

# 光伏建筑一体化与体育场建筑设计

## Study of BIPV System Applied in Stadium Design

撰文 王斌 罗洋 中国建筑设计研究院

**摘要** 通过对国外采用光伏建筑一体化技术的体育场实例分析,总结了体育场建筑与太阳能光伏技术结合的几种形式,同时对光伏建筑一体化应用在体育场建筑设计中的特点与难点进行了探讨。

**关键词** 光伏建筑一体化 体育场 设计

光伏建筑一体化 (Building Integrated Photovoltaic, 简称BIPV) 是利用太阳能发电的一种新概念,即将太阳能光伏单元安装在建筑的围护结构外表面来提供电力,是建筑节能的新趋势。光伏建筑一体化与大型体育场馆结合充分利用了大型公共建筑自身建筑体型的特点,不仅创造了经济效益,同时还对节能减排和推广绿色建筑具有示范意义。

### 1 光伏建筑一体化体育场国外发展现状

根据光伏单元与建筑安装结合方式的不同,太阳能光伏单元在体育场中的应用可具体细分为两大类——BAPV和BIPV:

BAPV是附着于建筑物上的太阳能光伏发电系统,也称为“安装型”太阳能建筑。这种方式是将光伏单元安装于建筑物上,光伏组件与建筑物功能不发生冲突,不破坏或削弱原有建筑物的功能。此种方式适宜于旧体育场的更新改造要求,投资低,规模不大,对屋面要求不高。

BIPV是与建筑物同时设计施工安装,与建筑物形成紧密结合的太阳能光伏发电系统,也称“构件型”或“建材型”太阳能建筑。光伏单元既具有发电功能,也是建筑物外表皮的一部分,具有建筑构件和材料的功能。此种方式适宜于新建体育场,光伏单元幕墙或顶棚与建筑无间隙融为一体,视觉效果突出,为建筑的外观注入新的活力。但此方式对构件要求较高,投资较大。

2006年德国世界杯体育场中,纽伦堡足球场 (Nuremberg Frankenstadion) 在罩篷局部安装了140kW屋顶光伏组件 (图1)。由于采用了BAPV方式,整个1 000m<sup>2</sup>的太阳能安装工程仅耗时3周。

弗里茨-瓦尔特球场 (Fritz Walter Stadion) 为迎接2006年世界杯,在耗资7 650万欧元的改扩建工程中安装了1.3MW的光伏组件,也是采用BAPV方式在罩篷挑檐处安装 (图2)。

正在升级改造的预计2011年竣工的不莱梅维悉足球场 (Weserstadion) 将安装目前世界体育场中规模最大的太阳能光伏发电系统 (图3, 4)。多达20万套BIPV光伏组件覆盖了全部屋面和南侧墙面,将产生每年高达8.4MkW·h的电力。

瑞士是最早开发利用可再生能源的国家之一,2005年建成的范可多夫体育场 (Stade de Suisse Wankdorf) 位于瑞士首都伯尔尼,屋面7 930套光伏组件总功率达1.3MW,每年可以产生1MKW·h的电能 (图5)。光伏组件采用BAPV方式安装,与方正的建筑屋面造型完美贴合。

圣雅各布公园球场 (St. Jakob Park) 位于瑞士巴塞尔,由瑞士建筑师赫尔佐格和德梅隆设计,是瑞士最大的专业足球场 (图6)。2001年,在体育场斜屋面上安装了1 012套光伏组件,收集电力供体育场日常使用,减少了常规能量消耗。光伏组件采用BAPV方式安装。



图1 纽伦堡足球场



图2 弗里茨-瓦尔特球场



图3 不莱梅维悉足球场效果图



图4 不莱梅维悉足球场实景



图5 范可多夫体育场



图6 圣雅各布公园球场

2009年，由日本建筑师伊东丰雄设计的高雄龙腾体育场是全世界第一座完全由太阳能供电的运动场馆（图7）。屋顶以BIPV方式安装了8 844套光伏组件作为体育场罩篷，不但可达到70%的遮光效果，预估每年发电可达110万度，减少660t的CO<sub>2</sub>排放，所生产的电力除了供场馆比赛期间照明、空调等使用，非赛事期间还可以出售电力给电网以盈利减少运营成本。

