



风暴下的太阳III

抗飓风暴露的地面光伏系统最佳实践更新



报告 / 2025年6月



2025年7月格林纳达卡里亚库
岛失败的太阳能安装。 图源
：克里斯托弗·伯格斯，RMI

“强大的太阳能丰富性加上年度飓风脆弱性是美国维尔京群岛必须面对的现实，以便全面缓解我们历史上依赖化石燃料的电力系统所固有的能源负担。随着我们进一步依赖太阳能成为我们集中式和分散式能源系统的骨干，坚持5级抗飓风安装标准至关重要。建造能够抵御不可避免的飓风的太阳能系统，确保了太阳能的“蓝天”运营优势继续支持我们的社区，尤其是在最黑暗的日子之后。”

— 肯莱·弗莱明，美属维尔京群岛能源办公室主任

作者与致谢

作者

克里斯托弗·伯吉斯 克里斯·尼德汉姆 方位咨询服务
菲德尔·内文森·弗兰克·奥德豪森 方位咨询服务

作者按字母顺序排列。除另有注明外，所有作者均来自RMI。

贡献者

迈克尔·范斯，安桑特能源
科尔·奥布莱恩，美国保险商实验室 (UL)
安德鲁·理查兹，光照电力加勒比
凯尔·弗莱明，维尔京群岛能源办公室

联系人

克里斯托弗·伯格，cburgess@rmi.org

版权和引用

克里斯托弗·伯格斯，弗兰克·奥德豪森，克里斯·尼德汉姆和菲德尔·内文森，*风暴下的太阳能III：针对有飓风暴露风险的耐用地表光伏系统的最佳实践更新*，RMI, 2025, <https://rmi.org/insight/solar-under-storm> .

RMI重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许利益相关方通过知识共享CC BY-SA 4.0许可证来参考、共享和引用我们的作品。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> .

联合岛（圣文森特和格林纳丁斯）2025年7月安装失败的太阳能装置封面照片，由Frank Oudheusden提供，Azimuth Advisory Services。

所有图片均来自istock，除非另有说明。



关于 RMI

落基山脉研究所（RMI）是一家成立于1982年的独立、非党派非营利组织，通过市场驱动的解决方案转变全球能源系统，为所有人创造繁荣、有韧性、清洁的能源未来。通过与企业、政策制定者、资金提供者、社区和其他合作伙伴的合作，RMI推动投资以扩大清洁能源解决方案，减少能源浪费，并提高获得负担得起清洁能源的机会，从而增强安全、强化经济并改善人民的生活。RMI在60多个国家开展活动。



卡里萊克

加勒比电力公用事业服务公司 (CARILEC) 是电力服务、经销商、制造商和其他利益相关者的协会，这些利益相关者在加勒比地区、中美洲和南美洲以及全球从事电力行业。CARILEC秘书处致力于改善其成员之间的沟通，提供技术信息、培训、能力建设、会议和其他服务。秘书处在加勒比地区 and 中美洲及南美洲的电力公用事业倡导、发展和可持续性方面发挥着领导作用。



全球太阳能理事会

全球太阳能理事会是世界太阳能光伏产业的代言人，代表了价值链上的企业成员以及国家、地区和国际协会，以加速全球太阳能部署。为了实现我们的使命和愿景，GSC倡导变革性政策，创建最佳实践和知识交流的平台，建设能力和技能，并培养网络建设和合作，从而在全球范围内释放太阳能光伏的效益。GSC的努力得到了关于关键挑战和主题的工作组的支持，这些挑战和主题对于加速全球范围内太阳能的可持续和成本有效的部署至关重要。



方位咨询服务

方位咨询服务 (AAS) 是弗兰克·乌德豪森和克里斯托弗·尼德姆之间建立的一个工程合伙企业。凭借在太阳能行业39年的综合经验，他们自2016年起共同咨询商用项目到大型的公共事业发电厂。AAS为风险投资公司、私募股权投资者、开发商、保险公司和支架制造商提供包括技术尽职调查、失效分析、结构韧性以及整改规划等专业服务。该团队还率先开发了许多旨在提高太阳能资产可靠性和韧性的技术创新，特别是在北美和加勒比地区的高风险环境中。



安桑特能源

安桑特能源是一家专注于新兴市场可再生能源、微电网和可持续基础设施的专业能源咨询和项目交付公司。我们支持客户的整个项目生命周期——从可行性研究和设计到采购、施工监督和投产。凭借对离岛和偏远地区挑战的深刻理解，安桑特能源提供符合气候适应性和长期可持续发展目标的、技术上可行且具有情境适应性的解决方案。我们的团队拥有实践经验、战略洞察力和对质量的承诺，帮助公共和私人利益相关者加速其清洁能源转型。



UL Solutions

一家在应用安全科学领域的全球领导者，UL Solutions将安全、安全和可持续性挑战转化为110多个国家的客户的机遇。我们提供测试、检验和认证服务，以及支持我们客户产品创新和业务增长的软件和咨询服务。UL认证标志是我们客户产品中可信赖的象征，反映了我们对推进安全使命的坚定承诺。我们帮助客户创新、推出新产品和服务、在全球市场和复杂的供应链中进行导航，并可持续和负责任地发展。从采用电动化到支持5G和新型交通，我们展望新的前沿。我们的科学就是您的优势。

目录

前言，索尼·邓洛普，全球太阳能理事会首席执行官.....7

执行摘要 8

研究发现摘要 10 建议
.....12

引言.....14

方法.....16 组织.....16

根本原因识别：发现
和推荐项目使用... .. 17

失效模式与影响分析 (FMEA) 20

结论.....28

推荐参考文献32

附录 34

附录A：光伏电站风压检查清单（项目业主用）.....35 附录B：飓风贝拉现场报告.....38 附录C：光伏组件框架的低循环疲劳.....45 附录D：地面安装式太阳能光伏设计的地形考虑因素 49

尾注 50



前言

索尼娅·邓洛普 | 首席执行官 | 全球太阳能理事会

太阳能是公正和可持续未来的核心。如今，它是许多国家的主流能源，正在降低碳排放、扩大能源获取、增强能源安全，并创造了数百万个就业和经济机会。目前全球已安装约22太瓦的太阳能容量，每天投资于太阳能项目的资金接近10亿美元，太阳能背后的动力正在重塑全球能源格局。

这种增长堪称非同凡响。自2004年以来，太阳能已成为全球增长最快的能源，平均年增长率达25%。从1954年到2022年，这个行业花了近七十年时间才达到1太瓦的装机容量。值得注意的是，增加第二个太瓦只需要再花两年时间。

在许多国家，太阳能现在已成为最经济实惠的电力来源之一，这一趋势没有减速的迹象。其灵活性——从离网屋顶系统到公用事业规模安装——使其成为实现去中心化、本地驱动解决方案的有力工具。随着气候变化和地缘政治紧张局势给传统能源系统带来日益增大的压力，太阳能提供了一种有弹性、清洁的替代方案。但要真正实现其承诺，太阳能行业本身必须对它所帮助缓解的气候威胁具有极强的抵抗力。随着极端天气事件加剧，特别是在飓风易发地区，对太阳能基础设施的风险也在增加。每年有数百吉瓦的太阳能装置位于热带气旋的路径上——随着市场的扩张，这种脆弱性正在升级。

那是为什么 *风暴中的太阳* 系列至关重要。RMI的工作为提高太阳能系统在飓风面前的耐久性提供了急需的技术指导。这些报告为制造、设计、安装和运营提供了实用、经过现场测试的策略，这些策略对于保护投资、确保安全以及在主要风暴期间和之后维持能源获取至关重要。

为了使太阳能，不论其规模大小，能为社区提供能源韧性，我们自己就必须对自然灾害、极端天气事件和其他外生冲击具有韧性。太阳能不仅仅关乎缓解，更关乎适应和韧性。世界各地的人们正转向使用离网式太阳能和储能系统，以应对飓风、为不稳定电网提供后备或能在冲突情况下继续使用能源。如果我们实施这些建议，就能为这些人提供更可靠的能源获取保障。

通过采纳这些最佳实践，并将韧性融入每个太阳能部署的基础，我们可以保障太阳能的未来，以及依赖它的社区和经济。

索尼娅·邓洛普
首席执行官，全球太阳
能理事会

执行摘要

在2025年7月，格林纳达的卡里亚库岛，一场地面安装的太阳能装置中，安全状况不佳的太阳能电池板在飓风贝莉尔中成为了飞行碎片。

照片由 Skylar Bee, RMI 提供

执行摘要

自2017年那场致命的飓风季节以来已经过去了八年，那仍然是历史上最具破坏性的飓风季节之一。¹ 飓风哈维、伊玛和玛丽亚给加勒比地区带来了前所未有的破坏。这场灾难也使不断增长的光伏产业清楚地认识到，哪些方面可能会迅速出问题，以及通过实施某些光伏设计和安装的最佳实践，哪些方面可以显著生存下来。我们在2017年飓风季节过后进行研究和报道时发现，尽管加勒比地区的一些光伏系统面临超过180英里每小时的有记录的持续风速，但它们仍然存活了下来。在英属维尔京群岛、特克斯和凯科斯群岛、波多黎各和圣尤斯塔西厄斯的一些光伏安装虽然面临历史性的风况，但第二天仍然继续发电。相比之下，波多黎各、美属维尔京群岛和巴布达的一些光伏系统遭受了重大损坏或完全失效。

自上次 *风暴下的太阳* 报告称，大西洋、太平洋和印度洋都遭受了热带气旋的猛烈袭击。2020年北大西洋季节是有记载以来最活跃的，共发生了30个命名风暴，其中11个登陆美国本土。¹ 去年夏天，2024年7月，北大西洋形成的最早五级飓风² 飓风贝里尔摧毁了格林纳达和多米尼克岛的房屋和基础设施。

