

## 基于两相流体的超大面源黑体控温技术

杨昌鹏<sup>1</sup>, 徐侃<sup>1</sup>, 薛亮<sup>2</sup>, 黄金印<sup>1</sup>, 于新刚<sup>1</sup>, 刘银年<sup>2</sup>, 宋云飞<sup>1</sup>, 何明键<sup>3</sup>

- (1. 北京空间飞行器总体设计部 空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 面源黑体作为红外源标在红外测温、红外成像、红外相机标定等领域广泛应用, 红外源标红外辐射性能主要取决于面源黑体温度场的控制。为了适应星载和机载红外探测器大孔径、大视场角的发展需求, 文中对超大尺寸面源黑体温度控制技术进行了研究。外场条件下, 面源黑体会随着尺寸的增大而增加温度控制的难度, 控温系统采用两相流体回路技术实现了外场 3 m×3 m 面源黑体不同目标温度下高温度均匀性、稳定性温度控制, 试验结果表明, 黑体表面温度均匀性控制优于±0.60 °C, 稳定性控制优于 0.14 °C/15 min。

**关键词:** 面源黑体; 超大尺寸; 两相流体回路; 温度均匀性控制

**中图分类号:** TN216      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20220195

## Temperature control technology for extra large surface blackbody based on two-phase fluid

Yang Changpeng<sup>1</sup>, Xu Kan<sup>1</sup>, Xue Liang<sup>2</sup>, Huang Jinyin<sup>1</sup>, Yu Xingang<sup>1</sup>,  
Liu Yinnian<sup>2</sup>, Song Yunfei<sup>1</sup>, He Mingjian<sup>3</sup>

- (1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology, Beijing 100094, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** As an infrared standard source, surface blackbody is widely used in infrared temperature measurement, infrared imaging, infrared camera calibration and other fields. The infrared radiation performance of infrared standard source mainly depends on the control of surface blackbody temperature field. In order to meet the development needs of large aperture and large field of view of spaceborne and airborne infrared detectors, the temperature control technology of extra large surface blackbody is studied in this paper. Under the condition of outfield, the difficulty of temperature control increases with the increase of surface blackbody size. The temperature control system adopts the two-phase fluid loop technology to realize the high temperature uniformity and stability temperature control of a 3 m×3 m surface blackbody for the outfield field under different target temperatures. The experiment results show that the surface temperature uniformity control of the black body is better than ±0.60 °C and the stability control is better than 0.14 °C/15 min.

**Key words:** surface blackbody; extra large; two-phase fluid loop; temperature uniformity control

收稿日期: 2022-03-17; 修订日期: 2022-04-25

基金项目: 国家民用空间基础设施项目 (2019KJJC208008)

作者简介: 杨昌鹏, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天器热分析和热设计方面的工作。

## 0 引言

黑体是一种理想物体,其发射率和吸收率都为 1,即能在任何温度下全部吸收所有波长的辐射,并能最大限度地发出辐射。黑体分为点源黑体(或空腔黑体)与面源黑体两种,前者发射率较高,可用于红外热像仪等设备的标定,后者可直接应用于红外探测设备的测试或性能评估<sup>[1-2]</sup>。面源黑体在红外测温、红外成像、红外相机标定等领域广泛应用,是红外探测器进行红外定标的关键设备。近年来,为了适应星载和机载红外探测器大孔径、大视场角的发展需要,对大尺寸面源黑体进行分析、研究变得越来越重要<sup>[3-5]</sup>。

黑体辐射源的辐射精度主要取决于辐射面温度场的控制,对于面源黑体,须保证辐射平面内温度控制的均匀性和稳定性。目前常见的面源黑体控温方式有半导体制冷片控温<sup>[6-8]</sup>、制冷机结合加热控温<sup>[9-10]</sup>、开式热沉结合加热控温<sup>[11-13]</sup>、闭式制冷结合加热控温<sup>[14-15]</sup>以及电加热分区控温<sup>[16-18]</sup>等几种方式。半导体制冷片控温以及制冷机结合加热控温方式控温精度较高,但由于制冷器件制冷量有限,面源黑体尺寸较小,一般不超过 100 mm×100 mm。开式热沉结合加热控温一般使用液氮作为热沉直接冷却黑体,通过调节加热器功率实现黑体温度的调节,由于控温过程伴随着液氮的持续消耗,室温环境中极易产生结露结霜现象,不利于外场使用。闭式制冷结合加热控温使用闭式制冷机组对黑体进行冷却,同时使用加热器进行二级控温,电加热分区控温则是通过直接分区加热来实现黑体控温,使用上述两种方式控温的面源黑体尺寸可以做到 1 m×1 m,由于各加热分区之间存在较强耦合,加热的均匀性难以保证以及空气对流、光照等因素影响,面源黑体温度均匀性一般控制在±0.6℃左右,同时电加热分区控温方式缺乏对面源黑体温度的制冷调节能力,黑体温度只能控制在室温以上的范围。

外场阳光照射和空气对流条件下,面源黑体会随着尺寸的增大而增加温度控制的难度,目前现有的控温方式很难满足外场更大尺寸面源黑体在一定温度范围内精准控温的需求,同时难以保证其表面温度的均匀性和稳定性。针对星载和机载红外及高光谱载荷高精度辐射定标对于大尺寸面源黑体温度均匀性、

