

上海世博园区能源规划： 回顾与反思

同济大学 龙惟定[☆] 马宏权 梁浩 范蕊 白玮

摘要 回顾了世博园区能源规划的过程,从最早的天然气联合循环热电联产方案,到后来的分布式能源方案,直到现在的基于江水源热泵的综合方案,都是基于系统能源效率最大化的原则。对江水源热泵的方案,分别从负荷分布、黄浦江水温预测、能耗分析、区域供冷的最佳供冷半径、大型江水源热泵对黄浦江生态环境的影响,以及江水源热泵的运行模式等方面进行研究。并对方案的节能减排效益作了测算。

关键词 上海世博会 世博园 园区能源规划 江水源热泵

Community energy planning in Shanghai Expo Park: Review and reflection

By Long Weiding[★], Ma Hongquan, Liang Hao, Fan Rui and Bai Wei

Abstract Reviews the energy planning process in the Park. From the earliest natural gas combined-cycle cogeneration scheme to the later distributed energy system scheme, and to the final option based on a comprehensive system of river water-source heat pump, all these are based on the consideration of maximizing energy system efficiency. For the river water-source heat pump scheme, studies from aspects of cooling load distribution, water temperature estimation of the Huangpu River, energy consumption analysis, the optimum pipework radius of district cooling, the impacts of large-scale river water-source heat pump on the local ecological environment, and operating mode of the river water-source heat pump. And calculates energy saving and carbon emission mitigation benefits of the scheme.

Keywords Shanghai Expo, Expo Park, community energy planning, river water-source heat pump

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

期盼已久的上海 2010 年世博会正在顺利进行。自 2005 年以来 5 年时间里,笔者参与了世博园供冷供热能源规划的多项研究课题。世博园能源系统在当时的技术条件和认知水平下,有很多亮点,也有很多不足,更有很多遗憾。这其中有决策机制上的原因,也有我们对这类大规模园区能源规划的认识还需要进一步深化的原因。趁着世博一片大“热”的时候,冷静地对能源规划的过程作一些回顾和思考,可以对今后大规模园区建设提供借鉴和参考。

1 上海世博园能源系统

上海世博会规划园区面积为 5.28 km²,规划控制面积 6.68 km²,其中保留 1.4 km² 既有建筑。世博园围栏面积 3.28 km²,其中浦东 2.43 km²,浦西 0.85 km²,总建筑面积约 185 万 m²。世博会后,此地将建成未来上海的贸易中心和文化中心。

世博园区分布在黄浦江两岸(见图 1)。世博的新建永久性场馆,即世博轴、世博中心、文化中心、中国馆和主题馆(一轴四馆),主要集中在浦东

①[☆] 龙惟定,男,1946 年 11 月生,教授,博士生导师
200092 上海市四平路 1239 号
(021) 69586960
E-mail: weidinglong@tongji.edu.cn
收稿日期:2010-04-19

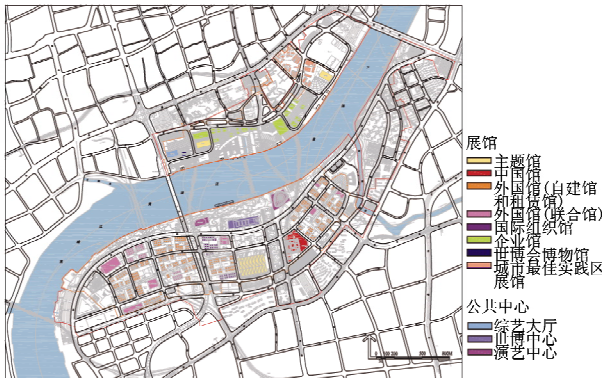


图 1 上海世博会场馆分布

的 B 片区；而世博保留的历史建筑和再利用的工业建筑主要集中在浦西（主要是始建于 1867 年的中国民族制造业的发祥地江南制造总局，即现江南造船厂）。

世博会举办期间（2010 年 5 月 1 日到 10 月 31 日）上海气候炎热。预计世博会参观人数将达 7 000 万，也就是说，每天有 40~60 万的参观者进入世博园的各个建筑。因此，世博园区新增的近 200 万 m² 建筑面积的供冷能耗，是对上海能源需求和温室气体排放的挑战，如何选择既节能又能满足世博特殊需求的供冷供热能源，是需要园区规划中和建筑设计之前就深思熟虑的。但遗憾的是能源规划一直游离在总体规划之外，也一直没有得到应有的地位。

上海世博会与爱知世博会有所不同，爱知世博会后所有场馆全部拆除；而上海世博会后一部分永久建筑如一轴四馆等将予以保留而且功能不变，另一部分永久建筑如工业建筑和历史建筑不会拆除，但功能不明。而国外场馆和企业场馆是临时场馆，世博会后是要拆除的，土地将重新利用。但在土地批租之前，这些临时场馆还有可能保留一段时间，其功能是展馆还是商场餐饮尚不清楚。对于一轴四馆，要考虑世博会后的运行需要，特别是冬季供热；但对于其他建筑，因为功能不明，难以确定其供热负荷。这就给能源规划带来很大的困难。

