

基于DSP的高可靠舵机控制器设计

郭扬光,赵怀林,祝波

(上海应用技术大学 电气与电子工程学院,上海 201418)

摘要:电动舵机作为飞行控制系统的安全关键部件,对舵机控制器的精度和动态性能等方面有很高的要求。针对上述要求,设计并实现了一种采用数字信号处理器(DSP)为控制核心的控制电路、驱动电路及旋转电涡流传感器等检测电路共同组成的硬件设计方案,控制策略采用电流-速度-位置三闭环控制结构,其中位置环采用了位置反馈+前馈补偿的复合控制算法。实验测试表明,系统无超调量和静态误差,表明系统具有很好的稳态和动态性能,控制精度高。

关键词:控制器;电动舵机;前馈控制;伺服系统

中图分类号:TM383.4

文献标识码:A

DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed19642

Design of High Reliable Steering Gear Controller Based on DSP

GUO Yangguang, ZHAO Huailin, ZHU Bo

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: As the key part of the flight control system, electric steering gear has high requirements on the precision and dynamic performance of the steering gear controller. According to the above requirements, a control scheme was designed, it included control circuit, drive circuit and rotating eddy current sensor detection circuit, which was based on DSP, the control strategy adopted the current position-speed-three closed loop control structure, the position loop adopted the compound control of position feedback plus feedforward compensation algorithm. The experimental results show that the system has no overshoot and static error, and the control precision is high.

Key words: controller; electric steering gear; feedforward control; servo system

舵机作为伺服系统的关键组成部分,在火箭、飞机、导弹等飞行器领域得到了广泛应用,随着电力电子技术的发展,这些飞行器需要控制系统具有高可靠、高灵敏度、高精度等性能。三闭环反馈PID控制技术^[1]作为连续控制系统理论中最成熟、应用最广泛的技术,常被用于调控无刷直流电机(bushless direct current motor, BLD-CM)。在反馈系统中,反馈作用依据偏差量进行调控,当偏差产生时,控制器根据偏差进行反馈调节,从而消除干扰。当干扰持续存在时,系统将总是不可避免地存在稳态跟踪误差,从而影响控制器的性能。在分析无刷直流电机的数学模型时,现有的研究结合了各种智能控制算法,得

到了较好的PID控制器^[2]。文献[3]基于三闭环控制策略在位置环引入了反馈实现微分控制,系统性能稳定,控制精度高,有良好的动态性能。文献[4]采用转速和位置双闭环控制策略,并在位置环加入了模糊自适应PID控制算法,进行了仿真实验。仿真结果表明,加入模糊PID控制算法后,系统的稳定性更高、响应速度更快。文献[5]采用变参数的PID控制策略,设计了基于DSP2812的数字位置单闭环舵机控制系统,具有较好的鲁棒性。但目前这些算法大都停留在仿真研究阶段,实用价值有待提高。

本文在现有研究的基础之上采用了位置反馈+前馈补偿的控制算法,设计了一种基于DSP+

基金项目:国家自然科学基金(61701276)

作者简介:郭扬光(1992—),男,硕士研究生,Email:2350833057@qq.com

CPLD的全数字电流-速度-位置三环控制和前馈控制相结合的控制。与传统控制器相比,既吸收了经典PID控制算法的响应速度快、静差小等优点,又弥补了其不能及时消除干扰的缺点。整个控制系统操作简单,算法结构简洁,能够有效地消除方波信号的稳态误差和正弦信号的相位滞后,提高了系统的控制精度,工作稳定可靠,有较高的工程使用价值。

1 控制器结构及硬件设计

舵机控制器硬件结构主要包括主控模块、驱动模块、反馈检测模块及通信模块等,图1为舵机控制器硬件结构图。上位机给定的控制指令经由通信模块传给控制模块,控制模块进行数据处理,将栅极驱动信号传输给驱动模块进而驱动电机运转,反馈模块实时采集电机的状态信息传输到控制模块进行闭环控制^[6]。

