doi:10.11887/j.cn.202102001

http://journal. nudt. edu. cn

针对多振源密频及波动线谱主动控制的改进算法及试验*

李 彦^{1,2},何 琳^{1,2},王迎春^{1,2},王春雨^{1,2},尹天齐^{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:为了让船舶机械主动隔振装置在线谱频率波动和多振源密频耦合等实船复杂工况下,仍能取得 良好的振动线谱主动控制效果,研究了以多通道窄带 Fx-Newton 算法为基础的改进算法,提出了窄带滤波相 位失真的自适应补偿器,使控制算法对线谱频率波动具有高鲁棒性;研究了多参考信号 Fx-Newton 算法,从多 振源分离提取互不相关的多参考信号,从而解决多振源密频线谱控制难题。实验结果表明,改进窄带 Fx-Newton 算法对频率波动线谱的主动控制效果良好,并且对两个激振器或两台空压机组激励出的密频波动线 谱也能进行稳定、高效的主动控制。

关键词:改进窄带 Fx-Newton 算法;频率波动线谱;多振源密频线谱;相位失真补偿;多参考信号 中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)02-001-10

Improved algorithm and experiments for active control of dense and fluctuating frequency sinusoidal vibration induced by multi-sources

LI Yan^{1,2}, HE Lin^{1,2}, WANG Yingchun^{1,2}, WANG Chunyu^{1,2}, YIN Tianqi^{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: In order to achieve good active control effect of fluctuating-frequency and dense-frequency sinusoidal vibration induced by multisources which may occur in active-passive vibration isolation devices of marine machineries, the improved algorithm based on multi-channel narrowband Fx-Newton algorithm was studied. The algorithm with adaptive compensator for narrowband filter phase distortion was proposed, which can obtain high robustness for fluctuating-frequency sinusoidal vibration. Next, the multi-reference Fx-Newton algorithm was proposed to control dense-frequency multiple sinusoids in the same narrowband, under the precondition of acquiring multiple independent reference signals from vibration sources. The active control experiments show that the improved narrowband Fx-Newton algorithm can get good control effect on the fluctuating-frequency sinusoidal vibration, and can achieve stable and efficient control on the fluctuating dense-frequency sinusoidal vibration excited by two exciters or two air compressors.

Keywords: improved narrowband Fx-Newton algorithm; fluctuating-frequency sinusoidal vibration; dense-frequency sinusoids induced by multi-sources; phase distortion compensation; multi-reference signal

船舶机械振动含有丰富而突出的线谱成分, 这些线谱能量集中、幅值远高于周围频率宽带噪 声,且各线谱幅值、频率均会随着机械运转工况而 波动。船舶机械振动线谱对船舶辐射噪声有重要 影响,机械设备主动隔振技术作为一种抑制线谱 的有效手段而日益受到重视。

对船舶机械振动线谱的实测和特征分析表明,为了实现更好的线谱控制效果,机械主动隔振的有源控制算法需要突破以下难点:①有多根线 谱振动需要进行控制,采用传统的宽带自适应算 法只能有效控制其中最强的1~2个频率振动;② 机械设备由多个隔振器支承,结构通常较复杂,次 级通道矩阵特征值分散度大,造成收敛稳定性和 速度难以兼顾^[1];③机械设备的振幅和频率均可 能出现波动,控制算法应具有较快收敛速度并对 频率波动具有较好鲁棒性,才能取得良好线谱控 制效果;④通常会将多台船舶机械安装在公共浮 筏隔振装置上,多台机组同时运转,因此激发处于 同一窄带、频率相近但有细微差别的多线谱振动, 运转工况波动还可能引起多线谱频率同时波动、

^{*} 收稿日期:2019-10-14 基金项目:军事科技领域青年人才托举工程资助项目(18-JCJQ-QT-002) 作者简介:李彦(1984—),女,广西柳州人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:liyan19840622@yeah.net

引发多振源密频线谱控制难题。

窄带自适应控制算法是在传统宽频自适应算 法基础上,针对多线谱控制需求提出的,该类算 法^[1-3]采用分离提取参考信号和误差信号中不同 频率线谱成分,多个控制子系统并行控制多个线 谱成分。因此可针对难点①的多根线谱振动(噪 声)控制取得良好效果。其中常见的窄带 FxLMS 算法^[1-3]已在精密平台等方面得到了较多应用, 但对于机械设备多通道主动隔振系统耦合性复杂 的情况,FxLMS 算法的次级通道矩阵特征值分散 度大,仍存在收敛速度慢、稳定性差的控制 难题^[1,4]。

