

基于CMAC和重复补偿的电脑横机伺服控制方法研究

施邹云,潘海鹏

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘要:针对电脑横机伺服控制中机头定位稳、快、准的要求,分析了横机机头伺服控制系统的工作原理、定位过程和影响因素,建立了机头运动的数学模型,阐述了CMAC小脑模型神经网络的优点,并将其与重复补偿控制相结合,提出一种基于CMAC和重复补偿控制的复合PID控制方法。仿真结果表明,与传统PID控制方法相比,该方法提高了横机机头伺服系统对周期信号的跟踪精度和系统的响应速度,有较高的实用价值。

关键词:电脑横机;交流伺服系统;CMAC;重复补偿控制

中图分类号: TP273.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)02-0244-06 **引用页码:** 030503

0 引言

电脑横机是一种机电一体化的针织机械,以生产羊毛衫类产品为主。主传动机构是电脑横机的重要装置之一,横机机头通过伺服系统和同步带轮的传动,并在选针与成圈机件的配合下做横向往复运动,完成编织动作^[1]。高性能电脑横机要求机头能快速、准确、稳定地定位,主要采用交流伺服系统。永磁同步电机(PMSM)由于其特殊的结构和运行特性,能实现高精度、高动态性能、大范围的调速或定位控制,在工业领域中得到了广泛应用^[2]。目前,横机伺服控制系统多采用PID控制算法,因其结构简单、运算量小,且开发成本低而受到广泛应用,但是PID参数整定往往依靠经验,而且稳态精度不高。由于横机机头伺服系统各参数的非线性及相互耦合性,经典PID控制难以实现机头在高速运行时高精度定位的要求,而且抗干扰能力不强,往往影响编织的质量和效率。通过对电脑横机机头横移系统的分析和工艺对横移的要求,本文利用小脑模型神经网络(CMAC)的优点,结合重复补偿控制算法应用于横机机头定位控制中,并通过仿真实验以验证该控制方法性能。

1 电脑横机机头数学模型

电脑横机机头部件由主传动机构带动运行,同时在选针与成圈机件的配合下完成织物的编织。主传动机构一般由伺服电机驱动,经过两级同步带的传动,带动机头做横向往复移动。横机主传动机构框图如图1所示。

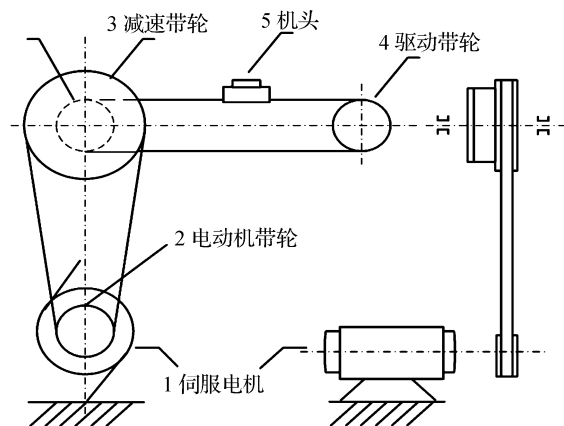


图1 横机主传动机构

对于不同的衣片组织结构,横机机头在高速的往复横移运动中,需同时增减织针的针数来适应编织物的宽窄变化,为实现编织物的高效和高质量生

收稿日期: 2015-06-04

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LZ15F030005)

作者简介: 施邹云(1988-),男,浙江慈溪人,硕士研究生,主要从事伺服电机驱动方面的研究。

通信作者: 潘海鹏, E-mail: pan@zstu.edu.cn

产,必须保证横机机头的横移定位精度和响应速度^[3]。

横机编织过程中,机头不断做横移往复运动,其运行既有加减速过程,也有恒速过程,去速度范围控制在 $0 \sim V_{\max}$ 之间。机头横机的加减速曲线如图2所示。影响机头加减速时间长短的因素包括设定速度、机头重量、传动摩擦、伺服电机效率、传动系统结构和抗冲击的能力等。缩短机头加减速时间的关键因素在于机头重量,轻的机头惯量较小,对伺服电机和传动系统带来的负荷和冲击也小,更适合速度的快速变化。此外,伺服系统还可以根据横机的具体情况优化不同设定速度下的加减速曲线,来提高横机的编织效率。

