

无刷直流电机全数字智能伺服控制系统^{*}

李先祥¹, 麦宜佳¹, 斯燕跃²

(1. 佛山科学技术学院工学院, 广东 佛山 52800;
2. 华南理工大学自动控制系统, 广东 广州 510640)

摘 要: 应用 TMS320X240 系列 DSP 芯片设计了一套无刷同步电机全数字智能伺服系统。该系统充分利用了 DSP 丰富接口和运算速度快的特点, 使所设计的系统硬件简单, 并采用智能控制策略对系统进行控制。实验结果表明, 该系统具有良好的动态和静态特性。

关键词: 数字信号处理器; 无刷同步电机; 智能控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 02-0037-04

永磁无刷同步电动机是近阶段随着电力电子器件及新型永磁材料而迅速成熟起来的一种新型机电一体化电机, 既具有交流电机结构简单, 运行可靠, 维护方便, 又具有直流电机那样良好的调速特性而无机式换向器。无刷同步电机具有体积小、出力大、系统结构简单等优点, 现已广泛应用于各种高性能驱动场合。

本文以永磁无刷电机为控制对象, 应用美国 TI (德州仪器) 公司推出的 DSP 芯片 TMS320X240 设计了一套全数字智能伺服控制系统。该系统充分利用了 TMS320X240 芯片丰富的电机控制的外围部件和较强的实时运算能力, 组成的系统结构简单, 抗干扰能力强, 并实现了基于智能控制策略的系统在线实时控制。实验结果表明: 该位置伺服系统具有良好的动态性能和静态性能, 且在外部参数大范围变化的情况下表现出很强的鲁棒性。

1 无刷同步电机伺服系统的构成

基于 TMS320X240 的全数字无刷同步电机伺服控制系统的原理框图如图 1 所示。图中虚线框内的部分代表了 TMS320X240 实现的全数字化位置伺服系统。

1.1 主电路和驱动电路

主电路由二极管整流桥、滤波电容以及 IGBT 逆变器组成的变换器, 它用于将恒压恒频交流电变换成频率电压均可调的三相交流电, 控制稀土永磁无刷电机实现位置伺服。驱动电路采用 TLP250 作为 DSP 的 PWM 输出与 IGBT 之间的接口, 其不导通功率器件的栅极射极之间具有 5 V 的反向电压, 保证了功率器件的可靠关断。

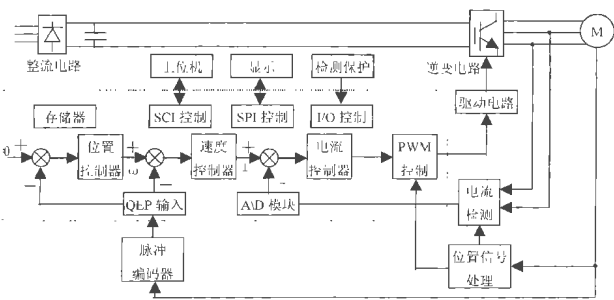


图 1 系统结构框图

Fig 1 Block diagram of system

1.2 电流检测及反馈

电流检测采用根据磁场补偿原理制成的霍尔元件 LEM 模块。由于无刷电机相电流为 120° 的方波, 三相互差 120° , 任一时刻只有两相通电, 在 60° 电区间内相当一直流电流, 因而可以采用电流分时反馈技术, 使三相相电流合成反馈成一直流, 这样系统只采用一个电流调节器, 系统稳定且调试方便。又因三相电流 $i_a + i_b + i_c = 0$ 故只需检测两相电流, 如图 2 为电流分时反馈的原理图, 来自于 LEM 模块的两相电流信号经放大送加法器相加得到第 3 相电流信号。三相电流经模拟开关 CD4066 由位置检测信号 CA BC AB 控制切换, 即可得合成电流波形。图 3 (a) 为合成电流波形, 图 3 (b) 为 a 相电流波形。

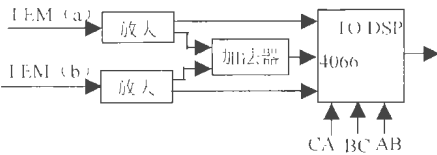


图 2 电流分时反馈原理图

Fig 2 Principle diagram of current time-sharing

^{*} 收稿日期: 2001-10-06

基金项目: 广东省高教基金资助项目 (1999267)

