

近零能耗建筑概念演进、总体策略与技术框架

陈平^{1,2}, 孙澄^{1,3*}

1. 哈尔滨工业大学建筑学院, 哈尔滨 150006

2. 山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250101

3. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150006

摘要 近零能耗建筑以实现建筑能耗趋近于零为目标, 成为当前国际社会建筑节能减排的有效途径和主要目标。通过追根溯源近零能耗建筑起源与演进历程, 讨论了类似概念的异同和发展近零能耗建筑的基本思路, 针对研究现状中近零能耗建筑总体策略分类, 探讨了便于平衡计量的低耗能与高产能总体策略划分方法, 并以此为基础建构技术框架, 阐述了主要技术措施、特征与发展趋势。

关键词 近零能耗建筑; 概念演进; 总体策略; 技术框架

建筑业耗能占据了欧、美、中等各国能源消耗总量的40%左右, 预测到2050年全球建筑能耗将占总能耗的50%^[1]。在全球气温上升、生态环境恶化及能源危机等一系列全球性问题的背景下, 国际社会加快了节能减排的各项进程, 近零能耗建筑逐步成为世界主要国家建筑节能的发展方向。当前, 国际社会近零能耗建筑的概念范畴不尽相同, 仍处于不断的探索过程中^[2-4]。

1 概念演进

1.1 发展历程

从Web of Science数据库中近零能耗建筑研究的年度变化图可以看出(图1), 2008年之前的研究文献非常少, 而之后急剧增多, 呈现出截然不同的两个发展阶段。通过挖掘文献内容发现, 早期阶段仅有少数学者研究近零能耗建筑, 其起源可追溯到

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点自然科学基金项目(51938003); 山东省自然科学基金项目(ZR2018PEE022)

作者简介: 陈平, 副教授, 研究方向为建筑性能化设计, 电子信箱: chenping543@163.com; 孙澄(通信作者), 教授, 研究方向为建筑数字化设计与技术, 电子信箱: suncheng@hit.edu.cn

引用格式: 陈平, 孙澄. 近零能耗建筑概念演进、总体策略与技术框架[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 108-116; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.012

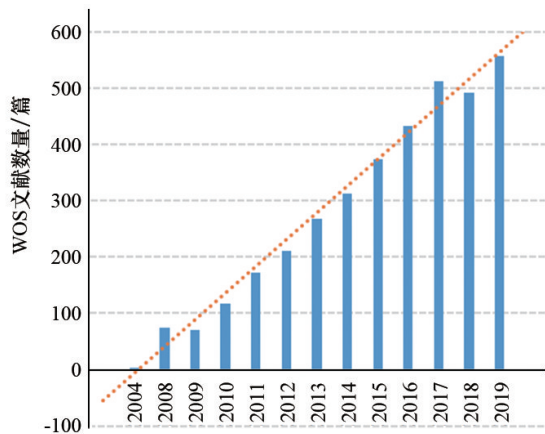


图1 近零能耗建筑研究文献年度变化

1976年丹麦Esbensen公司应对能源危机开展的冬季“零采暖”建筑实验,以不采用化石能源取暖为目标实现建筑供暖的自给自足,这一阶段的发展重点为提倡关注全球性能源和环境问题,“绿色建筑、生态建筑、可持续建筑”概念被各国所熟知以探索建筑节能减排渠道。随着各国建筑节能减排的不断推进,相关概念层出不穷,呈现多元化发展趋势,如“德国被动房(passive house)与超低能耗(ultra-low energy house)、丹麦主动房(active house)、荷兰能源中性建筑(energy neutral buildings)”等^[5],自1988年瑞典和德国科学家Adamson和Feist提出被动房概念以及在1996年成立被动房研究所(PHI)^[6],被动式建筑成为这一时期的主要发展内容。进入新世纪以来,全球建筑总能耗和碳排放增速加剧,一些国家提出了更加积极的建筑节能减排政策,近零能耗建筑被提上发展日程,美国《2007年能源独立和安全法案》提出“净零能耗公共建筑倡议”,明确发展净零能耗(net-zero energy buildings),欧盟2010年《建筑能效指令》(修订版)(Energy Performance Directive recast, EPBD-recast)提出近零能耗建筑(Nearly-Zero Energy Buildings)发展计划,自2021年新建建筑全部实现近零能耗标准,中国经过“30-50-65”节能三步走之后积极推进近零能耗建筑研究与实践,于2019年8月颁布了《近零能耗建筑技术标准》,全球主要国家进入近零能耗建筑快速发展期。

