国际典型“零能耗建筑”示范工程技术路线研究*

哈尔滨工业大学　中国建筑科学研究院　张时聪☆
中国建筑科学研究院　徐　伟
哈尔滨工业大学　姜益强
美国劳伦斯伯克利国家实验室　冯　威
中国建筑科学研究院　孙德宇

摘要　对美国、英国、德国、法国等国家的多栋零能耗(近零能耗)低层居住建筑、多层居住建筑、公共建筑和社区进行了分析,这些建筑大部分已经建造完成且有实测数据,小部分使用了模拟计算进行分析。介绍了以实现建筑零能耗为目的的采用的太阳能光电技术、高性能围护结构、其他支撑技术和部分示范工程经济性分析的最新进展,提出了通过被动式设计、高性能围护结构、高效建筑能源系统、能耗预测监管平台等技术综合应用,达到建筑零能耗的技术措施。

关键词　零能耗建筑　示范工程　技术路线　太阳能光电技术　高性能围护结构

Research on demonstration project technology roadmap of zero energy buildings abroad

By Zhang Shicong★, Xu Wei, Jiang Yiqiang, Feng Wei and Sun Deyu

Abstract　Analyses several zero energy (or nearly zero energy) building cases for low-rise residential buildings, multi-rise residential buildings, public buildings and communities in US, UK, Germany, France, etc. These buildings are mostly built completely and actual measurement data for most of them are collected. For a small part of the buildings, simulation calculation is used to get data. Present recent development in solar energy photovoltaic technology, high performance building envelope and other support technology aimed at realizing zero energy building, as well as the economical efficiency analysis of sovne demonstration projects. Proposes the integration application of passive design, high performance building envelope, high performance energy system, energy consumption monitoring system, etc. to achieve the goal of zero energy building.

Keywords　zero energy building, demonstration project, technology roadmap, solar energy photovoltaic technology, high performance building envelope

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

“零能耗建筑”及相关定义从最早提出,到被各国科研界广泛重视、国际组织试图通过国际合作对其进行统一定义,经历了 30 余年的发展过程。《“零能耗建筑”定义发展历程及内涵研究》[1]一文对“零能耗建筑”及相关定义的发展历程进行了总结,对国际“零能耗建筑”定义的边界划分、计算范围、衡量指标、转换系数、平衡周期等内容进行了分

* 科技部国家国际科技合作计划项目“可再生能源蓄能技术在低能耗建筑的应用”(编号:2010DFA64240),中国建筑科学研究院青年基金项目“零能耗建筑可行性研究”

①☆ 张时聪,男,1981 年月生,在读博士研究生,副研究员
100013　北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院
(010) 84270181
E-mail:zhangshicong@chinaibee.com
收稿日期:2013-09-17
修回日期:2013-10-16

析，结合我国实际情况，得出了适用于我国的“零能耗建筑”的具体定义，即：以年为计算周期，以终端用能形式作为衡量指标，建筑物及附近与其相连的可再生能源系统产生的能源总量大于或等于其消耗的能源总量的建筑物。本文通过对国际典型“零能耗建筑”示范工程按低层居住建筑、多层居住建筑、公共建筑、社区划分进行技术分析，探讨建筑物实现零能耗的技术路径。

1 典型工程案例

1.1 低层居住建筑

Danny 通过对在北美建造的多栋超低能耗建筑以及第一例在北美使用德国被动房技术建造的建筑进行实测分析发现：1）现有节能相关技术和可再生能源建筑应用技术已经基本成熟，可以很容易使建筑物达到超低能耗；2）节能增量投资约为 0.1 美元/(kW·h)，就可以使建筑物降低到标准建筑能耗的一半或更低；3)性价比最高的节能方式是在建筑建造的过程中安装太阳能热水器和太阳能光电系统[2]。

Wang Liping 对在英国 Cardiff 地区使用可再生能源发电系统(光电＋风电)、太阳能热水系统、高性能供暖系统，通过调节建筑物朝向、窗墙面积比、围护结构性能参数等方式，使英国典型低层居住建筑达到零能耗的可行性进行了分析[3]。研究者将窗户的传热系数设为 1.78 W/(m^2·K)；将墙体传热系数分别设置为 0.1，0.2，0.3，0.4 W/(m^2·K)；将各向窗墙面积比设为 0.1～0.4；将供暖室内参数设定为 20 ℃，供冷室内温度设定为 24 ℃。通过模拟计算发现，当南向窗墙面积比为 0.4，其他各向窗墙面积比为 0.1 或更低，建筑墙体传热系数为 0.1 W/(m^2·K)时，建筑物全年供热供冷能耗最低，供暖能耗相对于传统建筑可降低 26.5%，但供冷能耗小幅升高。

