

一种物体比辐射率的新型四次测量法及增温补偿

张仁华¹, 米素娟^{2,3*}, 田静¹, 李召良^{4,5}, 苏红波¹, 郝贵斌^{1,6}, 姜勃^{1,6}, 刘素华^{1,6}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环重点实验室,北京 100101;

2. 中国交通通信信息中心,北京 100011;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室,甘肃 兰州 730000;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;

5. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;

6. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:提出了测量物体比辐射率的二次照度四次测量法.根据自主研制的仪器表明该方法和设计能够测量到与照射到被测目标完全一致的热辐射源辐照度,并且能够排除传感器镜头、腔壁等的干扰.不仅提高测量精度,而且可以设计成小尺寸便携式的比辐射率测定仪.设计的 1000 w/m^2 以上的强热辐射源,大幅度提高仪器信噪比.为了补偿在强热辐射源下的被测目标的增温,提出了在非同温系统中求解比辐射率普适表达式以及补偿增温的“过程法”.从而解决了在非同温系统中温度变化造成比辐射率测量误差的瓶颈问题.三种比辐射率测量方法对比表明,该方法优于其它两种方法.

关键词:比辐射率;二次照度四次测量法;增温补偿;求解比辐射率的普适表达式;过程法

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

A new method on estimating object emissivity by using four times measuring and principle of temperature compensation

ZHANG Ren-Hua¹, MI Su-Juan^{2,3*}, TIAN Jing¹, LI Zhao-Liang^{4,5}, SU Hong-Bo¹,
HAO Gui-Bin^{1,6}, JIANG Bo^{1,6}, LIU Su-Hua^{1,6}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, 100101 Beijing, China;

2. China Transport Telecommunications & Information Center, 100011 Beijing, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 730000 Lanzhou, China;

4. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, 100101 Beijing, China;

5. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 100081 Beijing, China;

6. University of Chinese Academy of Sciences, 100049 Beijing, China)

Abstract: A "two times thermal irradiance and four times measuring method" was proposed to measure the surface emissivity of any object. Compared with the previous methods, the proposed method can completely eliminate the interference of the lens and cavity walls of the sensor to measure accurately the irradiance of the observed object, implying its ability to improve the accuracy of surface emissivity measurement and making the equipment of emissivity measurement portable. The designed $1000 + \text{w/m}^2$ strong heat radiation source considerably improved the signal to noise ratio of the equipment. To compensate the warming effect of the measured object under the strong heat radiation source, we proposed a universal expression to solve the emissivity in the non-isothermal system and a "Process Meth-

收稿日期:2017-06-11,修回日期:2017-09-22

Received date: 2017-06-11, revised date: 2017-09-22

基金项目:国家基础发展规划项目(973项目2013CB733406),国家自然科学基金项目(41271380,41571356,41671354)

Foundation items: Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program 2013CB733406), National Natural Science Foundation of China (41271380, 41571356, 41671354)

作者简介(Biography):张仁华(1940-),男,江苏宜兴人,研究员,学士学位,主要研究领域为定量热红外遥感. E-mail: zhangrh@igsrr.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: misujuan871001@163.com

od" to reduce warming. The comparison of three measurement results showed that the proposed method outperformed the others.

Key words: emissivity, two times radiation and four times observing method, temperature compensation, a universal expression of solving emissivity, process method

PACS: 95.55.Fw

引言

地表温度是地球系统热量平衡、水量平衡等领域非常重要而灵敏的参数,因此地表温度信息与许多重要的自然现象、过程和规律相耦合.定量热红外遥感的核心科学问题之一就是如何准确获取地物表面的真实表面温度.

物体真实温度(即黑体温度 $B(T_s)$)与物体比辐射率 ε 、热红外出辐射度 Q 以及环境辐射照度 $E(T_E)$ 的定量关系:

$$Q = \varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)E(T_E) \quad (1)$$

根据式(1)可知,不能用红外测温仪直接获取被测物的黑体温度,也不能直接获取被测物的比辐射率,从而快速直接获取被测物的比辐射率成为热红外遥感的具有挑战性的课题^[1-2].实践表明比辐射率相差 0.01 可以导致表面温度的反演精度相差 $0.7 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[3-4],因此,比辐射率是定量反演地表温度的一个重要参数.

