

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1680

QJ 20678.4—2018

空间环境模拟器研制要求 第4部分：太阳模拟器

Development requirements for space environment simulator —
Part 4: Solar simulator

2018—01—18 发布

2018—05—01 实施

国家国防科技工业局 发布

前 言

QJ 20678《空间环境模拟器研制要求》分为六个部分：

- 第 1 部分：真空系统；
- 第 2 部分：低温系统；
- 第 3 部分：外热流模拟系统；
- 第 4 部分：太阳模拟器；
- 第 5 部分：控制与监测系统；
- 第 6 部分：系统联试。

本部分为 QJ 20678 的第 4 部分。

本部分的附录 A 为规范性附录，附录 B 为资料性附录。

本部分由中国航天科技集团有限公司提出。

本部分由中国航天标准化研究所归口。

本部分起草单位：中国航天科技集团有限公司第五研究院总装与环境工程部、中国航天标准化研究所。

本部分主要起草人：蒋山平、杨林华、李竑松、向艳红、张鹏嵩、张博伦、王丹艺、泉浩芳。

空间环境模拟器研制要求 第4部分：太阳模拟器

1 范围

本部分规定了空间环境模拟器太阳模拟器的系统组成、性能要求、设计要求、工艺要求、光学装校要求、光学性能测量要求、安全要求和验收交付要求。

本部分适用于航天器热平衡试验用太阳模拟器的研制，其他用于模拟太阳辐照的太阳模拟器的研制可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本部分，然而，鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本部分。

QJ 1955 航天器空间环境术语

3 术语和定义

QJ 1955 确立的术语和定义适用于本部分。

4 研制目标

太阳模拟器的研制目标如下：

- a) 在热平衡试验中，采用太阳模拟器模拟的辐照环境应满足热平衡试验工况要求；
- b) 模拟太阳辐照的辐照度、辐照不均匀度、辐照不稳定性、光谱分布和光束准直角等性能指标应满足试验要求；
- c) 保证太阳模拟器使用的安全性、可靠性和可维修性。

5 工作原理及系统组成

太阳模拟器主要通过选用光谱分布接近太阳光谱的光源，将电能转换为光通量，通过合适的准直光学系统，将光源发出的光线经过汇聚、匀光，再准直投射到试验面上，形成模拟太阳辐照特性的准直光束，从而达到太阳辐照模拟的目的。

太阳模拟器通常由光机分系统、冷却分系统和控制分系统组成（见图1和图2），具体组成及功能如下：

- a) 光机分系统由灯室组件、窗口镜组件和准直镜组件组成：
 - 1) 灯室组件用于提供满足能量要求的均匀发散光束，灯室组件通常包括聚光镜、遮光筒、水冷挡板和光学积分器等部件；
 - 2) 窗口镜组件用于将辐照光束透射进入真空容器内，并起到真空密封作用；
 - 3) 准直镜组件用于将由灯室组件出射的光束进行准直，并平行出射到试验空间上。
- b) 冷却分系统用于太阳模拟器的冷却。
- c) 控制分系统用于太阳模拟器的具体操作和控制等。

