

超高层近零碳建筑光伏一体化设计研究

仲亮¹ 石晶群¹ 刘博宇² 王钧玉²

1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司 上海 200333

2. 上海朗绿建筑科技股份有限公司 上海 200050

摘要：建筑光伏一体化是实现近零碳建筑的必要手段。本文以实际项目为例，分析了在超高层建筑中实施建筑光伏一体化的应用方法，建立模型测算全年发电量，最终确定在屋顶及立面不透明部分布置光伏发电组件。设计中兼顾幕墙与遮阳构件，将光伏组件与建筑立面、自然通风相结合，实现一体化效果。同时布置直流照明灯具与直流充电桩，最大化实现光伏发电本地消纳。

关键词：超高层建筑；近零碳建筑；建筑光伏一体化；节能

引言

建筑节能与碳减排已经成为当前社会的共识。据统计，2018年，全国建筑运行CO₂排放达21.1亿吨，占全国排放21.9%^[1]。采取技术措施降低建筑运行阶段能耗，同时因地制宜地开发可再生能源，减少传统化石能源的消耗，是建筑节能降碳的必要措施。

分布式光伏发电是可再生能源最广泛的应用途径之一。根据国家能源局发布的数据，2022年全国光伏发电装机容量约3.9亿千瓦，同比增长28.1%^[2]，未来还在进一步增长中。“建筑光伏一体化”（Building Integrated Photovoltaic，简称BIPV）是光伏发电与建筑结合的有效方式。通过在建筑的屋顶、平台及立面等位置布置光伏发电组件，使之与建筑结构相结合，不额外占用场地，可以充分利用建筑自身及周边的空间资源，产生的电能就地消纳，对于建筑实现节能低碳、零碳排放的目标具有十分重要的作用。

为了普及推广光伏发电在建筑中的应用，国家推出一系列相关鼓励政策。2021年10月，国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》，提出到2025年，城镇建筑可再生能源替代率达到8%，新建公共机构建筑、新建厂房屋顶光伏覆盖率力争达到50%^[3]。2022年1月，国务院发布《“十四五”节能减排综合工作方案》，提出积极推进既有建筑节能改造、建设光伏一体化建设^[4]。

针对这种情况，本文依托实际项目，对在上海地区超高层近零碳建筑中，如何进行建筑光伏一体化设计展开具体研究。

1 案例概况

项目位于上海市徐汇区滨江地块，东至枫林路，南至龙华中路，西至船厂路，北至内环高架。总用地面积20,539.72m²，规划总建筑面积189,232.03m²，地上计容建

筑面积127,140.87m²，包括北侧住宅35,030.91m²，南侧公建综合体86,910m²。其中公建综合体为一幢199m超高层塔楼，地上40层、地下3层。相邻一幢8层裙楼，二者通过连廊相连。功能包括办公59,682.93m²，商业（酒店及配套商业）21,343.04m²，其他计容面积5,884m²。容积率6.19，绿化率20%，机动车停车位802辆。项目设计情况如下：



图1 项目设计情况与计算模型

项目按照国家标准《零碳建筑技术标准》（征求意见稿）中近零碳建筑标准设计，采用外围护结构优化、提升暖通空调系统能效、照明与设备节能、智慧能源控制、光伏发电等多项节能减碳技术措施，建筑本体冷、热负荷相对常规建筑（基准为GB55015）降低15%。经测算，在光伏年发电量不低于1,066MWh的情况下，降碳率达到47.0%，满足标准中近零碳建筑降碳率 $\geq 45\%$ 的要求^[5]。为了达到以上节能减碳目标，项目采用建筑光伏一体化设计，在屋面及立面铺设光伏发电组件，产生的电能就地消纳，减少传统能源消耗，实现节能降碳的目标。

2 光伏一体化设计研究

2.1 光伏发电方案比选

项目设计初期，首先对光伏发电方案进行初步比选，分析可行性，对比如下：

表 1 不同的光伏铺设方案对比

铺设方案	铺设方式	铺设特点
方案一	<ul style="list-style-type: none"> • 屋顶：晶硅，塔楼+裙楼 • 立面：光伏BIPV（薄膜），西、南立面（透光+不透光部分） • 应铺尽铺。 	<ul style="list-style-type: none"> • 优点：太阳辐射资源利用充分。 • 不足：薄膜组件发电效率不及晶硅；透明部分发电效率更低，经济性差；对建筑外观有较大影响。
方案二	<ul style="list-style-type: none"> • 屋顶：晶硅，塔楼+裙楼 • 立面：光伏BIPV（晶硅），所有立面（不透光部分：窗间墙+垂直遮阳） • 应铺尽铺。 	<ul style="list-style-type: none"> • 优点：太阳辐射资源最大化利用，发电量充足；对建筑外观影响相对较小。 • 不足：装机容量大，经济性较差。

