

任务13：光伏系统可靠性与性能

S  
P  
V  
P

## 第二生命光伏组件的性能与 可靠性方面

2026



## IEA PVPS TCP 是什么？

国际能源署 (IEA) 成立于1974年，是经济合作与发展组织 (OECD) 框架下的一个自主机构。技术创新合作计划 (TCP) 的设立源于对能源安全和可持续性未来起始于全球合作的信念。该计划由来自政府、学术界和行业的6000名专家组成，致力于推进共同研究和特定能源技术的应用。

国际能源署光伏电力系统项目 (IEA PVPS) 是IEA内的一个技术合作计划 (TCP)，成立于1993年。该项目的使命是“加强国际合作，促进光伏太阳能作为可持续能源系统转型基石的作用。”为了实现这一目标，项目参与者开展了多种光伏电力系统应用的联合研究项目。整个项目由一个执行委员会领导，委员会由每个国家或组织成员的代表团组成，并指定了不同的“任务”，这些任务可能是研究项目或活动领域。

参与国际能源署太阳能光伏合作伙伴计划的28个国家包括：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、中国、丹麦、芬兰、法国、德国、印度、以色列、意大利、日本、韩国、立陶宛、马来西亚、摩洛哥、荷兰、挪威、葡萄牙、南非、西班牙、瑞典、瑞士、泰国、土耳其、英国和美国。欧洲委员会、欧洲太阳能电力和新加坡太阳能研究所也是其成员。

访问我们：[www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)

## 什么是IEA PVPS任务13？

在IEA PVPS框架内，任务13的目的是为努力提高光伏组件和系统运行、可靠性和质量的市场参与者提供支持。项目内部整理的不同气候区域的光伏系统运行数据将有助于为光伏可靠性和性能的当前状况估计提供基础。

任务13的一般设置提供了一个共同的平台，以总结和报告影响光伏系统在各种环境和应用中的质量、性能、可靠性和寿命的技术方面。通过跨越国家界限的合作，我们都可以利用每个成员国的研究和经验，并将这些知识结合和整合成最佳实践和方法的宝贵总结，以确保光伏系统以最佳状态运行并继续提供具有竞争力的投资回报。

任务13至今已成功构建了计算各种参数的正确框架，这些参数可以指示光伏组件和系统的质量。该框架现已存在，可供表示对高质量报告中包含的结果表示赞赏的行业使用。

参与第13项任务的IEA PVPS国家包括澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、智利、中国、丹麦、芬兰、法国、德国、以色列、意大利、日本、荷兰、挪威、西班牙、瑞典、瑞士、泰国和美国，以及太阳能研究机构。

### 免责声明

IEA PVPS TCP是在国际能源署 (IEA) 的赞助下组织的，但在职能和法律上是独立的。IEA PVPS TCP的观点、发现和出版物并不一定代表IEA秘书处或其个别成员国的主张或政策。

### 版权声明

此内容可自由使用、复制和重新分发，前提是必须给予适当的信用 (请参阅“建议引用”)。例外情况是，某些受许可的图片可能不能复制，具体请参考单个图片标题中的说明。

### 建议引用

性能与可靠性方面的第二人生光伏组件 Oreski, G., Tsanakas, I. (2026). Oreski, G., Tsanakas, I., Bruckman, L., Jahn, U. (Eds.), (报告编号：T13-37：2026)。 <https://iea-pvps.org/key-topics/t13-performance-2nd-life-modules-2026/> DOI：10.69766/JGYV3909

### 封面图片

顶部：瓦尔斯兰示范建筑屋顶安装的第二生活光伏系统；底部：修复后的背板光伏系统



国际能源署光伏电力系统计划

## 性能与可靠性方面的第二人生光伏组件

国际能源署光伏发电计划

任务13

光伏系统的可靠性和性能

报告IEA-PVPS T13-37:2026 202  
6年2月

ISBN: 978-1-7642902-8-9 D  
OI: 10.69766/JGYV3909



## 作者

---

### 主要作者

Gernot Oreski, 奥地利莱奥本聚合物能力中心  
Ioannis Tsanakas, 法国CEA  
Gabriele C. Eder, 奥地利化学与工艺研究学院OFI, 维也纳, 奥地利  
Arvid van der Heide, 比利时imec/哈塞尔特大学/imo-imomec/EnergyVille  
Rich Stromberg, 美国阿拉斯加大学费尔班克斯分校

### 贡献作者

Anika Gassner, 奥地利维也纳, OFI  
丹妮拉·阿里奥利, 意大利米兰, BayWa r.e. 运营服务S.r.l.  
Guillermo Oviedo Hernandez, BayWa r.e.运营服务S.r.l., 意大利米兰

### 编辑们

Gernot Oreski, 奥地利莱奥本聚合物能力中心  
约安尼斯·萨纳卡斯, CEA, 法国  
劳拉·布鲁克曼, 凯斯西储大学, 美国  
Ulrike Jahn, 弗劳恩霍夫CSP, 德国



## 目录

致谢 .....	6
缩略语列表 .....	7
图目录.....	9
执行摘要.....	10
<b>1 介绍.....</b>	<b>12</b>
<b>2 模块修复策略综述.....</b>	<b>14</b>
2.1 生产后光伏组件的维修.....	16
2.2 现场光伏组件维修.....	18
2.3 光伏组件的翻新，2 <sup>nd</sup> 生活.....	25
2.4 方法评估维修措施/安全方面.....	25
2.5 措施提高光伏组件的可维修性 .....	26
2.6 维修的经济考量.....	28
<b>3 重新资格认定、标准化、可银行性和现场经验2 <sup>nd</sup> 生活光伏</b>	<b>30</b>
3.1 第2次重新资格认证 <sup>nd</sup> -> <sup>nd</sup> 生活PV.....	30
<b>4 主要结论.....</b>	<b>50</b>
参考文献.....	52



## 致谢

---

本文得到了几位IEA-PVPS任务13小组成员和其他国际专家的宝贵贡献。谨致谢意：

本报告得到德国联邦经济事务和气候行动部（BMWK）的支持。根据合同编号03EE1120B以及 **奥地利研究机构（FFG）** 根据合同编号FO999908094。

对于CEA来说，本报告的部分工作得到法国国家项目“未来投资计划 - INES.2S”的支持，该项目根据研究协议ANR-10-IEED-0014 0014-01资助。

这项为CEA完成的工作也得到了欧盟“地平线欧洲”SUPER-NOVA和CACTUS项目的框架支持。SUPER NOVA已从欧洲联盟“地平线欧洲”研究和创新计划获得资金，资助协议编号为101146883。CACTUS已从欧洲联盟“地平线欧洲”研究和创新计划获得资金，资助协议编号为101132182。

对于imec，本报告的部分工作得到了CLOSER项目的资助。CLOSER项目获得了欧洲联盟I3计划的资金支持，协议编号为101161109。作者们对以下人员的宝贵贡献表示诚挚的感谢，并为此表示感谢：先生 ... **帕布洛·迪亚斯** 并且先生 **Todd Phillips** 代表 **太阳能周期（美国）**；the **H2020 CIRCUSOL** 财团，特别是该 **瓦桑德演示** 团队和先生 **克里斯托夫·高克玛** 代表 **富特克（比利时）** 先生； **Luc Federzoni** 代表 **索雷德（法国）**；以及先生 **Simon Prüller** 代表 **第二周期（奥地利）**。



## 缩略语列表

缩写	意义
BS	背衬材料
BOM	物料清单
CEA-INES	原子能和核能委员会 可再生能源 - 国家可再生能源研究所 太阳能
CIGS	铜铟镓硒
CPV	集中式光伏发电
DH	湿润热
DfD.	拆解设计
DfR	设计用于回收
EG	可扩展石墨
EL	电致发光
EOL	生命终结
欧盟光伏展	欧洲光伏太阳能大会 参考
EVA	乙烯-醋酸乙烯酯
IEC.	国际电工委员会
国际能源署	国际能源署
国际能源署光伏发电计划	国际能源署光伏 电力系统项目
IR	红外线
ISO	国际标准化组织 tion
第四 (一至五)	当前电压
LID	光照诱导降解
LIT	锁相热成像
MC	微裂纹
莫	钼
MST	模块安全测试
NIR	近红外
经合组织 (OECD)	经济合作组织 以及发展



PA	聚酰胺
PAS	公开可用规范
PIB - 国内生产总值 ( Gross Domestic Product )	聚异丁烯
进程标识符 ( PID )	潜在诱发性退化
PLR: PLR ( 私人标签商品 )	性能损失率
PMMA聚甲基丙烯酸甲酯 ( Polymethyl methacrylate )	聚甲基丙烯酸甲酯
PSS	产品-服务系统
PV.	光伏
Riso湿	潮湿绝缘电阻
RSB	电阻焊接
SEPA	智能电能联盟
STC	标准测试条件
TCP传输控制协议	技术合作计划
TEM	热膨胀微球
TR	技术报告
TRL	技术成熟度等级
紫外线	紫外线
WEEE ( 废旧电子产品回收指令 , Waste Electrical and Electronic Equipment )	废弃的电器和电子产品



# 图目录

F.  
I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 1:  
一：B 锁相图，如所提出的自动激光基太阳能电池修复系统 [27].....

17 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 2 : M 移动维修车间 ©S 去周期 我 贝里卡 [30]..... 19 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 3 : S Unfortunately, the English text provided "CHEME OF ON" seems incomplete or possibly malformed, making it challenging to translate into meaningful Chinese. If you can provide a full or corrected sentence, I would be more than happy to offer a translation. - 站点互联修复，如所提出的等人；复制（适应的）有许可。C 版权 2022, MDPI.[12].....

20 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 4 : S 化学互联修复方法，如所提出的 (A 适应) 有许可。C 版权 2024年 莱塞尔 [13] .....

21 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 5 : M 微观图像 (MS) 表面深左，纵向裂纹 (LC)；并且是横截面（中间和右侧）样本涂覆 [8]..... 23 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 6:F OTO涂层老化模块带裂纹背板的涂层工艺（左），ON - 场地材料粘附测试（中间的）并且关于测试 - 站点运行正常，已修复 / 涂层 PV. 模块和20%的层已被使用修复涂层, 80%的层和双2% F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 7:R EPAIR情景 2 ND.

生活. PV. 模块背面存在问题，AS IDENTIFIED BY THE NEW  
玩家对战 项目 [34].24 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 8 : S 化学手册：再循环厂的 2 ND.

C YCLE  
( HTTPS:// WWW  
.2 NDCYCLE . AT  
/ It seems there is no English text provided to translate. Please provide the English text you would like to have translated into Chinese. )...  
25 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 9 : A 紧密连接的接线盒 PV. 模块之前（左）并且之后（正确）扩展可膨胀石墨。（参见 [44]）..... 26 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 10 : W 资格和分类框架的工作流程 PV. 再利用，如所介绍和提议的  
TRUST-PV 并且 S OLAR  
POWER  
E. 欧洲 Q 质量 W ORKSTREAM 专家 ©S OLAR  
POWER  
E. 欧洲 [2] ... 31 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 11:11 EFT  
:E 示例：XAMPLE OF EL 第一次的图像表征 - 生活 PV. 模块旁路二极管故障（对应一个开放 - 环形子模块）。I'm sorry, but "IGHT" does not form a recognizable word or phrase in English, and thus cannot be translated into Chinese with any meaning. It seems like it might be an incomplete or incorrectly typed word. Please provide a complete and correct English text for me to translate it for you.....  
33 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 12:O 模块后或修理 and 准备进行再利用 [2]..... 34 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 13: E 示例仪表板输出结果从 ASPIRE A SOFTWARE PROTOTYPE INTRODUCED BY CEA 旨在呈现形象 - 基于检测与分类 PV. 允许选定的失败 PV. 模块化重用 [2,61]. ..... 34 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 14:O 概览 S 奥拉周期 ' S 第二 - 生活 PV. 安装，由退役产品制成 PV. 模块，在评估他们的剩余功率输出之后 ..... 39 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 15: A 另一种观点：SOLARCYCLE S 第二 - 生活 PV. 模块安装在其旁边 PV. 废弃回收设施  
6: P ILOT  
U 自行车骑行 -L INE FROM 2 ND.  
C YCLE IN A MSTETTEN  
一个 乌斯迪亚 ( HTTPS:// WWW  
.2 NDCYCLE . AT  
/ It seems there is no English text provided to translate. Please provide the English text you would like to have translated into Chinese. )...  
42 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 17 : B USINESS APPROACH OF 2 ND.

C YCLE  
43 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 8: E 示例：XAMPLE OF LIT 图像之前（左）并且（After）修复旁路二极管'失败，暗示修复后恢复正常热电性能 PV. 模块  
5 F I'm sorry, but "IGURE" does not seem to be a recognizable word in English. Could you please provide a clearer or correct the term? 1  
) 输出功率和填充因子 ( PPF, POST - 修理 ( 残留  
案例研究模块，表明 T.



## 执行摘要

本报告是在IEA PVPS Task 13框架下准备的，针对二次光伏（PV）模块的性能、可靠性和实际可行性进行研究，特别关注维修、翻新和再利用策略。在全球光伏部署迅速增加的背景下，为了限制未来的废物流和支撑循环经济的目標，延长模块寿命和管理报废流程的可持续方法至关重要。本报告的目标受众广泛，包括政策制定者、光伏系统所有者和运营商、制造商、保险公司、研究人员以及其他具有不同技术水平专业利益相关者。

### 关键洞见

该报告整合了与二次生命周期光伏相关的技术发现、工艺发展和现场经验。提供了光伏模块修复策略的全面审查，涵盖广泛的缺陷类型，如背板开裂、焊料键合和互连故障、接线盒和旁路二极管问题以及局部玻璃损坏。报告讨论的修复方法包括实验室规模的构思、试点实施和多年的现场演示。

一项主要区别在于，将经过长期可靠性测试或长期现场验证的修复技术与主要通过工艺开发或短期修复后性能测量来展示可行性的修复技术区分开来。虽然许多修复技术从技术上来说是可行的，但审查强调了修复仍属劳动密集型且在经济上难以规模化，尤其是当缺陷根源于内在设计或制造缺陷时。

报告强调，鉴于设备无法修复，应基于系统测试、分类和认证退役模块的再利用途径。视觉检查、I-V特性表征、电致发光成像和绝缘电阻测试构成了以再利用为导向的分级框架的技术基础。自动化和半自动化测试解决方案、移动实验室和人工智能辅助诊断被确定为提高产量、一致性和成本效率的关键推动因素，使模块能够可靠地分类为再利用、维修或回收流。

### 经济与政策视角

报告中以定性方式探讨了经济考量。在许多市场环境中，新式光伏板成本的下降限制了劳动密集型维修方法的市场竞争力。尽管如此，在特定情况下，如受物流限制或偏远安装、回购项目、以及支持性政策或金融框架的区域，第二生命周期的光伏产品仍具有可行性。环保贡献机制等政策工具被强调为刺激循环利用市场的有效机制，有助于弥合新旧产品之间的成本差距。

从政策和市场角度看，缺乏统一的重新资格评定标准、标准化的测试协议和清晰的维修指南仍然是广泛采用二次光伏产品的主要障碍。因此，IEC技术委员会内部持续的标准化和光伏质量保证活动对于提高复用光伏模块的透明度、可比性、安全性和可靠性至关重要。

### 田野经验与示范项目

实际现场经验和示范项目在报告中得到证实，第二生命周期的光伏系统可以带来切实的益处，包括稳定的能量产量、降低的运维成本和延长系统的使用寿命。



环境影响，以及对当地能源自主性的贡献。同时，这些案例研究突出了与模块异质性、认证和再认证、保险和银行信用、物流以及法规遵守相关的持续挑战。所报告的经验强调了健全的资格程序和明确的系统集成指南的重要性。

## 范围与局限性

本报告无意全面提供所有修复技术的定量性能或可靠性评估。相反，它提供了一个关于现有实践、新兴解决方案以及在测试、标准化和市场框架中的主要知识差距的结构化概述。通过综合现有经验和明确指出局限性与机遇，本报告旨在为二次使用太阳能电池板（second-life PV）的未来研究、标准化活动和政策制定提供信息。

## 结论与建议

维修、翻新和重复利用光伏组件是延长太阳能资产使用寿命和减少废物的一种技术上可行且环境有益的途径。本报告中的审查表明，通过维修可以解决多种光伏组件缺陷；然而，这些解决方案的成熟度、可扩展性和长期可靠性差异很大。只有少数维修方法得到了多年现场数据或长期可靠性测试的支持，因此应谨慎选择维修，仔细考虑缺陷类型、组件年龄和潜在故障机制。

基于检测和分拣的再利用策略成为第二次生命光伏部署中最稳健和可扩展的选项。标准化检验和资格认证程序——优先考虑安全和可追溯性而不是边际性能提升——对于确保系统业主、保险人和投资者的信心至关重要。缺乏统一的再认证协议和明确的及格/不及格标准仍然是二次生命光伏产品市场采用和银行接受的主要障碍。

经济可行性仍是一个决定性约束。在许多地区，新光伏模块的低成本和持续下降使得更换比劳动密集型的维修更具吸引力。然而，在特定背景下，如翻新项目、偏远或难以到达的安装地点以及政策支持下的再利用方案，再利用和选择性维修在经济上是合理的。本报告包含的案例研究既展示了二手光伏的潜在价值，也展示了在实际应用中遇到的实际挑战，包括技术兼容性、物流、监管不确定性以及市场接受度。

实现二次使用光伏系统的更广泛采用，需要技术在技术、标准化和政策方面的协同进步。提高易于维修的设计、增强物料清单的透明度，以及开发国际统一的测试、重新资格认定和认证标准是关键推动因素。如生态贡献、激励措施和报告要求等政策手段可以在为二次产品创造公平竞争环境中发挥关键作用。