1.2 概念解析

因学者们的侧重点不同,在近零能耗建筑发展演进过程中出现了许多类似却又不尽相同的概念,如零碳建筑(zero carbon building, ZCB)、近零能耗建筑(nearly zero energy building, nZEB)、净零能耗建筑(net zero energy building, NZEB)、正能量建筑(zero energy building plus, +ZEB)以及PV-ZEB、Wind-ZEB等,概念的主要区别在于物理边界、平衡周期、能源类型与计量方法等方面^[7]。2019年Agostino通过对ZEB相关概念的比较^[2],指出各概念的区别主要在于一次能源及其转换系数以及能源源于现场或远处供能等。美国能源部(DOE)以可再生能源来源范围将净零能耗建筑分为不依靠外来能源的建筑物及场地范围内的现场净零能耗建筑(on-site)和接入城市电网等外来能源的离场净零能耗建筑(off-site),共分为4种类型^[8]。Hernandez^[9]提出近零能耗应当以建筑全生命周期为平衡计算范围,从建材制造、建筑物设计、建造、运行到拆除的过程定义近零能耗建筑,提出LC-ZEB概念。中国学者探讨了中国近零能耗建筑定义、政策与标准等内容^[3,10-11],宋德萱^[12]、冯国会^[13]等分别对夏热冬冷地区和严寒地区近零能耗建筑开展了相关研究。从全球范围看,近零能耗建筑概念范畴尚未完全统一,但减少常规能源消耗的出发点和大力发展可再生能源利用的思路基本一致,欧盟侧重于低能耗前提下的零能耗目标,美国、加拿大、澳大利亚等国侧重于在可再生能源方面的获取以保障用能需求进而达到净零平衡^[14],中国采用了与国情特点相契合的近零能耗建筑提法。从建筑业节能发展的进程看,建筑正沿着“低能耗建筑、被动式超低能耗建筑、近零能耗建筑、零能耗建筑、正能量建筑”的路径循序前行。

2 总体策略

2.1 研究现状

如何实现近零能耗建筑是自概念诞生以来不断研究的核心问题,近年来一些学者探讨了近零能耗建筑总体策略,采用了包括以“被动式策略与主

动式策略”的两分法和以“被动式技术、主动式技术与可再生能源”三分法的两种划分方法。Liu^[10]、Li^[11]等将近零能耗建筑技术分为节能措施(energy efficient measures, EEMs)和可再生能源与其它技术措施(renewable energy and other technologies, RETs)两部分实现近零能耗。2017年, Jeongyoon等^[12]对全球过去10年间的nZEB建筑进行分析,提出了通过被动策略降低初始负荷、主动策略节省剩余负荷,使能耗和发电量之和为零实现零能耗建筑,被动式策略包括被动式可持续设计和主动式节能技术,主动式策略包括可再生能源和可再生能源的回收存储系统(back-up system for RE)。2019年Feng等^[8]通过对欧洲典型零能耗案例进行聚类分析,提出被动式和主动式的近零能耗建筑总体策略,并将其细化为被动设计、能源效率和可再生能源技术系统集成。2016年,Cao等^[16]通过对过去10年间全球近零能耗建筑案例采取的各类技术进行梳理,将其归纳为被动式节能技术(passive energy-saving technologies, PET)、建筑服务系统(energy-efficient building service systems, EBSS)以及可再生能源生产技术3个部分。2019年Belussi等^[14]提出包括节能措施(包括被动式的空间加热和制冷、采光及其自然采光设备,主动式的空间加热制冷、采光等设备)、能源供应与发电系统(包括太阳能和风能、热泵与区域供冷供热和生物质能)、建筑控制与管理系统(包括建筑自动化系统、建筑能效管理系统)3个方面为近零能耗建筑实现策略。Yu等^[17]对两届国际太阳能10项全能竞赛项目以评价框架为基础进行策略总结,包括被动设计、主动系统、工业预制系统和可持续性等方面。

