

# 面向外场 1.2 m 口径低温面源黑体温控系统设计与实现

李 准, 李 强, 郝小鹏, 谢臣瑜  
(中国计量科学研究院, 北京 102200)

**摘要:**为满足外场大口径红外测量设备的辐射定标要求,研制了一套直径为 1.2 m 的大尺寸低温面源黑体系统。该系统主要由低温制冷机组和辐射体两部分组成。通过对系统降温和升温过程的热负荷计算,确定了需要的冷热量;同时配套了精密温度调控系统,制定了黑体温度均匀性保证措施;为测试系统的温度稳定性和均匀性,搭建了测试装置。试验证明,系统的温度稳定性达到 $\pm 0.20$  K,温度均匀性达到 $\pm 0.60$  K,满足设计和实际使用要求。

**关键词:**制冷系统;面源黑体系统;负荷计算;温控系统;温度稳定性

中图分类号:TB657

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2021)04-0340-06

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2021.04.004

## Design and Implementation of Refrigeration System for 1.2 m Diameter Low Temperature Extended Area Blackbody

LI Zhun, LI Qiang, HAO Xiaopeng, XIE Chengyu  
(National Institute of Metrology, Beijing 102200, China)

**Abstract:** To meet the demand of radiation calibration for large diameter infrared measurement equipment, a low temperature point source blackbody system which diameter is 1.2 m is developed. The system consists of refrigeration unit and radiator two parts. Through the thermal load calculation to cool and heat system, cold and heat required is determined. At the same time, the temperature control system to ensure temperature uniformity are introduced. In order to test the temperature stability and uniformity of the system, a test device is built. The experimental results show that the temperature stability of the system reaches  $\pm 0.20$  K, temperature uniformity reaches  $\pm 0.60$  K, which can meet the design and practical requirements.

**Key words:** refrigeration system; extended area blackbody; load calculation; temperature control system; temperature stability

## 0 引言

近年来,随着红外技术的迅速发展,红外探测设备被广泛应用于空间遥感、资源勘探以及气象监测预警等领域,如目前在轨运行的风云卫星系列、资源卫星系列、高分卫星系列等,均搭载了相应的红外探测设备<sup>[1-4]</sup>。在利用红外设备探测目标之前,必须对其进行光谱辐射定标,获取其光谱响应特性。在中远红外(3~14  $\mu\text{m}$ )波段内,普遍采用黑体辐射源作为标准定标光源<sup>[5-6]</sup>,根据普朗克定律<sup>[7]</sup>,黑

体的光谱辐射度是波长和温度的函数,这为红外探测设备辐射定标的量值溯源提供了理论依据<sup>[8]</sup>。

常用的黑体辐射源根据辐射面结构的不同,一般分为腔型黑体和面型黑体。腔型黑体具有发射率高,温度均匀性好等特点,适用于实验室作为标准黑体定标辐射源。面型黑体的辐射面源大,适宜作为外场观测设备的定标辐射源<sup>[9]</sup>。现阶段,为满足国内大口径、宽视场红外探测设备的辐射定标需求,必须研制大尺寸的面型黑体辐射源,覆盖红外

收稿日期:2020-12-07

基金项目:中国计量科学研究院基金(2019002)

作者简介:李准,高级工程师,主要从事低温技术和特殊气体应用研究。Email:lizhun@nim.ac.cn。

引用本文:李准,李强,郝小鹏,等.面向外场 1.2 m 口径低温面源黑体温控系统设计与实现[J].真空与低温,2021,27(4):340-345.

LI Z, LI Q, HAO X P, 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.

