

用于燃烧驱动 DF 激光器的紧凑型智能测控系统

林 夕, 袁圣付, 房晓婷

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙, 410073

摘要 针对现有燃烧驱动氟化氘(DF)化学激光器测控系统体积庞大、接线复杂等诸多不足,在分析化学激光器测控系统基本功能需求和运行特点的基础上,以 PIC 单片机为硬件核心,研制出一套采用电池组供电、测控指令与数据可无线射频或 485 总线传输、可由 PC 终端和安卓手持终端两种上位机控制的嵌入式智能测控系统。该系统具有采集流场参数数据、控制气体燃料供给时序、闭环调控燃料流量等功能。功能板测试实验结果表明,该系统可完全嵌入激光器系统中,具有体积小、接线少、重量轻、扩展性好、抗干扰能力强、数据安全性好等优点,应用前景良好,同时为化学激光器测控系统的紧凑化设计奠定了坚实的基础。

关键词 激光器; PIC 单片机; 嵌入式智能测控系统; 流量闭环调控; 紧凑化

中图分类号 TN248.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501003

An Embedded Intelligent Measurement and Control System for Combustion Driven DF Lasers

Lin Xi, Yuan Shengfu, Fang Xiaoting

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In order to solve the existing problems in the measurement and control system of combustion driven deuterium fluoride (DF) chemical lasers, such as the large system volume and complex wiring, an embedded intelligent measurement and control system is designed based on the analysis of the basic functional requirements and operating characteristics of chemical laser measurement and control system powered by a battery pack and using the PIC microcontrollers as the hardware device. The system can be controlled by a PC upper-computer and an Android hand-held upper-computer, which measurement-control instructions and data can be transmitted by the radio frequency wireless or 485 data bus. The intelligent measurement and control system has the functions of flow field data acquisition, supply control of different fuels according to the injection timing sequence, closed-loop control of fuels' flow rates, and so on. The test results based on the function board show that this embedded intelligent measurement and control system has not only smaller volume, less wiring and lighter weight, but also good expansibility, strong anti-interference ability and reliable data security, which shows a good application prospect, and at the same time, lays a solid foundation for the compactness of the measurement and control system of chemical lasers.

Key words lasers; PIC microcontrollers; embedded intelligent measurement and control system; closed-loop control of flow rate; compactness

OCIS codes 140.1550; 280.5475; 280.6780; 140.3070

1 引 言

燃烧驱动 DF 化学激光器采用全气态燃料,能量自给运行,具有激射尾气可恢复压力高,激射波长处在

收稿日期: 2016-12-16; **收到修改稿日期:** 2017-01-19

基金项目: 国家 863 计划(2015AA806037)

作者简介: 林 夕(1992—),女,硕士研究生,主要从事化学激光器测控系统方面的研究。

E-mail: linxi_920117@163.com

导师简介: 袁圣付(1975—),男,博士,研究员,主要从事化学激光器方面的研究。

E-mail: shengfuyuan_bb@163.com(通信联系人)

大气窗口,可远距离传输,远场光斑大小适合特定性能的跟瞄系统等特性,从1969年发明以来至1980年MIRACL+Sea-Lite实现2 MW功率输出,仅用10年左右的时间^[1-3]。因此,随着各种新型技术的进步和应用,化学激光器仍将是未来最具有发展潜力的高能激光选择之一^[4-5]。

对于DF化学激光器系统来讲,测控系统是其不可或缺的组成部分,也是控制全系统稳定运行的中枢神经。但长期以来,测控系统通常只是基于工业测量与控制板卡来整合搭建,在大量通道数据采集时需要选择价格不菲的器件,控制台等通常都需要空调机大小的机柜来实现,体积庞大,接线复杂,对实现激光器的小型化存在重要的影响^[6-7]。实际上,测控技术在当前智能物联网技术的推动下已经得到了快速发展,DF化学激光器测控系统也应朝着嵌入式、紧凑化与智能化的方向发展。

