

## 科技综述

我国建筑耗能状况  
及有效的节能途径清华大学 江 亿<sup>☆</sup>

**摘要** 简要分析了我国建筑能源消耗状况,从用能特点出发,对建筑物和建筑用能途径进行了新的分类,给出各类的现状、问题和节能潜力。在此基础上列出为实现建筑节能所需要的主要技术与产品研究领域和政策研究与保障机制。文中列出的关键技术研究为:基于模拟分析的建筑节能优化设计;新型建筑围护结构材料与部品;通风装置与排风热回收装置;热泵技术;降低输配系统能源消耗的技术;集中空调的温度湿度独立控制技术;建筑自动化系统的节能优化控制;楼宇式燃气驱动的热电冷三联供技术;燃煤燃气联合供热和末端调峰技术;节能灯、节能灯具与控制。有关政策与保障机制的研究问题为:建筑能耗数据的统计系统;住宅能耗标识方法与保障机制;大型公共建筑能耗评估与用能配额制;各种建筑用能装置的能耗标识标准与方法。

**关键词** 建筑节能 围护结构 暖通空调 节能政策

## Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures

By Jiang Yi

**Abstract** Outlines current situation of building energy consumption in China. Makes new classification of buildings based on the energy performance. Points out the energy consumption features and the potentials of energy saving for each type of buildings. According to the potential savings, presents the key technologies to achieve these savings, including energy optimization in building design process, new technologies in building fabrics, ventilators and exhaust heat recovers, heat pumps, technologies to reduce energy consumption in distribution systems, temperature and humidity independent control system, energy saving optimizing control of building automatic systems, building combined power, heating & cooling system (BCHP), new type of configuration of district heating system as well as high efficiency lightings. Policies are also important to ensure these technologies to be accepted widely. Relative studies for policy making and for policy operation should also be carried on. Lists four projects, including building energy consumption model and the data collection system, energy label system for residential buildings, energy estimation for commercial buildings and energy label system for home appliances.

**Keywords** building energy efficiency, envelope, HVAC, energy saving policy

Tsinghua University, Beijing, China

### 1 我国建筑能耗状况和节能潜力

我国目前城镇民用建筑(非工业建筑)运行耗电占我国总发电量的22%~24%,北方地区城镇供暖消耗的燃煤占我国非发电用煤量的15%~18%。(建筑消耗的能源占全国商品能源的21%~24%)。这些数值都仅为建筑运行所消耗的能源,不包括建筑材料制造用能及建筑施工过程能耗。目前发达国家的建筑能耗一般占总能耗的1/3左右。

<sup>☆</sup>江亿,男,1952年4月生,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士

100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系  
(010) 62786871

E-mail: jiangyi@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2005-02-22

修回日期:2005-04-28

随着我国城市化程度的不断提高, 第三产业占 GDP 比例的加大以及制造业结构的调整, 建筑能耗的比例将继续提高, 最终接近发达国家目前的 33% 的水平。根据近 30 年来能源界的研究和实践, 目前普遍认为建筑节能是各种节能途径中潜力最大、最为直接有效的方式, 是缓解能源紧张、解决社会经济发展与能源供应不足这对矛盾的最有效措施之一。

我国城镇民用建筑能源消耗按其性质可分为如下几类: a) 北方地区供暖能耗, 目前城镇民用建筑供暖能耗按标准煤计平均约为  $20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{a}^{[1-2]}$ , 城镇民用建筑供暖面积约为 65 亿  $\text{m}^2$ , 此项能耗约占民用建筑总能耗的 56% ~ 58%; b) 除供暖外的住宅能耗(照明、炊事、生活热水、家电、空调), 折合用电量为  $10 \sim 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})^{[3]}$ , 目前城镇住宅总面积接近 100 亿  $\text{m}^2$ , 约占民用建筑总能耗的 18% ~ 20%; c) 除供暖外的一般性非住宅民用建筑(办公室、中小型商店、学校等)能耗, 主要是照明、空调和办公室电器等, 年用电量在  $20 \sim 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间, 约占民用建筑总能耗的 14% ~ 16%; d) 大型公共建筑(高档写字楼、星级酒店、大型购物中心等)能耗, 此部分建筑总面积不足民用建筑总面积的 5%, 但单位面积年用电量高达  $100 \sim 300 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})^{[4]}$ , 因此总用电量占民用建筑总用电量的 30% 以上, 此部分建筑能耗占民用建筑总能耗的 12% ~ 14%, 是非常值得关注的部分。上述分析之所以把供暖能耗分出是因为此部分能耗以直接燃煤和热电联产之排热为主, 而其他部分能耗则以用电为主; 之所以把非住宅民用建筑分为一般(c)与大型(d)是因为这两类建筑的单位面积用电量差别巨大。

目前我国正处在城市化高速发展的过程中。为适应城镇人口飞速增长的需求和继续改善人民生活水平的需要, 在 2020 年前我国每年城镇新建建筑的总量将持续保持在 10 亿  $\text{m}^2/\text{a}$  左右, 到 2020 年新增城镇民用建筑面积将为  $100 \sim 150 \text{ 亿 m}^2$ 。由于人民生活水平提高, 供暖需求线不断南移, 新建建筑中将有 70 亿  $\text{m}^2$  以上需要供暖, 10 亿  $\text{m}^2$  左右为大型公建(d)类, 按照目前建筑能耗水平, 则需要增加的用于供暖的能量按标准煤计达 1.4 亿 t/a, 需增加的用电量达 4 000 亿 ~ 4 500 亿  $\text{kWh/a}$ 。这将成为对我国能源供应的巨大压力。

在实施建筑节能标准之前建造的建筑, 冬季供暖平均热指标在  $30 \sim 50 \text{ W/m}^2$ , 为北欧相同气候条件下建筑供暖能耗的 2 ~ 3 倍。新建建筑通过改进建筑设计、加强围护结构保温和有效利用太阳能, 可使建筑供暖需热量降低至目前的 1/2 甚至 1/3, 供暖标准煤耗量可仅为  $6 \sim 7 \text{ kg/m}^2$ 。目前北方城镇建筑近 60% 采用不同规模的集中供热系统供热。由于调节不当导致部分建筑过热、开窗散热造成的热量浪费平均为供热量的 30% 以上。部分小型燃煤锅炉效率低下也是造成能耗过高的原因之一。通过更换供热方

式、改善管网系统的调节、提高热源效率这三方面的改进, 现有建筑的供暖能耗也可以在目前水平上减低 30%。这样, 对新建建筑全面采用节能措施, 对现行的供热系统进行节能改造, 可以使到 2020 年实现这些新增建筑供暖后, 我国北方地区建筑供暖能耗总量与目前相同, 大大缓解届时对能源供应的压力。

除供暖外, 住宅能耗中的用电量为  $10 \sim 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 随生活水平的提高目前呈上升趋势; 生活热水能耗在大城市中也逐渐加大。推广节能灯和节能家电对降低住宅电耗有重要作用; 改进建筑设计、降低夏季空调能耗, 也可以使住宅电耗减少  $3 \sim 8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。及时开发和推广高效的家用生活热水装置, 可避免由于生活热水需要量的不断增长所导致的住宅能耗新的增加, 对现有住宅的照明和用电设备实行节能改造, 对新建住宅从建筑形式、通风、遮阳等方面全方位采取措施, 可以使得在增加 100 亿  $\text{m}^2$  住宅后, 除供暖外的住宅能耗总量仅在目前基础上增加 50%, 维持在 2 000 亿  $\text{kWh/a}$  内。

一般性非住宅民用建筑(c)的能源消耗性质接近住宅, 其照明和电器耗电更大, 但炊事和生活热水能耗要小。改善建筑设计可降低空调和照明能耗, 推广节能灯具及其他用电设备可减少电耗, 这两项措施应能使此类建筑能耗降低 30% ~ 40%, 在新增的此类建筑中采取有效措施改善自然采光, 减少空调能耗, 推广诸如液晶显示器这样的节能电器, 有可能使新建一般性非住宅建筑的单位面积能耗降为目前水平的一半。这样有可能在新增 60% ~ 70% 此类建筑后, 这一类建筑总能耗的增加不超过 10%。

