

# 带钢磁悬浮防抖系统的研究\*

纪 历, 徐龙祥

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 在镀锌生产线中垂直带钢水平晃动会造成镀层不均。基于磁悬浮技术能够实现无接触稳定的特点, 研制了用于带钢防抖的磁悬浮系统。分析建立了系统的数学模型, 设计了 PID 控制器。研究设计了包括传感器、控制器、功率放大器的磁悬浮电控系统。在模拟试验台上对系统的性能进行了试验研究。通过试验证明了该磁悬浮系统能够稳定地悬浮带钢, 减小带钢在外力扰动下的振幅和回到稳态所需的调节时间, 并且在激振试验中成功地使带钢的振幅减小了 71.4%。

**关键词:** 磁悬浮; 带钢; 数字控制器

中图分类号: TF345.1

文献标识码: A

## Research on electromagnetic suspension system of steel strip

Ji Li, XU Long Xiang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In continuous hot dip galvanizing line, shaking of vertical steel strip in horizontal direction will cause unevenness of the coating thickness. As magnetic levitation technology can keep object stable without any contact, a system of electromagnetic suspension was developed to keep vertical steel strip stable in horizontal. Based on research on the mathematic model of the system, PID controller was designed. And the electric control system which including sensors, controller and power amplifier was designed. The experimentation was implemented in the test-bed and the results were given out. It proved that the system not only can keep vertical steel strip stable in horizontal direction but also can reduce amplitude of vertical steel in the effect of outside force. Moreover, as shown in the excitation experimentation, the amplitude of system was reduced by 71.4%.

**Key words:** electromagnetic suspension; steel strip; digital controller

在连续镀锌生产线中, 带钢在传送辊的驱动下从镀锌槽中垂直抽出以使凝固中的锌层附着在带钢表面, 同时锌槽出口处的气刀向带钢上呈液态的锌层喷射气体以去除多余的锌。能否准确控制锌层的厚度, 主要取决于喷射气体的气压以及气刀与带钢表面的气隙距离<sup>[1]</sup>。由于垂直上升的带钢比较长, 在外界干扰下容易抖动, 从而影响到气刀与带钢表面气隙距离的稳定性, 造成镀层不均匀<sup>[2]</sup>。

借助于磁悬浮技术能够实现无接触稳定的特点, 在不接触带钢的前提下将一对对称的电磁铁安放在带钢的左右两侧, 利用电磁铁产生的电磁力使带钢稳定在两电磁铁的中间位置(以下称为平衡位置), 从而抑制带钢的抖动。

### 1 带钢磁悬浮防抖系统数学模型的建立

带钢磁悬浮防抖系统的工作过程如图 1 所示, 在上下固定辊之间安放一对电磁铁, 通过调节两电磁铁对带钢的吸力来抑制带钢的抖动。

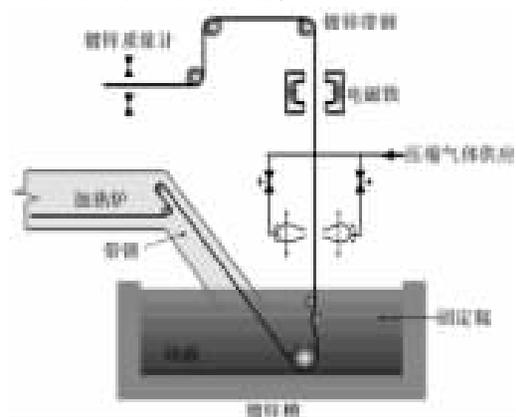


图 1 镀锌过程示意图<sup>[1]</sup>

\* 基金项目: 国家“863”高科技资助项目(2006AA05Z205)和江苏省“六大人才高峰”项目(07-D-013)