总的来说，二次利用光伏有明确潜力，但并非万能解决方案。其成功部署取决于严格的资格审核程序、可扩展的测试和再利用基础设施以及支持性的监管框架。行业、研究机构和政策制定者之间的持续合作对于将二次利用光伏从孤立的试点项目转变为成熟、可靠和受信任的市场领域至关重要。



# 1 引言

随着全球光伏（PV）系统的部署持续增长，越来越多的关注被投向了光伏模块的维修、翻新和延长使用，以支持循环经济原则并减少环境影响。本报告介绍了旨在审查促进光伏模块实现可持续第二生命的技术和实际方面的合作活动的成果。

此活动的目标有两个：

- |   |
|---|
| 1. 为了对现有的维修策略和途径进行全面回顾<br>提升光伏组件的维修性，在生产后及现场使用后<br>老化                   |
| 2. 为了探索和评估与当前实践、挑战和机遇相关的<br>重新认证、标准化以及二手光伏模块的可靠性，包括在安装方面。<br>真实世界现场经验之见 |

报告分为两个主要部分：

**第一部分：光伏组件修复策略综述：**本节描述并评估了当前光伏组件的修复方法，考虑了其有效性和长期稳定性。它涵盖了生产后立即以及对于现场老化组件的修复场景。详细讨论包括更换损坏的电池片、修复开裂的背板或前玻璃、纠正缺陷的焊接点以及更换外部组件如框架、接线盒和旁路二极管。

此外，这一部分包括了对通过替代模块设计和符合当前及未来生态设计和循环经济设计要求的材料清单来提高维修性的措施进行综述。

**第二部分：第二人生光伏的再认证、标准化、银行性和现场经验：**  
本节重点讨论两个核心方面：

**第二部分第1.1节：重新资格认证和标准化** 它讨论了可靠性测试、选择以及二手光伏组件的质量/安全控制中的最佳实践和技术挑战。它还提出了未来（国际）标准化框架和建议，包括对新IEC技术规范对二手光伏组件的贡献。同时，还解决了设计可维修性与设计可靠性之间有时存在矛盾的关系。

**第二部分第二点二：可融资性及领域经验：**这一部分评估了二手光伏服务成本影响，涵盖从测试和分类到运输和系统集成的整个流程链。它提出了优化二手光伏系统成本性能比的建议，并分享实际数据及从安装和运行的二手光伏设施中获得的经验和教训，重点关注性能、可靠性和维护需求。

通过整合现有知识和实践经验，本报告旨在支持可修复和二手光伏技术的更广泛应用，并为该领域未来的技术和政策发展提供信息。

本报告的部分内容曾在欧洲光伏太阳能大会（EU PVSEC）[1]上展出，并在同行评审的科学期刊[2]上发表。该出版物源于对这份报告的最初规划和收集贡献，作为对所选发现和早期见解的集中总结。因此，报告的一些部分和



数字可能类似于早期出版物中发现的那样。然而，这份报告显著扩展了原始工作的范围。它对该主题进行了更全面的处理，纳入了额外的数据和数据分析，并包括了对截至2025年中期该领域的最新文献和发展情况的综述。



## 2 维修光伏组件策略综述

延长光伏组件的使用寿命是光伏行业面临的最紧迫挑战之一。众多研究表明，将光伏组件的维修视为确保其持续功能性和安全性的有前景的方法，这种做法在保修期到期以及之后都适用[3-6]。

然而，修复损坏或退化的光伏组件仍然是一个相对较新的、未经充分探讨的话题。在2024年10月进行的一项全面的互联网和文献调研只发现：**16项科学贡献** 处理光伏组件维修和少量商业维修服务。本调查结果总结于表1。

本章主要关注光伏组件的维修、翻新和再利用策略。平衡系统（BOS）组件，如逆变器、电缆和储能系统的维修和再利用被视为重要主题，但在此报告中未详细阐述。

虽然维修有可能延长使用寿命，但现场观察表明，大多数光伏组件在具备坚固的物料清单（BOM）和良好的生产工艺的前提下，本身就具有较长的使用寿命[3,4]。相比之下，过早失效的组件往往是因为选择了劣质组件或采用了不标准的制造工艺[3-6]。在这种情况下，维修可能从技术和经济角度来看并不明智，因为根本的质量和可靠性问题已经嵌入到原始制造过程中。

在此背景下，区分由外部因素造成的损害和源于内在设计或材料缺陷的损害至关重要[3]。

- **外部损坏** 例如因运输不当、安装不当或局部冲击引起的裂缝、分层或接线盒脱落 **内在材料或设计缺陷** 例如，劣质选材或组件退化、故障，或因模块尺寸不当或货架设计、安装不当导致的结构失效。

关于因设计不当或制造工艺不达标而导致的内在故障模块的修复，在技术或经济上是否合理，存在争议[7-9]。然而，可能由于某些利益相关者的利益关系，大部分的研究和开发工作都集中在这一特定领域。

总的来说，任何现场维修过程都应该像原始制造过程一样，以同样的严谨性进行开发、管理和验证，包括遵守相关的质量保证协议和安全标准。没有这样的严谨性，维修可能只能掩盖更深层次的缺陷，而不是恢复长期可靠性。在尝试维修之前，评估是否已经发生了细胞级别的损坏也很重要。在某些情况下，恢复外部完整性可能只会掩盖已经受损的产品，导致过早的二次故障和潜在的安全隐患。

迄今为止，大多数关于光伏组件修复的工作集中在损坏/裂缝的后背板的修复上，相关第一项成果于2020年发表[10-12]。已研究了两种不同的方法，即在对现有背板施加额外的涂层或粘合带/箔[13]。2023年的一项工作涉及玻璃缺陷的修复[14]。关于断裂互联修复策略的初步研究自2022年以来已陆续发表[9,15-17]。



一些公司将光伏组件的维修列为一项商业服务[18-21]。其中，以下部件提供维修程序：旁路二极管、接线盒、框架、背板、电缆和连接器。尽管这些公司在网站上列出了维修服务，但其中大多数公司并没有提供其维修方法或程序的详细描述。这可能是由于各种原因，如专有方法、竞争优势或简单地未向潜在客户提供全面信息。然而，缺乏详细信息可能会成为客户考虑使用这些服务的障碍。他们可能会对维修的质量、可靠性和持久性感到不确定。详细描述维修程序可以建立信任，并确保客户了解他们将获得的服务。缺乏透明度也可能表明更广泛的行业问题，即维修标准实践的缺失。nd -> nd 生活光伏尚未得到良好建立或记录。

Nieto-Morone等人[9]调查了从一家西班牙光伏模块维修公司获得的23个部分修复的模块。考虑的可修复缺陷包括损坏的二极管、接线盒更换、轻微的背板损坏以及损坏或烧毁的电池。不幸的是，没有提供关于维修过程的细节，也没有提及进行维修的公司名称。目标是评估通过部分维修恢复的功率容量，为与更换相比模块维修的技术和成本效益提供见解。该研究的重大发现表明，修复的模块符合制造商的保修标准，表明它们具有再利用的潜力。

近年来，光伏组件修理的话题已逐渐从早年科学出版物和专业修理服务的有限范围内受到越来越多的关注。越来越多的项目、工作组以及标准化机构现在正积极处理这个议题，反映了其在可持续性和循环经济原则背景下的日益重要性[22]。在IEA-PVPS第12项任务框架中，该框架专注于光伏系统的可持续性，光伏组件修理已被正式作为子任务1（循环经济）下的新活动引入[23]。这一纳入凸显了修理被视为延长光伏系统使用寿命、减少浪费和提升资源效率的关键要素的认识。PVQAT工作组15（WG15）也专注于与修理紧密相关的课题，特别是光伏组件的修理、再利用、再认证和回收。该小组旨在建立质量保证指南和最佳实践，以确保修理和再利用的模块在其延长服务寿命期内满足可靠的性能和安全标准[24]。此外，在国际电工委员会技术委员会82（IEC-TC82）内，一个专注于与循环经济战略相结合的光伏组件再利用的专业工作组正在处理相关议题[25]。他们的工作包括制定定义二次使用光伏模块技术要求、测试程序和认证途径的国际标准，确保它们可以在不降低质量或安全性的情况下重新进入市场。



表1：概述文献和市场报道的晶硅光伏组件（及其技术成熟度水平，TRL）的修复方法。除电缆和连接器外，所有修复都需要进行湿漏电测试以确保安全。

Component	故障模式	模式	现场维修 可能 没有 拆解	可自动化的	TRL	参考
背衬材料	粉笔涂鸦 裂缝 微裂纹 无绝缘问题 背面保护层	涂层	是的*	是的	7	[10,11]
		磁带	是的	没有	9	[20,26,27]
		新颖		是的	9	
玻璃	裂缝	涂层 / 粘合剂	是的	是的	3-4	[14]
损坏的焊点-互 成对 连接 points	破碎的肋骨；		没有	没有	3-4	[15,16]
交汇处水流侵入 盒子	分层脱落 失败的绕行 二极管	替换	是的	没有	9	[19,21]
框架	分层脱落	替换	没有	没有	9	[19]
电缆与	损坏的电缆 连接器 连接件	替换	是的	没有	9	[19]

有时，但许多情况下，模块必须从托架上取下

在以下子节中，详细介绍了文献中描述的几种维修策略。

## 2.1 生产后光伏组件的修复

总的来说，在生产后对光伏组件或其单个组件进行维修的全面文献和技术指导明显不足。这包括在制造过程中受损的组件、使用有缺陷或低于标准的组件，或由工艺波动（如焊接或压膜过程中的温度变化）引起的异常。此类维修通常在将组件运往客户之前在制造设施内进行，以确保它们在上市前满足最低性能和安全标准。

据传，某些维修技术被使用过，例如重新焊接电气连接和重新覆层模块，在原封装胶固化不足的情况下。这些纠正措施通常用于恢复机械完整性或提高防潮性能。在模块生产的早期年份，人工更换模块中的故障或损坏的太阳能电池也不少见。这些模块通常表现出轻微的光学或电气偏差，随后作为B级库存进行市场推广和销售。

报道了在生产过程中及生产后直接进行的修复工作，包括故障硅太阳能电池的自动化检测[28]和Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) 电池划线修复[29,30]。



## 晶体硅电池

Rodriguez-Araujo等人[28]开发了一套适用于太阳能电池生产线系统，该系统能够自动识别、定位和修复缺陷。该系统隔离并去除有缺陷的部分，允许从损坏的太阳能电池中回收可重复使用的部件（见图1）。该方法预计可减少69%的浪费。该系统的关键特性在于其能够同时分割和分类太阳能电池中不同类型的缺陷，如短路和裂纹。这标志着超过当前方法的进步，因为当前方法通常只能检测到一种缺陷类型或无法区分缺陷。识别特定的缺陷类型是必要的，因为每种缺陷都需要独特的修复方法。尽管有这一进步，但找不到关于该系统进一步发表或市场准备或商业采用的证据。

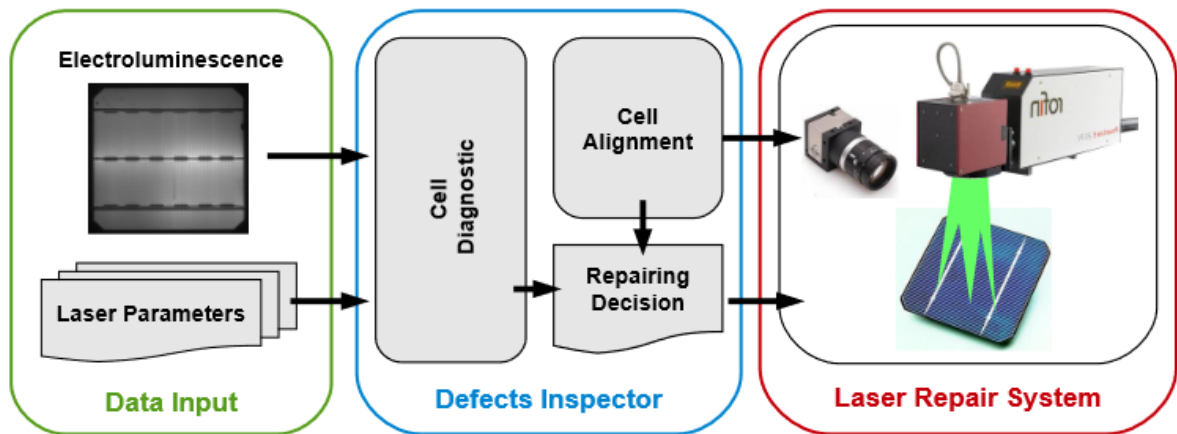


图1：2014年提出的基于自动激光的太阳能电池修复系统的框图[28]

## 薄膜技术

Misic等人开发了一种简单的方法来修复CIGS（铜铟镓硒）太阳能模块生产初期损坏的P1刻线[29]。刻线是用于分离和连接太阳能电池层（特别是P1层用于分离背面接触层）的细小切口。他们的方法利用电压阶跃在钼层中产生电流，使其能够无需详细成像来发现和修复缺陷。它对缺陷的大小或位置没有限制。通过监测修复电流，系统还收集了有关缺陷发生地点和频率的有用数据，有助于改进刻线过程。这种方法已经在实际生产中得到成功应用，但尚未有基于此的进一步研究或商业工具的报道。

在另一种方法中，Misic等人[30]研究了通过热诱导断裂修复两个Mo背电极之间背接触（P1）刻线中断的问题。这些断裂发生在吸收剂共蒸镀过程中，这一过程用于CIGS薄膜模块制造，并能有效修复约70  $\mu$ m的线条中断。此外，他们还证明了在P1激光刻线后、CIGS共蒸镀前进行的退火处理可以修复直径达1 mm的线条中断。



## 2.2 场地内光伏组件的修复

### 2.2.1 接线盒/电缆/旁路二极管

尚未找到关于这个主题的任何科学或技术出版物。然而，作者可以从不锈钢阳光科技有限公司获取相关信息。<https://www.suncycle.eu/> )，一家专注于光伏系统运营和维护的公司。

Suncycle遵循定义明确的工程技术程序和安全操作规程，对运营太阳能电站中PV模块的子串故障进行修复。主要目标是建立一套安全、高效和标准化的方法来诊断和修复存在电故障的模块，尤其是涉及旁路二极管和互联故障的模块，以恢复性能并确保长期可靠性。

过程的关键重点是故障诊断，这从对每个模块进行视觉和电气检查开始。技术人员评估损坏的迹象，如变色或变形的接线盒，并使用万用表测量直流电压。这允许识别有缺陷的子字符串：全V表示所有子字符串完好无损，而读数小于V表示有缺陷的子字符串。<sup>oc</sup>

2/3, 1/3, 或0表示一个、两个或所有子串都已断开或绕过。详情<sup>oc</sup>

二极管正向和反向方向的测试用于确认功能，有助于区分二极管故障和电路中断。

根据诊断结果，该程序提供三种主要纠正方法：(i) 重新焊接故障接触点，(ii) 更换损坏的旁路二极管，或在必要时，(iii) 安装新的接线盒。所有维修行动都在现场搭建的移动车间进行(图2)，确保最小化干扰和快速干预。维修后，对模块进行重新测试以确认恢复到正常电气参数，并重新密封接线盒；所有步骤都有记录。该程序强调保持高标准的安全，确保环境保护(包括废物收集和栖息地保护)，并确保符合国家劳动和风险预防法律。

实施后的维修流程已展现出高吞吐量的工业产能，每天可重新加工多达120个模块。现场数据显示，最近安装的模块返工成功率约为90%，表明对于退化程度低的模块具有显著效果。即使是长时间暴露于环境条件下的模块，该流程也能达到约75%的成功率，突显了其在延长不同老化程度模块使用寿命方面的稳健性和价值[26]。然而，截至目前，尚未有关于这些修复模块长期电气性能、可靠性或退化行为的调查报告。



图2：移动维修车间 © Suncycle Iberica [31]。

### 2.2.2 互连与焊点故障

两个不同的研究小组提出了细胞互连故障的修复程序。Lee等人[15]提出了一种恢复由不良焊接引起的电阻焊 (RSB) 热点的方法。Rosillo等人[16]提出了一种修复光伏模块中母线中断的方法。

对于RSB热点模块的修复方法[15]涉及几个详细的步骤，以确保最小化损坏和有效的恢复，见图3。团队比较了新的现场修复方法与更全面的工厂恢复过程。在工厂过程中，将框架分离，并去除如胶带或密封剂等粘合材料。然后使用热板加热和软化EVA，以便可以剥离并完全去除背板，受损区域的EVA和汇流排也一并去除。随后，在上下电池的界面处重新涂覆EVA封装层。待连接到新汇流排的电池片进行焊剂处理以重新焊接。将模块冷却至室温后，在新汇流排上应用焊剂，然后焊接以连接。将第一层EVA以高精度插入玻璃和汇流排之间，以避免气泡并确保完美的连接。在修复区域略大的第二层EVA重叠并固定，使用烙铁尖端以防止在压膜过程中的移动。保持约5毫米的重叠边距至关重要，以避免压膜后的可见修复痕迹。最后，用新的EVA和新的背板覆盖整个模块，检查电气连接，并将模块放入压膜工艺中。

现场恢复过程中，所有恢复流程都是在现场直接进行的，将工厂设置中的22个步骤减少到了现场8个。这种方案使得在恢复后能够立即安装和检查，无需重新打包或转移模块。在现场维修程序中，只需用打孔的方式打开背板，露出受影响的焊接点。修复后，用树脂和背板胶带将模块密封。



