

基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法研究

宋 健¹ 郝小鹏¹ 原遵东¹ 刘曾林¹ 许 敏^{1,2} 丁 雷³

¹中国计量科学研究院热工计量科学与材料特性测量技术研究所, 北京 100013

²成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059

³中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 介绍了中国计量科学研究院基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量原理、方法和装置的研究进展。基于普朗克黑体辐射理论,建立了控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法的理论模型,并且搭建该测量装置,研究了该方法测量黑体辐射源发射率的结果和影响因素。利用该系统测得的黑体辐射源发射率测量的结果与理论模拟的结果高度吻合,测量重复性(标准偏差)达到0.07%。实验结果表明该方法在测量黑体发射率时不受热辐射环境温度重复性的影响,当热辐射环境温度与被测黑体温度的差异足够大时,热辐射环境温度的变化对黑体发射率测量结果的影响可以满足应用的需求。该方法具备热红外遥感载荷在轨定标黑体的发射率测量的应用潜力,为我国红外遥感在轨定标系统定量化水平的提高提供重要技术基础。

关键词 测量; 发射率; 控制环境辐射; 热辐射环; 黑体辐射源; 航天应用

中图分类号 TB941 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP42.0908005

Blackbody Source Emissivity Measurement Method Based on Controlling Surroundings Radiation

Song Jian¹ Hao Xiaopeng¹ Yuan Zundong¹ Liu Zenglin¹ Xu Min^{1,2} Ding Lei³

¹Division of Thermometry and Materials Evaluation, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

²College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

³Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The progress of the blackbody source emissivity measurement based on the controlling surrounding radiation is presented, including the principle, method and equipment. The theoretical model is established according to the Planck's radiation law. The equipment is set up, and the blackbody emissivity results are analyzed and factors affecting the results are discussed. The measurement results of blackbody emissivity agree well with the theoretical modeling result, and the standard deviation of measurement results achieves 0.07%. It is shown that the temperature repetitiveness of the heated halo has little influence on the emissivity results by the proposed method. Similarly, the change of heated halo temperature has little effect on the results when the difference in temperature between heated halo and blackbody is large enough. The proposed method has potential applications in the blackbody emissivity measurement during the thermal infrared remote sensing facility on orbit. It also set an important base to raise the level of infrared remote sensing calibration on board.

Key words measurement; emissivity; controlling surrounding radiation; heated halo; blackbody source; aerospace application

OCIS codes 120.0280; 120.3940; 120.5630

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-21; 网络出版日期: 2015-00-00

基金项目: 国家 863 计划(2015AA123701)、国家自然科学基金(11475162)、中国科学院红外探测与成像技术重点实验室资助课题

作者简介: 宋 健(1988—),男,硕士研究生,主要从事红外亮度温度标准装置方面的研究。E-mail: songj@nim.ac.cn

导师简介: 郝小鹏(1980—),男,博士,副研究员,主要从事红外亮度温度标准装置和量值传递方法方面的研究。

E-mail: haoxp@nim.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

红外遥感是对地观测系统的重要探测手段之一,在国土安全、防灾减灾、环境监测、气象预报和气候变化监测等很多领域都发挥着重要作用。由于红外遥感载荷在轨运行期间量值稳定性不高,需要利用星载定标系统不断的进行标定。高精度的星载定标系统,对于保持红外遥感载荷高量化和高稳定性的观测水平具有决定性作用。星载定标系统一般由1~2个星载黑体实现高低温度的标定,也可利用深空环境作为标定源^[1-4]。

当前,我国星载定标黑体整体水平与美国和欧洲还有较大差距。如美国和欧洲在红外遥感载荷的星上定标黑体水平达到(0.2~0.3) K^[5],而我国星载定标黑体的水平为(0.7~1) K。另一个突出的问题是星载黑体一旦发射入轨工作,其量值无法计量和校准。而美国气候监测领域的气候绝对辐射和折射观测平台(CLARREO)计划要求红外遥感亮度温度的定标水平优于0.1 K,并且建立了星载定标黑体在轨计量和校准方法,其中黑体发射率不确定度优于0.06%($k=3$)^[6]。而我国在此领域的研究还尚未开展。

