

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.002

零能耗建筑技术研究现状与发展展望

王志勇, 王 俊, 刘畅荣

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 回顾了零能耗建筑的发展历程, 在分析零能耗建筑内涵的基础上, 介绍并讨论了国外零能耗建筑的政策与发展规划。对零能耗建筑在理论研究、建筑用能策略及优化、可行性分析与经济评价等方面的国内外研究现状作了评述, 最后从目标规划、政策引导、标准规范、技术体系、产业支撑、监测评价等方面对我国零能耗建筑技术作了研究展望。

关键词: 零能耗建筑; 近零能耗建筑; 建筑节能; 可再生能源

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)02-0008-07

Prospects of the Current Research on Building Technologies with Zero Energy Consumption

WANG Zhiyong, WANG Jun, LIU Changrong

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on an analysis of the connotation of zero energy buildings, a whole review has been made of its historical development, followed by an introduction and investigation of the policies and development planning of zero energy buildings in foreign countries. An overall account has been given of the current research situation at home and abroad of zero energy buildings concerning the theoretical research, building energy strategy and optimization, its feasibility analysis, as well as its economic evaluation. What's more, a prospect of the research has been made on building technologies with zero energy consumption in China from aspects of its target planning, policy guidance, standard specification, technical system, industrial support, and monitoring and evaluation systems.

Keywords: zero energy building; nearly zero energy building; building energy conservation; renewable energy

当前, 建筑能耗已超过工业能耗和交通能耗, 占全球总能源消耗的41%, 给能源安全、社会可持续发展带来了严峻挑战。建筑节能已成为世界范围内节能领域的重点, 建筑节能未来的发展方向是建筑近零能耗, 甚至是零能耗。关于零能耗建筑(zero energy

building, ZEB), 最早可以追溯到1976年, 丹麦技术大学的T. V. Esbensen首次提出了零能耗建筑(住宅)(zero energy house)一词^[1]。自20世纪70年代以来, 欧美各国极力推动零能耗建筑的发展, 且已得到了建筑界的热切关注。

收稿日期: 2017-01-21

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4030)

作者简介: 王志勇(1978-), 男, 山东济宁人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事绿色建筑理论与技术, 建筑节能技术等方面的研究, E-mail: zywang668@126.com

1 零能耗建筑的内涵与发展历程

国际上许多国家提出了零能耗建筑及类似概念。1992年,德国Fraunhofer太阳能研究所的K. Voss教授提出了无源建筑(energy autonomous house,也称self-sufficient solar house)^[2],并且进一步提出了零能耗建筑^[3]。P. Torcellini对net zero site energy, net zero source energy, net zero energy costs, net zero energy emissions等4类不同的零能耗建筑的理论定义进行了对比与区分^[4]。类似的零能耗建筑定义还有加拿大的零能耗太阳能社区(net zero energy solar communities),美国的零能耗住宅(zero energy home)、净零能耗公共建筑(zero net energy commercial building),英国的零碳居住建筑(zero carbon home)等^[5]。虽然关于零能耗建筑的定义有些不同,但其内涵基本一致,即通过各项节能措施的运用以及最大限度地应用可再生能源,达到建筑能耗与建筑产能之间的平衡^[6]。

实际上,零能耗建筑往往要求通过高性能建筑围护结构、高效建筑能源系统和精细化运行管理与控制来实现。目前,要达到建筑零能耗的目标还比较难,且即使达到,其建筑成本也较高。鉴于此,目前国内外更加广泛认可的是实施近零能耗建筑(nearly zero energy building, NZEB)^[7]。欧洲不同国家对“近零能耗建筑”的定义以及称谓方式多种多样,比如1988年瑞典Lund University的B. Adamson和德国Institut für Wohnen und Umwelt的W. Feist首次提出了被动房(passive house)^[8]的概念。瑞士的R. Kriesi博士和H. Uebersax博士共同提出了迷你能耗房(minergie)的概念,意大利国家建筑研究中心的S. Fattor和F. Ruffini博士提出了气候房(climate house)^[9]的概念,丹麦、法国、德国等提出了主动房(active house)的概念,这些都是近零能耗建筑称谓的不同表现形式。由此不难发现,世界上不同国家对ZEB的定义都有所差异,而且其内涵和外延也有所变化。