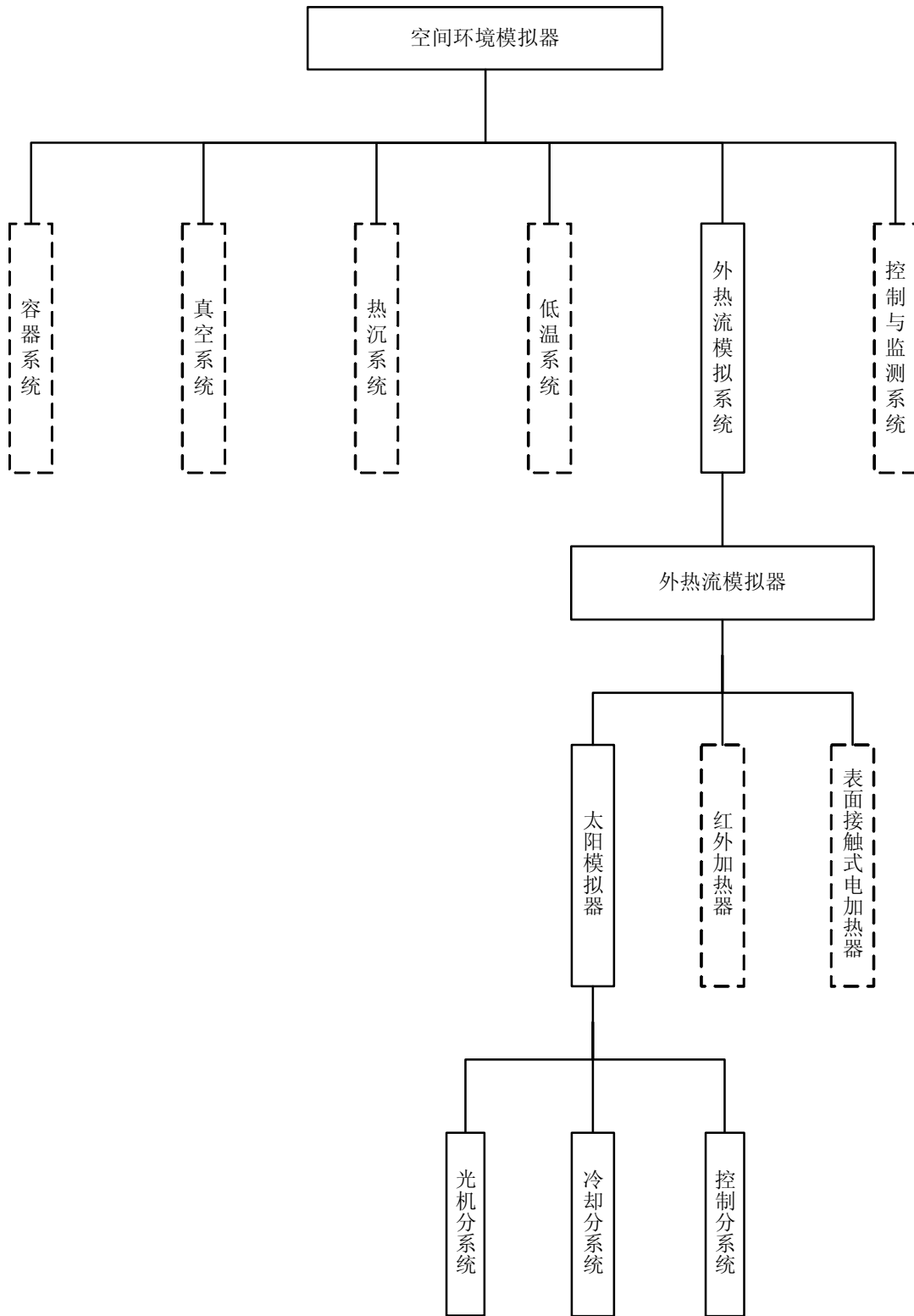
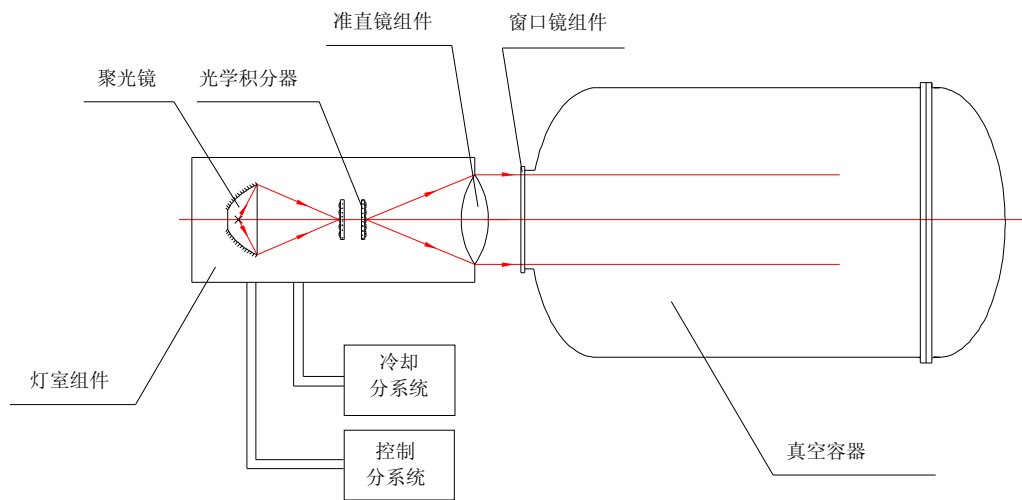
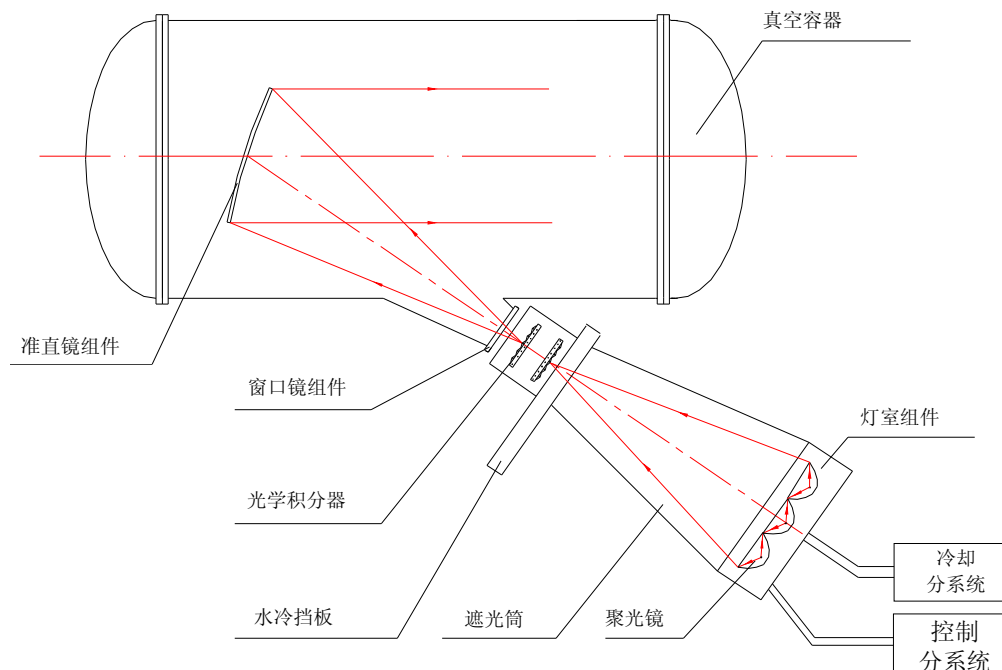


