

·测试、试验与仿真·

基于曲线拟合的红外成像测温定标方法研究

官上洪¹, 杨海波¹, 邵 铭², 刘小虎²

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 分析了红外热像仪测温幂指数曲线拟合与三次样条插值辐射定标方法。利用高精度控温面源黑体对典型中波红外热像仪进行辐射定标, 获取了黑体温度与输出电压信号的准确关系。对定标实验数据进行幂指数最小二乘拟合、三次样条插值处理, 并比较了两种处理方法的测温误差, 结果表明, 随着定标点增加两种拟合方式获得的测温误差均逐渐下降; 在整个测温范围内采用3温度点定标时, 幂指数最小二乘拟合法能获得更高的测温精度; 在测温范围内以温度间隔均匀分布比灰度间隔均匀分布的3定标点能获得更高的测温精度, 该种定标方法的测温精度能达到0.1 K, 是热像仪较为理想的一种快速准确测温定标方法。

关键词: 红外测温; 红外辐射定标; 幂指数曲线拟合; 三次样条插值

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0049-06

Research on Calibration Method of Infrared Imaging Temperature Measurement Based on Curve Fitting

GUAN Shang-hong¹, YANG Hai-bo¹, SHAO Ming², LIU Xiao-hu²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China;

2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: The methods of temperature measurement power exponent curve fitting and cubic spline interpolation radiation calibration of an infrared thermal imager are analyzed. The radiation calibration of a typical middle wave (MW) infrared thermal imager is carried out by using a high accuracy temperature control surface source blackbody to obtain the correct relationship between the blackbody temperature and the output voltage signal. The power exponent the least square fitting and cubic spline interpolation are performed on the calibration experimental data, and the temperature measurement error of the two methods are compared. The result shows that the temperature measurement errors of the two fitting methods decrease gradually with increasing of fixed punctuations. The power exponent least square method can obtain higher temperature measurement accuracy when three temperature points are used in the range of temperature measurement. In the range of temperature measurement, the 3-points punctuation with uniform distribution of temperature interval can obtain higher accuracy temperature measurement than that of uniform distribution of gray interval. The temperature measurement accuracy of this calibration method can reach 0.1 K, which is an ideal, fast and accurate temperature measurement method for thermal imager.

Key words: infrared temperature measurement; infrared radiation calibration; power exponent curve fitting; cubic spline interpolation

随着红外技术及红外探测器件的进步和发展, 非接触式红外测温被广泛应用在冶炼、电力、勘测、科研、医疗等领域。红外成像测温技术^[1-6]具有测温

速度快、测温面积大、空间及温度分辨率高等优点, 是一种常用的非接触式测温手段。目前, 国内外的很多专家和学者已对红外测温精度的影响因素^[7,8,13]

收稿日期: 2018-07-13

作者简介: 官上洪(1984-), 男, 学士, 高级工程师, 从事光电探测相关方向研究工作。

进行了广泛地分析和讨论,对红外测温定标方法也进行了大量研究^[9,11-16]。由于对红外成像测温精度影响因素有目标温度、目标发射率、目标反射率、目标距离、大气透过率、大气温度、环境辐射等参数,被测物体的发射率及大气透过率等因素都有相应手段准确获取但都比较复杂,对于精确测温时环境辐射与探测设备响应漂移及探测器内部辐射等因素也将影响精确测温^[6],为了减小环境辐射及探测设备自身响应漂移^[7]及内部辐射最好的解决办法是在外场测量时短时间内快速定标。考虑到外场定标的可操作性,要求在短时间快速定标,因此采用黑体定标时的温度点要尽量少。

以幂指数最小二乘拟合、3次样条插值两种定标数据处理方法进行了分析,结合黑体温度定标实验结果,比较了两种方法在不同定标温度点数时的测温精度。结果表明,利用三个温度定标点时采用幂指数拟合方式可以获得更好测温精度,能满足外场快速准确温度定标的要求。

