

变尺高精度全自动矽钢片剪切机控制系统设计

张曙光 王福顺 孙小华 邵利敏 王希望

【摘要】 为满足矽钢片剪切机工艺精度要求,用三菱 FX2 系列 PLC 作为主控单元,与定位模块、伺服放大器及 MR-J2 系列伺服电动机组成控制系统。利用伺服电动机所具有的位置控制和多段速度控制的特点,通过表定位方法对定位模块进行操作从而实现了对电动机的精确定位,并推导出位置、速度双重控制的最优方案,既提高了剪切精度又使该系统达到理想的剪切速度。系统实现了变尺剪切,达到了特种变压器的装配要求。

关键词: 剪切机 变尺剪切 可编程控制器 位置控制 多段速度控制

中图分类号: TG333.2⁺1; TP273 **文献标识码:** A

A Cutting Control System with Variable Scale and High Precision for Auto Silicon Steel Sheet Cutter

Zhang Shuguang¹ Wang Fushun¹ Sun Xiaohua² Shao Limin¹ Wang Xiwang¹
(1. Agricultural University of Hebei 2. Hebei Software Institute)

Abstract

A FX2 PLC as master control unit combined with a MR-J2 servo motor, an orientation module and a servo amplifier to make a system. A motor was accurately controlled by using the features of position control and multistage velocity control of the servo motor through the form address orientation method and an optimization project of dual control for position and velocity was deduced. The dual control project ensures both the precision and the speed of the system. The system realized variable scale cutting, which met the requirement of special transformer. The operating tests indicated that of the cutter satisfied the technical specifications completely.

Key words Cutter, Variable scale cutting, Programmable logic controller, Position control, Multistage velocity control

引言

矽钢片剪切机是特种变压器的生产部门用于剪切特种磁芯原料(矽钢片)的机器。矽钢片的剪切精度要求非常高,误差过大就无法装配。国内的一些滚剪机只应用于定尺剪切或精度要求不高的场合,不适合矽钢片的剪切。还有一些半自动剪切机,其劳动强度大且生产效率低,故目前我国所使用全自动矽钢片剪切机大都是进口的,价格昂贵且维修不便。本研究在定尺剪切的基础上,运用自动控制技术与优

化方法实现剪切板长的精确控制,结合一定的机械结构,较好地解决剪切精度和速度之间的矛盾,实现全自动剪切并且可根据具体的参数实现不同形状磁芯的剪切。

1 控制原理与精度误差分析

1.1 系统控制原理

图1为剪切机控制系统结构框图,它主要分为机械部分和控制部分。机械部分主要由导轨区、碾送区、剪切区组成。其中碾送轮直径 $D=90$ mm,伺服

收稿日期:2005-10-28

张曙光 河北农业大学机电工程学院 教授,071001 保定市

王福顺 河北农业大学信息科学与技术学院 助教

孙小华 河北软件职业技术学院数字传媒系 助教,071001 保定市

邵利敏 河北农业大学机电工程学院 助教

王希望 河北农业大学信息科学与技术学院 助教

电动机到碾送轮的减速器减速比 $i=40$ ；控制部分由 PLC、定位模块、伺服放大器组成。由于需要的剪切精度高(短板为 $\pm 0.1\%$ ，长板为 $\pm 0.01\%$)、速度快，对设计制造提出了很高的要求。

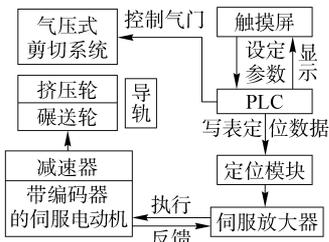


图 1 系统的结构框图

Fig. 1 Framework of the system

系统设计中选用三菱 HC-KFS 73(B)型(低惯量、小功率)伺服电动机。在送料电动机的拖动下，送料机构拖动矽钢片作进给运动。由于惯性和速度，矽钢片在运动过程中储存一定的动能，当发出停车命令时，拖动系统在减速释放动能的同时执行机构还要继续向前行走一段距离(滑程)，然后才能停止^[1]。因此为了准确停止在给定位置，应在到达给定位置前提早发出减速制动命令。经过一段惯性滑程之后刚好停在给定位置上，从而达到精度要求。在系统惯性一定的情况下如矽钢片运行速度为 v ，减速度为 b ，则滑程为 $L=v^2/(2b)$ 。因此，只要在到达给定位置前 L 处发出停车制动信号，系统将正好停在给定位置。但在实际中由于各种原因，制动过程都会产生误差。制动点的速度 v 、减速度 b 、制动行程 L 都可能产生偏差，所以总是存在超前或滞后的位置误差，现分析可能产生偏差的 2 种极端情况。

