# 《气象用太阳模拟器校准规范》编制说明

一、任务来源

经全国气象专用计量器具计量技术委员会向国家市场监督管理总局申报，国家市场监督管理总局于2022年7月印发《2022年国家计量技术规范项目制定、修订计划》，正式批准《气象用太阳模拟器校准规范》（以下简称本规范）立项编制。本规范由国家气象计量站、长春理工大学、福建省计量科学研究院和德雷射科（廊坊）科技有限公司等单位联合起草，由全国气象专用计量器具计量技术委员会归口管理。

二、编制此规范的目的和意义

太阳辐射是地球-大气系统的关键驱动能量，是地球生态气候形成和变迁的重要影响因素，是科学开发太阳能资源、助力实现碳达峰碳中和的重要举措，为此，准确测量太阳辐射已经成为气象观测的重要工作。目前，气象行业测量的太阳辐射包括太阳总辐射、直接辐射、散射辐射、反射辐射、长波辐射和净全辐射等，主要测量仪器包括总辐射表、直接辐射表、长波辐射表和净全辐射表等，气象用太阳模拟器是用于测试太阳总辐射表和直接辐射表灵敏度、方向响应、非线性、温度响应的重要仪器，校准气象用太阳模拟器计量性能，对于保证总辐射表和直接辐射表等气象辐射观测仪器的测量性能具有重要价值。

为满足国内气象行业辐射测量仪器的计量需求，制定《气象用太阳模拟器校准规范》，旨在为检测气象用太阳模拟器辐照度不稳定度、辐照度不均匀度等计量特性提供科学、规范且适用的方法，使气象用太阳模拟器计量特性满足总辐射表和直接辐射表等气象辐射测量仪器的测试需求，为检测总辐射表和直接辐射表等气象辐射测量仪器提供准确、可靠的测试仪器。

目前，国内现行相关标准有GB/T 33707—2017《气象太阳模拟器》，主要对气象太阳模拟器的组成、技术要求、试验方法、检验规则、标识、包装、运输和贮存做出规定。现行计量技术规范有JJF 1615—2017《太阳模拟器校准规范》，它是参照国际标准IEC 60904-9：2007《光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求》（Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements）制定的，它主要适用于太阳光伏和其他行业用稳态太阳模拟器的性能校准，与气象用太阳模拟器不匹配。同时，JJF 1615—2017《太阳模拟器校准规范》使用的检测器件是光电型硅探测器或单晶硅太阳电池片，响应速度较快，波长介于400 nm~1100 nm之间，而气象太阳模拟器主要测试的是热电型辐射表，响应速度相对较慢，波长介于300 nm~2500 nm之间这使得对太阳模拟器输出辐照度的不稳定度、不均匀度和光谱匹配度等测试结果有很大的差异。因此，为了更好地测试气象太阳模拟器的计量性能，确保其满足气象辐射测量仪器的测试需求，制定《气象用太阳模拟器校准规范》是十分有意义的。

1. 编制《气象用太阳模拟器校准规范》的依据

本规范依据JJF 1071―2010《国家计量校准规范编写规则》编写，规范中的通用计量术语符合JJF 1001―2011《通用计量术语及定义》要求，附录中给出的校准不确定度评定示例依据JJF 1059.1―2012《测量不确定度评定与表示》编制。

气象用太阳模拟器的结构与原理依据GB/T 33707—2017《气象太阳模拟器》编制。

太阳辐射相关术语和计量单位依据《GB/T 31163―2017 太阳能资源术语》编制。

太阳辐射标准光谱依据ISO 9845―1: 2022 太阳能—地面不同接收条件下的标准太阳光谱辐照度—第1部分：大气质量1.5的法向直接日射辐照度和半球向日射辐照度（Solar energy — Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions — Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5）进行计算，气象用太阳模拟器的光谱匹配度校准主要以ISO 9845―1: 2022为参考，是否光谱匹配的技术指标是依据GB/T 33707—2017《气象太阳模拟器》给出的。