从 2005 年开始，研究者便对世博园区围栏区内的建筑群作了空调动态负荷预测，主要完成了 4 个方面的负荷预测：1) 逐时空调动态负荷；2) 空调负荷率的时间分布；3) 月累计空调负荷；4) 设计日逐时负荷。

世博园区建筑主要有两大特点，即建筑形式和

围护结构的多样性和非常大的内部得热。因此，在空间负荷预测中，针对临时展馆用了基于模块化概念的模块分类简化方法，并确定模块模拟的边界条件，即建筑因子和内部得热因子。建筑因子主要有：建筑面积、围护结构、建筑朝向、建筑层高、窗墙比和建筑外形。内部得热因子主要有：气象参数、室内设计参数、人流量、照明负荷、设备负荷、空气渗透和新风量等因素。其中人流量（人员负荷）的影响因素十分复杂，如节假日、季节、气候因素等。模拟中设置了黄金周、工作日、双休日和学生暑假 4 种情景。根据 4 种情景模式下入场人数和出场人数的设定，结合世博期间每天的客流量，可以得到世博园区 184 d (4 416 h) 的逐时人流量分布（见图 2）。这一预测客流量比实际流量偏小。

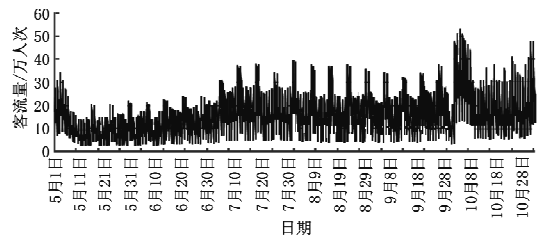


图 2 2010 年上海世博会举办期间逐时客流量分布

最后，确定了 3 大负荷敏感度因子——天气变化因子、人流量变化因子和新风供给方式变化因子，采用 2004 年和 2005 年实际气象年的天气参数和世博园区内可能出现的 3 种人流量模式以及不同的新风供给方式对负荷变化情景进行了分析。研究涉及的展馆建筑共计 163 栋，建筑面积共计 86.3 万 m² [1]。

根据模拟，预计整个世博园区的峰值负荷出现在 7 月 13 日 12:00，为 159 162.5 kW，该日空调的总冷量需求为 1 646 505 kWh，如图 3 所示。

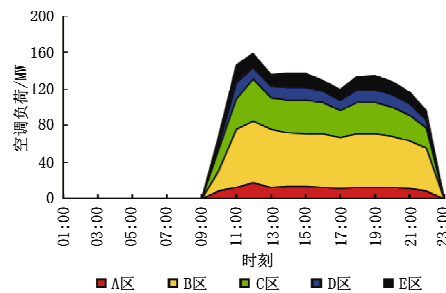


图 3 7 月 13 日世博园区逐时负荷

研究中还分析了整个世博园区的空调负荷率分布（即空调负荷的时间频率）情况。分析世博会

期间 184 d 内开馆时段内的负荷,发现空调冷负荷率在 75%~100% 范围内的时间频率仅占 18% 左右,展馆运行期间大部分的时间处于部分负荷的状态。空调冷负荷率在 50%~75% 范围内的空调冷负荷时间频率占 33% 左右,空调冷负荷率在 25%~50% 范围内的空调冷负荷时间频率占 40% 左右。图 4 为世博园核心区冷负荷率的时间分布。

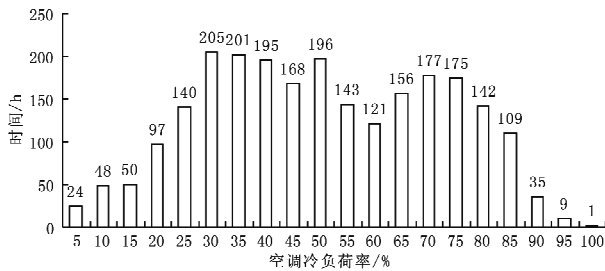


图 4 世博园核心区(B 片区)冷负荷率的时间分布

预测世博园区各片区建筑群在世博期间总的空调冷量为 196 033 MWh,其中月总冷量以 7 月最高,8 月次之,其余各月的月总冷量仅为最高月总冷量的 40%~70% 左右。

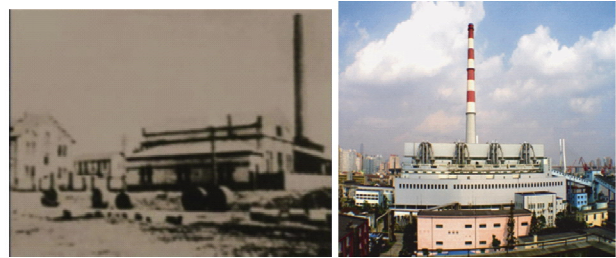
2 供热供冷能源方案研究

为了满足世博园区巨大的空调冷量需求,必须找到高效、节能、低碳和可行的规模化供冷方式。

2.1 南市发电厂天然气联合循环(NGCC)热电联产方案

位于世博园区的原上海南市发电厂始建于 1897 年。当年清政府在上海十六铺老太平码头创建了供 30 盏路灯照明的南市电灯厂(见图 5a),后于 1918 年成立上海华商电力股份有限公司。1955 年,电厂转为国营,更名为南市发电厂(见图 5b)。南市发电厂的百年历史浓缩了上海整个城市的变迁。在 2006 年拆迁之前,南市发电厂是一家热电联产电厂,有 2 台抽汽冷凝式机组、1 台背压式机组及 1 台凝汽式机组,配有 4 台燃煤锅炉,发电能力为 16 MW,最大供热能力 350 t/h。因此,在世博园规划之初,计划将南市发电厂改造成 30 MW 级的 NGCC 电厂,在发电的同时,通过蒸汽管网向园区供应蒸汽,末端采用蒸汽吸收式制冷机的热力制冷方式供冷。