2 国外零能耗建筑的政策与发展规划

当前,世界各国依据本国国情,研究探讨或制定了主要针对新建建筑的零能耗建筑行动方案和中长期发展目标,其中美国、欧盟、日本、韩国等,在零能耗建筑的推广应用上取得了一定的成果,对零能耗建筑的研究与建设起了较大的促进作用。

美国于2008年发布了《Zero Net Energy Commercial Buildings Initiative》计划。2009年,由《美

国环境、能源与经济绩效领导行动(Federal Leadership in Environmental, Energy and Economic Performance)》提出了强制性节能要求:自2020年起,所有计划新建或租赁的联邦建筑必须以零能耗为导向进行设计,使建筑物可在2030年达到净零能耗;到2040年,50%的既有公共建筑达到净零能耗要求;到2050年,所有公共建筑达到净零能耗。自2020年起,住宅建筑将实现以净零能耗为导向设计,到2030年达到净零能耗的目标。

欧盟于2010年发布了《建筑能效指令(Energy Performance of Building Directive Recast)》(修订版),要求各成员国应确保所有政府拥有或使用的新建建筑在2018年达到近零能耗,所有新建建筑在2020年达到近零能耗^[10]。虽然欧盟各国对“近零能耗建筑”的定义和技术路径有所不同,但是大多数国家还是给出了相对明晰的发展目标^[11](见表1),并且已经开始出台各种计划或有关法律来执行这项指令,比如英国推出了永续住宅技术规则(Code for Sustainable Homes)。

日本于2010年发布了《能源基本计划》提出了本国的零能耗建筑发展目标(见表1)。韩国2009年发布的《绿色增长国家战略及五年计划》提出:到2017年,实现被动房建筑目标;到2025年,全面实现零能耗建筑目标^[12]。

表1 部分国家的零能耗建筑发展规划

Table 1 Zero energy building development planning in some other countries

国家	年份	零能耗建筑目标
匈牙利	2012/2020	大投资的建筑从2012年实现零排放,其他建筑在2020年实现零排放
芬兰	2015	执行被动房标准
英国	2016/2019	2016年所有住宅建筑实现零碳排放,2019年所有建筑实现零碳排放
挪威	2017	执行被动房标准
韩国	2017/2025	2017年实现被动房建筑目标,2025年全面实现零能耗建筑目标
丹麦	2020	实现近零能耗目标,且建筑能耗比2006年降低75%
法国	2020	建筑实现“正能量”,即建筑产生的能量大于其消耗的能量
德国	2020	住宅和公共建筑实现零化石燃料消耗
爱沙尼亚	2020	实现近零能耗目标
荷兰	2020	住宅和公共建筑实现建筑产能和用能持平的能源中性(energy neutral)目标
日本	2020/2030	2020年新建公共建筑实现零能耗,2030年新建建筑整体上平均实现零能耗

3 国内外零能耗建筑研究现状

近年来,零能耗建筑技术已成为建筑节能领域研

究的前沿热点,相关研究报道主要见诸于国外文献资料,国外零能耗建筑已经形成了相对完整的知识体系,主要包括理论研究、建筑用能策略及优化、可行性分析与经济评价等方面。

3.1 理论研究

理论研究主要包括零能耗建筑的边界划分、能耗计算的边界范围、衡量指标、能源转换系数、平衡周期等。A. J. Marszal 等认为,发展零能耗建筑面临两方面的挑战:一是对零能耗建筑进行统一清晰地定义,二是能量平衡的界定,并对比和分析了 12 个零能耗建筑的定义以及算法^[13]。I. Sartori 等从边界条件、转换系数、平衡、匹配特性以及测试等方面对零能耗建筑的定义进行了较为全面的架构^[14];提出了零能耗建筑能量平衡方程,明确分析了平衡方程中各项因子的定义及相关影响因素^[15]。P. Torcellini 等讨论了零能耗建筑的计算边界及并网问题,并对 4 类不同的零能耗建筑的理论定义进行了对比与区分^[4]。P. Hernandez 等提出 life cycle zero energy buildings 的概念,完善了零能耗建筑理论^[16]。J. S. Bourrelle 通过对比建筑物无需外来能量和降低外来能量,强调了建筑与外部环境的能量流动关联的重要关系^[17]。A. Robert 等认为零能耗建筑对天气依赖严重,仅仅使用典型气候难以得到建筑能够达到零能耗的定论,建议模拟过往多年的气象数据,进而降低气候参数对建筑零能耗的影响^[18]。