丹麦于 2006 年颁布了新版本的《建筑法规》，Tommerup 通过对根据 2006 年丹麦《建筑法规》建造的 6 栋独栋示范居住建筑进行研究发现，采取了更高性能的围护结构后，独栋居住建筑可以相对容易达到将其能耗降低为典型被动式住房能耗 75% 的政府要求，通过一些改进措施，可进一步将能耗降低至被动式住房能耗的 50%[4]。Tommerup 通过对住户入住的 3 栋建筑进行测量发现：1）由于冬季室内平均温度通常维持在 22～23 ℃，高于标准计算温度 20 ℃，示范建筑的实测能耗普遍高于根据标准计算出的能耗，但如果采用 22 ℃作为室内温度对能耗进行模拟计算，则模拟能耗和实测能耗相差不大；2）选用市场上能效较高的家电产品，示范建筑整体耗电可以降低 40%；3）随着围护结构性能提升，通过电器耗电产生热量的 75%可以视为建筑物的潜在供暖热源。

Milorad 对塞尔维亚 Kragujevac 地区的 3 栋低层居住建筑进行了比较研究[5]，Kragujevac 地区一年四季分明，夏季最高温为 37 ℃，冬季最低温为 −12 ℃，示范建筑为每栋面积 130.6 m^2 的双层居住建筑。3 栋建筑分别配备 14.5，29，45.6 m^2 的 PV 板，PV 板与电网连接为地埋管地源热泵系统、全部家电和用电设备供电。通过模拟和监测发现，建筑物冬季供暖耗电量占建筑全年耗电量的 54%，照明占 23%，其余家电设备占 23%。安装 14.5m^2 PV 板的建筑，PV 板发电可满足建筑冬季供暖需求；安装了 29 m^2 PV 板的建筑，PV 板可满足建筑物全年耗电量需求；安装 45.6 m^2 PV 板的建筑在满足建筑物全部需求后，还可以向电网供电。研究者通过计算发现，当上网电价为 0.15 欧元/(kW·h)时，对 PV 板的增量投资可以在 30 年内收回，与 PV 的寿命期基本一致，如果上网电价进一步提高，回收期可以缩短为 3～7 年。

Mahdavi 对奥地利维也纳 1 栋被动式住房和 1 栋普通低能耗住房的室内环境、能耗水平等进行了实测，发现：1）被动式住房的供暖能耗较普通低能耗住房降低 65%，用电减少 35%；2）建造被动式住房的增量成本约为 5%，由于能源价格波动较大，回收期约为 8～18 年[6]。在更炎热的意大利、中国香港，零能耗低层居住建筑的理论和示范研究也在逐步展开[7-8]。

1.2 多层居住建筑

Marszal 以业主的视角对丹麦第一栋多层零能耗建筑“BOLIG＋”进行了研究[9]，该建筑总面积为 7 000 m^2，部分 6 层，部分 10 层。1 782 m^2 的 PV 板被安装在建筑的屋顶、南向外墙、西向外墙，203 m^2 的太阳能光伏光热一体化系统(PV/T)安装在建筑屋顶。研究者对建筑物可以使用的 3 种能源供应系统进行了比较分析：1）太阳能光电板＋太阳光伏光热一体化＋空气源热泵；2）太阳能光电板＋地源热泵系统；3）太阳能光电板＋区

域供暖系统。通过对这 3 种系统的全寿命期经济性进行比较发现:1) 在建筑围护结构节能性能上进行投资其回收期要远低于为建筑安装光电池板,除非 PV 系统的价格可以降低 70%;2) 对于丹麦地区的多层居住建筑来说,PV+户式空气源热泵供暖的经济性远远优于使用区域供暖。

Morelli 对丹麦一栋 1896 年建造的多层居住建筑进行了近零能耗改造[10],建筑物高 6 层,总面积为 2 717 m^2,有 30 户住户。改造方案为首先将建筑外墙传热系数从 1.20～2.14 W/(m^2·K)降低到 0.16～0.22 W/(m^2·K);然后将外窗传热系数从 2.3～4.2 W/(m^2·K)降低到 1.03 W/(m^2·K),并为每户配备一套独立通风热回收系统。根据计算,建筑物全年能耗可以从 162.5 kW·h/(m^2·a)降低到 51.5 kW·h/(m^2·a),降低 68%。研究者认为,如果不使用可再生能源,此类建筑物的改造很难达到近零能耗。

韩国政府颁布强制性规定,要求 2025 年执行零能耗建筑标准,据此韩国建设科学研究院 Cho Dong-Woo 等人建造了韩国首栋 8 层近零能耗居住建筑[11]。根据计算,通过被动式设计可将建筑物的供暖能耗由 120 kW·h/(m^2·a)降低到 15 kW·h/(m^2·a),通过安装户式太阳能光电一体化系统可以为每户住户提供电能 38 kW·h/(m^2·a),此示范建筑已于 2012 年底落成。

