

# 国外大型太阳模拟器研制技术概述

杨林华, 李竝松

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 国外航天大国均建有大型太阳模拟器, 并在空间探测技术研究中发挥着重要作用。文章介绍了国外典型大型太阳模拟器, 给出了其达到的技术指标, 较系统地总结了国外大型太阳模拟器研制技术和经验, 如准直镜、灯室和光学装校等关键技术的设计思路 and 解决途径, 为我国研制大型太阳模拟器提供了技术借鉴和参考。

**关键词:** 太阳模拟器; 准直镜; 光学系统; 氙灯; 积分器

**中图分类号:** V524.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2009)02-0162-06

## 1 引言

太阳模拟器是模拟空间太阳辐照环境的设备, 主要用于航天器的热平衡试验、热控涂层特性试验和材料的老化试验, 能够较准确地模拟太阳辐照的准直性、均匀性和光谱特性, 对于空间外热流的模拟精度较高。其中大型太阳模拟器特别适用于外形复杂、伸展在外空间的大型天线和月球探测器以及新型号初样阶段的热平衡试验, 能够较真实地验证航天器的热模型, 为热模型的优化设计提供了依据。另外, 利用光屏效应, 太阳模拟器可以模拟空间外热流的瞬变, 从而取得较真实的瞬时试验数据; 同样借助运动模拟器还可以模拟太阳不同入射角辐射, 显示其良好的适应性。

太阳模拟器独特的优势, 使其在航天器热平衡试验中发挥重要作用, 是空间探测技术发展的基础设施。美国、欧洲、俄罗斯等航天大国均研制了大型太阳模拟器, 并广泛应用于航天器试验中。国外大型太阳模拟器的研制经历了光学系统从同轴系统到离轴系统、灯室由上百只较小功率氙灯组成等群到十几只大功率氙灯组成灯阵的演变过程, 在研制技术、使用技术等方面积累了大量的实际经验。

本文将介绍国外典型的大型太阳模拟器的结构特点、性能指标以及研制过程中对关键技术的设计思路 and 解决办法, 目的是较系统地吸取国外大型太阳模拟器研制的先进技术和实际经验, 为我国目前正在建设的 KM6 大型太阳模拟器所借鉴, 推动我国这项技术的发展。

设计思路 and 解决办法, 目的是较系统地吸取国外大型太阳模拟器研制的先进技术和实际经验, 为我国目前正在建设的 KM6 大型太阳模拟器所借鉴, 推动我国这项技术的发展。

## 2 美国大型太阳模拟器

### 2.1 概述

美国是最早开始研制大型太阳模拟器的国家, 初期研制的太阳模拟器辐照度较低, 辐照不均匀度也只能达到  $\pm 10\%$ 。20 世纪 60 年代初美国 JPL 在  $\phi 7600\text{ mm}$  的立式空间环模设备上建造了一套同轴太阳模拟器<sup>[1]</sup>: 主抛物面反射镜为铝镜, 由 324 块铝合金单元镜组成; 次抛物面反射镜为不锈钢镜, 由 19 块不锈钢单元镜组成; 灯室光源由 131 只 2.5 kW 的汞氙灯的灯群组成。该太阳模拟器的辐照面为  $\phi 6100\text{ mm}$ , 辐照度最高达到  $2152\text{ W/m}^2$ , 准直角为  $5.3^\circ$ , 面辐照不均匀度为  $\pm 10\%$ , 体辐照不均匀度为  $\pm 15\%$ , 可以看出该太阳模拟器的性能指标并不理想。

为了改善该太阳模拟器的性能, 1966 年对其进行了第一次技术改造, 即 SS15B 太阳模拟器<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示。改造后的太阳模拟器由离轴光学系统代替同轴光学系统, 离轴角很小 (只有  $14^\circ$ ), 输出辐射光垂直向下, 氙灯在垂直或与垂直方向成较小夹角的状态下点燃, 使得该太阳模拟器具备了较好的性能指标。

收稿日期: 2008-11-13; 修回日期: 2009-02-24

作者简介: 杨林华 (1962-), 女, 工程硕士, 研究员。主要从事卫星光学遥感器模拟空间环境下辐射定标技术和空间太阳辐照环境模拟技术研究。Email: ylh1357@yahoo.com.cn.