本文结合化学激光器自身基本测控功能需求和运行特点,基于模块化设计思路,采用电池组供电,以PC终端和手持终端作为系统上位机,以PIC18单片机为下位机硬件核心,使用无线射频和485总线两种通信方式,经过4年多的实验测试与优化改进,初步研制出一套可用于燃烧驱动DF化学激光器的分布嵌入式紧凑型智能测控系统。

2 燃烧驱动DF激光器测控系统功能需求和运行特点

燃烧驱动DF化学激光器通过 NF_3 、 C_2H_4 、He等3种燃料按特定配比在燃烧室混合后点火燃烧,产生热量解离 NF_3 生成F原子,F原子与 D_2 分子在光腔内发生抽运反应,产生振动——转动激发态DF分子,在光腔He稀释辅助控温下产生粒子数反转与激射^[1,8]。气体燃料流量的精确控制直接影响到F原子的产生和输运环境以及激发态DF分子的激射环境,而这两个环境的流场压力、温度等参数直接影响到增益区长短与激射波长等出光性能。因此,需要对燃烧驱动化学激光器各气体燃料的供气时序和流量进行精确控制,并对激光器内的流场参数进行监测诊断。气体燃料流量的计量与控制一般采用临界流文氏咀,根据临界流流量公式

$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{P_0 \cdot A^*}{\sqrt{\frac{R_u}{w} \cdot T_0}} \cdot \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \quad (1)$$

式中 P_0 、 T_0 分别为音速喷嘴上游的气流总压、总温; A^* 为音速喷嘴的喉道面积; w 为气体分子量; γ 为气体比热比/绝热指数; R_u 为普适气体常数,其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; C_d 为气体流量系数,通过标定得到,对于特定喷嘴一般为接近且小于1.0的常数^[9]。ISO 9300-2005给出了精确得到气体流量值的计量检定规程,详细规定了 P_0 、 T_0 的测量位置与误差。由(1)式可知,气体流量与 P_0 成正比,通过改变音速喷嘴上游 P_0 的大小,可以改变供气流量。在激光器的运行过程中, P_0 大小的调控是通过外部先导式减压阀或节流面积调节阀来实现的。

综上所述,燃烧驱动DF激光器测控系统的基本功能需求主要包括3部分:1)测量存储各个燃料供给单路以及燃烧室、光腔等位置的压力、温度参数;2)控制各个气体燃料供给阀门的通断与燃烧室点火器的开关;3)闭环调控各个燃料供给单路气体流量。

对于系统的压力、温度参数的采集测量以及供气阀门的开关,传统的测控系统主要是基于NI测控机或者Nano测控模块实现的,该系统体积庞大,且上位机与下位机之间需要连接繁杂的数据传输线。本文系统是基于PIC单片机的小型化嵌入式模块实现的,体积小,可以嵌入激光器系统,并且采用无线射频或者485总线方式通信,避免了下位机与上位机之间连接大量数据线;对于系统流量的调控根据(1)式可以转成对总压的调控。传统测控系统的流量调控装置响应速度慢、精度差,而本文系统改善了系统的相应特性,使用自动闭环调控方式,即在激光器运行前通过电气比例阀先对减压阀进行自动总压预调节,在出光过程中,将测量的总压反馈值与设置的总压目标值进行比对实现闭环。

另一方面,本文系统在每个传感器及数据采集端口之间增加了光耦隔离模块,对激光器中传感器的采样信息进行隔离,以消除激光器运行时的电磁干扰对测控装置的影响。其次,由于燃烧驱动HF/DF激光的能量是由反应放出的热能转化而来的,无需外部能量注入,仅测控系统需要电量供给,且激光器持续运行出光

