

李立 尹鸿玺 李昂 瞿明 LI Li, YIN Hongxi, LI Ang, QU Ming

零能耗太阳能住宅技术发展及应用展望

2018 中国国际太阳能十项全能竞赛技术综述

Technology Advancements and Prospects of

Zero-Energy Solar Houses

Technical Review of Solar Decathlon China 2018

摘要 文章概述了零能耗太阳能住宅发展的必要性和所面临的挑战，并介绍了应用于太阳能住宅中的主-被动式太阳能利用和建筑节能技术以及相关行业的发展。文章通过总结 2018 年中国国际太阳能十项全能竞赛各参赛队所实际采用的太阳能技术和主-被动式策略，为实现主-被动式技术在未来零能耗太阳能住宅设计与实践中的整合创新和一体化应用提供技术参考，以达到“零碳排放”“智慧互联”“人居健康”的目标愿景。

关键词 零能耗；太阳能住宅；主动式；被动式

ABSTRACT The paper outlines the necessity and challenges for the development of zero-energy solar houses. It introduces passive and active solar technologies

applied to solar houses and the development of relevant industries. By summarizing the active and passive design approaches that were actually employed by the participating teams in the Solar Decathlon China 2018 competition, it provides ideas for integration and innovation of active and passive solar technologies regarding future zero-energy solar house design, in order to achieve visions of "Carbon Neutral", "Smart Connection", and "Human Health".

KEY WORDS Zero-energy; Solar House; Active; Passive

中图分类号：TK519; TU241.1

文献标识码：A

文章编号：I005-684X(2019)03-0078-06

太阳能住宅作为一种利用太阳能来满足居民用能需求的建筑，其发展伴随着人们生活方式的改变和太阳能技术的提升，同时也是人类应对环境恶化和能源危机、寻求可持续发展的积极探索。据统计，建筑能耗占中国总能耗的 20.6%，其中 62% 来自于住宅建筑^[1]。建筑节能已成为中国势在必行的节能战略。而太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源，被认为是未来最适合、最安全、最理想的替代能源。将丰富的太阳能资源和亟待降低能耗的建筑行业相结合，创造零能耗、高舒适度的健康居住环境成为节能减排和绿色发展必然选择，是当代住宅设计和建造的一个新亮点^[2]。

1 现代太阳能住宅的挑战和愿景

现阶段对太阳能的开发面临着利用率低、成本高、能流密度低、受天气影响和自然条件限制等诸多问题和挑战。尽管到达地球表面的太阳辐射总量很大（约为 $177 \times 10^{17} \text{ kW}$ ^[3]），但分散到住宅表面的能流密度

却很低，能被太阳能组件有效利用的比例更是非常有限：加上受到昼夜、季节、纬度、海拔等自然条件和阴、云、雨、雪等天气因素的影响，太阳能间断且不稳定，而住宅建筑的用电高峰通常集中在傍晚时段（19:00 ~ 22:00），这给太阳能在住宅上的应用增加了难度；此外，随着中国持续推进的城市化进程，高密度的住宅形态、拥挤的城市空间、迅速增加的建筑用能也为太阳能利用提出了挑战^[4]。

科技的日新月异为人类面对和解决可持续发展问题带来了福音，尤其是进入 21 世纪以来，科技呈爆炸式发展，高精尖技术不断取得突破，各种太阳能利用和建筑节能技术的推陈出新为人们解决太阳能住宅问题提供了技术手段。通过主-被动式技术的科学选型及其在太阳能住宅设计建设中的一体化整合应对多方挑战、实现可再生能源在建筑上的完美应用是未来太阳能住宅发展的美好愿景^[5]。因此，现代太阳能住宅以及社区的开发与设计需对“零碳排放”“智慧互联”“人居健康”的诉求有所回应。

(1) 零碳排放。全球变暖对地球气候和人类活动产生的影响不言而喻, 控制温室气体排放以最大限度地减少对气候环境的人为干扰成为21世纪人类所面临的共同命题。据统计, 建筑碳排放占中国能源碳排放总量的19.4%, 其中62%来自于住宅建筑^[1], 建筑的节能减排任重道远。

(2) 智慧互联。现代建筑不仅是为人们提供遮蔽庇护的场所, 而且早已成为各种数据、信息、功能整合的载体。人们不再满足于简单的驱寒避暑, 而是寻求通过对建筑构件、自动化系统、家用电器等设备的灵活控制和互动, 获得更加便捷舒适的生活方式, 使一个真正智能的世界成为可能。智慧互联技术将在住宅社区和城市更新发展中起到关键作用。

(3) 人居健康。人的一生中70%~90%的时间在室内度过, 建筑对人的健康至关重要。而室内的空气污染物含量往往高于室外, 并对人们的认知功能和工作效率产生负面影响。减少病态建筑综合征、提高居住舒适度是健康住宅永恒的宗旨。