1 红外成像测温定标方法

辐射定标的目的是确立红外热像仪像元响应输出信号与目标辐射能量之间的对应关系。对于红外测温定标,主要是确立红外探测器输出信号与目标温度之间的确切关系,输出信号可以用 $f(T)$ 表示。由于被测物体真实温度分布可能连续分布,而定标过程中通常只对其中有限非连续温度点进行数据定标,通过对有限的标定点采用最小二乘拟合或插值方法进行数据处理便可以准确获取被测物体的辐射温度^[11]。对于曲线拟合需要找到适合于黑体温度和输出电压的拟合函数进行最小二乘拟合,对于插值可以采用工程上常用的3次样条插值。

(1) 基于幂指数函数^[13]的最小二乘拟合

根据斯蒂芬—波尔兹曼定律^[10]可知:黑体全辐射度 M_{bb} 与黑体温度 T 满足 $M_{\text{bb}} = \sigma T^4$, σ 为常数,取 $(5.669\ 7 \pm 0.002\ 9) \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, T 为黑体绝对温度。斯蒂芬—波尔兹曼定律是全谱段辐射出射度积分结果,热像仪等红外探测器具有一定的工作波段,上述公式将不再适用,但在一定温度范围内任意波段范围的黑体辐射度积分结果仍可按该类形式表达^[11,3,6]为

$$M_{\lambda_1\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(T)d\lambda = bT^n \quad (1)$$

图1为一定温度范围内不同波段黑体辐射出射度按照式(1)拟合的结果。

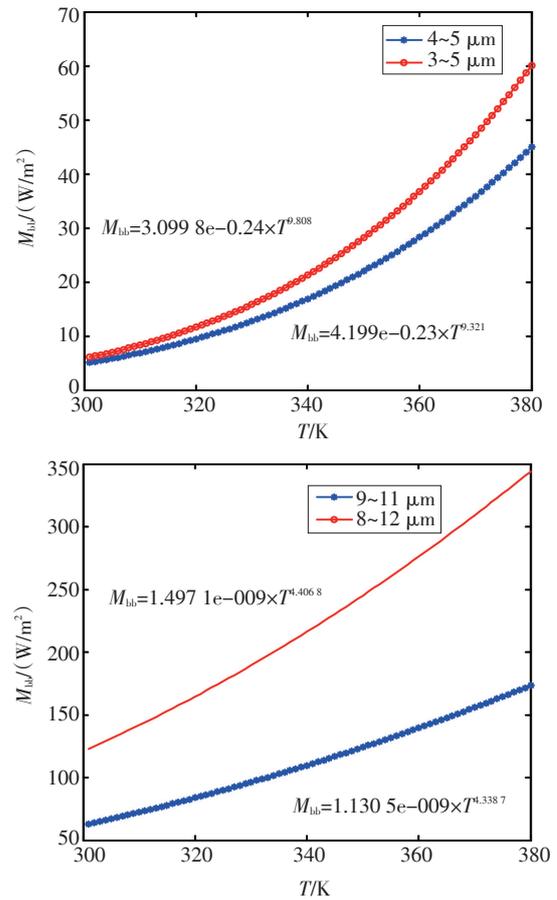


图1 红外辐射出射度按幂指数拟合结果

可以看出,不同波段的黑体辐射出射度积分仍然满足幂指数变化规律,但不同波段幂指数拟合的参数 n 差别较大。

红外传感器将红外辐射能量转换成电压信号,由于光电红外传感器响应时具有波长选择性并考虑传感器响应时的自身偏置,则传感器输出电压信号与黑体温度的关系按照幂函数规律可表示为

$$f(T) = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(T, \lambda) R(\lambda) d\lambda + a = a + bT^n \quad (2)$$

