联立式(1) ~ (3), 即可计算充放气控制引起的设备重心、筏架重心位移。进一步地根据位置变化矩阵, 可以计算出对各气囊实施充放气控制引起的任意测点 i 的位移偏差变化量, 即控制响应特性。

如果 $i = 1, 2, 3, 4$, 则:

$$\Delta h_{i-j} = (G_{h_i} X_{c-j})_{31} \quad j = 1, 2, \dots, n_k \quad (4)$$

如果 $i = 5, 6, 7, 8$, 则:

$$\begin{aligned} \Delta h_{i-j} &= (G_{h_i}^1 X_{c-j}^1 - G_{h_i}^1 X_{c-j})_{31} \\ j &= n_k + 1, n_k + 2, \dots, n_k + n_1 \end{aligned} \quad (5)$$

3 多目标协同姿态控制模型

双层气囊隔振装置姿态平衡控制涉及上下层共计 8 个位移传感器高度偏差控制目标, 属于典型的多目标控制问题。为解决姿态控制过程中的目标冲突问题, 采用多目标满意优化方法^[8-10], 建立双层气囊隔振装置多目标协同姿态控制模型。该模型可从任意初始状态出发, 搜索出最优控制路径, 实现多个对中控制目标快速收敛。

对控制路径点 k , 最优控制对象 $u_g(k)$ 满足:

$$\begin{aligned} \mu(u_g(k)) &= \max \{ \mu(u_g^c(k)), \mu(u_g^d(k)) \} \\ \mu(u_g^c(k)) &= \max \bigcup_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^8 \mu_m(u_j^c) w_i \right] \end{aligned}$$

$$\text{s. t.} \quad P_{u_g^c(k)} - \min \{ P_{u_j^c} | j = 1, 2, \dots, N \} \leq \sigma_1 \quad (6)$$

$$\mu(u_g^d(k)) = \max \bigcup_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^8 \mu_m(u_j^d) w_i \right]$$

$$\text{s. t.} \quad \max \{ P_{u_j^d} | j = 1, 2, \dots, N \} - P_{u_g^d(k)} \leq \sigma_1 \quad (7)$$

其中: u_g^c, u_g^d 分别为当前控制路径点最优充气、放气控制对象气囊; u_j^c, u_j^d 分别为可进行充气控制、放气控制的候选气囊; μ_{m_i} 为隶属度评价函数, 用于评价候选气囊实施充放气控制的对中状态恢复效果; w_i 为控制目标权重系数, 由当前控制状态各对中分量值及其控制精度决定; m 为对应位移传感器测点的工作高度偏差; N, N' 分别为综合考虑各类元件故障影响得到的可进行充气、放气控制气囊数目; P 为气囊工作压力; σ_1 为决策模型约束条件引入的气囊工作压力相对目标工作压力的允许偏差, 用于实现各气囊隔振器均匀承载控制, 减小承载不均匀所可能导致的结构弹性变形影响。

对充气控制动作, 其控制目标满意隶属度函数:

$$\mu_m = \begin{cases} \frac{|\Delta h_{i-j}| - \sigma_2 \delta}{(1 - \sigma_2) \delta} & |\Delta h_{i-j}| > \sigma' \delta \text{ 且 } \Delta h_{i-j} h_k < 0 \\ 0 & |\Delta h_{i-j}| \leq \sigma' \delta \text{ 或 } \Delta h_{i-j} h_k \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中: $m = 1, 2, \dots, 8$ 为各垂向位移偏差的编号; $j = 1, 2, \dots, N$ 为可行充气控制气囊隔振器编号; $\delta = \max \{ |\Delta h_m| | m = 1, 2, \dots, 8 \}$ 为对任意气囊施加充放气控制引起的垂向位移偏差 h_m 的最大绝对响应; σ_2 为用于限定最小响应量的阈值。

对放气控制动作, 隶属度函数形式与式(8)一致, 只是 $j = 1, 2, \dots, N'$ 。

基于各控制目标威胁度隶属度评价函数, 建立线性权重计算方法, 以控制目标 δ_{h_m} 的权重为例:

$$w_{h_m} = \frac{\mu'_{h_m}}{\mu'_{h_1} + \mu'_{h_2} + \dots + \mu'_{h_8}} \quad (9)$$