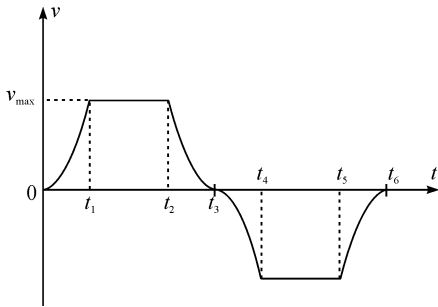


图2 机头横移的加减速曲线

一般,在设定的机头速度下,加速时间 $0 \sim t_1$ 和减速时间 $t_2 \sim t_3$ 越短,机头运行一次的时间就越短,效率就越高。机头运行的速度公式为:

$$v = n_d \times C \times \frac{\pi d}{60 \times 1000} \quad (1)$$

其中: v 表示机头实际运行速度(m/s), n_d 表示伺服电机转速(r/min), C 为齿轮传动比(为常数), d 为驱动带轮直径(mm)。电机转速测量一般常采用M法,其原理是在规定的检测时间 T 秒内,对光电编码器输出的脉冲信号进行计数。若已知电机每转一圈会产生 N 个脉冲,则在检测时间 t 秒内,计数器得到 m 个脉冲数,则伺服电机转速可用式(2)表示为:

$$n_d = \frac{m}{N \cdot t} \quad (2)$$

假设伺服驱动系统每输出一个脉冲,机头横向移动距离是 n (mm),当横移距离为 L (mm)时,电机输出的脉冲数为 L/n ,根据式(2),则可简化得到伺服电机转速 n_d :

$$n_d = \frac{L}{N \cdot t \cdot n} \quad (3)$$

由此可知,机头横移运动的性能与伺服系统电机的转速性能直接相关,即横机机头的定位精度由伺服系统决定着。因此,要获得控制精度高、响应速

度快的机头横移系统,需提高伺服驱动系统的控制精度和响应速度^[4]。

交流伺服系统一般由伺服控制器、伺服放大器、伺服电机构成。为方便分析,其简化数学模型可由传递函数表示为:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s) \quad (4)$$

其中: $G_1(s) = \frac{K}{1 + T_ms}$ 为一个一阶惯性环节,是伺服放大器与交流伺服系统构成的速度环^[5](K 表示系统的开环放大倍数, T_m 表示系统的电气时间常数); $G_2(s) = \frac{1}{T_{fs}}$ 为一个积分环节,为速度环到系统

的输出控制量; $G_3(s) = \frac{1}{J_L s + B_L}$ 为伺服系统负载传递函数(J_L 表示负载的转动惯量, B_L 为负载粘性阻尼系数)。以上各式经过整理,可得到交流伺服系统的传递函数:

$$G(s) = \frac{k}{s(1 + T_ms)(J_L s + B_L)} \quad (5)$$

横机机头伺服系统所用的永磁同步电机,其型号为130ST-M06016。根据其参数信息,可获得其负载转动惯量为 $J_L = 0.5 \text{ kgm}^2$, $T_m = 0.1 \text{ s}$, $B_L = 8$, $k = \frac{K}{T} = 360(\frac{v_l}{v_s})$ 。将以上参数代入式(5),可得到交流伺服系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{7200}{s^3 + 20s^2 + 160s} \quad (6)$$

2 CMAC和重复补偿控制

横机的机头定位不仅要求高速,而且要求高精度。但由于电脑横机的伺服系统是个非线性、时变性以及易受到不可预计干扰的被控对象,这要求伺服控制器具有较强的鲁棒性与抗干扰能力,否则将影响定位精度与整体控制性能。常规PID控制器结构简单、适用范围广、具有一定的鲁棒性等优点,但还是难以满足目前高精度、高实时性的伺服系统要求。

2.1 CMAC基本原理

小脑模型神经网络(CMAC)于1972年提出,是一种模拟人类小脑机能的人工神经网络。CMAC是一种基于局部学习的神经网络,学习速度快。与比一般神经网络相比,由于CMAC分类存储信息的特点,使其具有更好的非线性逼近效果,并且收敛速度快、自适应性强、易于实现,很适用于复杂条件下非线性对象的实时控制。^[6]

