

基于改进型双模分数阶重复控制器的高速磁悬浮电机谐波电流抑制

王献章, 徐向波*, 陈劭, 李俊峰, 李博伦, 王麒臻
(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

Harmonic Current Suppression in the High-Speed Magnetically Suspended Motor Based on Improved Dual Mode Fractional Order Repetitive Controller

WANG Xianzhang, XU Xiangbo*, CHEN Shao, LI Junfeng, LI Bolun, WANG Qizhen
(The School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Harmonic currents in active magnetic bearing systems are caused by rotor imbalance and sensor runout, which consequently result in harmonic vibrations. Repetitive controller can suppress both same frequency and multiply frequency harmonics, but traditional repetitive controller must satisfy that the control system sampling frequency is an integer multiple of the actual rotor speed, which severely limits their applicability. To solve this problem, an improved dual mode fractional order repetitive controller is designed. The Lagrange interpolation method is utilized to convert the fractional order to an integer, addressing the non-integer delay issue in repetitive control. Even and odd harmonics are independently suppressed through dual channels, the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th harmonics are respectively reduced by 87.9%, 61.3%, 86.9%, 36.9% and 85.3%. Simulation and experimental results verify the accuracy and effectiveness of the improved repetitive controller for harmonic current suppression.

Key words: active magnetic bearing system; sensor runout; even and odd harmonics; repetitive controller; harmonic current suppression

摘要: 主动磁悬浮轴承系统的转子不平衡和传感器跳动会使系统产生谐波电流, 从而导致谐波振动。重复控制器能同时抑制同频和倍频谐波, 但传统重复控制器必须确保控制系统的采样频率与实际转频之比为整数, 极大地限制了其适用性。为解决此问题, 设计了一种改进型双模分数阶重复控制器。采用拉格朗日插值法将分数阶变为整数, 解决了重复控制的非整数延迟问题; 通过双

支路独立地消除奇偶次谐波, 第1次、2次、3次、4次和5次谐波分别降低了87.9%、61.3%、86.9%、36.9%和85.3%。仿真和试验结果验证了改进型重复控制器对谐波电流抑制的精确性和有效性。

关键词: 主动磁悬浮轴承系统; 传感器跳动; 奇偶次谐波; 重复控制器; 谐波电流抑制

0 引言

与传统电机相比, 高速磁悬浮电机具有无接触运行、无油污染、低振动、低功耗和主动控制等优点, 被广泛应用于航空航天、电力生产和污水处理等领域^[1]。在高速磁悬浮压缩机运行过程中, 不平衡转子产生的离心力会导致转子振动, 影响主动磁悬浮轴承系统的转子控制精度^[2]。此外, 由于转子表面的非理想圆、材质不均匀等特性, 位移传感器会产生多个倍频谐波, 通过控制器和功率放大器产生谐波电流, 造成高功率损耗和外壳振动^[3]。转子不平衡会产生与转速同步频率的振动力, 而位移传感器噪声会产生与转速整数倍频的谐波振动力, 随着转速的增加, 振动力显著增大, 从而导致机壳强烈振动, 严重影响机器的安全运行^[4]。因此, 实施主动振动控制策略至关重要。

重复控制基于内模原理, 根据闭环系统给定信号或扰动信号的特性以及动态模型产生控制作用, 使系统能够跟踪给定信号、抑制扰动信号, 从而消除周期干扰^[5]。理论上内模控制系统可实现无静态误差的输入跟随和扰动抑制, 但会因为引

基金项目: 国家自然科学基金(32371868)

National Natural Science Foundation of China (32371868)

人无穷多个极点而影响原系统的稳定性^[6]。

重复控制能同时抑制同频和倍频谐波,其需要外源输入信号的确切周期,在实际应用中可能会受到时钟误差漂移、传感器测量精度及电机速度误差等因素的影响^[7]。文献[8]设计了一种新型鲁棒奇次重复控制器,通过改变延时单元,仅对奇次谐波产生抑制效果,并引入加权因子提高控制器的抗频率波动鲁棒性。文献[9]提出了一种低通滤波器相位延迟的补偿方法,提高了系统的稳定性和鲁棒性,但降低了谐波扰动的抑制精度。文献[10]在传统奇次重复控制器的基础上并联一个谐振控制器,设计了一种混合奇次重复控制器,仿真结果表明该控制器能够提高谐波电流的抑制精度。文献[11]为了解决相位补偿函数的选取问题,利用磁轴承控制系统的各阶段相位特性,设计了一种零相移奇次重复控制器,并通过试验验证了该控制器的可行性。文献[12]结合重复控制设计了转矩扰动观测器,该观测器能够周期性补偿转子扰动误差。文献[13]提出了一种基于扩张状态观测器的液体静压轴承重复控制方法,该方法具有更好的轴心轨迹跟踪能力和扰动抑制能力。文献[14]设计了一种双模分数重复控制器,该控制器可以根据谐波频率的特性,按需求选取不同的奇次或偶次通道增益因子来抑制谐波电流。实际使用时,转子受到环境等多方面干扰,并且传感器测量精度误差导致测得的转频与实际值存在误差,不能独立消除奇偶次谐波,从而影响重复控制器在实际转频处的增益^[15-17]。

