

D08-32 捣固车激光电机控制器设计与实现

张宝明

(中国铁建高新装备股份有限公司 研究院, 云南 昆明 650215)

摘要: D08-32 捣固车网络控制系统中, 激光准直系统用于提高捣固车直线作业精度, 激光电机控制是关键技术。为进一步提高激光准直系统作业精度, 以及提高作业效率, 设计了一款基于 DSP 的激光电机控制器, 以实现激光电机 PID 超调控制及过流保护功能, 详细介绍了激光电机控制器总体及软件、硬件设计。试验与应用表明: 该控制器功能完善、性能良好, 大大降低了现场应用故障率, 整体上提高了激光准直系统的稳定性和可靠性。

关键词: D08-32 捣固车; 激光电机; DSP; 激光准直系统; 电流斩波

中图分类号: U273

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.02.021

Design and Implementation of D08-32 Tamper Laser Motor Controller

ZHANG Baoming

(CRCC HIGH-TECH Equipment Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650215, China)

Abstract: In D08-32 tamper network control system, laser collimation system is used to improve the precision of linear tamper operation, and motor control is the key technology. In order to further improve the accuracy of laser collimation system, and improve the working efficiency, a laser power controller based on DSP was designed to realize laser motor PID overshoot control and overcurrent protection function. The general structure, software and hardware design of laser motor controller was introduced in detail. The verification and application shows that the controller has perfect function and good performance, which can reduce the application failure rate, and improve the stability and reliability of laser collimation system.

Keywords: D08-32 tamper; laser motor; DSP; laser collimation system; current chopping

0 引言

D08-32 捣固车激光准直系统包括激光发射器、激光接收器、激光电机控制器、激光电机和激光传感器。激光发射器产生并发射激光束; 激光接收器接收并处理激光束; 激光电机控制器控制激光电机电作, 实现自动跟踪作业。

激光电机是一款精密的直流电机, 在激光准直作业过程中, 需要根据激光的变化, 反复进行启动、停止、正转和反转, 激光电机的控制精度将对激光准直作业的精度起着关键性的作用。激光电机控制器是整个激光准直系统的核心装置, 是实现自动跟踪作业的关键

控制单元。

1 总体设计

激光电机控制器由处理器、功率驱动电路、电流采样电路、通信接口电路等组成。处理器采用 DSP 处理器, DSP 外设可输出用于电机控制的 PWM 信号, 以驱动电机功率控制的桥式电路。电流采样电路主要用于采集通过激光电机的电流, 通过 A/D 转换模块进行模数转换, 并直接读取转换后的数值, 用于实现电流显示及激光电机过流保护功能。位置检测电路反馈激光电机的位置, 实现激光电机的精确控制和激光自动跟踪功能, 以达到在 D08-32 捣固车上的激光准直精确作业的目的。激光电机控制器框图如图 1 所示。

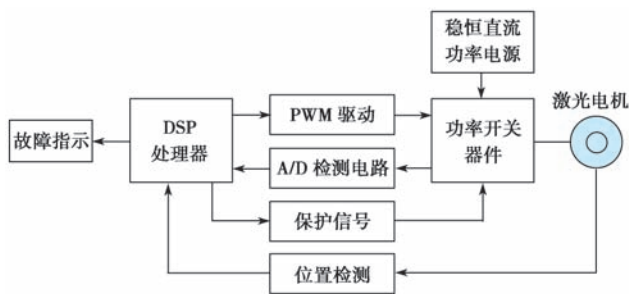


图 1 激光电机控制器框图

2 硬件设计

本控制系统主要分为功率变换器、电流检测、位置信号检测和控制单元，如图 2 所示。功率变换器采用非对称半桥结构。DSP 作为主控制芯片，采用了 ADC、DMA、I/O 口、EVA 和 PWM 等模块，用于数字和模拟信号的采集、计算和控制信号输出。在控制及反馈上，采用了 DSP 的 Timer 通道端口与内置在 SRM 内的霍尔位置传感器——相连，以采集转子的位置信息，并以此来计算 SRM 的转速。采用了 ADC 输入端口来连接霍尔电流传感器、霍尔电压传感器，以及内置霍尔传感器的调速旋钮所输出的转速给定信号。采用了 PWM 信号连接到功率变换器作为功率变换器的上开关管驱动信号，I/O 信号作为下开关管驱动信号。