我们的团队调查了三条在致命飓风路径上的地面光伏安装。这是我们第一次更新的 *风暴下的太阳* 报告基于那些安装项目的经验教训，提供了全面的更新，涵盖Solar在Storm规范下的最佳实践、核对清单、行业规范和推荐参考资料，这些更新基于太阳能行业的演变、技术的进步以及更多季节的经验和实地调查。



2024年7月东加勒比海飓风贝拉

自该系列报告首次发布以来，光伏发电呈指数级增长。这项技术具有模块化和可扩展的特点，为全球家庭、企业、工业、政府设施和公用事业补充能源需求。目前，数十吉瓦的太阳能已安装在全球易受攻击的热带和沿海地区的屋顶、停车场棚屋和广阔的土地上。太阳能光伏是当今世界以及所有加勒比海岛屿增长最快的电力来源。³ 事实上，如今加勒比地区90%的电力公司都拥有或调度太阳能光伏发电作为其发电组合的一部分。

利用光伏发电是一种经济高效且可靠的发电方案。整合最佳可用工程、设计、交付和运营实践可以提高极端风荷载下的可靠性和存活率。

加勒比海有几个岛屿的太阳能发电量超过90%，使用锂离子电池稳定资源，并将柴油发电机每年的运行时间降至10%以下。随着岛屿和其他易受影响的沿海地区对太阳能发电越来越依赖，确保这些发电资产变得更加关键。

考虑到风速、风向、风持续时间、地形、设计和施工的变异性，以及有限的全球数据集，我们不能得出一个总体的统计结论来解释生存率与失败。相反，本指南结合了近期的实地观察、专家分析以及先前飓风季节调查的成果，提供了一组更新的可操作性建议，以提高改造和新建太阳能光伏装置的抗灾韧性。

本报告分为四个部分：

1. 简介

2. 根本原因识别方法和发现

3. 失效模式与影响分析 (FMEA)

4. 建议 总结

第一部分和第四部分面向普通受众，包括政府部门、公共事业公司、监管机构、开发者和光伏系统安装人员，他们有兴趣提高光伏系统抵御强风载荷的能力。第二部分和第三部分面向负责光伏系统设计、光伏系统规范和/或光伏系统施工监督和批准的工程专业人员。

发现总结

我们在飓风贝莉尔过后，有幸在格勒纳丁群岛观察到三个地面安装系统。在一个项目中，我们看到了遵循“风暴中使用太阳能的最佳实践”，而在同一地理区域且处于相同风暴条件下的另外两个项目中，这些缓解措施却不存在，形成了鲜明的对比。

一个专家结构工程团队通过观察发现了系统故障的几个根本原因，并发现了一个关键的模块故障，这是一个“潜伏故障模式”，但在我们之前的版本中没有被观察到或报告。

在飓风艾尔玛和玛丽亚过后失败的系统性相似之处，并进一步经格林纳丁斯在飓风伯尔后在调查中验证包括：

1. 模块自上而下或T型夹具失效
2. 尺寸过小货架或不设计抗风载货架
3. 缺乏横向支撑（托架未针对侧向风荷载进行正确设计）
4. 规格不匹配的螺栓
5. 绕制力不足的螺栓
6. 缺乏减震连接
7. 光伏组件设计环境压力过低
8. 光伏组件框架经历低循环疲劳失效
9. 使用自攻螺钉代替穿透螺栓

在飓风艾尔玛和玛丽亚过后，幸存的系统在格林纳丁斯飓风贝拉之后的调查进一步证实了一些常见的地面安装光伏属性包括：

1. 双柱式桥墩
2. 通过螺栓固定太阳能电池板（无需顶部向下或T型夹）
3. 横向搁架支撑
4. 记录中的结构计算
5. 历史所有者工程记录工程师与qa/qc计划
6. 抗震模块螺栓连接，如Nylocs。



巴哈马丘布岛4兆瓦地面光伏安装项目为该岛提供超过90%的电力。照片由迈克尔·万斯提供，阿桑特能源公司

推荐

本报告提供了关于建设更具韧性的光伏电站的更新建议列表。这些建议分为两类：1) 规范和2) 合作。

1. 规格：

- 请指定高负荷（4000帕提升）的PV模块，基于结构计算（不是模块数据表）；这些目前可以从多家一级模块制造商处获得。
- 需按美国土木工程师协会标准ASCE 7并结合场地条件进行结构工程设计，对风荷载、反力及锚固设计（地面基础）需有工程师签名的计算书。核实项目所采用的K值应包含项目边界内的地形信息^{zi}根据美国土木工程师协会规范（见 附录D）。

- 与货架制造商确认实际现场条件（地形）是否符合其风洞试验得出的基础条件假设。
- 明确螺栓的QA/QC流程：调查中发现存在几例螺栓拧紧不足的情况——这是一个工艺和疏忽问题。
- 指定螺栓硬件锁紧方案。
- 通过模块螺栓固定，而不是自上而下或T夹，如果需要顶部夹紧，请使用单独或独立夹持模块的夹具，不要使用共享夹具。

当通过螺栓模块时，使用专用垫圈而不是标准圆形垫圈，以将低循环疲劳从模块框架的集中区域分散开。RMI 将在未来的加勒比和太平洋太阳能项目中要求使用专用垫圈，如 StormPlate™。参考 附件C 。

- 需要结构工程师审查由于货架和电气设备产生的侧向载荷。通常侧向载荷会被忽略，而最近的失败已经证明它们是薄弱的关键来源（例如，连接到端部太阳能阵列立柱的合并箱导致加载增加并导致失效）。
- 不建议在3级或更高风区项目中使用追踪器。
- 基于25年的腐蚀，指定所有硬件。
- 不推荐任何自攻螺钉。

2. 合作：

协作建议确定了提高弹性的机会，这些机会需要多方考虑和行动，但并不代表当前行业标准的行动。

- 与模块供应商合作，实施代表180英里/小时风速的静态和动态负载测试——超过当前的5级飓风标准。
- 与货架供应商合作，进行代表180英里每小时风载荷的全尺寸和连接测试。
- 与供应商合作，通过符合工程假设的第三方审核（见下框），记录制造商质量、材料来源和认证。

或许最及时的建议是为那些受极端风暴露影响的太阳能光伏电站利益相关者国际社区，定期分享新设计以及极端风事件中的经验教训。为此，我们在由CARILEC主办的网络加勒比可再生能源社区（CAREC）上组建了光伏韧性工作组，以连接、创新和协作。加入工作组于 <http://community.carilec.org/>。

自2016年以来，Clean Energy Associates 已在300多家光伏组件工厂中进行了超过70,000次质量检验。过去几年的数据显示，光伏组件制造中存在令人担忧的质量趋势，这可能导致现场的性能和安全风险。

确保光伏制造质量，—清洁能源协会，2024年10月16日

简介



被摧毁的房屋，飓风艾玛，2017年，美国维尔京群岛圣约翰。

简介

太阳能已成为全球增长最快的发电能源，仅在2024年就安装了超过500吉瓦（GW）。⁴ 太阳能与电池储能已经展示出支持全球能源转型的技术和经济能力有所提高。自上次以来，几个主要岛屿的太阳能设施已经翻了一番。《风暴下的太阳》出版物，包括巴布亚新几内亚，目前正朝着到2030年实现30%太阳能的目标迈进；⁵ 夏威夷目前装机容量超过1400兆瓦，43%的公用事业客户在屋顶安装太阳能；⁶ 并与菲律宾，截至2024年底已安装近3吉瓦(GW)的太阳能。⁷ 面对每年那么多暴露在热带气旋中的太阳能，再加上对发电的重大依赖，确保其韧性至关重要。《风暴下的太阳I》(2018)，提供了一套最佳实践，这些实践被观察和记录下来，以提升地面安装太阳能系统的韧性，并帮助他们经受住热带气旋事件。

对于任何北大西洋飓风、太平洋台风或印度洋风暴的变量（风速、风向或持续时间），以及每个太阳能项目的有限数据，无法得出一个总体的结论来解释结果的多样性。然而，在《风暴下的太阳I》它们经受住了时间的考验和数季飓风暴露的考验。本报告的目的是结合飓风贝莉尔最近的现场观察、专家分析以及新的行业标准，提供旨在提高改造和新建太阳能光伏装置弹性的更新建议。更具体地说，本报告提供了专门适用于固定倾角或双倾角（东-西）配置的地面安装和遮阳棚式光伏电站的指导。屋顶系统会经历独特的空气动力学现象，这些现象不在本报告的范围内，但已在其中得到了全面阐述。《暴风雨下的太阳II》并且未来版本可能会根据兴趣进行修订。



卡里亚库岛在2024年7月遭受了飓风贝莉尔带来的5级强风，但这座太阳能阵列幸存了下来。照片由克里斯托弗·伯格斯提供，RMI

方法

我们提高光伏系统抵抗飓风风能的能力的方法利用了可靠性设计原则和方法。

这项工作的指导原则包括：

1. 跨组织、跨专业协作。
2. 处理已观察到的失效模式和处理潜伏的失效模式（这些失效并非仅仅因为其他事物先失效而发生）。
3. 硬件提升计划、可靠性统计数据 and 专家知识的计划。
4. 在可能的情况下，提供基于绩效的建议，以允许创新的解决方案。
5. 仅限于提供风险调整经济收益的建议。

