

文章编号 1674-2915(2011)04-0411-07

基于 DSP 的高功率 TEACO₂ 激光器控制系统的高精度数据采集

王鹤淇^{1,2} 孟范江¹ 郭立红¹ 管目强^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对基于 DSP 的高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统直接利用 DSP F2812 内置 A/D 转换器(ADC)进行模拟量采样时存在转换误差较大,且模拟量易受电磁干扰等问题,从硬件和软件两个角度提出了校正 DSP2812 内置 ADC 的方法。硬件上采用硬件模拟滤波和隔离等手段对输入的模拟量进行处理;软件校正则通过将两路给定的参考电压值送入 DSP F2812 内置 A/D 转换器的两个转换通道,计算出 ADC 的偏置误差和增益误差,以此误差对其它通道 A/D 转换器进行校正。最后,实验分析了参考电压和 A/D 采样时钟频率对 A/D 转换精度的影响。结果表明,提出的方法能有效地提高 A/D 转换器的精度,A/D 转换误差达到 ± 3 LSB,特别是在对腔压值精度要求很高的 0~12 000 Pa 区段,A/D 转换精度达 ± 1 LSB,可以保证 TEA CO₂ 激光器的可靠运行。

关键词:高功率 TEA CO₂ 激光器;数据采集;DSP F2812;A/D 转换;误差校正

中图分类号:TN248.2;TP274 文献标识码:A

High precision data acquisition of control system for high-power TEA CO₂ laser based on DSP

WANG He-qi^{1,2}, MENG Fan-jiang¹, GUO Li-hong¹, GUAN Mu-qiang^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: It shows larger conversion errors and stronger electromagnetic interference when the AD converter (ADC) built in DSPF2812 of the control system for a high-power TEA CO₂ laser based on the DSP is used to acquire analog signals. To overcome the backcomings, a method to correct the ADC built in the DSPF2812 was proposed based on both the hardware and software. In hardware processing, the analog filtering and isolation module were adopted to process the input analog signals and the median average filtering method was used to eliminate the occasional glitch. With software correction, two given reference voltages were sent to the two channels of the A/D converter of the DSPF2812 to calculate the offset error and gain error, then it was used to

收稿日期:2011-05-21;修订日期:2011-07-23

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM0902-01)

correct other channels of the A/D converter. Furthermore, the impact of the reference voltage and A/D sample clock on the A/D conversion precision was analyzed by experiments. The experimental results show that the method can improve the precision of the A/D converter effectively. The A/D conversion error has been within 3 LSB, which can ensure the stability and reliability of data acquisition for the control system in high-power TEA CO₂ lasers.

Key words: high-power TEA CO₂ laser; data acquisition; DSP F2812; A/D conversion; error correction

1 引言

TMS320F2812 是美国 TI 公司推出的一款 32 位高集成度、高性能数字信号处理器 (DSP)^[1]。该处理器采用哈佛结构,具有主频高达 150 MHz 的高性能 CPU 以及丰富的外设接口,在电机控制、工业自动化控制、电力转换等领域得到了广泛应用。TMS320F2812 内部集成了 12 位带流水线的 A/D 转换(ADC)模块,带有 2 个采样和保持器(S/H),支持同步和顺序采样,具有 16 个转换通道和快速的转换时间(ADC 时钟最高可配置为 25 MHz,最高采样频率为 12.5 MHz)。

