

高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统设计

于德洋, 郭立红, 陈 飞, 孟范江, 杨贵龙, 邵明振

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 随着高功率 TEA CO₂ 激光器技术的快速发展, 及其在工业加工、科学研究、航空航天等领域的广泛应用, 对其自身控制系统也提出了更高的性能要求。针对所研制的高功率 TEA CO₂ 激光器, 设计了一种基于 DSP 数字信号处理器技术的控制系统, 分别从硬件、软件两方面对控制系统的核心单元做了详细的介绍; 为了克服激光器在工作过程中产生的强电磁干扰, 对控制系统采取了屏蔽箱体结构、电源滤波、安全接地、数字滤波、关键数据存储自恢复、抗复位干扰等设计。经过激光器长时间运行试验, 控制系统工作稳定、可靠, 控制响应速度快, 同时满足了抗强电磁干扰的设计要求, 具有很好的实用和推广价值。

关键词: TEA CO₂ 激光器; DSP; 控制系统; 电磁干扰

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0705002

Design of control system for high-power TEA CO₂ laser

Yu Deyang, Guo Lihong, Chen Fei, Meng Fanjiang, Yang Guilong, Shao Mingzhen

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: As the rapid development of high-power TEA CO₂ laser technology and its extensive application on industrial production, scientific research, aeronautics and astronautics and other fields, higher performance demand on control system for high-power TEA CO₂ laser was put forward. A control system based on Digital Signal Processor(DSP) was designed for the high-power TEA CO₂ laser, and the core module was introduced on hardware and software in detail. To overcome the severe electromagnetic interference generated during the working process of laser, shielding enclosure, power filter, safety ground, digital filter, storage and recovery of critical data, resisting reset interference and other designs were taken measure on the control system. After long term run-time test on the high-power TEA CO₂ laser, the control system works stably and firmly, controlling and responding quickly, meanwhile satisfying the design request of resisting strong electromagnetic interference, with good application and popularization value.

Key words: TEA CO₂ laser; DSP; control system; electromagnetic interference

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-14

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究课题(SKLLIM1413)

作者简介: 于德洋(1988-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事激光器精密控制及其电子学技术方面的研究。Email: yudeyang830@163.com

0 引言

随着现代科学技术的进步,以激光器为基础的激光技术得到了迅速发展,在工业加工、航空航天、雷达探测、电子仪表等领域取得了重大应用。高功率 TEA CO₂ 激光器因其脉冲能量高、重复频率高、大气传输特性好等特点,是当前研究和应用最为广泛的高功率激光器之一^[1-4]。

高功率 TEA CO₂ 激光器是一种由机械结构、激光光学、高压充电电源、脉冲功率、自动控制、气体动力学、密闭真空、热交换和制冷等多学科技术交叉的大型高功率气体放电激光设备。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的高功率 TEA CO₂ 激光器采用了高压直流放电激励、脉冲重复频率工作模式,激光工作介质由 CO₂、N₂ 和 He 三种气体按照一定比例混合而成,在真空密闭环境下工作。激光器通过高频高压开关电源对储能电容进行充电,触发系统对高功率氢闸流管进行开关控制,从而在回路中产生放电脉冲;气体放电包括紫外预电离火花放电和“张氏电极”辉光放电,最后通过光学谐振腔使激光振荡放大定向输出。

高功率 TEA CO₂ 激光器对自身控制系统有着较高的性能要求:需要实时采集和监测激光器压力、温度、风机转速、高压电源电压、电流等参数,对

激光器各单元运行情况监测和控制,同时为各单元提供配电。目前高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统主要以可编程控制器、单片机等器件作为控制核心,其中,可编程控制器使用方便、维护简单、抗电磁干扰能力强,但其控制功能、数据处理功能较少、成本较高、运算处理速度慢,不适用于快速实时的现场控制应用;单片机虽然控制、运算处理能力优于可编程控制器,但其高精度实时控制和数据处理运算能力一般^[5-6]。

在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统中,选取了 TI 公司的数字信号处理器 TMS320F2812 作为主控芯片,该芯片具有较高的运算处理速度和丰富的控制接口、通信接口等片上外设资源,能有效提高控制系统运算处理能力、系统响应时间和硬件资源利用率。