时间短(一般在 100 s 以内),因此测控系统实际连续工作的时间很短,需要供给的电量很少,所以本文测控系统可使用大容量电池供电。

3 测控系统下位机的硬件设计

测控系统下位机主要包括传感器数据采存模块、时序控制模块与流量闭环调控模块,每个模块的外形尺寸完全相同。印刷电路板(PCB)板大小为 160 mm × 110 mm × 30 mm,安装接口位置都在 150 mm × 100 mm 处,安装孔直径为 4 mm,都使用贴片型的 PIC18F46K22 单片机作为控制器。PIC18F46K22 单片机内置定时器、主同步串行口、增强型通用收发器、AD 转换器等功能模块,可满足系统各功能设计的需求。

3.1 传感器数据采存模块

传感器数据采存模块(以下简称采存模块)方案图如图 1 所示。压力/温度传感器输出 4~20 mA 模拟信号采集与存储模块,采存模块能对 6 路 200 Ω 采样电阻转换而来的 0.8~4 V 电压模拟信号按 100 Hz 速率采样进行前端数字化。实验过程中,采集到的数据通过串口 2 按 SD 卡和 FAT32 文件格式规范存储到采存模块上的 SD 卡内。实验结束后,存储到 SD 卡上的数据可以通过连接串口 1 的无线射频模块/连接扩展串口芯片 CH432 的 485 总线模块发送到上位机。

采存模块配备 7 块容量为 3400 mAh、两端电压为 3.7 V 的 18650 电池,并使用了 7 个 DC-DC 转压功能块,其中 6 个将 3.7 V 转换成 24 V 给二线制压力传感器供电,另一个将 3.7 V 转换成 5 V 给单片机供电;电池供电以及模拟信号输入等通过接线端子接入;PCB 板的设计,使用稳压二极管对模拟数字转换(A/D)口进行过压保护;对于强干扰环境,在传感器输出口和采集模块数据采集口之间串接隔离器件,以增强系统的抗干扰能力。

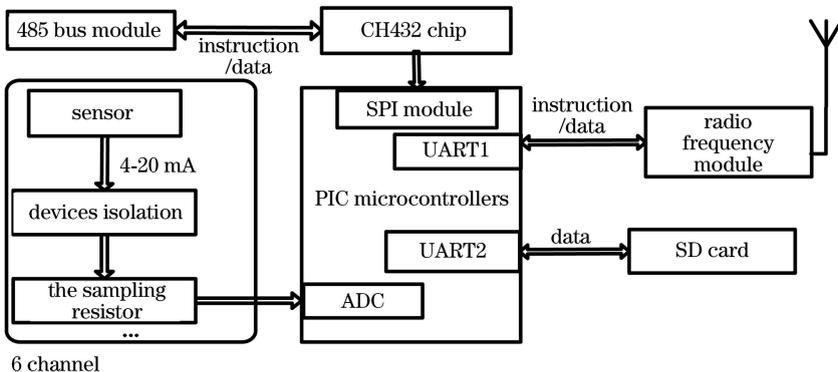


图 1 传感器数据采存模块方案图

Fig. 1 Diagram of sensor data acquisition and storage modules

3.2 时序控制模块

为了避免 PCB 板上因器件过多而尺寸增加,同时也为了减小继电器通断时的电磁干扰,将时序控制模块分成控制板和继电器板两个部分。每个时序控制模块可对 14 路继电器按设定时序进行输通断控制,具体过程如下:单片机 14 个输入输出(I/O)口按时序输出控制信号,信号经 ULN2003 达林顿晶体管放大,通过端子排接到继电器板的输入端。通过单片机输出信号控制继电器线圈(或者光敏元件)通断来控制单路电磁阀的电源开关,从而控制单路供气时序。时序控制模块方案图如图 2 所示。

控制板配备 1 块容量为 3400 mAh、两端电压为 3.7 V 的 18650 电池,PCB 板上设置了 1 个 DC-DC 转压功能块,将 3.7 V 转换成 5 V 给单片机供电。