高功率 TEA CO₂ 激光器是一种高电压脉冲激励类型的气体激光器,是一个集光、机、电于一体的大型设备,包括大功率高压电源、脉冲大电流放电系统、高速风机系统、高真空密封腔体^[2]。仪器工作时必须保持工作气体成分、气压、电压以及温度的动态稳定,因此,其控制系统在运行中要对系统中的电压、电流、气压、温度、气比等多种模拟参量进行实时监测和反馈调整^[3];同时,由于其工作时进行高电压、大电流脉冲放电会产生强烈的电磁干扰^[4~6],这些强电磁干扰会影响模拟量采集,从而影响激光器的正常工作。用 DSPF2812 作为激光器控制系统的核心时,如果直接利用其内置的 ADC 对模拟量进行采样,在不考虑电磁干扰的情况下,则仅 ADC 本身的转换误差就较大,若直接使用采样的结果数据,会造成激光器系统不能正常工作。为了获得高精度的模拟量数据,本文从硬件和软件角度提出了 DSP2812 内置 ADC 的校正方法。对受到电磁干扰的模拟信号采取抗干扰措施,包括硬件上采用模拟滤波和隔离模块滤除干扰信号;软件上利用校正方法和中位值平均滤波方法对数据进行处理,从而获得了

较高的数据采集精度。

2 提高 A/D 转换精度的硬件措施

提供稳定的模拟量信号是准确进行 A/D 转换的前提。激光器进行脉冲放电时产生的强烈电磁干扰会对送入 A/D 转换器的模拟量叠加一些高频干扰信号,因而采用低通滤波和隔离是有效的方法之一^[6]。本激光器控制系统的设计是使用电压分压器,把高压电源电压 0~40 kV 的高电压减少至 0~40 V,然后进行硬件 RC 低通滤波,再运用隔离接口模块把 0~40 V 的电压变成 0~3 V,其电路如图 1 所示。同时使用电流互感器把高压电源电流 0~400 A 的大电流转变为 0~5 A,然后进行硬件 RC 低通滤波,接着用模拟隔离接口把 0~5 A 转换为 0~3 V。对于气压和温度的测量也与高压电源和电流类似,将经压力传感器和温度传感器变换的模拟量依次通过 RC 低通滤波和模拟隔离接口变换为 0~3 V。以对数据采集精度要求最高的腔压为例,腔压变送器的线性度为 0.038%,隔离接口的线性度为 0.01%,这两

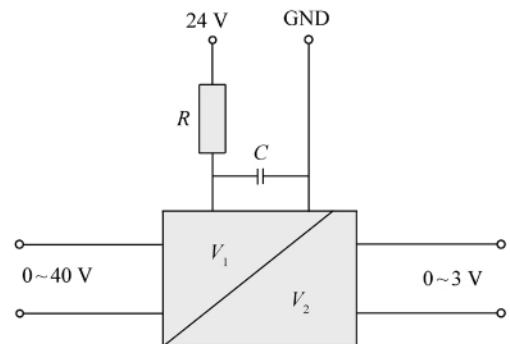


图 1 A/D 转换输入的隔离模块

Fig. 1 Front isolation for input of A/D converter

个器件的总线性度仅为 0.048%,保证了 A/D 转

换器输入信号的准确性。

另外,在设计电路板(PCB)时应注意不要使A/D的输入引脚ADCIN运行在靠近数字信号通路处,这将大大降低耦合到ADCIN引脚的数字信号开关噪声^[7],同时隔离A/D转换模块的模拟电源和数字电源,以确保不用的AD输入引脚接地。通常将ADCLO引脚直接连接到模拟地,确保为其提供一条低阻抗路径,同时要确保数字地和模拟地在一点连接。

3 A/D转换的软件校正

3.1 A/D转换的误差分析

虽然模拟信号经过上述的硬件措施已经比较稳定,但是直接使用A/D转换器采集的数字量和理想值相比还是会存在较大的误差^[8]。因此,必须对A/D采样的结果进行软件校正。要想提高A/D转换的精度,必须要了解A/D转换的误差来源。A/D误差的类型包括:量化误差,偏移和增益误差,非线性,以及由噪声和漂移导致的测量误差^[9]。偏移误差是指对A/D转换器采用零伏差动输入时实际输出代码与理想代码间的差异;增益误差是指从负满量程转为正满量程输入时实际斜率与理想斜率的差值,这两种误差是A/D转换器的主要误差源,这里提出的校正方法也主要针对这两种误差。噪声存在于任何电子设备中,由于采样得到的数据具有白噪声的特性,可以通过基于数理统计的方法来减小噪声的影响。

