

低温红外目标源控温技术

王超, 胡忠辉

(哈尔滨工业大学 空间光学研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 低温红外目标源是测试和标定低温红外传感器的响应线性度和非均匀性的关键测试设备。对所研制的低温红外目标源设备的工作原理进行了论述, 同时基于有限元分析方法, 以 ANSYS 软件为载体对黑体面源控温方式及温度场分布进行模拟分析, 并进行了测温实验。结果表明: 所研制的低温红外目标源结构设计合理, 仿真温度场与实测温度场分布规律一致, 控温精度不大于 0.5 K, 黑体面源温度分布均匀, 表面温差 ≤ 0.2 K, 稳定性好(≤ 0.1 K/min), 可以满足低温红外系统的测试和检定要求。

关键词: 低温目标源; 黑体; 控温; 传热分析

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0827-05

Temperature control technology of cryogenic infrared target source

Wang Chao, Hu Zhonghui

(Space Optical Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to correct the response linearity and non uniformity of infrared sensor, variable temperature and cryogenic infrared target device was developed. The working principle of the developed infrared target device which temperature was variable and cryogenic was discussed. The temperature control system of the blackbody source was analyzed by temperature field simulation based on finite element method in ANSYS software and temperature measurement experiment. The analysis and experimental results show that the cryogenic infrared target device developed is reasonable, and the distribution of simulated temperature field and measured temperature field is consistent, and temperature control precision(≤ 0.5 K) and stability(≤ 0.2 K) are high, and temperature distribution of the blackbody source is even(≤ 0.1 K/min). And the system can meet the test and verification requirement of cryogenic infrared system.

Key words: cryogenic target source; blackbody; temperature control; heat transfer analysis

收稿日期: 2014-07-17; 修订日期: 2014-08-19

作者简介: 王超(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计、低温光学方面的研究。Email: 6288400wang@163.com

导师简介: 胡忠辉(1960-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学加工、低温光学方面的研究。Email: ketai@sina.com

0 引言

红外技术和产品在国防、航天、医疗、环境工程、资源勘探等各个领域的应用已日益广泛^[1-3]。特别是航天领域中的光学探测系统目前采用的主要是红外光学系统。因此,红外传感器性能的好坏直接影响了太空探测中的信号采集及处理能力。为了测试和标定传感器的性能,确定探测器在工作温度范围内的输出信号与标准辐射源之间的函数关系,并将探测系统飞行过程中获取的目标信息反演得到该目标的光谱反射特性和光谱辐射特性,必须应用具有模拟空间红外辐射源的低温黑体目标源对其线性响应度和非均匀性进行定标校正^[4]。

红外传感器的定标方法主要有点源法和面源法,其中,点源法采用开孔的空腔型黑体,该类型黑体一般用于高温段红外传感器的定标,而低温定标常采用面源黑体,该面源黑体表面为涂黑的蜂窝空腔列阵结构或 V 型槽等结构以提高黑体表面发射率。点源法定标精度可达 1% 以内,而面源法定标精度为 5% 左右。虽然面源法精度较点源法低,但是该方法结构简单,易于制作,节省费用^[5]。

目前研制成熟的低温黑体目标源一般仅能达到 220 K 的低温^[6],文中介绍的可变温低温红外目标源可以达到 80~300 K 的宽温区的温控范围,为红外传感器在低温环境中的探测提供了定标的基准,提高了探测器在空间工作的精确性,为红外探测器的研制和应用提供了可靠的技术质量保证。

文中论述的用于传感器校正试验的设备为可变温低温红外目标源系统。该设备的核心部件是低温面源黑体,大小为 150 mm×150 mm。为了提高该面源黑体的发射率及消除杂散光影响,其表面均匀分布有 18° 角的四棱锥结构,并涂有低温黑体漆。该装置的温控范围为 80~300 K,控温精度 ≤ 0.5 K,工作区域温度均匀性温度 ≤ 0.2 K,稳定性优于 0.2 K/min,具有可靠的控温精度和温度稳定性。