使用树脂的现场修复方法证明了其可靠性与工厂方法相当，同时具有时间、成本和物流复杂度降低的优点。建议在规定的监控期内进行现场验证，以评估所提出修复方案的长远性能和有效性。

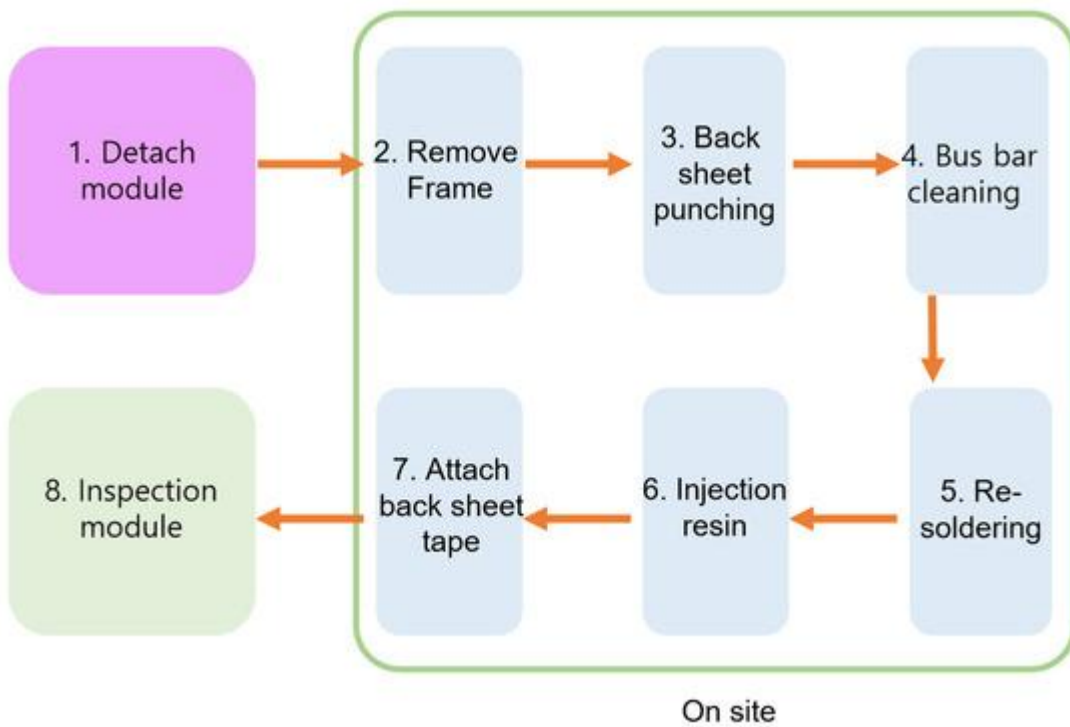


图3：方案由Lee等人提出的现场互联修复；经许可（改编）复制。版权所有2022，MDPI。[15]。

在[16]中提出的工艺包括标记工作区域，并移除待修复模块部分的背板和EVA。使用了砂带附件以及各种抛光和清洁工具。关键步骤包括仔细分离和抬起汇流排部分，施加焊剂，并插入互补的汇流排片（见图4）。焊接使用特定温度的焊铁（183°C）以确保连接牢固。使用万用表或音频测试仪检查连续性后，用硅橡胶密封胶填充孔洞以确保正确密封。每条带状中断修复大约需要5到10分钟。该程序在三个不同模块上进行了测试，分别标记为M1、M2和M3。在修复之前，M1和M2的功率约为50W，而M3无法产生电力。修复后，所有模块均产生了约200W的电力；未发现因修复过程造成的额外损坏。

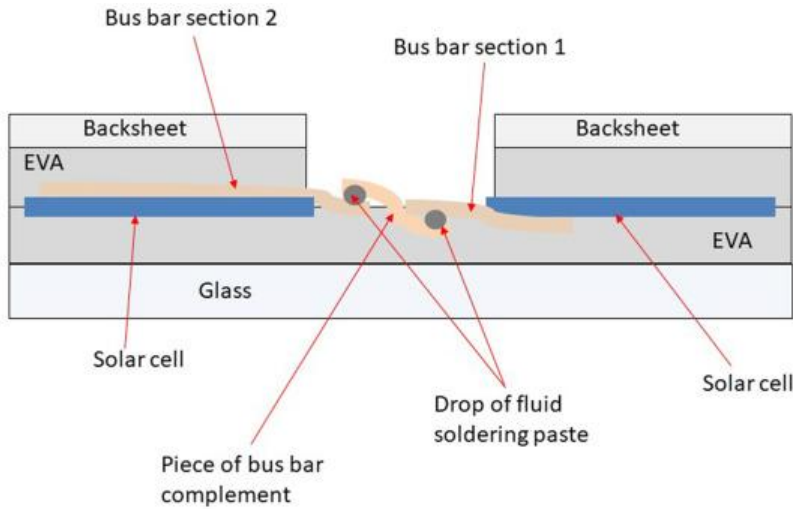


图4：方案：由Rosillo等人提出的互联互通修复方案。经授权（改编）复制。版权所有©2024，Elsevier [16]。

在后续论文中，Rosillo等人[17]研究了光伏模块中双串（影响一个电池的两个串）和单串（只影响一个串）中断的修复。研究发现，双串中断会导致显著的功率损失，其修复可以恢复到模块标称功率的三分之一，而单串中断可以获得高达6%的额外收益。提出了一种使用磁性指南针定位单串中断的简单、低成本方法，其结果与EL成像和电流传感器的结果相匹配。该研究突出了全面修复（双串和单串中断）的益处，这在测试的模块中导致功率增益高达320%，填充因子提高了高达25%。

## 2.2.3 模块包装

### 玻璃修复

Tas和Van Sark [14]对玻璃-玻璃光伏组件中的玻璃缺陷进行了一种实验性修复技术的研究，通过加速老化测试（DH）后的性能和可靠性测试来评估其有效性。双玻璃光伏组件中玻璃缺陷的实验性修复技术借鉴了汽车挡风玻璃修复的方法。所需材料包括修复和凹坑树脂、紫外线灯和辅助清洁工具。该技术涉及七个步骤：

- (1) 检查：评估裂缝的新鲜度和范围。
- (2) 温度控制：保持模块在5°C至29°C之间，理想温度为20°C，并确保裂缝干燥。
- (3) 准备：清洁模块并将其放置成水平状态。
- (4) 玻璃纤维树脂应用：将修复树脂插入裂缝，并使用画笔确保其流入，然后去除多余树脂。
- (5) 窝洞玻璃纤维树脂应用：将窝洞玻璃纤维树脂涂覆于较大的凹坑和裂缝上作为密封剂。
- (6) 固化：使用紫外线灯或阳光固化树脂。
- (7) 完工：确认修复和清洁模块。

研究检查了存在玻璃缺陷的太阳能电池板，确认除玻璃裂缝外没有其他初始缺陷。初始EL成像未发现内部不规则性。实验之后，...



维修、视觉检查和EL成像未发现额外的缺陷或内部变形。这表明维修过程对光伏组件没有负面影响，证实了双层玻璃光伏组件预期的耐用性和弹性。经过DH暴露后，六个样本中有五个表现相似，下降了4.0%-4.7%。只有未维修的组件在DH存储过程中由于形成额外的大裂缝，表现出现了显著的7.8%下降。Tas和Van Sark[14]利用成本优先数法[8]来比较局部维修和更换的经济效益。他们发现，从能源角度讲，维修远比更换更可取，经济效益取决于维修规模和频率。在后续项目[32]中，正在测试新的树脂和薄片，结合室内加速测试和室外测试，但目前尚无结果。

### 背板修复

实地经验清楚地表明，玻璃/背板组件的使用寿命往往取决于聚合物背板的可靠性。光伏组件中，超过40%的材料缺陷是由于背板的裂缝、分层以及材料的老化/变黄。最严重的后果是背板可能导致的电气绝缘电阻（ $R_{湿}$ ）下降，这将对<sup>ISO</sup>安全运行，从长远来看，也要考虑PV系统的产量。一种修复涂料可以解决老化背板的湿度敏感性。因此，一支奥地利研究团队研究了修复背板的可能策略，以裂纹的聚酰胺基背板作为首个测试案例[10-12]。已经提出了两种不同的修复策略：通过以下步骤修复深裂纹的BACKSHEET损伤：（i）通过涂覆恢复电绝缘性能，以及（ii）防止近微裂纹表面的进一步扩展。已经开发了一种修复工艺（见图5），包括以下步骤[11]：（i）清洁，（ii）（如有必要）预处理，以及（iii）涂覆（裂纹填充和密封）。

从技术角度来看，所审查的几种修复解决方案符合兼容性和适用性的定义要求。一方面，修复胶带/薄膜可以完美密封表面，但如果粘合剂能够渗透因基底材料裂缝而形成的空腔，则裂缝填充才会成功，例如在接近表面的微裂缝情况下。另一方面，还确定了基于聚氨酯、环氧树脂、硅和合成橡胶的几种修复涂料，经过一两个步骤的应用过程后，显示出完全填充和密封表面的效果。老化模块所需的绝缘电阻（ $R_{湿}$ ）可以恢复。长期话题非常重要。<sup>ISO</sup>修复模块的可靠性以及阻止裂纹扩展的有效性也得到了讨论。对修复模块进行了加速老化测试和自然老化测试。自2021年8月和2020年6月起，分别投入运行具有深度纵向裂纹和微裂纹的修复光伏组件，如图6所示。

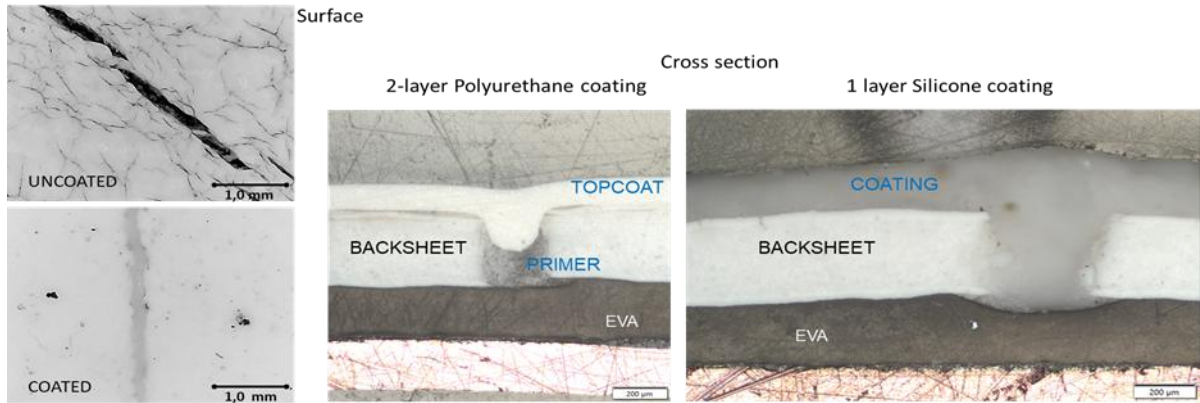


图5：显微镜下的聚酰胺背板表面图像（左）显示微裂纹（MC）和深纵向裂纹（LC）；以及涂层样品的横截面（中右）[11]。



图6：照片展示了老化组件背面破裂的涂覆过程（左侧），现场材料和粘合度测试（中间），以及自2021年以来修复/涂覆的PV模块成功运行的测试地点（右侧）。在修复涂层中使用了流动硅酮和双组分聚氨酯涂层[10,11,33]。

基于这些结果，可以得出结论，对于深度裂纹的后盖板模块的成功修复，需要完全密封深度裂纹和整个磨损以及经常出现微裂纹的后盖板表面，以阻止后盖板进一步的材料退化并恢复其电绝缘性能。修复后的光伏系统的长期性能在运行条件下（从电学和材料两方面）进行了跟踪。在涂层处理和30个月的自然老化（模块运行状态）后，（i）电学特性没有变化，（ii）没有因漏电而发生的逆变器跳闸事件，（iii）在光谱（红外、近红外、拉曼）测量和附着力测试中，涂层表现出高稳定性。因此，可以初步预测修复的长期行为及其延长光伏模块寿命的效果。因此，后盖板修复涂层可以在四种不同的场景下应用，见图7。

当地背板在模块安装或处理过程中因机械损坏而产生的缺陷，可以很容易地通过涂层或胶带/薄膜进行修复[11]。由背板物理开裂引起的缺陷，如（i）外层的微裂纹或（ii）位于汇流排下的深纵向裂纹（贯穿背板整个横截面），也可以通过涂抹能够填充裂纹空隙的涂层进行修复。这同样恢复了背板/模块的绝缘电阻[11]。



在这种情况下，如果背板出现裂纹同时伴随着聚合物层的化学降解（例如在PA背板中观察到的方形裂纹，见参考文献[10,11]），这会导致分层，[28,29]使用涂层或胶带进行修复是不可能的。

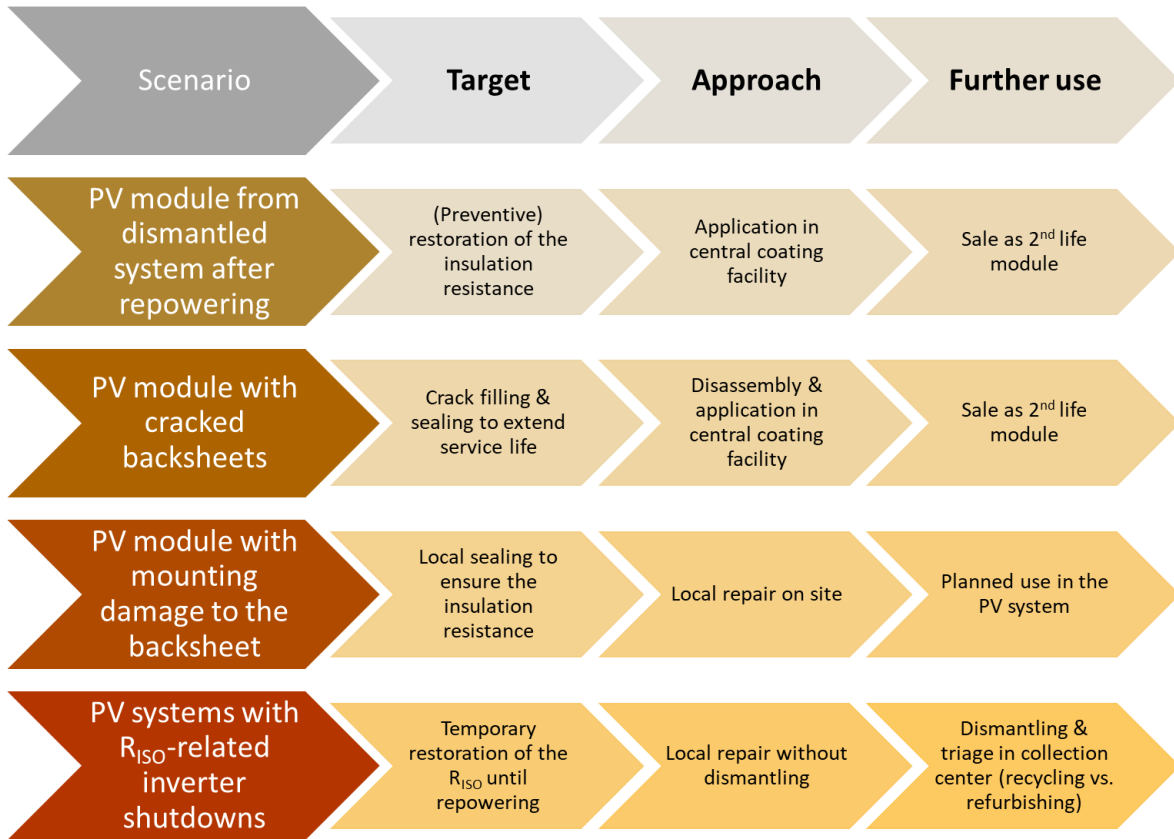


图7：维修场景示例 2<sup>nd</sup> -> 2<sup>nd</sup> 光伏组件存在背板问题，如ReNew光伏项目[34]所识别的。

可靠的维修方案可以通过延长使用寿命和更稳定的能源产出为光伏资产所有者带来成本效益。现场通过涂抹涂层修复机械损坏的背板薄膜，恢复操作安全。延长使用寿命的另一个优点是减少光伏废物和关联资源的保护。此外，现场维修减少了物流的额外成本，从而降低了二氧化碳排放。<sup>2</sup>

### 2.2.4 框架

全面审查现有资源表明，仅更换框架的专用独立现场程序不常被记录或标准化。在大多数情况下，当存在结构性损坏时，普遍建议更换整个模块，而不是尝试修理。然而，修复损坏的框架被列为一些公司的 [www.sunrecycle.eu](http://www.sunrecycle.eu) 并不列出有关修理程序的任何进一步信息。



## 2.3 2型光伏模块的翻新 nd -> nd 生活

如果光伏系统在现代化或重新发电时被拆除，这些模块有时只达到了其可能使用寿命的一半，但仍然有90%以上的原始输出。这些模块可以对其电气性能和安全方面进行测试，然后——如果需要——进行翻新，以实现第二个生命周期。奥地利初创公司2<sup>nd</sup> -> nd Cycle FlexCo (<https://www.2ndcycle.at/en>) 为此建设了一个升级改造工厂（参见第三章3.2节案例研究2）。他们正在开发一个完全自动化且可扩展的解决方案，以高效地处理使用过的、拆卸的太阳能板，使其进入第二个生命周期。在升级改造工厂（见图8），光伏板被清洗，识别物料清单（BOM），进行电气测试（EL图像、IV曲线、 $R_{ISOwet}$ ）尽可能更换损坏的部件（例如，连接器）。通过所有测试站后，根据测得的数据创建测试报告。

