

新型啮合式电动机全数字化控制系统设计

吕新明 孙汉旭 贾庆轩

(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘要: 以一种新型啮合式电动机为研究对象,设计了一种结构简单、性能可靠的全数字化电机控制系统。系统采用 TMS320F240 为主控单元,详细介绍了系统的结构组成和工作原理,包括啮合式电机驱动电路,电流、电压检测电路,位置/速度检测电路。该系统可以实现电机位置、速度的开环或闭环控制。以速度闭环控制为例,介绍了系统控制算法的设计。最后用试验结果检验了控制系统的闭环调速性能。

关键词: 啮合式电动机; 数字化控制系统; DSP 芯片

中图分类号: TP391.8

引言

啮合式电动机是一种新型电机,其特点是电机定子与转子由一对互相啮合的内外齿轮构成,运行时两者始终相啮合,这一点区别于其他所有类型电机。该电机的转子运动是自转和公转的合成,自转相当于经过一级减速,减速比在 15~30 左右,可提供低速大扭矩动力^[1]。目前其电磁理论研究已初步完成并制造了几种样机。

与传统的直流或交流电机不同,啮合式电机必须在控制器作用下才能运转。文献[2]设计了基于 DSP(数字信号处理器)的控制器,但是其结构过于简单,功率驱动电路没有回流功能,绕组断电后储存的电能不能回馈电源,驱动效率低;没有位置和速度反馈功能,不能对各相绕组分别进行电流检测,因此仅能实现简单的开环控制,无法进一步提高电机运转质量。本文为啮合式电机重新设计了以 DSP 为主控芯片的控制系统。改进了功率驱动电路,增加了回流功能,提高了驱动效率;设计了位置、速度、电流反馈检测电路,可实时检测电机转子位置和速度,可实时检测每相绕组的电流并分别予以控制。设计了 CAN 总线接口电路,便于通过上位机调试和修改控制参数。该系统既能实现电机的开环控制,也能实现各种复杂的闭环控制算法,便于开发电机潜

能和提高运行质量。最后设计了速度环-电流环双闭环调速控制算法,检验了控制器硬件和软件性能,并给出了试验结果。

1 控制系统硬件结构方案的确定

从控制角度看,与其他类型电机相比,啮合式电机主要有如下特点:(1)位移与输入脉冲信号数量相对应,步距误差积累,用开环控制也能达到一定精度;(2)要获得高的运行质量,每相绕组通断时机最好根据转子位置确定;(3)绕组导通时,输出扭矩随转子相对位置的变化有很大的波动。根据转子位置调制相邻两相绕组的电流分配比例可以减小输出扭矩的起伏,提高运转质量。

这里对所设计的控制器提出如下要求:(1)相绕组的通断要与转子位置相关,因此要有转子位置检测功能;(2)能够实现开环和闭环调速以及定位控制,为此要有速度、位置反馈测量功能;(3)不论是为了提高控制精度,或是减小扭矩波动,都需要控制每相绕组电流大小,为此控制器要有各相绕组电流反馈测量功能;(4)能够与上位机或其他控制器进行通讯,以便于调试控制算法,或待以后组成分布式控制系统;(5)为以后采用智能控制等较复杂的控制算法留下硬件资源空间。

2 控制器芯片的选择和接口配置

要实现上述功能,传统的单片机资源显得很有限,因此选用 TMS320LF2407 DSP 作为控制器芯片。这是因为它具有下述特点^[3-4]。

(1)它是专门针对电机控制而设计的微控制器。

收稿日期: 2006-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(50375020)