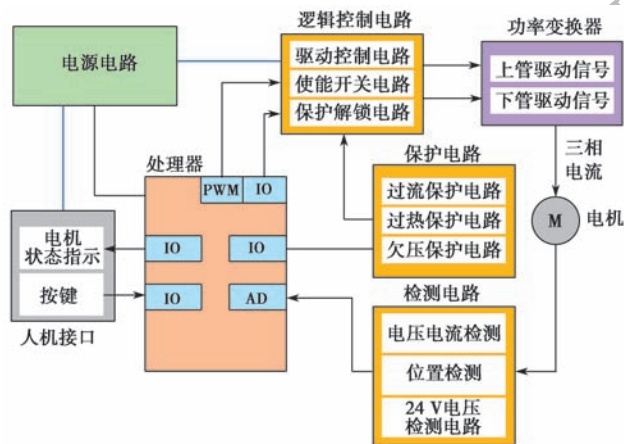


图 2 硬件设计框图

3 基本控制策略

开关磁阻电机基本控制策略主要包括电流斩波控制（CCC）、电压 PWM 控制、角度位置控制（APC）等 3 种控制策略。

3.1 电流斩波控制

电流斩波控制的一般方法就是保持开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 不变，通过主开关器件的多次导通和关断，进而将电流限制在某一值附近，借以控制转矩。电流斩波控制可分为电流上限控制和电流上、下限控制。电流斩波控制的优点是可限制电流峰值的增长，保护开关器件的安全，并起到良好有效的调节效果，因此适用于低速调速系统。

图 3 所示为电流上下限控制的电流斩波，在固定开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 之间，当相电流超过约定的上限电流值时，则主开关关断；当相电流低于约定的下限电流值时，则组合开关开通，从而实现电流斩波控制效果。

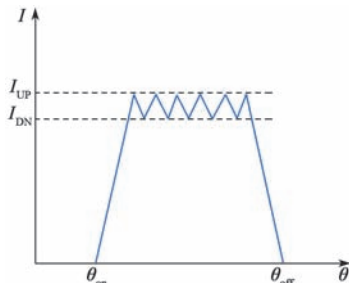


图 3 电流斩波控制（控制电流上下限）

3.2 电压 PWM 控制

电压 PWM 控制也是在保持开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 不变的前提下，通过调整占空比，来调节相绕组的平均电压，以改变相绕组电流的大小，从而实现转速和转矩的调节。电压 PWM 控制的特点是，通过调节相绕组电压的平均值间接地限制和调节相电流，因此既能用于高速调速系统，又能用于低速调速系统，而且控制也较简单。电压 PWM 波形如图 4 所示。

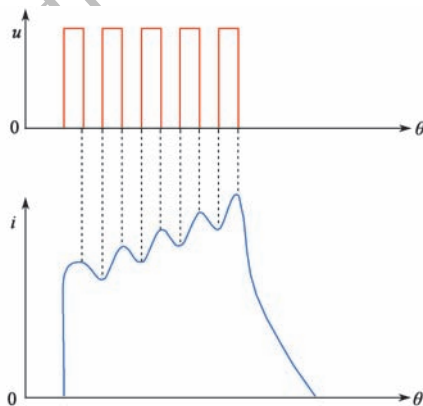


图 4 电压 PWM 控制

3.3 角度位置控制

角度位置控制是指对开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 的控制。它的实质就在于输入电压保持不变而通过改变主开关的开通角和关断角来调节电流，以达到调节电机转矩的目的。角度控制的优点是转矩调节范围较大，可允许多相同时通电，以增加电机输出转矩，可实现效率最优控制和转矩最优控制。但是角度控制不适用于低速，低速时电流峰值增大，必须进行限流，因此角度控制一般用于高速运行状态。