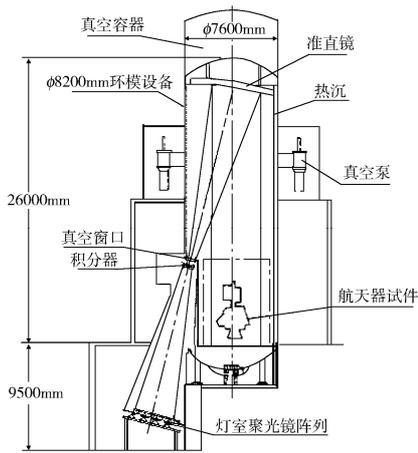


图1 美国 JPLSS15B 太阳模拟器  
Fig. 1 Schematic diagram of JPL SS15B solar simulator

## 2.2 SS15B 太阳模拟器关键技术

### 2.2.1 准直镜

为了提高太阳模拟器的适用性，总体方案设计要求的辐照面分别为  $\phi 6000\text{mm}$  和  $\phi 4600\text{mm}$ ，光学系统设计中以最大辐照面为设计输入，取准直镜为  $\phi 7000\text{mm}$ 、曲率半径为  $30000\text{mm}$ 。在结构上准直镜设计为一巨型单片反射镜，由铝合金材料制成，采用表面抛光、镀镍的加工工艺，它的加工、检验难度都很大，是研制过程中的关键技术之一。为了防止污染，该反射镜在工作时采用循环氮气冷却，温度在  $-73\sim+93^{\circ}\text{C}$  范围内可控。

### 2.2.2 灯室设计

立式的空间环模设备，使得氙灯可以在垂直或与垂直方向成较小夹角的状态下点燃，这是点燃氙灯的最佳状态。在当时，只有功率为  $5\text{ kW}$ 、 $6\text{ kW}$  短弧氙灯的成熟技术和使用经验，大功率短弧氙灯还是新生事物。灯室初期的设计比较保守，仍然选用功率  $5\text{ kW}$  的短弧氙灯，该方案需要聚光镜的数量众多，使得灯室结构庞大、费用昂贵，且安装调试的工作量巨大。而如果选用功率为  $20\text{ kW}$  的短弧氙灯，可大大减少聚光镜的数量，从而简化灯室结构、降低研制成本。尽管当时大功率氙灯用于太阳模拟器研制技术的经验还很少，但使用新型  $20\text{ kW}$  的短弧氙灯所带来的好处，还是深深地吸引了设计者，因此在设计  $5\text{ kW}$  氙灯方案的同时，开展了  $20\text{ kW}$  大功率氙灯的方案设计。为了获得可靠的设计依据，同时进行了  $20\text{ kW}$  氙灯的点燃试验及氙灯的输出能量的测量等。经过试验和计算，两个方案

都能达到 SS15B 太阳模拟器的技术要求，需要氙灯的数量如表 1 所示。

表 1 不同灯室方案氙灯数量  
Table 1 Xenon numbers in different schemes of lamp house

辐照面直径 /mm	5 kW 氙灯数量 /只	20 kW 氙灯数量 /只
$\phi 6000$	169	61
$\phi 4600$	91	37

通过对两个方案的综合比较，最终选用  $20\text{ kW}$  氙灯作为该太阳模拟器的光源，其最大的优点是减少了聚光镜数量，节省了灯室安装空间，降低了成本，有利于维修。 $20\text{ kW}$  氙灯在 SS15B 太阳模拟器的成功应用，揭开了大功率短弧氙灯应用于大型太阳模拟器研制技术的序幕。

### 2.2.3 光学装校

光学装校是太阳模拟器研制过程中的重要环节之一。通过光学装校，将各光学元件按照光学系统的结构参数进行安装、调试，必要时通过部分光学元件在理论计算位置的微小调节，优化太阳模拟器的性能指标。装校过程主要是通过氙灯离焦、积分器调节、准直镜旋转等方法使太阳模拟器的性能参数达到最佳技术状态。

