

光伏组件可靠性计分卡报告 2017

报告撰稿人

Jenya Meydbray, 战略与业务发展副总裁

Frederic Dross, 组件业务主管



目录

1 简介	1
2 光伏组件老化机理	3
2.1 光伏性能现场研究	4
2.2 实验室测试的目的	6
3 组件可靠性和测试	7
3.1 组件可靠性简史	7
3.2 现有认证标准的局限性	8
3.3 性能衰减与失效	9
4 光伏组件产品认证程序	10
4.1 组件选择和抽样过程	11
4.2 光诱导性能衰减	11
5 光伏组件可靠性计分卡的结果	12
5.1 结果概述	12
5.2 热循环	13
5.3 动态机械载荷	15
5.4 湿冷冻	17
5.5 湿热	19
5.6 PID 测试	21
6 结果解释	23
6.1 实验室数据的使用	23
6.2 收获	24
7 结论	28
重要通知和免责声明	29
关于 DNV GL	29

最佳表现制造商（按字母顺序排列）

正泰太阳能
比亚迪
伟创力
协鑫
韩华 Q CELLS
现代

晶科能源
京瓷
隆基
新日光
REC
S-Energy

赛拉弗
Silfab
Solaria
SolarWorld
SunPower
SunSpark

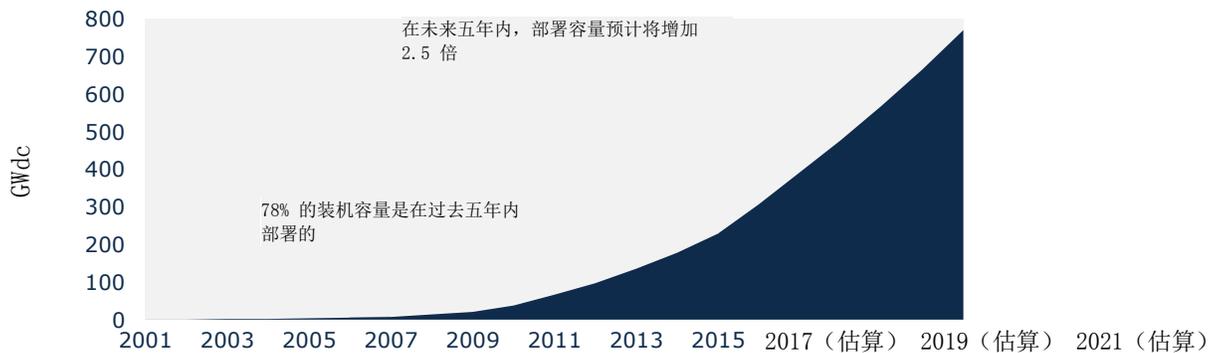
Talesun
天合光能
Vikram
英利

1 简介

现代太阳能电池发明于 1954 年。1997 年春，西门子太阳能产业公司宣布将光伏组件的质保期从 10 年延长至 25 年。这标志着新行业标准的开端，让 25 年质保期成为了一项基本要求，帮助投资者了解太阳能项目全寿命的经济可行性。

但时至今日，组件长期性能所伴随的风险仍不明朗。可公开获得的光伏 (PV) 系统长期运行性能高质量现场数据仍然十分有限。其次，现场数据需要历经多年才能生成，而到那时技术早已更新换代。正因为如此，在过去的几年里，高质量、独立的实验室数据在光伏组件质量和长期可靠性评估中已确立了其关键作用。

在全球超过 300 GW 的光伏装机容量中，有 78% 的现场运行时间还不足五年。要收集到当前大多数装机容量实际寿命的现场数据还需要 20 多年的时间。



资料来源: GTM Research

图 1-1 全球累计光伏装机容量

其次，虽然从 2010 年至 2016 年组件价格下降了大约 80%，且仅仅在 2016 年年初至 2017 年年中期间价格就下降了约 35-50%，促使行业得以加速增长，但以组件质量为代价降低成本仍然受到持续关注。美国和欧洲的进口关税和最低价格政策促使许多制造商将生产外包，或在马来西亚、越南、泰国、印度等免关税国家新建工厂。应对巨大的价格压力和动荡的供应链表现可能会以牺牲质量为代价。目前尚不能证明价格或排名能够展示组件的质量或性能。

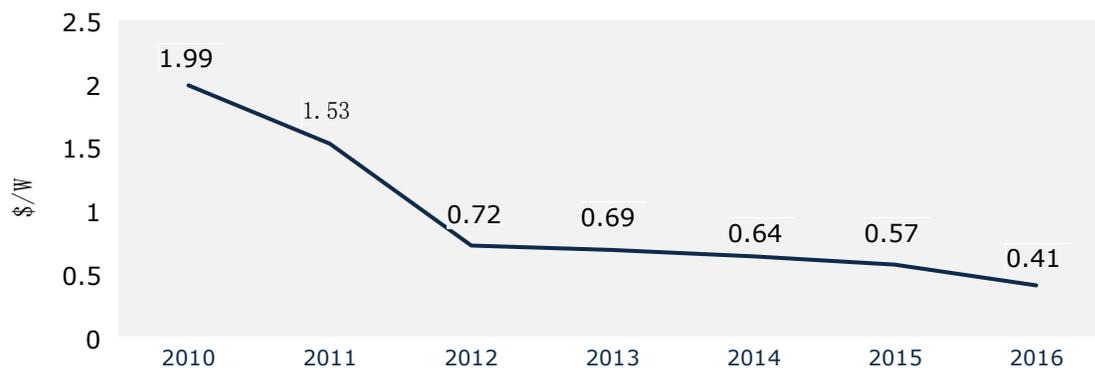


图 1-2 全球混合组件价格

此外，除了价格上的激烈竞争以外，还存在效率方面的竞赛。好的一面是，在标准“H 型铝背场”技术历经几十年优化之后，光伏产业终于将创新纳入了生产线：PERC（钝化发射区和背表面电池）、PERT（钝化发射极，背面完全扩散）和 PERL（钝化发射极，背面局域扩散）、双面组件、叠瓦技术（亦称为“高密度组件”）、多线、半切电池等都推动了市场和市场份额。然而，新技术同时也带来了一系列新的挑战、风险和不确定性。

获得全寿命现场性能数据还要漫长的 20 多年，而且无法获得公开数据比较供应商的组件长期可靠性，买家和投资者在采购决策中该如何衡量质量呢？

DNV GL 光伏组件可靠性计分卡旨在解决这一关键挑战。通过对供应商针对性的表现分析，计分卡可以帮助投资者和开发商生成以质量为保障的采购策略，以确保项目长期可行性。

2 光伏组件老化机理

随着太阳能产业不断成熟，光伏组件和其他系统组件（如逆变器）的长期性能和可靠性受到了投资界越来越多的关注。资金成本降低使项目寿命后期在贴现现金流量分析中显示出了相当大的价值。任何元件质量管理策略的目标都是为了避免采购会出现早期寿命失效的设备，并选择能够成功长期运行的设备。如今全球活跃着一百多家光伏组件制造商——通常每家制造商都有多处工厂，有时还在多个大洲生产。这些制造商使用的材料、制造技术和质量控制方法各异，因此产品质量和可靠性也参差不齐。为了正确应对如今产品的失效风险，必须对光伏电站中发生的光伏组件常见失效模式建立清晰的了解。了解组件在现场如何发生老化有助于凸显技术风险，并有助于采购质量保证策略的有效实施。

过去几十年出现的光伏组件老化和失效机制都有记录，涉及了世界各地的电厂以及种类各异的材料。光伏设备的现场失效可能源于材料问题、基本的产品设计缺陷、或是制造过程期间的质量控制失效。图 2-1 表明了主要的一些光伏组件老化和失效机制，包括寿命初期失效、寿命中期失效和磨损失效。

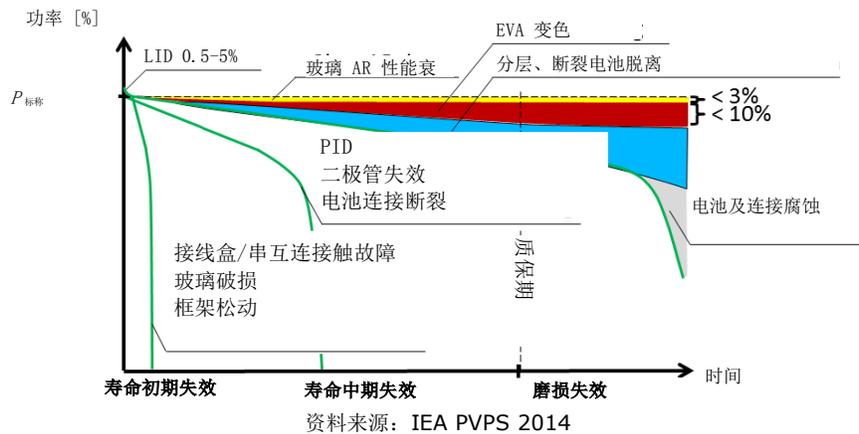
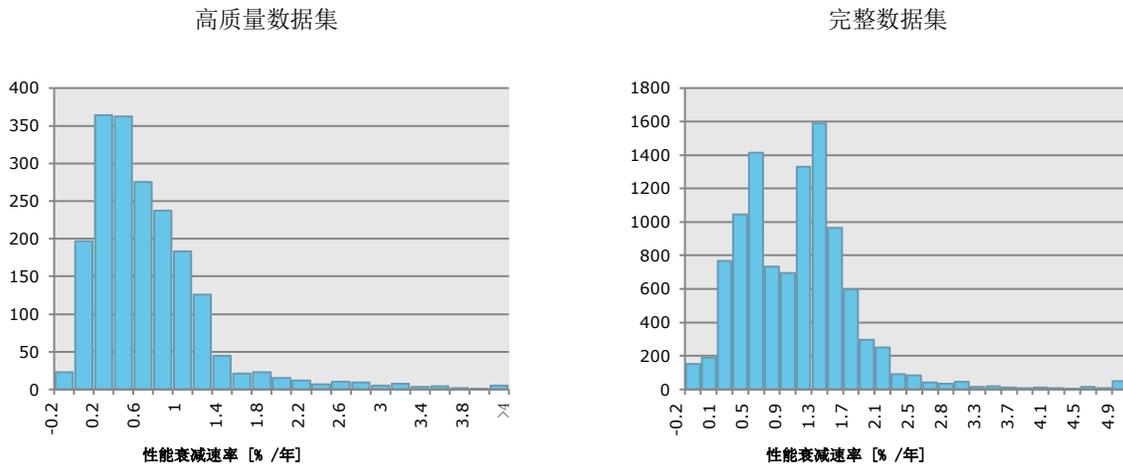