综合考虑以上因素，经分析对比后，确定采用方案二作为主要技术方向。

2.2 光伏发电量测算

为满足全年发电量要求，在方案设计阶段采用以下方法测算光伏发电量：

- (1) 利用专业软件Rhino建立模型；
- (2) 测算各个朝向面的全年太阳辐照情况；
- (3) 测算各个可利用的发电面积（屋顶、窗间墙、垂直遮阳）；
- (4) 根据建筑设计方案，结合实际产品性能，设定转化率与修正系数；
- (5) 将全年太阳辐照量与发电面积、转化率及修正系数相乘，得出全年发电量。

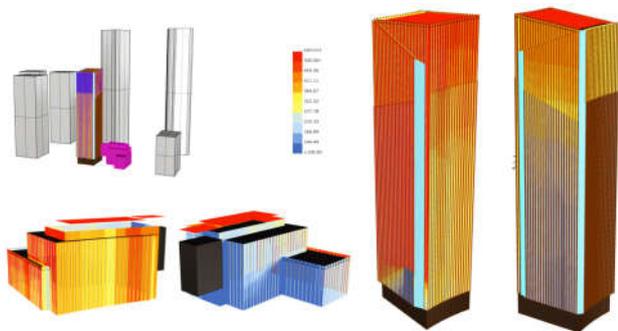


图 2 光伏发电量测算模型

经模拟测算后，项目塔楼屋顶光伏安装面积1,643.06m²，

装机容量386.32kW，年发电量200.02MWh；窗间墙、垂直遮阳斜面与短边总安装面积17,823.91m²，装机容量3,392.56kW，年发电量762.32MWh。裙楼屋顶光伏安装面积417.15m²，装机容量98.08kW，年发电量57.39MWh；窗间墙、垂直遮阳斜面与短边总安装面积1,208.2m²，装机容量229.97 kW，年发电量49.37MWh。总计光伏安装面积21,092.30m²，装机容量4,106.93kW，年发电量1,069.10MWh，大于所需的1,066MWh，可以满足近零碳建筑的设计要求。不同部位安装的光伏组件发电量如下图3所示。

2.3 光伏铺设与组件选型

项目优先利用屋顶区域安装光伏组件，铺设原则为应铺尽铺，最大化利用屋面资源。产品选用经济效益高、技术成熟的单晶硅550Wp光伏组件，单个组件尺寸为2278*1134*35mm，单块面积2.58m²，光电转换效率21.3%。屋顶组件采用固定支架方式安装，配合结构相关专业进行实施。电缆桥架在阵列附近敷设，固定在支架上，具体位置及固定方式由现场施工调整确定，留出良好的散热空间。光伏汇流箱放置在楼顶房间内，由电缆桥架连接至一楼，经过多台50KW光伏变换器，接入大楼光储直柔系统。建筑立面采用最新的定制晶硅组件产品，光电转化率可达17%，表面做高光或亚光处理，单方功率185W/m²。