为解决上述问题,本文基于高速磁悬浮电机,设计了一种改进型双模分数阶重复控制器。该控制器采用拉格朗日插值法将分数阶变为整数,解决了重复控制的非整数延迟问题,提高了系统的响应速度;并通过双支路独立地消除奇偶次谐波。仿真和试验结果表明,所设计的改进型重复控制器可以实现对任意频率谐波电流的精确抑制。

1 含不平衡质量及传感器跳动的磁悬浮轴承系统动态建模

含不平衡质量的磁悬浮电机转子系统动态模型如图1所示。磁悬浮高速电机的转子系统主要由磁悬浮转子、磁轴承、位移传感器以及功率放大

器组成^[18]。磁轴承和位移传感器分别对称放置在转子的两端,图中只画出了转子径向方向的两对,垂直于纸面方向的两对未画出。位移传感器对分放置于转子的两端,其到转子中心平面的距离为 l_s ;磁轴承1、2同样也关于转子中心平面对称,距离为 l_m 。 R_R 为转子的旋转中心线和中轴面的交点; O_1 为由转子几何轴与 xy 坐标平面的交点; R_M 为转子质心; S_a 为磁隙; i_{ay} 、 i_{by} 为其中一个径向通道的控制电流; F_{ax} 、 F_{ay} 、 F_{bx} 、 F_{by} 为各径向通道产生的电磁力; x_1 、 y_1 分别为转子惯性轴在广义坐标系中 x 、 y 方向的位移; x_c 、 y_c 分别为转子几何轴在广义坐标系中 x 、 y 方向的位移。质量分布不均会导致转子不平衡,传感器跳动会造成传感器检测到的轴线与转子的绝对空间位置不一致,从而导致测量信号包含谐波噪声,这是造成几何中心、质心和旋转中心不一致的主要因素。

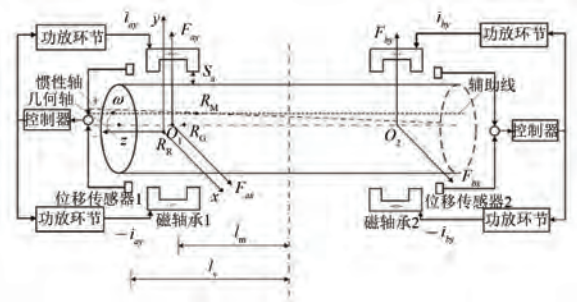


图1 磁悬浮转子系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetically suspended rotor system

如图2所示,建立以旋转中心 R_R 为原点的坐标系 xR_Ry 。其中几何中心 R_C 、质心 R_M 在 xR_Ry 坐标系中的坐标分别为 (x_c, y_c) 和 (x_1, y_1) 。然后建立以 R_C 为原点,随转子同步转动的固连坐标系 uR_Cv ,取与 R_Rx 轴平行的虚线为初始时刻,则转子以角速度 ω 绕旋转中心旋转时, $R_C R_M$ 也绕 R_C 点转动同样的角度。 $R_C R_M$ 的模为 e_0 ,初始相位为 ψ 。

2 磁悬浮转子系统微振动机理分析

转子系统中的磁悬浮动力学方程为

$$\begin{cases} F_x = m\ddot{x}_1 = F_{ax} + F_{bx} \\ F_y = m\ddot{y}_1 = F_{ay} + F_{by} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_x 、 F_y 分别为 x 、 y 方向的平动合力。

位移传感器检测轴为转子的几何轴,因此几

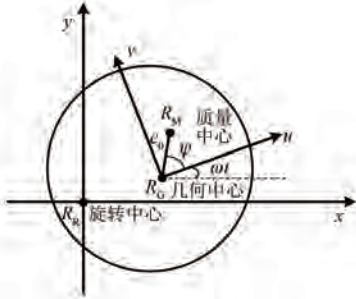


图 2 磁悬浮转子不平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of unbalance of magnetically suspended rotor

何中心偏离中心的位移可以表示为

$$\begin{cases} x_G = x_1 - e_0 \cos(\omega t + \psi) \\ y_G = y_1 - e_0 \sin(\omega t + \psi) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入到式(1)中,可得:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_G + m\omega^2 e_0 \cos(\omega t + \psi) = F_x \\ m\ddot{y}_G + m\omega^2 e_0 \sin(\omega t + \psi) = F_y \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,转子旋转时的离心力一部分由几何中心、质心与旋转中心不一致导致;另一部分受转子转频影响且由质心与几何中心不一致产生。