值得注意的是大型公共建筑(d)。此类建筑目前仅占城镇总建筑面积的 5% ~ 6%, 但其用电量为  $100 \sim 300 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 为住宅建筑用电量的 10 倍以上(不包括供暖)。在我国大型和特大型城市, 这类建筑的总耗电量大于当地住宅的总电耗。“九五”到“十五”期间我国城市建设的重点是住宅建设, 但目前已逐渐转向此类大型公共建筑, 这将导致建筑用电量的急剧增加, 因此必须采取有效措施, 抑制这部分能耗的增加。否则至 2020 年仅新建的大型公共建筑用电量就会达到 2 000 亿  $\text{kWh/a}$ 。此类建筑中, 空调用电占 50% ~ 60%, 照明用电占 25% ~ 35%, 其余为电梯和电气设备用电。与发达国家相比, 我国此类建筑的平均能耗值高于日本水平, 与美国的平均值大体接近。然而据调查, 我国同一地区同一性质的此类建筑, 电耗差别最大可达 50%。因此对落后者来说, 也有很大的节能潜力。在此方面, 我们决不能照搬北美或日本的办法, 否则就会带来电力供应的巨大问题。必须探索新的更有效的大型公共建筑节能途径。研究表明, 当在建筑、空调、照明等方面采用先进技术, 产生创新性突破时, 对于新建大型公共建筑也可使电耗降到目前水平的 40% 以下, 而如对空调系统、照明等采取全面的改进措施, 现有建筑的电耗也有可能降低 30%

~40%。这样,可以在大型公共建筑增加150%后,总的用电量仅在目前的水平上增加20%。

综上所述,当没有采取有效的建筑节能措施,基本维持目前建筑能耗水平时,与目前能耗总量相比,到2020年我国需要新增供暖用煤(按标准煤计)1.4亿t/a,新增建筑用电4000亿~4500亿kWh/a。而采取有效的节能措施后,有可能在同样的新增建筑量的条件下,基本不增加供暖煤耗,建筑用电总量仅增加1100亿~1300亿kWh/a。所节约的燃煤量约为我国目前煤炭总产量的10%,所节约的电力约为三峡电站全面建成后年发电总量的4倍。因此建筑节能应是解决我国经济和社会发展与能源供应不足这一矛盾的最重要的措施。

按照前述分析,我国建筑节能的重点应为:建筑围护结构的节能、建筑供暖系统的节能、灯具和其他电器效率的提高、新建大型公共建筑的节能、既有大型公共建筑的节能改造。上述诸项对实现前述建筑节能的目标的贡献大致分别为:30%,30%,15%,15%,10%。

要实现上述目标需要技术创新、技术推广和政策保障机制三方面工作,本文将以技术创新为重点,同时简单介绍技术推广和相关的政策机制方面需要开展的工作。

## 2 建筑节能可能的技术创新和我国应重点发展的领域

### 2.1 优化建筑设计

建筑造型及围护结构形式对建筑物性能有决定性影响。直接的影响包括建筑物与外环境的换热量、自然通风状况和自然采光水平等。而这三方面涉及的内容将构成70%以上的建筑供暖通风空调能耗。不同的建筑设计形式会造成能耗的巨大差别。然而建筑物是复杂系统,各方面因素相互影响,很难简单地确定建筑设计的优劣。例如加大外窗面积可改善自然采光,在冬季还可多获得太阳热量,但在冬季的夜间却会增大热量消耗,同时还会在夏季由于太阳辐射从窗户进入使空调能耗增加。这就需要利用动态热模拟技术对不同的方案进行详细的模拟预测和比较。科技部中美合作项目低能耗示范建筑在建筑设计阶段对十余个不同的方案进行了详细的模拟计算比较,从而使最终选定的建筑方案比原方案节能30%以上。为实现这种模拟优化分析,发达国家从上世纪70年代第一次能源危机开始,就投入大量经费,开发出多个建筑能耗模拟预测和优化软件,并将其作为推广建筑节能的最有效技术措施。目前在各国的建筑节能设计导则或规范中,都要求设计者必须进行动态模拟预测与优化。

美国自上世纪70年代起持续开发的能耗模拟软件DOE-2是北美应用最广泛的软件<sup>[9]</sup>,也对美国建筑节能的推动起到一定的作用。但近20多年的应用陆续反映出的问题使DOE-2很难进一步完善以适应各种新出现的问题。因此自1997年开发者已停止对DOE-2的技术支持,美国能源部组织多个部门共同开发新的建筑能耗模拟软件

Energy Plus<sup>[6]</sup>,以全面替代DOE-2。目前此工作仍在进行中。西欧通过近30年的努力,各国都形成了各自的建筑能耗模拟软件,并将其作为建筑节能设计与节能分析的基本工具,写入相关的建筑节能标准或规范中。如英国的ESP<sup>[7]</sup>,荷兰的VA114等。日本也自上世纪70年代开始,逐渐完成HASP软件的开发,成为日本建筑节能标准的实施工具<sup>[8]</sup>。但近年来由于HASP软件本身和其开发维护机制的问题,使HASP不能跟上日益发展的建筑节能分析的需要,一些研究者开始把目光投向我国的建筑能耗模拟软件DeST<sup>[9-10]</sup>。2004年,日本包括名古屋大学、三菱重工、大金等在内的几所名校和企业与清华大学签订协议,使用和推广DeST软件,并成立日本DeST研发中心,根据日本的具体情况对这一软件进行进一步开发和本土化。

我国自上世纪80年代初以来一直没有间断这方面的研究。目前美国Energy Plus软件所用的建筑热模拟方法State Space法就由清华大学在1982年最早提出<sup>[11]</sup>。这一方法也是我国全部自主开发的建筑能耗模拟软件DeST的核心算法。DeST软件历经15年的开发推广,目前已发展为完善的建筑节能模拟分析软件系列。目前已完成针对住宅能耗分析与优化设计的DeST-h,针对住宅能耗评估的DeST-e,针对大型公共建筑设计及空调系统优化分析的DeST-c,以及针对大型公共建筑能耗评估的DeST-ce四个版本。在上海、广州、北京和日本名古屋都成立了DeST中心,并先后完成了1000万m<sup>2</sup>以上的建筑的模拟分析,其中包括国家大剧院、首都机场改扩建、国家主体育馆(鸟巢)、国家游泳中心(水立方)、深圳会展中心等几十个国家重大项目,对我国建筑节能设计已开始起作用<sup>[12]</sup>。为了使建筑能耗模拟分析软件能够真正发挥作用,还必须在全国各地区的供建筑模拟分析用逐时气象数据。长期以来这也是影响建筑模拟分析全面应用的制约因素。国家气象信息中心与清华大学合作,已完成了包括全国270个城镇和地区的基于地面观测数据的建筑热分析用逐时气象数据,并正式出版发行<sup>[13]</sup>。这也解除了长期困扰建筑能耗模拟分析方法全面应用的障碍。

目前的问题是如何进一步发展推广DeST软件,将其与国家的各个建筑节能规范与标准相结合,以其作为工具,推动建筑节能标准的全面落实。并开展基于这一模拟分析工具的建筑节能优化设计方法研究,同时不断完善这一工具,逐渐发展出完整的建筑节能优化方法,在建筑设计和改造中全面推广。

### 2.2 新型建筑围护结构材料和部品

开发新的建筑围护结构部品,以更好地满足保温、隔热、透光、通风等各种需求,甚至可根据变化了的外界条件随时改变其物理性能,达到维护室内良好的物理环境同时降低能源消耗的目的。这是实现建筑节能的基础技术和必需产品。主要涉及的产品有:外墙保温和隔热、屋顶保温与

