

doi: 10. 3788/gzxb20174605. 0522002

基于物联网的智能化条纹相机控制系统的研制

吕斌^{1,2}, 裴承全³, 田进寿¹, 温文龙¹, 王俊锋¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安交通大学 电子器件与物理教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要:为满足条纹相机便携化、智能化的发展需要, 研制了一种高适用性的分布式智能控制系统, 实现了对条纹相机工作参量的监测, 对电极电压、扫描工作模式的精确控制以及对图像的采集与处理. 基于物联网技术框架与客户端-服务器的结构模式, 实现了有线及无线设备扩展的多机协作功能与移动监控功能. 并针对该控制系统, 设计了具有自保护功能的自激型反激式可调高压电源模块, 基于自激式拓扑的简单结构, 实现了电源的小型化, 且线性调整准确度可达 1%. 采用 Nd: YLF 脉冲激光器(脉宽 8 ps, 波长 526.5 nm)对应用该控制系统的可见光皮秒条纹相机进行标定, 测试得到动态分辨率为 12.75 Lp/mm(CTF=14%), 动态范围为 234:1, 时间分辨率达到 14 ps.

关键词:条纹相机; 分布式控制; 物联网; 自激式开关电源; 过流保护

中图分类号: TN16

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0522002-8

Design and Implementation of the Intelligent Streak Camera Control System Based on Internet of Things

LÜ Bin^{1,2}, PEI Cheng-quan³, TIAN Jin-shou¹, WEN Wen-long¹, WANG Jun-feng¹

(1 Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A distributed intelligent control system was implemented to make streak cameras more portable and intelligent, which achieved the monitoring of working parameters, precise control of the electrode voltage and scanning patterns, additionally, image acquisition and processing. Based on the structure of Internet of things and client-server model, the system realized multimachine collaboration capabilities about wired and wireless devices extension and mobile monitoring. Furthermore, an adjustable self-protection high voltage ringing choke converter was designed for the system. The power supply realized the miniaturization by the simply self-excited topological structure, and its linear adjustment accuracy can reach 1%. The picosecond visible light streak camera with the intelligent control system was calibrated by the Nd: YLF pulse laser (Wavelength of 526.5 nm and pulse width of 8 ps). A dynamic spatial resolution of 20 lp/mm (CTF=14%), a dynamic range of 234:1 and a temporal resolution of 14 ps were reached.

Key words: Streak cameras; Distributed control systems; Internet of things; Ringing choke converter; Overcurrent protection

OCIS Codes: 220.4830; 320.7080; 320.7100; 150.6044; 150.5495

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11274377)资助

第一作者: 吕斌(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超快诊断技术. Email: lvbinhit@126.com

导师(通讯作者): 田进寿(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超快诊断技术. Email: tianjs@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-12-22; 录用日期: 2017-02-10

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

条纹相机作为具有超高时间分辨的诊断工具^[1],不仅是激光核聚变(Inertial Confined Fusion, ICF)等重大科学工程的核心诊断手段^[2-3],还广泛应用于光化学、光通讯、海底探测、远程高速目标探测等领域^[4-5].为满足现代仪器便携式、智能化的发展趋势,用于各领域的条纹相机需要在满足其诊断参量的基础上尽可能地缩小整机体积,尤其是基于条纹相机的激光雷达系统更希望能够搭载在无人机等搭载平台上.惠丹丹^[6]、陈正凯^[7]等已研制出小型化多用途的条纹变像管,但是鉴于条纹相机的使用场合大多较为特殊,其电磁辐射环境复杂,且在多数场合下单一设备无法满足应用要求,因此要实现相机的便携化与智能化,还需具备良好的电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)以及具有设备扩展与多机协作功能的远程智能控制系统,这就对控制系统的可靠性与通用性提出了要求.由于分布式控制具有高可靠性、灵活性和易于维护等优点,是目前工业控制的主要趋势^[8],因此,对条纹相机的控制方式也采用分布式控制,可使其满足任意应用的场合.国际上,日本已研制出易扩展的模块化普适型条纹相机^[9].西安光学精密机械研究所的刘杰等研制的各向异性聚焦条纹相机程控系统^[10],已经采用了模块化结构设计,但是其系统不具备多设备扩展的功能.另外,其高压供电模块因自身结构特点,具有体积大、可靠性低等缺点,限制了条纹相机的应用,因此优化电源模块也很必要.