四个位移通道中传感器跳动的扰动分别用 q_{axsr} 、 q_{bxsr} 、 q_{aysr} 和 q_{bysr} 表示。传感器误差扰动可描述为

$$\mathbf{q}_{sr} = \begin{bmatrix} q_{axsr} \\ q_{bxsr} \\ q_{aysr} \\ q_{bysr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n A_{ai} \cos(k\omega t + \psi_{ai}) \\ \sum_{i=1}^n A_{bi} \cos(k\omega t + \psi_{bi}) \\ \sum_{i=1}^n A_{ai} \cos\left(k\omega t + \psi_{ai} - \frac{i\pi}{2}\right) \\ \sum_{i=1}^n A_{bi} \cos\left(k\omega t + \psi_{bi} - \frac{i\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: A_{ai} 、 A_{bi} 、 ψ_{ai} 、 ψ_{bi} 分别为位移传感器 1 和 2 的谐波分量的振幅、初始相位; i 为传感器跳动的谐波阶数, 为正整数。

图 3 为含转子不平衡和传感器跳动的磁轴承 X 方向控制系统的简化框图。其中, $G_c(s)$ 为原始控制器; $G_a(s)$ 为功率放大器; $q_{xsr}(s)$ 为 X 方向的位移传感器检测误差; $\Delta x(s)$ 为转子不平衡扰动向量; i_x 为功率放大器环节输出并作用于磁轴承

的线圈电流; k_i 为电流刚度; k_x 为位移刚度; k_s 为位移传感器放大系数; k_{ad} 为与 AD 转换器相应的影响因子; $G_p(s)$ 为转子系统; $x_G(s)$ 为转子几何轴位移; $x_1(s)$ 为转子惯性轴位移。含转子不平衡和传感器跳动的磁悬浮转子动力学模型可表示为

$$\begin{aligned} ms^2 [x_G(s) + \Delta x(s)] = \\ - 2k_i k_{ad} [q_{xsr}(s) + k_s x_G(s)] \cdot \\ G_c(s) G_a(s) + 2k_x x_G(s) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,由于转子不平衡和位移传感器跳动,控制电流中存在同频和倍频的干扰。抑制谐波电流可有效减小谐波振动力,从而减小机壳振动,降低总体功耗^[19-20]。因此,本文提出一种改进型双模分数阶重复控制方案,以有效减少谐波电流的产生。

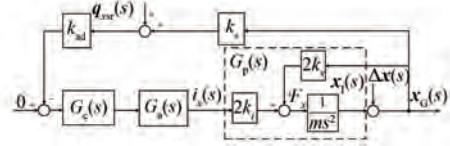


图 3 含转子不平衡和传感器跳动的 X 方向控制系统简化框图

Fig. 3 Simplified block diagram of X-direction control system with rotor unbalance and sensor runout

3 改进型双模分数阶重复控制器的谐波电流抑制

3.1 改进型重复控制器设计

图 4 为传统重复控制器的控制系统原理图,其中, $G_{rc}(s)$ 为传统重复控制器模块; $i_x(s)$ 为功率放大器 $G_a(s)$ 输出并作用于磁轴承的线圈电流; i_c 为经过重复控制模块后的输出。

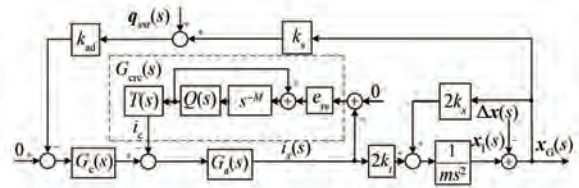


图 4 传统重复控制器 X 方向控制原理框图

Fig. 4 Control schematic block diagram of X-direction of conventional repetitive controller

传统重复控制器模块的传递函数为

$$G_{rc}(s) = \frac{s^{-M} Q(s) T(s) e_{rc}}{1 - s^{-M} Q(s)} \quad (6)$$

式中: $Q(s)$ 为低通滤波函数; e_{rc} 为控制器增益; M 为超前步长; $T(s) = k_{cp} \frac{s+w}{k_{wp}s+w}$ 为相位校正函数, k_{cp} 为直流增益, k_{wp} 为分度系数, w 为频率。

当 $k_{cp} = 0$ 时,传统重复控制器关闭,仅 $G_c(s)$ 在工作,从而实现磁悬浮高速转子的稳定悬浮;当 $k_{cp} \neq 0$ 时,该重复控制器和 $G_c(s)$ 共同作用,在稳定悬浮的基础上实现对多谐波电流的抑制。

$$\text{令 } G_p(s) = \frac{2k_i}{ms^2 - 2k_x}, \text{ 定义传统系统函数为}$$

$$S_0 = \frac{k_s k_{ad} G_c(s) G_a(s)}{1 + k_s k_{ad} G_c(s) G_a(s) G_p(s)} \quad (7)$$