2.2 总体策略

1) 以耗能策略与产能策略平衡计量。从总体策略的研究现状可知,近零能耗建筑技术种类复杂多样,两分法的划分方法在具体技术措施中容易混淆主动技术,三分法则不便于能量平衡计算。若将近零能耗建筑各项技术分别以降低能耗为目标的低耗能策略和以扩大产能为目标的高产能策略进行分类,既便于技术归类也易于平衡计算。低耗能策略采用高效的围护结构系统提升围护结构性

能、增强气密性,设计阶段优先采用自然通风采光、优化建筑几何形式、减少体形系数、适宜遮阳等被动式建筑设计方法降低能源损失,提高能源设备系统能源效率进一步减少耗能,以实现最大限度的节约能源。高产能策略采用可再生能源系统与能源回收利用系统,最大化从太阳能、地热能、风能等可再生能源中获取能量,以及采用相变材料、热回收利用技术高效回收与存储可再生能源或建筑剩余能源。

2) 以建筑单体为基础扩展计量边界。近零能耗建筑的核心问题是能量消耗与获取能否取得平衡,计量边界既影响了近零能耗建筑的概念范畴,也影响了可再生能源的获取范围进而决定了总体策略中的产能策略。当能源的获取不仅来源于建筑物本身也来自场地或社区范围时,可再生能源实则更容易被获取,因此,更大范围的场地、社区等计量边界比建筑单体更容易实现能量平衡。建筑消耗的能源全部出自建筑物本身,建筑单体可以实现能量平衡,则场地、社区和区域范围则必定可以实现能量平衡,建筑规模小、层数低、能耗密度低等建筑物则甚至可以成为产能大于耗能的正能量建筑。需要注意的是,尽管更大范围内更容易实现近零能耗建筑,建筑单体仍然是近零能耗的首要目标,仅追求数值平衡却产生高耗能建筑的发展路线不可取。

因此,近零能耗建筑总体策略应以建筑单体近零能耗目标为基础,采用低耗能策略实现最小化的能源消耗、采用高产能策略实现最大化的能源获取,进而扩展到更大范围的平衡,从而实现耗能与产能平衡的“零”能耗目标(图2)。

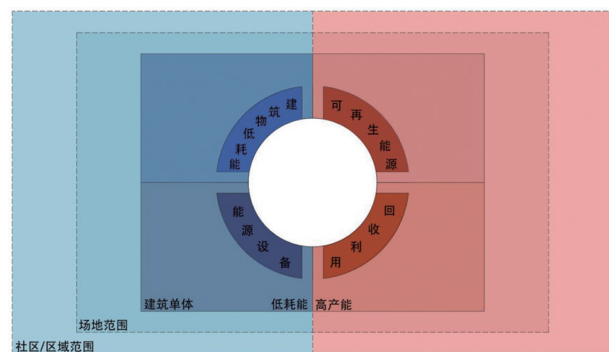


图2 近零能耗建筑总体策略示意

3 技术框架

总体策略为近零能耗建筑技术体系建立了归类依据,提升围护结构热工性能与气密性、被动式建筑设计优化节能、提高能源设备系统能效等低耗能技术与设计,能源回收利用、可再生能源利用等高产能技术,共同建构起近零能耗建筑技术框架。

3.1 建筑物低耗能技术与设计

1) 提升围护结构热工性能与气密性。

提升围护结构热工性能与气密性是近零能耗建筑的基本要求。围护结构构成了建筑物的气候边界,光、热、空气等通过围护结构进行传递,高性能围护结构可以使建筑能耗总体降低22%以上,其物理性能和整体气密性、换气次数与建筑耗能均成正比关系,是近零能耗建筑低耗能策略的关键要素^[18]。屋顶、墙体等不透明围护结构的热工性能研究较多且技术成熟,改善方法主要有降低热传递、结合被动加热或冷却技术进行复合应用两种方法,保温隔热是降低热传递的最简单有效方法,德国被动房、中国被动式超低能耗建筑等均对围护结构的热工性能提出了技术标准限制^[19]。保温材料的热工性能一般情况下从高到低是真空保温板、气凝胶、岩棉矿棉、麻纤维玻璃棉、聚氨酯保温材料,但从可持续角度上最好的是岩棉和矿棉,最便宜实用的是聚苯乙烯板(EPS)。近年来,复合应用技术的围护结构发展迅速,如结构保温板体系、双表皮空腔体系、抽真空保温板体系与植物纤维、ALC板加岩棉等,为近零能耗建筑围护结构提供了新选择。