作者简介: 李先祥 (1965-), 男, 副教授; E-mail: lex@foshan.net

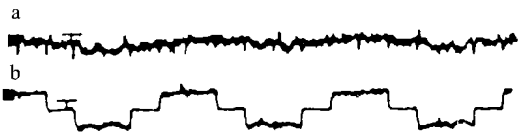


图 3 (a) 合成电流波形 (b) a 相电流波形

Fig 3 (a) Current wave of time sharing
(b) a-Phase current wave

1.3 速度和位置反馈

TMS320X240 的正交编码脉冲输入单元 (QEP) 能对脉冲的前后沿进行计数, 即其本身能进行 4 倍频, 而无需任何硬件, 并可根据两路脉冲的次序判别电机的转向, 大大简化了系统的硬件。

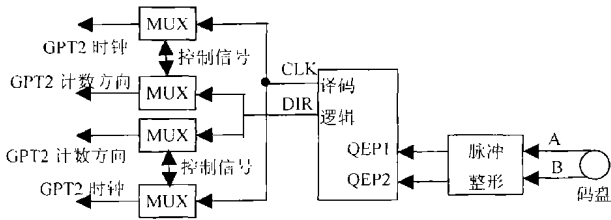


图 4 QEP 电路和速度位置反馈原理图

Fig 4 Principal diagram of QEP circuit and speed/place feedback circuit

光电编码器输出的 A 和 B 两路脉冲信号经整形后直接送入 QEP 单元的 QEP1 和 QEP2 引脚, 经译码逻辑单元产生内部 4 倍频的脉冲信号 CLK 和转向信号 DIR。对脉冲信号 CLK 的计数由 T2 和 T3 相级联组成的 32 位计数器完成。计数器的方向由 DIR 信号决定。当 QEP1 输入超前时, 所选计数器加计数; 当 QEP2 输入超前时, 计数器减计数。计数器的状态字中有专门的一位用于保存计数方向的信息, 这实际上是电机实际转向的信息。

1.4 转子位置信号的检测及 PWM 的产生

无刷直流电机的三相转子位置信号 ABC 经转子位置信号处理电路后从 DSP 的可编程中断 INTX 输入, 当任一相转子信号发生变化时, 产生中断, 通过中断服务程序改变 ACTR 的值控制 PWM 输出信号。TMS320X240 的 PWM 发生电路可产生 6 路具有可编程死区和可变输出极性的 PWM 信号。PWM 输出信号经 TLP250 驱动和隔离控制主电路中 IGBT 实现调压调速。

1.5 系统保护功能

本系统设计了完善的保护环节, 主要有过流保护, 过载保护, 过压保护, 欠压保护和过压吸收电路。各种保护动作信号通过 CD4078 综合后, 经光电隔离输入到 TMS320X240 的 PD/PINT 引脚。当有任何动作保护信号出现时, CD4078 输出低电平, PD-

PINT 引脚也被拉为低电平, 此时 DSP 内定时器立即停止计数, 所有 PWM 输出管脚全部呈高阻状态, 同时产生中断信号, 通知 CPU 有异常情况发生。整个过程不需要程序干预, 全部自动完成。在中断处理程序中, 读入相关 I/O 口状态, 判别发生何种故障, 并送 LED 显示, 以便很快判别故障原因, 并加以排除。实验运行表明该保护系统工作可靠。

2 控制策略

本系统采用全数字三闭环控制, 电流环和速度环分别采用传统工程设计方法设计成典型 I 型系统和典型 II 型系统, 在此基础上, 位置环采用具有产生式规则的智能控制策略。通过位置的误差和误差的变化率而给出相应的控制规则实现对被控对象的调节, 可以有效地解决传统 PID 调节器所难以解决的问题。

一般的智能控制系统如图 5 所示, 它由知识集, 推理机构和控制规则集组成。为了简化和便于实现, 把知识集、推理机构和控制规则集合并成一个具有优异控制性能而结构又较简单的智能控制器 (EC)。EC 可视为一个基于规则的动态控制器, 它能在线修正控制策略和控制参数以适应过程的变化。