第一作者: 男,1975年生,博士生

E-mail: ming75629@163.com

它把存储器和电机控制所需的 PWM 发生器、A/D 采样等集成到控制器内部,外边只需设计功率驱动电路,提高了系统可靠性。

(2) 工作频率可达 40 MHz,片内高达 32 K 程序存储器和 32 K 数据存储器,易于实现先进的控制算法,为以后控制算法的改进留足了空间。

(4) 8 个 16 位脉宽调制(PWM)通道,用于电机控制非常方便。

(5) 10 位 A/D 转换器最小转换时间为 500 ns。可选择由两个事件管理器来触发的两个 8 通道输入或一个 16 通道输入 A/D 转换器。

(6) CAN 总线接口。该 DSP 芯片有内置的 CAN210B 总线控制器模块,便于通过 CAN 协议进行高速通信。

这种 DSP 芯片资源能够满足上面对控制器提出的性能要求。DSP 与外设的硬件接口配置如图 1 所示。

3 驱动电路的设计

驱动电路要能够分别驱动每相绕组的通断,实

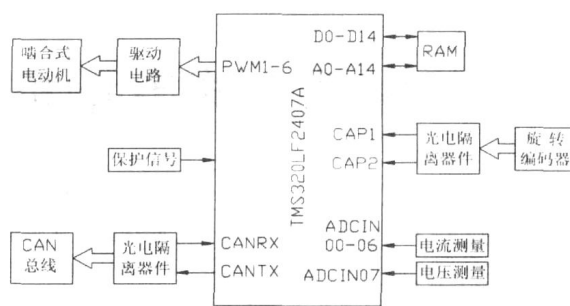


图 1 DSP 与外设的硬件接口配置示意图

Fig. 1 Interface between the DSP and the peripheral equipment

现电机运转。图 2 为部分驱动电路图。驱动芯片选用 IR 公司的电机控制专用芯片 IR2130,它带有 3 个独立高压侧和低压侧输出通道,可输出 3 路高压驱动脉冲,只需 1 个直流工作电源。逻辑输入与 CMOS 或 LSTTL 输出兼容,最小可达 2.5V 逻辑电压。外围电路中参考地运放通过外部电流检测电位器提供全桥电路电流模拟反馈值,如果超出设定的参考电流值,IR2130 驱动器内部电流保护电路就启动,关断输出通道,起到电流保护作用。

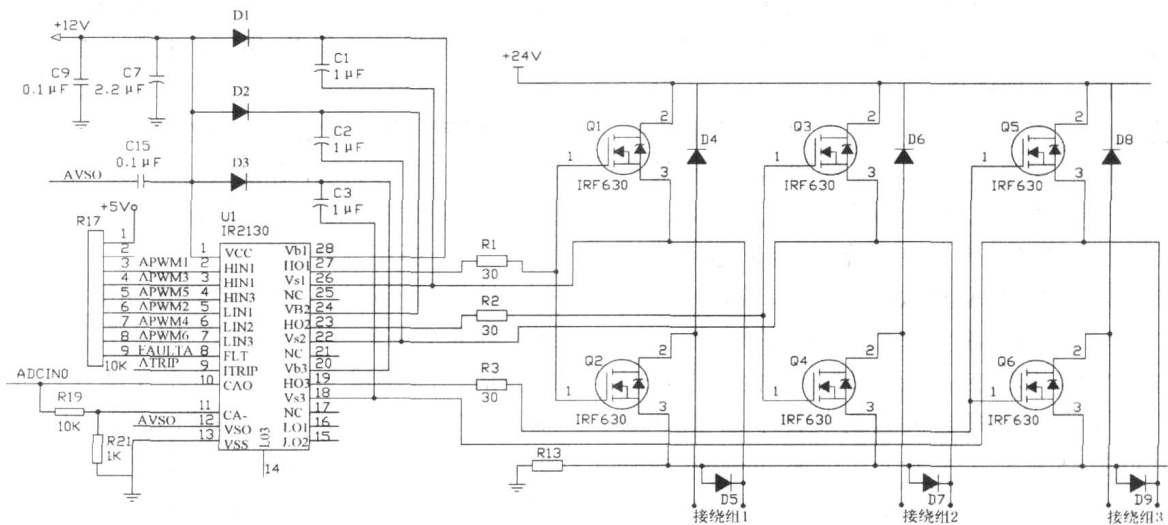


图 2 控制系统的驱动电路图

Fig. 2 The drive circuit diagram of the control system

驱动芯片输出的每路高压驱动脉冲通过 2 个功率器件来完成 1 相电机绕组的通断控制。之所以用两个功率器件是为了在绕组断电时让储存的电回馈给电源。图 2 中二极管 D4-D9 在绕组通电时是截止的,在断电时起到回流作用。一个 IR2130 芯片能控制 3 相绕组,本文啮合式电机共有 6 相绕组,所以共需要 2 个 IR2130 芯片。功率器件选用 IR 公