与国外相比,我国对零能耗建筑的研究才刚刚起步,在理论方面的研究较少。张时聪等对零能耗建筑概念中的边界划分、计算范围、衡量指标等进行了详尽分析^[5]。封换等分析了零能耗建筑既有定义中的衡算指标,并对常规定义中的时间、空间 2 个研究尺度进行了讨论^[19]。

3.2 建筑用能策略及优化

零能耗建筑技术是多能源系统和多节能技术的集成,即开源与节流的集成。开源是高效利用可再生能源,节流是利用建筑保温体系、气密性保障技术、LED 照明、地源热泵空调技术、光热技术和光伏建筑一体化等主被动式技术,尽最大可能地降低能耗。D. H. W. Li 等总结了零能耗建筑中的可再生能源利用方式以及能源利用效率,指出零能耗建筑涉及 2 个方面的设计策略:一是可再生能源利用技术,如地热、光热、风能和光伏等;二是能源需求最小化技术手段,如在围护结构、机电系统、室内环境等方面提高能源的利用效率^[20]。目前,欧美发达国家正在不断研究与实践零能耗建筑,其被动式设计技术以当地气候为依据,并从材料、构造、体系等各方面进行了深入研究,

形成了较成熟的设计、建造和评价技术体系^[21-23]。零能耗建筑除了通过被动式技术使建筑物能耗达到最小,即“需求最小化”之外,还应通过主动式技术实现设备的高效运行,利用太阳能和地热能等可再生能源和高效的建筑能源系统,满足建筑能源的需求,实现“供给最优化”^[24-25]。E. Musall 等对德国、美国、加拿大等国家的 282 栋零能耗示范建筑使用的技术进行汇总后发现:太阳能光电、太阳能光热、建筑遮阳、机械通风热回收、免费供冷等技术应用的比例相对较高,高性能保温结构和光伏系统、太阳能热水系统以及热泵可再生能源应用系统等节能技术应用最为广泛;其次是自然采光、遮阳系统、被动通风等被动式技术的应用^[26]。H. Lund 等分别从微观和宏观角度探讨了在零能耗建筑中出现的产、用能不匹配问题,并且对产用能的不匹配率进行了量化^[27]。S. Attia 等分析评价了零能耗建筑的既有评价优化方法和工具,鉴于模拟中出现的高度耦合性以及非线性的性能特征,指出建筑性能模拟应采用进化算法^[28]。S. Bucking 等选用混合演化算法对某零能耗建筑的性能进行了模拟分析,并得到了优化方案^[29]。D. Kolokotsa 等分析了影响零能耗实现的重要因素,例如建筑优化方法、建筑性能模拟等^[30]。目前国内这方面的研究不多,代表性的文献有:杨柳等从被动式设计原理出发,提炼了实现超低能耗建筑设计的关键技术问题^[31]。LIU Z. B. 等分析了太阳能热电制冷技术在零能耗建筑中的应用^[32]。

3.3 可行性分析与经济评价

分析当地的气候情况和可再生资源状况,是建造零能耗建筑的基础工作。通过对零能耗建筑研究和实践的对比,总结技术体系、新能源利用、政策规划等方面的特点,并通过实际案例的经济性评价和后期运营管理,可为零能耗建筑发展提供可行性参考,以利于寻找适宜的建造技术和设计策略。目前,国外这方面的研究比较深入,值得借鉴^[33-35]。如 A. Audenaert 等针对比利时被动式建筑、低能耗建筑及标准建筑进行了经济分析^[36]。G. C. D. Graça 等验证了欧洲南部地区典型独栋住宅实现零能耗的可行性^[37]。Wang L. 等运用 Transys 和 Energy Plus 模拟验证了英国住宅建筑实现零能耗的可能性^[38]。J. Kurnitski 等运用净现值法分析了零能耗建筑在全寿命周期内的经济性,并总结归纳出适用于零能耗建筑的七步法^[39]。黄春成选择新疆首座超低能耗节能示范建筑作为研究对象,用 Ecotect 模拟分析了各种节能技术在新疆地区运用的适宜性^[40]。国外对近零能耗建筑的增量成本研究比较成熟,根据国外的经验,建造近零能耗建筑比

