

太阳能光伏建筑一体化的发展现状与前景展望

褚玉芳^{1, 2} 张囡囡^{2, 3} 沈辉^{2, 3}

1 江西宜春学院物理科学与工程技术学院 2 中山大学太阳能系统研究所,

3 深圳市太阳能学会

摘要: 根据国内外发展趋势来看, 光伏发电在城市推广利用的最佳形式就是与公共电网并网并且与建筑结合: 即光伏建筑一体化。本文首先对国外光伏建筑一体化的发展现状进行了综述, 并对技术的发展特点进行了分析和评估。此外, 还介绍了我们所完成的光伏建筑的几个典型工程事例, 最后, 结合我国的具体情况提出了发展思路和具体建议, 以期望能对我国发展光伏建筑提供一些发展思路和技术参考。

关键词: 太阳电池; 屋顶计划; 光伏建筑一体化 (BIPV)

1 太阳能光伏发电的发展趋势

太阳能光伏发电在城市推广利用的最佳形式就是与公共电网并网并且与建筑结合: 即光伏建筑一体化。至今为止, 光伏发电经历了漫长的发展过程: 从天上到地面: 主要是 1973 年第一次石油危机, 太阳电池从主要作为空间电源向地面应用发展; 从独立系统到并网发电: 从环保角度出发, 由于少用或不用化学蓄电池, 并网光伏发电系统比离网的独立光伏系统更科学和环境友好; 从屋顶系统到与建筑结合或光伏建筑一体化: 从单纯的将光伏组件安装在屋顶上发展成为太阳电池组作为建筑材料的一部分。

光伏发电系统与建筑结合的早期形式主要就是所谓的“屋顶计划”, 这是德国率先提出的方案 and 进行具体实施的。德国和我国的有关统计表明, 建筑耗能占总能耗的三分之一, 光伏发电系统的最核心的部件就是太阳电池组件, 而太阳电池组件通常是一个平板状结构, 经过特殊设计和加工完全满足建筑材料的基本要求, 因此, 光伏发电系统与一般的建筑结合, 即通常简称的光伏建筑一体化应该是太阳能利用最佳形式。对于光伏建筑一体化的发展, 德国首先是进行示范, 然后逐步推广, 已经历了一个历时 15 年多的发展过程: 从 1991 到 1995 年, 实施 1000 光伏屋顶计划, 并开始实施电网回收; 从 1995 到 1998 年, 为巩固和评估

阶段，进行技术与经验积累，并进而提出 10 万屋顶计划；到 2000 年，德国政府制定“可再生能源法”，而在 1991-2003 年，主要实施 10 万光伏屋顶项目，总共安装 300 MW。到 2003 年秋天，10 万屋顶计划完成。德国政府为了进一步加快发展光伏发电系统的推广，在 2004 又修正可再生能源法，制定了更加吸引私人投资光伏补贴的计划（见表 1.1 和 1.2），到 2004 年底，德国一年就安装 600 MW 光伏发电系统。由于 2005-2006 年起期间，德国光伏迅猛发展，以至于最后统计的数字也发生混乱。如德国太阳能经济联盟 BSW (der Bundesverband Solarwirtschaft) 统计：2005 年安装 750 MWp，2006 年安装 750 MWp，这样的话，至今为止，德国总共安装并网光伏 2550 MWp；而 Photon 杂志社统计：2005 年安装 912 MWp，2006 年安装 1150 MWp，那么德国总共安装并网光伏 3300 MWp。如果按德国联邦环境部的计划：到 2020 年德国要总共安装并网光伏 10 GWp，2006 年按保守的数字也已经安装了 2550 MWp，还有约 7.5 GWp，从 2006 年到 2020 年还有 14 年，那么按每年平均安装 540 MWp 即可达到目标，这对于德国来说或按照德国目前的发展来看，到 2020 年总共安装 10 GWp 的光伏系统应该不成问题。