NGCC 是指利用天然气燃烧产生的 1 000~1 400 °C 高温烟气通过燃气轮机做功发电,排出的 500~600 °C 烟气在余热锅炉中产生约 450 °C,5



a 1897 年

b 2005 年

图 5 1897 年的南市电灯厂和 2005 年的南市发电厂

MPa 的蒸汽,用来推动蒸汽轮机做功发电,燃气-蒸汽两者结合便形成了天然气联合循环发电。其本质上就是利用天然气发电的余热再次发电,即“电-电联产、利用余热”。在目前条件下,NGCC 是燃用矿物燃料(煤、石油、天然气)发电效率最高的技术,有报道称其最高热效率可接近 60%(普通燃煤电厂在 35% 左右),如果再加上利用其蒸汽实现供冷供热,总体热效率还可以进一步提升。由于天然气相对煤而言是一种清洁能源,所以 NGCC 的 CO₂ 和其他污染物排放都很低,完全可以满足世博园区的能源需求和环境要求,并成为世博会的一个亮点。当时计划南市发电厂成为世博能源中心,兼具展示功能,供专业访问者参观。

但是,由于以下几个原因,该方案最终没有实施:

1) 2006 年初,我国遭遇严重的天然气荒,为保证首都供气,全国许多地区采取限气措施,上海也不例外。这样,使得 2010 年的基本供气前景变得扑朔迷离。

2) 天然气价格一直是敏感问题,当时所有天然气电厂都处于亏损状态,多数仅作为调峰之用,无法预测 2010 年及以后的气价。

3) 世博园区跨黄浦江两岸,南市发电厂位于浦西南浦大桥桥堍、世博园区的东北端,而热负荷中心是在浦东的 B 区,因此蒸汽管道穿越黄浦江存在一定的经济和技术问题。

4) 高压天然气进入园区存在一定安全隐患。

最终,南市发电厂旧有燃煤机组被拆除,厂房被改造成为城市未来馆,并保留了一个能源展示馆。为保证原来南市发电厂的热用户的需求,不得不另建锅炉房。从技术上说,是在原南市发电厂热电联产基础上的倒退。很遗憾,世博园与国际最先

进的能源技术失之交臂。不过南市发电厂原有的抽取黄浦江水冷却的泵站在江水源热泵集中供冷供热中继续发挥着作用。

2.2 分布式能源方案

上海世博能源系统规划得到国际上很多专家

的帮助和支持。其中日本早稻田大学尾岛俊雄教授的研究团队与同济大学合作,提出了图 6 中的“1+2”分布式能源站方案^[2]。即浦西地区 1 个能源站,浦东地区 2 个能源站。又根据能源的来源提出 3 种方案:

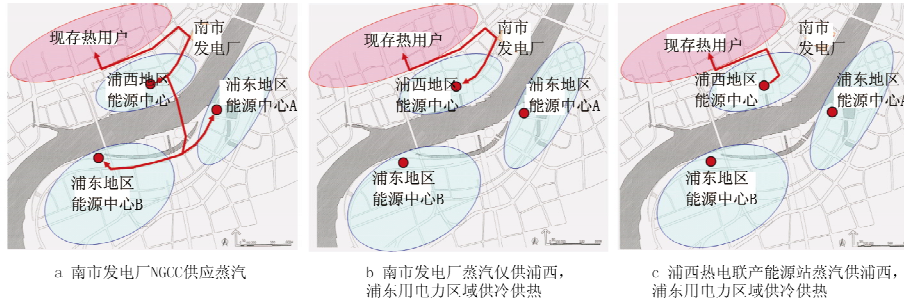


图 6 日本早稻田大学尾岛俊雄教授及其团队提出的方案

1) 基于南市发电厂热电联供,设 3 个能源站,利用南市发电厂蒸汽和吸收式制冷,分别建立 3 个区域供冷系统,利用黄浦江水作为冷却水。

2) 浦西 1 个能源站利用南市发电厂蒸汽和吸收式制冷;浦东 2 个能源站利用电力制冷,蒸汽管道不过江。理论上浦东的制冷电力来自于南市 NGCC 电厂,可以有高达 3.0 的一次能源利用率。利用黄浦江水作为冷却水。

