

一种优化的PID算法在伺服跟踪系统中应用

刘敏层, 杨子毛, 李阳, 张琦, 李广田

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 伺服位置跟踪作为衡量伺服控制系统性能的重要指标, 在伺服控制系统起着举足轻重的作用。但是由于常规PID算法与经典3环结构位置随动系统不能满足伺服系统快速性和准确性的要求, 为此在PID的基础上, 提出速度前馈加速度前馈PID算法, 通过引入前馈控制加快系统响应速度, 弥补系统的相位滞后。同时为了提高位置随动的快速性, 摒弃速度环和电流环而只采用位置反馈的单环结构。为了验证系统的正确性, 利用STM32F103RCT6作为主控芯片进行了正弦信号与不规则曲线的动态跟踪实验, 结果表明伺服系统采用速度前馈加速度前馈PID算法可以很好地改善系统的动态响应特性, 能够满足动态跟踪的性能要求。

关键词: 伺服系统; 位置跟踪; STM32F103RCT6控制器; 反馈

中图分类号: TM351

文献标识码: A

Application of an Optimized PID Algorithm in Servo Tracking System

LIU Minceng, YANG Zimao, LI Yang, ZHANG Qi, LI Guangtian

(Information and Control Engineering Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: Servo position tracking is an important index to measure the performance of servo control system, and plays an important role in servo control system. However, since the conventional PID algorithm and the classic kringle position servo system cannot satisfy the requirements of speed and accuracy, Therefore, on basis of PID, based velocity feedforward presented before acceleration feedforward PID algorithm, introduced the feedforward control to speed up the system response speed for phase lag of the system. In order to improve the speed of the position, the speed loop and current loop were discarded, but only the position feedback was used in order to improve the position. To the correctness verification system using STM32F103RCT6 as the main control chip of sinusoidal signal and irregular curve of dynamic tracking experiment, results show that the dynamic response characteristics of the servo system with speed and acceleration feedforward PID algorithm can improve the system dynamic response characteristics, can meet the requirements of dynamic tracking performance.

Key words: servo system; position tracking; STM32F103RCT6 controller; feedback

在伺服控制系统中, 伺服位置随动系统始终是伺服控制系统的一个难点。近年来, 随着科技的发展, 尤其是导弹的定位跟踪、飞机的视觉导航等方面, 伺服的动态位置跟踪已成为制约其发展的重要因素。但由于伺服系统自身的强耦合、非线性时变等特征, 难以建立精确的数学模型, 从而难以实现伺服的动态位置跟踪。

针对伺服系统实际应用中的基本要求以及

控制存在的主要问题, 鉴于常规PID算法无法同时满足伺服系统快速性与准确性的要求, 同时综合考虑工程领域常用的PID算法以及经典电流环、速度环、位置环3环结构^[1-2], 本文采用速度前馈加速度前馈PID算法, 通过引入前馈加快系统响应时间, 弥补系统的相位滞后; 通过位置反馈的单环结构, 提高位置随动系统的快速性。

为了验证系统的正确性, 在此基础上设计了

基金项目: 陕西省教育厅科研计划资助项目(2010JK664)

作者简介: 刘敏层(1966-), 女, 高工, 硕士研究生导师, Email: 295076439@qq.com

基于STM32F103RCT6的位置伺服控制电路,进行不同规则曲线的位置动态跟踪实验,结果表明采用速度前馈加速度前馈PID算法可以很好地改善系统的动态响应特性,弥补系统的相位滞后,减小动态跟踪过程中的误差,有效解决了位置随动系统快速性和准确性这一矛盾。

1 速度前馈加速度前馈PID算法

在伺服跟踪系统中,传统的控制策略如PID反馈控制、解耦控制等,在伺服系统中得到了广泛的应用。但在快速性、准确性要求场合,就必须考虑到动态响应、准确性和快速性等特性要求^[3-4],才能得到满意的控制效果。为了解决这一矛盾,在传统PID调节的基础上,再加上速度前馈、加速度前馈,使伺服系统获得快速的动态响应,通过传统的PID调节算法保证系统定位的准确性^[5]。系统调节原理图如图1所示。系统使用PID调节算法需要计算当前偏差 $e(k)$,前1拍的偏差 $e(k-1)$,前2拍的偏差 $e(k-2)$ 以及速度和加速度的变化量可计算输出的增量 $\Delta u(k)$,再与上一步的实际输出量 $u(k-1)$ 相加即可得到控制器的最终输出量。

