

## 基于比色测温原理的动态辐射扫描测温仪研制

于为雄,戴景民,王 勇

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**介绍了动态辐射扫描测温仪相应的硬件和软件设计。硬件设计主要是两部分:光学设计和电路设计。光学设计主要包括光学镜头、扫描镜、激光器、透镜组以及孔径光阑这五部分。电路设计由前置放大电路和数据处理电路组成。前置放大电路包括前置放大器 AD820、反相放大器 OP07 以及继电器三个部分;数据处理电路采用 STC12C5A16S2 单片机最小系统,通讯采用 MAX232 进行;并且将 12864k12 作为液晶显示屏;其中,运用矩阵键盘,按键的功能包括发射率的设定、扫描频率的设定、测量键、通讯键和复位键,并且采用 AC/DC 的电源模块。动态辐射扫描测温仪采用非接触法测量,这种测量方法的主要优点是测量精度高、响应速度快、测试方便、便于携带等,使得该测量仪能够在危险系数高、辐射强度大、具有腐蚀性等恶劣环境下进行测量,使用方便,因此在市场中有着广阔的应用前景。

**关键词:** 红外测温; 动态扫描; STC12C5A60S2 单片机; 比色

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1390-06

## Research of the dynamic radiation scanning thermometer based on colorimetric measurement principle

Yu Weixiong, Dai Jingmin, Wang Yong

(Department of Automation Measurement and Control Engineering, School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The hardware and software design of the dynamic radiation scanning thermometer was presented in this paper. The hardware part contained optical part and circuit part. The optical part was composed of optical scanning mirror, laser, lens and aperture stop. And the circuit included pre-amplifier circuit and data processing circuit. In the circuit part, the pre-amplifier circuit was composed of pre-amplifier AD820, inverting amplifier OP07 and relay components, while the data processing circuit was composed of STC12C5A16S2 microcontroller, MAX232 and 12864k12 LCD display. Besides, matrix keyboard was used which can set emissivity, scanning frequency and reset. AC/DC module was used as the power module. The thermometer was designed with high accuracy, fast response, easy testing and carrying and many other advantages. It can also be used in some serious conditions, such as high-risk, high-radiation, high corrosion. Thus, the market application prospect is very broad.

**Key words:** infrared temperature; dynamic scanning; MCU(STC12C5A60S2); colorimetric

收稿日期:2013-09-05; 修订日期:2013-10-03

作者简介:于为雄(1988-),女,硕士,主要从事红外辐射测温 and COD 测量方面的研究。Email:yuweixiong881224@126.com

### 0 引言

红外辐射测温法的优点是任何传统温度测量方法都无法与之比较的,其精度高、响应快、稳定性好的优点所呈现的测量结果使其得到广泛应用。红外测温是利用自然界中所有物体都会向外发出红外辐射的原理来进行测量。随着现代红外技术的不断成熟和日益完善,在高危险、高腐蚀和高辐射领域中,红外检测的远距离、非接触、准确、实时、快速等优势逐渐地显现出来。同时,红外检测技术能够在不停电、不取样、不解体的情况下快速实时地在线监测和诊断故障<sup>[1-3]</sup>。

传统的红外辐射测温仪只针对一点进行测量,无法随周围环境影响的改变而迅速响应,而研究的一种基于比色测温原理的动态辐射扫描测温仪就是根据上述情况所研制的。

## 1 系统的硬件和软件设计

### 1.1 比色测温原理

一个绝对温度为  $T(K)$  的黑体,单位表面积在波长  $\lambda$  附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率(简称为光谱辐射度) $M_\lambda(T)$  满足下列关系:

$$M_\lambda(T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

该式即为黑体辐射的普朗克定律。其中,  $\lambda$  为波长,  $T$  为温度,真空中光速  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; 普朗克常数  $h = 6.256 \times 10^{-34} \text{ W/s}^2$ ; 波耳兹曼常数  $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s/K}$ ; 第一辐射常数  $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ ; 第二辐射常数  $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