图 1 太阳模拟器系统组成图



a) 同轴准直型



b) 离轴准直型

图2 典型太阳模拟器组成示意图

6 性能要求

太阳模拟器的性能指标主要包含如下：

- 有效辐照面积：在参考辐照面附近，通过测量确定的满足太阳模拟器设计指标的辐照面积。通常用辐照面直径来表示。
- 辐照度：太阳模拟器出射的总辐照度，通常为在均匀辐照面、垂直于太阳辐射光的单位面积上，单位时间内接收的太阳辐射量。通常，辐照度在 $500 \text{ W/m}^2 \sim 1700 \text{ W/m}^2$ 范围内变化并连续可调。
- 辐照不均匀度：辐照不均匀度表征辐照度随空间位置的变化，通常分为面辐照不均匀度和体辐照不均匀度。通常，面辐照不均匀度应优于 $\pm 5\%$ ，体辐照不均匀度应优于 $\pm 6\%$ 。辐照不均匀

度的计算见附录 A 中 A.1 要求。

- d) 辐照不稳定性：辐照不稳定性表征辐照度随时间的变化。通常，1 h 内的辐照不稳定性应优于 $\pm 1\%$ 。辐照不稳定度的计算见附录 A 中 A.2 要求。
- e) 光谱分布：光谱分布表征与标准太阳光谱的匹配精度。光谱分布通常要求为氙灯光谱或参见附录 B 要求。
- f) 光束准直角：太阳模拟器的光束准直角应优于 $\pm 2^\circ$ 。其中，用于精确模拟太阳准直性的高准直太阳模拟的光束准直角一般应为 $\pm 16'$ 。

