

## 采用双窗口红外探测器的道面温度遥测系统

程寅<sup>1,2,3</sup>, 刘建国<sup>1,2,3</sup>, 桂华侨<sup>1,3</sup>, 陆亦怀<sup>1,3</sup>, 魏秀丽<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;
3. 安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 在外场应用环境中, 红外道面温度遥测系统的自身温度会发生较大幅度的变化, 引起的内部杂散辐射变化会导致较大的系统测量误差。设计了采用双窗口红外探测器的红外道面温度遥测系统, 同时对目标物辐射和内部杂散辐射进行实时测量, 并在考虑探测器温度效应的基础上, 建立了扣除内部杂散辐射影响的道面温度计算模型; 标定实验结果表明: 当探测器工作温度和测量目标温度分别在  $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围时, 探测器温度效应和辐射定标函数均可以做线性化处理, 并呈线性叠加效果, 验证了道面温度计算模型的合理性; 经过标定后, 红外道面温度遥测系统与 Pt100 接触式温度传感器进行了外场比对测试, 得到测量系统与 Pt100 接触式温度传感器的测量数据相关性达到 98.7%, 其中夜间测量误差低于 2.78%, 表明了系统可在环境温度变化的外场条件下准确测量道面温度。

**关键词:** 道面温度测量; 双窗口红外探测器; 内部杂散辐射; 辐射定标

**中图分类号:** TN219      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20190455

## Remote measuring system of road surface temperature based on dual window infrared detector

Cheng Yin<sup>1,2,3</sup>, Liu Jianguo<sup>1,2,3</sup>, Gui Huaqiao<sup>1,3</sup>, Lu Yihuai<sup>1,3</sup>, Wei Xiuli<sup>1,3</sup>

1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Optics for Environmental Monitoring Technology, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In the environment of out-field application, the temperature of the infrared remote measuring system of road surface temperature would change greatly, and the changes of the internal stray radiation thereby caused can lead to great systematic measurement error. So, infrared remote measuring system of road surface temperature based on dual window infrared detector was designed to measure the target object radiation and the internal stray radiation in real-time; meanwhile, based on the temperature effect of the detector, road surface temperature calculation model was established by eliminating the influences of internal stray radiation. The results of the calibration test show that when the working temperature of the detector and the measured target temperature are within  $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively, the temperature effect and the radiometric calibration function can be processed linearly, showing linear superposition effect, which verifies the rationality of the road surface

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-03-15

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1408085MKL91)

作者简介: 程寅 (1972-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事红外测温系统仪的电子学设计与算法分析方面的研究。

Email: chenying@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国 (1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境监测技术方面的研究。Email: jgliu@aiofm.ac.cn

temperature calculation model. After calibration, out-field comparison test was conducted on infrared remote measuring system of road surface temperature and Pt100 contact temperature sensor, and it was obtained that the correlation between the measurement system and the measured data of Pt100 contact temperature sensor was up to 98.7%, among which the measurement error at night was lower than 2.78%, suggesting that the proposed system can measure the road surface temperature under out-field condition with changing environmental temperature.

**Key words:** measurement of road surface temperature; double window infrared detector; internal stray radiation; radiation calibration

## 0 引言

道路表面温度是判断道路表面状态的一项重要指标。对道面温度进行实时监测,对交通安全管控、公路养护等具有重要的意义<sup>[1]</sup>。红外遥测式道面温度测量系统通过测量道面红外辐射量来反演道面温度,与接触式道面温度测量设备相比,在冰、雪、积水等天气条件下的测量结果更加准确、可靠,并且具有响应快、测温范围宽、无需接触被测物体、不干扰被测温场的优点<sup>[2]</sup>。

在实际应用过程中,红外遥测式道面温度测量系统安装在外场,系统温度会受到气温、日照、降水等气象因素干扰,其内部光机构件产生的杂散辐射直接或者经过反射传递进入探测器,叠加在目标测量信号中,且随系统温度发生变化,从而引起较大的测量误差<sup>[3]</sup>。

由于系统内部结构复杂,构成的材质不同,且温度场分布也不均匀,产生的内部杂散辐射变化规律较为复杂,与环境温度之间并非呈简单的线性关系<sup>[4]</sup>。特别是在外场,环境温度变化幅度较大,导致系统内部杂散辐射的变化情况更加复杂。因此,克服系统中内部杂散辐射的影响,避免目标信号湮没在杂散辐射噪声之中,是实现遥感道面温度准确测量的关键所在。