2 太阳能住宅应用技术

太阳能住宅在中国经历了几十年的发展, 从单纯的生活热水利用逐步发展成为绿色生态建筑的重要组成部分。初期的太阳能住宅主要采用被动式技术来集热和贮热, 后来发展出的主动式技术依靠机械动力装置来实现太阳能的光热利用, 现阶段的太阳能住宅主要依托太阳能电池等光电转换设备来为建筑物提供用能需求^[6]。太阳能住宅的设计需遵循“开源节流”的原则, 通过主-被动式相结合的方式实现建筑物的产能、储能和节能。在提倡简约高效的今天, 主-被动技术一体化、光伏光热建筑一体化^[7]势必成为未来太阳能住宅技术的发展趋势。

主动式和被动式通常以是否借助机械动力作为区分。被动式太阳能利用技术以不使用机械设备为前提实现建筑物的冬季采暖保温和夏季通风降温, 完全通过建筑设计的方法达到室内环境舒适^[8]。而主动式太阳能利用技术则是运用光热、光电等可控方式利用太阳能资源, 借助一定的动力循环实现收集、蓄存和使用太阳能^[9]。目前的太阳能住宅基本都结合了被动式设计(如建筑物的选址朝向、体型构造、材料选择、通风采光、遮阳保温等因素^[10])和主动式太阳能应用(包括太阳能热水系统、太阳能发电系统、太阳能空调系统^[11]、太阳能热泵系统、储能电池等^[12])。而将主动式和被动式合二为一的设计也成为了最新的发展亮点和趋势, 例如, 通过风机实现空气在双层玻璃中的流动, 既兼顾了窗户的保温, 又能充分利用夹层空气获得的热能。

再者, 光电、光热技术与建筑的一体化(BIPV/T)是实现“产能建筑”的关键。通过将太阳能组件与建筑表皮或构件有机结合, 以替代原有建筑构件的方式消除太阳能设备对建筑物形象的影响, 同时获得电收益和热收益, 也是主-被动式技术一体化的体现。近

年来, 柔性薄膜电池等新技术的出现让光伏与建筑的一体化结合更加灵活方便, 大容量储能电池的研发与应用也减轻了光伏系统对外部电网的依赖性。

此外, 很多传统的建筑节能技术也在太阳能住宅中广泛使用, 由于这些技术不同程度地借助了机械动力, 本文将它们归为主动式建筑技术来讨论, 例如: 热回收、智能控制等。

3 太阳能住宅行业发展

与太阳能住宅直接相关的行业包括建筑、建材、空调、能源、控制等, 太阳能住宅的兴起也推动着这些传统行业的升级换代与绿色发展。

(1) 绿色建筑。绿色建筑行业的发展集中体现在各国的建筑研究机构不断为其制定和完善设计准则和评价标准^[13]。从1990年英国建筑研究院发布的世界第一部绿色建筑评价标准“BREEAM”开始, 世界各国都根据自身国情制定和推出不同的绿色建筑评估体系, 美国的“LEED”、德国的“DGNB”、日本的“CASBEE”、法国的“HQE”等都是活跃在国际市场上的绿色建筑评估体系。中国也于2006年由住房和城乡建设部发布了《绿色建筑评价标准》, 并于2019年推出《近零能耗建筑技术标准》^[14], 为零能耗太阳能住宅的设计和建造提供依据。此外, 建筑信息模拟技术(BIM)的发展也为建筑的性能分析(能耗、日照、结构、流体等)带来了便利, 建筑信息化也成为未来建筑的发展方向^[15]。

(2) 新型材料。近年来, 建材行业的发展除了对门窗和墙体的保温隔热、防火防水、健康安全等性能的不断优化外, 也涌现了很多创新性的建材形式。例如, 利用稻草、秸秆等农作物生产出的“稻草板”^[16]、“秸秆砖”^[17]等新型建材, 在将农业上难以处理的稻草变废为宝的同时生产出生态环保的“零甲醛”板材。此外, 3D打印技术^[18]也给建筑带来了全新的建造方式, 颠覆了传统的建材行业, 不仅可以生产出精确的墙体、家具和节点模具, 创造异形建筑, 还具有节约建材、缩短工期、减少人工、建筑垃圾再利用等优点, 在建筑材料和建筑工艺上进行了开拓和创新。

(3) 暖通空调。太阳能与暖通空调行业的结合产生了太阳能空调、太阳能热泵等相关技术。太阳能空调不使用氟利昂, 避免了对臭氧层的破坏, 且季节适应性好, 但其初投资依旧偏高、设备笨重, 难以被普通家庭接受。太阳能热泵系统的稳定性和季节适应性欠佳, 需要辅助热源。而近年发展起来的光伏直驱空调通过将光伏发电与变频多联机有机结合, 直接采用光伏直流电来驱动光伏多联机, 在减少电量消耗的同时还能提高用电效率, 成为节能空调“黑科技”^[19]。

(4) 新能源。目前人类从地球上采集的能源有99.98%来自于太阳能^[3], 太阳能作为新能源行业的翘楚, 21世纪以来在全球范围内呈现爆发式发展。2000年至2016年间, 全球累计装机容量从1250MW增至304300MW, 年复合增长率高达