在 SS15B 太阳模拟器装校过程中，主要是通过氙灯的离焦、准直镜的小角度偏转，改善准直镜的球差，提高太阳模拟器的辐照均匀度，并得到最佳的准直角。准直角的测量数据如图 2 所示，可以看出，优化后的准直角达到  $\pm 1^{\circ}$ ，优于  $\pm 2^{\circ}$  的设计指标。

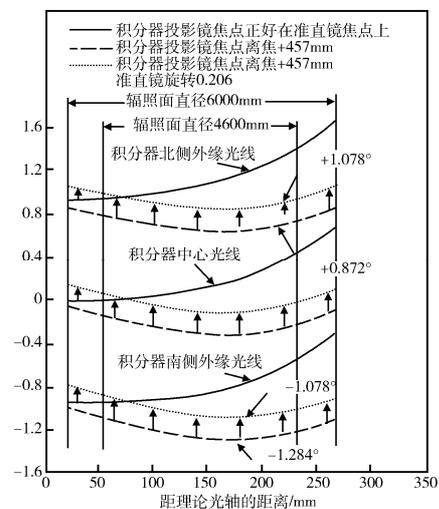


图 2 准直角测试数据曲线  
Fig. 2 Collimation angle vs. mirror location

调节过程如下:

- a. 积分器投影镜焦点正好在准直镜焦点上, 测得准直角为 $-0.912^{\circ}\sim+1.72^{\circ}$ ;
- b. 积分器投影镜焦点距准直镜焦点+457 mm, 测得准直角为 $-1.284^{\circ}\sim+0.872^{\circ}$ ;
- c. 积分器投影镜焦点距准直镜焦点+457 mm、准直镜旋转  $0.206^{\circ}$ , 测得准直角为 $\pm 1.078^{\circ}$ 。

### 2.3 小结

在 SS15B 太阳模拟器设计过程中, 进行了大量试验和优化设计工作。如 20 kW 氙灯的点燃试验, 为灯室方案选择提供了重要依据; 对聚光镜结构参数对传递到光学系统的能量和对太阳模拟器均匀性的影响等进行的一系列分析, 优化了椭球面聚光镜的参数, 提高了光学系统性能。该太阳模拟器的积分器选用 19 个元素镜的结构。

改造后的离轴光学系统取代了同轴光学系统, 大功率氙灯取代了小功率氙灯, 辐照面不均匀度达到 $\pm 4\%$ 、体不均匀度达到 $\pm 5\%$ , 光谱为滤光片修正后的氙灯光谱, 辐照度达到  $1453 \text{ W/m}^2$ 。

该太阳模拟器在 1972 年进行了第二次技术改造, 主要目的是提高辐照度, 新研制了一块准直镜和 2 个积分器。通过更换积分器, 可分别产生  $\phi 3400 \text{ mm}$  和  $\phi 2700 \text{ mm}$  的辐照面, 辐照度分别达到 8 个和 12 个太阳常数, 可进行航天器太阳辐照加速试验。

## 3 ESTEC 大型太阳模拟器

### 3.1 设备简介

欧空局 1983 年在 ESTEC 大型空间环模设备上建立了大型太阳模拟器, (如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

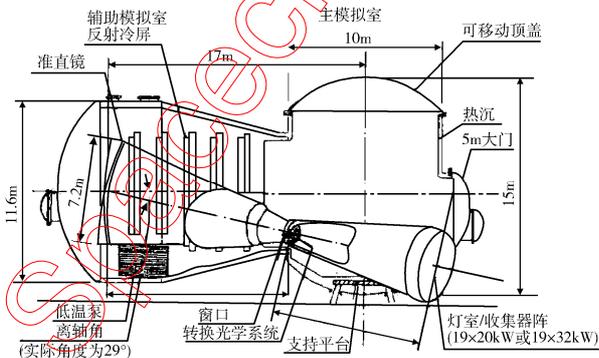


图 3 ESTEC 大型太阳模拟器  
Fig. 3 Layout of large solar simulator in ESTEC

大型空间环模设备的主容器为立式<sup>[4]</sup>, 直径为 10 000 mm, 高 15 000 mm。安装太阳模拟器的辅助容器为水平放置的锥形结构, 与主容器交界处的直径为 8 000 mm, 最粗的地方直径为 11 600 mm, 长 14 000 mm。该太阳模拟器建造过程中, 吸取了其他国家的研制经验和先进技术, 采用离轴准直光学系统, 输出光为水平方向, 离轴角为  $29^{\circ}$ , 准直角为  $\pm 1.9^{\circ}$ 。

