

基于 MSP430 的无刷直流电动机控制系统研究

曹菁^{1,2} 朱纪洪¹

(1. 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室 100084 2. 江苏信息职业技术学院 214106)

摘要 针对小功率电动舵机, 介绍了一种利用 MSP430 实现的稀土永磁无刷直流电动机控制系统, 简述了以 MSP430F149 为核心的控制系统的组成原理、硬件设计方案和控制策略等, 并给出了以无刷直流电动机为驱动部件的电动舵机三闭环控制系统调节方式。仿真及实验结果表明该系统具有很好的控制性能和动态特性。

关键词 无刷直流电动机 数字控制器 电动舵机

1 引言

稀土永磁无刷直流电动机 (BLDCM) 作为一种新型电动机, 具有结构简单、运行效率高、调速性能好、可靠性高等优点, 同时由于不受机械换向的限制, 易于做到大容量、高转速。近年来, 随着大功率开关器件、集成电路及高性能的磁性材料的快速发展, 无刷直流电动机 (BLDCM) 在航空航天、机器人、数控机床、医疗及实验室设备、家电等领域得到了广泛的应用。

本文介绍了一种基于美国 TI 公司的 MSP430 单片机的全数字无刷直流电动机控制系统, 该系统主要用于实现小型无人飞机的舵机控制, 整个控制系统结构简单, 功能完善。实验结果表明该系统具有很好的控制性能。

2 MSP430F149 单片机概述

美国 TI 公司的 MSP430 系列单片机, 是一种超低功耗特性的高性能单片机, 本设计采用的 MSP430F149 包含: 60KB 的片内程序存储器 ROM、2KB 的数据存储器 RAM, 12 位高性能 A/D 转换器, 高精度比较器, 一个硬件乘法器, 两个带有大量捕获/比较寄存器的 16 位定时器 Time-A 和 Time-B, 一个看门狗时钟, 两个可实现异步、同步及多址访问的串行通信接口, 有 6×8 个可实现

方向设置及中断功能的并行输入、输出端口等, 这些功能可以满足各种控制系统对单片机的需要, 使设计变得简单、可靠。

3 无刷直流电动机 (BLDCM) 控制系统结构

基于 MSP430F149 单片机的全数字无刷直流电动机控制系统结构组成如图 1 所示, 主要包括驱动电路、功率变换器、数字控制器、检测电路等。飞行控制计算机与舵机系统之间采用串行通信数据总线进行数据传输, 舵机系统根据飞行控制计算机的位置给定等命令通过调整 PWM 波的占空比来控制 MOSFET 功率管的开关时间, 从而实现对无刷直流

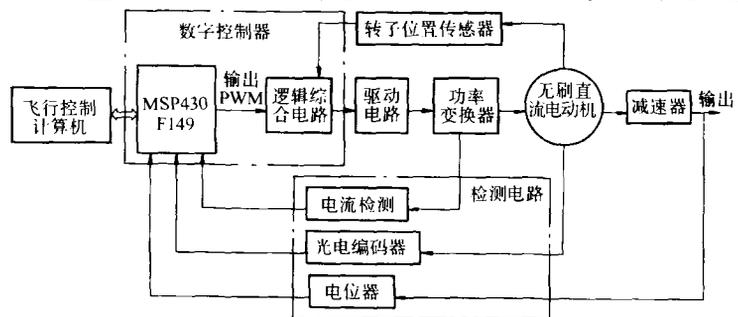


图 1 无刷直流电动机 (BLDCM) 控制系统结构组成框图

电动机转速和转矩的控制。

3.1 驱动和功率开关电路

无刷直流电动机的电动机绕组采用星形联结, 开关主电路的电源电压为 28V 直流, 采用三对桥式逆变电路驱动, 工作在 120°导通型星形二相导通三相六状态方式, 功率开关管选用高速型功率场效应晶体管 MOSFET 器件 IRF540, 内含快速恢复二极

管。驱动电路主要采用美国 International Rectifier 公司生产的六路高压集成驱动器 IR2130, 具有集成度高、可靠性好、速度快、过流欠压保护、调试方便等特点。

其驱动信号延时为纳秒级, 开关频率高达 20kHz, 芯片内部具有欠压锁定、外部过流封锁和故障输出指示等功能。通过调节电阻值可调节过流保护值, 电路外围元件少, 结构简单, 提高了系统的可靠性^[2]。