1.3 公共建筑

Franco 对建造在法国留尼旺岛上的 ENERPOS 零能耗办公建筑进行了研究[12]。留尼旺岛处于热带地区,此地区典型办公建筑全年能耗约为 140 kW·h/(m^2·a),空调能耗超过 50%、电脑能耗占 25%、照明能耗占 11%。ENERPOS 零能耗办公楼建筑面积为 681 m^2,2 层,通过 350 m^2 的屋顶 PV 板为建筑物遮阳和发电。研究者希望可以在满足办公人员舒适度的条件下,使用自然通风进行供冷,将建筑全年能耗降低到 50 kW·h/(m^2·a)以下。实测结果表明,从 2010 年 5 月到 2011 年 4 月,建筑一体化的 PV 板发电量为 72 020 kW·h,而建筑物总体耗电仅为 10 323 kW·h,其中电脑等办公设备占 46%、两个技术专用房的分散式系统占 15%、内部照明 14%、风扇 11%、外部照明 7%、电梯 7%,建筑物达到了零能耗。

Goncalves 对建造于葡萄牙里斯本的 SOLARX XI 零能耗示范建筑进行了分析[13]。建筑采用了被动式设计进行遮阳、采光,南向立面铺设了 96 m^2 的太阳能光伏光热一体化系统,约占 50%的面积,停车场铺设了 95 m^2 的 PV 板,用于建筑物供电;使用埋在地下 4.5 m 深的 32 根直径 30 cm、长 15 m 的管道为建筑物供冷,采用夜间供冷进行辅助供冷;使用太阳能光伏光热一体化系统和 16 m^2 的太阳能集热器进行冬季供暖,用燃气锅炉进行辅助供暖。根据计算及监测,研究人员发现,如按照葡萄牙现行建筑标准建造此建筑,其全年能耗会达到 101 kW·h/(m^2·a);如果通过提高围护结构性能,建筑全年供暖供冷能耗可以降低为 90 kW·h/(m^2·a);如果通过进一步提升围护结构性能并辅助被动式技术和运行策略,建筑物全年能耗可以降低为 43 kW·h/(m^2·a),而建筑物可再生能源系统可以产生能量为 35.85 kW·h/(m^2·a),研究人员认为此示范建筑属于葡萄牙的近零能耗建筑。

为响应美国国会于 2007 年启动的“净零能耗公共建筑倡议”,2013 年 4 月,美国 Bullitt 基金会在西雅图建成被称为世界上最绿色建筑的 Bullitt 中心[14],这栋办公楼高 5 层,总面积为 4 800 m^2,建筑物采用地埋管地源热泵和辐射盘管系统为建筑物供热供冷,配有带热回收装置的 100%全新风系统,使用自然照明和照度控制系统,建筑的照明负荷为 4 W/m^2,低于西雅图建筑标准要求的 9 W/m^2。通过对包括供暖、供冷、照明、风机水泵、生活热水、办公电器、电梯全部能耗的总能耗进行计算,研究人员发现,此建筑如果按美国“能源之星”的 50 分标准进行设计,其全年能耗应为 227 kW·h/(m^2·a);如果采用西雅图建筑节能标准进行设计,建筑物全年能耗可降低为 201 kW·h/(m^2·a);如果采用 LEED 白金奖要求进行设计,建筑物全年能耗可降低为 100 kW·h/(m^2·a);而本项目的设计全年能耗为 53 kW·h/(m^2·a),且建筑全部用电均可以用铺设在建筑物屋顶及建筑物立面的 PV 板提供。值得一提的是,为了使建筑物全部耗能均可以由 PV 板提供,市政府特许此建筑物屋顶 PV 板可超出建筑规划红线进行铺设。

1.4 社区

德国建筑师 Rolf Disch 在 Freiburg[15] 建造了一个包含 59 栋双层公寓的小区,建筑的起居室和

卧室都设置在南侧，厨房、卫生间和其他房间设置在北侧，每户平均居住 2.9 人，供暖面积为 138 m^2，小区共设置 PV 板 3 150 m^2，平均每户约设置 53 m^2[15]。研究人员通过计算和测量发现，如果按照德国建筑节能标准计算，建筑物包括供暖、电器、照明等的全年能耗约为 185 kW·h/(m^2·a)(图 1 中点 1)；如果按照节能模式对此住宅区进行运行管理，其全年能耗可以降低为 165 kW·h/(m^2·a)(图 1 中点 2)；如果采用德国被动式住宅标准建造此建筑，其全年能耗可以降低为 98 kW·h/(m^2·a)(图 1 中点 3)；如果考虑将建筑物接入由部分木材为燃料的供暖系统，则全年能耗可以降低为 79 kW·h/(m^2·a)(图 1 中点 4)，PV 板不但可以承担小区全部能源供给，还可以向外网输出电能 36 kW·h/(m^2·a)(图 1 中点 5)。