含重复控制器的磁轴承控制系统函数可以表示为

$$S_{rc} = \frac{k_s k_{ad} G_c(s) G_a(s)}{1 + k_s k_{ad} G_c(s) G_a(s) G_p(s) - G_{rc}(s) G_a(s)} \quad (8)$$

改进型双模分数阶重复控制器的控制原理图如图5所示。

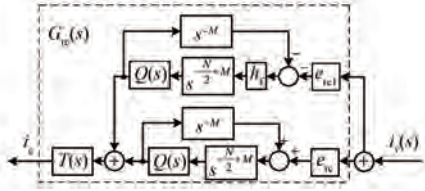


图5 改进型双模分数阶重复控制器控制系统原理框图

Fig. 5 Control schematic block diagram of improved dual mode fractional order repetitive controller

由图5可知改进型双模分数阶重复控制器的传递函数为

$$G_{rc}(s) = [e_{rc} G_0(s) + e_{rc1} G_1(s)] T(s) M(s) Q(s) \quad (9)$$

式中: $e_{rc} = \frac{u_0}{2(1+h_f)}$ 为奇次谐波重复控制器控制增益;

$e_{rc1} = \frac{u_1 h_f}{1+h_f}$ 为偶次谐波重复控制器控制增益, u_0

和 u_1 为性能影响系数, h_f 为调整因子; $M(s) = s^M$

为步长函数; $G_0(s) = \frac{s^{-N/2}}{1-s^{-N/2}Q(s)}$, N 为控制系统

采样频率与转子转频的比值; $G_1(s) =$

$$\frac{-h_f s^{-N/2}}{1+h_f s^{-N/2}Q(s)}$$

若 $u_0 = 0$,则为奇次谐波重复控制器;若 $u_1 = 0$,则为偶次谐波重复控制器。如果控制系统的频谱中奇次谐波影响较大,则可通过调整 u_1 和 u_0 的权重值来调整重复控制器的动态性能。在实际应用中,控制系统采样频率与转子转频的比值 N 并非整数,极大地限制了重复控制器的适用性。针对此问题,在原延时环节加入了分数阶,即:

$$s^{-\frac{N}{2}} = s^{-N_1} \cdot s^{-W} \quad (10)$$

式中: W 为分数阶, $0 < W < 1$ 。

含分数阶的重复控制器控制原理框图如图6所示。

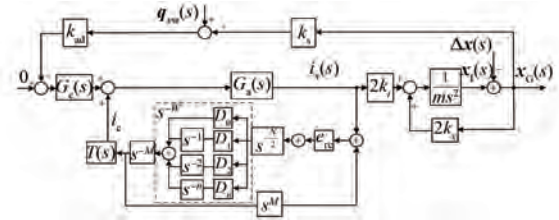


图6 含分数阶的重复控制器控制原理框图

Fig. 6 Control schematic block diagram of repetitive controller with fractional order

图6中当 $i_x(s)$ 输入到重复控制器中第一条支路时, i_c 为输出电流,运用拉格朗日插值法可求得 s^{-W} 表达式为

$$s^{-W} \approx \sum_{i=0}^n D_i \cdot s^{-i} \quad (11)$$

式中: $D_i = \prod_{r=0, i \neq r}^n \frac{W-r}{i-r}$,近似余项可推导为

$$R_n = \frac{\xi^{-W-n} \prod_{r=0}^{n-1} (-W-r)}{(n+1)!} \prod_{r=0}^n (W-r) \quad (12)$$

由式(12)可知,随着阶层的增加,第 ξ 次采样后逼近的精度越来越高,但也会导致计算时长越长。因此权衡控制精度和系统动态响应,选择 n 为2。

3.2 谐波电流抑制分析

将图4的 $G_{rc}(s)$ 替换为本文所提的算法可得输出电流 $i_x(s)$ 为

$$i_x(s) = \frac{-k_{ad} [k_s \Delta x + q_{xsr}(s)] G_c(s) G_a(s)}{1 + k_s k_{ad} G_c(s) G_a(s) G_p(s) - G_{rc}(s) G_a(s)} \quad (13)$$

当转速频率远小于低通滤波函数的截止频率时,有 $\lim_{w \ll \omega_L} Q(s) = 1$,故式(9)可改写为

$$G_{rc}(s) = \left[e_{rc} \frac{s^{-N/2}}{1-s^{-N/2}} + e_{rc1} \frac{-h_f s^{-N/2}}{1+h_f s^{-N/2}} \right] T(s)M(s) \quad (14)$$

