

激光电源中 DSP 数字控制技术研究

吴政敏 黄维玲 马新敏 万 慧

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要:介绍了 DSP(Digital Signal Processor 数字信号处理器)在激光电源数字控制中的应用,针对连续固体激光器电源的特性与要求提出了以 TI 公司 24 × x 系列芯片 TMS320LF2407 为核心的数字 PID 控制系统的实现方案,并给出了相应的仿真结果。

关键词:TMS320LF2407, 激光电源, 数字控制

DSP digital controller in laser power supply

Wu Zhengmin Huang Weiling Ma Xinmin Wan Hui

(State Key Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract: This paper describes the use of Digital Signal Processor in controlling laser power supply. A digital PID controller based on TMS320LF2407 is introduced into the controller of the power supply of solid - state laser with continuous wave. Simulated results are provided.

Key words: TMS320LF2407, laser power supply, digital control

1 引言*

近年来,各种各样的激光器已广泛用于工业加工领域,如激光切割、激光打标、激光热处理等。其中对整机起重要作用的激光电源仍然普遍采用模拟控制方式,手动调节电流。由于系统的动态响应时间为几十毫秒,对于弧光放电的较高频率扰动,这种方式无法做出准确的响应,降低了光束的品质,限制了激光的应用场合。另外,当加工过程中需要调整激光输出的功率时,只能由手动调节,而无法用计算机实现同步控制,降低了加工工艺、加工精度和自动化程度。随着功率电子器件的发展,再加上微机技术的不断提高和推广,促进了微型计算机测量与控制技术的迅速发展和广泛应用。这里将以 TI 公司的新型 DSP 芯片 TMS320LF2407 为核心的数字控制系统引入激光电源,发挥其运算速度快、数字信号处理能力强的特点,可以实现各种复杂控制功能,同时简化了激光电源控制部分的硬件结构,增强了自动化程度和功能扩展能力。可以方便的实现对激光电源的计算机控制与管理。

2 激光电源工作原理

该电源原理框图如图 1 所示,来自电网的三相交流电经电网滤波后可得 300V 直流电压,供给 BUCK 直流功率变换器。由 DSP 提供脉宽调制信号经隔离驱动电路驱动 BUCK 变换器的 IGBT 模块产生高频方波电压,然后经输出滤波电路得到氙灯需要的直流电压。由于氙灯的动态内阻很小,且随着弧光放电的扰动而产生随机性的波动,电源一般采用恒流电路,我们用响应速度为微秒级的霍尔电流传感器作为输出电流反馈器件,以强制把 BUCK 变换器开环的恒压特性转变为闭环的恒流特性。DSP 对输出电流进行采样反馈,根据输出电流的微小变化,由程序不断调节 IGBT 工作波形的脉冲宽度,从而实现输出的稳流。同时通过保护电路对 IGBT 模块及氙灯进行保护。

3 实现的可行性分析

TMS320LF2407 是 TI 公司 24 × x 系列的 16 位定点运算芯片。由于内核采用哈佛结构,流水线操作,大大提高了指令执行速度,在内部时钟为 30MHz 时,指令周期仅为 33ns。优化的 CPU 结构,更加快了指令执行速度。大部分计算指令均可以在一个周期内完成,即 33ns。这为复杂控制算法的实现提供了良好的条件。TMS320LF2407 的指令系统提供了丰富的“乘累加”指令,这使数字滤波,如 IIR、FIR 等,实现方便

快速。TMS320LF2407 芯片内部有 2.5K 字的数据/程序 RAM, 32K 的 FlashE2 PROM;对于一般的控制应用,不需外扩数据/程序存储器,简化了系统结构。外设包括两个优化的事件管理器,用于产生 12 路 PWM 输出,16 路 10 位 A/D 变换器(转换时间 500ns),一个看门狗定时器,一个串行通信接口(SCI),一个串行外设接口(SPI)和 40 路 I/O 口。

激光电源对输出电流的稳流精度要求较高,电流纹波要求在 0.5% 以内,这就要求数字控制系统的 AD 转换部分反映出输出电流的微小变化。由于 TMS320LF2407 片内 AD 转换只有 10 位(在参考电压为 3.3V 时,分辨率为 3.3mV)在低输出电流的情况下达不到精度要求,这里可以采用过采样和 FIR 滤波^[1],提高 AD 转换精度,当采用 16 倍的过采样率时,即可达到 13 位的 AD 转换精度,满足系统要求。其次系统要求 DPWM 输出可以实现对输出脉宽的微小调整,TMS320LF2407 的 DPWM 最小调节单位为 33ns,在开关频率为 20kHz 时,DPWM 分辨率为 1/1515 (55μs/33ns),完全满足精度要求。

