

文章编号:1001-5078(2015)06-0683-06

· 光电技术与系统 ·

高灵敏度、小视场角炮口焰红外触发器的研究

雷挺, 贺伟

(西安邮电大学研究生院通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:传统红外辐射探测装置的调理电路由场效应管和高阻抗运放组成,探测灵敏度较低、输出不稳定且场效应管极易损坏,对红外辐射探测装置的可靠性带来负面影响,从而影响到弹药、武器系统的正常测试。本文采用运算放大器作为调理电路,使用带有瞄准具的小视场光学系统并整体设计红外辐射探测装置。采用差分信号输出,提高长距离传输脉冲信号能力,方便后续处理及直观观察,同时也有效提高了探测装置的灵敏度,抗干扰能力强、轻巧、适用于各种环境。

关键词:红外辐射探测;炮口焰探测;PbS 红外探测器;小视场光学系统;单稳态触发

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.06.017

Study on muzzle flame infrared trigger with high sensitivity and small field angle

LEI Ting, HE Wei

(Graduate School of Communication and Information Engineering, Xi'an
University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract:The regulating circuit of traditional infrared radiation detection device is composed of field effect tube and high impedance op-amp. It has low detection sensitivity, low output instability and the field effect tube is easy to be damaged. That makes a negative impact on the reliability of infrared radiation detection devices, thus affecting the normal test of ammunition and weapon systems. In our design, the operational amplifier was used as a regulating circuit, and small field of view was adopted. Differential signal output can improve the transmission capability of pulse signal at a long-distance, and make it easy to the following treatment and intuitive observation. That effectively improves the sensitivity of the detection device. The system has strong anti-interference ability and good adaptability.

Key words:infrared radiation detection; muzzle flame detection; PbS infrared detectors; small field of optical systems; monoflop

1 引言

红外辐射探测器是弹药、武器系统测试时接收发射炸点辐射的计时零点输出装置。随着国防工业技术的发展,各型口径的弹药及武器系统层出不穷,

使用要求也不断变化,对弹药及武器系统列装前的靶场测试过程也提出了更高的要求。如何更加及时有效地检测炸点信息或由此精确测量弹药的飞行时间或调整、控制弹药的成分,更加有效地提升弹药的

基金项目:中国兵器工业集团公司辽沈工业集团有限公司基金项目(No. P20140508000026)资助。

作者简介:雷挺(1989-),男,研究生,研究方向为传感器检测与应用。E-mail:wushenyeyu@163.com

收稿日期:2014-10-24; **修订日期:**2014-11-19

品质就成为研究各弹药及引爆系统的重要课题。

传统红外辐射探测装置的调理电路由场效应管和高阻抗运放组成,探测灵敏度较低、输出不稳定且场效应管极易损坏,后续附带设备较多且使用不方便。本文在借鉴已有检测设备的诸多优点后,提出了一种差分信号输出的具有远触发距离、远传输距离、小延迟误差特点的便携式炮口焰探测装置。

2 系统组成及工作原理

根据设备使用要求:

- (1) 视场角: $\pm 3^\circ$;
- (2) 触发距离: 130 mm, ≤ 300 m;
- (3) 触发信号输出线长度: ≥ 200 m 屏蔽线;
- (4) 工作温度: $-40 \sim 50$ $^\circ\text{C}$;
- (5) 工作环境: 室外任意地形。

据此,设计检测装置由光学系统、探测器件、调理电路和辅助器件组成,系统框图如图 1 所示。

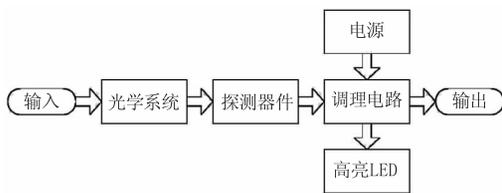


图 1 系统框图

Fig. 1 Systematic diagram

2.1 探测器件

弹药出膛及爆炸物爆炸后释放出大量的光和热,不同的弹药产生不同的火焰温度,对应不同的火焰光谱强度,光谱主要集中在可见光和近红外区域。为了避免可见光区域背景光干扰强烈的缺点,选择位于大气窗口的 $1 \sim 3$ μm 波长探测器件较为适合。

