

基于 DSP 的 PWM 双闭环直流调速系统

林立¹, 唐旭², 张续义², 黄声华³

(1. 邵阳学院 信息与电气工程系, 邵阳 422004; 2. 浙江求是科教设备有限公司, 杭州 310000;

3. 华中科技大学 电气与信息工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为提高直流调速系统的性能, 介绍了采用 TMS320LF2407A 为控制核心、H 桥直流斩波驱动、电流内环与速度外环 PI 调节以及转速测量等环节都实现全数字化的微机控制双闭环调速系统。分析了系统的全数字化调速原理, 阐述了双闭环调速系统的硬件组成和软件设计。这种系统在调速性能要求较高的场合有着广泛的应用。

关键词: 数字信号处理器; H 桥电路; 直流电动机; 调速; 双极性控制; 工程设计方法

Double Closed PWM Systems of Velocity Modulation of Direct Current Motor Based on DSP

LIN Li¹, TANG Xu², ZHANG Xu-yi², HUANG Sheng-hua³

(1. Shaoyang University, Shaoyang 422004; 2. Science and Technology

Teaching Apparatuses Company of QiuShi in Zhejiang, Hangzhou 310000;

3. Hua Zhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: In order to get good performance in DC motor speed control systems, this paper introduces double closed PWM systems of velocity modulation of direct current motor based on DSPs, this system come ture the digital control. In the paper, speed control theory and hardware and software are described in detail, this speed control of system have achieved the enterprise produces production request. The experiment indicates that this control system structure is simple and performance is good. This systems can be used in advanced control field all over the agriclctue and industry.

KEY WORDS: DSP; H bridge circuit; DC motor; Speed control; Bipolar control; Engineering design methods

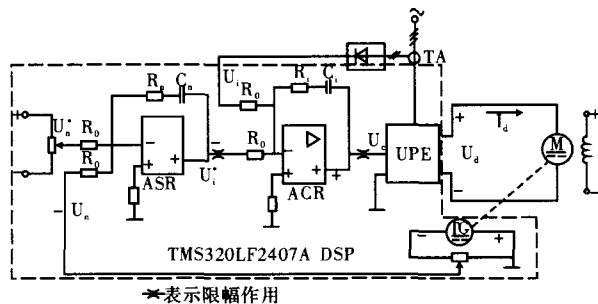
0 引言

随着电力电子技术和微处理器的快速发展, 运动控制系统的控制方式由硬件控制转向软件控制, 智能化的软件控制将成为运动控制系统的发展趋势。运动系统控制器的实现方式在数字控制中也在向硬件方式发展。在软件方式中也是从运动系统的外环向内环, 进而向接近电动机环路的更深层发展。目前, 运动系统的数字控制大都是采用硬件与软件相结合的控制方式, 其中软件控制方式一般是利用微机实现的。

1 结构与原理

调速系统如图 1 所示。这是以 TMS320LF2407A 为控制核心的 PWM 电流内环和转速外环的双闭环直流调速系统。主电路采用三相不可控整流, 经电容滤波 H 桥直流斩波调压后给直流电动机供电。控制电路利用调节器的工程设计方法^[1], 求出实际系统各个环节的传递函数后将电流内环按典型 1 型系统进行校正设计, 转速外环按典型 2 型系统进行校正设计, 分别确定 2 个 PI 调节器的比例与积分参数, 从而满足稳、准、快等性能指标的要求。整个系统的控制实现了数字化。其中 2 个 PI 调节器的参数经离散化后由 DSP 编程来实现。H 桥直流斩波调压的控制信号是由 DSP 的事件管理器控制产生的 4 路 PWM 脉冲波进行双极性控制的。同时利用 DSP

的 QEP 引脚和光电编码器实现对电机速度的检测, 利用 ADCIN 引脚可以完成模数转换, 利用 PDPINTA 引脚进行故障保护。



ASR-转速调节器 ACR-电流调节器 TG-测速发电机
TA-电流互感器 UPE-电力电子变换器 U_i -电流反馈电压
 U_n^* -转速给定电压 U_n -转速反馈电压 U_i^* -电流给定电压
图1 DSP控制的PWM双闭环直流调速系统原理图

2 硬件组成

DSP 数字控制 PWM 双闭环直流调速系统的硬件结构如图 2 所示。其硬件结构由主电路和控制电路两部分组成。主电路由三相不可控整流、H 桥双极性直流斩波、泵升电压电路与直流电机构成。H 桥双极性直流斩波电路驱动信号的产生由 DSP TMS320LF2407A 控制输出。转速的检测采用数字测速器。它是用 DSP 读取与电动机联轴的光电编码器输出的脉冲数, 经 DSP 计算后得出转速值。泵升电压的控制经与事先设定值比较后由 DSP 发出控制信号实时控制启动泵升电压电路, 进行能量泄放, 保护主电路。系统利用故障保护引脚 PDPINTA 产生的信号, 及时封锁 4 路 PWM 信号, 以及通过 I/O 口控制开关 K1 的动作实现保护。该 DSP 控制系统有完善的保护体系。