目前,通常是利用软件模拟仿真进行定量分析,在此基础上修正系统关键辐射面的发射率,并采取主动热控措施降低光学系统温度抑制内部杂散辐射,以提高系统探测的准确性<sup>[5-6]</sup>。但在实际应用过程中,外界环境温度变化幅度大,实施系统温度控制的难度较大,并且会大大增加系统结构的复杂性,从而降低系统的适用性与可靠性。

另外,探测器本身温度的变化也会带来其探测率和噪声等效温差的变化,需要对其进行温度效应定标校正<sup>[7]</sup>。

为了解决上述问题,文中设计了采用双窗口红外探测器的道面温度遥测系统,与传统的对内部杂散辐射进行抑制的方案不同,其原理是利用双窗口红外探测器的测量特性对目标物和内部杂散辐射分别进行

实时测量,在考虑探测器工作温度效应影响的基础上,建立了扣除内部杂散辐射影响的目标温度计算模型,并通过定标实验确定了函数系数、验证了模型的正确性。最后,通过定标后的系统开展了外场实验,并对实验结果进行了讨论。

## 1 采用双窗口红外探测器的道面温度遥测系统

### 1.1 系统构成

如图 1 所示,系统主要包括了红外辐射测量单元、信号调理单元和数字信号处理单元。红外辐射测量单元接收红外辐射,并转换为相应的电信号;信号调理单元对来自探测器的信号经滤波、放大等信号调理后,再经过数字信号处理单元进行算法处理,获得被测目标的温度值。为了不影响道面车辆通行,系统设计安装在道路两旁上方 5~6 m 的位置,向下进行测量,测量角度在 30~60° 的范围,被测区域约为直径为 20 cm 的圆形区域。

红外辐射测量单元主要由菲涅耳透镜、窗口滤光片、探测器等组成,如图 2 所示。探测器选用了 Excelitas 公司生产的 TPD 2T 0625 双窗口热电堆式红外探测器,其探测面上有两个独立光学窗口,分别安

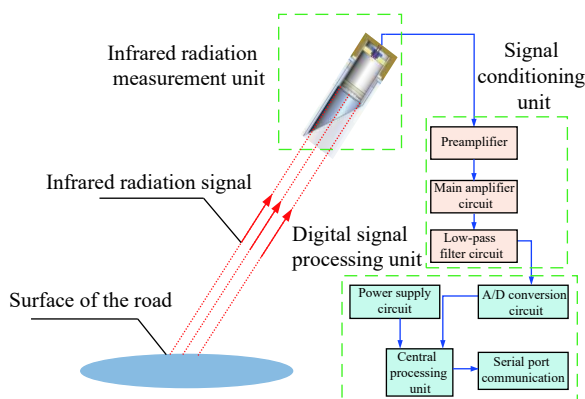


图 1 系统示意图

Fig.1 Schematics diagram of the system

装有不同波段的滤光片,对应内部两个独立的探测器。由于共基的制造工艺,该两个探测器电气参数一

致,且位置相邻,位于探测器中心点对称分布,可以在光机结构设计上按照单一探测器进行光学设计。

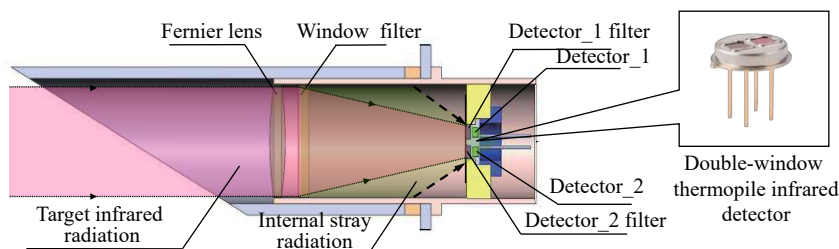


图 2 红外辐射测量单元

Fig.2 Infrared radiation measurement unit

其中,探测器 1 滤光片的光谱透过率大于 60% 以上的带通频率在 5.60~13.00 μm 之间(图 3(a));探测器 2

滤光片的带通频率在 8.00~14.10 μm 之间(图 3(b));在菲涅耳透镜后端设计安装了窗口滤光片(图 2),其带通频率是在 4.50~7.23 μm 之间(图 3(c))。

通过滤光片的组合,划分出两个探测器的探测区域:外部目标红外辐射通过窗口滤光片(4.50~7.23 μm)后,但无法通过探测器 2 滤光片(8.00~14.10 μm),故探测器 2 只能接受来自内部的红外杂散辐射;但部分波段的外部红外辐射(5.60~7.23 μm)可通过窗口滤光片、探测器 1 滤光片后照射到探测器 1 面源上。

