

# 方案阶段的光伏建筑设计方法探讨

## Design Method of BIPV in the Conceptual Design

撰文 李明亮 赵祖望 刘卫明 中国航天建设集团有限公司

**摘要** 以阳宗海生态温室方案设计为例,对前期调研、建筑概念设计和光伏组件设计的整个过程进行了介绍,以求探索形象化的设计方法。通过案例分析总结,给出一些方案阶段的光伏建筑设计方法建议,即多专业协作、技术与艺术的平衡、设计的地域性与普遍性、方案设计步骤建议。

**关键词** 光伏建筑 光伏组件 设计方法 设计步骤

### 1 光伏建筑设计原则

光伏建筑一体化 (Building Integrated Photovoltaic, 简称 BIPV) 设计主要包括两大项: 建筑设计和电气设计, 其中设计的主体是建筑, 客体是光伏系统。因此, BIPV 设计应以不影响建筑的美观、功能和结构安全为基本原则<sup>[1]</sup>。同时建筑设计与电气设计应同步进行以保持整体设计理念, BIPV 设计要综合考虑场地规划、建筑单体设计、技术措施应用以及围护结构采选等多方面要素, 以保证光伏建筑的合理性、实用性、高效性、美观性、耐久性。

BIPV 设计应结合建筑功能、建筑外观以及周围环境条件进行光伏组件类型、安装位置和安装方式的选择, 同时也要考虑光伏电池本身的电压、电流是否适于光伏系统的设备选型<sup>[2]</sup>。

建筑师应充分发挥光伏材料的美学特性, 重新组织建筑的形式和秩序, 将其按照形式美法则与建筑有机结合, 使两者在外观造型上达到和谐统一。此外, 光伏系统的引入不可影响到围护结构的功能, 如保温隔热、结构安全、采光通风、水密气密性等<sup>[3]</sup>。以下结合实际案例进行说明。

### 2 阳宗海生态温室方案设计

项目位于昆明阳宗海旅游度假区内, 距昆明市区 36km, 是针对昆明市及周边地区居民开发的休闲度假型旅游景点。为实现生态设计的理念, 对项目的地理环境、气候条件、场地规划、所需电力负载等做了充分的前期调研工作。

#### 2.1 前期调研

##### 2.1.1 地理环境

项目位于阳宗海湖畔, 东经 102° 10', 北纬 25° 1', 接近北回归线, 地处云贵高原, 海拔 1770m。因地处断裂带, 地热资源丰富。

##### 2.1.2 气候条件

项目所在地属于温带高原型湿润季风气候: 1) 日照时数长, 太阳

能资源丰富 (图 1), 太阳能年辐射总量为 5 182.88MJ / (m<sup>2</sup>·y); 2) 夏无酷暑, 冬无严寒, 气候温和, 年平均气温在 15°C 左右, 最热的月平均气温 19°C ~ 22°C, 最冷的月平均气温 6°C ~ 8°C; 3) 全年盛行偏西风。年平均静风频率为 30%, 平均风速不大, 仅为 2.2m/s; 4) 全年降水量在时间分布上明显分为干、湿两季, 5~10 月为雨季, 雨量集中, 且多阵雨、暴雨; 11 月至次年 4 月为干季, 年平均相对湿度 74%, 且降雪年份极少有。

##### 2.1.3 场地概况

项目选址在阳宗海湖畔的一块东南向坡地之上。基地东南向坡下 30m 处为阳宗海湖畔, 湖岸平直且有大片湿地, 西北向坡地之上有旧昆石高速公路通过, 西南紧邻柏联温泉 SAP, 东北接向白水台温泉公园, 往东 2km 处为阳宗海发电厂。基地有向阳坡地优势, 周围环境不会对建筑物产生日光遮挡现象, 太阳能利用条件优越。

##### 2.1.4 用电负载情况

建筑功能主要为观光温室和生态餐厅, 需要有良好的采光和相对稳定的室内温度, 建筑能耗以空调能耗为主。观光温室需要将室内温度维持在 15°C ~ 32°C, 相对湿度 ≥ 50%, 生态餐厅的室内温度则需要维持在 18°C ~ 26°C, 相对湿度维持在 35%~65%。据当地气候环境、建筑面积和功能要求等分析得出: 空调运行时间段主要在夏季与冬季, 春秋两季可用被动式通风维持较好的室内热环境, 初步估算建筑用电负载约为 1 200kW。

### 2.2 建筑设计

项目总占地面积约 4 000m<sup>2</sup>, 生态温室建筑占地面积约 2 100m<sup>2</sup>, 总建筑面积 2 360m<sup>2</sup>, 包括观光温室区 1 380m<sup>2</sup>, 生态餐厅区 980m<sup>2</sup>。