隔热、热物理性能优异的外窗和玻璃幕墙、智能外遮阳装置以及基于相变材料的蓄热型围护结构和基于高分子吸湿材料的调湿型内饰面材料。

自上世纪 90 年代起,我国自主研发和从国外引进消化了多种外墙和屋面保温隔热技术。尤其是多种外墙外保温技术、外墙外挂可通风装饰板的隔热保温技术以及通风遮阳型屋面技术等,都获得巨大成功。采用外墙外保温技术,很好地解决了墙角和结构搭接点的冷桥问题,可以获得非常好的保温效果。其需要进一步解决的问题是提高质量、延长寿命、降低造价以及怎样同时满足建筑防火要求。外墙外铺轻钢龙骨,其上外挂装饰板,装饰板与外墙主体间形成通风通道,可以在夏季通过自然通风排除太阳辐射热量,大幅度改善室内热环境。冬季阻断此通风通道,又可以使其成为保温空气夹层,同时充分吸收照在外墙表面的太阳辐射热。这是通过调节使围护结构性能能够满足冬夏不同需求的一个很好的实例<sup>[14]</sup>。屋顶遮阳、隔热和通风散热的一些技术,也是这种思路的体现<sup>[15]</sup>。此方面有待深入的工作就是如何提高质量、降低成本,以及更大范围地推广。

随着建筑形式的现代化,外窗和玻璃幕墙等透光型外围护结构占外表面的比例越来越高。由于其在保温、隔热、采光和吸收太阳光等方面的多重功能,使其成为影响建筑本体能源消耗的最主要因素。发达国家自上世纪 90 年代开始十分重视外窗与玻璃幕墙的节能型新技术新产品的开发与推广。可有效降低长波辐射增强保温的低辐射镀膜玻璃(Low-e)与玻璃夹层惰性气体的隔热技术以及断热窗框断热式玻璃幕墙等技术使外窗和玻璃幕墙的传热系数从传统的单玻外窗的  $5.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  降低到  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  以下,从而使透光型外围护结构的热损失接近非透光型外围护结构,但却具有良好的自然采光性能和景观效果<sup>[16]</sup>。发达国家把推广此类产品作为推广建筑节能的重要内容,10 年来在各类建筑中实现广泛应用。一些国家已将其列入建筑节能标准中,强制执行。为减少夏季透过外窗和玻璃幕墙的太阳辐射,而在冬季又适当地接收太阳辐射使其成为建筑供暖热源,采用可调节外遮阳装置和玻璃夹层中间设置可调节遮阳装置并进行玻璃夹层间的有组织通风。这样在冬季可使足够的阳光通过窗户和玻璃幕墙进入到室内,减少供暖用能,甚至实现“零能供暖”;而夏季则通过遮阳大幅度减少直接进入室内的太阳辐射热,通过夹层的通风有效排除被置于夹层中的遮阳板吸收的太阳辐射热量,从而大大减少空调制冷负荷。这种可调节装置还可根据室内的采光要求进行调节,避免室内眩光,保证室内足够的天然采光。采用这些新技术手段,可以使大型玻璃幕墙这种冬冷夏热的高能耗围护结构形式变为能耗低于通常的保温外墙,又具有良好的采光与景观效果的现代节能建筑形式<sup>[17]</sup>。值得注意的是目前大量的大型公共建筑在建筑形式上采用西方大型玻璃幕墙,但又都由于投资问题和

空间占用问题,把低辐射、遮阳、通风措施取消,这就变为高能耗建筑,单位外表面面积的能耗可为常规外墙的 3~4 倍。这一事实迫使我们必须加紧此方面研究与技术推广,推出国产的低成本高性能外窗与玻璃幕墙产品,从积极的角度减少或避免这种建筑外表面的高能耗做法。遮阳装置的任务既然是阻止阳光进入,那么就可以在其上进一步发展利用阳光的技术。发达国家开始尝试在外遮阳板或外层玻璃表面设置太阳能电池,将其遮挡住的太阳能转换为电能<sup>[18]</sup>。目前的太阳能电池的成本偏高,还难以在其寿命期内收回成本。随进一步的技术突破,在 10 年内这种太阳能电池应具有市场竞争力。

此外就是利用建筑围护结构蓄存热量,夏季夜间室外空气通过楼板空洞通风使楼板冷却,白天用冷却了的楼板吸收室内热量。在冬季则设法利用围护结构吸收和蓄存白天进入室内的太阳辐射热避免室温过高,在夜间释放这些热量,以减少室温的下降。在围护结构内配置适宜的相变材料,则可以产生更好的蓄能效果。

通过上述各项技术的有机结合,在某些地区(非潮湿地区)可以建造出所谓“零能耗”建筑,不消耗常规能源就可以维持室内的舒适环境,并通过太阳能解决夜间照明。

开发和推广上述先进技术,可使我国各类建筑的供暖能耗降低到冬季平均  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  的水平,仅为目前供暖能耗的  $1/3$ ,空调能耗也可以显著降低。因此我国建筑材料与部件的节能应从以外墙为重点迅速转向以提高外窗和玻璃幕墙的性能为重点。秦皇岛某玻璃厂 2003 年底与美国合作,完成了国内第 1 条、世界第 7 条玻璃在线镀膜生产线,并制造出多种高性能 Low-e 玻璃产品(具有自主知识产权),为我国高性能透光型外围护结构的开发迈出关键性一步。北京某公司采用自主技术的真空夹层玻璃生产线也在 2004 年投产,其真空玻璃的传热系数达到  $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,处于世界领先水平。上面提及的秦皇岛某玻璃厂 2004 年研制成功的玻璃钢窗框外窗,与 Low-e 玻璃配合,整体传热系数达到  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,也达到世界前列。但总体说来,我国目前市场上可见到的各种外遮阳技术、玻璃夹层通风与遮阳的双层皮技术,以及集自然通风、遮阳、隔热、太阳能发电于一体的零能耗外窗技术与产品,距国外还有一定差距。

夏季空调的大量能耗用于室内的湿度调节,而上述各项技术对湿度控制并无明显作用。采用一些吸湿性高分子材料,可以在空气湿度高的时候吸收空气中的水分,使其转换为结晶水而封存在材料中,在室内空气相对湿度较低时又重新把水分释放回空气中。这样可维持室内相对湿度在 40%~75% 的舒适范围内,而不消耗常规能源。目前日本、欧洲都开展了相关研究,国内的研究开发也接近同等水平<sup>[19]</sup>。这方面的突破将对改善住宅和一般性非住宅民用建筑的夏季室内环境,降低空调能耗甚至在某些场合取消

传统空调,起重大作用。

此方向研究对降低各类民用建筑能耗均有显著作用。尤其对降低供暖能耗和减少住宅(b))与一般性非住宅民用建筑(c))能耗起重要作用。

### 2.3 通风装置与排风热回收装置

随着外窗的气密性不断提高,关闭外窗后所能产生的室内外换气量已不能满足室内空气质量的要求。因此北方地区居民就不再像几十年前那样,在冬季糊窗缝,而是每天都要开窗换气。据调查,70%以上居住在新建住宅中的北京居民冬季每天都要开窗通风。然而目前大多数外窗都无法控制开窗通风量,开启一扇窗所导致的通风换气量远大于维持室内空气质量所要求的换气量。这就造成冬季供暖的热损失。对于采取了保温措施的新建住宅和新建一般性非住宅建筑,由于建筑围护结构保温好,开窗后的热量消耗是不开窗时的2~3倍,成为冬季供暖主要的热负荷部分。按照室内卫生要求,在供暖时适量换气,而不是无控制地开窗,可以在保证室内空气质量的前提下,使这种保温好的新建建筑供暖能耗减少一半以上。在欧洲就非常重视室内的受控通风。可在窗台下设专门的可调式通风窗,可采用上翻式外窗调节通风量,还可在外窗上专门开设用于通风的小窗。研究和开发这种产品,并在建筑设计规范中强制要求设置这种通风手段,可显著减少过量通风换气导致的能耗。