1 低温红外目标源系统组成

根据技术性能指标要求设计的低温红外目标源系统的结构原理如图 1 所示。该装置温控范围为 80~300 K,黑体表面温度场分布均匀(≤ 0.2 K),控温精

度 ≤ 0.5 K,且需要有极好的温度稳定性(≤ 0.1 K/min)。系统主要由低温目标源系统、测温控温系统、真空系统三部分组成。

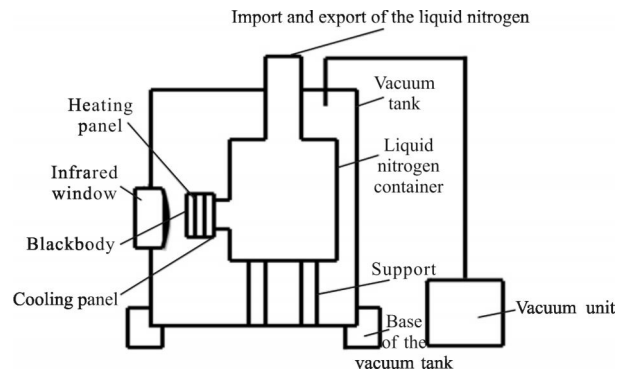


图 1 低温红外目标源系统结构简图

Fig.1 Structure sketch of the cryogenic infrared target

1.1 低温目标源系统

作为低温目标源系统的关键和核心,该结构主要由低温面源黑体、加热板、制冷板和液氮罐等组成。制冷板为黑体面源提供均匀制冷冷源,为了获得 ≤ 80 K 的低温均温效果,系统采用液氮 (77 K) 大面积直冷式制冷方式。加热板为黑体面源提供均匀加热热源,为此在加热板中均匀布满电阻加热棒。黑体面源在制冷板和加热板的共同作用下,通过调节加热功率(热源)来实现黑体面源的调温和控温,而在不同温度下的辐射透过红外窗口传递到红外传感器,对红外传感器进行定标校正。为保证黑体面源具有较好的温度均匀性及较高的传热效率,上述零件均采用热传导率较高的无氧铜材料制作。

为保证黑体面源具有较高的发射率和较好地消除杂散光的影响,黑体面源表面加工成 18° 角的四棱锥结构,并涂覆了高发射率的低温黑体漆。

为防止液氮罐低温传导到真空罐而导致漏热现象发生,应避免液氮罐直接与真空罐接触。为此,液氮罐一般可采用吊挂式或楔形脚架支撑方式进行安装。文中所设计的装置系采用绝热材料制作的楔形脚架支撑进行安装固定。

1.2 测温控温系统

测温控温系统是低温目标源系统能够精确、稳定工作的关键^[7]。

为了能够精确地测量黑体面源的温度,选用经过筛选的 Pt100 测温电阻作为测温传感器,且测温

传感器应尽可能安装在距离黑体表面最近的位置。

为了稳定地控制黑体面源的温度,选用高精度智能控温仪表进行控温,由于黑体面源的中心区域和边缘区域温度分布不均匀,必须对这两个区域单独进行温度控制。

1.3 真空系统

文中设计的低温红外目标源的工作温度范围为80~300 K,且主要用在低温下工作,在室温环境中极易产生结露结霜现象,造成系统无法正常工作。

低温目标源系统放置在带有红外窗口的真空容器内,一方面,保证低温目标源系统置于真空无水分子的环境中,黑体面源无法产生结露结霜现象;同时,真空环境可以避免真空罐内的低温传递到真空罐表面,从而避免红外窗口内外表面产生大的温差,防止红外窗口产生结露结霜现象,确保系统在低温下能够正常工作。

2 低温黑体面源控温方式及温度场

2.1 低温红外目标源控温原理

图2为低温红外目标源控温系统原理图。为了使黑体面源获得80~300 K之间的任意温度,并具有较高的传热效率和均匀的温度分布,应同时对其传输热源和冷源。工作时,在真空罐达到真空度要求后,首先向液氮罐中注入液氮,使整个系统冷却降温,待系统温度降至液氮温度77 K时,再将液氮罐