稳定性控温以及高精度测温等需求,文中开展了外场用超大尺寸面源黑体温度控制方法研究,利用两相流体工质等温相变特性实现了面源黑体高温度均匀性控制,工质相变即蒸发-凝结过程具有换热热流密度高、热量传输能力强、温度均匀性好等优势<sup>[19]</sup>,基于泵驱两相流体回路技术完成了 3 m×3 m 国内最大面源黑体温度控制系统设计与研制,并对系统控温性能进行了试验和分析。

## 1 控温系统设计原理

3 m×3 m 面源黑体控温系统设计需要在外场日照条件下对黑体进行控温,实现不同目标温度调节(环境温度~环境温度+30℃)、温度均匀性(≤±0.8℃)以及稳定性(≤±0.2℃/15 min)的控温需求。两相流体回路利用工质在循环流动过程中的蒸发吸热和冷凝放热过程,进行热量收集、输运和排散。

文中控温系统利用两相流体回路作为系统热量传输干线,同时为 3 m×3 m 面源黑体提供温度稳定的热沉,如图 1 所示,控温系统由 3 m×3 m 黑体冷板组件、泵驱两相流体回路机组以及高低温水冷机组三部分组成,整个系统控制和温度采集由控制器实现。

由于文中面源黑体尺寸过大,3 m×3 m 面源黑体采用拼接的方式,由 36 块 520 mm×520 mm 黑体冷板拼接而成。36 块黑体冷板要求共面,接缝处空隙≤2 mm,拼缝处填充高发射率黑色硅橡胶,减小拼缝部位与黑体冷板间的温差。单块黑体冷板采用黑体与控温冷板一体化设计,内部均匀分布多条平行微型槽道结构,利用两相工质实现对黑体表面温度的均匀性控制。正面加工微型棱锥,锥角 60°,高度 8 mm,表面喷涂黑漆,利用微棱锥体排列表面产生的腔体效应,提高黑体表面辐射率,产品经验收送样测试,测得所有黑体辐射面实际的法向发射率均大于 0.98。

泵驱两相回路机组作为 3 m×3 m 面源黑体热量传输干线,是控温系统的核心,由两相循环泵、储液器、回热器、换热器、预热器、压力传感器、温度传感器、传输管路等组成。36 块黑体冷板并联接入两相流体回路系统,处于气液两相状态的工质在黑体冷板内部发生流动沸腾换热,工质吸收热量后干度增大,经过换热器后把热量排散给高低温水冷机组,从换热器流出的过冷工质再经过泵回到黑体冷板中,循环往

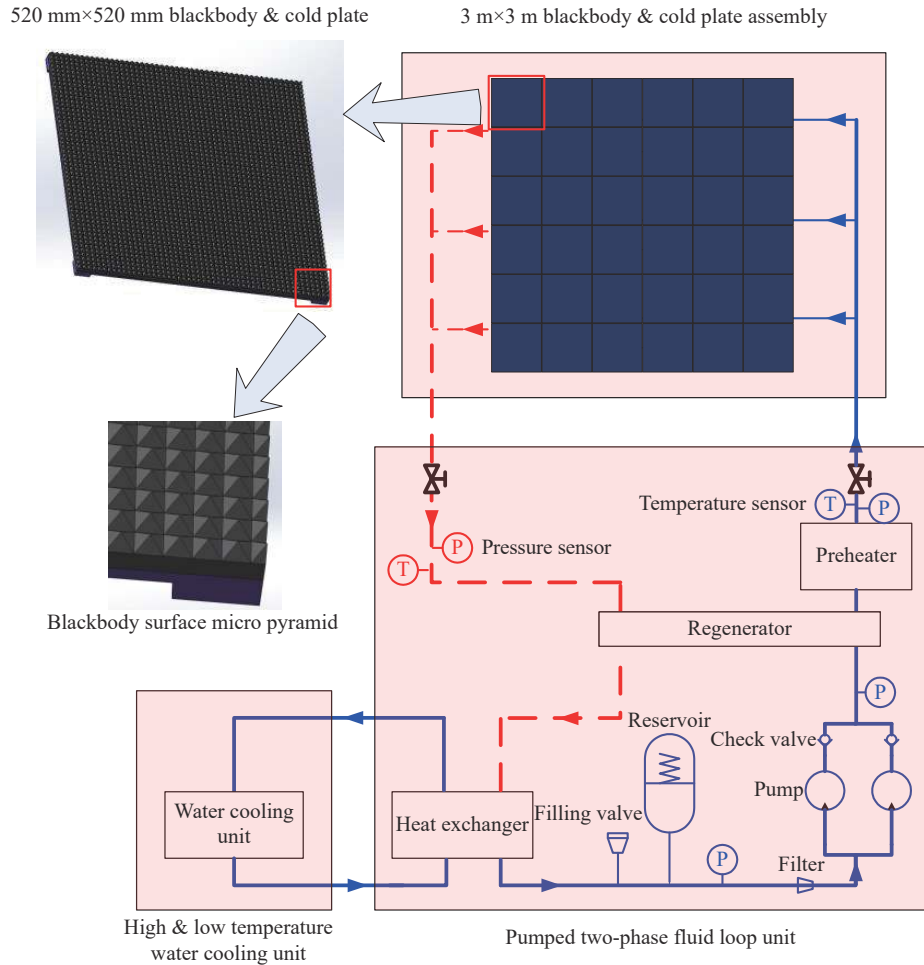


图 1 3 m x 3 m 面源黑体控温系统流程图

Fig.1 Diagram of 3 m x 3 m surface blackbody thermal control system process

复。工质在黑体冷板和换热器间的循环流动由泵提供的动力来维持。

高低温水冷机组通过换热器与泵驱两相流体机组进行热量交换,内部集成了制冷压缩机、储冷箱、换热容器、循环泵组、控制装置等部件,供液温度范围  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,任意可调,供液温度控制精度  $\leq\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时具备制冷和加热能力,为泵驱两相流体回路提供温度稳定的热沉,实现系统热量到周围环境的排散。