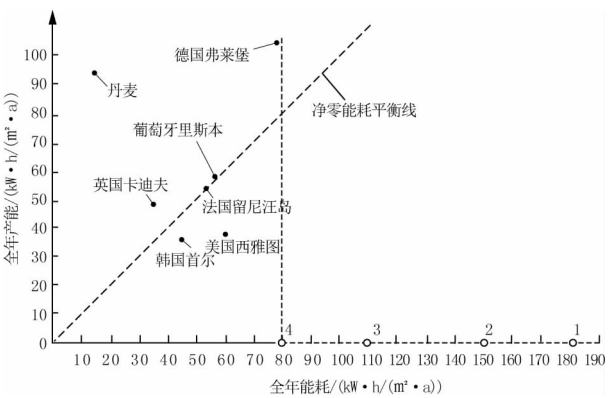

图 1 部分示范建筑产能与用能平衡示意图

1.5 小结

可以看出，随着各国政府对建筑节能工作的不断重视，在探讨零能耗建筑的定义和技术路线的同时，各主要国家都建造了大量示范项目。示范建筑覆盖了从严寒寒冷气候区到热带气候区的广泛地域(如北欧丹麦，法国留尼旺岛)，大部分项目都是近期竣工完成，项目类型包括低层居住建筑、多层居住建筑、办公建筑、校园建筑和居住区。本节示范工程情况汇总见表 1，从表 1 中可以看出：1) 示范建筑都采用了高性能的建筑围护结构(示范工程围护结构传热系数与我国节能标准比对见表 2)。2) 太阳能光电系统、太阳能光热系统作为建筑物能量来源使用最为广泛，大部分项目配有地源热泵系统用于供热供冷，机械通风系统普遍配有热回收。3) 大多数项目均采用 kW·h/(m^2·a)作为能耗单位对建筑物全年能耗进行平衡计算，且都可以达到近零能耗和零能耗，部门示范建筑的产能与用能平衡示意图见图 1。

表 1 零能耗示范工程情况汇总表

建筑类型	国家(地点)	建筑面积/m^2	*HDD*	*CDD*	外墙传热系数/(W/(m^2·K))	窗户传热系数/(W/(m^2·K))	能源系统类型	全年耗能/(kW·h/(m^2·a)	全年产能/(kW·h/(m^2·a)
低层居住建筑	英国 Cardiff	约 150	*HDD*18=3 015	*CDD*10=719,*CDD*27=0	0.1	1.36	PV+风电+太阳能热水	40	48.7
	丹麦	145	*HDD*10=1 357	*CDD*10=790,*CDD*27=17	0.11	1.5	区域供热+机械通风热回收	19.8(不包括供暖)	
	塞尔维亚 Kragujevac	130.6	*HDD*10=1 124	*CDD*10=1 694,*CDD*27=1 516	0.22	3.19	PV+土地源热泵系统		
	奥地利维也纳	89.5	*HDD*10=1 364	*CDD*10=1 306,*CDD*27=522	0.13	0.8	区域供暖	32.8	
多层居住建筑	丹麦	7 000	*HDD*10=1 357	*CDD*10=790;*CDD*27=17	0.1	0.9	PV/T+地源热泵	56.5	56.5
	丹麦	2 717	*HDD*10=1 357	*CDD*10=790,*CDD*27=17	0.16	1.03	通风热回收	51.5	
	韩国首尔	1 344	*HDD*10=1 183	*CDD*10=2 202,*CDD*27=1 318	0.15	0.85	BIPV	60	38
公共建筑	法国留尼旺岛	681					屋顶 PV 系统+自然通风	15.2	105
	葡萄牙里斯本	1 500	*HDD*10=35	*CDD*10=2 664,*CDD*27=1 513	0.45	3.5	BIPV/T+地道送风	43	35.85
	美国西雅图	4 800	*HDD*10=525	*CDD*10=1 345,*CDD*27=335			屋顶 PV+BIPV+地源热泵系统	53	53
居住区	德国 Freiburg	8 142	*HDD*10=958	*CDD*10=1 442,*CDD*27=548	0.28	0.7	屋顶 PV	79	115

注：BIPV 为 Building Integrated PV，建筑光伏一体化。

2 技术路线研究

Musall 对德国、美国、加拿大等国的 282 栋零能耗示范建筑使用的技术进行汇总，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[16]。Eike 研究的各国零能耗建筑数量见图 2，各种节能技术使用比例见图 3。从图 3 可以看出，高性能保温结构和 PV 系统、太阳能热水系统以及热泵可再生能源应用系统在零能耗建筑中应用最为广泛，其次是自然采光、遮阳系统、被动通风等被动式技术的应用，高效照明、电器、办公设备、HVAC 设备使用也比较广泛。