7 设计要求

7.1 总体要求

太阳模拟器应按照项目任务书要求或实际试验需求进行设计，一般包括如下内容：

- a) 总体设计：太阳模拟器的总体布局、光学系统形式等；
- b) 光学设计：太阳模拟器各光学元件的初步设计和优化设计；
- c) 光机分系统设计：太阳模拟器各光学组件的光机结构设计；
- d) 冷却分系统设计：太阳模拟器的风冷和水冷设计；
- e) 控制分系统设计：太阳模拟器的供电、控制等设计。

7.2 总体设计

太阳模拟器的总体设计要求如下：

- a) 应根据试验需求、技术指标和设备放置场地等情况，来确定太阳模拟器的基本布局方式。根据太阳光线的入射方向，一般可选择水平出射和垂直出射两种布局方式；
- b) 通常根据太阳模拟器有效辐照面积的大小来选择光学系统形式：
 - 1) 辐照面直径不大于 $\Phi 300\text{ mm}$ 的太阳模拟器一般选择同轴准直型光学系统；
 - 2) 辐照面直径大于 $\Phi 300\text{ mm}$ 的太阳模拟器一般选择离轴准直型光学系统。

7.3 光学设计

7.3.1 初步设计

根据太阳模拟器的主要性能指标来设计光源、聚光镜、滤光片、光学积分器、窗口镜和准直镜等光学元件的初步参数。其中：

- a) 光源一般选用短弧氙灯作为太阳模拟器的光源。根据太阳模拟器的有效辐照面积和辐照度的要求、结合太阳模拟器光学系统能量总利用率来计算所需氙灯总功率，进而确定氙灯数量和单只氙灯功率；根据光源数量来合理设计光源布局。
- b) 聚光镜一般选用椭球聚光镜。椭球聚光镜的第一焦距应根据氙灯尺寸和机械调节机构情况进行确定，聚光镜的近轴成像倍率应根据聚光镜的聚光效率和聚光镜第二焦面处的辐照分布来综合确定。
- c) 滤光片应根据太阳模拟器的光谱分布要求进行设计，从而选择合适的滤光膜层。对于要求直接采用氙灯光谱的大型太阳模拟器，可以不采用滤光片。
- d) 光学积分器由场镜组和投影镜组组成。其中，场镜组和投影镜组由多个元素镜组成。场镜组元素镜和投影镜组元素镜应呈一一对应关系，元素镜的数量应根据有效辐照面积和辐照不均匀度

指标综合确定。

- e) 窗口镜通常采用圆形石英玻璃，窗口的厚径比通常选用 1:10。
- f) 通常根据太阳模拟器有效辐照面积的大小来选择准直镜的形式：
 - 1) 辐照面直径不大于 $\Phi 300$ mm 的太阳模拟器的准直镜一般选择玻璃透镜；
 - 2) 辐照面直径大于 $\Phi 300$ mm 的太阳模拟器的准直镜一般选择金属球面反射镜。根据准直镜面积大小，可以采用单块金属球面反射镜或多块金属球面反射镜拼接而成。
- g) 在进行光路设计时，氙灯氙弧应位于聚光镜第一焦点位置，光学积分器的场镜组应位于聚光镜第二焦面处，光学积分器投影镜组应位于准直镜焦点上。

7.3.2 优化设计

在确定太阳模拟器各光学元件的基本参数后，应采用光学设计软件进行优化设计，要求如下：

- a) 首先依据氙灯配光曲线在光学设计软件中进行光源建模，再完成各光学元件的建模，然后采用光线追迹算法，完成光学系统的辐照度和辐照不均匀度计算；
- b) 在满足辐照度的前提下，应该以提高辐照均匀性和提高光学系统能量利用率为优化目标，以各光学元件的光学参数和相关位置关系为变量进行优化设计，最后获得满足总体技术指标的最优化光学参数，完成所有光学元件参数设计。