为了实现这些指导原则，我们进行了一个五步流程：

1. 对受2024年飓风季节影响的三个地面安装太阳能项目现场进行失效分析（附录 B 提供每个站点的现场报告）。
2. 聘请负责管理或分析太阳能项目历史故障的专家。
3. 通过协作完成“鱼骨图”工具来识别和优先处理根本原因。
4. 更新优先级根本原因的故障模式影响分析（FMEA）。
5. 从失效模式与影响分析中综合通信和考虑的建议。

本报告的关键输出是一个更新的、用于建设更具韧性的光伏电站的建议清单。这些建议分为两类：1) 规范和 2) 合作。在可能的情况下，规范以性能为基础，以便让各个项目团队能够提供最具成本效益和韧性的解决方案。

组织

本文件按完成顺序组织，旨在向读者展示每项主要分析步骤。第 2 节介绍了根本原因识别方法和结果，以及使用这些结果和方法的相关建议。第 3 节利用了 FMEA 中确定的根本原因。该分析的输出包括经成本和影响评估的缓解措施。第 4 节将 FMEA 中确定的缓解措施综合为一系列建议，以便于读者沟通和考虑。

根本原因识别： 发现与推荐项目使用



T形肋条级联失效和自上而下
卡里亚库岛，格伦达达，飓风期间夹具
伯利尔 2024年7月照片由 Skylar Bee, RMI 提供

风裂互动的太阳能：针对有飓风暴露风险的耐用光伏系统的最佳实践更新

rmi.org

根本原因识别：发现与建议项目使用

近期的飓风季节，加上该地区太阳能电站的指数级增长，为更新未来加勒比地区项目的韧性指南提供了极好的证据。然而，仅基于观测到的失效模式开发飓风韧性指南存在局限性。

弹性措施类似于加固链条中的环节。目的是通过加固最薄弱的环节，使整个链条具备执行当前任务的能力。然而，这并不意味着在任务完成前不会有另一个环节断裂。因此，观察到的故障模式和推荐措施可能改进光伏系统的区域设计，并且证据表明，*风暴下的太阳能I* 和 *风暴下的太阳能II* 已经完全做到了。但是，随着行业的发展，风暴的增强，以及链条中最新的环节逐渐显露，尽职调查仍在继续。



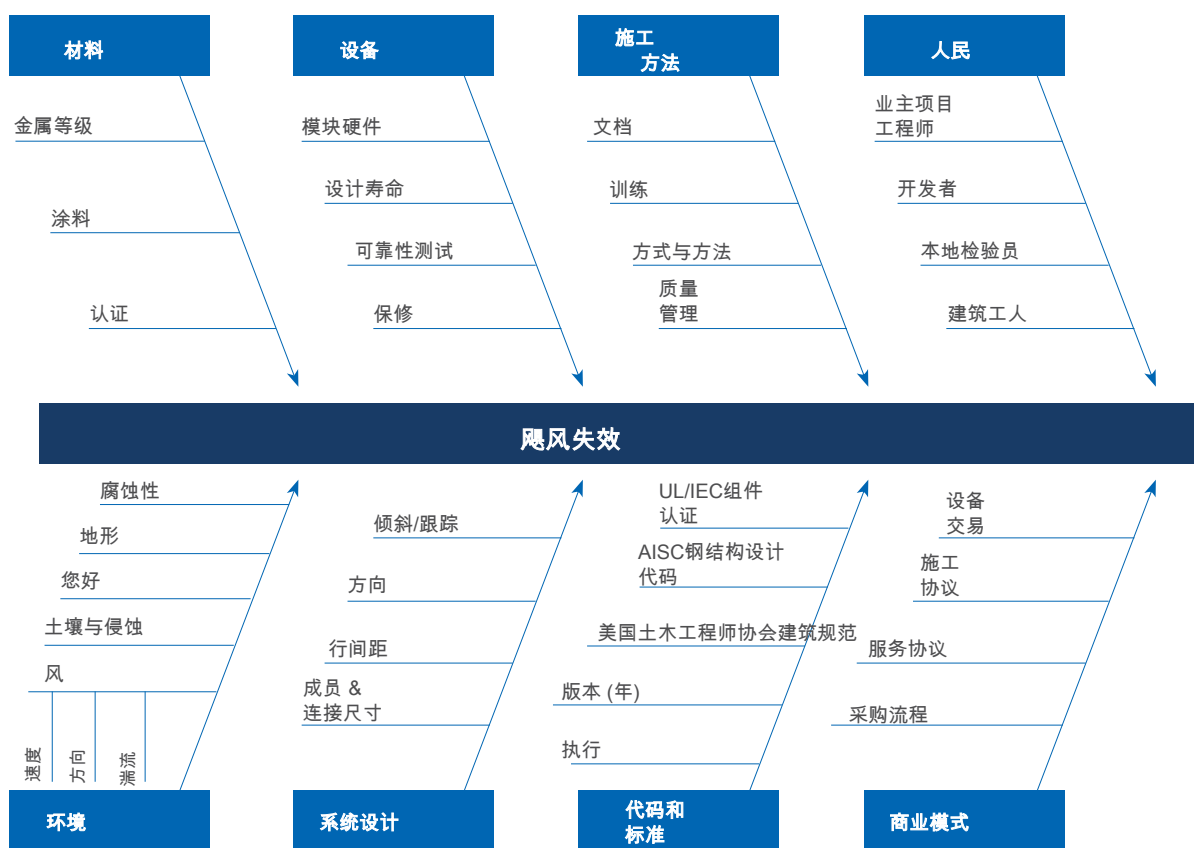
马约雷岛是圣文森特和格林纳丁斯的一部分，该岛拥有一个100千瓦的太阳能和电池微电网，可满足该岛一半的电力需求。这个100千瓦的太阳能地面安装系统是按照180英里/小时的风速标准，并采用 Solar under Storm 的最佳实践建设的。在飓风伯尔利期间，所有阵列都表现出色——每一根基础立柱、檩条和螺栓连接都保持稳固。然而，大约有70%的模块在框架安装孔处失效。照片由弗兰克·奥德胡斯登（AAS）提供

如果未来系统仅处理已观察到的故障模式，某些因素可能会触发其他故障模式，例如低循环模块框架疲劳，正如我们在Mayreau亲眼所见的那样（见 附件C）。

为了应对已观察到的和潜在的各种失效模式，我们采用经典的可靠性工程技术来设计可靠性。图1展示了一种用于系统性因果识别的常用可靠性工具，称为鱼骨图。该图显示了负责太阳能电站设计、制造、采购、交付、安装和运营的供应链，以及运行使用案例。

当前鱼骨图草案受限于数据集、作者专长和当前技术；因此，这项分析应该更新以融入新数据、专长和技术，随着它们成为可用。

图1 鱼骨图用于根本原因分析识别



RMI图形。

未来太阳能电站项目团队被邀请利用附件1作为促进工具，探索针对极端风或其他灾害导致项目失败的特定机会，以消除故障原因。在项目交付过程中，项目团队可以探索提供的类别以及附加因素，以确定故障原因和潜在的缓解措施。完成根本原因分析的项目团队被邀请标注附件1并分享他们的发现。



故障模式与影响分析 (FMEA)

胡马科，波多黎各，2018年1月25日，
在飓风伊尔玛和玛丽亚之后。
由肯尼斯·威尔西为FEMA拍摄的照片

故障模式与影响分析 (FMEA)

提高光伏系统抗飓风能力需要识别故障模式，并制定一项经济有效的缓解行动计划。行业不会从削弱平准化电力成本（LCOE）基础上太阳能项目经济性的缓解行动中受益。⁸ FMEA框架识别出经济实用的、市场上可获得的缓解措施。此外，在风险调整的财务分析中，考虑成本和收益时，还提供了对成本有净积极影响的措施。

下面呈现的FMEA合成旨在组织和展示最相关的故障模式及其当前缓解措施和关联限制，并提供一项经济高效的缓解行动计划。该表格按子系统和组件组织。

表2 故障模式及影响分析表

表1 太阳能电池板框架和层压片



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
1a	层压 撕下 (module 玻璃 被移除 框架)	UL 61730/ IEC 61215 静态负载 (global PV 模块 测试 标准)	本地压力 可能超过 模块额定 压力	审查堆放系统/全结构 系统风洞试验报告 for 模块级风压并比较 模块前后评级 压力。参考中的例子 堆放供应商提供这些风 按需提供隧道测试报告。结果 测试的结果将决定正确 模块评分（这将不同 跨接阵列的设计）。附录A	低/中

表1 光伏组件框架和层压片，续

#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
1b	框架螺栓孔洞失效	工程连接计算	模块回侧 (抬升 force) 评级可能不适合局部载荷	指定模块的工程师计算连接硬件，包括框架在何处使用。注意模块压力在单连接上 (¼ 模块面积) 可以比完整模块高50%。 与模块制造商合作以提升供应链。 该项目的记录工程师应该请求并批准工程连接计算。	低/高
1c	框架屈曲失效	UL 61730/ IEC 61215 静态负载 (global PV 模块测试标准)	本地压力可能超过模块额定压力	审查堆放系统/全结构模块系统风洞试验报告水平风力压力并比较模块前后压差 参考例子 <i>附录A</i> . 上架 供应商提供这些风洞试验按需报告。结果测试将决定适当的评级模块 (这将因...而异) 阵列的设计)。	低/高
1d	模块框架疲劳失效	IEC 61215-2 动态模块加载测试 附加安全系数选择模块框架。	周期性 (dynamic) 加载时常导致故障低于50% 静态的载荷等级。	确保模块数据表明确指定模块设计上的附加安全系数评分 (测试荷载 = 1.5 * 设计荷载) 。 设计模块连接以分发以某种方式将负载加载到框架中最小化应力集中。例子在铝上包括背板用于螺栓连接的模块框架每个模块使用超过 (4) 个螺栓并使用单个上夹具 (不共享片段) 或其他专有方法或快速安装面板安装。见附录C。	低/高
1e	层压冲击损伤	UL 61730 陨石撞击测试和 ASCE风- 易受残骸影响的。一些严重的冰雹损坏模块是可用	飓风碎片可能可以 be large 与...相比 hail	规定场地准备和清理应包含移除或加固所有异物 (碎片) 。	低/高

