

[光伏系统]

光伏发电技术的应用可靠性探讨

文/张雷

国电投山东生态能源有限公司

随着全球能源需求的增长和环保意识的提高，光伏发电技术得到广泛的关注和迅速的发展。综合探讨光伏发电技术的基本原理、发展现状以及实际应用中的挑战，并详细分析提高可靠性的多种策略，如采用先进材料与制造工艺、实施光伏系统的智能监控与故障诊断技术、设计全面的质量控制与测试程序，以及加强环境适应性和保护措施。通过一系列的技术应用测试，验证这些策略在实际中的有效性，为光伏发电技术的未来发展和应用提供科学依据和实践指南。

光伏发电技术是一种将太阳能转换至电能的关键技术，其应用可靠性直接影响到可再生能源领域的可持续性与经济效益。随着全球能源结构的转变和对可持续发展的需求，光伏发电不断受到推崇，但其在广泛部署和长期运营过程中面临的可靠性挑战也逐渐显现。这些挑战包括电池效率衰减、材料老化、环境因素影响以及系统维护问题，这些因素均可能导致发电效率下降或系统故障。

光伏发电的基本原理与光伏电池技术

1. 光伏发电的基本原理

光伏发电技术将太阳能通过光电效应直接转换为电能。这一过程主要发生在光伏电池内部，这些电池大多由半导体材料制成。基本原理涉及三个关键步骤：光子吸收、电荷载子生成及分离以及电荷载子的收集。

当太阳光照射到光伏电池上时，半导体材料（如硅）吸收含能量的光子。半导体内部的电子获得足够能量从价带激发到导带，从而形成自由电子和空穴。这些自由电子和空穴分别是电流的负载和正载，其运动形成电流。为了有效地收集这些电荷，光伏电池设计了内部电场。这通常通过在半导体材料中形成P-N结来实现，P型半导体与N型半导

体接触时会在接触面形成内建电场。这个电场有助于推动电子向N型层移动，空穴则向P型层移动，从而防止它们在半导体内重新结合。当这些电荷通过外部电路流动时，就形成可利用的电流。整个过程的效率受到多种因素的影响，包括材料的类型、光伏电池的结构设计以及外界环境条件等。光伏发电的基本原理如图1所示。

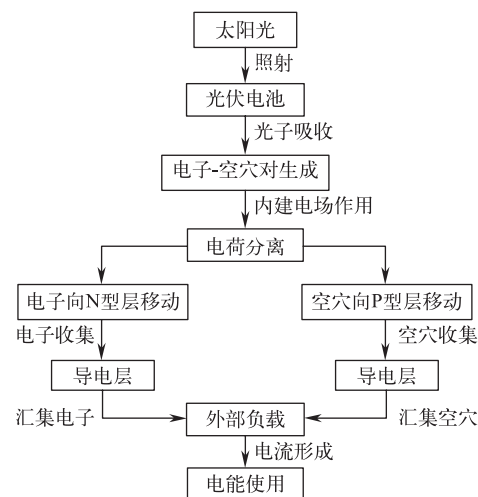


图1 光伏发电的基本原理

2. 光伏电池技术介绍

光伏技术的发展近年来极大地受益于新材料的

引入，如钙钛矿电池和有机光伏材料。钙钛矿电池使用一种名为钙钛矿结构的材料，主要成分是金属卤化物。钙钛矿电池的光电转换效率在实验室条件下已达到约23.7%，接近最先进的单晶硅电池。其主要优势在于低成本和易于制造，可以通过溶液加工过程在低温下制备。然而，钙钛矿电池的稳定性 and 环境耐久性还不足以满足长期商业应用的要求，尤其是在湿度和高温环境下的表现仍需改进；有机光伏材料（如聚合物和小分子）提供了可打印、可柔性和色彩多样化的解决方案。这些材料的光电转换效率较低，通常在10%~13%之间，但其制造成本低，且可应用于曲面或其他非传统的太阳能集成结构。主要限制包括较低的效率和较短的使用寿命。单晶硅、多晶硅和薄膜电池在生产过程、效率和成本等方面的特点见表1。

