

四电磁铁支撑钢板磁悬浮系统气隙交叉耦合控制

李奇南, 徐德鸿

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Gap Cross-coupling Control for 4-Electromagnet Supported Steel Plate Magnetic Suspension System

LI Qinan, XU Dehong

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

ABSTRACT: Control aspects of gap synchronized coordination for 4-electromagnet supported steel plate magnetic suspension system were discussed. In order to improve gap dynamic synchronization performance, it was necessary to eliminate effects on gap due to gain parameter, dynamic parameter mismatch between each single magnet suspension system and uncertain disturbances while steel plate was levitated. Based on motion equations of steel plate, one dynamic synchronized control strategy was proposed by introducing both gap and velocity cross coupling control into independent levitation control. To decrease gap contour error, related synchronization error terms were selected and coordination between multi-magnet suspension system was determined to compensate for parameter difference and disturbance influence. Experiments were carried out on the prototype of steel plate magnetic levitation system and experimental results shown the effectiveness of the proposed control method.

KEY WORDS: magnetic suspension; cross coupling control; contour error; synchronized control

摘要: 在四电磁铁支撑钢板磁悬浮系统的气隙同步协调控制中, 为改善气隙动态同步性能, 需要消除各单电磁铁系统增益参数、动态参数不匹配以及悬浮过程中不确定性扰动对各气隙的影响。基于钢板动力学模型, 在单电磁铁悬浮控制基础上, 提出一种动态同步控制策略, 引入气隙、速度双重交叉耦合控制, 通过选取相应同步误差以建立多电磁铁系统间的协调关系, 补偿参数差异、扰动所造成的影响, 减小气隙轮廓误差。在一台钢板磁浮装置上进行实验, 结果验证了所提出的气隙动态同步控制的有效性。

关键词: 磁悬浮; 交叉耦合控制; 轮廓误差; 同步控制

0 引言

钢板磁悬浮系统可实现钢板的无接触传输, 取

代传统的接触滚轴支撑, 具有广阔的应用前景^[1-5]。该系统由多个电磁铁组成, 就悬浮控制而言, 是多输入多输出耦合系统。

对于多电磁铁磁浮系统控制, 传统方法是多电磁铁系统简化为多个相同的单电磁铁悬浮系统, 进而根据单电磁铁悬浮系统的性能指标设计相应的控制律^[6-8]。这种独立控制方式难以消除各单电磁铁系统中传感器测量精度不匹配、电磁铁结构参数不一致等因素对各气隙动态同步性能的影响, 无法实现高性能的悬浮品质。此外, 多电磁铁磁浮系统存在耦合, 独立控制模式下每个单电磁铁悬浮系统并不从其它单电磁铁悬浮系统获取信息, 彼此之间缺少必要的同步协调机制。因此, 独立控制无法调节悬浮过程中不确定性扰动致使的各气隙不同步。改善气隙动态同步性能, 即减小多电磁铁磁浮系统气隙轮廓误差, 是进一步提高悬浮系统动态特性的重要途径。文献[9]针对双端电磁悬浮系统, 设计了一种基于反馈线性化方法的解耦控制器。该方法解耦性能依赖系统模型。文献[10]提出交叉耦合控制, 在双轴联动机床上得到了成功应用。该控制方法的基本思想是建立多轴间的协调关系, 在改善单轴系统跟踪误差的同时, 将其它轴的信息引入该轴, 补偿各轴之间的参数差异所造成的影响以降低轮廓误差。交叉耦合控制已在多电机传动系统、多机器人控制系统等领域中得到了应用^[11-13]。

本文将交叉耦合控制应用于钢板磁浮系统以改善多点气隙动态同步性能。基于钢板动力学模型, 在单电磁铁悬浮控制基础上, 提出一种气隙、速度双重交叉耦合控制策略, 补偿参数差异、扰动所造成的影响。在一台钢板磁浮装置上验证所提方案的有效性, 实验结果表明, 动态同步控制策略可