高功率 TEA CO₂ 激光器的核心工作过程是对储能电容器进行连续高电压、大电流脉冲充放电,在气体放电的过程中会产生非常强的电磁脉冲,对电控系统形成强电磁干扰,因此,控制系统的抗电磁干扰设计尤为关键,直接关系到激光器系统的可靠、安全运行^[7-8]。

1 控制系统总体方案设计

图 1 为基于 DSP 的高功率 TEA CO₂ 激光器控

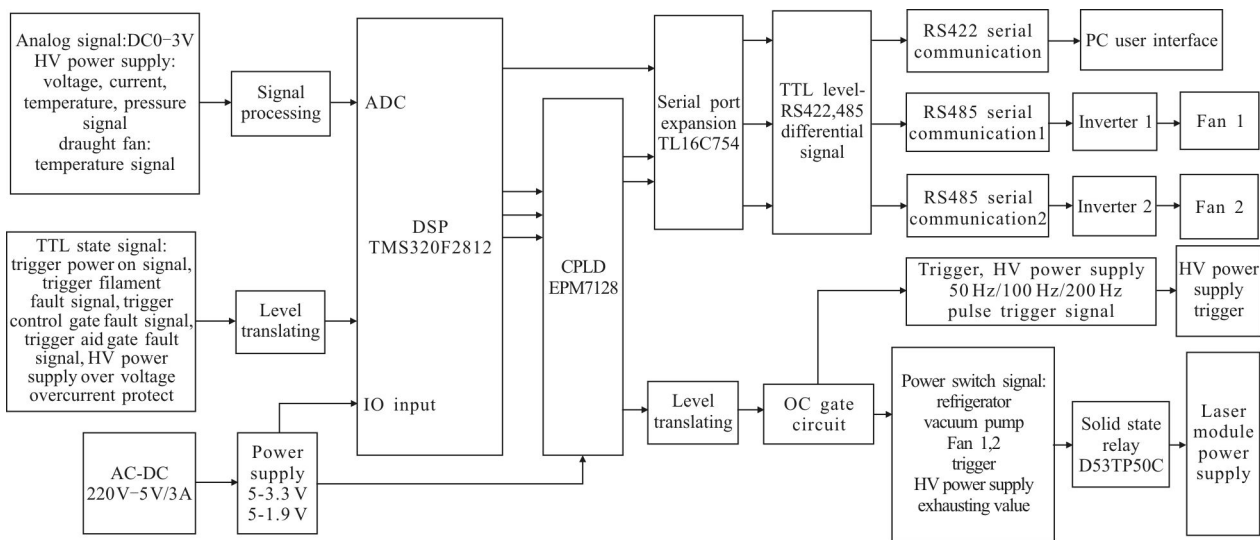


图 1 TEA CO₂ 激光器控制系统组成结构图

Fig.1 Main configuration of TEA CO₂ laser control system

制系统组成结构图。控制系统主要由 DSP 芯片、IO 扩展 CPLD 芯片、信号采集调理电路、电平转换电路、芯片供电电路、OC 门驱动电路、TL16C754 并行转 RS-422、RS-485 串行通信接口电路、上位机软件操作界面几部分组成。其中上位机与电控单元通过 RS-422 串口进行通信，电控单元通过 DSP 芯片采集、处理和上传激光器电压、电流、腔压、腔温、轴温和各开关量信号等运行参数，同时对激光器系统提供配电，总配电功率 30 kW；上位机实时显示和监测激光器运行状态，可以根据需要在上位机界面里选取 50、100、200 Hz 三种不同的激光发射频率。

2 控制系统硬件设计

2.1 AD 信号采集处理设计

在激光器运行过程中，需要实时地采集和监测激光器温度、压力、高压电源电压、电流等信号量，通过 DSP 芯片外设 ADC 接口将温度传感器、压力传感器和高压电源采集的模拟信号量转换成数字量，然后进行相应运算处理得到实际的真实测量值，并通过串口通信远程传输至上位机界面显示。

高压电源单元上传的输出电压、电流信号量是 0~3 V 模拟量，对应电压、电流量程范围分别为 0~40 kV 和 0~1 A。通过 DSP 芯片 ADC 外设接口采集高压电源电压、电流两路模拟信号量，转换成数字信号量，并进行对应量程关系运算转换，即可得到实际的高压电源电压、电流值。