PbS 红外探测器作为 $1 \sim 3$ μm 大气窗口的探测设备,在红外跟踪、红外制导、非接触测温、火焰探测、光电开关等诸多领域广泛应用^[1]。随着生产工艺的改进,温度、振动、冲击等影响因素也得到了较好的解决。实际中采用带滤光片的 MG9306 型 PbS 探测器,其主要技术指标如表 1 所示。

表 1 MG9306 型 PbS 探测器技术指标

Tab. 1 MG9306 type PbS detector technology indicators

物理量	性能参数
阻值 $R_d / \text{M}\Omega$	0.1 ~ 3.0
探测度 $D^* / (\text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1})$	7.0×10^8
电压灵敏度 $S_u / (\text{V} \cdot \text{W}^{-1})$	1.0×10^3
光谱范围 / μm	1.8 ~ 3.2
时间常数 / μs	≤ 400
工作面积 / mm^2	6×6

2.2 光学系统^[2]

弹药及爆炸物爆炸时伴随有大量的热和冲击波,为了保护人员及测试设备的安全都必须远离爆点,但距离越远接收到的有用信号就越弱且背景环境的干扰也就越强^[3]。为此,摒弃传统大视场角光学系统测量的方法,利用凸透镜成像规律,提出带有瞄准具的 $\pm 3^\circ$ 小视场光学系统^[4]的方法。

根据公式:

$$f = \frac{1}{(n_L - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

其中, f 为焦距; u 为物距; v 为像距; n_L 为透镜材料折射率; r_1 为凸透镜物方球面的曲率半径; r_2 为凸透镜像方球面的曲率半径,选取凸透镜作为光学镜头。

PbS 红外探测器的探测窗口与透镜的圆心处于同一基准线上且垂直于基准线并平行放置,相距 f , 由于 u 远大于 f , 像距落在 $1 \sim 2f$ 之间, 由于所用探测器的圆面半径为 $3\sqrt{2}$, 且小视场角为 $\pm 3^\circ$, 由相对折射率公式:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

其中, θ_1 为介质 1 的入射角; θ_2 为介质 2 的折射角; n_1 为介质 1 的折射率; n_2 为介质 2 的折射率。

凸透镜成像规律图如图 2 所示。 $n_L = 1.5$ 时, 由图得: $\frac{2}{3} \sin(87^\circ) = \sin \alpha = \frac{r - 3\sqrt{2}}{\sqrt{f^2 + (r - 3\sqrt{2})^2}}$, 选取半径为 r 的透镜, 并将 PbS 红外探测器的探测窗口与透镜的距离调节为 f 。实际中使用 $r = 30.5$ mm 的凸透镜。

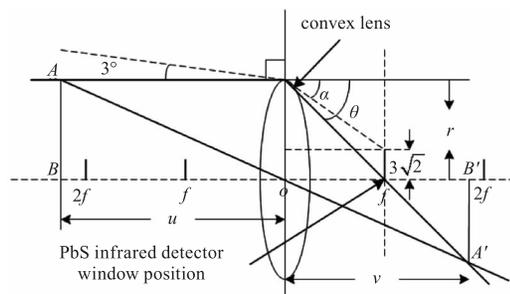


图 2 凸透镜成像规律图

Fig. 2 Figure convex imaging laws

因此,探测器在加与未加光学系统时,光敏面接收到的光功率发生变化,产生光增益^[5]:

$$G = \tau \cdot \left(\frac{A}{A_d}\right) \tag{4}$$

其中, τ 为光学系统透射率; A 为光学系统入瞳面积; A_d 为探测器光敏面面积。该光学系统的透射率 0.92, 光学系统入瞳面积 4213.88 mm^2 , 探测器光敏面面积 36 mm^2 , 光增益为 107.68。

2.3 基本调理电路

PbS 红外探测器为光导型传感器, 当接收到外界红外辐射时其阻值下降, 外界辐射消失后阻值恢复。因此, 将 PbS 红外探测器看做一个可变电阻并串联恒流偏置电路, 将外界辐射信号转化为电压信号。但实际中, PbS 红外探测器接收到的辐射信号是比较微弱的且为反向输出, 因此, 将已转化好的电压信号再经过反向放大、电压比较, 成为一定幅值的脉冲信号后再输出, 电路图如图 3 所示。