针对难点②,海军工程大学的李彦等^[4]在 Elliott 频域多通道 Fx-Newton 算法^[1]的基础上,提 出了时域窄带多通道 Fx-Newton 算法。该算法的 收敛速度对多通道耦合特性不敏感,可显著提高 机械振动主动控制的收敛速度和稳定性;并且突 破了此类算法通常在频域实现的局限性,无须时 频变换、可确保实时性。该算法已较好地解决了 工程实际中机械设备振动主动控制的多线谱、多 通道耦合、收敛速度和稳定性兼顾等技术难题,但 仍难以满足线谱频率波动和多振源密频耦合等实 船复杂工况下的线谱主动控制需求。

本文在时域窄带多通道 Fx-Newton 算法(简称"窄带 Fx-Newton 算法")优点的基础上,针对难 点③的频率波动线谱主动控制需求,研究了窄带 滤波相位失真的自适应补偿器,提出了对线谱频 率波动具有高鲁棒性的改进算法(简称"相位补 偿 Fx-Newton 算法");针对难点④的多振源密频 线谱的主动控制需求,研究了从多振源分离提取 互不相关的多参考信号,从而实现多振源密频线 谱高效、稳定控制的改进算法(简称"多参考 Fx-Newton 算法"),并且算法功能模块可以针对工况 进行组合调用。

1 算法频域公式

本文研究的相位补偿 Fx-Newton 算法和多参 考 Fx-Newton 算法是在时域执行的,但考虑到频 域分析方法的简洁性和直观性,算法原理公式首 先采用频域方法进行推导。

1.1 Fx-Newton 算法频域公式

设主动控制系统的作动器和误差传感器的数 量都是 *L*。多通道 Fx-Newton 算法的控制器频响 自适应更新公式^[4-5]为:

$$W(n+1) = W(n) - \mu \frac{1}{|X|^2} \hat{S}^{-1} X^* E \quad (1)$$

其中: μ 为收敛步长;复数向量 W(n) 为控制器频 响,其复元素 $W_l(n)$ 对应第 l 个控制器;复数矩阵 \hat{S} 表示次级通道 S 的估计, \hat{S}^{-1} 为 \hat{S} 的逆矩阵;复 数 X 表示参考信号,上标"*"表示共轭;复数向 量 E 表示次级振源和主振源共同作用下的误差 信号,其第 l 个复元素对应第 l 个误差传感器。

控制器的最优解^[4-5]为:

$$\boldsymbol{W}_{\text{opt}} = -\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{D} = -\frac{1}{|\boldsymbol{X}|^2}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{X}^*\boldsymbol{D} \quad (2)$$

其中:复数向量 D 表示主振源作用下的扰动信号,其第l 个复元素对应第l 个误差传感器。多通道 Fx-Newton 算法的收敛矩阵^[4-5] 为 $\hat{S}^{-1}S$,特征值分散度则接近 1,因此各特征值对应的各阶控制器均可一致快速收敛。

更普遍地,对于作动器和误差传感器数量分 别为 *L*、*K* 的主动控制系统(*K*≥*L*),多通道 Fx-Newton 算法的控制器更新公式为:

$$W(n+1) = W(n) - \mu \frac{1}{|X|^2} \hat{S}^* X^* E \quad (3)$$

控制器的最优解^[1,5]为:

$$W_{opt} = -S^{+}X^{-1}D = -\frac{1}{|X|^{2}}S^{+}X^{*}D$$
 (4)

其中: $\hat{S}^{+} = (\hat{S}^{H}\hat{S})^{-1}\hat{S}^{H}$ 为 \hat{S} 的广义逆矩阵, \hat{S} 为 $K \times L$ 阶复数矩阵;W(n)为L阶复数向量,E和D为K阶复数向量。当K = L时,式(3)与式(1) 相同。

1.2 相位补偿 Fx-Newton 算法频域公式

振动信号通常由多个频率分量叠加,频域算 法需进行时频变换,故会导致实时性差;而时域算 法中,需要提取才能获得单频线谱信号,其中一种 方法是辨识频率后采用正弦发生器输出单频参考 信号^[6],但该算法对频率失配(估计频率与实际 频率有偏差)的鲁棒性较差^[7]。