有效改善气隙轮廓误差。

1 4端磁浮系统模型

1.1 钢板动力学方程

图1是钢板磁浮系统实验装置示意图。上端支架固定有4个电磁铁，下端支架安装相应的气隙传感器。

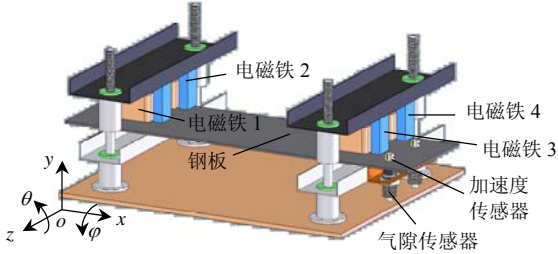


图1 4电磁铁支撑钢板磁浮系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of 4-magnet supported steel plate magnetic suspension system

$$\begin{bmatrix} \Delta \ddot{y}_1 \\ \Delta \ddot{y}_2 \\ \Delta \ddot{y}_3 \\ \Delta \ddot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/m - 1/m_\theta - 1/m_\phi & -1/m + 1/m_\theta - 1/m_\phi \\ -1/m + 1/m_\theta - 1/m_\phi & -1/m - 1/m_\theta - 1/m_\phi \\ -1/m - 1/m_\theta + 1/m_\phi & -1/m + 1/m_\theta + 1/m_\phi \\ -1/m + 1/m_\theta + 1/m_\phi & -1/m - 1/m_\theta + 1/m_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： m 为悬浮体质量； m_θ 为滚动模式等效质量； m_ϕ 为俯仰模式等效质量；符号“ Δ ”表示各变量标称值附近的微小变化，下同。

1.2 电磁特性方程

单电磁铁悬浮系统电磁特性^[17]小信号方程可表示为

$$\begin{cases} \Delta u = R\Delta i + L_0\Delta \dot{i} - k_i\Delta y \\ \Delta f = k_f\Delta i - k_y\Delta y \end{cases} \quad (2)$$

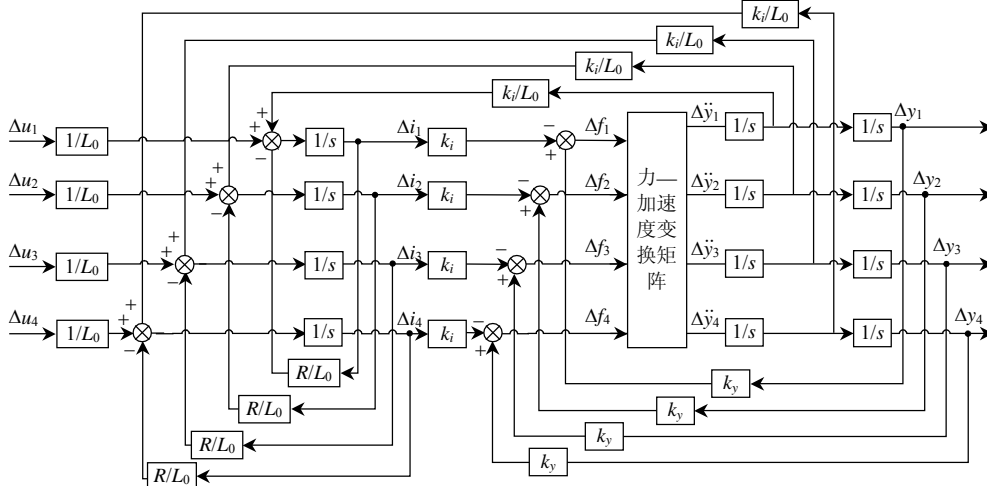


图3 开环悬浮系统框图

Fig. 3 Block diagram of open loop suspension system

2 同步控制策略

2.1 同步误差选取

气隙同步控制目标可定义为

$$\frac{y_1}{y_1^*} = \frac{y_2}{y_2^*} = \frac{y_3}{y_3^*} = \frac{y_4}{y_4^*} \quad (3)$$

