

第六版

2020 年光伏组件 可靠性计分卡



合作对象



作者



Tara Doyle

首席商务官

tara.doyle@pvel.com



Ryan Desharnais

首席技术官

ryan.desharnais@pvel.com



Tristan Erion-Lorico

光伏组件业务负责人

tristan.erion-lorico@pvel.com

撰稿人

Kenneth Sauer, 高级光伏工程师

Adam Gushansky, 项目经理

Tori Clifford, 市场部负责人

David DeLong, 网站运营经理兼摄影师

关于 PV Evolution Labs

PV Evolution Labs (PVEL) 是全球领先的光伏组件可靠性和性能测试实验室, 专为下游的太阳能项目开发商、金融商、资产所有者和运营商提供服务。凭借着十多年经验和数据的积累, PVEL 能够提供论证太阳能技术可融资性的评估测试。其值得信赖的独立报告以数据驱动的可量化指标取代了有关太阳能设备性能的假设, 从而实现高效的太阳能项目开发 and 融资。

PVEL 关联各大光伏和储能制造商, 在全球拥有 400 多个下游合作伙伴, 合作伙伴的年购买力超过 30 吉瓦。PVEL 的使命是通过生成有效数据来加速太阳能技术的采用, 从而为遍布全球的下游光伏买家提供支持。访问 pvel.com 了解更多信息。



目录

简介	
前言：首席执行官寄语	5
PVEL 的 10 年测试历程	6
光伏技术及其可靠性和测试	
光伏组件制造发展趋势	8
光伏组件失效模式和老化机制	9
保修和认证限制	10
现场的可靠性故障	11
测试结果	
方法：PVEL 产品认证计划 (PQP)	13
PVEL 2019 产品认证计划	14
结果概览	15
热循环	16
湿热	18
动态机械负载测试序列	20
电位诱导衰减	22
PAN 性能	24
历史计分卡	26
工厂厂址的影响	27
案例研究	
PQP 失效	29
背板耐用性测试序列	31
光照和高温诱导衰减 (LeTID)	32
独立工程师 (IE) 视角：DNV GL 作出的贡献	33
结论	
降低收入风险的五个步骤	36
结论	37

简介





前言：首席执行官寄语

今年的光伏组件可靠性计分卡对我个人有特殊意义。十年前，在我创立 PV Evolution Labs (PVEL) 的那段时间，我正准备成为一名父亲。我曾经说过，那时安装的系统将一直持续运行到我未出生的孩子大学毕业。

遗憾的是，并非所有在 2010 年安装的系统都经久耐用。那一年出现了电位诱导衰减 (PID) 这种失效模式，这一模式可使电站的发电量最多降低 30%。在我们今年的 PQP 测试中，PID 衰减测试结果的中位数已创下实验室历史最高纪录。PID 是我们业内许多人士认为都已解决的问题。但本报告中不仅再次出现了 PID，而且还记录了许多其他故障，这令人十分不安。

在过去几年中，我们见证了光伏技术的巨大创新。这份创新列表令人印象深刻，其中包括双面、更大的硅片、半切割和叠瓦电池、新颖的电池间互连方法、PERC、HJT 以及一系列其他的高效电池技术。我们还测试了更薄的框架和玻璃、反光焊带、新型密封剂和背板等材料。在急于创新的趋势下，一些制造商忽视了基本的质量管控。

但毫无疑问，太阳能光伏技术的进展至关重要。我们的计分卡合作伙伴 DNV GL 在其《能源转型前景展望》(Energy Transition Outlook) 中指出，到 2050 年，地球的温度预计会升高 2°C 以上，这一结果将对全球造成灾难性后果。快速扩大可再生能源的产能对于应对气候变化至关重要，而效率更高、成本更低的光伏电池和组件技术有助于我们更加接近这一目标。

这将引领全球太阳能产业走向何方？光伏价值链上的每一个参与者都面临着压力：在满足能源转型需求的同时，也要带来盈利的投资机会。PVEL 正在为建设所需的可靠、可融资的太阳能电站创造重要的数据。

第六版 PVEL 计分卡重点介绍了我们最重要的一项测试计划，即光伏组件产品认证计划 (PQP) 中的数据。这项计划中涵盖我们测试过的各种出色技术、对顶级制造商卓越表现的认可，以及任务关键型风险缓解策略。这些策略旨在协助全球太阳能行业在面对光伏组件的发展，以及部署呈指数级增长的太阳能的压力逐年增长的趋势下，能够保证质量和可靠性。

我们希望今年的计分卡能使整个行业专注于部署经久耐用的太阳能系统，以造福包括我十岁儿子在内的所有下一代。

JENYA MEYDBRAY

首席执行官

PV Evolution Labs

PVEL 的 10 年测试历程: 各个时段的产品类型

2010 年

早期

- P 型单晶和多晶, 薄膜以及 CPV 技术
- 所有电池都包含 3 根主栅线, 规格均为 156mm
- 仅单面

2012 年

有限的电池创新

- 为早期采用测试推出半切割电池
- 增量电池设计改进
- 新的背板和密封剂材料

2014 年

电池的重大进展

- 测试了 8 种不同的电池技术, 包括 n 型 PERT、p 型 PERC 和异质结 (HJT)
- 3 种不同的电池尺寸和 4 种主栅线组合

2016 年

PERC 开始占据主导地位

- 在制造商验证 PERC 电池技术时, 测试的产品组合完全一致
- 推出尺寸更大的电池 (高达 161.7mm)

2018 年至今

电池和组件的重大进展

- 8 种不同的电池尺寸
125mm、156mm、156.75mm、157.25mm、158.75mm、161.7mm、162mm 和 166mm
- 8 种不同的电池技术
p 型单晶 Al-BSF、p 型多晶和单晶 PERC、n 型单晶 PERT、HJT
n 型单晶、p 型双面单晶 PERC、n 型双面单晶 PERT 和 CdTe
- 具有以下 5 种不同主栅线数量的电池
3、5、6、9、12
- 单面和双面玻璃-玻璃组件
- 单面和双面玻璃-背板组件
- 4 种不同的电池互连类型
标准焊带、ECA (叠瓦)、交叉背接触 (IBC) 和金属穿孔卷绕 (MWT)

光伏技术及其测试和可靠性



光伏组件制造发展趋势

短短几年内，光伏组件制造业的格局已发生巨大变化。从 PERC 电池技术的迅速崛起 to 双面产品的日益普及，光伏组件买家面临着一个日趋复杂的市场。本年度计分卡中的结果表明，当制造商采用新流程或开始使用新元件时，开发商、投资者和资产所有者将受到直接影响。PVEL 观察到光伏组件技术目前存在三个重要趋势，从风险缓解的角度来看，这些趋势对于下游利益相关者尤为重要。

1. PERC 电池结构的大规模采用

钝化发射极背接触 (PERC) 电池已迅速取代曾经占据主导地位的铝背场 (Al-BSF) 电池。

— 风险

一些 PERC 电池容易受到光照和高温诱导衰减 (LeTID) 的影响，会使电站的发电量产出最多降低 10%。易受硼氧复合体不稳定性的影响也是一个问题。

+ 回报

PERC 电池效率更高，在弱光和高温条件下通常表现更好，并且生产成本与 Al-BSF 相当。

2. 新电池设计：更多主栅线、圆形焊带、更大的硅片、半切割或三切割电池

制造商现在使用的电池拥有超出 2012 年电池型号 4 倍的主栅线、新型焊带、多种硅片尺寸，同时还有半切割或更小的电池。

— 风险

一些新电池设计更易受到隐裂的影响，可能需要在生产线上变更工艺流程，而变更的实施难度非常大，会增加缺陷率。

+ 回报

新电池设计正在提高光伏组件的效率和铭牌额定功率，从而降低成本。

3. 新组件设计：更薄的框架、玻璃-玻璃、双面、重定向反光膜 (LRF)

光伏组件制造商正在竞相推出重量更轻的组件、双面选项、新颖设计以及尺寸更大的组件。

— 风险

较新规格的组件可能更易损坏，并且可能与现有的安装系统不兼容。该行业缺乏有关新元件和新设计的长期现场数据。

+ 回报

组件更轻，因而更易于运输和安装。新设计和新材料可以提高铭牌额定功率。

制造商急于将新技术推向市场，在这一趋势下，PVEL 观察到过去已知的失效机制再次出现，同时还伴有新的衰减模式。

光伏组件失效模式和老化机制

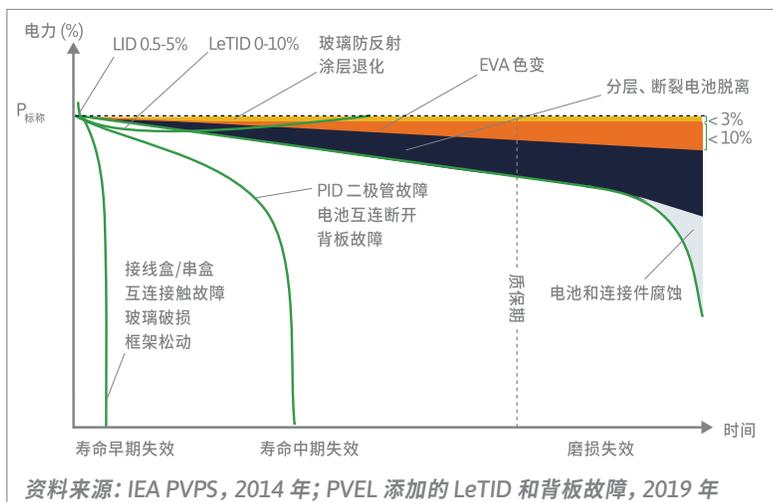
光伏组件容易受到各种失效模式和老化机制的影响。为使 PV 组件在其模拟寿命内可靠运行，制造商必须遵循严格控制的流程并使用优质元件。如果忽略质量保证/质量控制步骤或使用不合格材料，则可能导致过早失效。

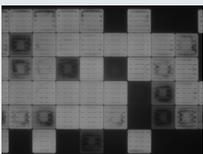
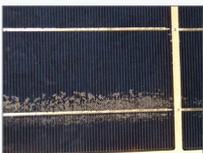
缺乏长期现场数据

现今建造的项目所利用的技术和元件，在 25 年前或更久之前尚不存在。

目前也缺乏现实数据，而无法证明许多近期的光伏组件设计具有持久的可靠性。

右侧图表中概述了光伏组件的缺陷。下表列出了 PVEL 重现了在运输或压力测试后的一系列缺陷。



失效模式	测试序列	可能的原因	项目影响
玻璃破损 	动态机械负载 (第 20 页)	框架或玻璃结构不稳固	功率损耗增加; 安全问题
接线盒未密封 	湿热 (第 18 页)	劣质元件和/或不正确的封装技术	安全问题
PID 	PID (第 22 页)	劣质元件、电池设计和/或质量控制	功率损耗增加
二极管故障 	热循环 (第 16 页)	劣质二极管和/或制造质量控制	功率损耗增加; 安全问题
主栅线腐蚀 	湿热 (第 18 页) 和 湿冷冻 (第 20 页)	不良的层压质量和/或元件	功率损耗增加
分层 	湿热 (第 18 页) 和 湿冷冻 (第 20 页)	不良的层压质量和/或元件	功率损耗增加; 安全问题



保修和认证限制

认证和保修是获得全球市场认可和太阳能光伏技术融资的重要前提。但是，认证不能确保组件在现场长期保持可靠性能，并且在组件失效或衰减时，提供保修也不能完全避免财务损失。

保修面临的挑战

1. 偿付能力和响应能力

当制造商资不抵债或未能及时响应索赔时，保修服务便无法保护买家。

2. 测量不精确

在现场精确测量功率衰减极其困难，因此大多数成功的保修索赔皆是由性能过低或完全失效引起。保修通常会针对测量不确定性提供 3% 的缓冲。发电量产出降低 3%，加上每年可预期的衰减，最终会导致堪比数百万美元的收入损失。

3. 承保范围限制

即使索赔已获接受，保修通常也仅包括替换组件的成本，而不是与劳动力或发电量损失有关的成本。由于制造技术的进步，当下合适的替换组件可能无法用于较旧的系统；另一方面，保修也不包括升级系统以兼容当前替换组件的费用。

认证的不足之处

范围限制

IEC/UL 61730 认证的重点是安全性和非危险性操作。IEC 61215 仅审查运行前几年出现的缺陷。

标准样品

制造商可以提交精心制作的样品以进行认证，而不必测试其市售产品，并且他们通常可以在其组件的 BOM 中更改元件组合而无需重新认证。

进展缓慢

更新认证标准需耗时多年，无法跟上技术变革带来的新失效模式。具体而言，认证标准在解决 PID 和 LeTID 问题方面进展缓慢。

现场的可靠性故障

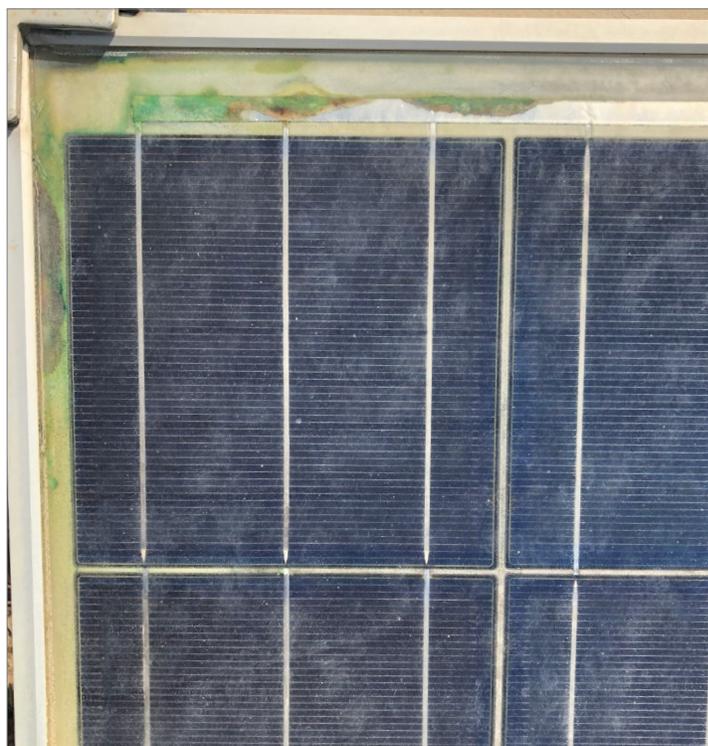
光伏模组故障和保修案例研究

某个大型商业和工业项目开发商在美国多个地点部署了由一级制造商制造的组件。不良的组件结构引发了渗水问题，最终导致分层、腐蚀、高电流泄漏（安全隐患）和接地故障，并使整个系统陷入瘫痪。

