

含位置给定轨迹优化的位置伺服复合控制系统研究

李之珂, 杨 影, 张杰鸣

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 位置动态响应速度快和响应无超调是目前高性能位置伺服系统的两个重要指标。单纯的比例或比例微分位置调节器无法同时满足这两个要求, 所以提出了一种新型定位复合控制策略。首先为保证运动过程柔滑无冲击而设定速度余弦函数曲线给定, 从而根据平滑变化的速度给定对位置给定信号进行轨迹优化, 避免了加速度突变带来的冲击。系统控制结构上提出在前馈控制的基础上引入位置伪微分负反馈控制环节, 该环节增加了系统阻尼, 减少位置超调量, 同时结合前馈控制保证了位置快速跟踪性能。由于采用了伪微分结构代替位置微分运算, 避免了微分带来的量化噪声干扰, 进一步提升了系统跟踪性能。最后给出了结构参数的取值范围。仿真和试验结果验证了该控制策略的可行性和有效性。

关键词: 位置伺服; 轨迹优化; 伪微分负反馈控制; 阻尼; 参数

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0022-05

Research on Servo Compound Control System with Position Command Trajectory Optimization

LI Zhike, YANG Ying, ZHANG Jieming

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Position dynamic fast response speed and without overshoot were two important indicators of the current high-performance position servo system, but proportional or proportional differential regulator could not meet both requirements at the same time, therefore a new positioning compound control strategy was proposed. First set the speed command with cosine function curve to ensure smooth movement without impact, then optimize the command position trajectory according to the speed command for avoid the impact of acceleration mutation. In the system control structure, the position pseudo derivative feedback control was proposed on the basis of feedforward control, this structure increases the system damping for reduces the position overshoot, and combined with feedforward control to ensure fast tracking performance simultaneously. the noise generated by derivative was avoid because of position differential operation was instead of pseudo derivative structure, and the range of the structural parameters was given. The results of simulation and experimental verified the feasibility and effectiveness of the control strategy.

Key words: position servo; trajectory optimization; pseudo derivative feedback; damping; parameters

0 引 言

随着现代工业生产的迅猛发展, 高性能的位置伺服系统广泛应用于运动控制中, 实现高性能定位控制必须满足: (1) 运动过程平稳无冲击; (2) 位置动态响应速度快; (3) 位置响应无超调;

(4) 位置无误差跟踪。

传统的位置伺服控制系统采用单纯的位置环比例控制器不足以满足以上要求, 通过提高位置闭环增益来减小位置跟随误差的调节效果有限, 不可避免地存在响应速度慢、超调量大的问题^[1-2], 并且当给定指令信号变化率突变时会对

作者简介: 李之珂(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高性能伺服电机控制。

杨 影(1979—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为高性能伺服电机控制。

张杰鸣(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高性能伺服电机控制。

系统产生冲击,造成较大的动态位置跟踪误差。所以,高性能位置伺服系统需要在位置给定形式和控制结构上进一步改进。

针对这一问题,很多学者对提升位置伺服控制性能做了深入研究。在位置给定形式方面,目前应用最广的是根据速度梯形给定设计位置给定信号^[3],通过计算加减速段和恒速段的时间对运动过程进行轨迹规划,但在加减速段的起点和结束点存在加速度突变的现象,会在定位末端造成机械振荡,增大跟踪误差。

在系统控制结构上,位置伺服系统采用较多的是位置比例调节器和前馈控制的复合控制结构^[4-6]。文献[7]提出了速度和转矩双前馈控制方法。该方法能减小位置跟踪误差,进一步提升位置跟踪性能,但前馈控制无法在保证位置动态响应速度快的同时减少超调量。因此有学者提出微分反馈控制^[8-9],虽然该方法对系统超调量起到明显抑制作用,但在位置动态响应性能方面不及前馈控制。文献[10]提出前馈控制与位置微分反馈复合控制结构,其定位控制效果良好,但纯微分环节会引入位置量化噪声的干扰,影响动态跟踪控制性能。其他如模糊算法、神经网络、变结构控制及自抗扰控制等现代控制方法^[11-14],算法均比较复杂,定位精度无法保证,难以投入工业应用。