设备的光学孔径,提高红外设备的辐射定标精度。

黑体辐射源自身的辐射精度主要受温度控制精度影响,对于面源黑体,须保证辐射平面内温度的均匀性,而大尺寸面源黑体随着面型尺寸的增大会增加温度均匀控制的难度<sup>[10]</sup>,这对温控系统的结构和性能以及温控系统与面源黑体的匹配提出了较高的要求。

为满足外场大口径红外测量设备的辐射定标需求,研制了一套直径为 1.2 m 的大尺寸面源黑体,其温度范围为 263~353 K。为满足温度均匀性的要求,在计算该面源黑体热负荷的基础上,设计了与该面源黑体匹配的制冷系统,提出了配套温控系统的精密温度调控方案,并对面源黑体的温度稳定性进行了试验验证。

## 1 外场 1.2 m 口径低温面源黑体系统

### 1.1 系统组成及布置

研制的外场 1.2 m 口径低温面源黑体系统主要包括温控系统和黑体辐射源两大部分,结构如图 1 所示。

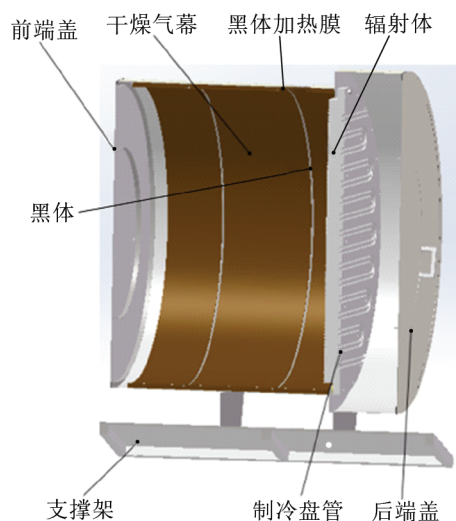


图 1 面源黑体结构示意图

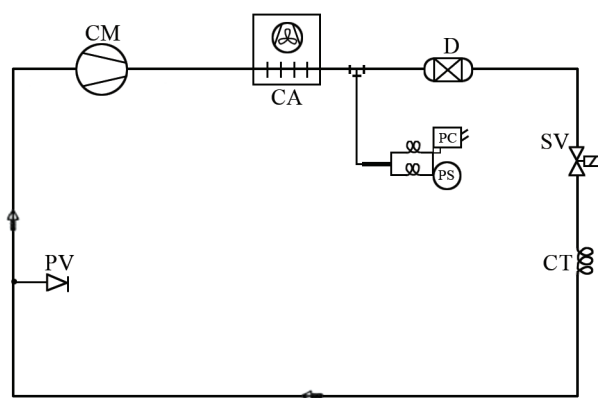
Fig. 1 Schematic diagram of non-point source in black body

图 1 中温控系统主要包括制冷盘管和黑体加热膜等温度控制部件,黑体辐射源是仪器测量的主体部分,为圆柱结构,除外部壳体和支撑部件外,还包括干燥气幕、辐射体(黑体、黑体加热膜)等,可放置在车载转台上。前端盖内部包含辐射体及干燥气幕,后端盖通过管路与控制机箱相连。控制机柜为方体结构,包括控温电路、制冷系统等,外部配有显示屏。通过控制机柜前面板的显示屏,可调节辐射体温度。两大部分分别通过数据线和密封管路

进行数据和控温介质的交换。

### 1.2 黑体温控系统

采用外置恒温槽将黑体温控系统的冷却和加热介质通过循环泵输送到黑体辐射板的背面,以实现黑体辐射板的降温 and 升温,再利用黑体辐射板上的控温系统,实现黑体的精准控温。黑体温控系统包括制冷和加热系统两部分。制冷系统采用闭式节流方式制冷,主要由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器等组成<sup>[11-12]</sup>,如图 2 所示,用铜管将各个部件按一定顺序连接成一个封闭系统,系统内充注一定量的制冷剂,通过闭式循环达到连续制冷的目的。