1.2 超前制动误差

假定按给定制动位置超前 ΔL_1 开始制动，而且制动开始时速度又偏低 Δv ，其值为 $v - \Delta v$ ，减速度又偏大 Δb ，其值为 $b + \Delta b$ ；这样制动后矽钢片停在给定位置之前，其最大误差为

$$\Delta L_{\max} = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta L_1 + \frac{v}{b} \Delta v + \frac{v^2}{2b} \Delta b$$

式中 ΔL_1 ——超前于 L 的偏差

ΔL_2 ——由 Δv 、 Δb 引起的偏差

1.3 滞后制动误差

假定按给定制动位置滞后 $\Delta L'_1$ 开始制动，而且制动开始时速度又偏高 $\Delta v'$ ，其值为 $v + \Delta v'$ ，减速度又偏小 $\Delta b'$ ，其值为 $b - \Delta b'$ 。这样制动后矽钢片停在给定位置之后，整个送料长度将比设定值长，其最大误差为

$$\Delta L'_{\max} = \Delta L'_1 + \Delta L'_2 = \Delta L'_1 + \frac{v}{b} \Delta v' + \frac{v^2}{2b} \Delta b'$$

式中 $\Delta L'_1$ ——滞后于 L 的偏差

$\Delta L'_2$ ——由 $\Delta v'$ 、 $\Delta b'$ 引起的偏差

由上面分析可以看出 2 种误差表达式相同。设速度的相对误差为 γ 、减速度的相对误差为 β ，则 $\gamma = \frac{\Delta v}{v}$ ， $\beta = \frac{\Delta b}{b}$ ，最大误差的统一表达式可写成

$$\Delta L_{\max} = \Delta L_1 + \left(\frac{2\gamma}{b} + \beta \right) \frac{v^2}{2b} \quad (1)$$

由此可以得到减小最大误差的方法：减小制动时的位置误差、减小制动开始时的速度相对误差、减小制动过程的减速度相对误差、增大制动过程的减速度、降低制动开始时的初始速度。

2 系统准确停车的实现

在式(1)中影响系统精度的因素有速度和减速度，系统减速度越大系统误差越小，因此应尽量增大减速度，但由于受电动机最大输出力矩的影响，该量只能在一定范围增大。制动时速度的大小对精度影响较大，因在式(1)中速度以平方出现，所以制动时速度越低误差越小，然而送料速度低，整个系统的工作效率低，工作效率与精度是矛盾的^[2]。为了既提高工作效率又减小误差，本系统采取了 3 级降速方式，即在送料过程中采用高速，在将要制动时电动机低速运行。其速度控制曲线与行程图如图 2 所示。图中 x_1 是第 1 级减速点， x_2 是第 2 级减速点， x_1 、 x_2 之间的差值应保证大于系统送料速度由 v_1 稳定到 v_2 ，电动机的转速由 n_1 稳定到 n_2 的时间内送过的料长。同样 x_2 、 x_3 之间的差值也应能保证送料速度由 v_2 变化到 v_3 所走过的位移。 x_3 减速点后的位移计算式为

$$S_3 = \frac{v_3^2}{2b} \quad (2)$$

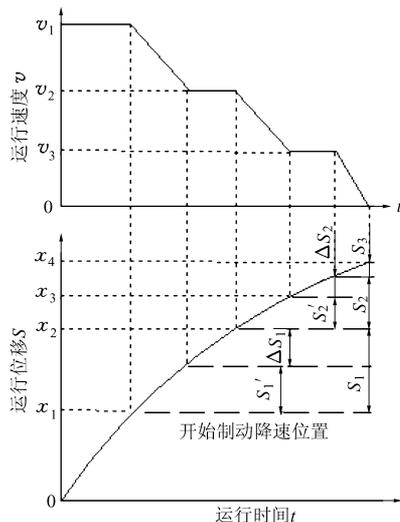


图 2 3 级降速停车的速度及行程图

Fig. 2 Velocity and journey chart of three-stage deceleration

2.1 采用表定位的方法进行分区多级降速

采用多级降速停车不仅能减小停车的行程误差而且工作时又不降低工作效率,系统中用 PLC 的 FROM/TO 指令对定位模块(FX2N-10GM)进行操作,从而完成对伺服电动机位置和速度的控制^[3]。作为变尺剪切还要考虑不同长度采用不同控制参数,即剪切短矽钢片时,其启动的速度、减速度和最后几段的距离与剪切长矽钢片时不同。根据厂家对矽钢长度的要求(10 mm < L < 300 mm),将该长度分成 3 个区域,短片区:10 mm < L < 50 mm;中长片区:50 mm < L < 150 mm;长片区:150 mm < L < 300 mm。通过理论计算得出每个长度区间的最优参数,然后用表定位的方法通过 PLC 编程对伺服电动机进行控制,达到精度和速度的要求。