比色温度,也可称色温,是指温度为  $T$  的物体在某一光谱区域内,辐射能量随波长的变化曲线与温度为  $T_c$  的黑体辐射能分布曲线相同,则  $T_c$  就为该物体的比色温度。根据比色测温原理,当波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的辐射经过转换后得到强度为  $I_1$  和  $I_2$  的光电流,分别表示为:

$$I_1 = M_{\lambda_1} K_1, I_2 = M_{\lambda_2} K_2 \quad (2)$$

式中:  $M$  是单色辐射出度。由维恩近似公式可得到:

$$M_{\lambda_1} = \varepsilon(\lambda_1, T) c_1 \lambda_1^{-5} e^{-c_2/\lambda_1 T} \quad (3)$$

$$M_{\lambda_2} = \varepsilon(\lambda_2, T) c_1 \lambda_2^{-5} e^{-c_2/\lambda_2 T} \quad (4)$$

由此可得:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) K_1}{\varepsilon(\lambda_2, T) K_2} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5} \cdot e^{(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1) c_2/T} \quad (5)$$

式中:  $K_1/K_2$  为两光路系统的系数之比;  $\varepsilon(\lambda, T)$  为辐射率系数。当两个发射率相等时,即  $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$ , 此时,就可以得到材料的真实温度,而不需要考虑发射率的影响。而且,在比色测温法中,由于测试过程中采用两个波段进行测量,使得在两个波段的光程中具有相同的影响因素,因此,不仅可以抵消较差环境的影响,而且当目标不完全充满视场时,对测量结果也不会产生影响,这是它的独到之处。

### 1.2 测温仪硬件设计概述

整体工作框图如图 1 所示。

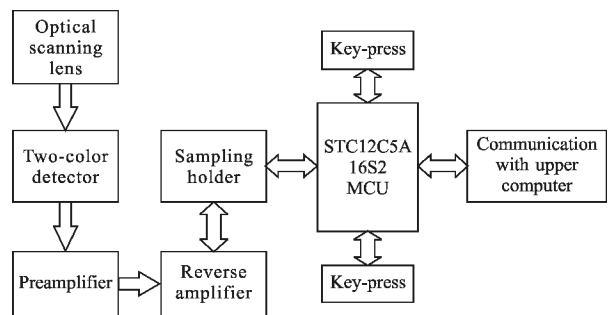


图 1 动态辐射扫描测温仪工作框图

Fig.1 Diagram of dynamic radiation scanning thermometer

动态辐射扫描测温仪充分应用了双色探测器、单片机、LCD、串口通讯等技术。该测量仪的总体设计方案为:首先,利用扫描测温仪的光学箱上的镜头接收被测目标的光线,镜头上的滤光片可以减弱杂散光的进入。光线经过旋转扫描反光镜后,再通过透镜组,实现对扫描目标的成像操作,在透镜组的焦距处放置滤光片,进一步消除杂散光的影响。双色探测器同样放置在透镜的焦距处,来接收经过处理后的光信号,并将其转化为模拟电流信号。然后,利用运算放大器将电流信号转换为电压信号并进行放大,并严格要求前置放大电路的放大比例和电阻的选择。接着,将放大后的电压信号送入内置有 10 位 A/D 转换模块的单片机中进行模数转换,达到 0.01 的测量精度条件。最后,利用 MAX232 将测量结果送入上位机,并且用液晶显示屏呈现动态扫描曲线。电机转动由单片机控制,利用扫描光电对管接收到的电平控制整个扫描过程的开始与结束。