CM. 压缩机;CA. 冷凝器;D. 干燥器;PS. 压力传感器;PC. 高压保护器;SV. 电子膨胀阀;CT. 节流毛细管;PV. 工艺充注阀。

图 2 制冷系统及工作流程图

Fig. 2 Refrigeration system and work process

采用电加热器对加热系统的恒温槽内部液体进行加热,以次级控温系统为辅调节加热量,实现对辐射板的次级加热控温。

## 2 低温面源黑体配套温控系统

### 2.1 低温面源黑体系统热负荷计算

首先计算黑体系统的热负荷,以便对所需要的制冷量、加热量以及循环泵的流量、管径等进行相应的设计。为降低黑体辐射源与外界环境的热交换,在辐射源体背面采取了隔热措施,以提高控温精度。假设除辐射面外其他面均为绝热状态。具体计算过程如下:

(1)降温过程

a. 黑体铝基材降温需要的冷量为:

$$Q_{\text{铝}} = m_{\text{铝}} c_{\text{铝}} (t_{\text{铝}} - t_{0\text{铝}}) = \rho_{\text{铝}} V_{\text{铝}} c_{\text{铝}} \Delta t \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{铝}}$ 为黑体铝基材密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V_{\text{铝}}$ 为黑体铝体积,  $\text{m}^3$ ;  $c_{\text{铝}}$ 为黑体铝基材比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $t_{\text{铝}}$ 为黑体铝降温前温度,  $\text{K}$ ;  $t_{0\text{铝}}$ 为黑体铝降温后温度,  $\text{K}$ ;  $\Delta t_{\text{铝}}$ 为其降温前后温差,  $\text{K}$ 。

则所需冷量 $Q_{\text{铝}}$ 为2.23 kW。

b. 对流换热需要的冷量为:

$$Q_{\text{对流}} = h_{\text{对流}} A_{\text{对流}} (t_{\text{对流}} - t_{0\text{对流}}) \quad (2)$$

式中: $h_{\text{对流}}$ 为自然对流系数,取25 W/(m<sup>2</sup>·K); $A_{\text{对流}}$ 为对流换热面积,m<sup>2</sup>; $t_{\text{对流}}$ 为对流换热前温度,K; $t_{0\text{对流}}$ 为对流换热后温度,K。

则所需冷量 $Q_{\text{对流}}$ 为0.57 kW。

c. 辐射换热需要的冷量为:

$$Q_{\text{辐射}} = \xi \sigma A_{\text{辐射}} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: $\xi$ 取1; $\sigma$ 为斯特藩-玻耳兹曼常数,取5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); $A_{\text{辐射}}$ 为辐射换热面积,m<sup>2</sup>; $T_1$ 为换热前辐射面温度,K; $T_2$ 为换热后辐射面温度,K。

则所需冷量 $Q_{\text{辐射}}$ 为0.12 kW。

d. 恒温槽内油介质降温需要的冷量为:

$$Q_{\text{油}} = m_{\text{油}} c_{\text{油}} (t_{\text{油}} - t_{0\text{油}}) = \rho_{\text{油}} V_{\text{油}} c_{\text{油}} \Delta t_{\text{油}} \quad (4)$$

式中: $\rho_{\text{油}}$ 为油介质密度,kg/m<sup>3</sup>; $V_{\text{油}}$ 为油介质体积,m<sup>3</sup>; $c_{\text{油}}$ 为油介质比热容,J/(kg·K); $t_{\text{油}}$ 为油介质降温前温度,K; $t_{0\text{油}}$ 为油介质降温后温度,K; $\Delta t_{\text{油}}$ 为其降温前后温差,K。

则所需冷量 $Q_{\text{油}}$ 为0.53 kW。因此,

$$Q'_{\text{总冷}} = Q_{\text{铝}} + Q_{\text{对流}} + Q_{\text{辐射}} + Q_{\text{油}} \quad (5)$$