为提高条纹相机的适用程度,本文基于物联网技术(Internet of things, IoT)具有不受地域限制的设备扩展性与强大数据交换能力的特点^[11],研制了智能化条纹相机控制系统.系统采用客户端-服务器(Client/Server, C/S)模式,实现了局域网-广域网、有线-移动设备扩展的功能;设计了具有图像采集、处理功能的PC监控端与便携式移动监控端以满足不同应用场合的需要.另外,为实现MCP增益和荧光屏高压的有效控制,考虑到自激式开关电源(Ringing Choke Converter, RCC)具有结构简单,容易实现等诸多优点^[12],针对该控制系统设计了具有过流保护功能的可调节自激型反激式高压开关电源,实现了电源小型化.

1 条纹相机的工作原理

图1为条纹相机的工作原理图.条纹相机包括条纹变像管,高压供电系统,扫描控制系统,CCD记录系统和智能控制系统等.条纹变像管一般由光电阴极、电子光学系统、像增强器和荧光屏组成.条纹相机的工作过程如下:光脉冲序列通过狭缝到达光电阴极转化为电子,电子的数量与光脉冲强度成正比,电子经过栅极电场加速、各聚焦极聚焦后进入偏转板,偏转板上加有高速的斜坡扫描电压,不同时间到达的电子将以不同的空间位置进入MCP,再经过MCP的电子倍增后轰击荧光屏,最后通过CCD记录荧光屏的图像.整个系统封闭在一个体积有限的气室内,由智能控制系统监控气室中系统的运行情况.

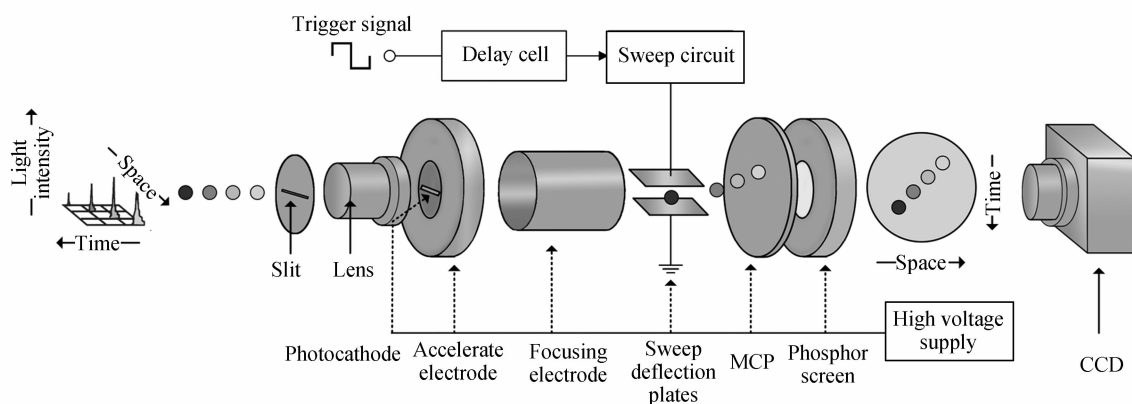


图1 条纹相机工作原理

Fig.1 Schematic diagram of streak camera

根据条纹相机的工作原理,控制系统需要在有限体积内对条纹相机的电子聚焦电压,扫描触发延时,扫描偏压,图像增益,CCD读出系统等做出精确的控制,并且需要对电极电压,气室环境参量等数据进行精准的监测以确保相机安全有效的工作.

2 智能控制系统设计

图 2 为基于物联网技术框架的系统总体架构图. 如图所示, 条纹相机各单元模块通过主控器与上位机通讯, 在主控器与上位机之间搭建一个访问节点 (Access Point, AP), 并通过单模光纤与主控器相连以减少电磁干扰对通讯造成的影响. 包括主控器、移动设备、手持设备和其他扩展设备等通过 AP 访问节点与服务器完成数据交换. 其中, 有线设备的通讯采用 TCP/IP 协议, 无线设备的通讯采用 IEEE802.11 协议, 通讯模式有局域网和因特网两种.