照片由克里斯·尼德汉姆，AAS提供

表2光伏组件连接硬件



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
2a	螺栓自松动	部分扭矩检查和合适文档扭矩的校验	自锁紧通用因到洗衣机-夹紧表面翻译在振动	指定螺栓锁紧方案合适为了环境和劳动力。(Nyloc 坚果已经证明了它们对自松脱即使在未拧紧时适当。)	低/高
2b	连接硬件失效 (骨折，破裂，撕裂 out, 剪切)	se hand 计算是典型	手计算不总是更新为场地特异性风荷载地形	指定SE站点特定模块审查 AISC每点的附件硬件等效。 记录工程师应充分理解风洞测试和应用到上架并且不单依赖上架供应商供应这些支票。	低/高
2c	级联顶部故障下夹具	模块顶部下夹具夹具专为对称边界条件	模块顶部下夹具夹具旋转 with loss of 一个模块并允许解放第二模块	指定要通过的模块框架按照制造规程螺栓连接设计风速规范 如果需要，请使用不会允许级联故障。铝T型插槽应避免使用rails。	低/高

照片由克里斯托弗·伯格斯，RMI提供

表3 结构式搁栅构件



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
3a	成员全局故障（塑料）挠度，失稳扭转)	钢码（AISC）或等价) 检查软件 package (RISA) 3D或等效) 和更新根据站点-具体 ASCE 7 载荷	ASCE 7 优先考虑正常载荷由于建筑物聚焦。横向电气负载系统平衡 (eBoS) 通常	1. 利用业主项目工程师进行审查计算包。 2. 针对 风速 指定 搁架 设计按ASCE 7-16推荐。 3. 规定侧向荷载的SE审查机架和eBoS硬件。 4. 指定带完整文档的货架 5. 指定项目中所包含的任何追踪器应设计用于最坏情况风暴露，无极端风力固定位置允许。	1. 低/中量级 2. 中/高 3. 低/高 4. 低/中量级 5. 中等
3b	地形负载增加	地形影响是考虑速度压力和压力系数。	ASCE7 第二十六章 风洞测试经常不包含充足地形考虑。	确保地形负载标量（Kzt）是包含在风设计。 确保考虑地形效应风洞测试，如适用。	低/高
3c	动态激励	建筑代码需要动态负载放大对于结构与共振频率<1 Hz>	光伏阵列行间距经验修改后的airflow更便利动态激励	se项目工程师应该检查动态若谐振频率<5 Hz时加载（Cain和银行，2015年）。 如果偏离建议的双发报告中推荐的固定倾斜结构任何风洞测试都应经过同行评审按照asce 7的要求验证符合性行业最佳实践。气动弹性与动力效果应包含在设计中。	低-高

左图由Frank Oudheusden, AAS提供；右图由NREL提供

表4 结构支架连接



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
4a	轴承 螺栓剪切	AISC校验 用手 计算 典型	手 计算 不总是 更新为 场地特异性 风力荷载	指定结构工程师完成 特定站点连接审查	低/高
4b	螺栓自 松动	部分扭矩 检查和 文档 典型	自锁紧 通用因 到洗衣机- 夹紧 表面 翻译 在 振动	指定螺栓锁定解决方案 为了环境和劳动力。 6	低/高
4c	自攻螺钉 螺钉 腐蚀和 剪切失效	钢材代码	尺寸做 不总是 账户 对于高度 腐蚀性 环境	不推荐使用自攻螺钉 用于新项目设计。 对于改造应用，请仔细 监控安装实践以确保 起适当作用，因为这些螺丝通常 由于安装错误而表现不佳。	低/高

左图由NREL提供；中图由AAS的Frank Oudheusden提供；右图由RMI的Christopher Burgess提供

表5 搁置基础



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
5a	基础结构失效	ASCE 20	需要场地特异性岩土数据	指定完整的岩土工程套件用于基础设计测试。 在可行的情况下，应进行腐蚀分析基于场地特定开展岩土数据	中/中量级
5b	推翻基础帖子	结构设计偏好设置	开发者想最小化每层基础站	指定双重基础结构超越单一基础设计他们最好从推翻中支持瞬时故障。指定低倾斜角度 to reduce peak module pressures and 翻转力矩。	中/高
5c	侵蚀	很少	需要排水控制计划	在陡坡松土项目中，制定排水计划在场地安装排水方法用于控制水流施工。考虑周围的地形非场地特定的土地。	中/中量级
5d	腐蚀	美国镀锌者协会指南	更多镀锌需要更多成本	对于基础：注明土壤测试腐蚀（pH值、氯化物和湿度）在多个地点并用于按照ASTMA123进行基础设计。 熟悉加速的原因腐蚀如污染、湿度和海水邻近并审查当地（300米半径）致蚀区域植物输入。	中/中量级

左图由AquaSoli提供；右图由Skylar Bee, RMI提供

表6 系统电气平衡



#	故障模式(s)	当前缓解	限制	潜在缓解措施	成本/影响
6a	线拉出或终端损伤	UL 规格对于每个电气组件 (e.g., UL 1703 光伏组件)	终端扭矩值未选中字段	指定 qa/qc 程序和终端扭矩文档。	低/低
6b	金属护套摩擦 (接地故障)	NEC或IEC 导体管理并且支持规格	导线下垂和主题围绕旋转基于领域安装	指定线缆管理实践包括支持时间表和 sag 公差。 指定不锈钢或厚重镀锌线夹或PVC涂覆不锈钢电缆夹代替塑料扎带。	低/低
6c	线管理骨折	NEC或IEC	直接和反射的UV 曝光增加风险痛苦和骨折	指定抗紫外线和防腐蚀耐热线缆管理解决方案。 需要方案集成线材审查管理技术 NEC或IEC。 替代露天敷设的导管规格 线缆管理可能适用某些位置。	低/低
6d	雨水渗入进入组合器盒子或逆变器	NEC - NEMA 规格	飓风风吹横向可以穿透 NEMA 3	根据要求指定NEMA 4X至6P外壳在工程评审中。IEC等效的是 IP56至IP67。	中/高

照片由克里斯托弗·伯格，RMI提供

结论



RMI技术经理费德尔·内文森和RMI经理，西德尼·朱尔斯，调查失败的太阳能在格列纳达的卡里亚库岛上的项目，2025年3月。照片 courtesy Skylar Bee , rmi

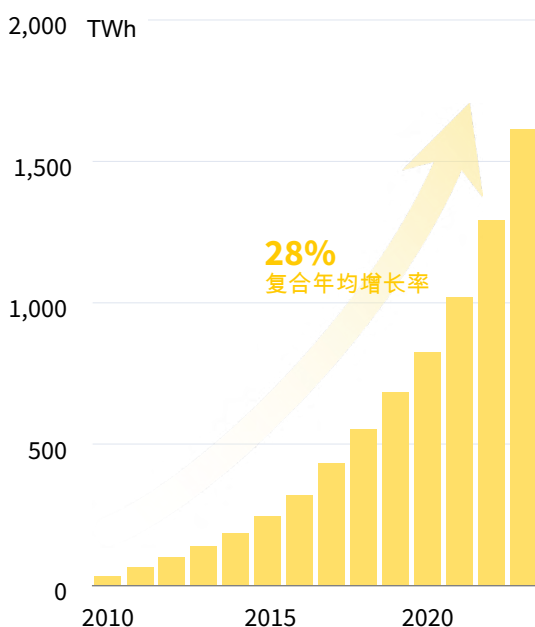
结论

利用太阳能光伏发电是一种对全球发电具有成本效益和可靠性的解决方案。这就是为什么它在过去十年中成为增长最快的发电来源。结合电池存储，太阳能光伏是一种稳定且可调度的资源，现在每年在全球发电量中占比超过1,500太瓦。⁹

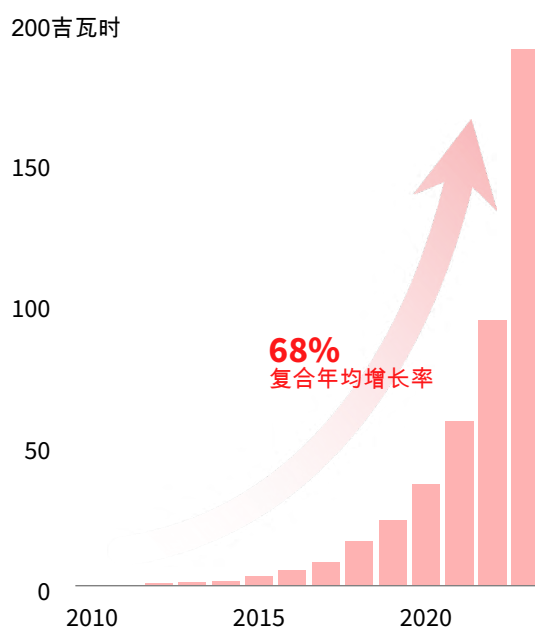
展品3 导致可再生能源的指数增长

全球太阳能发电量每2-3年翻一番，电池储能容量每年翻一番：

太阳能发电



电池存储



RMI图形。来源：国际能源署、伯恩斯坦能源研究公司；注：CAGR是2013年至2023年间的复合年均增长率。

全球太阳能光伏安装前三名的领导者之一，中国，¹⁰ 美国¹¹ 和印度，¹² 经历热带气旋。这三国仅安装的太阳能项目就超过1.2太瓦。当然，岛国也在经历显著的太阳能接受度提升，并且它们对热带气旋事件造成的电力系统中断更加脆弱。结合最佳工程、设计、交付和运营实践可以提高抗极端风荷载的可靠性和生存率。此外，在选择飓风易发地区的太阳能电池板时，需要更加谨慎，因为行业正转向更大尺寸的电池板，尽管它们能提供更高的能量产量，但机械强度有所降低。¹³