图2为带钢的受力示意图。带钢的质量视为固定值  $m$ ，两电磁铁的间距固定为  $\delta_1 + \delta_2$ 。当带钢与电磁铁1和电磁铁2的距离相等时，带钢处于平衡位置 ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$ )，此时传感器检测到的位移偏差信号为零，控制电流为零，线圈中只存在偏置电流  $I_0$ ，两个电磁铁对带钢的吸力相等，合力为零。当带钢偏离平衡位置时，有一个靠近电磁铁1的位移  $x$ ，此时带钢与电磁铁1和2间的气隙分别为  $\delta_1 = \delta_0 - x$ ,  $\delta_2 = \delta_0 + x$ 。为了使带钢回到平衡位置，两个电磁铁线圈中的电流分别为  $I_1 = I_0 - i$ ,  $I_2 = I_0 + i$  ( $i$  是由位移  $x$  引起的控制电流)，此时带钢受到总的电磁吸力为：

$$F = F_1 - F_2 = \mu_0 N^2 A \left[ \left( \frac{I_0 - i}{\delta_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{I_0 + i}{\delta_0 + x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

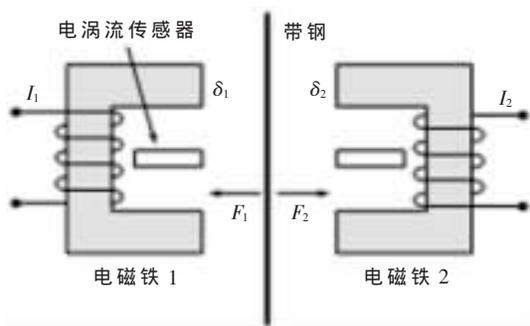


图2 带钢受力示意图

式中,  $N$  为电磁铁线圈的匝数,  $A$  为磁极的面积,  $\mu_0$  为真空磁导率。在平衡位置处有  $x=0$ ,  $i=0$ 。将上式在平衡位置处进行泰勒展开得：

$$F = K_x x - K_i i \quad (2)$$

$$\text{式中: } K_x = \frac{\mu_0 A N^2 I_0^2}{\delta_0^3}, K_i = \frac{\mu_0 A N^2 I_0}{\delta_0^2}$$

带钢的运动方程为  $F = m\ddot{x}$ ，即：

$$m\ddot{x} - K_x x - K_i i = 0 \quad (3)$$

对上式进行拉氏变换得：

$$(ms^2 - K_x)X(s) + K_i I(s) = 0 \quad (4)$$

式中,  $X(s)$ 、 $I(s)$  分别是位移  $x$  和控制电流  $i$  的拉氏变换。根据上式可以得到磁悬浮系统的传递函数为：

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{K_i}{ms^2 - K_x} = \frac{K_p \omega_0^2}{s^2 - \omega_0^2} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \omega_0 = \sqrt{\frac{K_x}{m}}, K_p = \frac{K_i}{m} \times$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} \quad [3]$$

## 2 控制器的设计及仿真

从式(5)可以看出, 该磁悬浮系统是典型的不稳定系统<sup>[4]</sup>。为使系统稳定并有足够的阻尼, 采用 PD 控制, 即取控制器为  $K(s) = K_c(1 + T_d s)$ 。所

构成的系统闭环特征方程为：

$$s^2 + K_c K_p T_d \omega_0^2 s + (K_c K_p - 1) \omega_0^2 = 0 \quad (6)$$

可得系统的固有频率  $\omega_n = \omega_0 \sqrt{K_c K_p - 1}$ ，阻尼比  $\xi = K_c K_p T_d \omega_0 / 2 \sqrt{K_c K_p - 1}$ 。

从式(6)看出, 当  $\omega_n > \omega_0$  时, 对象  $G(j\omega)$  将按 -40 dB/dec 的衰减率很快衰减, 所以如果系统的固有频率大于  $\omega_0$ , 控制系统的能耗将会很大。因此磁悬浮系统的  $\omega_n \leq \omega_0$ , 即  $K_c K_p \leq 2$ 。但是由于某种原因, 如功放的惯性和系统中的噪声等要求,  $K_c K_p$  也不能小于 1.2。