本文首先对位置给定进行轨迹规划,利用速度余弦函数曲线给定优化位置和指令轨迹,避免了传统速度梯形给定中存在加速度突变引起冲击的情况,做到运动过程柔滑无振动。在系统结构上,采用前馈和伪微分负反馈复合控制结构,用伪微分结构代替微分运算。通过位置伪微分结构预测电机位置的变化趋势,对位置调节器给定进行补偿,其实质是增大系统阻尼,减小系统超调,在保证位置快速响应的同时做到位置响应无超调。最后本文对前馈系数进行修正,给出了伪微分反馈系数的取值范围,并通过仿真和试验验证了理论分析的正确性。

1 位置给定轨迹优化

位置伺服系统的响应性能不仅与系统的控制结构有关,还取决于系统的给定指令形式。位置给定中包含了速度给定和加速度给定,其变化趋势也决定着速度变化趋势,对位置给定变化轨迹

进行优化能对速度变化趋势起到指导作用,从而得到所期望的速度平滑变化曲线。本文设定期望的速度给定曲线为余弦函数曲线。位置及速度给定优化轨迹曲线如图1所示,其速度给定 v^* 随时间变化曲线表达式如式(1)所示:

$$v^* = A - A \cos \omega t \quad (1)$$

同时对式(1)左右两边进行积分可得位置给定 θ^* 随时间变化的关系:

$$\theta^* = At + \frac{A}{\omega} \sin \omega t \quad (2)$$

式(2)是根据期望的速度给定得出的位置给定信号优化轨迹,优化后的位置给定随时间变化曲线如图1中虚线所示,图1中 θ_m 为目标位置, T 为需满足快速性的时间指标。可依据实际应用中要求的目标位置和时间指标推导出位置给定曲线中的参数表达式:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

$$A = \frac{2\theta_m}{T} \quad (4)$$

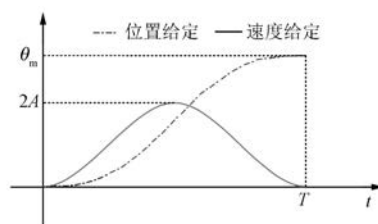


图1 位置及速度给定优化轨迹曲线

从图1中可以看出位置给定曲线的变化率平滑无突变,即速度给定曲线连续平缓变化。该规划曲线相比于速度梯形给定避免了斜率突变带来的冲击,满足了高性能位置伺服系统中平稳性的要求,运动过程更加柔滑,且其位置给定曲线参数依据实际运动指标设计,简单明确,不再需要计算加减速段的时间。

2 伪微分负反馈与前馈控制的复合控制

图2所示为位置伺服复合控制系统结构框图。图2中位置环采用比例调节器,由于位置环截止频率远小于速度环的截止频率,所以把速度环闭环传递函数等效为一阶惯性环节,永磁同步

电机等效为积分环节。其中位置给定 θ^* 随时间变化的关系 $f(t)$ 如式(2)所示。为了更好地实现速度余弦函数给定,采用位置前馈控制,图2虚线框中的 $F(s)$ 为前馈控制函数。位置前馈控制是位置伺服中常见的一种提升位置跟踪性能的控制结构,能够有效预测优化后的位置给定轨迹变化趋势并依此对速度给定进行前馈补偿,实现位置无误差动态跟踪。

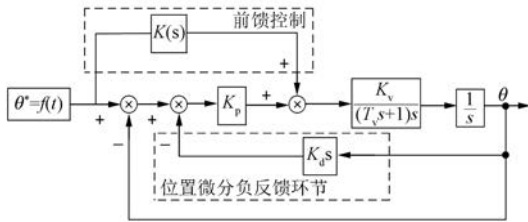


图2 位置伺服复合控制系统结构框图

但前馈控制只能加快位置动态响应速度,而无法抑制位置超调量,不能满足高性能位置伺服的要求。因此图2在前馈控制的基础上引入位置微分负反馈环节, K_d 为反馈系数,位置微分负反馈的作用是预测电机实际位置的变化趋势,对位置调节器给定进行补偿,增加系统阻尼,实现位置伺服系统的响应无超调。