根据普朗克黑体辐射定律,黑体的亮度温度由黑体温度、波长和发射率来决定。黑体的温度通过黑体上的高精度温度传感器测量得到。而黑体发射率通过地面实验测量得到后,作为一个重要参数直接用于黑体亮度温度的计算。目前尚无在轨测量和校准的措施。而卫星在轨运行期间星载定标黑体可能会受到宇宙射线照射的破坏或者长时间工作老化变性,这些都可能改变黑体的发射率,从而影响定标的准确性。为了提高我国红外遥感的定标水平,同时满足气候监测对高精度的红外遥感载荷的需求,有必要研究星载黑体发射率在轨的自校准方法。准确地测量黑体发射率对于提高星载定标系统的精度具有重要意义。

基于控制环境辐射的黑体发射率的校准方法为解决星载黑体发射率的自校准提供了新的方向。美国威斯康辛大学建立的基于热辐射环的黑体发射率测量装置,在氮气净化环境中使用绝对亮度干涉仪和高分辨率扫描干涉仪作为测量仪器,将热辐射环加热到高于黑体温度75 K测量黑体发射率,在实验室实现发射率测量结果不确定度为 4×10^{-4} ($k=3$)的水平^[7]。

本文介绍了中国计量科学研究院建立的基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量装置的原理、组成和实验结果,分析了热辐射环温度和黑体温度变化对测量结果的影响,验证了该方法应用于星载定标黑体发射率在轨校准的可行性。

2 实验原理

2.1 实验原理

一个具有无限小开口的理想黑体辐射源,其光谱辐射亮度可以由普朗克黑体辐射定律计算得到,表达为

$$B_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\pi n^2 \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{n\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

式中 $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, T 为黑体腔的温度,单位为 K, λ 为空气中的波长,单位为 μm , n 为空气折射率。

对于实际黑体辐射源其发射率接近于1,但不等于1,需要考虑其发射率和反射率对辐射亮度的贡献。即当环境温度与黑体温度接近时,探测到的实际黑体辐射源的光谱辐射亮度不仅要包含黑体辐射源自身的光谱辐射亮度,还包含着其反射的环境辐射亮度。因此,探测到的黑体辐射源总的光谱辐射亮度 \tilde{I}_{λ} 可以表达为

$$\tilde{I}_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_{\text{bb}}) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) I_{\lambda, \text{bg}}, \quad (2)$$

式中 ε_{λ} 为黑体的光谱发射率, $B_{\lambda}(T_{\text{bb}})$ 为理想黑体发射的光谱辐射亮度, $I_{\lambda}(T_{\text{m}})$ 为环境辐射亮度。通常情况下,环境辐射亮度的普朗克表达为

$$I_{\lambda, \text{bg}} = B_{\lambda}(T_{\text{m}}), \quad (3)$$

式中 T_{m} 为环境的温度值。假设环境温度是均匀分布,当在待测黑体前部加入一个热辐射环时,热辐射环成为环境辐射的一部分,如图1所示。当热辐射环处于室温时热辐射环与周围环境相同,当热辐射环温度升高就会改变环境辐射。黑体接收到的环境辐射包含热辐射环的辐射和环境的辐射。此时的环境辐射亮度 $I_{\lambda, \text{bg}}$ 可以表达为

$$I_{\lambda, \text{bg}} = FI_{\lambda}(T_{\text{halo}}) + (1 - F)B_{\lambda}(T_{\text{rm}}), \quad (4)$$

式中 $I_{\lambda}(T_{\text{halo}})$ 为热辐射环的辐射亮度, $B_{\lambda}(T_{\text{rm}})$ 为热辐射环以外的环境辐射的辐射亮度, F 为热辐射环相对黑体的角系数, 可以根据黑体和热辐射环的几何参数计算得到, T_{halo} 为热辐射环的温度。

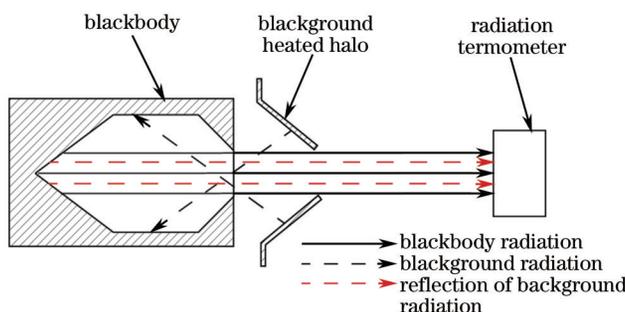


图1 热辐射环对黑体环境辐射的影响示意图

Fig.1 Schematic of influence of background radiation to blackbody caused by heated halo