普通建筑经济成本高。因为缺乏经验和数据,我国对近零能耗建筑的增量成本目前只能进行粗略估测,在这方面的研究工作还有待进一步深入。

4 我国零能耗建筑发展面临的问题与展望

在全球资源和能源短缺加剧的大背景下,零能耗建筑由于基本不消耗常规能源,逐渐受到社会各界的认可和重视,日益成为关注和研究的焦点^[41]。特别是在过去10a左右的时间里,很多发达国家提出了零能耗建筑的发展目标和规划,并出台了相关激励政策,投入了大量研发力量并积极付诸工程实践,有力推动了零能耗建筑的发展且已取得一定成果。我国尚处于零能耗建筑发展的初级阶段,在目标规划、政策引导、标准规范、技术体系、产业支撑、监测评价等方面与发达国家之间还有较大差距,还有很多问题亟待解决。

4.1 科学合理设定基于国情的中长期发展目标及规划

放眼世界范围内零能耗建筑的发展,各主要发达国家在政府指令、技术发展目标等文件中对零能耗建筑发展做出了中长期规划,有些国家还给出了相对明晰的发展目标。然而,我国建筑节能工作起步晚、基础差、底子薄,节能评估与能源消费计量工作相对滞后,建筑节能不是一朝一夕的事情。而且,中国发展零能耗建筑有其特殊性,室内环境、建筑特点、气候差异、生活习惯、用能特点、能源核算方法等方面都与发达国家不同,因此不能盲目照搬国外的经验和做法。清华大学朱颖心教授在“2011年国际低碳城市暨可持续建筑环境技术研讨会”上指出,中国当前不适合发展“零能耗建筑”,因为中国与发达国家不同,建筑形态主要是高密度聚居区,难以提供支撑零能耗建筑的太阳能板、地源热泵管道等技术手段所需要的用地,而且大型住宅建筑也不宜使用中央空调,否则能耗会远超分体式空调;另外,还要根据地域特点,选择适合使用地源热泵或水源热泵等可再生能源利用技术,否则反而会增加能耗。鉴于此,中国建筑科学研究院徐伟教授指出:近零能耗是大家普遍认同的目前发展的主要阶段,而且我国实现建筑近零能耗化也不能一蹴而就,需要考虑中国的国情,统筹规划,设定中长期发展目标,以利于近零能耗建筑在我国的健康持久发展。中国被动式超低能耗建筑联盟曾提出30-30-30的发展目标,即:到2030年,30%的新建建筑要达到超低能耗即近零能耗,可再生能源满足新

建建筑30%的能耗,既有建筑通过改造30%达到超低能耗。专家估计,未来可能需要50a或许更长时间,才能实现新建建筑的近零能耗化和既有建筑的近零能耗化改造,从而逐步实现建筑超低能耗。

4.2 健全相关政策引导和激励机制

发达国家纷纷出台相关的政策和激励机制推进零能耗建筑,比如:欧盟部分国家已明令加强建筑可再生能源应用,丹麦从1981年开始补贴建筑可再生能源应用。美国则允许在联邦层面法律法规的基础上,各州可根据各自实际情况和气候条件制定适合于各州的独立能耗政策。日本为了促进零能耗建筑的发展,从完善政策法规制度、强化政策激励、支持企业开展技术研发、示范带动等方面采取措施,取得了一些值得借鉴的经验^[10]。日本还制定了从基准建筑、超低能耗、近零能耗到零能耗的建筑节能政策路线图。2012年开展了住宅、公共建筑物的零能耗化推进事业,启动零能耗住宅建设激励活动。韩国出台了一系列财税政策,对零能耗建筑进行补贴,包括从容积率、财产税、公积金贷款、企业所得税等方面给予财税补贴,从被动式技术、可再生能源以及建筑能源管理系统等方面进行实际项目补贴和基金支持,用以抵消零能耗建筑的增量成本。