即使是适量通风,室内外通风形成的热量或冷量(夏季空调时)损失,对保温较好的建筑,也成为建筑供暖空调能耗的主要部分。对于一面外墙宽4m的一间20m<sup>2</sup>房间,如果外墙外窗平均传热系数为1W/(m<sup>2</sup>·K),则室内1h<sup>-1</sup>换气导致的热损失为外围护结构热损失的1.6倍。实际上,新建节能住宅与新建节能型一般性非住宅建筑,1h<sup>-1</sup>换气时的热损失往往可达到外围护结构热损失的两倍以上。此时,通过专门装置有组织地进行通风换气,同时在需要的时候有效地回收排风中的热量或冷量,对降低这类建筑的能耗就具有重要意义。显热热回收装置回收效率达到70%时,就可以使供暖能耗降低40%~50%。

由于以前我国建筑本身的保温隔热性能较差,通风问题的重要性就远没有欧洲突出,因此与欧洲相比在通风控制与排风热回收方面有很大差距。目前随着外围护结构保温性能的不断改进,通风能耗高的问题就越来越显现。因此需要积极开展相关的研究,进行建筑设计规范与产品标准的制定,以及产品的开发与推广。

就排风热回收而言,国内目前已研制成功蜂窝状铝膜式、热管式等显热回收器,以及可同时解决夏季全热回收的纸质和膜式透湿型全热回收器。怎样进一步提高这些产品的性能和质量,并且使其易于与住宅建筑和一般办公建筑结合,便于安装使用,是今后需大力开展的工作。

### 2.4 热泵技术

通过热泵技术从低温热源中取热,提升其温度后,为建筑物提供热量,解决供暖和生活热水的热量供应,是直接燃烧一次能源而获取热量的主要替代方式。随着夏季空调的广泛使用,我国用电高峰已逐渐从冬季转到夏季,从而使冬季电力供应能力过剩。需要增加冬季用电负荷,减少冬夏电负荷差,这是近年来各地推行电供暖的实质原因。直接电热相当于燃煤供热效率为30%,无论如何不应推广。采用热泵技术,只要其电热转换效率大于3,就应是最节省一次能源的产热方式。因此当推广冬季用电供暖时,应该着重推广热泵方式。由于热泵在夏天又可用作空调制冷,随着空调的大范围应用,就使得采用热泵并不比直接燃烧燃料方式增加一次投资。

热泵方式的主要问题是哪种低温热源中取热,怎样使低温热源能够提供足够的热量,同时热泵又能高效提取。依低温热源不同,主要有如下形式:

热泵型家庭热水机组。从室外或室内空气中提取热量制备生活热水,可使电热转换效率达3~4。日本推出采用二氧化碳为工质的热泵型热水机,并开始大范围推广<sup>[20]</sup>。当没有余热、废热可利用,并可承担较高的初投资时,这种方式应是提供家庭生活热水的最佳方式。我国应尽快开展这方面的产品开发。

空气源热泵。冬季从室外空气中提取热量为建筑供热,应是住宅和其他小规模民用建筑供热的最佳方式。在我国华北大部分地区,这种方式冬季平均电热转换率有可能达到3以上。目前的技术难点在于外温为0℃左右时蒸发器的结霜处理和为适应外温在5~10℃范围内的变化,需要压缩机在很大的压缩比范围内都具有良好的性能。国内外近10年来的大量研究攻关都集中在这两个难点上。前者通过优化的化霜循环、智能化霜控制、智能化探测结霜厚度传感器、特殊的空气换热器形式设计以及不结霜表面材料的研制等,正在陆续得到解决。后者则通过改变热泵循环方式,如中间补气、压缩机串联和并联转换等来尝试解决。然而对后者革命性的突破可能有待新的压缩机形式的出现。但这一定会在今后10~20年内发生。目前我国此领域的技术水平与研究现状与国外接近。值得注意的另一技术方向是采用大型离心式压缩机配盐水冷却塔的热泵方式。通过同时调整压缩机转速和压缩机入口导向叶片,可以使这种压缩机在较大的压缩比范围内都具有较高的效率,而采用盐水冷却塔则避免了蒸发器结霜。目前日本正在研发的样机的全冬季平均电热转换率已接近4。这将成为大型建筑或区域供热供冷的最佳冷热源方案。

地下水水源热泵。即从地下水抽水经过热泵提取其热量后再把水回灌到地下。这种方式用于建筑供热,其电热转换率可达3~4。这种技术在国内外都已广泛推广,但取水和回灌都受到地下水地质条件的限制,并非处处适用。研究更有效的取水和回灌方式,可能会使此技术的可应用

范围进一步扩大。增大水侧供回水温差,把目前普遍使用的5 K温差增加到10~12 K,可使需要的地下水循环量减少一半以上,从而可扩大这种方式的使用范围。要在热泵蒸发器水侧出现这样的大温差而又不降低热泵效率,需要采用串级的双蒸发温度等方式,或寻找新的混合制冷工质。

污水水源热泵。直接从城市污水中提取热量,是污水综合利用的组成部分。据测算城市污水全部充当热源可解决城市近20%建筑的供暖。目前的方式是从处理后的中水中提取热量,这就大大限制了其应用范围,并且不能充分利用污水中的热能。哈尔滨工业大学最近研制成功污水换热器<sup>[21]</sup>,可直接大规模从污水中提取热量,并在哈尔滨实现了高效的污水热泵供热。这应是污水热源利用的很好开端。如果进一步完善和大规模推广,应能成为我国北方大型城市建筑供暖的主要构成方式之一。

地下埋管式土壤源热泵。通过在地下垂直地或水平地埋入塑料管,通入循环工质,成为循环工质与土壤间的换热器。在冬季通过这一换热器从地下取热,成为热泵的热源;在夏季从地下取冷,成为热泵的冷源。这就实现了冬存夏用或夏存冬用。在华北、东北地区,由于住宅和一般性非住宅建筑的冬季用热量远大于夏季用冷量,这种方式使地下平衡温度低于当地年平均温度。这就使得夏季换热器出口温度可低于15℃,从而成为可直接消除夏季显热负荷的冷源,而不需通过热泵制冷。只要另外有有效的除湿方式,就可高效地解决夏季空调问题。目前这种方式的问题是初投资较高,并且由于需要大量从地下取热、储热,仅适宜用于低密度建筑。与建筑基础有机结合,从而进一步降低初投资;提高换热管与土壤间的传热能力,以减少工质与土壤间温差,提高热泵效率;这两点是地下埋管式热泵要解决的主要问题。此方面的突破将使其有可能成为低密度建筑供暖空调冷热源的主要方式。

如前分析,供暖用能占我国建筑能耗的50%以上,而热泵技术提供供暖热源比燃料直接燃烧要节能20%以上,同时对使用地来说,又是最清洁的供暖热源。通过热泵技术如能解决1/4城镇建筑的供暖,将大大缓解目前供暖与能源消耗、供暖与环境保护间的矛盾,电力负荷冬季与夏季的矛盾,实现高效的电驱动供暖。

## 2.5 降低输配系统能源消耗的技术

与住宅和一般性非住宅建筑不同,大型公共建筑供暖空调电力消耗中,60%~70%由输送和分配冷量热量的风机水泵所消耗。这是导致此类建筑能源消耗过高的主要原因之一。对大规模集中供热系统,负责输配热量的各级水泵的能源消耗也在供热系统运行成本中占很大比例。目前建筑系统中风机水泵的电力消耗(包括集中供热系统水泵电耗)占我国城镇建筑运行电耗的10%以上,而这部分电耗有可能降低60%~70%,因此也应是建筑节能的重点,尤其是大型公共建筑节能的主要途径。

目前承担输配任务的风机水泵能耗过高的主要原因是:

a) 绝大多数风机水泵的实测运行效率仅为30%~50%,而这些风机水泵的最高效率点效率都能达到70%~85%。原因是设计和设备选择时无准确的设计与选择方法,使风机水泵性能与管网不匹配。

b) 为了实现热量冷量的分配,依赖于大量的风阀水阀来实现调节。这些风阀水阀造成的压降一般都占风机水泵总扬程的一半以上。这就表明50%以上的风机水泵电耗消耗在风阀水阀上,而不是用来克服管道阻力。

c) 大多数工况下建筑内输送热量冷量的循环水泵的供回水温差小于设计的5 K温差,有时甚至仅为1~2 K。如果实行变水量,使温差在4 K以上,可使循环水量减少一半,水泵电耗至少可减少一半。

