光伏组件设备供应链稳定性提升路径探析

赵 冰

（中国电能成套设备有限公司，北京 100080）

摘 要 光伏组件设备供应链稳定性直接关系到光伏产业安全，当前关键设备供给集中、核心零部件依赖进口、跨境交付不确定等问题突出，仅靠管理手段难以从根本上解决这些问题。本文从技术视角界定供应链结构特征与稳定性评价维度，识别现实技术困境，提出模块化设计与标准化接口、数字孪生与工业互联网协同、国产化替代与技术备份三条技术支撑路径，并从协同仿真验证、试点应用评估、集成方案推广三个层面构建技术集成与验证路径，旨在为光伏组件设备供应链稳定性提升提供技术参考。

关键词 光伏组件设备；供应链稳定性；模块化设计；数字孪生；国产化替代

中图分类号：F274；TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.002

0 引言

光伏组件设备供应链稳定性研究多聚焦采购与供应商管理，对技术结构本身的脆弱性关注不足。关键设备供给集中、核心零部件进口依赖、接口不统一、数字协同弱等技术因素，才是制约稳定性的深层根源，仅靠管理手段难以触及。本文从技术视角界定供应链结构特征，建立稳定性评价框架，识别关键技术困境，提出面向基础供应、风险预判与极端断供三类场景的技术路径，并设计集成验证方案，为光伏组件设备供应链稳定性提升提供方法借鉴。

1 光伏组件设备供应链稳定性的技术内涵与影响因素

1.1 光伏组件设备供应链的技术结构特征

光伏组件设备供应链包含硅片设备、电池片设备、组件封装设备以及重要的零部件，技术结构具有上游集中、中游分化、下游分散的特点。上游的关键设备和主要零部件供应比较集中于少数企业，中游的设备制造环节的技术路线出现分化的现象，下游的组件企业的需求比较分散，并且交付周期也较短。造成供应链单点依赖性强，任何一个环节出现技术上的中断都会引起整个链条的连锁反应，稳定性天然脆弱[1]。技术结构特征是理解供应链稳定性的起点，也为后续评价维度构建和技术路径设计提供了基本依据。

1.2 供应链稳定性的技术评价维度与指标

供应链稳定性可以从供给连续性、技术适配性、交付准时性、质量一致性这四个方面来评价。供给连续性可衡量设备及零部件能否一直供应的能力，技术适应性是指设备同工艺路线相匹配的程度，交付准时性是指设备能否按时到达生产线，质量一致性能否保证设备的性能稳定。四个维度共同构成稳定性评价体系，为后续困境分析与路径验证提供统一参照。评价维度与指标的确立，使供应链稳定性从抽象概念转化为可衡量对象，让技术路径的提出有据可依。具体指标体系如表1所示。

1.3 影响供应链稳定性的关键技术因素识别

影响供应链稳定性的关键技术因素包括四类。一是关键设备依靠进口，PECVD、激光掺杂等设备的供应主要来自国外公司。二是核心零部件国产化率不高，

表1 供应链稳定性技术评价指标体系

评价维度	核心指标	技术含义
供给连续性	供给中断频次、替代周期	设备与零部件持续供给能力
技术适配性	工艺匹配度、接口兼容率	设备与产线工艺路线匹配程度
交付准时性	交付延迟率、运输损耗率	设备按期到达产线能力
质量一致性	故障间隔、良率波动	设备性能稳定水平

作者简介：赵冰（1990-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统。

真空泵、射频电源、精密运动模组等都是从国外进口的。三是设备接口不统一，不同的厂家设备不能互相替换。四是数字协同程度不够高，设备制造商、零部件供应商、组件企业之间存在明显的数据壁垒，风险预警能力弱。四类因素相互交织，共同削弱供应链稳定性。识别这些因素，是后续提出技术支撑路径和集成验证方案的前提。

2 光伏组件设备供应链稳定性的现实技术困境

2.1 关键设备与核心零部件供给集中度过高

关键设备与核心零部件供给集中度过高是首要困境。PECVD 设备、激光掺杂设备、高精度丝网印刷设备等主要设备的供应商比较集中，真空泵、射频电源、精密运动模组这些重要的零部件大多依靠进口，一旦供给方出现产能不足、技术封锁或者物流中断的情况，就会给国内组件生产线带来断供的风险，供应链稳定性受到直接冲击。供给集中度过高意味着替代周期长、议价能力弱，单一环节的技术中断即可沿供应链传导放大，是后续技术路径必须优先破解的核心问题。