继电器板上放置了 14 个继电器,继电器可选用 14 个相同的固态继电器(或者机械式继电器)来焊接成板。机械式继电器并联了相移(RC)回路吸收能量,避免继电器闭合时对电路回路的干扰;而固态继电器采用光耦导通原理,不会对回路产生干扰。为了显示继电器的通断情况,各个继电器回路都串接了一个 LED。继电器板采用 6 块 18650 电池串联为电磁阀提供电源,实现通断控制。

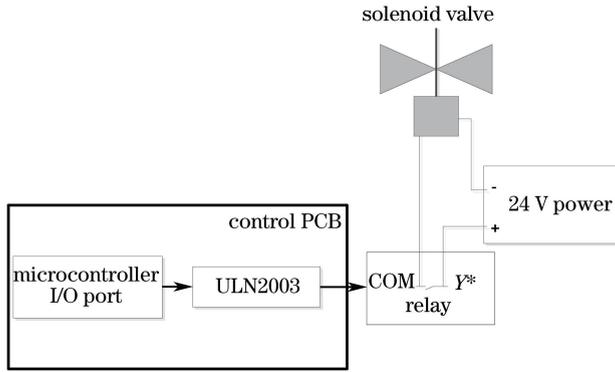


图 2 时序控制模块方案图

Fig. 2 Diagram of sequence control modules

3.3 流量闭环调控模块

流量闭环调控模块方案图如图 3 所示,每个流量闭环调控模块可对 4 路单路气体流量进行调控。具体方案为:调压开始前,上位机将 4 路单路流量目标值发送至流量闭环调控模块,单片机输出数字量经 MAX538 和 AD694 芯片转换为 4~20 mA 电流信号^[10],该信号输入电气比例压力阀实现 0.1~1 MPa 气体压力输出,输出压力进入外部先导减压阀控制腔,经比例放大后减压阀输出 0~3 MPa 主路气流,压力传感器检测出实际压力对应电流值,经隔离模块隔离保护通过 200 Ω 电阻后,送入单片机进行 A/D 采样,单片机比较 A/D 采样值与单路流量目标值,对设定流量的偏差量进行闭环修正。

流量调控模块配备 11 块容量为 3400 mAh、两端电压为 3.7 V 的 18650 电池,其中 6 块电池串连为比例阀提供 24 V 电压源,PCB 板上设置了 5 个 DC-DC 转压功能块,其中 4 个将 3.7 V 转换成 24 V 给二线制压力传感器供电,另一个将 3.7 V 转换成 5 V 给单片机供电。

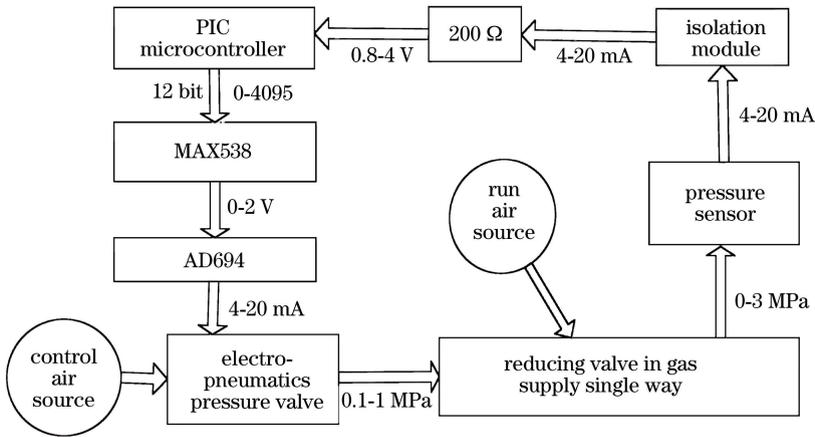


图 3 流量闭环调节模块方案图

Fig. 3 Diagram of closed-loop flow adjustment modules

3.4 其他硬件功能设计

上位机和下位机通信方面,主要有无线射频和 485 总线两种通信方式。无线射频方式是通过基于 SI4432 射频芯片的无线射频模块,该模块采用高斯频移键控(GFSK)调制方式,120 mA 发射电流,传输距离 1000 m 以上。485 总线方式是通过 RSM485CHT 隔离模块,该模块最大波特率为 115200 bit/s,且具有隔离和总线保护功能。通常情况下,测控系统采用无线射频方式通信。在复杂强电磁环境下,当受到等波特率射频干扰时,系统可通过开关切换到单根双绞线连接的 485 总线方式进行抗干扰通信。