各垂向位移偏差控制目标的威胁度隶属度评价函数为:

$$\mu'_{h_m} = \begin{cases} 1 & h_i > h_{\text{upper}} - \delta \text{ 或 } h_i < h_{\text{floor}} + \delta \\ \frac{h_m - h_{\text{upper}} + 2\delta}{\delta} & h_{\text{upper}} - 2\delta < h_i \leq h_{\text{upper}} - \delta \\ \frac{h_m - h_{\text{floor}} - 2\delta}{\delta} & h_{\text{floor}} + \delta \leq h_i < h_{\text{floor}} + 2\delta \\ 0 & h_{\text{floor}} + 2\delta \leq h_i \leq h_{\text{upper}} - 2\delta \end{cases} \quad (10)$$

其中: h_m 为第 m 个位移传感器测量得到的筏架工作高度偏差; h_{upper} 为当前最大工作高度偏差; h_{floor} 为当前最小工作高度偏差; δ 为根据控制响应特性分析计算得到的充气控制引起的 h_m 最大绝对响应。

根据多目标协同姿态控制模型即可获得任意

初始工作状态的最优充放气控制动作,进而获得最优的充放气控制动作序列。经过一系列脉冲式充放气动作,即可实现上下层气囊隔振器承载力调整,进而实现上下层的协同姿态控制。

4 实验验证

为验证以上协同姿态控制方法,在双层气囊隔振实验装置上进行实验。该实验装置重约25 t,上、下层均平置支撑,分别布置了8个额定承载力为2.5 t的气囊隔振器以及6个额定承载力为6 t的气囊隔振器。

实验过程中,将多目标协同姿态控制模型转化为试验装置控制系统中姿态控制决策程序,主要通过开展协同姿态控制精度试验、筏架弹性影响控制实验来验证协同姿态控制方法的有效性。

该实验样机由无气初始状态充气至设定姿态平衡状态,控制过程如图3、图4所示。

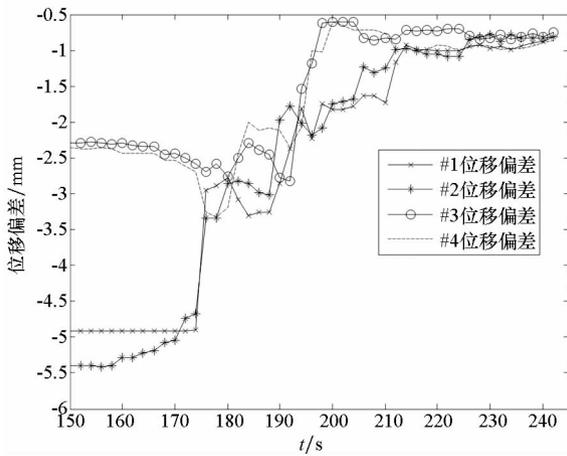


图3 下层气囊隔振装置姿态控制过程

Fig. 3 Attitude control process of the under layer air spring vibration isolation mounting

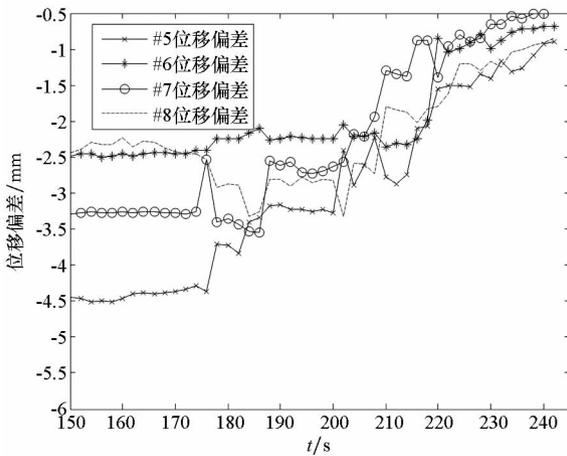


图4 上层气囊隔振装置姿态控制过程

Fig. 4 Attitude control process of the upper layer air spring vibration isolation mounting

从实验结果可以看出,采用以上协同姿态控制方法的试验样机,历时约4 min达到了-1.0 ~ 1.0 mm的协同姿态平衡控制精度,可以满足发电机组类设备气囊隔振装置姿态平衡控制要求。另外,双层气囊隔振装置长期运行过程中,基本不会出现无气的初始工作状态,对由于气囊隔振器少量漏气导致的姿态不平衡控制,装置所需控制时间仅需数秒,因此控制时间性能完全可以满足工程需要。