美国新建筑研究所 2012 年 3 月发布《美国零能耗公共建筑成本及特性调查》[17]，通过对 21 栋

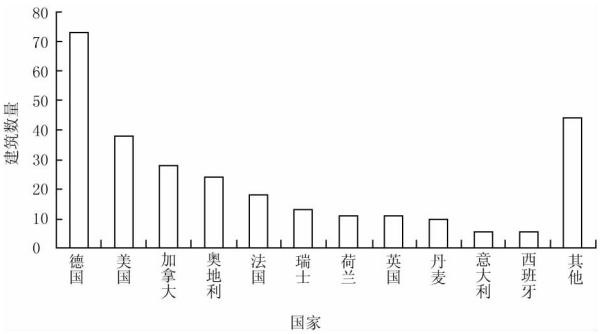

图 2　零能耗建筑数量国家分布

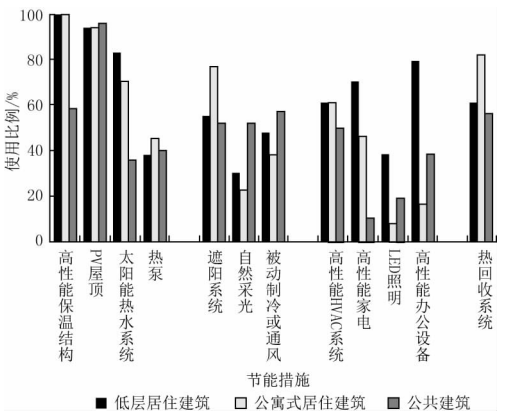

图 3　建筑节能技术使用频率

已经有实测数据的零能耗公共建筑进行研究发现:1)早期零能耗建筑面积普遍较小,目前大型和综合性的建筑案例不断增加,教学/科研楼、办公楼、学校、银行等建筑都可以设计为零能耗建筑。2)建筑物形式、规模、所处地理位置以及其他因素不同,如果不考虑 PV 板的费用,建筑为达到零能耗的增量成本为 3%～18%。3)通过综合性设计方案,充分考虑建筑所在地点和功能,选用高性能的围护结构、高效的暖通系统和设备,达到零能耗建筑难度不大。通常优先考虑通过被动式设计降低建筑能耗,如果必须使用暖通系统,常见的系统为地埋管地源热泵与地板辐射系统联合。美国既有零能耗公共建筑各种节能技术使用比例见图 4。

通过对零能耗示范建筑工程及近期国际上开展的技术经济进行分析,可以总结出实现零能耗建筑的技术措施如下。

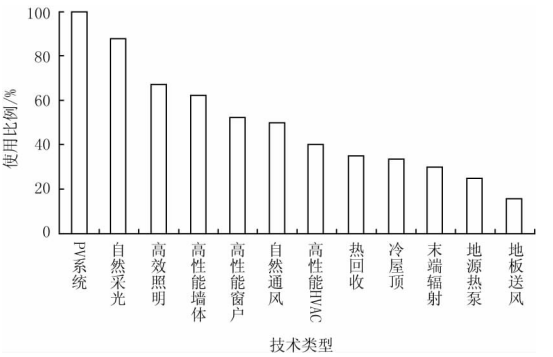

图 4　美国零能耗公共建筑节能技术使用比例

2.1　被动式设计

被动式设计主要通过建筑自身的空间形式分隔、围护结构与构造的设计来实现建筑节能,主要措施为调节建筑体形系数、内外遮阳、自然通风、自然采光等。如法国,典型办公楼宽度为 18 m,但某零能耗办公示范楼宽度为 14 m,这样可以使两侧的办公区域最大限度地使用自然采光和自然通风,根据示范项目检测发现,自然采光和自然通风的建筑其能耗可降低 20%～30%[18]。美国可再生能源国家实验室建设的零能耗办公建筑[17],通过调整建筑体形系数,可以使全部办公区域在全部办公时间使用日光进行照明。在零能耗建筑中,通过被动式设计可以引导日光照明、增加自然通风、辅助室内空气排出室外、蓄热与放热等功能,使建筑减少或无需安装传统的暖通空调系统。

2.2　高性能围护结构

零能耗示范建筑物围护结构保温性能通常高于普通建筑,如德国 2006 年落成的某示范建筑[15],其窗户传热系数为 0.70 W/(m^2·K),外墙传热系数为 0.12 W/(m^2·K),地板传热系数为 0.16 W/(m^2·K),顶棚传热系数为 0.11 W/(m^2·K)。比利时某示范建筑[19]外墙传热系数为 0.18 W/(m^2·K),窗户传热系数为 0.74 W/(m^2·K),地板传热系数为 0.26 W/(m^2·K),顶棚传热系数为 0.1 W/(m^2·K)。国外典型示范建筑围护结构传热系数指标与我国严寒寒冷地区国家标准限值比对见表 2。