由于实际应用中纯微分环节难以实现,所以提出用伪微分结构代替微分运算。伪微分等效结构框图如图3所示,其中 $R(s)$ 和 $C(s)$ 分别代表位置微分负反馈环节的输入和输出,图3中结构(a)在微分环节后增加了一阶低通滤波器,目的是降低位置微分运算后产生的量化噪声对系统的影响。由结构(a)等效变形为结构(b),结构(b)中没有对位置直接进行微分运算,但却从功能上实现了对电机位置的微分,故称作伪微分,伪微分结构避免了微分运算产生的量化噪声干扰。

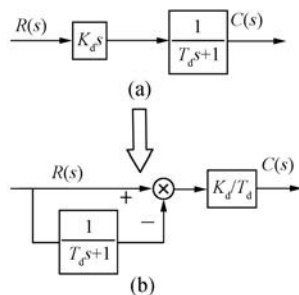


图3 伪微分等效框图

用图3所得的伪微分结构代替图2中微分环节后推导得出闭环系统传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{\theta}{\theta^*} = \frac{K_v(T_d s + 1)F(s) + K_v K_p(T_d s + 1)}{\left\{ T_d T_v s^3 + (T_d + T_v)s^2 + \left[(1 + K_v K_p T_d + K_v K_p K_d T_d)s + K_v K_p \right] \right\}} \quad (5)$$

由于 $G(s)$ 的特征多项式中系数 $T_d T_v$ 较小,故忽略其三阶微分项,把 $G(s)$ 当二阶系统分析,即

$$G(s) = \frac{K_v(T_d s + 1)F(s) + K_v K_p(T_d s + 1)}{(T_d + T_v)s^2 + (1 + K_v K_p T_d + K_v K_p K_d T_d)s + K_v K_p} \quad (6)$$

二阶系统中超调量与阻尼比 ζ 成反比,增大阻尼比即增大系统阻尼,从而减少超调量。分析式(6)的特征多项式可得其阻尼比 ζ 为

$$\xi = [1 + K_v K_p T_d (1 + K_d)] \sqrt{\frac{1}{4K_v K_p (T_d + T_v)}} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,对比只有前馈环节的传统位置伺服系统,伪微分负反馈控制方法可以调整反馈系数增大系统阻尼,在不改变 PI 调节器参数的情况下实现位置响应无超调。

在满足实际位置伺服系统超调量小的同时应保证阻尼不能过大而影响位置响应速度,所以阻尼比 ζ 应设计为 $0.9 > \zeta > 0.707$,代入式(7)中可化简得反馈系数 K_d 取值范围:

$$\frac{0.707p - 1}{K_v K_p T_d} - 1 < K_d < \frac{0.9p - 1}{K_v K_p T_d} - 1 \quad (8)$$

其中, $p = \sqrt{4K_v K_p (T_d + T_v)}$, 时间滤波常数 T_d 可依据对噪声的频谱特性选择合适的取值。

此时结合伪微分负反馈对前馈控制函数 $F(s)$ 进行分析推导。当闭环传递函数 $G(s) = 1$ 时即可实现位置无误差跟踪,则由式(6)可得 $F(s)$ 表达式为

$$F(s) = \frac{1}{T_d s + 1} \left(\frac{T_d + T_v}{K_v} s^2 + \frac{1 + K_v K_p T_d K_d}{K_v} s \right) \quad (9)$$

位置一阶微分是速度,二阶微分是加速度,所以由式(9)可以看出前馈控制环节是由速度前馈和加速度前馈两部分组成。实际系统中速度环惯

性时间常数 T_v 和滤波时间常数 T_d 都很小,所以加速度前馈部分的作用可以忽略,式(9)则可简化为速度前馈:

$$F(s) = \frac{1}{T_d s + 1} \frac{1 + K_v K_p T_d K_d}{K_v} s \quad (10)$$

从式(10)可以看出, $F(s)$ 在传统前馈控制的基础上增加了一个系数和一阶低通滤波环节,因此在引入伪微分负反馈控制后要对前馈系数进行修正,并且由于存在一阶低通滤波环节,也可以用伪微分形式代替其位置给定微分运算,进一步提升位置跟踪性能,修正后的系统整体框图如图4所示。图4中 $K_e = \frac{1 + K_v K_p T_d K_d}{K_v T_d}$ 。

