

〈系统与设计〉

在线自动聚焦红外热像仪系统设计

万晓帆¹, 吕耀文^{1,3}, 章冬岩², 刘基岩³

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 大连集发南岸国际物流有限公司, 辽宁 大连 116601;
3. 中光红外(大连)科技有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 红外热像仪具有全天候成像、环境适应性强、非接触测温等优点, 被广泛应用于国民经济的各个领域。本文设计了一套可组网的自动聚焦红外热像仪系统。系统主要分为3个部分: ①红外热像仪成像组件, 包括可变焦红外成像光学镜头和非制冷红外焦平面探测器; ②自动聚焦闭环控制组件, 包括FPGA图像评价单元、电机反馈控制单元和聚焦搜索算法; ③红外热像仪网络化监控嵌入式组件, 包含视频压缩编码、私有网络控制传输协议、OSD(on-screen display)温度叠加等功能。该系统可广泛应用于港口码头、石油化工、危险品仓储等领域, 并将逐步成为这些领域事故预判和报警的重要安全监控设备。

关键词: 仪器仪表; 红外热像仪; 自动聚焦; 网络化; 安监设备

中图分类号: THB11 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)08-0743-06

Design of an Auto-focusing Infrared Thermal Imager Online System

WAN Xiaofan¹, LYU Yaowen^{1,3}, ZHANG Dongyan², LIU Jiyan³

(1. The School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Dalian JiFa South Bank International Logistics Co., Ltd., Dalian 116601, China;
3. China Optical Infrared Technology(Dalian) Co. Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: An infrared thermal imager has the advantages of all-weather imaging, environmental adaptability, and noncontact temperature measurement. It has been widely used in various fields of the national government. An auto-focusing infrared thermal imager online system was designed for this paper. The system is mainly divided into three parts: 1) infrared thermal imager components, including zoom lens and imaging infrared uncooled infrared focal plane detector; 2) automatic focusing closed-loop control components, including FPGA image evaluation unit with feedback control of the motor unit and a focusing search algorithm; and 3) the embedded network monitoring component containing the video compression encoding, private network control transmission protocol, and OSD (on-screen display) temperature superposition function. The system can be widely used in ports, petrochemical, dangerous goods warehousing and other fields, and will gradually become an important part of the safety monitoring equipment for accident prediction and awareness in these areas.

Key words: metrological instrumentation, infrared thermal imager, auto-focus, networked, safety equipment

0 引言

红外热成像技术由美国军方研究和开发出来, 在海湾战争中发挥了无与伦比的夜视作战威力, 得到了世界各国的重视。几十年以来, 红外热成像技术作为

现代高科技, 在侦察、监视、瞄准、射击指挥和制导等方面的应用要求越来越高, 因此得到了惊人的发展, 显示出了极为辉煌的前景^[1]。红外热像仪可分为制冷型和非制冷型红外热像仪两大类。制冷型红外热像仪测温灵敏度高、探测距离远, 主要应用于高端军

收稿日期: 2017-12-20; 修訂日期: 2018-01-09。

作者简介: 万晓帆(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: onexiaofan16@163.com。

通信作者: 吕耀文(1987-), 男, 工学博士, 讲师, 硕士生导师, 中光红外(大连)科技有限公司技术顾问, 主要从事图像处理方面的研究。

E-mail: lyw@coirint.com。

基金项目: 吉林省科技发展计划资助青年资金项目(20160520018JH)、吉林省重点科技攻关项目(20170204048GX)。

事装备，非制冷红外焦平面红外热像仪无需制冷装置，可在室温下工作，具有体积小、质量轻、功耗低、寿命长、成本低、启动快等优点^[2]，被广泛应用于工业、交通、安防监控、气象、医学等民用领域。

相比于传统的可见光成像，红外热成像具有透雾、夜视和测温的功能。在很多应用领域取得了明显的优势，如刘凤杰^[3]将红外热像仪应用于高速公路的监控中，获得了清晰的红外夜视图像，带来交通安全及监控效果的改善。梁文远^[4]则将红外热像仪应用于汽车的夜间辅助驾驶，利用红外热像仪的夜视功能，实现了夜间行人的检测，显著提高了驾驶员夜间行车的安全。中煤集团刘涛等人^[5]则应用红外热像仪的非接触测温功能，将红外热像仪作为矿井设备的状态的监测装置，为矿井安全监测或设备预防性维护提供依据。刘永翔等人^[6]将弥散介质遮蔽表面的红外成像精确测温问题归结为遮蔽物对热像仪工作波段光学厚度的准确测算。卞宏友等人^[7]采用红外热像仪实时测量采集基板上表面温度，为激光沉积修复过程中预置基体表面温度场的实时调控提供依据。左月等人^[8]则探讨了红外热成像技术在轻工行业中的应用。而夏浩等人^[9]则将红外热像仪与三维激光扫描仪结合观测滑坡，并利用红外热像仪的测温数据对滑坡进行预测和预报。

