

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0017-15

引用格式: 李婷婷, 庞亚军, 刘剑阳. 太阳模拟器光谱匹配技术研究进展 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 17-31.

LI Tingting, PANG Yajun, LIU Jianyang. Advances in spectral matching techniques for solar simulators[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 17-31.



在线阅读

太阳模拟器光谱匹配技术研究进展

李婷婷^{1,2}, 庞亚军^{1,2}, 刘剑阳^{1,2}

(1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401; 2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401)

摘 要: 太阳模拟器是一种能够在室内环境中提供近似真实太阳辐射的重要实验装置, 通过模拟真实太阳光的照射条件, 太阳模拟器可以用于光伏组件、光电器件等产品的测试和校准。确保太阳模拟器光谱与真实太阳光谱的高度匹配是准确评估产品性能的重要前提, 本文首先介绍了太阳模拟器的应用领域和常用的等级划分标准, 之后重点综述了不同光源太阳模拟器的光谱匹配技术。根据光谱匹配技术的不同, 文章重点介绍了典型的太阳模拟器结构并对其光谱匹配性能进行了比较。最后结合目前需求对太阳模拟器光谱匹配技术的发展趋势进行了总结分析。

关键词: 太阳模拟器; 光谱匹配; 太阳光谱; 光学滤光片; LED

中图分类号: TN203; V524.2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0109002

Advances in spectral matching techniques for solar simulators

LI Tingting^{1,2}, PANG Yajun^{1,2}, LIU Jianyang^{1,2}

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China)

Abstract: The solar simulator is an important experimental device that can offer irradiation resembling natural sunlight indoors, which can be used for testing and calibrating products such as photovoltaic modules and photoelectric devices by simulating real sunlight conditions. To assess the performance of products accurately, it is crucial that the solar simulator spectrum and the real solar spectrum match to a great degree. Firstly, an introduction to the application fields and the categorization standards for solar simulators was briefly described. Then, the spectrum matching techniques for solar simulators with various light sources were summarized. According to these different spectrum matching techniques, the structures of typical solar simulators were introduced and their spectral matching performances were compared. Finally, based on the current demand, the development trend of spectrum matching techniques in solar simulators was summarized and analyzed.

Key words: solar simulator; spectrum matching; solar spectrum; optical filters; LED

引言

作为地球上最重要的能量来源, 太阳一直是众多学者的研究重点。为了详细研究太阳的表面特征、活动区域等, 研究者们提出了不同的太

阳图像重建算法来提高太阳图像质量^[1-4]。为了更好地研究太阳辐射和太阳能技术, 学者们开发了用于模拟太阳辐射的太阳模拟器。太阳模拟器是一种人造光源装置, 可以在室内提供近似太

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61905063); 河北工业大学创新研究院 (石家庄) 石家庄市科技合作专项基金 (SJZZXC23011)

作者简介: 李婷婷 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事大面积太阳模拟器技术研究。E-mail: litestingpcy@163.com

通信作者: 庞亚军 (1988—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事光电技术与仪器研究。E-mail: yjpang@hebut.edu.cn

阳光的辐照特性,不仅克服了真实太阳光因时间、环境和天气的限制,还能满足不同实验研究对太阳光照的需求。典型的太阳模拟器结构包括光源、聚光镜、匀光系统、准直系统和光谱滤光片,与月亮模拟器相比,两者的基本结构相同,但由于月亮辐照很微弱,月亮模拟器中一般要加入衰减片,并根据光源功率和辐照要求合理设计其衰减系数。此外,月亮的月相会根据时间变化,月亮模拟器中一般会有不同弯曲程度的月牙形月相板,使用时可根据月相的需要选择合适的月相板^[5]。由于月亮光是太阳光的反射光线,所以两者的光谱分布几乎相同,本文重点综述了用于太阳模拟器的光谱匹配技术。

作为在室内环境模拟太阳光的装置,太阳模拟器的光谱与真实太阳光谱的匹配程度是很重要的指标,尤其是对于太阳能电池测试用的太阳模拟器来说,只有提供更准确的光谱才能更准确地表征太阳能电池的转换效率,进而指导太阳能电池的优化。因此,设计研发具有高太阳光谱匹配程度的太阳模拟器成为众多研究机构和高校的研究热点,但目前还没有研究资料对太阳光谱的匹配技术做出总结分析,本文根据太阳模拟器光源种类的不同分别综述了其对应的太阳光谱匹配技术,总结比较了国内外太阳光谱匹配技术的研究进展,对相关领域的研究工作具有一定的指导意义。

1 太阳模拟器应用领域

在光伏领域,太阳模拟器可以用来测试光伏设备的电参数和 $I-V$ 曲线等,用于指导光伏设备的优化^[6-8]。2003年,东京农工大学研制的 MK-1 LED 太阳模拟器^[9]使用4色LED作为光源测得了太阳能电池的光谱响应曲线图,并根据明线光谱法估算了太阳能电池的光电流,但该太阳模拟器的辐照度较低。2006年,东京农工大学又提出了 MK-2 LED 太阳模拟器^[10],该模拟器能够在较高的辐照度下测量单晶硅太阳能电池的光谱响应曲线和 $I-V$ 特性,使用该太阳模拟器测量的结果比用仪器测量的结果要稍小一些。2008年,东京农工大学又提出测量结果更精确的 MK-3 LED 太阳模拟器^[11],使用该模拟器照射太阳能电池得到的光谱响应曲线与实际曲线基本吻合,而且短路电流的偏差仅为0.1%。ANON N等^[12]也设计了用来测量单晶硅

太阳能电池 $I-V$ 特性和电参数的太阳模拟器,光源为钨卤灯和蓝色LED的组合,与 PASAN Class AAA 太阳模拟器测得的 $I-V$ 曲线相比,该模拟器获得的曲线与其形状相同但存在偏差,使用 IEC 60891 标准^[13]规定的校正方法对曲线进行校正后可以与参考曲线很接近,获得的电参数与参考值的偏差在2%以下。STUCKELBERGER M等^[14]设计了用于非晶硅太阳能电池光浸泡和 $I-V$ 测量的太阳模拟器,光源由11种LED组成,波长范围为400 nm~750 nm,辐照强度可以达到1948 W/m²,该模拟器连接 $I-V$ 测量装置和温控样品台,可以实现在光浸泡的同时对太阳能电池特性进行测量。在航空航天领域,太阳模拟器可以在实验室中模拟出太空环境下的太阳辐照特性,用于对太阳敏感器、空间光学遥感器等性能测试和精度标定^[15-18]。李俊麟等^[19]设计的扫描式太阳模拟器可以用于模拟卫星在轨时的辐照环境,光源为呈方阵排列的4只5 KW或7 KW的氙灯,扫描系统由2维折反镜(反射模拟器光线)、7维大型机器人(持有扫描镜,根据设定的方位角和俯仰角调整机器人位姿的对测试面进行扫描)和1维被测样件转动机构(辅助构造方位角)组成,可以实现的方位角为-90°~+90°、俯仰角为-29°~+42.5°,角精度分别可达0.2°和0.1°,位置精度优于10 mm。苏拾等^[20]设计了用于太阳敏感器测试的运动式太阳模拟器,光源为4颗中心波长为575 nm的白光LED,根据太阳敏感器的结构设计了平行四边形结构的双摇杆运动装置来模拟太阳的矢量运动,该模拟器能够模拟3种太阳矢量角(-13°、0°、38°),且模拟精度优于±0.0083°。陈圆圆等^[21]设计了用于机载座舱热负荷试验的太阳模拟器,光源为长弧氙灯,灯阵按照座舱轮廓设计为曲面分布,座舱表面热效应与设计目标的偏差为-3.1%,使用该模拟器可以为座舱提供预期的辐照环境。

高通量太阳模拟器可以提供稳定的,近似自然光谱的高通量密度辐射,因此可以代替聚光用于太阳能相关领域的研究。WANG W等^[22]研制了用于太阳能接收器和热化学反应器研究的高通量太阳模拟器,光源为12个氙弧灯阵,使用硅玻璃菲涅尔透镜作为聚光器,可以实现19.7 KW的辐射功率。SARWAR J等^[23]同样设计了用于太阳热能和热化学研究的高通量太阳模拟器,光源为7 KW短弧氙灯搭配截断椭球镜,当光源的输入电流为113 A~