在系统保护功能上,TMS320LF2407 内部集成的看门狗定时器如果在给定的时间内没有接到归零指令,就会使系统复位,从而可以防止系统处在死机状态或程序受某种干扰而跑飞,提高了系统的抗干扰能力。同时,外接硬件保护电路检测到输出电流电压出现过流过压时,将 TMS320LF2407 的引脚 PDPINT(Power Drive Protection Interrupt 驱动保护)拉低,使 PWM 输出端口处于高阻状态,从而封锁输出信号,引起系统中断,由软件作相应的处理,保护 IGBT 模块及氙灯。

4 控制系统分析与设计

电源控制系统方框图如图 2 所示,虚线框内为 DSP 实现部分,包括数字控制器、AD 转换、数字脉宽调制。激光电源主电路相当于一个等效的无变压器降压型直流功率变换电路,即图中的 BUCK 变换器。AD 转换完成对输出电流采样,数字控制器根据参考电流值与输出电流采样值确定占空比,经数字脉宽调制部分输出,来调节 BUCK 变换器的输出电压,从而实现输出电流的稳流。该系统从参考到输出的闭环数字传递函数 $C(z)$ 为

$$C(z) = \frac{C(z) * Z\{K_{pwm}(s) G_{fd}(s)\}}{1 + C(z) * Z\{K_{pwm}(s) G_{fd}(s) G_{vd}(s)\}} \quad (1)$$

根据电流连续导通模式下 PWM 控制 BUCK 型直流功率

* 2003 年 3 月 2 日收稿
作者简介:吴政敏,男,(1979 -),现为华中科技大学硕士研究生。

变换器“小信号等效电路模型”的原则得到激光电源主电路的等效电路图如图 3 所示。我们可以推导出从控制到输出电流的传递函数⁽²⁾：

$$G_{id}(s) = \frac{I_{out}(s)}{D(s)} = \frac{V_{out}(s)}{R \cdot D(s)} = \frac{V_i}{R} \frac{1}{LCs + sL/R + 1} \quad (2)$$

$L = 1\text{mH}$ $C = 2200\mu\text{F}$

这里 $I_{out}(s)$ 、 $V_{out}(s)$ 分别为输出电流、输出电压, $D(s)$ 为 PWM 信号的占空比, V_i 为三相 220V 交流电经半桥整流后得到的直流电压, 在 $300 \times (1 \pm 15\%) \text{V}$ 内变化。L、C 为 BUCK 功率变换器 LC 滤波网络的参数。R 为氙灯处于工作状态时的等效电阻, 在 $(5.6 \sim 7.6)$ 范围内变化。