## 2 系统分析与设计

### 2.1 热负荷计算

外场条件下,太阳光照和空气对流等外部热环境与面源黑体辐射面产生热交换,对系统控温能力产生影响,计算 3 m x 3 m 面源黑体的热负荷时,要综合分析上述因素的影响,以便对系统所需要的制冷量、加热量以及循环泵的工质流量等进行相应的设计。为

降低黑体辐射源与外界环境的热交换,在黑体冷板背面采取了隔热措施,进一步提高系统控温能力。

根据面源黑体外场使用要求,定标时间段为中午 10:00~13:00 之间进行。太阳光照强度作为面源黑体的热量来源与表面温度密切相关。由相关数据可知,外场地面最大太阳辐照强度为  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ ,因此对于面源黑体控温来说,制冷量最大工况为夏至日中午定标,太阳直射整个黑体表面,面源黑体温度控制在室温附近。假设除黑体辐射面外其他面均为绝热状态,根据能量守恒方程计算黑体辐射源所需的制冷量,对于面源黑体而言,工作时主要热量损失为向空间的辐射热及与表面空气的对流换热,主要热量来源为太阳辐射热流。

$$Q_{\text{cool}} = Q_{\text{sun}} - Q_{\text{radiation}} - Q_{\text{convection}} = q_{\text{sun}}A - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_{\infty}^4) - Ah(T - T_{\text{ambient}}) \quad (1)$$

式中:太阳辐照强度  $q_{\text{sun}}=1000\text{ W}/\text{m}^2$ ;  $A$  为黑体辐射面

面积,  $A=36 \times 0.52 \times 0.52=9.73 \text{ m}^2$ ; 黑体辐射发射率  $\varepsilon=0.98$ ; 斯蒂芬-玻尔兹曼常数  $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_{\text{ambient}}$  为环境温度, 这里设定为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $h$  为黑体辐射面表面对流换热系数, 因辐射体表面为锥形腔结构, 将对流换热系数假设为较恶劣情况下的自然对流换热, 设定  $h=15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $T$  为面源黑体温度;  $T_\infty$  为外部辐射源温度, 取  $T_\infty$  为天空大气有效温度。

天空的大气辐射可以等效为一个位于黑体辐射源上方的无限大水平灰体平面, 在晴空条件下, 天空大气有效温度  $T_\infty$  可以采用 Brunt 方程式进行估算<sup>[20]</sup>:

$$T_\infty = (0.51 + 0.208 \sqrt{e_a})^{0.25} T_{\text{ambient}} \quad (2)$$

式中:  $e_a$  为空气中水蒸气分压力, 单位 kPa, 水蒸气分压力可由相对湿度和同一温度的饱和蒸汽压得出, 相对湿度 35%, 环境温度  $T_{\text{ambient}}$  为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 水蒸气分压力  $e_a=0.81 \text{ kPa}$ , 由公式 (2) 计算得到的天空大气有效温度  $T_\infty=-5.23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由公式 (1) 计算可得, 将面源黑体温度  $T$  控制在环境温度  $T_{\text{ambient}}$  时, 计算得到的温度控制系统最大制冷量  $Q_{\text{cool}}$  为  $8.53 \text{ kW}$ 。

计算温度控制系统最大加热量时, 设定此时无阳光照射, 面源黑体温度 30 min 内由室温加热到高于室温  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度控制系统最大加热量包括面源黑体升温过程所需要的加热量以及对环境的漏热 (自然对流和辐射漏热), 由能量守恒方程可以得到:

$$Q_{\text{heat}} = Q_{\text{transient}} + Q_{\text{radiation}} + Q_{\text{convection}} = Mc_{\text{Al}} \Delta T / \tau + \varepsilon \sigma A (T^4 - T_\infty^4) + Ah(T - T_{\text{ambient}}) \quad (3)$$

式中: 单块黑体冷板质量为  $13.5 \text{ kg}$ ; 36 块黑体冷板质量  $M=36 \times 13.5=486 \text{ kg}$ ; 黑体冷板为铝合金结构, 比热容  $c_{\text{Al}}=920 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ; 面源黑体温度变化量  $\Delta T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 面源黑体升温时间  $\tau$  取值  $30 \text{ min}$ ; 环境温度  $T_{\text{ambient}}$  同样取值  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 天空大气有效温度  $T_\infty$  同上文为  $-5.23 \text{ }^\circ\text{C}$ , 将面源黑体温度  $T$  控制在高于环境温度  $T_{\text{ambient}} 30 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 计算得到的温度控制系统加热过程最大加热量为  $14.94 \text{ kW}$ , 面源黑体温度稳定后系统加热量为  $7.49 \text{ kW}$ 。

## 2.2 回路流量分析

文中选用氟利昂 R134a 作为两相流体回路工质, 相较于宇航常用的热管工质氨, 其具有化学性能稳定, 无毒、不可燃、环境友好, 合适的饱和蒸汽压, 沸点和临界温度合适等优点, 同时与常见材料相容, 低、