表1 不同电池的生产特性

技术类型	光电转换效率 (%)	生产成本/ (元/W)	主要应用场景
单晶硅	18~22	3.2	住宅和商业屋顶，要求高效率
多晶硅	15~18	2.6	大规模太阳能农场，成本敏感型应用
薄膜电池	10~13	1.9	可集成到建筑物表面，对载重和美观有特殊要求的场合

提高光伏发电技术应用可靠性的策略

1. 系统配置优化

(1) 组件选型与匹配

第一步是合理选择并匹配光伏组件和逆变器等相关设备。光伏组件的性能参数，如开路电压、短路电流、最大功率点电压和电流，直接影响系统的输出性能。需要根据实际的太阳辐照度和温度条件，选择适合的组件型号。同时，逆变器的输入电压和电流范围应与光伏阵列的输出相匹配，以避免能量损失和设备损坏。在实际配置中，需要考虑组件的温度系数和性能偏差。例如，在温度升高时，组件的输出电压会降低，选用温度系数较小的组件可以减少温度对系统性能的影响。此外，尽量选用同一批次、性能参数一致的组件，避免组件间的不匹配导致功率损失。

(2) 电气设计与保护

电气设计的优化包括导线尺寸的合理选择、保护装置的配置和接地方案的制定。导线截面积的选择需要满足电流承载能力和电压降的要求。一般情

况下，导线的电流密度应控制在5~8 A/mm²，以保证导线在长期运行中不会过热。同时，电压降应控制在系统额定电压的固定数值范围内，例如，对于600 V的系统，电压降应不超过12 V，以确保系统的效率。保护装置如断路器和熔断器的额定电流需要大于线路的最大工作电流，通常取最大工作电流的1.25倍，以保证在过载情况下能够及时切断电路，保护设备安全。接地方案需要考虑系统的安全性和电磁兼容性，采用适当的接地措施可以有效防止漏电和雷击等风险。

(3) 热管理与安装布局

温度对光伏组件的性能和可靠性有显著影响。高温会降低组件的输出功率，并加速老化。因此，组件的安装角度和间距需要兼顾光照利用和通风散热。合理的安装角度不仅可以最大化接受太阳辐射，还能减少灰尘和积雪的影响。支架的设计和材料选择也影响散热性能。采用高导热系数的材料，如铝合金，有助于组件的散热。此外，确保组件背面有足够的空气流通空间，可以降低组件的工作温度，提高系统的可靠性。

(4) 控制策略优化

在光伏系统中，最大功率点跟踪（MPPT）技术是提高能量获取效率的重要手段。优化控制策略可以使系统在不同的光照和温度条件下，都能输出最大功率。在控制器的设计中，需要选择合适的MPPT算法，并根据系统的动态响应要求，调整算法的参数。常用的MPPT算法包括扰动观察法、增量电导法等。不同的算法在响应速度和稳定性方面有不同的表现。需要根据系统的具体需求，选择适合的算法。例如，在光照变化较快的环境中，选择响应速度较快的算法可以提高能量获取效率。

2. 先进材料与制造工艺的应用

先进材料与制造工艺的应用不仅能提高电池的效率，还能显著增强其耐用性和环境适应能力。此外，采用自动化和精密的制造技术如激光切割和自动化层压技术，可以确保生产过程中的一致性和高质量标准，从而减少电池缺陷率和提高整体组件的可靠性。使用不同先进材料和制造工艺的光伏电池在关键性能指标上的表现对比见表2。