首先讨论偏移误差和增益误差的影响。在理想情况下,12位的DSP2812内置A/D转换器的转换方程为:

$$y = x \cdot m_i, \quad (1)$$

其中 x 表示输入的模拟电压值对应的数字量, y 表示A/D转换得到的输出值, m_i 表示理想增益,其值为1。对于带有增益误差和偏移误差的A/D转换器,其转换方程变为:

$$y = x \cdot m_a + b, \quad (2)$$

其中 m_a 表示实际增益, b 表示实际的偏移,即输入电压为0时的输出值。理想的A/D转换曲线和实际的A/D转换曲线如图2所示^[10]。

根据Ti公司的手册,理想增益 m_i 的值在

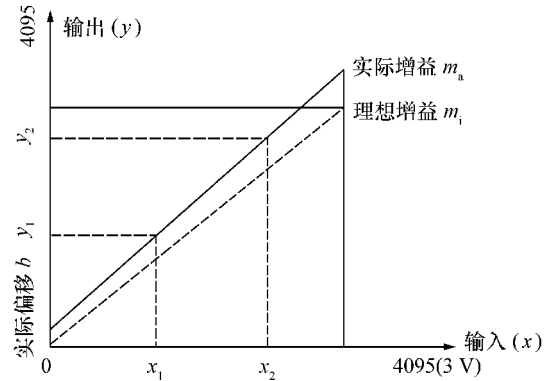


图2 A/D转换中的理想增益和实际增益

Fig. 2 Graph of actual and ideal gains in A/D conversion

0.95 ~ 1.05 之间,偏移误差 b 的值在-80 ~ 80 之间。如果不能达到上述指标,则应该从硬件设计以及A/D转换软件方面查找问题。

3.2 校正方法原理

实现A/D转换校正的方法是首先将两路给定的参考电压值送入到A/D转换器的两个转换通道,接着计算校正增益和偏移来补偿其它通道的输入值。使用这种方法可行是由于A/D转换器通道间的误差很小,一般增益误差和偏置误差在 $\pm 0.2\%$ 左右。

设给定的两路参考电压的理想代码分别是 x_1 和 x_2 ,经过A/D转换后的输出代码分别为 y_1 和 y_2 。根据方程(2),以及在此直线上的两个点 (x_1, y_1) (x_2, y_2) ,可求出实际增益:

$$m_a = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2), \quad (3)$$

实际偏移

$$b = y_1 - x_1 \cdot m_a. \quad (4)$$

对于其它任一通道的A/D转换后的输出代码 y ,可利用上面已经求得的 m_a 和 b 得出输入的代码

$$x = y \cdot \text{invGain} - \text{InvOffset}, \quad (5)$$

其中:

$$\text{invGain} = 1/m_a, \quad (6)$$

$$\text{invOffset} = b/m_a = y_1 \cdot \text{invGain} - x_1. \quad (7)$$

3.3 程序实现

与一般的A/D转换程序相比,本文采用的校正方法需要多增加两个程序模块:一是计算增益

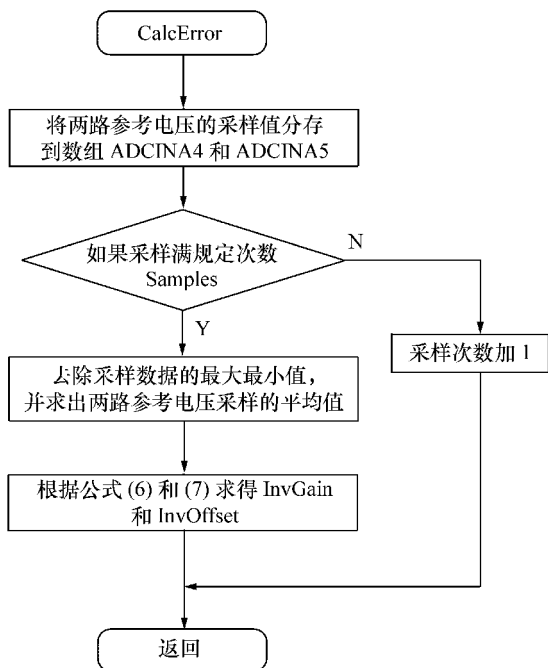


图3 偏置误差和增益误差计算模块

Fig. 3 Module of calculating offset and gain errors

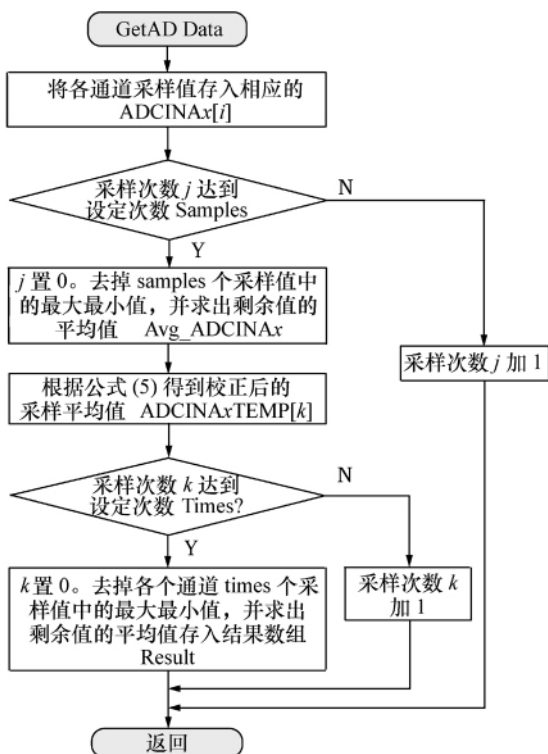


图4 A/D 采样数据校正模块

Fig. 4 Module of A/D data correction

误差和偏移误差的模块 CalcError, 二是利用增益误差和偏移误差来校正输入值的模块 GetAD Data。两个模块的流程图分别如图3和图4所示。采用顺序模式依次对各个输入通道进行 A/D 转换, 用事件管理器(如 EVA) 定时启动 A/D 转换, 当一个序列的转换完成时则触发中断。在中断处理例程中, 先调用 CalcError 计算校正增益 InvGain 和校正偏移 InvOffset, 为了节省 A/D 采样的时间, 只需在 DSP 上电复位后调用 CalcError 1 次即可。然后调用 GetADData 来读取转换后的结果。

4 实验结果与分析

当激光器系统工作时, 利用 TDS2012 示波器测试了一路受到大功率开关电源干扰的模拟信号波形, 如图5(a)所示。在加入了隔离和滤波措施之后对该路模拟信号进行测试, 如图5(b)所示。由图5可以看出, 经过隔离和滤波措施后叠加在模拟信号上的干扰基本被抑制, 输入的模拟信号稳定。