通常采用窄带带通滤波器(以下简称"窄带 滤波器")提取单频线谱信号^[1,4],其优点是无须 估计频率,提取的信号频率与原信号一致。

窄带 Fx-Newton 算法频域原理如图 1 所示。 设窄带滤波器在频率 ω 处频响为复数 B,滤波前 的参考信号、扰动信号和误差信号在频率 ω 处的 频谱分别为 X° , D° 和 E° ,滤波后的信号 $X = BX^{\circ}$, $D = BD^{\circ}$, $E = BE^{\circ}$,控制信号 $Y = WX_{\circ}$

窄带 Fx-Newton 算法频域迭代公式^[4-5]为:

$$W(n+1) = W(n) - \mu \frac{1}{|BX|^2} R^* E$$
 (5)

其中,R为次级通道广义逆模型滤波后的参考信



图 1 含窄带滤波器的 Fx-Newton 算法频域原理 Fig. 1 Frequency-domain schematic diagram of Fx-Newton algorithm with narrowband-pass filter

号频谱。

$$\boldsymbol{R} = (\hat{\boldsymbol{S}}^{+})^{*} B \boldsymbol{X} \tag{6}$$

从图 1 和式(6)可知,通过窄带滤波器提取 线谱参考信号 X 后,必须再经过相同的窄带滤波 器,与作用于 E° 的窄带滤波器相匹配,从而让算 法使用的广义逆矩阵模型 \hat{S}^{+} 仍然来自原次级通 道 S 的估计,窄带滤波器陡峭的相频响应并不会 额外增大次级通道模型误差。因此对于频率静态 偏移离开窄带中心的情况,图 1 算法具有较好的 鲁棒性。

但对于机械运转频率在一定范围波动的情况,控制器最优系数为:

 $W_{opt} = -B^{-1}S^{+}X^{-1}D = -B^{-1}S^{+}(X^{o})^{-1}D^{o}(7)$ 频率波动会使相频响应陡峭的滤波器出现较大波 动,从而导致最优解 W_{opt} 本身不断波动,影响寻优 控制效果。

针对线谱频率波动,研究了窄带滤波相位失 真的自适应补偿器,用于抑制线谱频率波动时由 窄带滤波环节引起的最优解波动,从而提高主动 控制的鲁棒性。

相位补偿 Fx-Newton 算法频域原理如图 2 所 示。设相位差补偿器在 ω 处频响为复数 C、串联 在窄带滤波器之后,有 $X = CBX^\circ$ 。若补偿器频响 为 $C = B^{-1}$,则有 $W_{opt} = -S^+(X^\circ)^{-1}D^\circ$,可使 W_{opt} 不受窄带滤波器频响特性影响。





Fig. 2 Frequency-domain diagram of the Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator

该相位差补偿器的频响 C 需随 ω 波动而调整,采用一个在线自适应调整环节实现,并与控制 子系统相对独立,如图 2 所示。 $U = BX^\circ$, $U_B =$

$$BU, U_{BC} = CU_B, \text{ [J]} \hat{n}:$$

$$E_U = U - U_{BC} = U - CU_B \qquad (8)$$

$$J_U = \frac{1}{2} (U^* U - U^* CU_P - C^* U_P^* U + C^* U_P^* CU_P)$$

$$g_U = -U_B^* E_U \tag{10}$$

其中, J_U 为性能函数, g_U 为其相对于 C 的梯度。

因此相位差补偿器的频域迭代公式为:

$$C(n+1) = C(n) + \varepsilon \frac{1}{|U_B|^2} (U_B)^* E_U$$
(11)

其中, ε 为收敛步长。式(11)为单通道 LMS 算法,无须调用控制系统次级通道和控制器系数,不受隔振装置物理特性影响,运算量小、收敛速度快。当 ω 波动时,式(11)快速收敛,使 $E_v \rightarrow 0$, *CBU* $\rightarrow U$,从而保持 $C \rightarrow B^{-1}$ 。