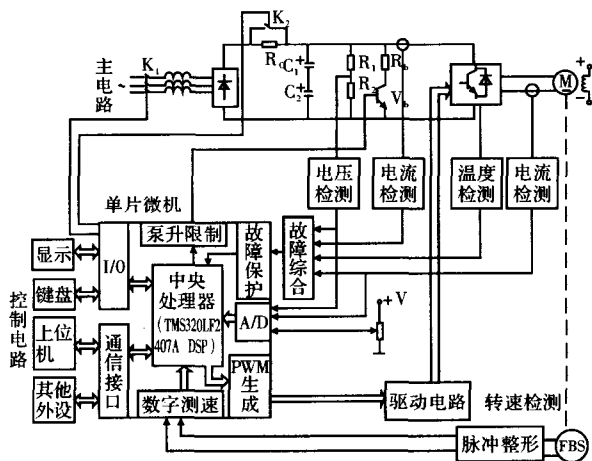


图2 DSP控制的PWM双闭环直流调速系统硬件结构图

2.1 主电路

三相交流电源经不可控整流器变换为电压恒定的直流电源, 再经过直流 PWM 变换器得到可调的直流电压, 给直流电动机供电。直流 PWM 变换器采用双极性斩波控制, 其结构如图 3 所示。

2.2 控制电路

控制电路由数字信号处理器、检测电路、驱动电路与故障保护等组成。

1) 数字信号处理器

数字信号控制器是整个系统的核心。选用专为电机控制设计的 TMS320LF2407A 为控制器, 配以显示、键盘等外围电路, 通过通信接口与上位机或其他外设交换数据。这种控制芯片本身都带有 A/D 转换器, 通用 I/O 口和通信接口, 还带有一般控制器并不具备的故障保护、数字测速和 PWM 生成功能, 大大简化了数字控制系统的硬件电路。

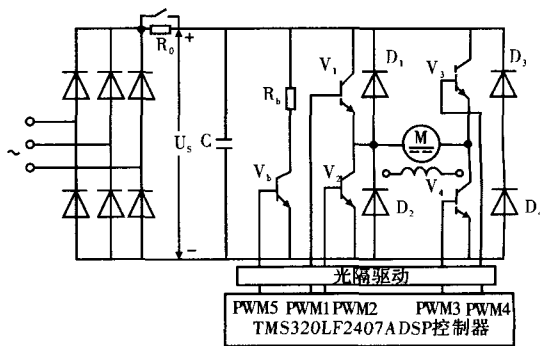


图3 桥式可逆双极性直流脉宽调速系统主电路原理图

2) 检测电路

检测电路包括电压、电流、温度和转速检测, 其中电压、电流和温度检测由 A/D 转换通道变为数字量送入 DSP 控制器。

3) 驱动电路

图 3 通过 DSP 产生 5 路 PWM 信号, 其中 DSP 的引脚 PWM1 - PWM4 输出 4 路控制信号对 H 桥电路的电力电子开关进行控制。桥式电路的电力电子开关采用电力晶体管 D202。PWM1 - PWM4 4 路信号经驱动芯片 M57215BL 后控制晶体管 (D202) V1 - V2 - V3 - V4 的通断。另外, PWM5 信号经 M57215BL 后对图 3 的 V_5 进行泵升保护。具体结构如图 4 所示。

4) 故障保护

在检测回路中, 对电压、电流、温度等信号进行分析比较, 若发生故障或者与给定的动态参数不符, 立即反馈到 DSP 控制器, 进行及时处理, 通过数字调节转速和电流调节器, 将动态参数调

整到规定的标准，避免误差或故障进一步扩大。

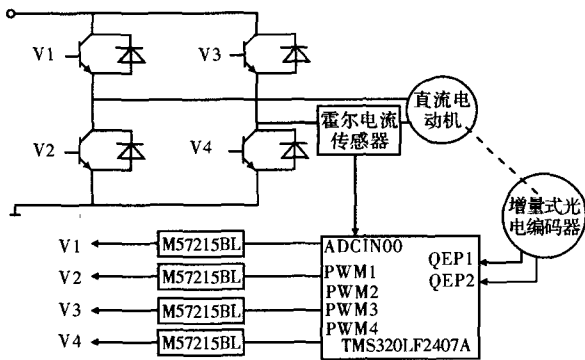


图4 直流电动机 DSP 控制的驱动电路

脉冲。所以在这个转速下，每秒发出 $10/3 \times 4096 = 40960/3$ 个脉冲。那么 4.5ms 发出的最大脉冲数为 $40960/3 \times 4.5 \times 10^{-3} = 61.44$ 。令编码器脉冲速度转换系数 $K_{\text{SPEED}} = 1/61.44$ ，其 Q22 格式为 $K_{\text{SPEED}} = 2^{22}/61.44$ ，即 10AAAH。用编码器的脉冲累计值乘以 K_{SPEED} 就可以得当前转速反馈量相对于最高转速的比例值 n ，当前转速反馈量等于 $200n/2^{22}$ 。