CMAC 可以由一个映射关系模型 $y=f(x)$ 来表达,其结构如图 3 所示。在 CMAC 中,输入空间的状态变量被量化,并被划分成离散状态。每个离

散状态被量化的输入构成的向量所指定,用于产生地址来激活联想单元中存储的联想强度,以恢复这个状态的信息^[7]。

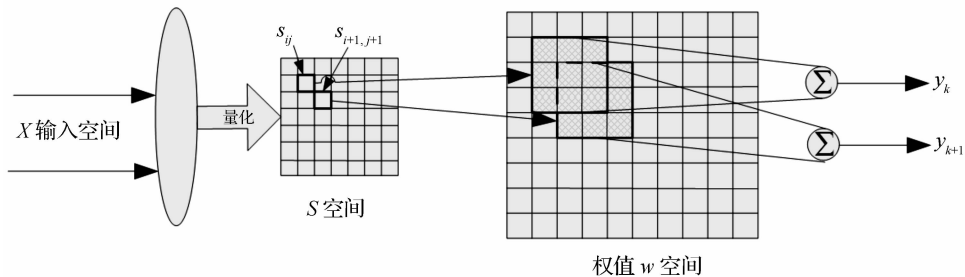


图3 CMAC小脑模型神经网络结构

2.2 重复补偿控制

重复补偿控制理论来源于内模原理,即若要被控输出就能够无误差地跟踪参考输入信号,则产生参考信号的发生器必须包含在一个稳定的闭环系统中^[7]。日本 Inoue 等基于上述思想提出了重复补偿控制理论,为使系统实现对外部周期参考信号的渐近跟踪,在一个闭环系统中,需要在其反馈回路设置一个可以描述系统输入的同周期的内部模型^[8]。

重复补偿控制系统结构框图如图 4 所示。由图 4 可知,在重复补偿控制系统中,作用于被控对象的信号 $U(s)$,除了当前时刻的偏差信号外,通过周期性延时环节 $\exp(-Ls)$ 的作用,与上一周期同时刻的运行偏差叠加,一起作用于被控对象。系统框图中 $Q(s)$ 和 $T(s)$ 为补偿环节。由于延迟因子 $\exp(-Ls)$ 的存在,系统开环传递函数在虚轴上含有无数个极点,所以对于任何阶输入或干扰,系统误差都能逐渐趋于零,系统鲁棒性较强^[9]。

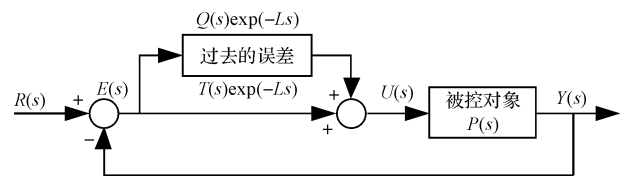


图4 重复补偿控制系统结构框

2.3 基于CMAC和重复补偿的复合PID控制

与传统PID控制和CMAC小脑模型神经网络相比,基于CMAC和重复补偿的复合PID控制方法,利用重复补偿控制环节来提高周期性的跟踪精度,其控制系统结构框图如图 5 所示。为确保系统的响应速度,CMAC 作为前馈控制;重复补偿控制的应用,可以使系统对周期信号的跟踪误差逐渐趋于零;为保证系统的稳定性并且抑制扰动产生,还增加了PID控制器来实现反馈控制。

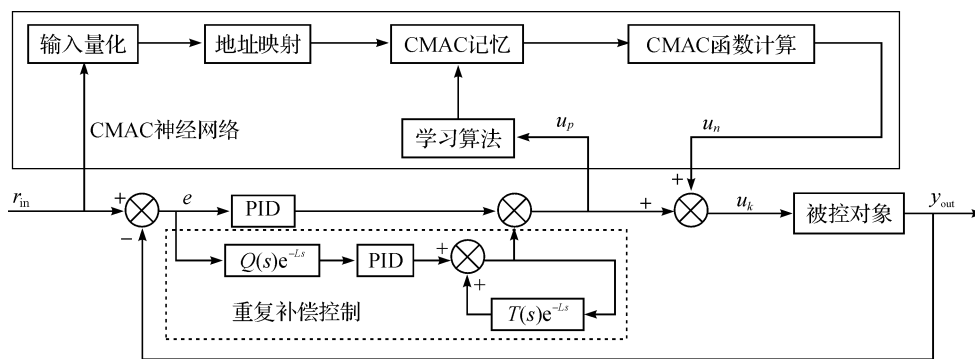


图5 基于CMAC和重复补偿的复合PID控制结构图

在图 5 所示的系统结构框图中, r_{in} 为系统输入信号,同时也是 CMAC 神经网络的输入信号。PID 控制器的输出 U_p 与 CMAC 的输出 U_n 之和作为控制系统总输出 U_k , 作用于被控对象。CMAC 小脑模型神经网络采用的是有导师的学习算法。系统在每