为了实现开关磁阻电机良好的调速性能，软件设计时采用了组合控制策略，即电机低速运行时，采用电流斩波控制方式；在中低速下，采用电压 PWM 控制方式；而在高速运行时，采用改变开通角关断角的角度位置控制方式。

4 软件设计

本软件设计平台是基于 DSP 处理器，采用 C 语言编程，实现模块化设计，并采用经典的前后台系统作

为软件框架，分为主程序和中断程序两部分。相较于现有的控制系统软件设计中的多中断程序，本软件设计仅采用了一个定时中断，程序更简洁，增加了程序的可读性及可移植性，同时也有利于程序的进一步扩充与完善。

现有控制系统软件中多数使用多中断设计，其中包括计算电机转速使用的捕获中断，获取电机位置使用 1 路或 2 路外部中断，电流采样时使用的 DMA 中断，以及 1~2 个定时中断，这些中断不仅增加了程序的复杂性，同时也降低了软件的可靠性。

在软件设计中，重点和难点就是如何获得较好的斩波效果，而软件设计的好坏直接影响了斩波效果的好坏。在现有的软件设计中，一般是将各相电流通过 ADC 采样，再经 DMA 通道传输，同时产生一个 DMA 中断，然后在一个定时中断（定时中断时间一般为 50~100 μs）中实现电流斩波。而这种设计会产生 2 个问题：其一，因为要实现其他功能，定时中断时间不能进一步缩短，而这对电流斩波而言，时间间隔又太长；其二，DMA 中断优先级要高于定时中断，这可能会导致定时中断的执行被 DMA 中断打断，进一步延长了电流斩波的时间间隔，会导致电流斩波效果进一步恶化。

4.1 主程序设计

主程序主要功能是对系统初始化、采集按键输入信息、定时执行保护、系统调速、换相控制等。主程序设计流程图如图 5 所示。

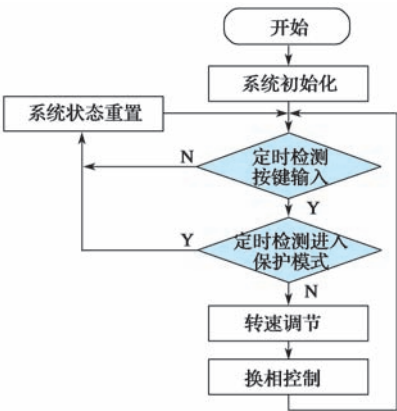


图 5 主程序流程图

4.1.1 模糊 PID 控制器算法实现

为了获得较好调速效果，本软件设计采用模糊自适应 PID 控制。模糊 PID 程序在主程序中循环调用，该模块输入参数为电机当前转速，输出参数为 PWM 变化率。进入模糊 PID 控制以后，程序首先采样当前的电机转速，将其与设定值比较，求得误差 e 和误差变化率 e_k ，然后将误差 e 和误差变化率 e_k 模糊化，查规则调整表，确定 PID 控制参数，最后解模糊 PID，调用 PID 计算出输出 PWM 控制量。

模糊自适应 PID 控制器结构是模糊控制器与传统 PID 控制器的结合，利用模糊推力判断的思想，根据不同的误差 e 及误差变化率 e_k 对传统 PID 控制器获得新的 K_p 、 K_i 、 K_d 进行在线自整定。传统 PID 控制器在获得新的 K_p 、 K_i 、 K_d 后，对控制对象输出控制量。

常规模拟 PID 控制如式（1）所示：

$$u(t)=K_p\left[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^te(t)dt+T_d\frac{de(t)}{dt}\right]+u_0\tag{1}$$