在以上姿态平衡控制过程中,筏架等结构弹性变形的影响如图5所示。

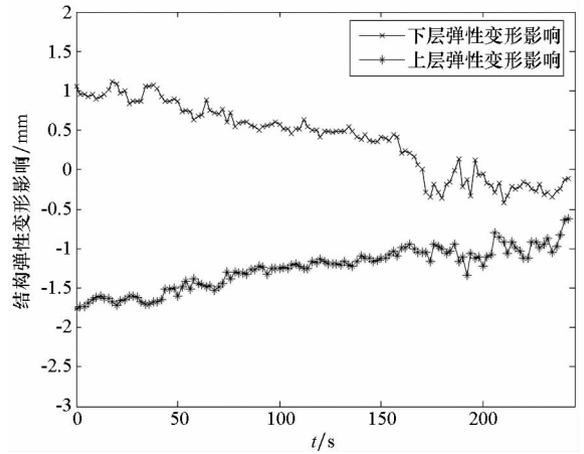


图5 结构弹性变形影响控制过程

Fig. 5 Control process of the structural elastic deformation influence

从实验结果可以看出,随着装置接近姿态平衡,筏架等结构弹性变形的影响呈现逐渐减小趋势,说明多目标协同姿态控制模型的约束条件引入均载控制条件有助于抑制承载力分布不均匀所导致的结构弹性变形影响,从而确保较好的上下层隔振装置协同姿态平衡控制精度。

此外,还在该双层气囊隔振实验装置上开展了隔振效果试验。结果表明,在电机170 r/min、220 r/min、250 r/min三个转速工况下,试验装置的隔振效果分别达到46.6 dB、48.9 dB、46.4 dB,可充分满足新型船舶声学设计对主要噪声源设备隔振效果达到40 dB以上的需求。

5 结论

为解决新型船舶动力装置应用高效双层气囊隔振装置后的姿态平衡控制难题,本文开展了双层气囊隔振装置协同姿态控制方法研究。通过建立隔振装置动力学模型,研究提出姿态控制响应特性分析方法,为协同姿态控制模型建立提供了准确的输入条件;通过多目标满意优化方法,建立

了多目标协同姿态控制模型,可决策出不同控制状态下最优的气囊充放气调整策略,实现快速、高精度的双层气囊隔振装置协同姿态控制,并可有效抑制结构弹性变形对姿态平衡控制的影响。在双层气囊隔振实验装置上对该控制方法进行了验证。该方法可为实现双层气囊柔性支撑状态下的机组高效隔振提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Harris C M, Piersol A G. Shock and vibration handbook[M]. 5th ed. USA: McGraw-Hill Press, 2002.
- [2] 徐伟. 船舶推进主机气囊隔振技术理论与试验研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2010.
XU Wei. Theoretical and experimental study of air spring mounting system for warship propulsion installation [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010. (in Chinese)
- [3] 何琳, 徐伟. 舰船隔振装置技术及其进展[J]. 声学学报, 2013, 38(2): 128-134.
HE Lin, XU Wei. Naval vessel machinery mounting technology and its recent advances[J]. Acta Acustica, 2013, 38(2): 128-134. (in Chinese)
- [4] Li W L, Lavrich P. Prediction of power flows through machine vibration isolators [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 224(4): 757-774.
- [5] Miura N. Design of double mount system of main engine and its effect of vibration isolation [J]. Journal of the JIME, 2003, 38(1): 43-49.
- [6] Xu W, He L, Lü Z Q. Dynamic analysis of a pneumatic mounting system for marine propulsion engines [C]// Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2007.
- [7] 卜文俊. 舰船推进主机气囊隔振技术对中监测及控制研究[D]. 武汉: 海军工程大学博士学位论文, 2010.
BU Wenjun. Alignment monitoring and control study of air spring mounting system for warship propulsion motor [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010. (in Chinese)
- [8] 任文敏, 汪正兴. 结构振动控制参数多目标满意优化方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5): 714-717.
REN Wenmin, WANG Zhengxing. Multiple objective satisfaction optimization for structural vibration control [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(5): 714-717. (in Chinese)
- [9] 吴翔, 谭国俊, 叶宗彬, 等. 三相电压源型逆变器的多目标满意优化脉宽调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1674-1684, 1781.
WU Xiang, TAN Guojun, YE Zongbin, et al. Pulse width modulation strategy for three-phase voltage source inverters based on multi-objective satisfactory optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1674-1684, 1781. (in Chinese)
- [10] 贾永基, 邢芳芳. 基于满意优化的电动汽车充电站选址[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 739-745, 770.
JIA Yongji, XING Fangfang. Location of electric vehicle recharging stations based on satisfactory optimization [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2017, 43(5): 739-745, 770. (in Chinese)