### 3.2 关键技术解决

#### 3.2.1 大功率氙灯点燃方案

在该太阳模拟器总体方案设计时, 首先遇到氙灯是垂直点燃还是倾斜点燃的问题, 两种方案各有千秋很难取舍, 只好同时进行设计。图 4 显示为倾斜点燃氙灯, 当氙灯点燃时, 灯弧受地球引力吸引, 可能引起弧飘, 影响氙灯的稳定性和太阳模拟器的辐照均匀度, 甚至影响氙灯的正常点燃。当时该状态点燃大功率短弧氙灯的经验较少, 而且氙灯生产厂家也未提供类似的数据。图 5 显示为利用平面反射镜的折光实现氙灯的垂直点燃, 此时氙灯的安全性、灯弧的稳定性都有所保障。但由于平面反射镜处于辐照光较强的位置, 受热后易产生变形, 造成反射镜表面的能量衰减(大约损失 15%)而降低氙灯的效率。

通过对两种方案优缺点的比较, 最后选择倾斜点燃氙灯的方案, 19 只氙灯与水平面所成的倾角在  $2^{\circ}\sim 20^{\circ}$  之间。为了稳定灯弧, 设计拟采用磁场稳弧技术, 但在实际使用中灯弧的稳定性较好, 磁场稳弧技术并没有被启用, 太阳模拟器的不稳定性达到了  $\pm 0.5\%$  的高水平, 说明倾斜点燃氙灯对稳定性的影响较小。

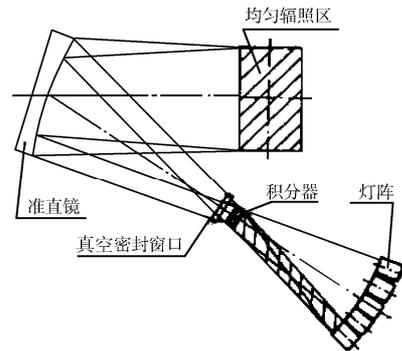


图 4 倾斜点燃氙灯  
Fig. 4 Highly inclined lamps

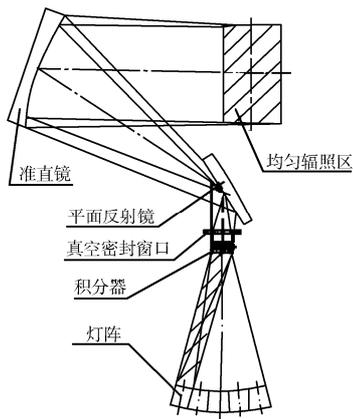


图5 垂直点燃氙灯

Fig. 5 Lamps close to vertical point

### 3.2.2 准直镜

准直镜为  $\phi 7\ 000\ \text{mm}$  的球面反射镜，由 121 块正六方单元反射镜拼接而成。单元镜由铝合金材料制成，有各自独立的调节机构，安装在准直镜框架上，采用铝合金基底镀镍、抛光的加工工艺。为了防止准直镜被污染，试验期间单元镜的温度控制在  $120^\circ\text{C}$ 。

拼接后的准直镜吊装在辅容器内的刚性支架上，支架设有旋转机构，准直镜组件在辅容器内可以旋转，为异位光学装校打下了基础，即可以在准直镜的旋转对称轴与辅容器对称轴同轴的情况下进行装校。这样可以利用辅容器和试验大厅的空间，在准直镜曲率中心，以自校准的原理完成光学装校。装校后准直镜整体旋转  $1/2$  离轴角即满足光学系统的要求。这种装校方法简单易行，不需要繁杂的工装，最大程度上降低了光学装校的难度和工作量。

### 3.2.3 灯室

灯室是一个密闭体，其内安装了 19 个灯单元。密闭体内充入循环氮气以冷却氙灯的泡壳，同时避免产生臭氧，如图 6 所示。灯单元由氙灯和椭球聚光镜组成（见图 7），氙灯根据不同辐照度需求选用 20 kW 或 32 kW 两种型号，采用高压去离子水冷却；聚光镜采用自来水冷却。