表 1.1 德国并网光伏发电国家回收价格细则（2004）

系统类型	回收价格（欧元/度）
开阔地	0.457（基本数）
屋顶	
<30 kW	0.574
>30 kW ≤ 100 kW	0.546
>100 kW	0.540
建筑集成 (BIPV)	
<30 kW	0.624
>30 kW ≤ 100 kW	0.596
>100 kW	0.590

注释：补贴时间持续 20 年，但从 2005 年起每年 5% 递减，如基本数到 2025 年为 0.156 欧元/度，与电网电价基本一致。

表 2. 德国并网光伏发电国家回收价格细则（2007 年）

系统类型	安装规模	补贴（欧元/度）
开阔地		37.96
屋顶		
	≤ 30 kW	49.21
	> 30 ≤ 100 kW	46.82
	> 100 kW	46.30
幕墙		
	≤ 30 kW	54.21
	> 30 ≤ 100 kW	51.82
	> 100 kW	51.30

在德国的带动下，世界各国特别是欧洲国家纷纷效仿德国政策，制定本国光伏发展计划：如西班牙、意大利和韩国等也制定了本国的光伏并网补贴计划，见下表：

表 3. 世界部分国家并网光伏发电国家回收价格细则（2005 年平均值）

国家	补贴（欧元）	时间持续（年）	备注
比利时	0.45	20	只在 Flandern
德国	0.55	20	
法国	0.15	20	补贴 0.30 在 Korsika 和在海外
希腊	0.49	20	0.57 在岛上
意大利	0.45	20	比较复杂的规定
葡萄牙	0.44	15	
西班牙	0.42	25	
捷克	0.20		
华盛顿州	0.43（美元）	10	部件必须在当地生产
加利福利亚州	0.50（美元）	3	示范项目
韩国	0.58 (176 SKW)	15	

西班牙欧洲光伏第二大市场，但总的市场容量小，只相当于德国零头：2005年安装了 21 MW, 2006 年安装了 38 MW。光伏并网回收价格为：€0.41/kWh 适用于小规模，€0.22/kWh 适用于大规模，2010 发展目标：128-400 MW。西班牙政府计划在未来若干年内大力推广利用太阳光发电、风力和生物质发电，并计划在打造“太阳城”，以满足 60 万居民能源需求。

意大利也开始发展光伏发电，按不同的安装场所制定不同的光伏发电回收价格：即€0.37/kWh 适用于地面安装，而€0.49/kWh 适用于光伏建筑结合，并且补助每年 2%降低，发展目标 2200 MW, 其中 2/3 为地面安装的大型系统。

在欧洲相对来说，希腊日照情况非常好，光热利用在希腊有很好的发展，但光伏发展很少。由于希腊海岛较多，目前主要发展海岛光伏发电，光伏补助€0.40-0.50/kWh。希腊的可再生能源发展目标为：到 2010 年，可再生能源发电占 20.10%，到 2020 年，可再生能源发电占 29%。光伏发展计划：170 - 500MW。

法国在光伏利用方面与德国相反，是比较保守的国家，目前只少量发展光伏建筑一体化项目，光伏建筑一体化并网补助价额最高达 €0.55/kWh，法国著名薄膜公司圣德班与 Shell 联合发展薄膜太阳能电池，主要也是考虑在光伏建筑上使用。

我国光伏发电的发展水平总体处于示范起步阶段。目前国家和地方政府也在开展城市太阳能光伏并网发电示范和逐步推广利用的一些项目。从我国实际情况来看，应该继续在西部缺电地区发展光伏发电，但也要积极在发达地区，特别是城市发展光伏并网发电。有可能在部分省份江苏、广东、上海等地区的城市进行小规模推广，并在合适的时机实施太阳能光伏发电的百万屋顶计划。德国和日本主要发展并网光伏发电和光伏建筑集成技术，我们应该从中学习并借鉴发展经验。我国的香港、深圳等城市也在公共建筑上安装光伏示范系统，如香港科技园、深圳园博会等。其中深圳园博会光伏功率达到 1MW 规模，是目前我国最大的光伏并网发电系统。

