

# 光伏组件效率测试方法与标准对比分析

张辉利 温 涛

湖北能源集团西北新能源发展有限公司 陕西榆林 719000

**摘要：**本文系统对比分析了光伏组件效率测试的三种主要方法——标准太阳模拟器测试法、自然光下实地测试法及积分球测试法的技术特征，并深入探讨了国际电工委员会（IEC）标准、中国国家标准及企业自定义标准在测试条件、设备精度及评价指标方面的差异。研究表明，标准太阳模拟器法通过人工光源实现可控环境测试，测量不确定度低于 $\pm 1.5\%$ ，但设备成本高且存在光谱偏差；自然实测法获取真实工况数据，但受环境干扰导致有效数据率不足60%；积分球法光学表征精度达 $\pm 0.3\%$ ，但受限于组件尺寸及电学参数评估局限。在标准体系方面，IEC标准构建了全球通用技术框架，国家标准增设本土化修正参数，企业标准则通过动态载荷、AI预测等创新手段提升测试深度。研究结论为光伏组件研发、认证及质量控制提供了方法选择与标准应用的决策依据。

**关键词：**光伏组件；效率测试；测试方法；测试标准；对比分析

随着全球光伏装机容量突破1TW里程碑，光伏组件效率的精准评估成为制约产业高质量发展的关键技术瓶颈。当前光伏组件转换效率测试体系呈现方法多元化与标准层次化特征：实验室模拟测试、户外实测及光学表征三种技术路线并存，国际标准、国家标准与企业标准形成梯度化规范。这种技术格局既保障了测试结果的可比性，又推动了测试技术的创新应用。本文通过系统解构三种测试方法的技术原理与操作规范，对比分析不同层级标准在测试条件设定、设备精度要求及性能评价指标方面的差异，旨在建立光伏组件效率测试方法与标准体系的对应关系框架，为光伏产品研发、质量认证及电站投资决策提供技术参考。

## 一、光伏组件效率测试方法

### （一）标准太阳模拟器测试技术解析

实验室环境下的光电转换效率评估主要采用标准太阳模拟器测试系统。该技术体系通过氙灯或LED阵列构建人工光源系统，能够精确复现太阳光谱特性、 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 标准辐照度及AM1.5光谱分布。测试平台采用三维调节机构确保被测组件法线与光轴重合，配备四象限探测器实现光照均匀性实时监测，均匀度偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内。典型测试流程包含三个阶段：首先进行光源预热与光谱匹配，通过分光光度计校准300–1200nm波段光谱匹配度；其次开展I–V曲线扫描，采用电子负载实现0– $V_{oc}$ 电压步进式扫描，采样间隔不大于10mV；最终通过数据采集卡同步记录 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $P_{max}$ 等关键参数。该方法在实验室可控条件下进行，确保了测试结果的重复性，其

测量不确定度可控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。高精度测试设备的购置成本构成主要制约因素，A级太阳模拟器单价通常超过50万美元。设备维护需要专业团队进行氙灯更换、光谱校准等操作，年度维护成本约占设备投资的8–10%。模拟光谱与真实太阳光谱在紫外波段的差异，可能导致量子效率测试结果出现3–5%的系统偏差。

### （二）自然环境实测技术特征

户外实测系统采用固定式或跟踪式支架部署被测组件，配套建设自动气象站和数据采集终端。测试阵列通常由3–5个相同规格组件构成，其中主组件连接高精度功率分析仪，从组件安装辐照度传感器和环境温湿度探头。数据采集周期设置为1分钟间隔，同步记录总辐照表、组件背板温度、风速风向等参数。通过多元线性回归算法建立环境参数与组件效率的关联模型，可解析温度系数、低辐照度效应等关键性能指标。测试周期需覆盖四季变化，典型测试时长不少于12个月。该方法优势在于获取真实工况数据，但面临多重环境干扰：云层遮挡造成辐照度突变可能引发MPPT追踪延迟，沙尘沉积导致透光率衰减，鸟粪遮挡造成热斑效应等。数据有效性筛选需建立三级判据，剔除雨雪天气、传感器故障等异常数据段，有效数据采集率通常低于60%。

### （三）积分球光学测试系统构建

积分球测试装置由直径1.5–2.0米的空心球体构成，内壁喷涂硫酸钡漫反射涂料，反射比 $\geq 98\%$ 。被测组件通过法兰盘密封安装在球体测试端口，入射光路采用光纤耦合LED阵列，可实现300–2500nm波段连续可调。测

试过程包含三个关键步骤：首先进行光阱校准，通过标准漫反射板建立反射基准；其次开展双向反射分布函数（BRDF）测量，采用旋转平台获取0–180°极角范围内的反射特性；最终通过积分方程计算吸收光通量，结合量子效率测试结果推导转换效率。该方法在光学性能表征方面具有独特优势，反射率测试重复性可达 $\pm 0.3\%$ 。系统局限性主要体现在三个方面：球体开口率限制被测组件尺寸，最大测试面积通常不超过 $1\text{m}^2$ ；测试光谱为标准光源而非真实太阳光谱；无法评估串联电阻、填充因子等电学参数。实际应用中常作为辅助测试手段，与太阳模拟器测试结果进行交叉验证<sup>[1]</sup>。