灯室的装校采用离线装校，即先将安装灯单元的球支座调整到光学系统所处的位置，再在氙灯单元专用装校装置上安装调节灯单元；灯单元调整完毕后从装校装置上卸下，直接安装到球支座的对接法兰上，用螺栓固定，不再进行装调。

积分器由 55 个元素镜组成，真空窗口直径为 1 080 mm、厚度为 80 mm，熔融石英材料。

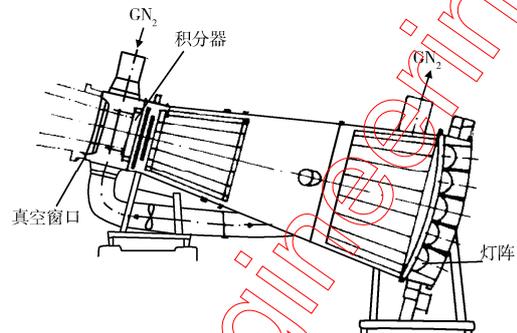


图6 灯室结构简图

Fig. 6 Lamp house with inclined lamp array

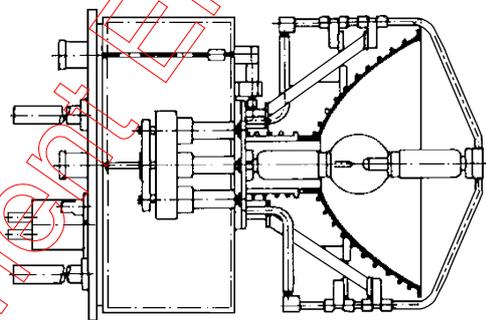


图7 氙灯单元结构简图

Fig. 7 Xenon lamp unit

## 3.3 小结

该太阳模拟器的均匀辐照(体)为  $\phi 6\ 000\ \text{mm} \times 5\ 000\ \text{mm}$ ，辐照面不均匀度为  $\pm 4\%$ 、体不均匀度为  $\pm 6\%$ ，光谱为未经过滤光的氙灯光谱，辐照度为  $1\ 625\ \text{W}/\text{m}^2$ 。它代表了当今大型太阳模拟器的先进水平，因此吸引了国际上众多的航天器进行试验。我国 KM6 太阳模拟器设计中主要参考了该太阳模拟器。

## 4 日本 NASDA 太阳模拟器<sup>[5]</sup>

1989 年，日本筑波空间中心在大型空间环境模拟器设备上配置了大型太阳模拟器。空间环境模拟器由两个水平放置的容器组成 T 字形。主容器直径 16 000 mm、长 23 000 mm，用于进行大型航天器的试验。辅容器直径 13 000 mm、长 16 000 mm，用于安装大型太阳模拟器。太阳模拟器输出辐射光为水平方向，由于有 ESTEC、IABG 倾斜点燃大功率氙灯的成功经验，因此在方案设计时直接选用水平点燃氙灯的方案，避免光学系统中引入平面反射镜。太阳模拟器总体结构如图 8 所示。

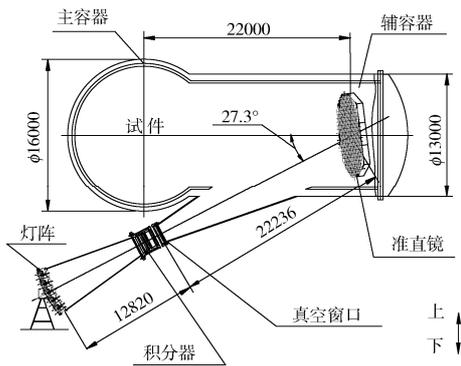


图8 日本太阳模拟器总体结构简图

Fig. 8 Schematic diagram of Japanese large solar simulator

该太阳模拟器采用离轴光学系统，离轴角为 $27.3^\circ$ ，准直角为 $\pm 1.5^\circ$ 。准直镜为球面镜，曲率半径为 $45\,000\text{ mm}$ ，由163块六方单元镜组成。准直镜的最大对角线长度约为 $8\,500\text{ mm}$ ，单元镜的最大对角线长度约为 $700\text{ mm}$ 。准直镜单元镜为碳纤维反射镜，具有重量轻、热变形小、易于温控等突出特点。灯室由19个氙灯单元组成，氙灯选用功率 $30\text{ kW}$ 的短弧线灯，水平点燃，去离子水冷却。氙灯单元的聚光镜为椭球反射镜。