门窗是建筑节能的薄弱环节,比墙体更容易出现热损失,在建筑围护结构能耗中占比最大。最为理想的建筑门窗选用模式是同时具备高透光率和低热传递系数的门窗,Low-E玻璃当前已经广泛应用,新技术集中在电致变色玻璃及与Low-E复合的玻璃、气凝胶等。门窗本身的物理性能如今提升幅度有限,重点在于选择合适性能的门窗类型,关键技术问题是窗户、墙壁、屋顶及各种构件之间的冷热桥以及整体气密性等。然而,仅靠提升围护结构的热工性能、采用昂贵的高科技技术不一定能实现近零能耗建筑的高性能目标^[8],而应该是需要设计

阶段的优先统筹考虑。

2) 被动式建筑设计优化节能。

被动式建筑设计是节能研究持续关注重点,也是优化建筑性能的重要方法和节约能源的首选途径。具体体现在自然采光与遮阳、自然通风等影响下的建筑设计。自然采光通风因其最节能和健康的使用特点是被动式设计的首选策略,形式有侧窗采光、反射采光、百叶窗、屋顶采光、天窗采光等^[20],可降低建筑能耗的20%~30%。Jenkins等^[21]的研究表明,一栋典型的6层办公大楼使用侧窗每年可以节省56%~62%的照明能源。结合庭、院布局的采光系统既是传统建筑的智慧也是现代绿色建筑的基本手法,Laouadi对不同中庭类型、比例以及屋面采光研究表明,开放中庭比封闭中庭节约制冷能耗的62%~70%^[22]、天窗自然采光比人工照明可节约照明能耗的77%^[23]。

遮阳是维持视觉和光热需求平衡的有效方式^[24]。早期主要以水平、垂直、综合等静态技术为主,随后发展了内遮阳、幕墙中空遮阳以及硬卷帘、百叶帘、机翼型百叶遮阳等外遮阳技术。近年来遮阳的优化设计方法的改进也大大提高了建筑节能效果,为实现近零能耗目标提供了参考,如Manzan^[25]采用遗传优化方法对办公室固定遮阳进行优化遮阳设计,减少了19%~30%的制冷能耗。当前动态遮阳、光伏遮阳、动态光伏遮阳成为近零能耗建筑遮阳研究的热点,呈现出技术与设计相整合的精细化、动态化趋势。

自然通风通过热压、风压实现建筑单侧通风、交叉通风、烟囱通风等形式^[26],结合中庭、风塔、风斗、捕风器、通风井、烟囱、双层外立面、通风开口和窗户等形式可产生百变多样的建筑形式。当前,结合太阳能、相变材料(Phase Change Material, PCM)等技术的太阳能复合通风系统研究成为热点^[27],而自然通风的预测与控制以及通风行为问题仍是研究的难点。国外学者对近零能耗建筑通风研究多基于封闭的设计理念,而采用结合自然的开放设计理念过渡季节采用自然通风策略,不仅可大大降低建筑通风设备能耗,也可营造健康舒适的室内空气质量。

自然采光通风对被动式建筑设计产生了深远的影响,也促使学者在近零能耗建筑研究中重视应用被动式设计方法。建筑朝向、空间布局、形体与平面几何形式、体形系数、窗墙比等设计几何参数,从设计之初即决定了建筑能耗水平能否达到近零能耗目标。Belussi^[4]对“L形、U形、T形、H形、三角形、矩形”等建筑平面几何形状进行年能耗分析发现H形建筑能耗最高,Wen^[28]等针对影响窗墙比的建筑构件物理特性、气象因素研究了方案阶段窗墙比的适用性。当前模拟方法进行建筑节能设计已经普遍使用,近年来以自然采光、光热舒适性为目标建筑参数化设计^[29]、耦合多目标遗传算法(MOGAs)与人工神经网络技术(ANNS)的建筑能耗预测方法^[30]等方向发展起来,结合人工智能、BIM与参数化设计的设计方法成为研究热点,与传统的模拟方法相比,不仅是设计形式更加科学合理,更可使建筑能耗大大降低。