本报告在全面了解所有故障模式和所有纠正措施方面存在局限性，不能保证任何建议措施的有效性。然而，在过去的七年中，这些最佳实践已被极端风事件所测试，其中许多得到了直接验证，并已更新至2025年：

规格包括：

- 请指定高负荷（4000帕提升）的PV模块，基于结构计算（不是模块数据表）；这些目前可以从多家一级模块制造商处获得。
 - 需根据ASCE 7及场地条件进行结构工程设计，并进行风荷载、反力及锚固设计（地面基础）的工程师签封计算。核实项目所采用的K值包含项目边界内的地形和边界外的地形。
zi
根据ASCE规范（参见 附录D）。
 - 与货架制造商确认实际现场条件（地形）是否符合其风洞试验得出的基础条件假设。
 - 明确螺栓的QA/QC流程：调查中发现存在几例螺栓拧紧不足的情况——这是一个工艺和疏忽问题。
 - 指定螺栓硬件锁紧方案。
 - 通过模块螺栓固定，而不是自上而下或T夹，如果需要顶部夹紧，请使用单独或独立夹持模块的夹具，不要使用共享夹具。
- 当通过螺栓模块时，使用专用垫圈而不是标准圆形垫圈，以将低循环疲劳从模块框架的集中区域分散开。RMI 将在未来的加勒比和太平洋太阳能项目中要求使用专用垫圈，如 StormPlate™。参考 附件C 。
- 需要结构工程师审查由于货架和电气设备产生的侧向载荷。通常侧向载荷会被忽略，而最近的失败已经证明它们是薄弱的关键来源（例如，连接到端部太阳能阵列立柱的合并箱导致加载增加并导致失效）。
 - 不建议在3级或更高风区项目中使用追踪器。
 - 基于25年的腐蚀，指定所有硬件。
 - 不推荐任何自攻螺钉。
 - 指定双支架固定倾斜地面安装支架，可显著降低基础损坏风险。

很可能是提高系统存活率的最为有效的策略是向供应商和上游设备供应商传达清晰的市场信号，并密切协调从业者之间。这包括：

- 与模块供应商合作，实施代表180英里/小时风速的静态和动态负载测试——超过当前的5级飓风标准。
- 与货架供应商合作，进行代表180英里每小时风载荷的全尺寸和连接测试。
- 与供应商合作，通过符合工程假设的第三方审核（见下框），记录制造商质量、材料来源和认证。

或许最适时机的建议是为那些面临极端风暴露的区域乃至国际太阳能光伏电站利益相关者建立定期分享新设计及极端风事件经验教训的社区。为此，我们在由CARILEC主办的网络加勒比可再生能源社区（CAREC）上成立了光伏抗灾工作小组，以连接、创新和协作。加入工作小组，<http://community.carilec.org/>。

自2016年以来，Clean Energy Associates 已在300多家光伏组件工厂中进行了超过70,000次质量检验。过去几年的数据显示，光伏组件制造中存在令人担忧的质量趋势，这可能导致现场的性能和安全风险。

确保光伏制造质量，—清洁能源协会，2024年10月16日

推荐参考文献



失败的太阳能农场 加勒比，格林纳达。
照片由乔丹·海尔斯，RMI提供

rmi.org

风量和太阳能辐射，针对格林纳达和加勒比地区其他国家的最佳实践案例研究

推荐参考文献

风暴下的太阳 报告系列，RMI
<https://rmi.org/insight/solar-under-storm/>

“确保光伏制造质量”，清洁能源协会
<https://www.cea3.com/cea-blog/ensuring-pv-manufacturing-quality-report>

飓风受损岛屿正认真发展可再生能源，以便在灾害后提高韧性，”卡珊德拉·斯威特，特利斯
<https://trellis.net/article/after-storms-its-microgrid-season-caribbean/>

光伏电站风荷载 乔·凯恩和大卫·班克斯
https://cppwind.com/wp-content/uploads/2020/12/Wind-Loads-on-Utility-Scale-Solar-PV-Power-Plants_Dbanks_2015.pdf

“太阳在波多黎各的暴风雨中幸存，”艾利·罗特施泰因 PV杂志
<https://pv-magazine-usa.com/2017/11/07/solar-survives-the-storms-in-puerto-rico/>

“飓风贝拉后岛屿光伏系统的生存能力”，弗兰克·奥德胡斯登，阿齐姆图 Advisory Services，PVRW 2025
<https://www.azimuth-ventures.com/publications>

“飓风破坏后的巴哈马正着重发展太阳能重建其电网”，比尔·惠特aker，哥伦比亚广播公司新闻
<https://www.cbsnews.com/news/bahamas-hurricanes-power-grid-solar-60-minutes-2022-07-24/>

“VINLEC 签署合同，在格瑞纳丁群岛建设首座太阳能-储能微电网系统，”RMI
<https://rmi.org/press-release/press-release-vinlec-first-solar-battery-storage-microgrid-grenadines/>

“太阳能光伏系统设计中的抗恶劣天气能力”，美国能源部
<https://www.energy.gov/femp/severe-weather-resilience-solar-photovoltaic-system-design>



菲德尔·内文森，RMI，正在调查圭亚那岛上的故障T型槽支架和自上而下夹具。照片由Skylar Bee，RMI提供

附录



在安格拉达英属维尔京群岛建设首个地面安装太阳能项目，该项目将为该公用事业公司提供大部分发电量。图片由克里斯托弗·伯格提供，RMI

附录A

太阳能光伏电站风压检查清单供项目业主使用



确定设计风压是一项由专家科学家和工程师进行的复杂科学。太阳能光伏电站所有者可以通过熟悉流程来一般性地确认风压已被适当确定。

太阳能光伏电站风压确定的一般流程：

- 1. 在内层风洞中对比例系统模型进行风洞试验。** 项目干系人可以审查风洞试验报告，以确认比例模型代表项目拟议的系统布局。行长度、间距、倾斜度、高度和前缘高度的差异应限制在风洞报告中确定的范围内。
- 2. 分析压力测量以确定目标模块或结构构件的压力系数。** 风洞试验报告应包含针对每个感兴趣的结构件与其集水面积相对应的压力系数表。项目相关方应能够识别为每个结构件或部件使用了适当选择的压力系数表。对于没有专用表的部件，只要长宽比和位置也相似，向下取整可以提供近似的近似值。如果适当表格不存在，风洞很可能利用现有数据，并只需少量时间和资源进行重新处理。

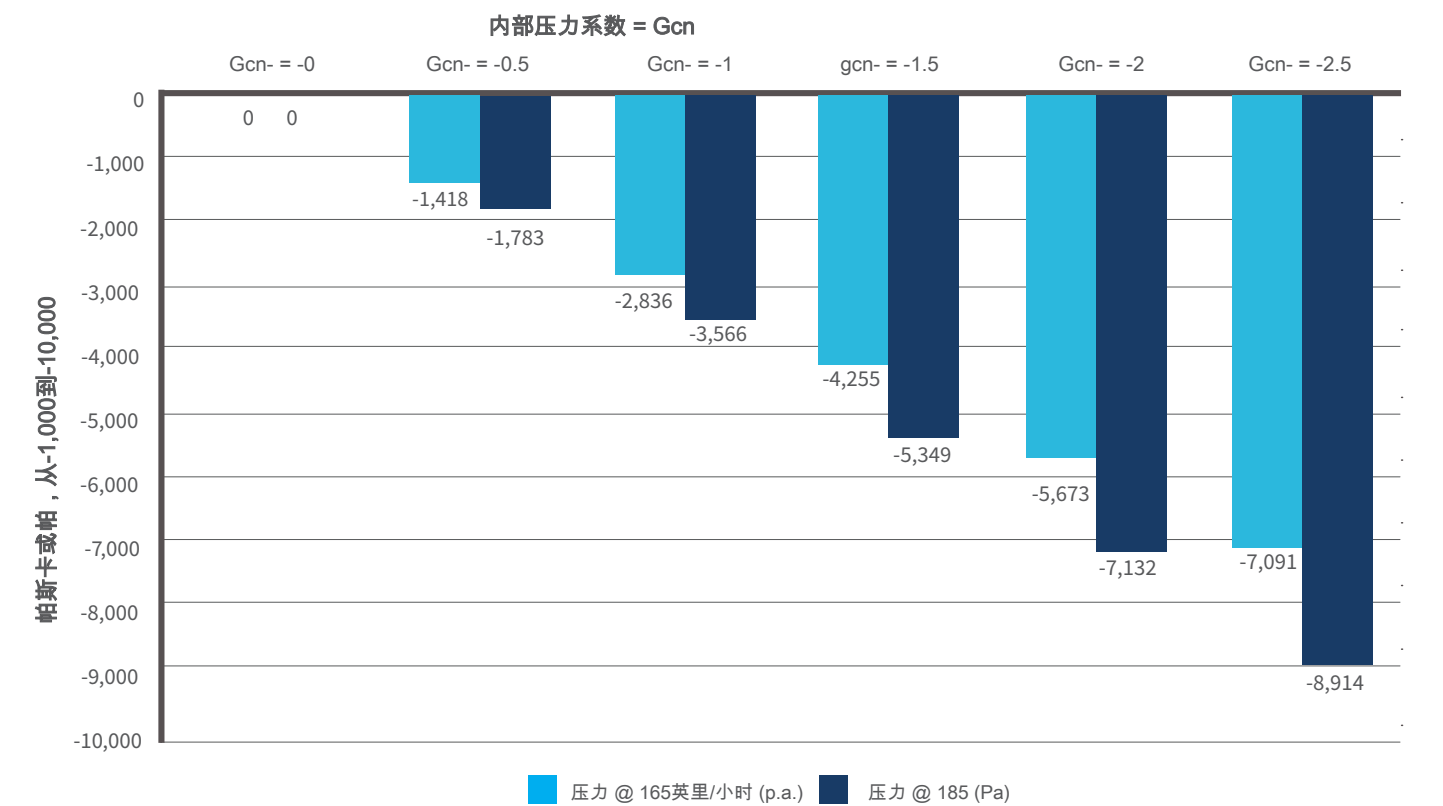
3. 确定风动压力，需考虑设计风速、当地地形、系统高度、方向性和风险类别。 项目利益相关者应该能够审查一个特定地点的风动力压力的确定。计算应符合主管代码和版本（例如，ASCE 7-16、ASCE 7-22），并纳入区域设计风速、系统高度、地形和重要性。具有任何地形特征的项目应确保对这些特征进行适当处理。