稳定悬浮时，钢板重力由各电磁铁所提供的电磁力 $f_j(j=1,2,3,4)$ 平衡，如图2所示。图中， y_j 表示各电磁铁磁极表面与钢板间的气隙； y_j^* 为标称气隙； Δy_j 为标称气隙附近的微小气隙变化量。

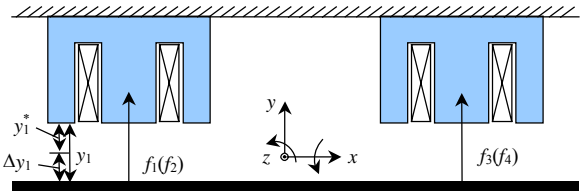


图2 悬浮系统结构

Fig. 2 Configuration of suspension system

将钢板的运动状态按照刚体自由度分解为竖直(y 轴平动)，滚动(z 轴转动)，俯仰(x 轴转动)3个模式，可得电磁力到加速度变换矩阵^[14-16]，如式(1)所示：

式中： R 为电磁铁绕组电阻； L_0 为等效电感； Δi 为稳态工作点处电流变化量； Δu 为电磁铁绕组端压变化量； k_i 、 k_y 分别为力-电流系数和力-气隙系数。

1.3 悬浮系统开环动态描述

相应的悬浮系统开环动态框图如图3所示。

控制输入 $u=[\Delta u_1 \ \Delta u_2 \ \Delta u_3 \ \Delta u_4]^T$ ，系统输出 $y=[\Delta y_1 \ \Delta y_2 \ \Delta y_3 \ \Delta y_4]^T$ ，即被控对象是一个4输入4输出耦合系统。

式中 y_i^* ($i=1, 2, 3, 4$)为各气隙期望值。当气隙满足

式(3)约束条件时, 各气隙将按照相同的轨迹变化。

同步控制目标可分解为如下子目标:

$$\frac{y_i}{y_i^*} = \frac{y_{i+1}}{y_{i+1}^*} = \frac{y_{i-1}}{y_{i-1}^*} \quad (4)$$

与子目标对应的同步函数可表示为

$$f_i(y_i, y_{i+1}, y_{i-1}) = 2\frac{y_i}{y_i^*} - \frac{y_{i+1}}{y_{i+1}^*} - \frac{y_{i-1}}{y_{i-1}^*} = 0 \quad (5)$$

令 $e_i = y_i - y_i^*$ 为各气隙跟踪误差, 将上述同步函数泰勒级数展开(保留一阶项), 有

$$\left. \frac{\partial f_i}{\partial y_i} \right|_{y_i^*} e_i + \left. \frac{\partial f_i}{\partial y_{i+1}} \right|_{y_{i+1}^*} e_{i+1} + \left. \frac{\partial f_i}{\partial y_{i-1}} \right|_{y_{i-1}^*} e_{i-1} = 0 \quad (6)$$

式中: $\left. \frac{\partial f_i}{\partial y_i} \right|_{y_i^*} = \frac{2}{y_i^*}$; $\left. \frac{\partial f_i}{\partial y_{i+1}} \right|_{y_{i+1}^*} = -\frac{1}{y_{i+1}^*}$; $\left. \frac{\partial f_i}{\partial y_{i-1}} \right|_{y_{i-1}^*} = -\frac{1}{y_{i-1}^*}$ 。

由式(6)可得气隙同步误差可表示为

$$\varepsilon_i = \frac{2}{y_i^*} e_i - \frac{1}{y_{i+1}^*} e_{i+1} - \frac{1}{y_{i-1}^*} e_{i-1} \quad (7)$$