2008 北京奥运会、2010 年上海世博会及 2010 年广州亚运会等，都应该成为我国太阳能利用大规模示范的理想场所，若干个 MW 级的光伏发电系统也应该能在 3-5 年内能够实现。通过大规模的工程示范，既可充分展示我国太阳能技术

的水平，也能从中发现与发达国家的发展差距，为大规模利用太阳能积累实际经验和数据，这对我国太阳能企业的发展是非常重要的。2006 年中国大气二氧化碳排放达历史最高，这应该引起我们高度重视，我国应对气候变化问题，采取一系列措施，当然首先要节约能源，但更要注重发展可再生能源，特别是太阳能光热利用和光伏利用。

德国和日本的发展经验证明，在城市发展光伏并网发电的效果是很好的，特别是与光伏与建筑结合，可降低系统成本，同时也不占用土地，而且可减少二氧化碳排放，这表明城市发展光伏建筑很有价值。如在广州建立一户光伏建筑(别墅区)：以 3.0 kW 光伏建筑为例，如作为在平屋顶上作为遮阳挡雨篷，向南 10 度的倾角，理论计算结果：

年发电量 2676 kWh；

可减少煤炭消耗 1.07 吨；

可减少二氧化碳排放 2492 kg。

对于广州这样得千万人口的大都市来说，如果有 100 万户居民使用 3.0 kW 光伏系统，由此可见，光伏发电在节省常规能源和减少二氧化碳排放方面具有重要意义。

2 光伏建筑组件的结构与发展

作为光伏建筑一体化发展。太阳电池是核心部件。太阳电池有多种。主要种类有：

● 一般太阳电池：

- 单晶硅电池，基片为单晶硅片，表面颜色为黑色或蓝色，4-6 英寸，效率最高 16-20%；

- 多晶硅电池，基片为多晶硅片，表面颜色一般为蓝色，4-8 英寸，效率较高 15-18%；

- 非晶体硅电池，基片为导电玻璃，通过化学气相沉积非结晶的硅薄膜，表面颜色为黑色，通过内联直接形成电池组件，效率较低，一般为 5-8%；

- 其它薄膜电池，如铜铟硒 (CIS)，表面颜色为黑色，通过内联直接形成电池组件，效率较高，一般为 9-12%。

● 特殊太阳电池：

- Sunpower 电池：美国 Sunpower 公司产品，用 n 型单晶硅片，表面为黑色，5 英寸，效率 20%。
- 双面电池：日本 Hitachi 公司产品，晶体硅电池两面都可发电。
- 透明非晶电池：通过光刻工艺，并设计特殊花样实现双玻璃封装的非晶硅电池组件既发电又透光，Schott Solar 有此产品。
- 柔性薄膜电池：在不锈钢片上制作非晶硅电池，由于不锈钢片很薄，可弯曲，美国 Uni-Solar 可生产。
- 其它颜色电池：除了蓝色和黑色外，还有绿、橙色等太阳电池可供选用。通常是在多晶硅电池上，可通过控制表面氮化硅薄膜的厚度得到不同的颜色，以满足建筑学的要求。

作为与建筑结合的主要是太阳电池组件，根据不同的用途，太阳电池组件主要的形式如下几种：

- 一般组件：单层结构，即玻璃/TPT 或玻璃/玻璃，仅适合一般光伏电站使用；
- 建筑组件：双层结构，即玻璃/玻璃-隔热玻璃或玻璃/玻璃-隔热玻璃-安全玻璃，主要用于光伏建筑建设。
- 特殊组件：
 - 聚焦跟踪：有单轴、双轴和低倍、高倍聚光之分，主要是为了得到最高的发电效率，目前很少应用，只要少数实验装置。
 - 中空玻璃形式：在实验阶段，主要是结合真空玻璃的优势，此外，可实现进行太阳电池更换，即太阳电池组件可维修，保证长期使用的效果。
 - 透光型组件：可为晶体硅或非晶硅太阳电池，既可发电又可采光，这作为一般组件或建筑组件都可以实现。

