# 轻质光伏改造工业厂房的设计与应用研究

王青磊* 夏世超

国网上海市电力公司金山供电公司 上海 200540

**摘 要：**针对工业厂房屋顶荷载受限难题，开展轻质光伏屋顶改造应用研究，完成光伏组件、阵列运行模式及逆变器优选，借助 PVsyst 软件完成发电量仿真预测，并开展单因素敏感性分析。以上海某工业厂房为案例进行研究。结果表明：15.73 MWp 光伏系统年均发电 1493.87 万 kWh，25 年累计发电 37346.7 万 kWh，节约标准煤 10.49 万吨，减排 $CO_2$ 17.56 万吨。综合电价与发电量对内部收益率影响最大，建设投资次之。研究为存量工业建筑低成本、低碳光伏改造提供了技术路径。

**关键词：**轻质光伏组件；工业屋顶；适配性优化；案例研究

**引言：**分布式光伏可就地开发和消纳，适用于负荷集中的工业园区。工业厂房屋顶面积大、用电稳定，是光伏开发的重要载体，但既有轻钢屋面承载能力有限，制约常规组件安装。

轻质组件通过封装结构优化降低屋面附加荷载，为既有建筑改造提供技术途径。N 型 TOPCon 电池具有高效率、低衰减等特点。本文以上海某工业厂房为例，结合屋面荷载复核开展组件与逆变器选型，并采用 PVsyst 分析发电性能、消纳能力及项目效益。

## 1 厂房基础条件与改造可行性分析

### 1.1 厂房建筑概况

项目位于上海某工业企业园区，可利用屋顶面积约 13 万 $m^2$，包括钢筋混凝土屋面和柔性防水轻钢屋面。前期已开展结构安全复核及屋面荷载专项验算。

钢筋混凝土屋面承载能力满足安装要求，无需加固；柔性防水轻钢屋面需专项加固后满足安全荷载要求。改造后可满足新增光伏荷载 0.07 kN/$m^2$的要求[1]。

### 1.2 厂区用电负荷特征分析

园区生产主要集中于白天，用电负荷稳定，与光伏出力时段匹配。综合负荷波动及瞬时功率不平衡因素，项目采用“自发自用、余电上网”模式，并通过容量配置提升就地消纳比例。

### 1.3 太阳能资源

区域多年平均太阳总辐射量约 4824.3 MJ/$m^2$，属于我国四类太阳能资源区（年辐射总量 4200～5000 MJ/$m^2$）。采用 Meteonorm 典型气象年数据，并考虑衰减、温升、遮挡及设备损耗，预计系统综合效率约 80%，年等效利用小时数约 1020 h。

## 2 光伏改造系统总体设计

改造遵循结构安全优先、因地制宜和经济运行原则，结合既有屋面条件实施差异化配置[2]。

### 2.1 光伏组件选型

综合转换效率、衰减特性、产业链成熟度与投资成本，项目选择 N 型 TOPCon 技术路线。

混凝土屋面采用 650 Wp 及以上 N 型单晶硅双玻 TOPCon 组件，利用屋面反射辐照提高发电量；柔性轻钢屋面采用 450 Wp 单玻单面轻质组件，以降低附加荷载，并采用非穿透式安装方式保护原有防水层[3]。

### 2.2 逆变器选型

阵列分散于多个屋面，朝向、倾角和遮挡条件存在差异。组串式逆变器可通过多路 MPPT 独立跟踪减少失配损失，故选用 1500 V 组串式逆变器，参数见表 2.1。

**表 2.1 逆变器主要技术参数**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 逆变器类型 | 组串式 |
| 额定容量/kW | 196 |
| 最大效率/% | ≥ 99.0 |
| 中国效率/% | ≥ 98.4 |
| MPPT 数量 | 3 |
| 直流电压等级/V | 1500 |
| 冷却方式 | 智能风冷 |