当各气隙期望值均相同时, 即 $y_i^* = y^*$, 控制目标可简化为 $y_1=y_2=y_3=y_4$ 。此时, 气隙同步误差可简化为

$$\varepsilon_i' = 2y_i - y_{i+1} - y_{i-1} \quad (8)$$

忽略钢板形变, 钢板满足超静定约束, 有 $y_1+y_4=y_2+y_3$, 即钢板磁浮系统可视为 3 自由度系统, 尽管系统为 4 输出, 只需对其中 3 个气隙进行交叉耦合控制。相应的气隙同步误差为

$$\varepsilon_p = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 交叉耦合控制

气隙交叉耦合项的引入, 一方面可改善气隙同步性能, 另一方面致使悬浮系统阻尼降低, 气隙超调增大。考虑到速度信号是磁浮系统阻尼的主要来源, 可引入速度交叉耦合项, 克服单一使用气隙交叉耦合带来的弊端。

相应的速度同步误差 ε_v 为 $\varepsilon_v = \dot{\varepsilon}_p$, 合成同步误差 $\varepsilon_s = \varepsilon_p + \varepsilon_v$ 。同步误差经由交叉耦合控制器后可得到相应的耦合项, 将其叠加至原独立控制输入 $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$, 便可构成交叉耦合控制 $u' = [u'_1 \ u'_2 \ u'_3 \ u'_4]^T$, 即 $u' = u + k_s \varepsilon_s$ 。其中, k_s 为交叉耦合控制器增益。如图 4 所示。

单电磁铁悬浮控制律 u 采用气隙-速度状态反馈。考虑到电流反馈很大程度上降低了电感时间常数, 可在控制中叠加扰动量 ΔI_d 以等效实际外力扰

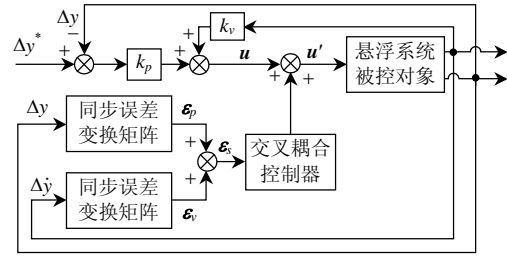


图 4 交叉耦合控制框图

Fig. 4 Block diagram of cross-coupling control

动, 如式(10)所示:

$$\begin{cases} \Delta u'_1(s) = [\Delta y_1(s) - \Delta y_1^*/s]k_p + s\Delta y_1(s)k_v + \Delta I_{1d}(s) + \varepsilon_{s1}(s)k_s \\ \Delta u'_2(s) = [\Delta y_2(s) - \Delta y_2^*/s]k_p + s\Delta y_2(s)k_v + \Delta I_{2d}(s) + \varepsilon_{s2}(s)k_s \\ \Delta u'_3(s) = [\Delta y_3(s) - \frac{\Delta y_3^*}{s}]k_p + s\Delta y_3(s)k_v + \Delta I_{3d}(s) + \varepsilon_{s3}(s)k_s \\ \Delta u'_4(s) = [\Delta y_4(s) - \frac{\Delta y_4^*}{s}]k_p + s\Delta y_4(s)k_v + \Delta I_{4d}(s) \end{cases} \quad (10)$$

式中 k_p , k_v 分别为气隙、速度反馈增益。

2.3 闭环稳定性

由式(10)和悬浮系统开环动态可得到悬浮系统闭环输出, 如式(11)所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1(s) \\ \Delta y_2(s) \\ \Delta y_3(s) \\ \Delta y_4(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^c(s) & G_{12}^c(s) & G_{13}^c(s) & G_{14}^c(s) \\ G_{21}^c(s) & G_{22}^c(s) & G_{23}^c(s) & G_{24}^c(s) \\ G_{31}^c(s) & G_{32}^c(s) & G_{33}^c(s) & G_{34}^c(s) \\ G_{41}^c(s) & G_{42}^c(s) & G_{43}^c(s) & G_{44}^c(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_c(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_c(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_c(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_c(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \\ \Delta y^*(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $G_c(s)$ 为气隙给定到输出的传递函数; $G_{ij}^c(s)$ 为扰动到输出的传递函数($i, j=1, 2, 3, 4$)。 $G_c(s)$ 可由式(12)计算:

$$G_c(s) = \frac{4k_p k_i / (mL_0)}{s^3 + Rs^2 / L_0 + (4k_i k_v s + 4k_i k_p - 4k_y R) / mL_0} \quad (12)$$