图 2-1 导致光伏组件性能衰减的老化机制

2.1 光伏性能现场研究

太阳能行业普遍缺乏光伏设备现场性能的全面公开数据；但本行业也曾开展过若干项大型研究。来自美国国家可再生能源实验室 (NREL) 的 Dirk Jordan 和 Sarah Kurtz 曾对已公布的光伏组件和系统性能衰减速率数据进行过综合文献调查¹。在此项研究中，他们从 40 个国家近 200 项研究中发现了近 10,000 种光伏组件性能衰减速率。现场性能的精确测量对几种误差来源非常敏感，从而可能使结果产生偏差。辐照度传感器的校准和清洁维护、组件基线数据（铭牌对瞬间功率试验）以及不适当考虑光诱导性能衰减 (LID) 只是潜在数据错误的几个主要来源。为了解决这个问题，作者将通过多次测量确定的较高质量研究中获得的数据进行了隔离，以提高置信度。对每个测量点基本采用类似的测量方法和校准，并做明确描述。作者还提供了装机的详细情况（忽略专有因素）。NREL 研究的结果如图 2-2 所示。值得注意的是，存在每年性能衰减超过百分之一的长尾现象。这条长尾可能是由质量低劣的制造、材料或产品设计引起的设备问题造成的。



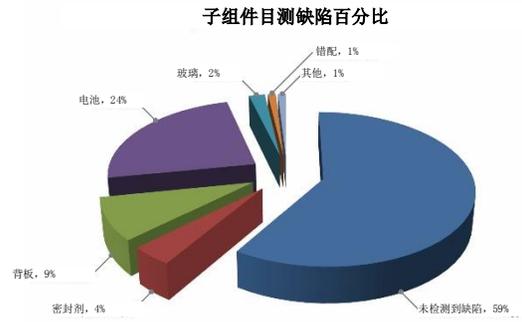
资料来源：“Compendium of Photovoltaic Degradation Rates”，D.C. Jordan, et al, NREL, 2015

图 2-2 NREL Kurtz-Jordan 等人的现场光伏性能衰减研究结果

在另外一项大型研究中，杜邦公司对全球 60 处不同现场、来自 45 家不同制造商的共计 150 万块光伏组件进行了广泛的现场检查（目视检查与热成像），评估它们在现实条件下的老化表现。系统年龄在 0 至 30 年之间。其研究发现见图 2-3。在调查的组件中，有 41% 发现存在不同的问题。

¹Compendium of Photovoltaic Degradation Rates”，D.C. Jordan, et al, NREL, 2015. 该报告在 DNV GL 支持下于 2016 年进行了更新。

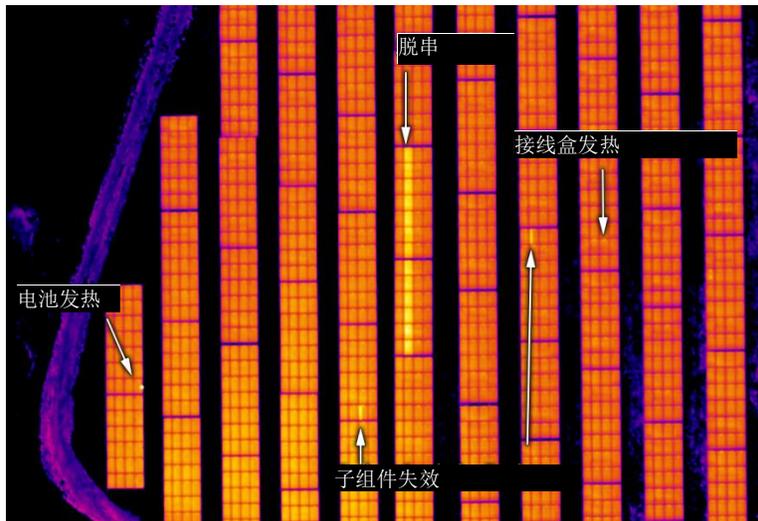
失效分类	
玻璃/覆板	玻璃破碎、被侵蚀、模糊
密封胶	变色或分层
电池/连接	腐蚀、热点、连接断裂、打结、裂纹、烧痕
背板	开裂、变黄、分层



资料来源：由杜邦光伏解决方案提供，“光伏组件在使用环境中的缺陷定量分析”，Alex Bradley 等人，2017 年

图 2-3 杜邦公司现场光伏组件调查

对光伏电站进行空中巡查（使用无人机或飞机）成为了一种日渐普遍的、用于筛选有缺陷或性能不佳的组件和电池串的方法，且近期已被纳入 NREL 操作和维护最佳实践指南中。这些技术能够检测到导致产生组件温差的组件级缺陷，如二极管故障、电池热点、接线盒发热和组件效率的重大差异，图 2-4 展示了其中一些。其中一个例子是 Heliolytics，它提供了从飞机上拍到的整个电厂的热成像图，可用于更准确地识别出组件故障，以供进一步实验室试验。



资料来源：Heliolytics, “Summary of DC Losses Observed using Aerial Infra-Red Inspection Across >1.6 GW”, Rob Andrews and Kristine Sinclair, 2017

图 2-4 Heliolytics 对光伏电站的热扫描

2.2 实验室测试的目的

确定一个产品能否在野外持续工作 25 年的最准确方法是实际部署它，并使用仪器监测 25 年。这个级别的测试显然让人望而却步。实验室测试可用于了解在某个商业上合理的时间框架内光伏设备的老化表现。在实验室只需数月时间就可以获得光伏组件相关的很多资料。不幸的是，就目前而言，根据实验室结果精确地预测现场性能衰减速率是不可能的。但我们有望将实验室内的相对性能转换为现场性能。例如，如果在实验室热循环试验中组件 A 的性能比组件 B 更优，那么鉴于该试验所揭示的老化机制，很有可能它在现场的性能也更佳。除了性能衰减分析以外，目前可利用的压力测试也非常有效，能用于筛选会导致严重性能衰减或安全问题的光伏组件缺陷，如有缺陷的焊接接头或粘结不良的接线盒。表 2-1 列出了 NREL 公布的每项实验室压力测试所针对的失效模式。

表 2-1 实验室测试中的光伏组件失效模式

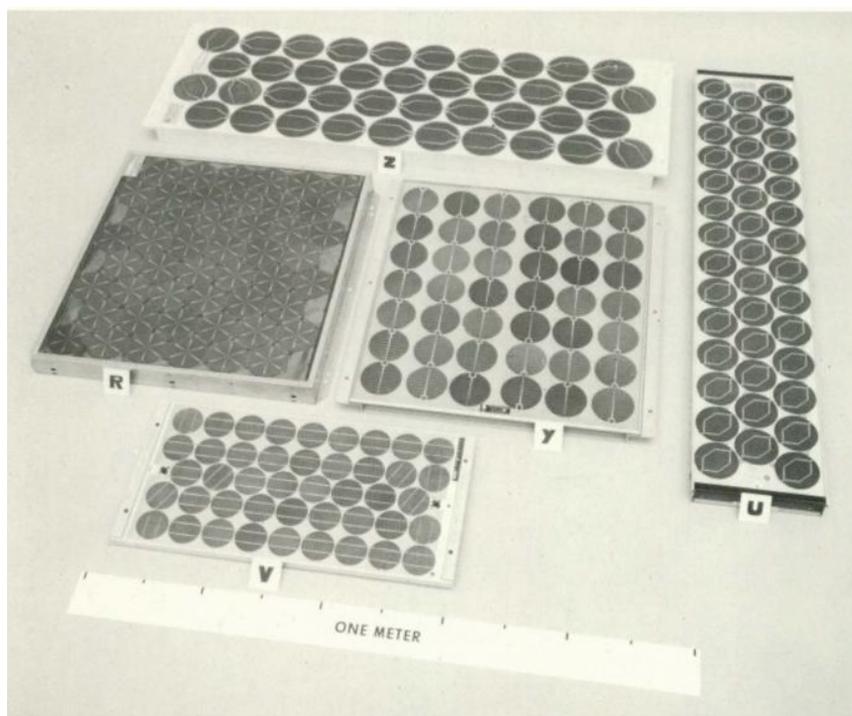
加速压力	失效模式
热循环	连接断开 电池破裂 焊接失效 接线盒粘结 组件连接开路 开路导致电弧
湿热	腐蚀 密封剂分层 密封剂失去粘性和弹性 接线盒粘结 TCO 电化学腐蚀 边缘除膜不充分
湿冷冻	密封剂分层 接线盒粘结 边缘除膜不充分
紫外线暴露	密封剂分层 密封剂失去粘性和弹性 密封剂变色 背板性能衰减导致接地故障

资料来源：“Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic’s Progress Toward Grid Parity”，Wohlgemuth, et al, NREL, 2011.