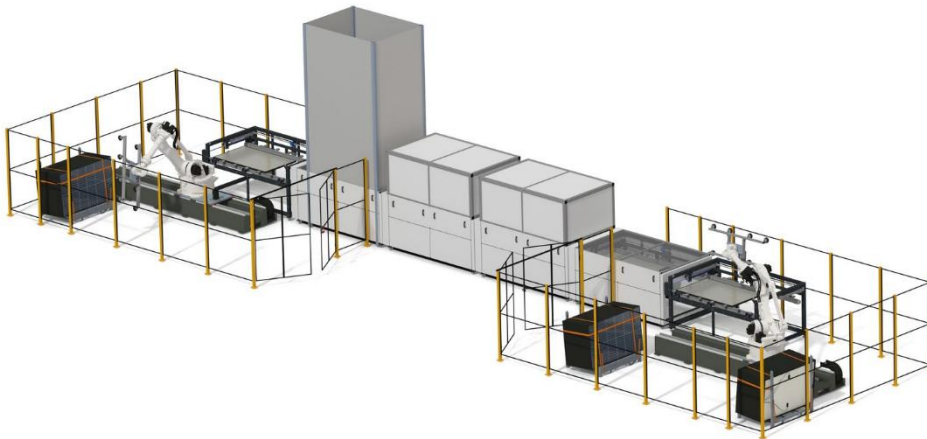


图8：图2.再利用工厂示意图 nd -> nd

周期 (<https://www.2ndcycle.at/en>)。

## 2.4 评估修复措施/安全方面的方法

维修/翻新措施的目标是恢复光伏组件中所有组件的完整功能；在运行过程中，必须始终满足IEC 61730-2 [35]中规定的安全要求。IEC 61730-2是国际上认可的标准，它定义了光伏组件的安全测试序列，涵盖了电气、机械和消防安全方面。它通过IEC技术委员会长期的国际合作成为共识方法，制造商、测试实验室和研究人员将实验室测试与现场经验相结合。其全球采用得到了实验室间验证、正式的IEC投票以及认证机构、监管机构 and 光伏行业的广泛接受。因此，评估维修过程成功与否的最合适方法是按照标准中规定的模块安全测试（MST）程序进行测试，并根据其中给出的通过/失败标准进行评估。

一例：在修复有裂纹背板并涂覆涂层或粘合箔的PV组件[27]后，必须通过湿漏电流测试（MST17），这在IEC 61215-2[36]中相当于MQT 15。关于模块在潮湿环境下的绝缘电阻要求：



环境是  $R > 40$  兆瓦/米<sup>2</sup> 研究表明，这会在长期内得到满足。<sup>iso.湿</sup> 当完成裂缝填充后[10,11,37]。这可以通过检查模块的横截面来确认，正如在2.2.3节中所述并如图5所示。

## 2.5 提高光伏组件维修性的措施

在许多研究中，光伏组件的修复被视为延长和确保光伏组件功能和安全的途径[1,2,38–41]。目前的光伏组件设计和包装概念，即在两片透明聚合物薄膜之间相互连接的太阳能电池、前玻璃和背板或背玻璃，是在40年前（20世纪70年代末至80年代初）发展起来的[42]。在光伏组件中，“设计用于维修”的创新和相关性在于其有可能延长组件的功能寿命，减少浪费，并提高太阳能行业的可持续性。相关性源于解决传统光伏组件设计中存在的耐久性与可维修性悖论带来的挑战的需求，这种设计优先考虑耐久性但限制了可维修性。一般来说，材料连接得越牢固，其强度和耐久性就越强，但修复和更换就越困难。

迄今为止，尚未发布针对“维修设计”或“维修权”的综合策略[43]用于光伏组件。然而，一些研究团队和初创公司已提出旨在提高光伏组件及其部件可回收性的方法。许多这些进步也有助于提升光伏组件的可维修性。

Wanghofer等人探讨了可逆胶粘剂在框架和接线盒中的应用，强调了它们在简化维修方面的潜力[44]。本研究评估了使用含热膨胀填料（如热膨胀微球（TEM）和可膨胀石墨（EG））的硅胶粘剂，对光伏模块的可拆卸粘接连接。TEM样品在较低温度下表现出快速膨胀，而EG样品需要更长的加热时间，但显示出有效的脱粘性能。

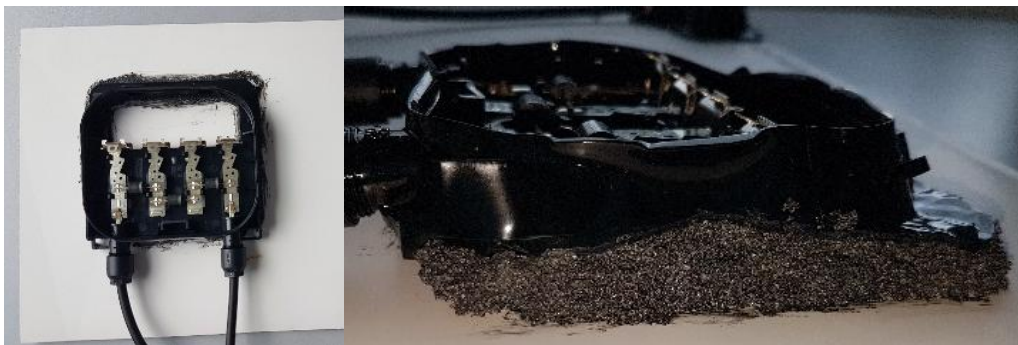


图9：在光伏模块上粘附连接的接线盒，在可膨胀石墨扩展前（左侧）和扩展后（右侧）（亦见[44]）。

机械性能和老化稳定性测试表明，由于结构原因，EG显著降低了粘合强度，而TEM略有提高。老化测试显示，填料含量对稳定性的影响不显著，尽管在潮湿热条件下TEM降解。总的来说，EG在创建可拆卸粘合连接方面证明是有效的，但由于可用材料的限制，较低的膨胀温度仍然是一个挑战。图9展示了热膨胀前后的模块。在热处理之前，两个接线盒都能支撑模块的重量。加热后，参考接线盒保持牢固且完好无损，而含有粘合剂的接线盒



可扩展石墨显著膨胀，使得接线盒可以轻松拆卸，展示了可扩展石墨在外部触发脱粘方面的潜力。

Ehrhardt等人[45]提出了一种太阳能电池封装材料的自修复机制，为提高模块寿命提供了另一种创新方法。封装层中由热应力引起的微观缺陷可以使用热响应性聚合物进行修复。测试了两种模型聚合物系统，显示出重复的热可逆性和有效的自修复能力，同时应用温度（-40°C至85°C）范围内保持结构完整性。总的来说，这些材料有望通过利用日常温度波动来实现自修复，从而提高光伏模块的耐用性。

最近，荷兰初创公司Biosphere Solar开发了一种无封装模块化光伏模块设计，该设计天生具备拆卸、维修、翻新和组件再利用的能力[46]。Biosphere Solar的模块采用无层压的玻璃-玻璃结构，利用双边缘密封系统密封，结合聚异丁烯（PIB）和硅胶以防止湿气和氧气渗透。与传统封装材料如EVA不同，消除了如黄变和分层等常见的老化问题。使用干燥剂和氧气吸收剂维持的无活性内部气氛进一步增强了耐用性和长期稳定性。Biosphere Solar的模块设计完全模块化且可维修，允许更换单个组件，如太阳能电池和接线盒，而不会损坏整个单元。每个电池都安装在可拆卸的“床”上，使得目标修复简单且无损。边缘密封系统设计用于可控拆卸，便于现场维护和升级。这种模块化方法支持产品寿命延长，促进再利用，并与循环设计原则相符。然而，迄今为止，尚未发布关于可靠性测试或户外性能的结果。

早期研究介绍了由阿波罗太阳能公司主导开发的N.I.C.E.（新型工业太阳能电池封装）光伏组件概念，主要采用类似模块化方法，避免使用聚合物封装材料[47]。N.I.C.E.光伏组件技术的核心在于一种颠覆性的制造工艺，消除了传统的焊接和层压。N.I.C.E.模块不使用EVA封装材料和高温工艺，而是采用双玻璃结构，配合聚异丁烯（PIB）边缘密封，并通过铜箔和电池汇流排之间的压力接触实现电气互联。不幸的是，由于该模块概念的失败，阿波罗太阳能于2022年停止了其活动。

从监管和管理角度来看，政策制定者越来越认识到，有必要将易于修复和循环设计的原则纳入监管框架中。欧洲委员会共同研究中心（JRC）最近发布了《太阳能光伏组件、逆变器及系统初步研究》[48]，其中确定了关键领域，改进后的光伏组件设计有助于提高长期耐用性、易于维护性和报废（EoL）回收。一个主要焦点是组件的可访问性，特别是在接插件盒子中，越来越多的二极管采用焊接连接而非插拔类型，限制了更换的可能性。研究建议，制造商应被要求报告接插件组件的可访问性和可更换性，并且在二极管替换受限的情况下，整个接插件盒子在不损害组件完整性的情况下应可替换。此外，定义与能源相关产品修复性和升级通用评估方法的EN 45554标准，可作为为光伏组件开发特定修复能力指数的基础。这些指数可以量化诸如维护信息可获得性、使用的螺栓类型、维修所需工具和拆装的技能水平等因素。[48,49]。



超出可修复性，可拆卸设计（DfD）和可回收设计（DfR）也是关键考虑因素。预备研究强调模块化光伏建设的必要性，这将有助于在产品寿命终结（EoL）时对单个组件进行针对性维修和更易于回收。制造商的拆卸试验可以为优化固定和连接方法提供宝贵见解，从而在运行期间保持结构完整性，同时提高可回收性。尽管模块故障率较低（约0.5%），但长期可持续性担忧需要主动的设计措施，以防止未来与日益增长的光伏废弃物流相关的环境负担。因此，政策制定者被鼓励引入强制信息披露和半定量生态设计要求，以促进循环利用，确保未来的光伏模块不仅性能出色，而且设计寿命长、易于维修和资源回收。

## 2.6 维修的经济考量

维修与更换的经济可行性取决于详细的成本效益分析[7]。

**修复** 通常在损害仅限于少数几块面板，而整个系统仍能正常工作时，这是首选方案。如果问题源于外部组件，如逆变器或布线，而不是核心模块本身，这种方法也适用。此外，如果面板仍在保修期内，如果物理损害轻微且仅限于表面组件，或者如果问题被及早发现并解决，那么维修通常更实际。然而，如果在同一生产批次中发现许多模块存在缺陷，这通常表明存在更深层次的根本原因——如材料退化或系统性制造问题——这些问题应在源头解决，而不是在现场临时修补。

**替换** 当光伏系统使用超过20年时，这通常是一个更优的选择，因为随着时间的推移，面板效率自然会下降。如果物业的能源需求增加，或者损害广泛，影响多个面板（例如，严重的开裂或分层），更换也是明智的。如果逆变器面板同时接近其使用寿命结束或失效，同时更换这两个组件也是一种可行的策略。

当前修复模块的方法，如前所述，需要大量的手工劳动。这通常涉及诊断问题、拆卸单元、更换或修复故障组件，以及重新组装模块。这个过程可能耗时且需要熟练的技术人员。考虑到高昂的劳动成本和维修所需的时间，用全新的模块更换整个模块可能更加经济高效且风险更低。尤其是在考虑到维修带来的停机时间和修复模块未来可能出现的故障风险时。新模块享有保修，并预期能够无故障地发挥最佳性能。它们还可以集成在旧单元中可能不存在的新技术或改进，从而提供更好的性能和效率。然而，在劳动力成本相对较低的地区，例如印度，维修和再利用的经济可行性可以得到进一步提升；例如，印度能源、环境和水委员会（CEEW）的初步估计表明，修复接线盒和旁路二极管故障的成本大约是新350瓦时模块的50-60%。

维修或更换模块的选择通常取决于多个因素，包括劳动力成本、新模块的可用性和成本、模块对整个系统的关键性以及长期可靠性考虑。总之，虽然修复损坏的模块是可行的，但通常更实际、更具经济可行性的是：



由于劳动力成本高昂以及新模块可能带来的性能提升，我们将其更换为新的模块。

在确定是维修还是更换光伏组件时，另一项重要考虑是从原始制造商处获取明确的批准。制造商的授权确保拟议的维修符合产品设计规范，维持安全及性能认证，并且不会意外地失效现有保修。

表2总结了维修与更换决策的关键因素。一种成本优先数[COST PRIORITY NUMBER]的方法[8]可以帮助做出最具经济性的决策。在某些情况下，如偏远或难以到达的安装地点，与更换光伏组件相比，维修可能成为一般做法的例外，因为运输新组件涉及到大量的劳动、成本或风险。一个显著的例子是安装在高原或山区的高空光伏系统，传统运输不可行，必须通过直升机运送更换组件。在这种情况下，现场修复损坏的组件可能成为一种更实际、更具经济可行性的解决方案，尤其是在可进入性、天气条件和运输限制使得定期维护或组件更换极具挑战性时。

表2：维修与更换决策的关键因素。

因子	考虑维修	Replacement Consideration
损害程度	小事（小裂缝、芯片，表面损伤）	严重的损坏（玻璃破裂，分层剥离...） tion, 扭曲框架，水渗入，深背板裂纹
模块年龄	相对较新的面板在保修期内或早期（人生阶段）	即将或超过20至25年的使用寿命
保修覆盖范围	人类承保的损失 制造商或安装商战 愤世嫉俗的	保修范围外的损坏（例如， weather, pests）- 天气，害虫（ ）
费用效率	维修费用显著 小于新模块+ 劳动力	维修费用与或超过 新模块 + 劳动
表现影响	轻微产出下降，除..... Expected significant recovery 每个维修后的产品。	显著的持续产量下降；无 预期会有实质性的改进。 修缮
广泛损害	仅有几个面板 受影响的：系统剩余部分 健康	多个面板严重损坏，脱..... 压层，或失败
系统需求	当前系统符合英 能源需求；无欲望 升级	能源需求已改变；对欲望的渴望 更高效、现代的技术
组件失败	问题孤立于外部 nal components (e.g., in- verter, 布线)	逆变器和平板都在老化/故障 同时



### 3 重新论证光伏标准化、银行可靠性及2年实地经验

#### 3.1 第2次重新资格认证 nd → nd 生活光伏

光伏组件二次利用资格认证通常从外观检查开始，随后进行电气性能测量，在某些情况下还会进行安全测试。这些步骤对于在重新投入市场之前，根据其剩余性能潜力和安全性对组件进行分类至关重要。

在实践中，重新认证的证据通常由进行评估的实体提供的追溯记录和测试文件（例如I-V数据、绝缘结果、EL图像）来提供。目前，一个协调一致且被广泛认可的面向消费者的标签仍在出现，这使得没有伴随文件的非专业人士很难验证重新认证状态。

然而，值得注意的是，目前有在线平台正在积极销售未经测试的二手光伏组件。虽然这些市场为组件的二手交易提供了便利渠道，但缺乏标准化的检验、分类和安全验证协议，对所提供产品的可靠性和长期性能提出了严重关切。未经充分测试的二手组件可能存在包括加速退化、电气故障或安全隐患等风险，尤其是在没有额外质量保证监管的系统部署时。

以下是详细描述二次光伏模块再认证程序，概述了必要的检验、测试和分类步骤，以确保安全性、可靠性和性能符合要求的内容。

##### 3.1.1 现场分类：从检查到分类

光伏组件的再利用资格和选择包括组件健康状况评估和功能测试。这些通常基于检查和表征方法，遵循既定技术标准和准则的原则。近年来，研究和行业项目引入了光伏再利用的技术进步和最佳实践。来自SolarPower Europe的“生命周期质量工作流程”和TRUST-PV研究项目[50,51]的几个光伏参与者最近概述了一个光伏再利用的资格和分类框架（图10）[1,2]。