式中： K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数； u_0 为控制常量。

将式（1）离散化，得到本文采用的增量式 PID 控制算法公式：

$$u_k=\left(K_p+K_i+K_d\right)e_k-\left(K_p+2K_d\right)e_{k-1}+K_de_{k-2}\tag{2}$$

式中： $K_i=K_p\frac{T}{T_i}$ ； $K_d=K_p\frac{T_d}{T}$ 。

模糊自适应 PID 控制器对于系统被控过程中不同的 $|e|$ 和 $|e_k|$ ，PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的自整定原则如下：

- ①误差 $|e|$ 较大时，应加快系统的响应速度，使系统具有快速跟踪性能，应取较大 K_p 和较小 K_d 。同时，为了防止积分饱和，避免系统超调过大，应限制 K_i 或使其为零。
- ②误差 $|e|$ 和 $|e_k|$ 适中时，为使超调较小，应取较小 K_p ，适当选取 K_i 和 K_d ，特别是 K_d 的取值对系统影响较大。
- ③误差 $|e|$ 较小时，为使系统具有较好的稳态性能，应取较大 K_p 和 K_i 的值，为避免系统在平衡点附近出现震荡，应取适当的 K_d 值。
- ④ $|e_k|$ 较大时，取较小 K_d 值。
- ⑤ $|e_k|$ 较小时，取较大 K_d 值。

依据以上原则，模糊控制器采用以误差 e 和误差变化 e_k 作为输入，以 K_p 、 K_i 、 K_d 作为模糊输出的结构。输入模糊集论域为 $\{-500,-200,-50,0,50,200,500\}$ ；输出 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊集论域为 $\{-5,-3,-1,0,1,3,5\}$ ，对应语言变量为 $\{NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB\}$ 。 K_p 、 K_i 、 K_d 对应调整规则如表 1~ 表 3。

表 1 K_p 模糊控制规则

u	e_k						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PB	PM	PS	Z
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	Z
	NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS
	Z	PM	PM	PS	Z	Z	NS
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM
	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB
	PB	Z	NS	NS	NM	NM	NB

表 2 K_i 模糊控制规则

u	e_k						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NS	NS	Z
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z
	NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS
	Z	NM	NM	PS	Z	Z	PS
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	NM
	PM	Z	Z	PS	PS	NM	PB
	PB	Z	Z	PS	NM	NM	PB

表 3 K_d 模糊控制规则

u	e_k							
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
e	NB	PS	PS	PS	NB	NB	NM	Z
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
	NS	PM	PM	PM	PS	NS	NS	Z
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PS	Z	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	PM	PB	PS	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

4.1.2 保护模式

为了实现控制系统的稳定安全工作，本软件设计实现了多种保护模式，主要包括欠压保护、过流保护、电机过载保护、堵转保护等保护功能。

4.2 中断程序

本软件设计仅使用一个 10 μ s 定时中断，相较于现有控制系统软件的多中断程序更简洁。中断程序主要功能是实现定时器累加，获取电机位置、计算电机速度，计算转子角度及读取相绕组电流值并实现电流斩波功能。中断程序框图如图 6 所示。



图 6 中断程序流程图

4.2.1 定时器的功能

定时器功能实现是以中断程序为时间基准的。在主程序中，有定时按键输入检测及定时保护模式检测，而这些定时功能并未使用控制器的其他 TIM 模块实现，而是在 10 μ s 中断中定时累加，通过一个定时器函数实现。这一设计减小了软件对硬件的配置，同时可在主程序的任意位置进行定时功能。

4.2.2 电流斩波控制

电流斩波控制为中断程序中子函数处理程序。本软件设计中采用控制上下限的电流斩波方式。控制器 DSP 有 12 位的 AD 转换通道，可对电机各相绕组电流进行采样，将电流采样值与约定的电流上下限值比较，决定是否斩波，实现电流斩波功能。如图 7 所示，相

