

# 市政道路光伏路面结构与能量转换效率优化

彭 静

江西阳桥建设工程有限公司宁都分公司 江西赣州 342800

**摘 要：**市政道路光伏路面作为一种将道路基础设施与新能源发电相结合的创新技术，其结构体系与能量转换效率的优化是实现其功能与经济性的关键。该路面采用“功能分层”设计，由基层、缓冲层、光伏电池层、封装层和面层构成，需同时满足道路承载、安全通行与高效发电的多重需求。然而，其能量转换效率受到面层污染磨损、车辆遮挡阴影以及电池工作温升等多重因素的制约。为提升性能，需从结构与材料两方面进行系统性优化。通过采用纳米改性材料优化面层，可提升透光率、耐磨性与自清洁能力；通过模块化错位布局与旁路二极管保护，可减少阴影效应与热斑效应的影响；通过集成水循环冷却系统，可有效控制电池工作温度，保障其在高效区间运行。这一系列综合优化策略，为构建高效、耐久且安全可靠的市政道路光伏路面提供了系统性的技术路径。

**关键词：**光伏路面；能量转换效率；结构优化；面层材料

## 引言

随着全球能源转型与智慧城市建设的推进，将传统基础设施赋予能源生产功能已成为重要发展方向。市政道路作为城市中覆盖面积最广的基础设施之一，其表面蕴含着巨大的太阳能利用潜力。光伏路面技术应运而生，它将光伏发电组件集成到道路结构中，使道路从单纯的交通载体转变为分布式发电站。然而，这一创新构想在实际应用中面临着严峻挑战：道路结构必须承受复杂的车辆荷载与恶劣的环境侵蚀，而光伏组件又对工作环境有着苛刻的要求。如何在保障道路安全耐用的前提下，最大限度地提升其能量转换效率，成为制约该技术发展的核心瓶颈。因此，深入剖析光伏路面的结构体系，揭示影响其发电效率的关键因素，并探索科学的优化策略，对于推动这一前沿技术的落地应用、促进城市可持续发展具有重大的理论价值与深远的现实意义。

## 一、市政道路光伏路面的结构体系与功能要求

### （一）光伏路面的分层结构组成

市政道路光伏路面系统严格遵循“功能分层”的集成设计理念，以实现发电、承载、防护等多功能协同为目标，由下至上依次为基层、缓冲层、光伏电池层、封装层以及面层，各层材料与结构经过精密匹配与性能优化。基层作为主要的承重结构，通常沿用已成熟应用的传统沥青混凝土或水泥混凝土材料，其厚度与强度须严格符合市政道路的荷载标准，为上方各层提供均匀稳定的力学支撑；基层施工过程中平整度误差需严格控制在

3mm/3m以内，以防因局部沉降或变形引发光伏电池组件发生破裂或失效。

缓冲层铺设于基层与光伏电池层之间，常采用柔性高、弹性恢复好的改性橡胶类聚合物材料，其核心功能在于吸收和消散由车辆行驶所带来的振动与冲击荷载，显著降低动力响应传递至光伏电池层，从而保护脆性电池组件的结构与电气安全；该层还具备辅助性的隔水防潮作用，可有效阻止地下水汽上升，避免电池电路受潮发生短路。光伏电池层作为整个系统的能量转换核心，由多个单晶或多晶硅电池片按预设电气布局进行拼装，片间以高可靠性导线相连构成完整发电回路，该层在铺设中需实施严格的密封隔离处理，以防止水汽、灰尘等杂质侵入影响发电性能与寿命。封装层通常选用高透光、耐紫外老化的聚碳酸酯或环氧树脂类材料，以层压或灌注方式将电池片完全包覆，在形成稳定整体结构的同时显著提高防水与抗机械损伤能力。最上方面层直接与车辆轮胎接触，须采用高透光且高耐磨的复合材料，在保障充足太阳光透射的同时满足行车安全与耐久性要求。

### （二）面层材料的透光性与耐磨性要求

面层作为光伏路面系统中与环境及车辆直接作用的关键层位，其材料的光学与力学性能直接影响整个系统的发电效率及服务寿命，因此必须在高透光率与高耐磨性之间寻求最佳平衡。在透光性能方面，为保障足够太阳辐射能量抵达光伏电池表面，面层材料可见光透过率须达到75%以上；研究表明，若透过率低于60%，会导致光伏电池接收的辐射量大幅削减，系统整体发电效率

下降将超过20%。此外，面层材料还应具备优良的光谱响应特性，其对可见光及近红外波段的光线透过率差异应控制在10%之内，以避免因选择性透光造成电池片转换效率损失。

在耐磨性能方面，因长期承受车辆轮胎的反复摩擦与碾压作用，面层材料的耐磨耗能力必须满足严苛要求，其磨耗值应不大于 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ （依据洛杉矶磨耗试验标准），材料表面硬度则不应低于邵氏D75等级。传统透明材料如普通玻璃，虽具备较高透光性，但脆性大、抗磨能力较差，难以适应道路复杂受力环境；目前工程中常选用复合型透光材料，如钢化玻璃与聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）复合板，借助多层材料复合与界面增强技术，在保持透光率不低于75%的前提下，将其耐磨性能提升至普通玻璃的3-5倍，并同步增强抗冲击性，例如可承受1.5kg钢球自1米高度自由落体冲击而不碎裂<sup>[1]</sup>。