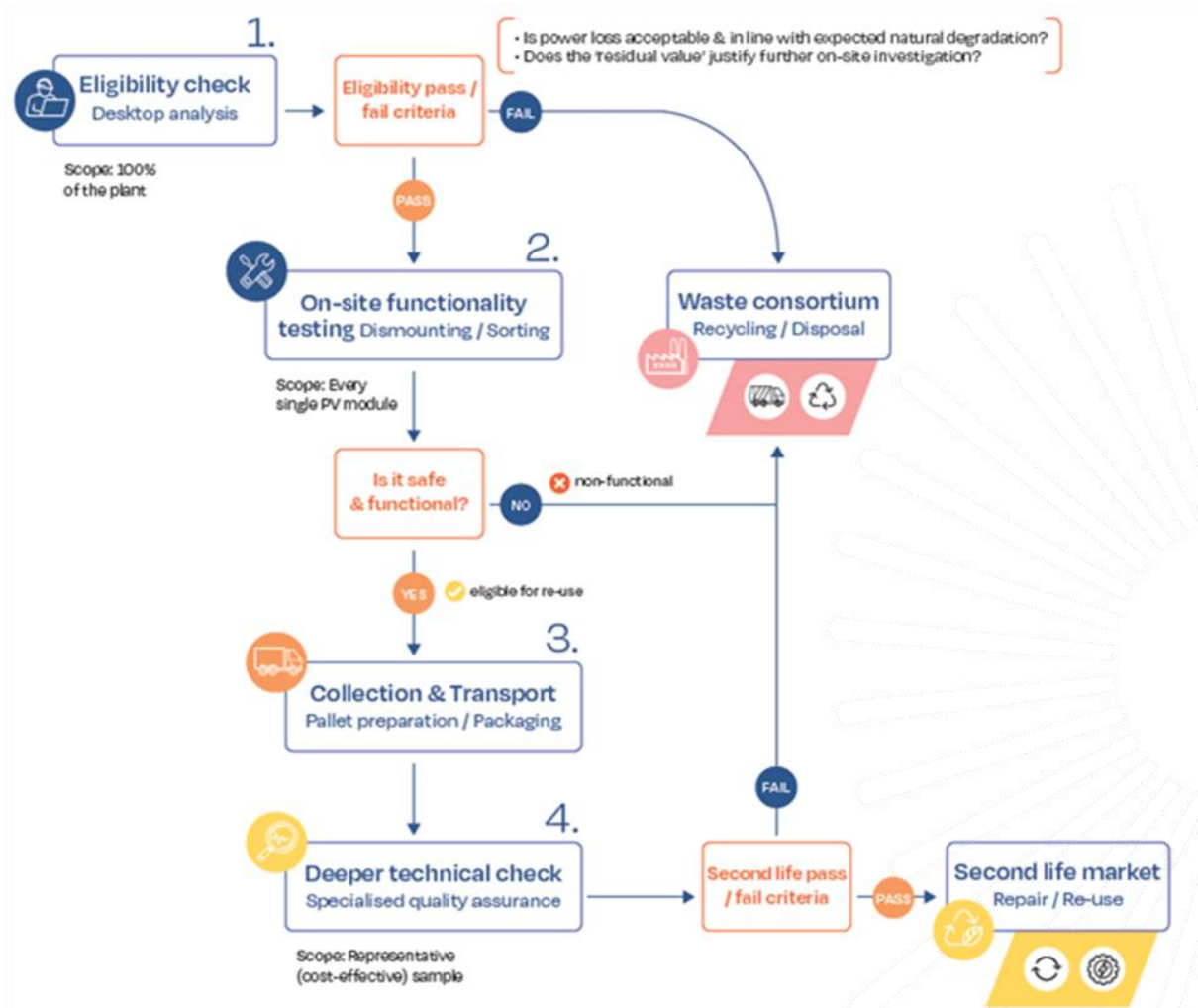


图10： 工作流程：TRUST-PV和SolarPower Europe的寿命质量工作组专家介绍和提出的PV回收资格和分类框架。©SolarPower Europe [2]。

本框架旨在实现技术上可行且成本效益高的程序，优先考虑安全性能。一个需要事先回答的关键问题是，一个特定的光伏电站的每一个模块都必须经过所有的质量保证测试，还是可以使用抽样方法。该框架分为四个步骤：i) 离场资格审核，ii) 现场检查和功能测试，iii) 分类收集和运输，iv) 深度技术检查[2]。

1) 现场外（桌面）资格检验可以基于光伏数据监测分析领域的最近进展[52,53]，以评估光伏电站的健康状况，确定表现不佳的组件（如功率损失率），从而确定是否需要现场检验。后者可能包括至少每年一次的红外（IR）图像和I-V追踪活动，同时进行电致发光（EL）、光致发光（PL）检验和/或绝缘电阻测量（ $R_{iso}$ ）是当需要精确的选择、分类和根本原因分析时受到青睐。

2) 对于此类资格审核，建议采用两种不同（但互补）的标准：i) 性能损失率（PLR）和ii) 残值。资格审核后，光伏组件应展示符合预期（内在）的年发电量损失。



性能下降。因此，PLR可以被视为一个及格/不及格的标准，而相比之下，残值则是一个相对具体于使用/业务案例的标准，即取决于每个案例中“重用价值”是如何定义和论证的（技术上和经济上）。

3) 现场检查和功能检查以供重复使用，可在退役现场或具有适宜检查和维修设施的处置现场进行。优先考虑移动式测试实验室和/或现场检查，以便快速评估并最小化运输过程中的进一步损坏风险。此外，在移除和验证光伏电站的各个模块之前，应收集一般输入数据，例如光伏组件序列号、铭牌电气参数、物料清单（BOM）（默认情况下很少可用，但可通过近红外（NIR）光谱学识别），等等。[54-56]。近期的研究和报告[39,57,58]概述了现场检查的主要方法、测试协议和最新创新，这些检查适用于光伏模块的重复使用资格/选择，主要基于视觉检查和I-V跟踪（IEC 62446-1），以及地面和/或空中红外图像（IEC TS 62446-3）。

4) 在完成所有资格和安全性检查，以及基于检验的PV模块资格认定后，适当的物流——包括拆卸、包装和托盘运输——对于防止处理和运输损坏以及确保可重复使用的PV模块不被误认为是电子废弃物至关重要。收集和运输应遵守WEEE指令附件VI（运输最低要求）中规定的用于二手产品运输的最低要求，旨在防止电子废弃物被运往回收方案不足的国家，如维修中心、回收设施等。[59]

5) 所提出的资格和分类框架的最后一个步骤将为之前步骤中被归类为可维修/再利用的模块的健康状况提供确定性和准确的证据。在专业测试实验室进行的全面且成本高昂的质量控制旨在作为补充，仅应用于光伏模块的代表样本[39]。实验室测试可能包括但不限于I-V特性（闪光）测试、锁相热成像（LIT）、EL成像、二极管测试、潮湿泄漏绝缘测试、气候室老化测试等。

除了上述的资格和测试外，还建议进行一套最低限度的后续安全测试和相关分级标准，包括IEC 61730-2 MST 13（接地连续性，检查所有框架部件是否电连接）和MST 16（绝缘电阻）。未能通过这些安全测试的PV组件应转入回收流程，或者考虑用于系统电压较低的PV配置（<60V）。另一方面，湿漏电流绝缘测试仍然是一个无法克服的挑战，因为它实际上几乎无法应用于每个可再用的PV组件候选者。相反，采用干绝缘测试。其思路是，对于系统电压较低的模块，接受较低的绝缘电阻值，如前所述。

按照上述所有步骤，确定了样品测试的实际（剩余）功率输出，以原始（铭牌）值的百分比表示。在此基础上，将光伏组件以折扣价格标签放置在二手光伏市场上销售，例如，卖给专注于小型屋顶和车棚应用的当地安装商，如[39]中给出的例子所示。

在TRUST-PV项目中的真实案例研究中应用上述步骤1-4后，以下几点重要收获值得强调[39]：（i）现场干燥绝热测试可能



不具重复使用结论性，建议在怀疑安全时（因为耗时）才进行湿泄漏绝缘测试；（因为耗时）已证明，即使是有明显损坏的模块，在没有水分的情况下也能得到积极的绝缘结果；（ii）可以进行抽样，但可能需要确定模块功率最大扩散的标准。需要对每个光伏模块进行最终的基本视觉检查。

应强调的是，迄今为止，关于野外暴露光伏组件的术后三甲治疗光伏组件的复用率，实际生活数据很少甚至没有。由CEA-INES执行的关于几块退役光伏模块的分级-维修-复用（非公开）研究的统计数据表明，可修复性和复用率可以从裂痕和焊接缺陷的退役光伏组件批次的略高于10%到绕路二极管故障的光伏模块的95%不等。在后者情况下，通过I-V特性、EL成像（图11）和LIT等更深入的实验室技术检查，可能确认了修复后的（术后）输出功率从93%到接近100%，几乎等于修复的光伏模块原始标称功率输出。考虑到这种残余功率输出的分散性，可能需要将模块分离成不同的“功率输出批次”，这也突出了需要额外分级步骤以及更复杂装车管理的必要性。

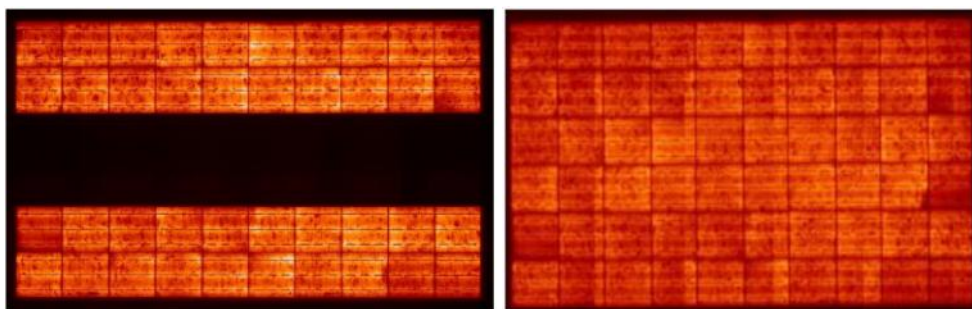


图 11：左侧：EL图像表征首次使用的PV模块中旁路二极管故障的例子（对应开路子模块）。右侧：修复后的同一PV模块的EL图像，准备进入再利用流程[2]。

在参考文献[38]和[54]中，研究人员基于三个主要标准提出了一种PV模块可再利用的分类矩阵：i) 维修的技术可行性，ii) 维修的经济可行性，iii) 维修后的安全性（包括保修）以及残值/功率比。在这种矩阵中，确定了三种不同的“可再利用资格类别”（图12）：

- 第1类（A和B）：可能不经进一步处理即可重复使用
- 第2类（C至G或H）：需要更深入的技术检查和/或维修（例如，R湿不足的模块）<sup>ISO</sup>
- 第3类（H和I）：非功能性的，不可修复的，进入回收流程。



<b>A</b>	As good as new, only small scratches etc.
<b>B</b>	Encapsulant and/or backsheet discoloration, minor delamination
<b>C</b>	Snail trails with < 10% module power loss
<b>D</b>	Cracked cells with < 10% module power loss
<b>E</b>	Failed bypass diode(s) that can be replaced (no potting)
<b>F</b>	Damaged junction boxes and/or cabling that should be replaced
<b>G</b>	Modules with severe power loss caused by PID
<b>H</b>	Cracked back sheet/severe scratches in back sheet that could be repaired
<b>I</b>	Unacceptable module damage that cannot be repaired: broken glass, hot spots / burn marks, excessive delamination, broken interconnects or poor soldering, corrosion, cracked cells with > 10% module power loss.

图12：光伏组件分类矩阵及维修/再利用资格判定[2]。

为了支持现场快速故障分类的需求，近期在欧盟资助的H2020项目SERENDI-PV和TRUST-PV中引入的创新可以进一步利用[50,60,61]。航空影像，尤其是红外和视觉数据，可用于实现对光伏系统的快速诊断评估，进而对光伏模块进行维修和再利用的资质/选择（见图13）。

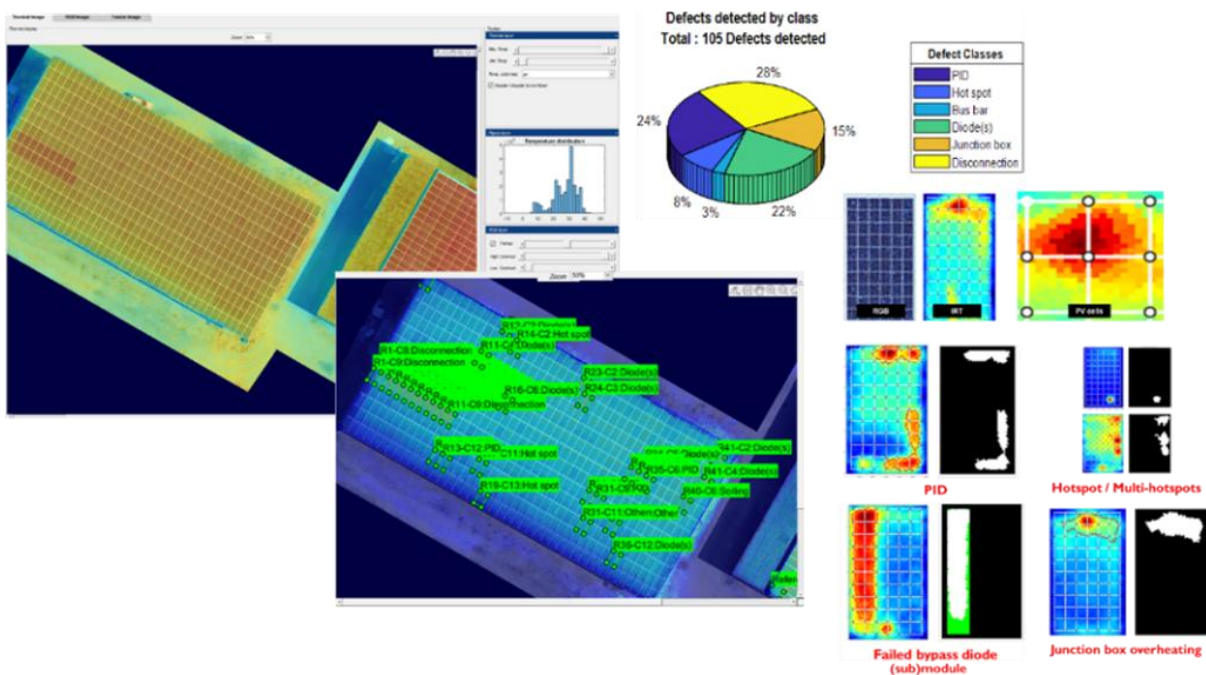


图13：示例ASPIRE仪表盘输出，CEA推出的一款旨在实现光伏组件故障基于图像检测和分类的软件原型，可允许选择可重复使用的光伏组件[2,61]。

尽管近年来出现了针对光伏设备的质量/再利用项目和技术进步，但关于光伏组件质量认证和筛选的资格标准/措施的固有模糊性仍然是一个障碍。虽然对于普通电子设备的功能测试和质量认证在原则上很简单（即“它工作/它不工作”），但在光伏组件功能足够的情况下，需要设定剩余功率或功率损失率（PLR）的下限。这种功能



“门槛”对废物立法至关重要，因为非功能产品被视为废物。迄今为止，H2020 CIRCUSOL专家提出了至少70%的[54]（原始）标称功率的太阳能电池板门槛。然而，由于二手太阳能系统的监管框架仍不确定且不一致，且目前缺乏标准化测试/分拣程序的再利用，太阳能系统的功能门槛可能有些任意。

这些资格阈值还影响实际中的模块路由：不符合安全或性能标准的模块通常进入监管废物流，并应按照适用的WEEE和国家要求处理。因此，早期分离可回收模块、在拆卸和运输过程中的谨慎操作以及将不可重复使用的组件适当引导至回收渠道，是重要的操作最佳实践，尽管详细回收流程评估超出了本报告的范围。

### 3.1.2 对2的质量保证 $nd \rightarrow nd$ 生命电力：推荐和（未来）标准化

如上所述，到目前为止，在光伏组件再利用的资格认证方面，缺乏国际标准化。为此，在2021年底，IEC技术委员会82工作组2内部成立了一个项目团队，其任务是为光伏组件再利用撰写一份IEC技术报告（TR），作为创建全球标准的初步步骤。该项目团队涉及来自不同大陆的约30位IEC专家。技术报告不允许具有规范性，但可以提供测试程序的推荐和未来限值规定的建议。因此，它可作为未来IEC技术规范或标准的依据。技术报告草案已于2025年9月完成，但IEC办公室现在（2025年10月）建议将其作为公开可获得规范（PAS）的文档，因为草案TR不仅具有信息性。现在IEC TC82的各国仍需决定将TR转为PAS的建议，之后，还需批准PAS草案的文本。PAS的发布预计接近2025年底。

#### 某些术语和定义在《光伏组件再利用技术报告》草案中

在更详细地讨论PAS草案内容之前，以下列出了一些在生命终结、废物和再利用领域中最重要术语和定义，以供明确。

表3。大部分原始的正式定义已经修订并适应了光伏行业通用术语，以便更好地理解。

表3：重要术语及定义。

退役	过程，从活跃状态中移除PV系统或组件。对于完整的光伏系统，意味着它被拆解，土地准备好进行再开发或恢复其原始用途。
生命末期（EoL）	自然或计划中的PV系统或组件寿命结束
性能损失评级（PLR）	参数表示光伏模块功率随时间下降的百分比（每年%）
准备再次使用	检查、清洁和/或维修操作，通过这些操作光伏组件被准备以便可以重复使用。



回收利用	任何将光伏废物材料再加工成产品、材料或物质，无论用于原用途或其他用途
重新发电	提高光伏系统名义功率，通过更换老旧组件 By replacing nents (mainly modules and inverters) with new ones, to enhance its overall performance. 表现
刷新	更换光伏系统旧组件（主要是模块和逆变器） ers)通过新的替代，以提升其整体性能而不会实质性地改变其标称功率，不损害新土地。
重复使用	延长已达到使用寿命的产品或产品组件的寿命 第一次使用结束，再次用它来完成最初的目的构想。
重新使用型光伏模块 ule	光伏组件经过一个运营阶段的结束重新使用 为了延长使用寿命而生成电能。
浪费	任何持有人丢弃或打算丢弃或被要求丢弃的物质或物品。 废弃。
电子垃圾	废弃物，或者更正式地说，电气或电子产品 废弃的电子产品 ( WEEE ) <span style="float: right;">浪费电力</span>

### 关于不同复用测试方法的讨论

The general PV module testing strategy targeted is to minimize testing as much as possible while promoting module safety and quality. A key question that needs to be answered upfront is:

每个单一 是否 给定光伏电站的组件必须进行所有质量保证测试，或者是否可以使用抽样方法代替。实际上，来自大型光伏电站的所有组件可以假设其剩余质量相似，使用样本可能就足够了。这种做法仅限于大型仍在运行的光伏电站，并且所有组件以相似的方式退化，当然不包括退役前的极端天气事件造成的任何损坏。此外，为了证明抽样方法的合理性，首先需要对光伏电站进行基于历史监测和维护数据的总体评估（例如，票务、红外热像报告、逆变器报告的绝缘错误等）。对于来自受损（天气）的电站或已堆放在仓库中的光伏组件，认为进行单个组件测试是不可避免的。