3.2 控制电路

控制电路主要由以 MSP430F149 为核心的 PWM 生成电路和逻辑综合电路两部分组成, 分别完成 PWM 调速功能和换相功能。

PWM 是电动机调速常用的一种方法, MSP430 根据上位机给定位置信号, 通过一系列的运算产生控制信号, 通过调整 PWM 波宽度控制功率管的开关时间, 实现对无刷直流电动机的控制, 同时, 一旦产生故障, 通过软件及时封锁 PWM 的输出直至故障消除。这里采用 MSP430F149 的定时器 B 通过软件实现 PWM 方波输出。

逻辑综合电路采用 GAL16V8 可编程器件来实现, 三个霍尔元件给出了互差 120°、脉冲宽度为 180°的转子位置信息, 其组合在一个周期内可给出六个状态, 即每 60°就变换一个不同的状态。GAL 电路将霍尔传感器输出信号、PWM 调制信号、电动机正反转信号 DIR 等进行开关译码, 输出对应于功率管的六个驱动信号, 实现电动机的正反转控制、调速控制及故障保护等功能。以上信号按 120°三相六状态导通规则进行逻辑合成, 生成逆变器开关器件所需的六路驱动控制信号, 送入 IR2130。

3.3 电流、速度和位置检测电路

MSP430F149 有八个外部通道和四个内部通道, 可用外部参考电平或内部参考电平, 也可采用两者的组合。本系统将采集到的电流、电压模拟量通过光耦隔离、滤波、跟随、限幅后直接送 MSP430F149 的 12 位 A/D 转换模块, 变为数字的电流信号, 若遇到电流检测值超过允许最大值时, 就及时封锁 PWM 输出, 直至故障解除。

为了提高测速精度, 速度检测采用 500 线的增量式光电编码器进行 M 法数字测速。将编码器输出的 A、B 两组信号分别送入 MSP430, 通过软件即可算出电动机转速。具体做法是: 通过 Time B 捕捉

10ms 时间内测到的脉冲数 M , 则转速 $n = 60 M \times 100/500$ (r/min) = $12 M$ (r/min)。

位置检测通过高精度电阻电位器进行测量, 将位移信号转换为电压信号, 输出信号经过分压、跟随、限幅等一系列的信号处理后, 送入 MSP430F149 的外部 A/D 通道。

4 系统控制策略

本系统采用位置、速度、电流三闭环计算机全数字控制, 其优点是不仅可提高伺服系统的快速性, 而且还可改善控制系统的稳定性, 从而更好地满足控制系统的性能要求。电流环和速度环分别采用 PI 和 P 进行控制, 位置环采用 PID 控制。

4.1 无刷直流电动机 (BLDCM) 的电气特性

为了简化分析, 对电动机进行以下假设: 三相绕组完全对称, 且为集中绕组; 气隙磁场为方波, 定子电流、转子磁场分布皆对称; 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等影响。电枢绕组在定子内表面均匀连续分布; 磁路不饱和, 忽略涡流和磁滞损耗的影响, 则根据电动机学知识和动力运动方程式可列出下列动态方程^[3]