虽然定量热红外遥感工作者在长期实践中已经提出运用卫星遥感数据进行“温度与比辐射率分离(TES)方法”和“白天-晚上法”等方法^[5-12],能够同时获取比辐射率和地表温度,但是,这方法均有一定的假设条件,而且需在地面进行真实性检验确定其精度.在气象站、生态台站的地表温度监测;在地质领域的野外矿物岩性的识别;在军事中的热红外伪装和反伪装;建筑材料热特性研究^[13];甚至化学热力学研究^[14]等领域均迫切需要快速、便携、准确的比辐射率测量仪器和方法.随着计算机技术的发展,物体多波段比辐射率非接触测量仿真技术也开始启动,这也可表明物体比辐射率信息的重要性^[15].

目前,存在的比辐射率测量方法中,常用的概括如下两种:

第一种方法是基于获取被测物黑体温度 $B(T_s)$ 的估算法,其表达式为

$$\varepsilon = \frac{Q - E(T_E)}{B(T_s) - E(T_E)} \quad (2)$$

这种思路的可行性是主要取决于获取 $B(T_s)$ 的准确度.例如,102F 傅里叶光谱仪采用一种假设,即

认为物体 $7 \mu\text{m}$ 附近的热红外出射辐射度近似为黑体温度辐射,以此求的黑体温度 $B(T_s)$.由于这种假设是近似的,这种假设和方法的设计者也承认对较低比辐射率物体,将产生很大误差^[16].目前仍有人用一种接触式的点温计获取地表黑体温度 $B(T_s)$,计算物体比辐射率.虽然这种测量表面黑体温度的方法既廉价又方便,然而它改变了被测表面的热量平衡,不能准确测量地表黑体温度,早在 60 多年前英国微气象学家萨顿的“微气象”专著中已经被否定^[17].

有学者根据第一种方法,试图以非接触方式准确获取被测物黑体温度,进行多角度地表温度测量^[18]以及开展方向比辐射率测量^[19],在尽可能精确获取被测物黑体温度和环境热辐射照度的基础上进行不透明物体比辐射率的测量^[20].

有学者在第一种方法中的 Q 及 $B(T_s)$ 不是直接测量,而以类似卫星数据同时反演地表温度和比辐射率的模型(TES 等)用于地面测量.肖青等提出采用卫星遥感的光谱平滑-温度/发射率迭代算法(ISSTES),进行了温度和比辐射率的分离反演,从而获取了地表黑体温度 $B(T_s)$ 和比辐射率^[21].沈斌、阎广建等运用 102F 便携式傅里叶变换红外光谱仪,研究了黑体温度拟合法和另外 3 种 TES 算法,认为基于平滑度的 ISS TES 算法和多项式拟合法不仅限制条件少、适用性强,而且精度较高,算法易于实现^[22].虽然上述模拟试验结果在运用比辐射率真值验证的前提下,有利于温度和比辐射率分离等卫星遥感模型的地面真实性检验,但是计算复杂,不能实时快速准确获取被测目标的比辐射率.

第二种方法是二次环境热辐射照度法.在二次照度的快速切换中,假设被测物黑体温度不变,从而在方程组中消掉被测物黑体温度,方程组闭合,从而获取比辐射率.第二种方法从测量途径上分封闭法和非封闭法.非封闭法是由非封闭环境形成两次辐射度,其中有利用天空冷辐射环境^[23-24]和利用二氧化碳激光照度^[25-26].

封闭法主要改变环境罩上盖的比辐射率和改变环境罩内表面温度,形成二次不同辐射度. Buettne

在 1965 提出了箱子法^[27], Rubio 等改进了 Buettne 在 1965 提出的箱子法^[30-31], 我们在 80 年代提了黑体筒法^[28-29], 均属于封闭法. 上述封闭法的两次热辐射照度是依靠计算而不是依靠实际测量, 或测量的热源面和目标物的位置的有差异, 导致多次反射的影响和红外测温仪的镜头热辐射的干扰不能排除, 从而减低了测量精度.

本文提出了二次照度四次测量法, 其设计特点为: (1) 实现二次目标物出辐射度和二次环境照度的直接测量; (2) 能够测量到与照射到被测目标完全一致的热辐射源辐照度; (3) 仪器结构小巧便携; (4) 1000 W/m² 以上的热辐射照度, 大幅度提高了信噪比; (5) 运用软件计算, 数秒钟即可实时显示比辐射率测量值.