对已有建筑中的系统,主要是提高风机水泵效率和变流量运行。仅靠使用变频器并不能解决效率过低的问题。需要研究现场检测,再根据检测结果改造或更换风机水泵的方法。如果能够通过加装专门的入口导向叶片,通过调整入口导向叶片来改变这些离心机的高效工作点,则将是创新性突破,会产生巨大的节能效果。通过这种改变工作点的方法使效率提高,增加变频器以高效地变流量再配合有效的控制调节算法,可使现有系统中输配能耗降低50%以上。

对于新建建筑的能量输配系统,则应从系统形式的彻底改革上大幅度降低输配系统能耗。用水作媒介输送热量冷量所消耗的能量一般仅为用空气作媒介的1/10,因此尽可能用水作媒介,避免用空气仅为输送冷热量而循环,这就要求重新审核各种空调系统形式。

传统的方式是依靠集中的风机水泵按照最大要求提供扬程,各末端再由阀门消耗其多余部分,这就使得一半以上的风机水泵电耗消耗在阀门上。目前变频器的质量已很可靠,且成本足够低。如果采用分布式风机水泵系统,基于变频风机、变频水泵对流量进行调节的方式,不装调节阀门,在末端靠风机水泵补充不足的扬程,而不是靠阀门消耗多余的扬程,就可以完全避免阀门调节的能耗<sup>[22]</sup>。这样做需要研究开发高效的低扬程、恒流量特性而不是恒压力特性的泵,以及把变频器、电机和控制器与水泵本体集成到一起的变频调节泵。当然还需要在输配系统结构形式上有重大改革与创新。此方面的突破可使输配系统的能耗从目前水平上降低65%~75%。

对于集中供热系统也可采用这种方式减少阀门能耗,改善调节效果。这种方式还可降低集中供热系统管道的压力,减少各处管道压力的差别,从而降低管网造价,提高管网寿命<sup>[23]</sup>。

对于以水为媒介的输配系统,还可进一步通过在水中添加减阻剂来降低阻力和添加相变材料提高其携带热量能力来降低能耗。国内外的研究都表明采用某些减阻剂可使

管道阻力降低到 20%，这将极大地降低输配系统能耗<sup>[24]</sup>。但需进一步研究解决如何提高这种方式的稳定性，消除其对传热过程的不利影响，并降低其造价，避免减阻剂本身可能造成的环境污染等技术问题。将相变温度在系统工作范围内的相变材料微粒掺混于水中，制成所谓“功能型热流体”，可以通过相变吸收和释放热量，从而可在小温差下输送大量热量。这就可以大大减少循环水量，从而使输送能耗降低到原来的 25%~35%。目前我国多所高校正在开展减阻剂的研究，并初见成效；清华大学已研制成基于相变材料的功能型热流体<sup>[25]</sup>，大量的传热和阻力特性试验表明其具有良好的动力特性和传热特性。但最终在工程中全面推广还要解决稳定性问题、成本问题等许多难点。

此方向的工作主要针对降低大型公共建筑(d)能耗。全面实现上述各项技术措施可使新建大型公共建筑供暖空调的输配系统用电量降低 90%，相当于空调系统总的用电量降低 50%以上。对现有大型公共建筑的改造，也可在不改变其系统形式的前提下，使输配系统能耗降低一半，相当于空调总电耗降低 30%。

## 2.6 温度湿度独立控制的空调系统

目前集中空调都使用出口温度为 5~7℃或更低的冷水作为冷媒，对空气进行处理，这是因为空气除湿的需要。而如果仅为了降温，采用出口温度为 18~20℃的冷源都可满足要求。然而一般除湿负荷仅占空调负荷的 30%~50%。结果大量的显热负荷也用这样的低温冷媒处理，就导致冷源效率低下。近年来此领域的一个重要方向就是采用温度湿度独立控制的空调方式。将室外新风除湿后送入室内，可用于消除室内产湿，并满足新鲜空气要求，而用独立的水系统使 18~20℃的冷水循环，通过辐射或对流型末端来消除室内显热。这一方面可避免采用冷凝式除湿时为了调节相对湿度进行再热而导致的冷热抵消，还可用高温冷源吸收显热，使冷源效率大幅度提高。同时这种方式还可有效改善室内空气质量，因此被普遍认为是未来的主流空调方式。目前世界各国都积极开展大量的相关研究和工程尝试。

这一方式的主要难点是新风的高效大幅度除湿。这也是国内外研究的热点。我国华南理工大学近年来研究开发的除湿转轮有多项创新，可以进一步发展成为湿度独立控制系统的新风处理方式<sup>[26]</sup>。清华大学近年研究的溶液除湿方式，利用低湿热源(60~70℃)驱动，可实现较高的能源利用率，并能同时实现排风的全热回收。与热泵技术结合，还研究出带有排风热回收的溶液除湿型新风机组，COP可到 8 以上<sup>[27]</sup>。目前这一技术也已用于实际的温度湿度独立控制的空调系统。与世界上近百个转轮除湿与溶液除湿研究小组的目前研究进展相比，国内这两项空气除湿技术都处于领先的或先进的地位。进一步完善这两项技术，并使其产品化，将对改变集中空调现有形式并大幅度降低

集中空调能耗起重大作用。

这种新的空调方式的实现还包括对现有末端方式的革新。采用高温冷水(18~20℃)吸收显热，应使用不同于目前方式的末端装置。目前国外已研发出多种辐射型末端<sup>[28]</sup>和干式风机盘管<sup>[28]</sup>，以及自然对流型冷却器等，国内也需要相应地跟踪或开发新的高效的显热型末端装置。

这种方式的新风送风只承担除湿、排 CO<sub>2</sub>、提供新鲜空气的任务，风量远低于目前空调的送风量。此时，气流组织方式应使新鲜空气尽可能直接送到室内人员的工作区。采用传统的散流器顶送或侧送，使人员工作区处于回流区，都不是适合的送风方式。研究下送风等置换式送风方式，更适合这种新的空调方式。还可以作为“工位空调”，直接把新鲜空气送到桌面<sup>[29]</sup>。由于室内人员是主要的产湿、产 CO<sub>2</sub>、产臭味的源，因此新风送风量应与人员数目成正比。这可以通过湿度传感器或 CO<sub>2</sub> 传感器来控制风量。由于风量很小，通过小的变速风机作为末端装置，通过调节转速来改变风量。这种新的末端调风装置也有待于研究开发。

采用这种温度湿度独立控制系统，显热由 18~20℃冷水吸收。这种冷水可直接来源于地下循环水，地下埋管换热(见 2.4 节)。当无法利用地下水或地下换热时，就需要采用压缩式制冷机。从理论上讲制取这种高温冷水的制冷机 COP 会很高，但此时要求压缩机在很低的压缩比下工作。一般的压缩机此时效率不高，从而不能达到高效节能的效果。为此需要专门研究开发可工作于这一工况的高效制冷机。

本方向的研究主要针对降低大型公共建筑(d)能耗。有效的技术突破可使大型公共建筑供暖空调能耗再降低 30%。与前一节输配系统的改革的措施相结合，可使大型公共建筑供暖空调能耗降低 65%。这相当于 d)类建筑能耗降低 33%(其他主要电耗为照明、电器及电梯)。