将式(14)代入到式(13)后并化简,可得分子中含有 $1-s^{-N}$ 项,当转子转速为 $2\pi kf$ 时,其中 f 为转子转频,存在 $(1-s^{-N})|_{s \rightarrow jw} = 0$ 。将结果代入式(13)可得 $i_x(s)|_{s \rightarrow jw} = 0$ 。由此可得本文所设计的改进型双模分数阶重复控制器可以同时抑制奇偶次谐波。

3.3 稳定性分析

为方便分析,对模型进行简化。在 $Q(s) = 1$ 的条件下,设置双路的控制器增益相等,结合本文所提的重复控制器传递函数式(9),可得闭环特征方程为

$$1 - K(s)J(s) = 0 \quad (15)$$

$$\text{式中: } K(s) = \frac{e_{rc}}{2(1+h_f)} \left(\frac{s^{-N/2}}{1-s^{-N/2}} + \frac{-h_f s^{-N/2}}{1+2h_f^2 s^{-N/2}} \right); J(s) = T(s)M(s)Q(s)。$$

根据稳定性条件要求^[21],调节因子 h_f 、控制增益 e_{rc} 和相位 ζ 需要同时满足以下条件关系:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} < \zeta(jw) < \frac{3\pi}{2} \\ 0 < e_{rc} < \frac{\min\{\cos[\zeta(jw)]\}}{\max[J(jw)]} \frac{(h_f + 1)^2}{h_f^2 + \frac{1}{2}(h_f + 1)} \\ |h_f| < 1, h_f \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

当 $s = jw$ 时,且满足稳定条件后,最终可得:

$$1 - K(s)J(s)|_{s \rightarrow jw} \geq 1 - \frac{|J(jw)|}{\cos[\zeta(jw)]} \left(-\frac{1}{2} - \frac{2h_f^2}{1+h_f} \right) \quad (17)$$

由式(17)可知, $\cos[\zeta(jw)] > 0$,闭环特征方程的值大于0,系统闭环极点位于单位圆内,在满足式(16)的条件下,该系统能够保持稳定。

4 仿真及试验分析

4.1 仿真分析

首先基于 Matlab/Simulink,按照转子动力学建模搭建基本磁轴承控制系统仿真模型,再结合所提算法搭建完整仿真模型。按照表 1 设定磁轴承转子的各项参数,对 AX 通道进行仿真

分析。

根据式(10)和式(11),经计算可得本算法所需的参数: $N/2 = 33.33, N_1/2 = 33, W = 0.33, m_0 = 0.56, m_1 = 0.56, h_f = -0.1$ 。本试验采用奇次和偶次谐波均抑制的方案,故取 $e_{rc} = 3, e_{rc1} = 2$ 。仿真得到转子转频为 150 Hz 时,AX 通道电流的变化情况,如图 7 所示。仿真中原系统运行 0.2 s 后加入同频电流抑制,电流从原始的 0.42 A 减小到 0.09 A;0.4 s 后再加入谐波电流抑制,电流从 0.09 A 减小到 0.03 A,此时仍存在部分谐波电流未被抑制;0.4 s 后电流几乎为零,残余电流主要为仿真中添加的随机干扰。

表 1 磁悬浮电机参数

Tab. 1 Parameters of the magnetically suspended motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	75
转子质量/kg	25.98
转子中心到传感器中心的距离/m	0.168
转子中心到轴承中心的距离/m	0.123
比例系数	1.8
积分系数	0.001
微分系数	45
电流刚度/(N·A ⁻¹)	420
位移刚度/(N·m ⁻¹)	2.6×10 ⁶

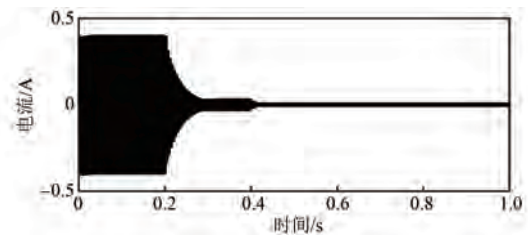


图 7 150 Hz 时 AX 通道电流仿真结果
Fig. 7 Simulation results of AX channel current at 150 Hz

图 8 为 AX 通道施加算法前后控制电流快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的仿真结果。未施加算法时,AX 通道控制电流的 1 次、2 次、3 次、4 次和 5 次谐波分量均大于-55 dB;施加算法后,AX 通道控制电流的 1 次、2 次、3 次、4 次和 5 次谐波分别降低了 89.8% (从-28.67 dB 到-48.55 dB)、87.8% (从-38.24 dB 到-56.50 dB)、78.2% (从-42.30 dB 到-55.32 dB)、67.9% (从-49.30 dB 到-58.69 dB)和 42.6% (从-53.30 dB 至-58.12 dB)。仿真结果验证了改进型双模分数阶重复控制器抑制谐波电流的有效性。