我国大型体育场馆设计也开始逐渐接受BIPV的设计理念，局部采用光伏建筑一体化技术以达到探讨尝试的效果。2008年北京奥运会期间，国家体育馆屋顶的100kW并网光伏发电系统是唯—与奥运主场馆主体结合建设并在奥运期间正常运行的太阳能发电系统，也是我国第一个同大型体育场馆结合建设的太阳能发电系统，系统采用BAPV+BIPV的结合方式，体现了“绿色奥运”的理念（图8，9）。

以上体育场实例的主要参数对比如表1所示。

表1 体育场主要参数对比

体育场名称	地点	建成时间	体育场容量(人数)	光伏单元数量	覆盖面积(m <sup>2</sup> )	功率	安装方式
圣雅各布公园球场	瑞士巴塞尔	2001	38512	1012	1200	200kW	BAPV
范可多夫体育场	瑞士伯尔尼	2005	32000	7930	12000	1.35MW	BAPV
纽伦堡足球场	德国纽伦堡	2006	48548	758	1000	140kW	BAPV
弗里茨-瓦尔特球场	德国凯泽斯劳滕	2006	49780	约8500	10000	1.38MW	BAPV
高雄体育场	高雄	2009	40000	8844	15000	1.4MW	BIPV
维悉足球场	德国不莱梅	2011	42358	200000	16000	1.75MW	BAPV+BIPV
国家体育馆	北京	2008	18000	1124	1000	102.5kW	BAPV+BIPV

## 2 体育场作为特殊建筑类型与太阳能光伏技术结合分析

太阳能光伏组件的发电原理是将屋面或墙面接到的太阳辐射能直接转换为直流电供负载使用或存储于蓄电池内备用（图10）。由于技术和材料原因，单一电池的发电量十分有限，使用中的太阳能电池一般都是经串并联形成大规模电池组件。

从光伏发电系统工作原理来看，体育场馆建筑作为大型公共建筑的代表适宜利用建筑的顶部与南向墙面布置光伏方阵，

不占用额外的地面空间。由IEA Task 74开展的意向工业潜力调查显示，普通建筑平均能够提供相当于地面建筑面积1/4的顶层PV系统。从实例看，大约1万m<sup>2</sup>屋面就可以安装1MW功率光伏组件，相当于将大中型太阳能光伏并网电站搬到屋顶。

体育场屋顶罩篷主要起到为观众遮阳避雨的作用，同时也是体育场最重要的造型元素。体育场罩篷一般都比较平整、面积巨大，表面有足够的条件安装大量光伏组件，形成集群效应，降低平均投资成本（图11）。

和体育场罩篷一样，体育场南侧立面幕墙也是光伏幕墙理想的安装位置。维悉足球场南侧全部安装了光伏组件幕墙，提高了系统运营功率（图12）。

除了屋顶和墙面，体育场可以将光伏组件选择安装在周边各个角落，全方位增加电力供给。比如封闭房间的遮阳板可以用光伏组件代替，玻璃栏杆内也可以考虑安装光伏组件，甚至景观小品外表也可贴附光伏组件（图13）。不同形式的建筑光伏组件的安装位置和要求如表2所示。

表2 不同形式的建筑光伏组件的安装位置和要求

PV形式	光伏组件	建筑要求	类型
光伏采光顶(天窗)	玻璃组件	建筑效果、结构强度、采光、挡风雨	BIPV
光伏屋顶	不透明屋面	建筑效果、结构强度、挡风雨	BIPV
光伏幕墙(立面透明幕墙)	玻璃组件(透明)	建筑效果、结构强度、采光、挡风雨	BIPV
光伏幕墙(立面非透明幕墙)	玻璃组件(非透明)	建筑效果、结构强度、挡风雨	BIPV
光伏遮阳板(有采光要求)	玻璃组件(透明)	建筑效果、结构强度、采光	BIPV
光伏遮阳板(无采光要求)	玻璃组件(非透明)	建筑效果、结构强度	BIPV
屋顶光伏方阵	普通组件	建筑效果	BAPV
墙面光伏方阵	普通组件	建筑效果	BAPV