1.2 测量原理

探测器 1 接收到的红外辐射主要包括两部分:来自道路表面的红外辐射和系统内部红外杂散辐射,对其辐射定标模型分析如下:

探测器 1 接收来自道路表面的红外辐射是经过窗口滤光片、探测器 1 滤光片,其波长范围在 5.60~7.23 μm 之间。该部分红外热辐射经过光电转换后的电信号量值表示为<sup>[1]</sup>:

$$f_1(T_0) = K\varepsilon_\lambda \int_{\Delta\lambda} RL_\lambda(T_0)d\lambda \quad (1)$$

式中:  $T_0$  是被测目标物的表面温度;  $R$  是探测器的光电转化率;  $K$  是与光学参数相关的常数项;  $\varepsilon_\lambda$  是目标物的发射率;  $L_\lambda(T_0)$  是目标表面光谱辐射亮度。

由于道路表面粗糙且材质为黑色沥青(铺路),其发射率较高,测量系统红外探测器接受来自道路表面的辐射主要是道路表面产生的直接辐射,而散射环境辐射的较少;同时,道路表面散射的环境辐射主要来自太阳辐射,其 98% 的能量都集中在 0.15~3 μm 范围内,而该光谱波段是不在探测器的测量波段上。因此,公式(1)中只考虑了道路表面的直接辐射,而未考

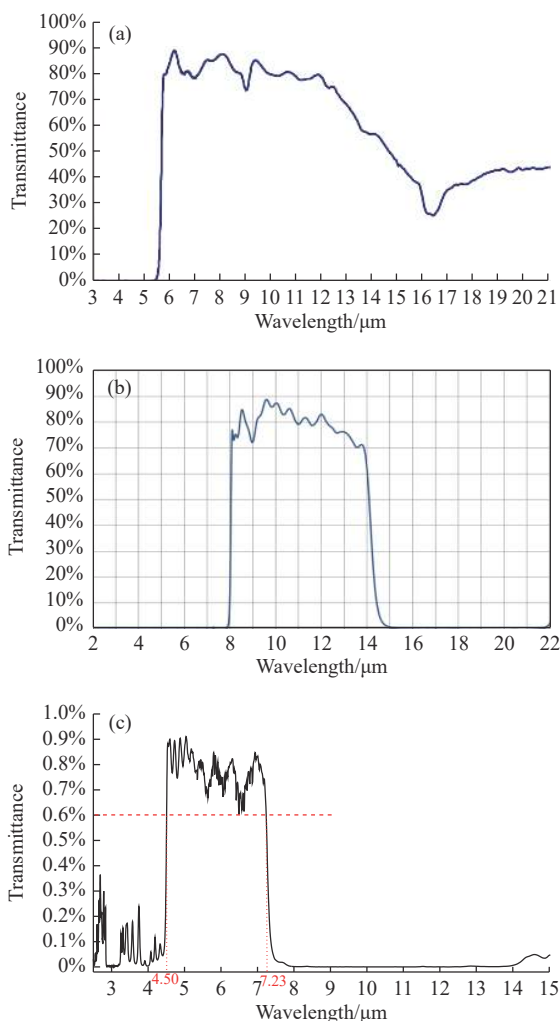


图 3 滤光片透过率曲线。(a) 探测器 1 滤光片;(b) 探测器 2 滤光片;(c) 窗口滤光片

Fig.3 Transmittance curve of filter. (a) Detector 1 filter; (b) Detector 2 filter; (c) Window filter

虑实际应用环境中光学系统接受到道路表面散射的环境辐射影响。

另外,探测器 1 接收系统内部杂散辐射,其波长范围在 5.60~13.00 μm 之间,经过光电转换后的电压值为:

$$f_{c1}(T_c) = K' \varepsilon' \int_{\Delta\lambda'} RL_{\lambda'}(T_c) d\lambda' \quad (2)$$

式中:  $T_c$  是系统内部等效黑体辐射温度<sup>[4]</sup>;  $K'$  是与光学参数相关的常数项;  $\varepsilon'$  是系统内部等效发射率;  $L_{\lambda'}(T_c)$  是系统内部的光谱辐射亮度。