根据(2)式可以得到发射率为

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\tilde{I}_{\lambda} - I_{\lambda, \text{bg}}}{B_{\lambda}(T_{\text{bb}}) - I_{\lambda, \text{bg}}}, \quad (5)$$

式中 $I_{\lambda, \text{bg}}$ 为环境辐射亮度, 可由(4)式计算得到, \tilde{I}_{λ} 是测量到的总的黑体辐射亮度, $B_{\lambda}(T_{\text{bb}})$ 是黑体辐射亮度, 可由普朗克方程计算得到。

2.2 热红外带通辐射温度计测量原理

作为测量仪器的红外辐射温度计, 其测量输出为温度值。假设辐射温度计的光谱响应为矩形带通响应, 利用辐射温度计的 Sakuma-Hattori 方程将辐射源的亮度温度值转换为辐射亮度值。Sakuma-Hattori 方程是表述探测器输出与其辐射温度之间关系的数学模型, 可表达为^[8]

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1}, \quad (6)$$

式中 $S(T)$ 为使用 Sakuma-Hattori 方程计算的探测器输出, 假设响应幅度为 1, 可将 $S(T)$ 视为辐射温度计接收到的辐射亮度。 T 为辐射温度计温度值, 单位为 K, A, B, C 为方程系数, $c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}^{[9]}$ 。系数 A, B 可由探测器的中心波长与探测器波长响应宽度计算得到, 系数 C 待定。

假设黑体发射率在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内为常数。对(2)式的波长积分, 可得

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tilde{I}_{\lambda} d\lambda = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}(T_{\text{bb}}) d\lambda + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda, \text{bg}} d\lambda. \quad (7)$$

辐射温度计探测到的辐射亮度应与黑体总的辐射亮度相等, 即

$$S(T_n) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tilde{I}_{\lambda} d\lambda, \quad (8)$$

式中 T_n 为辐射温度计的示值, 单位为 K。将(8)式和(6)式代入(7)式得到

$$\frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_n+B}\right) - 1} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}(T_{\text{bb}}) d\lambda + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda, \text{bg}} d\lambda. \quad (9)$$

令 $B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{bb}}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}(T_{\text{bb}}) d\lambda$, $I_{\lambda_1-\lambda_2, \text{bg}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda, \text{bg}} d\lambda$, 得到

$$\frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_n+B}\right) - 1} = \varepsilon B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{bb}}) + (1 - \varepsilon) I_{\lambda_1-\lambda_2, \text{bg}}. \quad (10)$$

假设热辐射环处于两个不同温度的环境辐射, 分别为 $I_{\lambda_1-\lambda_2, \text{bg}1}$ 和 $I_{\lambda_1-\lambda_2, \text{bg}2}$, 对应于黑体温度分别为 $T_{\text{bb}1}$ 和

T_{bb2} 温度计的辐射温度值分别为 T_{r1} 和 T_{r2} , 根据(10)式可以得到这两个状态的黑体辐射亮度与辐射温度计探测的辐射亮度之间关系式。将这两个状态相比, 得到

$$\frac{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{r2} + B}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{r1} + B}\right) - 1} = \frac{\varepsilon B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{bb1}) + (1 - \varepsilon)I_{\lambda_1-\lambda_2, bg1}}{\varepsilon B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{bb2}) + (1 - \varepsilon)I_{\lambda_1-\lambda_2, bg2}}, \quad (11)$$

令 $Y_1 = \exp\left(\frac{c_2}{AT_{r1} + B}\right) - 1$, $Y_2 = \exp\left(\frac{c_2}{AT_{r2} + B}\right) - 1$, 将(11)式中的发射率 ε 提取整理可得到控制环境辐射发射率测量方法的表达式, 即

$$\varepsilon = \frac{Y_1 I_{\lambda_1-\lambda_2, bg1} - Y_2 I_{\lambda_1-\lambda_2, bg2}}{Y_2 [B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{bb2}) - I_{\lambda_1-\lambda_2, bg2}] - Y_1 [B_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{bb1}) - I_{\lambda_1-\lambda_2, bg1}]} \quad (12)$$