通过这些数据可以看出，尽管一些高效率材料和先进制造工艺的成本稍高，但它们在延长光伏电

池的使用寿命和提升环境适应性方面具备显著优势。投资这些技术的长期收益远大于初期成本的增加，这种技术创新和优化推动光伏行业向着更高效率和更高可靠性的方向发展。

表2 关键性能指标对比数据

材料/工艺	光电转换效率 (%)	衰减率/ (%/年)	抗环境影响能力评分 (1~10)	制造成本/ (\$/W)
标准多晶硅	17.0	0.7	6	0.45
高纯度硅	18.5	0.5	7	0.50
钙钛矿	22.0	0.4	8	0.65
纳米技术增强多晶硅	19.0	0.4	8	0.55
激光切割技术	17.5	0.6	7	0.48

3. 光伏系统的智能监控与故障诊断

智能监控与故障诊断在提升光伏发电系统的应用可靠性中扮演着核心角色。这些系统利用高级的数据分析和机器学习算法，实时监测光伏阵列的性能，及时识别并诊断潜在的故障或效率下降的问题。具体来说，智能监控系统通过安装在光伏阵列中的传感器连续收集数据，包括电流、电压、温度以及光照强度等参数，这些数据随后被实时传输至中央处理系统，通过一种称为异常检测的算法来分析数据，异常检测算法可以表述为

$$z(t) = \frac{x(t) - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中， $x(t)$ 为实时监测到的参数值； μ 和 σ 分别为该参数的历史平均值和标准差； $z(t)$ 为标准化的结果，该值表明当前读数与历史表现的偏差程度。

通过设定阈值，当 $z(t)$ 超过该阈值时，系统判定为异常状态，进一步故障诊断程序则启动以确定具体问题所在，如通过比较不同传感器的读数来区分是传感器本身的问题还是系统级的故障。

进一步地，该智能监控系统还包括故障分类算法。此算法使用机器学习模型，如支持向量机（SVM）或神经网络，来分析异常数据点后的特征，以确定故障的具体类型和可能的原因，模型的训练过程包括使用历史故障数据来训练分类器

$$f(y) = Wx + b \quad (2)$$

式中， y 为故障类型； x 为输入的特征向量； W 和 b 为模型参数。

通过这种方式，智能监控系统不仅能够检测到异常状态，还能提供具体的故障诊断信息，大大减

少系统停机时间和维护成本。

4. 质量控制与测试程序设计

质量控制与测试程序设计在提升光伏发电技术的应用可靠性中起到核心作用。这些程序确保每一个生产环节都达到既定的质量标准，有效地预防产品缺陷的发生，并保证光伏系统在实际操作中能达到最优性能。为实现这一目标，制定一系列详细的质量控制流程和严格的测试标准，其中包括从原材料检验到成品测试的全过程控制。特别是在光伏电池板的生产中，采用先进的自动化检测技术来进行实时监测。通过引入统计过程控制（SPC）技术，有效地监控生产过程中的关键变量。此技术的核心是利用控制图的方法来实时监测生产数据，确保所有过程参数保持在控制限内。

控制图的基本算法可以表述为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

$$UCL = \bar{X} + \frac{S}{3\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$LCL = \bar{X} - 3\frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

式中， X_i 为单个生产样本的测量值； $\bar{X}$ 为样本均值； S 为样本标准偏差； n 为样本数量； UCL （上控制限）和 LCL （下控制限）为用于确定生产过程是否处于受控状态的阈值。

通过这些计算，可以实时识别出任何偏离正常生产条件的情况，及时进行调整以避免质量问题。

此外，光伏电池板的测试程序设计也包括对光电性能、温度适应性和长期耐久性的综合评估，这些测试通过模拟实际运行条件来验证产品的性能和可靠性。

技术应用测试

设计并实施一系列严谨的技术应用测试，旨在评估系统配置优化和新型材料应用对光伏系统性能和可靠性的影响。测试在室内实验室条件下进行，以确保环境参数的可控性和数据的准确性。主要设备和配置包括：光伏组件选用三种不同类型的光伏组件，即标准多晶硅组件、高纯度单晶硅组件和钙钛矿组件。每种类型的组件额定功率均为100 W；环境模