在实际应用中, 对于反馈控制只保证  $K_c K_p \leq 2$  并不能满足控制要求, 还应该满足性能要求, 如带钢磁悬浮系统中, 要求系统具有一定的刚度。因此在控制规律中还应加一积分环节, 得：

$$K(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \quad (7)$$

加积分控制的目的是提高低频段的增益。为了不影响到中频段的稳定性, 积分项在到达中频段前应衰减掉, 可取  $\frac{1}{T_i} \approx \frac{\omega_n}{10}$ <sup>[5]</sup>。

代入带钢防抖模拟实验台的参数计算: 真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ , 带钢质量  $m = 22.464 \text{kg}$ , 磁极面积  $A = 5 \times 10^{-2} \text{m}^2$ , 电磁铁线圈的匝数  $N = 820$  匝, 气隙  $\delta_0 = 0.02 \text{m}$ , 线圈中的偏置电流  $I_0 = 8 \text{A}$ 。由式(2)得  $K_x = 760$ ,  $K_i = 304117$ 。再由式(5)得  $\omega_0 = 116.346$ ,  $K_p = 0.0025$ 。

根据  $1.2 \leq K_c K_p \leq 2$  的要求, 取  $K_c K_p = 1.5$ , 得  $K_c = 1.5 / K_p = 600$ , 取  $\xi = 0.5$  得  $T_d = 0.004$ 。  $\omega_n = 82.269$ , 得  $\frac{1}{T_i} = 8.2269$ 。

被控系统在 MATLAB 中的 SIMULINK 下仿真得到的响应曲线如图3所示。

从图3(a)中可以看出, 由于引入了 PID 控制, 原先不稳定的系统最终收敛, 但是系统存在较大的稳态误差, PID 的参数需要进行调整。适当的减小积分常数  $T_i$  以增大积分作用, 来消除系统的稳态误差。调节后的响应曲线如图3(b)所示。可以看出虽然系统的超调有所增大, 但是由于积分作用增强, 系统的稳态误差缩小到了一个