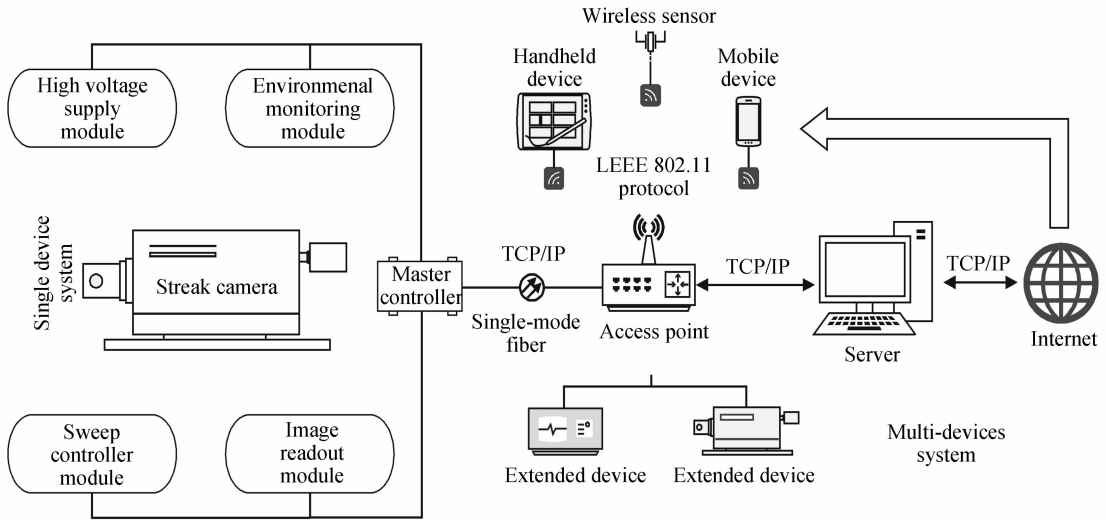


图 2 系统总体架构

Fig. 2 Architecture of overall system

2.1 控制系统硬件架构

图 3 是模块化分布式条纹相机控制系统的硬件架构及其主要控制参量, 具体架构为: 高压供电模块的控制主要由高精度 ADC 和 DAC 完成, 均采用 SPI 总线串行通讯, 需要监测的模拟信号通过 ADC 转化为数字信号传递给主控器, 主控器设定的控制量通过 DAC 转化为模拟信号发送给底层驱动电路. 整个系统具有 32 路 TTL 电平隔离 I/O 接口, 以保证输入输出稳定. I/O 接口主要负责扫描控制、各模块开关以及安全防

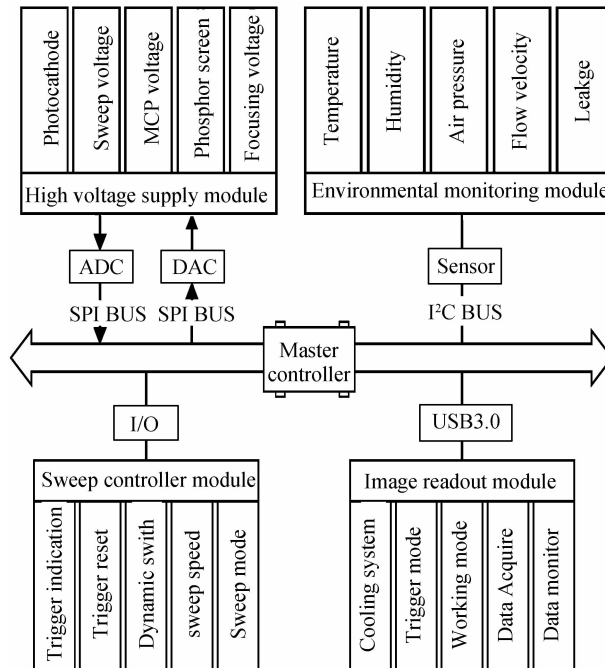


图 3 系统的硬件架构

Fig. 3 Architecture of hardware system

护等功能. 采用传感器监测气室温度、气压等环境参量, 保证系统运行在可靠的工作环境中, 传感器通过 I²C 总线与主控器通讯. 选用 USB 3.0 传输图像数据, 大幅增加传输速率与通用性.

智能控制系统下位机的主控器实物如图 4 所示, 从上至下分别为主控电路模块、协议转换模块、快门模块以及低压供电模块. 主控电路连接硬件系统各模块, 并完成 DC-DC 电平转换, ADC 与 DAC 驱动电路等功能; 协议转换模块完成串口通讯到 TCP/IP 协议的转换; 采用高速电子快门控制 CCD 电荷积累时间, 减小背景噪声对成像的影响; 低压供电模块提供 24V 的直流稳定电压; 最后采用屏蔽箱减小外界电磁辐射对主控器的干扰.