引入交叉耦合控制后, 闭环系统特征方程组为

$$\begin{cases} s^3 + \frac{R}{L_0} s^2 + \frac{4k_i k_v}{mL_0} s + \frac{4k_i k_p - 4k_y R}{mL_0} = 0 \\ s^3 + \frac{R}{L_0} s^2 + \frac{4k_i (k_v + 4k_s)}{m_\theta L_0} s + \frac{4k_i (k_p + 4k_s) - 4k_y R}{m_\theta L_0} = 0 \\ s^3 + \frac{R}{L_0} s^2 + \frac{4k_i (k_v + 2k_s)}{m_\phi L_0} s + \frac{4k_i (k_p + 2k_s) - 4k_y R}{m_\phi L_0} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中第1式等同于独立控制时单点悬浮控制系统闭环特征方程,稳定性同单点稳定约束条件一致,有

$$\begin{cases} k_p > k_y R / k_i \\ k_v > \frac{k_i k_p L_0 - k_y R L_0}{R k_i} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)中第2、3式的稳定条件可表示为

$$\begin{cases} R k_v k_i - (k_p k_i L_0 - k_y R L_0) + 4 k_s k_i (R - L_0) > 0 \\ R k_v k_i - (k_p k_i L_0 - k_y R L_0) + 2 k_s k_i (R - L_0) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知,引入交叉耦合控制后,在满足单点悬浮控制约束的基础上,只需 $R > L_0$,系统便可保持稳定。对于实际钢板磁浮系统,电磁铁绕组电阻 R 大于电感 L_0 ,即气隙、速度双重交叉耦合控制的引入,并不影响原独立控制的闭环稳定性。因此,由式(14)得到的 k_p 、 k_v 不再调整,调节交叉耦合控制参数 k_s 即可。式(14)和式(15)是引入交叉耦合控制后完整的闭环系统稳定性条件。

2.4 稳态气隙同步误差

以气隙同步误差 ε_1 为例。悬浮系统存在静扰动时,由式(8)和式(11)可得稳态气隙同步误差:

$$\begin{cases} E_s^1 = E_{s(1-2)} + E_{s(1-3)} \\ E_{s(1-2)} = \frac{-k_i(I_{d1} - I_{d2} + I_{d3} - I_{d4})}{2[k_i(k_p + 4k_s) - k_y R]} \\ E_{s(1-3)} = \frac{-k_i(I_{d1} + I_{d2} - I_{d3} - I_{d4})}{2[k_i(k_p + 2k_s) - k_y R]} \end{cases} \quad (16)$$

式中 E_s^1 , $E_{s(1-2)}$, $E_{s(1-3)}$ 分别表示气隙同步误差 ε_1 稳态值,气隙1与气隙2,气隙1与气隙3之间的稳态误差。由式(16)可知,同无交叉耦合控制($k_s=0$)相比,交叉耦合控制可减小扰动引起的各气隙差异。

3 实验验证

3.1 实验条件

悬浮系统的主要实验参数如表1所示。

表1 悬浮系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the suspension system

钢板质量 m/kg	悬浮气隙 y_0/mm	开关频率 f_s/kHz	直流母线电压 U_{dc}/V
8	8	20	96

将气隙响应带宽设定在8 Hz附近,阻尼比0.7。独立控制器参数: $k_p=10$, $k_v=40$ 。交叉耦合控制器参数 k_s 的选择需考虑系统带宽、噪声干扰等因素,在实验中调试确定 $k_s=12$ 。