在系统节能设计方面,可通过单片机程序软件调节场效应管的通断从而控制传感器、SD 卡等器件开关以及设置系统进入睡眠模式(只留单片机和无线射频模块处在运行状态以便完成指令收发和系统唤醒功能)。在非实验期间,3 个主功能模块可以通过拨码开关来实现系统的完全关闭。全系统电池组在一次充满

电量后,至少可连续运行 24 h,可满足燃烧驱动 DF 激光器 800 次 100 s 以上运行实验测控需要,在通常的实验强度下,至少一年内无需充电。下位机 3 个模块实物图如图 4 所示。

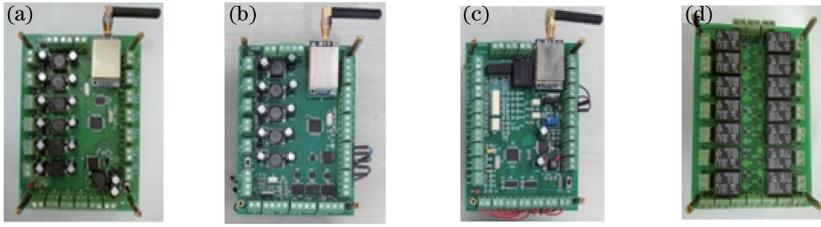


图 4 模块实物图。(a)采存模块实物图;(b)流量闭环调控模块实物图;(c)供气时序控制模块实物图(控制板);
(d)供气时序控制模块实物图(继电器板)

Fig. 4 Product photos of modules. (a) Product photo of sensor data acquisition and storage module; (b) product photo of closed-loop flow rate control module; (c) product photo of fuel's supply sequence control module (control module);
(d) product photo of fuel's supply sequence control module (relay module)

4 测控系统的软件设计

测控系统的软件主要包括上位机软件程序和下位机单片机程序。

上位机程序分为两种,即 PC 终端控制软件和安卓手持终端控制软件。PC 终端控制软件由 LabVIEW 软件编写,主要功能是向下位机发送指令控制下位机运行和保存下位机反馈的传感器数据文件。安卓手持终端控制软件由 Eclipse 软件开发,主要功能是向下位机发送指令控制下位机运行、保存下位机反馈的传感器数据文件以及将保存的下位机文件发送至 PC 终端供后期数据处理。

下位机程序使用 C 语言编写,由 3 个功能不同的程序组成,通过烧录器 PICKIT3 写入单片机内。下位机每个模块的单片机都有各自的 ID 号,ID 号保存在单片机的 EEPROM 里。

采存模块程序主要实现以下功能:1) 获取为模块供电的 18650 电池电压并将电压值反馈至上位机;2) 接收上位机发送的开始指令后开始采集 6 路传感器数据,并将数据写入模块 SD 卡模块的二进制文件内保存;3) 接收供气时序控制模块发出的停止指令,结束数据采集;4) 接收上位机发送的传输数据指令,将 SD 卡模块内的数据文件发送至上位机;5) 接收上位机发送的重置指令重置单片机,准备下次实验;6) 接收上位机发送的紧急停止指令,单片机程序停止,然后重置。