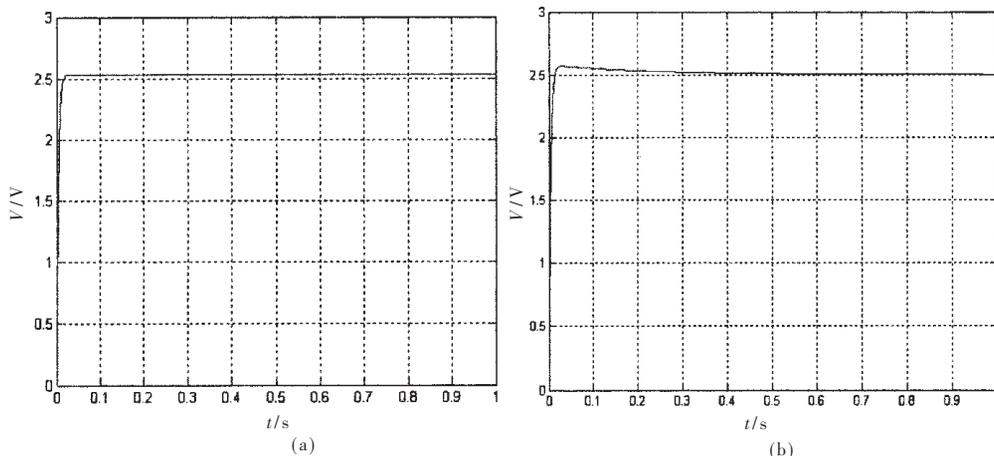


图3 系统的响应曲线

很小的数量级。

### 3 磁悬浮防抖系统电控部分的研究

磁悬浮防抖系统的电控部分主要由位移传感器、控制器、功率放大器以及电磁铁组成,如图4所示。

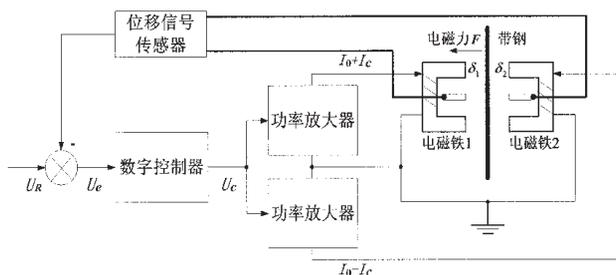


图4 磁悬浮电控系统的结构框图

由于电磁力的作用带钢将稳定悬浮于平衡位置( $\delta_1 = \delta_2$ )。当带钢在外力作用下偏离设定的平衡位置向电磁铁2靠近时,传感器将测得的带钢实际位置送入控制器,控制器根据PID算法产生控制信号,使功率放大器产生相应的控制电流 $I_c$ 。电磁铁1以偏置电流 $I_0$ 与控制电流 $I_c$ 之和激磁;而电磁铁2则利用两者之差激磁,使电磁铁1产生的电磁力大于电磁铁2产生的电磁力。因而,在带钢上产生与位置偏离方向相反的电磁力作用,使带钢克服外力回到平衡位置。

#### 3.1 位移传感器的选择

系统采用的位移传感器是电涡流传感器,为了减小温度影响,将电涡流传感器接成差动方式<sup>[6]</sup>,即一对传感器探头分别位于带钢的两侧,形成一对差动信号,经过调理电路后输出0~5V的直流电压信号来反映带钢的位移。如图5所示,当带钢吸死在电磁铁1上时, $\delta_1 = 0\text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 40\text{ mm}$ ,传感器给出的信号是0V(图5(a));处于平衡位置时, $\delta_1 = 20\text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 20\text{ mm}$ ,传感器给出的信号是2.5V(图5(b));吸死在电磁铁2上时, $\delta_1 = 40\text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 0\text{ mm}$ ,传感器给出的信号是5V(图5(c))。在两个电磁铁40mm的间隙内,带钢的位移与传感器输出的电压呈线性关系。对应传感器的灵敏度为125mV/mm。

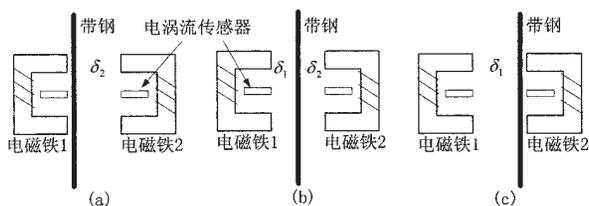


图5 带钢位置与传感器输出关系示意图

#### 3.2 数字控制器的硬件设计

数字控制器是整个磁悬浮系统的核心,它主要由CPU模块、A/D模块、D/A模块3部分组成。其中CPU模块由DSP和FPGA组成,它们协同工作完成控制算法以及A/D芯片、D/A芯片的启动。A/D模块包括低通滤波器以及A/D转换器。它的功能是将传感器检测到的位移

《电子技术应用》2009年第2期

信号转换成数字信号发送给DSP。D/A模块包括D/A转换器以及电压跟随器。它将DSP的运算结果转换为模拟信号并输送到功率放大器。

#### 3.2.1 CPU模块的硬件构成

磁悬浮系统对控制速度存在很高的要求(文中设计的控制周期为30μs),并且在极短的控制周期内要完成大量的运算,因此对DSP的运算速度是一个很大的考验。

基于这一原因,本系统选用了TI公司推出的TMS320VC33(以下简称VC33)作为控制芯片。VC33是32位浮点运算DSP,目前被广泛地运用于数字信号处理、控制等领域。它拥有13ns的指令周期,每秒75兆次指令(MIPS),150兆次浮点运算(MFLOPS)<sup>[7]</sup>。此外,VC33支持大量的浮点运算指令,编程方便,且数据的动态范围很大,几乎不用考虑数据的溢出问题。因此选用VC33作为磁悬浮系统的控制芯片是非常合适的。

VC33的运算功能非常的强大,但是事件管理能力相对薄弱,可用的I/O引脚很少。因此,本系统选用了Cyclone系列的EP1C6T144C8 FPGA芯片来弥补这一不足。EP1C6T144C8芯片是Altera公司推出的一款高性价比FPGA,有98个可用I/O口。它具有强大的嵌入式控制能力,与VC33配合使用,共同构成磁悬浮系统的控制核心。