介电常数大、价格低, 广泛应用于地面各种制冷系统中。

两相流体回路利用工质相变即蒸发-凝结过程传递热量, 液体的汽化潜热比单相液体的比热容高两个数量级。因此, 相较于单相流体回路, 两相流体回路热传输能力强, 所需的循环工质流量很小, 可以大幅减小泵功率和管道尺寸。流体回路流量设计要考虑多方面因素, 如果流量过大则泵功耗较大, 如流量太小则会出现过热的情况。对于热流密度较小的情况, 系统流量只要满足总的传热量即可, 对于高热流密度散热的情况下, 需要考虑干度对换热系数的影响。目前任务的热流密度较低, 因此可以控制在较高的干度。

综合考虑面源黑体温度稳定工况下温度控制系统制冷量和加热量换热需求以及设计余量, 温度控制系统设计最大传热量  $Q$  为  $10 \text{ kW}$ , 可根据以下公式计算流体回路的工质流量:

$$c_{\text{R134a}} \dot{m} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) + \chi \dot{m} \gamma_{\text{R134a}} = Q \quad (4)$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_{\text{R134a}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) + \chi \gamma_{\text{R134a}}} \quad (5)$$

式中:  $c_{\text{R134a}}$  为液态工质比热容, 取值  $1444 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $T_{\text{out}}$  和  $T_{\text{in}}$  为黑体冷板工质出口温度与入口温度, 由于工质出预热器后已经加热至饱和状态, 因此  $(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$  为  $0$ ;  $\chi$  为饱和工质干度, 设定为  $0.2$ ;  $\gamma_{\text{R134a}}$  为工质潜热, 取值  $290 \text{ kJ}/\text{kg}$ , 计算得到质量流量  $\dot{m}=0.172 \text{ kg}/\text{s}$ , 约合体积流量  $514 \text{ L}/\text{h}$ 。

## 2.3 控温均匀性设计

文中面源黑体控温均匀性设计的要点是保证供液分配的均匀性, 即将两相工质平均分配到 36 块黑体冷板内部的微流道中去, 保证工质在各个黑体冷板内均匀稳定地流动和换热, 利用两相工质等温相变特性以及换热能力强的特点实现对黑体辐射面高温度均匀性控制。黑体冷板是温度控制系统温度控制的对象, 为减小两相工质与黑体辐射面的换热温差, 提高两相工质对黑体辐射面的控温能力, 采用黑体和控温冷板结构一体化设计方法。单块黑体冷板设计由盖板、背板和螺纹接头组成。盖板正面为微型棱锥辐射面, 背面刻槽形成 38 条平行且均匀分布的微型流道。背板厚度为  $8 \text{ mm}$ , 与盖板钎焊在一起形成内部连通的流道, 在背板中心和四周均匀布置有 5 个铂电阻安装孔, 深入黑体冷板结构内部, 用于测量黑体辐

射面的温度。

工质进出口布置在黑体冷板对角线位置, 进出口焊接螺纹接头, 采用双 O 型圈密封螺纹接头与外部管路进行连接, 外部管路接口形式为柱塞接头和外套螺母, 接头具体形式为 M24×1.5 的双 O 型圈螺纹接头。

3 m×3 m 黑体冷板组件由 36 块黑体冷板、流体管路和黑体支架等部分组成, 如图 2 所示, 单块黑体冷板背面覆盖隔热泡沫安装在黑体支架顶面, 安装过程中黑体冷板可通过安装螺栓调平。在黑体冷板安装到位后, 进行支架上管道的连接。

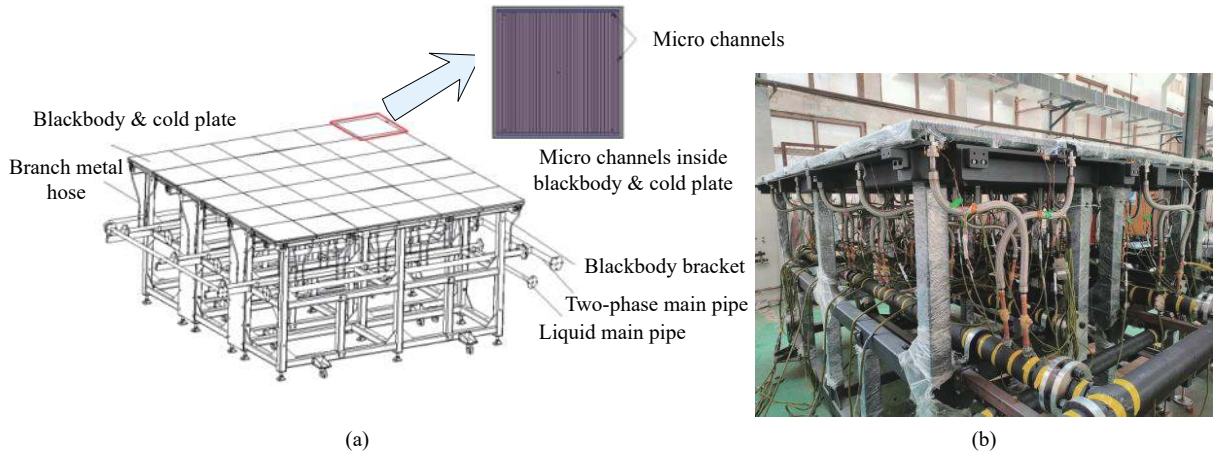


图 2 3 m×3 m 黑体冷板组件集成示意图 (a) 及实物图 (b)

Fig.2 Schematic diagram (a) and physical photo (b) of 3 m×3 m blackbody & cold plate assembly integration