40.98%^[20]。中国的太阳能行业也在国家政策的扶持下发展迅速, 成为世界上最大的太阳能热水器和光伏发电设备生产国, 装机容量领先全球。2016年, 国家能源局发布《太阳能发展“十三五”规划》, 大力推动分布式光伏发电、光伏扶贫等项目, 为太阳能住宅的发展提供了政策支持。2015年中国单晶硅和多晶硅太阳能电池转换效率平均分别达到19.5%和18.3%, 《能源技术创新“十三五”规划》中提出要在2020年前将晶硅太阳能电池效率提高到23%以上^[20]。

(5) 智能家居。智能家居在太阳能住宅上的应用不仅是为了节约能源, 更是为了满足人们对于舒适便捷生活的追求。中国的智能家居市场十分庞大, 其中家电类产品占比最高, 智能空调、智能冰箱和智能洗衣机三者市场占比合计超过70%^[21], 此外, 智能照明、智能遮阳、智能门锁、智能安防等产品也愈加丰富。随着技术的升级和用户需求的不断扩大, 智能生活将会渗透到家居生活的方方面面, 人机交互、语音助手将成为未来智慧生活的常态。

4 太阳能十项全能竞赛的实践

太阳能十项全能竞赛(Solar Decathlon)由美国能源部创始于2002年, 经过17年的发展已成为享誉全球的可再生能源和建筑行业的盛会。2018年在山东德州举行的第二届中国国际太阳能十项全能竞赛, 要求参赛队伍现场搭建一栋完成面积为120m²~200m²的太阳能住宅, 并通过竞赛期间对室内环境参数(如温度、湿度、二氧化碳、PM2.5等)的控制以及对日常家庭活动(如洗衣、做饭、娱乐、通勤等)的模拟, 全面考察和测试零能耗太阳能住宅的现实可行性和技术合理性, 从设计、建造、运行、监测全方位推动零能耗太阳能住宅从理论走向实践。本文以本次竞赛为例总结和探讨太阳能利用技术和主-被动式建筑技术在零能耗太阳能住宅上的应用。

4.1 太阳能利用

竞赛规则要求参赛作品只能以“场地范围内的太阳总辐射作为房屋运行的唯一能量来源”, 强调100%太阳能建筑。此外, 本次竞赛还增加了对“单位光伏面积发电量”的评价。如何在实现能源自给和能耗平衡的基础上追求更高的发电效率成为所有赛队面临的挑战。

光伏建筑一体化在竞赛中得到了广泛应用, 例如东南大学队采用的光伏立体使用技术, 在其建筑的东、西立面分别集成了70块具有高效弱光性能的薄膜电池, 以增加在清晨、傍晚, 以及阴雨天等弱光环境下的光电转换, 同时与屋顶的60块单晶硅光伏板一起形成了连续的能量表皮, 将整个建筑变成一个可以发电的能量单元^[22](图1)。武汉理工队亦采用了类似的设计, 其独特的碲化镉薄膜太阳能电池具有较宽的光谱响应范围和较高的弱光敏感度, 可吸收95%以上的太阳光^[23]。华盛顿大学队将柔性的薄膜电池敷设在其曲面屋顶上, 实现了太阳能电池与建筑的完美



结合。北京交通大学队则采用了光热遮阳百叶，将太阳能光热系统与遮阳构件合二为一^[24]。

沈阳工程学院队则采用“双维追日”的太阳能光伏系统以求最大化地获取太阳能（图2）。通过对太阳轨道的精确计算和气象预测，该系统能实时控制光伏板的倾角和方位角，以保证太阳光线始终垂直照射在太阳能电池板上，实验数据显示该系统比普通固定支架式光伏系统平均提高50%的发电量^[25]。

此外，“双面双玻”光伏组件也被多支赛队利用，即通过光伏板背面的晶硅阵列接受漫反射阳光进行工作以增加发电收益。例如北京交通大学队采用的高性能N型双面双玻组件（图3），正面效率>22%，背面效率>19%，且兼具无光衰、低工作温度、低温度系数、优越的弱光响应等优势，在单位光伏板面积发电量上占有显著优势^[24]。华南理工、同济大学等赛队均采用了类似技术并取得了良好的发电表现。

蒙特利尔队则利用光电光热建筑一体化技术来进一步提高太阳能的利用率（图4），低品位的热能被空调系统加以利用，通过屋顶热交换器实现冬天在冷水箱中储热和夏天给热水箱降温，以减小冷、热水箱温差，提高热泵机组的性能系数（COP）；同时还能使光伏电池维持在较低温度，保证其发电效率。华南理工队则是利用回水喷淋降温的方式来缓解太阳能电池效率随温度升高而降低的矛盾。

竞赛中，多支赛队通过安装储能电池来实现削峰

填谷、改变房屋能源结构的目的。富余电能除了进入储能单元以备用电高峰时使用外，也能反哺市政电网，实现经济效益。东南大学队亦采用了冰蓄冷技术，将夏季白天充足的电量用于制冰，相变存储的冷量用于夜晚空调系统给房间降温。而北京大学队则利用可双向充放电的电动汽车电池作为移动储能装置以应对房屋突发应急用电需求。