司的 IRF630 型 MOSFET 功率放大器,它是 IR 公司第 5 代的 HEXFET 器件,最大工作电流 42A,最大工作电压 100 V^[5]。DSP 输出的控制指令通过 IR2130 向 MOSFET 功率器件发送通断信号,控制电机各相绕组电流的通断,只要顺序正确,电机就能顺畅运转。

4 信号反馈电路的设计

根据所提出的要求,为了实现电机转子位置、速度、相电流的反馈信号检测功能,设计了相关的信号反馈电路,包括光电编码器信号反馈和电流反馈2个部分。光电编码器信号反馈电路非常简单,输出的A、B两路信号脉冲经光电耦合器件6N137(主要起保护作用)隔离后接到DSP芯片捕获引脚CAP1和CAP2即可,如图1所示。DSP通过比较捕捉到的A、B两相脉冲值即可确定当前电动机的位置和正反转状态。对不同时刻的位置信号进行差分运算还可获得电机转速值,所以能够同时起到位置和速度测量的作用。

绕组电流反馈信号通过DSP的A/D转换通道进行检测。啮合式电机共有6相绕组,要求每相电流都能独立检测,因此共用6路A/D转换通道。某一相绕组的电流检测电路如图3所示。电流信号通过采样电阻转化为电压信号来进行检测。取电流采样电阻为 $1\ \Omega$,由于电机最大工作电流为3 A,故测量电压最高为3 V,小于DSP工作电压。二极管IN4148起到过压保护作用。

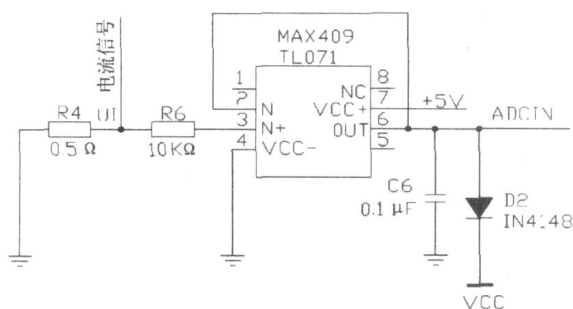


图3 电流反馈检测电路

Fig.3 Current feedback detection circuit

反馈信号测量的实现,为以后开发出各种闭环控制算法,提高控制性能打下了基础。

5 CAN 总线接口电路的设计

CAN总线的作用是在电机调试过程中,便于通过计算机对控制器发出各种运行指令,修改控制器参数;或者将来多台控制器相互通信组成分布式控制系统。CAN总线接口电路如图4所示。TMS320LF2407A芯片有内置的CAN2.0B总线控制模块,它是1个16位外设模块。芯片内CAN控制器与CAN物理总线的接口采用PCA82C250T驱动器芯片。这种芯片采用阻抗为120 Ω 双绞线作通

信介质,信号采用差动发送和差动接收,最高通信速率可以达到1 Mb/s。为增强抗干扰能力,在TMS320LF2407与PCA82C250T之间加装高速光电耦合器件。

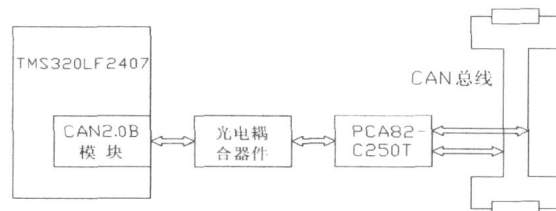


图4 CAN总线接口电路

Fig.4 Interface circuit of the CAN bus

6 控制算法的设计

这里以速度闭环控制为例来说明系统控制算法的制定,并检验控制器功能。由于电机实际运行速度大小本质上取决于相电流大小,因此采取速度-电流双闭环控制策略才能实现良好的调速效果^[6]。控制算法结构如图5所示。

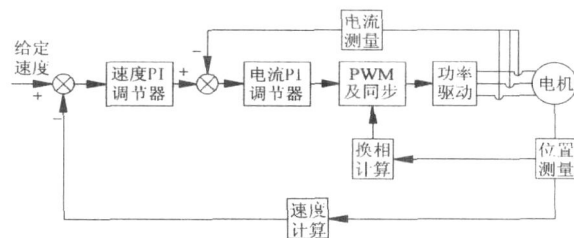


图5 速度-电流双闭环控制算法结构

Fig.5 Configuration of the speed and current closed-loop control algorithm for the motor