光伏建筑组件的安装结构类似与玻璃幕墙，分有框和无框，有专门的安装型材和构件，除此之外，还要考虑：

- 接线：即太阳电池组件之间的相互连接，并保证接线线头的绝缘和防水密封。
- 通风：通过组件的结构设计或安装形式以降低组件温度，可采用自然或强制通风。如太阳电池组件安装在屋面上，一般要留 15 cm 以上间隔，以保证通风需要。
- 水冷：用于降低组件温度，同时产生热水，还在试验阶段，如能获得应用将

对提高太阳能利用综合效率很有意义和实用价值。

在作为光伏建筑设计和实践方面，德国的 Schuco 公司、Conergy 公司、Scheuten Solar 公司和日本的京瓷公司等都有大量的实际范例。我国在光伏建筑设计、策划和实施等方面还在发展的最初阶段。

3 国外光伏建筑一体化发展

国外的光伏建筑发展是从示范到推广，从屋顶光伏到与建筑集成，并进而将光伏组件作为一种新型的建筑材料发展。目前，太阳能电池组件功率为 200 - 300 W，有向大尺寸发展趋势，作为光伏建筑材料主要是作为光伏屋面和光伏幕墙，而这必须要按建筑特点与形式特殊设计制造。从发展来看，光伏建筑在太阳能建筑中魅力无比，一些设计师将太阳能电池巧妙地、有机地与各类建筑融为一体。从国外的光伏建筑工程可发现一些特点：一是尽量满足最佳朝向和角度（如屋顶或向南墙面），以得到最大的发电收益；二是尽可能展示或突出太阳能电池，为了具有观赏性甚至有些夸张的设计。通过若干年的实践，也由此已经出现了专业型的太阳能建筑设计与建造专业公司（主要从事绿色建筑）。为了对光伏建筑的深入了解，下面对一些光伏建筑结合的典型案例进行简单分析和评估：



图 1 光伏组件可发电也具有遮阳挡雨功能

图 1 为德国 Schueco 公司设计与安装，太阳能电池组件具有遮阳挡雨功能，总共 14.2 kW。这种形式非常适合在我国南方发展，特别是广东夏天阳光很强，而且雨水较多，遮阳挡雨形式的太阳能电池组件应该很适合广东使用。

图 2 显示的光伏幕墙为 9 kW（左），光热幕墙为 100 kW（右），与建筑完美的结合在一起。特别是光热幕墙的设计也该能在我国得到应用。



图 2 光伏和光热幕墙的应用

在我国有很多这样的现代型大楼，结合光伏和光热幕墙，可为大楼提供必要的电力和热水供应，应该是很有必要也是可以实现的。

图 3 为荷兰的一座光伏建筑，是一个独特的装饰性光伏屋顶，太阳能电池组件构成三角形造型，非常夸张，具有张扬性。图 4 为意大利的一座光伏建筑，太阳能电池呈不对称造型安装在外墙上作为一个很壮美的一种装饰，太阳能电池总共 21 kW。



图 3 装设性的光伏屋顶



图 4 装饰性的光伏幕墙

这些代表性光伏建筑的共同特点：

- 设计独特，有时代感；

- 太阳能电池从颜色和构造来看，与建筑很协调；
- 除了发电功能以外，具有很好的实用型和装饰效果

4 广东的光伏建筑一体化的发展

广东是我国改革开放的前沿，在经济建设上已经取得了举世瞩目的辉煌成就。广东是用电大户，2006年用电量全国第一，2991亿千瓦时（南方都市报2007年3月31日）在光伏发展方面，最早就形成了光伏产品的加工基地。在城市光伏利用发展方面也走在了国内的前面，大型光伏电站-深圳园博园1MW光伏电站是目前我国最大的光伏并网发电系统。