#### 2.2.1 主题概念

建筑设计以“彩云之翼”为设计主题, 强调云南初印象——自然、生态、神秘、抽象、提炼云南地域印记的符号, 结合场地情况生成建筑外观形态 (图 2)。

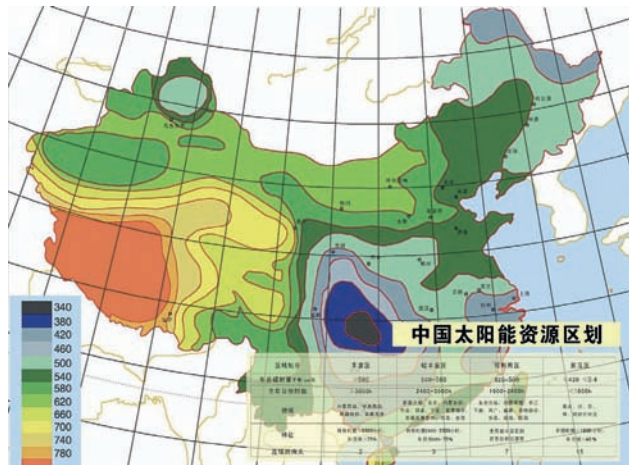


图1 中国太阳能资源分布图

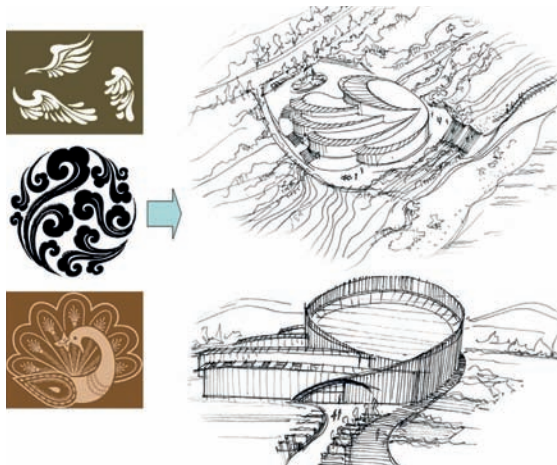


图2 主题概念及造型设计草图

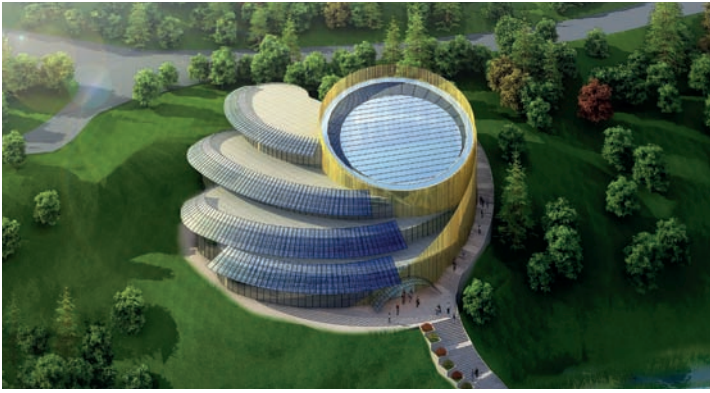


图3 阳宗海生态温室鸟瞰图

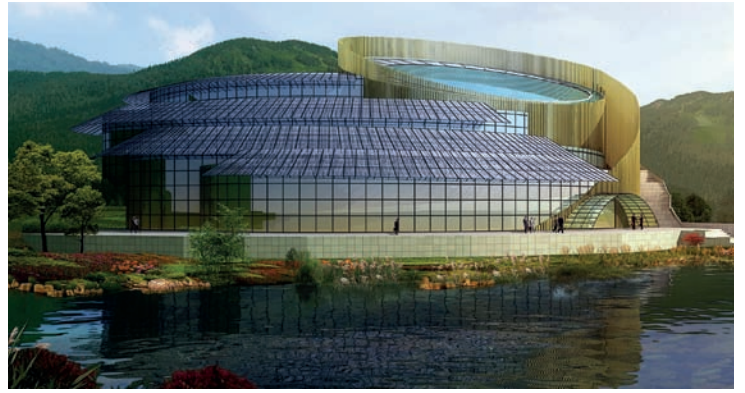


图4 阳宗海生态温室人视图

## 2.2.2 造型设计

结合地形的“嵌入式”方案减少了开挖土方量，并且减小了从高速公路视点观看的建筑体量感，使建筑能够更好地融入周围环境。四个退台式体块从一个大的倾斜式体块中延伸出来，依地势逐层向上升高，空间变化丰富，有着很强的韵律感和可识别性。建筑形体面向湖面展开，与柏联温泉 SAP 遥相呼应，提供了宽阔的景观视野。