在与制造商解决了长时间的纠纷后，资产所有者需要花费数千万美元的成本更换大约 100 MW 的产品。

- 保修仅涵盖产品本身，而不包括更换成本、系统升级或因资产无法使用造成的收入损失。
- 如果替换组件的功率不匹配，则需要对某些系统进行重新配置。

仔细查看该组件的 PVEL 报告便会发现其存在的结构缺陷。该产品通过了 IEC 61215 认证要求的湿热测试，但在经过 PVEL 更严格的湿热测试后，其便显示出了分层和腐蚀的迹象。

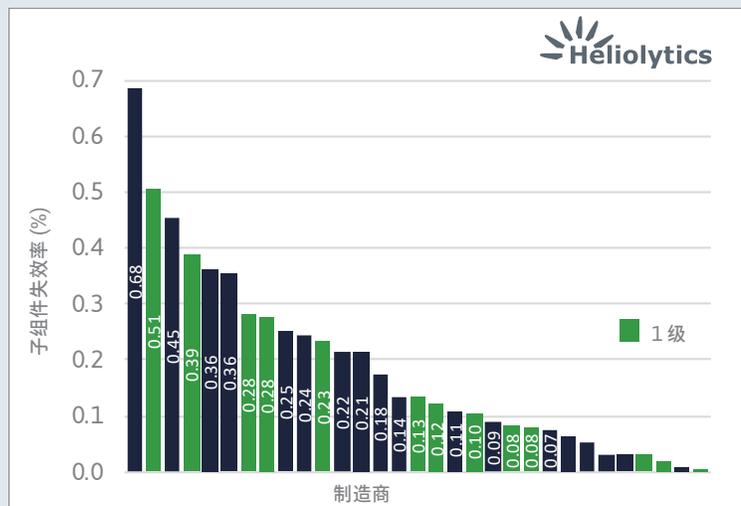


来自于现场的受损光伏组件，带有主栅线腐蚀和分层的迹象。

**不良的组件使资产所有者直接遭受了收入损失。
认证测试和保修未能完全避免损失。**

每个制造商的现场可靠性

Heliolytics 对全球范围内 3,500 多个运行中的光伏系统（代表超过 37 GW 的电力）进行了空拍红外扫描。空拍红外扫描可找出光伏组件中无法由外观检验发现的缺陷。对这些数据的分析表明，光伏组件的可靠性并不总是与制造商的全球领先地位有关。



条形图显示了不同制造商生产的组件中，存在子组件故障的组件所占的百分比（最高 0.68%，最低几近 0.00%）。

左侧图表显示了每个组件制造商的子组件失效率。这些是由至少三分之一的组件短路所引发的故障，会使组件功率最小降低 33%。这些故障可以有效指出由焊接不良、二极管故障、背板和/或电池可靠性问题引起的主要可靠性问题。此数据集涵盖了提供了五个或更多经 Heliolytics 扫描的地点的制造商。

根据 Heliolytics 的现场调查，在出现故障的前十大制造商中，有四家均位列 BloombergNEF 1 级制造商名录*；这表明在采购光伏组件时，仅参考行业顶级名录并不足以完成充分的尽职调查。

*PVEL 与 BloombergNEF 合作，注明了当下正参与 PVEL PQP 的 1 级制造商。

测试结果



方法: PVEL 产品认证计划

计分卡排名基于 PVEL PQP 对光伏组件的认证结果。PVEL 在 2012 年制定了这项严格、全面的计划,其包含以下两个目标:

1. 为太阳能项目开发商、投资者和资产所有者提供独立、一致的可靠性和性能数据,以进行有效的供应商管理。
2. 向在产品质量和耐用性方面有志超越其竞争对手的制造商提供独立认证。

如今, PQP 已成为全球开发商在采购风险缓解流程中必须纳入的步骤。PQP 报告对下游公司免费。

PVEL PQP 的核心原则

作为一个稳定如一而又讲求条理的测试序列, PQP 在市场上独树一帜,专用于支持下游的太阳能设备买家、投资者和资产所有者。该计划能够提供客观的供应商评估和严格的尽职调查。

其遵循以下四个原则:

- **经验数据**
PQP 将性能假设替换为经验指标,帮助优化收入和发电量产出模型。
- **随机挑选的样品**
为 PQP 测试提交的所有产品物料清单 (BOM) 在生产中都经过目击测试,并由 PVEL 审核员在工厂进行密封。
- **定期更新**
PQP 每年都会更新,以便在推出新技术和制造技术时为买家提供贴近行业发展的相关数据。

行业观点

“部署光伏组件时,但凡存在一个有缺陷的元件或制造缺陷,都有可能极大影响资本支出和系统级发电量产出。

正因如此,我们在采购风险缓解标准流程中纳入了使用 PVEL PQP 报告来指定光伏组件物料清单的环节。”



KEVIN SHEEHAN

美洲地区供应链高级总监
BayWa r.e.

- **标准化流程**
我们使用同一种方式和统一校准的设备,在相同的环境中对所有 BOM 进行测试。

工厂目击测试流程: BOM 级测试

为验证光伏组件的 BOM, PVEL 的审核员会遵循以下 8 个步骤来执行工厂目击测试流程:

1. 对工厂执行高级别的流程审核。
2. 将物料从原始包装中取出后,拍摄 BOM 元件的照片。
3. 观察并记录 BOM 的 100 多个技术细节。
4. 严格跟踪每个 BOM 元件的各个生产步骤。
5. 收集背板、密封胶和连接器样品,以在 PVEL 进行测试和/或盘点。
6. 记录用于焊接和层压的配方。
7. 在每个组件上签名,并用防损毁胶带密封托盘。
8. 将托盘直接运送到 PVEL 以进行 PQP 测试。

光伏组件买家可在其组件供应协议中以附件形式中指定经批准的 BOM,以确保收到在 PQP 测试中表现良好的 BOM 组合。PVEL 可为买方免费提供详细的 BOM 清单,以将其纳入供应协议中。

PVEL 2019 产品认证计划

PVEL 的 PQP 每年会定期更新，以响应下游买家、资产所有者、金融商、独立工程师 (IE)、制造商和独立研究机构等来源方提供的市场反馈。2019 年 8 月，PVEL 发布了 PQP 史上最为重要的一次更新。此次更新对 PQP 计划作出了多项更改，其中包括添加有关背板耐用性、LeTID 和机械应力的新测试。

由于 PVEL 的新测试是在 2019 年年中推出，因此所有新测试的表现最佳者都未出现在此计分卡排名中。此报告以案例研究的形式对背板耐用性测试序列和 LeTID 敏感性测试的结果进行了讨论。关于机械应力测试序列结果的白皮书将于今年晚些时候发布。

不过，PVEL 的下游合作伙伴可以获取接受过这些新测试的光伏组件的相关报告。

工厂目击测试							
吸收表征							
光辐照引起的光致衰减							
光辐照后的表征							
热循环	湿热	背板耐用性测试序列	机械应力测试序列	电位诱导衰减	LeTID 敏感性	PAN 文件和 IAM 配置文件	现场暴露
TC 200	DH 1000	DH 1000	静态机械负载	85°C, 85%RH MSV (+ 和/或 -) 96 小时	LeTID 162 小时 (75°C, Isc-Imp)	PAN 文件	现场暴露 6 个月
表征	表征	表征	表征	表征	表征	IAM 配置文件	表征
TC 200	DH 1000	UV 65 kWh/m ²	动态机械负载	85°C, 85%RH MSV (+ 和/或 -) 96 小时	LeTID 162 小时 (75°C, Isc-Imp)		现场暴露 6 个月
表征	表征	表征	表征	表征	表征		表征
TC 200	稳定 85°C, Isc, 48 小时	TC 50 + HF 10			LeTID 162 小时 (75°C, Isc-Imp)		表征
表征	表征	表征	TC 50		表征		
		UV 65 kWh/m ²	表征				
		表征	HF 10				
		TC 50 + HF 10	表征				
		表征					
		UV 65 kWh/m ²					
		表征					
		TC 50 + HF 10					
		UV 6.5 kWh/m ²					
		表征					



对于双面组件，PVEL 还会执行背面表征，并在两种反照率下执行现场暴露测试。

结果概览

以下页面总结了 PVEL 的 PQP 测试结果，并列出了 2020 年表现最佳者。

结果阐释

后续页面将按字母顺序列出每个测试类别中的表现最佳者。页面中还将提供包括各类别 EL 图像和电参数在内的高级性能衰减示例。图中的电参数定义如下：最大功率 (PMP)、最大功率点的电压 (VMP)、开路电压 (VOC)、短路电流 (ISC) 和最大功率点的电流 (IMP)。

条形图中所示结果显示了不同测试样品和 BOM（两者共同代表单个组件型号）的平均功率衰减情况。条形图还将 2020 年的计分卡结果与 PVEL 的历史数据集进行了比较。

某些结果在发布时可能尚不可用，因此并非所有产品或型号类型都可在每个测试中表示出来。表现最佳的制造商也可能会根据自己的意愿拒绝列出。尽管 PVEL 是在 BOM 级别进行测试和报告，但在计分卡中表现最佳者仅以型号级别识别出。

买家应联系 PVEL，以获取用于确定表现最佳者排名的完整报告。PQP 报告包含 BOM 级结果，并对 PVEL 下游合作伙伴免费提供。

计分卡资格

计分卡资格要求如下：

- 在 2020 年的 18 个月内完成工厂目击测试。
- 提交样品以执行 PQP 中的所有测试序列*。
- 为每个测试序列至少提交两个经工厂目击测试的光伏组件样品。
- 在每个可靠性测试序列后，表现最佳者的衰减程度需少于 2%。
- PAN 性能表现最佳者在 PVsyst 模拟中的发电量产出排名位于前四分位数以内。

以下几项著名的光伏技术有资格纳入 2020 年计分卡：

- 符合条件的 BOM 中有 78% 使用 PERC 电池。
- 符合条件的 BOM 中有 77% 使用半切割电池。
- 符合条件的 BOM 中有 26% 为双面组件。
- 符合条件的 BOM 中有 13% 为玻璃-玻璃组件。

行业观点

“自 2015 年以来，我们一直使用 PQP 测试结果来建立全球对 LONGi 高性能、可靠和创新产品的认可。

如今，PQP 已成为我们的新产品和新 BOM 组合上市过程中的重要一步。”



方洪斌博士

产品和
技术总监
LONGi

*制造商必须为所有可靠性测试序列提交样品，才能在计分卡中获得表现最佳者称号，但 PAN 文件和 IAM 配置文件的表征为非必选项。

热循环: 概览与结果

背景

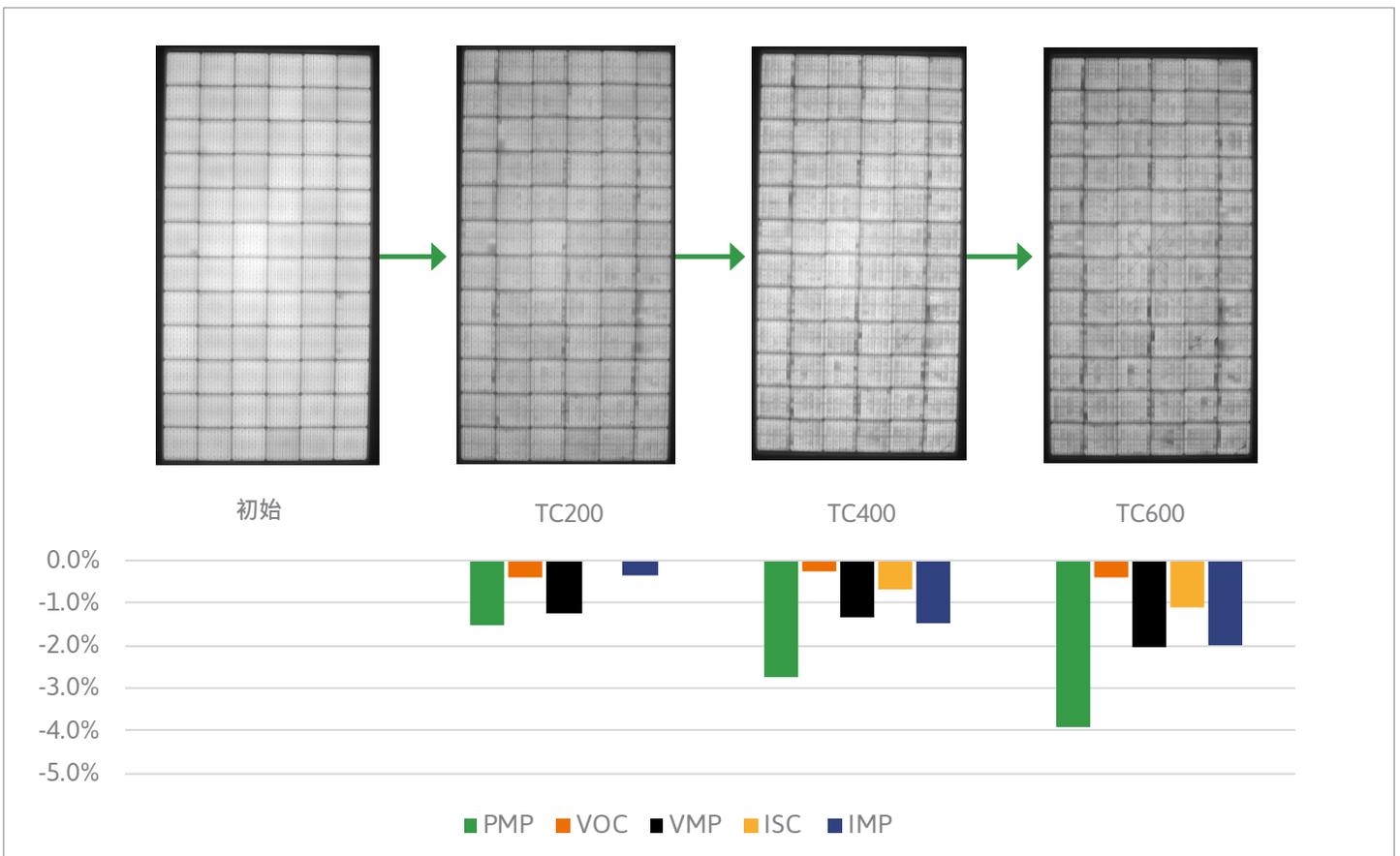
随着环境温度的变化, 电站现场的光伏组件中的元件会根据热或冷的程度而膨胀和收缩。这些元件具有不同的热膨胀系数, 因此会在相同的环境条件下以不同速率膨胀和收缩。这就产生了名为“界面应力”的热力学效应, 该效应会对光伏组件各层之间的粘接处施压。焊接接头疲劳便是这种应力的一个例子, 它会增加串联电阻, 从而在电流流经电阻较高的内部电路时增加组件中的压降, 并在太阳最亮时降低组件性能。