为均匀分配进入各个黑体冷板工质的流量, 获取更好的温度均匀性, 36 块黑体冷板采用并联的连接方式。黑体冷板进出液口与流体回路主管路通过 72 根金属软管连接, 管道设计时充分考虑分液均匀、方便安装、兼顾检修空间的要求, 所有并联连接管长度一致。同时, 所有黑体冷板上的铂电阻通过电连接器与控制器温度采集模块连接进行温度采集。

#### 2.4 高精度测温设计

为了获取黑体辐射面温度, 验证面源黑体的实际控温效果, 同时尽可能地提高测温精度以及减小空气流动对测温点的影响, 采用高精度四线制铂电阻接触式测温。选用 AA 级铂电阻 Pt100 作为文中的温度传感器, 研制阶段铂电阻经过高温贮存和温度冲击筛选试验, 并进行标定, 0~90 °C 铂电阻标定精度优于 ±0.05 °C。

黑体冷板内部测温点安装方式如图 3 所示, 铂电阻嵌入安装在黑体冷板背板预留的安装孔内, 铂电阻头部距离黑体辐射面 4 mm, 贴近辐射面安装, 安装孔内填充导热脂, 以减小铂电阻与被测表面的温差。最大太阳辐照强度  $q_{\text{sun}}=1000 \text{ W/m}^2$  时, 铂电阻头部位置与辐射面温差  $\Delta T_1 = q_{\text{sun}}\delta/\lambda = 0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ , 式中, 铂电阻头部与辐射面距离  $\delta=4 \text{ mm}$ , 黑体材料为铝合金, 其导热

系数  $\lambda=121 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ 。黑体辐射面与环境温度最大温差  $T - T_{\text{ambient}}=30 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 辐射面附近空气自然对流对铂电阻测温影响最大, 铂电阻头部位置与辐射面温差  $\Delta T_2 = h(T - T_{\text{ambient}})\delta/\lambda = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ , 式中,  $h$  为黑体辐射面表面对流换热系数, 假设为较恶劣情况下的自然对流换热, 设定  $h=15 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ 。因此, 铂电阻测温与辐射面温度差异可以控制在 0.05 °C 以内, 具有较高的测量精度。

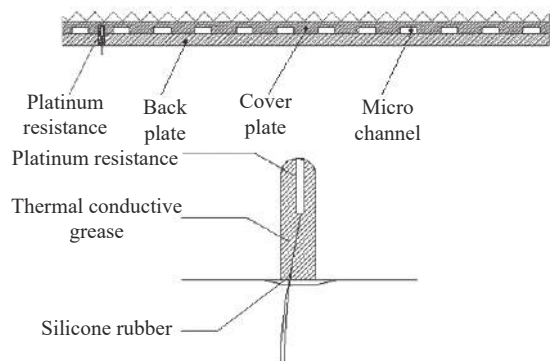


图 3 黑体测温铂电阻安装示意图

Fig.3 Installation diagram of platinum resistance for blackbody

为了测量 3 m×3 m 面源黑体整体温度, 验证温度均匀性控制情况, 在 36 块黑体冷板背面均匀布置了 120 枚铂电阻温度传感器, 每块黑体冷板布置的测温

点不少于 3 个, 36 块黑体冷板铂电阻测温布置及编号如图 4 所示。

42	44	100	99	64	66	129	128	143	145	131	130
43		98		65		127		144		132	
①		②		③		④		⑤		⑥	
89	91	39	41	139	141	109	107	61	63	118	117
90		40		140		108		62		116	
⑦		⑧		⑨		⑩		⑪		⑫	
92	94	47	46	76	75	113	115	102	103	123	122
93		45		74		114		101		121	
⑬		⑭		⑮		⑯		⑰		⑱	
49	50	59	58	110	111	68	69	133	135	124	125
48		57		112		67		134		126	
⑲		⑳		㉑		㉒		㉓		㉔	
60	81	51	53	77	79	136	138	149	148	104	105
82		52		78		137		147		106	
㉕		㉖		㉗		㉘		㉙		㉚	
54	56	83	84	73	72	157	158	88	71	154	142
55		85		95		152		86		159	
⑳		㉑		㉒		㉓		㉔		㉕	
156	160	160	120	97	96	153	155	87	70	38	80
㉖		㉗		㉘		㉙		㉚		㉛	

图 4 铂电阻及黑体冷板布置图

Fig.4 Distribution of platinum resistances and blackbody & cold plates

### 2.5 温度稳定性控制

控制器通过控制高低温水冷机组、两相流体回路机组储液器和预热器温度, 实现黑体冷板组件管路入口工质温度稳定, 对 3 m×3 m 面源黑体进行温度稳定性控制, 同时实现所有黑体冷板 120 枚铂电阻温度的采集, 控制器由主控计算机、逻辑控制器、温度采集

模块、供电系统及相应控制系统软件组成, 见图 5。

主控计算机通过 RS422 接口与逻辑功能控制模块进行通讯, 逻辑功能控制模块实现压力、液位参数数据的采集及在不同模式下对泵、电磁阀、预热器控温回路、储热器控温回路、水冷机组的状态采集及控制。系统的电源模块为主控计算机、采集控制模块及被控系统提供工作电源。温度测量模块使用安捷伦温度采集模块实现 140 路高精度温度的采集, 并将采集的温度信号, 通过网络接口上传给控制计算机进行显示、保存、下传等进一步处理。