153 A 时,该模拟器能够在 2 074 KW/m²~3 583 KW/m² 范围内调节峰值通量。除此之外,太阳模拟器还可以用于遥感研究,DU Z 等^[24]设计了用于遥感研究的多源太阳模拟器,波长范围为 350 nm~2 500 nm,光源为卤素灯和 LED 的组合,为满足遥感模拟的要求,太阳模拟器安装在运动平台上,保证光照方向始终指向目标,并模拟太阳的角运动轨迹,该模拟器提供的光谱与太阳光谱之间的 Pearson 相关系数为 0.96。

随着太阳模拟器应用领域的增多,对太阳模拟器的性能要求也变得更高。研究开发高光谱匹配度、高辐照均匀性、高时间稳定性的太阳模拟器是太阳模拟技术研究的重要方向。

2 太阳模拟器技术标准

为了表征不同太阳模拟器的性能,世界范围内先后发布了用于分类太阳模拟器的评测标准,其中最常用的是国际电工委员会 IEC 60904-9-2007 标准、日本 JIS C8942-2009 工业标准和美国 ASTM E927-19 标准^[25-27]。三种分类标准略有不同,但都是利用光谱一致性(与标准光谱的偏差)、辐照不均匀性和时间不稳定性三个参数来对不同太阳模拟器的性能进行评价。三种标准的太阳模拟器等级划分如表 1 所示,参考光谱分布如表 2 所示。

表 1 IEC、JIS、ASTM 三种标准的太阳模拟器等级划分
Table 1 Classifications of solar simulators in IEC, JIS and ASTM standards

Standards organizations	Performance parameters			
		Spectral match	Irradiation non-uniformity	Temporal instability
IEC 60904-9-2007	A	0.75~1.25	±2%	±2%
	B	0.6~1.4	±5%	±5%
	C	0.4~2.0	±10%	±10%
JIS C8942-2009	MS	0.95~1.05	±2%	±1%
	MA	0.75~1.25	±2%	±1%
	B	0.6~1.4	±3%	±3%
	C	0.4~2.0	±10%	±10%
ASTM E927-19	A	0.75~1.25	±2%	±2%
	B	0.6~1.4	±5%	±5%
	C	0.4~2.0	±10%	±10%

表 2 IEC、JIS、ASTM 三种标准的参考光谱分布

Table 2 Reference spectral distribution in IEC, JIS and ASTM standards

Spectral rage	Total irradiance (IEC、JIS)	Total irradiance (ASTM)
400 nm~500 nm	18.4%	18.21%
500 nm~600 nm	19.9%	19.73%
600 nm~700 nm	18.4%	18.20%
700 nm~800 nm	14.9%	14.79%
800 nm~900 nm	12.5%	12.39%
900 nm~1 100 nm	15.9%	15.89%

随着太阳能电池技术的进步,对太阳模拟器光谱的要求也越来越高。2020 年,IEC 对 2007 年发布的标准进行了修改,提出新标准 IEC 60904-9-2020^[28],在扩展波长范围内增加了光谱匹配分类,并推出了新的 A+级。表 3 所示为 IEC 60904-9-2020 太阳模拟器等级分类,新标准中提出了两种波长范围的参考光谱分布,对于波长范围在 400 nm~1 100 nm 内的太阳模拟器,其参考光谱分布与 IEC 60904-9-2007 中内容相同,不再赘述,对于波长范围在 300 nm~1 200 nm 内的太阳模拟器,其参考光谱分布如表 4 所示。新标准中指出,仅对光谱范围为扩展波长范围的太阳模拟器进行 A+级评估,对于波长在 400 nm~1 100 nm 范围内的太阳模拟器只进行 A、B、C 级评估。

表 3 IEC 60904-9-2020 标准的太阳模拟器等级

Table 3 Solar simulator grade according to IEC 60904-9-2020 standard

Grade	Class A+	Class A	Class B	Class C
Spectral match	0.875-1.125	0.75-1.25	0.6-1.4	0.4-2.0
Irradiation non-uniformity	≤±1%	≤±2%	≤±5%	≤±10%
Temporal instability	≤±1%	≤±2%	≤±5%	≤±10%

表 4 IEC 60904-9-2020 标准 300 nm~1 200 nm 范围参考光谱分布

Table 4 Reference spectral distribution in range of 300 nm~1 200 nm according to IEC 60904-9-2020 standard

Spectral rage	Total irradiance
300 nm~470 nm	16.61%
470 nm~561 nm	16.74%
561 nm~657 nm	16.67%
657 nm~772 nm	16.63%
772 nm~919 nm	16.66%
919 nm~1 200 nm	16.69%

对比各个标准可以发现:在太阳模拟器等级划分方面,美国 ASTM E927-19 标准和国际电工委员会 IEC 60904-9-2020 标准相同,而 IEC 60904-9-2020 中增加了标准更高的 A+级评估,日本制定的太阳模拟器等级中增加了 MS 级评估且辐照不均匀性和时间稳定性与其他标准也略有差别;在参考光谱分布方面,在太阳模拟器常用的 400 nm~1 100 nm 范围内,IEC 60904-9-2020 和 JIS C8942-2009 规定相同,ASTM E927-19 与其略有不同,对于光谱在扩展波长范围内的太阳模拟器,IEC 60904-9-2020 对其参考光谱做了单独规定。

3 太阳光谱匹配技术

传统的太阳模拟器光源包括氙灯、钨丝灯、卤钨灯、金卤灯等,这些光源的光谱连续,与太阳光谱较为接近,可以使用具有特定透过率曲线的滤光片对其光谱进行调整以匹配太阳光,或者将不同光源进行组合,再结合滤光片整合多个光源的光谱来提高太阳模拟器的光谱匹配度。近年来,随着发光二极管(LED)的迅速发展,LED 太阳模拟器成为了太阳模拟器的研究热点。LED 的发射光谱相对较窄,但种类很多,其波长可以覆盖深紫外到近红外范围。通过将多个具有不同峰值波长的 LED 的光谱进行混合,可以实现对太阳光谱的高度模拟。下面对不同光源太阳模拟器用到的光谱匹配技术进行详细介绍。

3.1 传统光源太阳模拟器

传统光源太阳模拟器的光谱匹配技术大体上包括两种:当光源为单源时可以使用特制的滤光片对其光谱中偏离太阳光谱的部分进行调整,或者通过滤光片将多个光源的光谱进行拼接来提高光谱匹配度。太阳模拟器使用到的滤光片为干涉滤光片,利用薄膜干涉原理使特定波长范围内的光通过。不同用途的太阳模拟器,使用的滤光片也有所差别。用于太空环境测试的太阳模拟器使用 AM0 滤光片,用于地面环境测试的太阳模拟器使用 AM1.5 滤光片,滤光片的制备分为以下三个步骤:

1) 确定滤光片理论透过率曲线

直接测量所用光源的光谱辐照度曲线,将其与所需的标准光谱分布曲线比较,使用以下公式计算得到滤光片各个波段内的透过率。

$$a = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} b \quad (1)$$

$$t = \frac{C}{a} \quad (2)$$

式中: a 为 λ_1 到 λ_2 波段内未加滤光片时光源的光谱辐照度之和; b 为 λ_1 到 λ_2 波段内光源某一波长处的光谱辐照度; C 为 λ_1 到 λ_2 波段内标准光谱的辐照度,为已知。利用标准光谱分布中某一波段的辐照度值除以光源在此波段内的辐照度即可求得滤光片在此波段内的透过率 t 。

2) 滤光片膜系设计

首先需要根据薄膜材料的光学特性和物理特性来选择合适的膜系材料,所选择的薄膜材料应该在太阳模拟器波长范围内透明度较高、折射率稳定且对光的吸收比较少即消光系数较小。另外,薄膜应该具有较好的机械性能和稳定性,膜层和基底之间,膜层和膜层之间应该有较好的附着力,而且膜层的应力应该尽可能小^[29-31]。将满足上述要求的高低折射率材料结合使用来设计膜系,常用的高折射率材料有 ZrO_2 、 TiO_2 、 HfO_2 、 Ta_2O_5 等,常用的低折射率材料有 MgF_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等,基底材料一般选择 K9^[32,33]。

干涉滤光片分为带通滤光片和截止滤光片,最常用的氙灯太阳模拟器滤光片为截止滤光片,其对某一波段内的光高反射,对偏离此波段的光高透射。目前广泛用于干涉截止滤光片的膜系为 $G|(\text{H}/2\text{LH}/2)^S|\text{A}$ 和 $G|(\text{L}/2\text{HL}/2)^S|\text{A}$, G 表示基底材料, H 表示高折射率材料, S 表示膜层的周期数; L 表示低折射率材料, A 表示空气,系数 $1/2$ 表示膜厚为 $\lambda/8$, λ 为滤光片中心波长^[34]。选定薄膜材料与初始膜系后,根据需要的滤光片参数,使用薄膜设计软件进行膜系的模拟优化,确定最终需要的膜系。