2.1.1 表功能概述

系统中用 PLC 的 FROM/TO 指令对定位模块(FX2N-10GM)进行操作,从而完成对伺服电动机的定位,当 FX2N-10GM 中的特殊辅助继电器 M9165 开启时,使用表方法进行定位控制变为有效。

2.1.2 命令脉冲频率和最大运行速度的计算

为取得使伺服电动机按额定转速(3 000 r/min)旋转所需的命令脉冲频率,根据伺服电动机的特性:在某一特定转速下,命令脉冲频率 f_0 与反馈脉冲频率相等,可得出

$$f_0 \frac{C_{mx}}{C_{dv}} = P_f \frac{N_0}{60} \quad (3)$$

式中 C_{mx} ——电子齿轮比率分子

C_{dv} ——电子齿轮比率分母

P_f ——伺服电动机一周的额定脉冲数,HC-KFS73(B)型电动机 $P_f=131\ 072$

N_0 ——伺服电动机的转速,r/min

假设电子齿轮比率为 1(是伺服放大器参数 3、4 的初始值),并从式(3)中得到

$$f_0 = P_f \frac{N_0}{60} = 131\ 072 \times \frac{3\ 000}{60} = 6\ 553\ 600$$

但是,因为定位单元的最高频率是 200 kHz,所以应更改电子齿轮比率 k ,从式(3)中可以得到

$$k = \frac{C_{mx}}{C_{dv}} = \frac{4\ 096}{125} = 32.768$$

上式结果表明:在伺服放大器中设定参数 3($C_{mx}=4\ 096$)和参数 4($C_{dv}=125$)则定位单元写入最高频率(200 kHz)时,伺服电动机以额定转速(3 000 r/min)转动。

在本系统中从精度和速度考虑,侧重精度的实现,系统使用的电子齿轮的实际比率 $k=10$,即伺服放大器中设定参数 3($C_{mx}=10$)和参数 4($C_{dv}=1$)。

将实际的 k 值代入式(4)即可算出定位单元写入不同频率 f_w 时,伺服电动机所对应的旋转速度 N_w ,即

$$N_w = 60 f_w \frac{1}{P_f} \frac{C_{mx}}{C_{dv}} = 600 f_w \frac{1}{P_f} \quad (4)$$

2.2 多段速度控制策略的最优化方案

所谓的最优化方案就是计算出特定减速时间 t_d 下的减速度 b 和 3 段的减速长度(S_1, S_2, S_3)及最优的减速速度(v_1, v_2, v_3)。在这里长度用通过定位模块送入伺服电动机的脉冲个数来表示;速度用单位时间通过定位模块进入伺服电动机的脉冲个数来表示。折算公式为

$$P_m = \frac{S}{\pi D} i \frac{P_f}{k} \quad (5)$$

式中 P_m ——行程 S 所对应的脉冲数

应用式(5)将长度折算成脉冲数,则短片区、中长片区、长片区所对应的脉冲个数如表 1 所示。系统设减速时间为 100 ms,且最后一段 $v_3=2\ 000\ \text{s}^{-1}$;在此减速时间 t_d 、开始减速速度 v_3 及系统的机械参数下,按照片长的不同区域分别计算最优参数。

表 1 实际距离所对应的脉冲数

Tab. 1 Corresponding pulse number of practical distance

距离/mm	10	50	150	200	300
脉冲数	18 543	92 714	278 143	370 858	556 287

(1)短片区

以最短长度 10 mm 为准进行计算,只要实现了最短片的精度要求,则在本区内其他长度的精度要求即可达到,工程中 10 mm 片长的 $v_1=50\ 000\ \text{s}^{-1}$, $v_2=10\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。

根据公式 $b = \frac{v_{\text{end}} - v_{\text{start}}}{t_d}$, $S = \frac{v_{\text{end}}^2 - v_{\text{start}}^2}{2b}$, 可得 $S_3=200, S'_2=600, S'_1=3\ 000$ 。在工程中为了确保多段速度的平稳过渡,需要在各理论减速段(S'_1, S'_2)后分别加上一个相应的余量($\Delta S_1, \Delta S_2$),即实际的减速段长如图 2 所示: $S_1=S'_1+\Delta S_1, S_2=S'_2+\Delta S_2$ 。实际的 S_3 也相应加长。但余量不能加的过长,过长就会影响速度,进而使效率降低。本系统中在短片区所取的实际减速段的脉冲距离为: $S_1=4\ 000, S_2=1\ 000, S_3=500$ 。