理论上公式  $f_1(T_0)$  表示为  $f_1(T_0) = CT_0^n$  的函数形式<sup>[8]</sup>, 在本测量系统中, 由于测量目标温度的范围相对较窄: 从 -20~70 °C, 可采用一次函数的关系式表示  $f_1(T_0)$ <sup>[9]</sup>, 即

$$f_1(T_0) = k_1 T_0 + b_1 \quad (3)$$

同样, 内部杂散辐射的等效黑体温度  $T_c$  与探测器输出电压值的函数关系也可表示为:

$$f_{c1}(T_c) = k_{c1} T_c + c_1 \quad (4)$$

另外, 由于非制冷性热电堆探测器需要按其工作温度  $T_b$  变化关系进行修正, 用  $f_{b1}(T_b)$  表示探测器工作温度效应函数, 具体表达如下<sup>[7]</sup>:

$$f_{b1}(T_b) = k_{b1} T_b + e_1 \quad (5)$$

探测器工作温度效应是叠加在探测器对目标辐射的响应之上<sup>[10]</sup>。因此系统响应由以下三部分组成: 第一部分是外界目标物的红外辐射响应, 第二部分是系统内部自身的红外辐射响应, 第三部分是探测器的工作温度效应, 且三部分之间的关系符合线性叠加原理, 即探测器 1 的输出函数表示为:

$$V_{s1}(T_0, T_c, T_b) = f_1(T_0) + f_{c1}(T_c) + f_{b1}(T_b) \quad (6)$$

即:

$$V_{s1}(T_0, T_c, T_b) = k_1 T_0 + b_1 + k_{c1} T_c + c_1 + k_{b1} T_b + e_1 \quad (7)$$

同理, 探测器 2 滤光片的透过波段是 8.00~14.10 μm, 由于窗口滤光片的透过率为 4.5~7.23 μm, 故不能接受到外部的红外辐射能量。因此, 探测器 2 的输出函数表示为:

$$V_{s2}(T_c, T_b) = f_{c2}(T_c) + f_{b2}(T_b) \quad (8)$$

式中:  $f_{c2}(T_c)$  是内部杂散辐射的等效黑体温度  $T_c$  与探测器 2 输出的函数关系, 可表示为:

$$f_{c2}(T_c) = k_{c2} T_c + c_2 \quad (9)$$

$f_{b2}(T_b)$  表示探测器 2 工作温度效应函数:

$$f_{b2}(T_b) = k_{b2} T_b + e_2 \quad (10)$$

得到:

$$V_{s2}(T_c, T_b) = k_{c2} T_c + c_2 + k_{b2} T_b + e_2 \quad (11)$$

可以看出, 公式中探测器 1 接收到是目标物辐射和内部杂散辐射的叠加辐射信号, 探测器 2 仅接收到内部杂散辐射信号。探测器 1、2 接收的内部杂散辐射通量一致, 通过探测器 2 反演出光学系统内部等效黑体温度  $T_c$ , 可以确定探测器 1 接收的内部杂散辐射量, 扣除后即能得到目标物净辐射量。

测量方法实现的流程是: 首先通过标定实验得到公式 (7)、(11) 的函数系数; 在测量中, 用温度传感器测量出探测器温度  $T_b$ , 并由公式 (11) 计算对应的内部等效温度  $T_c$ , 代入公式 (7), 可以计算目标物净辐射量  $f_1(T_0)$ , 进而反演得到目标温度  $T_0$ 。

## 2 实验及数据分析

实验及数据分析主要分为系统标定和外场实验两个部分。在系统完成标定后, 开展外场实验, 与接触式传感器进行道面温度测量比对。

### 2.1 系统标定实验

实验室标定的主要装置包括: (1) 合肥千力温控系统有限责任公司生产的 KL60A 低温黑体辐射源, 黑体面源直径为 26 cm, 其测量范围在 -40~80 °C 之间, 精度达到 0.01 °C; (2) 高低温实验箱 HKT705P-10, 精确控制内腔体温度范围在 -40~50 °C 之间, 用于模拟系统的工作环境温度, 可以开展探测器在不同工作温度下的标定实验; (3) 数据采集卡、数据传输设备和采样软件。

#### 2.1.1 内部辐射等效黑体温度标定

内部辐射等效黑体温度  $T_c$  标定实验中, 探测器直接安装在高低温实验箱体内部 (图 4), 将面源黑体放置在探测器前并完全覆盖探测器的视场, 用黑体产生辐射模拟仪器内部的杂散辐射进行定标实验。