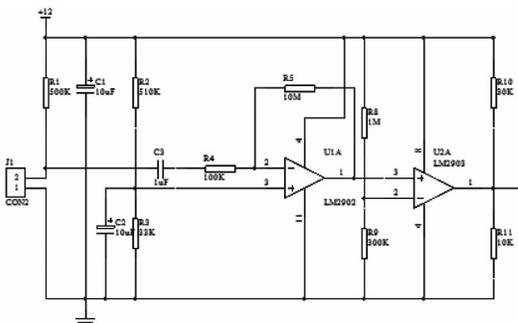


图3 基本调理电路
Fig. 3 Basic conditioning circuit

其中, LM 2902 用作反相放大并将电压基准上提, 设计为单极性运算放大电路, 再通过 LM 2903 电压比较器后输出脉冲信号。

通过调整放大倍数和电压比较器的阈值实现对该探测器灵敏度的调节与控制。

2.4 辅助器件

由于该探测装置多用于户外远程探测, 使用小视场光学系统, 增加测试距离, 减小背景光干扰, 提高透过率及成像质量的同时将辐射能量尽可能多地汇聚在带有滤光片的 PbS 红外探测器的探测窗口上, 减少干扰的同时也大大提高了系统的灵敏度。由于探测装置灵敏度较高, 在使用过程中不能抖动。

设计中, 在探测装置外部加装瞄准具, 用于瞄准探测区域的同时, 使用三脚架作为固定装置, 将整个探测装置与三脚架云台上的固定板相连, 有效去除抖动问题。使用时将带有固定板的探测装置装入云台, 再依次调整三脚架上的各固定装置, 通过瞄准具瞄准探测区域即可, 如图 4 所示。



图4 探测装置整体工作状态图
Fig. 4 State diagram of the overall detecting means

3 仿真分析及改进

3.1 基本调理电路仿真分析

光导器件的 PbS 红外探测器根据工作原理, 可以将其看做一个可变电阻, 它和一个匹配电阻串联将接收来的红外辐射信号转化为电压信号^[6]。

PbS 红外探测器接收到微弱的红外辐射后, 自身电阻会出现微弱的变化, 仿真时, 使用电压源串联耦合电容并联电阻代替。根据所用 PbS 探测器的频率响应曲线及输入测试电路^[6]得到的结果, 此处, 假定红外辐射信号引起的电压源频率 400 Hz、幅值 50 mV, 并进行仿真分析, 如图 5 所示。

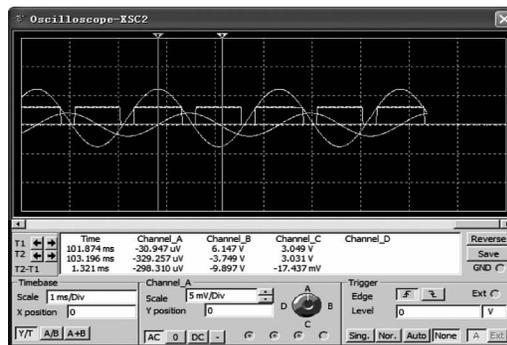
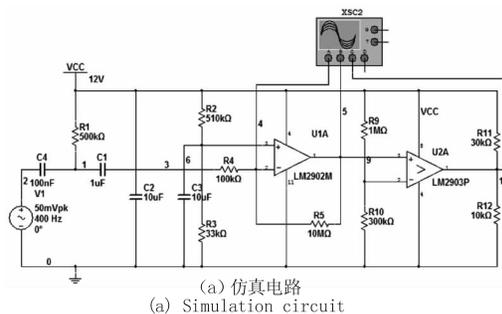


图5 基本仿真电路及其仿真结果
Fig. 5 Basic simulation circuit and the simulation results

实际中,受到检测距离及红外辐射信号强度等诸多因素的影响,PbS 红外探测器会有不同的输出情况,依次改变等效电路的参数可以模拟不同的输出情况。但值得注意的是,只要经过调理电路的输出电压大于电压比较器的阈值电压,输出是同幅值的方波信号。

3.2 电路改进

至此,检测装置功能基本实现,但实际中,炮口焰的红外辐射信号会随着火光的闪烁出现跳变^[7],等效于仿真过程中的电压源频率、幅值及其并联电阻阻值发生瞬间变化,最终导致基本调理电路的输出方波信号时而密集时而松散,对后续分析及处理造成很大的麻烦。