3) 浦西 1 个热电冷联产能源站,除为浦西场馆供冷外还为原南市发电厂的热用户供热。浦东 2 个能源站利用电力制冷,利用黄浦江水作为冷却水。

尾岛俊雄教授参与和主持过日本大阪世博和爱知世博的能源规划,有先进的理念和成功的经验。在南市发电厂确定被拆除的情况下,在尾岛俊雄教授方案的基础上,根据“位置相近、负荷相近、规模相近、功能相近”的原则,笔者的研究团队研究了“两岸 5 站”方案的可行性^[3]。表 1 为 5 个分布式能源站的设置,图 7 为 5 个能源站的布置。

表 1 5 个分布式能源站的设置

	负责区域	能源站性质	能源站方式
能源站 1	B 片	永久	供冷却水,热电冷联供
能源站 2	中国馆、国际组织馆	永久	热电冷联供
	其他	临时	
能源站 3	城市最佳实践区	永久	热电冷联供
	部分企业馆	临时	供空调冷却水
能源站 4	C 片	半永久	大型水源热泵+蓄冷装置
能源站 5	E 片	临时	供空调冷却水

该方案有以下几个特点:

1) 利用黄浦江水作为冷却源。

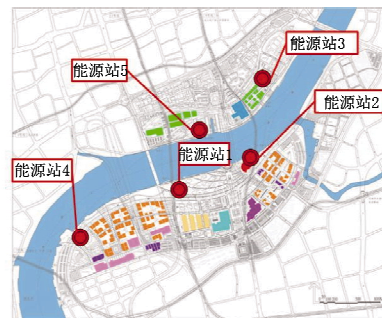


图 7 5 个能源站的布置

2) 永久场馆采用热电冷联供系统。

3) 临时场馆仅提供来自黄浦江水的冷却水,场馆自用水源冷水机组供冷。成为准“能源总线”系统,也便于世博会后拆除。

4) 整个世博园区内无冷却塔,减小热岛效应。

5) 由于取代南市发电厂向黄浦江排热,对环境的影响大大降低。

6) 既保证世博会期间包括临时场馆在内的所有场馆的供冷,又兼顾世博会后永久场馆的供冷和供热。

由于在园区最初的规划中没有将与分布式能源有关的基础设施考虑在内,加之浦西工厂动迁的推迟,因此,如果要实施分布式能源方案,就要敷设天然气管道、冷却水管道,乃至供冷管道,需要对原有规划中管道、共同沟等基础设施进行调整,而世博园的建设工期已经不允许作比较大的调整,加之天然气的供应同样需要落实,最终,分布式能源方案也未能实施。

2.3 江水源和地源热泵的应用

完全依靠天然气的 NGCC 热电联产方案和部分依靠天然气的分布式能源方案未能在世博园区实施,剩下的只能是高效利用电力的供冷技术。最简单的电力供冷就是单栋建筑的集中空调方案乃至分室(空间)的个别空调(例如分体式空调和多联机)。这种供冷方式的最大问题是在整个园区形成热量的多点排放。根据国外的研究,这种多点排放会造成园区热岛效应,使园区空气温度比周边高 5℃;同时会形成巨大的电力负荷,测算高峰负荷将达到 53 MW,会给上海供电带来很大压力,并造成对电网的冲击。

世博园区地处黄浦江两岸,可以充分利用黄浦江水的资源优势,做好“水”文章。利用江水为建筑物进行冷却的技术历史悠久,早在 1878 年巴黎世界博览会(Exposition Universally de Paris 1878)上,巴黎人就以五月广场为中心,充分利用了塞纳河的供水之便,用 4 台水泵抽取塞纳河水,经过 23 km 长的管道将水输送到博览会的每个角落。他们利用水作为升降梯的动力,设置喷泉,使塞纳河水流入工业宫的地板下来降低室内温度。法国人的水流控制技术大大造福了参观者,成为博览会上的一大亮点。在美国纽约、加拿大多伦多、法国巴黎、瑞典斯德哥尔摩以及瑞士日内瓦等地也都有地表水地源热泵的应用实例。在与上海气候相近的日本九州、东京和大阪等地区,以及空调需求比上海更大的香港,已建成的利用河川水或海水作为热泵冷热源(香港仅作冷源)的工程实例有数十项,其中许多项目运行已经超过 30 年。

上海早在上世纪 90 年代浦东开发陆家嘴金融区建设中,就提出了利用黄浦江水实现区域供冷供热的设想^[4],后来在外滩历史建筑置换中,也提出了利用黄浦江水为这些老建筑提供空调冷热源的方案。范存养教授、徐吉浣教授等老一辈专家为此作过大量研究工作。但由于种种原因,这些计划都未能实施。而在世博园建设期间,地处北外滩的上海国际客运中心和地处上海十六铺的黄浦江旅游中心均采用了江水源热泵并投入调试应用。

江水源热泵的能源利用效率要高于传统的空调冷热源系统^[3],这是由于以下原因:

1) 夏季江水源热泵的冷却效率较高。黄浦江水温度最不利情况为 30~32℃,大多数情况低于

26℃,比传统的冷却塔水温低 6~8℃,冷却温度每降低 1℃机组效率可提高约 1.5%,因此江水源热泵机组制冷效率和能源利用效率均高于传统冷却塔冷却的冷水机组。

2) 冬季大型水源热泵机组制热效率和能源利用效率均远高于空气源热泵,更比单纯燃烧天然气的锅炉能源效率要高。

3) 大型江水源热泵系统可以方便地利用热回收技术全年提供生活热水。

4) 江水源热泵可以实现过渡季节的免费供冷。在负荷不高的过渡季节,大型江水源热泵的取水管道可以直接获得 10℃左右的冷水,完全可以直接用于内区供冷,同时经内区供冷使用后温度升高的江水还可再进入热泵机组制热,以提高热泵机组制热的能力和效率。

最终确定园区能源利用方案:

1) 永久场馆的夏季供冷系统优化集成了江水源热泵、水(冰)蓄冷技术和地源热泵技术,冬季供热则集成了江水源热泵为主和天然气锅炉为辅的技术组合,浦东一侧采用集中泵站取水、各建筑独立设置冷热源的方式;浦西一侧采用集中泵站取水、集中设置冷热源、辅以大温差供能和高效输配系统,能源实现高效节能和清洁环保的最优复合式能源系统;并在运行中实现效率优先,最大程度地利用可再生能源,以满足建筑冷热需求。

2) 临时场馆本拟采用移动式电动离心式制冷机供冷,但与几家制造厂商谈判无果,主要症结在于设备租赁价格。而长沙远大空调有限公司是上海世博会的 13 家全球合作伙伴之一,2008 年开始上海的天然气供应已经不再紧张,因此世博园临时场馆最终采用了该公司的直燃型溴化锂吸收式制冷机,建立临时机房。因为直燃型溴化锂吸收式制冷机是一种热力制冷方式,燃用天然气,所以相对于以煤为主火力发电的电力驱动制冷机具有减碳作用。

3 江水源热泵的应用研究

围绕江水源热泵系统的应用,笔者的研究团队开展了一系列研究,为工程设计提供技术支撑。

3.1 黄浦江水温预测

由于种种原因,得到黄浦江水温的实测值极为困难。即便有实测值,也只反映局部江面和个别时段(例如某一年)的情况,从空间分布和时间延续两

方面的数据量都不足以用作预测外推。因此研究中参考了黄浦江入海口处引水船海洋站 1959 年 9 月到 2001 年 10 月的月平均表面水温,对比历年上海气温资料,推导出气温与水温之间的回归关系式^[5](见图 8): $Y=2.199 51+0.928 9 X$,相关系数为 0.983。然后参考 2005 年上海市逐时气温资料,得出黄浦江浦东世博园区的全年水温数据(见图 9)。

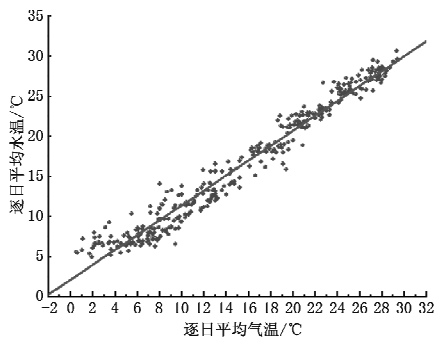


图 8 水温与气温之间的线性关系

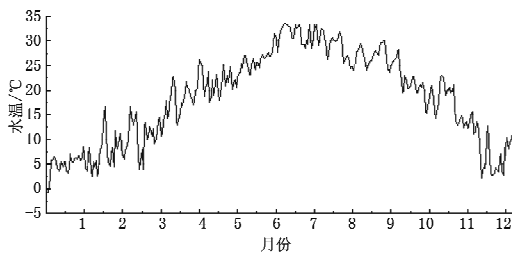


图 9 预测黄浦江水温值

统计其中 6 月 4 日至 9 月 26 日水温数据,得到水温的分布(出现频率),见图 10。将预测水温

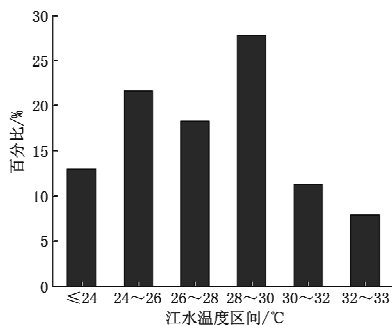


图 10 预测世博期间黄浦江水温出现频率

平均值与 1959—1993 年黄浦公园以及 2003 年淞浦大桥实测的各月平均水温进行对比,发现预测水温与实测资料的变化趋势和变化规律吻合较好,说明预测结果可靠。

以水温 25 °C 时的制冷机负荷为 1.0,从图 11 可以看出,水温超过 30 °C 时,负荷增加得很快,水温 34 °C 时,负荷增加近 30%,此时需要加大水量或采用辅助冷却塔。

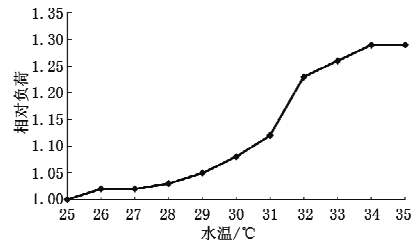


图 11 相对负荷随江水温度的变化

3.2 江水源热泵供冷的技术经济分析

以世博园核心区(B 区)为例,选取 3 种应用黄浦江水的供冷方案作技术经济比较^[5]。

1) 方案 1,黄浦江水通过板式换热器与制冷机冷凝器中的冷却水换热,冷却水循环使用。主机选用大型三级压缩离心式冷水机组,通过机组外水管侧阀门切换来实现制冷、供热工况的转换,实现区域供冷。