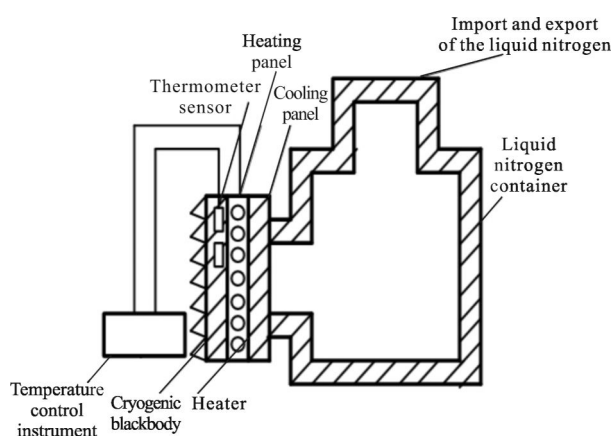


图2 控温系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of temperature control system

充满液氮,保证黑体面源始终有冷源存在,此时设定工作温度,然后启动控温仪表,加热棒进行加热,针对不同的温度控温系统给予不同的加热功率,当

温度升至设定的工作温度时,控温系统使加热棒功率维持在该值下,此时,红外黑体面源同时有冷源和热源输入,制冷量与加热量达到平衡,使黑体温度能够保持在设定的目标温度下。

2.2 低温黑体控温功率分析

黑体维持在不同的温度下需要加载不同的加热功率,为了更好地了解不同的工作温度所需要的加热功率以及在系统设计过程中所要加载的总功率,对不同温度下需要加载的加热功率进行了计算和分析。

黑体升温过程中,存在两种热交换:(1)黑体表面与真空容器上的红外窗口之间辐射换热;(2)黑体与加热板之间的热传导。

首先分析黑体表面与红外窗口之间的辐射换热。虽然面源黑体置于真空罐体中,理论上黑体表面能够与真空容器内表面发生辐射换热,但是考虑到黑体面源与红外窗口的距离较近,模型简化为黑体面源与红外窗口之间的辐射换热。两表面间的辐射换热量由下式计算^[5]:

$$\Phi_{1,2} = X_{1,2} \varepsilon_s A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

式中: $X_{1,2}$ 为黑体表面与红外窗口之间的角系数,根据系统结构计算得到该值为0.72; ε_s 为系统发射率,一般为0.91; A_1 为黑体表面面积,大小为150 mm×150 mm; T_1 和 T_2 分别为红外窗口与黑体的温度,其中红外窗口温度 T_1 约为室温300 K。

当黑体温度分别取为100 K、200 K、300 K时,计算得到黑体表面与红外窗口的辐射换热量分别为6.61 W、5.37 W、0.09 W。该辐射量值和黑体与加热板之间的热传导热量相比很小,可以忽略。

当黑体处于热平衡状态时,忽略加热板内部的温度梯度,同时认为黑体与加热板温度相同。此热平衡状态下,加热板与制冷板之间的热传导量,即控温状态下的加热功率,等于制冷板与液氮之间的对流换热热量。设制冷板与液氮接触表面一侧的温度为 T_3 ,并已知加热板的温度为 T_2 ,则加热板与制冷板之间的传热量由下式计算^[8]:

$$\Phi_2 = \frac{\lambda}{\delta} A (T_2 - T_3) \quad (2)$$

式中: A 为黑体表面面积,大小为150 mm×150 mm; λ 为无氧铜的导热系数,为计算简便取其大小为400 W/(m·K); δ 为制冷板厚度,为6 mm。

制冷板与液氮对流换热的热量由牛顿公式计算^[5]:

$$\Phi_3 = A_0 h (T_3 - T_{\text{液氮}}) \quad (3)$$

式中： h 为无氧铜板与液氮的对流换热系数，该值随温度及表面粗糙度等因素的变化差异较大，在此取其中值 $1500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； A_0 为制冷板与液氮的接触面积， $A_0 = \pi r^2 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ； $T_{\text{液氮}}$ 为 77 K 。

根据上述假设，加热板与制冷板之间的换热量和制冷板与液氮之间的对流换热量相等，即 $\Phi_2 = \Phi_3$ ，则由公式(2)和(3)可得：

$$T_3 = \frac{\lambda / \delta A T_1 + A_0 h T_{\text{液氮}}}{\lambda / \delta A + A_0 h} \quad (4)$$