在基本调理电路的基础上,输出端首先连接高亮 LED,再经过高精度单稳态触发电路^[8],最后连接线路收发器,构成系统调理电路,如图 6 所示。

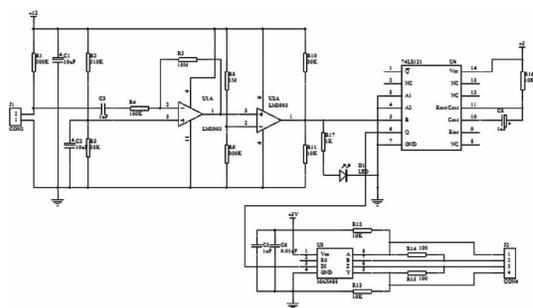


图 6 系统调理电路图

Fig. 6 The system condition circuit

其中,高亮 LED 主要用于直观的观察电路是否有输出脉冲,单稳态触发电路通过外接电容及电阻从第一个接收来方波的上升沿开始输出脉宽为 $t_w \approx 0.7 RC$ 的方波信号,结束之后再由第二个接收来方波的上升沿产生同样脉宽的方波信号^[7]。线路收发器再将这部分的输出以差分信号、RS 422 的通信类型输出,连接单片机就可以很容易地对采集到的数据进行分析及处理,且采用差分信号输出,提高了长距离传输脉冲信号的能力^[9]。

4 实验验证及系统完善

4.1 实际测试

由上所述,加工光学系统和 PCB 板以及整个检测装置的壳体,焊接 PCB 板所有元件后,依次安装 PbS 红外探测器及光学系统,并调整焦距使其刚好落在探测器的探测窗口上。再分别安装电源接插件、输出端接插件、高亮 LED 灯、检测装置电源开关,并全部封装在检测装置的壳体内,如图 7 所示。

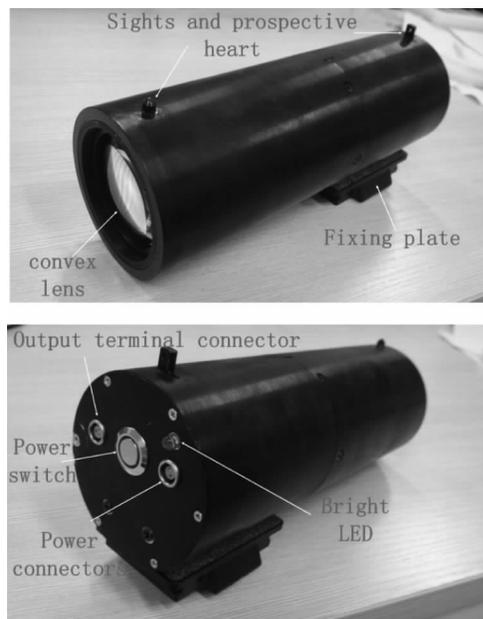


图 7 探测装置主体实物图

Fig. 7 Detection device body physical map

室内常温情况下,将示波器连接至检测装置正向输出端,用打火机代替炮口火焰,通过检测装置上的瞄准具瞄准虚拟探测点,使用打火机进行单次触发或连续单次触发,结果如图 8 所示。