3 组件可靠性和测试

3.1 组件可靠性简史

在谈及地面用组件可靠性评估的起源和早期阶段时，通常都会提及两个项目：Jet Propulsion Laboratory 的 Block Buy 项目²（见图 3-1）以及 Joint Research Center 的欧洲太阳能测试机构³。



资料来源：Jet Propulsion Laboratory

图 3-1 Jet Propulsion Laboratory 的 Block Buy 组件

JPL Block Buy 项目始于 20 世纪 70 年代中期，当时正是地面用光伏组件发展的起始阶段。这个项目的目的是开发和实施结晶硅组件的环境试验。至该项目结束之时，它开展了至今仍用于可靠性评估的许多测试，包括温度循环、湿冷冻和机械荷载试验。

欧洲太阳能测试机构 (ESTI) 项目于 20 世纪 70 年代后期启动，它专注于进行组件测试和创建太阳能电池的标准性能指标。该项目仍在进行中，目前专注于开发组件功率验证的工业标准。

这两个项目构筑了如今两项测试的基础：基本组件认证测试——国际电工委员会 (IEC) 61215 “地面用晶体硅光伏组件 - 设计鉴定和定型”、以及安全测试——美国保险商实验室 (UL) 1703 “平面光伏电池板”。

² https://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/photovol/Pub_blockbuys.htm

³ https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/esti_european_solar_test_installation_en.pdf

3.2 现有认证标准的局限性

虽然大多数光伏项目都要求进行 UL 和/或 IEC 认证，以确保满足最低等级的组件强度和安全性，但人们普遍认为这些认证标准并不足以证明光伏组件的可靠性或一致性。

首先，应注意 UL 1703 仅仅是一项安全性测试。这项测试的目的是确保组件在运行期间不会造成危险。

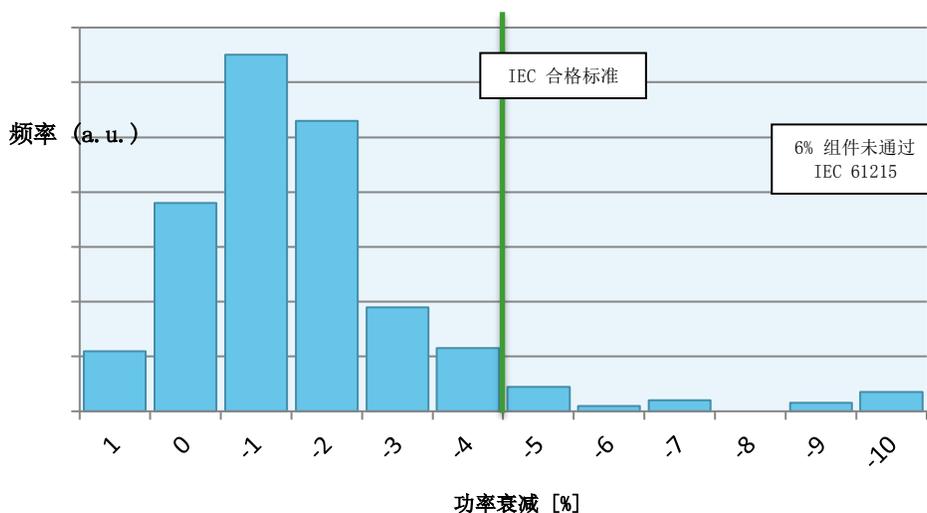
IEC 61215 标准是行业认可的最低基线组件评估程序，使用的是 JPL Block Buy 项目中首次提出的环境压力试验。然而，这些测试的范围只考虑了所谓的“初期死亡率”，而没有考虑一些常见的潜在故障原因。例如，对电势诱导性能衰减 (PID) 的抵抗能力根本没有进行测试。这意味着 IEC 61215 试验只适用于剔除在现场运行第一年就可能失效的组件（缺陷筛查）。

认证测试仅对少量样本进行，不一定能代表长时间、大产量的商业生产。制造商可自由选择送交测试的组件，这意味着不一定是从生产线中随机抽取的。这种默许可能导致制造商只挑选最好的产品送交测试。此外，维持认证结果不需要定期重新测试，除非发生重大变更或设计变更。

用于光伏组件缺陷筛查的 IEC 试验被广泛用于大型住宅区、商业采购或公用事业规模项目中的光伏组件采购，成为筛查系列缺陷的一种常用有效的批量验收方法（见下文第 6.1 节）。然而这种方法不足以量化组件结构的长期可靠性。

基于 DNV GL 的经验和数据，商用光伏组件至少有 6% 不能通过 IEC 61215 热循环测试 - 见下图 3-2。当历史数据集从几十个组件增加到上百个组件时，6% 这个数字依然保持不变。

其次，IEC 认证仅仅是一套用以判定是否合格的试验。它没有报告测试之后的实际性能衰减量，也不要求寻找性能损失的根源。



资料来源：DNV GL Laboratory Services Group

图 3-2 DNV GL 的历史热循环性能衰减结果（200 次循环）

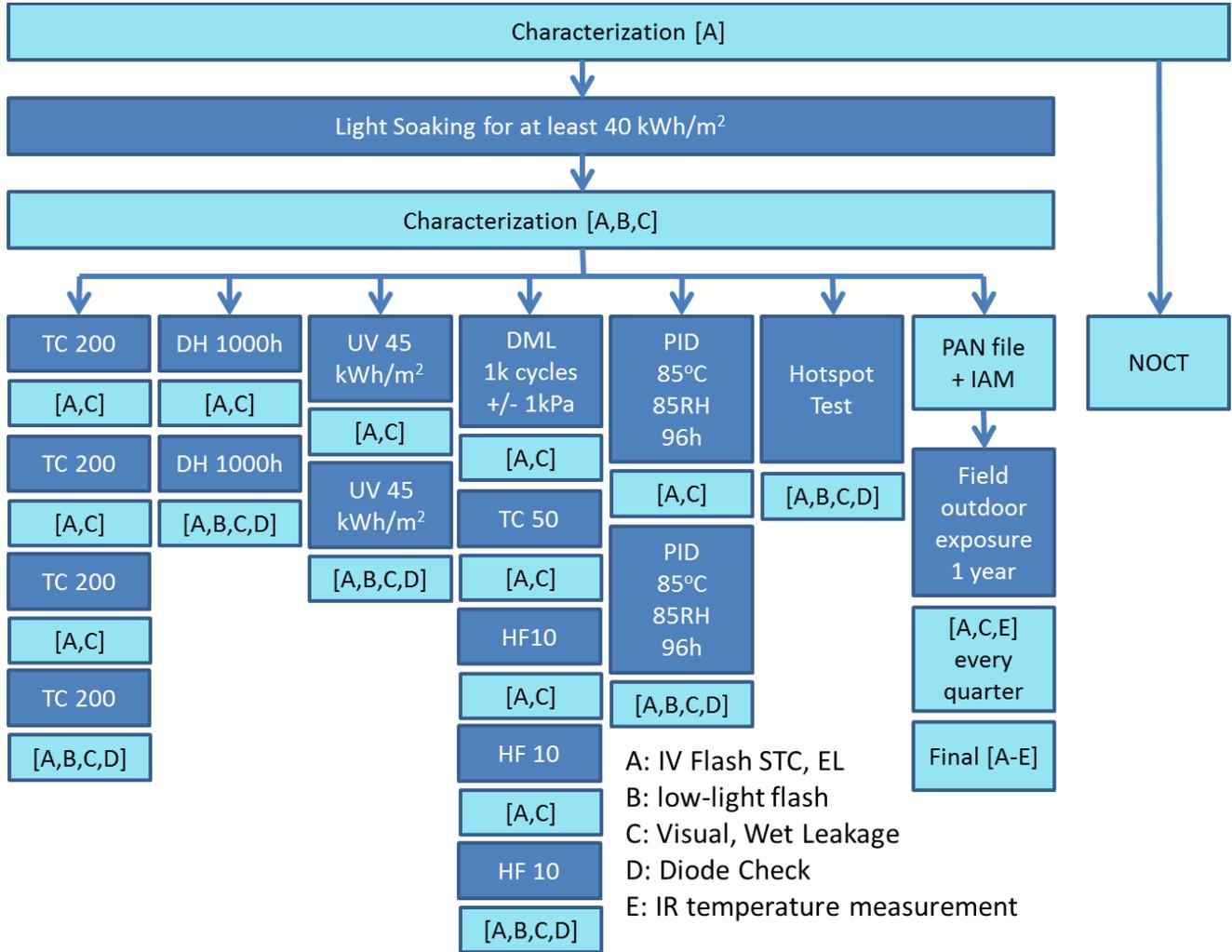
3.3 性能衰减与失效

每个项目都预期组件会随着时间的推移发生功率衰减，这是制造商的质保参数之一。如果组件在第一年内性能衰减超过 3% 且在第 25 年时线性降至其初始铭牌功率的 80%，通常即触发当前 25 年的标准质保期。由于测量工具的不确定性，很难准确地测量到现场发生的少量功率衰减。因此只有在总体性能不佳或完全失效时才能实施光伏组件的质保索赔。因此，在购买组件之前对组件抵抗最常见性能衰减机制的能力进行测量是非常有必要的。

4 光伏组件产品认证程序

DNV GL⁴于 2012 年开发了产品认证程序 (PQP)，用以支持太阳能下游产业。PQP 有两个目标。首先，它向光伏设备买家和光伏电厂投资商提供了独立、一致的可靠性和性能数据，以帮助实施有效的供应商管理程序（如合格产品或供应商清单）。其次，它还向专注于产品可靠性的组件制造商提供他们在市场竞争中取得成功所需的可见性。PQP 的范围与下游产业的要求相一致。它还随着时间适当发展变化，纳入人们对性能衰减机制的新见解、来自 DNV GL 下游合作伙伴的要求、以及来自整个光伏产业（包括制造商）的各种意见和建议。