首轮建筑方案中，每个体块都有部分曲面作为形体的过渡方式，形式语言相对连贯并能很好地表达出“羽翼”的感觉，但过多的三维曲面会给设计、施工都带来诸多不便。后续方案对建筑形态做出局部调整：取消曲面形式，将光伏组件与屋面分离，利用支撑结构架构出倾斜曲面形态；用竖向的木材杆件螺旋式排列方式来代替之前的曲面过渡形式；玻璃和木材会在色彩、肌理方面形成对比，但明框形式的光伏玻璃组件会在这两种材料中间起到过渡作用（图 3，4）。

## 2.2.3 功能布局

倾斜的大空间作综合展示区使用，不对地形做大的整改，可以沿坡种植较为高大的雨林植物；退台式体块最高层是农业科技展示区。建筑滨水一侧是生态餐厅，退台式的设计避免了观景视线的遮挡，顾客在就餐同时，亦可远眺前方水天一色的优美景色。生态餐厅共三层，各层都设有观景露台。嵌入山体部分为厨房、洗手间等工作空间。

## 2.2.4 拟采用的节能技术

当地太阳能资源丰富，可采用光伏发电技术；结合风环境设计建筑物体型，倾斜式空间利于热压通风，可采用被动式通风技术（图 5）；基地地热资源丰富，可考虑采用地源热泵空调技术；运用绿色建材——玻璃、钢结构和木材（图 6）。

## 2.3 光伏组件设计

### 2.3.1 光伏组件选型

综合考虑以下因素：1) 项目所在地太阳能资源丰富，但在夏季阴雨天气集中，日照条件并不算太好；2) 地处低纬度地带，光伏组件的工作环境温度较高；3) 建筑形体弧度较大，安装部位会朝向不同方位，应选用转化率受方位角影响较小的光伏电池；4) 生态餐厅区对观景视线要求较高，需选用有透光性的光伏组件；5) 温室的功能决定建筑表皮以玻璃幕墙为主，需选择相似肌理的光伏组件；6) 距离发电厂很近，项目可更侧重节能示范效果，不需过分强调发电量。最终选用透光率为 30% 的非晶硅光伏玻璃组件。组件最大输出功率为  $88W_p$ ，尺寸规格为  $1500mm \times 1400mm$ 。