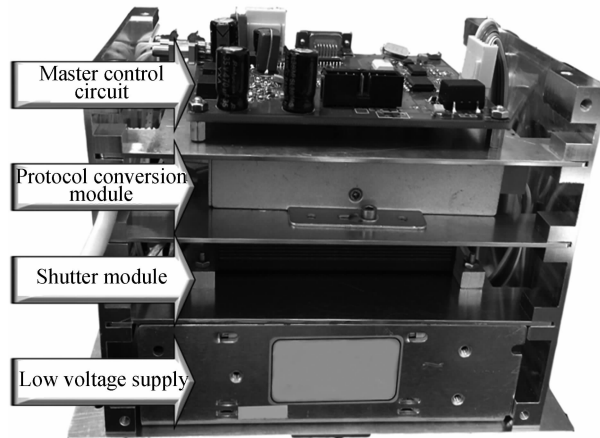


图 4 智能控制系统主控器实物图

Fig. 4 Master controller of intelligent control system

2.1.1 电源模块设计

图 5 为自激式开关电源拓扑结构设计: DAC 输出的控制电压 V_{DAC} , 经过由电压比较器构成的稳压驱动电路, 供给开关管 VT_1 的集电极. 初始状态下 VT_1 基极为低电平, 则 VT_1 正向偏置, 集电极电流 i_c 增长, 通过磁芯 T_1 , 在反馈绕组 N_f 产生上负下正的感应电动势, 基极电流 i_b 增大从而使 i_c 进一步增大, VT_1 迅速进入饱和状态. 此时 i_c 成线性迅速增长, i_b 保持不变, 二次绕组 N_s 感应电动势上负下正, 二极管反向截止, 无输出电流. 当 $i_c = \beta i_b$ 时 VT_1 进入放大区, 此时 i_c 增长速度减小, N_f 的感应电动势也随之减小, i_b 减小导致 i_c 减小, 在 N_f 产生基极为正的感应电动势, VT_1 进入截止状态. 此时副边线圈 N_s 感应电动势上正下负, 二极管正向导通, 电压经过整流升压后产生高压供给负载. 同时电容 C_5 通过 R_6 放电, 基极电势降低. 当变压器中的存储能量消耗完毕之后, 开关管 VT_1 的 U_{eb} 重新满足导通条件, VT_1 将再次进入开启状态.

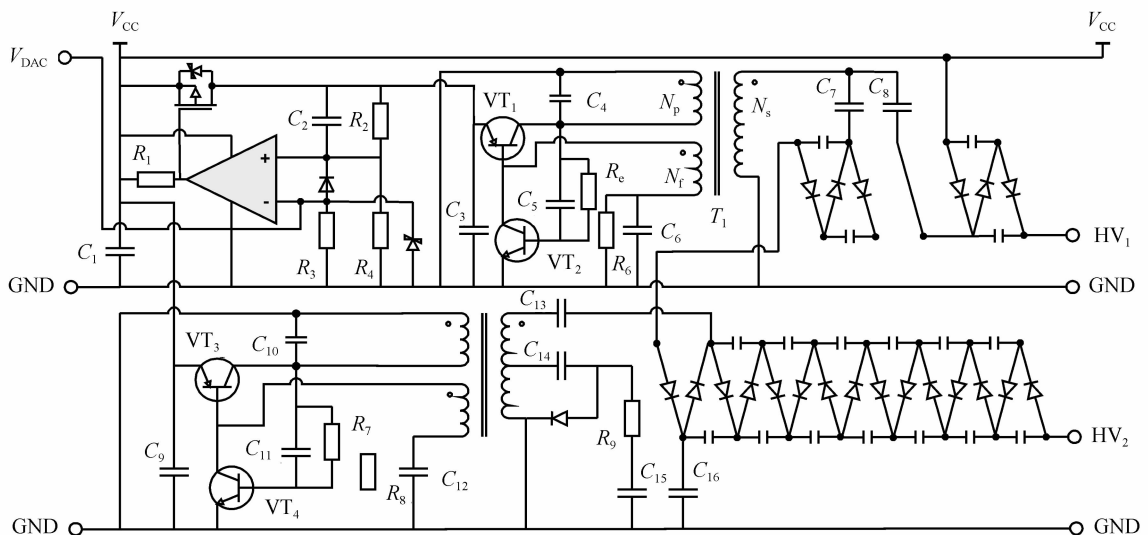


图 5 自激式开关电源拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of ringing choke converter

由工作原理可知,该电源的脉冲信号由自激振荡产生,电源结构简单,可以充分减小体积.另一方面,当 VT_1 的集电极电流 i_c 过大时,过流检测电阻 R_c 两端电压使得 VT_2 满足导通条件, VT_2 将对 VT_1 的基极电流产生分流作用,从而限制 VT_1 集电极电流 i_c 的增长,因此该电源具有一定的自保护功能.