一控制周期结束时,需要先将当前周期的 CMAC 输出 U_n 与总控制器输出 U_k 做比较来修正权值,然后进入学习过程,其目的是使控制器的总输出 U_k 与 CMAC 的输出 U_n 之差 U_p 最小^[10],使系统的总控制输出,在经过 CMAC 的学习后由 CMAC 产生。

CMAC 的学习算法是系统误差的线性组合,结合重复补偿控制和 PID 负反馈控制,可有效抑制负载扰动,提高系统跟踪精度。CMAC 小脑模型神经网络的控制算法可用式(7)和式(8)表示:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (7)$$

$$u_k(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (8)$$

其中: a_i 表示二进制选择向量, c 表示 CMAC 的泛化参数, $u_k(k)$ 为作用于被控对象的控制总输入, $u_n(k)$ 为 CMAC 产生的相应输出, $u_p(k)$ 为 PID 控制器产生的输出,由此得到 CMAC 小脑神经网络的调整指标^[11]为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u_k(k) - u_n(k))^2 \frac{a_i}{c} \quad (9)$$

$$\Delta w(k) = \eta \frac{u_k(k) - u_n(k)}{c} a_i \quad (10)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha(w(k) - w(k-1)) \quad (11)$$

图5中重复补偿控制部分, e^{-Ls} 为周期延时环节,

$Q(s)$ 和 $T(s)$ 为补偿环节,为保证系统的稳定性和足够的跟踪精度,综合考虑, $Q(s)$ 常取接近于1的常数或类似低通滤波器形式的函数^[9]。重复补偿控制部分的公式如下所示:

$$E(s) = R(s)(1 - T(s)e^{-Ls}) / (1 + F_2(s) \cdot P(s)(1 - T(s)e^{-Ls}) + F_1(s)P(s)Q(s)e^{-Ls}) \quad (12)$$

其中: $R(s)$ 为输入信号, $Y(s)$ 为系统输出, $E(s)$ 为误差信号, $U(s)$ 为控制器输出, e^{-Ls} 为周期性延时环节, $Q(s)$ 和 $T(s)$ 为补偿器, $P(s)$ 为被控对象。 $F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 分别为两个 PID 控制器的传递函数。由于 $|Q(j\omega)| = |T(j\omega)| \approx 1$, 根据式(12),显然误差 $E(s)$ 可以趋于零。

3 横机机头伺服系统的仿真

根据前文分析的电脑横机机头伺服系统的工作原理和数学模型,结合 CMAC 和重复补偿控制方法,在 Matlab 中建立了基于 CMAC 和重复补偿控制的复合 PID 仿真模型,如图6所示。