### 2.3.2 组件朝向的确定

场地因素决定了东南向的建筑朝向，在一定程度上影响到光伏组件的发电效率。利用 PVSYSY 软件辅助分析和优化设计，最后将光伏组件的

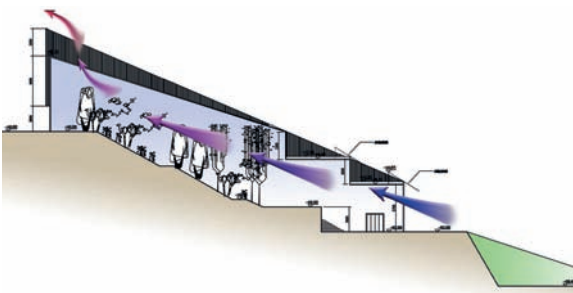


图5 被动式通风示意图

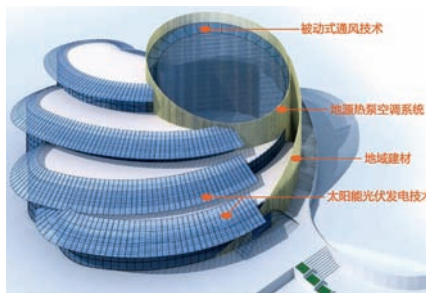


图6 拟采用节能技术示意图

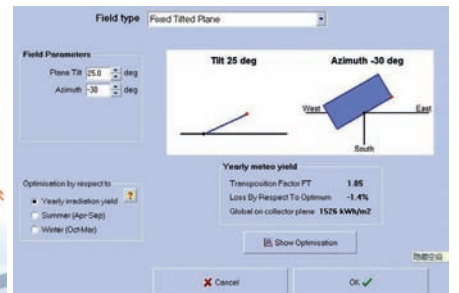


图7 利用PVSYSY软件辅助确定方位角

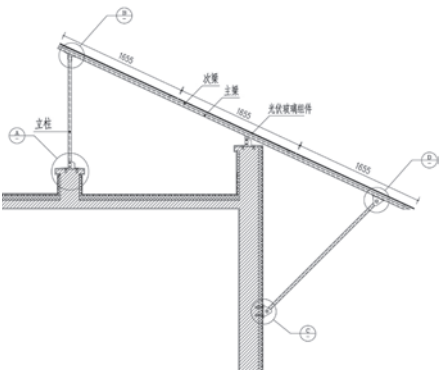
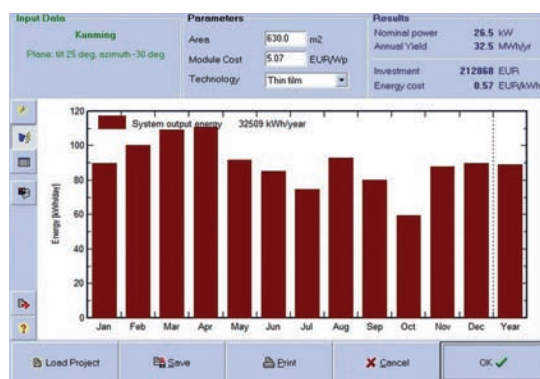


图8 光伏组件构造图



	Gl. horiz.	Coll. Plane	System output	System output
	kWh/m <sup>2</sup> day	kWh/m <sup>2</sup> day	kWh/day	kWh
Jan.	3.40	4.21	89.65	2779
Feb.	4.08	4.69	100.0	2801
Mar.	4.80	5.12	109.0	3379
Apr.	5.28	5.19	110.6	3318
May	4.61	4.30	91.53	2838
June	4.36	3.98	84.85	2545
July	3.79	3.51	74.72	2316
Aug.	4.56	4.36	92.93	2881
Sep.	3.70	3.74	79.80	2394
Oct.	2.62	2.78	59.30	1838
Nov.	3.43	4.12	87.84	2635
Dec.	3.31	4.21	89.79	2784
Year	3.99	4.18	89.06	32509

图9 利用PVSYSY软件计算发电量

倾角确定为 25°，主要朝向确定在南偏东 30°左右，组件的最差方位角是东偏南 15°，所获能量将会比最佳朝向时减少 7.9%；主要朝向处所获能量则损失 1.4%（图 7），考虑到场地因素和建筑造型，这样的电量损失是可以接受的。光伏阵列通过支承构件跨过女儿墙，其构造设计见图 8。

### 2.3.3 分区设计

由于不同朝向的组件所受光照强度不同，造成各组件间的电压、电流不同，影响系统的发电效率，所以考虑对光伏系统按光照度进行分区设计，并考虑将少数边角上的电池片不接入电路。

### 2.3.4 发电量的计算

经粗略计算，建筑将集成约 630m<sup>2</sup>的非晶硅光伏玻璃组件，通过软件 PVSYST 的分析，计算出系统的峰值功率为 26.5kWp，年发电量约为 32.5MW·h（图 9）。

### 2.3.5 经济效益分析

设定光伏系统寿命为 20 年，平均电网电价 0.6 元 / (kW·h)，对阳宗海生态温室太阳能发电系统进行技术经济分析（表 1）。在入口处设置 LED 数据显示屏，即时显示环境温度、电池温度和太阳辐射强度和上述技术经济分析数据等信息，加强示范宣传作用。

表 1 太阳能发电系统技术经济分析

光伏电池材料	非晶硅薄膜电池	光伏电池材料	非晶硅薄膜电池
透光率(%)	30	SO <sub>2</sub> 减排量 1 年/20 年(kg)	99/1980
转化率(%)	5	NO <sub>x</sub> 减排量 1 年/20 年(kg)	87/1740
安装总面积(m <sup>2</sup> )	630	粉尘减排量 1 年/20 年(t)	8.2/164
总峰值发电功率(kW <sub>p</sub> )	26.5	节约外网电费(万元)	1.95
年发电量(kW·h)	32500	系统总造价(万元)	198
节约标准煤 1 年/20 年(t)	11.7/234	发电成本(元/kW·h)	3.0
CO <sub>2</sub> 减排量 1 年/20 年(t)	30.7/614	系统寿命 (a)	20

## 3 光伏建筑设计建议

### 3.1 多专业的协作

BIPV 设计需要各专业尤其是建筑与电气专业间的协同工作，相关专业工程师应在前期便介入设计，各专业的相互支持和密切配合是一体化设计成功的重要保障<sup>[4]</sup>。