时序控制模块程序主要实现以下功能:1) 获取为模块供电的 18650 电池电压并将电压值反馈至上位机;2) 接收上位机发送的 14 路单路及点火器的时序;3) 接收上位机发送的运行指令,按指定时序控制 14 个继电器通断从而控制 14 路电磁阀的供电;4) 当系统总运行时间结束或者采集到单路电磁阀供电电压小于最低值时,向外发送停止运行指令,命令激光器系统停止运行;5) 接收上位机发送的重置指令重置单片机,准备下次实验;6) 接收上位机发送的紧急停止指令,单片机程序停止,然后重置。

流量闭环调控模块程序主要实现以下功能:1) 获取为模块供电的 18650 电池电压并将电压值反馈至上位机;2) 接收上位机发送的 4 路单路的气体流量目标值;3) 接收上位机发送的运行指令,按指定目标值调节 4 路单路气体流量;4) 当流量调节完成时,向上位机发送调节完成信号;5) 接收供气时序控制模块发出的停止指令,停止流量调节;6) 接收上位机发送的重置指令重置单片机,准备下次实验;7) 接收上位机发送的紧急停止指令,单片机程序停止,然后重置。

值得说明的是,程序中对关键指令进行了多次比对、校验,并在指定时间波门内发送接收才生效运行相关程序块,且测控系统的指令注入和数据传输通信长达 10 个字节,从而确保了系统运行的可靠性和安全性。

5 实 验

搭建了如图 5 所示的简易型单路实验平台,完成了对测控系统硬件基本功能和软件相应功能的测试。在调节算法上,4 个通道轮流闭环计算调节,在实验过程中,气流单路轮换连接到流量闭环调控模块的 4 个通道上进行测试,流量调节电路调节的单路参数分别为:第 1 通道目标压力值为 600 kPa;第 2 通道目标压力

值为 900 kPa;第 3 通道目标压力值为 400 kPa;第 4 通道压力值为 800 kPa。图 6 为 PC 终端上位机总压设置界面截图。供气时序设为 0~3 s(压力调节在通气后 0.1 s 进行)。