2.1.2 电源测试结果

图6为本文所设计的自激式开关电源的工作曲线,其中图6(a)为DAC输出的模拟电压 V_{DAC} 对供给MCP的高压输出 HV_1 的线性调整曲线,所用DAC的位数为16位,相对准确度(relative accuracy)为 $\pm 0.0987\%FSR$,其输出电压通过上位机发送指令到下位机处理器控制,线性调整准确度可达1%;图6(b)为该电源 HV_2 输出电压随时间变化的曲线,经测试该电源工作状态稳定,输出电压一小时变化误差约为0.3%,因此该电源可以满足对条纹相机的高准确度稳定控制.

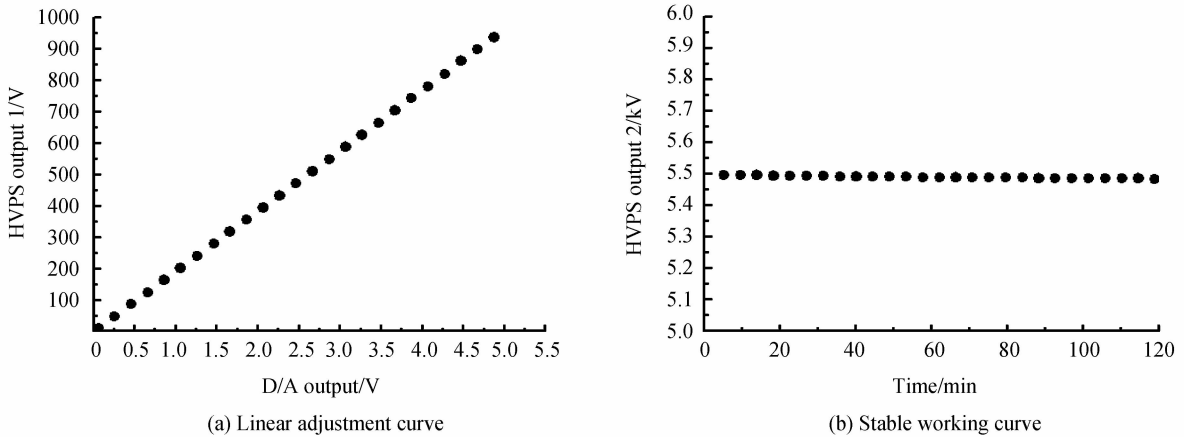


图6 自激式开关电源工作曲线
Fig. 6 Working curve of ringing choke converter

2.2 软件设计

软件系统采用客户端-服务器(Client/Server,C/S)模式,服务器负责数据交换与权限管理;客户端具有设备的监测权,并可以向服务器请求设备的控制权.同一时间一台设备只能被单一上位机(包括服务器)所控制.软件采用高级编程语言编写,并在应用层进一步保证系统可靠运行.图7所示客户端分为PC版(a)与Android版(b),PC版本包括相机控制、图像获取以及多种图像处理等功能,移动版可以运行于安卓系统的手持设备以及嵌入式设备中,满足设备便携化的需求.



图7 智能控制系统软件
Fig. 7 Software of the intelligent control system

客户端图像采集工作流程如图8,首先将相机初始化,获取运行参量,待系统工作状态稳定后进入图像读取流程:设定相机的工作模式,这包括电极电压设定,增益调节,扫描模式选择以及CCD的曝光时间、触发模式等.设定完毕后开始获取图像数据,系统监测数据获取情况,待全部数据传输完毕,将图像数据传输至客

户端图像显示区. 得到图像后若无需继续工作, 则相机进入关闭环节: 为防止过大的温度变化损坏传感器, 采用控制升温或降温速率的方式逐步关闭 CCD 冷却系统; 低压开关将在最后关闭, 使得监测系统全程工作以保证相机安全运行.