表 2　围护结构传热系数对比　　W/(m^2·K)

	中国 JGJ 26—2010《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》[20]	德国《建筑节能条例》ENEV2009[21]	德国被动房标准(Passive House)[22]	德国某示范工程	比利时某示范工程
窗户	1.90～2.50	1.30	0.80	0.70	0.74
外墙	0.45～0.60	0.28	0.15	0.12	0.18
地板		0.35	0.15	0.16	0.26
屋面	0.30～0.45	0.20	0.15	0.11	0.10

除了围护结构性能不断提高，一些专家也对最优窗墙面积比和围护改造模块进行了研究。Persson 研究了窗户面积对低能耗建筑能耗的影响，研究人员按照被动房标准在瑞典哥德堡建造了供暖能耗低于 15 kW·h/(m^2·a)的 20 栋双层居住建筑[23]。通过实测发现，通常情况下，建筑物南向窗户较大，用于吸收太阳辐射热量；北向窗户较小，为了避免建筑热损失。但当建筑物采用被动房标准建造时，其冬季耗热量大幅度减少，窗墙面积比对建筑物冬季能耗影响不大，反而应适当减小南向窗户面积以降低建筑物的夏季供冷能耗。Silva 认为，随着欧盟《建筑能效指令》的不断推进，欧洲大量既有居住建筑的改造将会形成巨大市场[24]，研究人员开发了一种可以直接用于既有建筑围护结构改造使用的预制式围护模块，其传热系数为 0.23 W/(m^2·K)，当使用此预制模块配合其他改造措施及可再生能源使用时，单独居住建筑能耗可降低 83%，多户居住建筑能耗可降低 76%。

2.3 能源系统

零能耗建筑中的能源系统主要有 3 种，第一种是太阳能光电系统或太阳能光电光热一体化系统，基本所有的零能耗建筑都需要使用此技术，光电板通常敷设在建筑物屋顶、侧面，光电板也可以放置在建筑物附近与建筑物连接，如停车场等位置；第二种是小型燃气冷热电联产系统，但使用这种系统需结合已经布置的区域燃气系统；如果不计算燃气能耗和碳排放，此类系统更容易使建筑物达到零能耗；第三种是空气源热泵系统、地源热泵系统、水源热泵系统，这类系统可以同时供冷、供热和生活热水，而且随着各国对此类系统进行大量补贴，使用得也非常广泛。对于零能耗办公建筑，通风系统可以单独设置，匹配高效换热器，可以和夏季自然通风、夜间通风降温、高效吊顶式风扇联合使用。

综合来看，在新型建筑能源系统中，太阳能光电系统的研究最为广泛。Alessandra Scognamiglio 系统总结了 PV 与建筑物围护结构结合的多种方式[25]，并从建筑师的视角出发分析了 BIPV 的优点和不足，研究人员认为，近零能耗建筑是欧洲建筑的未来发展趋势，但在某些气候条件及建筑类型下，仅仅依靠与建筑物一体化的 PV 系统很难满足建筑物的全部能耗需求，还应该引入“景观一体化 PV 系统”(landscape integrated photovoltaics，LIPV)，将可再生能源系统从城市和区域规划的角度引入到建筑设计中，提升建筑物达到零能耗的可能性。Lund 研究了 PV 系统、风电系统在零能耗建筑中使用时由于太阳能和风能波动带来的可再生能源系统计算附加系数问题[26]。Cerón 对 136 个 PV 生产商的 445 组 PV 产品进行了比对研究，产品主要分为预制式 BIPV 和现场安装式 PV 组件，研究人员认为，预制式 BIPV 系统常用于外形比较规则的建筑，70%产品的功率密度在 100～150 W/m^2 之间；现场安装式 PV 组件便于建筑师设计，可以广泛使用在顶棚、立面和景观设计中[27]。虽然 BIPV 系统发展迅速，但市场还需要易于安装、性价比高、可靠性强、可以和更多种类的建筑围护结构一体化的产品。

2.4 经济性分析

Zhu 将拉斯维加斯地区外形相同的一栋零能耗住宅与一栋传统住宅进行了经济技术比较，通过使用 Energy10 和 Equest3.6 分别建模，对建筑的节能性和经济性进行分析，并将结果和实际运行数据进行了比对[28]，发现：1) 回收期最短的节能技术分别为高性能窗户、节能灯、水冷冷凝的空调器和高性能屋顶，其增量成本带来的节能效益的回收期分别为 0.3，0.9，3.5，9.5 年；2) PV 技术的性价比虽然有争议，但从此项目看来回收期约为 15 年，尚可以接受；3) 相变材料与建筑物一体化的回收期过长，不建议采用此技术；4) 性能良好的保温围护结构在冬季可以降低建筑物供暖能耗，但在夏季会起到相反作用，所以针对不同地区，其外墙保温性能对建筑物全年能耗还需具体分析。