这里速度环和电流环都采取PI控制。由于本文是数字化制系统,采取离散型PI算法,如(1)式。

$$U(k) = U(k-1) + (K_p + K_I) E(k) - K_p E(k-1)$$

式中, U 为控制输出, K_p 、 K_I 为比例和积分控制系数, E 为设定值与反馈值偏差, k 为序号。实际控制系统中,为避免控制动作过于频繁引起输出振荡,引入带死区的PI控制作为修正。

$$E(k) = \begin{cases} 0 & |E(k)| \leq E_0 \\ E(k) & |E(k)| > E_0 \end{cases} \quad (2)$$

实质上就是当偏差值小于等于 E_0 时,控制器不动作。速度环和电流环都采取带死区的PI控制。

为防止控制量输出过大造成系统受到过分冲击,有必要对控制量的输出幅度进行限制,算式为:

$$U(k) = \begin{cases} U_{\max} & U(k) > U_{\max} \\ U(k) & 0 < U(k) < U_{\max} \\ 0 & U(k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

具体的速度-电流双闭环控制算法流程如图 6 所示。

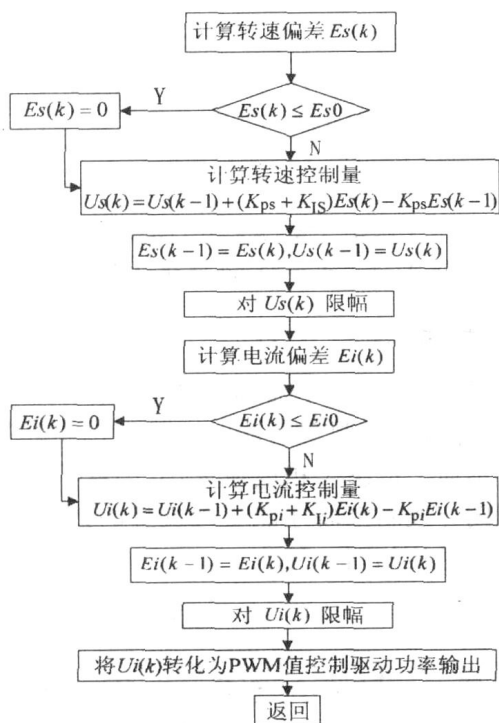


图 6 速度-电流双闭环算法流程图

Fig. 6 Flow-chart of the speed-current double closed-loop control algorithm

速度环输出 $U_s(k)$ 即为电流环设定值, 电流环输出为 PWM 脉宽值, 通过驱动电路转化为控制器的输出电压。双环 K_p 、 K_I 等参数采用在线调试方式来确定。

7 试验测试及结论

用本文所设计的控制系统对啮合式电机样机进行调速控制试验。所用样机内部结构如图 7 所示。转速设定值取为 320 转, 电机在空载和加载条件下速度响应曲线如图 8 所示。

图 8 开始电机空载启动, 曲线显示电机升速并逐渐逼近设定值, 经过一个超调整, 在 6 s 左右收敛到设定值。最高超调小于 8%, 振荡周期小于 1。表明控制系统硬件软件能够实现电机闭环调速功能。在第 15 s 时, 给电机加载一个 0.3 Nm 的负载扭矩阶跃干扰, 曲线显示电机转速一开始有所下降, 后在双闭环控制作用下, 输出扭矩增加使得电机转

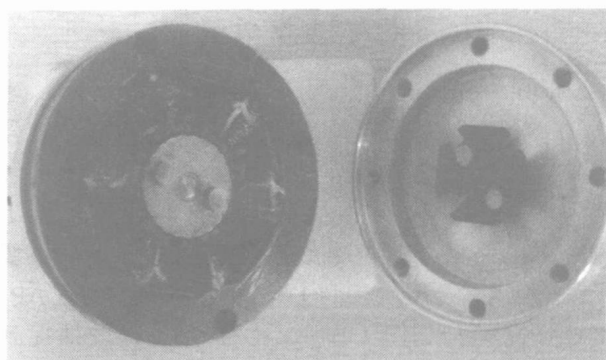


图 7 啮合式电动机样机结构照片

Fig. 7 Photo of the gearing motor prototype

速迅速回升, 经过整理又重新收敛到设定值附近。应对这次阶跃干扰的调整时间小于 2.5 s, 振荡周期小于 1, 表明控制系统能够在负载扭矩波动条件下起到稳定电机转速的作用。