所需要的总制冷量为 $Q'_{\text{总冷}}=3.45$  kW。

需要说明的是,在上述计算中,未考虑管道运输和热传导等损失的热量,而该损失一般占总制冷量的30%~50%,因此,为保证制冷量满足实际需求,其他损失取最大系数0.5,即 $Q'_{\text{总冷}}$ 为5.18 kW。

### (2) 升温过程

同理,可以计算当黑体温度高于环境温度323 K,系统在90 min内完成升温过程的热负荷。

a. 黑体铝基材升温需要的热量 $Q_{\text{铝}}=2.23$  kW。

b. 对流换热需要的热量 $Q_{\text{对流}}=1.41$  kW。

c. 辐射换热需要的热量 $Q_{\text{辐射}}=0.41$  kW。

d. 恒温槽内油介质升温需要的热量 $Q_{\text{油}}=0.87$  kW。

总热量 $Q'_{\text{总热}}=4.92$  kW。

同样采用最大系数0.5,则总加热量 $Q'_{\text{总热}}=7.38$  kW。

另外,由于黑体系统为车载形式,从可靠性和适用性方面考虑,采用卧式制冷压缩机。

## 2.2 精密温度调控系统

精密温度调控系统主要包括温度控制硬件系统、系统控制算法和数据采集系统等。

### (1) 温度控制系统硬件组成及数据采集系统

温度控制器由触摸显示屏、PLC可编程控制器、控温仪表、温度传感器、制冷系统和加热系统等6部分组成。当温控系统工作时,温度传感器检测恒温

槽体内部的温度,传感器的输出信号被送入控温仪表,控温仪表根据与设定值的差值,输出加热功率。同时,PLC控制器会接收到温度信号,将此温度与事先设定的温度进行比较。根据比较的结果,调节制冷系统输出冷量的大小从而改变恒温槽内部温度。这样便形成了闭环控制系统。此外,触摸显示屏可指示恒温槽内部的设定温度和实时温度,以便对槽体温度进行监控。PLC控制器采用Panasonic AFPX-C38AT和AFPX-COM4通讯模块,该控制系统具有3 001步以上、基本指令0.58 μs/步、继电器+晶体管混合型输出,可满足多种需求。

采用Pt100陶瓷铂电阻温度计作为温度传感器,引线为四线制,准确度为A级。铂电阻传感器用特殊的材料和工艺制造,具有高稳定性和耐振动性。

控温仪表采用SHIMAX UP93智能0.1级96段可编程调节器,无超调双自由度PID算法,8组PID参数和输出限幅,11点PV值补偿,AT自整定,手/自动切换,采样周期50 ms。控温精度高,温度控制准确。

### (2) 系统控制算法

系统通电启动后,首先完成硬件电路、触摸显示屏、执行机构的初始化工作。之后,通过触摸屏设置控温点及每个控温点需要保持的时间。系统会自动比较各个控温点,按照从低温点到高温点的方向进行温度控制。系统的控制流程如图3所示, $B$ 表示温度值波动连续 $\leq \pm 0.005$  K的次数, $E$ 表示在计时过程中温度值波动 $> \pm 0.005$  K的次数。

系统正常工作时,必须实时计算温度测量值(PV)与当前控温目标值(SV)之差(PV-SV)。

当 $PV-SV < -3$  K时,快速加热器启动,通过PLC控制,制冷机关机,冷量输入变为0;满足条件 $-3$  K $\leq$   $PV-SV < -2$  K时,停止快速加热;

当 $PV-SV > -2$  K时,加热器全部关闭,冷量100%输入,满足条件 $-3$  K $\leq$   $PV-SV < -2$  K时,切换电磁阀,降低冷量输入;系统进入PID调节状态。

## 3 低温面源黑体温度均匀性保障措施

温度均匀性是低温面源黑体的重要评价指标。为确保黑体温度均匀,从控制和材料方面采取了多项措施。在温度控制方面,采用SHIMAX UP93智能可编程调节器控制循环槽内温度,由于黑体表面积大,不同部位自然对流导致的漏热量不同,因此采用多部位控温的方法来保证黑体温度的均匀性。控制流程图如图4所示,温度传感器将不同部位的温度数据传送到UP93可编程调节器,调节器将该温度值与设定温度值进行比较,优化PID控制后输出温度控制