### 1.3 测温仪光学部分的硬件设计

针对上述的要求,最终采用的光路系统如图 2

所示。

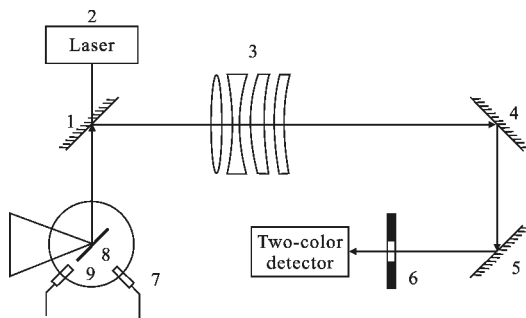


图 2 动态辐射扫描测温仪光学系统

Fig.2 Optical system of dynamic radiation scanning thermometer

在该光学系统中, 1、4、5 和 8 均为反射镜, 2 为激光器, 3 为透镜组, 6 为滤光片, 7 为光电对管, 9 是圆盘。其工作过程是电机带动圆盘转动, 位于圆盘上的反射镜也随之转动, 目标的光线经过转动的反射镜 8 后, 再通过反射镜 1、透镜组 3、反射镜 4 和 5, 最终经过透镜组焦距处的滤光片 6, 被探测器接收。其中, 滤光片 6 是可调的, 可进行调节使其恰好位于透镜组的焦距处。激光器 2 通过反射镜 1 中心的小孔再经过反射镜 8 射到目标上, 目的是为了更方便观察测量的位置, 是定位的作用。光电对管 7 放置在圆盘 9 靠近边缘处与圆盘上小孔对应位置, 圆盘转动时, 通过扫描光电对管接收到的电平来控制 AD 工作情况。

由于经过光路聚焦的焦距过长, 设计时采用平面镜反射来减少整机长度, 技术要求扫描频率为 1~100 Hz, 转盘下电机设计成两档选择 50 Hz 和 100 Hz, 电机采用直流无刷减速电机 BL2644-12-7.7-P2, 电机驱动器采用 DR2404 模块, 运用电机外置调速系统, 外接两个电位器以实现两档选择。运用单片机控制一个单刀双掷继电器来切换两档的选择, 使两个档位之间互相没有干扰。

#### 1.4 测温仪电学部分的硬件设计

单片机最小系统采用 STC12C5A60S2 系列单片机, 专用复位电路是其内部集成 MAX810, 2 路 PWM, 8 路高速 10 位 A/D 转换 (250 k/s), 针对电机控制, 抗强干扰场合。前置放大电路为了精确放大探测器采集到的模拟电流, 巧妙地设计了二级放大的前置放大电路板, 来对信号进行放大。在信号初期, 信号较小, 此时用反相放大的方法同时放大两路信

号, 倍数为 10 倍; 在信号的中后期, 直接将信号进行反相即可<sup>[4]</sup>。采样电路采用由双极性绝缘栅场效应管组成的 LF398 采样保持器, 它具有采样速度快、保持下降速度慢、精度高等优点, 采样时间小于  $6 \mu\text{s}$  时精度可达 0.01%。按键电路采用 CH452 控制芯片, CH452 的键盘扫描功能支持  $8 \times 8$  矩阵的 64 键键盘。液晶显示模块采用 LCD 液晶显示模块是  $128 \times 64$  点阵的汉字图形型液晶显示模块, 可与 CPU 直接接口。串口通信模块采用的是 STC12C5A60S2 单片机内部的通用全双工异步串行口 (UART), 在远距离通信时, 采用外置 RS232 转换模块实现。