3.2 提高能源设备系统能效

能源设备系统服务建筑运行保障室内舒适度要求,常称为主动式系统,普遍采用包括暖通空调、人工照明、插座设备及楼宇公用设备等在内的电能消耗做为计量范围。研究显示:暖通空调、电气照明分别占建筑总能耗的40%~60%和20%~30%^[31],占比最高、节能潜力巨大。混合通风技术及其控制策略、使用者行为等研究、机械通风中的变风量空调系统(VAV)、变容量调节系统(VRF)、变速驱动等主动式技术在近零能耗建筑研究中较多。照明系统方面,降低耗能的一般方法是采用高效的节能设备技术和自然采光策略,LED节能灯具已广泛应用于建筑节能^[32],当前多传感器和无线通信技术、日光集成的开关调光控制策略等是研究热点,可以在高效节能设备的基础上自动控制调节以进一步降低能耗,可实现节能21.9%^[33]。此外,采用渐进式能源管理优化建筑整体能源消耗,对于降低建筑耗能具有积极作用。

3.3 充分利用可再生能源技术扩大产能

应用可再生能源是近零能耗建筑的必然选择,资料显示,到2050年可再生能源可以全部满足139个国家的用电需求,中国届时将有62%的能源需

求和86%的用电需求来自可再生能源^[33]。可再生能源相关种类中使用频率最高的是太阳能,其次是风能和地热能^[16]。

1) 太阳能利用技术。

太阳能利用是实现近零能耗目标的关键,利用方式主要有光热与光电利用两种,包括光电利用、被动式太阳能建筑设计、太阳能加热与制冷技术等。太阳能光热利用是将照射在集热面上的太阳辐射采集吸收以加热建筑空间或集热设备,通过集热、蓄热和放热过程实现获取太阳能的过程。加热建筑空间有直接增益、辐射传热、对流换热形式的间接受益式,建筑形式有太阳房、太阳能烟囱、蓄热墙等。当前,特朗博集热蓄热墙、Trombe-Michell集成复合墙、集成相变材料的PCM-Trombe墙^[27]等太阳能热利用技术在近零能耗建筑中研究较多;设备用太阳能光热利用技术中,太阳能热水系统、太阳能采暖系统、太阳能热水及采暖复合系统等较为成熟,集成到建筑物上的建筑集成热利用系统(Building-integrated Solar Thermal Technologies, BIST)、太阳能光伏集成Trombe墙等^[17]混合式太阳能光热技术是主要发展方向。

光伏发电技术(PV)是实现近零能耗可持续发展的必选技术^[34],发电效率一直以来是PV技术应用的重点与难点,PV发电材料技术已历经4代,性能逐渐提升,呈现柔软轻质化、建筑集成化趋势。针对发电过程产生热量影响发电效率问题和光伏组件与建筑物的集成问题,发展了建筑集成光伏系统(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)、建筑集成光伏/热系统(Building Integrated Photovoltaic/thermal, BIPV/T),BIPV与BIPV/T有更高的建筑集成度,有利于高效发电、缩短投资回收期。Yang等^[35]和Biyik等^[36]研究了前沿BIPV和BIPV/T技术产品,结果显示,80%的BIPV产品应用于屋顶,其余用于墙体和幕墙,陶瓷双坡瓦等新型产品既可以实现发电效率也可以满足建筑形式需要,BIPV/T系统同时提供电能和热能,双重用途、高效灵活、应用广泛、便宜实用、易于翻新,是最有潜力的光电利用系统。BIPV/T与相变材料集成的复合系统(PCM-BIPV/T)混合式技术、光伏遮阳系统(Photo-

voltaic integrated Shading Devices, PVSDs)^[37]等可以有效地提升太阳能综合利用效率,提高建筑性能和视觉舒适性,这种混合式技术为发展近零能耗建筑提供了重要思路。