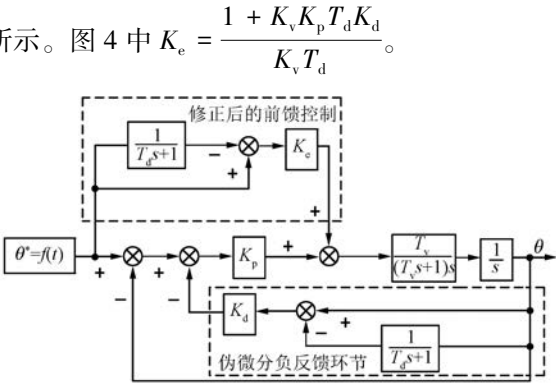


图4 前馈和伪微分负反馈复合控制位置伺服控制系统

3 仿真和试验验证

为了验证本文提出的位置伺服控制策略的效果,搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型,分别对纯比例调节器、前馈控制及前馈和伪微分负反馈复合控制位置伺服系统进行仿真对比定位控制性能。仿真所用电机参数为试验中所用的永磁同步电机参数,如表1所示。

表1 永磁同步电机参数

参数名称	参数值
额定功率/W	60
额定电压/V	48
额定转矩/(N·m)	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	150
极对数	4
定子绕组电阻/Ω	14
定子绕组电感/H	0.034
转动惯量/(kg·m ²)	0.005

仿真中时间指标为 0.6 s,目标位置为电机转过 90°,位置给定曲线按照式(2)进行设计规划,其中所使用的微分反馈系数和前馈系数分别根据式(6)和式(8)计算所得。图5(a)、图5(b)和图5(c)所示的分别为位置环纯比例调节器、前馈控制及前馈和伪微分负反馈复合控制下的位置跟踪波形。对比图5中的仿真结果可以看出:纯比例调节器无法快速跟踪位置给定且存在较大超调;前馈控制能保证快速跟踪性能,但却还是无法抑制超调;而前馈和伪微分负反馈复合控制能在达到快速无误差跟踪的同时实现了响应无超调。

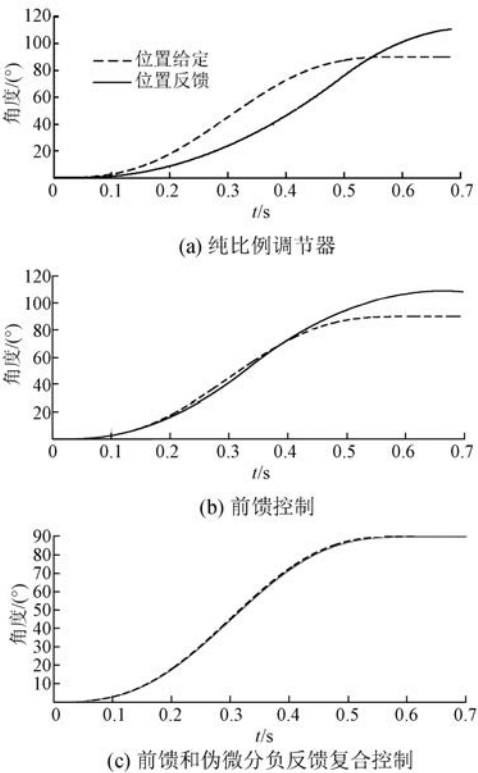


图5 不同位置伺服控制结构位置跟踪性能仿真对比

试验研究中位置信号采用编码器的脉冲数表示,试验所用的 2500 线编码器经过 4 倍频和传动齿轮可知电机一圈为 20 000 个脉冲,试验中设计的运动过程为电机在 0.6 s 内转过 90°,即 5 000 个脉冲。