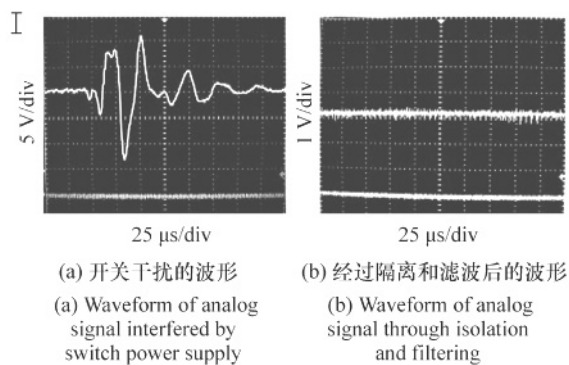


图5 模拟信号波形

Fig. 5 Waveforms of analog signals

实验时采用朝阳电源的 4inc-x 一体化线性电源, 电压精度 $\leq 1\%$ 或 100 mV, 并通过调节滑动变阻器来输出 0~3 V 之间的电压送入 F2812 内置 A/D 转换器。当 A/D 的时钟频率为 0.667 MHz 时, 分别以 0.5 和 2 V 以及 1 和 2 V 作为两路输入的参考电压采集了两组数据。如表1和表2所示。其中, 表中所列的采样值均是经过中值平均滤波后得到的数据。从表1和表2可以看出, 未

经校正的 A/D 转换值存在较大的误差,经校正后的 A/D 转换值与理想值很接近。将参考电压为 0.5 和 2.0 V 与参考电压为 1 和 2.0 V 时的校正前相对误差及校正后相对误差绘制成如图 6 所示的曲线可以看出,使用这两种参考电压校正后的

误差值都远小于校正前误差值。但是对于 0.5 V 以下的电压,以 0.5 和 2 V 作为参考电压得到的校正后相对误差更小,可达到 1 LSB。因此这里选择 0.5 和 2 V 作为参考电压。

表1 A/D 转换结果(参考电压 1 和 2 V)

Tab.1 Results of A/D conversion(reference voltage 1 V and 2 V) (V)

| 模拟量 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 2.7 |
|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 理想值 | 137 | 205 | 273 | 410 | 546 | 683 | 1 365 | 2 048 | 2 730 | 3 413 | 3 686 |
| 校正前值 | 204 | 273 | 343 | 486 | 627 | 767 | 1 472 | 2 175 | 2 880 | 3 591 | 3 876 |
| 校正后值 | 132 | 201 | 267 | 405 | 544 | 681 | 1 367 | 2 050 | 2 733 | 3 415 | 3 689 |

表2 A/D 转换结果(参考电压 0.5 和 2 V)

Tab.2 Results of A/D conversion(reference voltage 0.5 V and 2 V) (V)

| 模拟量 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 2.7 |
|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 理想值 | 137 | 205 | 273 | 410 | 546 | 683 | 1 365 | 2 048 | 2 730 | 3 413 | 3 686 |
| 校正前值 | 203 | 274 | 341 | 485 | 625 | 768 | 1 474 | 2 177 | 2 882 | 3 589 | 3 874 |
| 校正后值 | 136 | 206 | 273 | 411 | 545 | 684 | 1 367 | 2 049 | 2 733 | 3 415 | 3 688 |

腔压值是在 TEA CO₂激光器工作时非常重要的一项参数值,为 0 ~ 100 000 Pa(1 个数字量约为 25 Pa)。使用激光器时首先要对激光器腔抽真空,然后充入 CO₂,N₂,He 3 种气体。3 种气体的配气比例为 CO₂: N₂: He = 3 000 : 9 000 :

28 000,要求精度最高的气压是 0 ~ 12 000 Pa,该范围的配气情况见表 3。不同的配气比例对于激光器的输出功率和电光转换效率将产生较大影响^[3]。

表3 校正前后 CO₂和 N₂的实际气压值

Tab.3 Actual pressures of CO₂ and N₂ before and after corrections (Pa)

| 气体成分 | CO ₂ | N ₂ + CO ₂ | N ₂ |
|---------|-----------------|----------------------------------|----------------|
| 理想气压值 | 3 000 | 12 000 | 9 000 |
| 未校正的气压值 | 1 450 | 10 175 | 8 725 |
| 校正后的气压值 | 3 000 ± 25 | 12 000 ± 25 | 9 000 ± 25 |