2) 方案 2,黄浦江水与换热器换热后,将冷却水输送到各建筑物,各建筑物设独立冷水机组。该种方式又可称为 CWD (condenser water distribution) 方式,或“能源总线(energy bus)”方式。这一方案又可分成:末端配置离心式制冷机(简称冷却水 A)或末端配置螺杆式制冷机(简称冷却水 B)。

3) 方案 3,区域冷热电联产方案。即微型燃气轮机+吸收式机组,冷源集中,江水冷却。

图 12 为 3 种方案的能耗比较,图 13 为 3 种方案的焓效率比较。

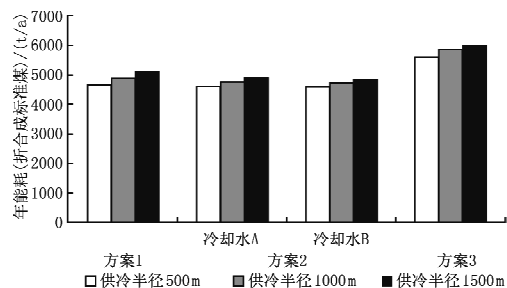


图 12 几种供冷方案的年能耗比较

综合技术和经济评价,方案 2 采用冷却水 CWD,末端配置螺杆机是最佳的方案;其次是方案 2 末端采用离心机;再次是方案 1(大型离心机

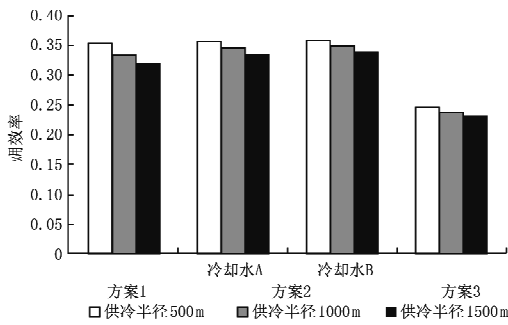


图 13 几种供冷方案的用效率比较

组),最后才是方案 3(分布式能源)。方案 3 不理想的原因在于,由于我国的电力政策中,分布式小型热电联产的电力只能并网不能上网,所以在系统配置时只能以电定热,而电力负荷与冷负荷是不可能相互匹配的,在供热(供冷)需求大于可供量时,只能用辅助电力热泵来补充。将辅助电制冷系统的能耗考虑在内,就使得系统的综合能效比下降。

3.3 区域供冷最佳供冷半径研究

因为区域供冷输送温度一般不能低于 4℃,因此其输送温差较小,相应的输送冷水量就较大(与区域供热相比)。使得区域供冷系统的能效主要损失在输送系统中,输送距离越长,能效越低。为了解决这一问题,笔者对区域供冷最佳供冷半径问题进行了研究^[6]。

笔者将区域供冷系统在不同供冷半径下的理论单位冷量能耗与变制冷剂流量多联式空调系统

的能耗进行比较,得出合理的当量供冷半径,当区域供冷系统的供冷半径落在此范围内时,其单位冷量能耗等于或低于变制冷剂流量多联式空调系统。

将区域供冷系统简化成如下两种系统形式:

1) 第一种区域供冷系统。制冷站位于末端负荷的中心,可以直接从机房引出支管以满足不同位置的负荷需求。这种系统形式的特点是末端负荷分布比较均匀,负荷密度大。

2) 第二种区域供冷系统。由于地理环境或其他客观因素的制约,使得制冷站只能布置在负荷末端,需要经过较长的距离才能把冷水输送到负荷中心,然后再通过各支管供给末端用户。

表 2 为第一种区域供冷系统与变制冷剂流量多联机空调系统的能耗比较。

表 2 第一种区域供冷系统与变制冷剂流量多联机空调系统(VRF)的能耗比较

	VRF 空调系统当量管道长度/m		
	≤8	50.00	100.00
冷量修正系数	1.00	0.95	0.90
VRF 空调系统单位冷量能耗系数	0.228	0.240	0.253
相应区域供冷系统当量供冷半径/m	382	657	962

表 2 中供冷半径 962 m 的区域供冷能效,相当于配管长度 100 m 的 VRF 能效。可见,第一种区域供冷最理想的供冷半径在 400 m 以下,最大供冷半径不宜超过 1 000 m。