#### 3.2.2 A/D模块的硬件构成

由于VC33芯片没有片内的A/D模块,所以必须外扩A/D芯片。系统选用MAXIM公司的MAX1304模数转换芯片。该芯片为8通道、12位、同步采样ADC芯片,输入电压范围为0~5V(与传感器输入范围相匹配),可以在0.9μs内完成2个通道的转换,在1.98μs内完成多达8个通道的转换,非常适合用作磁悬浮系统的模数转换。图6为MAX1304与DSP以及FPGA的接口电路。

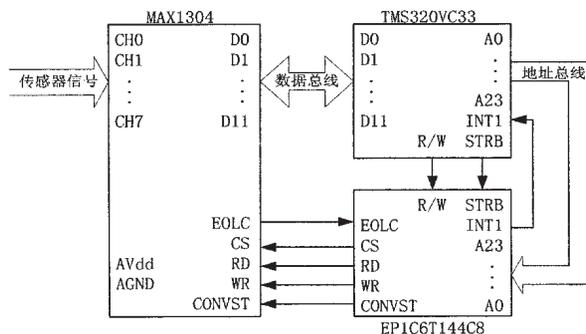


图6 MAX1304与VC33及FPGA的接口电路

#### 3.2.3 D/A模块的硬件构成

考虑到后级功放的输入范围设计为-5V~+5V,系统选用了TI公司的一款D/A转换芯片——DAC813。DAC813为单通道12位双缓冲D/A芯片,5μs的转换时间,双极性-5V~+5V的输出电压。由于DAC813的输出范围和功放电路的输入电压范围相匹配,故信号输出模

块无需电压转换电路，只需 D/A 转换芯片和电压跟随器即可。图 7 是 DAC813 与 DSP 以及 FPGA 的接口电路。

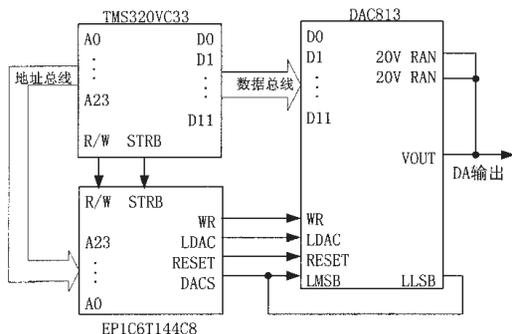


图 7 DAC813 与 VC33 及 FPGA 的接口电路

### 3.3 功率放大器的设计

磁悬浮系统的功率放大器采用的是三电平 PWM 功放<sup>[6]</sup>，主电路采用的拓扑结构如图 8 所示。

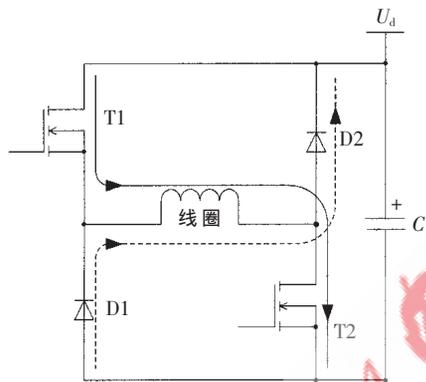


图 8 功率放大器主电路结构

将控制器输出的电压信号通过与三角波比较调制成两路相位相差 180° 的 PWM 信号，分别驱动功放中的两只功率管 T1 和 T2。当电流给定信号  $I_c$  大于线圈中的电流  $I$  时，两个功率管栅极的驱动信号占空比都大于 50%，当 T1、T2 同时导通时，线圈中流过驱动电流， $I$  增加；当  $I_c$  等于  $I$  时，两驱动信号的占空比等于 50%，T1、T2 任何时刻只有一个导通， $I$  不变；当  $I_c$  小于  $I$  时，两驱动信号的占空比都小于 50%，在 T1、T2 同时关断的时刻里，线圈通过 D1、D2 续流，线圈中的电流  $I$  减小。