3.2 参数匹配

图5(a)所示为采用独立控制方式时气隙阶跃响

应波形。由于各单电磁铁悬浮系统不能完全匹配,故气隙波形并不一致。

采用交叉耦合控制后气隙波形如图5(b)所示。可见,各气隙运动轨迹非常接近,各单电磁铁系统匹配程度得以增强,气隙同步性能得到改善。

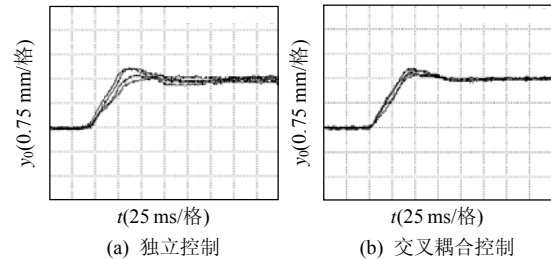


图5 气隙波形比较

Fig. 5 Comparison of gap waveforms

3.3 扰动影响

按照扰动力作用在钢板上位置的不同,扰动可分为点扰动、线扰动、面扰动3类,如图6所示。

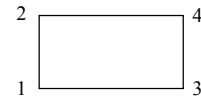


图6 扰动作用位置

Fig. 6 Location of disturbance

点扰动即单一扰动力作用在钢板上,位置可以是1、2、3、4中任意一点。

线扰动即同时有2个扰动力作用,位置组合可以是1—2, 1—3, 1—4, 2—3, 2—4, 3—4。

面扰动情况为3个扰动力同时作用,位置组合有1—2—3, 1—2—4, 1—3—4, 2—3—4。

为不失一般性,分别选取1, 1—2, 1—2—3作为点、线、面扰动作用位置。钢板已稳定悬浮后,对选取位置处的电磁铁施加扰动,测试各点气隙的动态同步性能。扰动量由静扰动和正弦扰动组成, $\Delta I_d = 1 + \sin(2\pi ft)$,其中正弦扰动量频率 $f=20\text{Hz}$ 。

1) 点扰动情况。电磁铁1施加扰动。独立控制时,各气隙波形 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 及轮廓误差波形 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 如图7(a)、(c)所示,采用交叉耦合控制时,相应实验波形如图7(b)、(d)所示。