### 模块资格基于抽样方法

采样方法适用于那些可以假定所有模块处于相似状态的太阳能光伏电站。明显的优势是，需要测试的太阳能光伏模块数量会大大减少，从而显著降低时间和成本。另一方面，这是最困难的方法，因为它需要一种程序，在不测量每个模块的情况下，为顾客提供有关模块安全性、质量和性能的充分保证。同时，检查采样方法是否被正确使用，以及是否适用于有正当理由的情况也更加困难。当采样用于从光伏电站内部对可重复使用的模块进行资格认证时，情况则有所不同，即当模块将由同一所有者在另一个地点/应用中使用时。

流程应始终从PV电站的视觉检查和监控数据分析开始，以检查约PLR、可能存在异常的组件串以及逆变器检测到的可能绝缘故障。基于此，以及可能的I-V和绝缘分析，



在停用之前，先检查几个模块字符串（或模块），然后可以做出是否重新使用PV模块的决定。

当前对模块抽样的建议是部分基于“工程与建筑采购最佳实践指南”中关于新植物的检查[62]。在表4中，列出了应用于新模块的不同测试及其采样率。

表4：检查光伏电站的采样率（改编自参考文献[39]）。

测试类型	采样率 ( ISO 2859-1 )		
	为新的光伏模块	模块化可重复使用	
		现场测试	更深技术检查
<b>性能特性测试</b>			
最大功率测定在标准测试条件下 标准技术规范 (Standard Technical Specifications)	G 1	G 1	G 1
效率在低光照度下的损失	S 1	--	(S 1)
电致发光检测	G 1	G 1	G 1
<b>资格测试</b>			
视觉检查	S 3	S 3	S 3
绝缘测试 ( 湿漏测试 )	S 3	S 3	S 3
乙烯-醋酸乙烯酯 ( EVA ) 交联度	S 1	--	(S 1)
粘接强度 EVA/背板	S 1	--	(S 1)
功率损失由光诱导退化 ( LID ) 引起*	S 1	--	--
功率损失由于功率诱导退化 ( PID )	每块2个模块 BOM和测试	--	--
功率损失由光照和升高温度引起 降低退化 ( LeTID )	每块2个模块 BOM和测试	--	--
<b>可靠性测试</b>			
设计适用性 ( 即扩展应力测试 , i. e. 湿 热量, 热循环, 湿度冻, 紫外线暴露, 我 机械负荷, 适用于所有BOM使用	每块2个模块 BOM和测试	--	(2 模块 ) ules per BOM and 测试 )

可以考虑降低对n型技术的重视。

可以考虑减少对具有反PID解决方案的系统进行考虑。

这些基于接受质量限 ( AQL ) 系统，样本率按照ISO2859-1定义。从这个列表中，至少应进行STC最大功率确定、电致发光检查、( 详细 ) 视觉检查以及湿润下的绝缘测试。原则上这些测试都可以在现场进行，但对于多云天气下的EL和模块功率测试，则需要一个移动室内测试设置。更深层次的技术检查



可以在需要进行时，但其中大部分通常在现场是无法完成的。使用G（常规）的采样率高于使用S（特殊）的采样率。以G1为例，对于125,000个模块的工厂来说意味着200个模块，而S3则仅意味着32个模块。当然，这些比率可以根据可再模块进行适应/增加。模块当然应该在整个工厂区域内进行抽样，以获得代表性的样本。在STC最大功率测定时，可以在模块串或使用便携式工具的模块上进行测量，或者在之前提到的移动PV测试设置中进行测量。

关于模块权限，仍未确定哪种变化应成为采样合理性的上限。关于上表中提到的视觉测试，在这种情况下，它应是一个详细的测试，而在植物退役期间，每个模块的主要问题还应进行视觉检查。最后，在湿润条件下的绝缘测试可以用手持绝缘测试仪进行，同时向模块背面喷水。

### 模块资格根据个人测试方法

当光伏电站（部分）受损，通常是由于冰雹或强风等天气事件，模块不会处于相似状态（由于损坏，过去的监测也毫无用处），因此测量每一个模块是唯一的选择。当模块已经被堆放在仓库的货堆上时，情况也是如此。在这种情况下，首先要进行的是对主要问题的视觉检查，然后进行以下室内测试：I-V曲线追踪、干绝缘测试、旁路二极管测试和EL（带有自动评估）。应指出的是，干绝缘测试应比IEC61215标准（提到最大500 V/s的电压上升速率和1-2分钟的停留时间）更快地进行，以提高吞吐量。

为了允许不满足原始系统电压（通常是1000伏或1500伏）绝缘要求的模块的重复使用，或者也可能是为了某些类型的缺陷和修复，PAS草案建议对这些模块引入“降低的最大系统电压”。

模块的回收标签应额外标注，不得覆盖原始标签。在此标签上，应注明其为回收模块、哪家公司已检验该模块回收、（可能降低的）最大系统电压以及已进行的维修（如有）。此外，建议将获得的I-V参数添加到标签上。

该工厂测试线可达到约60模块/小时（或200兆瓦/年）的通过量，而移动测试装置只能达到20模块/小时。因此，在场地对每个模块进行测试不是一个可行的选择。

最近，一些公司开始使用这种测试线。他们将这种个别测试也应用于大型光伏电站中可能适合抽样方法的模块。然而，目前尚不清楚对所有单个模块进行测试在经济上是否可行。

### 草案PAS中的方法建议及未来标准化意见

上述两种测试方法已被纳入PAS的最终草案。然而，目前草案中的PAS建议，当模块打算在市场上销售时，仍需评估每个模块。对于未来，最好为不同的方法创建不同的标准，因为预计采样方法比每个模块的方法需要（更多）时间和讨论。



关于维修，草案PAS（替换旁路二极管、电缆、连接器、接线盒等）中提到了不同的选项并进行了讨论。虽然连接器的更换是一个相对简单的话题，但像更换接线盒这样的其他维修则更为复杂，需要在未来的规范性文件文件中仔细处理。

## 3.2 实地经验与可靠性：案例分析

### 3.2.1 案例研究1：SOLARCYCLE（美国）

SOLARCYCLE，一家领先的光伏回收公司，通过使用500千瓦“二次生命”光伏系统为德克萨斯州奥德萨的回收工厂供电，建立了一种可持续发展方法。该系统由大约1,000块退役光伏板组成，满足了设施大约50%的电力需求。该光伏系统中使用的光伏板来自退役的光伏安装，即由Ørsted和Sunrun提供的住宅、商业和公用事业规模的混合光伏项目，这些项目遍布全国（美国）。设计和建造这样一个由二手光伏模块组成的光伏系统的独特之处在于，光伏模块具有不同的功率和形态因素。



图14：概述SOLARCYCLE的二次利用光伏安装情况，该安装由退役的光伏模块组成，并对它们的剩余功率输出进行了评估。底部右图展示了安装中的PV1阵列，其中展示了带有破碎玻璃但仍能发电的回收光伏模块的例子。



每个退役的PV组件到达SOLARCYCLE设施后，都会经过严格的评估流程。公司对每个PV组件的功率输出、结构耐久性和整体功能性进行测试，以确保其可重复使用。此外，对所有PV组件进行视觉检查，以确保关键部件（玻璃、框架或连接器/接线盒）完好。该公司表示，在本案例研究中，没有进行任何维修任务。另一方面，对每个要重复使用或安装的PV组件进行了闪光（I-V）测试和电致发光（EL）测试。鉴于目前此类全面测试在规模上成本过高，SOLARCYCLE团队旨在尽可能多地收集有关重复使用PV模块的剩余性能和可靠性的信息。在此基础上，仍能正常工作的PV组件被重新用于现场PV系统。那些因性能问题、安全问题或故障/损坏无法修复而无法重复使用的PV组件，则通过SOLARCYCLE的高级回收流程进行处理。

SOLARCYCLE 已经开发出一种回收方法，能够回收太阳能板高达95%的价值，并将其重新投入供应链。这些包括：

- 硅：制造新型太阳能电池的必需品。
- 银：太阳能电池板制造中的关键且宝贵的组成部分。
- 铜、铝：在各种工业应用中得以回收再利用。

提取的材料被重新引入供应链，加强了国内生产能力，并减少了行业对进口资源的依赖。这种重复使用和回收的双重方法与循环经济的原则相符，延长了太阳能板材料的使用寿命，并显著减少了浪费。SOLARCYCLE正在积极扩大其运营，以增强其影响力。

3. 乔治亚州塞达顿设施：自2024年7月起运营的回收场所。从2027年开始，该场所预计每年将使用回收面板回收的材料生产5-6吉瓦的太阳能玻璃。增强光伏制造国内供应链。

4. 亚利桑那州梅萨设施：旨在提高公司处理能力。针对随着全国更多面板退役而增加的回收服务需求进行管理。

在敖德萨设施安装的500千瓦可再生光伏系统不仅通过抵消能源消耗来降低运营成本，还展示了用于商业和工业能源解决方案的再用或二次使用光伏模块的可行性。



**图15：** 另一个角度看到SOLARCYCLE旁边的第二生命期光伏电站及其光伏回收设施

在五到十年内，一旦这个光伏系统的发电能力下降，SOLARCYCLE将倾向于将回收的光伏模块直接转移到其附近的回收生产线，并用未来的原料替换光伏模块，利用现有的系统平衡继续为他们的设施发电。随着公司扩大奥德萨工厂的回收能力至每年一百万块面板，SOLARCYCLE的计划是扩大这个回收光伏发电厂，以满足更多的能源需求。

公司计划在其更多设施中复制奥德萨模式，展示了回收和再利用如何共存以提升资源效率。SOLARCYCLE还希望为围绕循环经济实践和可再生能源系统的回收条例政策讨论做出贡献。

### 3.2.2 案例研究2：2<sup>nd</sup> - 奥地利自行车

第二周期正在应对管理首次生命周期结束（EoL）光伏模块的日益增长挑战，通过创新和自动化的解决方案。随着EoL光伏模块数量的快速增长，迫切需要能够延长这些模块寿命并优化资源效率的过程。为了满足这一需求，公司正在开发一套全面自动化的光伏模块翻新系统，包括清洗和通过先进测试方法进行全面状态评估（见图16）。

翻新过程始于对已使用光伏组件的清洁和小心处理，这是确保准确评估的必要步骤。在此阶段，将绝缘（ISO）测试创新性地整合到清洗站，使得可以对每个组件进行评估。



在清洗过程中模块的电气绝缘，从而节省时间并简化操作。



图16：奥地利阿姆斯特滕第二循环利用项目——飞行员升级线 (<https://www.2ndcycle.at/en>)。

在清洁阶段之后，模块将经历一系列检查和测试程序以评估其状态。这包括：

- **光学检查**：摄像头用于识别可见的表面缺陷，如裂缝或变色。 **紫外线荧光测试**：这可以检测到可能影响模块长期性能的细微表面异常。 **电致发光 (EL) 测试**：EL测试可以识别光伏电池内部的缺陷，如微裂纹和退化，为模块的结构完整性提供详细分析。 **电气性能测试**：这些包括用于确定功率输出和效率的IV曲线测量、用于确保正确接地的框架连续性测试，以及用于确认正确功能并防止运行过程中过热的旁路二极管检查。

通过这种自动化和精确评估，确定了每个模块是否适合再利用或回收。这种做法不仅最大化了有价值材料的回收，还确保只有高质量模块被再利用，支持经济和环境的可持续性。再利用和回收被视为互补策略，对于最大化不断增长的EoL光伏模块流的价值至关重要。保留其原始效率的大部分（通常在85-95%左右）的模块被优先考虑用于再利用。另一方面，回收为损坏或不可再利用的模块提供了有效解决方案。采用双重方法，可以有效地分离出可修复的模块，同时从无法再利用的模块中回收有价值材料。这种综合策略增强了光伏模块流的价值创造，并提高了有效整合这些过程的回收作业的竞争力（图17）。

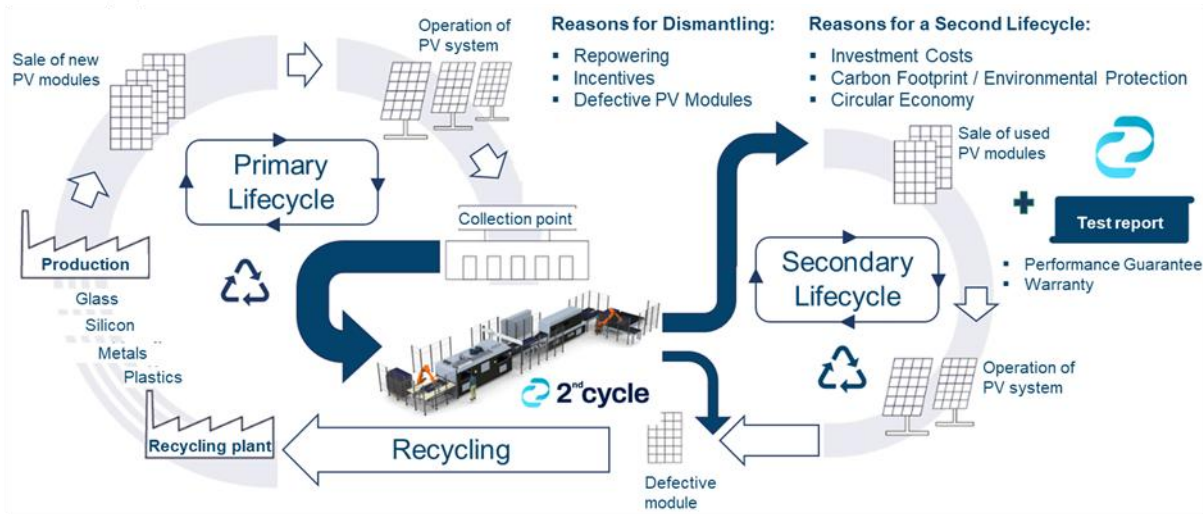


图17：商业方法2<sup>nd</sup> -> 2<sup>nd</sup> 循环。

该行业正逐渐远离通用粉碎方法，转向针对特定部件的回收工艺。粉碎通常使将由不同材料组成的颗粒分离变得具有挑战性，导致降级回收或热处理，从而造成有价值资源的损失。这限制了太阳能技术的环保和经济效益。

第二周期的解决方案通过为光伏组件开发个性化处理系统来解决这一问题。他们的自动化系统集成了光伏类型识别和精确状况评估，使得针对每个组件独特特性的处理成为可能。从批量处理转向个性化评估代表着光伏组件二次利用管理方面的重大进步，强调了升级改造在最大化环境和经济效益中的作用。

### 3.2.3 案例研究 3：Solreed (法国)

Solreed是一家在2024年9月正式成立的法国初创企业，通过CEA的麦哲伦初创企业加速器项目创立。Solreed专注于光伏模块的检测、维修和再鉴定，以便再次利用，旨在最终延长其使用寿命并减少对环境的影响。Solreed并非用昂贵的新进口缺陷面板（通常在亚洲定制）来替代，而是通过翻新和将光伏模块重新融入能源市场作为二手光伏产品，提供了一个可持续、本地化且具有经济可行性的替代方案。这种方法不仅减少了浪费，而且通过减少对外国制造商的依赖，增强了欧洲的能源主权。

索利德公司的使命是建立一种创新且可持续的光伏组件循环经济模式。通过持续的研发活动，公司致力于根据以下行动建立创新且可持续的光伏组件循环经济模式：

- 开发能够实现实时故障检测、提高维护效率和降低大规模太阳能农场停机时间的高精度诊断工具；
- 实施工业规模维修流程，恢复光伏模块的运行可靠性和使用寿命；
- 验证和标准化一个全面的质量保证框架，用于重新评估可重复使用光伏模块，确保符合严格的行业标准。



- 与能源供应商、政策制定者和可持续发展组织建立战略合作伙伴关系，以推进对光伏组件再利用的监管认可。

Solreed 声称其技术可能覆盖至少 80% 的常见光伏组件故障维修，通过利用创新工具对光伏电站进行实时监控和诊断，一旦发生故障便迅速定位和分类组件故障。与依赖年度无人机检查以识别故障光伏组件的传统方法不同，Solreed 的光伏诊断框架专注于通过人工智能和不断增长的电气故障特征数据库进行的持续性能跟踪，从而实现远程诊断和干预。

一旦诊断出模块，Solreed采用示范规模（目前阶段）的修复和表征步骤来恢复其操作效率。迄今为止，包括以下内容：i) 更换损坏的旁路二极管和接线盒；ii) 密封和结构性加固，以防止进一步的环境暴露引起的退化；iii) I-V表征和EL/LIT图像，以验证修复后的光伏模块满足性能和安全标准或识别和量化残余的物理/性能退化。此外，Solreed正在开发现场修复单元，消除对昂贵的模块运输的需求，并计划到2025年在两个地方进行示范性运行。

Solreed已在现实环境条件下证明了其能力，与ENGIE Green合作修复模块，并与格勒诺布尔市部署了首个太阳能回收试点工厂。一个重要的里程碑是在CEA INES设施内最近建立了一条试点维修生产线，这些实验表明，所提出的检测-修复-回收方法可以将光伏组件的使用寿命再延长至少10年。