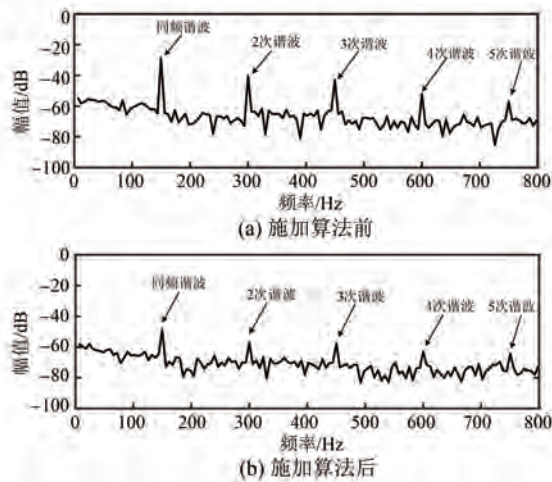


图 8 150 Hz 时 AX 通道控制电流 FFT 仿真结果

Fig. 8 Simulation results of AX channel control current FFT at 150 Hz

4.2 试验分析

本试验以 75 kW 的磁悬浮永磁同步电机为研究对象,该电机具有高效节能、低噪音及低振动等优点。试验所使用的磁轴承控制器的数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 为 TMS320F28377,其工作频率为 200 MHz。DSP 输出脉宽调制精准控制驱动 MOSFET 打开和关闭,调节磁轴承所需的控制电流。

如图 9 所示,150 Hz 时在磁悬浮电机控制系统 AX 通道施加算法。从 0.2 s 开始抑制同频电流,从 0.4 s 开始抑制谐波电流。电流从 0.46 A 开始减小,最终收敛到 0.12 A,线圈的电流值最终降低了 73.9%。

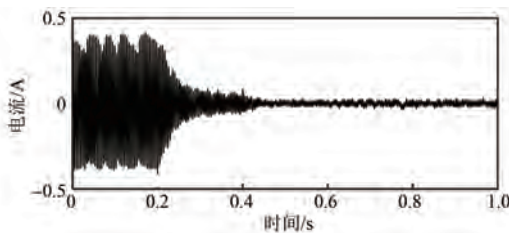


图 9 150 Hz 时 AX 通道电流试验结果

Fig. 9 Experimental results of AX channel current at 150 Hz

图 10 为 AX 通道施加算法前后控制电流 FFT 的试验结果。由图 10 可知,引入改进型双模重复控制算法后谐波电流均被有效抑制。AX 通道控制电流的 1 次、2 次、3 次、4 次和 5 次谐波分别降低了 87.9% (从 -28.28 dB 到 -46.69 dB)、61.3%

(从 -57.24 dB 到 -65.50 dB)、86.9% (从 -51.56 dB 到 -69.26 dB)、36.9% (从 -66.84 dB 至 -70.84 dB) 和 85.3% (从 -59.84 dB 到 -76.52 dB)。试验结果验证了所设计改进型双模重复控制器在减少谐波电流、确保系统稳定上的有效性。

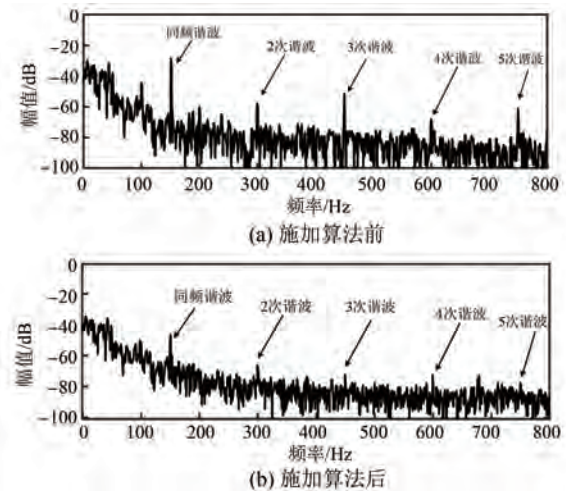


图 10 150 Hz 时 AX 通道控制电流 FFT 试验结果

Fig. 10 Experimental results of AX channel control current FFT at 150 Hz

5 结语

磁悬浮高速电机受转子质量不平衡和位移传感器误差影响,在高速下产生谐波电流。本文针对谐波电流的高精度抑制,展开了深入研究,设计了一种改进型双模分数阶重复控制器。通过减少延迟单元,提高了系统的响应速度;通过控制增益,针对性地抑制奇数倍频或奇数偶数都存在的倍频分量;采用拉格朗日插值法将分数阶变为整数,解决了重复控制的非整数延迟问题。最终通过仿真和试验验证了所设计的改进型重复控制器在精确抑制谐波电流上的有效性,线圈电流值降低了 73.9%,控制电流谐波最高降低了 87.9%。