激光器腔内压力测量选取的是上海天沐公司生产的 0.1 MPa 量程 NS-P-I 型压力传感器，输出为 0~5 V 电压信号量。图 2、图 3 分别为压力传感器实物图以及在激光器上的安装位置图。



图 2 压力传感器实物图

Fig.2 Real object of pressure sensor

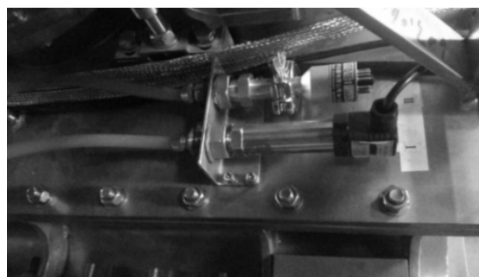


图 3 压力传感器安装位置图

Fig.3 Mounting position of pressure sensor

激光器腔温、腔风机轴温、线圈温度通过 PT100 传感器进行测量，选取了上海辰竹仪表公司生产的 CZ3079 型隔离温度变送器，将 PT100 阻值转换成 1~5 V 电压信号量，经过电阻分压转换为 0.5~2.5 V 电压信号，最后输入至 DSP 芯片 ADC 采样端口。图 4、图 5 分别为选取的 PT100 温度传感器实物图以及测量激光器腔温的传感器安装图。



图 4 温度传感器实物图

Fig.4 Real object of temperature sensor



图 5 温度传感器安装位置图

Fig.5 Mounting position of temperature sensor

2.2 IO 扩展 CPLD 电路设计

由于激光器控制系统需要采集和驱动的信号量较多，DSP 芯片自身 IO 引脚资源有限，因此需要对其 IO 引脚进行扩展。在设计中选取了 Altera 公司的 EPM7128 CPLD 芯片进行 IO 扩展，如图 6 所示，DSP 芯片 8 位数据总线，6 位地址线，读写控制引

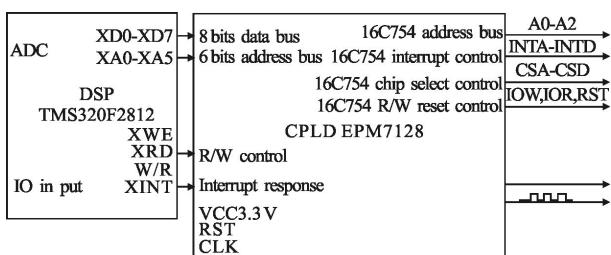


图 6 DSP 与 CPLD 接口扩展电路图

Fig.6 Interface expansion circuit of DSP and CPLD

脚、中断响应引脚分别与 CPLD 芯片相连，通过 CPLD 内部译码电路实现接口扩展、与 TL16C754 芯片串行通信、产生 8 路开关量驱动信号和 2 路脉冲触发信号的功能。

3 控制系统软件设计

3.1 上位机软件设计

控制系统上位机软件可以实时监测和控制激光器运行情况,显示激光器高压电源电压、电流、腔温、轴温、腔内压力等参数值,同时对风机、触发电源、高压电源等单元进行故障检测和显示。上位机软件界面的设计及数据通信处理由 Microsoft Visual Basic 编写完成,操作界面如图 7 所示。



图 7 激光器上位机操作界面图

Fig.7 PC user interface of TEA CO₂ laser

3.2 基于 Modbus 协议的变频器远程通信设计

在激光器控制系统设计中,两台变频器选取了 ABB 公司生产的 160 kW ACS510 型变频器,DSP 芯片基于 Modbus 协议,与两台变频器分别通过 RS485 串行总线进行远程通信控制。DSP 与变频器远程通信流程设计如下。

变频器初始化操作:向 Modbus 40001 寄存器中

写入 1142,延时 200 ms;

启动电机:向 Modbus 40001 寄存器中写入1151,延时 20 ms;