信号对黑体温度进行控制。同时根据初步控制结果 对控制参数进行调整优化以达到温度均匀性要求。

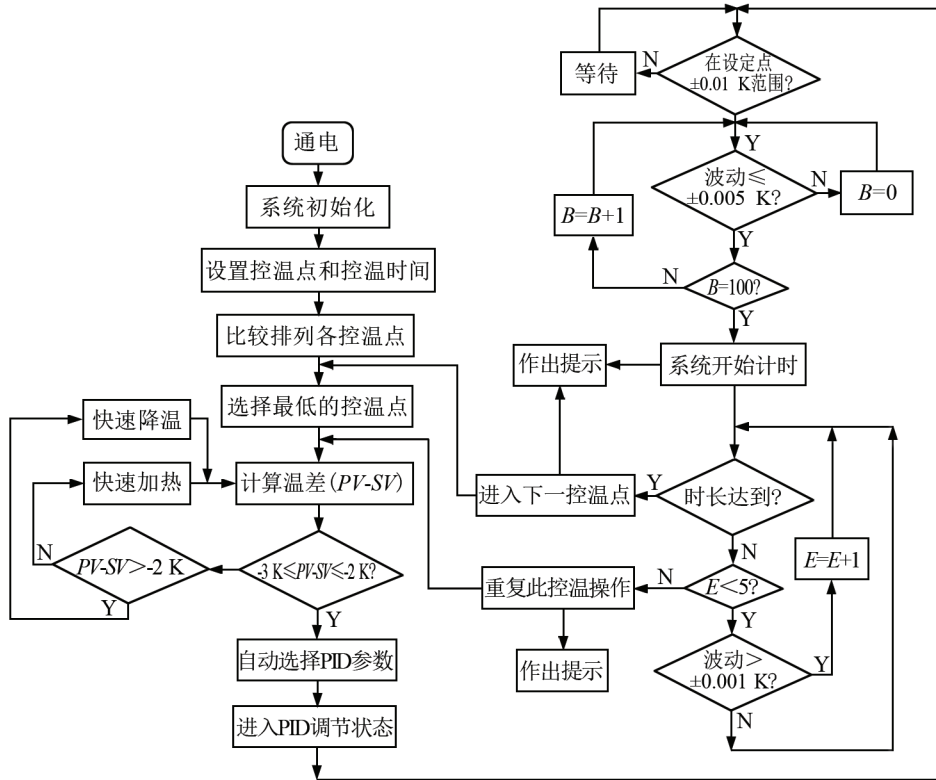


图3 系统控制流程图

Fig. 3 Flow chart of system control

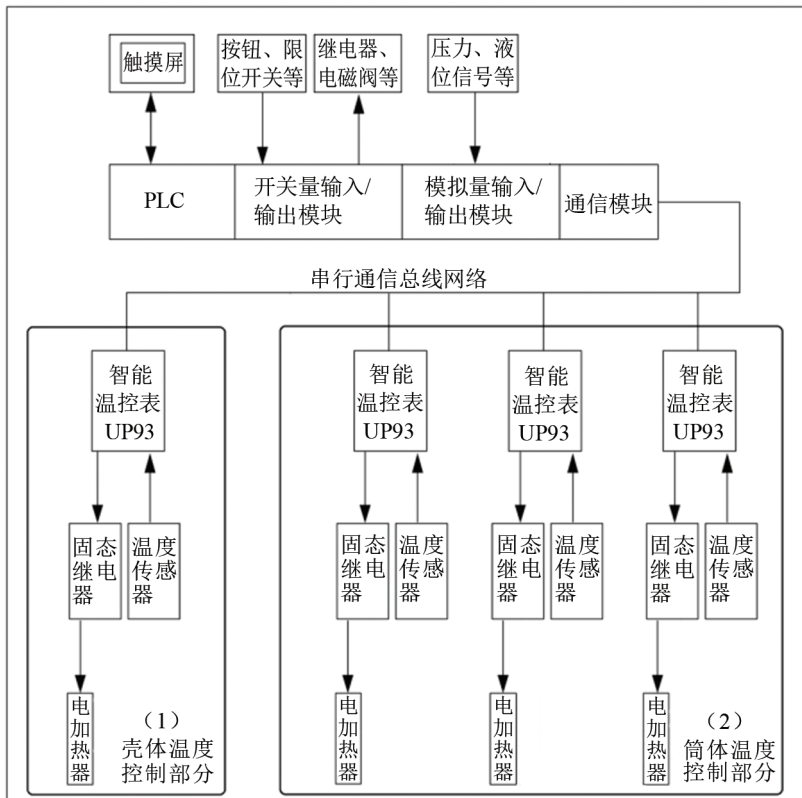


图4 温度控制流程图

Fig. 4 Flow chart of temperature control

采用在背部粘贴加热片的方式加热黑体。由于整个黑体辐射体的加热面积比较大,一段控温方式很难使加热区域的温度快速均匀上升,故将加热面划分为如图 5 所示的主加热区、附 1 加热区和附 2 加热区 3 个区域,采用三路加热电源并在每个加热区放置控温温度计,以保证温度的均匀性。

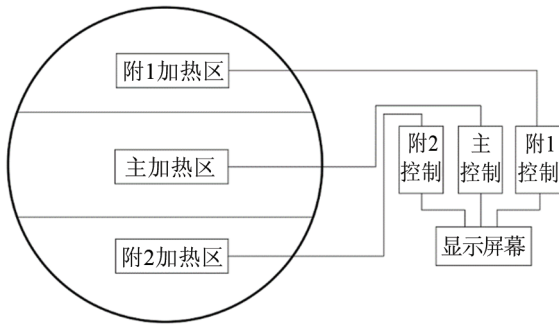


图 5 加热区域划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of heating area division