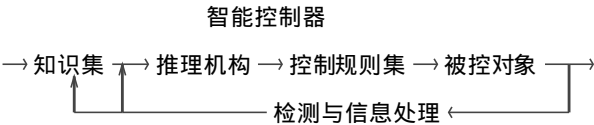


图 5 智能控制结构图

Fig 5 Structural diagram of intelligent control

本文是通过对被控对象的 e 和 Δe 进行检测和处理, 判别出被控对象的运行状态, 从而采用相应的控制行为对被控对象进行调节。

2.1 知识的获取与知识集的建立

知识集是智能控制的基础。它包括对象的先验知识, 用户要求的性能指标, 控制参数的可调范围及修正规则, 经验公式及数据等。这些知识的获取需要查阅大量资料, 做大量实现, 是一项艰巨的工作。建立知识集实际上是如何表示已获得的知识。知识的表达是人工智能中的一个专门的课题。本文结合工业控制特点, 采用产生式规则来建立知识集。其基本结构为:

IF (condition) THEN (action)

此规则特点是模块性好, 每条规则都可独立增删修改, 各产生式规则间无联系。

2.2 控制规则集

智能控制中控制规则集是总结人们控制经验基础上, 根据位置的误差和误差变化率的大小建立的一套适合于不同情况的控制规则。它集中反映了人

的智能控制行为。智能控制器的控制规则集包括 7 条规则：

- ①IF $e > R$ THEN $U_n = U_m$
- ②IF $e < -R$ THEN $U_n = -U_m$
- ③IF $|e| < S_1$ and $|\Delta e| < S_2$ THEN $U_n = U_{n-1}$
- ④IF $e \cdot \Delta e < 0$ and $|e| \Delta e > a$ THEN $U_n = U_{n-1} + K_1 \cdot e$
- ⑤IF $e \cdot \Delta e < 0$ and $|e| \Delta e < b$ THEN $U_n = U_{n-1} + K_2 \cdot \Delta e$
- ⑥IF $e \cdot \Delta e < 0$ and $b \leq |e| \Delta e \leq a$ THEN $U_n = K_p \cdot e + K_i \cdot \sum e_j + K_d \cdot \Delta e$
- ⑦IF $e \cdot \Delta e > 0$ THEN $U_n = K_p \cdot e + K_i \cdot \sum e_j + K_d \cdot \Delta e$

其中， U_n 为控制器的第 n 次输出值； U_m 为控制器输出的最大值； e 、 Δe 为位置的误差及误差的变化率； K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分常数； $\sum e_j$ 为位置误差的积累值； R 、 S_1 、 S_2 、 a 、 b 、 K_1 、 K_2 均为常数，由知识集中经验确定。

控制规则的多少视具体情况而定。规则太多，会增加搜索时间，降低决策速度。规则太少，会削弱控制器的灵活性与适应性。建立控制规则集必须满足以下原则：

设 EC 的输入集为 $E = \{e_1, e_2 \cdots e_n\}$ ，输出集（即控制规则集） $U = \{R_1, R_2 \cdots R_n\}$

设 f 是 E 到 U 的一个映集 $f: E \rightarrow U$ ，则建立控制规则集的必要条件为： $f(E) = U$

即 f 是 E 到 U 的一个满射。否则，将会因推理机构搜索不到目标而无法给出合适的控制行为，从而造成失控。

2.3 推理机构

由于规则集中只有 7 条规则，搜索空间很小，故采用前项推理方法逐项判别各规则的条件。若满足则执行，否则继续搜索。由于 e 和 Δe 的任一状态都有所对应的控制规则，故必须能搜索到目标。

3 实验测试及分析

使用无刷直流电动机的参数为：额定线电压为 380 V，额定功率 1.5 kW，额定转矩为 5 Nm，最高转速为 3 000 r/min，编码器脉冲输出 2 500 个/r。

智能控制器中的各参数须在实际调试中在线修正，参数 R 的选取应倍加小心，若 R 选取过大，则与常规 PI 算法没有什么区别，此时系统超调大，若 R 选择太小，则在切换过程中易引起系统抖动，即在平衡点附近振荡。参数 S_1 、 S_2 的选择主要取决于系统允许的误差。 a 、 K_1 的选取主要考虑扰动

情况，扰动后会出现误差较大而误差变化率很小的情况，此时应加大控制器的输出（比 PI 算法输出值更大），以便系统加快减小偏差。 b 、 K_2 的选择主要考虑在 e 很小而 Δe 很大时，若仍接 PI 算法，就有可能使 e 趋于零后向反向增大，从而引起超调或振荡。