第二种方式可以建立一个矩阵表格,见表 3。

表 3 第二种区域供冷系统的单位冷量能耗系数

		干管长度/m											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
支管长度/m	100	0.216 8	0.219 1	0.221 5	0.223 9	0.226 2	0.228 6	0.231 0	0.233 3	0.235 7	0.238 1	0.240 4	0.242 8
	200	0.221 5	0.223 9	0.226 3	0.228 6	0.231 0	0.233 4	0.235 7	0.238 1	0.240 5	0.242 9	0.245 2	0.253 1
	300	0.226 3	0.228 7	0.231 0	0.233 4	0.235 8	0.238 1	0.240 5	0.242 9	0.245 3	0.247 6	0.253 2	0.254 2
	400	0.231 0	0.233 4	0.235 8	0.238 2	0.240 5	0.242 9	0.245 3	0.247 7	0.250 1	0.252 4	0.254 8	0.257 2
	500	0.235 8	0.238 2	0.240 6	0.243 0	0.245 3	0.247 7	0.250 1	0.252 5	0.254 9	0.257 2	0.259 6	0.262 0
	600	0.239 7	0.242 0	0.244 4	0.246 8	0.249 2	0.251 6	0.253 9	0.256 3	0.258 7	0.261 1	0.263 5	0.265 8
	700	0.244 3	0.246 7	0.249 1	0.251 4	0.253 8	0.256 2	0.258 6	0.261 0	0.263 4	0.265 7	0.268 1	0.270 5
	800	0.248 9	0.251 3	0.253 7	0.256 1	0.258 5	0.260 9	0.263 3	0.265 6	0.268 0	0.270 4	0.272 8	0.275 2
	900	0.253 6	0.256 0	0.258 4	0.260 8	0.263 2	0.265 6	0.267 9	0.270 3	0.272 7	0.275 1	0.277 5	0.279 9
	1 000	0.258 3	0.260 7	0.263 1	0.265 5	0.267 8	0.270 2	0.272 6	0.275 0	0.277 4	0.279 8	0.282 2	0.284 6

表中黄色、蓝色和灰色区域分别对应于与变制冷剂流量多联机的当量配管长度 8, 50 和 100 m。这也意味着在颜色区域外的冷水输送管过长,使得区域供冷系统能效低于变制冷剂流量多联机。实际上变制冷剂流量多联机的制冷剂配管达到 100

m 已属不合理,因此,区域供冷系统的供冷半径达到 800 m、支管 200 m 应该是能耗控制的极限。浦西能源中心的供冷系统最终根据这个原则设计。

3.4 大型地表水地源热泵应用对黄浦江的环境影响研究

世博园区地表水地源热泵的冷却水排放必然会对黄浦江水环境带来一定的影响,尽管它所带来的温升效应远远不及黄浦江沿岸六大电厂排热的影响,但不论程度轻重,都要积极地采取有效措施,以保护黄浦江生态。

研究团队对世博园 B 片区地表水地源热泵排水口附近水体作了速度场和温度场模拟^[5]。其详细结果可参见文献^[5]和^[7]。计算域内影响范围最广的是 0.3℃温升。虽然在涨、落潮交替流速很小的情况下 1℃温升将影响到 7 m 水深,但是由于在一天中涨、落潮交替的时间短,影响宽度(与江面宽度 400 m 相比)也很小,1℃温升只在排放口附近影响了水体。对于黄浦江水生环境留有足够的自然水温通道。这些影响均在相关国家标准规定范围之内。

3.5 江水源热泵系统的运行模式研究

以世博中心为对象,笔者对江水源热泵系统的运行及其与其他系统(例如冰蓄冷系统)的相互关系作了研究^[8]。主要研究结果如下:

1) 江水源热泵的取水量应该按照冬季需求进行设置,以减少取水管道建造费用。在夏季,可以由江水源热泵承担基载负荷,利用冰蓄冷调峰。夏季夜间由于空气湿球温度的降低,江水温度也有 3~5℃的下降,这对冰蓄冷系统的运行是有利的,可以提高夜间蓄冰时的机组效率约 5%。

2) 冬季黄浦江水温度较低,完全依靠江水源热泵供热有一定风险,也可能导致江水取水管管径过大,增加成本。因此提出由江水源热泵承担基础负荷,辅助天然气锅炉承担调峰负荷的冬季运行方案。在约 70%时间段内不用开启燃气锅炉。

为保证在江水温度过低时的供热品质,研究了江水源热泵串联运行以提高水温的方案(见图 14)。冬季大部分时间内用两台热泵机组运行即可满足热负荷需求,第三台热泵机组可以作为串联机组,以提高出水温度,经计算串联系统包括水泵在内的系统能效比可以达到 2.64,在技术上是可行的。但此时江水源热泵的供热成本为 0.341 元/(kWh),相当于天然气价格为 3.0 元/m³ 时的天然气锅炉供热成本。另外,图 14 中两台机组并联,再串联第三台机组,设计中循环水量平衡有一定难度;而如果一对一串联,则系统能效比会下降到