Kurnitski 对爱沙尼亚一栋 171 m^2 的双层居住建筑达到近零能耗的经济技术可行性进行了分析。如按照常规技术建造，此建筑全年能耗应为 180 kW·h/(m^2·a)；如果采用更高性能的围护结构和地源热泵技术或者燃气供暖，建筑物全年能耗可以降低到 110 kW·h/(m^2·a)；通过采用 PV 系统，建筑物全年能耗可以降低到 40 kW·h/(m^2·a)[29]；但从经济角度看，此地区的近零能耗建筑并不可行。

2.5 相关研究

除了被动式设计、高性能围护结构、可再生能源系统外，一些研究也集中在天气变化对建筑能耗影响、建筑前期设计能耗模拟工具、建筑能耗预测系统等领域。

Robert 认为全球气候变化剧烈,现阶段设计的建筑物应该考虑未来的天气变化对建筑物能耗影响[30]。研究人员对 1961—1990 年和 1976—2005 年的气象数据进行了分析,对几个典型城市 2020 年和 2050 年的冬夏平均温度、海平面太阳辐射、相对湿度、风速进行了预测,并且使用中长期的数据对一个典型近零能耗双层居住建筑进行了能耗平衡模拟分析。通过研究发现,随着气候变化温度升高,建筑物的全年能耗和 PV 板产能都会逐步增加,但建筑物能源消耗量增加得更快,两者的缺口会逐步增大。Attia 认为,现有的大量建筑能耗模拟工具都是基于建筑物设计方案已经确定的情况下进行计算,但为了达到零能耗建筑,应该在建筑物的概念设计阶段就引入能耗平衡计算工具,这样可以通过建筑能耗的变化调整建筑设计方案[31]。研究人员开发了一个在建筑方案设计阶段使用的可以和 Energy Plus 接口的能耗计算软件,通过选择建筑近似外形、围护结构相关参数、能源系统,对建筑能耗进行初步计算,进而对建筑物设计方案进行调整。

Candanedo 认为,通过合理设计,建筑的供热、供冷、通风、照明等能耗都会大幅度降低,但其相对波动性会随之增大,通过建筑能耗预测系统,可以对建筑供能用能系统、室内环境舒适度、空气质量等信息进行监控,并通过对建筑物历史用能情况进行分析,结合未来短期内的气象条件,对建筑物未来用能需求进行合理预测,协调控制可再生能源系统和传统能源系统的供能用能关系,减少建筑能源系统的热电/电热转换次数,提高使用效率[32],其控制逻辑见图 5。

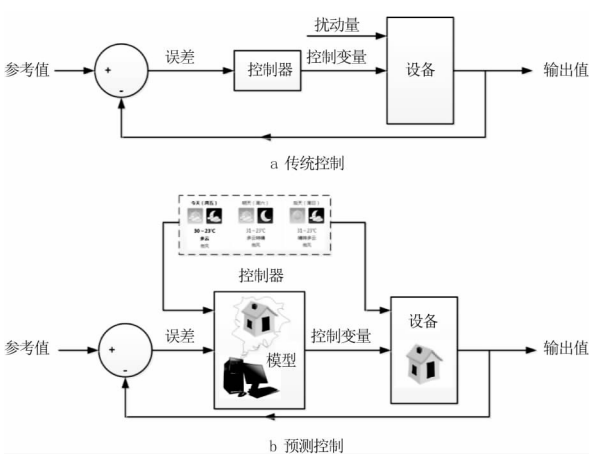

图 5　传统建筑能源系统控制策略与基于天气变化的能耗监管预测策略示意图

3　结论

3.1　在探讨零能耗建筑的定义和技术路线同时,各主要国家都建造了大量工程示范项目,早期示范建筑面积普遍较小,目前大型和综合性的建筑案例不断增加,低层居住建筑、多层居住建筑、教学/科研楼、办公楼、学校、银行等建筑都可以设计为零能耗建筑。示范建筑覆盖了从严寒寒冷气候区到热带气候区的广泛地域,均采用 kW·h/(m^2·a)作为能耗单位对建筑物全年能耗进行平衡计算。

3.2　对现有国际零能耗示范建筑进行汇总分析,研究了各类建筑节能技术和可再生能源建筑应用技术在现有建筑中的使用情况,得出了通过被动式设计、高性能围护结构、高效集成的产能系统与能源系统、建筑能耗预测监管平台等技术联合应用,实现建筑物零能耗的技术措施。由于我国建筑形式与气候特点与发达国家不尽相同,建筑物的能耗需求也差异很大,我国建筑在实现零能耗的过程中还需要针对不同地区不同建筑形式研究其具体技术方式。