太阳能光伏发电系统为达到接收太阳辐射最大化，对建筑表面朝向要求比较严格。根据规范，为保证田径与球类赛事需要，体育场朝向通常取正南北向布置，比较利于布置光伏组件。

挡光问题是太阳能光伏发电系统中的另一个棘手问题，如果建筑某一部分被另一栋建筑遮挡，其损失的电力会大大超过被遮挡住的模块所提供的电力。因为模块是成组串联工作，被遮挡某一部分就会使整个模块停止工作，大约10%的阴影遮挡



图7 高雄龙腾体育场



图8 国家体育馆屋顶外观



图9 国家体育馆屋顶PV细节、立面PV幕墙安装照片



图10 光伏组件的组成



图11 范可多夫体育场PV屋顶罩篷



图12 维悉足球场PV幕墙

面积会导致发电效率降低50%以上。由于体育场选址一般在城市开阔地带，位于体育专门用地，建筑密度较低。为保证体育场疏散，体育场与周边建筑间距条件一般比较宽松，留有充分的缓冲余地，有利于太阳光伏组件在工作时不受阻碍，产生最大功率的电力。

体育场建筑面积巨大，功能众多，本身运作和维护的能源消耗不菲。而一般城市体育场每年举办体育运动赛事的机会有限，体育场馆的赛后运营是所有建设单位和运营单位共同关注的问题。

体育场光伏发电系统的形式包括独立发电-蓄电系统和并网发电系统两类。独立发电-蓄电系统将白天光伏组件收集电能储存在蓄电池中，夜间供负载使用。此系统单，造价较低，可供负载较小的路灯使用。

大规模的并网发电系统可以将太阳能转化为源源不断的电力供体育场照明、消防、空调等系统使用。不举办赛事时，光伏系统生产的大量剩余电力可供周边居民使用，或并入电网取得一定的经济效益，减低体育场运营成本。由于与城市电网联系紧密，在阴雨天、夜晚或光强很小的时候，体育场负载也可由电网供电。由于有光伏阵列和公共电网共同给负载供应电力，增加了供电的可靠性。

位于旧金山的AT&T棒球场（AT&T Park）是美国职业棒球大联盟中绿色建筑和太阳能的倡导者（图14）。AT&T棒球场安装了总共120kW太阳能遮阳组件，用于在赛季驱动大联盟巨大的记分牌，这些电能可以供40户家庭使用。

### 3 太阳能光伏技术应用在体育场建筑设计中的难点

建筑太阳能光伏一体化设计具有高效、经济、环保等诸多优点，并已在诸多体育场建筑中取得一定的使用经验，技术上看已经基本成熟，但在实际推广中还面临诸多问题的挑战，在

进行体育场设计中需要根据项目的实际情况应用此项技术。

（1）造价问题。从造价看，目前整套太阳能光伏发电系统设备初期需要的投入依然比较高，约占总建设投资的10%~40%。例如全套中型100kW建筑一体化并网光伏系统，所需面积1 000m<sup>2</sup>，造价约500万元。从光伏发电的应用技术水平和规模上看，与工业发达国家相比有很大的差距。光伏发电技术研究和示范还需继续推进产业化，拓宽应用领域和市场，才能降低总体成本。

（2）BIPV对材料的要求。在光伏发电系统中，太阳能光伏组件需要与玻璃结合形成建筑的表皮，二者的结合成为光伏玻璃组件。这就要求作为幕墙和采光顶面板的光伏组件不仅要满足光伏组件的性能要求，还需要满足建筑维护幕墙的密闭性要求与建筑物安全性能要求。

（3）美观要求。由于光伏发电系统的技术要求，光伏组件安装位置往往比较呆板，而且光伏电池颜色单一，色彩质感比较单调，造成大众对PV立面接受程度不高，建筑造型需要结合美观及技术问题通盘考虑。

以高雄体育场为例，其BIPV光伏玻璃组件成组安装在弧线编织的结构构架上，增添了优美的动势，完全融入建筑中，形成独特的造型要素和耳目一新的设计感（图15，16）。

（4）光伏发电成本和并网问题。由于技术问题，目前太阳能光伏发电的成本依然比常规发电成本明显偏高。2009年3月，财政部颁布了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》，针对BIPV制定了补贴标准，各地政府也相应出台了补贴发展新能源政策。这些促进太阳能并网应用政策的出台，有利于进一步降低上网电价，促进建筑太阳能光伏一体化的快速发展。而太阳能光伏发电原理上存在发电不稳定、受天气影响大、有波动性等先天不足，因此电力部门不轻易承诺并网，“并网