光伏组件 PQP 向 DNV GL 的下游合作伙伴提供了第三方性能数据（PAN 文件、入射角修正系数 [IAM]、电池标称工作温度 [NOCT]、以及 LID）以及以下图 4-1 所列的可靠性数据。光伏组件可靠性计分卡中的数据即摘自 PQP。所有组件在生产中都经过见证，并在相同环境中以同样方式通过测试，以便进行平准化比较。在过去三年半，DNV GL 已与 40 多家组件制造商签署了 75 份光伏组件 PQP。全球十大组件制造商中的九家以及 70% 以上最新彭博新能源金融 (BNEF) “一级”制造商都已加入了 PQP。



资料来源：DNV GL Laboratory Services Group

⁴前身为 PV Evolution Labs，亦称 PVEL。

图 4-1 DNV GL 光伏组件产品认证程序

基于 IEC 和 UL 标准的各项试验缩写名称:

- TC: 热循环
- DH: 湿热
- UV: 紫外线暴露
- DML: 动态机械载荷
- PID: 电势诱导性能衰减

4.1 组件选择和抽样过程

独立的光伏组件抽样是测试和资质认证中非常关键的一步。这个步骤，尤其是组件的随机抽样，让人们相信生产流程和物料清单 (BOM) 真正代表了实际的商业化生产。BOM 在抽样期间进行控制和验证，以便 DNV GL 下游合作伙伴对不同 BOM 进行比较。DNV GL 下游合作伙伴的合格产品清单通常只包含经 PQP 认证、确认合格的 BOM 组件。对于光伏组件可靠性计分卡中测试的所有组件，DNV GL 通常都会与来自 SolarBuyer 和清洁能源协会 (CEA) 的独立检验师合作。这是 PQP 的一项强制性要求。

4.2 光诱导性能衰减

初次光照后，晶体硅组件通常会发生功率输出的永久性降低。这种现象称之为光诱导性能衰减，简称 LID。平均来看，晶体硅组件的 LID 范围处于 0.5% 至 3% 之间，有些组件会出现高达 5% 的损失。基于这一点，制造商在组件质保期第一年期间会考虑 3% 的功率损耗（通常情况下）。

为了确保 LID 不会损害实验室测试的结论，光伏组件可靠性计分卡中所有光伏组件在进入实验室之前都应照射强度至少为 40 kWh/m² 的光。

5 光伏组件可靠性计分卡的结果

5.1 结果概述

与去年报告类似，大多数参与测试的光伏组件制造商、型号以及相关 BOM 今年都表现良好，完全失效的情况相对较少。加入 DNV GL PQP 表明制造商重视其产品的可靠性。换言之，这些制造商可能是一个自我选择的群体。因此，这个群体表现出的中位结果可能会比更广泛的整个行业的中位结果要更好。如下条形图中的结果显示了每种 BOM 的多个光伏组件得到的平均值。每个条代表了一种不同的 BOM。使用的电厂位置和测试的型号名称见下文各表。大多数光伏组件是标准的 60 或 72 电池的单品或多晶硅组件。参加每种测试的制造商数量各有不同。由于每个 PQP 的范围都以重新测试指南为基础，因此不是每种 BOM 都要提交至每个试验站。

每幅图中的纵轴表示因压力测试导致的功率性能衰减，以占施加压力前输出（光照射之后）的百分比表示。表现最好的是在结果图中位于绿色纵线左边的那些。这条绿色纵线是一条视觉分界线，用以表示大多数数据集的拐点。

在本第三版光伏组件可靠性计分卡报告中，图下方的表格中还额外列出了在 2014 年和 2016 年报告中也获得提名的那些制造商。这证明了这些制造商的组件产品在剧烈变化的几年中保持了一贯的高品质，并有持续改进。

表 5-1 光伏组件可靠性计分卡测试结果概要

可靠性试验	报告期	最好结果	最差结果	中等结果
热循环	600 次循环	无可测性能衰减	完全失效	-1.9
湿热	2,000 小时	无可测性能衰减	-5.5	-0.9
湿冷冻	30 次循环	-0.21	-7.6	-2.3
动态机械载荷	1,000 次循环 + TC50 + HF10	无可测性能衰减	-11	-1.2
PID	96-100 小时	无可测性能衰减	-92.2	-0.4

资料来源：DNV GL Laboratory Services Group

表 5-2 制造商工厂所在地（按字母顺序排列）

制造商	工厂所在地
正泰太阳能	中国浙江海宁
比亚迪	中国上海松江
伟创力	Johor, Malaysia
协鑫	Bac Giang Province, Vietnam
韩华 Q CELLS	EumSeong-gun, Chungcheongbuk-do, Korea and Cyberjaya, Selangor, Malaysia
现代	Eumseong Chungcheongbuk-do, Korea
晶科能源	中国江西上饶
京瓷	Tijuana, Mexico
隆基	中国衢州
新日光	台湾新竹湖口
REC	新加坡
S-Energy	Daejeon site, Korea
赛拉弗	中国常州林南
Silfab	Ontario, Canada
Solaria	Fremont, CA USA
SolarWorld	Hillsboro, OR, USA
SunPower	Milpitas, CA USA
SunSpark	Riverside, CA, USA
Talesun	中国江苏常熟和 Pluakaeng, Rayong, Thailand
天合光能	中国常州
Vikram	Kolkata, West Bengal, India
英利	中国保定和衡水

资料来源：DNV GL Laboratory Services Group

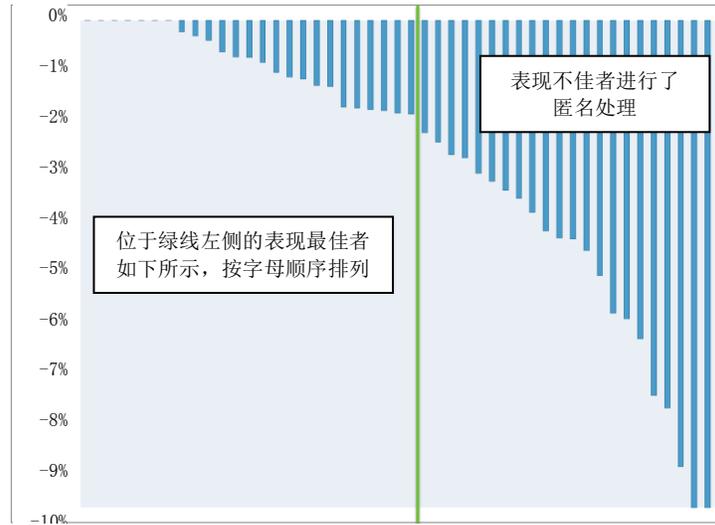
5.2 热循环

光伏组件由若干种材料构成，每种材料具有不同的热膨胀系数 (CTE)。当环境温度和辐照度发生波动时，材料发生膨胀或收缩。当相邻材料 CTE 不匹配时（例如硅太阳能电池和金属母线色带），接口处会受到压力，从而导致焊接疲劳等老化。

在制备和表征之后，组件从 -40°C 至 85°C 进行热循环处理。DNV GL 在实验腔内遵守 IEC 61215 电流注入推荐标准。如果焊点退化，这种向组件注入额外功率的做法会导致局部加热。IEC 61215 仅要求进行 200 次循环，取决于环境，这可能代表了在现场暴露约五年的时间。光伏组件 PQP 将此试验扩展为至少 600 次循环。应注意，试验程序没有组合加入组件在极恶劣环境中可能遭遇的所有条件。例如，干旱荒漠环境存在高强度和/或高光子能量的光暴露，并可能导致组件发生其他失效模式，如密封剂褐化。虽然当前 PQP 范围要求采用 TC800，但 2017 年光伏组件可靠性计分卡中呈现的是 TC600 的结果。

5.2.1 热循环测试结果

图 5-1 显示了热循环测试的结果；采用 49 种不同 BOM 的 40 个组件型号参与了热循环测试，获得的性能衰减速率从无可测性能衰减至完全失效各有不同。



2017 年表现最佳者名称, 按字母顺序排列	型号名称	2016 年报告表现最佳者	2014 年报告表现最佳者
正泰太阳能	CHSM6612M/HV-xxx		是
正泰太阳能	CHSM6612P/HV-xxx		是
比亚迪	BYD P6C-36		
晶科能源	JKMxxxP/PP		是
京瓷	KUxxx-6XPA	是	是
隆基	LR6-72-xxxM		
隆基	LR6-72PE-xxxM		
新日光	D6MxxxB4A		
新日光	D6MxxxB3A		
SolarWorld	SW xxx Mono Black		
SolarWorld	SW xxx Mono		
SunPower	SPR-P17-xxx-COM		
Talesun	TP672M-xxx		
Talesun	TP660P-xxx		
天合光能	DD14A(II)	是	是
天合光能	TSM-xxxPD05.18	是	是
天合光能	TSM-xxxPD14.18	是	是

资料来源: DNV GL Laboratory Services Group

图 5-1 热循环 (TC600) 后观察到的 P_{max} 差异 [%]