采用聚酰亚胺加热片加热。该加热片是薄膜状的加热材料,能可靠地与被加热物体良好接触,减小传热阻力;加热片导热效果好,在加热过程中不会损坏;同时加热片比较薄,方便包裹在保温材料

料内;加热片的辐射热损失很小,加热效率可达 90% 以上;此外该加热片可以连接高精度的温度控制器,达到预期精度的温度控制。

为进一步保证黑体面源的温度均匀性,在其外部包裹了热阻很大的保温材料。该保温材料表面采用玻纤铝箔防水层,可有效防水保温,内部为高密度橡塑吸热棉,热阻大,隔热效果好,增强了黑体面源温度均匀性。

#### 4 低温面源黑体温度稳定性及均匀性验证

##### 4.1 温度稳定性验证

通过上述热负荷计算和配套温控系统设计,研制出外场 1.2 m 口径低温面源黑体系统,并搭建了测试装置。将黑体辐射源温度分别设定为 263 K、273 K、283 K、293 K、303 K、313 K、323 K、333 K、343 K、353 K,每个温度测 10 次,每次持续 30 min,用辐射温度计连续测温 1 h。对面源黑体温度稳定性的测量验证结果如表 1 所列。由表 1 可知,在上述控温温度下,最大标准偏差为 0.073 K,最大极差为 0.190 K,面源黑体系统温度稳定在 0.190 K 以内,符合  $\pm 0.200$  K 的温度稳定性设计要求。