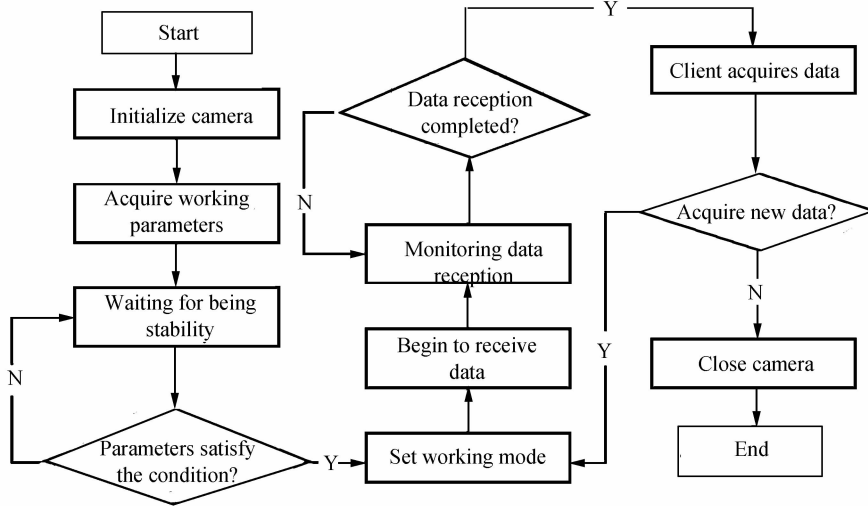


图 8 图像采集工作流程图
Fig. 8 Workflow of The image acquisition system

3 系统测试

图 9 为可见光皮秒条纹相机与智能控制系统的测试实验图, 本文设计的智能控制系统已应用至该相机, 相机的全部标定实验全部由此智能控制系统完成. 动态测试采用 Nd:YLF 脉冲激光器, 光脉冲为半高全宽标称 8 ps, 波长 526.5 nm 的黄绿光对相机进行标定.

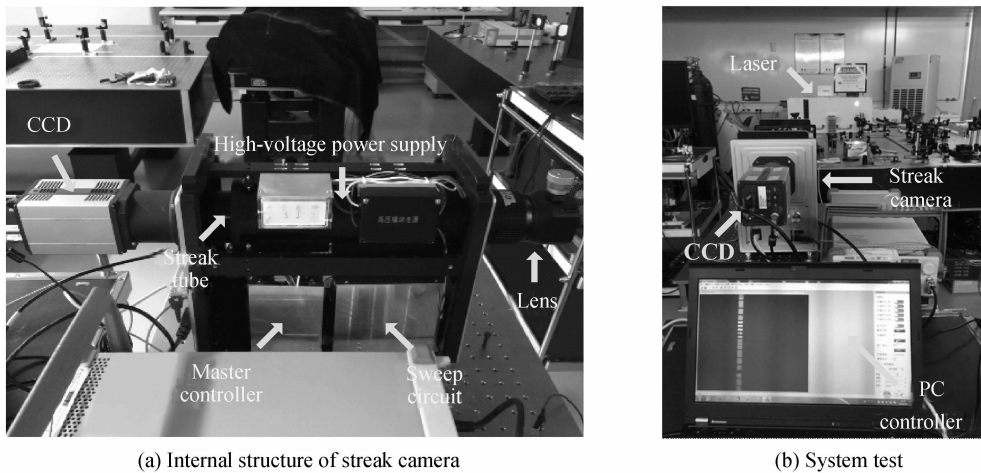


图 9 可见光条纹相机与智能控制系统测试实验图
Fig. 9 Visible light streak camera and intelligent control system test experiment

3.1 动态空间分辨率

采用分划板进行相机动态空间分辨率的标定实验, 分划板每个周期含有 3.75 lp/mm, 6.75 lp/mm, 9.75 lp/mm, 12.75 lp/mm, 15 lp/mm, 共 5 组分辨率条纹, 每组由 1:1 等宽 5 条黑白条纹构成. 在全屏扫描时间为 5 ns 档位下, 得到动态空间分辨率扫描图像及其选框部分 Y 轴方向强度分布 (图 10), 在 12.75 Lp/mm 分辨率条纹处, 计算出对比度 $CTF=14\%$. 在 9.75 Lp/mm 分辨率条纹处, 可计算出对比度 $CTF=28\%$.