由于式(2)中含有3个未知参数,要想获得准确的 $f(T)$ 曲线,至少需要三个温度点进行定标。其中, $L(T, \lambda)$ 、 $R(\lambda)$ 分别为到达探测器的温度为 T 的黑体辐射功率和探测器的响应系数。

焦平面红外热像仪通常为能量响应器件,在线性响应范围内其响应输出电压信号除与红外辐射功率有关外还与探测器积分时间成正比,因此,热

像仪积分时间不同时输出电压信号和黑体温度 T 之间的函数 $f(T)$ 将不同。

(2) 基于3次样条插值的函数拟合

样条插值是使用一种称为样条的分段多项式在一定区间进行插值并获得函数。由于样条插值可以使用低阶多项式来实现较小的插值误差,因此样条插值作为一种重要的曲线拟合方法而在工程应用中被大量使用。

3次样条插值作为一种常用的插值方法,该方法能获得一条通过多个型值点 x_j 的光滑曲线。假设函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上的型值点 x_0, x_1, \dots, x_n 处的函数值分别为: $f(x_j) = y_j, j = 0, 1, 2, \dots, n$, 关于型值点集合的三次样条函数 $S(x)$ 满足以下插值条件: ①在区间 $[a, b]$ 上 $S(x_j) = y_j, j = 0, 1, 2, \dots, n$; ② $S(x_j)$ 在 $[a, b]$ 区间上具有连续二阶导数; ③ $S(x_j)$ 在每个子区间 $[x_{j-1}, x_j]$ 上均是三次多项式, 可表示为 $S(x_j) = a_j x_j^3 + b_j x_j^2 + c_j x_j + d_j$ 。

由于红外热像仪输出电压信号与黑体辐射温度之间的关系曲线较为平滑, 满足3次样条插值的基本条件, 可以按照3次样条插值对标定实验数据进行拟合, 可以利用 MATLAB 软件中3次样条插值函数 `spline` 对标定数据进行处理。

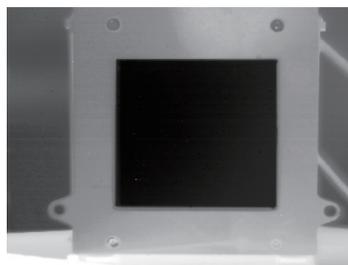
2 红外定标实验及数据处理

2.1 实验简介

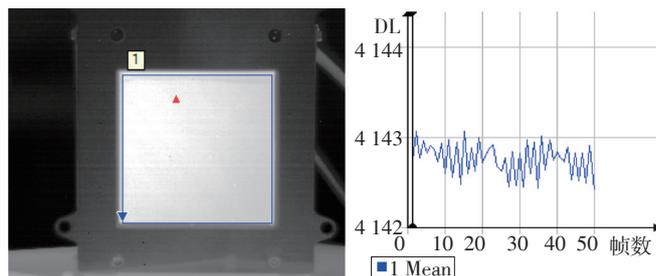
采用 FLIR 公司 SC7300-M 中波红外热像仪进行测温定标实验, 热像仪主要参数如下: 工作波段: $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 像元数: 320×256 , 光学系统焦距: 100 mm , $F/\#$: 2, 热像仪信号: 14 bit 数字信号。定标黑体采用 IN-FRAMET 公司 BB1707 面源黑体, 辐射尺寸: $100 \times 100 \text{ mm}$, 温度范围: $-10 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 控温精度: $0.005 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

定标实验开始前, 先调整光学系统焦距使热像仪对面源黑体清晰成像, 再对热像仪进行两点非均匀校正, 获取校正后的输出图像。面源黑体与热像仪之间的距离约为 2.3 m , 定标过程中热像仪获得的黑体图像如图 2a 所示。

实验中红外热像仪积分时间分别设定为 1.5 ms 、 2 ms 、 2.5 ms 、 3 ms , 通过调整黑体的温度, 分别记录下不同积分时间下热像仪的 50 帧数字视频, 并将黑体区域内的 50 帧数字电平均值记为 DL, 如图 2b。