以上这些应用，都以红外热像仪采集的数据为基础，红外热像仪是获得红外测温图像的关键设备。中光红外（大连）科技有限公司（以下简称中光红外）专注于红外热像产品的研究、开发、生产和服务。中光红外与长春理工大学合作，经过两年的研究和技术积累，已完全掌握红外热像仪系统设计中的关键核心技术，由中光红外和长春理工大学共同研发的红外热像仪系统在大连港集发南岸危险品库、芙蓉岛等领域得到广泛应用，该系统将逐步成为港口码头、石油化工、危险品仓储等领域事故预判和报警的重要安全监

控设备。本文以中光红外现在面向市场的 CR-PSV 红外热像仪产品为基础，详细介绍此红外热像仪系统设计的相关技术。

1 红外热像仪的总体组成

在线自动聚焦红外热像仪的系统架构框图如图 1 所示。主要由以下单元组成：①红外成像单元；②图像处理单元；③自动聚焦控制单元；④图像压缩与网络传输单元。

1) 红外成像单元

红外成像单元包括红外光学镜头和红外探测器。红外光学镜头将目标发出的红外光成像在红外探测器上，红外探测器将红外光转换为电学信号，输出图像信号，供后续电路采集、处理和显示。红外光学镜头和红外探测器的好坏直接影响最终的红外热成像效果。同时由于红外探测器的光电转换灵敏度的限制，红外光学镜头的 F 数应该与红外探测器匹配。本系统选择美国 FLIR 公司生产的非制冷红外探测集成一体化机芯，光学镜头采用中光红外自主设计、研发和生产的光学镜头。FLIR 一体化机芯要求的 F 数为 1.2，中光红外将光学镜头的 F 数提高到 0.8，获得了比原厂镜头更加优质的红外热像仪图像。同时为了满足不同探测距离的需求，中光红外拥有 7 款不同焦距的定焦或变焦红外光学镜头，可与机芯实现无缝对接，满足各种市场应用需求。

2) 图像处理单元

图像处理单元包括 FPGA 和 DSP。FPGA 采用 Xilinx 公司生产的高性能、低功耗和高性价比 Spartan 6。DSP 选用 TI 公司生产，主频 1 GHz 的 TMS 320C6748，可专门应用于图像处理领域。FPGA 完成图像的采集和实时预处理功能。FPGA 与 DSP 之

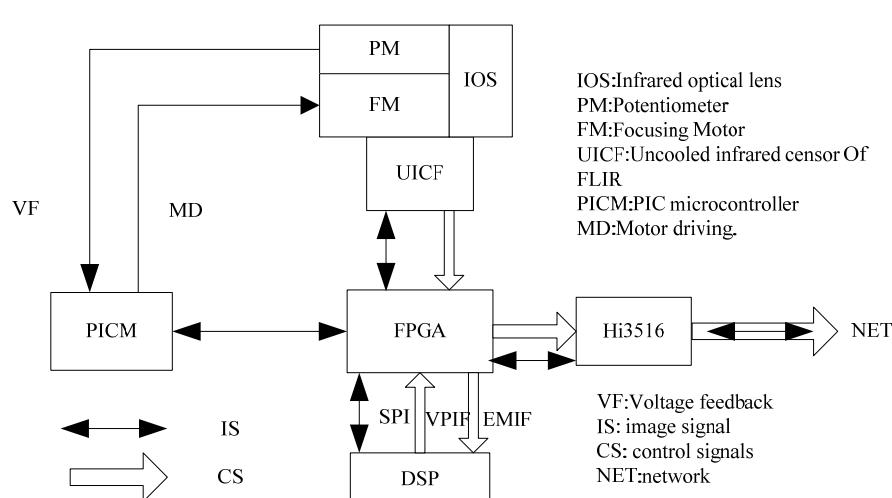


图 1 中光红外 CR-PSV 热像仪系统组成框图

Fig.1 Diagram of China optical infrared imaging system CR-PSV

间采用 DSP 专用的大量图像传输接口 VPIF 和 EMIF, 其中 VPIF 接口由 FPGA 向 DSP 传输, EMIF 由 DSP 向 FPGA 传输, 这样可以形成完整的图像处理数据流, 有利于复杂的红外图像增强及目标识别跟踪等高端应用中。FPGA 除了完成图像的预处理任务, 还实现了控制数据的转发, 是整个系统控制信号流动的中间枢纽。