#### 1.5 测温仪软件设计

##### 1.5.1 总体流程

动态辐射扫描测温仪总体流程如图 3 所示。

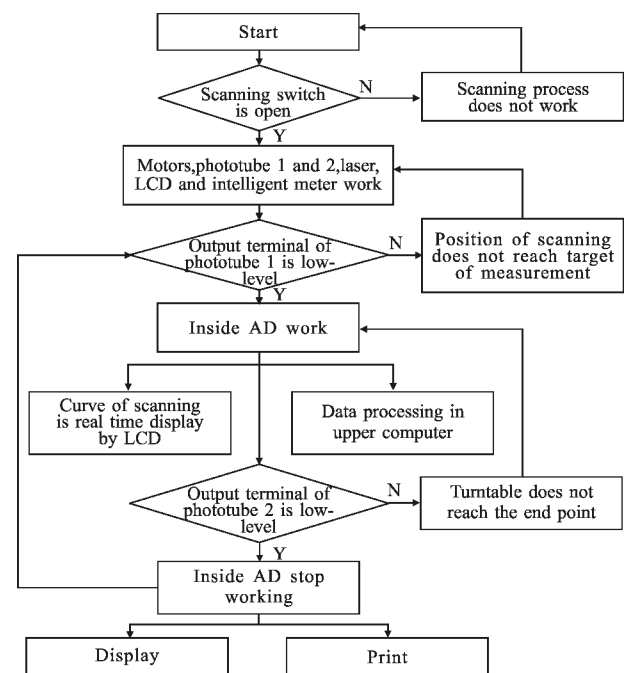


图 3 动态辐射扫描测温仪总体流程图

Fig.3 Flow diagram of dynamic radiation scanning thermometer

动态辐射扫描测温仪的核心是基于 C 语言编译的 STC 系列单片机。设备的工作流程为: 首先给系统上电, 在此过程中, 系统的所有模块都将进行初始化操作。初始化完毕后, 系统自动对开关状态进行扫描, 如果开关未开, 则继续扫描直到开关开启。开关开启后, 光电对管开始发光, 同时电机开始旋转, 液晶显示开始工作。之后, 系统开始扫描光电对管的输出电平直到输出低电平即光电对管到达初始测量位

置。此时,AD 开始工作,对数据进行采集,实时显示扫描曲线并送上位机进行数据处理。之后,继续扫描另一个光电对管,判断其是否处于结束电平,如果输出为高电平,则继续上述采集过程,如果扫描输出为停止电平即低电平,内置 AD 停止工作,对结果进行显示和打印。

### 1.5.2 AD 数据采集流程

动态辐射扫描测温仪数据采集流程如图 4 所示。

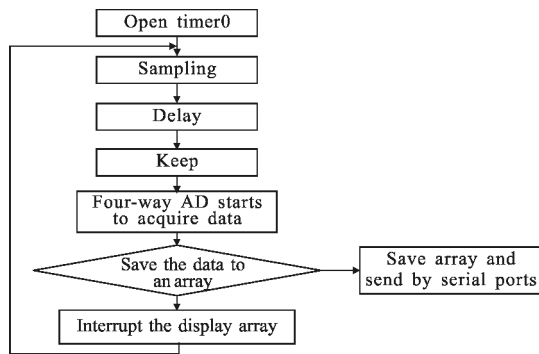


图 4 动态辐射扫描测温仪数据采集流程图

Fig.4 Flow diagram of data acquisition of dynamic radiation scanning thermometer

此模块表示接到采集命令后,AD 进入循环采集工作。一开始,定时器设置采样时间为 20 ms。在采样时间中,单片机控制 LF398 处于采样状态,2 μs 的延迟后,LF398 进入保持状态。然后,4 路 AD 开始对模拟电压进行采集,利用数组对每一路采集到的数据进行存储,此时,128 个数存在 4 个数组中,正好是液晶屏上每屏显示的点数。并且数组通过串口发送到上位机中进行保存。采集结束后,中断程序启动,曲线显示其中一组数组中的数据,结束后继续程序循环,一直到被下一次按键中断。

### 1.5.3 数据处理流程

动态辐射扫描测温仪真实温度换算流程如图 5 所示。

采集电压  $V_1, V_2, V_3, V_4$  扣除零点归一化后计算  $T_1, T_2$ 。由于真温与两个通道的色温有关,所以真温计算是由较长波长的通道数据得来,由经验公式推导,可以得到它们之间的关系为:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} = \frac{\lambda_1 \ln \varepsilon}{C_2} \quad (6)$$

式中:  $T$  为被测量目标的真实温度;  $T_1$  为其中一条通道的亮温;  $\lambda_1$  经过波长标定后,波长的大小约为  $0.9 \mu\text{m}$ 。

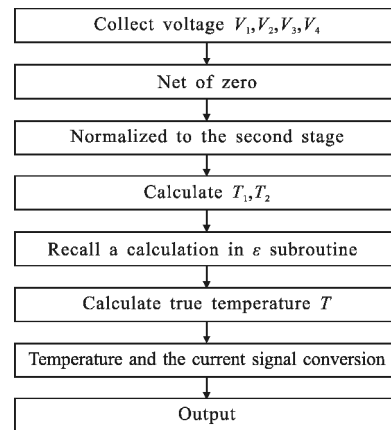


图 5 动态辐射扫描测温仪真实温度换算流程图

Fig.5 Flow diagram of true temperature conversion of dynamic radiation scanning thermometer

## 1.6 仪器技术指标

动态辐射扫描测温仪的技术指标如下:

温度范围为 600-1600 °C;精度为 0.01°C;绝对误差为 1%以内;距离系数为 1000:1;扫描频率为 1-100Hz。

## 2 测温仪的调试和目标测试

### 2.1 测温仪目标测试及数据处理

在动态辐射扫描测温仪的测试过程中,电机从顶端开始旋转运动并对线性目标进行测试,直到目标的末端,线性目标上的每一个点的测试数据都通过动态辐射扫描测温仪进行温度计算,因此,就涉及到动态辐射扫描测温仪的标定过程<sup>[5-6]</sup>。

整个过程就是利用黑体炉<sup>[7-8]</sup>,调节其温度使其温度保持在整百度的位置,之后保持电机静止,用动态辐射扫描测温仪进行定点测温,记录其输出的电压值并且整理填写在一表格之内,动态辐射扫描测温仪设计的一组实验的数据如表 1 所示。

表 1 动态辐射扫描测温仪接收的数据

Tab.1 Receiving data of dynamic radiation scanning thermometer

	Channel			
	1/mV	2/mV	3/mV	4/mV
700 °C	31	416	12	221
800 °C	66	751	25	355
900 °C	220	2 285	103	1 139
1 000 °C	435	4 213	196	2 069
1 100 °C	763	5 000	306	3 142
1 200 °C	1 219	5 000	464	4 420
1 300 °C	1 920	5 000	791	5 000
1 400 °C	2 845	5 000	1 143	5 000
1 500 °C	4 077	5 000	1 630	5 000

实验初期,黑体的温度很低,因此探测器仅产生非常微弱的信号,该信号利用前置放大器进行 10 倍放大后可被使用,如果不经过放大,则会使实验结果产生很大的误差;而当温度升高到 1 100 ℃时,如果继续对数据进行 10 倍放大,则会使数据出现饱和,因此,此时应使用未经过放大的数据。

在实际的曲线拟合中,不是所有通道的数据都会被用到,根据上述分析,如果选择前期数据较小的数据,则采用前置放大器二级放大的数据,当随着温度上升,数据出现饱和时,仅需要反相后的数据即可,实际对曲线拟合后的数据如表 2 所示。

表 2 动态辐射扫描测温仪拟合的数据

Tab.2 Fitting data of dynamic radiation scanning thermometer

	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
700 ℃	-	416	-	221
800 ℃	-	751	-	355
900 ℃	-	2 285	-	1 139
1 000 ℃	-	4 213	-	2 069
1 100 ℃	763	-	306	-
1 200 ℃	1 219	-	464	-
1 300 ℃	1 920	-	791	-
1 400 ℃	2 845	-	1 143	-
1 500 ℃	4 077	-	1 630	-

拟合后的曲线如图 6 和图 7 所示。

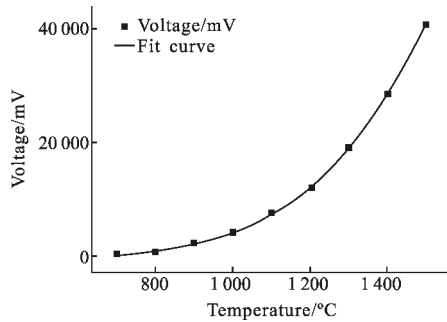


图 6 通道一标定曲线

Fig.6 Calibration curve of channel 1

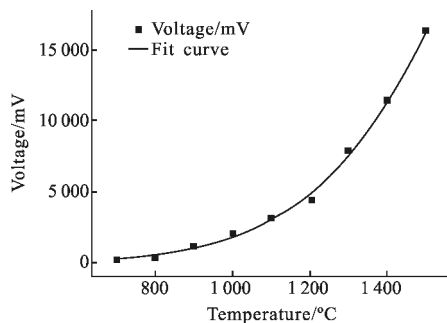


图 7 通道二标定曲线

Fig.7 Calibration curve of channel 2

将这四路电压和温度值 T 分别代入两个公式中:

$$\ln \frac{\overline{V}_1}{\overline{V}_{10}} A_1 + \frac{B_1}{T_1} \tag{7}$$

$$\ln \frac{\overline{V}_2}{\overline{V}_{20}} A_2 + \frac{B_2}{T_2} \tag{8}$$

式中:  $\overline{V}_1$  和  $\overline{V}_2$  是归一化后的值;  $\overline{V}_{20}$ ,  $\overline{V}_{10}$  是在两个通道中任何一组测量值中最高温度的电压;  $T_1, T_2$  表示比色温度;  $A_1, B_1, A_2, B_2$  可以通过最小二乘法拟合得出。