测试为何重要

太阳能电站的预计寿命在 25 年以上, 在此期间, 即使在温和的气候条件下, 光伏组件的材料元件也会膨胀和收缩数千次。在发生动态辐照度事件以及组件工作温度远高于环境温度的情况下, 这种影响全天都会发生。在沙漠和其他干旱环境中, 这种影响更为极端。热循环测试序列揭示了温度循环是否可能导致过度界面应力, 从而破坏组件并降低系统性能。

热循环测试程序

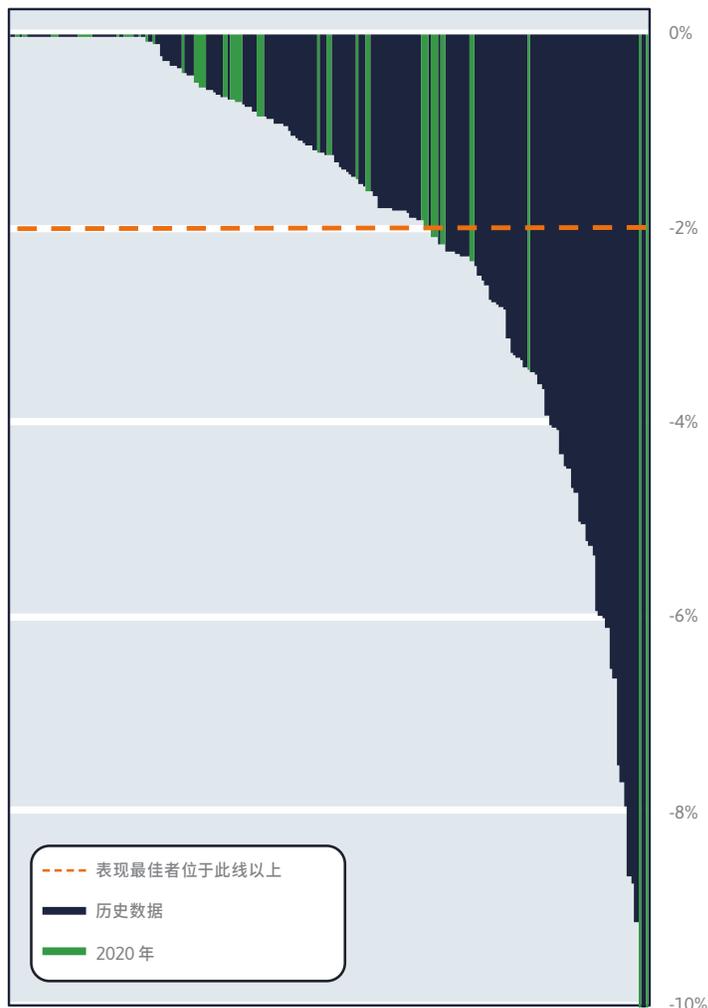
在此测试中, 组件要经受极端的温度变化。我们将组件放置于环境模拟室中, 并将模拟室中的温度降至 -40°C , 保持不变, 然后再加热至 85°C , 再次保持不变。当温度升高时, 组件也会经受最大功率时的电流。在 PVEL PQP 中, 环境模拟室中的循环会在三个周期内重复 200 次, 总共进行 600 次循环, 相当于 84 天左右。此程序比 IEC 61215 测试要严格得多, 因为后者总共只需进行 200 次循环。



2020 年 TC 表现最佳者

制造商	组件型号
Adani/Mundra	ASP-7-AAA / ASP-6-AAA
Astronergy	CHSM72P-HC-xxx / CHSM60P-HC-xxx; CHSM72M-HC-xxx / CHSM60M-HC-xxx; CHSM72M (DG)-B-xxx / CHSM60M (DG)-B-xxx
Canadian Solar	CS1H-MS
First Solar	FS-6xxxA
GCL	GCL-M3/72H / GCL-M3/60H; GCL-M6/72H / GCL-M6/60H; GCL-M3/72GDF; GCL-M6/72GDF; GCL-M3/72DH / GCL-M6/72DH
Hanwha Q CELLS	Q.PEAK DUO G5; Q.PEAK DUO L-G5.2; Q.PEAK DUO G6; Q.PEAK DUO G7
Heliene	72M-xxx / 60MBLK HOME PV
HT-SAAE	HT72-156M (V) / HT60-156M (V); HT72-156M (PDV)-BF / HT60-156M (PDV)-BF
Jinko	JKMxxxM-72HL-V / JKMxxxM-60HL-V
LONGi	LR4-72HPH-xxxM / LR4-60HPB-xxxM; LR6-72HPH-xxxM / LR6-60HPB-xxxM; LR6-72PH-xxxM / LR6-60PB-xxxM; LR4-72HIH-xxxM / LR4-60HIB-xxxM; LR4-72HIBD-xxxM / LR4-60HIBD-xxxM
Panasonic	VBHNxxxSA17
REC Solar	RECxxxTP2M
Silfab	SLGxxxM / SLAxxxM
Sunergy California	CSUNxxx-72MH5 / CSUNxxx-60MH5
Suntech	STPxxxS-24/Vfh / STPxxxS-20/Wfh
Trina Solar	TSM-xxxPE14H / TSM-xxxPE05H
ZNShine	ZXP6-72-xxx/P / ZXP6-60-xxx/P

TC 测试序列中各组件型号功率衰减



背景比较结果：关键结论

今年，多种组件技术均展现了出色的 TC 结果，包括许多全尺寸电池和半切割组件类型，以及薄膜、叠瓦电池、多主栅线和异质结组件。有关过往 TC 性能的进一步分析，请参阅第 33 页。

2020 年计分卡中所有符合条件的组件类型的功率衰减中位数为 0.67%。但某些组件的性能达不到这一水平，其中就包括此处的示例，此示例中我们可以看到电池金属化不佳和电池焊带焊接缺陷造成了 4% 的功率衰减。其他 TC 故障包括：两种组件类型在遭遇二极管故障后，引发了灾难性的功率损失；一种组件类型由于组件发生电气绝缘损坏而出现湿漏电故障。尽管 TC 性能总体上有所提高，但 PVEL 观察到某些 BOM 中仍存在重大故障。

双面组件的考量因素

玻璃-玻璃和玻璃-背板双面组件均在表现最佳者名单中占有一席之地。到目前为止，在 PVEL 的 TC 测试中，正面和背面的功率衰减量是一致的。

湿热：概览与结果

背景

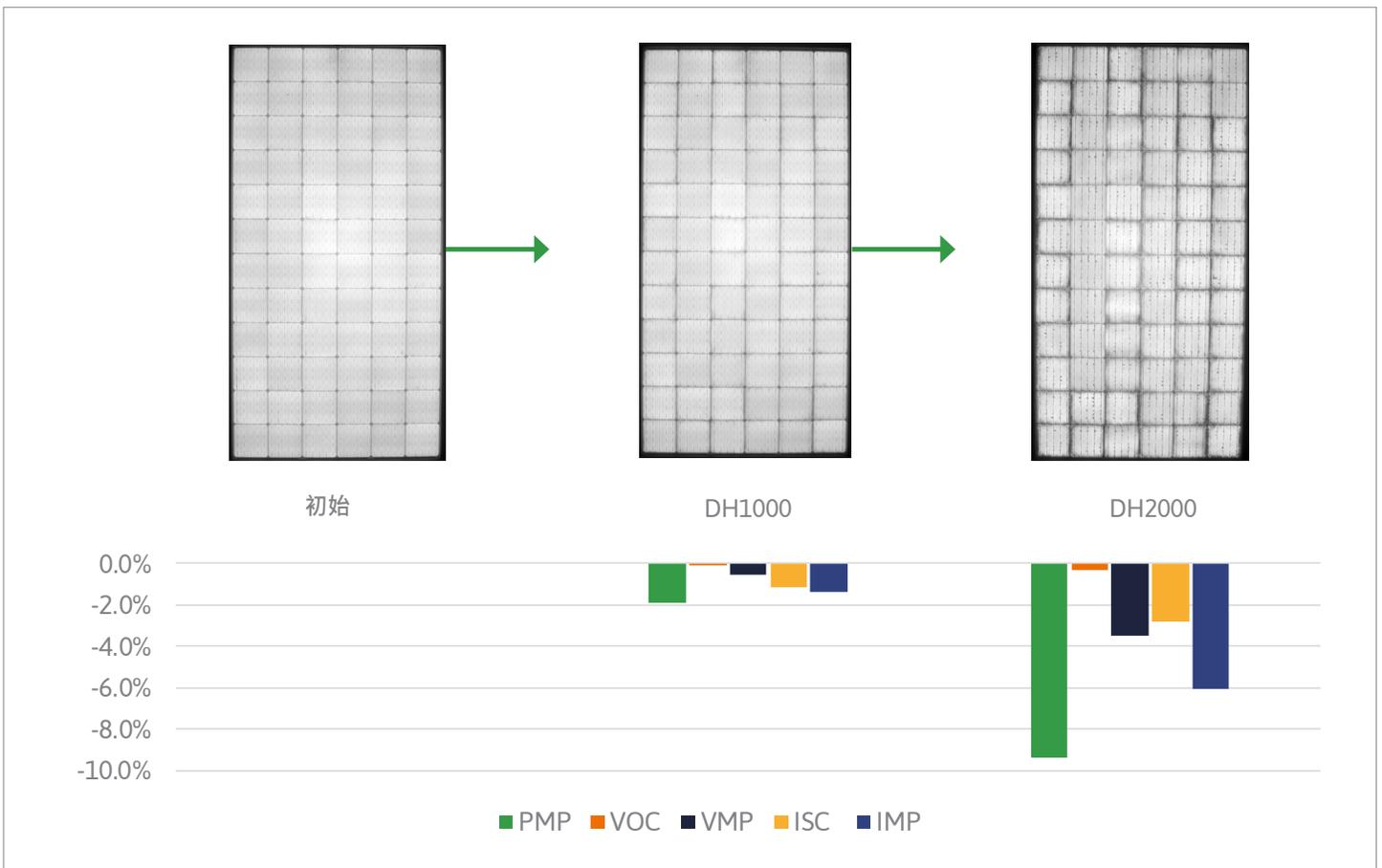
尽管高温高湿条件在许多热带和亚热带地区中普遍存在，但温和气候条件下的光伏组件也会经历高温和高湿的时间段。当发生这些情况时，如果使用劣质组件或不合格的层压程序，则可能导致组件过早失效和衰减。为评估组件的耐用性和可靠性，湿热测试重现了可能发生在现场的衰减和失效机制。

测试为何重要

光伏组件中的许多不同元件都以层压方式结合在一起。为在光伏资产的整个生命周期内达到性能预期，这些层必须牢牢粘附到光伏组件上。如果水分和高温减弱了用于粘合这些层的粘合剂的粘度，水、灰尘、土壤和其他异物便会进入组件并导致其内部元件发生性能衰减，从而降低发电量产出并影响整体系统性能。分层也是一个安全问题，因为它可能会降低光伏组件的绝缘电阻，增加发生电击的可能性。

湿热程序

放入环境模拟室后，组件将处在 85°C 的恒定温度和 85% 的相对湿度条件下并持续两个周期（每周期 1000 小时，共计 84 天左右），这是满足 IEC 认证要求所需时间的两倍。高温与高湿条件的结合可向光伏组件的每一层施加压力，而且能提供组件在现场可能的行为和性能的有关见解。但是，该测试的高温和无电流环境也可能导致某些 PERC 电池内的钝化硼氧 (BO) 复合体不稳定。为进一步探讨这种现象，PVEL 针对所有组件在最新的 PQP 中添加了经 DH2000 测试后的硼氧稳定化过程。若组件在经 DH 测试后普遍显示出 BO 不稳定的迹象，PVEL 便会向之前的 PQP 参与者提供该稳定化过程。