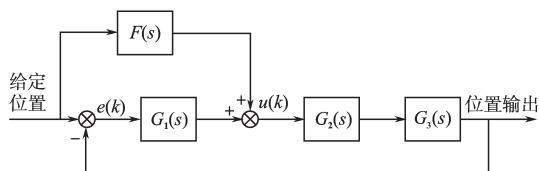


图1 加入前馈控制环节后系统控制结构图

Fig.1 Control structure diagram of the system after adding feedforward control

2 伺服位置动态跟踪策略

由于伺服跟踪过程往往是随动运动,而系统给定的指令是时变的、不可预知的,是1个随机变量。因此为了实现某种需要必须使输出的位置能够尽可能准确地跟随给定的目标位置。经典的伺服位置跟踪系统由电流环、速度环和位置环3环构成,从内环到外环,每个环都按典型系统设计,计算简单,易于调整。但是,这种3环系统在由内环设计到外环时,都要采用内环的等效环节,对于伺服位置跟踪系统来说,位置环的截止频率就被限制在低频范围内^[3]。而伺服位置跟踪系统除了稳态精度和动态稳定性的要求外,对输出量快速跟随给定输入量的要求很高。因此,这种结构的动态跟踪系统,只适用于对快速性要求

不高的地方,为了提高跟踪的快速性,本系统只采用位置反馈的单环结构。

为了对系统实现精确而稳定的控制,控制器采用了PID和速度前馈控制算法,通过调整控制参数,可以达到满意的效果。同时系统在闭环反馈控制的基础上,引入前馈控制,可以有效地解决位置随动系统快速性和准确性相互矛盾的问题。

图1为加入前馈控制环节 $F(s)$ 后的系统控制结构。

若图1中未加前馈 $F(s)$,则系统的闭环传递函数为

$$\Phi_1(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \quad (1)$$

加前馈 $F(s)$,则系统的闭环传递函数为

$$\Phi_2(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s) + F(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \quad (2)$$

式中: $G_1(s)$ 为PID校正环节传递函数; $G_2(s)$ 为功率驱动环节传递函数; $G_3(s)$ 为伺服电机传递函数。

各环节传递函数表示为

$$G_1(s) = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s}$$

$$G_2(s) = \frac{K_1}{K_1 s + 1}$$

$$G_3(s) = \frac{K_2}{s(T_2 s + 1)}$$

通过比较 $\Phi_1(s)$ 和 $\Phi_2(s)$,可以得出当加入前馈环节后并不影响系统的稳定性。另外如果 $F(s) = 1/[G_2(s)G_3(s)]$,则 $\Phi_2(s) = 1$,即系统输出信号复现或跟踪输入信号,这正是伺服位置随动系统要求的。 $F(s)$ 可表示为

$$F(s) = \frac{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{K_1 K_2}$$

$$= \lambda_1 s + \lambda_2 s^2 + \lambda_3 s^3 \quad (3)$$

由式(3)系统引入输入信号的一阶和二阶导数,即速度和加速度作为前馈控制的输入,与反馈控制一起构成复合控制来进行校正,可以最大限度满足伺服位置随动系统的要求,如图2所示为系统的控制结构。采用速度前馈可以通过开环控制特性来加快伺服系统的速度响应,并且当加大速度前馈增益时,可以减少位置环对位置误差的积累,从而加快补偿速度。此外,加入速度前馈信号可以补偿在速度输入时的稳态误差,加入加速度前馈信号可以补偿加速度输入时的稳态误

差,前馈控制加快了系统的响应速度,弥补了系统的相位滞后。为了保证电机不在极限状态下运行,加入了输出饱和控制模块,即对 $u(k)$ 进行限幅后再输出^[6-9]。

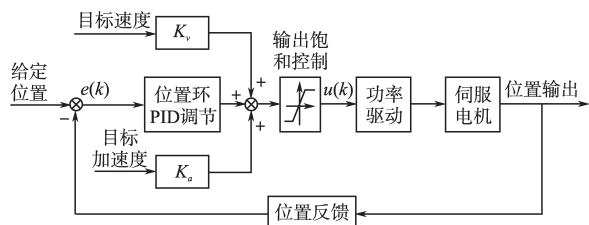


图2 复合控制系统控制结构图

Fig.2 Control structure diagram of composite control system

复合控制算法的计算步骤如下式所示:

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - c(k) \\ v(k) &= r(k) - r(k-1) \\ a(k) &= r(k) - 2r(k-1) + r(k-2) \\ y_v(k) &= K_v v(k) \\ y_a(k) &= K_a a(k) \\ y_e(k) &= K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \\ \Delta u(k) &= y_e(k) + y_v(k) + y_a(k) \\ u(k) &= \Delta u(k) + u(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; K_v 为速度前馈系数; K_a 为加速度前馈系数; $e(k)$ 为第 k 采样时刻位置偏差; $v(k)$ 为第 k 采样时刻速度; $a(k)$ 为第 k 采样时刻加速度; $\Delta u(k)$ 为第 k 采样时刻较上一时刻输出量偏差; $u(k)$ 为第 k 采样时刻输出量。

3 系统实验

整个控制系统采用STM32F103RCT6控制芯片^[10-12],通过IR2110S驱动MOSFET功率管构成电机驱动电路,进行动态跟踪系统试验。为了实时跟踪目标位置,采用旋转变压器对跟踪目标的位置信息进行采集,并将所采集到的角度与实际机械角度进行对比分析,并最终采用分段线性插值的方法进行误差校正。如图3~图5分别是利用P,PID,带有前馈控制的PID对正弦波和不规则曲线的跟踪效果图。

如图3所示为纯P调节对正弦信号的跟踪效果,从跟踪效果图可以看出使用纯P调节不仅相位滞后而且有超调产生,因此无法满足系统的指标要求。

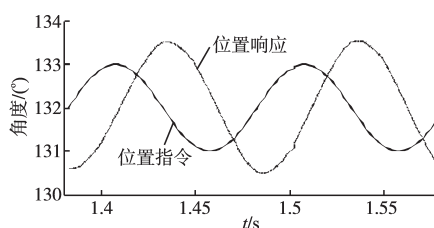


图3 纯P正弦跟踪曲线

Fig.3 Pure P sine tracking curves

如图4所示为常规的PID调节对正弦信号的跟踪效果,虽然幅值衰减不超过10%,可以满足指标要求,但是相位滞后严重,约为20 ms,因此无法满足系统的指标要求。

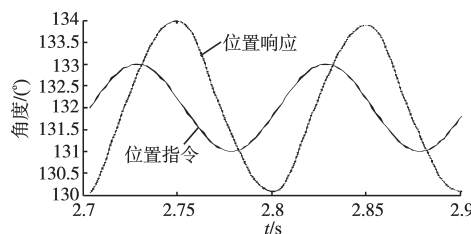


图4 常规PID正弦跟踪曲线

Fig.4 Conventional PID sine tracking curves

如图5所示为带有速度前馈和加速度前馈的PID调节对正弦信号的跟踪效果,从图5中可以看出幅值约0.92°,衰减不超过10%,相位滞后约为2.3 ms,都满足系统的指标要求。

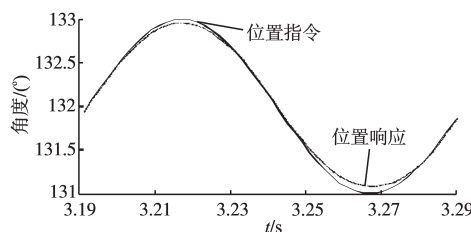


图5 带有前馈控制的PID正弦跟踪曲线

Fig.5 PID sine tracking curves with feedforward control

与纯P和常规PID调节相比,带有速度前馈加速度前馈的PID具有小延迟、小超调的跟踪输入指令和抗干扰能力强等特点,如表1所示。把该算法写进STM32F103RCT6控制芯片中,获得较为满意的控制效果,可以满足要求。

表1 3种算法的数据比较

Tab.1 Data comparison between three methods

算法	相位滞后/ ms	幅值超调/ %	相对1°幅度/ (°)	滞后角/ (°)
纯P	45	50	1.5	162
常规PID	20	98	2	72
速度前馈加速度 前馈PID	2.3	0	0.92	8.28