4.2 被动式建筑节能技术

综合利用建筑周围环境来实现冬季取暖、夏季散热的被动式技术被竞赛各参与方充分考虑和采用。

(1) 建筑朝向和体形系数。场地规划师严格地将所有房屋规定为“坐北朝南”，以最大限度地获取和利用太阳能，同时通过“日光围护”(Solar Envelope)的空间限制（限高8.4m）和合理的建筑间距（10m~15m）避免了相邻房屋之间对阳光的遮挡（图5）。建筑物的体形系数也经过建筑师们的精心考虑，例如华盛顿大学队采用了形如莲花的球体造型，将体形系数最小化（图6），其余赛队则大都将房屋构造为简洁的正方体或长方体，以减小外围护结构的传热损失。

(2) 围护结构。沈阳工程学院队主打“被动房”路线，其建筑外墙采用了100mm厚的ALC板和250mm厚的岩棉保温，以适应东北地区严酷的寒冬。清华大学队则采用了双层立面表皮，中间预留150mm厚的空腔用于夏季对实体墙面的遮阳，同时实现空腔对流带

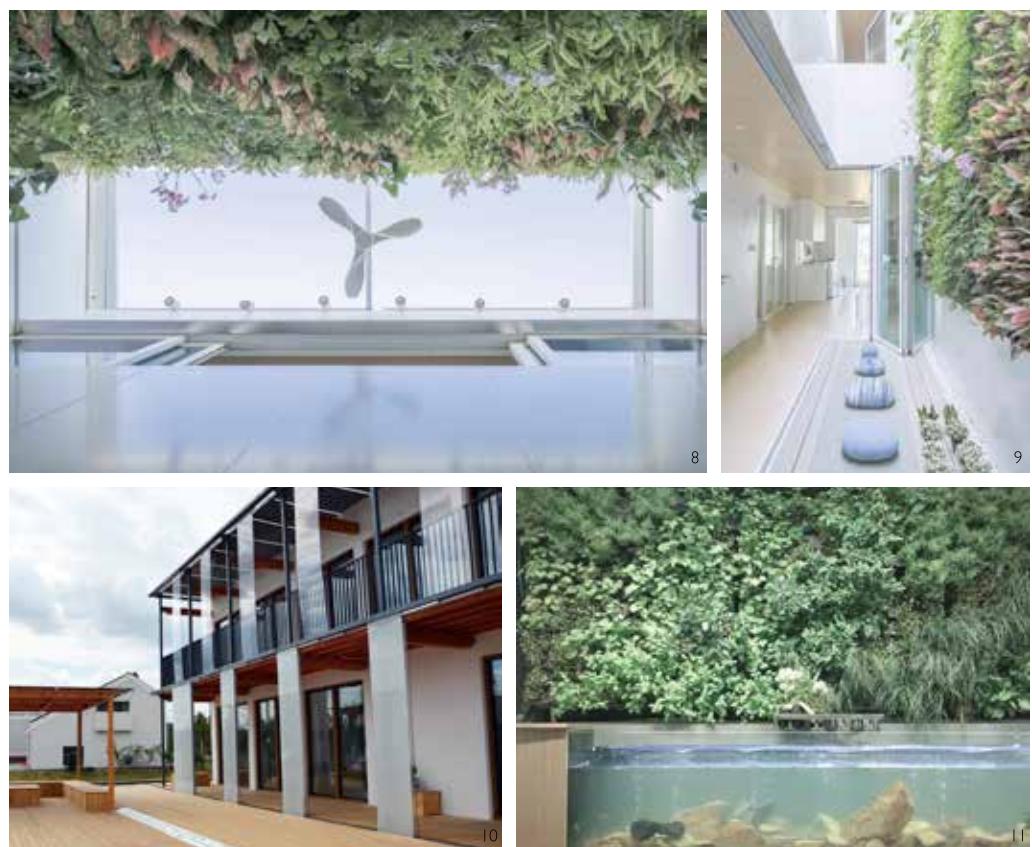
走热量（图7）。无独有偶，同济大学队在其东西两侧的外墙上也应用了聚碳酸酯阳光板形成特隆布墙体原理，被加热的空气通向北侧缓冲区以弥补冬季欠缺的阳光房效应。此外，气密性良好的高性能门窗也被普遍应用于各参赛房屋，如北建工队采用的木包铝玻璃门窗，配置三玻两腔真空Low-E玻璃和自主研发的防冷桥处理，整窗传热系数Uw达0.7W/m²·K，隔音和保温效果优异^[26]。

(3) 自然通风和采光。经济节能的通风和采光策略在竞赛中以多种形式得以体现。例如华南理工队利用室内中庭和天窗的烟囱效应来实现自然通风（图8），同时进行自然采光降低照明能耗（图9）^[27]。厦门大学队则利用前后院的对开门设计将穿堂风引入室内，加强南北对流，同时利用天窗和导光管技术实现自然通风和绿色照明^[28]。而北建工队则以钢架螺栓地桩为基础，通过采用独特的“吊脚楼”式设计，在房屋和地面之间形成了一个空气夹层，利于夏季通风降温及冬季保暖隔热^[26]。