我国零能耗建筑的发展尚处于起步阶段,近零能耗建筑在我国建筑市场推广仍以政府强制推广为主。目前,我国正借鉴国际经验,强化政策激励措施,如山东、河北等省市已相继出台了一系列补贴政策促进近零能耗建筑的发展,住房和城乡建设部也将研究制定推动被动式超低能耗绿色建筑发展的激励政策。

4.3 加快相关标准体系构建和法规对接

为了实现欧盟的能效提升目标,各成员国都积极推进零能耗建筑的发展。欧洲节能减排发展较好的国家已经建立了相应的超低能耗建筑标准体系,推动了欧盟的能效提升工程。德国的低能耗建筑包括产品质量保证与标识研究所认证体系下的低能耗建筑、被动房、3升房、高能效建筑。德国被动房研究所编制了被动房设计手册、被动房计算软件、被动房评价认证标准、被动房部品认证标准。瑞典颁布了低能耗建筑(minienergi)和被动房2个自愿性标准。挪威拟定了低能耗建筑和被动房标准NS 3700。芬兰制定了低能耗建筑和被动房标准RIL249—2009。奥地利2008年建立了建筑能效认证制度,根据建筑采暖需求将建筑划分为几个等级,分别为A++,A+,A到G,其中A+相当于被动房的标准,A++是最优

等级。瑞士 2003 年制定了针对低能耗建筑认证的标准 Minergie, 认证标识分为 Minergie、Minergie-P 和 Minergie-ECO/P-ECO 三类, 其中 Minergie-P 相当于瑞士的被动房。

目前, 近零能耗建筑虽然在国内日益受到重视, 但是由于缺乏相关标准或规范, 已经建成的被动房均参照德国的标准来设计, 其核心技术指标都基于欧洲的气候条件。其实我国 5 个热工分区的气象条件差异很大, 不能盲目参照德国标准, 应建立与采暖度日数、空调度日数相关的被动房能耗标准, 确定被动房室内舒适度标准和模拟计算边界条件^[42]。应该根据自身国情, 充分考虑气候特点、居民生活习惯、建筑特点和能耗情况, 制定被动房能耗指标体系^[43], 实现被动房设计标准的本土化, 对接我国法规和建筑标准体系, 为我国不同气候区的被动式超低能耗建筑建设项目提供设计指导^[44]。

2015 年 10 月, 在充分借鉴国外被动式超低能耗建筑建设经验并结合我国工程实践的基础上, 我国居住建筑《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)》颁布。其明确了我国被动式超低能耗绿色建筑的定义、不同气候区技术指标及设计、施工、运行和评价技术要点, 为全国被动式超低能耗绿色建筑的建设提供了指导, 这标志着我国正式步入近零能耗建筑发展阶段。2016 年, 国家工程标准计划——《近零能耗建筑技术标准》正式立项, 预计该标准 2018 年完成报批, 2019 年实施。

4.4 构建适合国情的零能耗建筑技术体系

虽然各个国家关于零能耗建筑的定义、名称、路线政策和推广方式不尽相同, 但各国都在寻找适合本国零能耗建筑发展的技术体系和优化路径。我国现阶段处在零能耗建筑发展初期, 技术研究尚不成熟, 还未健全适应我国不同地域气候特征的零能耗建筑技术体系, 应积极借鉴发达国家(地区)的实践经验 and 数据, 但必须注重与本国国情的紧密结合。清华大学江亿院士在接受《中华建筑报》记者采访时说到: 现在世界上已有的建筑节能新技术、新方式基本上都可以在国内找到工程应用案例, 但是所有这些建筑无一座真正意义上的零能耗或超低能耗建筑, 其能耗大都高于同类型的一般建筑。江亿院士的尖锐评论, 折射出我国零能耗建筑领域存在盲目的技术崇拜和技术堆砌。