2.2 上游原材料价格波动与产能错配

上游原材料价格的波动以及产能的错配都会造成供应链的不稳定。硅料、银浆、靶材等原材料的价格变动直接影响到设备的排产和交付速度，原材料供应不稳定也会造成设备工艺的不适应。产能错配是由于设备产能同组件扩产速度相脱离所造成的，一部分设备的交货时间变长，另一部分设备出现闲置的情况，整个供应链的效率被降低。原材料波动同产能错配互相叠加起来，致使设备制造端无法制订出稳定的排产计划，工艺适配性也随之下降，进一步放大了供应链的不确定性。

2.3 物流运输与跨境交付的技术不确定性

物流运输以及跨境交付有着明显的科技不确定因素。大型设备跨境运输时精密件容易受到振动、温度、湿度等环境的影响，造成运输损耗较高。由于清关技术标准不同而造成设备滞留的现象时有发生，从而使得交货期不能得到保证。由于跨境物流环节技术不确定性大，所以设备到货时间不稳定，给组件企业的生产安排带来困难，进而使整个供应链的稳定性变差[2]。物流和跨境交付的不确定性处在供应链末端，却直接影响设备交付准时性，与前两类困境共同构成供应链稳定性的现实约束。三类技术困境及表现如表 2 所示。

3 光伏组件设备供应链稳定性的技术支撑路径

3.1 设备模块化设计与标准化接口应用

设备模块化设计与标准化接口应用是提升供应链稳定性的基础路径。模块化设计把设备分成真空腔体、传输模组、控制系统等独立模块，降低单点依赖，当任何一个模块出现故障的时候就可以迅速替换掉，不会造成整个机器停止运转的情况发生。标准化接口使得不同的厂家设备之间可以互相替代，并且可以很快地更换，减少了对于某一个供应商的依赖程度，从而使得设备采购由单一供货模式变为多源选择模式。模块化和标准化相结合，使设备供应链由单点刚性供应变为多点柔性供应，供给连续性和技术适配性同步提升。从实施角度看，该路径技术门槛相对较低、改造成本可控、与现有产线兼容性好，企业可在新建产线中优先采用标准化设计，在存量产线中逐步推进模块化改造。因此，它是三条技术路径中最基础、最易落地的一条，其技术逻辑如图 1 所示。

表 2 光伏组件设备供应链主要技术困境及表现

困境类型	主要表现	技术影响
供给集中	关键设备与零部件依赖少数企业	断供风险高，替代周期长
原材料波动	硅料、银浆、靶材价格与供给波动	排产困难，工艺适配性下降
物流不确定	运输损耗、清关滞留	交付延迟，排产计划打乱

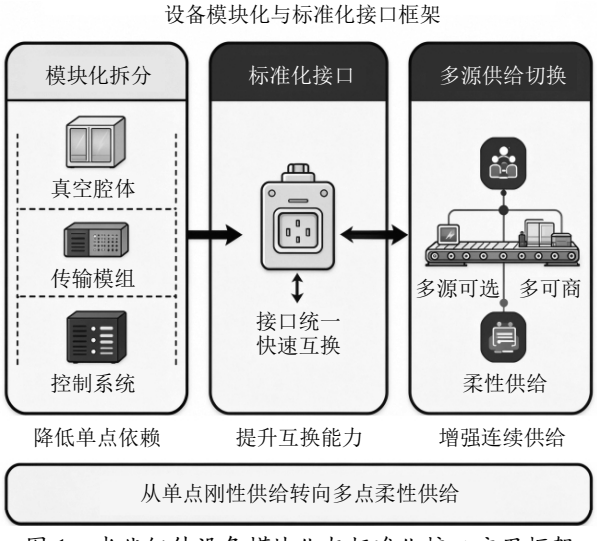

图 1 光伏组件设备模块化与标准化接口应用框架

3.2 数字孪生与工业互联网协同平台建设

数字孪生与工业互联网协同平台建设是提升供应链稳定性的关键路径。数字孪生把设备的状态实时呈现出

来，并且可以对设备的运行状况、零部件的损耗情况以及供应的风险做出预判，使风险在发生前即可被识别，为处置留出时间窗口。工业互联网平台打破设备制造商、零部件供应商和组件企业之间的数据壁垒，达成协同排产、风险预估的目的，从而缩减由于信息迟缓造成的交付延迟现象。两者相融合之后，就使供应链由被动应对变为主动预知，风险处理的时间往前推移，交付及时率及供应稳定度得到明显增强[3]。从实施角度看，该路径需软硬件协同投入，涉及数据采集、模型构建、平台部署等多个环节，初期投入较大，但一旦建成，对稳定性的提升具有系统性、持续性效果。