为了确认提出的四次测量法的实际效果, 本文首先提出四次测量法在非同温系统中求解比辐射率的普适方程; 其次开展由于在强热辐射照度下目标和下翻金板增温的灵敏度试验. 根据灵敏度试验, 确认这种小尺寸设计的增温效应及其对比辐射率测量精度的影响, 确认是否需要进行温度补偿. 为了使四次测量法更加严谨, 提出了补偿增温的“过程法”; 最后将本文提出的新方法 with 目前常用的两种方法进行比较.

1 基于红外测温仪的比辐射率四次测量法的普适计算方程构建

本设计的特色是冷、热辐射源辐照度采用了置于被测目标相同位置的镀金反射板的反射热辐射. 这种设计能够测量到与被测目标完全一致的热辐射源的辐照度, 也就是能够将热辐射源的辐照度和传感器镜头、腔壁等对冷热源辐照度的实际影响直接测量出来, 提高了测量精度, 并且可以设计小尺寸便携式的比辐射率测定仪. 从而构成了新型的二次照度的四次测量法.

以自主研发的主被动漫射式比辐射率测定仪为例, 该仪器结构见图 1 所示, 其特点: 便携式并且室内外两用; 测量快速, 软件计算, 数秒钟即可显示 8 ~ 14 μm 的平均比辐射率; 测量结果稳定准确. 该仪器于 2017 年 5 月获得国家发明专利授权^[35]. 其中以立方型镀金筒上方的块状电热组件的热照度(热环境)与上方的常温镀金板(与目标物接近的室温环境)构成的二次照度. 也就是在冷热辐射方程中, 把电热黑体源作为热环境源, 把室温作为相对冷环境, 构建了非同温系统.

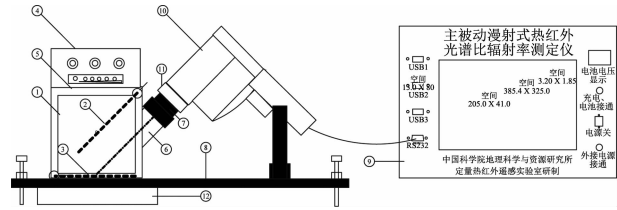


图 1 主被动漫射式比辐射率测定仪示意图
Fig. 1 The sketch map of the active and passive diffuse emissivity instrument

由于式(3)和式(4)中被测物黑体温度 T_{s0} 不等于环境温度 T_{col} 或 T_{hot} ; 根据基尔霍夫定律在非同温系统中被测物的表面温度要改变.

将热辐射式(1)以下标 hot 为热环境和 col 冷环境, 构成二次照度方程组:

$$Q_{col} = \varepsilon B(T_{s0-col}) + (1 - \varepsilon) E_{col}(T_{E-col}), \quad (3)$$

$$Q_{hot} = \varepsilon B(T_{s0-hot}) + (1 - \varepsilon) E_{hot}(T_{E-hot}). \quad (4)$$

上述方程组严格讲应该是在冷热环境改变的时间内被测物的黑体温度保持相等, 方程组才能求解而实际上保持完全相等是不可能的. 也就是当被测物进入热环境后必然要增温, 假如增温值为已知值, 方程也可求解, 可以通过已知的增温值消除增温的影响. 现将被测物在热环境中的增温值和下翻镀金板的增温值直接引入方程组, 推导四次测量法的普适解.

考虑热环境下被测物的增温 ΔT , 式(4)改写为:

$$Q_{hot} = \varepsilon B(T_{s0} + \Delta T) + (1 - \varepsilon) E_{hot}(T_{E-hot}). \quad (5)$$

令 $\Delta Q = Q_{hot} - Q_{col}$ 为传感器接收到热环境下目标与冷环境下目标的信号的(读数)出辐射度之差, 包含目标对热环境与冷环境的反射辐射之差, 以及目标在热环境与冷环境下的发射辐射之差. $\Delta E = E_{hot} - E_{col}$, 为热环境与冷环境的辐照度之差. $\Delta Q_E = Q_{E-hot} - Q_{E-col}$ 为传感器接收到热环境与冷环境下的镀金板的信号(读数)之差, 包含镀金板对热环境与冷环境的反射辐射之差, 以及镀金板在热环境与冷环境下的发射辐射之差. $\varepsilon \Delta B = \varepsilon [B(T_{hot}) - B(T_{col})]$ 为被测物在热环境与冷环境下的发射辐射之差.