## 2.7 大型公共建筑的节能控制调节

目前 90%的大型公共建筑安装有建筑自动化系统，对各种用能对象进行检测和控制。但是，90%的自动化系统都不能有效地对耗能系统，尤其是供暖空调系统进行自动调节，从而不能实现节能效果。在上世纪 80 年代，此现象可解释为担心传感器不可靠造成的误动作。但现在传感器和计算机网络技术的发展已可以充分实现其可靠性，这一现象的原因就不能再从硬件可靠性上找。实际的问题是缺少有效的可操作的协调级控制策略。对于一个典型的风机盘管加新风空调系统，协调级控制策略要解决：

a) 制冷机的供水温度设定值，在满足除湿要求的前提下尽可能提高出水温度，以提高冷机 COP；同时出水温度高有可能要求循环水量大，从而又增加泵耗，协调这三者需求，得到最佳的出水温度设定值。

b) 制冷机开启台数和搭配，使开启的制冷机都工作在



高效区,同时还能恰好满足建筑对冷量的需求。

c) 冷水泵的开启台数与转速,使其既可向末端提供足够的循环水量(并不一定需要提供额定的压差),又使各台水泵能工作在高效工作区。

d) 冷却水泵的台数与转速,在不使制冷机 COP 下降的前提下尽可能减少水泵功耗。

e) 冷却塔的运行方式,当制冷机仅部分开启时,怎样利用全部安装的冷却塔依靠自然通风降温以减少冷却塔风机电耗。

这种优化需要全面了解系统各设备运行状态,识别建筑物的实际需求,又不能过度依赖于预知各种设备与系统的特性。目前的建筑自动化系统水平已可完全提供各种所需要的实测数据,要解决的问题就是优化思想、优化算法和为了实现优化控制对系统进行必要的改造。

优化控制的实现,至少可达到 15%~20%的节能效果。

## 2.8 建筑热电冷三联供系统

当天然气为城市中主要的一次能源时,与简单的直接燃烧方式相比,采用动力装置先由燃气发电,再用发电后的余热向建筑供热或作为空凋制冷的动力,可获得更高的燃料利用率。这就是所谓热电冷三联供(BCHP: building combined heating & power generation)。这种方式通过让大型建筑自行发电,解决了大部分用电负荷,提高了用电的可靠性,同时还降低了输电网的输配电负荷,并减少了长途输电的输电损失(在我国此损失约为输电量的 8%~10%)<sup>[30~31]</sup>。

美国为解决其电力输配和供电安全问题,近年来大力推广这一方式。美国能源部预测到 2020 年新建建筑的 50%、现有建筑的 20% 都将采用这种方式解决建筑物内的能源供应<sup>[32]</sup>。目前正在支持一大批研究单位和企业研究相关技术、政策,并开发相关产品。我国长沙某公司由于其在燃气直燃式吸收机方面的技术领先地位,也属于美国能源部组织的关键设备研究单位之一,其产品已用于美国的几个主要的 BCHP 示范项目中,而实际上这一方式早在日本有很多应用实例,只是没有这样大规模宣传推广。

我国实现“西气东输”后,这种方式可以作为东部大城市天然气应用的一种形式。对于用电可靠性要求高、全年存在稳定的热负荷或冷负荷的建筑,这种方式可获得较高的节能效果和经济性。

要使这种方式能更大范围地使用,并真正有利于节能、环保,并具有经济性,要攻克的技术难点为:高发电效率、低排放的燃气发电动力装置,高密度高转换效率的蓄能装置和高效率的热驱动空凋方式。

燃气发电装置是 BCHP 的关键设备。根据分析,只有其发电效率达到 40%,BCHP 才真正具有节能意义<sup>[32]</sup>。目前的几十至几百 kW 的微燃机发电效率不足 30%,MW 级

内燃机发电效率可接近 40%,但排放的氮氧化物高于燃气锅炉,不符合环保要求。目前可能的方向为:进一步改进内燃机,实现低 NO<sub>x</sub> 排放,并进一步提高其发电效率;采用固体氧化物燃料电池(SOFC),彻底解决发电效率和 NO<sub>x</sub> 排放问题。目前美国 Ion American 公司在 SOFC 燃料电池的关键工艺上作出重大突破,可以最终实现整机成本在 1 000 美元/kW 水平。其发电效率为 45%,产生的排热温度为 800 °C,基本单元容量为 25 kW。这可真正实现高效率、小型化和零排放。目前制造这种燃料电池的大部分原材料来源于中国。受此启发,我国完全可以跳过动力机械阶段,直接采用燃料电池来发展我国的新型建筑能源系统,走出一条中国特有的新路。

采用燃料电池,余热温度在 800 °C 左右,非常容易实现高效率的热制冷。但采用内燃机则有约一半的余热以 80 °C 左右的冷却水形式释放,用其进行高效制冷有一定困难。此时如果采用溶液除湿方式,利用这部分热量再生浓溶液,从而可解决建筑物的新风处理并承担湿负荷,则是一种更好的解决途径。同时制备好的浓溶液还可以高密度储存,满足高密度、高转换效率的蓄能装置的要求<sup>[34]</sup>。这应是发展以内燃机作为动力方式时建筑空凋制冷的解决途径。

由于多种原因,我国电力部门很难允许分布式发电系统向电网供电。这样 BCHP 系统就只有同时存在电负荷与热负荷时,才能高效工作。否则为了发电而排放余热,就造成能源浪费。为了解决这一矛盾,使发电机组能更长时间运行,就要有高密度的热能储存装置,在余热富裕时储存起来,供电负荷低,而热负荷高时使用。前述溶液除湿系统,储存浓溶液是一种有效的方法。

这种方式为大型公共建筑能源供应提供一种整体解决方案。通过天然气发电替代使用电网电力,其余热又可解决建筑供冷供热问题。当解决好电热冷的负荷匹配时,与直接利用电网电力相比,这种方式可节约一次能源 20%~30%。

## 2.9 燃煤燃气联合供热与末端调峰

改革传统供暖系统,提高其调节效果,减少调节不当导致的能量损失,是降低集中供热系统能耗的重要途径。如何在保证供暖地区冬季供暖质量的基础上提高能效,减少环境污染并尽可能降低运行成本,也是我国北方城市冬季供暖和实现节能亟需解决的问题。尤其是当引入天然气作为部分一次能源之后,协调经济、环境、能源三者之关系成为重要问题。

以燃煤为燃料的大型热电联产热源和大型燃煤锅炉房通过采用清洁煤燃烧技术,可以高效低污染地烧煤,但希望稳定在某个最佳工况,不要随负荷变化而经常调整。输送热量的大型集中供热网也很难有效地根据末端用热量的变化进行及时调节。调节不当和调节不及时导致部分建筑过热,会造成很大的热量浪费。据多处现场实测结果,大型集



中供热系统调节不当导致部分建筑过热造成的热量浪费占总供热量的20%~30%。反之,以天然气为燃料的小型锅炉可以快速、方便地调节,且清洁、高效。但目前把天然气单独作为大型锅炉的燃料,也不能充分发挥其特点。因此,可以利用大型集中供热网,以燃煤作为燃料,提供供暖的基础负荷,整个供热季稳定运行。在末端采用天然气为燃料的小型调峰锅炉根据负荷需求补充不足的热量。天然气调峰锅炉可根据各自的末端状况及时准确地调节,避免调节不当造成的浪费,燃煤热源又可稳定运行,保证清洁与高效<sup>[3,9]</sup>。

这种方式还缓解了目前燃煤供热与燃气供热间巨大的成本差,实现燃煤燃气联合供热,有益于社会公平。整个冬季均匀地使用燃煤也可缓解严寒期高负荷时由于燃煤用量高峰导致的大气污染高峰。

这种方式应是今后北方地区大中城市燃煤燃气共同构成一次能源时应首先采取的供热方式。这种方式的引入,由于改善了调节,并提高了集中热源的效率,可以使集中供热系统的能耗降低20%~30%。

### 2.10 节能灯和节能灯具

由于照明用电为建筑物用电量的30%~60%,因此节约照明用电对建筑节能有重大意义。降低照明用电的途径包括:发展高效光源、采用高效灯具、改进照明控制。

目前荧光灯类高效节能灯已广泛普及,国外普遍看好的发展方向是LED光源。它可比目前的节能灯效率更高,发光光谱可在大范围选择,使用寿命可大大延长。尽管目前LED的成本、效率都无法与荧光灯类节能灯相比,但在最近10~20年内将有重大突破。