1.3 多参考 Fx-Newton 算法频域公式

在船舶中常将多台机械安装在公共浮筏上, 可能激发处于同一窄带、频率相近但有细微差别 的多线谱振动,本文以同一窄带的双线谱控制为 例进行研究。

由于误差信号中的窄带双谱很难分离,采用 同一个控制器对窄带双线谱进行控制很困难。但 根据自适应控制的相关性特性,若能从两个振源 分别获得两个参考信号^[8-9],并确保参考信号与 对应振源相关性较强、与另外振源相关性较弱,然 后将两个参考信号分别输入两个并行控制器,则 即使误差信号中同时含有两个振源引起的振动, 也可取得较好控制效果。

在能获得独立参考信号的前提下,本文的多 参考 Fx-Newton 算法频域原理如图 3 所示。在实 际应用中,多台机械振源的独立参考信号可以是 旋转机械的转速信号、往复机械的脉冲信号、机脚 加速度信号等。



图 5 风参考 FX-Newton 异石殃或床连 Fig. 3 Frequency-domain diagram of the double-reference Fx-Newton algorithm

图 3 中变量定义与图 1 中一致,区别在于顶

标"一"对应第二个振源,不带顶标则对应第一个 振源。

- 经窄带滤波后,双线谱密频误差信号为:
- $\overline{E} + E = B[D^{\circ} + \overline{D}^{\circ} + S(Y + \overline{Y})]$ $= (D + BSWX) + (\overline{D} + \overline{B}S\overline{W}\overline{X}) \quad (12)$ Field (12)Field (12)

$$J = \frac{1}{2} (\boldsymbol{E} + \overline{\boldsymbol{E}})^{\mathrm{H}} (\boldsymbol{E} + \overline{\boldsymbol{E}})$$
(13)

分别计算性能函数 J相对于 W 和 \overline{W} 的复梯 度向量 g 和 \overline{g} ,然后计算 g 和 \overline{g} 分别相对于 W 和 \overline{W} 的一阶导数 g'和 \overline{g}' ,则可得:

$$\frac{g}{g'} = \frac{X^* S^{\mathrm{H}} B^* (E + \overline{E})}{X^* S^{\mathrm{H}} B^* BSX} = \frac{(S^{\mathrm{H}} S)^{-1} S^{\mathrm{H}} (E + \overline{E})}{BX}$$

$$(14)$$

$$\frac{\overline{g}}{\overline{g'}} = \frac{\overline{X}^* S^{\mathrm{H}} \overline{B}^* (\overline{E} + E)}{\overline{X}^* S^{\mathrm{H}} \overline{B}^* \overline{B} S \overline{X}} = \frac{(S^{\mathrm{H}} S)^{-1} S^{\mathrm{H}} (\overline{E} + E)}{\overline{B} \overline{X}}$$

$$(15)$$

由此可得,双参考 Fx-Newton 算法频域迭代 公式为:

$$W(n+1) = W(n) - \mu \frac{1}{|BX|^2} R^* (E + \overline{E})$$
(16)
$$\overline{W}(n+1) = \overline{W}(n) - \mu \frac{1}{|\overline{B}\overline{X}|^2} \overline{R}^* (E + \overline{E})$$
(17)

其中,

$$\boldsymbol{R} = \left[\left(\hat{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}} \hat{\boldsymbol{S}} \right)^{-1} \hat{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}} \right]^{*} BX = \left(\hat{\boldsymbol{S}}^{*} \right)^{*} BX \quad (18)$$

 $\bar{R} = [(\hat{S}^{H}\hat{S})^{-1}\hat{S}^{H}]^{*}\bar{B}\bar{X} = (\hat{S}^{+})^{*}\bar{B}\bar{X}$ (19) 从式(16)和式(18)可知,虽然窄带滤波器 *B* 无法 分离密频线谱误差信号 *E* + \bar{E} ,但由于参考信号 提取环节的分离,信号 *R* 与 \bar{E} 互不相关,因此误 差信号 \bar{E} 不会再对控制器 *W* 的自适应迭代产生 影响。从式(17)和式(19)同理可知,误差信号 *E* 也不会影响控制器 \bar{W} 的自适应寻优。

2 算法时域实现

2.1 相位补偿 Fx-Newton 算法的时域实现

在频域完成控制算法推导后,将图 1 及公式 中的复数向量及复数矩阵展开为复数标量形 式^[4-5],然后以图 4 的线谱 2 阶时频滤波器^[10]为 基础(参数 $\hat{a}(\omega)$ 、 $\hat{b}(\omega)$ 分别为线谱频率 ω 处次级 通道频响估计值的实部和虚部),实现次级通道广 义逆模型滤波运算。滤波运算公式^[4-5]在此省略。