3) 自动聚焦控制单元

自动聚焦控制单元以 Microchip 公司的 16 位单片机 PIC24FJ64GA004 为控制核心。单片机控制电机驱动芯片, 驱动电机移动, 实现图像焦平面的移动, 同时图像焦平面移动的过程中, 环形电位计由于电阻值的改变, 输出电压也跟着产生变化。单片机通过 10 位 A/D 转换接口, 采集电位计的电压值, 确定电机的当前位置, 另外单片机与 FPGA 通过高速串行 SPI 接口连接, 获取图像评估值, 实现图像的快速自动聚焦闭环。

4) 图像压缩与网络传输单元

图像压缩与网络传输单元采用华为海思半导体生产的 Hi3516 网络摄像机专用处理芯片, 拥有 1080P@30 fps H.264 多码流编码性能、优异的 ISP 和编码视频质量、高性能的智能加速引擎等特性。红外机芯产生的图像数据, 经过 FPGA 转化为 Hi3516 采集的图像彩色格式 YUV420, 然后在 Hi3516 中完成热像仪图像的 H.264 压缩后推送到外部网络中。另外, 在 Hi3516 中还建立了私有的网络传输协议, 传输远程网络端发送的控制命令信号, 如云台移动、红外热像仪变倍和红外机芯模式调整等。

2 红外热像仪系统关键技术

2.1 自动闭环聚焦技术

自动聚焦是指通过调节镜头组和探测器之间的位置从而在图像探测器(如可见光 CCD 或红外探测器)上获得清晰图像的过程。目前在一些成熟的可见光成像方案中, 处理器厂商如华为海思、TI 等都在解决方案中给出了图像清晰度评价函数, 但是, 红外光图像在图像细节和分辨率上与可见光有很大的不同, 直接采用传统的可见光聚焦算法, 其聚焦效果会时好时坏, 为此中光红外对红外聚焦关键技术做了深入研究。目前已经完全掌握红外图像自动聚焦中的清晰度评价、位置搜索和动态闭环调整 3 项关键技术。相比于同行业产品, 实际聚焦速度处于国内领先地位。

红外测温和成像产品为了实现大范围的监测, 经常会配合云台工作, 当云台俯仰和方位变化时, 会导致成像物距的改变, 进而引起像面的变化, 因此需要

通过控制信号使镜头变焦以成清晰的像。另外在红外变焦镜头的应用中, 都需要实时的电动变倍以观测和跟踪感兴趣的目标对象。实现镜头电动调焦和变倍的动力执行机构就是电机。

针对每一款红外镜头, 都对电机选型中涉及的电机最大速度、电机定位精度和电机力矩进行了计算, 同时为了消除镜头齿轮的回转间隙, 中光红外采用环形电位器作为镜头移动的反馈机构, 形成红外镜头变倍和调焦的闭环控制系统。与传统的开环控制相比, 闭环控制技术可以实现快速、精确的自动聚焦。中光红外在镜头电机控制板上加入了一个单片机, 在单片机中实现电机的闭环控制算法, 无须用户关心内部的闭环细节, 客户只需按协议提供电机的位置信息即可, 闭环控制流程如图 2 所示, 设计的电机控制和位置反馈 PCB 板如图 3 所示。