(12)式为使用红外带通辐射温度计作为测量仪器的黑体发射率计算公式。

3 实验装置及流程

3.1 装置

基于控制环境辐射的黑体发射率测量系统包含被测黑体、放置在黑体空腔开口前的热辐射环、降低杂散辐射的水冷光阑、红外辐射温度计、电控移动台、高精度测温电桥及计算机等, 系统示意图如图2所示。辐射温度计瞄准黑体空腔底部, 用于测量黑体辐射亮度信号, 热辐射环安装在黑体空腔开口的前面, 通过设置不同的温度来控制环境辐射, 在热辐射环和辐射温度计之间设置水冷光阑来减小热辐射环对辐射温度计的影响、黑体的温度控制和测量、热辐射环的温度控制和测量, 以及辐射温度计的测量值均通过计算机控制和采集。

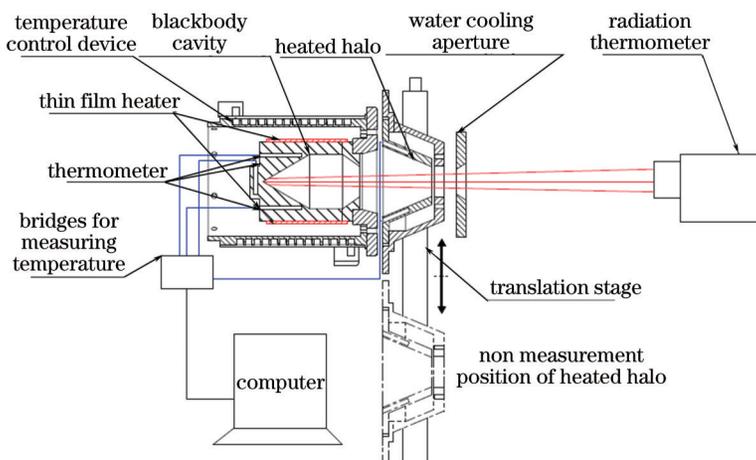


图2 基于控制环境辐射的黑体发射率测量系统示意图

Fig.2 Schematic of blackbody emissivity measurement method based on controlling background radiation

待测黑体的外部采用恒温水冷套控制黑体空腔外部环境温度, 黑体空腔为硬铝材料加工, 其为圆柱和锥形组合结构, 内径为 44 mm, 开口直径为 24 mm, 锥角为 60°, 深度为 79 mm, 腔底后部安装高精度铂电阻温度传感器用于测量黑体空腔温度, 结构和温度计相对位置如图3所示, 所有的温度传感器的电测信号通过 Fluke 1595 测温电桥测量得到。为了降低热辐射环热传导作用对黑体温度的影响, 在黑体前端采用聚四氟乙烯和空气隔离。

热辐射环为铝材质加工, 其结构为空心圆台形, 面向黑体一侧开口大小为 57 mm, 另一侧开口大小为 24 mm, 使用薄膜加热片加热, 其内壁同样喷涂高发射率的黑漆。在热辐射环的侧壁上预留安装温度计的小孔, 通过铂电阻温度计测量热辐射环的温度。其结构如图4所示。在热辐射环外侧安装防辐射外壳, 降低热辐射环温度对环境的影响。热辐射环及外壳整体安装在电控平移台上, 通过电控平移台控制热辐射环在测量位和非测量位切换。

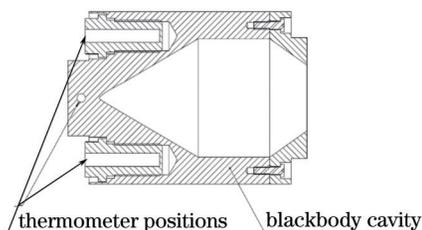


图3 待测黑体结构示意图

Fig.3 Feature of blackbody under test

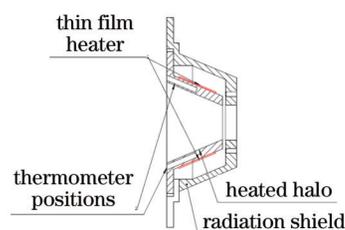


图4 热辐射环及附件结构示意图

Fig.4 Feature of the heated halo

测量仪器选用HEITRONICS公司的TRT4.82型红外辐射温度计,其测温范围为(223.15~1273.15) K,输出分辨率为0.02 K,使用热释电探测器光谱响应范围为8~14 μm ,焦距为390 mm,在488 mm处的视场大小为9.2 mm。