表4 不同采样时钟 ADCCLK 和采样时间选择 ACQPS 下的增益误差 m_a 和偏移误差 b

Tab.4 Gain errors m_a and offset errors b at different ADCCLKs and ACQPSs

| ACQPS | ADCCLK | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------|-------|----------------|----|----------------|----|----------------|----|----------------|----|----------------|----|----------------|----|----------------|----|
| | 20 MHz | | 10 MHz | | 5 MHz | | 2.5 MHz | | 1.67 MHz | | 0.71 MHz | | 0.5 MHz | | 0.33 MHz | |
| | m _a | b | m _a | b | m _a | b | m _a | b | m _a | b | m _a | b | m _a | b | m _a | b |
| 0 | 0.74 | 1 014 | 1.06 | 48 | 1.046 | 55 | 1.037 | 63 | 1.036 | 60 | 1.033 | 59 | 1.033 | 60 | 1.033 | 58 |
| 7 | 0.79 | 985 | 1.05 | 53 | 1.044 | 56 | 1.038 | 62 | 1.036 | 58 | 1.033 | 60 | 1.033 | 59 | 1.033 | 58 |
| F | 0.82 | 956 | 1.06 | 52 | 1.043 | 56 | 1.038 | 63 | 1.035 | 57 | 1.033 | 60 | 1.032 | 60 | 1.034 | 58 |

当 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$ 时,激光器的输出能量和电光效率转换最高。从表4可以看出,未校正时实际的 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:6$,这将导致激光器的输出能量和电光效率转换显著降低。

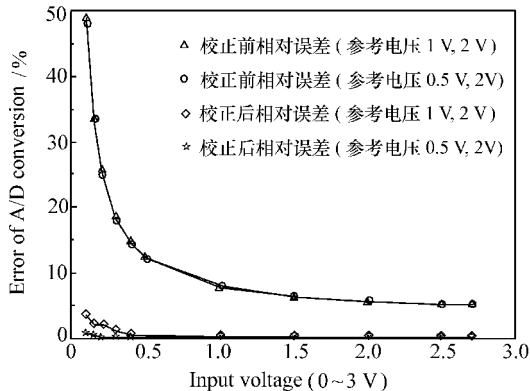


图6 A/D 转换误差

Fig.6 Error of A/D conversion

下面讨论 DSP2812 的 ADC 时钟 ADCCLK 和采样保持(S/H)采集时间窗口对 A/D 转换精度的影响。以 0.5 和 2V 作为参考电压,采用顺序采样模式进行 A/D 转换。通过设置不同的 ADC-CLK 和 S/H 采集时间窗口,得到相应的增益误差 m_a 和偏移误差 b ,其数据如表4所示。根据 Ti 公司手册 $0.95 < m_a < 1.05$, $-80 < b < 80$,从表3中可以看出,当采样时钟频率高于5MHz时,增益

误差 m_a 或偏移误差 b 都存在超出正常范围的情况,以此 m_a 和 b 来对 A/D 转换的数据进行校正会存在较大误差。当采样频率不高于 5 MHz 时,增益误差 m_a 和偏移误差 b 都在正常范围内,而且随着采样频率的降低,增益误差 m_a 越来越接近理想值 1,偏移误差则保持稳定。因此应该在保证要求的采样速率的条件下尽可能使用较低的采样时钟频率。不同的采样保持(S/H)采集时间窗口对转换结果影响不大。

5 结论

提高 A/D 转换的精度对于高功率 TEA CO_2 激光器的可靠运行具有非常重要的作用。由于模拟信号极易受到电磁干扰,利用硬件上的隔离、滤波方法去除了附加在模拟信号中的高频干扰部分。通过软件对增益误差和偏移误差进行校正,大幅提高了转换精度。实验结果表明:在 A/D 采样时钟频率为 0.667 MHz,校正参考电压为 0.5 和 2.0 V 时,A/D 转换误差达到 ± 3 LSB 之内,特别是在对腔压值精度要求很高的 0 ~ 12 000 Pa (数字量 0 ~ 480),A/D 转换的精度达到 ± 1 LSB 内,满足了高功率 TEA CO_2 激光器对 A/D 转换的精度要求。经过实际运行考核,该数据采集系统运行稳定可靠。