7.4 光机分系统设计

根据光学设计中各光学元件的最后参数来设计光机分系统，一般包括如下内容：

- a) 采用多个光源时的聚光镜阵列设计，应将所有聚光镜的主光轴指向光学积分器场镜组的中心位置；
- b) 灯室组件的设计，含氙灯调节机构、遮光筒、水冷挡板、光学积分器的机械结构设计；其中氙灯调节机构和光学积分器机械结构设计均要考虑后期光学装校中的位置调节的需求；遮光筒需要考虑光线在遮光筒内部的杂散光设计；
- c) 准直镜组件结构设计，包括拼接式准直镜的拼接方式设计等；准直镜组件结构设计需要考虑在后期光学装校中的位置调节的需求。

7.5 冷却分系统设计

冷却分系统主要包括水冷系统和风冷系统，其设计要求如下：

- a) 水冷挡板、遮光筒和光学积分器框架等通常采用水冷系统进行冷却；
- b) 氙灯、聚光镜、光学积分器场镜组和投影镜组等通常采用风冷系统进行冷却；
- c) 风冷系统应该满足氙灯泡壳处的风速要求；
- d) 风冷系统可以采用纯净空气或氮气作为气源，需要满足最大用气量、压力和洁净度的要求；
- e) 水冷系统需要满足用水设备的流量、温度、洁净度的要求。

7.6 控制分系统设计

太阳模拟器控制分系统的设计要求如下：

- a) 根据太阳模拟器光源总功率，确认电源总功率和电源数量；
- b) 氙灯电源的输出电流稳定度和输出电流控制精度应符合太阳模拟器辐照稳定性的需求；
- c) 应满足太阳模拟器辐照度实时监测要求；
- d) 应满足太阳模拟器准直镜组件的控温和温度测量要求；

- e) 应满足太阳模拟器水冷挡板的控制要求;
- f) 应满足太阳模拟器冷却分系统的控制要求;
- g) 应满足太阳模拟器远程控制, 数据测量、存储, 运行状态监控和自动报警等功能要求。

8 工艺要求

太阳模拟器光机分系统的加工应满足如下要求:

- a) 聚光镜可采用金属镜, 主要采用铝基底传统抛光工艺或电镀镍加工工艺, 最后镀 Al 反射膜和 SiO₂ 保护膜。通常要求聚光镜反射率不小于 86%。
- b) 光学积分器通常采用光胶工艺将元素镜固定在玻璃平板基底上。对于大尺寸光学积分器, 应将元素镜固定在金属镜框上, 光学积分器各光学元件透过率不小于 92%。
- c) 光学窗口的透过率不小于 92%。
- d) 金属准直镜的加工工艺流程为毛坯粗加工、面型精加工、镀镍、光学抛光、镀金属反射膜和保护膜。其中, 金属反射膜通常采用 Al 膜, 保护膜采用 SiO₂ 膜。通常要求准直镜反射率不小于 86%。
- e) 当光学积分器框架采用水冷方式制冷时, 在冷却管路加工完成后需要通水进行打压试验, 在 0.5 MPa 水压下保持时间不小于 30 min, 要求冷却管路无泄漏。

9 光学装校要求

在太阳模拟器各分系统研制完成后, 应以真空容器的锥筒法兰面为基准, 开始进行光学装校。光学装校基本步骤及要求如下(见图 3):

- a) 利用球面反射镜的自准直原理, 进行准直镜组件的光学装校。对于拼接型准直镜, 需要调整面形、光轴方向和位置直到满足光学设计要求。
- b) 进行聚光镜的装校。根据设计值安装聚光聚组件位置, 并调节氙灯位置, 使得氙灯在聚光镜第二焦面上的能量分布满足设计要求。
- c) 进行光学积分器装校和窗口镜组件装校。其中, 光学积分器的位置和角度, 以及光学积分器场镜组和投影镜组中各对应元素镜的同轴度和安装平行度应满足设计要求。
- d) 进行系统联合调试。根据光学测量结果指导进行系统装校, 直至所有光学性能满足设计要求, 完成系统联合调试。