此时探测器 1 的接收到 5.60~13.00 μm 波段上的辐射, 信号值为公式 (6) 的后两部分:

$$V_{s1}'(T_c, T_b) = f_{c1}(T_c) + f_{b1}(T_b) \quad (12)$$

设  $d_1 = c_1 + e_1$ , 即

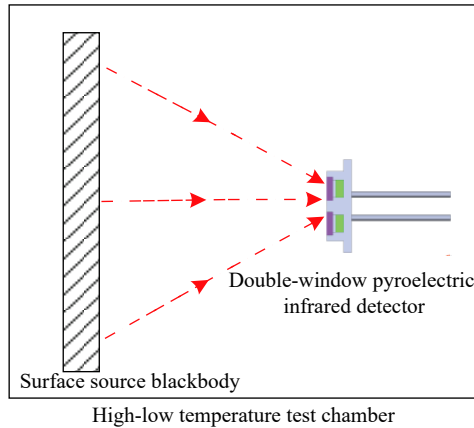


图 4 内部辐射等效黑体温度测量定标实验

Fig.4 Calibration experiment of internal radiation equivalent blackbody temperature measurement

$$V_{s1}'(T_c, T_b) = k_{c1}T_c + k_{b1}T_b + d_1 \quad (13)$$

同理探测器 2 接收 8.0~14.10 μm 波段上的辐射, 信号值由公式 (11) 表示。

该标定目的是在考虑探测器温度效应情况下, 通过面源黑体产生的辐射模拟系统内部杂散辐射, 对不含光学系统的两个探测器进行辐射标定, 得到内部杂散辐射的等效黑体温度  $T_c$  与两个探测器输出函数和工作温度效应函数的系数, 即确定  $V_{s1}'(T_c, T_b)$ 、 $V_{s2}(T_c, T_b)$  函数系数。

实验中, 黑体和探测器都放置在高低温实验箱体内部, 控制箱体内温度稳定变化, 从 -10~40 °C 每隔 10 °C 选择了 6 个温度  $T_b$  测试点, 并在每个工作温度  $T_b$  恒定的情况下, 设置面源黑体温度从 -10~60 °C 多点模拟内部杂散辐射  $T_c$  升高变化, 同时进行辐射信号测量。

通过数据记录及处理, 得到在不同工作温度点下, 探测器 1、2 输出信号量值随着面源黑体目标温度的变化曲线, 如图 5 所示。

对探测器 1 在每个稳定工作温度点的线性曲线进行拟合, 其函数关系表 1 所示。可以看出, 拟合曲线的线性度很好, 并且曲线之间平行一致, 斜率变化小, 即目标温度在 -10~60 °C 温度范围内, 探测器温度恒定的条件下, 探测器信号随面源黑体温度呈线性变化。

对该 6 条拟合线性曲线的斜率做平均值处理, 得到平均斜率为 1 629.12, 即得到公式 (13) 中  $k_{c1}$ 。

同时探测器工作温度效应函数  $f_{b1}(T_b)$  也可做线性

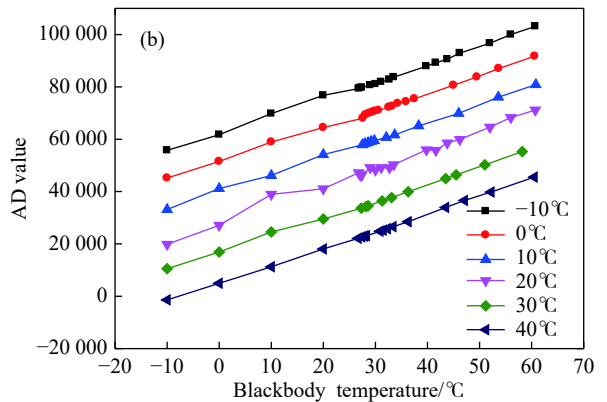
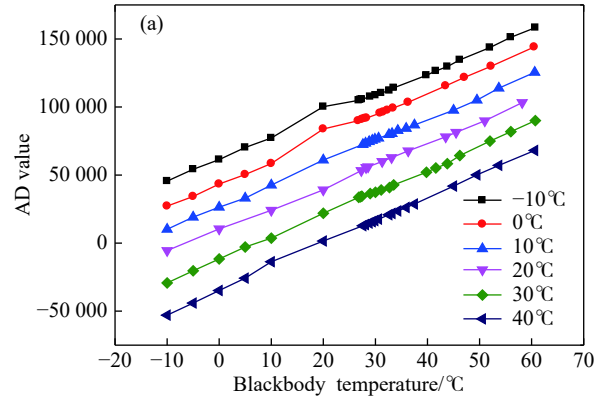


图 5 不同工作温度 ( $T_b$ ) 下探测器的响应曲线。(a) 探测器 1; (b) 探测器 2

Fig.5 Detector response curves at different working temperatures ( $T_b$ ). (a) Detector 1; (b) Detector 2