4. 将压强系数和动压结合起来计算风压。 项目利益相关方应能够审查结构计算，以确定每个感兴趣组件或构件的设计风压。图A1展示了从0到2.5的风压系数对应165和185英里每小时设计风速的一组风压。在此示例中，风压系数0.5对应设计压力小于2000帕（帕斯卡，49帕=1磅每平方英尺）。相比之下，风压系数2.5对应设计压力超过7000帕。鉴于可能的变异性，不能假设高荷载评级模块是必要的或充分的。

5. 审查组件和成员规格。 项目利益相关者应能够审查所有结构组件、构件和连接器的产品规格或工程集，包括光伏组件。附件A2说明了具有最高结构承载能力之一的模块的规格，该能力是作者所知。该规格中的关键信息包括允许支撑条件的范围（AI）以及特定的和独特的上抬荷载。

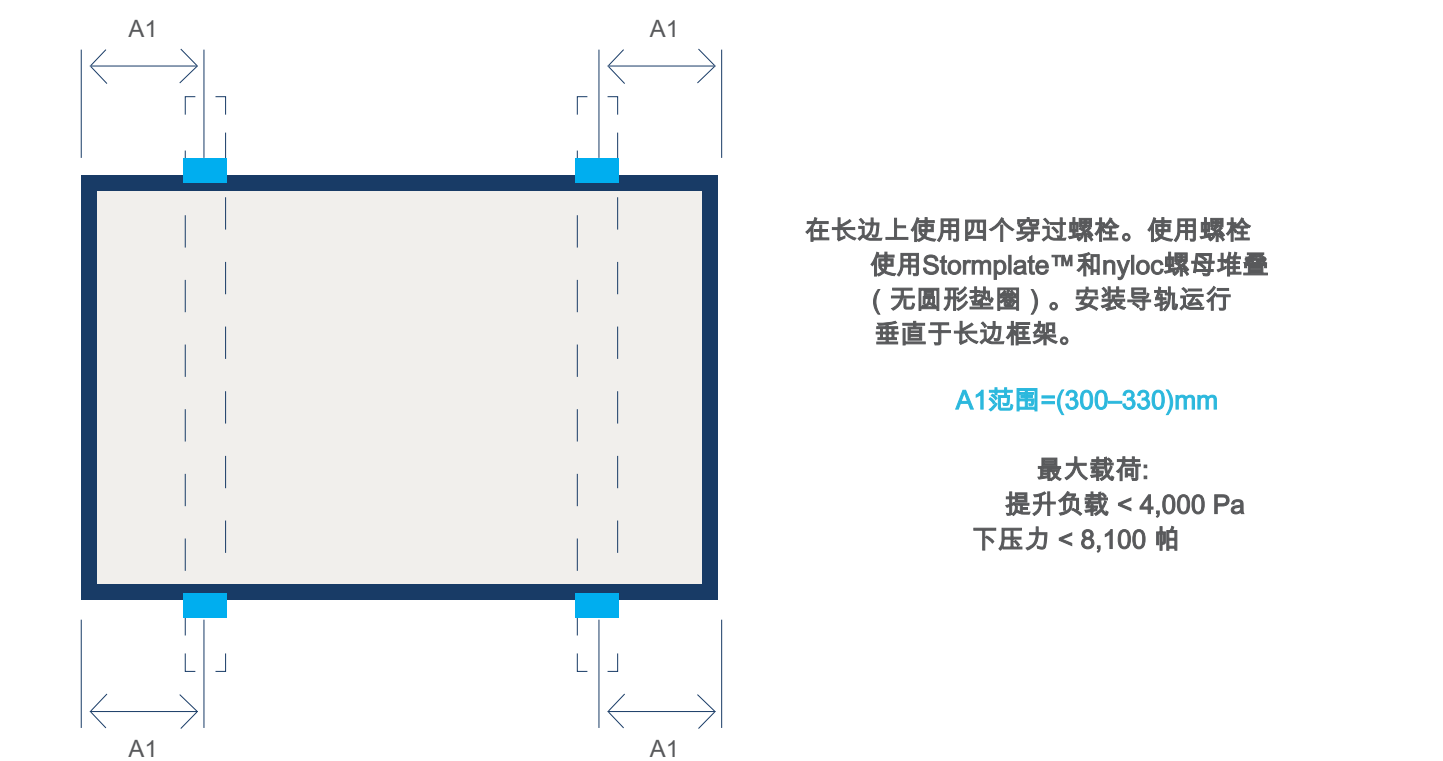
风险类别选择最终由记录工程师（EOR）负责，并根据光伏系统在更广泛能源或基础设施环境中的具体功能为基础。虽然大多数地面安装的光伏系统属于风险类别II，但在某些情况下——例如位于偏远岛屿或孤立电网的系统——太阳能电池板对总电力供应有重要贡献。在这种情况下，特别是当系统支持关键设施或促进快速灾后恢复时，将其归类为风险类别III或IV可能是适当的。

证据A1 模块表面样本极端风升力



RMI图形。

附件A2光伏组件安装规范



RMI图形。

飓风贝尔菲尔德报告

卡里亚库岛 — 检查日期：2024年7月29日

模块仍然可见无损：35%



太阳能安装失败。加勒比岛，格林纳达。2024年7月。照片由克里斯·尼德汉姆，AAS提供

正向设计元素：“什么做对了”

1. 模块的3轨道支撑/6个安装点
2. 双重基础设计防止了由于上部结构造成的任何主要故障。桌子翻倒了。
3. 使用双倾角系统（东西向）试图降低面板和系统的风压。

观测到的失效模式：“出了什么问题”

1. 共享自上而下的片段。数组的一部分仍然存在共享的片段，但项目的主要部分已完全丢失。
 - 负责 >50% 的系统损坏。
 - 观察到仍然在位的面板的损坏大多来自其他已经解放的面板。



错误 #1：共享自上而下的剪辑
照片由弗兰克·奥德胡斯登（AAS）提供

2. 在倾斜地形上使用双倾斜系统（东-西）导致风加速作用在背风面板倾斜的后侧。面板释放的很大一部分发生在这些面板上，这些面板原本相对受杂物保护。这类似于所概述的失效模式 风暴下的太阳III 在哪里建议不要在 roof ridgelines 上放置面板以防止模块解放。*

- 负责~30%的系统损坏。



3. 使用自攻螺丝。观察到这些允许组件旋转，导致公共夹具和模块的丢失。

4. 铝T型槽连接提供更容易的撕脱、循环载荷和安装错误实践，应该避免。

Rmi技术经理Fidel Neverson检查观察到的故障#4。
照片由 Skylar Bee, RMI 提供



5. 周围地区的地形特征表明应假设 K_{zt} 大于1。^{**}根据风向，这可能是一个影响因素，必须在结构计算中考虑和检查。

6. 大尺寸板（1.3米宽）在板面显示出永久性下凹，与灵活的整体板面固定设计方案相结合时，会导致模块的损坏。这些尺寸的模块往往没有足够的设计风压压力等级。

7. 在风荷载作用下，组合箱出现了显著位移。它们的结构承载能力和基础设计没有考虑其专门的风压。



故障 #7：受风压影响的组合箱。

图片由克里斯托弗·伯格提供，RMI

8. 缺少侵蚀缓解措施导致阵列的某些部分发生严重侵蚀。这可能已危及许多位置的支架基础。

风暴下的太阳能 第二部分：为耐飓风的屋顶光伏系统选择最佳实践 * 见第29页 对于更多信息。^{**} k_{zt} 是在 asce 7 中定义的风荷载方程中的地形系数。 附录D 详情请见。

联盟 — 检查日期：2024年7月30日

模块仍然明显未损坏：40%



重要模块和货架故障
坡顶（失效#4），联合岛。
照片由弗兰克·奥德胡斯登（AAS）提供

正向设计元素：“什么做对了”