### （三）结构层的承载能力与散热设计

光伏路面作为一种新型道路结构，其整体力学性能必须符合现行市政道路设计规范，以典型双向四车道城市主干道为例，路面结构应能安全承受轴重为100kN的重型车辆反复通行，整体结构抗压强度不低于40MPa，弯拉强度不低于4.5MPa。荷载在各结构层之间需合理传递与分布：基层承担约70%-80%的总荷载，并通过其刚性基础避免不均匀沉降；缓冲层与封装层借助弹性变形能力扩散局部应力，防止光伏电池层出现应力集中；电池组件自身也应具备一定抗压强度，通常要求不低于25MPa，以抵御残余荷载带来的潜在破坏。

散热性能是影响光伏电池发电效率与长期可靠性的关键因素。光伏电池在工作时会产生热量，其转换效率随温度上升而下降，一般温度每升高 $1^\circ\text{C}$ ，效率降低0.4%-0.6%。因此光伏路面需采取高效散热设计：主要通过热传导与对流换热方式实现温控，如基层可选用多孔或导热填料增强竖向导热能力；面层则可设计微粗糙表面以提高与空气的热交换效率。此外，在光伏电池层周边常设置专用的散热通道或空隙结构，利用空气流动及时将积聚热量导出，确保电池工作温度稳定在 $60^\circ\text{C}$ 以下，从而避免高温引发的性能衰退与老化加速<sup>[2]</sup>。

## 二、影响光伏路面能量转换效率的关键因素

### （一）路面表面污染与磨损对透光率的影响

市政道路光伏路面长期暴露在户外，表面易积累灰尘、泥沙、油污等污染物，同时受车辆轮胎摩擦与环境侵蚀，会产生磨损，两者共同导致面层透光率下降，削弱光伏电池的受光量。灰尘与泥沙的覆盖会形成物理遮

挡，薄尘层（厚度 $0.1\text{mm}$ ）可使透光率下降10%-15%，厚尘层（厚度 $0.5\text{mm}$ ）则会导致透光率下降30%以上；油污类污染物不仅遮挡光线，还会渗透至面层材料内部，破坏透光结构，造成永久性透光损失。

路面磨损对透光率的影响具有不可逆性，长期车辆碾压会使面层表面产生划痕，浅划痕（深度 $<0.1\text{mm}$ ）对透光率影响较小（下降5%以内），深划痕（深度 $>0.3\text{mm}$ ）会形成密集的光线散射面，导致透光率下降20%-25%。此外，雨雪天气虽能冲刷部分污染物，但长期雨水侵蚀会加速面层材料老化，使透光性能逐渐衰减，年衰减率约为3%-5%。

### （二）车辆遮挡与阴影效应的影响

车辆行驶过程中的动态遮挡与固定阴影（如道路两侧树木、建筑物），会显著影响光伏路面的能量转换效率。动态遮挡方面，城市主干道的车辆通行密度高，高峰时段路面被车辆覆盖的面积占比可达40%-50%，导致光伏电池无法充分接收太阳辐射，能量输出呈现明显波动；同时，车辆行驶产生的瞬时阴影会引发电池组件的“热斑效应”，被遮挡的电池片成为负载，消耗其他电池产生的电能，不仅降低整体效率，还可能因局部过热损坏电池组件。

在固定阴影方面，道路两侧的高大树木以及各类建筑物会在路面上形成一些固定的阴影区域，这些阴影覆盖的区域对光伏电池组件的发电效率影响显著。具体来说，当电池组件处于阴影之下时，其发电效率会急剧下降，几乎接近于零。若阴影区域占整个路面总面积的10%左右，系统的整体能量转换效率预计将下降8%至12%，从而直接影响整个道路光伏系统的总发电量。此外，由于太阳高度角会随着一天中不同时段的变化而不断改变，阴影的位置也会发生相应的移动，这种动态变化进一步加剧了系统能量输出的波动性与不稳定性。这种不稳定的能量输出特性，无疑对电网的平稳接入和电力调度提出了更高的技术要求与运营挑战<sup>[3]</sup>。

### （三）光伏电池工作温升对发电效率的影响

光伏电池的工作温升是制约能量转换效率的核心因素，其发电过程中约70%的太阳辐射能量会转化为热能，导致电池温度升高。市政道路光伏路面因结构层的隔热作用，热量难以快速散发，夏季高温时段电池工作温度可升至 $70^\circ\text{C}$ 以上，较环境温度高出 $20\text{--}30^\circ\text{C}$ 。