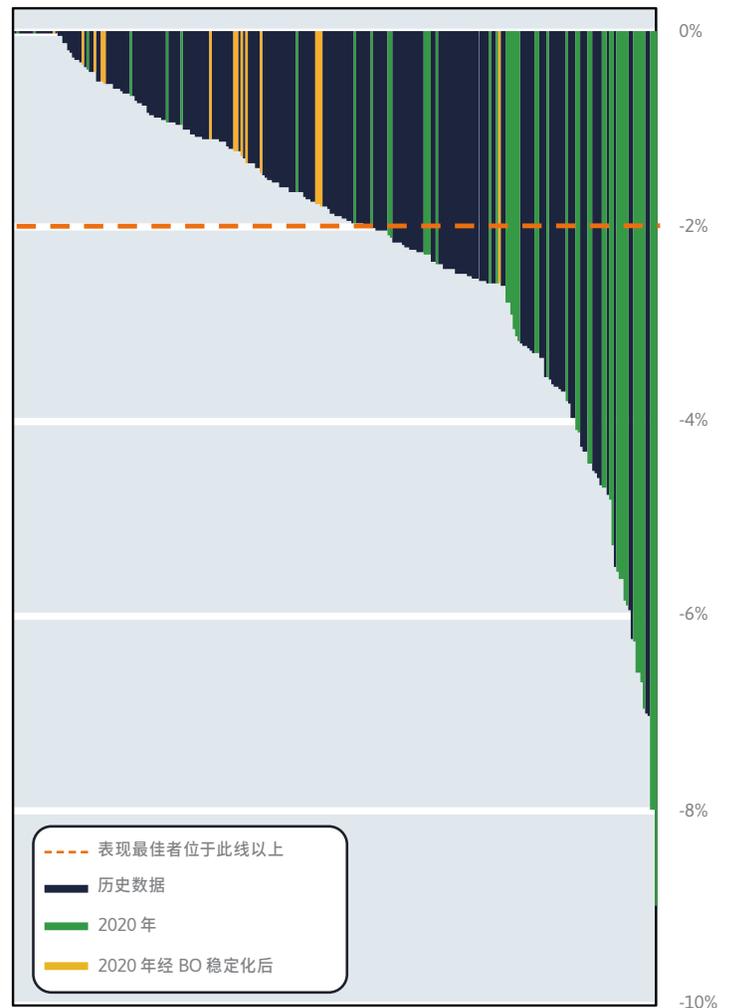


2020 年 DH 表现最佳者

制造商	组件型号
Astronergy	CHSM72P-HC-xxx / CHSM60P-HC-xxx; CHSM72M-HC-xxx / CHSM60M-HC-xxx; CHSM72M (DG)-B-xxx / CHSM60M (DG)-B-xxx
Canadian Solar	CS1H-MS*
First Solar	FS-6xxxA
GCL	GCL-M6/72H / GCL-M6/60H
Hanwha Q CELLS	Q.PLUS DUO L-G5.2*; Q.PEAK DUO G6*; Q.PEAK DUO G7*
Heliene	72M-xxx* / 60MBLK HOME PV*
HT-SAAE	HT72-156M (V)* / HT60-156M (V)*; HT72-156M (PDV)-BF* / HT60-156M (PDV)-BF*
Jinko	JKMxxxM-72HL-V* / JKMxxxM-60HL-V*
LONGi	LR6-60HPB-xxxM; LR6-72PH-xxxM
REC Solar	RECxxxTP2M*
Silfab	SLGxxxM* / SLAxxxM*
Sunergy California	CSUNxxx-72MH5* / CSUNxxx-60MH5*
Vikram	Eldora VSP.72.AAA.05 / VSP.60.AAA.05; Somera VSM.72.AAA.05 / VSM.60.AAA.05

*最佳性能结果在经 BO 稳定化后取得。

DH 测试序列中各组件型号功率衰减



背景比较结果：关键结论

湿热是一项关键测试，可用于找出易受湿气侵入和腐蚀影响的低性能组件。我们可以在示例 EL 图像中看到这一点，该组件在 1000 小时的 IEC 61215 认证测试期内表现良好。但在 2000 小时后显现出了非常明显的性能差异：沿主栅线和电池边缘可以看到腐蚀，且功率衰减超过 9%。

上图显示了 BO 稳定化前后的功率衰减结果。在最极端的示例中，PVEL 的测量数据显示，组件在经 DH2000 测试后的衰减率为 8.4%，在 BO 稳定化后衰减率又恢复到 1.3%。尽管一些行业研究表明，BO 不稳定是一种测试工件，只会在高温和无电流的条件（现场不存在这些条件¹）下出现，但我们还需要更多研究，以确定组件 25 年以上的使用寿命期间是否会出现不稳定现象。值得注意的是，这种现象仅影响某些 PERC 组件。

双面组件的考量因素

有大量资料表明，玻璃-玻璃组件过去在湿热测试中表现较差。但到目前为止，在 PVEL 的 PQP 测试中，新型双面玻璃-玻璃与玻璃-背板组合均显示出了相似性能。这可能是由于玻璃-玻璃组件中所用的胶膜已从 EVA 变为 POE。

¹ F. Kersten 等人，“Stability investigations of Cz-PERC modules during damp heat testing and transport: the impact of the boron-oxygen defect”（湿热测试和运输过程中 Cz-PERC 组件的稳定性研究：硼氧缺陷所带来的影响），AIP Conference Proceedings 2147, 090001 (2019);

<https://doi.org/10.1063/1.5123869>

动态机械负载测试序列：概览与结果

背景

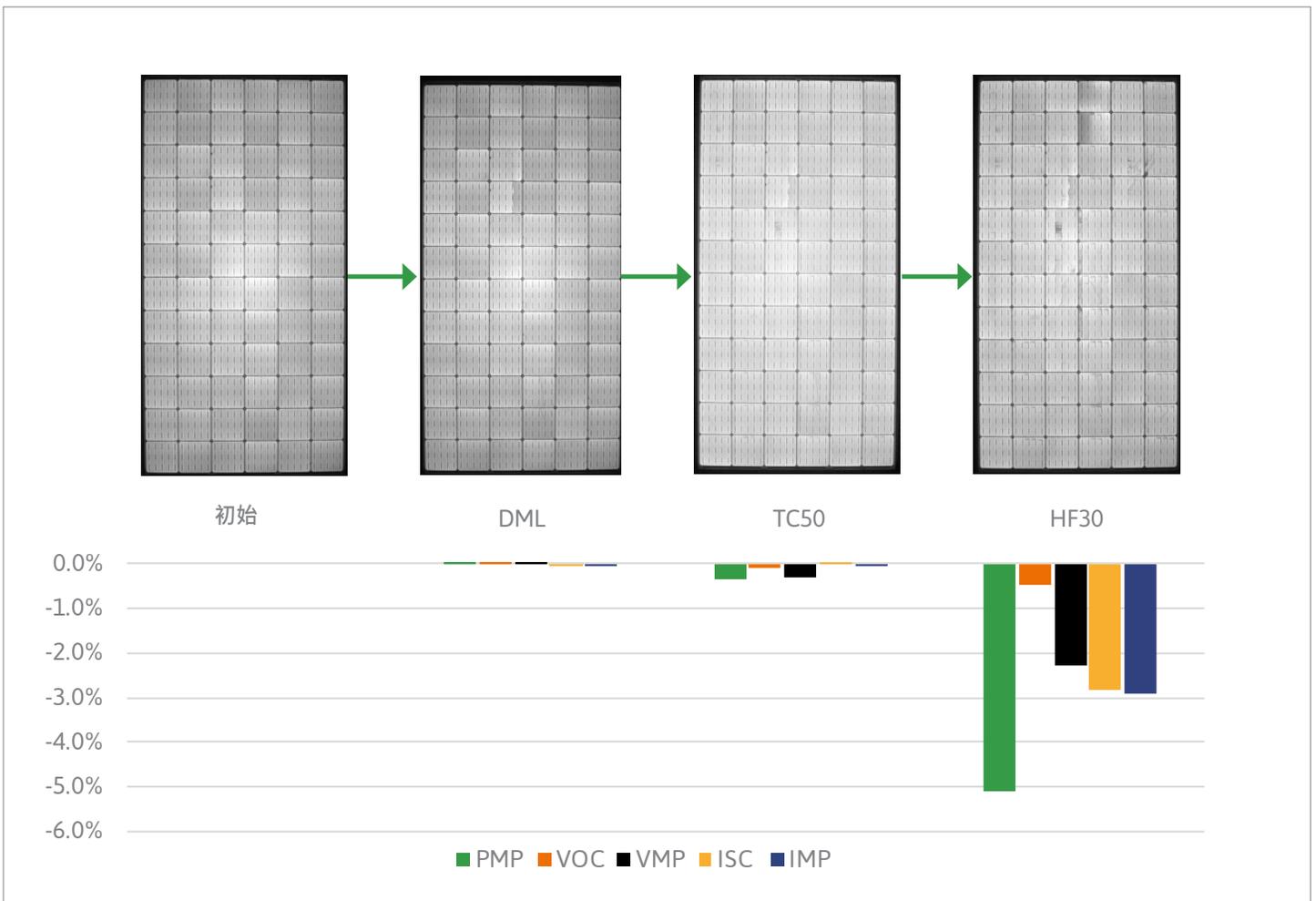
动态机械负载 (DML) 测试序列是最严格的 PQP 测试序列之一，并与 DML、热循环和湿冷冻测试相结合。当光伏组件承受大雪等机械负载或强风、冰雹等形成的力时，元件会受压并可能断裂。这种情况可能会引发一系列诱导性能衰减问题，例如湿气侵入、电池裂纹扩展和延伸、焊接接头疲劳和电池腐蚀。这些问题通常会导致发电量产出降低，甚至会使组件和系统发生现场故障。

测试为何重要

风雪条件会使组件承受来自动态负载的应力（沿不同方向、以不同速度施加的力）。动态负载也可能发生在系统建造之前。包装或处理不当会在组件的运输、交付和安装过程中造成损坏。DML 测试有助于预测光伏组件能否承受这些常见的负载条件。

动态机械负载测试序列程序

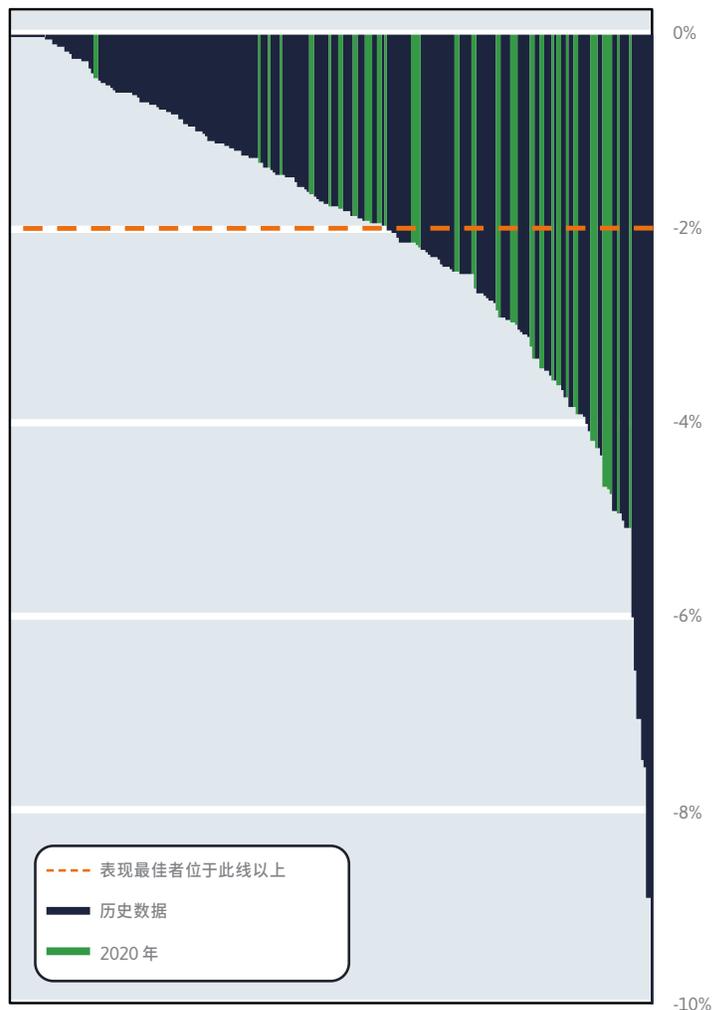
首先，根据制造商建议的安装配置安装组件。然后在 1000 Pa 压力下，使组件经受 1000 次交替负载循环。接下来，将组件放置在环境模拟室中，并使其经受 50 次热循环 (-40°C 至 85°C) 以引发电池裂纹扩展，然后进行三组湿冷冻循环（每组 10 次，在 85°C 温度和 85% 的相对湿度条件下持续 20 小时，然后迅速降至 -40°C），从而刺激潜在腐蚀和进一步的电池破裂。在测试序列中的每个步骤之后，都要对组件进行特征化和外观检验，查看是否存在元件发生故障的任何迹象。



2020 年 DML 表现最佳者

制造商	组件型号
Adani/Mundra	ASP-7-AAA / ASP-6-AAA
Astronergy	CHSM72P-HC-xxx / CHSM60P-HC-xxx; CHSM72M (DG)-B-xxx / CHSM60M (DG)-B-xxx
Canadian Solar	CS1H-MS
LONGi	LR6-72HPH-xxxM / LR6-60HPH-xxxM; LR4-60HPB-xxxM; LR6-60HPB-xxxM; LR6-72PH-xxxM
REC Solar	RECxxxTP2M
Silfab	SLGxxxM / SLAxxxM
Vikram	Eldora VSP.72.AAA.05 / VSP.60.AAA.05
ZNShine	ZXP6-72-xxx/P / ZXP6-60-xxx/P

DML 测试序列中各组件型号的功率衰减



请注意：约有 80% 的历史测试数据仅包括 10 次湿冷冻循环，也就是过去的 PQP 测试持续时间。

背景比较结果：关键结论

DML 测试序列产生了各种衰减结果，延续了去年的趋势。在湿冷冻测试过程中，湿热条件可能会导致 BO 不稳定，这也是出现这些结果的潜在原因。奇怪的是，有些组件类型在经 DH2000 测试后经历了 BO 不稳定的情况，但仍成为了 DML 表现最佳者。

造成 DML 性能范围的另一原因便是组件易受电池破裂和温度快速变化所导致的功率损失的影响。我们可以在提供的示例中看到这一点：由于金属化缺陷、电池裂纹和有效区域损失增加了串联电阻，组件在 HF30 之后遭受了超过 5% 的功率损失。