对于相位补偿 Fx-Newton 算法,图 2 中的相 位差补偿器在时域实现的结构如图 5 所示,同样 基于 2 阶时频滤波结构进行相位补偿滤波。补偿



图 4 线谱频率 ω 处的 2 阶时频滤波器 Fig. 4 The 2nd-order time-frequency filter for sinusoid at frequency ω

器的实部系数 c_{R} 和虚部系数 c_{I} 参照频域式(8)和 式(11)进行时域迭代调整。图 5 中时域信号 u(n)与图 2 中频域信号 U 的实部成分相对应, $mu_{Q}(n)$ 与u(n) 正交, 对应频域信号 U 的虚部成分, 后续其 他信号 e(n)、d(n)等定义均可依此类推。



图 5 窄带滤波相位差的自适应补偿器结构 Fig. 5 Adaptive phase-shift compensator for the narrowband pass filtering in time domain

2.2 多参考 Fx-Newton 算法的时域实现

对于多参考 Fx-Newton 算法,图 3 的频域原 理框图在时域实现的结构如图 6 所示(以双参 考、1 个窄带频段、具有 3 个误差传感器和 2 个 作动器的系统为例)。从图 6 中可知,首先应对 双振源的参考信号分别进行提取、相位差补偿、 次级通道广义逆模型滤波,其误差信号无须区 分,然后进行两个参考子系统的控制器系数更 新和控制信号生成,最后将两个子系统控制信 号叠加输出。

参考信号 x̄(n)的控制器迭代式(17)和式(19)在时域实现如下:

$$\overline{w}_{li}(n+1) = \overline{w}_{li}(n) - \tilde{\mu} \sum_{k=1}^{L} e_{k}(n) \bar{r}_{lk}(n-i)$$

$$i = 0, \dots, N-1 \qquad (20)$$

$$\bar{r}_{lk}(n) = \hat{p}_{lk}(\omega) \bar{x}_{B}(n) + \hat{q}_{lk}(\omega) \bar{x}_{QB}(n)$$

其中:归一化步长 $\tilde{\mu} = \mu / |\overline{BX}|^2$, \overline{w}_{li} ($i = 0, \dots, N-1$) 为参考信号 $\bar{x}(n)$ 对应控制子系统的第l个控制

(21)





器系数;其余信号均为窄带滤波器提取后的时域 线谱, $e_k(n)$ 为第 k 路误差信号、包含多台机组引 起的密频振动干扰, $\bar{x}_B(n) = \bar{B}(z)\bar{x}(n), \bar{x}_{QB}(n)$ 与 $\bar{x}_B(n)$ 正交; $\hat{p}_{lk}(\omega)$ 和 – $\hat{q}_{lk}(\omega)$ 为 ω 处次级通道频 响广义逆模型的实部和虚部, $(\hat{S}^+)_{lk}^* = \hat{p}_{lk}(\omega)$ – $j\hat{q}_{lk}(\omega)$ 。

参考信号 x(n) 对应的控制信号为:

$$\bar{y}_{l}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \bar{w}_{li} \bar{x}(n-i)$$
(22)

式(20)~(22)即为对应参考信号 $\bar{x}(n)$ 的控 制算法时域公式,类似可得对应参考x(n)的 $w_{li}(n)$ 更新公式和控制信号 $y_l(n)$ 计算公式。

最终输出的控制信号为各参考信号子系统的 叠加:

$$y_{l}^{o}(n) = y_{l}(n) + \bar{y}_{l}(n)$$
 (23)

图 6 中的相位差补偿模块可以针对工况进行 组合调用,若实际工作时线谱频率较稳定,可不采 用该补偿环节。

3 实验研究

3.1 双振源密频线谱的控制实验

3.1.1 实验台架及测点布置 本实验在双机组浮筏隔振装置上进行,如 图 7所示,浮筏上共安装有两台空气压缩机组,各 由 12 只橡胶隔振器支撑,筏架与基座之间由 6 个 气囊隔振器连接,总承载约 5 t。6 个气囊隔振器 内集成有磁悬浮作动器(称为作动器 A1 ~ A6), 作为主动控制次级振源;以基座 6 个主被动隔振 器附近的加速度为误差信号(称为测点 el ~ e6)。