1. 所有紧固件上都有可见的扭矩标记

2. 东西方向的良好基础支撑。

3. 选择尺寸较小的光伏板，并搭配更高的框架轮廓，意味着没有主要故障归因于板结构故障（层压剥离、框架失稳、螺栓孔剥离或循环载荷）

4. 现场实施了侵蚀控制，且该地未出现显著的侵蚀后事件。这保护了基金会的基础结构完整性。

5. 未使用任何tek螺钉或铝t形槽。

观测到的失效模式：“出了什么问题”

1. 共享自上而下的片段。数组的部分仍然存在共享片段，但模块组完全丢失。

- 负责大约30%的系统损坏。

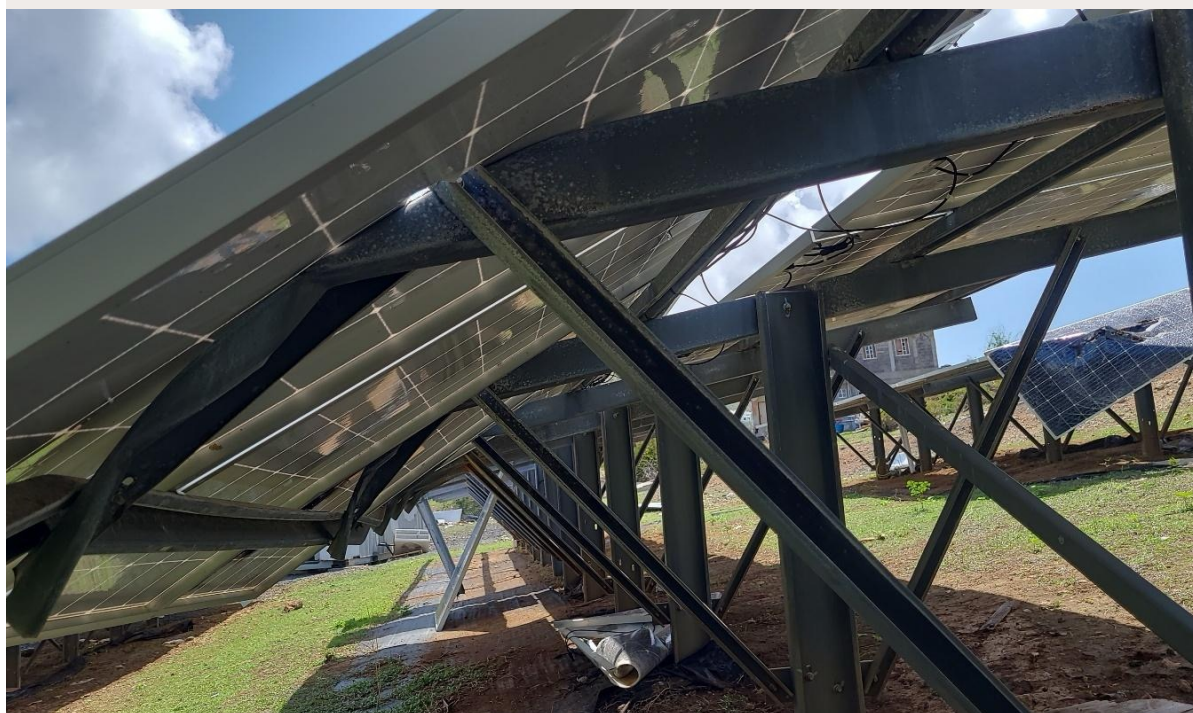
错误 #1：共享自上而下的剪切，联合岛，2024年7月。
照片由弗兰克·奥德胡斯登（AAS）提供



2. 缺乏防震硬件导致螺栓自由振动。

- 负责20%的系统损坏。

3. 使用单柱基础导致两种失效模式：上弦过载和阵列旋转（见下图）。这些问题将通过使用双柱基础来解决。



联合岛上的太阳能电池板支架损坏，2024年7月。照片由Frank Oudheusden，AAS提供

4. 周围的地貌特征表明本地的K值应该假设大于1。

取决于风向，这可能是影响因素之一，需要在结构计算中考虑和检查（见附录D）。在斜坡的顶部，有明显的更多模块损失。

5. 逆变器托盘墙和汇流箱的风压考虑不足，表现出与风相关的移动或损坏。



逆变器外壳在格林纳丁斯圣文森特岛的联合岛上翻转。

照片由弗兰克·奥德胡斯登（AAS）提供

梅勒乌 — 检查日期：2024年7月30日

模块仍可见未损坏：31%



飓风贝拉过后梅勒索尔菲场。照片由Fidel Neverson, RMI提供

正向设计元素：“什么做对了”

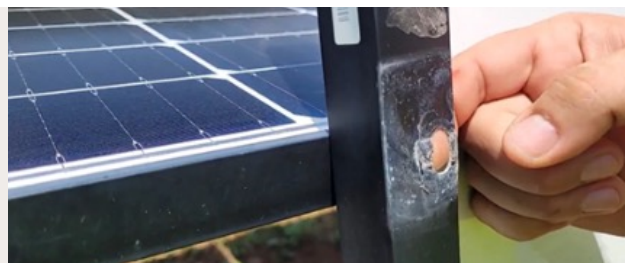
1. 螺栓穿过式模块安装，配备减震硬件。现场未出现因硬件松动导致的故障。
2. 双柱式基础设计因上部结构导致零次主要失效。该项目的支架在再供电期间可以完全重复使用。
3. 低倾角设计有助于降低组件压力并提高现场功率密度。
4. 系统电气平衡良好。除模块缺失处外，没有线缆外皮磨损、暴露、端子损坏或拉出。

观察到的失效模式： “出什么问题了”

1. 板件经历了模块框架的低循环疲劳失效（见 附件C）。这实际上是结构失效链中玻璃本身失效前的最后一个环节。

- 负责95%的系统损坏。

- 使用的面板采用更短、更薄的铝合金框架部分，这是大多数现代面板的典型特征。



低循环太阳能框架孔疲劳，梅勒，七月2024。照片由克里斯·尼德汉姆，AAS提供



太阳能电池板框架孔撕裂，梅勒，七月2024。照片由克里斯·尼德汉姆，AAS提供

2. 高程条件影响了光伏板压力。这增加了疲劳失效效应，是目前行业内正在探讨的问题。对于高坡度场地，建议采用保守的地形系数（参见附录D）。

3. 支撑结构的腐蚀正在进行中，这在加勒比项目很常见，但在任何失效模式中都不是影响因素。建议为腐蚀较严重的区域指定更厚的保护层厚度和/或更耐腐蚀的材料。双柱基础设计提供了一定的更高承载力，以考虑项目寿命期间材料强度的损失，但在实践中仅能多提供几年。

C附录

低循环疲劳对光伏板框架



克里斯·尼德汉在2024年7月马耶鲁检查失效的太阳能电池板。照片由弗兰克·奥德海森提供，AAS

在过去10年中，光伏板框架已经发展到更短更薄，即使模块的面积增长了50%。尤其重要的是，光伏框架的底缘已经从2毫米减少到1.1毫米，如今大尺寸模块的典型厚度为1.5毫米。这意味着框架比以往有更多的应力集中。

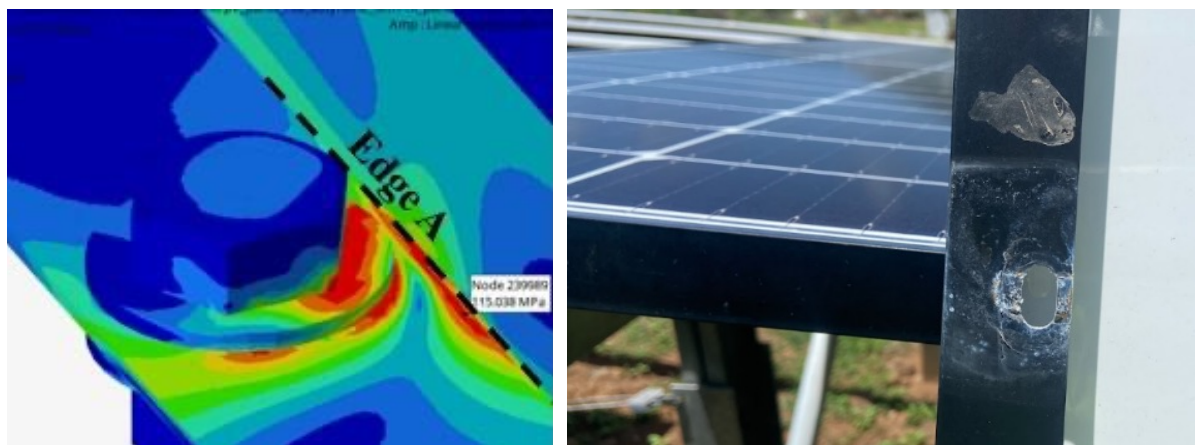
PV框架所使用的铝材没有有效的疲劳极限，这意味着在给定的峰值应力下，它总会存在一定数量的载荷循环会导致其失效。在过去，更高的、更厚的框架在给定载荷下的峰值应力较低，因此失效的循环次数足够高，以至于在实际中几乎所有的项目都不会发生这种情况。不幸的是，情况不再如此。

更短的框架、更薄的底缘、更大的板材面积以及更高的风速，都使得峰值板材应力达到了低循环疲劳可能成为主导因素的程度。事实上，这是Mayreau项目中观察到的主要且可能唯一失效模式，该项目经历了持续的四级风和五级阵风。