如更新后的 PQP 图表所示（请参见第 14 页），新的机械应力测试序列（“MSS”）已取代 DML+TC50+HF30 测试。早期结果表明，性能范围将随 MSS 测试继续出现。PVEL 计划在未来几个月内发布一份单独的出版物来展示 MSS 的结果。

双面组件的考量因素

迄今为止，玻璃-玻璃和玻璃-背板双面组件在 DML 测试序列后均显示出相似的性能结果，并且正面和背面的衰减程度完全一致。目前有 20 余种双面 BOM 在排队等待接受新的 MSS 测试，而 PVEL 也渴望第一时间与业界分享这些结果。

电位诱导衰减: 概览与结果

背景

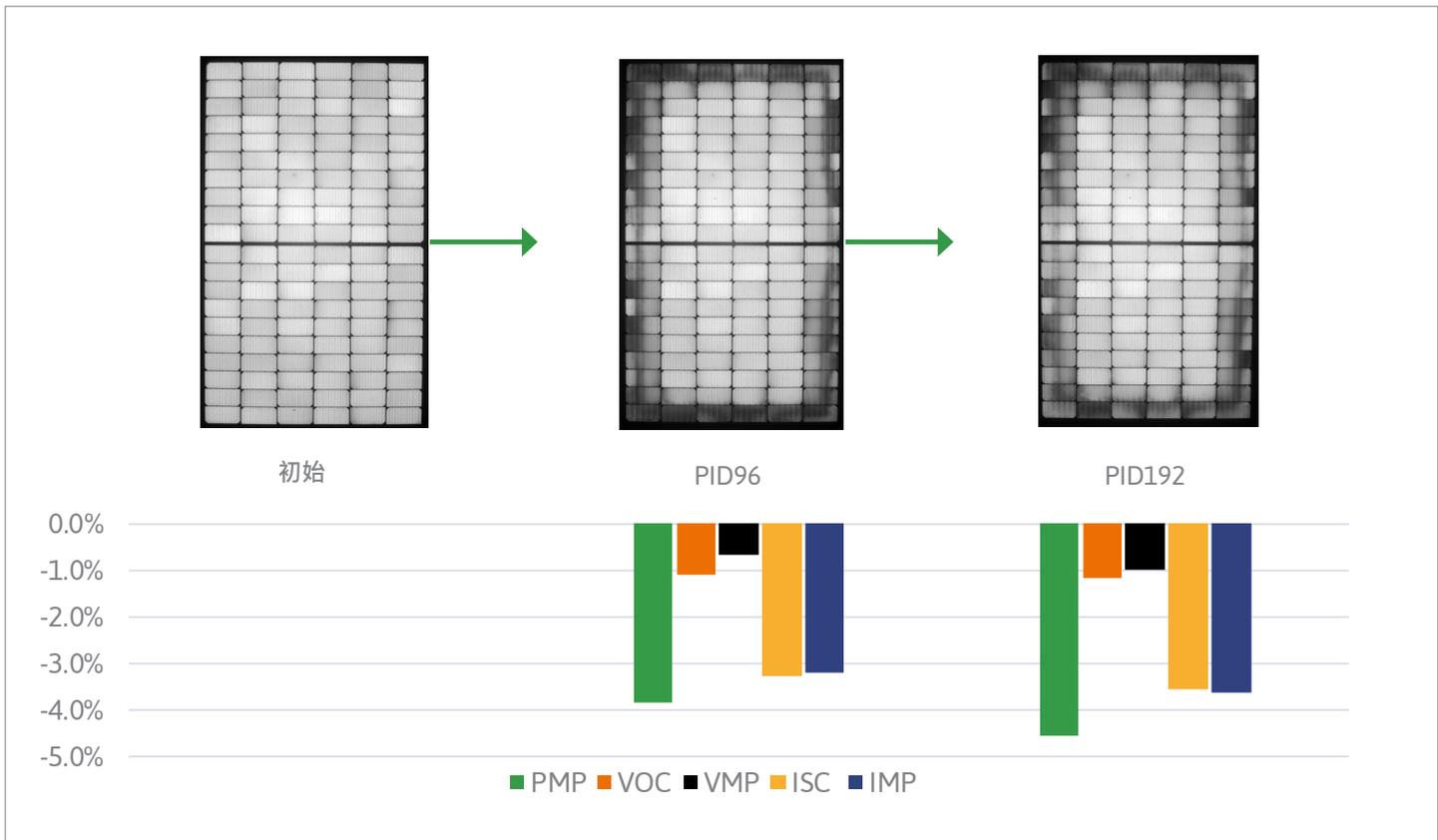
在过去 10 年中, 随着更高系统电压和不接地系统的发展, 出现了电位诱导衰减 (PID) 现象。在调试后的几周甚至几天内可能会发生 PID。当内部光伏电路相对于地面负偏压时, 这种现象往往会发生。框架和电池之间的电压会导致玻璃中的钠离子向电池表面移动, 而电池表面通常涂有氮化硅 (SiN) 抗反射涂层。如果该涂层中的 pinholes 大到允许钠离子进入电池, 则电池性能可能会受到不可修复的损害。此外, 该电压会导致静电荷积聚, 这也会降低性能, 但这种影响通常是可逆的。

测试为何重要

大型电站会使用配有负极系统接地的中央逆变器, 因此不需担心 PID, 但 PID 会大大降低配备无变压器型逆变器的电站 (未接地) 的组件性能。尽管某些 PID 机制在衰减的早期是可逆的, 但有些是不可逆的, 并可能导致长期的性能下降。我们可以通过系统设计来解决 PID 问题, 包括使用特定的接地配置或分布式电子设备。如果未为项目采购抗 PID 组件, PVEL 建议开发商和 EPC 评估这些替代解决方案。

PID 程序

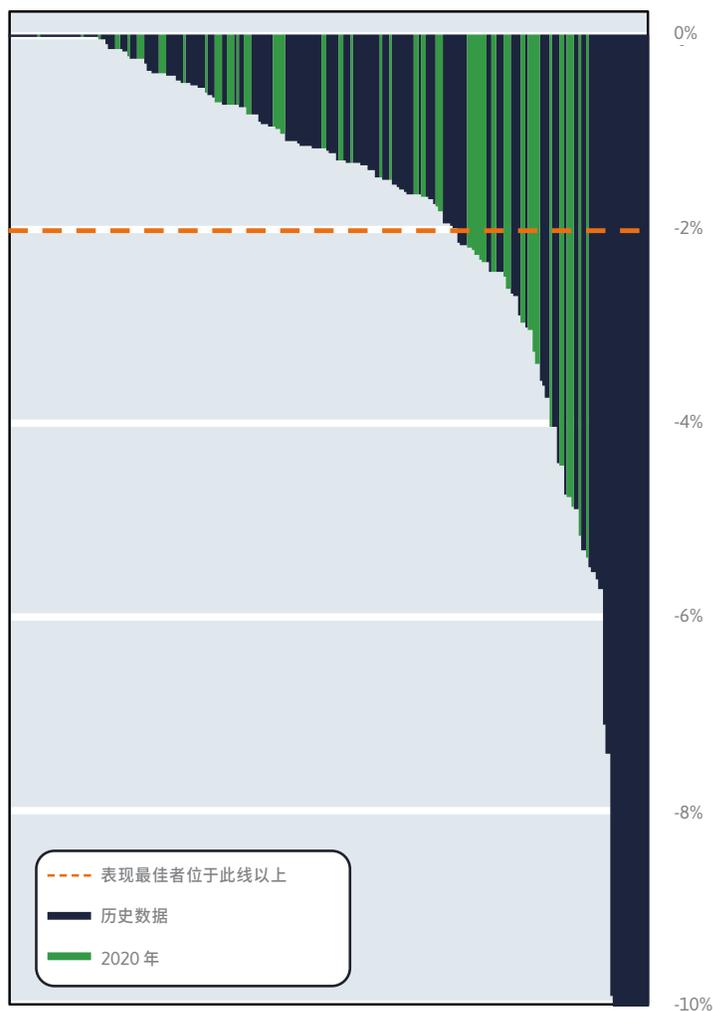
将组件放入环境模拟室后, 在 85°C 和 85% 相对湿度条件下施加等同于组件最大系统额定电压 (MSV) (-1000V 或 -1500V) 的电压偏差, 进行两个各持续 96 小时的循环。这些温度、湿度和电压偏差条件能够帮助 PVEL 评估与泄漏电流增加相关的潜在衰减和失效机制。



2020 年 PID 表现最佳者

制造商	组件型号
Adani/Mundra	ASP-7-AAA / ASP-6-AAA
Astronergy	CHSM72P-HC-xxx / CHSM60P-HC-xxx; CHSM72M-HC-xxx / CHSM60M-HC-xxx; CHSM72M (DG)-B-xxx / CHSM60M (DG)-B-xxx
Boviet	BVM6612M-xxx-H / BVM6610M-xxx-H
Canadian Solar	CS1H-MS
First Solar	FS-6xxxA
GCL	GCL-M6/72H / GCL-M6/60H
Hanwha Q CELLS	Q.PLUS DUO L-G5.2; Q.PEAK DUO G6; Q.PEAK DUO G7
HT-SAAE	HT72-156M (V) / HT60-156M (V)
JA Solar	JAM72S09-xxx/PR / JAM60S09-xxx/PR
Jinko	JKMxxxM-72HL-V / JKMxxxM-60HL-V; JKMxxxM-72H-TV / JKMxxxM-72HL-TV
LONGi	LR6-72PH-xxxM; LR4-72HIBD-xxxM / LR4-60HIBD-xxxM
Panasonic	VBHNxxxSA17
REC Solar	RECxxxTP2M
Seraphim	SRP-xxx-6MA-HV / SRP-xxx-6MB-HV
Silfab	SIL-xxxBL; SLGxxxM / SLAxxxM
SunPower	SPR-Axxx-G-AC
Suntech	STPxxxS-24/Vfh / STPxxxS-20/Wfh
Trina Solar	TSM-xxxPE14H / TSM-xxxPE05H; TSM-xxxPE14A / TSM-xxxPE05A; TSM-xxxDE14A(II) / TSM-xxxDE05A(II)
Vikram	Somera VSM.72.AAA.05 / VSM.60.AAA.05
ZNShine	ZXP6-72-xxx/P / ZXP6-60-xxx/P

PID 测试序列中各组件型号的功率衰减



背景比较结果：关键结论

此处列出了许多因提供出色的 PID 衰减结果而获选的表现最佳者，但这些产品对这一衰减模式的敏感性仍是一个值得关注的问题。根据 PVEL 开展的 2020 年计分卡测试，PID 衰减结果的中位数高于任何一次历史测试结果。当 PVEL 测试结果表明存在 PID 问题时，组件制造商通常都会表示惊讶，因为他们认为自己的组件都具有抗 PID 特性。

显然，确保所有组件都具有抗 PID 特性可谓任重道远，但 PQP 仍然是发现缺陷（例如可能导致现场出现重大经济损失的 PID）的关键工具。

双面组件的考量因素

双面组件的 PID 测试结果表明，组件正面出现了大范围衰减，背面的衰减情况甚至更严重，其中有一个组件的背面功率损耗已经超过 30%。某些双面组件出现背面衰减的原因可能是组件在 PID 测试期间发生了可逆极化效应，但并非所有 p 型双面组件都容易受此现象影响。

PAN 性能: 概览与结果

背景

PVsyst 是用于预测光伏电站运营效能的行业标准建模软件。PVsyst 使用 PAN 文件来模拟受辐照度和温度影响的光伏组件行为。PVsyst 默认使用的 PAN 文件通常是根据组件数据表中列出的规范所创建,但这些规范可能无法充分定义所有组件的性能参数。虽然生成的 PAN 文件能发挥相应功能,但其通常无法在整个潜在辐照度和温度条件范围内对光伏组件的行为进行准确建模。

测试为何重要

发电量产出预测会对采购决策、资本成本计算和风险评估产生显著影响。PVEL 根据实验室测量的受辐照度和温度影响的光伏组件行为创建了一个自定义 PAN 文件,该文件可生成更准确的发电量模型。为了更好地说明经过优化的 PAN 文件的性能,每份 PAN 报告均有纳入两个电站的模拟结果:温带气候条件下倾角为 0° 的 1MW 电站(美国波士顿)和沙漠气候条件下倾角为 20° 的 1MW 电站(美国拉斯维加斯)。