在实际伺服运动过程中,目标的位置往往是随机的。为了验证系统的动态跟踪性能,随机产生1组目标曲线,分别使用常规的PID调节算法和带有速度前馈和加速度前馈的PID调节算法对相同的曲线进行跟踪测试和对系统的动态跟踪进行测试。

图6和图7分别为常规的PID算法和加入速度前馈和加速度前馈的PID算法对曲线跟踪结果。

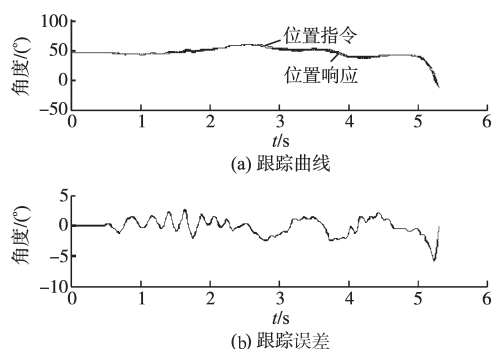


图6 常规PID算法的跟踪效果图

Fig.6 Tracking effect of conventional PID algorithm

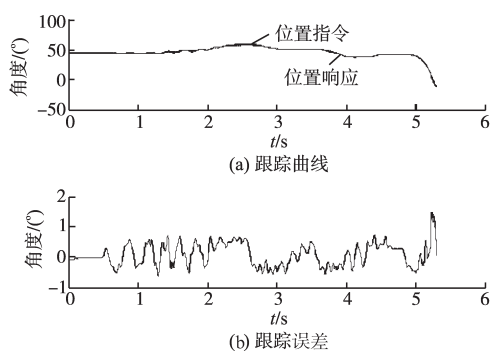


图7 加入前馈的PID算法的跟踪效果图

Fig.7 The tracking effect of the PID algorithm is added to the feedforward

4 结论

本文通过对常规PID算法以及伺服跟踪系统的经典3环结构进行描述,提出了一种简单的速度前馈加速度前馈PID调节算法及位置反馈的单环结构的复合控制策略。试验结果表明,与常规的PID算法相比,该算法有效解决了伺服系统准确性和快速性的矛盾,改善系统的动态响应特性,满足了动态跟踪的性能要求。

参考文献

- [1] 樊生文,刘海山. 基于TMS320F2808的永磁同步电动机伺服系统设计[J]. 电气传动, 2011, 41(2): 44-47.
- [2] 樊宏,陈富,冯浩,等. 伺服环路控制在某雷达中设计与仿真[J]. 微电机, 2012, 45(5): 68-72.
- [3] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 桂花,窦日轩. 运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [5] 佟彤,黄丰保. 基于改进PID-速度前馈的位置伺服系统设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(12): 94-96.
- [6] 王宇林,李琳,彭志明,等. 前馈-改进型PID复合控制策略的研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(11): 50-53.
- [7] 田大鹏,吴云洁,刘晓东,等. 高精度电机伺服系统控制综合方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(7): 66-74.
- [8] 刘强. 高性能机械伺服系统运动控制技术综述[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 603-609.
- [9] 胡勇. 姿态随动稳定跟踪平台的控制算法与仿真[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(2): 65-67.
- [10] 孔康. 基于STM32的永磁同步电机的控制[D]. 苏州:苏州大学, 2013.
- [11] 于兆凯. 基于STM32的永磁同步电机伺服系统的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [12] 谭建成. 电机控制专用集成电路[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

收稿日期: 2015-07-09

修改稿日期: 2016-02-23

欢迎订阅《电气传动》(月刊)

《电气传动》创刊于1959年,由天津电气传动设计研究所和中国自动化学会共同主办,是我国自动化类和电工技术类具有权威性的核心刊物。本刊以促进科技交流,沟通行业、产品信息,培养人才为宗旨。主要栏目包括:综述和专论、交、直流调速、计算机应用、微机及PLC应用、自动控制理论、自动控制系统、控制技术、设计计算、工业应用等。内容涵盖电气传动自动化最新研究成果、发展动态及新技术、新产品、新器件。是科研院所、工矿企业广大科技人员和高等院校师生发表学术见解、应用经验及学术争鸣的园地,也是了解新产品、新器件、新技术的窗口。

邮发代号:6-85 邮局全年订价:120元 零售价:10.00元