由于热环境和冷环境是用镀金板的反射辐射测量的, 镀金板也像被测物一样被热辐射加温, 其方程组为

$$Q_{E-col} = \varepsilon_g B_g(T_{col}) + (1 - \varepsilon_g) E_{col}(T_{E-col}), \quad (6)$$

$$Q_{E \sim \text{hot}} = \varepsilon_g B_g(T_{\text{col}}) + \varepsilon_g \Delta B_g + (1 - \varepsilon_g) E_{\text{hot}}(T_{E \sim \text{hot}}) \quad (7)$$

热环境与冷环境的辐射度之差由下式表达:

$$\Delta E = \frac{\Delta Q_E - \varepsilon_g \Delta B_g}{(1 - \varepsilon_g)} \quad (8)$$

式中 $\varepsilon_g \Delta B_g = \varepsilon_g [B_g(T_{\text{hot}}) - B_g(T_{\text{col}})]$ 为下翻镀金板在热环境与冷环境下的发射辐射之差. 在热环境与冷环境下目标温度和下翻镀金板的温度均有所改变的时候, 被测物的比辐射率由下式表达:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_E - \varepsilon_g \Delta B_g - \Delta Q(1 - \varepsilon_g)}{\Delta Q_E - \varepsilon_g \Delta B_g - \Delta B(1 - \varepsilon_g)} \quad (9)$$

式(9)是二次照度四次测量法求解被测物比辐射率的普适公式, ΔQ 、 ΔQ_E 是二次照度法中必须测量而且能够直接测量到的数据. 式中包含了非同温系统中被测物体的增温值 ΔB , 以及反射镀金板的增温值 ΔB_g . ΔB 、 ΔB_g 也是必须测量得到但是还不能直接测量到的数据.

2 目标增温和下翻金板增温导致目标比辐射率测量影响的灵敏度试验

新型四次测量法, 由于小尺寸便携式的设计, 缩短了热源和被测目标的距离, 加大了在传感器响应时间内热源对被测目标增温的可能性. 基尔霍夫定律指出被测物在两次热环境下温度(或热辐射)不变的唯一条件是被测物和环境同温^[32,34]. 因此在二次照度法的冷热环境切换时, 将造成被测物的表面温度改变. 为了确定提出的结构和热源强度设计在测量中的比辐射率变化灵敏度, 需要试验在设计的热源面温度下的实际增温幅度.

为此, 开展几种有代表性的被测目标和下翻镀金板的灵敏度试验. 以热源面出辐射度照射下的实际增温幅度代入求解比辐射率的普适表达式(式(9))计算出比辐射率值, 确定目标增温和下翻金板的增温对目标比辐射率的测量影响的灵敏度.

表 1 两种传感器响应时间内目标和下翻镀金板增温导致的比辐射率测量值的变化

Table 1 The changes in the emissivity measurements due to temperature rise of target and bottoming gold plating in two response time of sensors

地物名称	泡沫塑料		橡胶垫		薄铝板		大理石	
两种传感器响应时间目标增温	$\Delta T_{0.8s} = 0.90^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 3.60^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.51^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 2.05^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.05^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.22^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.03^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.19^\circ\text{C}$
两种传感器响应时间和下翻板增温	$\Delta T_{0.8s} = 0.06^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.22^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.06^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.22^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.06^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.22^\circ\text{C}$	$\Delta T_{0.8s} = 0.06^\circ\text{C}$	$\Delta T_{3.2s} = 0.22^\circ\text{C}$
不增温的 ε	0.95		0.90		0.26		0.85	
增温的 ε	0.94999	0.95001	0.90000	0.90012	0.26016	0.26000	0.85006	0.84999
增温导致的比辐射率变化值	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00012	0.00016	0.00000	0.00006	-0.00001

采用美国 MX4 红外测温仪作为传感器, 2000 年之前的产品, 传感器响应时间较长, 约为 3.2 s, 近期产品为 0.8 s. 在传感器响应时间里, 不同被测物体的增温幅度不一样. 因此进行温度补偿的关键步骤是准确确定传感器响应时间以及设置数据采集频率.