3 软件设计

采用 TMS320LF2407A DSP 对控制系统进行设计。必须对控制系统的动态参数进行校正。按工程设计方法，电流内环按典型 I 型系统设计，转速外环按典型 II 型系统设计。结合调节器设计、H 桥双极性直流斩波控制算法、模数转换和故障保护，本调速系统的软件设计由 3 部分组成：即主程序、初始化程序和中断服务子程序。主程序完成实时性要求不高的功能，完成系统初始化和其他外设通信等功能。其流程如图 5 所示。初始化后，实现键盘处理、刷新处理与上位计算机和其他程序完成硬件工作方式的设定、系统运行参数和变量的初始化等。其流程如图 6 所示。中断服务子程序主要完成实时性强的功能，如故障保护、PWM 生成、状态检测和数字 PI 调节等。中断服务子程序由相应的中断源提出申请，CPU 实时响应。它包括了 3 种中断服务申请，其中，转速调节中断服务子程序流程如图 7 所示。电流调节中断服务子程序流程如图 8 所示。故障保护中断服务子程序流程如图 9 所示。

本系统设计脉冲编码器在每个 PWM 周期 ($50\mu\text{s}$) 都对直流调速系统进行一次电流采样和电流 PI 调节，因此电流采样周期与 PWM 采用定时器 1 周期中断标志来启动 A/D 转换，转换结束后申请 ADC 中断。图 10 是 ADC 中断处理子程序框图。全部控制功能都通过中断处理子程序来完成。

由于速度时间常数较大，在本程序中设计每 90 个 PWM 周期 (即 4.5ms) 对速度进行一次 PI 调节。

速度反馈量是按以下方法计算的：在每个 PWM 周期都通过读编码器求一次编码脉冲增量，并累计。设电动机的最高转速是 200r/min 即 $10/3\text{r/s}$ 。采用 1 024 线的编码器，经 DSP4 倍频后每转发出 4096 个

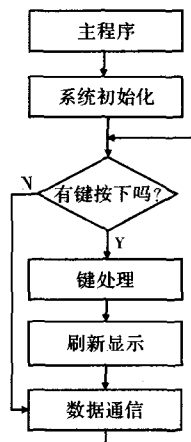


图5 主程序框图

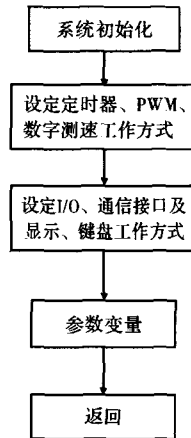


图6 初始化子程序框图

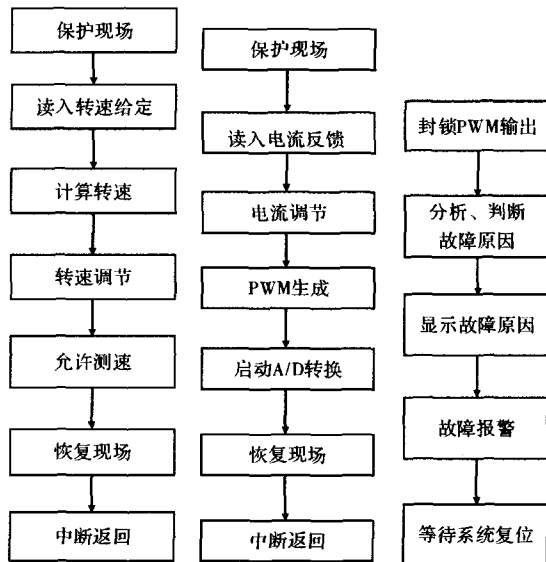


图7 转速调节中断 图8 电流调节中断 图9 故障保护中断
服务子程序框图 服务子程序框图 服务子程序框图

程序中的速度 PI 调节器和电流 PI 调节器的各个参数可以根据要求在初始化程序中改写。

常规的模拟 PI 控制系统由模拟 PI 调节器和被控对象组成。采用 DSP 对电动机进行控制时，使用的是数字 PI 调节器，而不是模拟 PI 调节器，也就是说用程序取代 PI 模拟电路，用软件取代硬件。数字 PI 调节器的算法：