3) 滤光片镀制

常用的镀制方法为真空蒸镀法^[35],真空环境下在基片上交替沉积高折射率和低折射率材料形成具有周期性结构的多层膜。蒸发技术根据工作原理的不同可以分为热蒸发、溅射和离子镀三种,常用的热蒸发又分为电阻热蒸发和电子束热蒸发,前者适合蒸发熔点低的材料,后者适合蒸发熔点高的材料,一般蒸镀机还会配备离子源构成离子束辅助热蒸发系统,来弥补热蒸发镀膜时的缺陷^[36,37]。

在滤光片镀制过程中还需要对膜层厚度进行监控,常用的膜层监控方法有光学监控和石英晶振监控,前者适合控制膜厚为 $\lambda/4$ 整数倍的膜层,

后者可以监控任意厚度的膜层。实际镀制前,选择合适的镀膜方法并进行单层薄膜的镀制来确定实际镀制时的工艺参数,依据最佳的工艺参数来完成滤光片的镀制。

3.2 LED 太阳模拟器

太阳光为不同颜色光混合而成的复色光,可以使用多种不同波长的单色 LED 组合来对太阳光进行模拟。LED 光谱窄、种类多,组合不同种类的 LED 可以实现不同的光谱^[38-41],光谱的可匹配性强。另外,改变 LED 驱动电流的大小可以调整其辐射通量,可控性强^[42-45]。因此,LED 太阳模拟器可以实现很高的光谱匹配度。

根据光谱叠加原理,多个 LED 合成的光谱可以看作各个 LED 光谱的线性叠加,LED 太阳模拟器的光谱合成可以分为以下两个步骤:

1) 建立单色 LED 的光谱拟合模型

在进行 LED 光谱拟合之前,需要对单色 LED 的光谱进行曲线拟合^[46],以便后续通过数值分析的方法对目标太阳光谱进行模拟。单色 LED 的光谱为窄带单峰谱,一般使用峰值波长、半高全宽来表征,通常可以使用高斯模型或洛伦兹模型对其进行拟合。

在光谱拟合研究中,如式 (3) 所示的高斯模型适合表示圆滑的光谱,而如式 (4) 所示的洛伦兹模型适合表示尖锐的光谱^[47,48]。

$$G(\lambda) = A \cdot \exp\left[-2.7726\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: A 表示峰值; λ_0 表示峰值波长; $\Delta\lambda$ 表示半高全宽。

$$F(\lambda) = \frac{\lambda_0}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2} \quad (4)$$

2) 建立 LED 合成太阳光谱的数学模型

LED 光谱为窄带单峰谱,要实现宽波段的太阳光谱,需要将多个波段的 LED 进行组合,根据光谱叠加原理^[49-53],可以得到 LED 合成太阳光谱的数学模型为:

$$L(\lambda) = \sum k_j S_j(\lambda) \quad (5)$$

式中: $L(\lambda)$ 为目标光谱; $S_j(\lambda)$ 为单个 LED 的光谱; k_j 为拟合系数。光谱匹配的目的是确定不同 LED 的峰值波长及其合适的拟合系数,使合成光谱尽可能接近目标太阳光谱。LED 光谱和太阳光谱都是波长对应能量的数据组,将太阳光谱进行离散化处理,得到太阳光谱数据组 $\{x_i, y_i\} (i = 1, 2, 3, \dots, n_1)$,

测量 LED 在额定电流下工作时的光谱曲线,同样进行离散化处理后,得到的 LED 光谱数据组为 $S_j(x_i) (j = 1, 2, 3, \dots, n_2)$,在 x_i 处的函数关系为:

$$\begin{cases} k_1 S_1(x_1) + k_2 S_2(x_1) + \dots + k_j S_j(x_1) = y_1 \\ k_1 S_1(x_2) + k_2 S_2(x_2) + \dots + k_j S_j(x_2) = y_2 \\ \dots \\ k_1 S_1(x_i) + k_2 S_2(x_i) + \dots + k_j S_j(x_i) = y_i \end{cases} \quad (6)$$

由于目标光谱数据点的个数一般大于单色 LED 的种类数即 $i > j$, 所以方程组为超定方程组,只要求出方程组的非负最小二乘解即可获得单色 LED 的拟合参数。最小二乘法的原则为误差平方和最小原则,将模型输出值和实测值的差构造一个平方和,确定最优估计量使该平方和最小^[54-56],即求 $\min \sum_{i=1}^{n_1} (\sum k_j S_j(x_i) - y_i)^2$ 。一般通过迭代优化的方法求解最小二乘问题,常用的方法有梯度下降法、Newton 法、Gauss-Newton 法等^[57],合理选择求解方法来确定单色 LED 的峰值波长和拟合系数,从而确定用来合成太阳光谱的 LED 种类和数量。此外,LED 的能量大小和驱动电流成正比^[58],通过调整各个波段 LED 驱动电流的大小可以实现合成光谱和太阳光谱的最佳匹配。

LED 的光衰一般比较缓慢,因此 LED 具有很好的时间稳定性。使用多个 LED 进行光谱合成时,单个 LED 的光谱特性会在一定程度上影响合成光谱。由于 LED 的发光角度比较大(一般为 120°),多个 LED 合成的光谱在不同位置处可能会存在偏差,光谱的空间均匀性不是特别好。此外,由于受到 LED 制作工艺的限制,所需的某种波长的 LED 只能从市面上现有的 LED 中选择,其峰值波长可能会有偏差,而且 LED 的光谱会受到功率和温度的影响,当功率或温度变化时,其光谱会发生整体偏移,因此对 LED 光谱的控制精度一般为几纳米。

4 研究进展

4.1 传统光源太阳模拟器

潘永强等^[59]设计了用于脉冲式光伏组件太阳模拟器的 AM1.5 滤光片,模拟器光源为 6 个圆弧形脉冲氙灯,滤光片在中心波长为 930 nm 处透过率为 15%,半宽度约为 350 nm,400 nm~750 nm 波段内平均透射率 $\geq 93\%$,1 200 nm~1 400 nm 波段内平均透射率 $\geq 91\%$,基底材料选用超白伏法玻璃,镀膜材料为 TiO_2 和 SiO_2 ,模拟器在氙灯正上

方位置处的光谱匹配度为 0.91~1.05, 但距离氙灯较远位置处的光谱匹配度并不高, 因此又设计了组合滤光片, 使用两块中心波长不同的滤光片进行拼接, 使滤光片中心位置处的中心波长仍为 930 nm, 而周边位置处的中心波长提高到 960 nm。该模拟器通过使用拼接滤光片解决了辐照面上远离光源位置处光谱匹配度不高的问题, 提高了模拟器光谱的空间均匀性, 使用拼接滤光片后, 太阳模拟器辐照面上的所有位置在 400 nm~1 200 nm 范围内的光谱匹配度都在 0.962~1.106 之间, 可以达到 A 级标准^[25]。

苏拾等^[60]设计了用于气象辐射计量检测用的太阳模拟器, 模拟器光源为氙灯, 采用 H4 作为基底材料, Al_2O_3 和 SiO_2 为镀膜材料镀制了滤光片, 安装滤光片后的氙灯光谱能够在 300 nm~1 100 nm 波长范围内实现对 AM1.5 太阳光谱的 A 级匹配^[25], 该太阳模拟器可以实现辐照强度在 $100 \text{ W/m}^2 \sim 1\,250 \text{ W/m}^2$ 之间连续调节, 而且调节过程中的辐照不稳定性均可以控制在 1% 以内, 模拟器在 $\phi 100$ 口径内辐照不均匀度小于 1%, $\phi 200$ 口径内小于 2%, 准直角小于 $\pm 1^\circ$ 。

高雁等^[61]设计了光源为短弧氙灯的三谱段太阳模拟器, 使用四种滤光片配合来修正光谱。在光学积分器附近放置 AM0 滤光片滤除氙灯光谱中 800 nm~1 000 nm 波段的尖峰, 该滤光片在中心波长 930 nm 处透过率为 18%, 400 nm~760 nm 波段内平均透射率 $\geq 95\%$, 1 160 nm~1 700 nm 波段内平均透射率 $\geq 92\%$ 。在此基础上加入了三谱段滤光片进一步修正光谱, 其结构如图 1 所示, 每种滤光片各有两片, 对称放置, 每个滤光片固定在一个平移机构上, 六组平移机构固定在圆形支撑架上, 第一滤光片为截止波长为 700 nm 的前截止