上文已经阐明, 被测目标和下翻镀金板在一定的热源面温度下的增温幅度是与其比辐射率、热惯量、主体腔内的空气温度等参数有复杂的函数关系, 最合理的获取途径是实际测量. 图 2 至图 5 为对 4 种被测目标和下翻镀金板在 95°C 的热源照射下, 环境空气温度为 25°C 时的增温随时间的变化过程. 忽略红外测温仪的测量随机误差, 被测物在 10 s 之内可以认为是随时间线性增温, 将被测目标的增温随时间变化过程作出线性回归方程. 从而可以更确切获取传感器响应时间内的增温值.

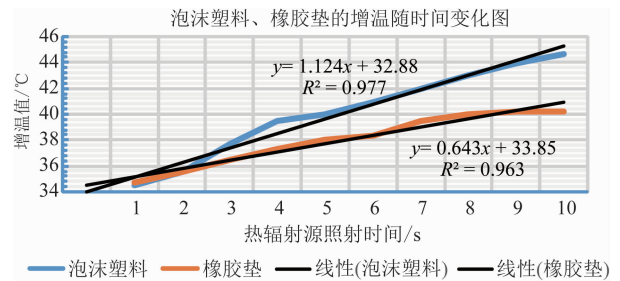


图 2 泡沫塑料板、橡胶垫的增温随时间变化图
Fig. 2 Temperatures increasing of the polyfoam and the rubber over time

被测目标和下翻镀金板在 95°C 的热源面温度照射下, 热源漫射面距离被测目标为 10 cm, 其增温幅度有上述图中线性回归方程确定, 根据式(9)计算出增温补偿的比辐射率值, 如表 1 所示.

从表 1 可知, 被测目标和下翻镀金板在 95°C 热源面温度照射下, 热源漫射面距离被测目标为 10 cm, 两种传感器响应时间内目标和下翻板增温导

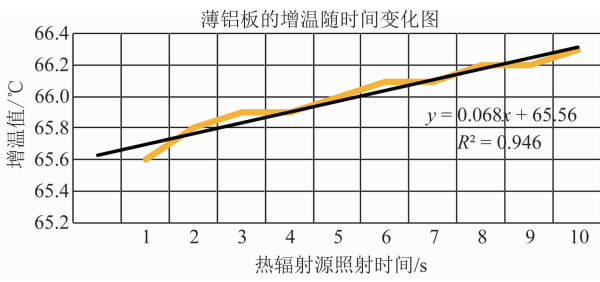


图3 薄铝板的增温随时间变化图
Fig.3 Temperatures increasing of the thin aluminum plate over time

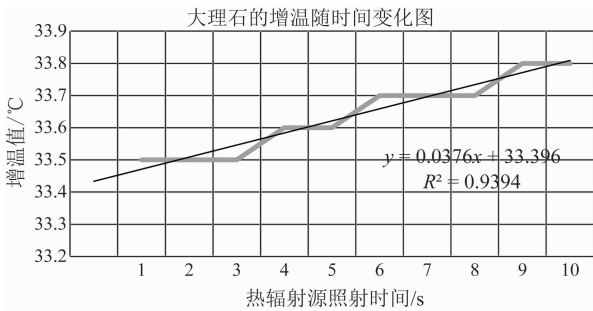


图4 大理石的增温随时间变化图
Fig.4 Temperatures increasing of the marble over time

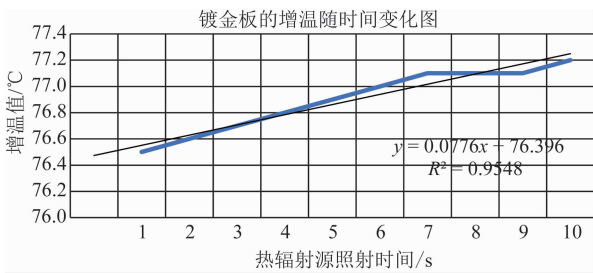


图5 镀金板的增温随时间变化图
Fig.5 Temperatures increasing of the gold plated block over time

致的比辐射率测量值的变化不大,运用本仪器在上述条件下,可以不进行温度补偿.