当黑体温度分别为 100 K 、 200 K 、 300 K 时， T_3 分别为 99.95 K 、 199.74 K 、 299.53 K 。将此结果代入公式(3)可得制冷板与液氮的对流换热量分别为 72.06 W 、 385.40 W 、 698.74 W ，即当黑体温度分别为 100 K 、 200 K 、 300 K 时加热板需提供的加热功率值。考虑到计算误差及其他的加热损失和漏热，并为了缩短调温和控温时间，实际设计中给加热板加载 2 kW 的总功率。

2.3 低温红外目标源系统温度均匀性

2.3.1 低温黑体整体温度分布均匀性

为了考察黑体面源的整体温度分布状况，一般采用无量纲特征数—毕渥数 B_i 来进行分析^[4]。当 $B_i \leq 0.1$ 时，可以认为黑体整体温度分布均匀一致。毕渥数计算公式如下：

$$B_i = \frac{\delta h}{\lambda} \quad (5)$$

式中： δ 为黑体厚度； h 为表面换热系数； λ 为导热系数。

(1) 黑体辐射对温度分布的影响

黑体面源厚度 δ 为 15 mm ；黑体表面等效辐射换热热阻 $1/h$ 大小取为 3 ； $\lambda = 400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。则由公式(5)计算可得 $B_i = 1.125 \times 10^{-4}$ ，此时 $B_i \ll 0.1$ 。因此，黑体与红外窗口之间的辐射换热对黑体温度分布均匀性的影响极小。

(2) 热传导对温度分布的影响

只考虑制冷条件下的黑体温度分布。此时 $1/h$ 为黑体与加热板之间热传导的换热热阻，大小取为 0.1 。则由公式(5)计算可得 $B_i = 3.75 \times 10^{-6}$ ，此时 $B_i \ll 0.1$ 。因此，黑体与加热板之间的热传导对黑体温度均匀性的影响也极小。

由以上分析可知，热平衡状态下的黑体整体温

度分布均匀。

2.3.2 黑体表面温度的均匀性分析

黑体表面的温度场分布对系统的性能有十分重要的影响。应用 ANSYS 软件对黑体目标源在制冷过程中的表面温度场分布进行了有限元分析，结果如图 3 所示。

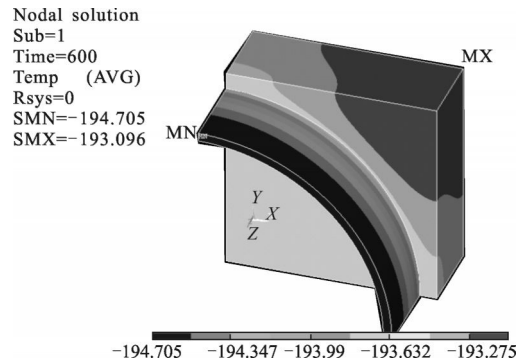


图 3 黑体制冷过程中的温度场分布

Fig.3 Temperature field distribution of the blackbody in the process of refrigeration

由分析结果可知，在制冷过程中，黑体面源最高温度为 $-193.122 \text{ }^\circ\text{C}$ ，高温的温度分布区域居于黑体面源四角，这是由于热传导过程中温度梯度效应引起的，以冷却介质为中心，半径越大，温度越高。黑体面源最大温差为 $0.178 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在 $\phi 150 \text{ mm}$ 工作区域内，最大温差为 $0.051 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度均匀性较好，不大于 0.2 K ，满足使用要求。

2.3.3 测温实验及结果

为了对黑体面源表面温度场分析结果进行验证，分别对制冷板、加热板、面源黑体进行了温度测试，测温位置如图 4 所示。

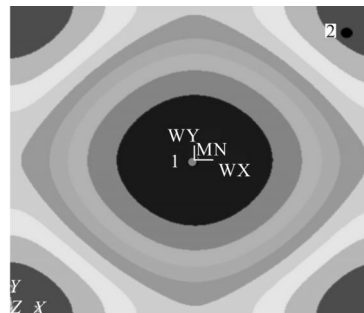


图 4 温度测试位置图

Fig.4 Location of the temperature test

表 1 为实测温度与仿真温度分析结果，虽然实

测温度与理想的仿真温度有一定偏差,但是仿真温度与实测温度基本吻合,只是在黑体面源四角边缘处误差稍大。此外,从制冷时间来看,由于测温实验时,真空罐内部的所有部件都处在制冷状态下,而在用有限元分析时,只对黑体面源部分进行仿真,同时忽略了热阻、环境影响等因素,因此实际降温时间要长于仿真降温时间。