表 1 探测器 1 在 6 个工作温度下测量信号-黑体温度关系

Tab.1 Relation between the measured signal and blackbody temperature of detector 1 at 6 working temperatures

| Temperature $T_b/^\circ\text{C}$ | Function                              | Correlation coefficient $r$ |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| -10                              | $V_{s1}' = 1\,570.38T_c + 62\,200.89$ | 0.998                       |
| 0                                | $V_{s1}' = 1\,667.96T_c + 43\,934.71$ | 0.996                       |
| 10                               | $V_{s1}' = 1\,618.73T_c + 26\,875.19$ | 0.998                       |
| 20                               | $V_{s1}' = 1\,558.56T_c + 9\,708.75$  | 0.998                       |
| 30                               | $V_{s1}' = 1\,658.16T_c - 12\,122.68$ | 0.998                       |
| 40                               | $V_{s1}' = 1\,700.94T_c - 34\,367.91$ | 0.999                       |

化处理。探测器工作温度效应与入射能量无关, 对表 1 中每条曲线的截距与对应的探测器温度值  $T_b$  做线性化处理, 即截距值  $y_b = k_{b1}T_b + j$  随温度  $T_b$  的变化进行拟合, 结果如图 6 所示, 该拟合曲线的相关系数  $r$  为

0.998, 表达式为:

$$y_b = -1\,916.53T_b + 44\,898.97 \quad (14)$$

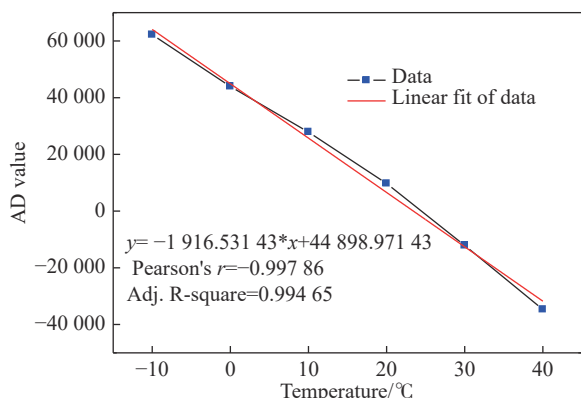


图 6 探测器 1 工作温度修正函数曲线  $f_{b1}(T_b)$

Fig.6 Working temperature correction function curve  $f_{b1}(T_b)$  of detector 1

由此可以得到:

$$V_{s1}'(T_c, T_b) = 1\,629.12T_c - 1\,916.53T_b + 44\,898.97 \quad (15)$$

同样, 探测器 2 在 6 个不同的工作温度下的响应曲线如图 5(b) 所示, 其曲线斜率平均值为 665.67, 曲线截距与探测器 2 工作温度  $T_b$  的关系:

$$y_{b2} = -1\,142.80T_b + 50\,995.29 \quad (16)$$

得到:

$$V_{s2}(T_c, T_b) = 665.67T_c - 1\,142.80T_b + 50\,995.29 \quad (17)$$

$T_b$  是通过探测器内置测温元件实时测量。标定后, 可通过公式 (17), 实时反演内部等效黑体温度  $T_c$ , 进而通过公式 (15) 计算出其对探测器 1 的杂散辐射量和温度效应的量值。

### 2.1.2 目标温度标定

系统目标温度  $T_0$  标定是在内部辐射等效黑体温度标定的基础上, 扣除探测器 1 接受的杂散辐射和探测器工作温度效应的影响, 即扣除  $V_{s1}'(T_c, T_b)$  的影响后, 净外部测量辐射与标准面源黑体温度  $T_0$  进行曲线拟合, 最终结果是标定出公式 (7) 中的系统  $k_1$  和  $b_1$ 。将公式 (15) 代入公式 (7), 得到:

$$Y_{T_0} = V_{s1}(T_0, T_c, T_b) - V_{s1}'(T_c, T_b) = k_1 T_0 + b_1 \quad (18)$$

式中:  $Y_{T_0}$  是 5.60~7.23  $\mu\text{m}$  波段上来自外部的净辐射量;  $V_{s1}(T_0, T_c, T_b)$  是系统测出的总量值;  $T_0$  是通过面源黑体模拟道面设定的实际温度, 考虑到实际道路材料为粗糙的沥青路面, 发射率约为 0.97, 对  $T_0$  进行了修正<sup>[1]</sup>。

实验方案示意图如图 7 所示, 光学测量系统对准

面源黑体, 测量区域全部包含在黑体面源内。实验中分别设置黑体从 -10~60  $^{\circ}\text{C}$  之间选取 16 个温度点模拟目标温度  $T_0$ , 在每个测量点同时分别测量:  $T_b$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s1}$ , 并通过  $V_{s2}$  计算出  $T_c$ 。如图 8 所示, 数据经过线性拟合, 得到系数:  $k_1 = 351.36$ ,  $b_1 = -5545$ , 相关性  $r$  达到 0.999。