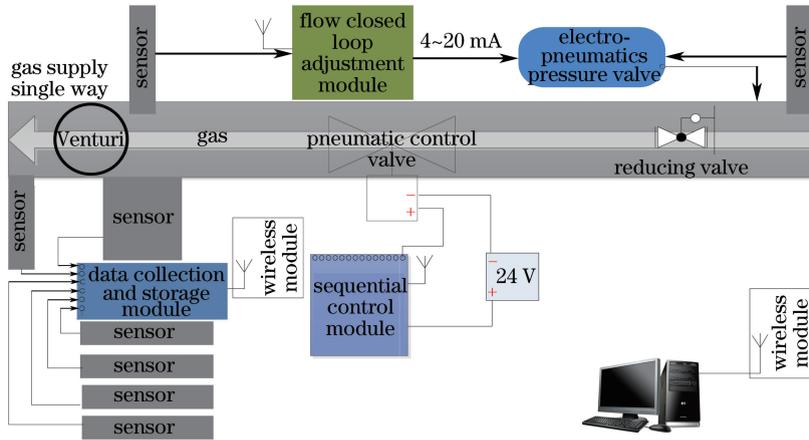


图 5 简易型实验平台

Fig. 5 Simple test platform

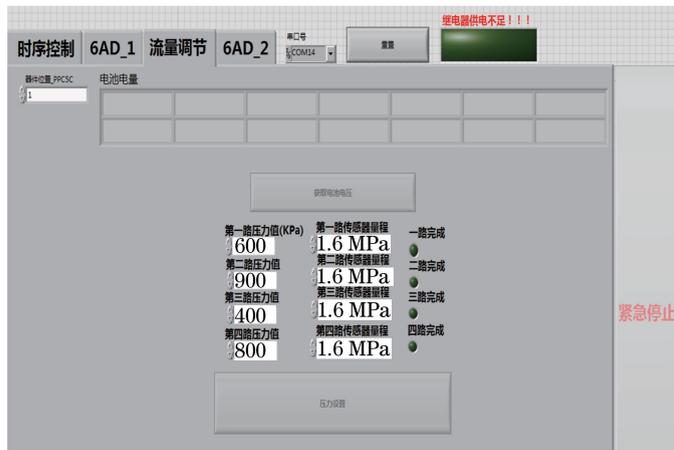


图 6 PC 上位机界面截图

Fig. 6 Screenshot of PC upper-computer

图 7 为流量闭环调控模块 4 个通道总压反馈值曲线。由图 7 可知,气体流量能够闭环调节,完成 4 个通道的调节时间不超过 300 ms,调节完成后,能够很好地闭环锁定,稳定在调节好的数据(4 个通道均在 0.1 s 开始通气,3 s 结束通气)。设定值与调节结果数据存在一定的偏差,这种偏差主要是由于采样和调节闭环采用了 2 个 1% 满量程精度、量程为 1 MPa 的绝压传感器,累加误差可以达到 20 kPa。图 8 为采存模块采集 600 kPa 总压调节时 6 个通道数据曲线,其中,通道 1 为单路总压目标值为 600 kPa 时的对比传感器数据,通道 2~5 测量对象为环境压力(0.1 MPa),通道 6 测量对象为室内环境温度(采存模块在时序开始前 1 s 开始采集数据,系统总运行时间为 5 s),通道 1 通气时间为时序开始后 0.1 s 至 3 s 即为图中曲线对应的 1.1 s 至 4 s。由图 8 可知,传感器获得的数据误差在量程精度范围内,且数值较为稳定。

在某 DF 激光器平台上,对测控系统进行了测试,该系统由 1 个时序控制模块、2 个流量闭环调节控制模块、3 个采存模块、1 块 18650 电池组以及 1 部安卓手持终端组成(图 9)。测控系统分布式嵌入安装在激光器系统中,具有控制 14 个电磁阀按时序开启与关闭,闭环调控 8 个气体燃料供给管路流量,采集存储 18 个 4~20 mA 输出的传感器数据等功能,可满足燃烧驱动 DF 激光器运行测控的基本需求,通过安卓手持终端就可以运行激光器并接收下位机存储的实验数据文件,安卓手持终端软件界面截图如图 10 所示。

根据以前测控系统采集的数据曲线可知,电激励激光器在放电管放电时测控系统采集的数据会受到影响,异常波动明显,所以进行了基于电激励化学激光器的本文系统的抗干扰能力测试。电激励化学激光器运

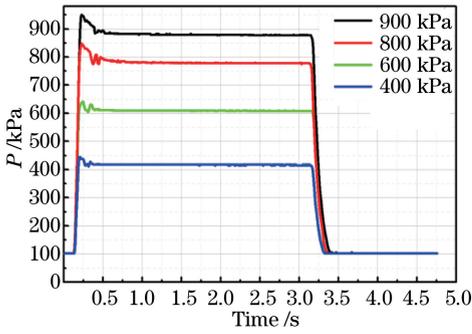


图 7 流量调控模块压力反馈值曲线
Fig. 7 Curves of pressure feedback of the flow adjustment module

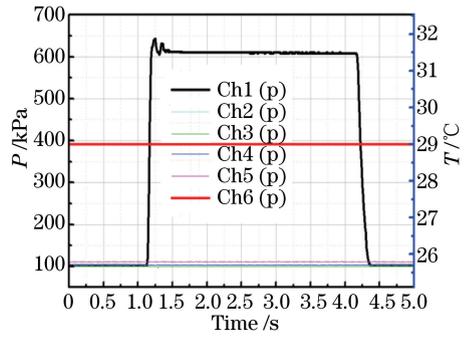


图 8 采存模块数据曲线
Fig. 8 Curves of data acquisition and storage module



图 9 测控系统整体图



图 10 手持终端上位机截图

Fig. 9 Complete picture of the measurement-control system

Fig. 10 Screenshot of the hand-held upper computer

行时,用两套测控系统同时采集放电管进气口的传感器数据,采集时间为 21 s,得到如图 11 所示的曲线。图 11 中 P_2 为本文系统采集的数据, P_1 为原来系统采集的数据。从图中数据可以看出,在第 4 s 放电管开始放电后,原来系统采集的数据波动很大,而本文系统数据稳定,说明其抗干扰性能较强。