我们在十五期间，主要承担国家光伏建筑工程示范项目，开始了光伏建筑一体化建设尝试。我们认为广东具有大量的别墅和高档小区，大型公共建筑，这些都是发展光伏建筑的基础，国际光伏发电的主流是在城市示范推广，我国也应该逐步发展以城市主推广光伏建筑。光伏发电系统的应用很广泛，对于城市来说，可用于的场所很多，如：

- 海岛居民用电，我国沿海有许多岛屿，目前多用柴油发电机，噪声大，而且有污染，风能和太阳能光伏发电是很好的替代方式；
- 旅游区供电，一般旅游区多为山区或湖泊地带，很少有工业，用电主要是照明，可主要通过风能和光伏发电作为主要的供电方式，可保护地方环境；
- 住宅小区照明，可通过太阳能电池供电解决，一方面节约能源，同时由于太阳能电池一般提供低压直流电，这样装在园区的路灯和草坪灯也安全，不易出危险；
- 道路照明、景观照明，可通过光伏系统供电，可节省大量的传统能源。

我们在建设广东光伏建筑的项目中，首先在中山大学东校区建设了两个试验光伏屋顶，主要用于两种不同类型的光伏屋顶建设实验，2个屋顶共计5.4kW，理论计算平均每天发电3.1度/kW，通过发电数据采集来进行分析和评估。

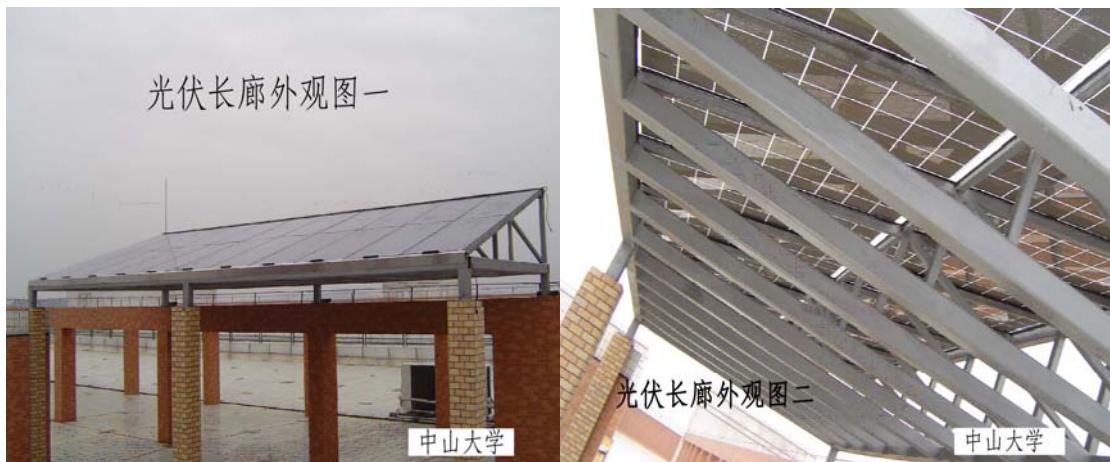


图 5 中山大学的光伏试验屋顶

如图 5 所示，在现有的建筑，如别墅或大型公用建筑，可不动用已有的屋顶瓦面，通过特殊构件，可在瓦面上方 15 厘米左右的距离上安装太阳能电池组件，这样不影响屋面结构和外观，同时还起到隔热和保温的作用，通过一年多实用，结构稳定，经受了大风和暴雨的考验。这样的形式可在现有的很多建筑上推广。另一种可直接用于新建建筑，替代瓦面材料，即可发电又能采光，适合大型公共建筑的大厅或长廊结构等。这样的结构在我国南方应该有很好的发展市场。