## 二、光伏组件效率测试标准

### （一）国际电工委员会（IEC）标准

国际电工委员会（IEC）制定的光伏器件测试标准具有全球通用性。其中，IEC 62094-1：2018标准严格规范了标准测试条件（STC）下的电气参数测定流程。该标准明确要求测试环境必须满足 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 辐照强度、 $25^\circ\text{C}$ 组件温度及AM1.5光谱分布三项核心参数，同时对测试设备精度提出量化指标：电流采样装置误差范围不得超过 $\pm 0.5\%$ ，电压测量系统精度需达到 $\pm 0.2\%$ 以上。这些技术指标确保全球不同实验室的测试数据具备可比性，例如在组件最大功率点追踪（MPPT）测试中，设备精度差异将直接影响转换效率计算结果。针对环境适应性验证，IEC 62108-1：2016盐雾腐蚀试验标准构建了完整的耐候性评估体系。该标准规定试验舱需维持 $35^\circ\text{C}$ 恒温环境，采用浓度5%的氯化钠溶液进行雾化腐蚀，喷雾速率控制在 $1\text{--}2\text{mL}/80\text{cm}^2\cdot\text{h}$ 范围内。测试周期可根据应用场景弹性设定，近海光伏设备需经历至少2000小时连续试验，而普通工业级产品测试周期通常为96小时。这种梯度化测试方案有效平衡了测试效率与可靠性验证需求。

### （二）国家标准（以中国为例）

中国光伏标准体系在兼容国际规范的基础上，形成了特色化技术要求。GB/T 6495.1-2017国家标准与IEC 62094-1：2018保持技术同源，但在测试报告规范方面增设了环境温度修正系数、光谱失配修正等本土化参数。GB/T 9535-1998晶体硅组件认证标准则突出全生命周期验证理念，要求组件在 $-40^\circ\text{C}$ 至 $85^\circ\text{C}$ 温变循环、双85湿热老化等极端工况下保持效率衰减低于5%，并通过机械载荷测试验证抗风压性能。

### （三）企业自定义标准

领先光伏企业构建了多维度的内部测试标准。头部

企业在执行IEC标准基础上，增设了动态机械载荷、热斑耐久性等专项测试。某龙头企业要求组件在 $-40^\circ\text{C}$ 至 $85^\circ\text{C}$ 温变循环中完成100次冷热冲击后，效率衰减不得超过初始值的1%，测试设备精度指标普遍提升30%–50%。行业联盟标准则更具前瞻性，某联盟制定的组件可靠性认证体系引入AI数据分析模型，通过百万级测试数据训练，建立效率衰减预测算法，使长期可靠性评估周期缩短60%<sup>[2]</sup>。

## 三、测试方法与标准的对比分析

### （一）测试条件方面

#### 1. 标准太阳模拟器测试法与IEC标准

标准太阳模拟器测试法依据IEC标准中规定的标准参考条件（STC）进行测试，即辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、温度为 $25^\circ\text{C}$ 、大气质量（AM）为1.5。这种标准化的测试条件能够在一定程度上模拟出理想的太阳光照环境，使得不同实验室和制造商之间的测试结果具有可比性。然而，实际应用场景中的光照条件往往更为复杂多变，与标准参考条件存在一定差异。例如，在户外实际环境中，太阳辐照度会随着天气、季节、地理位置等因素的变化而波动，且光谱分布也可能受到大气散射、云层遮挡等因素的影响。相比之下，IEC标准在制定过程中充分考虑到了这些实际因素，除了规定标准参考条件外，还对一些特殊环境下的测试条件进行了说明和指导，如高温、低温、低辐照度等环境条件下的测试要求，更符合实际应用的需求。

#### 2. 自然光下实地测试法与国家标准

自然光下实地测试法直接将光伏组件暴露于自然环境中进行测试，能够真实反映组件在实际使用条件下的性能表现，这与国家标准中强调的实际应用场景相结合的理念相契合。国家标准如GB/T 6495.1-2017等在规范光伏组件效率测试时，不仅考虑了标准参考条件下的测试方法，还对户外实地测试提出了一些基本原则和要求。例如，在实地测试中要求对太阳辐射强度、环境温度、风速等气象数据进行准确测量和记录，以便后续对测试结果进行分析和评估。但自然光下实地测试法由于受自然条件的限制，测试条件的一致性和可控性较差，难以像标准太阳模拟器测试法那样精确地控制和重复测试条件，这可能导致测试结果的离散性较大。