3 热环境照度下目标增温误差的可操作补偿算法

当目前四次测量法用于红外波谱辐射仪时,将会遇到被测目标在同一波长的冷热环境切换时间很长的场合.例如,对于102F傅里叶红外波谱仪,第一次从2到16 μm目标热出辐射度 $M(\lambda_{iu}, T_{iu})_{h1}$ 的扫描到第二次2到16 μm的目标的热出辐射度 $M(\lambda_{iu}, T_{iu} + \Delta T)_{h2}$ 的扫描,同波长两次测量时间间隔

约有30 s,是红外测温仪响应时间的10~40倍.在如此长的时间内,目标物的增温补偿应该考虑.

为了使四次测量法方法更加严谨,即使增温影响不大,也应该提出一种增温补偿方法供读者参考.消除热红外遥感工作者长期以来在非同温系统中温度变化造成比辐射率测量误差的担忧.

根据上述模拟表明,真实的目标增温值和下翻金板的增温只能依靠实际测量而得.首先分析传感器对数据的采集时间过程.被测物和下翻反射镀金板的增温过程是相似的,下面以被测目标为例,当高温热源板照射到被测物的瞬间,由于传感器存在响应时间,因此,被测物未增温时瞬间的温度 T_{s0} 不可能获取,只有到传感器的响应时间后,才能获取被测物的表面温度,称为 T_{s-res} .由于热源面和被测物面之间的温差,使得被测物开始增温,根据被测物表面热量平衡方程,被测物的热惯量、表面气流造成的显热通量等,其增温随着时间而增加,最终达到热量平衡.此时的表面温度为热平衡温度 T_{s-bal} .达到平衡温度 T_{s-bal} 的时间较长, T_{s-bal} 取决于很多因素,随时间呈现非线性变化.最主要的问题是非热源面导致的温度变化掺和进来,例如显热通量等的掺和,使方程更加复杂和病态.因此,平衡温度在快速测量中不宜采用.虽然 T_{s-res} 也受到上述因素的影响,但是时间短,可以近似认为从 T_{s0} 到 T_{s-res} 随时间是线性变化.因此在快速测量和增温补偿中采用 T_{s-res} .

下面提出一种消除被测目标物增温对比辐射率测量影响的可操作方法:称为“过程采集复原法”,简称“过程法”.以红外测温仪的传感器响应时间为例,“过程法”的要点如下:

- 1)设计红外测温仪自动采集的频率(或采集时间间隔)等于红外测温仪的响应时间.
- 2)被测物升温曲线应该随时间是指数函数,假设在1-4倍红外测温仪的响应时间内升温为线性函数.实验指出, MX4 型号红外测温仪实际响应时间内的增强与加热源—被测目标温差有关,温差越大实际增温也越大.

令, T_{s1} 为从改变环境瞬间到红外测温仪传感器响应时间的传感器第一个温度读数;

T_{s2} 为从改变环境瞬间到红外测温仪传感器响应2倍时间的传感器第二个温度读数;

ΔT_{s0-s1} 为从改变环境瞬间到红外测温仪传感器响应时间的被测物第一个增温值;

ΔT_{s1-s2} 为从改变环境瞬间到红外测温仪传感器响应时间的被测物第二个增温值.

T_{s0} 、 $T_{s0\text{-col}}$ 、 $T_{s0\text{-hot}}$ 分别为被测物真实表面温度、刚进入冷环境瞬间的被测物真实表面温度、刚进入热环境瞬间的被测物真实表面温度. 三者应该相等, 即

$$T_0 = T_{0\text{-col}} = T_{0\text{-hot}} \quad (10)$$

从改变环境瞬间到红外测温仪传感器响应 1 到 2 倍时间内分别有

$$T_{s1} = T_{s0} + \Delta T_{s0\text{-}s1} \quad (11)$$

$$T_{s2} = T_{s0} + \Delta T_{s0\text{-}s1} + \Delta T_{s1\text{-}s2} \quad (12)$$

运用 $2T_{s1}$ 减去 T_{s2} 后, 可以获取增温之前的被测物真实表面温度值, 下面关系式成立

$$2T_{s1} - T_{s2} = 2T_{s0} + 2\Delta T_{s0\text{-}s1} - T_{s0} - \Delta T_{s0\text{-}s1} - \Delta T_{s1\text{-}s2} = T_{s0} \quad (13)$$

$$Q_{\text{hot}} = \varepsilon B(2T_{s1} - T_{s2}) + (1 - \varepsilon)E_{\text{hot}}(T_{E\text{-hot}}) = \varepsilon B(T_{s0}) + (1 - \varepsilon)E_{\text{hot}}(T_{E\text{-hot}}) \quad (14)$$