1500 V 系统可减少直流线缆用量和线路损耗；智能风冷方式便于安装维护。

## 3 光伏系统运行性能与仿真分析

### 3.1 光伏系统仿真模型构建

采用 PVsyst 建立光伏系统仿真模型，输入项目所在地典型气象年数据、组件与逆变器参数、阵列布置方案

及系统损耗参数，预测发电性能。模型考虑太阳辐射、组件转换效率与温度影响，为倾角优化和生命周期发电量分析提供依据。

组件输出功率为：

$$P = \eta \cdot A \cdot H \quad (1)$$

式中：P 为组件输出功率；η 为光伏电池效率；A 为组件有效面积；H 为组件接收到的太阳辐射量。

组件效率的温度修正为：

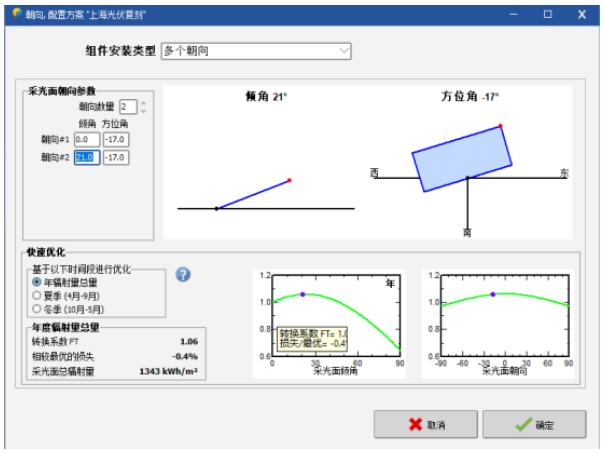
$$\eta_T = \eta_{STC}\left[1 - \gamma\left(T_c - T_{ref}\right)\right] \quad (2)$$

式中：$\eta_{STC}$为标准测试条件下组件效率；γ 为温度系数，对于单晶硅电池材料取 0.0045；$T_c$为组件工作温度；$T_{ref}$为参考温度。

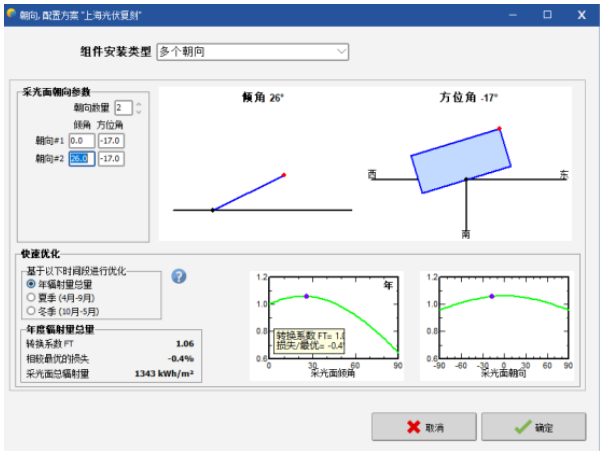
3.2 光伏阵列设计与参数优化

3.2.1 最佳安装倾角确定

采用 PVsyst 比较不同倾角下的年发电量。由图 3.1 可知，倾斜面年总辐射量随倾角增加先升后降，21°~26° 时达到最大，因此固定支架采用 21°~26° 安装倾角。




（a）21° 安装倾角




（b）26° 安装倾角

图 3.1 不同安装倾角下系统年辐射量变化曲线

3.2.2 阵列间距优化设计

按冬至日 9:00 至 15:00 无遮挡原则，阵列间距 D 计算如下：

$$D = L\cos\beta + L\sin\beta\frac{0.707\tan\Phi + 0.4338}{0.707 - 0.4338\tan\Phi} \quad (3)$$

式中：L 为阵列倾斜面长度；β 为阵列倾角；Φ 为当地纬度。

单排组件阵列中心间距约 3.8 m，双排约 7.5 m。

3.3 光伏系统规模配置

系统直流侧装机容量为 15.7348 MWp，交流侧为 13.96 MW，容配比为 1.127，采用分块发电、集中并网方式，组串式逆变器分区接入厂区配电网络[4]。