滤光片, 第二滤光片为截止波长为 700 nm 的后截止滤光片, 第三滤光片为 700 nm~900 nm 的带通滤波片, 光谱修正组件放置在氙灯聚光镜上方, 通过调整氙灯功率和不同滤光片移入光路的程度来对模拟器光谱进行精确调整。该太阳模拟器可以同时调整 300 nm~700 nm、700 nm~900 nm 和 900 nm~1 700 nm 三个波段的能量, 最终得到的光谱与 AM0 光谱最大偏差为 -0.1486, 优于 A 级标准的 ± 0.25 。该太阳模拟器在 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的辐照面内的平均辐照强度可以达到 2 个太阳常数 ($2\,730 \text{ W/m}^2$), 辐照不均匀度为 $\pm 1.77\%$, 辐照不稳定性为 $\pm 0.83\%$, 准直角为 $\pm 2.5^\circ$ 。

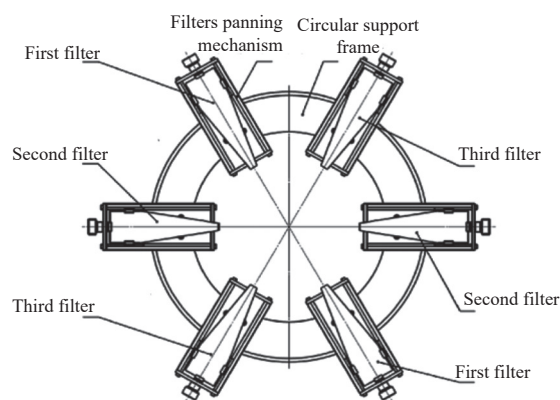


图 1 光谱修正组件结构布局^[61]

Fig. 1 Structural layout of spectrum correction module^[61]

氙灯是最常用的太阳模拟器光源, 其亮度高、发光区域小、显色性好且光色与太阳光很接近, 但其光谱在 800 nm~1 000 nm 范围内存在很明显的尖峰, 一般需要使用在此波长范围内透过率很低的滤光片来滤去此区域的能量尖峰, 才能实现较好的光谱匹配性能。表 5 为传统光源太阳模拟器的光谱匹配性能对比。

表 5 传统光源太阳模拟器的光谱匹配性能

Table 5 Spectral matching performances of solar simulators with traditional light sources

Year	Light source	Spectral range	Spectrum/Spectral matching degree/Spectral grade	Ref
2012	6 pulsed Xenon lamps + filters	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.91~1.05/A	[59]
2013	Xenon arcs + filters	300 nm~1 100 nm	AM1.5G/-/A	[60]
2013	Xenon arcs + filters	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/-/A	[62]
2015	Xenon arcs + 4 filters	300 nm~1 700 nm	AM0/0.8514/A	[61]
2016	Xenon lamps + combined filters	400 nm~1 200 nm	AM1.5G/0.946/A	[63]
2022	Xenon arcs + filters	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.8~1.2/A	[64]

4.2 多源太阳模拟器

早在 20 世纪 60 年代, 国外学者就开始研究将

不同光源的光谱进行拼接来模拟太阳光谱, 但早期的多源太阳模拟器性能还不是特别好。BICK-

LER D^[65] 设计了氙灯和钨丝灯组合的双源太阳模拟器, 氙灯光源使用蓝色透镜过滤, 钨丝灯光源使用红色透镜过滤, 最终实现了对 AM0 太阳光谱的匹配, 辐照面积为 $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, 辐照不均匀度为 $\pm 1\%$, 但该太阳模拟器对氙灯的过滤不完全, 光谱中仍然存在尖峰。BENNETT M 等^[66] 设计了 $1\,000\text{ W}$ 氙灯和 650 W 钨卤灯组合的双源太阳模拟器, 通过冷镜来反射氙灯光源的可见光部分, 透射钨卤灯的近红外部分。该模拟器可以在 $350\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$ 波长范围内精确模拟 AM1.5 太阳光谱, 在直径为 4 英寸的测试平面上, 辐照不均匀度为 $\pm 3\%$ 。该模拟器将两个功率较高的光源安装在了比较小的空间内, 整个系统的热负荷比较高。

JENKINS P 等^[67] 将 Spectrolab X-25 氙灯太阳模拟器改造成了三源太阳模拟器, 其结构如图 2(a) 所示。使用 X-25 太阳模拟器提供紫外和可见光区域的光谱, 在测试平面上方放置一个 45° 角倾斜的非吸收二向色镜作为分束器, 其光路如图 2(b) 所示。在二向色镜上方放置 36 个钨丝灯组成的灯阵来提供红外光谱。在钨丝灯阵和二向色镜之间安装一个滤光片来调整红外光源小于 $1\,000\text{ nm}$

波长范围内的光谱。在钨丝灯阵中的 6~12 只灯前放置可以透过 $700\text{ nm} \sim 900\text{ nm}$ 波长范围的滤光片。该模拟器可以在 $350\text{ nm} \sim 2\,000\text{ nm}$ 波长范围内精确匹配 AM0 太阳光谱, 并且能够满足 GaInP/GaAs/Ge 多结太阳能电池对 $350\text{ nm} \sim 700\text{ nm}$ 、 $700\text{ nm} \sim 900\text{ nm}$ 和 $900\text{ nm} \sim 1\,700\text{ nm}$ 三个波段光谱匹配的要求, 其准直角为 $\pm 7.6^\circ$, 在 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 测试平面上的辐照不均匀度为 $\pm 1\%$ 。

天津大学罗青青^[68] 设计了一种可以覆盖 $0.4\text{ }\mu\text{m} \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围的宽光谱太阳模拟器。在 $0.4\text{ }\mu\text{m} \sim 1.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段采用自带抛物面镜的氙灯加 AM1.5 滤光片作为光源, 在 $1.4\text{ }\mu\text{m} \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段采用变温黑体作为光源。使用中心波长为 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 的滤光片作为合束器, 通过透射可见光、反射红外光将两束光线合为一束。该模拟器可以在非常宽的波长范围内精确匹配 AM1.5 太阳光谱, 在 $1\text{ }\mu\text{m} \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段内与太阳辐射分布匹配度在 85% 以上, 辐照强度大于一个太阳常数 ($1\,353\text{ W/m}^2$), 辐照不稳定性小于 $\pm 5\%$, 准直角小于 2° 。

冯云峰等人^[69] 使用氙灯和卤素灯作为混合光源研制了用于测试空间三结砷化镓太阳能电池的 AM0 太阳模拟器。氙灯使用负反馈系统控制, 卤素灯使用恒压系统控制。使用氙灯搭配滤光片覆盖 $350\text{ nm} \sim 760\text{ nm}$ 和 $760\text{ nm} \sim 950\text{ nm}$ 两个波段, 调整滤光片送入光路中的面积比例来调整第二波段的能量。卤素灯覆盖 $950\text{ nm} \sim 1\,800\text{ nm}$ 范围的第三个波段, 搭配吸收型滤光片来截止 $1\,000\text{ nm}$ 以下的光谱, 通过控制卤素灯电流的大小直接对第三波段的光谱进行调节。该太阳模拟器可以实现 3 个波段光谱独立可调, 并且在 $350\text{ nm} \sim 1\,800\text{ nm}$ 各个波段内的光谱匹配度均在 0.75~1.25 之间, 均能实现 A 级光谱匹配^[25]。

BAGUCKIS A 等^[70] 设计了卤素灯和 LED 组合的太阳模拟器, 光源由四组 LED 阵列和 2 只卤素灯组成, 使用冷白、蓝、深红、远红、 850 nm LED、 780 nm LED 共同组成的 LED 阵列可以覆盖 $400\text{ nm} \sim 900\text{ nm}$ 的波长范围, 两只 48 W 的卤素灯可以覆盖 $900\text{ nm} \sim 1\,100\text{ nm}$ 的波长范围, 灯具布局如图 3 所示。所有模拟器灯具安装在采用强制风冷的管式铝散热器上, 每个 LED 都由独立的驱动电流控制。该太阳模拟器在 $400\text{ nm} \sim 1\,100\text{ nm}$ 范围的 12 个波长间隔内 (比 IEC 60904-9-2007 标准规定的波长间隔窄一倍) 的光谱失配误差均小于 0.25, 在