图 7 浮筏隔振装置的主动作动器及测点布置 Fig. 7 Experimental setup of active actuators and measuring points for the raft isolation device

两台空气压缩机组运转可激发宽频与多根线 谱振动。此外,浮筏上表面的前部和后部共安装 有2只电磁惯性振子激振器(分别称为激振器1 和2),也可作为初级振源输出较理想的窄带双线 谱信号。 3.1.2 激振器输出窄带双线谱时控制效果对比

· 6 ·

通过惯性激振器激发频率相近、处于同一个 窄带频段的双线谱振动(60 Hz 与 62 Hz)。采用 单参考 Fx-Newton 算法进行两组实验,然后采用 多参考 Fx-Newton 算法进行第三组实验。其中, 第一组实验的参考信号为激振器 1 激励电压(称 为 ref 1),包含 62 Hz 成分;第二组实验的参考信 号为中层筏架加速度信号(称为 ref 2),包含 60 Hz与 62 Hz 成分;第三组实验的双参考信号分 别为两个激振器的激励电压。

图 8(a)为参考信号 ref 1 的 Fx-Newton 算法控制过程中误差测点振动时频谱图(基于短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)),可知该算法难以同时抑制同一窄带频段的双线谱振动, 仅对其中一根线谱有抑制效果,因为其参考信号仅包含与一个振源相关的成分。图 8(b)为参考信号 ref 2 的 Fx-Newton 算法试验结果,其参考信号同时包含 60 Hz 与 62 Hz 成分,不仅没有取得线谱抑制效果,而且还导致同一窄带频段的双线谱振动控制发散了。试验结果表明,用单参考 Fx-Newton 算法 难以控制多个振源引发的窄带多线谱振动。









图 9 为双参考 Fx-Newton 算法的误差测点振动时频谱图,两根线谱都被迅速、有效控制,最终 被淹没于背景噪声,说明本文算法对同一窄带频 段双线谱振动取得了很好的控制效果。

该算法的控制信号为各参考信号子系统的控制信号叠加,因此若能获得独立参考信号,该算法可适用于三个及更多振源的主动控制。



图 9 双参考 Fx-Newton 算法控制的误差测点 振动时频谱



3.1.3 两台空压机组运转激励窄带双线谱时的 控制效果

在实验装置上,让两台空压机组同时运转,转 速约 1500 r/min,基频约 25 Hz,各次谐频分别为 50 Hz、75 Hz 等。首先在不进行主动控制的情况 下采集 250 s 数据分析其振动特性,图 10(a)为双 机组同时运转时基座测点 75 Hz 附近振动时域波 形,可知振幅忽高忽低,幅值呈现周期性的强弱变 化,即出现了"拍"的现象,这是因为两台空压机 组的转速很接近但又有轻微差别,从而引发了窄 带密频双线谱振动。图 10(b)为基座 e1~e6 测 点平均功率随时间变化曲线,更直观地呈现振动 功率周期性强弱变化。

然后采用双参考 Fx-Newton 算法进行主动控制(双参考信号分别为两台空压机的机脚振动), 实验结果如图 11 所示。







图 10 不进行主动控制时,误差测点 75 Hz 振动时域波形及功率







- 图 11 主动控制开启/关闭时,控制信号时域波形 及误差测点 75 Hz 振动功率
- Fig. 11 Time domain record of control signal and the evolution of average power of error signals at 75 Hz with active control on/off $\,$

考虑到"拍"现象导致的振幅强弱变化,每隔 10~20 s开启/关闭主动控制算法以便于对比观 察控制/不控制状态下的振动功率差别。 图 11(a) 为控制信号时域波形,可明确区分控制/ 不控制状态的分段,分别标记为"c"和"uc",并相 应地将图 11(b) 基座误差测点平均振动功率曲线 也分成控制/不控制的 14 个分段。观察图 11(b) 并对比图 10(b)可知,本文提出的多参考 Fx-Newton 算法效果非常好,可对两台空压机组运转 激励的窄带密频双线谱振动进行有效抑制,一旦 切换到"控制状态",则基座误差测点振动迅速降 低,控制效果达到 14 dB 左右。