在最近的一个由地区资助的项目中，Solreed、ENGIE Green、CEA以及法国一家专注于回收、翻新和二手销售家电和电子设备的社交企业网络Envie合作，旨在通过诊断故障、应用标准修复协议以及测试大规模翻新流程来评估废弃光伏组件的再利用可行性。该倡议分为三个主要阶段。第一阶段是确定二手光伏组件的来源，包括能源公司和回收机构运营的光伏和储能站点报废的光伏组件。第二阶段是对模块缺陷进行详细研究，并建立修复方法。第三阶段也是最后阶段，是一场为期三周的全规模加工活动，在此期间，共检查、修复和测试了158个组件。结果为这种过程的技术可行性提供了洞察，同时也涉及到了扩大这一方法所需的物流和经济考虑因素。

退役PV模块的识别发生在多个PV站点。其中一个主要来源是一个公用事业规模的PV电站，其中存在缺陷的模块根据红外线检查定期被移除。最常见的故障包括旁路二极管短路和结构损坏，尤其是在过去火灾事件影响到的区域。另一个关键来源是一个收集来自不同PV电站的PV模块进行回收的设施。一些PV模块遭受了严重冰雹，导致电池产生微观裂纹，仅在EL成像下可见。在某些情况下，第一代PV模块在户外长期储存导致显著退化，包括水分渗透、连接器腐蚀和框架损坏。

在此初步评估之后，选定了两种具体的PV模块类型/型号进行详细研究。第一种类型表现出反复发生的二极管故障问题，导致电压和功率输出部分损失。第二种类型显示出更严重的缺陷，尤其是尺寸不足的旁路二极管过热，在许多情况下，导致接合箱内部塑料组件熔化。预研究证实了二极管更换是必要的。



可以在第一模块类型（图18）中恢复电气性能，尽管额外的红外成像揭示了与某些焊点过热相关的潜在风险。第二模块类型需要更全面的维修策略，用更高额定值的元件更换故障的二极管，以防止未来过热。

在大规模处理活动中，第一种模块类型展现了高修复成功率。在105个经过处理的单元中，有101个成功恢复了到正常工作条件，这代表着：**96%复用率**。这些翻新的模块通过了所有电气和安全测试，随后获准在市政光伏能源项目中再次使用。然而，第二种模块类型却面临重大挑战。在104个处理过的模块中，只有19个（约11%）可以验证用于再次使用。靠近接线盒的焊缝普遍存在缺陷，导致频繁的电气断开和潜在的过热风险。尽管尝试了修复方法，但热循环测试表明，在运行条件下缺陷可能会再次出现。因此，大多数这些模块被暂时搁置，等待重新评估修复方法以及进一步的资格/安全检查。基于对光伏模块修复前后电气特性的统计分析，第一种类型的光伏模块也展示了其剩余功率输出的较低变化，这也表明其修复的高可重复性（图19）。

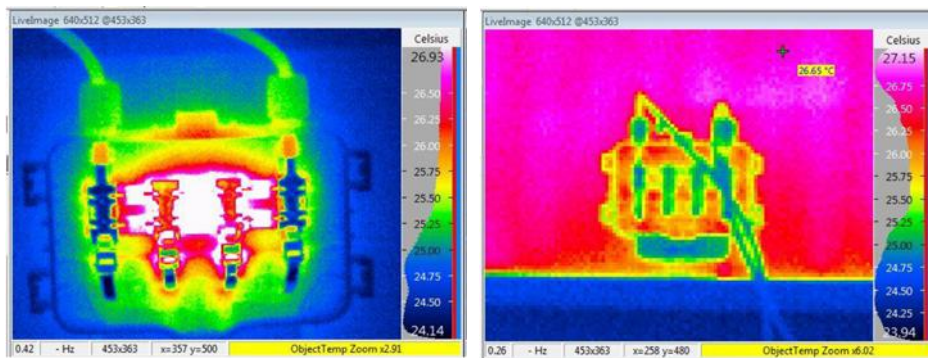


图18：LIT图像修复前（左侧）和（修复后）旁路二极管故障示例，表明修复后的光伏组件已完全恢复正常温度和电性能。

测试和验证过程依赖于闪光测试（IV表征）、EL/LIT成像和潮湿条件下的泄漏电流测量相结合。这种多步骤表征方法被证明是确保翻新模块可靠性和性能的有效途径。此外，翻新团队开发的数字追踪系统允许系统地记录每个模块的维修历史和电气特性，确保整个过程中的可追溯性。

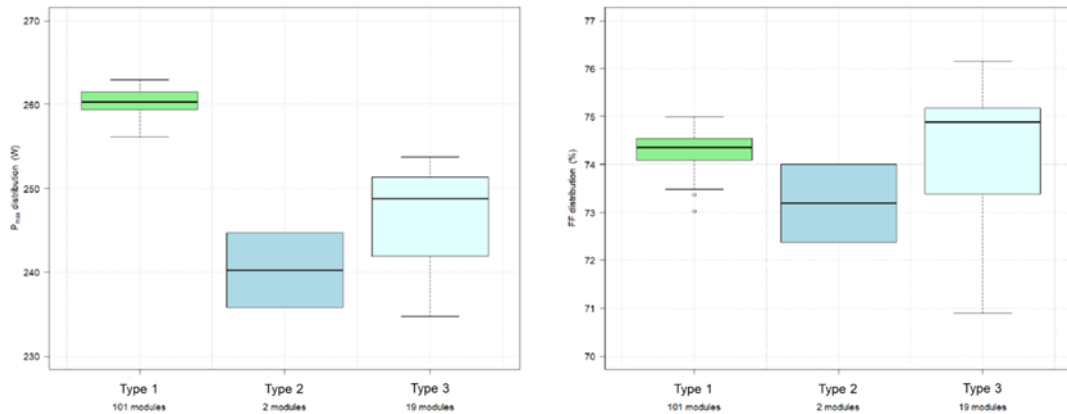


图19：统计分析了案例研究中三种类型光伏模块的修复后（残余）光伏功率输出和填充因子的分布，表明类型1模块在修复后表现出高度一致的电性能，而类型2和3模块则显示出显著的变异性，突显了焊点缺陷带来的挑战。

该具体项目/案例研究成功验证了一种修复光伏组件的方法。一种模块类型的高成功率表明，在提前识别合适的批次的情况下，大规模再利用退役太阳能电池板是可行的。然而，该研究也突显了在扩大此方法之前必须解决的问题。组件的储存和运输质量在修复成功中发挥了关键作用，因为处理不当的电池板额外受损，降低了它们的修复潜力。此外，在第二种模块类型中观察到的广泛焊点缺陷表明，某些故障模式需要比最初预期更先进的修复技术。

从运营角度来看，该协议（见图20）展示了结构化工作流程和人员适当培训的重要性。维修和测试流程得以成功实施，但在未来的商业环境中，可能需要采取额外措施来优化效率。该研究还重申了在翻新过程中涉及来自专业康复项目的人员的价值。经过充分培训，没有先前光伏技术经验的人员能够有效地为模块检查、维修和测试做出贡献。还需要进一步研究来确定受焊接缺陷影响的模块是否可以可靠地修复。如果找到可行的解决方案，它将显著提高二手光伏模块的整体回收率。与行业合作伙伴的讨论正在进行中，可能启动后续的技术研究，以探索潜在的维修策略。

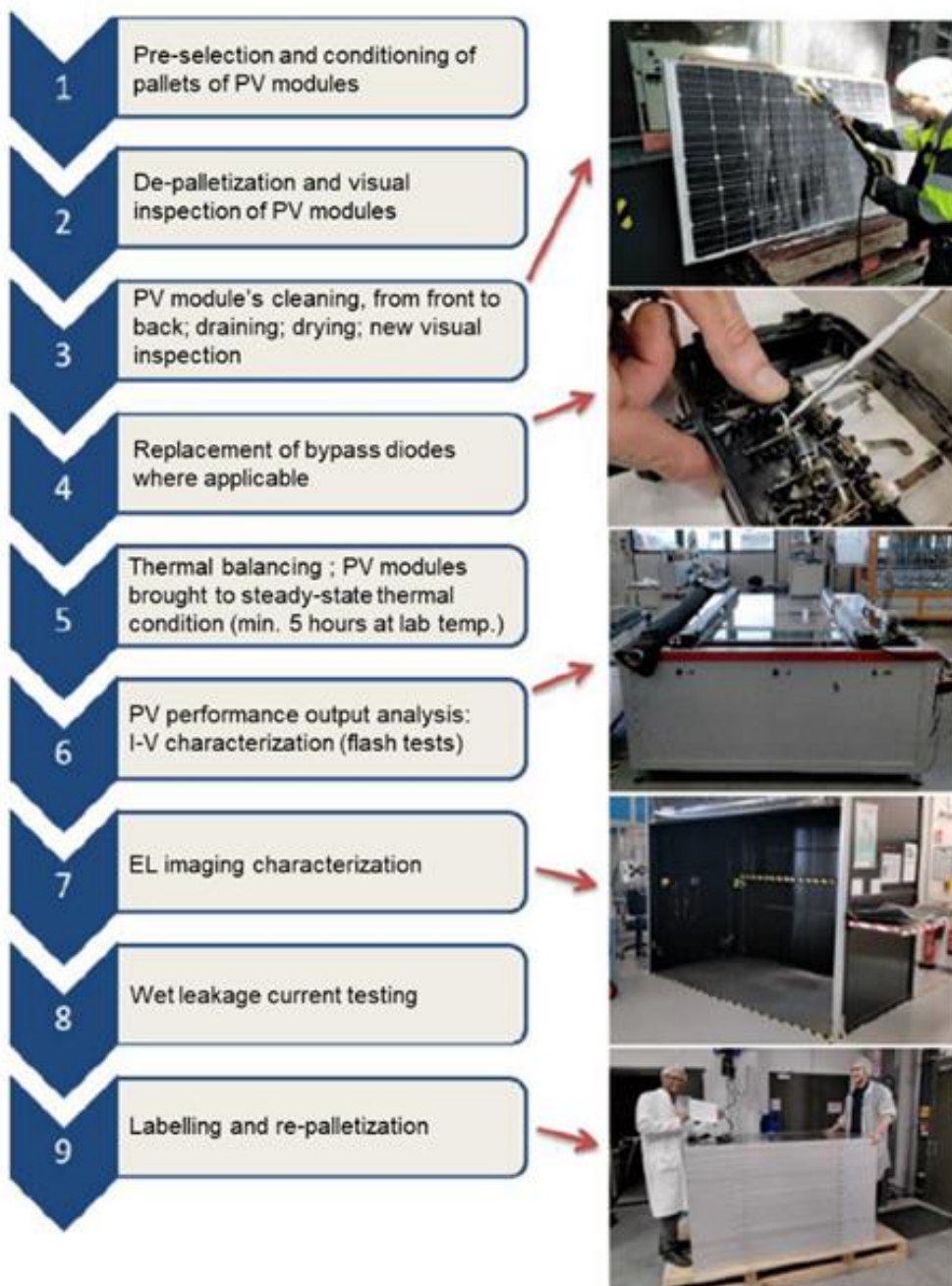


图20：PV重用协议概述：包括由Solreed和CEA研究人员研究的PV分类、诊断、修理以及测试/表征步骤。

### 3.2.4 案例研究 4：CIRCUSOL 演示瓦尔斯兰（比利时）

在欧盟“地平线2020”计划资助的CIRCUSOL（太阳能行业循环商业模式）项目框架下，实施了几项示范项目（示范场所），以展示实施光伏和电池行业产品-服务系统（PSS）商业模式的真实场景。CIRCUSOL中提出的PSS概念的基本思想是延长光伏系统组件的使用寿命。



特别是光伏组件和电池，通过回收利用、翻新和提升资源效率。该项目不是销售太阳能设备，而是提供太阳能光伏电力作为服务，降低财务壁垒并提高可及性。

在其示范项目中，比利时的Waasland合住项目一直在住宅环境中使用和测试二次光伏组件和电池储能，评估其技术可行性和经济可行性（图21）。Waasland合住项目包括22套住宅单元，包括公寓和排屋，重点关注集体太阳能的生产和消费。与单独的屋顶安装不同，它采用**集中式二次生活光伏系统**。该方案已实施，降低了安装复杂性，并确保了高效的能源分配。项目目标是实现可再生能源的最大自给自足，通过回收退役的太阳能电池板来最小化浪费，并探索由Futech（CIRCUSOL合作伙伴）运营的基于服务的太阳能能源模式的可行性，居民为产生的电力付费，而不是拥有设备。



图21：左侧：瓦兹兰德演示建筑物的卫星视图，及其屋顶上的二次利用光伏系统。右侧：搭载二次利用光伏和储能系统的建筑外部视图。

瓦兹兰德二次生命光伏系统由231个来自已退役商业光伏安装的二次生命光伏组件组成（见图22）。这些面板经过EL测试以检测缺陷并确认其持续效率和安全。总装机容量为59.91千瓦时，足以满足社区大部分电力需求。

一个主要挑战是二次利用电池板的电气特性存在差异，因为它们来自不同的来源。这需要额外的最大功率点跟踪（MPPT）控制，使逆变器能够在模块电压和输出存在差异的情况下优化性能。

原始逆变器的容量为10 kVA，安装时受到佛兰德法规的限制。然而，最近的一次法规更新允许扩展，导致将原始逆变器更换为20 kVA的混合逆变器，从而提高了系统性能和能源分配。

为了优化能源使用，实时监控系統提供了关于能源消耗和太阳能生产的每15分钟间隔的数据。这有助于最终用户跟踪性能，并调整使用模式以实现最高效率。



图22：屋顶上安装的第二生命期光伏系统的视图，展示了再利用光伏模块的多样性，包括光伏技术和功率输出。

为增加Waasland二手光伏系统自用电力，安装了一个来自SNAM ( Société Nouvelle d’Affinage des Métaux ) 的21 kWh二手锂离子电池。此电池存储多余太阳能，用于发电低峰期，提高能源独立性并减少对电网的依赖。电网并网需得到地方电网运营商Fluvius的批准。一项可行性研究证实，扩展后的20 kVA混合逆变器符合电网稳定性要求，使得电池储能和光伏系统能够协同优化运行。电池系统支持多个关键功能，包括：i) 增加太阳能自用比例，减少从电网购买电力的需求；ii) 能源套利，在电价高峰时使用存储的太阳能；iii) 通过有控制地充放电保证电网稳定。

二次利用光伏组件和电池显著减少电子垃圾，最小化资源开采，并降低制造新组件产生的二氧化碳排放。这种循环方法延长了太阳能技术的使用寿命，提高了可持续性。从经济角度来看，PSS模式稳定了居民的电费，保护他们免受市场价格波动的影响。此外，集中管理提高了系统效率，最大化了用户和服务商的投资回报。

关键绩效指标是项目的第一阶段：

- 年度光伏发电量：约28.2万千瓦时
- 总电力消耗：84万千瓦时
- 并网电量：3.5万千瓦时
- 自用率：88%
- 自给自足程度：29%

瓦塞尔兰示范项目在实施二次生命太阳能技术方面突显了几个关键挑战。一个主要问题是：**技术兼容性**，因为将次生太阳能电池板整合到系统中通常需要复杂的电力管理系统来处理其电气性能的变异性。此外，**立法障碍** 构成重大障碍；适应不断变化的法规对于允许更大逆变器容量和确保符合电网标准至关重要。最后，the **经济循环电池** 仍然值得关注，因为新旧电池之间的成本差距仍然相对较小——凸显了对支持二次能源储存解决方案推广的针对性激励措施的需求。



## 4 主要结论

本节概述了从对2的评估中得出的技术结论。nd -> nd 生命光伏模块，特别关注维修程序、再认证实践、新兴的再利用商业模式和政策激励。研究结果旨在支持在IEA-PVPS任务13框架内的结构化讨论和前瞻性规划。

### Second Life PV市场现状

二次生命周期光伏市场仍然分散且发展不足。缺乏统一的资格标准、标准化的测试协议和维修指南，极大地限制了产品透明度、可比性和对再利用产品的信任。没有明确的技术标准，二次生命周期光伏模块在广泛采用、保险覆盖和银行能力方面面临障碍。展望未来，与国际框架（例如IEC标准）相一致以及开发健全的通过/不通过标准对于确保安全、可靠性和可追溯性至关重要。

### 维修可行性及限制

光伏组件的维修——无论是解决焊点失效、背板开裂还是接线盒问题——已被证明在技术上可行。然而，现场经验表明，维修往往劳动密集、成本高昂，且没有自动化难以规模化。案例研究表明，再利用的成功率差异很大：某些缺陷，如旁路二极管失效，实现了>90%的恢复率，而具有系统性焊接缺陷的组件的成功率低至10-15%。因此，维修最好仅限于特定情境，如偏远地区或物流使更换变得不可行的地方。对于更广泛的市场，基于测试和分类的再利用策略通常更经济高效。

### 测试与自动化分诊作为推动者

自动化的IV特性分析、电致发光成像和绝缘电阻测试系统为大规模分类提供了一条可扩展的道路。这种方法能够高效地将物品分类为“再利用”、“维修”或“回收”三个流程，从而最小化劳动力成本并确保更高的一致性。空中检查的进步、基于AI的诊断和移动测试实验室可以进一步降低成本和风险，同时提高产量。建立集中或半自动化的再利用中心是增强二手光伏产品经济可行性的有前景的战略。

### 重新认证

再认证成为大规模部署和第二生命期光伏板经济可行性的基石。稳健、透明和标准化的再认证流程对于确保安全、性能可预测性和市场信心至关重要。除了技术保证外，再认证还能通过降低投资者、保险公司和系统业主的不确定性，推动新价值链的发展，从而提高其银行信用。自动化和可扩展的再认证框架，与剩余性能的清晰分类和文件记录相结合，是促使第二生命期光伏从利基应用转型为具有实际经济和就业机会的成熟市场段的关键推动者。