表 1 外场 1.2 m 口径低温面源黑体温度稳定性测量结果

Tab. 1 Temperature stability measurement results of 1.2 m diameter low temperature extended area blackbody

| 控温温度/K | 263    | 273    | 283    | 293    | 303    | 313    | 323    | 333    | 343    | 353    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 第 1 次  | 265.83 | 276.53 | 286.20 | 295.84 | 306.48 | 316.23 | 325.74 | 336.06 | 342.07 | 351.72 |
| 第 2 次  | 265.81 | 276.52 | 286.16 | 295.85 | 306.34 | 316.20 | 325.81 | 336.08 | 342.05 | 351.72 |
| 第 3 次  | 265.73 | 276.52 | 286.13 | 295.90 | 306.36 | 316.12 | 325.73 | 336.08 | 342.14 | 351.67 |
| 第 4 次  | 265.80 | 276.53 | 260.10 | 295.87 | 306.37 | 316.24 | 325.73 | 336.10 | 342.12 | 351.67 |
| 第 5 次  | 265.74 | 276.49 | 286.16 | 295.85 | 306.39 | 316.20 | 325.81 | 336.14 | 342.01 | 351.71 |
| 第 6 次  | 265.82 | 276.49 | 286.15 | 295.88 | 306.34 | 316.21 | 325.84 | 336.11 | 342.07 | 351.66 |
| 第 7 次  | 265.79 | 276.46 | 260.10 | 295.95 | 306.30 | 316.19 | 325.82 | 336.09 | 342.08 | 351.84 |
| 第 8 次  | 265.79 | 276.48 | 286.15 | 295.95 | 306.31 | 316.14 | 325.82 | 336.06 | 342.14 | 351.85 |
| 第 9 次  | 265.71 | 276.46 | 286.11 | 295.98 | 306.31 | 316.17 | 325.80 | 336.06 | 342.05 | 351.79 |
| 第 10 次 | 265.79 | 276.48 | 286.15 | 295.99 | 306.31 | 316.17 | 325.79 | 336.07 | 342.12 | 351.81 |
| 极差     | 0.12   | 0.070  | 0.100  | 0.150  | 0.080  | 0.120  | 0.110  | 0.080  | 0.090  | 0.190  |
| 标准偏差   | 0.04   | 0.028  | 0.032  | 0.057  | 0.029  | 0.038  | 0.036  | 0.026  | 0.036  | 0.073  |

注:极差为同一温度下,最大测量值与最小测量值之差。

##### 4.2 温度均匀性验证

将黑体辐射源温度分别设定为 263 K、273 K、283 K、293 K、303 K、313 K、323 K、333 K、343 K、353 K,每个温度保持 30 min,用温度计测量辐射体不

同位置的温度,共 9 个测温点,如图 6 所示。对面源黑体温度均匀性的测量验证结果如表 2 所列。由此可知,在上述控温温度下,面源黑体系统温度均匀性均在  $\pm 0.60$  K 以内,符合  $\pm 0.80$  K 的温度均匀性设计要求。

表2 外场 1.2 m 口径低温面源黑体温度均匀性试验结果

Tab. 2 Temperature uniformity measurement results of 1.2 m diameter low temperature extended area blackbody