(4) 阳光房及缓冲空间。作为建造场地位于中国北方的竞赛项目，冬季的蓄热保温相较于夏季的通风降温显得更为重要。玻璃温室允许短波辐射进入而阻挡长波辐射透出的特性使其成为冬季贮存热量的良好选择，华南理工队、厦门大学队、西安建筑科技大学队均在其建筑里置入了阳光房来储蓄太阳能。同济大学队则在房屋的南北立面加设了两个缓冲区来提高建

1. 光伏建筑一体化（东南大学-布伦瑞克工业大学联队）
2. “双维追日”光伏系统（沈阳工程学院-辽宁坤泰联队）
3. 双面双玻光伏板（北京交通大学-中来联队）
4. 光电光热建筑一体化原理简图（蒙特利尔队）
5. 竞赛场地
6. 莲花之居（圣路易斯华盛顿大学队）
7. 双层立面表皮（清华大学队）
8. 天窗自然通风（华南理工-都灵理工联队）
9. 室内中庭自然采光和冬季蓄热（华南理工-都灵理工联队）
10. 气候缓冲空间（同济-达姆联队）
11. 鱼菜共生（华南理工-都灵理工联队）
12. 光伏直驱空调（北京交通大学-中来联队）
13. 冷辐射吊顶（同济-达姆联队）

1. Building-integrated photovoltaics (Team TUBSEU)
2. Dual axis solar tracking system (Team SIE-LNKT)
3. Double-sided photovoltaic modules (Team BJTU-Jolywood)
4. Simplified schematic of the BIPV/T system (Team Montreal)
5. Competition site
6. The Lotus House (Team WashU)
7. Double-skin façade (Team THU)
8. Natural ventilation via skylight (Team SCUT-POLITO)
9. Natural lighting and heat storage (Team SCUT-POLITO)
10. Buffer zone (Team TJU-TUDA)
11. Aquaponic system (Team SCUT-POLITO)
12. PV driven DC air conditioner (Team BJTU-Jolywood)
13. Radiant suspended ceiling (Team TJU-TUDA)



筑性能，冬天可以将缓冲区关闭形成阳光房，夏天将缓冲区打开，天花板成为自然的遮阳构件（图 10）。

(5) 景观的利用。通过环境绿化和生态景观来调节建筑微气候不但可以营造舒适宜居的气候环境，还能减少人们对于采暖、降温等电器设备的依赖，从而获得节能减排的生态效益。环绕在华盛顿大学队建筑周围的莲花池，既是对建筑主题的呼应，又能通过夏季池水蒸发来降低建筑周围的温度。同济大学队则将景观水池放置在建筑西侧以缓解太阳西晒给建筑带来的不利影响，而厦门大学队的景观池则位于建筑东南方，利用的正是厦门地区夏季盛行的东南季风来为建筑降温。华南理工队和北京交通大学队则是将鱼菜共生系统置入室内中庭，形成凉爽舒适的视觉效应（图 11）。

(6) 合理布局。主次分明的房间布局也是提高居住舒适度和降低能耗的有效方式，例如西安建筑科技大学队将其建筑总体以南侧阳光房为核心形成 U 字形布局，将主要的功能房间如卧室和起居室布置在南侧以获得良好的日照，北侧则布置厨房、卫生间等辅助空间，形成良好的气候缓冲区阻挡北风。印度理工队、华盛顿大学队和北京交通大学队在房屋布局上也采用了相似的原理。

4.3 主动式建筑节能技术

供暖、热水、制冷、照明是住宅建筑中的四大耗能“大户”，节能潜力巨大。北京交通大学队应用了光伏直驱空调，直接采用光伏直流电来驱动多联机

空调，避免了逆变器交直流转换时的能量损失（图 12）。同济大学队使用了毛细管地暖和冷辐射吊顶，在达到同样的舒适条件时，辐射供暖的室内设计温度可降低 2 °C，辐射供冷时可提高 0.5 °C ~ 1.5 °C，从而降低能耗^[29]（图 13）。除此之外，绝大多数赛队的空调系统都具备热回收功能，利用空调废热来预热新风以达到节约能源的目的。

东南大学队则对淋浴水的废热加以利用，通过将冷水管道与淋浴通道中的热交换器相连，冷水被废热加热后撞击混合电池中的热水，从而使供暖所需的能量减少。

节能器具的使用和对灯光、遮阳的智能控制是实现照明和空调整能的有效方式。例如武汉理工队采用的智能照明技术，能实现人在灯开、人走灯关的节能模式，与普通模式相比每年能节省照明能耗 80%^[23]。而其所采用的智能遮阳控制系统会根据设定在白天阳光强烈的时候自动关闭门窗和窗帘，使夏天房屋处于阴凉的环境以降低空调能耗。