图 6 和图 7 分别为位置给定 20 000 个脉冲时位置和速度响应波形。从波形可见，该系统具有良好的动、静态性能，可以实现准确快速定位。

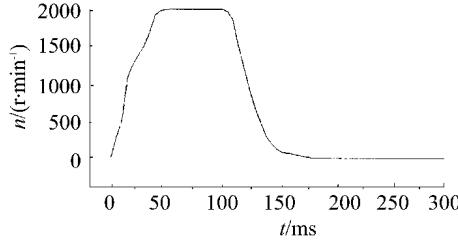
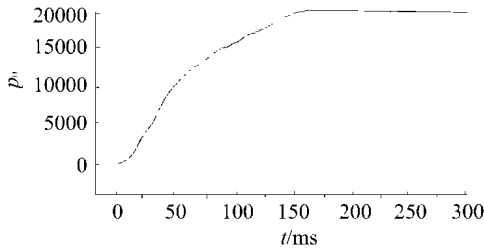


图 6 位置给定时速度响应波形
Fig. 6 Dynamic response of speed



7 位置响应波形
Fig. 7 Dynamic response of place

4 结束语

本文以稀土永磁无刷直流电机为对象，应用 TMS320X240 DSP 芯片设计了一套全数字智能控制的伺服系统，本系统采用三闭环控制，并在位置环引入基于产生式规则的智能控制策略。系统结构简单，并设计了完善的保护电路。实验测试表明，该系统工作可靠，具有良好的动态性能和静态性能。

参考文献：

[1] ISHIGURO A, FURUHASHI T. TMS320X24X DSP. Controllers reference set (peripheral library and specific drive)[J]. Texas Instruments 1997(2): 128—132.
[2] 任海鹏. DSP 在无刷直流电动机伺服系统中的应用[J]. 微电机, 2000(2): 32—33.
[3] HISAO K, KOUKI M. DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor[J]. IEEE Trans On Industry Application, 1993, 29(2): 138—142.
[4] 李先祥, 周波. 智能控制器在稀土永磁无刷方波电机调速系统中的应用[J]. 电气自动化, 1997(4): 13—15.

(下转第 43 页)

Novel (α -Diimine) nickel Catalyst for Preparing
Branched Polyethylene with Single Ethylene Monomer

ZHU Fang ming, XU Wei, LIU Xin xing, LIN Shang an

(School of Chemistry and Chemical Engineering,

Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Branched polyethylene containing primarily methyl and long branches was synthesized with a novel (α diimine) nickel (II) complex of 2, 3 bis (2, 6 dimethylphenyl) butanediimine nickel dichloride { [2, 6—(CH₃)₂C₆H₃—N=C(CH₃)C(CH₃)=N—2, 6-(CH₃)₂C₆H₃] NiCl₂ } (1) activated by methylaluminoxane (MAO) via ethylene homopolymerization. The influences of varying polymerization temperature and Al/Ni molar ratio on catalytic activity, as well as molecular weight, degree of branching and branch length of polyethylene were investigated. The results of GPC characterization, indicate that the resultant polymers have weight average molecular weight ranged from 1.7×10^5 to 6.0×10^5 and rather narrow molecular weight distributions, showing the characteristic of ethylene polymerization catalyzed by single active species. The degree of branching rapidly increased with increasing polymerization temperature, giving rise to polymers ranging from highly crystalline to amorphous. The addition of triisobutylaluminum (TIBA) to 1/MAO system could reduce the amount of MAO and led to significant enhancement of polymerization activity, while the polymer microstructure and molecular weight was slightly changed.

Key words: late transition metal catalyst; (α -Diimine) nickel (II) complex; methylaluminoxane; polyethylene; branched polyethylene

(上接第 39 页)

Digitized Brushless DC Motor Intelligent Control Servo System

LI Xian xiang¹, MAI Yi jia¹, SI Yan yue²

(1. Engineering School, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A digitized brushless DC motor intelligent control system is designed by using DSP. It fully utilizes the wealthy periphery and high speed calculation function of DSP, and intelligent control strategy is employed in position control. Experimental results show that the system has a compact structure and good dynamic and static performances.

Key words: DSP; brushless DC motor; intelligent control