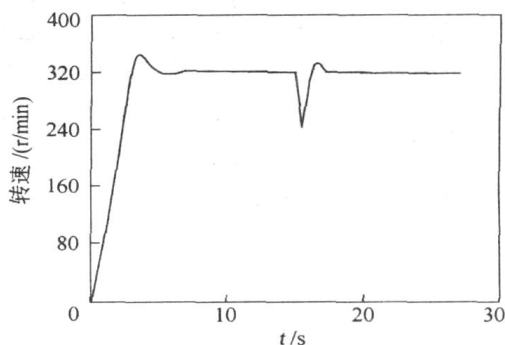


图 8 控制系统作用下的电机速度响应曲线

Fig. 8 Effect of the control system on speed-time curve

不足之处是响应时间有些长, 应当进一步改进控制参数和算法结构, 提高响应速度。

总之, 测试结果表明控制系统能够实现啮合式电机顺畅运转, 能够实现所要求的转子位置、速度和各相绕组电流反馈检测功能, 能够实现闭环控制功能。所设计的速度-电流双闭环控制算法能够在空载和负载条件下稳定的发挥作用。下一步需要在现有工作基础上改进控制算法, 不断挖掘电机控制潜能, 提高运行品质。

参考文献:

- [1] 于忠华, 孙汉旭, 吕新明. 基于 DSP LF2407A 的啮合式微型电动机控制驱动器 [J]. 机械产品开发与创新, 2006, 7: 4 - 5.
- [2] 吕新明, 孙汉旭. 啮合式电机及其动力输出机构的设计 [J]. 机械产品开发与创新, 2006, 7: 1 - 4.

- [3] 江思敏. TMS320LF240X DSP 硬件开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] TI Corporation. TMS320LF240xA DSP Controllers system and peripherals reference guide[M]. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2002.
- [5] 谭建成. 电动机控制专用集成电路[M]. 北京:机械工业出版社,2003:473 - 485.
- [6] 陈峥,齐蓉. 基于数字信号处理器的开关磁阻电机调速系统设计[J]. 电机与控制应用,2005(7):46 - 49.

Design of a pure digital control system for a new type of geared motor

LV XinMing SUN HanXu JIA QingXuan

(College of Automatics, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: A pure digital control system with a simple structure and high reliability has been designed for a new type of geared electric motor. The system is based on TMS320LF240 as the main controlling unit. The structure and principles of the control system are introduced in detail, including the motor drive circuit, current and voltage testing circuit, and the position/speed testing circuit. The system allows either open loop or closed loop control of the position and speed of the motor. As an example, the closed loop speed control algorithm of the system is described. Finally, the speed adjustment capability is tested experimentally.

Key words: geared motor; digital control system; DSP chip

(上接第 292 页)

Grafting glutamic acid to a polyethylene terephthalate (PET) film treated with NH₃ plasma

MA XiaoXing¹ WANG XiuFen^{1,2} ZHANG LiQun³

(1. State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering; 2. The Key Laboratory of Beijing Municipality for Preparation and Processing of Novel Polymer Materials; 3. Key Laboratory for Nanomaterials, Ministry of Education, Beijing University of Chemical Engineering, Beijing 100029, China)

Abstract: Polyethylene terephthalate (PET) surfaces have been treated with NH₃ plasma, and subsequently grafted with glutamic acid using glutaraldehyde as crosslinker. The extent of surface modification of the PET films was investigated by contact angle measurements, ATR-FTIR, XPS spectra and activated partial thromboplastin time (APTT) measurements. The properties of the films after treatment with NH₃ alone were compared with those obtained after subsequent grafting with glutamic acid. It was found that the former are superior to the latter, and the blood compatibility was best when the power used was 70 W. The APTT times of the NH₃-treated film and the grafted film were respectively 5.9 s and 3.2 s longer than that of the untreated film.

Key words: glutamic acid; PET film; anticoagulant activity; plasma