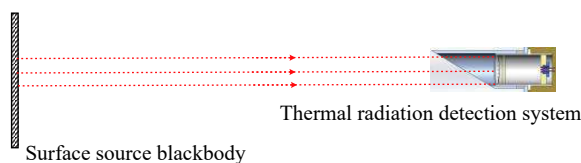


图 7 目标温度辐射标定

Fig.7 Radiation calibration of target temperature

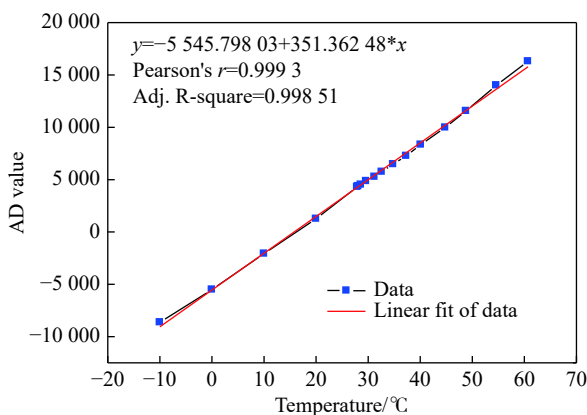


图 8 目标温度标定结果

Fig.8 Calibration results of the target temperature

即得到测量系统的辐射定标方程为:

$$V_{s1}(T_0, T_c, T_b) = 351.36T_0 + 1\,629.12T_c - 1\,916.53T_b + 39\,353.19 \quad (19)$$

### 2.2 外场比对实验

标定后的系统与接触式温度传感器 Pt100 进行外场比对实验。将系统安装至合肥市安光所综合楼停车场, 选取粗糙的黑色沥青地面进行测量, 测量距离 6.85 m, 测量角度 38.7 $^{\circ}$ 。图 9 是 2018 年 8 月 15 日 8:00 至 8 月 16 日 8:00 的 24 h 的测量结果, 两个系统均为每分钟测量一组数据。由于温度传感器 Pt100 是接触测量方式, 比对观测时应该避免将 Pt100 放置在地表面, 即感温部分的一半接触路面, 另一半暴露在空气中, 该种方式测得的温度为地表面与其紧贴空气温度的平均值, 并不能完全代表道面温度, 同时还受太阳辐射影响。本实验中是将其探测部分全部

埋入贴近表面的道路沥青中,但由于沥青的热传导因素,其测量到的实际温度有一定滞后性。

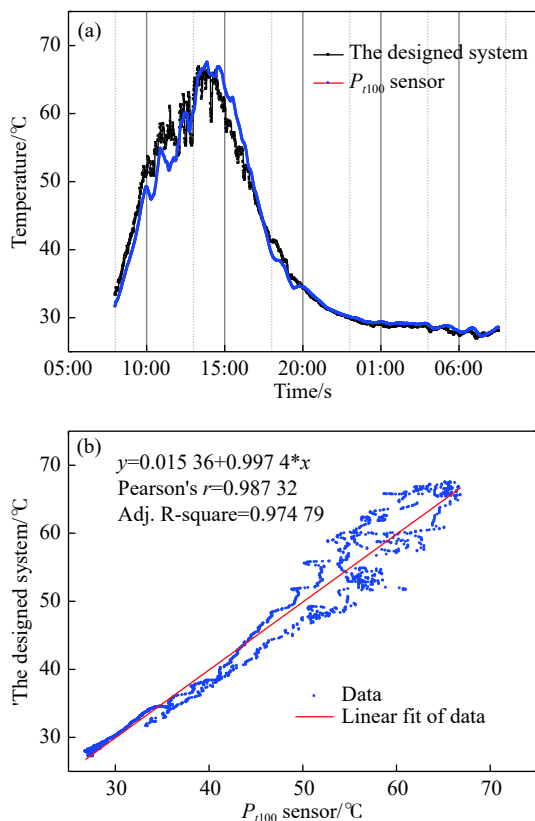


图 9 设计的系统与 Pt100 外场比对结果。(a) 测量结果; (b) 相关性  
Fig.9 Results of the designed system compared to the Pt100 sensor in the outfield. (a) Measurement results; (b) Correlation