停止电机:向 Modbus 40001 寄存器中写入1143,延时 20 ms。

4 抗电磁干扰设计

激光器工作时产生的强电磁干扰对控制系统的影响主要体现为:发射激光过程中,控制系统 DSP 芯片受到干扰自动复位,使激光器系统突然停机,对风机、电源等设备造成冲击损害;操作界面显示参数出现跳变、乱码,无法正常监测激光器各单元运行状态;在软件界面中对激光器进行运行操作,系统无响应、不受控制等干扰现象。下面主要从硬件、软件两个方面介绍控制系统的抗电磁干扰设计。

4.1 抗干扰硬件设计

控制系统硬件抗干扰主要采取了屏蔽箱体外壳、输入供电接入电源滤波器、系统安全接地等方法。其中,控制系统外壳设计采用了屏蔽箱体结构,利用密封衬垫、铍铜指形簧片等材料对箱体的缝隙、开门处进行了电磁密封设计;供电系统的电源线传导发射是系统的主要干扰源之一,在供电输入端加入了电源滤波器,由于其阻高频、通低频的特性,可以有效切断电磁干扰能量的传播路径;激光器系统中的各种供电、控制、信号、通信线缆均采用了编织丝网和金属箔组合的屏蔽封装电缆,电缆本身屏蔽层良好接地,可以将干扰电流引入大地,从而保证电缆内部线芯不受电磁干扰;最后,对激光器系统进行良好的安全接地设计,各单元接地点汇于大地,有效减小各单元之间的地环路电磁干扰^[9-10]。

4.2 抗干扰软件设计

针对激光器在出光发射过程中对系统自身产生的强电磁干扰现象,主要设计了以下几个软件抗干扰模块:采样数据数字滤波处理、关键数据存储自恢复、抗复位干扰模块。

采样数据数字滤波处理主要是针对控制系统采集到的腔温、腔压、电压、电流等模拟量信号,由于电磁干扰,可能在传感器采集和向控制系统传输过程中发生变化,通过限幅滤波对干扰部分信号进行滤除。根据实验估算确定连续两次 AD 采样的最大接受变化量 x , 如果新采集的测量值与上一次测量值

变化量超过 x , 则输入信号可能存在干扰, 采样值仍采用上次的测量值; 如果变化量不超过 x , 则认为所采集信号为正常测量值。

关键数据存储自恢复主要原理是: DSP 芯片在运算控制过程中会产生和采集到大量的数据, 其中一些是关键数据, 这些数据反映了激光器当前的运行状态。关键数据一旦受到干扰, 有可能导致激光器系统失控。根据 EEPROM 存储抗干扰能力强的特点, 将关键数据以冗余的方式存放在物理地址上分开的数据存储区内和 EEPROM 中, 以进行关键数据备份。在控制系统程序运行时, 关键数据实时更新、存储备份, 如果检测到关键数据损坏, 则用 EEPROM 中的备份数据进行恢复。

抗复位干扰模块用于保证若控制系统非正常复位, 在启动后仍能保证复位前的工作状态, 使激光器正常工作。抗复位干扰模块流程图如图 8 所示。

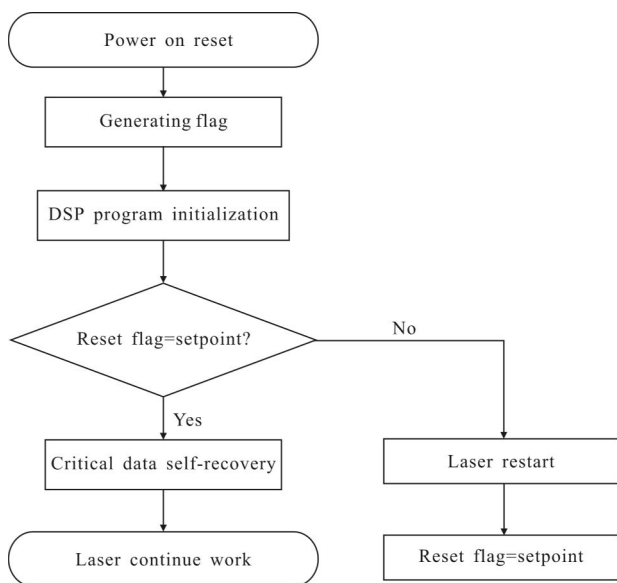


图 8 抗复位干扰模块流程图

Fig.8 Flow chart of interference rejection module

5 结 论

文中结合高功率 TEA CO₂ 激光器的主要组成结构和工作原理, 设计了一种基于 DSP 数字信号处理器的激光器控制系统, 介绍了该控制系统的总体方案设计、硬件电路设计和软件设计; 针对高功率 TEA CO₂ 激光器在工作过程中产生的强电磁干扰现象, 对控制系统采取了屏蔽箱体结构、电源滤波、安