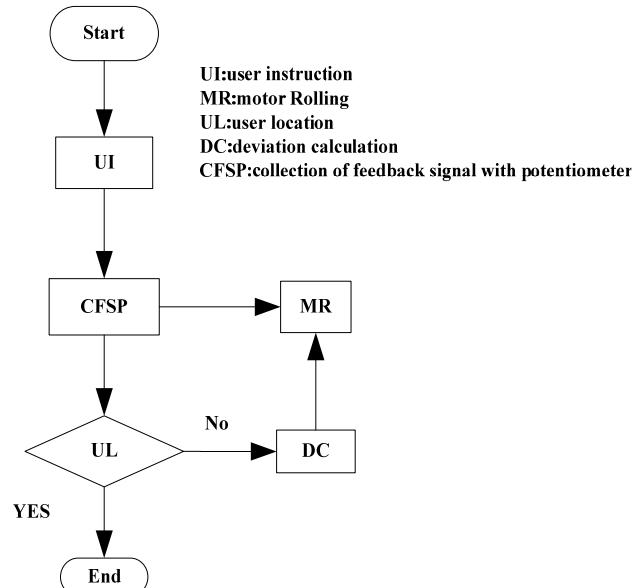


图 2 自动聚焦控制流程图

Fig.2 Block diagram of automatic focus control

2.2 图像格式转化与压缩网络传输技术

如图 4 所示, 为 Hi3516 的硬件功能框图。Hi3516 的 VIU 接口为视频图像接口, 支持 Bayer、BT656/1120、CMOS 等主流的图像传输格式。FLIR 红外机芯采用 4 对 LVDS 差分信号传输图像数据, 不符合 Hi3516 视频图像输入的格式要求。需要将 LVDS 编码的图像数据解码成 CMOS 格式的图像格式, 本系统采用 FPGA 的并行特性, 完成图像数据的实时转换。LVDS 编码到 CMOS 格式转换的信号仿真图如图 5 所示。

转化后, 被 Hi3516 采集的红外图像进入芯片内部, 通过 Hi3516 的 SDK, 调用芯片内部的 H.264 硬压缩视频子系统, 将图像编码压缩后通过 RTSP 传输

协议将红外图像推送到网络中。同时，远程网络端还发送了一些响应的控制信号。红外热像仪系统 Hi3516 应用层软件设计框图如图 6 所示。

3 红外热像仪系统的应用

中光红外与长春理工大学研发设计的这套在线自动聚焦红外热像仪系统已成功实现批量生产，并对外销售。图 7 为红外热像仪系统在芙蓉岛海港安全监

控中的应用。其中，图 7(a)为中光红外热像仪在某一处位置的架设实物图；图 7(b)为通过网线连接多台红外热像仪设备的室内组网控制机柜；图 7(c)为组网红外热像仪与可见光采集的图像样张。图 7(c)中上左和上中 2 幅视图为可见光采集的图片，其余 4 幅视图则为红外热像仪采集的图像。由对比可看出，红外热像仪相对于可见光拥有更低的图像噪点和优质的夜视成像效果。