$$u_d = e_d + i_d R_d + (L - M) \frac{di_d}{dt} \quad (1)$$

$$e_d = K_e \omega \quad (2)$$

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$T_e = K_m i_d \quad (4)$$

对于减速机构, 有

$$\theta = 1 N \int \omega dt \quad (5)$$

式中 u_d ——加在电动机两相绕组上的电压

i_d ——导通相绕组中的电流

e_d ——定子相绕组电动势

R_d ——电动机绕组的总电阻

L ——每相绕组中总自感

M ——每两相绕组间的互感

K_e ——电动势常数

ω ——电动机的角速度

K_m ——转矩常数

T_e ——电动机的电磁转矩

T_l ——负载转矩

J ——运动部分折算到电动机轴上的总的转动惯量

在零初始条件下,对式(1)~式(5)两边取拉氏变换,整理后,可得无刷直流电动机的动态结构图,如图2所示。

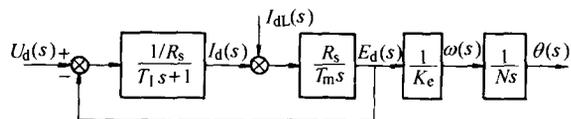


图2 无刷直流电动机的动态结构图

T_m —系统机电时间常数(S), $T_m = JR_s / (K_e K_m)$

T_1 —电枢回路电磁时间常数(S), $T_1 = L_d / R_s$

4.2 电流环、速度环、位置环控制器设计

一般多环控制系统的设计原则是:先设计内环的控制器,然后将整个内环当作外环的一个环节,再设计外环的控制器,一环一环由内向外逐步扩展,因此,先设计电流控制器,然后把整个电流环看作是转速控制环中的一个环节设计转速控制器,最后把整个转速环看作位置环中的一个环节设计位置控制器。这里借助于工程设计方法,决定校正环节的特性,在满足稳态精度的前提下,按照动态校正的方法选择控制器的结构并计算其参数。

电流环的主要作用就是保持电枢电流在动

态过程中不超过允许值,故根据实际系统的性能指标要求,由于电流环需具有较快的跟随性能,电流控制器采用PI控制器。由于电流检测信号中常含有高频开关噪声,需加滤波环节来抑制反馈信号中的噪声,但同时也给反馈带来延滞作用,为使设计方便,在给定通道中也加入一个相同时间常数的惯性环节。另外,由于电动机的电磁时间常数远小于机电时间常数,因而电流的调节过程比转速的变化快得多,反电势 E 对电流环的影响相当于一个变化缓慢的扰动作用,在电流控制器的调节过程中可以近似地认为 E 基本不变,即在设计电流环的控制器时可忽略反电势变化的动态作用,将电动势的反馈

作用断开。电流闭环后,加快了电流跟随作用,提高了伺服系统的响应速度及频率响应范围^[4]。

转速环作为位置环的内环,也需具有较高的快速响应性能,采用比例控制器,设计时把整个电流环看作是转速控制环中的一个环节来设计转速控制器,由于用旋转编码器测量转速需有一定的时间延迟,因此在其反馈回路中增加了一个延迟环节。采用转速反馈校正可以改造系统的结构,减小系统固有部分的惯性作用,使系统的快速性提高,同时可以削弱被转速反馈包围的部分参数变化及非线性影响,起到改善其线性度的作用。

根据系统要求,要求位置响应无超调,位置环控制器采用PID控制器,在位置环的反馈回路中为抑制高频干扰也增加了一个滤波环节。

三闭环控制系统动态结构如图3所示。

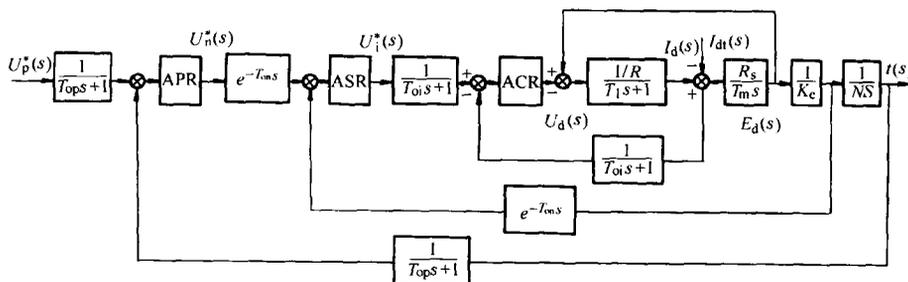


图3 三闭环控制系统的动态结构图

APR—位置调节器 ASR—转速调节器 ACR—电流调节器

$U_p^*(s)$ —位置给定电压 $U_n^*(s)$ —转速给定电压 $U_i^*(s)$ —电流给定电压

T_{op} —位置反馈滤波时间常数 T_{on} —转速延迟时间常数 T_{op} —位置反馈滤波时间常数

5 仿真与实验结果

在 Matlab/Simulink 下进行系统仿真,电动机参数为:电动机额定电压为 $U_d = 24V$,空载转速为 $n_0 = 5900r/min$,定子绕组电阻为 $R_s = 0.65\Omega$,电动机转动惯量 $J = 85g \cdot cm^2$,定子相间电感 $L_d = 0.34mH$,转矩常数 $K_m = 38.2mN \cdot m/A$,减速器的减速比为 $N = 353$ 。考虑到实际系统中电动机运行情况,故根据电动机参数对每个控制器的输出增加了饱和输出环节,系统仿真模型结构如图4所示^[5]。当给定输入为阶跃信号时,其输出响应的仿真曲线如图5所示,可以看出无刷直流电动机伺服系统在阶跃输入下有很快的响应速度和较强的位置跟踪能