全接地、数字滤波、关键数据自恢复、抗复位干扰等设计。

经过对比试验发现, 控制系统未采取抗电磁干扰设计前, 激光器在出光运行中会有激光发射中断、控制界面操作无响应、参数跳变等电磁干扰现象; 对控制系统实施了软、硬件抗干扰设计后, 通过激光器长时间出光试验, 控制系统工作稳定、可靠, 利用能量计测得激光器单脉冲能量 5.3 J, 利用功率计测得激光器在 200 Hz 重复频率工作下, 出光功率可以达到 1 000 W 以上。

控制系统由于选取了数字信号处理器 DSP 以及固态继电器等电子器件, 与基于 PLC 控制、采取继电器接触器作为主配电回路控制器件的老式高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统相比, 体积、重量大幅减小, 控制响应速度快, 稳定性高, 具有很好的实用和推广价值。

参 考 文 献:

- [1] Yang Guilong, Li Dianjun, Xie Jijiang, et al. High power repetitive TEA CO₂ pulsed laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(7): 1173-1176.
- [2] Zheng Yijun, Tan Rongqing, Wang Donglei, et al. Novel high repetition-rate pulse CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2697-2701. (in Chinese)
郑义军, 谭荣清, 王东雷, 等. 新型高重复频率脉冲 CO₂ 激光器[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2697-2701.
- [3] Zhang Kuo, Lu Jun, Yang Guilong, et al. Estimation of far-field divergence of high power TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2286-2291. (in Chinese)
张阔, 陆君, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光远程发散角评估方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2286-2291.
- [4] Zhang Xingliang, Guo Lihong, Meng Fanjiang, et al. Application of series resonant charging technology to trigger system for rotated spark switch [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1416-1423. (in Chinese)
张兴亮, 郭立红, 孟范江, 等. 谐振充电技术在火花开关触发系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1416-1423.
- [5] Wang Lingfang, Zhang Xiaolu, Tang Ling, et al. Design of kJ pulse laser control system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 1-3. (in Chinese)
王凌芳, 张晓璐, 唐菱, 等. kJ 脉冲激光器控制系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 1-3.
- [6] Meng Fanjiang, Yang Guilong, Li Dianjun, et al. Design of

- control system for high-power pulsed TEA CO₂ laser [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(8): 843–846. (in Chinese)
- 孟范江, 杨贵龙, 李殿军, 等. 大功率脉冲 TEA CO₂ 激光器控制系统设计[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 843–846.
- [7] Meng Fanjiang, Guo Lihong, Yang Guilong, et al. Suppression of electromagnetic interference in high power TEA CO₂ laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 177–181. (in Chinese)
- 孟范江, 郭立红, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器系统中电磁干扰的抑制[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 177–181.
- [8] Zhang Xingliang, Guo Lihong, Zhang Chuansheng, et al. Design of high-voltage pulse trigger system for CO₂ laser [J]. *Chinese Optics*, 2012, 8(4): 416–422. (in Chinese)
- 张兴亮, 郭立红, 张传胜, 等. CO₂ 激光器高压脉冲触发系统的设计 [J]. 中国光学, 2012, 8(4): 416–422..
- [9] Ge Xinhong, Guo Lihong, Meng Fanjiang, et al. Electromagnetic radiation test of high-power TEA CO₂ laser and its shielding cabin design [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 15(5): 983–991. (in Chinese)
- 葛欣宏, 郭立红, 孟范江, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器的电磁辐射测试及屏蔽方舱设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 15(5): 983–991.
- [10] Ge Xinhong. Research on electromagnetic compatibility design technique for electro-optical jamming system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 81–110. (in Chinese)
- 葛欣宏. 光电系统的电磁兼容设计技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 1–11.