式(3)与下式等价, 有

$$Q_{\text{col}} = \varepsilon B(T_{s0}) + (1 - \varepsilon)E_{\text{col}}(T_{E\text{-col}}) \quad (15)$$

式(14)与式(15)联立求解比辐射率, 获得严谨方程的解. 既补偿了非同温系统的被测目标的增温, 又解决了方程组的不闭合的病态问题. 同理, 下翻金板的增温补偿也可根据上述思路获得. 本文提出的过程法也适用于红外光谱仪, 仅需要将传感器响应时间改为对应曲线中每个波长重现间隔时间. 通过上述的增温补偿, 解决了在非同温系统中温度变化造成比辐射率测量误差的瓶颈问题, 消除热红外遥感工作者长期以来的在非同温系统中温度变化造成比辐射率测量误差的担忧.

4 方法的对比

由于文中列出的首先获取被测物体黑体温度进而获取比辐射率的方法(即第一种方法)是目前常用的比辐射率测量方法, 因此本文采用获取被测物黑体温度的两种方法, 即接触式点温计法和黑体罩测量被测物黑体温度与本文提出的二次照度四次测量法进行对比. 其原因是目前有不少遥感工作者仍采用接触式点温计测量被测物的黑体温度, 为了客观提醒其不确定性, 我们仍采用了接触式点温计的

方法进行对比. 黑体罩测量被测物黑体温度, 是由本团队设计的发明专利并已授权, 具体见专利说明^[36]. 用这两种方法测量得到被测物体的黑体温度后, 计算被测物体的比辐射率, 并与本文提出的二次照度四次测量法进行对比, 对比结果见表 2. 被测目标为泡沫塑料、光滑橡胶垫、薄铝板和大理石四种, 每次测量重复 5 次.

上述三种测量方法对比表明, 最差的是用接触式点温计测量黑体温度的方法, 其原因是黑体温度测量不准确, 加上环境下行辐射多变以及其它随机误差, 造成薄铝板比辐射率测量出现负值的错误结果. 其次是黑体罩测量被测物黑体温度的方法, 黑体温度的测量精度得到提高, 然而环境下行辐射测量仍存在一定的随机误差. 最好的是本文提出的二次照度四次测量法, 测量数据非常稳定. 其中就大理石(毛面)测量结果与计量局的标准值非常一致. 值得提及的优点是测量不受任何环境的干扰, 测量结果准确稳定, 测量速度非常快, 5~6 s 时间测量的比辐射率就直接在屏上显示出来, 无需对原始数据进行计算统计.

5 结论

1) 本文设计的冷、热辐射源(冷热环境)辐照度均是用置于相同位置的镀金板测量它们的反射值而获取的. 这种设计优点是能够测量到与实际照射到被测目标完全一致的热辐射源辐照度, 从而能够以二次热辐射照度的相减算法排除传感器镜头、腔壁等热辐射的干扰. 不仅提高了测量精度, 而且可以设计小尺寸便携式的比辐射率测定仪. 构成了一种二次照度四次测量的新型设计和方法.

2) 为了进一步提高四次测量法的比辐射率测量精度, 本文对热照度(热环境)与常温照度(与目标物接近等温环境, 与相对热环境对比可称冷环境)构成的四次测量法, 进行较深入的分析, 提出了考虑被测物在非同温系统中求解比辐射率的普适表达式; 开展了由于目标和下翻金板的增温而影响目

表 2 三种比辐射率测量方法对四种地物的比辐射率测量结果对比

Table 2 Comparison of Three Emissivity Measurement Methods for Four Kinds of objects

地物名称	泡沫塑料			光滑橡胶垫			薄铝板			大理石		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ε 测量方法	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
$\bar{\varepsilon}$ 平均值	0.950	0.943	1.063	0.901	0.916	0.986	0.260	0.310	-0.532	0.850	0.875	0.785
ε 标准差	0.000	0.038	0.037	0.000	0.018	0.033	0.001	0.045	0.172	0.000	0.021	0.020
测量时间 s	≈5	≥120	≥60	≈5	≥120	≥30	≈5	≥120	≥30	≈5	≥120	≥30
计算时间 s	0	≥600	≥600	0	≥600	≥600	0	≥600	≥600	0	≥600	≥600