气象用太阳模拟器的辐照度不均匀度和辐照度不稳定度校准方法则是参考了GB/T 33707—2017《气象太阳模拟器》、JJF 1615—2017《太阳模拟器校准规范》和IEC 60904―9: 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求 （Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements），检测标准器依据ISO 9060—2018 太阳能 总辐射表和直接辐射表的规格和分类（ISO 9060: 2018 Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation）选择二等标准总辐射表。在上述技术文件的基础上，结合气象用太阳模拟器的特点，重新编制了测试流程和检测点等。

1. 任务分工

本规范主要起草人包括：崇伟、丁蕾、刘石、张国玉、何翔、林慧君，其分工如下：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 单位 | 职称 | 分工 |
| 崇伟 | 中国气象局气象探测中心 | 高级工程师 | 负责规范总体编写，提出规范结构、主要内容，完成初稿、编制说明、征求意见稿的编写工作等，负责相关技术指标的试验和分析，协调工作组成员工作 |
| 丁蕾 | 高级工程师 | 负责提出规范结构和主要内容，开展相关技术指标的试验和分析 |
| 刘石 | 长春理工大学 | 副教授 |
| 张国玉 | 研究员 | 参与规范主要内容起草，对规范编写提供技术支持，修改初稿和征求意见稿负，参与规范起草过程中的讨论，对规范结构和内容提出意见 |
| 何翔 | 福建省计量科学研究院 | 工程师 |
| 林慧君 | 德雷射科（廊坊）科技有限公司 | 工程师 |

1. 主要编制过程

编制的主要工作过程如下：

（1）成立起草组、召开启动部署会、任务分工、制定工作计划

2023年1-2月，召开了规范编制工作部署会，成立了编写组，明确了编写组人员分工任务，确定了规范编制原则和总体思路，制定工作进度计划。

（2）组织调研、研讨咨询、确定技术路线

2023年3月-4月，完成规范编写的前期准备工作，研究学习国内外相关规范、标准、指南等文件，调查国内外气象用太阳模拟器技术现状，详细研讨目前气象用太阳模拟器技术参数，广泛征求各方意见，初步确定本规范具体技术参数、校准方法思路和内容。

（3）技术参数的试验、分析和验证，编写征求意见稿

2023年5月-6月，编写组根据前期调研的情况，针对气象用太阳模拟器技术特点和使用需求，结合长期以来对气象用太阳模拟器的测试和使用经验，开展了大量针对性的实验、研究和不确定度分析，拟针对光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度不稳定度三个参数对气象用太阳模拟器进行校准，完成了征求意见稿的编写。

1. 编制内容的说明

（1）范围

本文件适用于气象行业使用的太阳模拟器的性能校准。

说明：

本文件的校准对象是气象用太阳模拟器，其产品标准为GB/T 33707—2017《气象太阳模拟器》。之所以强调是气象用太阳模拟器，是为了与光伏行业和航天领域的太阳模拟器相区别。气象太阳模拟器主要用于测试热电型的总辐射表、直接辐射表等气象仪器的方向响应、非线性、倾斜响应等参数，其光谱范围介于300nm-3000nm，其中2500nm-3000nm的能量及其微弱，因此常常只界定到300nm-2500nm，光谱匹配满足AM 1.5A级要求，同时，气象太阳模拟器辐照度不均匀度和辐照度不稳定度指标也应该通过热电型检测仪器进行检测。而与之相对的光伏行业使用的太阳模拟器的光谱介于300nm-1100nm或400nm-1100nm，光谱匹配根据使用需求可以分为为AM1.5 A级、B级或C级，用于检测其辐照度不均匀度和辐照度不稳定度的检测器也是光电型探测器，不适用于气象用太阳模拟器。