## 田野经验与示范项目

试点项目，如瓦尔斯兰示范项目，证实了二次使用的光伏和电池系统能够在能源自主、减少排放和抵御电价波动方面带来切实的利益。然而，它们也突显了持续的挑战：异质模块批次的技术兼容性、不断变化的电网合规要求，以及与新产品相比，二次使用电池的经济优势有限。这些经验凸显了需要强有力的系统集成指南和监管灵活性，以促进更广泛的应用。

## 政策和经济动力

经济效益仍然是决定性的瓶颈。维修和再利用与新型光伏组件成本的快速下降竞争，使得财务激励或生态贡献对建立再利用市场至关重要。由Soren协调并由生态资金支持的法国模式表明，政策框架可以显著提高再利用率——从现在的约1%提高到几年内收集模块的5-7%。这强调了监管清晰、资金方案和循环经济规定将是扩大二次生命周期光伏解决方案的关键。

## 建议未来行动措施

1. **标准化**：快速制定基于IEC的复用模块复检和安全的技术规范。2. **基础设施**：支持在自动化测试中心和物流网络方面的投资，以实现高效的收集和再分配。3. **市场激励**：介绍金融工具（生态费用、补贴、税收优惠）以缩小新旧模块和电池之间的成本差距。4. **目标修复**：鼓励对高回报案例进行选择性修复，同时优先考虑自动化分诊以提高可扩展性。5. **合作**：推动研究机构、产业和政策制定者之间的国际合作，以加快学习和协调。

总结来说，2<sup>nd</sup> -> 1<sup>st</sup> PV具有明显潜力为循环经济目标做出贡献，减少浪费，并延长现有太阳能资产的价值。实现这一潜力将需要**技术资格的协同进步、可扩展的重复利用基础设施和有利的政策框架**。没有这些，二手市场可能会继续保持细分和碎片化。



## 参考文献

1. Tsanakas I, Oreski G, Eder G, Gassner A, van der Heide A, Ariolli D, Oviedo Hernandez G, Moser D, Wambach K. 向着可重复使用的光伏：近期进展的视角  
*第四十一届欧洲光伏太阳能 实践与未来挑战*。WIP-慕尼黑。  
*会议与展览* 2024, DOI : 10.4229/EUPVSEC2024/5EP.1.3. 2. Tsanakas IA, Oreski G, Eder G, Gassner A, van der Heide A, Ariolli DMG, Hernandez GO, Moser D, Wambach K. 向即用型光伏迈进：近期广告的视角  
*高级能源可持续性研究 Vances, Practices, and Future Challenges* 2024, DOI : 10.1002/aesr.202400237
3. Aghaei M, Fairbrother A, Gok A, Ahmad S, Kazim S, Lobato K, Oreski G, Reinders A, Schmitz J, Theelen M, Yilmaz P, Kettle J. 降解与失效现象综述  
*可再生能源评论 在光伏模块中*。2022; **159** 112160, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112160. 4. Kettle J, Aghaei M, Ahmad S, Fairbrother A, Irvine S, Jacobsson JJ, Kazim S, Kazukauskas V, Lamb D, Lobato K, Mousdis GA, Oreski G, Reinders A, Schmitz J, Yilmaz P, Theelen MJ. 光伏模块中技术特定的衰减审查：理解成熟技术可靠性提升的方法  
*光伏研究与应用进展 吉斯可以提升新兴技术*。2022; **30(12)** 1365–92, DOI : 10.1002/pip.3577. 5. Eder GC, Voronko Y, Oreski G, Mühleisen W, Knausz M, Omazic A, Rainer A, Hirschl C, Sol. Sonnleitner H. 裂纹聚酰胺背板老化模块的错误分析。  
*能源材料. 太阳能电池* 2019; **203** 110194, DOI : 10.1016/j.solmat.2019.110194. 6. Uličná S, Owen-Bellini M, Moffitt SL, Sinha A, Tracy J, Roy-Choudhury K, Miller DC, Hacke P, Schelhas LT. 基于PVDF的光伏材料降解机理研究  
*科学报告 背板* 2022; **12(1)** 14399, DOI: 10.1038/s41598-022-18477-1. 7. Ali BM, Al-Musawi TJ, Mohammed A, Fakhruideen HF, Hanoon TM, Khurramov A, Khalaf DH, Algburi S. 可持续预防维护和更换策略  
*Un-conv. 资源* 2025; **6** 100170, DOI : 10.1016/j.unconvres.2025.100170. 8. Moser D, Del Buono M, Jahn U, Herz M, Richter M, Brabandere K de. 光伏价值链中技术风险的识别及经济影响量化。  
*进程光伏* 2017; **25(7)** : 第592-604页, DOI: 10.1002/pip.2857. 9. Nieto-Morone MB, Rosillo FG, Muñoz-García MA, Alonso-García MC. 提高光伏组件可持续性：对西班牙部分修复组件的缺陷分析  
*J. 清洁产品 光伏电站* 2024; **461** 142575, DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142575. 10. 博卡恩 G, 埃德尔 G, 雅多 E, 沃隆科 Y, 穆赫伊森 W. 使用流动硅酮密封剂修复和预防维护具有退化背板的太阳能电池板。  
*光伏研究与应用进展* 2021, DOI : 10.1002/pip.3492. 11. Voronko Y, Gabriele E, Breitwieser C, Mühleisen W, Neumaier L, Feldbacher S, Oreski G, Lenck N. 破裂背板式光伏组件的维修方案。2021 (待发表) : 1-13, DOI: 10.1002/ese3.936. 12. Voronko Y, Eder GC, Breitwieser C, Mühleisen W, Neumaier L, Lenck N, Feldbacher S, 2021年IEEE第48届光伏研讨会 Oreski G. 聚酰胺背板裂缝修复。在：  
*际分析师大会 (PVSC) IEEE; 6202021, pp. 507–509. 13. Zhou Q, Chen H, Uno K, Wu X. Photovoltaic module back-sheet修复粘胶带的粘合工艺及其应用 (WO/2019/024165); 2017.*



14. 托斯 MP, 范萨rk W. 玻璃缺陷玻璃玻璃实验修复技术  
 太阳能材料, 太阳能电池 光伏组件——技术经济分析 2023;  
**257** 112397, DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112397. 15.李K, 赵SB, 尹J, 张HS. 解决晶体硅光伏组件焊接不良引起的电阻性焊点 (RSB) 热点简化的恢复过程  
 能量 使用树脂。 2022; **15(13)** 4623, DOI: 10.3390/en15134623. 16. Rosillo FG, Nieto-Morone MB, Esteva JB, Soriano F, Temprano S, González C, Del Alonso-García MC. Using ribbon bus bar interruptions to repair photovoltaic modules  
 可再生能源 非侵入式中断位置 2024; **223** 120012, DOI: 10.1016/j.renene.2024.120012. 17. Félix G. Rosillo, Maria Beatriz Nieto-Morone, Richard Russell, Jesús Marín Muñoz, Juan Rodriguez Sánchez, Javier Yáñez Gonzalez, María del Carmen Alonso-García. Ad-  
 Re- 重新 光伏组件中带状中断定位与修复的进展  
 可再生能源 2025; **246** 122828, DOI: 10.1016/j.renene.2025.122828  
 Rinovasol集团: 未来的能源生成 18. 丽诺索尔集团 可用在:  
<https://www.rinovasol.com/about-us>.  
 光伏组件维修: 通过光伏组件快速恢复发电 19. 第二个解决方案  
 模块维修 可在以下链接获取: <https://www.secondsol.com/en/services/reparaturmodule.htm>.  
 SC重新翻新背板修复 20. SC翻新。 可在以下链接获取: <https://www.sc-refit.com/>.  
 修复包 21. 新能源系统服务。 Available at: <https://www.junctionboxrepair.com/zh-Hans/>. 22. 巴森 R, 琼斯 L, 阿兹米 MA, 琼斯 M, 麦坎 M, 厄恩 M. 推进循环经济  
 Sol. 英文。  
 硅光伏产业概述: 光伏组件再利用的现状与挑战。  
 能量材料. 太阳能电池。 2025; **292** 113816, 数字对象唯一标识符: 10.1016/j.solmat.2025.113816  
 IEA-PVPS任务12 - 太阳能光伏可持续性 23. 可在以下链接获取: <https://iea-pvps.org/research-tasks/pv-sustainability/>.  
 光伏板的维修、再利用、再认证和回收: 任务组15 24. 可用在:  
<https://www.pvqat.org/project-status/task-group-15>.  
 IEC TR 63525 ED1 太阳能电池组件的再利用与循环经济 25. IEC TC 82. 可在此处获取: [https://www.iec.ch/dyn/www/lf?p=103:38:411937478880787::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_APEX\\_PAGE,FSP\\_PROJECT\\_ID:1276,23,120892#](https://www.iec.ch/dyn/www/lf?p=103:38:411937478880787::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1276,23,120892#). 26. Liu L, Lu X, Zhang Z, Chen L. 太阳能电池背板修复方案;  
**H01L31/18(CN104538491B)**; 2017.  
 修复裂纹背板用的胶带 27. 威尔胡恩 M.; 2021.  
 Rodriguez-Araujo J, Garcia-Diaz A. Automated inline defect classification and localization  
 2014年第23届IEEE国际研讨会 光电池激光修复中的离子应用。在:  
 工业电子学 (ISIE) IEEE; 2014, 第1099-1104页. 29. Mistic B, Pieters BE, Rau U. 不完整背面接触绝缘的电修复 (P1)  
 IEEE光伏杂志 在Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>光伏薄膜模块中。 2015; **5(4)** 1197-205, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2422137. 30. Mistic B, Pieters BE, Rau U. Thermal Repair of Incomplete Back Contact Insulation (P1) in  
 J.太阳能工程 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>光伏薄膜组件 2015; **137(6)** DOI: 10.1115/1.4031214  
 M 砌场子字符串失败: 如何避免和缓解? 31. 马丁内斯·冈萨雷斯·G.  
 陈; 2023年  
 修理修补成为 32. 可在以下链接查看: <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/repair-mend-to-be-38400>. 33. Beaucarne G, Lima Garcia J, Jadot E, Kenney K, Gassner A, Eder G. 加速老化  
 欧盟光伏展 《流动硅橡胶密封剂背板修复研究。WIP-慕尼黑。在:》  
 2023 .



- ReNew PV：用于提高光伏组件使用寿命的涂层* 34.  
 损坏的背面薄膜 可在以下链接找到：<https://projekte.ffg.at/projekt/5123552>。35. IEC. 光伏 (PV) 模块安全认证——第2部分：测试要求；光伏 (PV) 模块安全认证——第2部分：测试要求； **27.160 - 太阳能工程设计 (IEC 61730-2:2016)** 2016年。可在以下链接获取：<https://web-store.iec.ch/publication/25680>。36. IEC. 地面光伏 (PV) 组件——设计鉴定和型式批准——第2部分：测试程序：地面光伏 (PV) 组件——设计鉴定和型式批准——第2部分：测试程序 **27.160 - 太阳能工程 (IEC 61215-2:2016)** 2016年。可在以下网址获取：<https://webstore.iec.ch/publication/24311>。
- 监测光伏组件的电性能和材料稳定性* 37. 加斯纳 A.  
*修复/涂层背板* TU Wien; 2022. 38. Tsanakas JA, van der Heide A, Radavičius T, Denafas J, Lemaire E, Wang K, Poortmans J, Voroshazi E. 向光伏模块的循环供应链迈进：今日挑战的回顾  
*光伏研究与应用* 光伏回收、翻新和再认证的语言。2020;  
**28(6)** 454-64, DOI: 10.1002/pip.3193.39, van der Heide A, Godinho Ariolli DM, Hernandez GO, Noels S, Clyncke J. 太阳能电池板再利用：标准化进展与案例分析学习。WIP-Mu-  
*第四十届欧洲光伏太阳能会议和展览会* nich 2023, DOI: 10.4229/EUPVSEC2023/5DO.15.6. 40. 沃尔茨贝格J, 卡彭特A, 希思GA. 社会因素在太阳能光伏成功中的应用角色  
*自然能源* 伏打电池再利用和回收项目。2021; **6(9)** 913-24, DOI: 10.1038/s41560-021-00888-5。  
 41. Nyffenegger R, Boukhatmi A, Radavičius T, Tvaronavičienė M. 欧洲光伏产业循环程度如何？关于当前循环经济障碍的实践见解  
*J. 清洁产品* 模糊和目标。2024; **448** 141376, DOI: 10.1016/j.jcle-pro.2024.141376。  
*Prog. Pho-*  
 42. 绿 M.A. 硅太阳能电池板：前50年的简史。  
*伏打电学研究与应用* 2005; **13(5)** 447-55, DOI: 10.1002/pip.612。  
*修理权：委员会引入新的消费者权益* 43. 欧洲委员会  
*简单诱人的维修* 可在以下链接找到：[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1794](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1794); 2023. 44. Wanghofer F, Wolfberger A, Oreski G, Neumaier L, Schlögl S. 调查expanda-  
 《国际粘接杂志》粘接 光伏模块中可逆粘合剂使用的填充剂。2023年； **126** 103454, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103454。45. Ehrhardt D, van Durme K, Jansen JF, van Mele B, van den Brande N. 用于环境应用的可逆Diels-Alder键自修复UV固化聚合物网络  
*聚合物* 条件 2020; **203** 122762, DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122762  
*将公平和循环标准引入太阳能产业和市场* 46. 生物圈太阳能 .  
 Available at: <https://www.biosphere.solar/>. 47. Dupuis J, Saint-Sernin E, Nichiporuk O, Lefillastre P, Bussery D, Einhaus R. NICE mode-  
*2012 38th* 太阳能技术 - 从概念到量产：10年回顾。在：  
*IEEE光伏专家会议* IEEE; 2012, 第3183-3186页。  
*预备研究* 48. Dodd N, Espinosa Martinez M, Van Tichelen P, Peeters K, Soares A.  
*太阳能光伏组件、逆变器及系统* 2020. 49. Polverini D, Dodd N, Espinosa N. 光伏对环境影响的潜在  
*监管方法：预期改进和技术创新的影响*  
*过程* 2021; **29(1)** 83-97, DOI: 10.1002/pip.3344。  
*信任PV - 太阳能光伏，性能与可靠性* 50. 大卫·莫泽 可在以下网址找到：<https://trust-pv.eu/>。



生命终结管理：最佳实践指南：2024年报告 51. 太阳能欧洲；2024. 52. Ascencio-Vásquez J, Liu H, DeFreitas Z. An Automated Flexible Data-Driven Ensemble Approach for Estimating PV Module Degradation and Comparing Against Warranty Levels. 4 pages / 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; 1413-1416 2022, DOI: 10.4229/WCPEC-82022-4BV.5.29. 53. Kumar V, Maheshwari P. Advanced analytics on IV curves and electroluminescence imaging techniques for PV modules. *程序光伏研究* 光伏模块的年龄使用机器学习算法。 *Appl* 2022; **30(8)** 880-8, DOI: 10.1002/pip.3469. 54. 范德海德 ( van der Heide ) A, 图斯 ( Tous ) L, 万巴赫 ( Wambach ) K, 波尔特曼斯 ( Poortmans ) J, 克莱克 ( Clyncke ) J, 沃罗沙齐 ( Voroshazi ) E. 废旧光伏组件的再利用：机遇和技术指南。4页/第38届欧洲光伏太阳能大会和展览；2021年，670-673, DOI: 10.4229/EUPVSEC20212021-4CO.4.2. 55.埃德尔 ( Eder ) GC, 林 ( Lin ) Y, 沃罗诺科 ( Voronko ) Y, 斯波尔贾里奇-卢卡奇 ( Spoljaric-Lukacic ) L. 现场识别材料成分 *能量* 光伏组件与移动光谱仪器的配置位置。 2020; **13(8)** DOI: 10.3390/en13081903. 56. Stroyuk O, Buerhop-Lutz C, Vetter A, Hauch J, Brabec CJ. 利用近红外吸收光谱对硅太阳能电池模块聚合物组件进行无损表征。 *太阳能源材料, 太阳能电池* 透光率 ( NIRA )。 2020; **216** 110702, DOI: 10.1016/j.sol-mat.2020.110702. 57. 奥维耶多·埃尔南德斯 G, 戈德因霍·阿里奥尔利 DM, 艾内里斯·帕埃斯 PS, 奇亚托雷 PV. 趋势与程序能源 *光伏运维创新* 2022; **4(4)** 42002, DOI: 10.1088/2516-1083/ac7c4f. 58. 赫尔曼·W, 埃德·G, 法恩宁·B, 弗里森·G, 孔特格斯·M, 库比策克·B, 昆茨·O, 刘·H, 帕尔- *光伏 ( PV ) 电站使用移动设备的资格* vliet D, Tsanakas I, Vedde J. 译为：弗利特D, 察纳卡斯I, 维德J。 *测试设备：IEA-PVPS T13-24：2021报告*；2021. *欧洲议会2012/19/EU指令* 欧洲联盟 *关于2012年7月4日理事会关于废物电气和电子设备的决议*；2012. *Serendi PV - 平稳、可靠、易于派遣的太阳能光伏整合* 60. 爱德华·罗曼 *网格* . 可在以下链接找到：<https://serendipv.eu/>. 61. Tsanakas JA, Stepec M, Marechal P, Ha D-L. 从像素到洞见：一款软件原型 *41st European Pho-* 为AI驱动型光伏电站全面诊断而设计的型号。WIP-慕尼黑。 *托尔瓦特太阳能会议及展览会* 2024, DOI: 10.4229/EUPVSEC2024/4BO.7.1. *工程技术、采购与建设最佳实践指南* 62. 欧洲太阳能。 . 版本2；2021年。