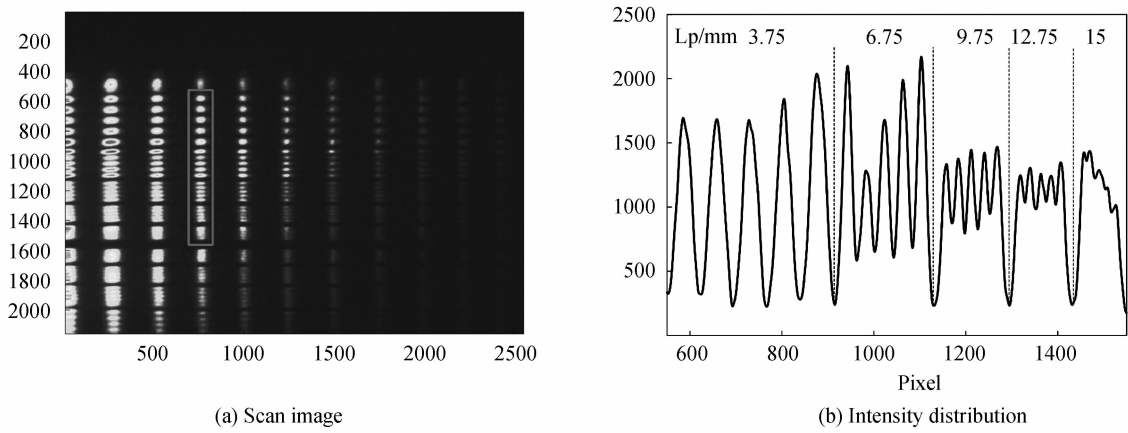


图 10 动态空间分辨率测试结果
Fig. 10 Result of dynamic resolution test

3.2 动态范围

采用在输入/输出线性范围内的最强脉冲和最弱脉冲比的方法标定条纹相机的动态范围:调整透射式标准具镜片距离,产生光脉冲间隔 500 ps、强度依次衰减 75% 的脉冲序列.在全屏扫描时间为 5 ns 档位下,得到动态空间范围扫描图像与 X 轴方向强度分布(图 11),其中最强脉冲强度 $I_{\max} = 2217$,最小脉冲强度 $I_{\min} = 122$,背景噪声 $I_b = 113$,由此可得动态范围为

$$D = \frac{(I_{\max} - I_b)}{(I_{\min} - I_b)} = \frac{2217 - 113}{122 - 113} \approx 234$$

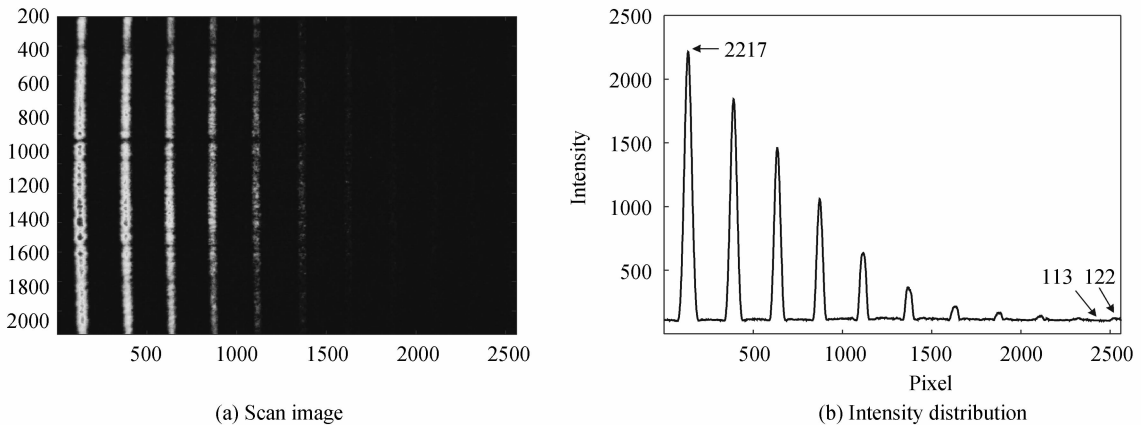


图 11 动态范围测试结果
Fig. 11 Result of dynamic range test

3.3 动态时间分辨率

采用入射光脉冲宽度的展宽的方法标定动态时间分辨率:调整标准具镜片距离为 5 mm(脉冲间隔 33.3 ps),狭缝宽度为 80 μm ,在扫描 1 ns 档位下,得到时间分辨扫描图像与 X 轴方向强度分布(图 12),其中两个脉冲间隔为 $L_2 - L_1 = 83$ 像素,CCD 图像采集分辨率为 2560 \times 2160,则全屏扫描时间为

$$T = \frac{2560}{L_2 - L_1} \times \frac{5 \text{ mm} \times 2}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.028 \text{ ns}$$

脉冲半高宽为 35 像素,估算该相机时间分辨率为 $T \times 35 / 2560 \approx 14.05$ ps.由于实验条件限制,本文所采用的是 8 ps FWHM 的入射光脉冲,若采用 FWHM 更小的入射脉冲进行标定,测得该可见光条纹相机的极限时间分辨率应优于 14.05 ps.