（2）引用文件

列出了本文件引用的技术文件。

说明：

JJF 1615―2017 太阳模拟器校准规范，参考相关技术指标以及测试方法。

GB/T 31163―2017 太阳能资源术语，主要引用辐射相关术语。

GB/T 33707―2017 气象太阳模拟器，主要引用辐射相关术语和气象太阳模拟器的结构原理，参考相关技术指标以及测试方法。

ISO 9845―1: 2022 太阳能—地面不同接收条件下的标准太阳光谱辐照度—第1部分：大气质量1.5的法向直接日射辐照度和半球向日射辐照度（Solar energy — Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions — Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5），引用计算标准太阳光谱。

IEC 60904―9: 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求 （Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements），参考光伏行业太阳模拟器相关指标和测试方法。

（3）术语和计量单位

给出了气象用太阳模拟器校准相关术语和计量单位，引自相关标准。

（4）概述

参考GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》，介绍了气象用太阳模拟器的组成结构和功能原理，给出了结构示意图。

（5）计量特性

1. 辐照度范围：200 W/m2～1100 W/m2。
2. 光谱匹配度：波长300nm～2500nm范围内不同波段的光谱辐照度分布与AM1.5标准光谱辐照度分布对比，误差范围在[0.8，1.2]。
3. 辐照度不均匀度：≤1%（≤φ60 mm）；≤2%（φ60 mm（不含）～φ160 mm（含））。
4. 辐照度不稳定度：≤1%/h。

说明：

上述技术指标主要引自GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》，其中，本文件补充了φ60 mm（不含）～φ160 mm（含）之间的辐照度不均匀度指标，即辐照度不均匀度：≤2%（φ60 mm（不含）～φ160 mm（含）），这是根据气象太阳模拟器设计说明提出的，主要是为了确保气象用太阳模拟器满足测试总辐射表非线性提出的。

（6）校准条件

1. 环境条件
2. 温度：校准过程中温度变化范围为20 ℃±10 ℃；
3. 相对湿度：30% RH～70% RH；
4. 电源电压：交流电源220 V±22 V
5. 其他条件：无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动，光学暗室条件。

说明：

a）温度：根据气象太阳模拟器工作原理，氙灯在工作过程中会大量产生热量，如果不加以控温，实验室内部的温度将上升严重，这一方面高温会影响氙灯及气象太阳模拟器相关组件的使用寿命，另一方面考虑到被测总辐射表温度响应通常介于±1%~±1.5%（-20℃~+50℃）、直接辐射表温度响应通常介于±2%~±10%（50K范围内相对于室温）、配套的数字多用表的温度系数通常介于±（2ppm×reading+6ppm×range），不实施温控将对测试结果造成不利影响。为此，建议控温条件为校准过程中温度变化范围为20 ℃±10 ℃。

b）湿度：一方面，考虑到冬季干燥产生静电对测试过程的影响，建议校准环境湿度下限应不低于30%。另一方面，气象太阳模拟器工作产生大量热量，在其关机后，如果空气湿度过大，环境温控降温将导致冷凝水的产生，这对实验室设备将产生重大损坏，因此建议校准环境湿度上限应不大于70%。综合来看，建议实验室环境的相对湿度：30% RH～70% RH。

c）电源电压：气象太阳模拟器根据输出功率不同，供电电压包括380V和220V两种，考虑到辐照度不稳定度与供电电压直接相关，建议在市电基础上，增加精密电压控制，保证电压控制在（1±%1）×380 V或（1±%1）×220 V。

d）其他条件：气象用太阳模拟器包括光源部分和多维工作转台两部分，这两部分需要严格准直，保证光线准直交控制在2°以内，因此建议实验室环境无影响仪器正常工作的机械振动，以免影响准直性。另外，考虑到气象用太阳模拟器是对总辐射表和直接辐射表等微弱信号开展检测，需要配置光学暗室条件，且不存在影响仪器正常工作的电磁干扰。