2) 热泵与风能利用技术。

热泵技术使用频率仅次于太阳能,热泵技术可通过热力循环有效利用可再生能源和低品位热能,获取热源形式广泛产生了地源热泵(ground source heat pump, GSHP)、水源热泵(water source heat pump, WSHP)、空气源热泵(air source heat pump, ASHP)等技术,水源和地源热泵对于建筑能耗而言平均节能潜力在20%~40%^[38],地源热泵技术发展最为成熟,可在夏、冬季节分别最多提供53%和97%的能量来源,但地源热平衡问题明显,解决这一问题的新技术有复合太阳能的太阳能地源热泵系统(solar ground source heat pump system, SGSHPs)、集成太阳能加热或冷却装置的混合地源热泵(hybrid ground source heat pump, HGSHP)系统^[39]等。空气源热泵 ASHP 相对于其他热泵系统具有配置简单、取源容易、造价较低等优点,但对环境温度的依赖性较高且易于结霜,严寒和寒冷地区的应用限制较大,最新解决办法是太阳能辅助的复合 ASHP 系统。总体而言,地源热泵技术性能系数(Coefficient of Performance, COP)高于空气源热泵,地下水源热泵系统是地源热泵系统中能源效率最高的系统形式,运行稳定可靠,采暖地区的近零能耗建筑案例中较多的采用了这一能源获取方式。

风能利用是将风能转换为机械能再转化为电能的过程,风能的充分利用可为建筑能产生相当可观的能量,但具有随机性,可预测性困难,需要考虑盛行风条件、邻近遮挡情况、建筑布局等因素。风力涡轮机是利用风能的核心,包括设置于建筑场地内的独立式风机系统和与建筑物集成涡轮机系统,建筑上适用于安装水平轴向风力涡轮机、垂直轴向风力涡轮机等小型风力涡轮机,垂直轴向风力涡轮机可捕获来自任何方向的风能,适宜于近零能耗建筑风能使用。针对风能利用困难的问题,当前新技术是结合太阳能和风能互补特点整合为复合技术系统,如光伏风能系统(photovoltaic wind power,

Pv-WP)系统,即当太阳能可利用性较低时风能的可利用性往往较高,比单独使用光伏或风能具有更高的性能,具有广阔的应用前景。

3.4 能源回收利用折减耗能

能源回收利用技术主要是将建筑物运行过程中产生的空气、废水等余热进行回收利用,或将可再生能源进行回收存储利用,可大幅度折减建筑物耗能,其中空气余热回收利用技术已经成为近零能耗建筑应用最广的技术措施。余热回收利用系统有交叉式和对流式回收方法,可以进行显热回收和焓热回收,当前热交换器热回收率普遍最高达到85%以上,串联热交换器形式的产品回收率达90%以上。采暖地区的建筑为保障室内卫生条件的通风换气次数等造成的空气渗透热损失通常高于1/3,能量损失严重,采用热回收利用技术有利于使用较少的能源消耗保持室内温湿度,对采暖建筑尤其适用。需要指出的是,能源回收利用技术需要同时结合建筑物整体气密性发挥作用,而且这一技术使用的前提是回收到的能源应大于回收设备消耗掉的能源,能源回收利用技术不局限于热利用回收,同样适用于炎热地区冷回收,作用相反、原理相同。

近零能耗建筑技术体系庞大、技术措施不一而足,新技术的研究不断深化和扩充着近零能耗建筑的实现方法,表1概括了总体策略基础的近零能耗建筑技术框架,但近零能耗的实现过程仍需要技术的适宜性选择和整体的精细优化。有学者通过对国际近零能耗建筑实践案例研究显示^[7,40],太阳能技术、热回收利用技术、建筑遮阳技术以及自然通风采光等应用比率最高、最广泛,自然采光、遮阳系统、高性能围护结构、节能灯具、热泵空调器、通风热回收、太阳能热水器系统性价比最高。