可见,在点扰动工况下,独立控制时气隙1和气隙4显著偏离,轮廓误差较大;交叉耦合控制时各气隙较为接近,轮廓误差减小。

2) 线扰动情况。电磁铁1—2施加扰动力。独立控制时,各气隙波形及轮廓误差波形如图8(a)、(c)所示,采用交叉耦合控制后波形如图8(b)、(d)所示。

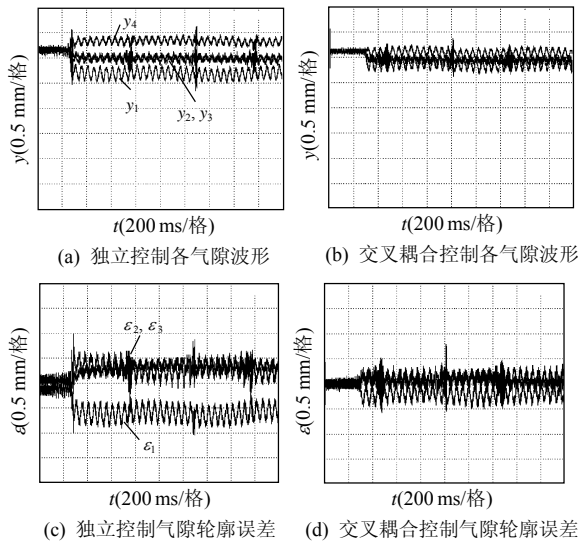


图 7 点扰动(1)测试
Fig. 7 Disturbance test at position 1

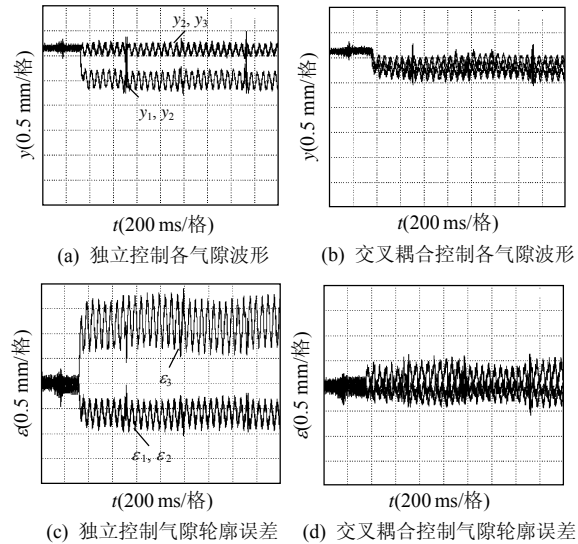


图 8 线扰动(1—2)测试
Fig. 8 Disturbance test at position 1—2

在线扰动工况下，独立控制时气隙 1、2 与气隙 3、4 产生偏离，导致较大的轮廓误差；交叉耦合控制时各气隙趋于一致，轮廓误差减小。

3) 面扰动情况。电磁铁 1—2—3 施加扰动力。独立控制时，各气隙波形及轮廓误差波形如图 9(a)、(c)所示，采用交叉耦合控制后波形如图 9(b)、(d)所示。

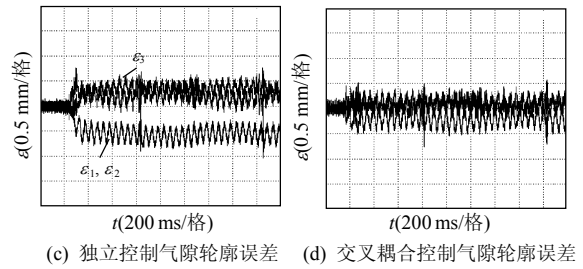
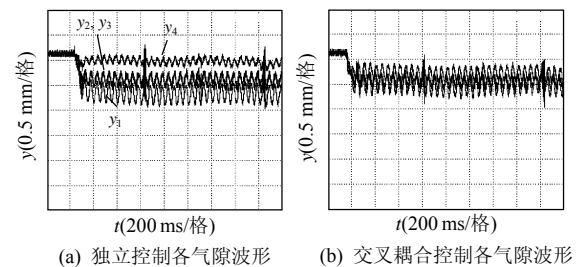


图 9 面扰动(1—2—3)测试
Fig. 9 Disturbance test at position 1—2—3

可见，在面扰动工况下，独立控制时气隙 1、2、3 显著偏离气隙 4，轮廓误差较大；采用交叉耦合控制后各气隙偏离程度减小，轮廓误差减小。

由点扰动、线扰动及面扰动 3 组测试结果可知，同独立控制相比，交叉耦合控制均可有效减小气隙同步误差，改善气隙动态同步性能。

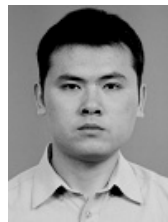
4 结论

本文提出一种气隙、速度双重交叉耦合控制方法以改善四电磁铁支撑钢板磁悬浮系统气隙同步性能。实验结果表明，该方法可以补偿参数差异、扰动所造成的影响，减小气隙轮廓误差。本文所提出的控制算法易于实现，对探索、构建多电磁铁支撑磁悬浮系统气隙同步控制策略具有一定的指导价值。