真空密封石英窗口直径为 $1\,080\text{ mm}$ ，厚度为 $81\text{ mm}$ 。在窗口支撑结构设计时，对其结构、热设计进行了充分的分析优化，并经过试验验证。积分器由55个元素镜组成。

该太阳模拟器的辐照体积为 $\phi 6\,000\text{ mm} \times 6\,000\text{ mm}$ ，辐照面不均匀度为 $\pm 5\%$ ，辐照体不均匀度为 $\pm 10\%$ ，辐照度达到 $1\,758\text{ W/m}^2$ ，光谱为未经滤光的氙灯光谱。

### 5 俄罗斯大型太阳模拟器

俄罗斯作为航天大国建有两套大型太阳模拟器，其中1台安装在大型立式容器上，但输出光束为水平方向，如图9所示。共有12块准直镜，横向2排、纵向6层分布在容器的一侧；灯室、积分器、真空窗口安装在容器的另一侧。从灯室输入的光经准直镜准直后，水平辐照到容器中部的试件上。该太阳模拟器的光学系统不同于上面提到的太阳模拟器。上述太阳模拟器只有一套光学系统，形成一个大面积的均匀辐照面，而该套太阳模拟器则由多套太阳模拟器单元形成许多均匀的小辐照面，这些辐照面拼接后组成一个巨大的均匀辐照面。我国KM4大型太阳模拟器也采用该原理研制，由19

套同轴卡塞格林准直系统产生的均匀辐照面拼接而成。

俄罗斯该太阳模拟器的每一块准直镜与独立的灯室、积分器、真空窗口等组成太阳模拟器单元，选用离轴准直光学系统，共12套，它们的辐照面积拼接组成 $6\,000\text{ mm} \times 22\,000\text{ mm}$ 的巨大辐照面。如图10所示。每一块准直镜的面积为 $4\,000\text{ mm} \times 4\,000\text{ mm}$ ，由49块单元镜拼接组成，采用液氮冷却。

该太阳模拟器突出的特点是上面两层太阳模拟器单元的输出光束经过平面反射镜折光后，垂直向下辐射，可同时辐照试件相互垂直的两个面，增加了试验的功能和灵活性。其辐照度为 $2\,030\text{ W/m}^2$ ，辐照不稳定度为 $\pm 1\%$ ，辐照不均匀度为 $\pm 15\%$ 。

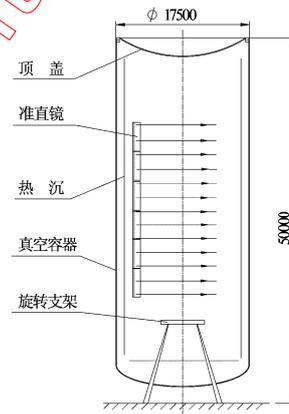


图9 俄罗斯大型太阳模拟器简图

Fig. 9 Schematic diagram of Russian large solar simulator

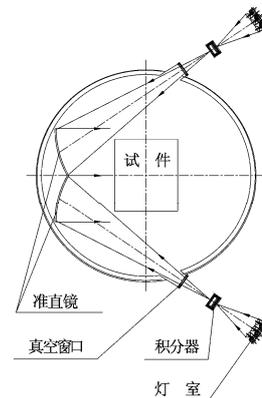


图10 光学系统水平截面图

Fig. 10 Vertical view of optical system

另一台在BK600/300设备上配备的太阳模拟器，其辐照面积为 $3\,000\text{ mm} \times 8\,000\text{ mm}$ ，辐照度最高可达到 $2\,970\text{ W/m}^2$ ，不稳定度为 $\pm 1\%$ ，辐照不均匀度 $\pm 15\%$ 。从这些性能参数可以看出，俄罗斯