力。

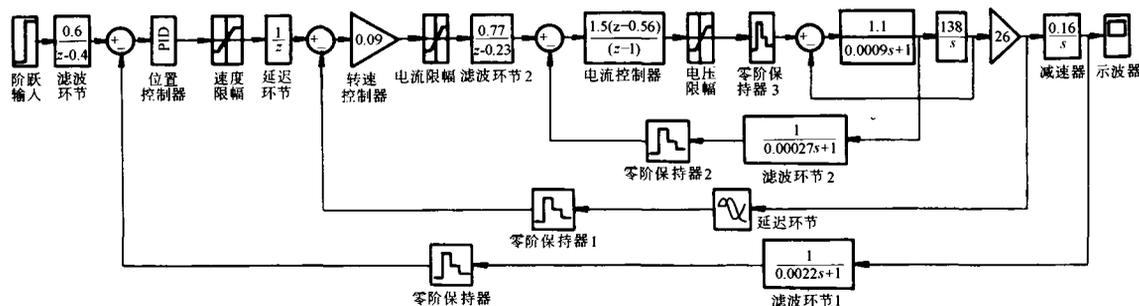


图 4 系统动态仿真模型结构框图

通过在实验室对舵机控制系统进行实际调试,可得空载时的实验曲线如图 6 所示。实验结果表明:伺服系统状态跟踪误差小,系统无超调,响应速度快,有很好的动态和静态跟踪性能。

参考文献

- 1 胡大可. MSP430 系列 FLASH 型超低功耗 16 位单片机. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001
- 2 李钟明, 刘卫国等. 稀土永磁电动机. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 3 PRAGASEN PILLAY. Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet drive, Part II: The brushless DC motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25 (2): 274 ~ 279
- 4 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 5 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2002

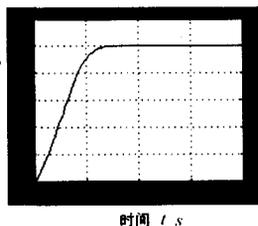


图 5 系统仿真曲线

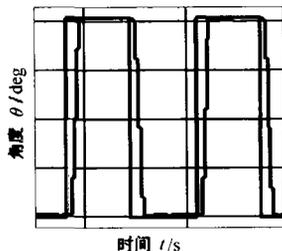


图 6 实际试验波形

6 结束语

MSP430 系列单片机具有实时处理能力强, 运行速度快、性能价格比高等特点, 文中介绍了基于 MSP430 的稀土永磁无刷直流电动机控制系统的硬件设计方案和控制策略等, 该系统用于小功率电动机舵机的控制, 实验样机为 Maxon 公司的稀土永磁无刷直流电动机, 额定功率为 120W, 由于 MSP430 集成了如 PWM 电路、A/D 转换电路、串行通信端口等许多控制部件, 使电动机的控制模块大为简化。按工程设计方法设计的控制器保证了系统的稳定性, 当速度环与电流环内部的某些参数发生变化或受到扰动时, 电流反馈与速度反馈能对它们起到有效的抑制作用, 对位置环的工作影响很小, 由于每个环都有自己的控制对象, 分工明确, 易于调整。实验表明: 整个系统简单可靠、功能完善、运行稳定, 具有实用价值。

Study of Brushless DC Motor Control System Based on MSP430

Cao Jing

(Tsinghua University)

Abstract Aiming at small power electromechanical actuator, a control system of rare earth permanent magnet (REPM) brushless DC motor realized by MSP430 singlechip is introduced. the composing principle, the hardware design solution and the control strategy for control system based on MSP430F149 are described. The adjust mode of three closed loop control system is given and the system is driven by the brushless DC motor. The simulation and experimental results show that the system has good control performance and dynamic characteristics.

Keywords brushless DC motor digital controller electromechanical actuator

收稿日期: 2004 - 12 - 04