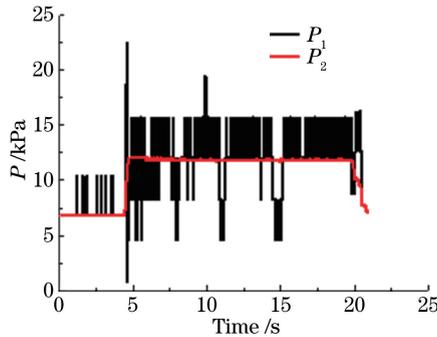


图 11 两套系统数据对比图

Fig. 11 Data contrast figures of two systems

6 结 论

详细介绍了一套基于 3 个 PIC 单片机功能模块与 PC 终端 LabVIEW/安卓手持终端主控软件的化学激光器嵌入式紧凑化智能测控系统。测试实验结果表明,该系统具有全电池驱动、功能全面、扩展性好、体积小、接线少、重量轻、抗干扰能力强、数据安全性好等优点,为化学激光器测控系统的紧凑化和嵌入式设计奠定了基础,具有良好的应用前景,有望对化学激光器测控系统的未来发展起到较大的推动作用。

参 考 文 献

[1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical lasers[M]. Yin Houming, Xie Xingbin, Luo Jingyuan, Transl. Beijing:

Science Press, 1987.

格罗斯, 博特. 化学激光手册[M]. 尹厚明, 谢行滨, 罗静远, 译. 北京: 科学出版社, 1987.

- [2] Yuan Shengfu, Zhao Yijun, Hua Weihong, *et al.* Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flow field parameters[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(5): 402-406.
袁圣付, 赵伊君, 华卫红, 等. CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 402-406.
- [3] Pan Qikun, Xie Jijiang, Shao Chunlei, *et al.* High power electric-discharge non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702001.
潘其坤, 谢冀江, 邵春雷, 等. 高功率放电引发非链式脉冲 DF 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702001.
- [4] Carroll D L. Overview of high energy lasers: past, present, and future[C]. 42nd AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference, Hawaii, 2012: 1-21.
- [5] Fang X T, Yuan S F, Hua W H. Analysis of the possibility designing more compact DF chemical lasers driven by combustion of preheated fuels[J]. Quantum Electronics, 2016, 46(9): 790-794.
- [6] Xia Fei. Initial study of measure and control system for combustion driven chemical laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
夏 霏. 燃烧驱动化学激光器测控系统的初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [7] Xue Pengfei. Design and experimental study on the embeddable wireless measurement and control system of combustion-driven CW HF/DF chemical lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
薛鹏飞. 燃烧驱动连续波 HF/DF 化学激光器嵌入式无线测控系统设计与试验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [8] Wang Jie, Guo Jianzeng, Yan Feixue, *et al.* Analysis of detonation in chemical laser combustor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081406.
王 杰, 郭建增, 颜飞雪, 等. 化学激光器燃烧室中的爆轰问题分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081406.
- [9] Wang Xinyue, Hu Chunbo, Zhang Kunyuan, *et al.* Fundamentals of gas dynamics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
王新月, 胡春波, 张堃元, 等. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [10] Fan Chuanyang, Nie Shiliang. System design based on tachometric survey of MCU with 4-20 mA current output[J]. Journal of Southwest University of Southwest and Technology, 2012, 27(1): 74-76.
范传阳, 聂诗良. 基于单片机的转速测量及输出 4~20 mA 电流的系统设计[J]. 西南科技大学学报, 2012, 27(1): 74-76.