4.4 分析及展望

(1) 零能耗。从竞赛期间各赛队的能源绩效表现（表 1）来看，除了少数几支因搭建延误或系统故障发生意外的赛队外，其余赛队都实现了产能富余，基本验证了零能耗太阳能住宅的现实可行性。然而，由于竞赛周期的局限性，竞赛只监测了房屋在 8 月 2 日—16 日两周内的运行表现，而缺乏全年的观测数据，



12



13

尤其是对冬季工况下各房屋的能源绩效未做评估，因此“零能耗太阳能住宅”的称号还需进一步测试和验证。此外，无论是否加入了储能单元，本次竞赛的房子都不同程度地依附于稳定的城市电网，这也是立足于满足中国高密度住宅建设的需求。或许一个绝对离网的零能耗太阳能住宅社区可以成为未来竞赛的一种有意义的尝试。

(2) 主 - 被动式一体化。本次竞赛涌现了大量的主 - 被动式太阳能利用与建筑节能技术，有些是对现有成果的直接应用，有些进行了进一步地整合创新，有些还实现了主 - 被动式一体化的尝试。例如北京交通大学队在房屋南立面建造了一面集热空气墙，利用黑色的集热管吸收太阳辐射，加热位于集热管中的空气，再借助风机将热空气直接送入位于集热墙正下方的客厅进行冬季采暖^[24]（图 14）；又如其在中庭顶部采用的光热遮阳百叶系统，既实现了夏季对房屋的被动式遮阳，又能主动利用太阳能提供生活热水。主 - 被动式技术的一体化应用成为本次竞赛的一大技术亮点，代表了未来太阳能住宅设计的发展方向，其实现过程离不开多个专业的配合与协作，而“十项全能”竞赛鼓励的正是多学科、多领域的深入碰撞与融合，从而产生具有开创意义的灵感和设计，为主 - 被动式技术的一体化应用提供了土壤。此外，竞赛本身要求房屋实体建造的属性使得参赛作品更注重产品和技术的应用性，并通过竞赛测试其可行性，对于技术的市场推广和行业的进步有着积极的推动作用。

5 结语

在建筑节能已成为中国节能战略的今天，太阳能住宅不仅能让住户家庭生活得更自然环保，而且能够实现节能减排，是应对能源危机和环境污染的可持续

发展策略。太阳能住宅的发展同时也促进着相关行业技术创新和产业升级，对社会发展具有重大意义。实现“零能耗、零排放”的目标需要建筑师和工程师们匠心独运、因地制宜地使用主 - 被动式太阳能利用与建筑节能技术，以达到对太阳能的最大化合理利用，而主 - 被动式技术的高度整合和一体化应用也成为未来太阳能住宅设计的发展方向。

太阳能十项全能竞赛作为一项围绕可再生能源和建筑学科的综合竞赛，以“零碳排放”“智慧互联”“人居健康”为目标，是推动零能耗太阳能住宅从理论走向实践，并测试其可行性和合理性的平台。期待通过竞赛能够孕育出更多具有开创性和实用性的先进技术与创新理念。

(图片来源：图片由作者提供)

参考文献：

- [1] 中国建筑节能协会能耗统计专委会. 2018 中国建筑能耗研究报告 [J]. 建筑, 2019 (2): 26-31.
- [2] 潘翔思. 太阳能与建筑一体化在我国进行推广的几点思考 [C]// 中国太阳能热利用年会论文集. 2004: 6-9.
- [3] 穆志君, 关欣, 刘鹏. 太阳能光伏光热一体化系统运行实验研究 [J]. 节能技术, 2009, 27 (5): 445-447+465.
- [4] 李振宇, 常琦, 董怡嘉. 从住宅效率到城市效益——当代中国住宅建筑的类型学特征与转型趋势 [J]. 时代建筑, 2016 (6): 6-14.
- [5] 加藤义夫, 沙永杰, 纪雁. 太阳能建筑之思与行 [J]. 时代建筑, 1999 (3): 66-70.
- [6] 章宁, 钱利姣, 张永娟. 太阳能与建筑一体化概述 [J]. 建筑节能, 2013 (3): 20-23. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2013.03.004.
- [7] 龙文志. 光电光热建筑一体化 (BIPVT) 概论 [J]. 中国建筑金属结构, 2012 (9): 35-43.
- [8] 陈鹏. 浅议“被动式太阳能建筑” [J]. 科技情报开发与经济, 2006 (18): 294-295.
- [9] 韦亮. 谈主动式太阳能技术在建筑中的应用 [J]. 山西建筑, 2008 (9): 260-261.