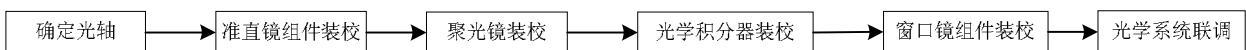


图 3 光学装校基本步骤

10 光学性能测量要求

在完成太阳模拟器光学装校后, 进行太阳模拟器的辐照不稳定性、辐照不均匀度、辐照度、光谱分布和光束准直角的测量。

在大气环境条件下太阳模拟器光学参数测量, 一般要求和顺序如下(见图 4):

- a) 采用硅光电池探测器、数据采集仪测量辐照不稳定性, 测量不确定度不大于 1%;
- b) 采用硅光电池探测器、三维移动机构、数据采集仪测量辐照不均匀度, 测量不确定度不大于 1%;

- c) 采用绝对辐射计测量辐照度，测量不确定度不大于 2%；
- d) 采用光谱辐射计测量光谱分布，测量不确定度不大于 5%；
- e) 采用准直角仪测量光束准直角，测量不确定度不大于 1'。

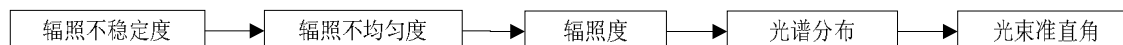


图 4 光学参数测量顺序

11 安全要求

太阳模拟器研制过程的安全性要求如下：

- a) 操作人员应穿工作服、戴口罩和手套，并戴防紫外、防强光的眼镜；
- b) 使用大功率氙灯应采取防爆措施；
- c) 太阳模拟器辐照面的温度较高，应采取高温防护措施；
- d) 采用氮气冷却时，需要考虑氮气泄露危险，应安装氧浓度监测仪；
- e) 当采用空气冷却时，需要考虑臭氧防护措施。

12 交付验收要求

太阳模拟器的交付验收要求如下：

- a) 在完成太阳模拟光学测量并满足技术指标要求后，可进行太阳模拟器的验收交付；
- b) 太阳模拟器的验收内容应包括太阳模拟器各分系统功能检查和太阳模拟器光学性能测量（见第 10 章的规定）；
- c) 当太阳模拟器各分系统工作正常，各项光学性能参数满足技术指标要求时，可认定太阳模拟器验收合格，具备交付条件。

附录 A

(规范性附录)

辐照不均匀度和辐照不稳定性计算公式

A.1 辐照不均匀度计算公式

辐照不均匀度按公式 (A.1) 计算。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_p = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_p$ ——参考辐照面 (或体) 上的辐照不均匀度;

E_{\max} ——参考辐照面 (或体) 上的最大辐照度的数值, 单位为瓦每平方米 (W/m^2);

E_{\min} ——参考辐照面 (或体) 上的最小辐照度的数值, 单位为瓦每平方米 (W/m^2)。

A.2 辐照不稳定性计算公式

辐照不稳定性按公式 (A.2) 计算。

$$\left.\frac{\Delta E}{E}\right|_{t=1} = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$\left.\frac{\Delta E}{E}\right|_{t=1}$ ——1h 内的辐照不稳定性。

附 录 B
(资料性附录)

太阳模拟器光谱匹配要求

辐照度比值 R 是在表 B.1 规定的测量波段间隔内,太阳模拟器的实测辐照度与大气质量为零(AM0)时,波长区间太阳光的辐照度之比值。在每个波长区间内,应有三分之二的波段数的 R 值在表 B.1 规定的范围内。

表 B.1 辐照度比值 R 与测量波段的对应关系

波长区间 μm	测量波段间隔 μm	波段数	AM0 时区间内的辐照度 W/m^2	辐照度比值 R
0.25~0.4	0.01	15	115	0.6~1.4
0.4~0.7	0.01	30	516	0.8~1.2
0.7~1.0	0.05	6	306	0.6~1.4
1.0~2.5	0.1	15	363	0.6~1.4
合计	—	66	1300	—

中华人民共和国航天行业标准
空间环境模拟器研制要求
第 4 部分：太阳模拟器

QJ 20678.4—2018

*

中国航天标准化研究所出版
北京市丰台区小屯路 89 号
邮政编码：100071
中国航天标准化研究所
印务发行部印刷、发行

版权专有 不得翻印

*

2018 年 5 月出版
定价：24 元