2）测量标准及其他设备的选择。测量标准及其他设备主要技术指标见表1。

表1 测量标准及其他设备

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分类 | 名 称 | 测量范围 | 主要技术指标 |
| 测量  标准 | 光谱辐射计 | 波长：300nm～2500nm | 波长分辨率≤1nm；  波长最大允许误差±2nm。 |
| 总辐射表 | 辐照度测量范围：  0～1600 W/m2。 | 灵敏度稳定性优于0.2%/h（测量区间800 W/m2～1000 W/m2）。 |
| 数字多用表或数据采集器 | 电压：  (-100～100) mV | 分辨力不低于六位半；  准确度等级不低于0.01级。 |

说明：

a）光谱辐射计。根据国标GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》关于气象用太阳模拟器的光谱匹配度的要求，气象用太阳模拟器在波长300nm～2500nm范围内与AM 1.5太阳光谱辐照度分布相匹配，并且在280nm～400nm、400nm～700nm、700nm～1100nm、1100nm～2500nm等四个谱段内的光谱失配误差要控制在20%以内。根据这一检测需求，光谱辐射计波长误差只需在各谱段截止端加以控制，波长分辨率在紫外辐射谱段需要达到1nm，在红外谱段5nm即可满足需求，因此将波长分辨率指标定为≤1nm。同时根据JJF 1975-2022 《光谱辐射计校准规范》，光谱辐射计的波长示值误差应控制在200nm～1100nm：±1.0 nm和1100nm～2500nm：±2.0 nm，因此对波长最大运行误差指标定为±2nm。需要解释的是，尽管GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》中关于紫外波段拓展到了是280nm，但是本规范根据ISO 9845―1: 2022计算，标准太阳光谱辐照度在280nm～400nm与300nm～400nm之间几乎一样，考虑到气象太阳模拟器是实验室人工检测设备，光源是氙灯，其在280nm～300nm之间的光谱能量几乎没有，因此，在本规范中将GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》中的280nm～400nm光谱辐照度相对分布修改为了300nm～400nm。

b）总辐射表。总辐射表主要用于气象用太阳模拟器辐照度不均匀度和辐照度不稳定度检测，根据辐照度不均匀度：≤1%（≤φ60 mm）；≤2%（φ60 mm（不含）～φ160 mm（含）），辐照度不稳定度：≤1%/h，总辐射表的稳定性应优于辐照度不均匀度和辐照度不稳定度的1/3，即小于0.33%。现有总辐射表的稳定性通常是指灵敏度的年稳定性，ISO 9060关于A级（即二等标准）总辐射表的年稳定性要求在0.8%，B级（即一级表）总辐射表的年稳定性要求在1.5%，为了满足辐照度不均匀度和辐照度不稳定度的检测需求，选择了A级总辐射表对其短期稳定性进行了测试评估，在检定条件下，可以达到0.1%/h，甚至更高，因此本规范将总辐射表的技术指标定为0.2%/h，完全满足气象用太阳模拟器辐照度不均匀度和辐照度不稳定度的检测需求。

c）数字多用表或数据采集器。数字多用表或数据采集器主要用于测量总辐射表输出的模拟电压，并参与计算得到辐照度值。当前市场上的总辐射表输出的模拟电压信号通常为毫伏级，对检定条件下的总辐射表输出电压信号通常介于7mV~10mV，因此选择数字多用表或数据采集器输出电压范围为(-100～100) mV，准确度等级不低于0.01级，能够保证辐照度误差控制在0.1W/m2以下。

（7）校准项目及方法

1）校准前的准备。主要包括对太阳模拟器的外观和结构进行检查。太阳模拟器外观应完好，光学镜头无明显变形和机械损伤，仪器名称、规格型号、生产厂商、出厂编号等铭牌标识应完整、清晰、醒目。确认被校太阳模拟器工作状态、有效辐照面和周围工作环境状况等正常等准备事项。