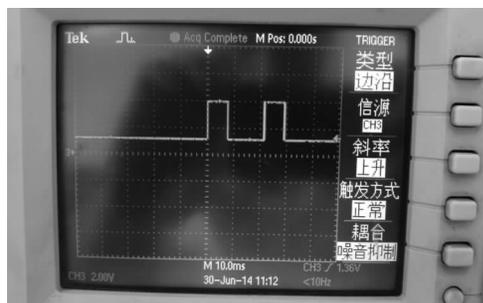


图 8 打火机触发输出

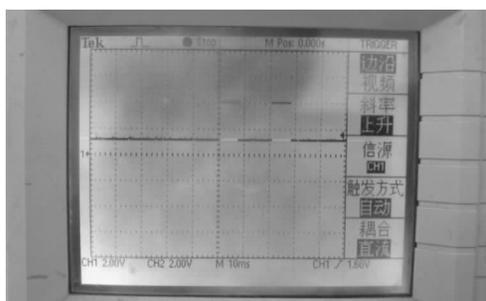
Fig. 8 Lighter trigger output

保持检测装置不动,以光学系统中轴线为准,在平行于光学系统的平面内任意偏离 3° 角均可以检测到,且探测距离为 $0 \sim 8$ m。

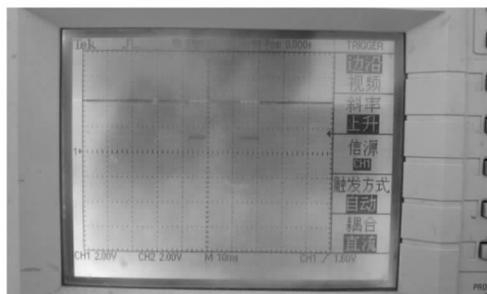
靶场测试条件为室外强光、 30°C 情况下,使用 105 mm 火炮,以炮口焰作为探测目标,连接 400 m 输出线,分别在距离炮口 84 m、300 m 处进行探测,其结果如图 9 所示,在 300 m 处时,保持检测装置水平视场不变,通过瞄准具结合三脚架上的水平罗盘,水平于炮口焰处将检测装置分别向左向右转动 3° 角,均有有效输出。

由于考虑经济原因,靶场测试只做了 84 m、300 m 及其各自 $\pm 3^\circ$ 视场角实验,而实验室中使用打火机作为触发设备做了大量测试,同一个打火机最远触发距离可达到 (8 ± 0.5) m,但同一触发设备、不

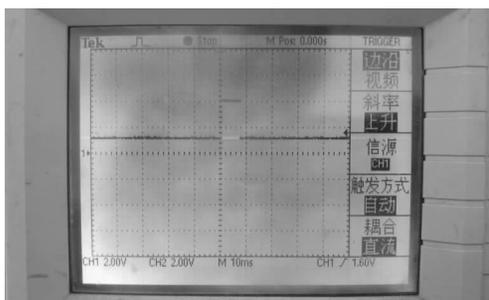
同的触发距离的输出方波个数各异但均有输出。其关系如表 2 所示。



(a)84 m 处正向输出
(a)Positive output at 84 m



(b)84 m 处反向输出
(b)Inverted output at 84 m



(c)300 m 处正向输出
(c)Positive output at 300 m

图 9 105 mm 火炮 84 m,300 m 处触发输出

Fig.9 105 mm artillery's trigger output at 84 m,300 m

表 2 不同触发设备在不同触发距离的输出
Tab.2 The output of different trigger equipment in different trigger distance

触发距离/m	方波数	触发装置
0~0.1	1~3	打火机
0.1~0.5	1~3	打火机
0.5~3	1~2	打火机
3~8	1~2	打火机
84	2	炮口焰
300	1	炮口焰

4.2 输出分析

实验结果表明,模拟检测点及真实检测点均可以有效触发且均满足设计指标。但由于探测距离或火焰的闪动,致使红外辐射信号发生变化,在示波器上反映为出现一个方波信号、两个方波或更多个方

波,但脉宽相同且均为 $t_w \approx 0.7 RC$ (本文为 8 ms)。由于调理电路整体原因,正向或反向输出时基准电压 1.2 V,后续处理时只需要相应的抬高电压门限即可。差分输出时,脉宽相同,基准电压为 0 V,幅值为 7.8 V。

4.3 系统完善

在调试过程中,将整个调理电路的地线与检测装置的壳体共地并将整个调理电路部分喷涂三防漆,整个装置共地的同时也增加了系统的抗干扰性能。

在室外强光、高温,检测装置长时间暴晒且持续工作的情况下,由于密闭的检测装置壳体内温度急剧升高,致使 PbS 红外探测器的阻值、电压灵敏度、探测度长时间处于最小值处,不能正常工作^[10]。使用时,避免长时间暴晒或遮光即可避免该问题发生。

4.4 功能复用

至此,达到并实现了所需炮口焰红外触发器的所有功能。但显然该设备的功能不会如此局限。

由于炮口焰非均匀气体红外辐射特性的不同,连接前级放大器的输出端至示波器,通过不同作用时间、幅值的输出波形便可准确地记录每次红外辐射持续的时间,使用积分的方法计算不同输出波形的面积,结合红外成像技术及以概率论为基础的等效分子黑体的方法^[11],计算出的辐射通量与输出波形的面积成正比关系。