3.2 频率波动线谱的控制实验

3.2.1 实验台架及测点布置

本实验在如图 12 所示的单层隔振装置上进 行,上层平台与基座之间由 6 个气囊隔振器连接, 总承载约 3.6 t。6 个气囊内集成有磁悬浮作动器 (称为作动器 A1 ~ A6),作为主动控制的次级振 源;以基座 6 个主被动隔振器附近的加速度为误 差信号(称为测点 e1 ~ e6)。上层平台安装有电 磁惯性振子激振器作为初级振源,输出频率波动 的扫频线谱振动。





3.2.2 单激振器输出频率波动线谱时控制效果 对比

以激振器 1#作为初级振源,输出扫频线谱, 在频率 f_o = 2.5 Hz 到 f_o + 2.5 Hz 之间线性扫描, 扫频速度 0.2 Hz/s,采用 Fx-Newton 算法和相位 补偿 Fx-Newton 算法分别进行主动控制,参考信 号为惯性激振器动子加速度,实测对比两种算法 对频率波动线谱的控制效果,结果如图 13~14 所示。

对比图 13(a) 和图 13(b) 时频谱图(6个误 差测点平均)可知,在中心频率 f。= 80 Hz 扫频工 况下,采用 Fx-Newton 算法控制后,由于频率波动 导致窄带提取的参考信号相位剧烈波动,引起最 优控制系数波动,控制算法难以寻优,因此线谱功 率有一定降低,但效果不够明显;而采用相位补偿 Fx-Newton 算法后,其相位补偿环节可以抑制窄带 参考信号的相位波动,使最优控制系数稳定,控制 后的线谱功率降低到更接近背景噪声水平;从 图 13(c)可知,相位补偿 Fx-Newton 算法对扫频 线谱的控制效果改善了约 15 dB。从图 14 可知, 中心频率f_o = 110 Hz 扫频工况下的主动控制试验 也有类似结果,相位补偿 Fx-Newton 算法控制效 果提高约 13 dB。









(b) Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator



(c) 两种算法对比



- 图 13 f_o = 80 Hz 时,无/有相位补偿的 Fx-Newton 算法的误差信号功率收敛过程
- Fig. 13 Evolution of the average power spectra of the error signals for the Fx-Newton algorithm with and without phase-shift compensator when $f_{\circ} = 80$ Hz

图 15 为中心频率 f_o = 80 Hz 扫频、然后频率 往复突变工况下的实验结果。可知 Fx-Newton 算



(b) 相位补偿 Fx-Newton 算法

(b) Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator



(c)两种算法对比

(c) Comparison of two algorithms

- 图 14 f_o = 110 Hz 时,无/有相位补偿的 Fx-Newton 算法的误差信号功率收敛过程
- Fig. 14 Evolution of the average power spectra of the error signals for the Fx-Newton algorithm with and without phase-shift compensator when $f_{\circ} = 110$ Hz

法和相位补偿 Fx-Newton 算法在线谱频率跳变 后,均未出现不稳定发散问题;频率跳变后,两种 算法均出现了很短时间(<0.5 s)的超调,其中相 位补偿 Fx-Newton 算法由于补偿环节的存在,超 调量比 Fx-Newton 算法高约2 dB,但是后续两种 算法均能重新快速收敛、恢复控制效果,鲁棒性 好;相位补偿 Fx-Newton 算法控制效果仍远优于 Fx-Newton 算法。

3.3 频率波动双振源密频线谱的控制实验

以激振器1#和2#作为两个初级振源,输出同



(b) Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator



(c) Comparison of two algorithms

图 15 f_o = 80 Hz 时,扫频且频率突变工况下,无/有相位 补偿的 Fx-Newton 算法误差信号功率收敛过程 Fig. 15 Evolution of the average power spectra of the error signals for the Fx-Newton algorithm with and without phase-shift compensator, when f_o = 80 Hz and frequency sweeps and jumps

一窄带内的双扫频线谱,采用具有相位补偿功能 的双参考 Fx-Newton 算法进行主动控制,参考信 号为两个惯性激振器动子加速度。

图 16 的工况为中心频率 $f_o = 80$ Hz,两个激振器分别以 $f_o = 2.5$ Hz 和 $f_o + 2.5$ Hz 为起点频率,在 $f_o = 2.5$ Hz 到 $f_o + 2.5$ Hz 之间扫频,速度 0.2 Hz/s。从图 16 可知,在双线谱频率波动反向 扫频工况下,本文算法取得了良好控制效果,控制 后的线谱基本淹没于背景噪声。