图6所示为比例调节器与前馈控制结构下的位置伺服定位系统位置跟踪性能。从图6中可以看出该结构跟踪性能良好,但在定位末端会产生超调,引起系统小幅振荡。

图7所示为采用前馈和伪微分负反馈复合控

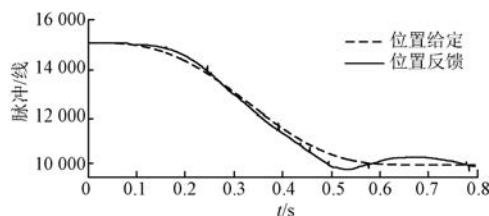


图6 采用比例调节器与前馈控制结构的位置跟踪试验波形

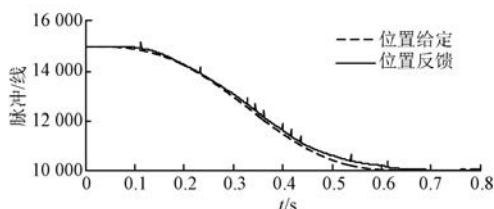


图7 前馈和伪微分负反馈复合控制位置跟踪试验波形

制的位置伺服系统位置跟踪性能,可以看出位置反馈信号很好地跟踪位置给定,无明显的动态跟踪误差,且无位置超调情况,与仿真结果一致。

4 结 语

本文针对位置伺服控制系统中存在的动态响应速度慢、超调量大的问题提出了一种新型复合控制策略。首先提出利用速度余弦函数曲线给定优化位置和信号轨迹,对实际速度变化起到指导作用,使运动过程平滑无冲击;同时系统控制结构上引入前馈和伪微分负反馈复合控制,并都采用了伪微分结构避免微分环节。该复合控制同时保证了位置响应的快速性和无超调,并给出了复合控制中系数选取的依据,给实际应用提供理论指导。最后通过仿真和试验结果验证了该控制策略的可行性和有效性。

【参考文献】

[1] 万宏,李洪文,张超,等.参数在线可调的直流伺服控制系统设计[J].电机与控制应用,2014,41(2): 14-18.

[2] 韩明文,刘军.基于积分分离的永磁同步直线电机PID控制系统[J].电机与控制应用,2013,40(1): 22-24.

[3] 邓昌奇,廖辉.基于前馈控制的交流伺服系统精确定位的研究[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3): 405-408.

[4] 王宏,于泳,徐殿国.永磁同步电动机位置伺服系统[J].中国电机工程学报,2004,24(7): 151-155.

[5] 程国扬,金文光.硬盘磁头快速精确定位伺服控制系统的设计[J].中国电机工程学报,2006,26(12): 139-143.

[6] 胡庆波,吕征宇.全数字伺服系统中位置前馈控制器的设计[J].电气传动,2005,35(5): 24-27.

[7] 滕福林,李宏胜,葛红宇,等.伺服系统中一种新型前馈控制结构的研究[J].电气传动,2012,42(2): 61-64.

[8] 陈荣,邓智泉,严仰光.微分反馈控制在永磁伺服系统中的应用研究[J].电工技术学报,2005,20(9): 92-97.

[9] SANT A V, RAJAGOPAI K R. PM synchronous motor speed control using hybrid fuzzy-PI with novel switching functions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4672-4675.

[10] 黄科元,周滔滔,黄守道,等.含前馈补偿和微分反馈的数控位置伺服系统[J].中国机械工程,2014,25(15): 2017-2023.

[11] 张益顺,杨海,罗正球.基于遗传算法的数控机床进给伺服系统模糊PID位置控制研究[J].工业仪表与自动化装置,2009(6): 53-56.

[12] 邵明玲,于海生.基于模糊RBF神经网络的永磁同步电机位置控制[J].青岛大学学报(工程技术版),2014,29(4): 27-32.

[13] 黄明辉,熊欢欢,赵啸林,等.模糊PID在液压机位置控制系统中的应用[J].控制工程,2011,18(1): 14-17.

[14] 滕福林,胡育文,李宏胜,等.基于自抗扰控制器的交流位置伺服系统[J].电气传动,2011,41(11): 46-50.

收稿日期: 2017-08-07

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态