照明控制也是实现照明节能的重要组成部分,尤其是办公室、教室等公共建筑,改善照明控制可大幅度减少照明电耗。国外有采用照度传感器对光源进行连续调节,并实现了很好的节能效果。使这种系统国产化,降低成本,同时进一步完善其控制逻辑,在5~10年内应能在我国广泛推广并产生较大的节能效果。

### 3 相关政策激励机制和所要解决的技术问题

通过政策机制,实施有效管理,是推进我国建筑节能的重要手段。建筑节能政策机制应建筑节能的要求而出现,随着人们对建筑节能认识的加深和社会经济的发展而不断发展、创新和完善。建筑节能政策机制主要有三类:一是通过制订、颁布、实施建筑节能标准规范、法律法规,下达指令性行政命令等,属于计划经济体制下的典型管理手段;二是随着经济发展和市场完善,超越标准规范的最低要求,将建筑节能性能与产品市场价格挂钩的手段,例如正在逐渐推广的评估、审查、标识、定额管理等市场经济体制下的建筑节能管理手段;三是由于建筑节能管理已经由管理者的特有任务转化为与社会各群体利益、责任相关的事务,建筑节能管理涉及主体呈多元化特点,因此将建筑节能有关的各

种显性和隐性信息加以收集整理,并在一定范围内以适当形式公开,用以建立各种刺激、奖惩机制,即建筑能耗统计与信息公开制度。我国正处于计划经济向社会主义市场经济转型阶段,社会经济发展水平千差万别,因此不能指望实施上述三类政策机制中的某一种即可解决所有问题,而是应当根据不同社会经济发展水平,针对建筑节能的特点和重点,灵活选择和搭配上述行政管理、规范市场与市场调节、信息统计与公开等三类基本手段,形成合力。编制、实施建筑节能标准规范等行政管理手段在我国已经实施多年,应继续加大执法力度;而规范市场与市场调节、信息统计与公开等新的市场经济体制下公共管理手段尚较薄弱,应大力发展,主要的具体措施包括:

#### 3.1 建立建筑能耗基础数据统计体系和建筑能耗数据库

目前尚没有任何一个机构可以准确地给出我国的建筑物所消耗终端能源的具体数据,包括绝对量和在整个社会终端能源消耗量中的比例;也不能准确地描述我国建筑能耗的具体特点,例如发展变化的特点,不同功能建筑能耗的特点,不同地域建筑能耗、建筑内不同终端用能途径能耗的特点,这成为我国进一步开展建筑节能工作的重要障碍。国家统计局和建设部近年来在建筑能耗统计方面做了大量的工作,但仍存在很多的差距,主要包括:一是缺少科学有效、可操作性强的建筑能耗统计模型,使具体的建筑能耗统计工作能在此模型指导下实施;二是尚未建立全国和地方的建筑能耗统计数据库,也没有形成相应的统计渠道;三是无有效机制开展统计工作,缺少有效渠道使这些数据向各级政府、公众和国际社会公开。

建立符合国际惯例、适应中国国情的建筑能耗统计制度,主要包括三部分内容:一是在现有统计渠道基础上建立可持续运行的建筑能耗基础数据统计体系,包括行政管理方案、数据调查方法、统计信息标准等;二是建立城市、省、区、全国的建筑能耗数据库和统计数据报送网络,建立建筑能耗统计分析模型和建筑导致的温室气体排放量估算模型等,并开展统计分析和预测研究;三是建立一定范围内、适当形式的建筑能耗数据定期公开和公布制度,利用网络、媒体,促进公共参与,形成刺激和奖惩机制。

#### 3.2 建立适应市场需求的住宅能耗标识体系

住宅节能的关键是住宅本身的优化设计和节能的建筑部品与建筑技术的采用。由于我国住宅开发已基本进入市场化,因此实现这些节能措施的主体是住宅开发商。要使其不是概念炒作,不使建筑节能堕落为仅仅成为开发商的市场行为而丧失了消费者的信任与兴趣,就必须有一套科学可行的管理体制,客观地给出住宅实际的能耗状况。这就需要建立住宅能耗标识方法和能形成自我约束机制的住宅能耗标识体系。

调查与研究计算表明,一座住宅建筑的每个单元的热性能都不相同,因此为实现要求的室内环境控制所需要的

能源消耗也不相同。对于塔楼,这种差别在同一层楼的不通朝向会高达 50%。因此,就需要对每一套单元进行能耗标识,给出其为控制热环境所需要的能源消耗。实际的能源消耗又与住宅的实际使用状况、温湿度水平等有关。为此就需要定义标准的住宅运行和使用工况,给出在这种标准工况下的能耗,作为能耗指标。同时提出当实际运行使用状况与标准工况不同时求得真正能耗的修正方法。根据住宅施工图和各种部件的选择,可以计算出标准工况的能耗指标和工况改变后的修正。通过对施工过程中几个关键阶段的现场检查,可以确定实际的施工质量和实际建筑是否与计算所用参数一致。

住宅能耗标识体系就是在市场机制下建立起能够健康实施这一标识工作,从而真正推动节能工作的平台。这包括独立的住宅能耗标识事务的建立与监管;确保标识过程公正的授权与保险机制;向消费者宣传教育使能耗指标的意义深入人心等。通过这一平台的建立,使消费者能够把节能作为选择住宅的一项指标,由消费者推动开发商以节能为开发市场的手段,进而由开发商推动设计研究和生产部门的住宅节能的研究开发和相关产品生产,就能使住宅节能工作进入良性循环。

### 3.3 建立大型商业建筑能耗评估、审查体系及能源定额管理机制

大型公共建筑相互之间能耗的差异表明,这类建筑的节能潜力在 30% 以上。根据对部分大型商业建筑的节能改造,通过加强运行管理,杜绝“跑冒滴漏”的浪费现象,可实现节能 5%~10%;通过提高水泵风机等输配设备的运行效率及应用变频调速技术可实现节能 15%~20%;此外通过改善过渡季节设备运行方式、避免冷热不均、增加自动控制系统等措施,也可实现 10%~20% 的节能效果。对这类建筑而言,应重点开展两方面工作:一是大型公共建筑各用能环节的分项计量,是节能工作开展的基础;二是新建大型公共建筑的用能评估审查和使用中的大型公共建筑的用能配额管理制度。

对于大型公共建筑而言,能源消耗情况非常复杂。以空调系统为例,其组成包括制冷机、冷水泵、冷却水泵、冷却塔、空调箱、风机盘管、供暖泵等多个环节,目前全国各地的各类大型公共建筑基本上是每栋一块总电表,因此业主和物业公司以及统计部门得到的仅是数万  $m^2$  的大楼的总能耗一个数据,对开展节能工作需要的各耗能环节的状况往往难以了解,能耗不合理的部分存在的问题被掩盖了。此外,近年来国内一些节能改造项目开始按照合同能源管理的模式执行,效果并不是很好,究其原因,一个重要的因素就是合同双方对最终节能量的认可存在差异,如果建筑内各耗能环节实现分项计量,则可从根本上解决这一问题。这些信息通过一定范围内公开和交流,也会对认识和改进系统的能耗管理有很大的推进作用。

大型公共建筑能耗偏高的原因一为设计不当导致系统的先天不足,一为运行管理不当,不能按照节能的方式运行与调节。为此可通过新建大型公共建筑的节能评估审查和已有大型公共建筑的用能配额管理制度来从这两方面约束。大型公共建筑建筑面积大多在 2 万  $m^2$  以上,按照国家节能法的要求,这类建筑均应进行节能评估,只是由于缺乏可操作的评估方法,多年来一直没有开展起来。今年 1 月,由有关单位协作完成的《北京市大型公共建筑节能评估方法》<sup>[36]</sup> 通过了专家鉴定,并应用到了奥运场馆等建设项目的节能评估工作中。这种评估方式根据设计方案对大型公共建筑的建筑本身、能源转换和设备系统及可再生能源利用三个环节通过专门软件进行详细的模拟计算,并根据其结果进行全面的节能审查。同时预测出被评建筑在合理的运行管理下不同气候、不同的建筑利用率时煤、天然气、热力、电等能源消耗的数量,这就可以成为这类建筑的用能指标,从而实行大型公共建筑能耗配额制,节约有奖,超过拉闸或加倍收费。通过用能定额制有效地推进大型公共建筑各种节能运行方式的推广和各种节能改造技术的实施。这一方法的可操作性和相对公平性还有待于大量实际工程与各种具体情况的检验,并需要根据各地的具体情况修正,从而发展成各地的指标体系。