我国的经济发展水平、室内环境标准、建筑特点、建筑技术和产业水平以及人们的生活习惯, 都和欧美国家存在较大差异, 因此理应构建符合中国国情的零能耗建筑技术体系。另外, 我国地域广阔, 由于地域

性的差异, 不同地区的气候条件、地质条件、水文条件、生活习惯等均不尽相同。同时, 即便是同一地区, 随着季节的变迁、气象状况的变化、昼夜的交替, 这些都会导致相同建筑物的可用能源种类及能源效率不同, 建筑总体能耗不同。因此, 必须考虑技术的适用性问题和地域性问题。我国零能耗建筑技术体系的优化途径应侧重于以下几点: 建筑负荷及能耗的准确预测, 降低建筑负荷及能耗的被动式技术, 高效建筑能源系统, 可再生能源高效转换与利用, 零能耗建筑运行优化控制, 建筑能耗监测与评价。

4.5 加快自主研发, 引领技术升级, 提升产业支撑能力

虽然我国在节能建筑建造施工以及建筑材料的研发生产上已经具备了一定的基础, 欧洲被动房建筑所要求的材料和设备, 在我国大多都有相同或者类似的产品。但是与国外相比, 国内相关材料和产品在生产工艺、性能方面还有一定的差距, 配套技术和产品的研发以及产业化水平还有待提高, 例如: 高效保温系统的配套密封材料、有效的热桥处理措施和构造等。一些高效节能设备及建筑材料仍然需要从国外引进, 例如气密性套环等。另外, 国内很多新型设备及材料的安装技术要求, 没有可供参照的标准或规范, 这其中既有技术原因, 也有市场规模较小、经济成本较高的原因。现阶段, 我们应加大自主研发力度, 通过市场竞争和扩大规模, 提升相关设备、材料及产品的性价比, 实现标准化、工业化, 促进产业升级, 提升产业支撑能力。

4.6 科学推进工程示范、后续监测和评估认证工作

近年来, 我国也开展了近零能耗建筑的示范工程建设实践。2010 年上海世博会上的“德国汉堡之家”是引进的第一座经过认证的近零能耗建筑。2014 年, 住建部组织开展“被动式超低能耗绿色建筑项目”, 启动了汉堡之家、在水一方、溪树庭院、布鲁克、幸福堡等项目的建设。依托中德、中丹、中美等国际合作平台, 以及中央和地方政府的积极推动, 我国在近零能耗建筑的推广方面发展很快, 目前全国在建或者建成的案例大约为 100 项, 国内掀起了被动式超低能耗建筑的应用热潮。我国近零能耗建筑的发展虽然比较快, 但是与德国、美国等发达国家相比, 还相去甚远。比如: 德国有 6 万多座被动房; 截至到 2010 年, 奥地利的被动房也已达到 8 500 栋。下一阶段, 我国应根据中长期目标, 遵守市场规律, 有序推进近零能耗建筑的健康发展。这里, 技术性应该不是主要问题, 关键是经济性问题。在近零能耗建筑的推广过程中, 如何提高性价比是一个需要首先解决的难题。近零

能耗建筑的收益和所增加的额外投资是否能够平衡,从而被市场所接受,这也是影响近零能耗建筑推广的关键因素。如果不能有效提高被动房建筑的性价比,那它在中国将难于被市场所接受,而只能成为试验性个例。

国内一些示范项目的调研和测试显示,近零能耗建筑已经展示出初步的成效,大幅度降低了能耗,室内环境也得到较大改善。但是,我国目前对既有示范建筑的后续监测、评估还有待加强,还需进一步加快近零能耗建筑评价标准、检测、评价体系的建设;同时也要开发评价工具,开展标识认证,完善新建近零能耗建筑或零能耗建筑的节能检测、能耗统计、施工验收、运营及评价标识工作,以推动我国近零能耗建筑的快速发展。

5 结语

零能耗建筑通过提高建筑和建筑设备及其系统的节能性、高效利用可再生能源等各种技术手段,减少建筑中的一次能源消耗,使建筑物中一次能源净消耗量为零或近乎为零。随着可持续发展和低碳概念深入人心,零能耗建筑已成为建筑节能的发展新趋势。我国应坚持政策激励与市场推动相结合,标准强制与技术创新相结合,过程监管与目标考核相结合,推进零能耗建筑的快速发展。