2.4 幕墙及遮阳一体化设计

光伏年发电量结果汇总 kWh

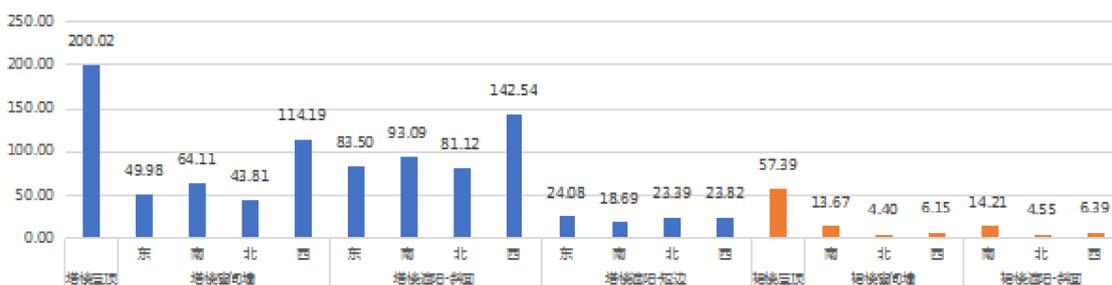


图 3 不同部位安装的光伏组件发电量

本项目采用高性能玻璃幕墙，玻璃拟选用TP6+1.52PVB+6(Low-E)+16Ar+TP8(Low-E)夹胶中空钢化双银超白充氩气玻璃（暖边间隔条），K值 ≤ 1.2 （W/m²·K）；框材采用聚氨酯型材与铝合金型材配合使用，幕墙整体K值 ≤ 1.4 （W/m²·K），气密性8级，水密性6

级。同时，为了促进大楼内自然通风，项目采用幕墙通风器，与立面垂直遮阳相结合，不仅可以在夏季遮挡多余阳光射入室内，还可以在过渡季有效引进自然通风，减少空调使用，降低能耗与碳排放，改善室内空气品质。

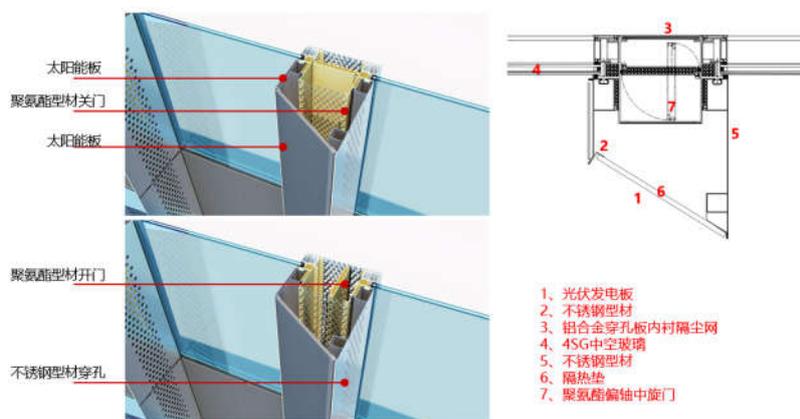


图4 幕墙及遮阳一体化设计示意

2.5 光伏发电消纳方式

项目设置光储直柔系统，就地消纳光伏发电，光伏输出750V直流电经过柔性双向变换器之后，一部分接入直流充电桩，为电动汽车充电，另一部分变成400V直流电进入直流母线，输送到每个楼层，再经过直流变换器转换为220V直流电，供全楼照明与部分直流设备使用。经计算，本项目可配置直流负荷功率占光伏发电功率比例48.7%，满足上海《上海市建筑光储直柔系统技术导则》2023-12中3.4.1项规定（ $\geq 20\%$ ）^[6]。

3 经济性分析

经测算，本项目光伏一体化（屋顶及立面）成本增量4,779.0万元，折算到建筑单方549.9元/m²；玻璃幕墙及遮阳成本增量1,720.0万元，折算到建筑单方197.9元/m²。

结语

通过以上研究表明，对于上海地区超高层建筑来说，实施建筑光伏一体化是其实现低碳、近零碳的必要途径。在进行一体化设计中，应首先分析项目自身可利用的太阳能资源，采用应铺尽铺的原则，优先选择在建

筑屋顶、立面不透光部分铺设光伏组件，同时做好与建筑幕墙、遮阳的一体化设计。最后，在应用建筑光伏一体化的同时，应充分考虑光伏发电的消纳问题，努力做到“本地发、本地用”，减少中间转换环节，提高用电效率，减少建筑的能源消耗与碳排放。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会.《中国建筑能耗研究报告（2020）》.
- [2] 国家能源局.《国家能源局发布2022年全国电力工业统计数据》. <https://www.nea.gov.cn/>;
- [3] 国务院.《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》国发〔2021〕23号. <http://www.gov.cn/>;
- [4] 国务院.《国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》国发〔2021〕33号. <http://www.gov.cn/>;
- [5] 住房和城乡建设部.《零碳建筑技术标准》（征求意见稿）. <https://www.mohurd.gov.cn/>;
- [6] 上海市住房和城乡建设管理委员会.《上海市建筑光储直柔系统技术导则》2023-12.