图 9(a) 为系统所测数据与 Pt100 数据对比曲线。可以看出两种系统在 2018 年 8 月 15 日 8:00 至 20:00 的时间段测量数据变化趋势基本一致, 相关系数  $R^2$  达 0.974。该时段处于合肥地区夏季, 白天日照较强, 引起道面温度快速上升变化, 到 13:53 后温度到达最高值 67.5 °C 开始下降。由于接触式温度传感器通过地面的热量交换传导, 响应较慢。而红外温度测量系统直接测量道路表面的红外辐射反演温度, 系统响应速度相对较快, 因此从图 9(a) 中可以看出, Pt100 测量系统与红外温度测量系统相比在该时间段上有一定的滞后性。到了 20:00 后无日照影响, 道面温度发生缓慢变化, 从 20:00 到次日 8:00 期间, 两种设备测量数据不仅趋势一致, 绝对误差也小于 2.78%。

### 3 结 论

(1) 设计了采用双窗口红外探测器的道面温度遥

测系统, 通过频谱分段的方式实现目标物红外辐射量和内部杂散红外辐射量实时测量, 建立的道面温度计算模型扣除了内部杂散红外辐射对测量准确性的影响;

(2) 通过定标实验确定探测器温度效应、辐射定标函数系数并验证了模型合理性。实验结果表明: 1) 在探测器工作温度稳定的条件下, 目标温度在  $-10 \sim 60$  °C 的范围内, 测量信号与黑体温度可以用线性函数关系表示, 且相关系数  $r$  大于 99.6%; 2) 探测器在  $-10 \sim 40$  °C 的工作温度范围内, 温度效应影响也可通过线性化处理, 拟合函数相关系数  $r$  为  $-99.8\%$ ; 3) 验证了系统定标模型基于线性方程系统, 即探测器对被测目标温度响应和工作温度效应引起的变化成线性叠加效果, 建立了目标温度反演模型, 其拟合函数的相关系数  $r$  为 99.9%;

(3) 开展了外场比对试验, 结果表明: 设计的测量系统与 Pt100 接触式温度测量系统的测量结果有较高的一致性, 其相关性  $R^2=97.5\%$ , 且时间响应度快于接触式温度测量系统。在夜间温度变化率较慢的情况下, 两者相对误差小于 2.78%。该误差主要是由于目标物发射率误差导致, 下一步可以通过现场定标的方法消除。

与传统的抑制杂散辐射技术相比, 本测量系统在硬件上没有增加额外部件, 具有结构简洁、体积小、可靠性高等特点, 在外场环境下运行有较好的适应性, 也对其它的红外测量系统的抗杂散辐射干扰设计具有重要的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Jonsson P, Riehm M. Infrared thermometry in winter road maintenance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(6): 846–856.
- [2] Riehm M, Gustavsson T, Bogren J, et al. Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 29(6): 71–76.
- [3] Tian Qijie, Chang Songtao, He Fengyun, et al. Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems using ambient temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 144–151. (in Chinese)
- 田棋杰, 常松涛, 何锋贇, 等. 根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 144–151.
- [4] Yu Fei, Ren Qifeng, Li Hua, et al. Measurement method of self-

- thermal radiation for coaxial total reflection infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0104003. (in Chinese)
- 余菲, 任栖锋, 李华, 等. 同轴全反红外光学系统自身热辐射测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0104003.
- [5] Song Xincheng, Zhang Yu, Shi Yanfei, et al. Design of temperature control system for infrared thermal imager under non-uniform temperature field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0604002. (in Chinese)
- 宋新成, 张宇, 史燕飞, 等. 非均匀温度场下红外热成像仪温控系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0604002.
- [6] Liu Yang, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1164–1171. (in Chinese)
- 刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1164–1171.
- [7] Zhang Xiao long, Liu Ying, Sun Qiang, et al. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235–241. (in Chinese)
- 张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 235–241.
- [8] Yang Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 1999(4): 20–24. (in Chinese)
- 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. *红外技术*, 1999(4): 20–24.
- [9] Xie Le. Design and research of pavement temperature measurement system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.(in Chinese)
- 解乐. 道面温度测量系统设计与研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [10] Zhang Yuntao, Li Yao, Gao Taichang. Calibration method of infrared focal plane arrays based on neural network [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instruments*, 2009, 26(4): 19–21+25. (in Chinese)
- 张云涛, 李涛, 高太长. 基于人工神经网络的红外焦平面阵列定标方法[J]. *气象水文海洋仪器*, 2009, 26(4): 19–21+25.
- [11] Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li. Calculation of infrared temperature measurement on Non-lambertian objects [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2093–2097. (in Chinese)
- 杨桢, 张士成, 杨立. 非朗伯体红外测温计算研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2093–2097.