| 控温温度/K | 263    | 273    | 283    | 293    | 303    | 313    | 323    | 333    | 343    | 353    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 测点 1   | 266.14 | 276.47 | 286.22 | 296.15 | 306.30 | 316.74 | 326.23 | 336.43 | 342.53 | 352.41 |
| 测点 2   | 266.26 | 276.35 | 286.14 | 296.06 | 306.58 | 316.62 | 326.20 | 336.44 | 342.72 | 352.53 |
| 测点 3   | 265.97 | 276.53 | 286.20 | 296.84 | 306.37 | 316.23 | 325.81 | 336.06 | 342.07 | 351.81 |
| 测点 4   | 266.37 | 276.50 | 286.06 | 295.72 | 307.00 | 316.20 | 325.74 | 335.83 | 342.15 | 351.93 |
| 测点 5   | 265.92 | 276.40 | 285.99 | 295.52 | 305.96 | 315.94 | 325.29 | 335.41 | 341.81 | 351.44 |
| 测点 6   | 266.46 | 276.85 | 286.40 | 295.98 | 306.60 | 316.60 | 326.10 | 336.45 | 342.22 | 351.96 |
| 测点 7   | 266.03 | 276.46 | 286.03 | 295.70 | 306.15 | 316.05 | 325.48 | 335.65 | 341.83 | 351.55 |
| 测点 8   | 266.41 | 276.52 | 286.14 | 296.14 | 306.69 | 316.63 | 326.28 | 336.49 | 342.63 | 352.51 |
| 测点 9   | 266.10 | 276.32 | 286.02 | 295.72 | 306.19 | 316.05 | 325.63 | 335.87 | 342.11 | 351.89 |
| 均匀性    | 0.49   | 0.53   | 0.41   | 0.63   | 0.73   | 0.80   | 0.99   | 1.08   | 0.91   | 1.09   |

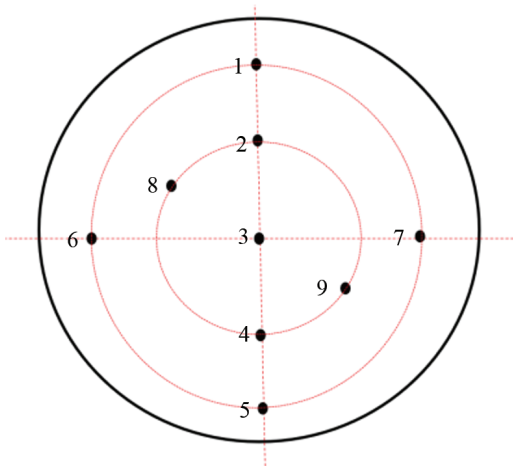


图6 辐射体上的测点分布示意图

Fig. 6 Distribution of temperature measuring points on radiator

## 5 结论

成功研制了用于外场试验的 1.2 m 口径低温面源黑体系统,计算的总热负荷为 12.56 kW,设计的配套制冷系统及其精密控温方案能够保证系统正常运行。经试验测试,面源黑体温度稳定性达到 $\pm 0.2$  K,温度均匀性达到 $\pm 0.60$  K,满足设计和实际使用要求。

### 参考文献:

[1] 杨军,咸迪,唐世浩.风云系列气象卫星最新进展及应用

[J]. 卫星应用,2018(11):8-14.

[2] 盛一成,顿雄,金伟其,等.星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述[J].红外与激光工程,2019,48(9):18-30.

[3] 包翱翔,曹盘勋.高精度低温面源黑体的研究[J].激光与红外,2018,48(8):1023-1026.

[4] 宋健,郝小鹏,丁雷,等.真空低背景红外高光谱亮温计量标准装置研制[J].红外与激光工程,2019,48(10):26-32.

[5] CARTER A C, DATLA R U, JUNG T M, et al. Low-background temperature calibration of infrared blackbodies[J]. Metrologia, 2006, 43(2):S46.

[6] 张岚,蔡静,路林锋.影响辐射测温用黑体辐射源应用的因素分析[J].计测技术,2020,40(4):1-4.

[7] 原遵东,郝小鹏,王景辉,等.黑体辐射源的多波长有效亮度温度校准和不同溯源方式特点分析[J].计量学报,2017,38(2):135-140.

[8] SAPRITSKY V I. Black-body radiometry[J]. Metrologia, 1995, 32(6):411.

[9] 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.

[10] 钱婧,孙胜利,于胜云,等.大型红外辐射面源的设计[J].红外与激光工程,2013,42(1):31-35.

[11] 徐新华,刘庆东.低负荷条件下水冷制冷机间歇运行分析[J].暖通空调,2020,50(3):7-13.

[12] 李丹.基载制冷机在冰蓄冷系统中运行模式研究[J].暖通空调,2020,50(2):53-56.