参考文献:

- [1] ESBENSEN T V, KORSGAARD V. Dimensioning of the Solar Heating System in the Zero Energy House in Denmark[J]. Solar Energy, 1977, 19(2): 195-199.
- [2] VOSS K, GOETZBERGER A, BOPP G, et al. The Self-Sufficient Solar House in Freiburg-Results of 3 Years of Operation[J]. Solar Energy, 1996, 58(1/2/3): 17-23.
- [3] VOSS K, MUSALL E, LICHTMEß M. From Low-Energy to Net Zero-Energy Buildings: Status and Perspective[J]. Journal of Green Building, 2011, 6(1): 46-57.
- [4] TORCELLINI P, PLESS S, DERU M, et al. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition[R]. California: National Renewable Energy Laboratory, 2006: 275-286.
- [5] 张时聪, 徐伟, 姜益强, 等. “零能耗建筑”定义发展历程及内涵研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 114-120.
ZHANG Shicong, XU Wei, JIANG Yiqiang, et al. Research on Definition Development and Main Content of Zero Energy Building[J]. Building Science, 2013, 29(10): 114-120.
- [6] 王伟栋, 薛峰, 李婷. 零能耗建筑实现的能耗分配控制策略设计研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(6): 168-172.
WANG Weidong, XUE Feng, LI Ting. Design of Control Strategy for Energy Consumption Distribution to Realize Zero Energy Building[J]. Building Science, 2015, 31(6): 168-172.
- [7] 张时聪, 陈曦, 徐伟. 近零能耗建筑的研究与实践[J]. 建设科技, 2014(22): 27-29.
ZHANG Shicong, CHEN Xi, XU Wei. Research and Its Application of Nearly Zero Energy Buildings[J]. Construction Science and Technology, 2014(22): 27-29.
- [8] GONZALO R, RAINER V. Passive House Design: A Compendium for Architects[M]. Munich: Birkhauser, 2014: 1.
- [9] 徐伟, 刘志坚, 陈曦, 等. 关于我国“近零能耗建筑”发展的思考[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 1-5.
XU Wei, LIU Zhijian, CHEN Xi, et al. Thoughts of Development of Chinese Nearly Zero Energy Buildings[J]. Building Science, 2016, 32(4): 1-5.
- [10] DYRBØL S, THOMSEN K E, ALBÆK T. European Directive on the Energy Performance of Buildings: Energy Policies in Europe-Examples of Best Practices[C]//ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington DC: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2010: 126-140.
- [11] THOMSEN K E, WITTCHEN K. European National Strategies to Move Towards Very Low Energy Buildings[M]. [S. l.]: Statens Byggeforskningsinstitut, 2008: 1-35.
- [12] 刘燕, 张时聪, 徐伟, 等. 韩国零能耗建筑发展研究考[J]. 建筑科学, 2016, 32(6): 171-177.
LIU Yan, ZHANG Shicong, XU Wei, et al. Study of Zero Energy Building Development in Korea[J]. Building Science, 2016, 32(6): 171-177.
- [13] MARSZALA J, HEISELBERG P, BOURRELLE J S, et al. Zero Energy Building: A Review of Definitions and Calculation Methodologies[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 971-979.
- [14] SARTORI I, NAPOLITANO A, MARSZALA J, et al. Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings[J]. Zeitschrift Für Ärztliche Fortbildung, 2010, 68(7): 330-338.