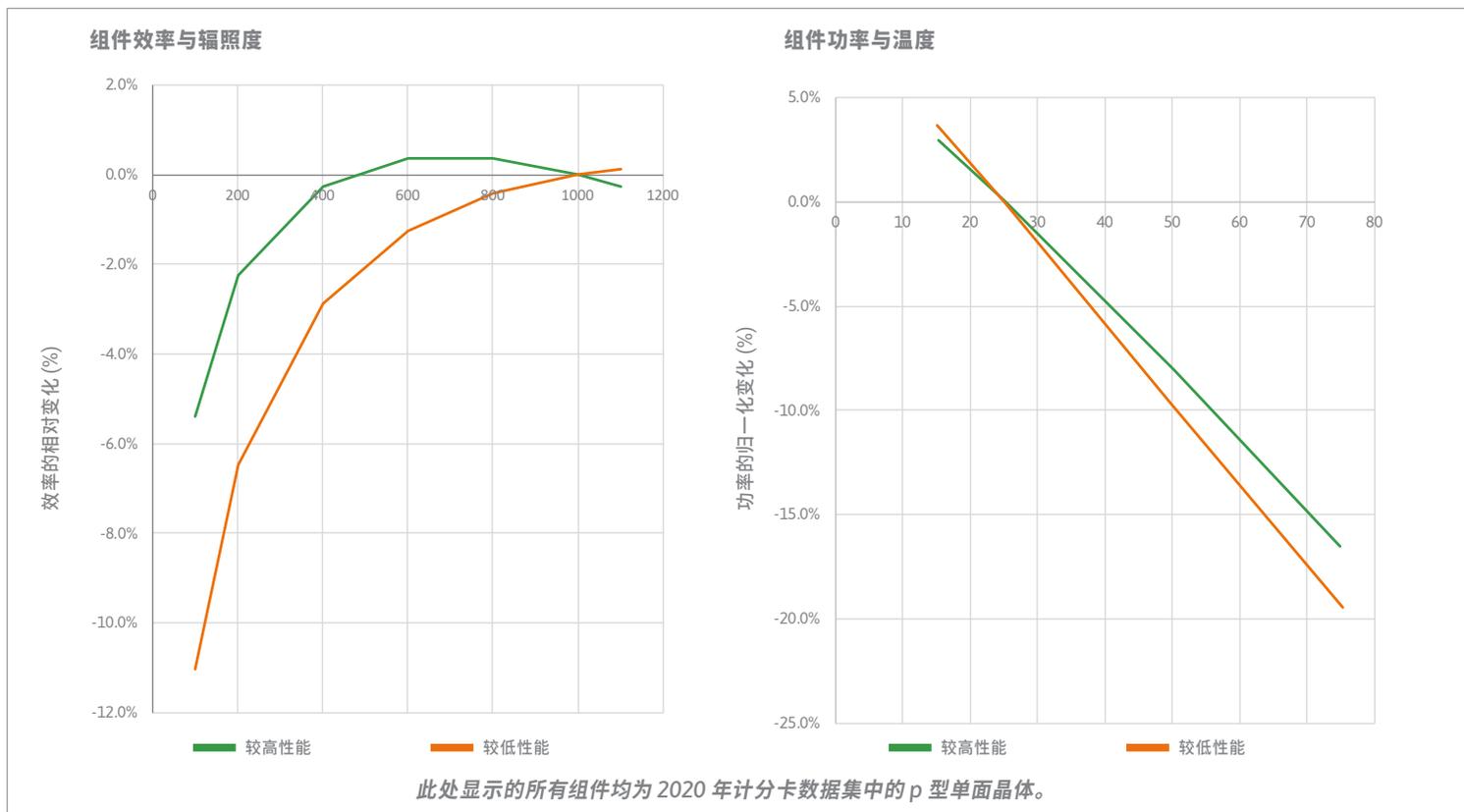
PAN 测试程序

根据 IEC 61853-1 在运行条件矩阵上测试了三个相同的光伏组件,其中辐照度范围为 100 W/m² 至 1100 W/m²,温度范围为 15°C 至 75°C。然后,使用经优化的 PVsyst 模型参数创建自定义 PAN 文件,以使 PVsyst 的建模结果与 PVEL 在所有条件下的测量结果保持一致。

PAN 性能差异

左图显示了组件效率与辐照度的相对变化。性能较低的组件在较低辐照度下的效率损失更大。虽然这种差异会影响低日照区电站(例如模拟的波士顿电站)的性能,但由于一天和一年中的低辐照度时间存在不同,因此其也会影响高日照区电站。

右图显示了组件效率与温度的相对变化。图表显示,性能较低的组件在高温下的效率损失更大。这种差异在高温环境下最为明显。



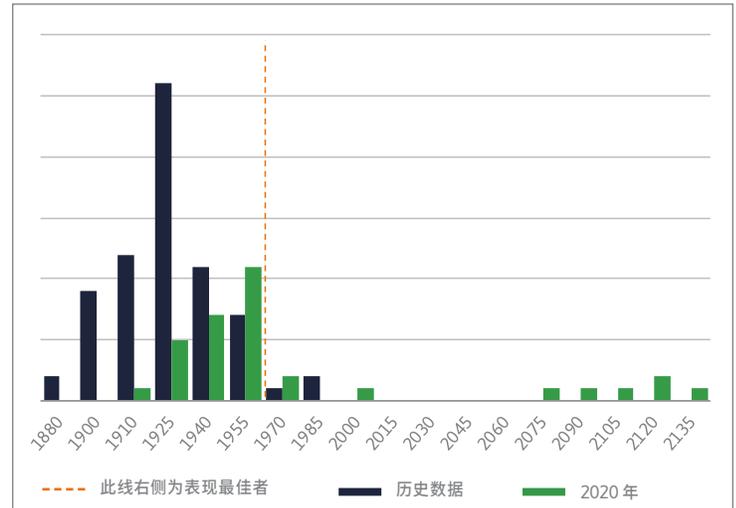
2020 年 PAN 表现最佳者

制造商	组件型号
Astronergy	CHSM72M (DG)-B-xxx; CHSM60M (DG)-B-xxx
GCL	GCL-M3/72GDF; GCL-M6/72GDF
HT-SAAE	HT72-156M (PDV)-BF
JA Solar	JAM72S09-xxx/PR
Jinko	JKMxxxM-72H-TV / JKMxxxM-72HL-TV
Panasonic	VBHNxxxSA17
Trina Solar	TSM-xxxDE14A(II)

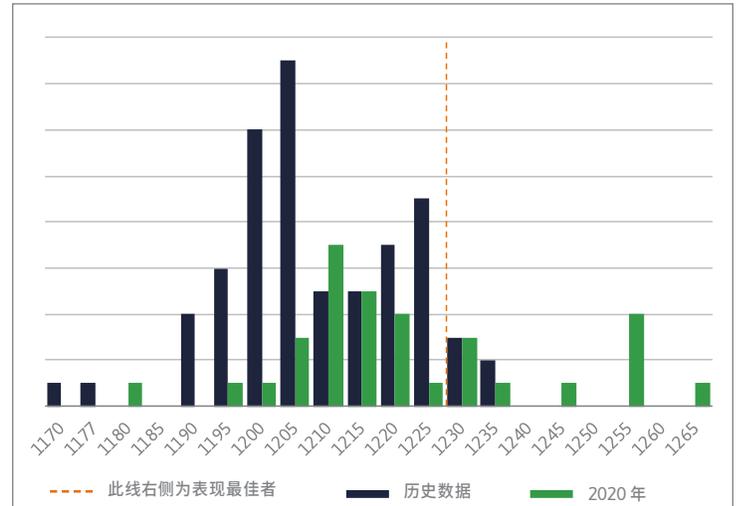
表现最佳者评定标准

此处列出的表现最佳的组件类型均符合以下条件：以发电量产出 (kWh/kWp) 为准，组件在拉斯维加斯或波士顿电站的 PVsyst 模拟结果位于所有合格结果的前四分位数以内。此处提供的数据仅来自 PVEL 的 PAN 测试，该测试是 PQP 的一部分，而其中的测试样品均已经过工厂目击测试。

美国拉斯维加斯 1MW 电站的发电量产出情况 (kWh/kWp)



美国波士顿 1MW 电站的发电量产出情况 (kWh/kWp)



背景比较结果：关键结论

上文的历史数据为 2020 年计分卡 PAN 数据集中显示的性能提升提供了比较背景。随着组件设计的改进，组件的发电量产出明显提高。根据 PVEL 自 2016 年以来的所有 PQP 历史测试数据，只有 4% 的受测试组件将在 2020 年计分卡中获评为“表现最佳者”。

其中，双面组件在此类别的表现最佳者中颇具代表性。此外，有一种异质结组件本身便具备在高温环境下提升性能的特性。还有两种全电池 p 型单面 PERC 组件的表现也很突出。在相同的铭牌额定值下，全电池组件的低光性能要高于相同的半切割组件，因而年发电量产出也更高。有一项测试案例显示，全电池 BOM 在波士顿电站的模拟发电量产出要比相同的半切割 BOM 高 1.5%。但在相同的电池效率下，半切割组件展现了功率等级更高的优势。影响组件性能的不仅仅是数据表中的各项值；PVEL 的自定义 PAN 文件还可使项目的利益相关者针对发电量产出表现进行建模，并确定最适合其电站的组件选择。

双面组件的考量因素

结果表明，双面组件可成为阶跃式性能提升的代表，因为表现最佳者中有三分之二均为双面组件。在没有逆变器限幅的情况下，所有使用双面组件的拉斯维加斯电站的发电量产出中位数要比使用单面组件的电站高 7.7%。在相同的水平倾角下，使用双面组件的波士顿电站的发电量产出中位数要比使用单面组件的电站高 3.3%。

历史计分卡

以下历史计分卡展示了 2020 年的表现最佳者及其在往年计分卡中的最佳表现记录。制造商以字母顺序按获评为表现最佳者的年份列出。

这组精选的制造商在 PVEL 历年来的光伏组件可靠性计分卡上多次获得“表现最佳者”称号。PVEL 对这些信守产品质量和可靠性承诺的制造商们予以高度赞扬。



	2020 年	2019 年	2018 年	2017 年	2016 年	2014 年
Jinko	●	●	●	●	●	●
Trina Solar	●	●	●	●	●	●
Hanwha Q CELLS	●	●	●	●	●	
JA Solar	●	●	●		●	●
REC Solar	●	●	●	●	●	
Astronergy	●		●	●		●
GCL	●	●	●	●		
LONGi	●	●	●	●		
Suntech	●	●	●			●
Adani/Mundra	●	●	●			
Silfab	●	●		●		
SunPower	●		●	●		
Vikram	●	●		●		
ZNShine	●	●			●	
Boviet	●	●				
First Solar	●		●			
HT-SAAE	●		●			
Panasonic	●		●			
Canadian Solar	●					
Heliene	●					
Sunergy California	●					

工厂厂址的影响

最近，PVEL 在不同地点生产了两种近乎相同的 BOM，并在此期间发现，工厂厂址的确会影响产品质量。这两种 BOM 的生产地分别为制造商的自有工厂和合同制造商的工厂。前者的 DH2000 功率衰减率为 1.0%，而对后者生产的组件进行相同测试后得出的结果为功率下降了 3.9%。

两家工厂生产的 BOM 近乎相同。但一个 BOM 获评为表现最佳者，而另一个相距表现最佳者入选标准则降低了近两倍。

表现最佳者工厂厂址	
Adani (Mundra Solar PV Ltd.)	印度古吉拉特邦
Astronergy (Chint Solar [Zhejiang]) Co., Ltd.	中国海宁; 中国宜兴
Boviet Solar Technology Co., Ltd.	越南 Song Khe-Noi Hoang 工业区
Canadian Solar Inc.	泰国是拉差
First Solar Inc.	美国佩里斯堡
GCL System Integration Technology Co., Ltd.	越南 Van Trung 工业园区
Hanwha Q CELLS Co., Ltd.	韩国镇川郡; 马来西亚赛城; 美国道尔顿
Heliene Inc.	美国铁山 (Mountain Iron)
JA Solar Technology Co.	中国合肥; 中国奉贤
Jinko Solar Co., Ltd.	中国上饶; 越南 Van Trung 工业园区
LONGi Solar Technology Co., Ltd.	马来西亚古晋; 中国台州
Panasonic Corporation	美国布法罗
REC Solar	新加坡大士
Seraphim Solar System Co., Ltd.	中国常州
Silfab Solar Inc.	加拿大密西沙加; 美国贝灵厄姆
Shanghai Aerospace Automobile Electromechanical Co. ("HT-SAAE")	土耳其伊斯坦布尔
Sunergy California, LLC	越南 Dinh Tram 工业区
SunPower Corporation	墨西哥恩森那达
Trina Solar Co., Ltd.	中国常州; 越南 Van Trung 工业园区; 泰国是拉差
Vikram Solar Ltd.	印度加尔各答
Wuxi Suntech Power Co., Ltd.	中国无锡
ZNShine PV-Tech Co., Ltd.	中国常州

行业观点

“在对超过 95 GW 的制造能力进行了 300 多次审核之后，我们多次发现，同一家制造商旗下不同工厂的产品质量之间存有差异。即使是一级供应商，其工厂和工厂内各车间的产品质量也可能存在差异。”



IAN GREGORY

常务董事

PI Berlin North America

案例研究



PQP 失效

在今年的计分卡中，有 20% 的获提名 BOM 至少发生过一次失效。如果在湿热测试后没有进行 BO 稳定化处理，则 2020 年的失效率与 2019 年观察到的总失效率一致。

失效的含义

PQP 中存在三类失效：

1. 安全性

IEC 61215 标准专用于评估光伏组件在湿操作环境（即雨、雾、露水、潮湿、融雪）下的电气绝缘情况，我们依照 IEC 61215 标准并通过湿漏电测试来确定光伏组件是否安全运行。失效则意味着现场运行的组件可能带来危险。

2. 外观检验

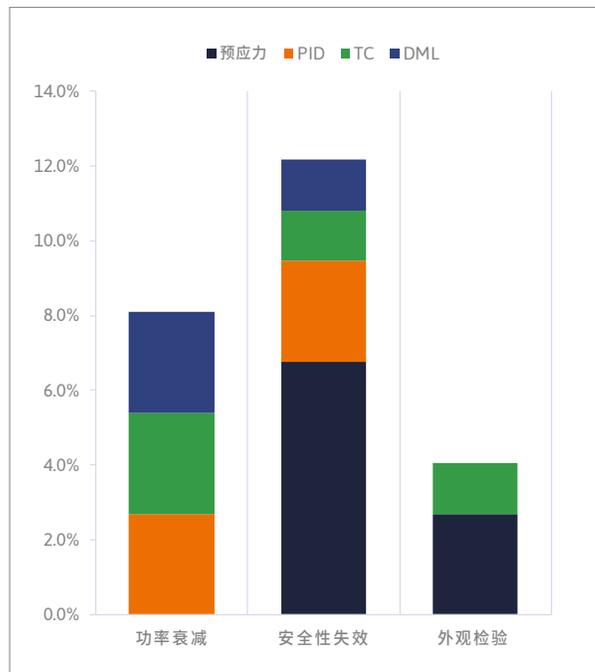
使用 IEC 61215 标准检查组件的分层、腐蚀、破损或裂纹表面及组件的其他变化。失效则表明组件存在重大制造缺陷，进而会在现场运行时过早失效。