3.2 实验流程

实验流程为:1) 保持黑体和热辐射环处于室温状态,辐射温度计测量黑体辐射亮度温度值,同时采集黑体和热辐射环温度传感器的信号;2) 将热辐射环从黑体前端移开,开始加热热辐射环到高于黑体温度约44 K;3) 待热辐射环温度稳定后,将热辐射环移动到黑体前部,辐射温度计测量黑体辐射亮度温度值,并且采集黑体和热辐射环温度传感器的信号,为了防止热辐射环辐射对黑体温度的影响,测量时间一般为1 min;4) 通过热辐射环位置控制电移台将其移到待测位置,放置5 min后,再次移动到测量位置测量1 min,如此反复6次。

4 实验结果

4.1 控制环境辐射的黑体发射率测量结果

实验中使用的红外辐射温度计的波长响应范围为8~14 μm ,则其中心波长 $\lambda_0 = 11 \mu\text{m}$,带宽 $\Delta\lambda = 6 \mu\text{m}$ 。根据 λ_0 和 $\Delta\lambda$ 的值可以得到 Sakuma-Hattori 方程的系数 A 、 B 分别为 $9.37 \mu\text{m}$ 和 $178 \mu\text{m} \cdot \text{K}$,代入(6)式中。同时(7)式中积分的波长范围为8~14 μm ,将上述数据代入(12)式,可得到黑体空腔发射率的计算结果。按照3.2中实验流程,在20天内测量了10次黑体空腔发射率,实验数据和发射率计算结果列于表1。控制环境辐射黑体发射率测量方法得到发射率的平均值为0.9961,标准偏差(STDEV)为0.07%。从实验结果可以看出,热辐射环的温度与黑体温度的差异最小为44.06 K,最高为75.85 K,相差约32 K,而发射率的测量结果几乎无差异。因此可以看出,此方法与控制环境辐射热辐射环的温度设置的重复性无关,只与热辐射环与被测黑体温度的差异有关。

表1 控制环境辐射的黑体发射率测量结果

Table 1 Results of blackbody emissivity based on controlling surrounding radiation

Date	Blackbody temperature /K	Halo temperature /K	Difference between the halo and blackbody /K	Background temperature /K	Value of TRT4.82 /K	Blackbody emissivity
November 6, 2014	305.09	364.34	59.25	299.25	305.40	0.9963
	303.60	379.28	75.69	299.65	304.04	0.9955
	303.01	347.24	44.24	299.55	303.45	0.9958
November 5, 2014	303.39	363.31	59.92	300.15	303.87	0.9959
	305.92	381.65	75.73	300.45	306.33	0.9958
	302.95	347.01	44.06	300.05	303.38	0.9962
November 4, 2014	303.22	379.06	75.85	299.85	303.70	0.9951
	301.36	361.38	60.02	295.85	301.55	0.9967
October 17, 2014	301.86	359.91	58.05	295.75	301.97	0.9974
October 14, 2014	294.33	356.93	62.60	294.75	294.46	0.9965
Average						0.9961
STDEV						0.07%

4.2 黑体空腔发射率理论计算结果

在设计黑体时,可以通过很多方法模拟计算黑体的发射率^[10]。黑体空腔的结构参数如表2所示,黑体腔的内径为44 mm,开口直径为24 mm。黑体腔底部设计为圆锥形,底部锥角为60°,黑体腔整体深度为79 mm。其内部喷涂TEMPIL公司的PYROMARK高发射率的黑漆,其发射率为0.94。使用基于蒙特卡罗方法的STEEP3黑体腔发射率模拟软件^[11]计算其法向发射率为0.998。模拟计算结果比实验测量结果平均值高0.0019。由于理论计算并未考虑很多实际因素,如黑体空腔温度均匀性、涂层的发射率和反射率等,实验测量结果与理论计算结果比较吻合。

表2 实验中使用的黑体腔参数

Table 2 Blackbody parameters used in the experiment

Parameter	Value
Material	Aluminum
Diameter of cavity	44 mm
Diameter of opening	24 mm
Length of cavity	79 mm
Cone angle of cavity	60°
Coating emissivity	0.94