由于  $V_{10}$  是在某通道的全部数据中最高温度所对应的电压,于是有:

$$\ln \frac{\overline{V}_i}{\overline{V}_{10}} = C \tag{9}$$

$$\ln \frac{\overline{V}_i}{\overline{V}_{10}} = A_i + \frac{B_i}{T_i} \tag{10}$$

而真温和色温之间又有:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} = \frac{\lambda_1 \ln \varepsilon}{C_2} \tag{11}$$

这里  $C_2 = 14\,388 \mu\text{mk}$ , 而又有:

$$\ln \varepsilon = \frac{C_2(T_1 - T_2)}{T_1 T_2 (\lambda_1 - \lambda_2)} \tag{12}$$

### 3 实验结果

在本次测试中,将线性目标作为被测对象,将已经通过标准仪器测试的线性目标上固定点温度,利用动态辐射扫描测温仪重新测量,将得到的实验数据与标准数据进行比对,如表 3 所示。

表 3 实验数据与标准数据对比表

Tab.3 Experimental data and standard data comparison table

Display temperature/℃	True temperature/℃	Absolute error	Relative error
615.650	614.000	1.65	0.26%
727.630	728.000	0.37	0.03%
853.890	854.000	0.01	0%
979.460	978.000	1.46	0.14%
1 102.43	1 102.00	0.43	0.04%
1 229.24	1 231.00	0.76	0.06%
1 357.46	1 359.00	1.54	0.11%
1479.45	1477.00	2.45	0.16%
1598.77	1597.00	1.77	0.11%

根据实验结果可知,测温仪在测量温度范围为600~1600℃,距离系数为1000:1时,并给出了测试数据与标准数据的绝对与相对误差,测量精度可以达到0.01℃。而且在测量700~1600℃测量范围内绝对误差可以保持在0.1%左右,绝对误差最大为0.16%、最小为0。但在测量600℃左右时绝对误差较大,达到0.26%,但并未影响测温仪的整体精度。实验结果证明此动态辐射扫描测温仪在温度范围内精度较高。

#### 4 结 论

研究了一种基于比色测温原理的动态辐射扫描测温仪。该测温仪的优点主要是对测量线性目标动态温度有很好的作用,这个只能对一点定点测温的传统测温仪没有办法相比的。并已进行了初步试验,从而进行数据处理及标定,对试验得出的数据进行了分析。并给出了动态辐射扫描测温仪在实验室中的波长函数标定结果,还对动态辐射扫描测温仪的温度进行了标定。

#### 参考文献:

- [1] Liu Menghua, Wu Xiaohong. Photoelectric Detection Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005: 128-132. (in Chinese)  
刘孟华, 吴晓红. 光电检测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 128-132.
- [2] Chen Hengzhu. Infrared Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 78-158. (in Chinese)  
陈衡著. 红外物理学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 78-158.
- [3] Zhang Weili, Wang Xun. Infrared Diagnostic Techniques[M]. Beijing: Water Power Press, 1991: 10. (in Chinese)  
张维力, 王训. 红外诊断技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 10.
- [4] Franco S. Circuit Design Based on Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese)  
赛尔吉欧·佛朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [5] Hao Jiping, Du Chenggong, Huang Pinghua. The infrared calibration theoretical calculations and application[J]. Applied Optics, 2004(2): 36-39. (in Chinese)  
郝继平, 杜成功, 黄平华. 红外标定理论计算与应用[J]. 应用光学, 2004(2): 36-39.
- [6] Hong Sungwook, Inchul Shin. Comparison of the infrared surface emissivity model (ISEM) with a physical emissivity model [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2010, 27(2): 345-352.
- [7] Dai Jingmin, Song Yang, Wang Zongwei. Spectral emissivity measurement technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 710-714. (in Chinese)  
戴景民, 宋杨, 王宗伟. 光谱发射率测量技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 710-714.
- [8] Wang Yanbin. Set blackbody temperature and simulate the real target area [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 780-783. (in Chinese)  
王彦斌. 黑体模拟真实目标温度和面积的设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 780-783.