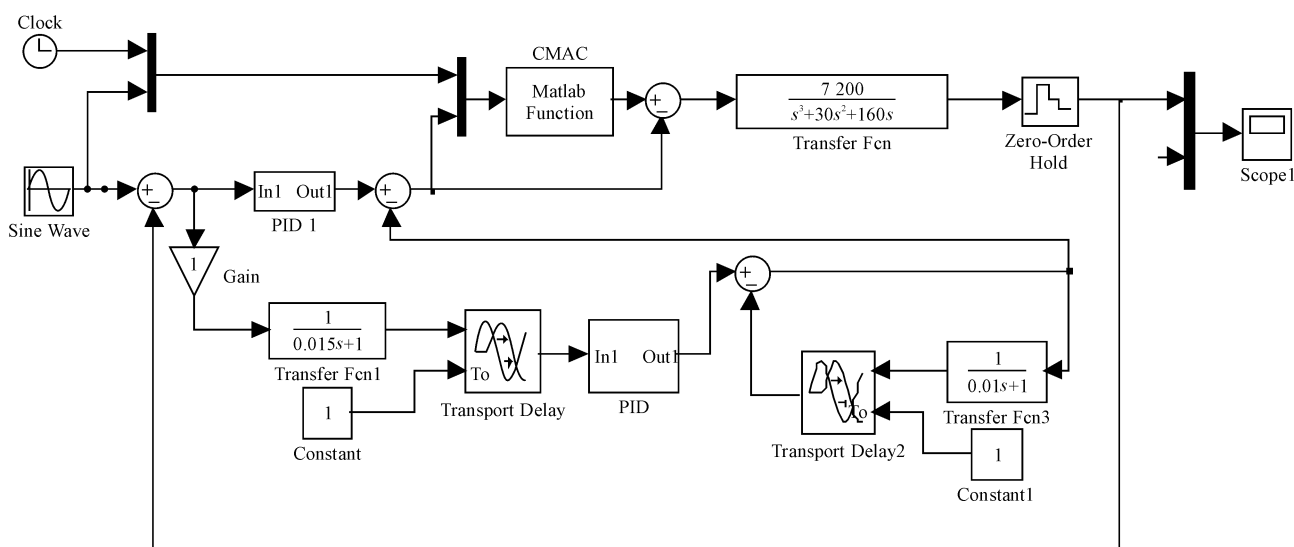


图6 基于CMAC和重复补偿的复合PID仿真框图

仿真模型中,CMAC 控制部分采用了 Matlab 的 Function 模块,其包含 CMAC 的一个 M 函数文件,并且在 M 函数中利用时钟功能实现神经网络权值的初始化。重复补偿控制部分,使用 Transport Delay 模块构成周期性延时环节,补偿器的选取为:

$$Q(s) = \frac{1}{0.015s + 1}, T(s) = \frac{1}{0.01s + 1}.$$

整个仿真模型以正弦信号作为输入信号,在普通 CMAC 小脑模型神经网络和 PID 控制器的基础上结合重复补偿控制器,来跟踪输入信号。

通过仿真,得到横机机头伺服系统基于 CMAC 和重复补偿控制的复合 PID 控制器的跟踪曲线和输出跟踪误差曲线,常规 PID 控制器的跟踪曲线和输出跟踪误差曲线,分别如图7—图10所示。从图中可以看到,与常规 PID 控制相比,复合 PID 控制方法在经过最初两个周期后,系统误差明显减小,表明结合 CMAC 和重复补偿控制的复合 PID 控制结构,能更快地跟踪给定信号,收敛速度快,跟踪误差小,且具有较强的鲁棒性,从而能有效提高系统的响应速度和抗干扰能力。