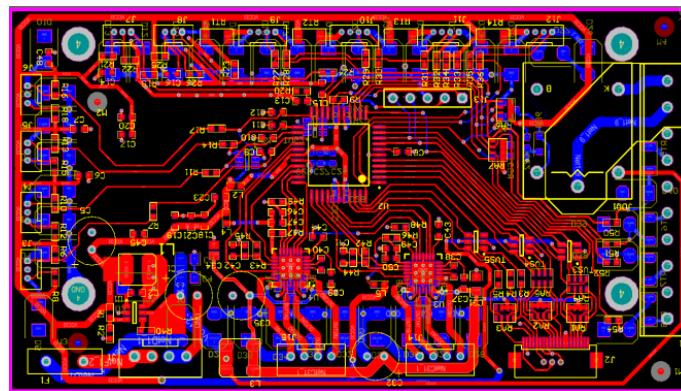


图 3 单片机位置控制与反馈 PCB 设计 Fig.3 PCB of microcontroller control and feedback

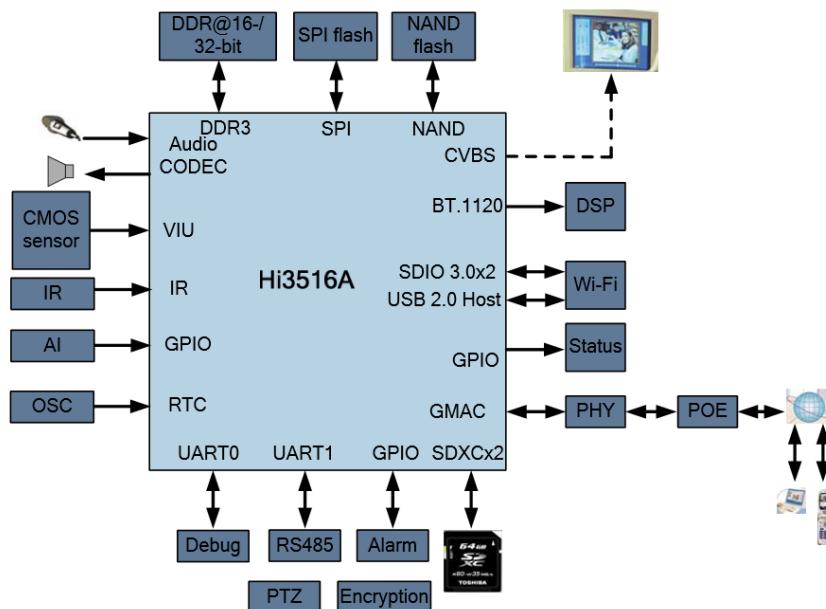


图 4 Hi3516 硬件功能框图 Fig.4 Block diagram of Hi3516

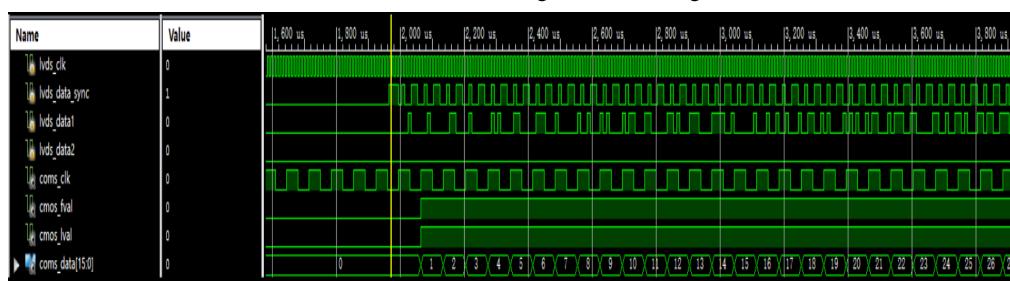


图 5 LVDS 编码到 CMOS 格式转换的信号仿真图

Fig. 5 Block diagram of signal simulation from LVDS coding to CMOS format conversion

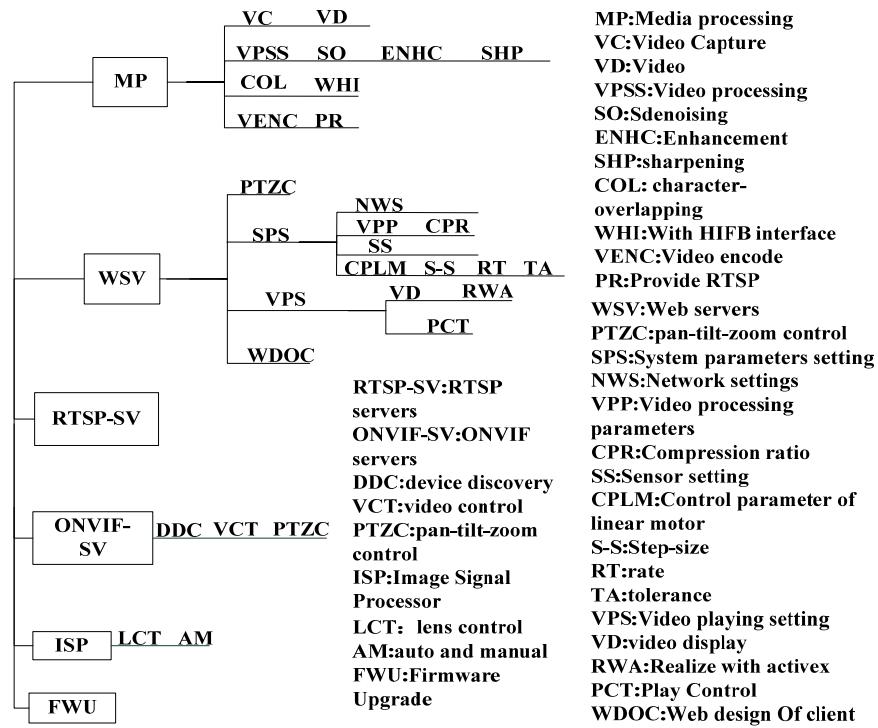


图 6 Hi3516 应用层软件设计框图

Fig. 6 Block diagram of software design on Hi3516 application layer



(a) 某一位置处的红外热像仪



(b) 室内组网控制机柜

(a) Infrared thermal imager at a certain location

(b) Control cabinet with networking at indoor



(c) 组网红外热像仪与可见光采集的图像样张 (c) Infrared thermal imager with networking and image acquired in visible light