控温流程以黑体温度为控制目标, 采用三个层次的控制逻辑进行高稳定性控制, 第一个层次利用水冷机组控制, 将控温的目标温度输出到水冷机组的控制系統, 由水冷机组完成第一级的迅速控制, 反映为水冷机组调整到目标温度附近, 供水温度稳定性可以控制在 1 °C/30 min 以内; 第二个层次利用储液器控温回路进行控制, 采用 PID 算法, 输出的控制量为储液器控温回路的加电占空比, 反映为储液器温度变化到目标温度, 储液器温度稳定性可以控制在 0.5 °C/30 min 以内, 同时回热器将工质吸热蒸发后的回流与供水进行有效换热, 根据回热效果, 可以使工质温度波动衰减为原来的 1/2; 第三个层次为预热器控温回路, 采用 PID 算法, 输出的控制量为预热器控温回路的加电占空比, 反映为预热器温度变化到目标温度, 预热器出口工质温度稳定性可以控制在 0.2 °C/30 min 以内。

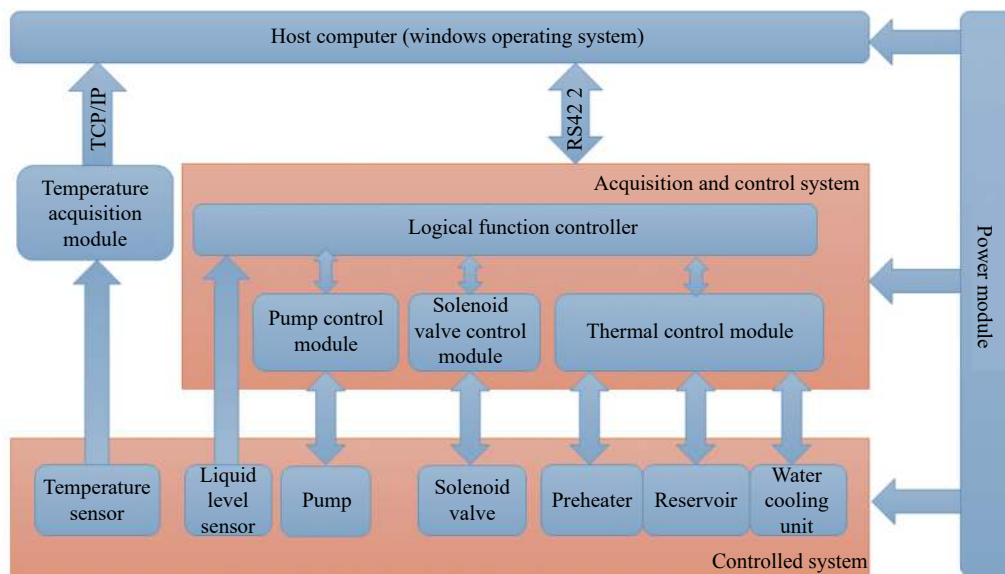


图 5 控制器系统功能原理

Fig.5 Functional principle of controller system

在升温模式或降温模式下,软件根据当前温度和目標温度间的差值范围,采用分层分段控制,调节温度向目標温度趋近,并减小超调。

### 3 试验结果及分析

根据外场定标对 3 m×3 m 面源黑体的控温需求,对黑体温度控制系统实际控温效果进行了试验,按照黑体控制目標温度,温度控制试验分为环境温度+10℃、环境温度+20℃、环境温度+30℃三个主要工况,试验项目包括:两相流体回路控制测试,包括水冷机组、储液器、预热器温度控制调节以及泵转速测量;黑体控制温度测试,包括温度均匀性、稳定性和分辨率;控制过程测试,包括控温时间、控制稳定时间。

在进行工况 1 试验前,对黑体温度控制系统进行了电气组件检查,包括压力传感器检查、铂电阻测温准确性检查、电磁阀开关检查、泵运转测试、储液器加热器和预热器加热器检查,确保所有的电气组件工作正常,同时进行了黑体冷板升温测试,将所有黑体冷板温度由环境温度升高到 30℃附近,验证了黑体温度控制系统的温度调节能力。

试验过程中,通过调节高低温水冷机组温度、储液器温度和预热器温度,控制工质在黑体冷板内处于两相换热状态。工况 1 试验时环境温度 9℃,36 块黑体冷板温度稳定控制在 19℃附近,黑体冷板温度由 30℃调节降至目標温度 19℃所需要的时间在 30 min 左右,3 m×3 m 面源黑体典型测点(铂电阻 40#、42#、52#、62#、68#、80#、130#、147#、156#)温度平衡曲线如图 6 所示,所有温度测点 15 min 控温稳定性

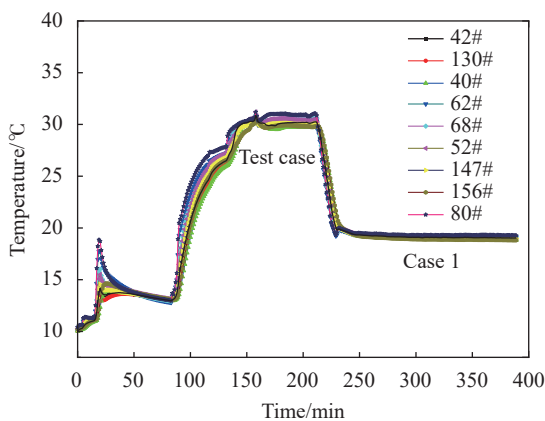


图 6 工况 1 面源黑体温度试验曲线

Fig.6 Surface blackbody temperature experiment curves in case 1

为 0.05℃。

工况 2 试验时环境温度 10℃,36 块黑体冷板温度稳定控制在 30℃附近,黑体冷板温度由 10℃调节到目標温度 30℃所需要的时间在 100 min 左右,所有温度测点 15 min 控温稳定性为 0.10℃。工况 3 试验时环境温度 9℃,36 块黑体冷板温度稳定控制在 39℃附近,黑体冷板温度由 30℃调节到目標温度 39℃所需要的时间在 60 min 左右,所有温度测点 15 min 控温稳定性为 0.14℃。上述两个工况 3 m×3 m 面源黑体典型测点温度平衡曲线如图 7 所示。