拟系统采用全光谱太阳光模拟器，光照强度可调范围为200~1 200 W/m²，光照均匀性优于±2%；温度控制系统使用精密温控平台，温度可在-1~60 ℃范围内调节，控制准确度为±0.5 ℃；数据采集系统采用高精度度数据记录仪，采集频率为1 Hz，能够实时记录电压、电流、温度和光照强度等参数。同时设计多组测试场景，涵盖不同的温度和光照条件，见表3。

表3 环境组合参数

组合编号	环境温度/℃	光照强度 / (W/m ²)
1	15	400
2	15	800
3	15	1 200
4	25	400
5	25	800
6	25	1 200
7	35	400
8	35	800
9	35	1 200

在确定环境参数后，将待测光伏组件安装在温度控制平台上，确保组件表面清洁，无遮挡物。启动数据采集系统，记录组件的输出电压、电流，以及环境温度和光照强度。在每种环境条件下，持续记录10 min，确保数据的稳定性和可靠性。依次更换光伏组件，直至完成所有测试组合。每个组合下的测试均进行三次，总计测试次数为9（环境组合）×3（组件类型）×3（重复次数）= 81次。

经过数据处理和统计分析，得到各组件在不同环境条件下的平均性能参数，具体见表4~表6。

表4 标准多晶硅组件测试结果（平均值）

组合编号	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W
1	17.8	4.5	80.1
2	18	4.6	82.8
3	18.2	4.7	85.5
4	17.6	4.4	77.4
5	17.8	4.5	80.1
6	18	4.6	82.8
7	17.4	4.3	74.8
8	17.6	4.4	77.4
9	17.8	4.5	80.1

表5 高纯度单晶硅组件测试结果（平均值）

组合编号	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W
1	18.5	5	92.5
2	18.7	5.1	95.4
3	18.9	5.2	98.3
4	18.3	4.9	89.7
5	18.5	5	92.5
6	18.7	5.1	95.4
7	18.1	4.8	86.9
8	18.3	4.9	89.7
9	18.5	5	92.5

表6 钙钛矿组件测试结果（平均值）

组合编号	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W
1	19	5.3	100.7
2	19.2	5.4	103.7
3	19.4	5.5	106.7
4	18.8	5.2	97.8
5	19	5.3	100.7
6	19.2	5.4	103.7
7	18.6	5.1	94.9
8	18.8	5.2	97.8
9	19	5.3	100.7

从测试结果可以看出，随着环境温度的升高，输出电压略有下降，输出电流变化不大，导致输出功率有所降低。例如，标准多晶硅组件在组合1（15 ℃）和组合7（35 ℃）下的输出功率分别为80.1 W和74.8 W，功率下降约5.3 W。在相同温度下，随着光照强度的增加，输出电压和电流均有所提升，输出功率显著增加。高纯度单晶硅组件在25 ℃条件下，光照强度从400 W/m²提升至1 200 W/m²，输出功率从89.7 W增加至95.4 W。钙钛矿组件在各环境组合下的输出功率均高于其他两种组件，表现出较高的光电转换效率。需要注意的是，钙钛矿组件的长期稳定性仍需进一步验证。

总体来看，在所有测试条件下，钙钛矿组件的输出功率最高，平均提高约10%~12%。这表明钙钛矿材料具有优异的光电转换性能，尤其在低光照强度下优势明显。高纯度单晶硅组件性能次之，输出功率较标准多晶硅组件高出约15%。其在高温条件下的性能保持相对稳定，显示出良好的温度适应性。标准多晶硅组件性能相对较低，受温度影响较大，输出功率在高温条件下下降明显。

结束语

光伏发电技术的研究不仅是为提高能源产出的效率，更是为实现系统的长期稳定运行，保障能源安全和推动环境可持续发展的目标。全面提高光伏系统的可靠性，可以有效地降低因技术或操作失败导致的经济损失，同时，也为全球能源结构的绿色转型提供坚实基础。EA

（收稿日期：2024-10-09）