5 结论

传统红外辐射信号检测装置使用场效应管加高阻抗运放的调理方式^[1],输出信号不便于后续处理且场效应管极易损坏。

本文检测装置依次通过信号转换、反相放大、电压比较、高亮 LED、单稳态触发、线路收发器,结合带有瞄准具的小视场光学系统及三脚架。输出以差分信号、RS422 的通信类型输出,连接单片机就可以很容易地对采集到的数据进行分析及处理且具有长距离传输输出信号的能力,同时通过高亮 LED 的闪烁可直观地观察触发状况。检测装置灵敏度高、探测精度及抗干扰能力强且轻巧、便于携带。不仅适用于炮口焰检测,经过改进后,也可适用于枪口焰、弹药、引爆系统及区域防火。

参考文献:

[1] WEI Guixiang,JIANG Bo. A digital infrared flame detector[J]. Journal of Beijing Institute of Technology,1999, 19(5):660-662. (in Chinese)

- 魏桂香,姜波.一种数字式红外火焰探测器[J].北京理工大学学报,1999,19(5):660-662.
- [2] GUAN Yingzi, YANG Liang. Digital micromirror array dynamic infrared scene projection optical system design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2):245-248. (in Chinese)
关英姿,杨亮.数字微镜阵列动态红外景象投射器光学系统设计[J].红外与激光工程,2011,40(2):245-248.
- [3] LI Bin, WU Haiying, WANG Wentao, et al. A simple infrared calibration system design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2):459-463. (in Chinese)
李斌,吴海英,王文涛,等.一种简易红外标定系统的设计[J].红外与激光工程,2014,43(2):459-463.
- [4] AN Ying, YANG Fengchun. The research of method to improve Infrared burst detection performance[J]. Optical instruments, 2013, 35(6):21-25. (in Chinese)
安莹,杨逢春.红外炸点探测装置性能的提高方法研究[J].光学仪器,2013,35(6):21-25.
- [5] JIN hai, ZHANG Haitao, GONG mali, et al. Diffuse light wide-field optical antenna design[J]. Journal of photons, 2002, 31(12):1518-1522. (in Chinese)
金海,张海涛,巩马理,等.漫射光宽视场光学天线的设计[J].光子学报,2002,31(12):1518-1522.
- [6] CHEN Renhou, FENG Gang, MA Xiaodong. Photoelectric properties of lead sulfide infrared detectors automatic test system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9):1001-1005. (in Chinese)
陈仁厚,冯刚,马晓东.硫化铅红外探测器光电性能自动测试系统设计[J].激光与红外,2010,40(9):1001-1005.
- [7] ZHU Chenguang, XU Chungun, XUE Rui, et al. Pyrotechnic flame burning particles in the flow field and its spatial distribution[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2):369-374. (in Chinese)
朱晨光,许春根,薛锐,等.烟火药火焰流场及其正在燃烧粒子的空间分布[J].红外与激光工程,2014,43(2):369-374.
- [8] REN Junyuan. The analysis of the characteristics of 555 monostable trigger[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2013, 31(2):170-172. (in Chinese)
任骏原.555单稳态触发器的触发特性分析[J].吉林大学学报:信息科学版,2013,31(2):170-172.
- [9] NIU Siyuan, XIANG Zheng. Based on RS-422/485 serial asynchronous communication interface design and application[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(10):2472-2474. (in Chinese)
牛思先,向征.基于RS-422/485的串行异步通讯接口设计和应用[J].计算机工程与设计,2007,28(10):2472-2474.
- [10] SUN Zhiyuan, WANG Min, CHANG Songtao. Ambient temperature on the measurement accuracy of infrared radiation effects and correction[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5):522-527. (in Chinese)
孙志远,王旻,常松涛.环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J].激光与红外,2014,44(5):522-527.
- [11] ZHANG Wenhua, WANG Xing, ZHANG Fengming, et al. Non-uniform heat gas, a new method to calculate the infrared radiation characteristics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4):573-578. (in Chinese)
张文华,王星,张凤鸣,等.非均匀热气体红外辐射特性计算新方法[J].红外与激光工程,2008,37(4):573-578.