参考文献:

- [1] Texas Instruments Incorporated. TMS320C28x 系列 DSP 的 CPU 与外设[M]. 北京:清华大学出版社 2005.
Texas Instruments Incorporated. *TMS320C28x Series DSP's CPU and Peripherals* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 李殿军 杨贵龙. TEA CO_2 激光器主放电延迟时间对效率的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 807-810.
LI D J, YANG G L. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO_2 laser [J]. *Opt. Precision Eng.* 2006, 14(5): 807-810. (in Chinese)
- [3] 杨贵龙 李殿军 孟范江 等. 大功率脉冲 TEA CO_2 激光器配气比对输出的影响[J]. 中国光学与应用光学 2009 2(3): 231-235.
YANG G L, LI D J, MENG F J *et al.*. Influence of gas mixture ratios on laser outputs of high power laser pulsed TEA CO_2 laser [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.* 2009 2(3): 231-235. (in Chinese)
- [4] 孟范江 郭立红 杨贵龙 等. 大功率 TEA CO_2 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.
MENG F J, GUO L H, YANG G L *et al.*. Suppression of electromagnetic interference in the Big-power TEA CO_2 laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2008 20(2): 177-182. (in Chinese)
- [5] 孟范江 杨贵龙 李殿军 等. 大功率 TEA CO_2 激光系统的电磁兼容性设计[J]. 中国光学与应用光学 2009 2(3): 236-241.

- MENG F J ,YANG G L ,LI D J ,*et al.*. EMC design of high power TEA CO₂ laser system [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.* 2009 2(3):236-241. (in Chinese)
- [6] WANG H Q ,MENG F J ,GUO L H. Inhibition of electromagnetic interference in ontrol system based on DSP of high-power TEA CO₂ laser [C]. Proceedings of IEEE conference on CMCE ,Changchun ,China 24-26 Aug 2010:389-392.
- [7] 夏振华 ,王晓爽. 32 位高性能数字信号处理器内部 AD 的精度校正方法 [J]. 仪器仪表与分析监测 2010(2):20-22.
XIA ZH H ,WANG X SH. Researching on correcting the accuracy of 32 bit high performance DSPk's on-chip AD [J]. *Instrument and Anal. Monitoring* 2010(2):20-22. (in Chinese)
- [8] 周正 ,李贵山. A/D 转换器参考电压的软件校正 [J]. 电子元件与材料 2004(2):46-48.
ZHOU Z ,LI G SH. Research and development of high precision digital conversion module with voltage output sensor [J]. *Process Automation Instrumentation* 2004(2):46-48. (in Chinese)
- [9] 德州仪器 ,SCHREIBER R. 使高分辨率 A /D 转换器获得更高性能 [EB/OL]. (2010-02-11) . [2011-03-12]http://wenku.baidu.com/view/31a4827469eae009581becad.html.
- [10] 王伟 ,杨智涛 ,吴佳楠. 提高 DSP 的 AD 转换器精度的研究与实现 [J]. 现代制造工程 2009(6):95-97.
WANG W ,YANG ZH T ,WU J N. Enhancing the precision of DSP AD converter study and realization [J]. *Modern Manufacturing Eng.* 2009(6):95-97

作者简介:王鹤淇(1983—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事激光器电子学设计及电子系统可测试性设计方面的研究。E-mail: whq200808@gmail.com

孟范江(1957—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事大功率激光器控制系统及高压电源方面的研究。E-mail: mengfj2006@sohu.com

郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,研究员,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。E-mail: Guolh@ciomp.ac.cn

管目强(1985—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事计算机仿真应用、视频数据传输方面的研究。E-mail: guanmuqiang@sina.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 40.00 元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

电话:(0431)6176059

网址:www.yjxs.com