高温环境会从两方面降低发电效率：一是破坏电池内部的半导体材料特性，减少光生载流子的分离与传输效率，导致短路电流与开路电压下降；二是加速电池组

件的老化速度，缩短其使用寿命，高温条件下电池组件的年衰减率会从常温环境的2%升至4%以上。此外，不同区域电池的温度差异会引发组件间的性能不匹配，进一步降低整体能量转换效率，温度差异每达到5℃，整体效率下降约2%–3%。

### 三、光伏路面结构与能量转换效率的优化策略

#### (一) 面层材料与结构的优化设计

面层材料优化的核心是提升透光性、耐磨性与抗污染能力，某市政光伏路面示范项目采用“纳米二氧化硅改性聚碳酸酯”材料，通过在聚碳酸酯中添加5%–8%的纳米二氧化硅，其透光率维持在80%以上，耐磨性提升至普通聚碳酸酯的4倍，同时纳米粒子形成的表面微结构可减少污染物附着，灰尘附着量下降30%，雨水冲刷后的自清洁效率提升50%。

结构优化方面，采用“凹凸相间”的面层纹理设计，凸起部分（高度2–3mm）用于增加轮胎摩擦力，保障行车安全，凹陷部分用于减少光线反射，提升透光效率；同时，在面层与封装层之间增设透光防雾涂层，避免冬季或雨季因温差产生雾气影响透光。该优化方案实施后，路面透光率较传统平面面层提升12%，能量转换效率提升8%–10%，同时行车制动距离缩短5%，安全性显著提升<sup>[4]</sup>。

#### (二) 电池组件布局与电路连接方式的优化

电池组件布局优化需减少遮挡与阴影效应的影响，某城市次干道光伏路面项目采用“模块化错位布局”，将光伏电池组件划分为1m×1m的独立模块，模块间按30cm间距错位排列，避免车辆行驶时同一区域的模块被同时遮挡；同时，根据道路通行特征，在车辆轮迹集中区域加密组件布局，非轮迹区域合理调整组件角度，使组件受光面积提升15%。

电路连接方式优化采用“旁路二极管分组保护”设计，每个电池模块串联1个旁路二极管，当模块被遮挡时，二极管自动导通，将被遮挡模块旁路，避免热斑效应产生；同时，采用最大功率点跟踪（MPPT）技术，为每个模块配置独立的MPPT控制器，实时追踪各模块的最大功率输出，减少模块间性能不匹配导致的效率损失。该优化方案使车辆高峰时段的能量输出波动幅度从35%降至15%，整体能量转换效率提升12%。

#### (三) 路面集成冷却系统的设计与应用

路面集成冷却系统的核心是快速导出电池工作产生的热量，某高速公路光伏路面试验段采用“水循环冷却

+多孔基层散热”的复合系统。在缓冲层与光伏电池层之间铺设细水管网，水管直径10mm，间距20cm，通过循环水泵驱动水流带走热量，冷却水经路面边缘的散热装置降温后循环使用；基层采用多孔水泥混凝土材料，孔隙率控制在15%–20%，增强热量向地下的传导效果。

该冷却系统可将电池工作温度控制在45℃以下，夏季高温时段温度较未冷却的路面下降25℃，能量转换效率提升15%–18%；同时，循环冷却水可回收利用，冬季用于路面融雪除冰，实现“散热–融雪”双重功能。此外，系统设置温度传感器，实时监测电池温度，动态调整水泵转速，在保障冷却效果的同时降低能耗，水泵运行能耗仅占光伏路面发电量的3%–5%<sup>[5]</sup>。

### 结语

市政道路光伏路面结构与能量转换效率的优化，是一场材料科学、结构工程与能源技术深度融合的探索。它要求设计者不仅要考虑道路的坚固与安全，更要像对待精密仪器一样，精细地管理每一缕阳光、每一分热量。从面层材料的微观改性，到电池组件的智能布局，再到冷却系统的集成创新，每一个优化环节都体现了对技术极限的挑战与突破。这些努力共同指向一个目标：让道路在承载车辆通行的同时，也能高效、稳定地收集太阳能，成为城市能源网络中一个活跃的节点。展望未来，随着相关技术的不断成熟和成本的持续降低，光伏路面有望从示范项目走向规模化应用，为构建绿色、低碳、智慧的城市基础设施贡献重要力量，让城市道路在流动的车水马龙之下，悄然汇聚起推动未来发展的清洁能源。

### 参考文献

- [1]何肖斌, 胡昌斌, 张培旭, 等. 装配式光伏路面系统设计及工程应用[J]. 福建交通科技, 2022(005): 000.
- [2]向波. 太阳能光伏光热道路—地源热泵系统供暖特性研究[D]. 西南交通大学, 2020.
- [3]赵冬梅. 光伏技术在路面结构中的应用分析[J]. 工程建设(2630–5283), 2020.
- [4]曾孟源. 装配式水泥混凝土路面振动感知与解析[D]. 同济大学, 2022.
- [5]胡恒武, 查旭东, 吕瑞东, 等. 基于光伏发电的道路能量收集技术研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(20): 12. DOI: 10.11896/cldb.21060129.