图 7 红外热像仪系统在芙蓉岛海港安全监控中的应用

Fig.7 Infrared thermal imager applied in monitoring of Hibiscus island

由图7(c)可知,芙蓉岛上的红外热像仪在夜晚成像对比度高、噪声小,具有明显的安全防控优势。

红外热像仪除了具有显著的夜视优势外,还能够实现非接触式温度测量。该特性在森林防火、危险品仓库存储、石油化工、电力等行业中能够起到安全预防作用。在这些应用中,一旦温度出现了异常,就意味着潜在危险已经开始出现,应马上进行温度异常原因查找,并做出决策。因此,红外热像仪在这些行业中能够起到重要的安全生产预警作用。图8为中光红外热像仪CR-PSV在大连港集发南岸危险品库1号出入口获取的非接触温度测量图。图中标识了红外热像仪视场内的最高温、最低温和平均温(温度单位为摄氏度),并对最高温和最低温的位置进行了相应标记,这些温度数据对于危险品库的突发事故预防具有积极的参考意义。



图8 大连港集发南岸危险品库1号出入口热成像测温图

Fig.8 Temperature images measured by infrared imaging system CR-PSV in exit one of Dangerous Chemicals Warehouse of Dalian JiFa South Bank

4 总结与展望

本文针对中光红外推向市场的成熟红外热像仪产品,详细介绍了红外热像仪设计的总体结构,分析了红外热像仪系统设计中的两项关键技术:自动对焦和红外热像仪在线组网,给出了红外热像仪在夜视和红外测温方面的典型应用。通过2年的研发,中光红外已完全掌握了红外热像仪系统设计的各项关键技术,具备红外热像仪的总体研发设计生产能力。下一步,中光红外将会充分利用红外热像仪的夜视和非接触测温特点,在现有硬件平台和相关成熟应用的基础上,拓展红外热像仪在国民经济中各个领域中的应用,特别是在安全生产领域的应用开发,给出红外热像仪在海港码头、危险品储运、石油管道监测、夜晚船舶自动辅助驾驶方面的解决方案,将危险扼杀在萌

芽中,为这些行业的正常运转和安全生产保驾护航。

参考文献:

- [1] 何丽. 走向新世纪的红外热成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2002(12): 48-51.
HE Li. Infrared thermal imaging technology towards the new century[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2002(12): 48-51.
- [2] 冯涛, 金伟其, 司俊杰, 等. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. 红外技术, 2015, 37(3): 177-184.
FENG Tao, JIN Weiqi, SI Junjie. Uncooled infrared FPA-a review and forecast[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 177-184.
- [3] 刘凤杰. 红外热成像系统在高速公路监控系统中的应用[J]. 交通标准化, 2010, 227: 148-150.
LIU Fengjie. Application of infrared thermal imaging system in highway supervision[J]. *Transportation Standardization*, 2010, 227: 148-150.
- [4] 梁文远. 基于红外热成像的夜间辅助驾驶系统[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
LIANG Wenyuan. Night driver assistance system base on infrared thermal imaging[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] 刘涛, 张化宁, 张锋军. 红外热成像技术在矿井设备状态监测中的应用[J]. 陕西煤炭, 2014, 33(5): 91-93.
LIU Tao, ZHANG Huaning, ZHANG Fengjun. Application of infrared thermal imaging technology in mine equipment condition monitoring[J]. *Shaanxi Coal*, 2014, 33(5): 91-93.
- [6] 刘永翔, 张健, 杜永成. 弥散介质遮蔽表面的红外成像测温方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 135-140.
LIU Yongxiang, ZHANG Jian, DU Yongcheng. Infrared imaging temperature measurement for a shielded surface by diffuse medium[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 135-140.
- [7] 卞宏友, 韩双隆, 李英, 等. 感应加热参数对激光沉积修复基板温度场的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 167-173.
BIAN Hongyou, HAN Shuanglong, LI Ying. Effect of different induction heating parameters on the substrate temperature field during laser deposition repair[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 167-173.
- [8] 左月, 刘娜, 高福生. 红外热像技术的工作原理及在轻工行业的应用[J]. 轻工标准与质量, 2017(1): 49-50.
ZUO Yue, LIU Na, GAO Fusheng. The working principle of infrared thermal imaging technology and its application in light industry[J]. *Standard and Quality of Light Industry*, 2017(1): 49-50.
- [9] 夏浩, 胡新丽, 唐辉明, 等. 红外热像技术在滑坡物理模型试验中的应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 291-299.
XIA Hao, HU Xinli, TANG Huiming. Application of infrared thermal radiation imaging technology to landslide physical model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 291-299.