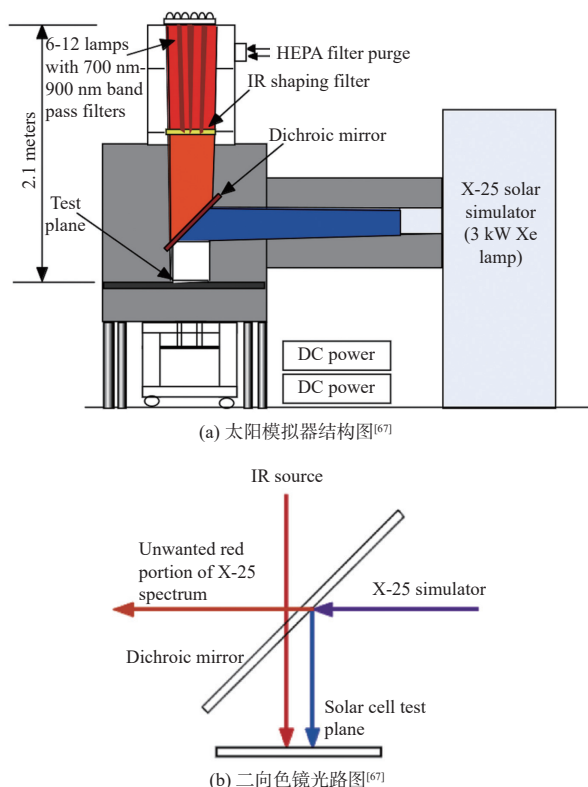


图 2 JENKINS P 等设计的三源太阳模拟器^[67]

Fig. 2 Triple-source solar simulator designed by JENKINS P, et al^[67]

直径至少为 3 cm 的测试区域内可以实现辐照不均匀度小于 2%, 长期不稳定性在 1% 以内。

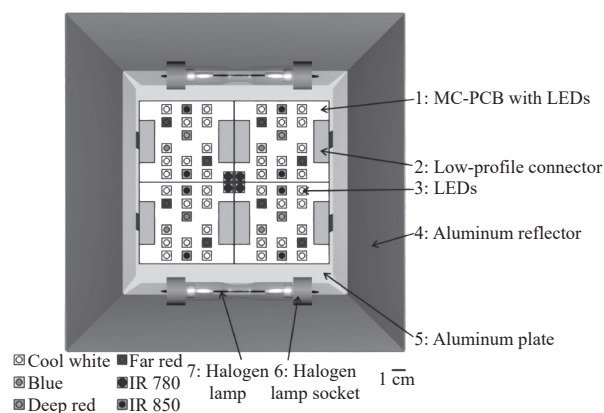


图 3 BAGUCKIS A 等设计的太阳模拟器灯具布局图^[70]

Fig. 3 Luminaire layout diagram of solar simulator designed by BAGUCKIS A, et al^[70]

刘洪兴等^[71]采用基底光源和 LED 光源组合的形式设计了积分球太阳模拟器, 在基底光源光谱的基础上, 调整不同的 LED 组合来模拟太阳光谱,

积分球作为系统的匀光器。基底光源选择带滤光片的氙灯光源, 使用模拟退火算法作为光谱匹配算法来选择 LED, 最终选择 Exitex 公司的 1 200 只 53 种 LED 组成 LED 模块, 使用电源控制箱选择不同 LED 的组合, 摄谱仪输出光谱到电脑端, 电脑端计算输出光谱与太阳光谱的差异来调整 LED 组合, 直到输出光谱可以最好地模拟太阳光谱, 该太阳模拟器在 380 nm~1 000 nm 波长范围内的光谱匹配误差小于 $\pm 3\%$, 通过合理调整积分球的设计参数并为 LED 模块设计高精度控制系统, 该模拟器的辐照不均匀度和辐照不稳定性均可以控制在 $\pm 3\%$ 以内。

综上所述, 多源太阳模拟器多使用氙灯提供可见光和紫外范围的辐照度, 使用其他光源提供红外范围的辐照度, 早期多使用传统光源进行组合, 比如钨丝灯、钨卤灯和卤素灯等, 后来随着 LED 技术的发展, 出现了传统光源和 LED 组合的形式, 进一步提高了太阳模拟器的光谱匹配性能。表 6 所示为多源太阳模拟器光谱匹配性能对比。

表 6 多源太阳模拟器的光谱匹配性能

Table 6 Spectral matching performances of multi-source solar simulators

Year	Light source	Spectral range	Spectrum/Spectral matching degree/Spectral grade	Ref
1962	Xenon arc + Tungsten	—	AM0/-/-	[65]
1990	Xenon arc + Tungsten Halogen	350 nm~1 000 nm	AM1.5G/-/-	[66]
2005	Xenon arc + Tungsten	—	AM0/-/-	[67]
2009	Halogen + 8-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/-/B	[72]
2009	Xenon arc + Ectothermic blackbody	0.4 μm ~12 μm	AM1.5G/0.85/A	[68]
2012	Xenon arc + 53-color LEDs	380 nm~1 000 nm	AM1.5G/0.97/A	[71]
2016	Halogen + 6-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.75/A	[70]
2023	Xenon arc + Halogen	350 nm~1 800 nm	AM0/-/A	[69]

4.3 LED 太阳模拟器

高亮等^[73]使用 460 nm 白光 LED、750 nmLED、850 nmLED 和 940 nmLED 作为光源设计了 LED 太阳模拟器, 利用三次样条插值法绘制出 LED 的光谱曲线图, 根据不同波段 LED 的辐照度与总辐照度的比值计算出所需 LED 的数量, 最终确定使用白光 LED 56 只, 其余 LED 各 20 只, 灯室顶面放置 36 只白光 LED 排列成 6 排 6 列, 剩余 LED 均匀排列在侧面。模拟器在 400 nm~1 100 nm 波长范围内的光谱匹配度为 0.77, 通过修改灯室参数, 模拟器均匀性和稳定性均可达到 A 级标准。该太阳模拟器造价低、使用方便, 适合用于小型光伏组件

的检测。

丹麦科技大学可持续能源国家实验室设计了基于 LED 的太阳能电池测试平台^[74], 光源为线性排布的 18 种 LED, 每条线段由 7 个波长相同的 LED 串联而成, 对于弱发光的 LED, 采用双线段排列。测试平台整体分为基座、上部支架和反光罩三部分, 基座中间有一个基板, 用来放置太阳能电池, 反光罩中放置 LED 阵列及其冷却系统, 支架为可以垂直上下移动的 4 根杆。该系统使用 24 个可编程电流源来独立控制 24 个波长, 使用一个 14 位的数模转换器控制 LED 阵列中每一段的电流。该 LED 太阳模拟器的亮度可以控制在 2^{14} 位精度, 在

390 nm~940 nm 波长范围内对 AM1.5G 太阳光谱的匹配度优于 90%, 辐照不均匀度优于 0.4%, 辐照不稳定性优于 0.5%。

LINDEN K J 等^[75]设计了基于模块化的光谱可调 LED 太阳模拟器, 其基本模块由 4 个相同的 5 cm×5 cm 的导热印刷电路板组成, 23 种不同波长的 LED 以 10×10 的方式排列在电路板上, 相邻 LED 的间隔为 5 mm。系统连接计算机控制输入 0 mA~350 mA 的电流来调整每个 LED 的发光强度和发光时间, 实现对该太阳模拟器的光谱调节。该 LED 太阳模拟器在 400 nm~1 100 nm 各个波段内的光谱失配度均在±0.125 之间, 优于 A 级标准^[25], 在 200 mm×200 mm 的测试面上, 2×2 模块的模拟器能够实现辐照不均匀度小于±2%, 而且模块化的设计有助于太阳模拟器辐照面积的扩展。

AL-AHMAD A 等^[76]同样设计了可扩展的模块化 LED 太阳模拟器, 基本模块为呈六边形放置的 6 种不同类型的 LED。所有 LED 安装在一个 150 mm 的方形铝板上, 铝板连接到一个采用强制风冷的隧道散热器上。LED 和测试平面的距离为 140 mm, 在距离 LED 40 mm 和 120 mm 处放置棱镜扩散器以均匀光线。对每个 LED 的电流进行单独控制来灵活调整模拟器光谱, 在 ASTM 划分的 400 nm~1 100 nm 的 6 个波长间隔内, 模拟器的光谱匹配度都在 0.75 到 1.25 之间, 整体匹配度达到 0.995, 辐照不均匀度为 2%, 时间不稳定性小于 0.2%。该太阳模拟器能够以较低的成本实现大面积照明, 可专用于大面积印刷有机太阳能电池的测试。