(a) 低温面源黑体图像



(b) 黑体区域数字电压与帧数的关系

图2 热像仪采集黑体图像

考虑到热像仪的线性工作范围, 定标实验中通过调整黑体的温度使热像仪输出电平值始终处于 $2500 \sim 13000$ 之间。为了便于比较定标结果与真实结果之间的偏差, 需要对黑体温度与输出电平值进行高精度的采样, 实验中采样黑体温度连续变化, 热像仪输出连续记录的方式实现, 如图 3 所示。

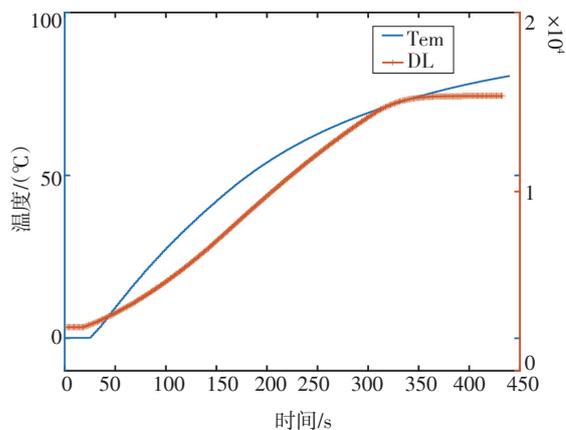


图3 连续变化黑体温度与热像仪输出信号之间关系

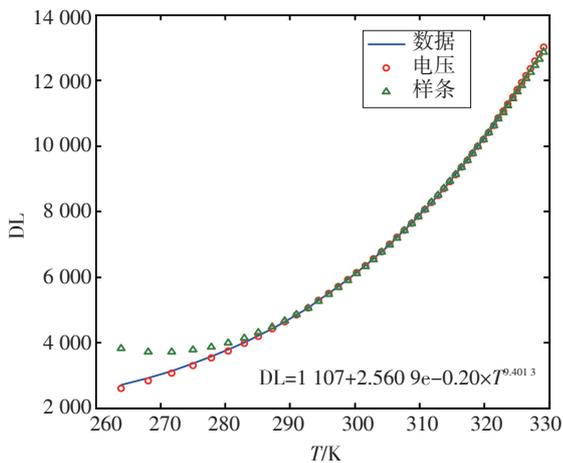
2.2 数据处理

从实验中获取的黑体温度 T 与输出电压信号 DL 之间的关系曲线(图 3)中取出少数数据点作为

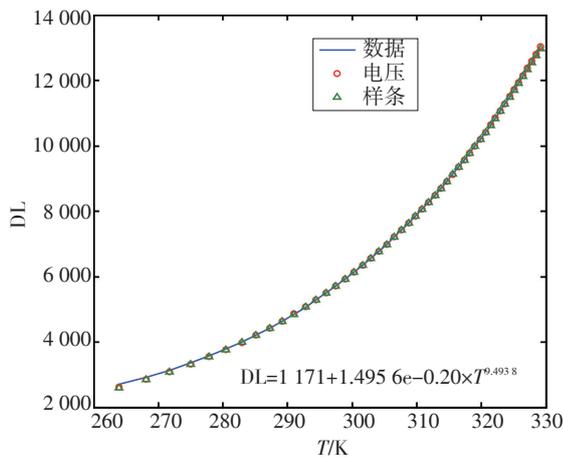
定标拟合的数据点进行幂指数最小二乘拟合和3次样条插值,比较两种数据处理方法下的测温精度。

(1)以电压信号DL均分选取定标点

本次实验定标选取定标点数量最少为3个,以电压信号DL在动态范围内(2 500~13 000)均分方式进行标定点选取,比较不同定标点个数下幂函数最小二乘拟合和3次样条插值的测温精度。图4为红外热像仪在积分时间2.5 ms时的输出电平与温度之间的关系及定标点数为3和4时的幂指数拟合和样条插值拟合结果。