3. 功率衰减

虽然 PQP 没有为衰减指定通过/失败阈值，但组件制造商可在衰减率不符合预期时将其产品从测试中移除。在这类情况下，制造商通常会更改其 BOM 或生产流程，然后提交新样品以供重新测试。PVEL 会在 PQP 报告中记录所有重新测试的产品，以便为下游买家提供充分透明的信息。失效则意味着组件可能在电站现场表现不佳，最终使资产所有者遭受经济损失。

BOM 中有 20% 至少发生过一次失效。

下表描述了 2020 年计分卡 PQP 测试中每个 BOM 在每项测试中的失效情况。预应力失效是指在测试前的初步检验中检测到的失效情况。



PQP 失效 (续)

现场接线盒缺陷



上图显示了电站光伏组件的接线盒因电弧而熔化。

2013 年建于非洲的一座发电量达 50 MW 的光伏电站在仅运行五年后，便因焊接不良和二极管失效而出现严重故障。

超过 3,000 个组件受到接线盒焊接不良的影响，导致接线盒因电弧而发生了灾难性故障。

其中一种情况是，熔化的接线盒中流出的熔融塑料在组件下方的干草中引发了一场灌丛火灾。

资产所有者的保修索赔方案由制造商自行决定，因此制造商会优先选择维修受影响的现场组件，而非更换所有组件。

组件失效数量随时间不断增加，这会让电站所有者愈发担忧电站的持久可用性和盈利能力。

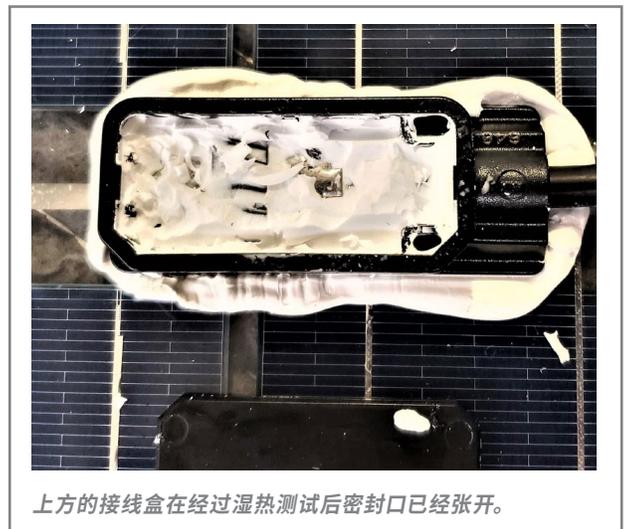
实验室接线盒缺陷

PVEL 观察到，与 2019 年和 2018 年计分卡相比，2020 年计分卡 PQP 测试中的接线盒相关故障有所增加。这些故障包括热循环后的旁路二极管故障、测试前及热循环、PID 和 DML 测试序列后接线盒处发生的湿漏电故障。

发生短路的旁路二极管会使功率至少下降 33%，因而可归类为功率衰减故障。但二极管故障同时也是一种安全隐患：当组件处于局部阴影条件下时，发生开路的旁路二极管无法防止产生热斑。

极端情况下，热斑可能会使组件玻璃发生破裂并/或烧毁背板。接线盒或组件生产线上的元件选择不当或静电放电控制不良均会导致现场的二极管失效。

许多记录在册的湿漏电故障都可归因于使用接线盒盖、粘合剂或灌封剂密封接线盒时所留下的密封不严问题。正确放置盒盖并涂抹密封剂属于关键的制造流程，但制造商可能会在追求生产目标时忽略这些流程。



上方的接线盒在经过湿热测试后密封口已经张开。

**在 2020 年计分卡制作期间接受过测试的制造商中，
有五分之一的制造商至少发生过一次接线盒故障。**

背板耐用性测试序列

背板故障会造成严重的安全后果并大幅降低性能，最终可能导致资产所有者和投资者遭受经济损失。虽然具体的衰减模式取决于环境条件和背板材料，但故障通常始于背板发黄和/或粉化（粉末在背板上积聚），并可能演化为背板破裂。

现场故障：为期 7 年的光伏项目



上方图片来自美国西南部一处发电量达 17 MW 的光伏电站，该电站中的背板已经彻底破裂。背板出现严重烧焦的起因是，背板裂缝处产生的电弧截断了框架。热事件导致正面玻璃发生破碎。

背板故障

当水分通过背板裂缝进入光伏组件时，会导致：

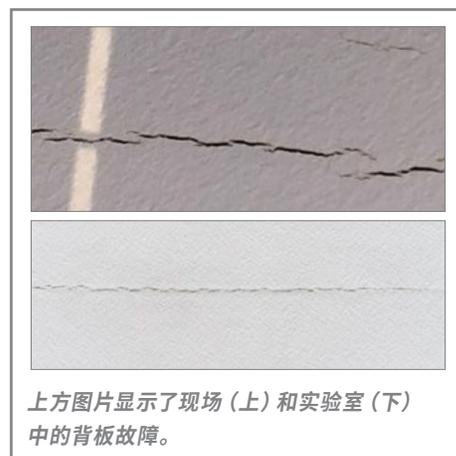
- **接地故障：**水流会形成一条通向地面的通道，而这些高泄漏电流会导致逆变器关闭。晨露环境下，电站的逆变器也可能会延迟启动。
- **分层：**当水分在光伏组件中积聚时，组件的各层就会分离，电子元件也会遭受腐蚀。
- **安全隐患：**水分进入分层、衰减后的光伏组件后，电弧故障等热事件会更容易发生。

在实验室重现现场故障

在短短六个月的时间里，PVEL 的背板耐用性测试序列便重现了五至七年后才开始在现场出现的背板衰减模式。该项测试的目的是使用以下参数在受控的实验室环境中重建现场观察到的失效模式：

- 测试对象为含有经过工厂目击测试的* BOM 的全电池光伏组件而非背板样品，目的是捕获机械应力。
- 测试包括背面紫外线以及用于模拟现场条件的其他应力。

实验室测试结果（见右图）显示了一系列影响背板耐用性和可靠性的问题。据此可得出的明确结论为：背板材料的选择会影响光伏组件的性能，而市场现有组件的背板质量参差不齐。



上方图片显示了现场（上）和实验室（下）中的背板故障。

**为防止现场出现背板故障，请始终在光伏组件供应协议中明确指定
需向 BOM 加入通过 PVEL 测试的高性能背板。**

*查看第 13 页，了解 PVEL 的工厂目击测试要求。

光照和高温诱导衰减

由于现场报告的衰减率高达 10%，光和高温诱导衰减 (LeTID) 已成为 PERC/PERT 组件行业普遍关注的问题。PVEL 已在我们的 PQP 中添加了 LeTID 敏感性测试，以帮助买家减轻后续风险。

现场出现的 LeTID

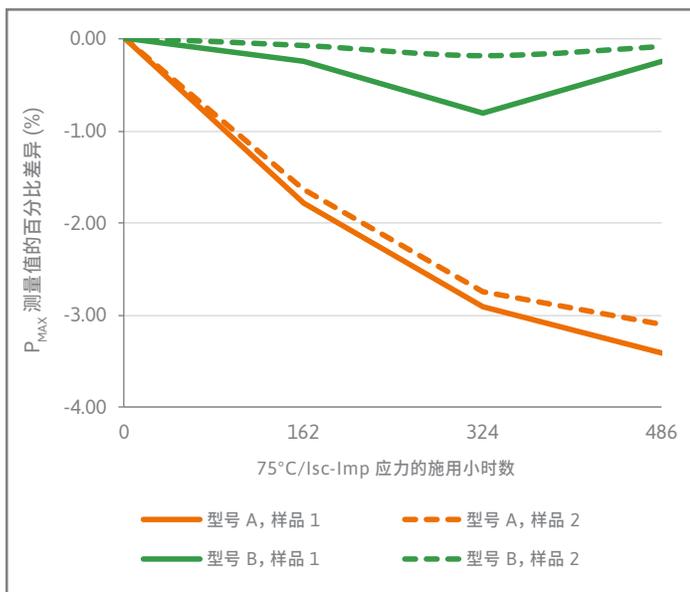
一篇即将发表的 NREL 论文¹详细介绍了美国中大西洋州份一处发生 LeTID、发电量达 12 MW 的公用事业规模的太阳能电站。该电站由六个 2 MW 的阵列组成，其中五个阵列均出现了迅速衰减。根据校正后的现场 IV 曲线，组件的功率衰减率高达铭牌所示值的 7.5%，在不到三年的时间内平均功率衰减率已达 5%。

未受影响的阵列的平均功率衰减率则为 0%。在实验室中进行的闪光测试结果和年度衰减率分析结果也表明，这五个受影响阵列的衰减率更高。

所有组件均由同一制造商提供且型号相同，因此，我们无法从视觉上区分。NREL 的破坏性分析结果显示组件中至少使用了两种不同的电池类型，这表明有一类电池对 LeTID 更敏感。

实验室中的 LeTID

PVEL 的 LeTID 敏感性测试遵循先前针对 IEC 61215* 拟议的相同测试顺序。测试条件设计为缓慢接近最大衰减点，以免触发其他衰减机制。本文发布之时，PVEL 已通过结合 PQP 和项目级别的批量测试项目，测试了 50 多个组件对 LeTID 的敏感性（见第 36 页），并且还有超过 25 份的额外 BOM 正在排队等待测试。



行业研究

“这突显了制造商制定稳健的质量计划的重要性，以及当更改与组件模型相关的电池、材料或制造流程时，重新对组件进行资格认证的重要性。”¹

¹Michael G. Deceglie, Timothy J Silverman, Steve W. Johnston, James A. Rand, Mason J. Reed, Robert Flottesmesch 和 Ingrid L. Repins. “Light and Elevated Temperature Induced Degradation (LeTID) in a Utility-scale Photovoltaic System” (公用事业规模的光伏系统中发生的光和高温诱导衰减 (LeTID)), IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.2989168

迄今为止的测试结果

迄今为止的大多数结果均表明，制造商已在电池生产线中对 LeTID 实施了强有力的控制，经过 486 小时测试后，衰减率的中位数和平均数分别为 0.96% 和 1.17%。

但是，同一制造商生产的多种组件类型的衰减率有时会有差异，如左图所示。该制造商宣传自己的 PERC 组件“对 LeTID 不敏感”，这显然适用于型号 B，但所测衰减率为 3% 的型号 A 却与此宣传不符。

鉴于市场上提供的组件类型正在迅速增加，买家务必要进行 PQP 测试以确保所收到的 BOM 确实“对 LeTID 不敏感”。

*注意：LeTID 测试最终未纳入最新版 IEC 61215 标准中。

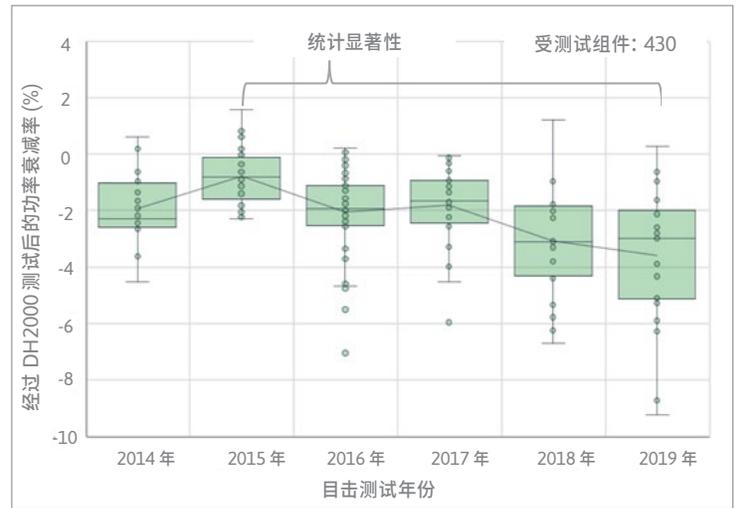
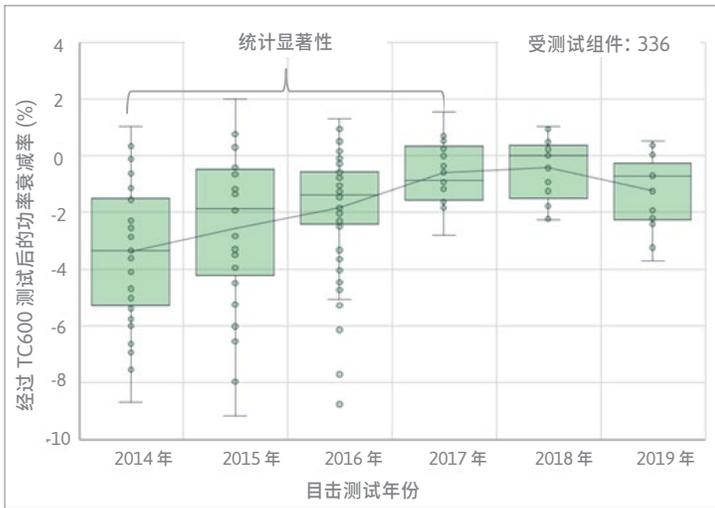
IE 观点: DNV GL 的重要发现

DNV GL 和 PVEL 合作为下游项目开发商和资产所有者提供支持。在接下来的两页中, DNV GL 会说明 PVEL 的独立数据如何帮助他们评估光伏组件技术和项目寿命。

PVEL PQP 测试结果分析

结果趋势

DNV GL 分析了 2014 年至今的 PVEL PQP 测试结果。虽然 PQP 一直在向前发展, 但 TC600 和 DH2000 仍然是可提供统计显著性趋势的常见测试。TC600 的测试结果从 2014 年到 2017 年一直处于改善趋势, 之后进入平稳期, 鲜有出现衰减(见左下图)。这种改善可以解释为组件转为使用了单晶硅电池、更多主栅线和更厚的封装剂。然而, 湿热测试结果显示, 自 2015 年以来, 衰减率呈现出恶化趋势(见右下图)。这可能是由于组件采用了 PERC 电池, 因此我们还需在完成 DH2000 测试后另外执行与硼氧复合体相关的光致衰减(LID)稳定化步骤。或者, 该测试结果还可能表明组件使用了非氟聚合物背板或更薄的丝网印刷指状物, 所以可能更易因进入的湿气而遭到腐蚀。