参考文献

- [1] 刘志坚, 蓝益鹏, 徐泽来. 磁悬浮平台直线同步电动机悬浮系统的分数阶反步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 52-58.
- LIU Z J, LAN Y P, XU Z L. Fractional order backstepping control of linear synchronous motor suspension system of magnetic levitation platform [J]. Electric Machines & Control Application,

- 2023, 50(11): 52-58.
- [2] 陶楷文, 储剑波. 基于电机参数在线修正的高速永磁同步电机无位置传感器算法研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 1-7+15.
- TAO K W, CHU J B. Sensorless algorithm of high-speed permanent magnet synchronous motor based on online motor parameters correction [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 1-7+15.
- [3] LI J L, LIU G, CUI P L, et al. Suppression of harmonic vibration in AMB-rotor systems using double-input adaptive frequency estimator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(3): 2986-2995.
- [4] LI J L, LIU G, CUI P L, et al. An improved resonant controller for AMB-rotor system subject to displacement harmonic disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(5): 5235-5244.
- [5] 黄慈梅, 赵小坤, 夏铸亮, 等. 基于改进的重复控制永磁同步电机谐波电流抑制方法[J]. 汽车零部件, 2022, 4: 6-10.
- HUANG C M, ZHAO X K, XIA Z L, et al. Harmonic current suppression method of PMSM based on improved repetitive control [J]. Automobile Parts, 2022, 4: 6-10.
- [6] CUI P L, LI W S, ZHOU X X, et al. Multi-order repetitive controller for harmonic current suppression in magnetically suspended rotor system [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(23-24): 2657-2668.
- [7] 韩邦成, 刘洋, 郑世强. 重复控制在磁悬浮高速转子振动抑制中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 486-492+591.
- HAN B C, LIU Y, ZHENG S Q. Research on vibration suppression for magnetic suspension motor based on repetitive control method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 486-492+591.
- [8] CUI P L, HAN D, ZHANG G X, et al. Robust odd repetitive controller for magnetically suspended rotor system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 2025-2033.
- [9] XU X B, FANG J C, LIU G, et al. Model development and harmonic current reduction in active magnetic bearing systems with rotor imbalance and sensor runout [J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(13): 2520-2535.
- [10] CUI P L, XU H, LIU Z Y, et al. Harmonic current suppression of magnetically suspended rotor system via odd-harmonic fractional RC [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 4812-4819.
- [11] CAI K W, DENG Z Q, PENG C, et al. Suppression of harmonic vibration in magnetically suspended centrifugal compressor using zero-phase odd-harmonic repetitive controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(9): 7789-7797.
- [12] 刘向辰. 一种基于转矩扰动观测器+重复控制的船舶永磁同步电机矢量控制技术[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 33-38.
- LIU X C. Vector control of marine permanent magnet synchronous motor based on torque disturbance observer and repetitive control [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 33-38.
- [13] 孙文龙, 潘伟, 向绍通, 等. 基于扩张状态观测器的液体静压轴承重复控制技术[J/OL]. 机械工程学报, 2023-10-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20231018.1105.022.html>.
- SUN W L, PAN W, XIANG S T, et al. Research on repetitive control technology of liquid hydrostatic bearing based on extended state observer [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2023-10-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20231018.1105.022.html>.
- [14] CUI P L, WANG Q R, ZHANG G X, et al. Hybrid fractional repetitive control for magnetically suspended rotor systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(4): 3491-3498.
- [15] 崔培玲, 张国玺, 刘志远, 等. 基于通用选择性分数重复控制的磁悬浮转子谐波电流抑制[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 165-172.
- CUI P L, ZHANG G X, LIU Z Y, et al. Universal fractional repetitive control for the selective harmonic current suppression in magnetically suspended rotor systems [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 165-172.
- [16] 王晓雷, 张臣, 郭飞亚. 单相中频逆变器中的双分数阶重复控制策略[J]. 机电工程技术, 2023, 52(11): 52-55+129.
- WANG X L, ZHANG C, GUO F Y. Double fractional repetitive control strategy in single phase IF inverter

- [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(11): 52-55+129.
- [17] 张功, 赵强松, 陈赛男, 等. 单相并网逆变器新型奇次谐波重复控制策略[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(9): 73-78.
ZHANG G, ZHAO Q S, CHEN S N, et al. Novel odd-harmonic repetitive control scheme for single-phase grid-tied inverters [J]. *Power Electronics*, 2023, 57(9): 73-78.
- [18] 徐向波, 陈劭, 刘晋浩. 重复控制与积分正反馈组合的磁轴承低功耗控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2149-2154.
XU X B, CHEN S, LIU J H. Low power control of magnetic bearing combined by repetitive control and positive integral feedback [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2149-2154.
- [19] PENG C, ZHENG S Q, HUANG Z Y, et al. Complete synchronous vibration suppression for a variable-speed magnetically suspended flywheel using phase lead compensation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(7): 5837-5846.
- [20] 钟永彬, 高健, 冯富原, 等. 基于闭环辨识模型的永磁同步直线电机分数阶反馈控制方法[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(23): 2773-2780+2793.
ZHONG Y B, GAO J, FENG F Y, et al. Fractional-order feedback control method for PMLSMs based on closed-loop identification model [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(23): 2773-2780+2793.
- [21] CUI P L, LIU Z Y, ZHANG G X, et al. A novel second order repetitive control that facilitates stability analysis and its application to magnetically suspended rotors [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 149857-149866.