参考文献

- [1] Ebihara D, Kawaguchi H, Muraguchi Y, et al. Transportation technique for magnetically levitated thin iron plates[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1993, 29(6): 2974-2976.
- [2] Nakagawa T, Hama M, Furukawa T. Study of magnetic levitation technique applied to steel plate production line[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36(5): 3686-3689.
- [3] Fujisaki K, Ueyama T, Wajima K. Electromagnets applied to thin steel plate[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1996, 32(5): 5058-5060.
- [4] Hayashiya H, Araki N, Paddison J, et al. Magnetic levitation of a flexible steel plate with a vibration suppressing magnet[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1996, 32(5): 5052-5054.
- [5] 徐德鸿, 吴长春, 封伟, 等. 基于 H_∞ 理论的薄钢板磁浮控制研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(4): 71-75.
Xu Dehong, Wu Changchun, Feng Wei, et al. Electromagnetic suspension of thin steel plate with H_∞ control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(4): 71-75(in Chinese).
- [6] Sinha P K, Pechev A N. Model reference adaptive control of a maglev system with stable maximum descent criterion[J]. Automatica, 1999, 35(8): 1457-1465.
- [7] Maggiore M, Beceril R. Modelling and control design for a magnetic levitation system[J]. International Journal of Control, 2004, 77(10): 964-977.
- [8] Gottzein E, Brock K H. Control aspects of a tracked magnetic levitation high speed test vehicle[J]. Automatica, 1977, 13(3): 205-223.
- [9] Liu Desheng, Li Jie, Zhang Kun. Design of nonlinear decoupling

- controller for double-electromagnet suspension system[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(3): 321-328.
- [10] Koren Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of ASME, 1980, 102(4): 265-272.
- [11] 赵希梅, 郭庆鼎. 数控机床多轴联动伺服电机的零相位自适应鲁棒交叉耦合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 129-133. Zhao Ximei, Guo Qingding. Zero phase adaptive robust cross coupling control for NC machine multiple linked servo motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 129-133(in Chinese).
- [12] 郭庆鼎, 蓝益鹏. 双位置驱动直线伺服电机三重动态同步控制[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 39-42. Guo Qingding, Lan Yipeng. Three variables dynamically synchronized control for double position drive with linear servo motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 39-42(in Chinese).
- [13] 杨亚辉, 苏玉鑫, 张立科, 等. 机器人系统同步协调自适应控制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 117-123. Yang Yahui, Su Yuxin, Zhang Like, et al. Adaptive synchronized control of robot manipulators[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(1): 117-123(in Chinese).
- [14] 杨泉林. 磁悬浮实验列车模型的解耦控制系统[J]. 自动化学报, 1989, 15(1): 23-29. Yang Quanlin. The decoupled control system of the magnetic suspension test vehicle model[J]. Acta Automatica Sinica, 1989, 15(1): 23-29(in Chinese).
- [15] 森下明平, 明石正邦, 小豆沢照男. 多点支持式刚体磁気浮上車両のゼロパワー制御[J]. 電気学会論文誌 D, 2000, 120(4): 509-519. Morishita M, Akashi M, Azukizawa T. Zero-power control for maglev system of a rigid body vehicle with multi-suspended points[J]. IEEJ Trans. on Industry Applications, 2000, 120(4): 509-519(in Japanese).
- [16] 山村昌, 大西公平, 正田英介. 吸引力形常電導磁気浮上台車の制御系理論[J]. 電気学会論文誌 B, 1979, 99(11): 752-759. Yamaura S, Ohnishi K, Masada E. Theory of control system of electromagnetically levitated bogie truck[J]. IEEJ Trans. on Power and Energy, 1979, 99(11): 752-759(in Japanese).
- [17] Sinha P K. Electromagnetic suspension: dynamics and control [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1987: 52-89.



李奇南

收稿日期: 2010-08-10。

作者简介:

李奇南(1981), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁悬浮控制技术, lqn1981@zju.edu.cn;

徐德鸿(1961), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高频电力电子技术, 基于电力电子技术的电力品质先进控制等方面的研究。

(责任编辑 王剑乔)