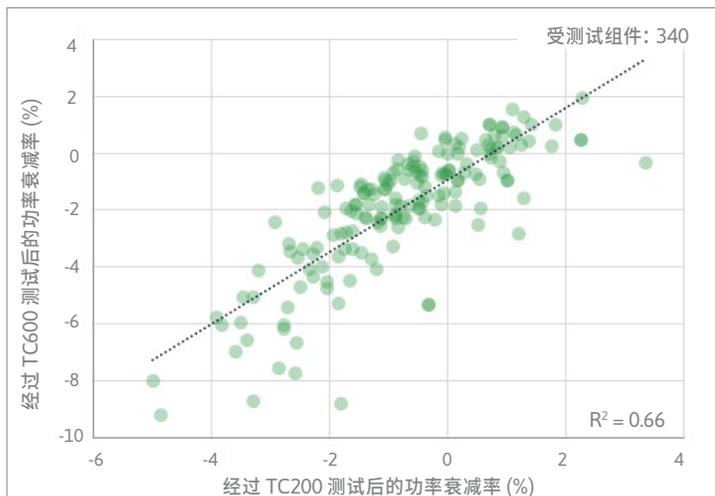


自 2014 年以来的热循环和湿热测试结果

适当的测试时间

理想的测试时间经常无法达成统一。这些测试是为了模拟现场发生的应力和衰减机制。如果测试时间过短, 可能无法检测到衰减; 如果测试时间过长, 则可能会引入新的非代表性失效机制。

热循环测试中的 200 次循环和 600 次循环之间的相关性表明, 600 次循环测试不会引入新的机制, 但在只进行 200 次循环后停止测试可能为时过早(见左下图)。而 600 次循环和 800 次循环之间的历史相关性表明, TC600 的测试周期是足够的。1000 小时与 2000 小时之间的湿热相关性表明, 1000 小时并不能完全替代 2000 小时(见右下图); 而 2000 小时与 3000 小时之间的历史相关性表明, 后者可能会引入较不相关的失效机制。数据显示, 2000 小时为最理想的测试时间。



散点图显示了 TC 和 DH 测试各阶段之间的相关性

在 DNV GL 的使用寿命评估中使用 PVEL 的数据

相比传统的 25 年寿命，光伏系统的当前使用寿命已经有了显著提高。将使用寿命延长至 30 至 40 年后，电站的平准化度电成本 (LCOE) 将降低 16% 至 20%，资产价值亦会提升。为了延长使用寿命，许多系统元件都需要不断改进并/或进行更换。

DNV GL 通过考量组件的失效率来确定组件的使用寿命，其中失效被定义为组件功率在短时间内显著衰减，而衰减原因可能是 PID、腐蚀、背板故障等。

组件类别

DNV GL 设定了三种组件类别：标准、优质和高耐久性，且每个类别都有相应的失效率和更换时间表。

组件的分类主要取决于一系列加速应力测试的结果，例如 PVEL 的 PQP。其他考量因素包括工厂审核报告、详细的 BOM 审核信息和现场历史数据。优质或高耐久类别在完成长时间测试后所得到的衰减率必须很低。

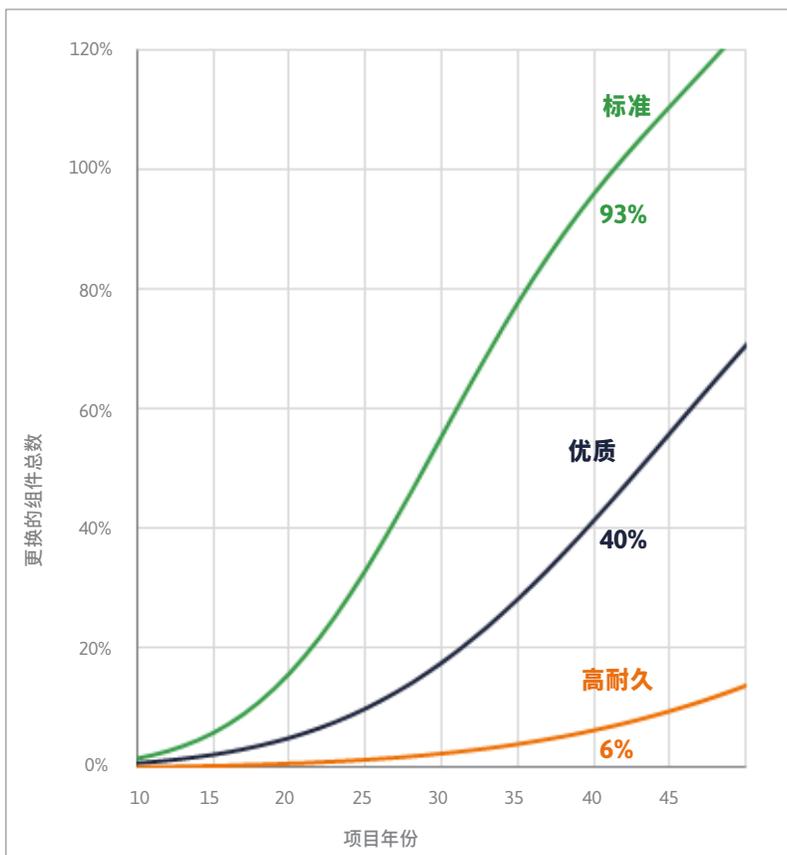
通过这些分类，下游买家和金融商可以比较不同组件选择的经济性。

如果对光伏系统设定的目标使用寿命为 40 年，则几乎所有标准组件都需要更换，而优质和高耐久组件分别只需更换 40% 和 6%（见右图）。

Henry Hieslmair 博士的分析结论

DNV GL

太阳能技术部首席工程师



以下三种组件类别需更换的组件总数：标准、优质和高耐久。

行业观点

“PVEL 精心设计的 PQP 测试可提供行业所需的数据来延长光伏系统的使用寿命，从而降低 LCOE。”



ANAT RAZON

DNV GL

太阳能尽职调查与技术部部门主管

结论



降低收入风险的五个步骤

通过遵循下文概述的五个关键步骤，下游太阳能公司可以通过建设可靠的高性能项目来显著降低技术风险敞口，同时大幅提高长期财务回报。

1. 执行工厂审核

工厂审核是指对制造商生产线进行单独检验。执行第三方工厂审核有助于下游买家选择遵循严格的质量保证和质量控制流程的生产商。

2. 审查 PVEL PQP 报告

PVEL 的 PQP 报告为模型提供了经验数据，可助其提高预测准确性，最终指导买家选择能够满足独特项目要求的 BOM。通过要求供应商参与 PQP，买家可以确保为基准设定提供相关数据。

3. 指定光伏组件物料清单

选择光伏组件后，买家应与 PVEL 合作，以在其供应协议中明确指定已获批的 BOM 和工厂厂址。PVEL 应根据合同免费提供此等 BOM 展品。

4. 确认生产期间的产品质量

工厂启动特定项目的生产流程后，买家应另外安排第三方监督生产。独立审核员将负责确认工厂在订单生产中使用了指定的 BOM，并遵循了适当的质量控制流程。

为了确保工厂生产的光伏组件满足买家对性能和可靠性的期望，买家可将组件的统计样本交由 PVEL 进行批量测试，这将有助于验证性能并快速识别一系列缺陷。PVEL 可与下游客户合作制定风险缓解计划，以防组件无法按预期运行。

5. 安装后验证组件性能

PVEL 执行现场 EL 与项目验收能力测试，以确保组件按预期运行。该测试还可检测到在运输和安装过程中可能出现的电池裂缝。此外，现场 EL 测试还可在日后发生保险索赔时提供基线数据，并可用于诊断系统是否性能不佳。

行业观点

“Arevon 是北美领先的可再生能源公司，经营着超过 3,500 MWdc 的光伏太阳能项目。我们一直依靠 PVEL 产品认证计划 (PQP) 所提供的数据和统计批量测试来为我们正在进行的几个 GW 项目优化光伏组件采购和技术尽职调查流程。

从公用事业规模的太阳能电站到分布式发电，PVEL 的产品认证计划均可对潜在供应商和新技术进行客观评估，而这些新技术都是可用来优化项目融资假设的有力工具。”



JARED PORPIGLIA

Arevon
采购总监

超出大规模采购

并非所有光伏组件买家都能始终遵循 PVEL 最佳做法建议中的每个步骤。所有与 PVEL 签署合作协议的下游公司，无论规模大小，均可获得 PQP 报告。作为最基本的建议，PVEL 希望买家使用 PQP 报告为性能和可靠性评估提供有价值的信息。



结论

十年前，公用事业规模的太阳能项目是指使用标准配发的 3 主栅线和 72 电池型多晶组件构建并具有固定倾角的 1MW 地面阵列。如今，公用事业规模的发电站已能产生高达数百甚至数千 MW 的电量。买家可以像在餐厅或咖啡店点单一样来选择产品功能：“我想要 166 mm 的半切割双面电池和透明背板。”

如今的技术正在以前所未有的惊人速度不断发展。为了满足全球供应需求和不断降低的 PPA 费率，制造商要顶着重重压力更快速地生产出更具经济效益的组件。但这种组件的质量不见得更好，因为在急于实现规模经济的过程中，制造商可能会忽略基本的质量控制。

国际能源机构预测，在短短四年内，可再生能源便可占全球总发电能力的 30%。尽管这种增长引人注目，但还不足以应对气候变化。

为了改善这一预测，让我们的地球和后代受益，我们所有人都要采用更智能、更经济、更快速的工作方式。但是，我们还需要在太阳能部署过程的每个阶段（包括选材、生产、建造、运营和停运）落实质量控制工作。

对质量的追求决定了我们在 PVEL 的工作方式——认真对待。我们与制造商建立合作，以推动其生产耐用产品。我们尽职审查项目的建设及部署。我们为全球数十吉瓦的光伏太阳能开发与资产所有者提供支持。我们很荣幸能与全球绝顶聪明的人士和极具创造力的思想家们携手合作。我们致力打造重要数据。

未来数据

“我很自豪地看到，我在新南威尔士大学的团队于上世纪 80 年代中期推出的 PERC 电池对该行业和 PERC 推动的新组件设计浪潮都产生了重要影响。

这就更加突显了 PVEL 在提升组件现场性能方面所做的努力，有助于确保我们构建并安装真正经久耐用的光伏组件。”



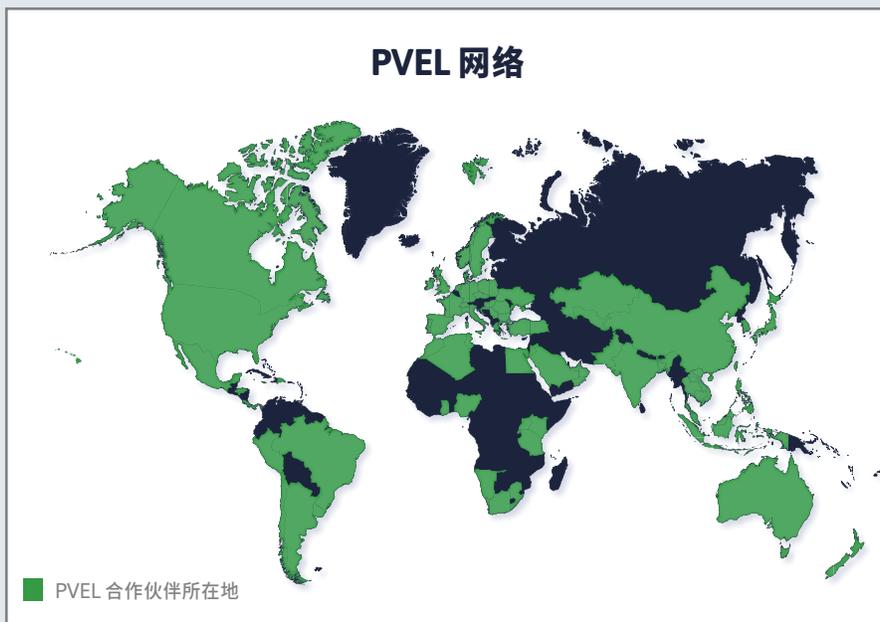
MARTIN A. GREEN 博士

澳大利亚先进光伏中心
新南威尔士大学

有兴趣成为 PVEL 下游合作伙伴?

加入我们的全球网络, 免费访问我们的光伏组件、逆变器和储能系统的 PQP 报告。

了解有关 PQP 的更多信息, 并登录 pvel.com/pqps 进行在线注册



PVEL 下游合作伙伴的业务遍布全球太阳能市场。

重要通知和免责声明

本文件(下称“本报告”)由 PVEL LLC 实验室基于与其中提及的日期和期限相关的信息编制而成。本文件不保证信息不会发生变化。在法律允许的范围内,无论 PVEL 还是其任何关联公司(下称“集团”)都不承担因使用本报告而引发的任何合同责任、民事侵权或其他形式的责任。本文件是一份概要,必须整体阅读,并受其中提及的任何假设及资格条件的约束。本报告可能包含仅供在相关主题领域拥有必要专门知识的人员使用的详细技术数据。本报告中没有任何内容会向集团以外的任何实体授予任何利益,且使用本文件所带来的相关风险应由用户独自承担。本文件受版权保护。



MAKE DATA MATTER.

重要通知和免责声明

本文件（下称“本报告”）由 PVEL LLC 实验室基于与其中提及的日期和期限相关的信息编制而成。本文件不保证信息不会发生变化。在法律允许的范围内，无论 PVEL 还是其任何关联公司（下称“集团”）都不承担因使用本报告而引发的任何合同责任、民事侵权或其他形式的责任。本文件是一份概要，必须整体阅读，并受其中述及的任何假设及资格条件的约束。本报告可能包含仅供在相关主题领域的专业人员使用的详细技术数据。本报告中没有任何内容会向集团以外的任何实体授予任何利益，且使用本文件所带来的相关风险应由用户独自承担。本文件受版权保护。