5.3 动态机械载荷

动态机械载荷 (DML) 试验能确定光伏组件耐受在风中或雪中时常引起的循环压力载荷的能力。显著或重复的压力会导致玻璃发生偏斜，并可能导致电池断裂或焊点性能衰减。

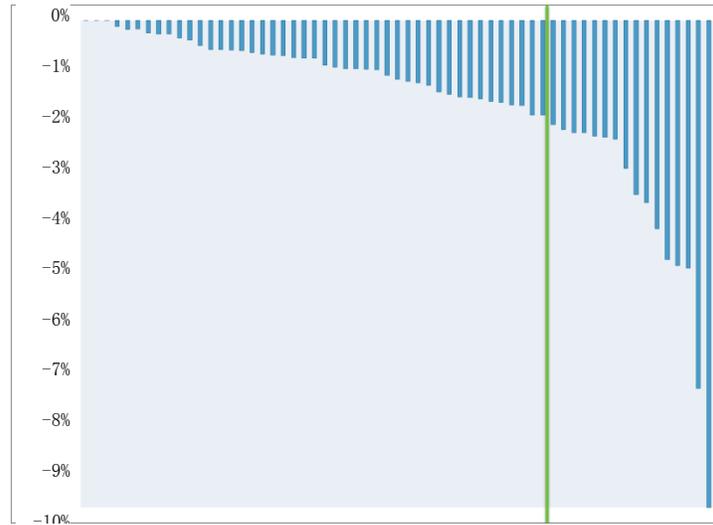
加工过程的各个环节，例如电池焊接和电池侵蚀、以及玻璃、EVA 密封剂和背板材料的选择，都会影响组件受到机械载荷物理损坏的敏感度。还应注意，在现实情况中，较大的压力载荷可能伴随有其他环境条件，如冷湿环境。

光伏组件 PQP 在热压力（50 次热循环）之后使用了一套机械压力测试，以引发电池裂缝（在 $\pm 1,000$ Pa 下进行 1,000 次循环）；在冻结水分压力（10 次湿冷冻循环）之后也使用了一套机械压力测试，以使裂纹扩展，从而导致电池裂缝并影响功率输出。因此，此测试序列还能探测组件在因粗暴运输或安装等原因引发裂缝或微裂纹的情况下依然保持高性能的能力。

为了测试实际的性能表现，被测试的组件根据制造商的规范要求进行了装配。

5.3.1 动态机械载荷测试结果

图 5-2 显示了 DML 试验的结果：采用 61 种不同 BOM 的 49 个组件型号参与了 DML 试验，得到的性能衰减速率从无可测性能衰减至性能衰减到 -11% 各有不同。



2017 年表现最佳者: 名称, 按字母顺序排列	型号名称	2016 年报告表现 最佳者	2014 年报告表现 最佳者
正泰太阳能	CHSM6612M/HV-xxx		是
正泰太阳能	CHSM6612P/HV-xxx		是
比亚迪	BYD P6C-36		
协鑫	GCL P6/72xxx		
韩华 Q CELLS*	Q.PLUS BFR G4.1	是	
晶科能源	JKMxxxP/PP		
京瓷	KUxxx-6XPA	是	是
隆基	LR6-72-xxxM		
隆基	LR6-72PE-xxxM		
新日光	D6MxxxB3A		
新日光	D6MxxxB4A		
REC	RECxxxTP BLK		
S-Energy	SNxxxP-15		
赛拉弗	SRP-xxx-6PA		
赛拉弗	SRP-xxx-6PB		
SolarWorld	SW xxx Mono Black		
SolarWorld	SW xxx Mono		
SunPower	SPR-P17-xxx-COM		
SunSpark	SMX-xxxP		
Talesun	TP672M-xxx		
Talesun	TP660P-xxx		
Solaria	PowerXT-xxxU		
天合光能	DD14A(II)	是	
天合光能	TSM-xxxPD14.18	是	
天合光能	TSM-xxxPD05.18	是	
Vikram	VSP.72.aaa.03		
Vikram	VSP.60.aaa.03		
英利	YLxxxD-36b	是	是

资料来源: DNV GL Laboratory Services Group

*以往表现参考为“Q CELLS”或“韩华 SolarOne”（两者现已合并）。

图 5-2 机械载荷试验序列 (DML + TC50 + HF10) 后观察到的 P_{\max} 差异 [%]

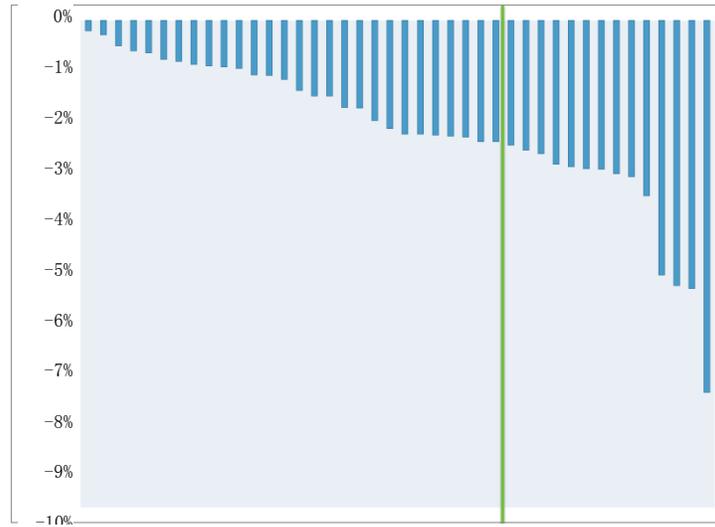
5.4 湿冷冻

光伏组件中使用的多种材料，如接线盒和框架胶粘剂、背板和密封剂，可能会吸收水分。在北美、欧洲和亚洲的北部地区，温度常常会降到冻结条件以下，这些水分可能会在组件内发生冻结。冻结过程中水分会发生膨胀，这对组件的整体性非常不利。冰晶会导致粘接接口失效，从而导致分层或其他机械失效。这种环境试验还可能导致电池金属发生腐蚀。湿冷冻试验模拟了环境湿度和冻结温度共存的环境条件。

在标准 IEC 61215 试验中，组件被暴露在温度 85°C 、相对湿度 85% 的环境中至少 20 小时。这个步骤确保了组件达到水饱和状态。然后温度快速下降至 -40°C 并保持至少 30 分钟（最长 4 小时），组件内的所有水分都会发生冻结。在 IEC 标准试验程序中这个循环总计要完成 10 次。光伏组件 PQP 将此试验扩展至 30 次循环。

5.4.1 湿冷冻测试结果

图 5-3 显示了湿冷冻试验的结果；采用 45 种不同 BOM 的 33 个组件型号参与了湿冷冻试验，得出的性能衰减速率从 -0.2% 至 -7.6% 各有不同。



2017 年表现最佳者 名称, 按字母顺序排列	型号名称	2016 年报告表现 最佳者	2014 年报告表现 最佳者
比亚迪	BYD P6C-36		
韩华 Q CELLS*	Q.PRO BFR-G4	是	
晶科能源	JKMxxxP/PP	是	是
京瓷	KUxxx-6XPA	是	是
隆基	LR6-72-xxxM		
隆基	LR6-72PE-xxxM		
新日光	D6MxxxB4A		
REC	RECxxxTP BLK		
SolarWorld	SW xxx Mono Black		
SolarWorld	SW xxx Mono		
SunPower	SPR-P17-xxx-COM		
Talesun	TP672M-xxx		
Talesun	TP660P-xxx		
天合光能	DD14A(II)		是
天合光能	TSM-xxxPD14.18		是
天合光能	TSM-xxxPD05.18		是
Vikram	VSP.72.aaa.03		
Vikram	VSP.60.aaa.03		

资料来源: DNV GL Laboratory Services Group

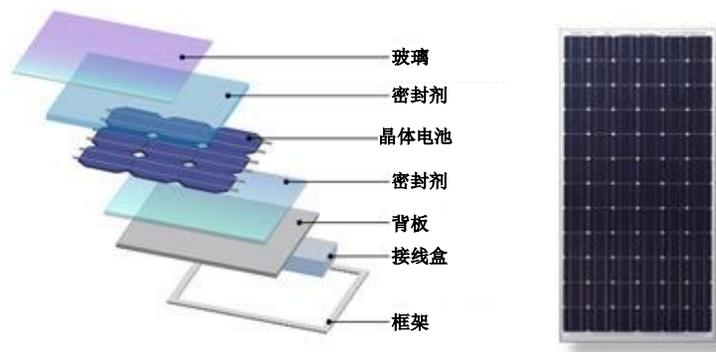
*以往表现参考为“Q CELLS”或“韩华 SolarOne”（两者现已合并）。

图 5-3 湿冷冻 (HF30) 后观察到的 P_{max} 差异 [%]

5.5 湿热

高环境温度和湿度，例如美国南部部分地区（如佛罗里达州）、欧洲和亚洲部分地区（如土耳其、罗马尼亚、印度和泰国）以及中美和南美洲的一些亚热带地区（如巴拿马、巴西），会产生本试验中模拟的、可能导致老化的条件。

在 IEC 61215 试验程序中，组件被保持在恒温 85° C 和相对湿度 85% 条件下 1,000 小时（约 42 天）。这个步骤使组件变得完全水饱和，给粘接接口造成压力。如文献中所述，如果试验再延长几百个小时，某些通过此认证的组件就可能会失效。如今，光伏组件 PQP 将此试验程序延长至了 2,000 小时。图 5-4 显示了典型的晶体硅光伏组件中的各层结构。所有这些层在现场都需要保持牢固粘合长达数十年。



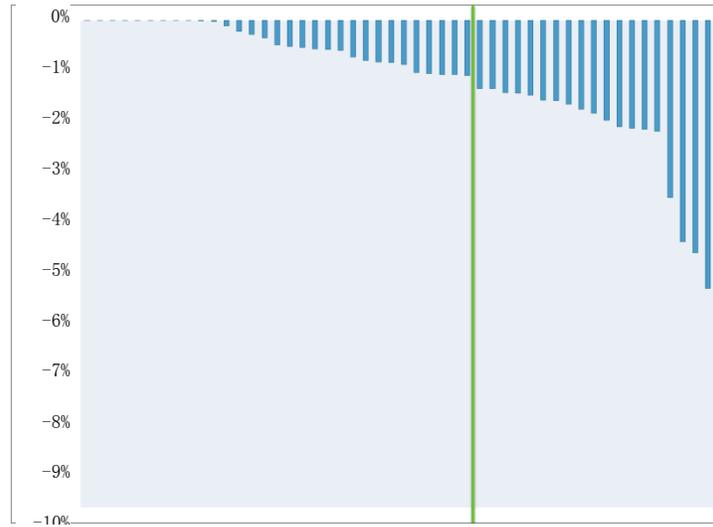
资料来源:

Dow Corning: <http://www.dowcorning.com/content/solar/solarworld/solar101.aspx>

图 5-4 光伏组件各层

5.5.1 湿热测试结果

图 5-5 显示了湿热试验的结果；采用 50 种不同 BOM 的 42 个组件型号参与了该湿热试验，获得的性能衰减速率从无可测性能衰减至 -5.5% 各有不同。



2017 年表现最佳者: 名称, 按字母顺序排列	型号名称	2016 年报告表现 最佳者	2014 年报告表现 最佳者
比亚迪	BYD P6C-36		
韩华 Q CELLS*	Q.PRO L-G2		
韩华 Q CELLS*	Q.PRO BFR-G4		
现代	HiS-SxxxRG		
晶科能源	JKMxxxP/PP	是	是
京瓷	KUxxx-6XPA	是	是
隆基	LR6-72-xxxM		
隆基	LR6-72PE-xxxM		
新日光	D6MxxxB3A		
新日光	D6MxxxB4A		
REC	RECxxxTP BLK	是	
Silfab	SLGxxxM		
SolarWorld	SW xxx Mono Black		
SolarWorld	SW xxx Mono		
SunPower	SPR-P17-xxx-COM		
SunSpark	SMX-xxxP		
Talesun	TP660P-xxx		
Talesun	TP672M-xxx		
天合光能	DD14A(II)	是	是
天合光能	TSM-xxxPD05.18	是	是
天合光能	TSM-xxxPD14.18	是	是
Vikram	VSP.60.aaa.03		
英利	YLxxxD-36b		

资料来源: DNV GL Laboratory Services Group

*以往表现参考为“Q CELLS”或“韩华 SolarOne”(两者现已合并)。

图 5-5 湿热试验 (DH2000) 后观察到的 P_{max} 差异 [%]

5.6 PID 测试

在运行期间，由于各组件串联且所有框架都相连，组件的内部电路经受着相对于组件框架的静态电压偏置。多个系统设计决策影响着内部电路和框架之间的电压，如系统接地配置（负极接地、两极接地、浮点接地）和最大串联电压（600V、1 kV、1.5 kV）。太阳能电池与组件框架之间的静电电场导致玻璃中包含的钠离子朝向电池或框架扩散（即，远离电池），具体方向取决于压降的极性。这种效应会损害电池特性并可能导致功率输出大大降低。这种效应通常被称为电势诱导性能衰减或 PID。

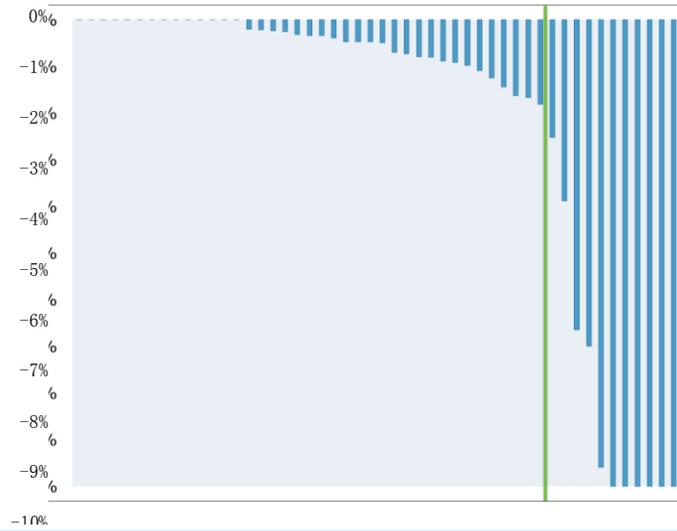
值得注意的是，PID 机制有可逆的和不可逆之分。电化学腐蚀和一些钠离子造成的 PN 结损伤被广泛认为是不可逆的，而由于静电荷在电池表面发生积累产生的 PID，亦称为极化，可在夜间使用逆向电压对这些电荷进行均衡。不可逆机制和可逆机制均可通过此实验室测试获得。

5.6.1 PID 测试程序

在该测试中，在湿热测试条件（ $T=85^{\circ}\text{C}$ ， $\text{RH}=85\%$ ）下施加了相当于组件系统额定电压的电压偏置（-1 kV 或 -1.5 kV），持续时间在 96 到 100 小时之间。这提供了刺激泄漏电流增加所必需的温度和水分条件。

5.6.2 PID 测试结果

图 5-6 显示了 PID 测试的结果；采用 50 种不同 BOM 的 47 个组件型号参与了该 PID 测试，而获得的性能衰减速率从无可测性能衰减到性能衰减 -92.2% 各有不同。必须注意的是，并非所有组件都声称能在 PID 压力测试中保持稳定。



2017 年表现最佳者: 名称, 按字母顺序排列	型号名称	2016 年报告表现 最佳者	2014 年报告表现 最佳者
正泰太阳能	CHSM6612M/HV-xxx		是
正泰太阳能	CHSM6612P/HV-xxx		是
比亚迪	BYD P6C-36		
伟创力	FXS-XXXBC-SAD1W		
协鑫	GCL P6/72xxx		
韩华 Q CELLS*	Q.PLUS L-G4.2	是	
韩华 Q CELLS*	Q.PLUS BFR G4.1	是	
现代	HiS-SxxxRG		
现代	HiS-MxxxTI		
晶科能源	JKMxxxP/PP	是	
京瓷	KUxxx-6XPA	是	是
隆基	LR6-72-xxxM		
隆基	LR6-72PE-xxxM		
新日光	D6MxxxB4A		
REC	RECxxxTP BLK	是	
S-Energy	SNxxxP-15		
Silfab	SLGxxxM		
SolarWorld	SW xxx Mono Black		
SolarWorld	SW xxx Mono		
SunPower	SPR-P17-xxx-COM		
SunSpark	SMX-xxxP		
Talesun	TP672M-xxx		
Talesun	TP660P-xxx		
Solaria	PowerXT-xxxU		
天合光能	DD14A(II)		是
天合光能	TSM-xxxPD05.18		是
天合光能	TSM-xxxPD14.18		是
英利	YLxxxD-36b		
英利	YLxxxP-35b		是

资料来源: DNV GL Laboratory Services Group

*以往表现参考为“Q CELLS”或“韩华 SolarOne”(两者现已合并)。

图 5-6PID 试验 (96-100h) 后观察到的 P_{max} 差异 [%]

6 结果解释

6.1 实验室数据的使用

实际应用是组件可靠性最真实的测试。光伏电厂的现实条件各式各样，加速试验无法完美再现。组件在现场不同程度地同时经受着所有压力作用。实验室测试则受到了很好的控制，而且在某个时刻通常只限于于单一一种压力。实验室观察结果用于准确评估特定的一套老化机制在试验期间内如何影响组件功率输出。利用实验室数据设定性能衰减阈值（如 5%、或 PQP 参与者最高的 40%），可有效管理合格供应商/产品清单。

其次，加速试验可用于筛查大宗采购中的光伏组件缺陷。以下示意图显示了光伏电厂如何使用实验室测试数据尽量降低技术风险的建议流程。首次评估某个产品是否能进入组件买家的合格供应商名单时，即出现了资质认证情景（PQP 范围）。实际组件生产完成并运送至项目现场时，即出现了统计批量测试或系列缺陷筛查（通常采用 IEC 的范围）情景。红色旗帜表示流程中组件买家可对采购的组件质量进行检查的环节，前提是采购协议中有合理的规定。

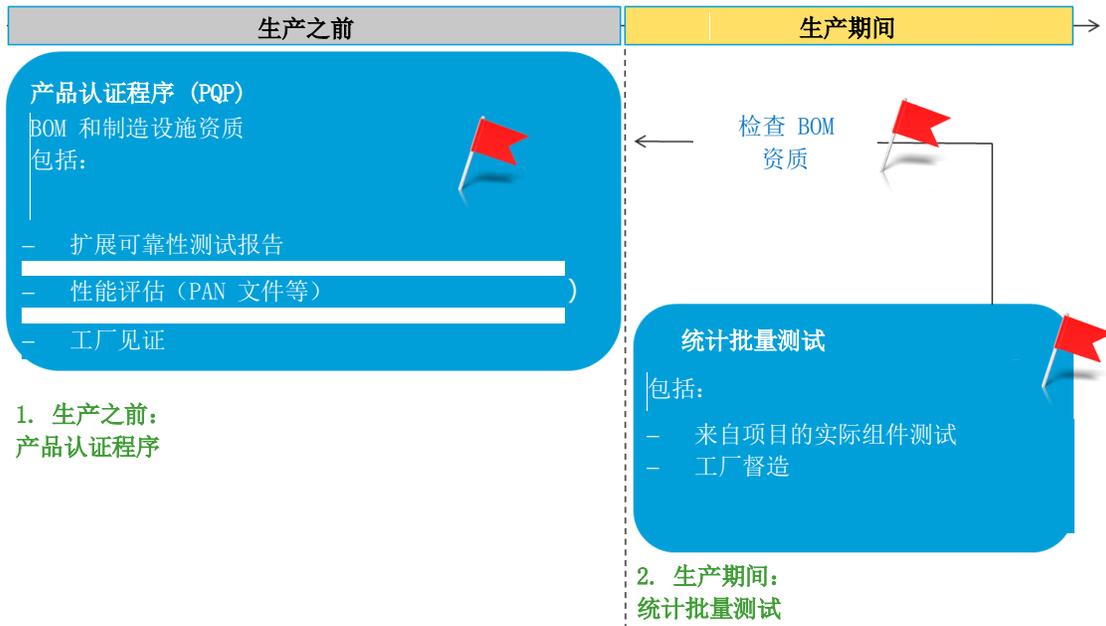


图 6-1 推荐的采购质量计划

光伏组件 PQP 得出的性能衰减水平不得直接用于预测现场组件的年度性能衰减速率。它只能用作评估光伏组件和相关 BOM 及工厂所在地的一个机制，并作为对组件预期可靠性和长期性能进行定性比较的一个工具。