赵孟刚等^[77]提出了基于混光系统的 LED 太阳模拟器光谱合成技术, 整个系统包括 LED 光源阵列、光学混光系统和光谱显示系统 3 部分。混光系统为带有出光口的反射箱体, 内部涂有高反射率材料, LED 阵列放置在箱体底部。箱体出光口处放置光谱仪并将混光后的光谱显示在计算机上, 根据光谱结果调整 LED 的电流强度来改变混光光谱。该太阳模拟器通过 LED 控制电路调节每种 LED 的输入电流, 在 300 nm~1 100 nm 波长范围内对 AM1.5G 太阳光谱的匹配度高于 0.99, 远优于 A 级标准^[25]。

苏拾等^[78]设计的 LED 太阳模拟器使用中心波长分别为 420 nm、480 nm、505 nm、550 nm、605 nm、660 nm、710 nm、735 nm、780 nm、810 nm、850 nm、890 nm、940 nm、1 020 nm 的 LED 和白光 LED 共 15 种组成光源阵列, 使用 origin 对各 LED 的光谱

曲线采点, 将每个光谱曲线用多项式方法拟合, 得到 LED 光谱的数学式, 根据光谱合成原理, 对光谱合成方程组求最小二乘解, 确定每种 LED 的个数。将 LED 布置在 4×4 的网格中, 每个网格单元内放置 15 种 25 颗 LED, 将白光 LED 放置在中心, 波长大于 780 nm 的近红外 LED 放置在其周围, 可见光波段的 LED 放置在最外围。该太阳模拟器的每个 LED 均配有自由曲面透镜来对 LED 光线进行准直, 减小其发光角度, 准直后的 LED 发光角度为±5°。模拟器光谱在 400 nm~1 100 nm 各个波长间隔内的失配误差均在±0.2 以内, 在 100 mm×100 mm 的辐照面内辐照强度达到 1 376.3 W/m², 辐照不均匀度为±1.73%, 辐照不稳定性为±0.82%。

NOVICKOVAS A 等^[79]使用 6 种 19 只 LED 作为光源设计了 LED 太阳模拟器。如图 4 所示, LED 以蜂窝状排列在六角形金属芯印刷电路板上, 整体安装在铝矩形板上, 整个六角形簇尺寸为 96 mm×104 mm, 每个 LED 和相邻 LED 的中心间距离为 22 mm, 带有 LED 阵列的铝矩形板安装在带有翅片和风扇的铝散热器上, 所有 LED 串联连接, 由独立驱动电流控制其辐射通量。该太阳模拟器仅使用 19 个 LED 就实现了直径至少为 5 cm 的照明区域, 且辐照度至少为 1 个太阳常数(1 353 W/m²), 在 400 nm~1 100 nm 各个波段内的光谱失配度均在±0.23 之间, 辐照均匀度为 A 级, 辐照不稳定性小于±2%, 可以实现 AAA 级标准^[25]。

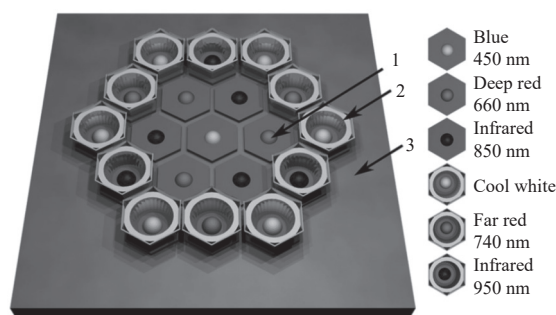


图 4 NOVICKOVAS A 等设计的太阳模拟器 LED 布局图^[79]

Fig. 4 LED layout diagram of solar simulator designed by NOVICKOVAS A, et al^[79]

综上所述, LED 太阳模拟器的设计重点在于 LED 的种类选择和合理布局, 可以根据参考光谱分布规定的 6 个波长间隔选择峰值波长与之相近的 LED, 也可以使用白光 LED 作为宽带光谱, 在各个波长间隔内搭配窄带 LED 进行光谱调整来更好地模拟太阳光谱。布局方面应该遵循均匀布局的

原则,将 LED 以正方形或正六边形布置,或者将 LED 阵列模块化,通过增加模块数量形成任意大面积的太阳模拟器。由于 LED 的发光角度较大,在设计过程中可以为其添加透镜来减小其发光角度^[78,80]。LED 工作过程中产生的热量会使其光谱曲线发生偏移,目前的散热方式一般是将 LED 阵

列放置在铝散热器上并搭配水冷或风冷装置使用,但该散热系统存在维护困难、噪音大的缺点,而且装调误差可能会导致 LED 阵列散热不均匀,因此,为 LED 太阳模拟器设计更好的散热系统是未来的重要研究方向。表 7 所示为 LED 太阳模拟器光谱匹配性能对比。

表 7 LED 太阳模拟器的光谱匹配性能

Table 7 Spectral matching performances of LED solar simulators

Year	Light source	Spectral range	Spectrum/Spectral matching degree/Spectral grade	Ref
2008	4-color LEDs	—	AM1.5G/0.77/A	[73]
2010	18-color-LEDs	390 nm~940 nm	AM1.5G/0.9/A	[74]
2014	23-color LEDs	350 nm~1 100 nm	AM1.5G/-/A	[75]
2015	LEDs	300 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.99/A	[77]
2015	6-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.92~1.08/A	[81]
2016	6-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/-/A	[79]
2018	6-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.995/A	[76]
2018	15-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.94/A	[78]
2019	11-color LEDs	400 nm~900 nm	AM1.5G/-/A	[82]
2020	39-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.9544/A	[83]
2021	19-color LEDs	250 nm~1 000 nm	AM1.5G/-/A	[80]
2018	6-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.995/A	[76]
2018	15-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.94/A	[78]
2019	11-color LEDs	400 nm~900 nm	AM1.5G/-/A	[82]
2020	39-color LEDs	400 nm~1 100 nm	AM1.5G/0.9544/A	[83]
2021	19-color LEDs	250 nm~1 000 nm	AM1.5G/-/A	[80]

5 光谱匹配技术发展趋势

未来光谱匹配技术的研究重点主要为以下几个方面:

- 1)在红外和紫外范围扩展太阳模拟器的光谱,以实现更广泛的应用。随着光伏技术的迅速发展,太阳能电池的光谱响应范围也在不断扩展,对此类太阳能电池的测试和测量需要使用光谱范围更广的太阳模拟器。
- 2)提高太阳模拟器的光谱保真度。高保真度太阳模拟器要求太阳模拟器的整个光谱形状和积分能量与太阳光谱匹配,同时在小的波长范围内没有高强度尖峰,能够更精确地模拟太阳光谱。
- 3)采用更严格的标准来评估太阳模拟器的光谱匹配性能,进一步提高太阳模拟器与标准太阳光谱的匹配程度。

6 结束语

如何提高太阳模拟器光谱与真实太阳光谱的匹配程度一直是太阳模拟领域的重要研究方向,本文根据太阳模拟器所用光源的不同介绍了三种光谱匹配方法:研制性能优异的光学滤光片来修正传统光源的光谱、将不同光源的光谱进行拼接以及设计不同的 LED 组合结构。未来的太阳模拟器将向着多样化、多功能化的方向发展,应用范围也会更加广泛,能够匹配多种太阳光谱的太阳模拟器将会对光伏产业和航天技术的发展起到极大的推动作用。

参考文献:

[1] 宣经纬,饶长辉,钟立波,等.基于 GPU 的太阳图像斑点重建技术实现[J].大气与环境光学学报,2020,

- 15(2): 90-100.
- XUAN Jingwei, RAO Changhui, ZHONG Libo, et al. Implementation of solar speckle image reconstruction based on GPU[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(2): 90-100.
- [2] 何春元. 太阳自适应光学图像盲解卷积算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- HE Chunyuan. Research on blind deconvolution algorithms for solar adaptive optics images[D]. Chengdu: School of Information and Communication Engineering, 2022.
- [3] 王帅, 鲍华, 何春元, 等. 低秩先验的相位差法太阳图像重建[J]. *光电工程*, 2023, 50(6): 220208.
- WANG Shuai, BAO Hua, HE Chunyuan, et al. Solar image reconstruction by phase diversity with low rank prior[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(6): 220208.
- [4] 王帅, 何春元, 荣会钦, 等. 二阶广义总变分约束的太阳图像多帧盲解卷积[J]. *光电工程*, 2023, 50(2): 220207.
- WANG Shuai, HE Chunyuan, RONG Huiqin, et al. Multi-frame blind deconvolution of solar images via second-order total generalized variation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(2): 220207.
- [5] 徐亮. 月亮模拟器光学系统设计与辐照度均匀性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- XU Liang. The Optical design of the moon simulator and the analysis for irradiance and uniformity[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
- [6] HAROON S M A, HAMZA B, MUAZZ F, et al. Development of a truncated ellipsoidal reflector-based metal halide lamp solar simulator for characterization of photovoltaic cells[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 43(20): 2554-2568.
- [7] SONG J Y, ZENG R M, XU D Y, et al. A compact AAA-compatible multispectral solar simulator based on spherical cap chamber[J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1053-1064.
- [8] VOSYLIUS Ž, NOVIČKOVAS A, TAMOŠIŪNAS V. Optimization of LED-based solar simulators for cadmium telluride and microcrystalline silicon solar cells[J]. *Energies*, 2023, 16(15): 1-15.
- [9] KOHRAKU S, KUOKAWA K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]//3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japan: IEEE, 2003: 1977-1980.
- [10] KOHRAKU S, KUOKAWA K. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90(18-19): 3364-3370.
- [11] TSUNO Y, KAMISAKO K, KUOKAWA K. New generation of PV module rating by LED solar simulator - A novel approach and its capabilities[C]//33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [12] ANON N, CHAYA J, DHIRAYUT C, et al. Construction of tungsten halogen, pulsed LED, and combined tungsten halogen-LED solar simulators for solar cell I-V characterization and electrical parameters determination[J]. *International Journal of Photoenergy*, 2012(4): 201-209.
- [13] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices — Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics: DIN EN 60891-2010[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2010.
- [14] STUCKELBERGER M, PERRUCHE B, BONNET-EYMARD M, et al. Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(5): 1282-1287.
- [15] 卢铿, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学传感器环境适应性设计与试验研究[J]. *中国光学*, 2009, 2(5): 364-376.
- LU E, YAN Changxiang, WU Qingwen, et al. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(5): 364-376.
- [16] 李光云, 张国玉, 付明, 等. 太阳模拟器中正方形光学积分器的设计与分析[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 48-52.
- LI Guangyun, ZHANG Guoyu, FU Ming, et al. Design and analysis of square integrator in solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 48-52.
- [17] 刘石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- LIU Shi. Study on key technique of collimated solar simulator with high-precision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [18] 吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 太阳模拟器中椭球面聚光镜参数的确定[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 43-47.
- LÜ Tao, ZHANG Jingxu, FU Donghui, et al. Determination of ellipsoid condenser parameters in solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 43-47.
- [19] 李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 扫描式氙灯太阳模拟器十维扫描系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 358-366.

- LI Junlin, ZHANG Liming, SI Xiaolong, et al. Ten dimensional scanning system of scanning xenon lamp solar simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 358-366.
- [20] 苏拾, 王逸文, 张国玉, 等. 太阳敏感器测试用运动式 LED 太阳模拟器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(6): 104-110.
- SU Shi, WANG Yiwen, ZHANG Guoyu, et al. Research on mobile LED solar simulator for solar sensor testing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 104-110.
- [21] 陈圆圆, 方贤德, 郭龙, 等. 座舱热载荷太阳辐射模拟器设计研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 140-147.
- CHEN Yuanyuan, FANG Xiande, GUO Long, et al. Design of a solar radiation simulator for the aircraft cabin thermal load tests[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 140-147.
- [22] WANG W, AICHMAYER L, LAUMERT B, et al. Design and validation of a low-cost high-flux solar simulator using fresnel lens concentrators[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 2221-2230.
- [23] SARWAR J, GEORGAKIS G, LACHANCE R, et al. Description and characterization of an adjustable flux solar simulator for solar thermal, thermochemical and photovoltaic applications[J]. *Solar Energy*, 2014, 100: 179-194.
- [24] DU Z, ZHAO H, JIA G, et al. Design, fabrication, and evaluation of a large-area hybrid solar simulator for remote sensing applications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6184-6202.
- [25] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements: IEC 60904-9-2007[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [26] Japan Industrial Standards. Solar simulator for multi-junction solar cells and modules: JIS C 8942-2009[S]. Japan: Japan Industrial Standards, 2009.
- [27] American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing: ASTM E927-19(2019)[S]. United States: American Society for Testing and Materials, 2019.
- [28] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices – Part 9: Classification of solar simulator characteristics: IEC 60904-9: 2020[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2020.
- [29] 顾皓楠. 太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- GU Haonan. Development of the AM1.5 filter for solar simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [30] 孟嘉译, 付秀华, 王迪. 太阳模拟器中光谱修正滤光片的研制[J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 50-53.
- MENG Jiayi, FU Xiuhua, WANG Di. Fabrication of spectral correction filter in solar simulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(2): 50-53.
- [31] 陈文志, 蒋绿林, 姜黎, 等. 太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222002.
- CHEN Wenzhi, JIANG Lulin, JIANG Li, et al. Experimental research of spectral design of solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002.
- [32] 顾皓楠, 付秀华, 张静, 等. 氙灯模拟太阳光谱滤光片的研制[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 21-24.
- GU Haonan, FU Xiuhua, ZHANG Jing, et al. Development of the filter for solar spectrum simulated[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 21-24.
- [33] 付秀华, 杨金也, 刘冬梅, 等. 基于太阳模拟器阶梯式补偿滤光片的研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 1123001.
- FU Xiuhua, YANG Jinye, LIU Dongmei, et al. Research on ladder-type compensation filter based on solar simulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1123001.
- [34] 宁晓阳, 杭凌侠, 郭峰, 等. $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 变折射率光学薄膜制造技术研究[J]. *表面技术*, 2011, 40(6): 58-61, 77.
- NING Xiaoyang, HANG Lingxia, GUO Feng, et al. Research the deposition of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nonlinear refractive-index optical thin films[J]. *Surface Technology*, 2011, 40(6): 58-61, 77.
- [35] 钟民. 一种太阳模拟器的光学系统设计及辐射特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- ZHONG Min. Optical system design and radiation characteristics of a solar simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [36] 白涛. 太阳模拟器 AM0 滤光片及其稳定性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.
- BAI Tao. The fabrication and stability of AM0 filter for solar simulator[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [37] 潘永强, 施洋, 杭凌侠. 太阳能模拟器滤光片的研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2010, 30(5): 470-473.
- PAN Yongqiang, SHI Yang, HANG Lingxia. Design and

- fabrication of air mass filter for solar simulator[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, 30(5): 470-473.
- [38] 朱继亦, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于 LED 的光谱可调光源的光谱分布合成[J]. *发光学报*, 2010, 31(6): 882-887.
ZHU Jiyi, REN Jianwei, LI Baoyong, et al. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, 31(6): 882-887.
- [39] 范铎. LED 阵列模拟太阳光谱的理论研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
FAN Duo. The theory research of solar spectrum simulated by LED[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [40] AL-AHMAD A, HOLDWORTH J, VAUGHAN B, et al. Optimizing the spatial nonuniformity of irradiance in a large-area LED solar simulator[J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8393.
- [41] KOLBERG D, SCHUBERT F, KLAMETH K, et al. Homogeneity and lifetime performance of a tunable close match LED solar simulator[J]. *Energy Procedia*, 2012, 27: 306-311.
- [42] BROWN S W, SANTANA C, EPPELDAUER G P. Development of a tunable LED-based colorimetric source[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2002, 107(4): 363-371.
- [43] FUJIWARA K, YANO A. Controllable spectrum artificial sunlight source system using LEDs with 32 different peak wavelengths of 385-910 nm[J]. *Bioelectromagnetics*, 2011, 32(3): 243-252.
- [44] 王基强, 苏拾, 张健, 等. 球面阵列 LED 太阳模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 117-123.
WANG Jiqiang, SU Shi, ZHANG Jian, et al. Design of optical system of spherical array LED solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 117-123.
- [45] 张新强, 张庆茂, 郭亮, 等. 新型 LED 太阳模拟器光学系统设计及仿真[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 170-175.
ZHANG Xinqiang, ZHANG Qingmao, GUO Liang, et al. Design and simulation of optical system for novel LED solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 170-175.
- [46] SUN C, JIN Z L, SONG Y, et al. LED-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations[J]. *Solar Energy*, 2022, 233: 96-110.
- [47] 朱强. 谱峰曲线拟合的计算机处理[J]. *平原大学学报*, 2001, 18(2): 13-14.
- ZHU Qiang. A novel computer disposal of the spectral information fitting[J]. *Journal of Pingyuan University*, 2001, 18(2): 13-14.
- [48] 张译文, 徐林, 万松. 基于 LED 的标准太阳光谱灯拟合算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 596-600.
ZHANG Yiwu, XU Lin, WAN Song. Synthesizing algorithm for LED standard solar spectrum lamp[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 596-600.
- [49] 甘汝婷, 郭震宇, 林介本, 等. 遗传算法在 LED 光源光谱匹配技术中的应用[J]. *光子学报*, 2014, 43(7): 0730003.
GAN Ruting, GUO Zhenning, LIN Jieben, et al. The genetic algorithm in the application of the LED light source spectral matching technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0730003.
- [50] 徐广强, 张竞辉, 曹冠英, 等. 大功率单色 LED 拟合日光光谱研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(1): 1-5.
XU Guangqiang, ZHANG Jinghui, CAO Guanying, et al. Simulation of solar spectrum with high-power monochromatic light emitting diodes[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(1): 1-5.
- [51] 王立辉. 基于 LED 阵列光源的太阳光谱合成技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
WANG Lihui. Solar spectrum synthesis technology based on LED array light source[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [52] 王凌云, 王立辉, 苏拾, 等. 基于 LED 峰值的太阳光谱合成方法[J]. *发光学报*, 2018, 39(4): 555-561.
WANG Lingyun, WANG Lihui, SU Shi, et al. Solar spectrum synthesis based on LED peak[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(4): 555-561.
- [53] WU C C, HU N C, FONG Y C, et al. Optimal pruning for selecting LEDs to synthesize tunable illumination spectra[J]. *Lighting Research & Technology*, 2011, 44(4): 484-497.
- [54] 唐帆. LED 全光谱合成方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
TANG Fan. Study on LED full spectrum synthesis method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [55] 徐广强, 于慧媛, 张竞辉, 等. 基于单色 LED 补偿白光 LED 技术的模拟太阳光谱研究[J]. *发光学报*, 2017, 38(8): 1117-1124.
XU Guangqiang, YU Huiyuan, ZHANG Jinghui, et al.