表1 黑体实测温度与仿真分析结果

Tab.1 Measured temperature of blackbody and result of the simulation analysis

Testing surface	Site	Measured temperature		Simulated temperature	
		Temperature/°C	Time/min	Temperature/°C	Time/min
Surface of blackbody	1	-192.0	27	-193.3	11.7
	2	-189.2	27	-193.1	11.7
Surface of heating panel	1	-194.9	20	-194.6	10
	2	-194.4	20	-194.3	10
Surface of cooling panel	1	-194.9	20	-195.8	10
	2	-194.7	20	-195.5	10

2.4 低温黑体面源控温精度分析

黑体的热平衡方程如下式:

$$Q_1 + Q_2 = cm\Delta T \quad (6)$$

式中: Q_1 为辐射换热热量; Q_2 为热传导热量; c 为黑体热容,其大小为 $386 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; m 为黑体质量, 3 kg ; ΔT 为黑体温度变化量。如果要求 $\Delta T \leq 0.5 \text{ K}$,则 $Q_1 + Q_2$ 必须小于 579 J 。由于黑体输入的冷源和热源是平衡不变的,则黑体温度的变化只受其辐射换热影响。当黑体温度为 100 K 时, Q_1 为 6.61 W ,则经过 87 s 才能使温度下降 0.5 K ,而一般实际工作中,在一个温度点的测试工作时间为 10 s 左右,因此,该系统可以达到要求的控温精度。

3 结论

文中对所设计的低温红外目标源系统的控温模式、加热功率、温度场分布及控温精度进行了分析和实验验证。结果表明,该系统的各项指标均达到设计和使用要求,温控范围为 $80\sim 300 \text{ K}$,黑体表面温度场分布均匀,控温精度 $\leq 0.5 \text{ K}$,且有极好的温度稳定性($\leq 0.1 \text{ K}/\text{min}$)。

文中所设计的低温红外目标源系统不仅可以解决低温红外产品(传感器)的响应线性度和非均匀性的检测问题,而且很好地满足了航天红外探测系统的标定校正需求。

参考文献:

- [1] Qu Jinxiang, Lu Yan. Structure design and heat transfer analysis of cryogenic vacuum chamber [J]. *Cryogenics*, 2006 (1): 008. (in Chinese)
屈金祥, 陆燕. 低温真空腔体结构设计及传热分析[J]. 低温工程, 2006(1): 008.
- [2] Christy J W, Rochester J R. Low-temperature blackbody radiation source: US, 6232614[P]. 2001-05-15.
- [3] Schwarz M, Hofmann R, Giacosa F. Gap in the black-body spectrum at low temperature [J]. *Journal of High Energy Physics*, 2007(02): 091.
- [4] Xu Bing, Ma Long, Li Xiaoman. Development of the infrared background simulator in cryogenic vacuum environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(4): 430-436. (in Chinese)
徐冰, 马龙, 李晓曼. 低温真空环境的红外背景模拟器的研制[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(4): 430-436.
- [5] Yang Jianbin, Zhang Wenrui, Bai Shu, et al. Temperature analysis for infrared radiation calibration plane blackbody[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2011(1): 007. (in Chinese)
杨建斌, 张文瑞, 柏树, 等. 面源红外定标黑体控温热分析[J]. 真空与低温, 2011(1): 007.
- [6] Dai Yinghong, Wu Jianfeng, Zhang Yazhou, et al. Development of a calibration device of low temperature blackbody with large aperture [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(5): 49-52. (in Chinese)
戴映红, 吴剑峰, 张亚洲, 等. 大口径低温黑体标定装置研制[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(5): 49-52.
- [7] Balaj O P, Berg C B, Reitmeier S J, et al. A novel design of a temperature-controlled FT-ICR cell for low-temperature black-body infrared radiative dissociation (BIRD) studies of hydrated ions[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2009, 279(1): 5-9.
- [8] Yang Shiming, Tao Wenshan. Heat Transfer Theory[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Publishing House, 2006: 6-8, 121, 404-408. (in Chinese)
杨世铭, 陶文栓. 传热学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 6-8, 121, 404-408.