$$u_k = K_p \left[e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j \right] + u_0$$

$$\text{或 } u_k = K_p e_k + TK_I \sum_{j=0}^k e_j + u_0$$

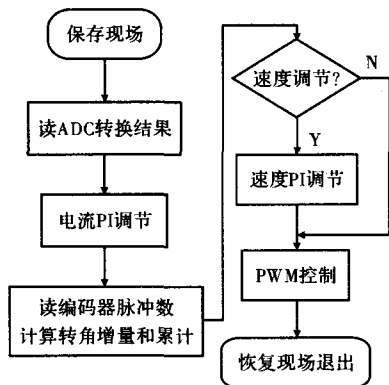


图 10 ADC 中断处理子程序框图

式中, k 为采样序号, $k=0, 1, 2, \dots$; u_k 为第 k 次采样时刻的输出值; e_k 为第 k 次采样时刻输入的偏差值; k_I 为积分系数, $K_I = K_p/T_I$; u_0 为开始进行 PI 控制的原始初值。

根据工程设计方法, 按照实际系统的具体要求计算得到两个调节器的实际参数, 然后将模拟 PI 调节器离散化得到数字 PI 调节器后, 求得以下数字调节器的参数:

电流比例系数 $I_K_p = 4A14H$, Q12 格式;

电流积分系数 $I_K_I = 134AAA H$, Q12 格式;

电流积分饱和修正系数 $I_K_C = 000DH$, Q12 格式;

速度比例系数 $N_K_p = 5666H$, Q12 格式;

速度积分系数 $N_K_I = 71000H$, Q12 格式;

速度积分饱和修正系数 $N_K_C = 0199H$, Q12 格式;

电流最大值 $I_{MAX} = 7666H$, Q12 格式。

4 结 论

本文根据上海一精密仪器加工系统进行了设计。该系统的基本参数和设计要求是^{[2][7]}: 电动机功率 $P_N = 200\text{ W}$, $U_N = 48\text{ V}$, $I_N = 3.7\text{ A}$, $n_N = 200\text{ r/min}$, 电枢电阻 $R_a = 6\Omega$, 电枢回路总电阻 $R = 8\Omega$, 电动势系数 $C_e = 0.12\text{ V}\cdot\text{min/r}$, 允许电流过载倍数 $\lambda = 2$, 电磁时间常数 $T_l = 0.015\text{ s}$, 机电时间常数 $T_m = 0.2\text{ s}$, 电流反馈滤波时间常数 T_{oi}

$= 0.001\text{ s}$, 转速反馈滤波时间常数 $T_{on} = 0.005\text{ s}$ 。设调节器输入输出电压 $U_{nm}^* = U_{im}^* = U_{cm} = 10\text{ V}$, 调节器输入电阻 $R_0 = 40\text{ k}\Omega$ 。已知电力晶体管 D202 的开关频率 $f = 1\text{ kHz}$, PWM 环节的放大倍数 $K_s = 4.8$ 。要求是: 进行动态参数设计, 设计指标为: 稳态无静差, 电流超调量 $\sigma_i \leq 5\%$, 有抗负载性能, 空载起动到额定转速时的转速超调量 $\sigma_n \leq 20\%$, 过渡过程时间 $t_s \leq 0.1\text{ s}$; 进行数字化控制; 有完善的自动保护功能。

根据生产系统的基本要求, 利用高性能的专用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的强大运算能力和快速实时处理能力, 本文提出的 PWM 双闭环直流调速系统可以使转速和电流调节器复杂的控制算法更加容易编程实现, 实现了全数字化控制, 结构简单、性能良好。与模拟直流调速系统相比, 具有易于改变控制算法、程序易于移植、控制精度高、可靠性好、调速范围宽、静差率小、功率因数高等优点。这种系统在可逆、小功率驱动、精密仪器制造生产线等领域中有着广泛的应用。

参考文献

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统—3 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 江思敏, 戴向国, 李伟. TMS320LF240x DSP 应用程序设计教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 江思敏. TMS320LF240x DSP 硬件开发教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 王晓明, 王铃. 电动机的 DSP 控制: TI 公司 DSP 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [5] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [6] 苏彦民. 电力拖动系统的微型计算机控制[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] Leonhard, W. 电气传动控制[M]. 吕嗣杰译. 北京: 科学出版社, 1988.
- [8] Leonhard, W. Control of Electrical Drives 3rd ed. Springer-Verlag, 2001.
- [9] Texas Instruments Second Generation TMS30 User's Guide, 1987.
- [10] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术(第四版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

作者简介: 林立(1972年-), 男, 湖南武冈市人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动。