- [15] SARTORI I, NAPOLITANO A, VOSS K. Net Zero Energy Buildings: A Consistent Definition Framework[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 48: 220–232.
- [16] HERNANDEZ P, KENNY P. From Net Energy to Zero Energy Buildings: Defining Life Cycle Zero Energy Buildings (LC-ZEB)[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (6): 815–821.
- [17] BOURRELLE J S, ANDRESEN I, GUSTAVSEN A. Energy Payback: An Attributional and Environmentally Focused Approach to Energy Balance in Net Zero Energy Buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 65(10): 84–92.
- [18] ROBERT A, KUMMERT M. Designing Net-Zero Energy Buildings for the Future Climate, Not for the Past[J]. *Building and Environment*, 2012, 55(9): 150–158.
- [19] 封换换, 安青松, 曹孙亮, 等. 关于零能耗建筑定义框架及研究尺度的探讨 [J]. *建筑科学*, 2016, 32(10): 120–128.
FENG Huanhuan, AN Qingsong, CAO Sunliang, et al. Exploration and Discussion on Definition Framework and Research Scale of Net Zero Energy Building[J]. *Building Science*, 2016, 32(10): 120–128.
- [20] LI D H W, YANG L, LAM J C. Zero Energy Buildings and Sustainable Development Implications: A Review[J]. *Energy*, 2013, 54(6): 1–10.
- [21] HASSAN O A B, JONSSON P. Lecablock, an Alternative Construction Material for the Exterior Walls of Passive House[J]. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 2014, 2(2): 96–108.
- [22] LEWANDOWSKI W M, LEWANDOWSKA-IWANIAK W. The External Walls of a Passive Building: a Classification and Description of Their Thermal and Optical Properties[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 69(2): 93–102.
- [23] GUILLÉN-LAMBEAS, RODRÍGUEZ-SORIA B, MARÍN J M, et al. Review of European Ventilation Strategies to Meet the Cooling and Heating Demands of Nearly Zero Energy Buildings(nZEB)/Passivhaus. Comparison with the USA[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 561–574.
- [24] FABRIZIO E, SEGURO F, FILIPPI M. Integrated HVAC and DHW Production Systems for Zero Energy Buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40(C): 515–541.
- [25] DUMONT O, QUOILIN S, LEMORT V. Experimental Investigation of a Reversible Heat Pump/Organic Rankine Cycle Unit Designed to be Coupled with a Passive House to Get a Net Zero Energy Building[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 54: 190–203.
- [26] MUSALL E, WEISS T, LENOIR A, et al. Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects[R]. Graz: Eurosun 2010 International Solar Energy Society(ISES), 2010: 1–9.
- [27] LUND H, MARSZALA A, HEISELBERG P. Zero Energy Buildings and Mismatch Compensation Factors[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(7): 1646–1654.
- [28] ATTIA S, HAMDY M, O' BRIEN W, et al. Assessing Gaps and Needs for Integrating Building Performance Optimization Tools in Net Zero Energy Buildings Design[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 60(4): 110–124.
- [29] BUCKING S, ZMEUREANU R, ATHIENITIS A. An Information Driven Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimal Design of a Net Zero Energy House[J]. *Solar Energy*, 2013, 96(4): 128–139.
- [30] KOLOKOTSA D, ROVAS D, KOSMATOPOULOS E, et al. A Roadmap Towards Intelligent Net Zero and Positive-Energy Buildings[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(12): 3067–3084.
- [31] 杨 柳, 杨晶晶, 宋 冰, 等. 被动式超低能耗建筑设计基础与应用 [J]. *科学通报*, 2015, 60 (18): 1698–1710.
YANG Liu, YANG Jingjing, SONG Bing, et al. Fundamental Research and Practice of Passive and Ultra-Low Energy Consumption Buildings[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60 (18): 1698–1710.
- [32] LIU Z B, ZHANG L, GONG G C, et al. Review of Solar Thermoelectric Cooling Technologies for Use in Zero Energy Buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 102: 207–216.
- [33] KNEIFEL J, WEBB D. Predicting Energy Performance of a Net-Zero Energy Building: A Statistical Approach [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 468–483.
- [34] KRARTI M, IHM P. Evaluation of Net-Zero Energy Residential Buildings in the MENA Region[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 22: 116–125.
- [35] MUÑOZ P, MORALES P, LETELIER V, et al. Implications of Life Cycle Energy Assessment of a New School Building, Regarding the Nearly Zero Energy Buildings Targets in EU: A Case of Study[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 142–152.
- [36] AUDENAERT A, CLEYNS S H D, VANKERCKHOVE B. Economic Analysis of Passive Houses and Low-Energy
(下转第 27 页)