## 4 试验研究

### 4.1 带钢磁悬浮防抖试验台的结构

为检验该磁悬浮防抖系统在实际生产中能否有效地抑制带钢的抖动，文中在带钢磁悬浮防抖试验台上进行了试验研究。试验台的结构如图 9 所示。长度为  $l=3\text{ m}$  的带钢上端固定在支架上，下端通过可调节张紧力的弹簧与支架连接。支架的中部有一横梁用于固定电磁铁，电磁铁的下方安装了激振器用于对带钢施加干扰力。

### 4.2 带钢稳态悬浮试验

带钢稳态悬浮试验是在没有外力干扰的情况下对

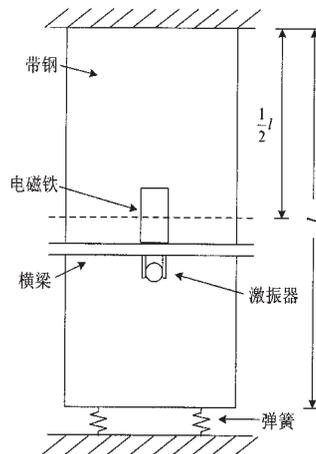


图 9 带钢防抖模拟试验台

带钢施加磁悬浮控制以观察带钢是否能够稳定悬浮。图 10 为施加磁悬浮控制后带钢的位移波形，传感器的输出信号恒定为 2.5V (传感器输出信号与带钢位置的对应关系见 3.1 节)，可以看出带钢稳定悬浮于两电磁铁中间的平衡位置。

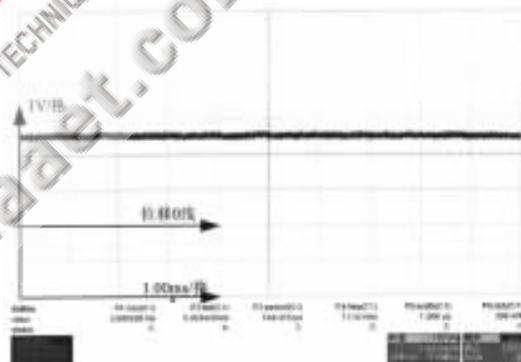


图 10 带钢静态悬浮时的位移波形

### 4.3 带钢抗干扰试验

抗干扰试验是当带钢稳定时人为地施加一个外力将带钢推向电磁铁 1，此时传感器的输出接近 0V。迅速撤去外力，以观察带钢回到稳态所需的调节时间。不施加磁悬浮控制时，带钢的响应波形如图 11 所示，可以看出，在所测的 40s 内带钢仍在抖动。施加磁悬浮控制后，