(a)3点定标



(b)4点定标

图4 热像仪输出电平与温度之间的关系及定标结果

可以看出,3定标点时幂指数拟合比3次样条插值的准确度更高;定标点个数越多,拟合或插值结果准确度越高。

为了准确量化比较拟合或插值定标方法的精度,需构建以测量温度误差 δT 为目标函数的评价

方法。从真实黑体温度与电压信号数据中可求出该热像仪的温度分辨率 $\frac{dT}{dDL}$,结合最小二乘拟合或插值获得的灰度结果与真实灰度结果的电压信号差 δDL ,计算出不同温度处的定标温度误差函数 δT ,温度误差函数可以表示为

$$\delta T = \frac{dT}{dDL} \times \delta DL \quad (3)$$

图5为积分时间1.5 ms时不同定标方法在不同定标点下的温度误差与温度之间的关系。

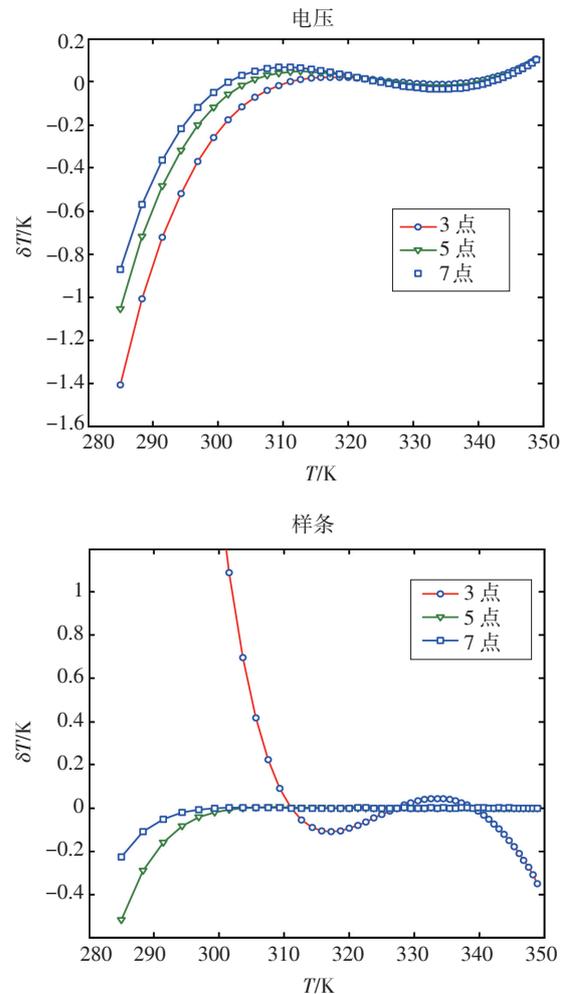


图5 不同温度范围两种定标方法的误差对比

可以看出,随着定标点个数的增加,两种定标数据处理方法获得的温度误差 δT 均逐渐下降;当定标温度点为3个时,幂指数拟合能获得比3次样条插值更低的最大温度误差;大于等于5个时,3次样条插值能获得比幂指数拟合更低的最大温度误差;在进行幂指数拟合时测量温度与温度分辨率成正比,在高温范围比低温范围的测温精度高,导致

低温部分的测温误差较大。

在进行测温定标时,除考虑最大测温误差 δT_{\max} 外,还应考虑在整个测温范围内的均方温度误差 δT_{RMS} ,图6为不同积分时间不同定标点个数下两种方法获得的温度均方误差结果对比。