14. 太阳能集热空气墙（北京交通大学-中来联队）

14. Solar thermal wall (Team BJTU-Jollywood)

表1. 各赛队能源绩效

Table 1. Energy performance

赛队名称	发电量 (kWh)	耗电量 (kWh)	净电量 (kWh)	光伏板面积 (m ²)	单位光伏面积 发电量 (kWh/m ²)	单位建筑面积 耗电量 (kWh/m ²)
北建工-香港大学联队	551.39	698.83	-147.44	58.24	9.47	4.78
北京大学队	1829.57	794.53	311.32	175.99	10.40	4.41
清华大学队	887.29	680.39	56.29	78.49	11.30	4.72
西安交通大学-西新英格兰大学-米兰理工联队	589.53	464.70	59.95	55.31	10.66	3.07
烟台大学队	1088.23	834.90	54.23	102.27	10.64	5.75
新泽西理工-武汉理工-中国建材联队	189.12	1062.60	-873.48	28.80	6.57	5.88
上海工程技术大学-华建集团联队	1190.32	592.06	387.40	98.11	12.13	4.53
印度理工队	474.07	426.69	-46.01	69.25	6.85	2.22
蒙特利尔队	412.90	396.78	16.12	72.85	5.67	2.07
厦门大学-法国联队	970.76	600.18	37.00	88.39	10.98	3.92
东南大学-布伦瑞克工业大学联队	1447.39	1015.72	30.97	195.80	7.39	6.98
西安建筑科技大学队	1219.63	773.70	45.73	114.48	10.65	4.18
上海交通大学-伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校联队	1374.43	839.40	44.71	113.49	12.11	4.96
北京交通大学-中来队	1291.23	573.23	29.48	63.32	20.39	4.02
沈阳工程学院-辽宁坤泰联队	674.74	419.98	69.04	49.82	13.54	2.46
同济大学-达姆联队	1530.88	668.20	385.96	137.19	11.16	4.19
湖南大学队	758.92	447.37	63.85	82.97	9.15	3.27
华南理工-都灵理工联队	749.48	592.25	39.19	61.46	12.20	4.62

表2. 赛队主-被动式太阳能利用与建筑节能技术一览 (部分)
Table 2. Annex - Summary of teams' active and passive technologies (partial)

赛队名称	主动式	被动式	赛队名称	主动式	被动式
北建工-香港大学联队	光电光热一体化 住宅型新能源双向计量系统 热回收新风机组	“吊脚楼”式设计 庭院辅助温控 木包铝保温玻璃门窗 整体式保温墙体	东南大学-布伦瑞克工业大学联队	光伏建筑一体化 东西立面集成高效薄膜电池 蓄电池储能、电动车辅助储能 冰蓄筒制冰用于空调制冷 通风系统热交换和热回收 毛细管换热系统提高换热效率 浴室废水热交换和热量使用提醒 多角度百叶电动卷帘遮阳	立方体造型降低体形系数 热敏玻璃幕墙
北京大学队	光伏建筑景观一体化 高性能光伏组件 电动汽车电池储能 热回收新风系统 智能微电网管理交直流混合电能	高性能石墨聚苯板墙体保温 高抗压挤塑板基础保温 保温门窗 内遮阳隔热卷帘 中庭高处四面开窗形成对流	西安建筑科技大学队	屋顶光伏 智能遮阳 太阳能光伏景观照明 智能家居	南侧阳光房蓄热 西侧遮阳结构 北侧气候缓冲区阻挡北风 合理空间布局 四玻三腔玻璃 景观水池调节微气候 底层架空通风
清华大学队	屋顶光伏 智能窗通风和智能百叶遮阳 动态人体热舒适空调策略 节律人工光照明策略 实时空气品质管理新风策略	双层立面表皮兼顾遮阳和对流 阳光房冬季采暖 人工湿地调节建筑微气候	上海交通大学-伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校联队	屋顶光伏 微型逆变器 喷雾系统降温 智能管理监测系统制定节能策略	景观水池调节微气候 外表皮格栅遮阳
西安交通大学-西新英格兰大学-米兰理工联队	屋面光伏	多个立体院落空间形成遮阳并促进自然通风 灰泥墙体增加建筑容重及蓄热能力	北京交通大学-中来队	屋顶光伏 双面双玻光伏组件 光伏直驱空调 光热遮阳百叶	“绿核”中庭调节建筑微气候 三进空间布局 南立面太阳能被动集热空气墙 铝包木保温门窗 轻钢复合墙板外挂保温板
烟台大学队	屋顶光伏	整体单坡式屋顶，最大化提供太阳能板所需面积 “L”型平面降低体形系数	沈阳工程学院-辽宁坤泰联队	太阳能双轴跟踪 热电联产 三位一体微能网系统 分级发电储能	外墙高厚度保温 门窗洞口密封技术 双层真空玻璃窗 预埋木质龙骨阻断冷热桥
圣路易斯华盛顿大学队	光伏建筑一体化 曲面薄膜太阳能光电板	圆形造型降低体形系数 鱼鳞型墙体自遮阳 中庭天窗采光和自然通风 混凝土材料蓄热	同济大学-达姆联队	光伏建筑一体化 双面发电光伏组件 毛细管地暖 冷辐射吊顶	南北侧气候缓冲区 高窗墙比自然采光 玻璃纤维复合气凝胶保温材料 三层中空玻璃保温窗 阳光板蓄热墙
新泽西理工-武汉理工-中国建材联队	光伏建筑一体化 太阳能热水器 碲化镉薄膜电池立体使用 建筑自动控制技术降低能耗	节能玻璃幕墙	湖南大学队	屋顶光伏 太阳能热水 金属辐射供冷供热一体化 智能遮阳	西墙外侧立体种植与遮阳 高性能被动窗 自然通风 单向透湿墙体
上海工程技术大学	地面光伏	预制混凝土三明治保温板 混凝土蓄热	华南理工-都灵理工联队	光伏建筑一体化 双面光伏组件 毛细管地暖 全热新风回收机 可调节遮阳 回水光伏喷淋降温和 能源监测系统	阳光房蓄热 烟囱效应自然通风 自然采光天窗 高性能被动窗 高性能复合保温墙体
印度理工队	屋顶光伏 太阳能热水	悬挑构件和穿孔立面遮阳 房间合理布局提高热舒适			
蒙特利尔队	光电光热建筑一体化 能量回收通风 可视化监测	体形系数0.6 天窗自然采光 三层玻璃门窗 高保温性能围护结构			
厦门大学-法国联队	空调系统余热回收 智能化控制系统优化能源使用 LED照明系统降低灯光能耗 电动百叶和可控内遮阳帘	天窗和北侧高窗自然通风 可变遮阳表皮 高性能被动式门窗 导光管和天窗自然采光 南侧水池夏日蒸发降温 独立内院形成缓冲空间			