2）校准项目包括光谱匹配度、辐照度不均匀度、辐照度不稳定度，此三项是气象用太阳模拟器的关键技术指标，直接影响气象用太阳模拟器检测总辐射表的性能。

3）校准方法包括三个部分，分别是对光谱匹配度、辐照度不均匀度、辐照度不稳定度的校准方法，下面做分别说明。

a）光谱匹配度校准方法。主要利用光谱辐射计对气象太阳模拟器的输出光源进行光谱检测，辐照度测试点之所以选在（1000±50）W/m2的任意一个值，是由于气象用太阳模拟器通常在这个区间范围内检测总辐射表，因此选择光谱辐照度介于（1000±50）W/m2的任意一个值进行光谱匹配度校准测试。

b）辐照度不均匀度校准方法。关键在于辐照度不均匀度测试中总辐射表的位置和检测点的选择。原因在于：气象用太阳模拟器的多维工作转台呈圆形，通常检测总辐射表的灵敏度、方向响应、倾斜响应等指标时，总辐射表都是至于多维工作台中心点，而检测总辐射表非线性是则需要将标准总辐射表和被校总辐射表分别置于多维工作台的两个辐射照度相等的对称位置上，因此在辐照度不均匀度校准过程中，选择测试多维工作转台中心点和φ60 mm（含）范围内的不均匀度，以满足总辐射表灵敏度、方向响应、倾斜响应检测需求，选择测试多维工作转台φ60 mm（不含）～φ160 mm范围内的不均匀度，则是为为了满足总辐射表非线性测试的需求。

至于选择以45°为间隔，将同心圆周长8等分，各同心圆8等分点皆为测试点，辐射输出值为200 W/m2，500 W/m2，800 W/m2，1100 W/m2，一方面是借鉴了GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》的测试方法，另一方面是在GBT 19565-2017 《总辐射表》和JJG 458《总辐射表检定规程》（修订稿）中对总辐射表的非线性检测点正是200 W/m2，500 W/m2，800 W/m2，1100 W/m2，因此重点校准气象用太阳模拟器在上述四个点上的辐照度不均匀度。

对于辐照度不均匀度的计算公式，是参考GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》、IEC 60904―9: 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求 （Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements）和JJF 1615―2017 《太阳模拟器校准规范》给出的。

3）辐照度不稳定度。气象太阳模拟器的辐照度不稳定度仅在多维工作转台中心点在（1000±50）W/m2的任意一个值上进行测试，这主要是考虑检测总辐射表的灵敏度、方向响应、倾斜响应等指标时，总辐射表置于多维工作转台中心点，且在（1000±50）W/m2开展测试。至于未考虑总辐射表非线性测试过程中辐照度包括200 W/m2，500 W/m2，800 W/m2，1100 W/m2的情况，是因为测试总辐射表的非线性需要在多维工作转台上选择两个辐照度相等的对称点放置标准总辐射表和被校总辐射表，测试过程中即便太阳模拟器发生波动，但是非线性是用标准总辐射表和被校总辐射表输出值计算的相对值取得的，辐照度不稳定度对非线性测试结果没有影响，因此未考虑200 W/m2，500 W/m2，800 W/m2等检测点。

对于辐照度不稳定度的计算公式，是参考GB/T 33707―2017《气象太阳模拟器》、IEC 60904―9: 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求 （Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements）和JJF 1615―2017 《太阳模拟器校准规范》给出的。

（8）校准结果的表达

根据JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》的要求，本规范列出了校准结果的表达，对校准证书应包含的信息加以说明。

（9）复校时间间隔

在本规范建议太阳模拟器的复校时间间隔为1年，但是当发现太阳模拟器输出值出现异常时，建议提前校准。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

（10）附录

（a）本规范附录A给出了校准不确定度评定示例。

（b）附录B为太阳模拟器校准记录（参考格式）。

（c）附录C为校准证书（参考格式）。

《气象用太阳模拟器校准规范》起草小组

2023年7月15日