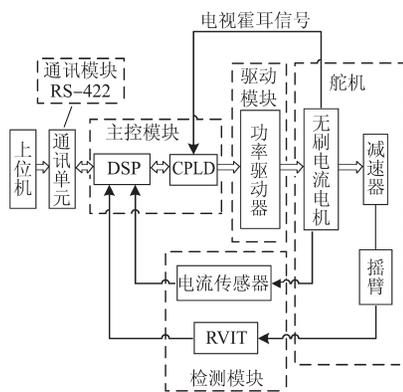


图1 系统硬件结构图

Fig.1 Hardware system block diagram

1.1 控制模块

系统的控制模块由DSP和CPLD组成,系统选用TMS320F28377型DSP,具有精度高、速度快、集成度高、功耗低等特点,具有强大的信号处理能力。其中运算速度能够达到200 MHz,完全能满足控制器处理速度的要求;内部集成12路增强型脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM),模块能够满足对电机的驱动;同时支持串行通信接口(serial communication interface, SCI)、串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)及增强型控制器局域网通讯接口(enhance controller area network, eCAN)通信^[7],方便与其它设备进行通信。

CPLD选用Lattice公司生产的LC4128V芯片,具有128宏单元,可满足系统的需要。其中CPLD的主要功能是对电机控制信号和电机霍尔

信号进行逻辑处理产生控制功率管的开关相序,经过隔离电路输入驱动电路,从而实现电机的PWM控制^[8]。

1.2 驱动模块

考虑到控制器的空间及可靠性,采用了TI公司的DRV8313全桥驱动芯片,最大工作电流为2.5 A,母线供电电压范围为8~60 V,开关频率上限为250 kHz,其内部集成3个可独立控制的半桥和1个通用比较器,可通过设计外围电路设置欠压保护和电流保护,能够提高系统的可靠性。

1.3 反馈模块

反馈模块主要包括位置、转速和电流检测。其中位置检测采用旋转电涡流式传感器(rotary variable inductance transducer, RVIT)实现,转速检测则由电机内部集成的霍尔传感器实现,电流检测通过电流传感器芯片实现。

在位置检测常用的位置传感器中,RVIT^[9]相比于其它类型的传感器,具有成本低、精度高、抗干扰能力强、可靠性高等优势,可工作在恶劣的环境中。鉴于本系统的应用环境,选用RVIT作为系统的位置检测装置。RVIT能够把角位移量变换为阻抗变化,由此对角位移进行测量。系统选用的RVIT的关键参数为:独立线性公差为 $\pm 0.5\% \cdot FS (FS=100^\circ)$,有效电角度为 $\pm 50^\circ$,有效输出范围为 $(10\% \sim 90\%) U_{in} \cdot FS$ 。

电动舵机的舵面与RVIT相连,精确测出舵面的角位移,输出端可获得随舵面位置变化而变化的模拟电压信号,通过定量关系转换为舵面输出角度。

电机转速检测通过检测霍尔脉冲信号获得,由于电机转子旋转1圈输出的霍尔脉冲个数是固定的,这样通过DSP内部的ECAP捕获单元可以得到转子转过1圈所需的时间,从而能估算电机的转速,实现转速闭环。

电流检测选取Allegro公司的ACS709芯片,以实现电流检测和电流闭环控制。该芯片基于霍尔原理检测流经的电流。工作电压为3.3 V。ACS709能够输出0.33~2.97 V的电压信号,不需在经过运放电路进行调压处理,经过滤波后可直接送到DSP的AD采样引脚,然后由DSP进行电流解算和闭环控制。ACS709输入电流与输出电压的对应关系用下式表示:

$$U_{OUT} = SENS \times I_p \quad (1)$$

式中: U_{OUT} 为输出电压; I_p 为输出电流; $SENS$ 为灵

敏度。

此外,电流传感器还集成了限流保护功能,当电流超过设定的电流阈值,ACS709输出一个保护信号,此信号可送到CPLD,通过相应的逻辑保护关断PWM驱动信号输出,从而实现对驱动芯片的保护。由于ACS709集成的限流保护的功能,所以不需要再设计专门的电流保护电路,集成度更高,可靠性更强。电流保护阈值计算公式为

$$U_{oc} = SENS \times |I_{oc}| \quad (2)$$

式中: I_{oc} 为双向电流保护阈值(交流电流),即对称过流故障点 $+I_{oc}$ 和 $-I_{oc}$ 。

2 模型搭建与控制策略设计

2.1 BLDCM模型

基于BLDCM创建被控对象的电机模型如图2所示。

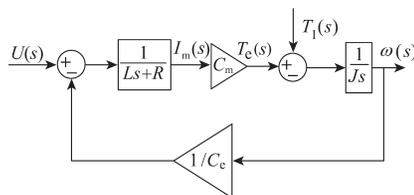


图2 BLDCM电机模型

Fig.2 BLDCM model

图2中,系统的输入量 $U(s)$ 为电机电枢电压, L 为电枢回路电感, R 为电枢回路电阻,在 $U(s)$ 的作用下产生电枢电流 $I_m(s)$, $I_m(s)$ 产生转动力矩 $T_c(s)$,其中 C_m 为转矩常数, T 为负载力矩, J 为转动惯量,系统输出电机转速为 $\omega(s)$,同时产生反电势, C_e 为反电势常数。转动惯量 J 计算公式为

$$J = J_m + \frac{J_1}{n^2} \quad (3)$$

式中: J_m 为自身转动惯量; J_1 为负载转动惯量; n 为减速比。

2.2 控制策略设计

控制模块采用三闭环结构^[10],即电流环、转速环、位置环,再加入前馈补偿转速,提高系统的控制精度。根据多闭环控制系统的设计规则,以电流环、转速环、位置环、前馈补偿的顺序设计控制器。控制器结构如图3所示。

首先,设计电流环,对差值电流 i_c 采用P控制, K_c 为比例系数,经过电流控制器ACR输出电机控制电压 u_r ,使电机输出电流 i_y ;设计转速环时将电流环作为内环。电机运转时不断校正转速得到转速环输出。对差值转速 ω_c 采用P控制,比

例系数为 K_s 。同理将转速环作为内环设计位置环。转速环的输出 ω_y 经过减速器,再经过积分器得到位置角度(单位为rad),乘以系数 $180/\pi$ 得到系统的转动位置角 θ_y 。位置环作为系统最重要的一环,对系统的稳态特性尤为重要, θ_g 为初始位置给定,对差值转动位置角 θ_c 采用PI控制,整定合适的比例积分常数,得到转速环的参考输入 ω_r 。最后,考虑系统的干扰信号设计前馈控制器对转速进行补偿,在前馈控制器的向前通路设计微分器和比例环节,比例系数为 K_f , θ_g 经过前馈补偿器得到补偿输出转速 ω_{r0} 。