图 17 的工况为中心频率 f。= 80 Hz,两个激振

器分别以*f*。-2.5 Hz 和*f*。-1.5 Hz 为起点频率,以 *f*。+1.5 Hz 和*f*。+2.5 Hz 为终点频率,扫频并且频 率往复突变。从图 17(a)可知,在频率差为1 Hz 的 密频双线谱同向扫频工况下,本文算法控制后的线 谱也基本淹没于背景噪声;在频率跳变后,能重新快 速收敛、恢复控制效果,具有很好的稳定性。对比 图 17(a)和图 17(b)可知,扫频速度提高一倍,本文 算法控制效果略有下降,但仍较优良,稳定性仍较好。



Fig. 16 Evolution of the average power spectra of the errors for the double-reference Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator



图 17 扫频且频率突变工况下,相位补偿双参考 Fx-Newton 算法的误差信号功率收敛过程

Fig. 17 Evolution of the average power spectra of the errors for the double-reference Fx-Newton algorithm with phase-shift compensator, when the frequency sweeps and jumps

4 结论

针对工程实际中机械设备振动线谱频率波动 以及多台机组运转激励出密频振动线谱带来的主 动控制难题,在前期研究的收敛速度快、稳定性好 的多通道窄带 Fx-Newton 算法基础上进行改进, 提出相位补偿 Fx-Newton 算法和多参考 Fx-Newton 算法,推导了算法频域公式,给出时域实 现公式,并进行了实验研究。

实验结果表明,用单参考 Fx-Newton 算法难 以控制多个振源引发的窄带多线谱振动,而双参 考 Fx-Newton 算法对双激振器、双空压机机组激 励出的同一窄带频段双线谱振动都可取得很好的 控制效果。相位补偿 Fx-Newton 算法对于频率波 动线谱的控制效果,比 Fx-Newton 算法提高了 13~15 dB,并且在频率突变等情况下具有良好的 鲁棒性。本文还将相位补偿与双参考算法结合, 进行了频率波动双振源密频线谱的控制实验,也 取得了良好的控制效果,进一步验证了控制算法 的鲁棒性。

参考文献(References)

- ELLIOTT S. Signal processing for active control [M]. London: Academic Press, 2001.
- [2] MORGAND R, SANFORD C. A control theory approach to the stability and transient analysis of the filtered-x LMS adaptive notch filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(9): 2341-2346.

- [3] 孙旭, 陈端石. 次级通道模型误差下滤波 X 型最小方差 算法性能的分析[J]. 声学学报, 2003, 28(1): 73-78.
 SUN Xu, CHEN Duanshi. Analysis on the performance of FXLMS algorithm with secondary path modeling error [J]. Acta Acustica, 2003, 28 (1): 73-78. (in Chinese)
- [4] 李彦,何琳,帅长庚,等. 多通道窄带 Fx-Newton 时频算法及动力机械有源隔振实验[J]. 声学学报, 2015, 40(3): 391-403.
 LI Yan, HE Lin, SHUAI Changgeng, et al. MIMO Fx-Newton narrowband algorithm and experiment of active vibration isolation on diesel generator [J]. Acta Acustica, 2015, 40(3): 391-403. (in Chinese)
- [5] LI Y, HE L, SHUAI C G, et al. Time-domain filtered-x-Newton narrowband algorithms for active isolation of frequency-fluctuating vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 367: 1-21.
- [6] KIM S, PARK Y. Active control of multi-tonal noise with reference generator based on on-line frequency estimation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 227(3): 647-666.
- JEON H J, CHANG T G, YU S, et al. A narrowband active noise control system with frequency corrector [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2011, 19 (4): 990 - 1002.
- [8] LIU J X, CHEN X F, GAO J W, et al. Multiple-source multiple-harmonic active vibration control of variable section cylindrical structures: a numerical study [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 461-474.
- [9] WANG C Y, HE L, LI Y, et al. A multi-reference filtered-x-Newton narrowband algorithm for active isolation of vibration and experimental investigations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 108-123.
- [10] ZHAO G, ALUJEVIC N, DEPRAETERE B, et al. Experimental study on active structural acoustic control of rotating machinery using rotating piezo-based inertial actuators [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 348: 15 – 30.