- [10] 加藤义夫, 吴耀东. 被动式太阳能建筑设计实践 [J]. 世界建筑, 1998 (1), 10-12.
- [11] Ming Qu, Hongxi Yin, David H. Archer. A Solar Thermal Cooling and Heating System for a Building: Experimental and Model Based Performance Analysis and Design [J]. Solar Energy, 2010; 166-182.
- [12] 潘冬辉, 鞠振河. 浅谈太阳能住宅中的主动式太阳能技术 [J]. 山东工业技术, 2017 (23), 57+99.
- [13] 宋晔皓, 林波荣, 姜涌. 绿色与建筑 [J]. 时代建筑, 2008 (2), 6-11.
- [14] 建筑环境与节能研究院. 我国首部建筑节能引领性国家标准《近零能耗建筑技术标准》发布 [EB/OL]. <http://www.chinaibee.com/news/ring/474.html>, 2019-03-26/2019-04-01.
- [15] 王锋. BIM 技术在绿色建筑设计中的应用分析 [J]. 山西建筑, 2019, 45 (6), 189-190.
- [16] 李长江. 新兴的建筑材料——稻草板综述 [J]. 才智, 2010 (14), 39.
- [17] 王春华. 稻秆砖在墙体材料中的应用 [J]. 上海建材, 2018 (2), 18-19.
- [18] Hongxi Yin, Ming Qu. 3D Printing and Buildings: a comprehensive review and future outlook [J]. Architecture Education, 2018.

- [19] 中央空调市场. 格力光伏多联机, 告别空调“电老虎” [EB/OL]. http://www.sohu.com/a/217371249_259724, 2018-01-17/2019-04-01.
- [20] 中国产业信息. 2018 年中国光伏产业发展现状分析及未来发展前景预测 [EB/OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201803/624728.html>, 2018-03-29/2018-04-01.
- [21] 中商情报网. 2018 智能家居行业深度调研及前景预测研究报告 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1609908087240390478&wfr=spider&for=pc>, 2018-08-25/2019-04-01.
- [22] 张宏, 罗申, 唐松, 李永辉. 面向未来的概念房——基于 C-House 建造、性能、人文与设计的建筑学拓展研究 [J]. 建筑学报, 2018 (12), 97-101.
- [23] 新泽西理工学院-武汉理工大学-中国建材国际工程集团有限公司联队. 新能源智享房屋 [J]. 建设科技, 2018 (15), 64-69.
- [24] 李珺杰, 夏海山. 归·田园居——i-Yard 2.0 新城镇零能耗养老住宅设计 [J]. 建筑学报, 2018 (12), 102-108.
- [25] 鞠振河, 郝长青. 沈阳工程学院-辽宁坤泰联队. 爱舍 [J]. 建设科技, 2018 (15), 116-117.
- [26] 北京建筑大学和香港大学“鲁班柱 & 紫荆花”联. 斯陋宅 [J]. 建设科技, 2018 (15), 30-37.

[27] 王奕程, 赵一平, 许安江, 关竣仁. 历史走向未来: 长屋计划的整合实验 [J]. 建筑学报, 2018 (12), 80-85.

[28] 王绍森, 石峰, 闫树睿. 地域类型的建构——2018SDC 竞赛作品“自然之间”设计解析 [J]. 建筑学报, 2018 (12), 92-96.

[29] 同济-达姆联队. 正能量房 4.0 [J]. 建设科技, 2018 (15), 118-127.

作者单位:中国国际太阳能十项全能竞赛组委会
美国圣路易斯华盛顿大学
美国普渡大学

作者简介:李立, 男, 中国国际太阳能十项全能竞赛组委会赛事主管
尹鸿玺, 男, 美国圣路易斯华盛顿大学建筑学院副教授
李昂, 男, 中国国际太阳能十项全能竞赛组委会秘书长
瞿明, 女, 美国普渡大学土木工程学院副教授

收稿日期:2019-03-15