这些试验提供了各供应商、组件、BOM 和工厂在一套模拟现场可能遭受的假设失效机制的受控环境条件下相互比较得出的信息。

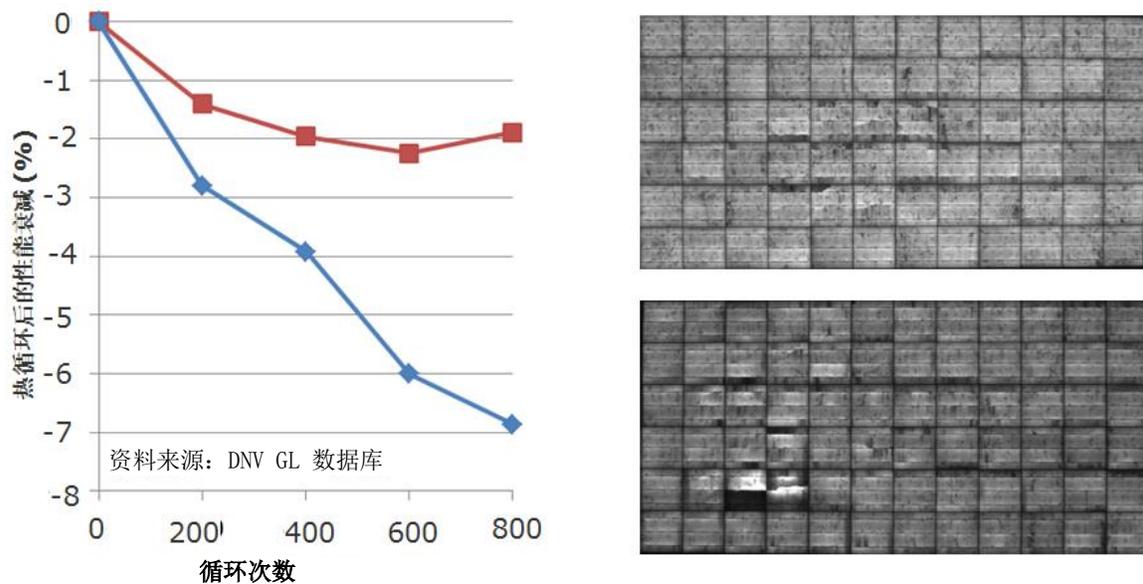
选择性能衰减水平较低的供应商有助于提高项目获得技术成功和财务成功的可能性。

6.2 收获

DNV GL 从 2017 年计分卡结果中取得了几项关键的收获。

6.2.1 物料清单非常重要

如今市场中大多数组件型号都使用若干种（或许多种）不同的物料清单。即使一种组件使用了在不同国家生产的不同材料和电池，它的背面也可能印上相同的标签。市场上相同的组件类别可能采用不同的连接方案（如，常规母线对多母线）和不同的电池类型（如，铝背场和 PERC）。作为示例，图 6-2 显示了铭牌标签相同但 BOM 差异巨大的两个组件，它们在进行加速试验时表现出的性能也非常悬殊。



相同的组件类型 – 相同的背板标签 – 不同的 BOM

图 6-2 标签相同但 BOM 不同、在加速试验中可能表现悬殊的两个组件

DNV GL 建议获取 BOM 相关的信息，并了解发运至现场的产品所采用的具体 BOM 的相应加速测试结果。进行测试的组件应随机挑选，记录它们的 BOM，并严格控制它们在到达实验室之前的出处。如有要求，DNV GL 可将给定的 BOM 与具体 BOM 相关的 PQP 试验报告清单进行匹配。

6.2.2 生产厂非常重要

与关于 BOM 的观察结果相类似，DNV GL 的数据集显示，在不同工厂制造的、采用相同 BOM 的相同模型类别在经历各种 PQP 试验时的表现可能也各有不同。

测试结果中各个不同制造地点的分布如表 6-1 所示。没有哪个地区在“表现最佳者”中占据优势。然而，与世界其他地方相比，中国在 2017 年计分卡最佳表现者中明显占有较多席位。

表 6-1 测试结果中制造地点分布

	热循环		湿热		湿冷冻		动态机械载荷		PID	
	表现最佳者组	全部								
中国	54%	37%	38%	43%	45%	36%	51%	44%	34%	32%
亚洲其他国家/地区	27%	41%	38%	41%	32%	43%	33%	37%	39%	45%
北美	19%	22%	25%	16%	23%	20%	16%	19%	26%	23%

为了进一步说明测试结果的区域性分布，图 5-1 所示的热循环测试结果采用了颜色编码，突出了每个被测组件的生产地点，如下图 6-3 所示。虽然也有些来自其他区域的组件表现不错，但中国（以红色表示）在表现最佳部分中明显占有较高比例。

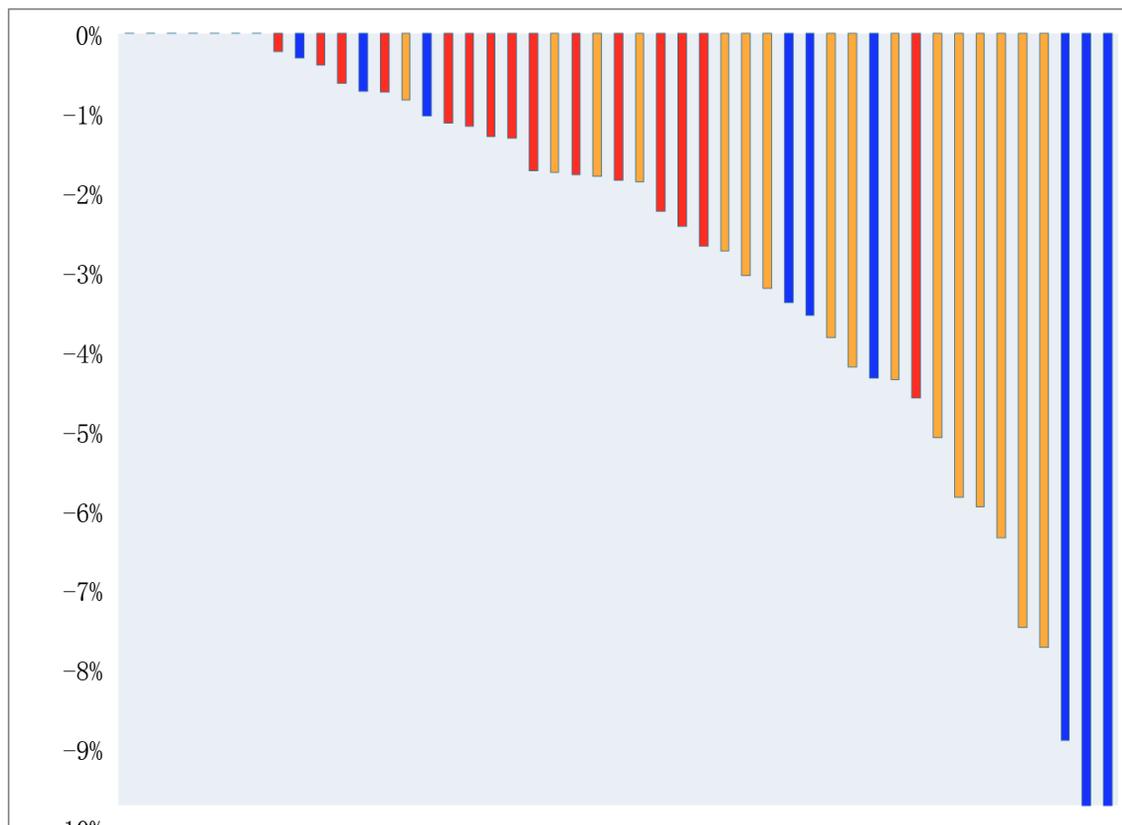


图 6-3 TC600 后观察到的 P_{max} 差异 (%) - 颜色编码显示工厂所在地（红色 = 中国；黄色 = 亚洲其他国家/地区；蓝色 = 世界其他地区）

如上文所述，美国和欧洲的进口关税和最低价格政策迫使许多制造商将制造进行外包，或在马来西亚、越南、泰国、印度等免关税国家新建工厂。

DNV GL 建议在项目施工期间获取生产工厂的具体信息（地点、车间等），并在组件批次生产期间进行工厂监督。在监督期间，可以如第 6.1 节所述随机挑选和测试样品进行系列缺陷筛查。

DNV GL PQP 包括工厂见证报告，其中包含了与生产工厂相关的有用信息。除了其他报告（可靠性和性能测试数据）以外，DNV GL 下游合作伙伴还可以要求获取该见证报告，以便了解 BOM 和生产工厂。

6.2.3 制造商重视质量十分重要

DNV GL 的经验显示，不同制造商对产品质量的重视程度各有不同，而对质量的重视非常关键。制造商越重视改进和证明产品的质量，在加速试验中获得的结果越好。

举例说明，图 6-4 复制了图 5-1 的热循环测试结果，但加上了颜色编码，以显示 DNV GL PQP 中制造商的相对参与度。最关注生产和证明高质量产品的制造商生产出的组件在可靠性试验中获得了更好的结果。