(2)中长片区

以该区最短板 50 mm 为准进行计算,取 $v_1=150\ 000\ \text{s}^{-1}, v_2=50\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。同理,本系统中在中长片区所取的实际减速段的脉冲距离为: $S_1=11\ 000, S_2=3\ 000, S_3=500$ 。

(3)长片区

以该区最短板 150 mm 为准进行计算,取 $v_1=$

$200\ 000\ \text{s}^{-1}$, $v_2=100\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。同理根据短片区中的计算可得: $S_3=200$, $S'_2=5\ 100$, $S'_1=15\ 000$ 。

系统中在长片区所取的实际减速段的脉冲距离为: $S_1=16\ 000$, $S_2=5\ 500$, $S_3=500$ 。

2.3 程序实现

系统自动控制部分的程序框图如图3所示。可编程控制器工作方式是扫描工作方式, 不同于其他计算机, 因而在程序中只能分支而不出现循环, 否则要出现超时错误警报而停止工作^[4]。

3 结束语

该设计的工作重点是寻得对伺服电动机的位置、速度双重控制的最优方案, 进而解决剪切精度和

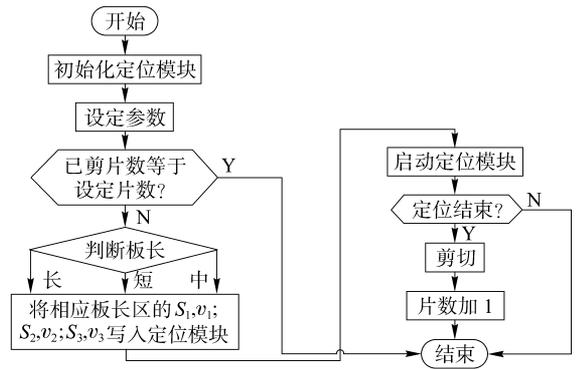


图3 程序流程图

Fig. 3 Procedure flow chart

速度的矛盾。系统经不间断的工作检验, 半年多来运行正常, 各项指标均达到设计要求, 效果良好。

参 考 文 献

- 1 任兴权. 电力拖动基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- 2 蔡振江, 孙耀杰, 沈贵水, 等. 开卷定尺剪切系统的可编程控制器控制[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 188~192.
- 3 邹奎政, 涂仁发, 吴康寅. FX2型可编程控制器在配料控制中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(S1): 119~122.
- 4 白天明, 仇立国, 赵永涛, 等. 定尺剪切飞锯 PLC 控制系统[J]. 基础自动化, 1994(5): 33~35.

(上接第 143 页)

- 4 张永新. 计入内齿板弹性的三环减速器弹性静力分析[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- 5 梁永生, 李华敏, 辛绍杰, 等. 三环减速器均载机构及其有限元分析[J]. 机械设计, 1999, 16(9): 25~27.
- 6 陶浩, 段红杰. 四环减速器内齿环板的有限元分析[J]. 机械设计, 2003, 20(9): 20~22.
- 7 谢永春, 王立华, 刘文, 等. 双环减速机振动噪声分析[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(4): 20~23.
- 8 辛绍杰, 李华敏, 田勇. 两极三环减速器振动特性的实验研究[J]. 石油机械, 2000, 28(10): 20~22.
- 9 张俊. 三环减速器承载能力研究与新产品系列设计[D]. 天津: 天津大学, 2004.

(上接第 159 页)

- 7 Frost H J, Ashby M F. Deformation mechanism maps, the plasticity and creep of metals and ceramics [M]. Pergamon Press, Oxford, 1982: 80.
- 8 Juliane Kadner, Siegfried Menzel, Klaus Wetzig. In situ investigations of the thermal fatigue behaviour of hot pressed Si3N4 by laser shock loading inside an SEM[J]. Fresenius J. Anal. Chem., 1998, 361: 578~581.
- 9 Menzel S, Gobel T, Bartsch K, et al. Phase transitions in PACVD-(Ti, Al)N coatings after annealing[J]. Surf. Coat. Technol., 2000, 124(2-3): 190~195.
- 10 Gobel T h, Menzel S, Hecker M, et al. Stress measurements in thermal loaded Ti, Al N hard coatings[J]. Surf. Coat. Technol., 2001, 861: 142~144.
- 11 Bartsch K, Leonhardt A, Unger U, et al. New PACVD-hard material layers for wear protection of high-speed steel [J]. Surf. Coat. Technol., 1997, 94: 168~173.