注: A 为本文提出的二次照度四次测量法, B 为黑体罩测量黑体温度的方法, C 为接触式点温计测量黑体温度的方法。

标比辐射率测量精度的灵敏度试验。

3)通过灵敏度试验表明:被测目标和下翻镀金板距离热源面为 10 cm,并在 95 °C 热源面,即有 1 040 w/m²的强热辐射源照射下,0.8 s 和 3.2 s 两种传感器响应时间内,目标和下翻板的增温 1°C 仅增加 6 w/m²,增温 3°C 增加 18 w/m²,导致的比辐射率测量值的变化不大,本仪器在上述条件下,可以不进行温度补偿。

4)运用 1 040 w/m² 的强热辐射源照射源的另一优点,可以使得温度传感器的测量误差和随机噪音对于比辐射率测量的精度的影响无足轻重。实践表明,本设计的精度和稳定度均优于较低热辐射源照射源的设计。

5)为了本仪器的方法能够普适于红外波谱辐射仪的冷热辐射源切换时间更长的场合,并使四次测量法方法更加严谨,提出了一种增温补偿的“过程法”供读者参考。

6)四种物体的三种比辐射率测量方法的测量结果对比表明,本文提出的方法优于其它两种方法。

References

- [1] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scale; definition, measurement and related [J]. *Remote Sensing Review*, 1995, **12**:225 - 253.
- [2] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1987, **8**(10):1509 - 1522.
- [3] Li Z L, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **43**:67 - 85.
- [4] ZHANG Ren-Hua. *Quantitative thermal infrared remote sensing and ground experimental basis* [M]. Science Press (张仁华. 定量热红外遥感及地面实验基础, 科学出版社), 2009.
- [5] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA7/ AVHRR [J]. *Geophys. Res.*, 1984, **89**:7231 - 7237.
- [6] Becker F, Li Z L. Temperature - independent spectral indices in thermal infrared bands[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **32**:17 - 33.
- [7] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity [J]. *Remote Sens Environ.*, 1992, **42**:113 - 116.
- [8] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal multispectral scanner data; Implications for recovering land surface temperatures[J]. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, 1993, **31**(6):1155 - 1164.
- [9] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, **34**:892 - 905.
- [10] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, 1997, **35**(4):980 - 996.
- [11] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T. et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**:1113 - 1126.
- [12] Li Z L, Becker F, Stoll M. P. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **69**:197 - 214.
- [13] Chen H Y, Chen C H. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **126**:130 - 137.
- [14] Sakata K, Watanabe Y, Okada J T, et al. FT-IR emissivity measurements of Nb melt using an electrostatic levitation furnace[J]. *J. Chem. Thermodynamics*, 2015, **91**:116 - 120.
- [15] Mazikowski A, Chrzanowski K. Non-contact multiband method for emissivity measurement[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**:91 - 99.
- [16] Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(10):1679.
- [17] Sutton O G. *Micrometeorology* [M]. McGraw-Hill Press. London UK. 徐尔灏, 吴和庚译.
- [18] Cuenca J, Sobrino J. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23), **10**:4598 - 4602.
- [19] Leire del Campo, Pérez-Sáez A, Esquisabel X, et al. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(11):367.
- [20] Riou O, Guiheneuf V, Delalex F, et al. Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials [J]. *Measurement*, 2016, **89**:239 - 251.
- [21] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究, *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(5):373 - 378.
- [22] SHEN Bin, YAN Guang-Jian, FENG Xue, et al. A comparison study on the field measurement methods of thermal infrared spectral emissivity [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (沈斌, 阎广建, 冯雪, 等. 热红外比辐射率光谱野外测量方法的对比研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*) 2007, **43**(3):264 - 268.
- [23] ZHANG Ren-Hua. A preliminary study on non-closed measurements of emissivity [J]. *Science Bulletin*, (张仁华. 比辐射率的非封闭测定法初步探讨. *科学通报*) 1981, **26**(23):1444 - 1447.
- [24] Chen J M, Zhang R H. Studies on the measurements of crop emissivity and sky temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **49**:23 - 34.
- [25] Zhang R H. Emissivity measurements for long distance using CO₂ laser [J]. *Science Bulletin*, 1985, **23**:1814 - 1818.