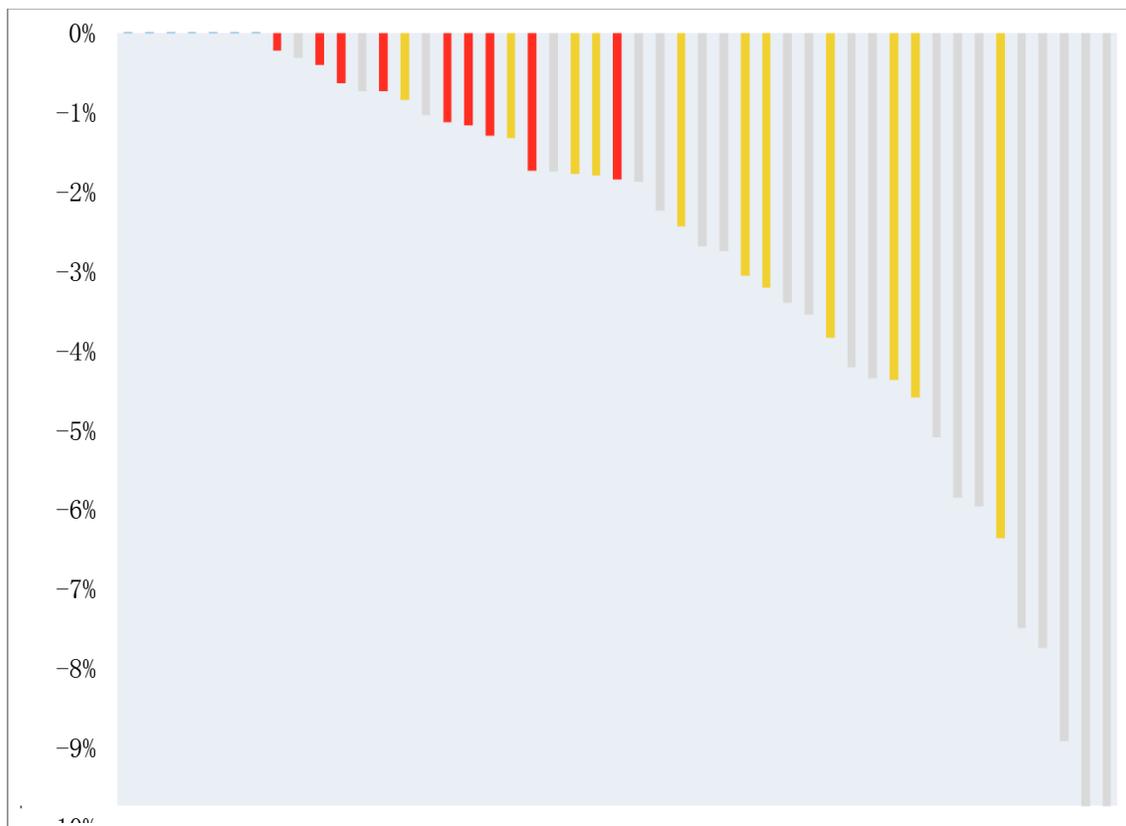


图 6-4 TC600 后观察到的 P_{max} 差异 (%) - 颜色编码表示在 DNV GL PQP 中的相对参与度（红色 = 高参与度的 PQP 参与者 [每年都有若干项 PQP，并要求所有美国 BOM 进行系统性测试]；黄色 = 中等参与度的 PQP 参与者 [每年都有若干项 PQP，且大多数美国 BOM 都进行测试]）

DNV GL 认为，参与 DNV GL PQP 并在本报告中列明的制造商是行业内所有制造商中最重视质量、且可能因此已经脱颖而出的制造商。

DNV GL 建议选择接受过严格测试的组件。

6.2.4 公司规模大小不一定代表质量好坏

多年来，已有 40 多家制造商（规模有大有小）向 DNV GL PQP 提交过组件样品。回顾 DNV GL 数据库，我们并未发现制造商的规模与加速试验的性能之间存在任何直接关联。举例说明，对来自于图 5-1 的热循环测试数据加上颜色编码，作为制造商在 2016 年发货量（见图 6-3）的一个函数，红条对应于全球发货量最大的十家制造商。有些小型制造商取得了很好的结果，同时也有些大型制造商生产的组件的测试结果属于后 50%。

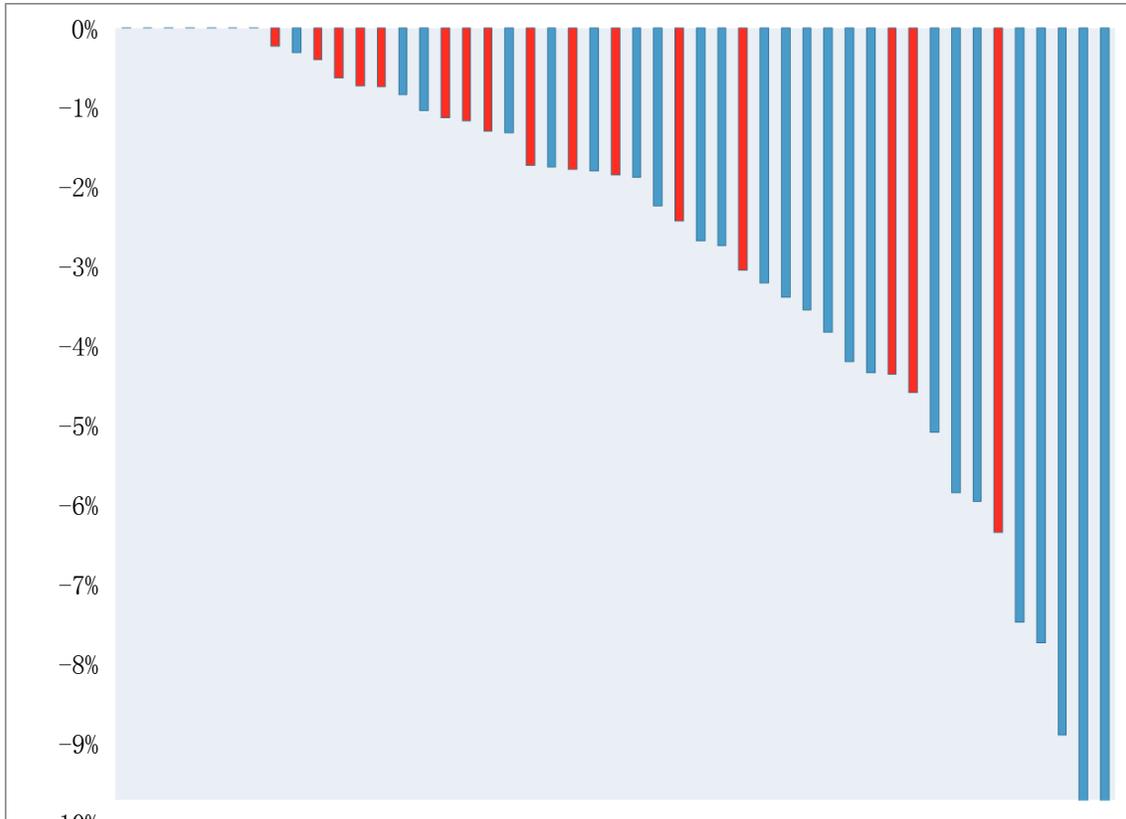


图 6-5 TC600 后观察到的 P_{max} 差异 (%) - 颜色编码表示 2016 年的发货量（红色 = 发货量最大的前十家制造商）

DNV GL 建议获取具体 BOM 的加速测试结果，以免评估光伏产品时单纯依赖于发货量或供应商的声誉。

7 结论

2017 年光伏组件可靠性计分卡报告是 DNV GL 光伏组件可靠性计分卡报告的第三版。本文件中呈现的所有结果都基于以相同方式挑选和测试参与 DNV GL 产品认证程序的组件，由 DNV GL 生成。制造商参与 DNV GL PQP 表明他们重视产品的可靠性。因此，本文件中展示的各种组件可能是具有自我选择性的群组，这更突出了最佳表现者的难能可贵。

总而言之，我们发现提交给 DNV GL PQP 的大多数组件在 PQP 的各个不同试验中都表现不错，只有少数几个出现了显著的性能衰减，可能导致使用这些组件的太阳能项目在财务上遭遇风险。我们发现有几项因素对可靠性测试结果有比较大的影响，包括物料清单、生产工厂、以及制造商对质量和可靠性的重视程度。我们不建议在做出采购决策时仅仅依赖于制造商的发货量或声誉。

DNV GL 下游合作伙伴有权免费获取其他详细资料和内容。如果您想成为下游合作伙伴，请联系 DNV GL。

重要通知和免责声明

本文件（“本报告”）由 DNV GL PVEL LLC（“DNV GL”）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 DNV GL 还是其任何关联公司（“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。本报告可能包含有详细的、预期仅供在相关主题领域拥有必要的专门知识的人员使用的技术数据。本报告中没有任何内容会向集团以外任何实体授予任何利益，且使用本文件相关的风险应由用户独自承担。DNV GL 商标由 DNV GL AS 所有。本文件受版权保护。

关于 DNV GL

DNV GL 秉承保护生命、财产和环境的宗旨，致力于帮助组织提高业务的安全性和可持续性。我们为海事、石油、天然气及能源行业提供软件、咨询服务、评级和技术保证服务。我们还为各行业的客户提供认证服务。凭借领先的技术和业务专业知识、风险方法以及对行业的深入了解，我们让客户在充分信任的基础上，自信地制定决策并落实行动。我们不断投资于研究和协同创新，为客户和社会提供业务和技术展望。我们的业务遍及全球 100 多个国家和地区，我们的专业人员致力于帮助客户，让世界变得更加安全、智能和环保。