数字脉宽调制部分的传递函数为

$$K_{pwm}(s) = K_{pwm} * e^{-sT_{pwm}} \quad (3)$$

$K_{pwm} = 1/1515$

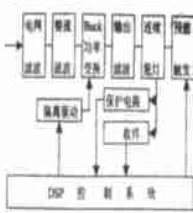


图 1 DSP 控制激光电源原理框图

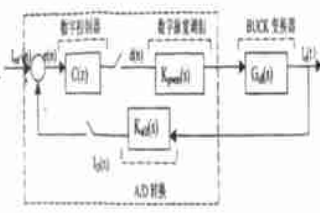


图 2 电源闭环控制系统方框图

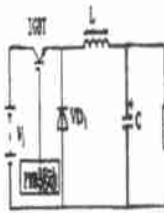


图 3 主电路等效电路图



图 4 定时器中断流程图

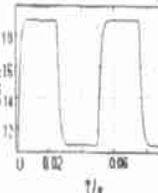


图 5 参考电流变化仿真结果

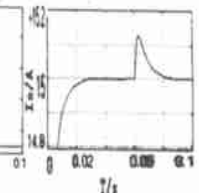


图 6 输入电压变化仿真结果

$$H(z) = \frac{6.0697 e^{-4} (z + 0.9991)}{z^2 - 1.996z + 0.9974} \quad (6)$$

$$H(z) = \frac{4.4865 e^{-4} (z + 0.9986)}{z^2 - 1.995z + 0.9959} \quad (7)$$

由于随着注入氙灯电流的变化,氙灯动态电阻也在改变,因此为了使电源能在输出电流的任一值下都稳定工作,要求控制电路的动态校正部分有较大的稳定裕量。这里采用数字 PID 控制器,其 Z 域表示形式如式(9)所示, T_s 为系统取样时间,对应于开关频率为 20KHz,这里取 T_s 为 0.00005s。 K_p 为比例系数, K_i 为微分系数, K_d 为积分系数。

$$C(Z) = \frac{D(z)}{e(z)} = K_p + K_i \frac{T_s}{1 - z^{-1}} + K_d \frac{1 - z^{-1}}{T_s} \quad (9)$$

则根据零极点对消原则选择使系统稳定的 K_p 、 K_i 、 K_d ,即使式 9 的零点与式 6 和 7 的极点相抵消,对应于式 6 和 7 所得的值不同,这里在二者之间取一折中值,然后根据系统的调节时间和超调要求调节 K_p 。最终由 MATLAB 仿真确定 $K_p = 3.2$, $K_i = 573$, $K_d = 6.055e - 3$ 。

5 软件设计

系统软件分为两部分,主程序和中断响应子程序,其中主程序实现对系统的初始化,软启动,控制高压点火。在系统启动时,通过缓慢增加占空比来实现系统的软启动,保护 IGBT 模块。主要控制功能均利用中断实现,保证系统响应的实时性。中断响应子程序包括定时器周期中断、SCI 通讯中断、硬件中断。定时器中断周期性的启动 AD 转换,获取输出电流新的采样值,计算新的占空比,并输出新的占空比,计算流程图如图 4 所示。硬件中断实现对系统的快速保护。SCI 中断实现与上位机的通信。

这里 K_{pwm} 为 DPWM 的分辨率,1515 为数字表示的 PWM 周期(50μs/33ns), T_{pwm} 为 DPWM 部分的延时。

A/D 转换部分的传递函数为

$$K_{a/d}(s) = K_{a/d} * e^{-sT_{a/d}} \quad (4)$$

$K_{a/d} = 31$

$K_{a/d}$ 为 AD 转换的增益,即输出电流 1A 对应于数字量 31。 $T_{a/d}$ 为 AD 转换部分的延时。综合以上几个传递函数可以得到系统模拟部分的离散传递函数为

$$H(z) = Z\{K_{pwm}(s) * G_{id}(s) * K_{a/d}(s)\} \quad (5)$$

对控制系统的两种极端运行状态(最大输入电压 345V/最小输出电流 7A、最小输入电压 255V/最大输出电流 30A)时, $H(z)$ 依次如式(6)、(7)所示：

6 仿真结果与分析和结论

根据以上分析,利用 MATLAB 和 SIMULINK 仿真该控制系统参考电流和输入电压发生变化时系统响应。结果如图 5、图 6 所示。由图 5 可以看出在输入电压 300V 时,参考电流值发生变化时,系统的动态响应时间在 10ms 之内。由图 6 可得系统在输入电压升高时的响应时间在 20ms 之内,超调量小于 1%。

本文分析了 DSP 芯片 TMS320LF2407 在激光电源中的应用,并根据现有的激光电源,设计了一套数字控制器。仿真结果表明,采用数字控制方案完全可以达到激光电源的稳态精度要求,改善了系统的动态性能,同时简化了硬件电路设计,而且由于采用了数字控制,与上位机通信更加方便。本文的研究工作为用 DSP 实现激光电源的数字控制提供了设计依据。此外当参考电流为由激光强度反馈所确定的数字电流值时,可以实现对激光强度的稳定数字控制。

参考文献

[1] 胡广书. 数字信号处理,北京:清华大学出版社,1999
[2] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,1998
[3] Boudreaux, R. R.; Nelms, R. M.; Hung, J. Y. Simulation and modeling of a DC - DC converter controlled by an 8 - bit microcontroller. APEC, 1997
[4] Y. Duan and H. Jin. Digital controller design for switchmode power converters. Conference Proceedings of the Fourteenth IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999
[5] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析. 北京:清华大学出版社. 2000 年