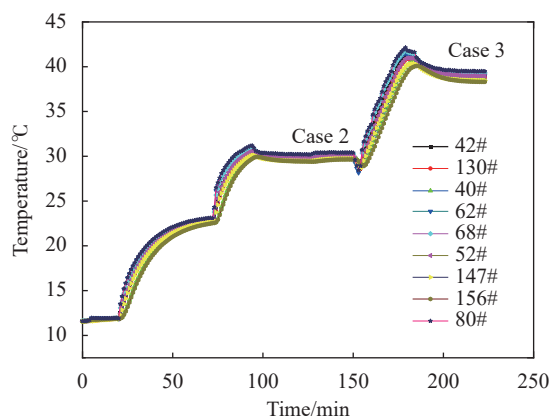


图 7 工况 2、3 面源温度试验曲线

Fig.7 Surface blackbody temperature experiment curves in case 2 and 3

试验工况 1~工况 3 温度稳定后,3 m×3 m 面源黑体 120 个铂电阻测点温度分布统计见图 8,其中横坐标为黑体冷板编号,工况 1 中所有铂电阻测点温度在 19.08~19.48℃之间,工况 2 中所有铂电阻测点温度

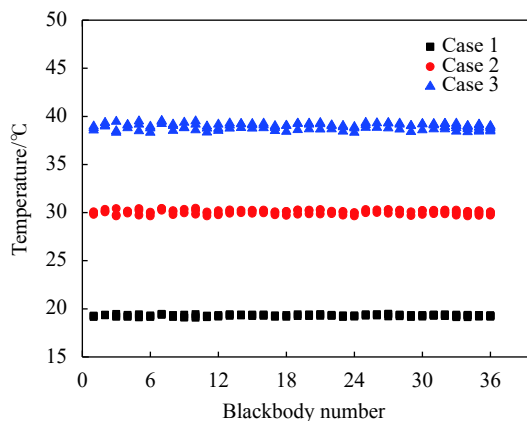


图 8 工况 1~3 中 3 m×3 m 面源黑体温度试验数据

Fig.8 3 m×3 m surface blackbody temperature experiment data in case

在 29.64~30.45 °C 之间,工况 3 中所有铂电阻测点温度在 38.33~39.53 °C 之间。黑体控制目标温度与环境温度较为接近时,黑体所有温度测点一致性很好,但随着黑体控制目标温度的升高,黑体所有温度测点离散性有所增加。

3 m×3 m 面源黑体温度分布云图以及均匀性情况见图 9,工况 1 中黑体冷板温度测点平均值在 19.20~19.43 °C 之间,单个黑体冷板温度均匀性在 ±0.03~±0.18 °C 之间,3 m×3 m 面源黑体整体温度均匀性为 ±0.20 °C。工况 2 中黑体冷板温度测点平均值在 29.86~30.36 °C 之间,单个黑体冷板温度均匀性在

±0.10~±0.39 °C 之间,3 m×3 m 面源黑体整体温度均匀性为 ±0.41 °C。工况 3 中黑体冷板温度测点平均值在 38.67~39.40 °C 之间,单个黑体冷板温度均匀性在 ±0.15~±0.57 °C 之间,3 m×3 m 面源黑体整体温度均匀性为 ±0.60 °C。随着黑体控制温度的升高,外部空气对黑体表面的流动扰动增强,不论是同一黑体冷板内的不同温度测点之间,还是不同黑体冷板温度测点之间,温度不均匀性均有所增加,但是由于两相流体温度控制系统良好的温度控制特性,在环境温度~环境温度+30 °C 范围内黑体温度均匀性和稳定性控制均满足使用要求。