- Solar spectrum matching based on white LED compensated with monochromatic LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(8): 1117-1124.
- [56] 张玉宝, 董礼, 张国英. 基于有效集算法的大功率单色 LED 太阳光谱模拟仿真[J]. *发光学报*, 2018, 39(6): 862-869.
- ZHANG Yubao, DONG Li, ZHANG Guoying. Simulation of high power monochromatic LED solar spectrum based on effective set algorithm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(6): 862-869.
- [57] 侯晓芬. 基于序列影像的空间目标三维重建关键技术研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2015.
- HOU Xiaofen. Research on key technologies of 3D reconstruction of space objects based on sequence images[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015.
- [58] POUSET N, ROUGIÉ B, RAZET A. Impact of current supply on LED colour[J]. *Lighting Research & Technology*, 2010, 42(4): 371-383.
- [59] 潘永强, 白涛, 杭凌侠. 光伏电池组件太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2484-2488.
- PAN Yongqiang, BAI Tao, HANG Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2484-2488.
- [60] 苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 气象辐射计量检测用太阳模拟器性能分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(5): 11-15.
- SU Shi, ZHANG Guoyu, WANG Lingyun, et al. Performance analysis for the solar simulator of solar test radiometry in meteorology[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(5): 11-15.
- [61] 高雁, 刘洪波, 王丽, 等. 实用型三谱段太阳模拟器的设计与研制[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 1004-1012.
- GAO Yan, LIU Hongbo, WANG Li, et al. Design and manufacture of a practical triple spectrum solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 1004-1012.
- [62] 高雁, 刘洪波, 王丽, 等. AAA 级太阳模拟器的设计与研制[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 570-576.
- GAO Yan, LIU Hongbo, WANG Li, et al. Design and development of a class AAA solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 570-576.
- [63] 韩国华, 朱文星, 朱炬, 等. 大面积宽光谱太阳模拟器光谱匹配均匀度技术研究[J]. *半导体光电*, 2016, 37(5): 746-749.
- HAN Guohua, ZHU Wenxing, ZHU Ju, et al. Study on spectral matching uniformity of large area wide spectrum solar simulator[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(5): 746-749.
- [64] 崇伟, 吕文华, 张健, 等. 双氙灯光源积分球日照计校准系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0112004.
- CHONG Wei, LÜ Wenhua, ZHANG Jian, et al. Calibration system of sunshine duration recorder based on bi-xenon lamp source integrating sphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0112004.
- [65] BICKLER D. The simulation of solar radiation[J]. *Solar Energy*, 1962, 6(2): 64-68.
- [66] BENNETT M, PODLESNY R. Two source simulator for improved solar simulation[C]//IEEE Conference on Photovoltaic Specialists. Florida, USA: IEEE, 1990: 1438-1442.
- [67] JENKINS P, SCHEIMAN D, SNYDER D. Design and performance of a triple source air mass zero solar simulator[C]//18th Space Photovoltaic Research and Technology Conference. Ohio, USA: OAI, 2005: 134-138.
- [68] 罗青青. 宽光谱太阳模拟器的理论分析和整体设计[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- LUO Qingqing. Theoretical analysis and integral design for wide spectrum solar simulator[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [69] 冯云峰, 张鹤仙, 黄国保, 等. 基于 AM0 太阳模拟器 3 波段光谱独立可调的设计[J]. *太阳能*, 2023(10): 95-100.
- FENG Yunfeng, ZHANG Hexian, HUANG Guobao, et al. Based on AM0 solar simulator design of three band spectral independent adjustable[J]. *Solar Energy*, 2023(10): 95-100.
- [70] BAGUCKIS A, NOVIČKOVAS A, MEKYS A, et al. Compact hybrid solar simulator with the spectral match beyond class A[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2016, 6(3): 35501.
- [71] 刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1447-1454.
- LIU Hongxing, SUN Jingxu, LIU Zexun, et al. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1447-1454.
- [72] BLISS M, BETTS T R, GOTTSCHALG R. An LED-based photovoltaic measurement system with variable

- spectrum and flash speed[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(6-7): 825-830.
- [73] 高亮, 李果华, 孟昭渊. LED 太阳模拟器的设计[C]//第十届中国太阳能光伏大会: 拥抱光伏发电新时代. 江苏, 常州: 中国可再生能源学会, 2008: 751-756.
- Gao Liang, Li Guohua, Meng Zhaoyuan. The design of LED solar simulator[C]//10th China Solar Photovoltaic Conference: Embracing the New Era of Photovoltaic Power Generation. Changzhou, Jiangsu: China Renewable Energy Society, 2008: 751-756.
- [74] KREBS F C, SYLVESTER-HVID K O, JORGENSEN M. A self-calibrating LED-based solar test platform[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2011, 19(1): 97-112.
- [75] LINDEN K J, NEAL W R, SERREZE H, et al. Adjustable spectrum LED solar simulator[C]//Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII. California, USA: SPIE, 2014: 9003171-9003179.
- [76] AL-AHMAD A, HOLDSWORTH J, VAUGHAN B, et al. Modular LED arrays for large area solar simulation[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2019, 27(2): 179-189.
- [77] 赵孟钢, 冯云峰, 刘皎, 等. 基于 LED 光源的太阳模拟器光谱合成设计[J]. *太阳能*, 2015, 36(6): 41-43.
- ZHAO Menggang, FENG Yunfeng, LIU Jiao, et al. Spectral synthesis design of solar simulator based on LED light source[J]. *Solar Energy*, 2015, 36(6): 41-43.
- [78] 苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于 LED 阵列光源的太阳模拟器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 307-315.
- SU Shi, ZHANG Guoyu, WANG Lingyun, et al. Solar simulator based on LED array light source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 307-315.
- [79] NOVICKOVAS A, BAGUCKIS A, MEKYS A, et al. Compact light-emitting diode-based AAA class solar simulator: design and application peculiarities[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(4): 1137-1142.
- [80] TAVAKOLI M, JAHANTIGH F, ZAROOKIAN H. Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region[J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1130-1136.
- [81] 朱孔硕, 孙健刚, 李果华, 等. LED 太阳模拟器光谱匹配度与辐照不均匀度的实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 193-198.
- ZHU Kongshuo, SUN Jiangang, LI Guohua, et al. Realization of LED solar simulator matching and irradiance unevenness[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 193-198.
- [82] 李超, 邵剑波, 席曦, 等. 多波段 LED 太阳模拟器及其测试系统的研制[J]. *发光学报*, 2019, 40(5): 635-642.
- LI Chao, SHAO Jianbo, XI Xi, et al. Development of LED solar simulator and solar cell test system[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(5): 635-642.
- [83] 胡鹏飞, 王广才, 王静, 等. 高光谱匹配 LED 太阳模拟器的研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2020(7): 85-89.
- HU Pengfei, WANG Guangcai, WANG Jing, et al. Study of high spectrum matching LED solar simulator[J]. *Automation & Instrumentation*, 2020(7): 85-89.