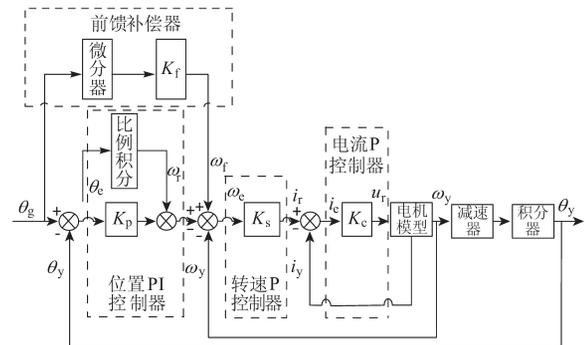


图3 控制器结构图

Fig.3 Structure diagram of controller

3 控制系统软件设计

基于舵机控制器的硬件系统,设计实现了高效、可靠的位置随动控制软件,如图4所示。软件系统主要包括通信模块、控制模块和检测模块。

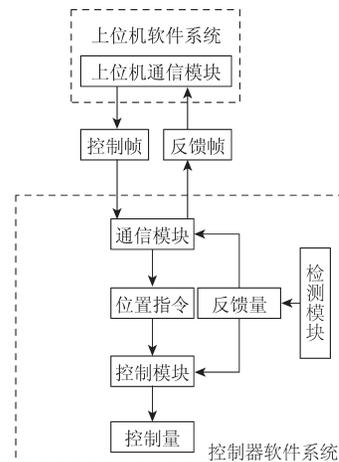


图4 系统软件框图

Fig.4 System software block diagram

通信模块的作用是接收和解析上位机发送的给定位置信息,同时将检测单元检测到的反馈信息发送给上位机软件。检测模块将检测到的物理量转换成控制单元能够识别的反馈量;上位机给定的位置指令和检测模块检测的反馈量的

差值作为输入,经由通信模块送到控制模块,再根据系统设计的控制策略解算BLDCM^[11]实际运转状况的参数和设定参数的差值,经过连续的校正得到软件控制系统的输出,进而达到对BLDCM的伺服控制。

4 试验测试和验证

为了验证本文设计的控制器及控制策略的性能,搭建了基于DSP+CPLD的电动舵机调试系统,实验平台包括上位机、驱动控制器、通讯转换器、电源及舵机5个部分。上位机与舵机控制器通过驱动控制器上预留的SCI串行通讯接口发送控制指令,进而测试系统的静态性能和动态性能,验证系统方案的可行性。

由上位机软件发送控制指令,根据试验结果进行分析。根据系统对动态性能的要求,位置转动范围为 $\pm 20^\circ$,最大偏转角的响应时间不超过600 ms。分别采用经典PID控制器和加入前馈的PID控制器对控制系统进行测试。图5为经典PID控制器的方波信号($\pm 20^\circ$)响应;前馈PID控制器的方波信号响应如图6所示。

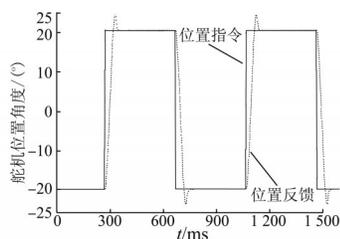


图5 经典PID控制器方波响应

Fig.5 Classical PID controller square wave response

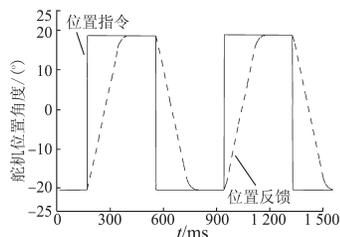


图6 前馈PID控制器方波响应

Fig.6 Feedforward PID controller square wave response

经典PID控制器与前馈PID控制器2种控制器关键性能对比如表1所示。

表1 2种控制器对于方波信号控制效果对比

Tab.1 Comparison of control effects of the two controllers for square wave signals

性能	上升时间/s	最大超调量/%	稳态误差/ $l(^{\circ})$	稳态输出值/ $l(^{\circ})$
传统PID	0.25	10	0.5	± 19.9
前馈PID	0.52	0	0	± 20

从表1中可以看出,前馈PID控制除了在上升时间比传统PID控制性能稍差,其余性能均优于经典PID控制。

基于系统对动态性能的需求,在空载情况下扫频带宽要达到10 Hz。由上位机给定幅值为 5° 频率为10 Hz的正弦信号。经典PID的控制系统的响应如图7所示;前馈PID控制系统的正弦信号响应如图8所示。