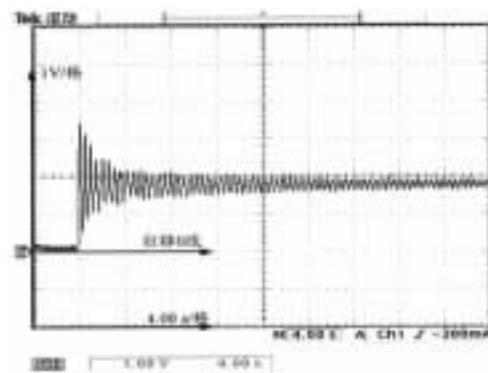


图 11 未施加磁悬浮控制时带钢的阶跃响应

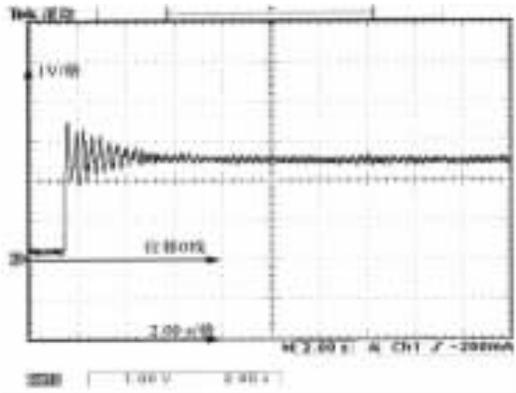


图 12 施加磁悬浮控制后带钢的阶跃响应

重复上述过程,带钢的响应波形如图 12 所示,带钢在 5 s 内回到平衡位置重新稳定悬浮。相比之下,施加磁悬浮控制后系统的调节时间大大缩短。

#### 4.4 带钢激振试验

激振试验是通过激振器在带钢上加入一个固定频率固定幅值的干扰力,使带钢产生抖动,再施加磁悬浮控制,从而检验磁悬浮防抖系统的性能。当不加磁悬浮控制时,带钢的位移信号如图 13 所示。此时由于激振器的作用,带钢以 2.3 Hz 的频率抖动。位移信号的峰峰值为 1.75 V,传感器的灵敏度为 125 mV/mm,可以得出此时带钢抖动的幅度为  $\pm 7$  mm。

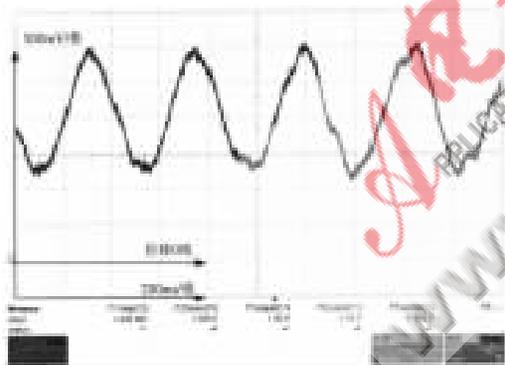


图 13 未施加磁悬浮控制时带钢抖动的波形

施加磁悬浮控制之后,控制器将自动调节控制电流,以改变电磁力的大小,减小带钢抖动的幅度。施加磁悬浮控制后带钢的位移信号如图 14 所示。

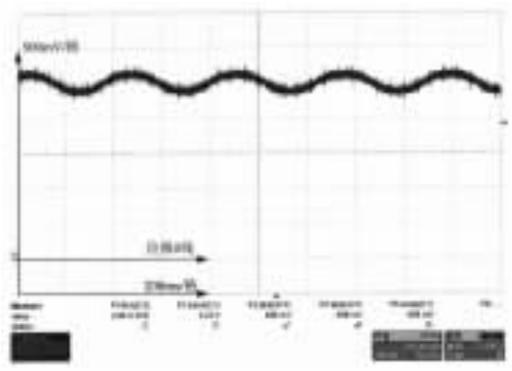


图 14 施加磁悬浮控制后带钢抖动的波形

可以看出,施加磁悬浮控制之后,原先抖动的幅值被大幅缩减,带钢仅在平衡位置附近作小幅抖动。此时位移信号的峰峰值为 500 mV,可以得出带钢的抖动幅度为  $\pm 2$  mm。对比未施加磁悬浮控制时的  $\pm 7$  mm,带钢抖动的幅度减小了 71.4%。

通过以上试验可以看出,本文研制的带钢磁悬浮防抖系统能够稳定地悬浮带钢,并能很好的抑制带钢的抖动。证明了磁悬浮技术在带钢防抖领域中应用的可行性,为进一步的研究提供了很好的参考。

#### 参考文献

- [1] VOSS G, WALLACE G. Automation and crossbow control of hot dip galvanizing lines. SEASIS Taiwan Conference, Kaohsiung Taiwan, May 1999.
- [2] 尚玲艳,周坚刚.垂直带钢磁力位控系统研究[J]. 计算机仿真, 2007(6): 307-314.
- [3] 徐龙祥,欧阳祖行.机械设计[M].北京:航空工业出版社, 1999:250-251.
- [4] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社, 2001: 137-138.
- [5] 王广雄,袁欣,何朕.不稳定对象的PID控制[J].控制与决策, 2002(5): 611-613.
- [6] 曾学明.磁悬浮轴承电控系统研究[D].南京:南京航空航天大学, 2002.
- [7] 尹国华.基于 VC33 DSP 磁悬浮轴承系统数字控制器的研究[D].南京:南京航空航天大学, 2007.

(收稿日期:2008-09-19)