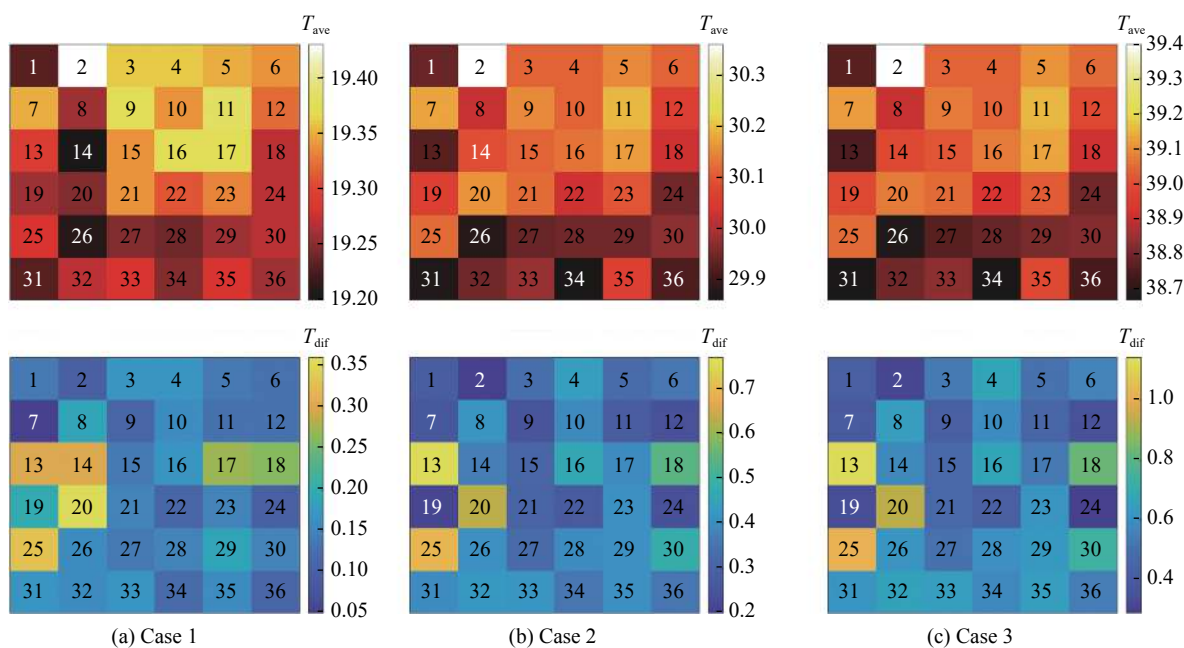


图 9 工况 1~3 中 3 m×3 m 面源黑体温度分布云图

Fig.9 3 m×3 m surface blackbody temperature cloudy map in case 1-3

### 4 结 论

文中开展了超大尺寸 3 m×3 m 面源黑体温度控制方法与试验研究工作,对面源黑体温度控制进行了关键技术和难点研究。采用两相流体回路技术实现了超大面源黑体的温度均匀性、稳定性的较高控制要求,试验结果表明,在环境温度~环境温度+30 °C 范围内面源黑体温度均匀性控制优于 ±0.60 °C,稳定性控制优于 0.14 °C/15 min,系统具有良好的温度控制特性。随着面源黑体与环境温度温差的增大,外部空气对黑体表面的流动扰动增强,黑体表面的温度不均匀性有所增加,后续将结合外场试验,进一步开展不同

风速、光照条件等因素对系统控温的影响分析工作。

研究辐射定标黑体辐射面温度控制技术、研制外场用温度可控的超大面源尺寸高温度均匀性辐射定标用黑体具有重大意义,文中研究内容有助于提高卫星红外及高光谱载荷辐射定标精度,为后续超大黑体辐射源的设计和研发提供了基础和依据。

### 参考文献:

[1] Xu Jie, Yang Linhua, Li Na. Key technologies and development of point-source blackbody working at low temperature [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(2): 151-156. (in Chinese)



- [2] Xu Heng, Han Yizhong, Yang Yongjun. Development of blackbody source [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2009, 29(5): 1-3. (in Chinese)
- [3] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010(4): 117-128. (in Chinese)
- [4] Li Zhaozhou, Zheng Xiaobing, Tang Lingli, et al. An advanced technology of absolute radiometric calibration for optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 581-588. (in Chinese)
- [5] Han Qijin, Min Xiangjun, Fu Qiaoyan, et al. Analysis of onboard calibration accuracy of HJ-1B infrared multispectral camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3): 41-47. (in Chinese)
- [6] Wu Hongxia, Zhang Bo, Jiang Feng, et al. A temperature control system of miniature blackbody based on thermoelectric cooler [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(5): 64-67. (in Chinese)
- [7] Bao Aoao, Cao Panxun. Research of high-precision low temperature extended surface blackbody [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(8): 1023-1026. (in Chinese)
- [8] Liu Sha, Wang Zhantao, Wang Tao, et al. Research on a type of ir dynamic simulation drone based on extend blackbody [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(2): 10-17. (in Chinese)
- [9] Wang Zhaoli, Zhang Yangyang, Li Wei, et al. The research of uniform temperature structure for low temperature extended area blackbody [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2012, 18(4): 201-204. (in Chinese)
- [10] Wang Qiang, Zhang Wei, Dai Jingmin, et al. Temperature uniformity optimum design and performance evaluation of surface blackbody radiant source with cavity effect [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(5): 18-24. (in Chinese)
- [11] Hu Youhua, Hao Xiaopeng, Sima Ruiheng, et al. Development of large-aperture and high-emissivity surface blackbody radiation source [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(3): 314-320. (in Chinese)
- [12] Wang Chao, Hu Zhonghui. Temperature control technology of cryogenic infrared target source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 827-831. (in Chinese)
- [13] Yang Jianbin, Zhang Wenrui, Bai Shu, et al. Temperature analysis for infrared radiation calibration plane blackbody [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2011, 17(1): 23-27. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] Li Zhun, Li Qiang, Hao Xiaopeng, et al. Design and implementation of refrigeration system for 1.2 m diameter low temperature extended area blackbody [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, 27(4): 340-345. (in Chinese)
- [16] Qian Jing, Sun Shengli, Yu Shengyun, et al. Design of large size infrared radiant planar source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 32-35. (in Chinese)
- [17] Yu Shengyun, Qian Jing, Yong Chaoliang, et al. Temperature control system and performance test method for new infrared radiant target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 199-202. (in Chinese)
- [18] Li Chao, Zhang Yuguo, Liu Baowei, et al. Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(2): 292-298. (in Chinese)
- [19] Miao Jianyin, Zhong Qi, Zhao Qiwei, et al. Spacecraft Thermal Control Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 160-178. (in Chinese)
- [20] Lv Xiangyin, Ling Yongshun, Huang Chaochao. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 563-567. (in Chinese)