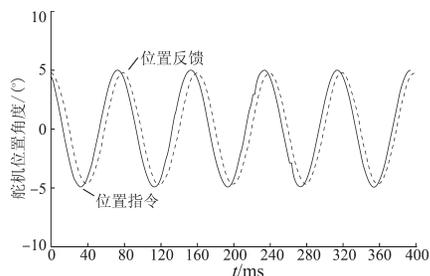


图7 经典PID控制器正弦波响应曲线

Fig.7 Classical PID controller sine wave response curves

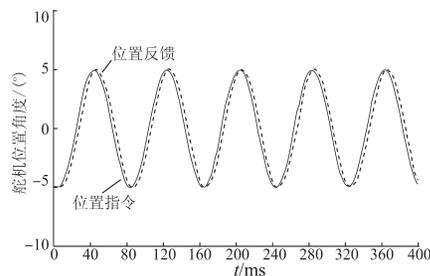


图8 前馈PID控制器正弦波响应曲线

Fig.8 Sine wave response curves of feed-forward PID controller

经典PID控制器与前馈PID控制器2种控制器对于正弦指令信号响应的关键性能对比如表2所示。

表2 2种控制器对于正弦波信号控制效果对比

Tab.3 Comparison of control effects of the two controllers for sine wave signals

性能	相移/ $l(^{\circ})$	稳态误差/%	稳态输出值/ $l(^{\circ})$
传统PID	45	40	4.5
前馈PID	10	0	5

从表2可知,前馈PID控制系统跟踪曲线与输入曲线近似重合,干扰信号的影响很小,并且正弦跟踪响应幅值基本没有衰减,相位滞后角度很小,表明前馈PID控制系统具有很高的动态性能。

5 结论

基于无刷直流电机控制系统,提出了将前馈控制算法和传统PID控制算法相结合的控制策略,并设计控制器。同时设计以DSP+CPLD为控

制核心的舵机控制器硬件系统,并在此基础上设计软件系统来实现伺服控制。搭载实验平台进行位置随动实验测试,测试了系统的动、静态性能。从实际运行效果来看,该系统能够很好地实现对BLDCM的位置高精度控制,实验结果说明,前馈控制与三闭环反馈PID控制相结合的控制策略具备响应速度快、工作稳定、控制精度高的特点。但前馈控制的前馈系数是由系统的增益决定的,对系统模型的精度有较高的要求,文中的电机模型精度还有待提高,这也是作者需要进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 李红燕,和阳,朱纪洪,等.机电一体化灵巧舵机控制器设计[J].微特电机,2016,44(12):72-76.
- [2] 夏玉龙,赵怀林,和阳.基于虚拟仪器的电机测试系统设计[J].自动化与仪表,2015,30(4):59-63.
- [3] 伍城,赵怀林,朱纪洪.一种小型数字电动舵机系统设计与实现[J].自动化与仪表,2015,30(10):10-14.
- [4] 崇阳,李言俊,张科,等.基于DSP的模糊PID舵机控制算法设计与实现[J].飞行力学,2011,29(2):86-88.
- [5] 刘健飞,高智刚,李朋,等.一种微型多路电动舵机控制驱动器设计[J].微特电机,2013,41(12):53-56.
- [6] 张爱军,程时兵,朱军伟,等.基于DSP+CPLD的无刷直流电机三环控制设计[J].电力电子技术,2012,46(11):106-108.
- [7] 强明辉,张彦龙,马永炜,等.基于CAN总线多轴伺服控制系统的应用[J].电气传动,2016,46(2):60-64.
- [8] 周俊鹏,李焱.模糊自整定PID控制器在光电伺服设备中的应用[J].电气传动,2015,45(9):62-65.
- [9] He Yang, Zhu Jihong, Yuan Xiaming, *et al.* Research on High Reliable Dual-redundancy Electro-mechanical Actuator Controller[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014:2848-2853.
- [10] Nian X, Peng F, Zhang H. Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5798-5808.
- [11] 董燕飞,何国锋.基于相位检测的BLDCM滑模控制系统[J].电气传动,2017,47(3):12-16.

收稿日期:2018-10-24

修改稿日期:2019-01-19