### 3.2 技术与艺术的平衡

光伏技术对建筑造型提出一定的要求，光伏材料为建筑设计提供新的元素，建筑与光伏的结合需要工程的严谨和艺术的灵感，这是难点，也是建筑创作的着力点和突破口。在 BIPV 设计初期，最好确定是以追求发电量为重，还是偏向于建筑外观，这样建筑师能更加集中精力，且更好地发挥其创造性思维，将新材料的消极因素转化为积极因素。

### 3.3 设计的地域性与普遍性

我国的光伏建筑正处于以示范工程为主，逐步走向普及的阶段，国内已建成项目并不多；且光伏建筑设计受气候、地理纬度、场地环境等因素影响较

参考文献

- [1] 北京泰豪智能工程有限公司. 光伏建筑一体化设计及应用[J]. 建设科技, 2009 ( 20 ) .
- [2] 10J908-5 建筑太阳能光伏系统设计与安装[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [3] 罗多, 李广立. 光伏建筑一体化的设计要素[J]. 建设科技, 2009 ( 20 ) .
- [4] 徐崇. 建筑师视角下光伏建筑发展的阻力和潜力[J]. 华中建筑, 2009 ( 12 ) .

大，而我国幅员辽阔，南北差异巨大，所以数量不多的光伏项目很难提供普遍性经验。建筑设计人员仍然需要继续研究并参与实际工程，设计出适合不同地域、不同风格的光伏建筑，为以后的项目设计提供可参考借鉴的设计经验。

## 3.4 方案设计步骤建议

### 3.4.1 前期调研

(1) 地理环境：纬度、经度、海拔、地质情况等。这些数据将作为建筑日照间距、节能技术选用、光伏组件选型和角度设置等方面的设计依据。

(2) 气象条件：太阳能辐射量、最大连续阴雨天数、气温、风速等，这些数据与光伏系统的发电量、太阳能光伏组件工作温度、最大容量等设计参数密切相关，直接影响到光伏组件的选型和造价。

(3) 场地环境特征：包括坡度、交通、景观、空间分析等，这是建筑设计的依据和前期工作；另外要调研周围有无遮挡物，并要考虑这些遮挡在将来是否会出现，若是并网光伏发电系统，还要考虑与电网的距离。

(4) 电力负载情况：只有清楚地了解负载的类型、功率大小、运行时间、运行状况等，才能对负载耗电量作出相对准确的估计，这些数据对侧重发电量或电气系统一体化的光伏建筑设计尤为重要。

### 3.4.2 光伏建筑设计

(1) 根据前期调研进行建筑初步设计，同时考虑建筑布局及体型设计应为光伏组件接收更多的太阳直射光创造条件。

(2) 利用相关软件辅助计算太阳能方阵最佳倾角，进行防阴影遮挡设计，计算建筑结构的受力状况，综合考虑建筑美学确定光伏系统与建筑的结合方式和结合部位。

(3) 综合考虑相关设计条件决定光伏组件选型，并考虑蓄电池、逆变器、控制器、支架的设计，以及最大功率跟踪(MPPT)、测量和数据采集设备的设计等。

(4) 利用相关软件辅助计算光伏组件安装面积和系统的年发电量，做出经济效益的分析。

(5) 进行光伏建筑整合部位的细部构造设计，重点注意热工性能与结构安全性的设计。

(6) 设计监测系统，以便建筑建成后对系统运行情况作出监测、评价和优化调整。

## 4 结语

本文只是针对方案阶段的光伏建筑设计方法进行探讨。BIPV 是一项系统工程，涉及多个领域，必须整合各方面力量，推动太阳能光电生产、设计、施工三者间的有效结合；BIPV 是多学科、多层面参与和合作的综合性事业，需要国家政策法规部门、建筑主管部门、光伏企业、房地产开发商、建筑设计单位共同努力，把光伏建筑应用作为建筑节能工作的重要内容，完善技术标准，加强质量管理与维护，才能逐步提高光伏建筑应用水平。▲



### 作者简介

**李明亮**，中国航天建设集团建筑师，中央美术学院学士，山东建筑大学硕士，研究方向为太阳能建筑一体化。参与编制的《山东可再生能源建筑应用发展规划研究》获山东省软科学优秀成果二等奖。

**赵祖望**，中国航天建设集团副总建筑师，一级注册建筑师，研究员，国家勘察设计大师，被航空航天部评为部级有“突出贡献专家”。设计作品曾获航空航天部优秀设计一等奖、中国航天基金奖、“航天工程荣誉建设者”称号。北京空间技术研制试验中心规划和设计获国家级金奖。

**刘卫明**，中国航天建设集团华阳设计所所长，北京航天华阳环境工程有限公司总经理。