### 3.4 推进建筑用能产品能效标识制度

对于空调、冰箱、家用电器、照明器具等建筑用能产品,应大力推动节能产品分级认证和能效标识管理制度的实施,运用市场机制,引导用户和消费者购买节能型产品。例如可按产品耗能由低到高,依次标为 1~5 级,能效低于 5 级的产品不允许上市销售,而只有达到 1 级和 2 级能效标准的产品才能称做“节能产品”。

具体的研究工作包括制定科学和可操作的能耗标识指标及检测方法。例如家用空调器在不同的室内外热环境条件下能耗性能会有很大差别,只在单一的标准工况下测试和标识其能耗指标,其结果就有可能与实际有很大偏离。当大多数运行工况并非标准工况时,会导致制造厂单纯地追求标准工况下的高效而不顾大多数实际运行工况下的低效。设计多个不同气候条件的全负荷与部分负荷的参考工况,并根据各个地区的气候情况确定各自对这些参考工况的权系数,从而得到根据参考工况计算各个地区能耗综合性指标的方法,才有可能更科学地反映实际的用能状况,促进和推广真正的适宜当地气候条件的节能产品。

### 4 总结

本文初步分析了我国建筑能源消耗状况、节能潜力和为了实现这些潜在的节能效果所应该开展的主要技术研究与政策制定工作。作为总结,可归纳如下:

a) 建筑节能是解决我国今后能源紧缺问题的有效途径之一。有效地做好建筑节能工作与维持现状按照目前的用能水平发展相比,会使我国总的能源消耗有约 10% 的差

别。因此这项工作对我国今后的能源问题至关重要。

b) 建筑节能的重点应为: 建筑物本身的节能; 供暖系统的节能, 大型公共建筑中用能系统的节能; 以及各种家用电器的节能。围绕这些重点领域, 尚有大量的新产品新技术有待研究创新, 开发和推广。

c) 利用市场机制, 有效地推广建筑节能技术, 真正实现节能效果, 还需要大量的政策保障。这也需要大量的研究工作, 主要为建筑物和系统的能耗预测、实测与标识; 用能产品的测试与标识; 以及科学公平地实施这些方法的约束机制。

最近, 胡锦涛总书记指出: 要突出抓好节约能源、节约原材料和节约用水工作, 大力发展循环经济, 要发展节能省地型住宅和公共建筑……温家宝总理也强调要坚决贯彻节约优先的原则, 把节能、节水、节地作为可持续发展的大政策, 并多次批示、关注建筑领域的节能问题。这充分表明建筑节能已经得到了党中央、国务院的高度重视。

在这种形势下, 积极组织各种科研力量, 并与中央和地方有关部门充分沟通与协调, 针对上述重点发展领域进行联合攻关, 并出台配套的发展政策机制, 从而可有效解决我国建筑能源使用效率低下的问题, 为我国城市建设的可持续发展和减缓我国能源需求的压力起重要作用。

#### 参考文献

- 温丽. 对推进我国供热系统节能的看法和建议. 暖通空调, 1998, 28(1): 1-7
- 北京市民用建筑采暖现状和发展研究, 供热顾问团研究报告, 2005. 3
- 薛志峰, 江亿. 北京市大型公共建筑用能现状与节能潜力分析. 暖通空调, 2004, 34(9): 8-10, 24
- 江亿, 薛志峰. 北京市建筑用能现状与节能途径分析. 暖通空调, 2004, 34(10): 13-16
- Lawrence Berkeley Laboratory. DOE-2 Engineers Manual. Version 2.1A, 1982
- Crawley D B, Lawrie L K, Winkelmann F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, 2001, 33: 319-331
- Clarke J A. Energy Simulation in Building Design. 2nd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001
- 松尾阳. 空调设备动态热负荷计算入门. 日本建筑设备协全, 1980
- Pan S, Yan D, Zhu Y, et al. Comparison of various simulation programs as the commissioning tool: part-5 VAV system simulation using DeST. 日本空卫学会年会, 2003
- Pan S, Yan D, Zhu Y, et al. Comparison of various simulation programs as the commissioning tool Part-5 VAV system simulation using DeST. Nakahama Laboratory, Environmental Syst-Tech. Tsinghua University
- Jiang Y. State-space method for the calculation of air-conditioning loads and the simulation of thermal behavior of the room. In: ASHRAE Trans. 1982, 88(2). 122-132
- 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第1讲 建筑模拟技术与 DeST 发展简介. 暖通空调, 2004, 34(7): 48-56
- 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- 刘月莉, 曾剑龙, 江良明. 以人为本低能耗住宅的尝试——优化建筑围护结构设计的锋尚国际公寓. 中国住宅设施, 2004(2): 23-27
- 孟庆林. 建筑屋面太阳能被动蒸发冷却研究. 太阳能学报, 1996(3): 256-262
- 涂逢祥. 节能窗技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- Michael Wigginton, Jude Harris. 著. 智能建筑外层设计. 高木, 王琳. 译. 大连: 大连理工大学出版社, 2003
- 李树国. 建筑物用太阳能电池的进展. 中国能源, 1997(11): 46-48
- 黄季宜. 含盐吸水性树脂调节室内湿度的应用基础研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2003
- 徐洪涛, 袁秀玲, 李国强, 等. 跨临界循环二氧化碳在热泵型热水器中的应用研究. 制冷学报, 2001(3): 12-16
- 孙德兴. 城市原生污水冷热源系统形式及其应用. 见: 2004年全国暖通空调制冷学术年会论文集, 2004
- 江亿. 用变速泵和变速风机代替调节风阀水阀. 暖通空调, 1997, 27(2): 66-71
- 江亿. 冷热联供热网的用户回水加压泵方案. 区域供热, 1996(2): 25-31
- Li F, C. Kawaguchi Y, Hishida K. Structural analysis of turbulent transport in a heated drag-reducing channel flow with surfactant additives. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(5): 965-973
- 陈斌娇, 王馨, 张寅平, 等. 相变乳液层流变特性实验研究. 自然科学进展, 2005, 15(4): 453-458
- 左远志, 丁静, 丁云辉, 等. 太阳能驱动除湿转轮辅助中央空调系统的设计. 节能技术, 2005, 23(1)
- 刘晓华, 李震, 江亿. 溶液全热回收装置与热泵系统结合的新风机组. 暖通空调, 2004, 34(11): 98-102
- 薛志峰, 等. 超低能耗建筑技术及应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- P O 范格, 著. 21世纪的室内空气品质: 追求优异. 于晓明, 译. 暖通空调, 2000, 30(3): 32-35
- Aristotle Marantan. Optimization of integrated microturbine and absorption chiller systems in CHP for buildings application: [Ph D Dissertation]. The University of Maryland, 2002
- Midwest CHP Application Center. Combined heating and Power (CHP) resource guide. 2003
- John Laitner. Federal Strategies to Increase the Implementation of Combined Heat and Power Technologies in the United States. US Environmental Protection Agency
- 耿克诚. 楼宇式天然气热电冷联供系统的评价及应用研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2004
- Liu X H, Geng K C, et al. Combined cogeneration and liquid desiccant system applied in a demonstration building. Energy and Buildings, 2004, 36: 945-953
- 江亿, 薛志峰. 审视北京大型公共建筑节能. 科技潮, 2004(10)
- 薛志峰, 江亿. 北京市《公共建筑节能评审标准》简介. 暖通空调, 2005, 35(5): 44-53