研制的大型太阳模拟器辐照面积很大,但辐照均匀性较差。

## 6 其他国家太阳模拟器

### 6.1 德国 IABG 太阳模拟器

德国在 1983 年建成的大型太阳模拟器,采用离轴准直光学系统,离轴角  $27^\circ$ ,辐照面  $\phi 3\ 600\text{ mm}$ ,面辐照不均匀度  $\pm 4\%$ ,体辐照不均匀度  $\pm 6\%$ ,光谱为未经过滤光的氙灯光谱,辐照度达到  $1\ 895\text{ W/m}^2$ 。氙灯选择倾斜点燃的方式,与水平面所成倾角范围在  $15^\circ \sim 33^\circ$  之间。

该太阳模拟器后来做了两处改进:把积分器单元镜由圆形改为矩形;准直镜单元镜由 61 块六方镜增加到 84 块,扩大了准直镜口径,得到  $3\ 050\text{ mm} \times 4\ 500\text{ mm}$  的辐照面积。这两处改进增加了辐照面积并改变了辐照面形状,从而增加了潜在的客户,每年大约进行 2~3 次试验。

### 6.2 法国 INTESPACE 太阳模拟器

法国 INTESPACE 在 20 世纪 70 年代建立了大型太阳模拟器,率先在离轴太阳模拟器中采用多块拼接式准直镜技术,降低了准直镜的加工难度和成本,推动了离轴式大型太阳模拟器研制技术的发展。

INTESPACE 太阳模拟器的辐照面积为  $\phi 3\ 800\text{ mm}$ ,准直角为  $\pm 1.5^\circ$ 。光源由 34 只  $5\text{ kW}$  氙灯组成,辐照度达到  $1\ 894\text{ W/m}^2$ ,面不均匀度  $\pm 5\%$ 、体不均匀度  $\pm 8\%$ ,辐照不稳定性  $\pm 0.5\%$ ,该太阳模拟器目前仍在使用中。

### 6.3 印度大型太阳模拟器

印度在 1991 年投入使用的大型空间环境模拟器 (LSSC) 也配备了太阳模拟器。该太阳模拟器的辐照不均匀度为  $\pm 4\%$ ,使用 11 只  $20\text{ kW}$  氙灯时

辐照面达到  $\phi 4\ 000\text{ mm}$ ;使用 14 只氙灯时,辐照面达到  $\phi 4\ 500\text{ mm}$ 。

## 7 结束语

从国外大型太阳模拟器的研制技术可以看出:离轴光学系统是优质大型太阳模拟器的基本保证;大功率短弧氙灯应用到太阳模拟器研制中,减少了氙灯、聚光镜的数量,降低了研制成本;水平或倾斜点燃技术趋于成熟,达到了较好的性能指标。

随着我国航天技术的发展,利用大型太阳模拟器进行航天器热平衡试验的需求越来越迫切。多年来对太阳模拟器技术的研究以及国外大型太阳模拟器研制技术为我们提供的宝贵经验,使我们掌握了关键技术及解决途径;新技术的发展也为大型太阳模拟器创造了有利条件,如大功率程控电源将简化电源系统,提高其运行可靠性,降低运行成本,我国已具备了自主研制大型太阳模拟器的能力。北京卫星环境工程研究所新完成的 KFTA 太阳模拟器采用  $10\text{ kW}$  的短弧氙灯水平点燃方式,其性能达到了优良。目前我国已跻身于航天大国,但并没有大型太阳模拟器服务于型号,因此应尽快研制我国的大型太阳模拟器,提升型号研制的保障能力。

### 参考文献 (References)

- [1] 黄本诚. 空间模拟器设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994
- [2] Eddy R, Design and construction of JPL SSL5B solar simulator[R]. JPL internal document, 1968-01
- [3] Brinkman P W. Main characteristics of the large space simulator (Lss) at ESA/ESTEC, LLS (II)[C]//13<sup>th</sup> SSC
- [4] Brinkman P W. The actual performance of the large space simulator (LSS) at ESA/ESTEC and the validation of its design, LLS(I)[C]//13<sup>th</sup> SSC
- [5] Naukamura Y, Tomita T, et al. 13-m diameter space simulation test facility[C]. ESA SP-304, 1990-09: 107-112