4 结论

从近零能耗建筑概念演进、总体策略、技术框架等方面,研究了当前近零能耗建筑的发展阶段、实现方法、技术种类及发展趋势。

1) 近零能耗建筑作为下一步建筑节能减排的目标,其演进过程经历了早期多元发展和近期政策

表1 近零能耗建筑技术框架简表

策略	类别	主要技术	具体措施
低耗能策略	建筑物低耗能系统	围护结构低耗能技术	屋顶墙体等不透明、门窗等透明围护结构热工性能,建筑气密性与换气次数
		被动式设计	建筑平面、形体、立面等几何形式,自然采光通风,遮阳等
	能源设备系统	暖通空调	机械通风,VAV、VRV等
		人工照明	节能照明设备
		混合式低耗能技术	主动式设备与被动式设计整合,BIST系统、MVF等
高产能策略	可再生能源	太阳能	被动式与主动式太阳能热水、采暖及混合系统 太阳房、蓄热墙、太阳能烟囱等
		地热能	光电技术 热泵技术
		风能	BAPV, BIPV, BIPV/T, PVSDs等 土源(GSHP)、水源(WSHP)、空气源(ASHP)
	其他	转换效率	独立式发电机组,水平轴向、垂直轴向发电机组等
	能源回收利用系统	主被动及混合式回收利用技术	生物质能、沼气能等其他能源 相变材料、通风设备等空气、水等环境能量和余热回收利用;可再生能源回收、存储利用

推动下的快速发展两个阶段,概念范畴虽尚未完全统一,但减少常规能源消耗的出发点和充分利用可再生能源实现近零能耗的思路基本一致。

2) 探讨了近零能耗建筑总体策略,采用低耗能策略与高产能策略便于平衡计量,低耗能策略实现最小化的能源消耗,高产能策略实现最大化的能源获取,建筑单体层面的近零能耗目标是场地、社区及区域等更大计量边界实现近零能耗目标的基础。

3) 建构近零能耗建筑技术框架,提高围护结构热工性能与整体气闭性是基础,被动式设计有利于大幅度降低能源消耗,能量回收利用可以大大折减能源消耗,充分利用可再生能源是实现近零能耗的关键。

随着新技术的不断进步,技术复合化趋势显著,近零能耗建筑并非单一专业和技术可以实现,而是既需要围护结构、建筑设备、可再生能源系统等高性能技术与设备,也需要从设计优化到高气密性施工工艺的全面提升,因此,精细化统筹处理各项、各阶段技术措施,才能实现建筑能耗接近于“零”的目标。

参考文献 (References)

- [1] Yuan T, Ding Y, Zhang Q, et al. Thermodynamic and economic analysis for ground-source heat pump system coupled with borehole free cooling[J]. Energy and Buildings, 2017, 155: 185-197.
- [2] D'Agostino D, Mazzarella L. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 21: 200-212.
- [3] Liu Z, Zhou Q, Tian Z, et al. A comprehensive analysis on definitions, development, and policies of nearly zero energy buildings in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 114: 1-13.
- [4] Belussi L, Barozzi B, Bellazzi A, et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 25: 1-21.
- [5] Pan W, Li K. Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon[J]. Building and Environment, 2016, 104: 92-101.
- [6] Institute P H. Criteria for certification of passive houses for non-residential use[EB/OL]. [2020-01-22]. <https://passiv.de/en/index.html>.