太阳能电池板框架孔撕裂。照片由Chris Needham，AAS提供

在这个项目中，使用典型的螺栓堆（螺栓、圆垫圈、尼龙螺母）意味着来自圆垫圈的应力直接集中在面板框架中，底法兰过渡到垂直箱形部分的相对较小的区域。这已经通过非线性有限元分析（FEA）模型进行了评估和确认，以产生初始裂纹，这些裂纹以与5月16日观察到的完全相同的方式扩展到失效。ⁱ 下面的照片显示了预测的帧应力与在Mayreau货架上仍有的未损坏面板的比较。这种失效模式主要存在于背面（风）面板加载中。



有限元分析与梅勒板对比显示框架的低周疲劳破坏。照片由克里斯·尼德汉提供，AAS

行业标准测试标准用于评估循环（动态）负载。现行标准为 IEC 62782，该标准使面板承受 1,000 帕斯卡 1,000 次循环。然而，这是一种简化测试，而现实中的负载复杂且受许多因素影响。例如，在某些情况下，面板可能在短短 8 分钟的持续风力下经历 1,000 次循环。此外，1,000 帕斯卡对于加勒比地区来说是相对较低的负载。尽管如此，如今许多面板在安装典型的螺栓堆栈时仍难以通过此测试。

存在几种方案可以大大降低光伏组件框架的低循环疲劳失效风险。目前一些常见的方案包括：

1. 使用个体顶夹具（每个模块四个），将背面风载荷分散到铝制框架顶部的更大区域。目前该选项在行业内未普遍采用，且未对疲劳失效进行评估。
2. 穿过螺栓安装的面板，使用超过（4）个紧固件以减少任何单个紧固件的峰值载荷。需要注意的是，这仍可能使面板容易受到低循环疲劳的影响，并应仔细评估。
3. 滑入式导轨和其他专有方法或快速安装面板安装，更全面地支撑PV框架的正面和背面加载。

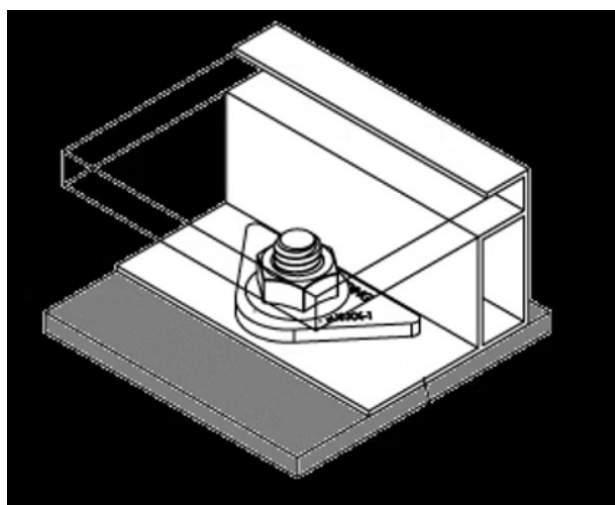
ⁱ 一种有限元分析(fea)是在应力下对机械部件进行的计算机仿真。



太阳能 Helix 安装在巴哈马群岛的拉奇岛，在2019年飓风艾尔玛之后。照片由David Kaul, Salt Energy提供

索菲尔®Helix™ 安装系统是一个专有的快速安装系统，已被用于满足加勒比地区180英里/小时风压抗性要求。

4. 使用特种背板，比标准圆形垫圈能更好地将负载分散到面板框架上。型号显示循环加载失效周期增加约450倍于标准圆形垫圈，并且框架的 uplift 压力承载能力提高了33%。



风暴板™ 由 Resilient Solarworks (www.resilientsolarworks.com) 提供的 SP1

在Mayreau案例研究中，飓风贝拉过后，明显表明模组框架在地面安装阵列上遭受了低周疲劳并失效。此外，在圣文森特岛主岛上，与屋顶安装项目同同样品牌和系列的模组也以完全相同的方式失效。

圣文森特岛上的几个模块部分脱位，几个完全从两个独立的屋顶安装项目的支架上脱落。这是由于循环次数低导致的框架孔疲劳，因为在圣文森特岛经历的最大风速为1级以下，远低于保证的设计升力/背面压力等级（-2667 p.a.）。

为了在Mayreau恢复可再生能源，RMI获得了拨款资金以更换剩余的模块。新模块附带产品证书IEC 61215、61730、FSEC（美国佛罗里达州）UL 61730、IEC 61701、62716、62782和63126，并带有长达每年4,000的设计保修，通过四孔螺栓安装。



圣文森特岛在低循环条件下失效的模块框架。照片由 Fidel Neverson, RMI 提供

除了完整模块替换之外，RMI 还将确保

每个与不锈钢紧固件堆叠连接

由一个M8螺栓、锁紧螺母和一个StormPlate组成TM，

一种特殊的多层垫圈，将替换螺栓堆中的标准圆形垫圈。StormPlateTM比传统平板垫圈提高了450倍的抗循环疲劳性能。这种额外的缓解措施硬件成本低，人工成本中性，是热带气旋地区太阳能项目中推荐的最佳实践。

地面光伏设计的地形考虑因素

K是什么？

zt

K是ASCE 7（例如7-16或7-22）中定义的风荷载公式中的地形因子。

zt

对场地及周围地区的地形进行数学逼近。它考虑了由于当地地形，如丘陵、山脊和悬崖而引起风速增加效应。

K在ASCE 7标准的第26章（风荷载——一般）中有涵盖，提供关于如何的指导

zt

在26.8节中计算。

为什么K对岛屿国家和沿海地区很重要？岛屿地点通常具有：zt

- 陡峭的地形
- 高地
- 暴露于极端近海岸线
- 为太阳能电池板
- 旋风性风事件

忽视K可能会导致低估设计风压，尤其是对于山顶或山腰阵列。

zt

对于易受飓风侵袭的岛屿，这一因素可以显著改变太阳能支架和组件所受的力，正如上文在联合岛所看到的那样。

如果K没有正确应用，风压的低估会导致结构失效

zt

由于货架或模块损坏，在中等至严重风灾期间受损，并最终导致经济损失和保险索赔纠纷。

地区设计师可采取的行动步骤，以确保K适用于站点设计：zt

1. 判定您的项目场地是否具有地形效应（坡度具有显著的高度变化）。
2. 查阅ASCE 7-16第26.8节以确定是否必须应用K。
- zt
3. 仅当您的场地平坦或有遮挡时，才使用 $K = 1.0$ ，这是无风速增加的默认设置。
- zt
4. 对于位于山顶附近或陡坡上的太阳能电池板，使用特定的地形特征进行K评估。
- zt
5. 聘请一位结构工程师来确定 K_{zt} ；不恰当的假设可能导致灾难性的设计不足。



联合岛K加速证据。照片由Frank Oudheusden, AAS zt提供。

脚注

- 1 “飓风成本,”美国国家海洋和大气管理局海岸管理办公室(最后修改日期 05/20/2025), <https://coast.noaa.gov/states/fast-facts/hurricane-costs.html> .
- 2 “飓风贝拉成为历史记录上最早五级飓风,”天气频道,2024年7月1日, <https://weather.com/storms/hurricane/news/2024-07-01-hurricane-beryl-category-5> .
- 3 “进展数据”SIDS灯塔倡议——国际可再生能源署,2024年3月1日 <https://islands.irena.org/Re-Progress/Progress-data> .
- 4 *全球能源展望2025* ,国际能源署,2025, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>, 许可证: CC BY 4.0.
- 5 *巴巴多斯行动计划IRRP - 最终报告* 由Acelerex为能源和商业发展部准备,2022年7月5日 <https://energy.gov.bb/wp-content/uploads/2024/10/Barbados-Action-Plan-for-IRRP-ActionPlan-and-Roadmap-Final-Report-v2.1-1.pdf>.
- 6 “夏威夷电力太阳能安装稳步增长,”夏威夷电力,2025年3月18日, <https://www.hawaiianelectric.com/hawaiian-electric-sees-steady-growth-in-solar-installations> .
- 7 “菲律宾一省批准300兆瓦太阳能” *PV杂志* ,2025年3月31日, <https://www.pv-magazine.com/2025/03/31/philippine-province-approves-300-mw-of-solar> .
- 8 “平准化电力成本(LCOE)”,能源部印第安能源办公室,2015年8月, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf> .
- 9 金斯米尔·邦德,山姆·巴特勒-罗斯洛,和达恩·瓦尔特, *清洁技术革命* ,RMI,2024, <https://rmi.org/insight/the-cleantech-revolution/> .
- 10 “今日能源,”美国能源信息署,2025年4月22日, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65064#> .
- 11 *太阳能市场洞察报告* ,太阳能行业协会,2025年3月11日, <https://seia.org/research-resources/us-solar-market-insight/> .
- 12 “印度达到100吉瓦太阳能里程碑,” *PV Magazine* 2025年2月7日 <https://www.pv-magazine.com/2025/02/07/india-hits-100-gw-solar-milestone> .
- 13 “模块可靠性评分卡揭示普遍存在质量风险” *PV杂志* ,2025年6月4日, <https://www.pv-magazine.com/2025/06/04/june-4-module-reliability-scorecard-reveals-widespread-quality-risk/> .

克里斯托弗·伯格，弗兰克·奥德霍斯登，克里斯·尼德汉姆和菲德尔·内文森，*风暴下的太阳能III：针对有飓风暴露风险的耐用地表光伏系统的最佳实践更新*，RMI, 2025, <https://rmi.org/insight/solar-under-storm>。

RMI重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许利益相关方通过知识共享CC BY-SA 4.0许可证来参考、共享和引用我们的作品。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>。



所有使用的图片均来自iStock.com，除非另有注明。



RMI创新中心
22830 两条河路 矿石城，科
罗拉多州 81621

www.rmi.org

© 2025 RMI。版权所有。落基山脉研究所®和RMI®是注册商标。