作为一个广州户用光伏系统，我们选择在广州一个高档别墅区-凤凰城建设一个光伏建筑结合工程，我们称为光伏天棚（图 6）。天棚架构由钢梁组成，矩形的钢架顶面安装六条横梁，以横梁为基础相应排列太阳能电池组件，我们专门选用了京瓷公司的 45 W 和 60 W 薄型组件，总共太阳能电池组件功率为 6300 W，并采用相配套的金属构件对连接电缆进行铺设和保护，整个光伏天棚作为建筑的一个延伸，与已有建筑连为一体，与主体建筑、游泳池等形成一个和谐的园林式庭院总体结构。该项目的目标是通过在广州地区建立一家示范户用光伏发电系统，为以后推广太阳能光伏发电项目提供一些经验，我们为此进行了成本分析和社会

效益分析，这一光伏系统的效果的理论结果如下：

- 在 20 年的寿命周期内，计算出 6300W 光伏系统系统累计发电量为 108000 度，相当于少用 43.2 吨标准煤（每发一万度电就可以替代 4 吨标准煤）
- 每年可以少向公共电网获取 5300-5800KW·h 的电，这些电都是由业主自己的太阳能产生，大大减少了电网的负荷。
- 总的减少排放如上图表数量的 CO₂，SO₂，NO_x 和烟尘。环境保护的作用十分明显。总的减排效益为 8997 元，具体见下表：

	CO ₂	SO ₂	NO _x	烟尘
减少排放 (t)	31.36 (tc)	0.95	0.43	0.73
减排效益 (¥)	6538.5	1197.0	860.0	401.5



图 6 光伏天棚

5. 结束语

近五年来，我国光伏工业飞速发展，已经形成珠江三角洲太阳电池产品加工、生产、集散地和市场，长江三角洲太阳电池制造、京津冀太阳电池和江西太阳能级硅片制造基地，先后有 10 家企业在境外上市：如无锡尚德、浙江煜辉、苏州阿特斯、常州天合、江苏林洋、河北晶澳、中电光伏、塞维 LDK 和天威英利等。光伏产业的兴起和发展为我国光伏推广应用，特别是光伏建筑发展奠定了基础条件。

我国政府重视发展可再生能源，科技部、建设部等积极推进光伏科研和示范工程。广东的深圳积极走在前面，已经作为建设部的太阳能与建筑一体化的示范

城市。深圳有很好的光伏产业基础，深圳政府已经制定十一五规划，要在 100 万平方米建筑面积推广太阳能应用光伏应用。

推广光伏发电项目的方法，光伏屋顶 - 光伏发电在城市发展的首推形式。政府支持要大力支持，采用上网电价补助政策，制定合理的上网电价我国上网价格。建设部门也应该制定相应的政策，鼓励和激励房地产商的大力采用光伏发电技术。政府要带头大力推广太阳能技术，有可能应率先在政府大楼、公共建筑、市政工程等推广太阳能利用。并且制定符合我国国情的太阳能为主的激励政策，确定年度、中、长期发展目标，并建立检测、评估与监督机制，以促进我国光伏建筑快速健康的发展。

Building integrated solar photovoltaic the present situation and prospects

褚玉芳^{1, 2} 张囡囡^{2, 3} 沈辉^{2, 3}

1 江西宜春学院物理科学与工程技术学院 2 中山大学太阳能系统研究所，

3 深圳市太阳能学会

参考文献:

1. ingrid hermannsdorfer and Christine rub, solar design, jovis
2. 高辉 何泉. 太阳能利用与建筑的一体化设计[J]. 华中建筑
筑, 2004, 22 (1): 70-79.
3. 邓涛, 沈辉, 国外光伏建筑一体化实践, 太阳能, 2004, (6)
4. 陈中华, 汪征宏, 杨金焕. 光伏与旧建筑相结合的新进展[J]. 新能源, 1998,
(10): 42-45.
5. Edward Milford, Powering On – The finances solar energy in Europe,
Renewable Energy World, March-April 2007 Volume 10 Number 2, p 44-52
6. 沈辉, 曾祖勤, 太阳能光伏发电技术, 化学工业出版社, 2005
7. 陈维, 博士论文, 中国科学技术大学, 2006

8. 李芳, 博士后出站工作报告, 中山大学, 2006