- [7] Marszal A 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.
- [8] Feng W, Zhang Q, Ji H, et al. A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109303.
- [9] 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.
- [10] Liu Z, Liu Y, He B, et al. Application and suitability analysis of the key technologies in nearly zero energy buildings in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 329–345.
- [11] Li D H W, Yang L, Lam J C. Zero energy buildings and sustainable development implications: A review[J]. *Energy*, 2013, 54: 1–10.
- [12] 宋德萱, 韩抒言. 夏热冬冷地区近零能耗建筑技术途径探索[J]. *南方建筑*, 2018(2): 51–54.
- [13] 冯国会, 徐小龙, 吴珊, 等. 近零能耗建筑技术体系在严寒地区的实践研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(6): 15–20.
- [14] Sartori I, Napolitano A, Voss K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 48: 220–232.
- [15] Oh J, Hong T, Kim H, et al. Advanced strategies for Net-Zero Energy Building: Focused on the early phase and usage phase of a building's life cycle[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2272.
- [16] Cao X, Dai X, Liu J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 128: 198–213.
- [17] Yu Z, Gou Z, Qian F, et al. Towards an optimized zero energy solar house: A critical analysis of passive and active design strategies used in Solar Decathlon Europe in Madrid[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117646.
- [18] Yang L, Lam J C, Tsang C L. Energy performance of building envelopes in different climate zones in China [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(9): 800–817.
- [19] Feist W, Schmieders J, Dorer V, et al. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the passive house concept[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(11): 1186–1203.
- [20] Shi L, Chew M Y L. A review on sustainable design of renewable energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 192–207.
- [21] Jenkins D, Newborough M. An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution[J]. *Applied Energy*, 2007, 84(6): 608–622.
- [22] Laouadi A, Atif M R, Galasiu A. Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(12): 1289–1316.
- [23] Treado S, Gillette G, Kusuda T. Daylighting with windows, skylights, and clerestories[J]. *Energy and Buildings*, 1984, 6(4): 319–330.
- [24] Lima K M D, Bittencourt L S, Caram R M. Ranking configurations of shading devices by its thermal and luminous performance[C]//Personal Learning Environments Conference. Berlin: [S. 1.], 2013, 9: 10–12.
- [25] Manzan M. Genetic optimization of external fixed shading devices[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 72: 431–440.
- [26] Chenari B, Dias Carrilho J, Gameiro Da Silva M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 1426–1447.
- [27] Tyagi V V, Buddhi D, Kothari R, et al. Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 51: 248–254.
- [28] Wen L, Hiyama K, Koganei M. A method for creating maps of recommended window-to-wall ratios to assign appropriate default values in design performance modeling: A case study of a typical office building in Japan[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 145: 304–317.
- [29] Eltaweel A, Su Y. Parametric design and daylighting: A literature review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 1086–1103.
- [30] Kazanas T, Günaydin M, Binol S. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(8): 1751–1757.
- [31] Lam J C, Chan R Y C, Tsang C L, et al. Electricity use characteristics of purpose-built office buildings in subtropical climates[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(6): 829–844.
- [32] Huang B, Hsu P, Wu M, et al. Study of system dynamics model and control of a high-power LED lighting luminaire[J]. *Energy*, 2007, 32(11): 2187–2198.

- [33] Energy Foundation. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[M]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, 2015, 4: 7–8.
- [34] Tiwari G N, Mishra R K, Solanki S C. Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modeling[J]. Applied Energy, 2011, 88(7): 2287–2304.
- [35] Yang T, Athienitis A K. A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 886–912.
- [36] Biyik E, Araz M, Hepbasli A, et al. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems[J]. Engineering Science and Technology, 2017, 20(3): 833–858.
- [37] Zhang X, Lau S, Lau S S Y, et al. Photovoltaic integrated shading devices(PVSDs): A review[J]. Solar Energy, 2018, 170: 947–968.
- [38] Bayer P, Saner D, Bolay S, et al. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(2): 1256–1267.
- [39] Yuan T, Ding Y, Zhang Q, et al. Thermodynamic and economic analysis for ground-source heat pump system coupled with borehole free cooling[J]. Energy and Buildings, 2017, 155: 185–197.
- [40] Gupta R, Gregg M. Assessing energy use and overheating risk in net zero energy dwellings in UK[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 897–905.

Conceptual evolution, overall strategy and technical framework of nearly zero energy buildings

CHEN Ping^{1,2}, SUN Cheng^{1,3*}

1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

2. School of Architecture and Urban Planning (SAU) of Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

3. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150006, China

Abstract Nearly zero energy consumption building aims to achieve zero energy consumption and has become an effective way and a main goal of building energy conservation and emission reduction. By tracing the origin and development process of nearly zero energy consumption buildings, this article discusses the similarities and differences of similar concepts and the basic ideas towards nearly zero energy consumption buildings. In view of the classification of overall strategies of nearly zero energy consumption buildings in the current research situation, this paper also discusses the division method of overall strategies for low energy consumption and high production capacity, which is convenient for balance measurement. Based on the overall strategy, a technical framework of nearly zero energy consumption building is constructed, and the main technical measures, characteristics and development trend are described.

Keywords nearly zero energy buildings; conceptual evolution; overall strategies; technical framework ●



(责任编辑 卫夏雯)