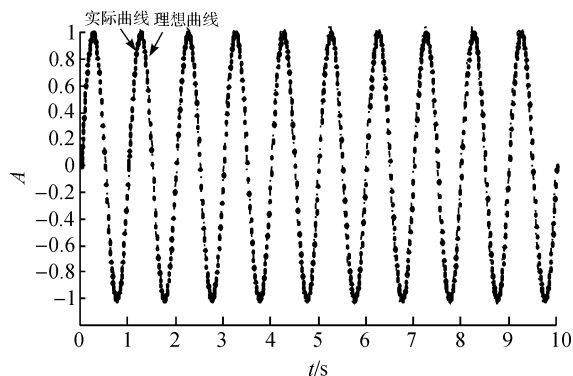


图7 复合PID控制跟踪曲线

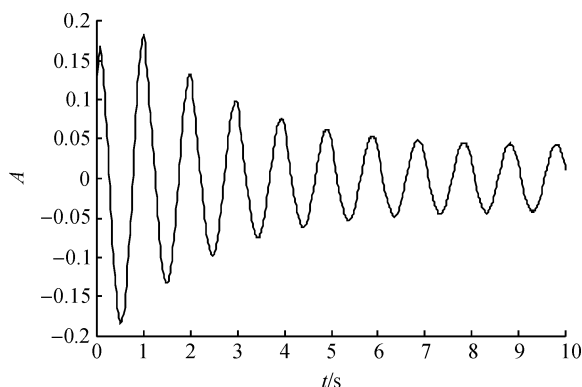


图8 复合PID控制的跟踪误差曲线

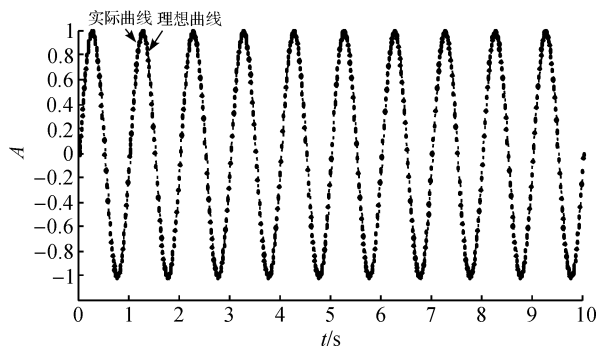


图9 常规PID控制跟踪曲线

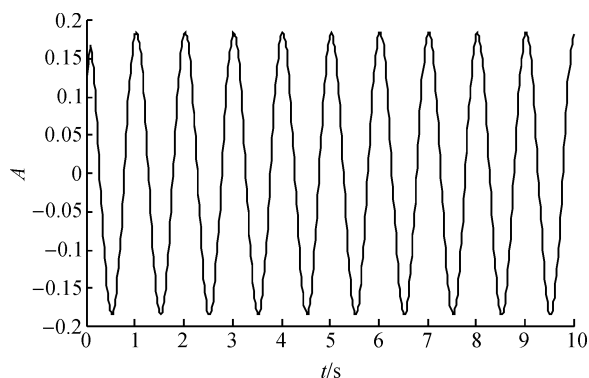


图10 常规PID跟踪误差曲线

4 结 语

针对电脑横机机头交流伺服系统采用的常规PID控制方法难以达到理想的定位控制效果,本文给出了一种基于CMAC与重复补偿控制相结合的复合PID控制方法。该方法结合CMAC小脑模型神经网络和重复补偿控制的优点,能有效满足横机伺服系统需要快速、高精度的定位要求。仿真结果表明,该控制方法减小了交流伺服系统的跟踪误差,收敛速度快,且具有较强的鲁棒性,从而能有效提高系统的响应速度和抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 张淑敏. 电脑横机使用与维修[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011: 1-5.
- [2] 高孝纲. 伺服系统在纺织工业中的应用综述[J]. 伺服控制, 2009(5): 22-26.
- [3] 宋广礼. 电脑横机实用手册[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2010: 30-35.
- [4] PAN H P, FENG X Y, SU L Y. Positioning control system of computerized flat knitter base on fuzzy PID composite feed forward control[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, 2011: 5820-5823.
- [5] 李彬, 郑宾, 殷云华. 基于Matlab的新型CMAC控制器的设计与仿真[J]. 微计算机信息, 2007, 23(16): 41-42.
- [6] 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 196-200.
- [7] 王耀南, 孙炜. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 120-125.
- [8] 詹习生. 重复补偿PID控制在交流伺服系统中应用[J]. 电气传动, 2009, 39(10): 55-58.
- [9] 苏义鑫. 基于重复补偿控制的交流伺服系统的PID控制[J]. 控制工程, 2011, 18(5): 685-687.
- [10] 宋轶群, 杜华生, 王德新. 基于CMAC神经网络与PID的并行控制器设计与应用[J]. 自动化与仪表, 2005, 20(3): 37-39.
- [11] 时光, 吴朋, 王刚. CMAC网络与模糊PD并行控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9): 1975-1979.

Study on Servo Control Method for Computerized Flat Knitter Based on CMAC and Repetitive Compensation

SHI Zouyun, PAN Haipeng

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the requirements of steady, fast and correct head positioning in servo control of computerized flat knitter, we analyzed the working principle, positioning process and influence factors of head servo control system of flat knitter, built a mathematic model of head motion, elaborated the advantages of CMAC (cerebellar model articulation controller) and combined it with repetitive compensation control to bring forward a compound PID control method based on CMAC and repetitive compensation control method. Simulation results shows that, compared with the traditional PID control method, the control method improves the flat knitter's head servo system's tracking accuracy of periodic signal and response speed of the system, so it has a high practicability.

Key words: computerized flat knitter; AC servo system; CMAC; repetitive compensation control

(责任编辑: 康 锋)