图13 不同形式的光伏组件



图14 旧金山AT&T棒球场

图15 高雄体育场组件安装效果

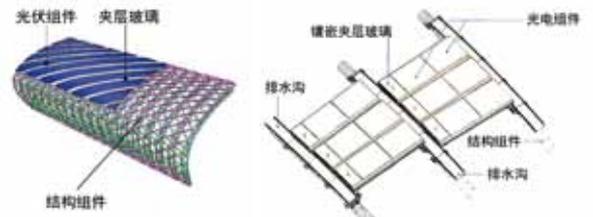


图16 高雄体育场组件安装方式

难”往往绊住光伏发电前进的脚步。

(5) 后续管理与维护问题。光伏尚属新兴学科，发展变化迅速。而国内建筑施工安装到后续管理缺乏此方面的研究和必要的技术储备，如太阳能光伏发电需要一定的维护，包括定期清扫和检查以使光伏组件达到最高效率。实现完全意义上的建筑光伏一体化需要制定标准、完善制度，以保证工程质量和安全。

另外太阳能电池质量不稳定，质保期短，为大面积推广留下质量隐患。太阳能电池转换效率会随时间推移逐渐降低，总使用寿命最长约25年，尚无法做到与建筑同寿命。

(6) 在目前光伏技术推广应用中，光伏企业和建筑设计

师之间缺乏沟通。不少建筑师在项目设计中有想法运用但缺乏系统的设计规范指导。2010年，国家行业标准JGJ 203-2010《民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范》的颁布不仅规范了光伏建筑的基本要求，还将进一步推动光伏建筑的发展。

#### 4 结语

节能减排是社会发展的必然趋势，光伏建筑一体化与大型体育场馆的结合为实现绿色建筑、可持续发展探索了一种可行的发展方向。相信随社会发展需求和光伏发电技术的日益成熟，适当采用太阳能光伏技术实现体育场馆的绿色可持续将成为未来体育场设计的趋势之一。

图片来源：

图1, Simens Press Photo; 图2, <http://www.fck-news.de>; 图3、4, Bayer.MSC factsheet; 图5、6、11, <http://www.skyscrapercity.com/>; 图7, Chi Po-lin/deputydog.com; 图8、9, 《与建筑结合的典型并网光伏案例及技术分析》，科诺伟业；图10、13, 《太阳能建筑-建筑光电一体化源书》；图12, <http://phoenix-bremen.de/>；图14, <http://www.pge.com>；图15、16, ARCHITECTURAL Record 2010.01。

参考文献

- [1] 布拉沙 D,斯诺 M.太阳能建筑-建筑光电一体化源书[M]. 周莹, 杨艳霞, 左丹红等译. 北京: 迪赛纳图书有限公司, 2006.
- [2] 中国建筑学会建筑电气分会. 电气节能与太阳能应用技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 龙文志. 加强光伏建筑一体化应用管理[J]. 建设科技, 2010, 4, 48-51.
- [4] 王朝红,高辉,王建军.现代建筑表皮的光伏一体化设计研究[J]. 新建筑, 2009, (5) 8.
- [5] 刘馨,赵玉文. 实施“上网电价法”是推动太阳能光伏建筑一体化应用的关键所在[J]. 新材料产业.2010, (2).
- [6] 北京科诺伟业科技有限公司, 国奥投资发展有限公司.国家体育馆太阳能发电技术[J]. 建设科技, 2008, 13.
- [7] Kickoff Time for Green Stadiums. <http://news.nationalgeographic.com/>



#### 作者简介

王斌，中国建筑设计研究院建筑师，一级注册建筑师。先后参与承德奥体中心体育馆、鄂尔多斯东胜体育中心体育场、综合体育馆、鄂托克体育场等工程设计项目。2007年毕业于东南大学。

罗洋，中国建筑设计研究院建筑师。先后参与苏州火车站、燕京饭店改扩建、鄂尔多斯东胜体育中心体育场、万州体育场、灵武体育中心体育场等工程设计项目。2005年毕业于西安建筑科技大学。

王斌

罗洋