### （二）测试设备要求方面

#### 1. 积分球测试法与企业自定义标准

积分球测试法需要使用专门的积分球设备以及配套的光学测量仪器，如光谱仪、功率计等。这些设备通常

具有较高的精度和稳定性要求，以确保能够准确测量光伏组件在积分球内的反射、透射和吸收特性以及电输出功率。企业自定义标准中，对于采用积分球测试法的企业来说，往往会根据自身的研发需求和产品质量控制要求，对测试设备提出更高的精度和性能指标。例如，一些企业要求积分球的内壁反射率在特定波段范围内要达到98%以上，以保证光线在球内的充分漫反射和均匀分布；同时，对光谱仪的波长分辨率和功率计的测量精度也有更为严格的要求，可能会要求波长分辨率小于0.1 nm，功率测量精度达到±0.1%以内，从而能够更精确地获取光伏组件的光学和电学性能参数。

## 2. 不同测试方法与各类标准

标准太阳模拟器测试法需要配备符合IEC标准规定的高精度太阳模拟器、标准光伏器件以及数据采集系统等设备。太阳模拟器的光谱分布、光照强度和均匀性必须满足严格的要求，以确保能够模拟出标准的太阳光照条件。自然光下实地测试法则相对简单，主要需要配备太阳辐射计、温度传感器、风速仪等气象测量设备以及数据采集存储设备，用于记录测试过程中的环境参数和光伏组件的电性能数据。而无论是IEC标准、国家标准还是企业自定义标准，都对测试设备的准确性、可靠性和溯源性提出了明确要求。例如，所有用于测量电性能参数的设备都必须定期进行校准和溯源，以确保测量结果的准确性和一致性；对于太阳模拟器等关键设备，还需要具备相应的资质认证和检测报告，证明其符合标准规定的性能指标。

### （三）效率计算方式及评价指标方面

#### 1. 各测试方法的效率计算共性与差异

在效率计算方面，三种测试方法都遵循基本的功率转换原理，即通过测量光伏组件在一定光照条件下的输出功率与输入光功率的比值来计算转换效率。然而，由于测试条件和方法的不同，在具体的计算过程中存在一些差异。例如，标准太阳模拟器测试法和自然光下实地测试法都是直接测量组件在不同光照强度下的输出功率，然后根据已知的光照面积和辐照度计算出输入光功率，进而得到转换效率。但在积分球测试法中，由于其特殊的测试原理，需要先测量组件的反射光通量、透射光通量和入射光通量，计算出组件的吸收光通量后，再结合输出功率计算转换效率。这种差异导致了三种方法在计算结果上可能会存在一定的偏差，尤其是在不同的光谱分布和光照条件下。

#### 2. 不同标准对评价指标的规定差异

IEC标准、国家标准和企业自定义标准在评价指标方面各有侧重。IEC标准主要关注光伏组件在标准参考条件下的基本电性能参数，如短路电流、开路电压、最大功率点功率等，并通过这些参数计算出转换效率，以此作为衡量组件性能的主要指标。国家标准在遵循IEC标准的基础上，还会结合国内光伏产业的发展现状和应用需求，对一些特殊类型的光伏组件提出额外的评价指标。例如，对于地面用晶体硅光伏组件，GB/T 9535-1998标准中除了规定电性能指标外，还对组件的机械性能、耐腐蚀性能、耐候性能等方面提出了具体要求，以确保组件在户外长期稳定运行。企业自定义标准则更加灵活多样，会根据企业自身的产品特点和市场定位，制定出更具针对性的评价指标。一些企业为了突出产品的高效性和先进性，会在IEC和国家标准的基础上，增加对组件在不同光照角度、弱光条件下的性能要求以及长期衰减率等指标的考核，从而更全面地评估产品的性能优势<sup>[1]</sup>。

## 结语

光伏组件效率测试技术体系已形成“方法互补、标准协同”的发展格局。标准太阳模拟器法作为研发基准手段，自然实测法作为工程验证手段，积分球法作为光学研究手段，共同构建了完整的测试链。在标准层面，IEC标准确保全球技术对标，国家标准兼顾本土应用特性，企业标准推动技术前沿探索。未来，随着双面组件、钙钛矿电池等新技术发展，测试方法将向多维度环境模拟、动态载荷评估方向演进，标准体系需同步完善光谱失配修正、长期衰减预测等评价指标。产业界应建立“方法-标准-应用”的闭环验证机制，通过方法创新突破测试边界，以标准升级保障产品质量，最终推动光伏技术持续降本增效。

## 参考文献

- [1] 陈勇, 蒋玉文, 郭霄, 等. 大型集中式光伏电站效率测试及提效对策研究[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(07): 1-5.
- [2] 段野, 张鹏翔, 朱城, 等. 钙钛矿光伏电池和组件温度场分布测试分析[J]. 信息技术与标准化, 2021, (12): 37-40+49.
- [3] 包斯嘉, 张双庆, 李红涛, 等. 光伏发电效率检测方法及案例分析[J]. 电气自动化, 2016, 38(04): 59-61.