5 讨 论

在黑体前端加入热辐射环改变了黑体的环境辐射量,辐射温度计测量的信号中包含黑体反射的来自热辐射环的信号。本实验使用的黑体的发射率使用蒙特卡罗方法模拟值为0.998,则其反射率约为0.002,热辐射环的信号相对黑体辐射的信号必须足够大才能够被辐射温度计探测到。也就是说热辐射环的温度与黑体温度的差异必须足够大才能正确测量黑体的发射率。实验中测量了热辐射环温度与黑体温度差异从26 K变化76 K时黑体的发射率,实验结果如图5所示。从图5可以看出当热辐射环与黑体空腔温差升高到44 K及以上时,在将近1个月内的十次测量的黑体发射率的平均值为0.9961,标准差为0.07%。在高于此温差的情况下,在同一天内,黑体空腔发射率的测量结果几乎不变。因此,当热辐射环的温度与黑体空腔的温差高于44 K时,其空腔发射率的测量与热辐射环与黑体空腔温度的差值无关。当热辐射环温度与黑体空腔的温差低于26 K时黑体发射率的测量结果平均值相差较大,结果明显偏高。

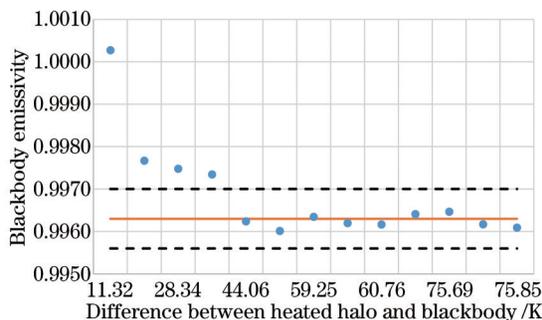


图5 热辐射环温度与黑体温度差异变化对发射率测量结果的影响

Fig.5 Difference of temperature between heated halo and blackbody on the effect of emissivity results

6 结 论

本文系统介绍了基于控制环境辐射的黑体发射率测量的原理、方法和装置。基于普朗克黑体辐射理论和Sakuma-Hattori方程,建立了黑体发射率计算模型,在不需得到Sakuma-Hattori方程中系数C的情况下,计算黑体的发射率。搭建了实验装置,通过设置不同的热辐射环与黑体空腔的温度差从44 K到76 K,在20天内测量了10次黑体空腔发射率,其结果的标准差为0.07%,验证了此方法与控制环境辐射热辐射环的温度设置的重复性无关,只与热辐射环与被测黑体温度的差异有关。实验结果证明当热辐射环温度与黑体温度的差异足够大时黑体发射率的测量结果不受热辐射环温度设置重复性的影响。

参 考 文 献

- 1 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008.
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. *激光与光电子进展*, 2013, 50(1): 010008.
- 2 You Siliang, Chen Guilin, Wang Ganquan. Simulation experiment of satellitic blackbody in midnight's solar radiation[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 650-654.
游思梁, 陈桂林, 王淦泉. 星载定标黑体午夜太阳辐照模拟实验[J]. *光学技术*, 2010, 36(5): 650-654.
- 3 Chen Muwang, Qi Hongxing, Gong Yumei, *et al.*. Analysis of effect of calibration blackbody temperature stability on the infrared imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 652-654.
陈木旺, 齐洪兴, 龚玉梅, 等. 定标黑体的温度稳定性对热成像的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 652-654.
- 4 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.
孙志远, 常松涛, 朱 玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712006.
- 5 J Sun, X Xiong, S Madhavan, *et al.*. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk effect and its removal[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52(3): 1551-1561.
- 6 Fred A Best, Douglas P Adler, Claire Pettersen, *et al.*. On-orbit absolute radiance standard for future IR remote sensing instruments [C]. Pasadena: Earth Science Technology Forum, 2011.
- 7 P J Gero, J K Taylor, F A Best, *et al.*. On-orbit absolute blackbody emissivity determination using the heated halo method[J]. *Metrologia*, 2012, 49(2): S1-S8.
- 8 Sakuma F, Kobayashi M. Interpolation equations of scales of radiation thermometers[C]. Society of Instrument and Control Engineering, 1994: 95.
- 9 Peter Saunders. Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers[J]. *Meas Sci & Technol*, 2009, 20(2): 025104.
- 10 Dong Liu, Yuanyuan Duan, Zhen Yang. Integrated effective emissivity computation for non-isothermal non-axisymmetric cavities [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(2): 022001.
- 11 Sapritsky V I, Prokhorov A V. Calculation of the effective emissivities of specular-diffuse cavities by the Monte Carlo method[J]. *Metrologia*, 1992, 29(1): 9-14.

栏目编辑: 何卓铭