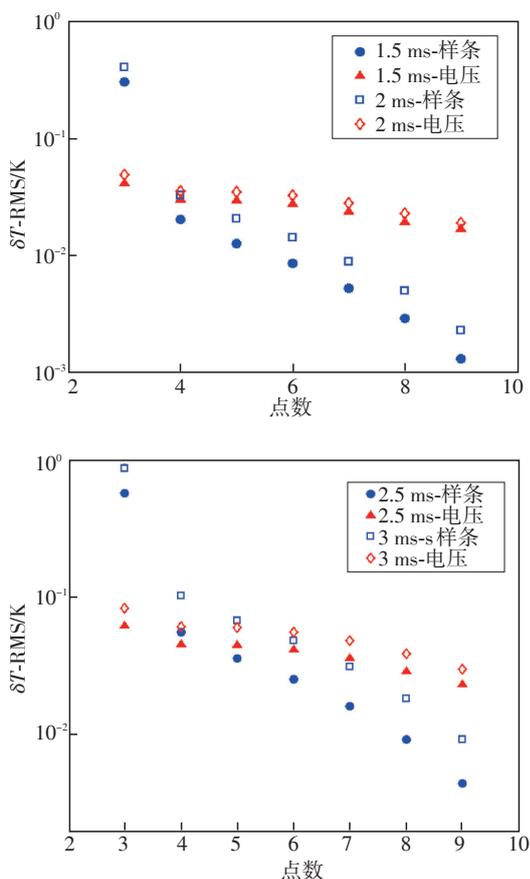


图6 不同定标温度点下两种方法的测温误差

在积分时间分别为 1.5 ms、2 ms、2.5 ms、3 ms 下,该中波红外热像仪测量温度范围均大于 60 °C,从图6可以看出,定标温度点个数小于4时,幂指数拟合优于3次样条插值;温度点个数大于4时,3次样条插值优于幂指数拟合;采用3个温度点进行幂指数拟合可以获得测温均方误差0.1 K的精度;随着点数的增加,3次样条插值的均方误差迅速下降,而指数拟合的温度均方误差仅略有下降且趋于稳定。

考虑到温度定标尤其是外场测试环境下的可操作性定标温度点越少越好,因此采用三温度点进行幂指数曲线拟合定标是比较理想的方案。

(2)以温度均分选取定标点

由于采用灰度值均匀分布的3定标点时,幂指数拟合的测温误差中在低温区间的误差较大,可以在定标温度点的选取上进行调整,对三温度定标点按照温度范围内均匀分布进行选取可以进一步提高测温精度,图7为3定标点幂指数拟合时采用灰度值均匀分布与温度点均匀分布时误差结果对比。

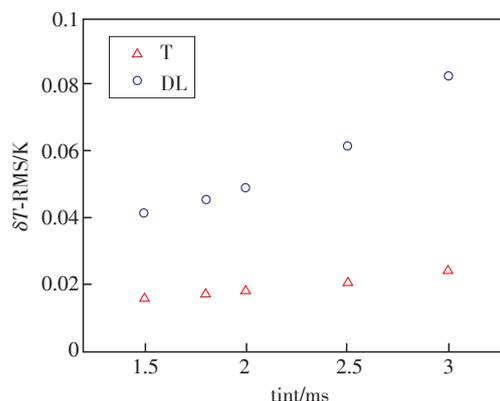


图7 灰度均匀与温度均匀分布三点拟合结果对比

可以看出,采用3点幂指数拟合时,选择温度均匀分布比灰度均匀分布造成的测温均方误差更小。因此,可以在实际外场定标过程中可以选择3点温度均匀分布幂指数拟合方式进行定标是最佳方案。

3 结论

对中波红外热像仪进行了常温全动态范围的定标,通过对比幂指数拟合与3次样条插值两种定标数据处理方法下红外热像仪的测温误差,研究结果发现:①采用幂指数最小二乘拟合与3次样条插值定标方法均可以使红外热像仪的测温精度达到0.1 K;②选择3个定标温度点(灰度电平均分),采用幂指数拟合比3次样条插值法能获得更高的测温精度;③当定标温度点大于等于5个时,采用3次样条插值法能获得比幂指数拟合更小的测温误差;④采用三温度点幂指数拟合定标时,选取以温度均分比灰度电平均分的定标点具有更高的测温精度。因此,采用测温范围内温度均分的3定标温度点进行幂指数乘拟合是快速精确定标的最佳方案。