3.3　根据建筑物形式、规模、所处地理位置、上网电价以及其他因素,建筑物节能技术的回收期差别很大。PV 板为零能耗建筑必备设施,其增量投资一般可以在寿命期内回收,如果未来上网电价进一步提高,回收期会进一步缩短。根据美国零能耗公共建筑调查,如果不考虑 PV 板的费用,其他建筑节能技术的整体增量成本为 3%～18%。性价比较高的节能方式包括:自然采光、遮阳系统、高性能围护结构、节能灯、热泵空调器、通风热回收、免费供冷以及在建筑建造的过程中预先装设太阳能热水器和太阳能光电系统。

参考文献:

[1]　张时聪.“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

[2]　Danny S P. Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(5):512-520

[3]　Wang Liping. Case study of zero energy house design in UK[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(11): 1215-1222

[4]　Tommerup H. Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006 [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(10):1123-1130

[5]　Bojic M. Toward a positive-net-energy residential

building in Serbian conditions[J]. Applied Energy, 2011, 88(7):2407-2419

[6] Mahdavi A. A performance comparison of passive and low-energy buildings[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(8):1314-1319

[7] Ferrante A. Zero energy balance and zero on-site CO_2 emission housing development in the Mediterranean climate[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 2002-2010

[8] Fong K F. Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong [J]. Applied Energy, 2012, 93():686-694

[9] Marszal A J. Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark[J]. Energy, 2011, 36(9):5600-5609

[10] Morelli M. Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a "nearly-zero" energy building based on experiences from a test apartment [J]. Energy and Buildings, 2012, 54 (:395-406

[11] Cho Dong-Wo. Development of Low/Zero Carbon Green Home[EB/OL]. [2013-7-17]. http://www.kict.re.kr/eng/rsch/build1.asp

[12] Franco M. Environmental design and performance of the ENERPOS building, Reunion island, France[EB/OL]. [2013-7-17]. http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DC-TP12-Garde-2011-06.pdf

[13] Gonçalves H. Solar XXI: A portuguese office building towards net zero-energy building [J]. REHVA Journal, 2012,3():34-40

[14] Werner M. Seattle's bullitt center bills itself as' world's greenest office building[EB/OL]. [2013-7-17]. http://www.pbs.org/newshour/rundown/2013/04/seattles-bullitt-center-opens-today-as-worlds-greenest-office-building.html

[15] Heinze M. Goal: Zero energy building exemplary experience based on the solar estate solarsiedlung freiburg am Schlierberg [J]. Journal of Green Building,2009,4(4): 93-100

[16] Musall E. Net zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects[EB/OL]. [2013-7-17]. http://www.enob.info/fileadmin/media/Projektbilder/EnOB/Thema_Nullenergie/EuroSun_Conference_Graz_2010_Net_Zero_Energy_Solar_Buildingsx.pdf.

[17] New Building Institute. Getting to Zero 2012 Status Update: A First Look at the Costs and Features of Zero Energy Commercial Buildings[EB/OL]. [2013-7-17]. http://newbuildings.org/sites/default/files/GettingtoZeroReport_0.pdf.

[18] Lenoir A. Zero Energy Buildings in France: Overview and Feedback[EB/OL]. [2013-7-17]. http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DC-TP11-Lenoir-2011-06.pdf.

[19] Klein R. A Belgian pilot project for zero energy office buildings[EB/OL]. [2013-7-17]. https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/387179/1/Eurosun+2010_A+belgian+pilot+project+for+zero+energy+office+buildings.pdf.

[20] 中国建筑科学研究院,中国建筑业建筑节能专业委员会,哈尔滨工业大学. JGJ26—2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010

[21] EnEV2009[EB/OL]. [2013-7-1]. http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/

[22] Passive house[EB/OL]. [2013-7-1]. http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_house

[23] Persson M-L. Influence of window size on the energy balance of low energy houses [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(3):181-188

[24] Silva P C P. Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings [J]. Energy and Buildings, 2013, 56():115-125

[25] Scognamiglio A. Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design27th EU PVSEC[C]// John Wiley & Sons, Ltd., 2012

[26] Lund H. Zero energy buildings and mismatch compensation factors [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(7):1646-1654

[27] Cerón I. 'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products[J]. Renewable Energy, 2013, 58():127-133

[28] Zhu L. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house [J]. Energy, 2009, 34(9):1043-1053

[29] Kurnitski J. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11):3279-3288

[30] Robert A. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past[J]. Building and Environment, 2012, 55():150-158

[31] Attia S. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design[J]. Energy and Building, 2012, 49():2-15

[32] Candanedo J A. Strategies for reducting peak demand in net zero energy solar homes[EB/OL]. [2013-7-17]. http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DB-TP5-Candanedo-2011-08.pdf