收稿日期:2023-12-31

收到修改稿日期:2024-02-28

作者简介:

王献章(1998-),男,硕士研究生,研究方向为磁悬浮电机振动抑制,13772503059@163.com;

*通信作者:徐向波(1982-),男,博士,教授,研究方向为磁悬浮振动抑制,xuxiangbo@bjfu.edu.cn。

Harmonic Current Suppression in the High-Speed Magnetically Suspended Motor Based on Improved Dual Mode Fractional Order Repetitive Controller

WANG Xianzhang, XU Xiangbo*, CHEN Shao, LI Junfeng, LI Bolun, WANG Qizhen
 (The School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Key words: active magnetic bearing system; sensor runout; even and odd harmonics; repetitive controller; harmonic current suppression

Compared to traditional motors, high-speed magnetically suspended motor has the advantages of contactless operation, no oil pollution, low vibration, low power consumption, and active control. During the operation of the high-speed magnetically suspended compressor, the centrifugal force from the imbalanced rotor leads to rotor vibration. Rotor mass imbalance leads to the inertial axis and geometric axis of the magnetic suspension rotor to become misaligned, resulting in signal interference synchronized with the rotor speed. Sensor runout causes the axis detected by the sensor to be inconsistent with the absolute spatial position of the rotor, which results in the measured signal containing harmonic noise. Moreover, when the displacement sensor detects non-ideal characteristics on its detection surface, it generates harmonic currents at synchronous frequencies and multiples of

the rotational speed, causing shell vibration.

In this paper, an improved dual mode fractional order repetitive controller is designed based on a high-speed magnetically suspended motor. The framework of this paper is shown in Fig.1. Firstly, a dynamic model of the high-speed magnetically suspended motor rotor system is initially established. Secondly, the vibration mechanism of the rotor is investigated. Thirdly, an improved dual mode fractional order repetitive control algorithm is proposed. By adjusting the gain factors of the dual channels and combining them with the Lagrange interpolation, precise suppression of harmonic currents at any frequency is achieved, and the delay unit is minimized to accelerate the system response. Finally, it is verified that the designed controller can effectively suppress harmonic current through simulation and experiment.

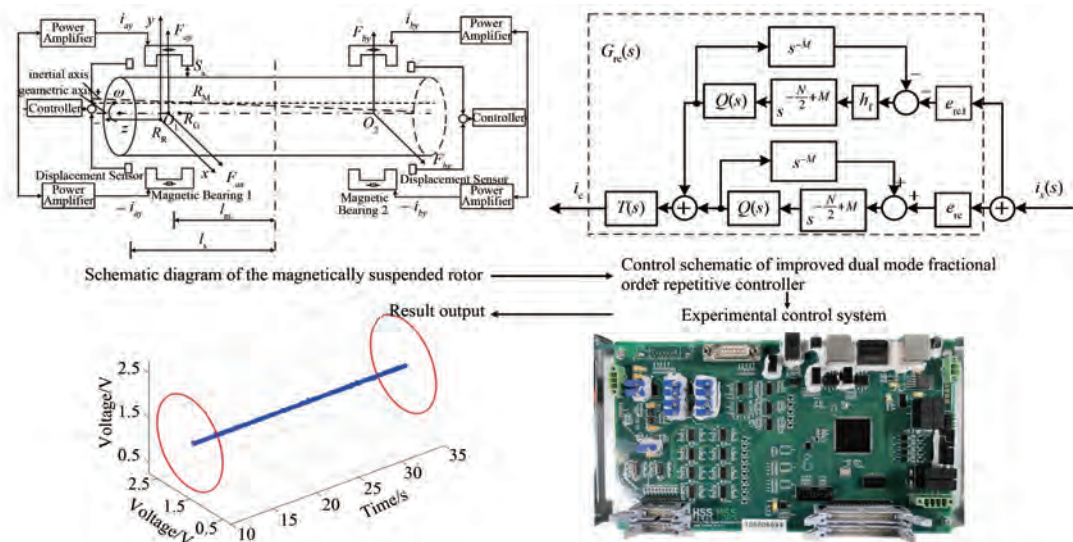


Fig. 1 The framework of this paper