3.3 关键设备国产化替代与技术备份机制

关键设备国产化替代与技术备份机制是提升供应链稳定性的兜底路径。国产化替代分为整机替代和零部件替代两个方面，整机替代可以降低关键设备的进口比例，零部件替代可以提高核心部件的自主供应能力，两者同时进行才能达到完整的替代效果。技术备份机制依靠多种技术路线一起工作，当某一条技术路线出现问题的时候，还有其他的备选方案可以使用，不会因为某个技术被封锁而造成供应链的断供。从实施上看，国产化替代要经过样机验证、试点应用、批量推广三个阶段，技术备份机制要在设计之初就留出接口以及工艺兼容空间。国产化替代与技术备份结合，使供应链在极端情况下仍能维持基本运转，是前两条路径的重要补充。三条路径分别对应基础、关键、兜底三个层次，共同构成技术支撑路径的完整体系。

4 光伏组件设备供应链稳定性的技术集成与验证路径

4.1 供应链协同仿真与风险预警技术验证

供应链协同仿真以及风险预警技术验证属于技术集成检验的首要环节。在仿真建模方面，采用离散事件仿真方法，将设备制造商、零部件供应商、组件企业作为节点构建供应链网络模型，输入供给中断概率、物流延迟分布、原材料价格波动区间等参数，模拟多场景下的供应链运行状态。通过仿真的方法来模拟出由于供应中断、物流延误、原材料价格变动等原因造成的各种情况，并以此为基础来检验风险预警模型是否准确、及时。验证指标有预警提前量、误报率、漏报率。仿真验证结果显示，协同仿真以及风险预警技术可以很好地发现供应链上的薄弱环节，为技术集成方案优化提供依据，使风险处置从经验判断转向数据驱动。

4.2 国产化替代设备的试点应用与性能评估

国产化替代设备的试点应用以及性能评价属于技术整合检验的关键部分。国产化替代设备在试点产线中应用，从设备稳定情况、工艺匹配度、良率影响三个维度评估性能。设备稳定性以平均无故障时间和故障恢复时间衡量，工艺适配性以工艺参数达标率和接口兼容率衡量，良率影响以试点产线良率波动幅度衡量。评估结果表明，国产化替代设备的稳定性及工艺适配性方面已接近进口设备水平，并且良率的影响也处于可以接受的范围内，具备进一步推广条件，为国产化替代从单点试用走向批量应用提供了实证支撑。

4.3 技术集成方案的稳定性效果评价与推广路径

技术集成方案稳定性的效果评价以及推广途径属于技术集成检验的最后一部分工作。稳定性效果评价是从供给连续性、技术适应性、交付及时性、质量一致性四个维度综合打分，评价技术集成方案的整体效果[4]。评价结果表明，技术集成方案实施后，供给中断频次下降，替代周期缩短，交付延迟率降低，质量一致性提升，整体稳定性得分较实施前有明显改善。推广路径有试点推广、行业标准制定、产业链协同推广这三个层次，逐渐扩大技术集成方案的应用范围，不断提高光伏组件设备供应链的稳定性，形成一个由验证到推广完整的闭环[5]。

5 结束语

通过从技术视角对光伏组件设备供应链稳定性的内涵、困境与提升路径进行分析。结果表明，模块化设计和标准接口可以解决基本供应的问题，数字孪生同工业互联网联合起来可以达到风险预估的目的，国产化替代与技术备份可解决极端断供问题，三者分别对应基础、关键、兜底三个层次，共同构成提升供应链稳定性的技术体系。技术集成和验证途径使上述方案由理论变为实践。未来要加快技术集成方案的实施，增强光伏组件设备供应链的抗风险能力。

参考文献：

[1] 张旭龙.业主方视角下新能源光伏项目EPC模式供应链管理的风险评估与优化研究[J].中国集体经济,2025(25):77-80.

[2] 江燕兴.极高纬度地区光伏电站阵列优化与设备管理策略研究[J].电力设备管理,2025(07):83-85.

[3] 周沈.时间敏感需求下A公司光伏供应链协同研制策略研究[D].上海:东华大学,2024.

[4] 景家锤.基于绿色供应链的废旧光伏组件回收模式与优化研究[D].天津:天津理工大学,2024.

[5] 董一宁.双碳背景下北京光伏设备供应链网络设计与选择[D].北京:华北电力大学(北京),2023.