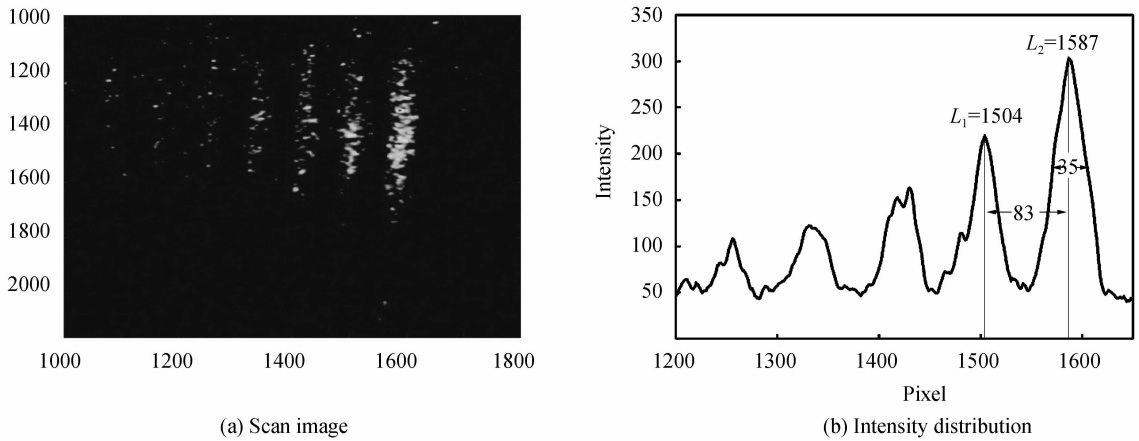


图 12 时间分辨率测试结果
Fig. 12 Result of temporal resolution test

4 结论

本文针对条纹相机不同应用场景的需要,基于物联网技术框架,研制了一种扩展性强、网络化、数据处理功能强大的分布式智能控制系统.采用了无线与有线相结合的客户端-服务器控制模式,方便多机协作与设备扩展,设计了具有图像读出与处理系统的 PC 客户端与满足便携化的移动监控端.针对该控制系统,设计的具有自保护功能的自激式负反馈的可控制高压电源模块,实现了电源的小型化,且线性调整准确度可达 1%.在应用该系统的可见光相机的测试试验中,得到动态分辨率 12.75 Lp/mm(CTF=14%),动态范围 234:1,时间分辨率约为 14ps.实验证明该智能控制系统可靠有效,现在该智能控制系统已广泛应用于多种型号的条纹相机中.

参考文献

- [1] FENG J, SHIN H J, NASIATKA J R, *et al.* An X-ray streak camera with high spatio-temporal resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(13): 134102.
- [2] KHAN S F, LEE J J, IZUMI N, *et al.* Characterization of the X-ray sensitivity of a streak camera used at the National Ignition Facility (NIF) [C]. SPIE, 2013, **8850**.
- [3] HU Xin, LIU Shen-ye, DING Yong-kun, *et al.* Design of SG-III X-Ray streak camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2871-2875.
胡昕, 刘慎业, 丁永坤, 等. 神光 III 主机 X 射线条纹相机设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2871-2875.
- [4] ANTHONY D G. Multiple-Slit Streak Tube Imaging Lidar (MS-STIL) applications[C]. SPIE, 2000, **4035**: 266-278.
- [5] MCLEAN JW. High resolution 3-D underwater imaging[C]. SPIE, 1999, **3761**: 10-19.
- [6] HUI Dan-dan, TIAN Jin-shou, WANG Jun-feng, *et al.* Dynamic properties of a small-size streak tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(1): 410-418.
惠丹丹, 田进寿, 王俊峰, 等. 超小型条纹管的动态特性研究[J]. *物理学报*, 2016, **65**(1): 410-418.
- [7] CHEN Zheng-kai, TIAN Jin-shou, LIU Hu-lin, *et al.* A small multi-purpose streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2379-2382.
陈正楷, 田进寿, 刘虎林, 等. 一小型化多用途条纹变像管[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2379-2382.
- [8] CAO Yong-can, YU Wen-wu, REN Wei, *et al.* An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 427-438.
- [9] Hamamatsu Photonics. Universal streak camera C10910-01 [EB/OL]. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/5001/5011/5041/C10910-01/index.html>. 2016-4-11.
- [10] LIU Jie, DING Yong-kun, TIAN Jin-shou, *et al.* Modular remote-controllable anisotropic focusing streak camera[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2405-2410.
刘杰, 丁永坤, 田进寿, 等. 模块化程控各向异性聚焦条纹相机[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(10): 2405-2410.
- [11] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, *et al.* Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions[J]. *Future Generation Computer Systems-The International Journal of Esience*, 2013, **29**(7): 1645-1660.
- [12] OCHIAI M; MATSUO H. An AC/DC converter, with high power factor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, **50**(2): 356-361.