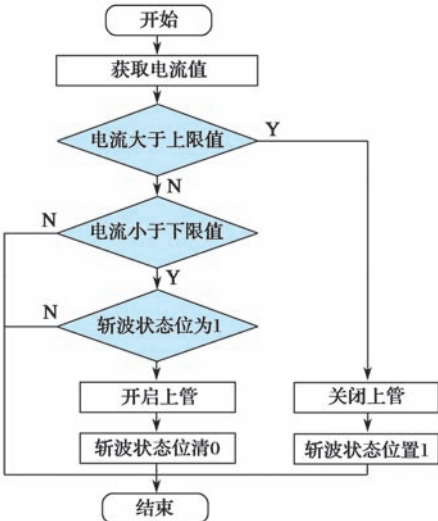


图 7 电流控制器程序流程图

电流如果大于参考电流 I_{ref} 和滞环宽度电流 I_{range} 的和，则马上关闭此相上管进行斩波；如果相电流小于参考电流与滞环宽度电流 I_{range} 的差，则判断此相是否在开通区间并且在斩波状态，是则开启此相上管（下管此时已是开启状态），不是则程序返回，不做任何操作。为了安全，需要斩波时不判断是否斩波过，而是只要电流满足条件就斩波；开启时候则需要更强的 3 种条件都满足，方能开启。

5 软启动算法设计

为了防止激光电机启动电流过大而引起检测电流过大而触发激光电机保护程序，特别设计了激光电机软启动功能，如图 8 所示。电机软启动分 3 个阶段：起始占空比保持阶段、占空比累加阶段、占空比最大输出界面，通过定时器控制各阶段的维持时间和平滑度，从而实现激光电机的软启动功能，对激光电机的保护起到了一定的作用。

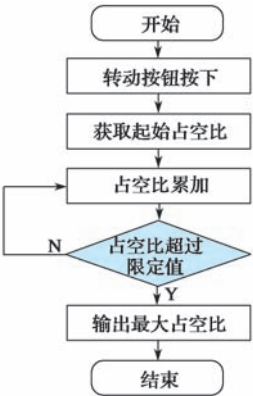


图 8 电机软启动程序流程图

6 测试结果与分析

为了检验该激光电机控制器在 D08-32 捣固车上对激光准直系统控制指标，对其进行了电磁兼容、振动冲击、交变湿热等型式试验。图 9 为电压 PWM 控制方式下的电流波形。

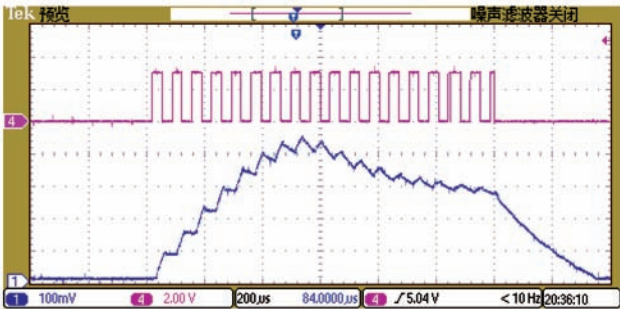


图 9 PWM 控制方式电流波形

经过以上条件进行测试，本装置运行状况良好，能够按预定策略完美运行，且能对控制系统实现所需的保护功能。充分说明了激光电机控制器经过精心设计，完全能够适应不同气候的恶劣环境。

该装置被成功应用于 D08-32 捣固车。在进行激光准直作业过程中，能实时快速响应来自激光接收器的激光信号并控制电机启动、停止、正转、反转，实时检测激光电机驱动电流，实现激光电机的保护功能。

7 结语

该装置的成功研制和现场装车应用，极大地提高了 D08-32 捣固车激光准直系统的控制（下转第 92 页）