参考文献

- [1] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999(4): 21-23.
- [2] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1337-1339.
- [3] 张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 420-422.
- [4] 杨立, 寇蔚, 刘慧开, 等. 热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 43-45.
- [5] 胡剑虹, 宁飞, 沈湘衡, 等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 152-156.
- [6] 孙志远, 王晶, 乔彦峰. 环境中波红外探测器测温精度的影响[J]. 中国光学, 2010, 3(6): 659-664.
- [7] 孙志远, 朱玮, 乔彦峰. 红外测温过程中灰度值漂移的修正[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 391-396.
- [8] 陆子凤, 潘玉龙, 王学进, 等. 目标到测试系统距离对红外测温精度的影响[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 271-276.
- [9] 李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [10] 张正辉, 魏宇飞. 红外成像系统测试与评价[M]. 红外与激光工程(编辑部). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 海啸, 朱志杰. 最小二乘法和三次样条曲线拟合的比色测温误差修正对比分析[J]. 激光杂志, 2015, 36(6): 72-76.
- [12] 修金利, 金伟其, 刘崇亮, 等. 应用U形边框黑体光阑的三点辐射定标校正方法及其分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2313-2318.
- [13] 程丽鹏, 张猛, 王高, 等. 长波红外探测器的辐射定标[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 195-198.
- [14] 李冰, 李响, 魏臻. 实时定标红外测温法测量海水表面温度[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(2): 66-69.
- [15] CAO Xi-zheng, GUO Li-hong, LI Zhuo. Infrared radiation measurement of the aerial target based on temperature calibration and target images[J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(6): 463-467.
- [16] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 150-155.

(上接第5页)

3.3 膜层环境适应性

测试项目: 恒定湿热、盐雾、低温

测试依据: GB/T2423.3、GB/T2423.17、GB/T2423.1

测试结论: 光谱曲线无变化, 满足了膜层的环境适应性。

4 结论

化学稳定性很好的光学玻璃基底采用布儒斯特角制备的偏振分光棱镜偏振分光带宽较窄, 更换光学玻璃后, 光学玻璃的化学稳定性变差, 选用的匹配膜料多为氟化物、硫化物软膜, 在实际制备这种宽带偏振分光膜时, 容易基底变质、表面路子等疵病, 以及膜层应力不匹配而发生膜裂等现象; 运用干涉截止滤光片膜系结构补偿布儒斯特角的偏振分光膜带宽, 则使用氧化膜料膜实现了在化学稳定性好的光学玻璃基底上宽带偏振分光膜的制备, 氧化物膜料抗磨强度明显优于氟化物膜料, 而且膜料应力匹配, 不出现膜裂现象。同时, 布儒斯特角角度适应范围小, 光线偏离布儒斯特角则出现“孔洞效应”, 偏振分光效果变差, 而干涉截止滤光片结

构补偿优化设计则可以大幅度改善上述情况。

参考文献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 484-542.
- [2] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学、像差、光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 102-156.
- [3] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990: 34-120.
- [4] 李建芳, 周言敏, 王君. 光学薄膜制备技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 40-54.
- [5] Macleod H A. Thin-film optical filter[M]. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001: 18-198.
- [6] Eckertova L. Physics of Thin Films[M]. Prague: Plenum Publishing Corporation and SNTL, 1986: 18-198.
- [7] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 118-188.
- [8] 钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001: 42-128.
- [9] 李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 台湾: 艺轩图书出版社, 2016: 188-286.
- [10] Thelen A. Design of Optical Interference Coatings[M]. McGraw-Hill Book Company, 1988: 22-98.