3.4 发电性能仿真分析

3.4.1 系统损失分析

系统损失参数见表 3.1。

表 3.1 系统损失参数设置

| 损失项目 | 损失率/% |
|---|---|
| 组件功率偏差 | 0 |
| 直流侧线损 | 0.74 |
| 污秽损失 | 3.00 |
| 弱光损失 | 1.31 |
| 交流侧损失 | 1.60 |

3.4.2 年发电量预测

考虑组件首年衰减 1%、后续每年衰减 0.4%，得到生命周期发电量预测结果（表 3.2）。

表 3.2 光伏系统生命周期发电量预测结果

| 指标 | 数值 |
|---|---|
| 首年发电量/万 kWh | 1601.4 |
| 首年利用小时数/h | 1018 |
| 系统综合效率/% | 79.2 |
| 25 年累计发电量/万 kWh | 37346.7 |
| 年均发电量/万 kWh | 1493.9 |
| 年均利用小时数/h | 949.4 |

3.5 光伏消纳能力分析

园区年用电量 3408.06 万 kWh，光伏首年发电量 1601.4 万 kWh，占总用电比例 46.99%。逐月用电量均高于对应月份光伏发电量，理论自发自用率为 100%；考虑设备检修、变压器运行约束及局部时段波动，实际消纳率≥ 90%，支持“自发自用、余电上网”运行模式[5]。

4 效益分析

4.1 节能减排效益分析

系统每年节约标准煤约 4194.48 吨，减排二氧化碳约 7022.67 吨。25 年累计节约标准煤约 10.49 万吨，减排二氧化碳约 17.56 万吨、二氧化硫约 31.53 吨、氮氧化物约 51.16 吨、烟尘约 5.46 吨、灰渣约 4.46 万吨。

4.2 收益单因素敏感性分析

选取建设投资、发电量和综合电价，设置 ±5%、±10%单因素波动工况。基准方案投资回收期为 7.98 年；建设投资降低 10.00%和增加 10.00%时，回收期分别为 7.15 年和 8.82 年；发电量或综合电价降低 10.00%和增加 10.00%时，回收期分别为 9.06 年和 7.13 年。

由此可见，综合电价及发电量对项目内部收益率影响最大，其次是建设投资。

**5 结束语**

以上海某工业厂房为案例，得到以下结论：

（1）按屋面承载条件配置常规 TOPCon 组件和轻质组件，结合必要结构加固及 1500 V 组串式逆变器，可满足低荷载屋面改造需求。

（2）21~26° 安装倾角下，系统首年发电量 1601.4 万 kWh，综合效率 79.2%，25 年累计发电量 37346.7 万 kWh。园区负荷与光伏出力匹配，具备高比例就地消纳条件。

（3）系统具有节能减排效益；综合电价与发电量是收益的主要敏感因素，应重视购电电价约定及发电量保障，同时控制建设投资。

**参考文献**

[1] 薛凯, 王帅, 马金鹏, 等. 工业园区分布式综合能源系统的规划与调度 [J]. 化工进展,2023,42(7):3510-3519.

[2] 王娟, 赵春红, 李瑶. 屋顶分布式光伏系统在铸造工业中的应用及经济环境效益 [J]. 能源环境保护,2022,36(1):105-108.

[3] 吴昕桐, 戴建方, 介雷, 等. 轻质柔性 TOPCon 光伏组件封装前板材料及其可靠性 [J]. 半导体技术,2026,51(5):499-506.

[4] 王艳. 光伏组件轻量化发展与研究进展 [J]. 水利电力技术与应用,2025,7(17):232-234.

[5] 周啸颖, 王丽婷, 刘海涛, 等.n 型 TOPCon 单晶硅太阳电池的研究现状与展望 [J]. 太阳能,2026,(3):5-14.