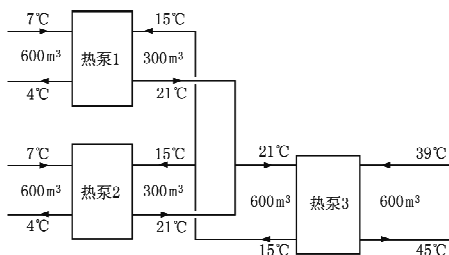


图 14 冬季江水源热泵的串联原理图

1.79。因此,最终没有采用此方案。

3) 对利用黄浦江水作冷却水的蓄冰式供冷系统的运行作了技术经济分析。根据全日冷负荷曲线及上海地区分时电价,制定了运行模式:夜间低谷电价时段,制冰主机制冰蓄冷;平时电价时段,由制冰主机满负荷运行,不足部分由融冰供冷满足负荷需求;而在高峰电价时段,优先融冰供冷。分析表明,冰蓄冷结合地表水地源热泵系统与常规地表水地源热泵系统的主机能耗差别不大,冰蓄冷主机能耗高 11.4%。蓄冰工况下尽管蒸发温度降低,但夜间黄浦江冷却水温度较低,致使主机 COP 值下降并不明显。而冰蓄冷结合地表水地源热泵系统与常规地表水地源热泵系统的系统总能耗差别较大,前者高 25.9%。这是由于蓄冰系统采用二次泵系统,一次乙二醇泵的功率也有较大幅度增加。但从系统运行费用分析可知,冰蓄冷结合地表水地源热泵系统与常规地表水地源热泵系统差别很大,前者低 29.8%。制定优化的蓄冰工况运行策略是降低系统运行费用的一个重要因素。

3.6 世博园江水源热泵和地源热泵的规模化应用
江水源热泵主要用于世博永久场馆(见表 4),充分发挥了世博园依江临水的区位优势,服务总面积达 61.8 万 m²。

表 4 2010 年上海世博会江水源热泵系统及其服务范围总览

建筑名称	能源系统形式	供冷供热面积/万 m ²	主要设计单位
世博轴	江水源热泵+桩源地源热泵	24.8	华东建筑设计研究院
世博中心	江水源热泵+冰/水蓄冷	14	华东建筑设计研究院
世博演艺中心	江水源热泵+冰蓄冷	8	华东建筑设计研究院
浦西新能源中心	江水源热泵区域供冷供热	15	同济大学建筑设计研究院

4 结论

4.1 采用江水源热泵、地源热泵和冰蓄冷技术后世博期间预计节约电力约 390 万 kWh,减少 CO₂ 排放约 3 360 t。

需要指出,由于还没有公认的建筑碳排放的基准线,此处采用了“规划方案下的清洁发展机制(PCDM)”的方法论,即在某一规划方案下,通过添加不限数量的相关 CDM 规划活动,与没有此规划方案活动时相比所产生额外的温室气体减排或增加温室气体汇的效益。数据只能作参考,而能不能达到预期的节能量和减排量,要看运行和监测的结果。

4.2 在大规模园区开发中,凸显建筑能源规划的重要性。能源规划中,要从技术、经济、环境甚至社会等多视角分析,坚持科学发展观。方案决策中,要充分发扬民主,听取各方意见,反复进行科学论证,克服长官意志和拍脑袋的做法。尤其是在近来全国“低碳城市”热的大环境下,区域能源规划应成为低碳城市建设不可或缺的程序。

4.3 集成应用可再生能源和未利用能源,是今后区域开发中的必然选项。而一个好的能源系统,一定要经过对可再生能源和未利用能源资源量的充分评估,通过情景分析方法对负荷作预测,并对各种主要影响因素进行敏感性分析。而在系统选择中,必须在能源效率、热效率和经济性方面作多角度的权衡,同时把降低输送能耗作为降低系统能耗最主要的措施。这是今后需要认真研究的课题。

参考文献:

- [1] 瞿燕. 上海世博园区空调动态负荷预测与研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [2] 尾岛俊雄,许雪,王健,等. 2010 年上海世博园能源系统规划的研究[J]. 暖通空调,2005,35(5):107-111

- [3] 世博科技专项研究报告(科技部、上海市科委,课题编号:05dz05807,2005BA908B07),城市清洁能源高效利用技术及系统的研究与示范,第 3 子课题 世博园区分布式供能系统及区域供冷供热技术的研究[R]. 同济大学,2008
- [4] Long Weiding, Liu Bing. Water source heat pump: an option of the DHC plan in Shanghai Central Business District[C]// Proceedings of International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Beijing, 1995
- [5] 张文字. 上海世博园大型地表水源热泵对黄浦江水环境的影响分析[D]. 上海:同济大学,2007
- [6] 张思柱. 上海世博园区域供冷空调系统的能耗与经济研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [7] 张文字,龙惟定. 地表水源热泵以黄浦江水作为冷热源的可行性分析[J]. 暖通空调,2008,38(3):15-20
- [8] 邓波. 上海世博园区域供冷系统采用大型地表水源热泵的配置与运行优化研究[D]. 上海:同济大学,2008
- [9] 吴筠. 上海世博园区域供冷冷源方案的技术经济分析与研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [10] 薛志峰,刘晓华,付林,等. 一种评价能源利用方式的新方法[J]. 太阳能学报,2006,27(4)
- [11] 冯小平. 上海世博园区域供冷系统管网优化设计研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [12] 范存养,龙惟定. 从日本世博会的冷热源方式对 2010 年上海世博会供能方式的初探[J]. 制冷技术,2003(3)
- [13] 世博科技专项研究报告(科技部,项目编号:2006BAK13B04),世博中心智能化生态建筑技术集成研究,子课题 1,公共活动中心绿色生态建筑适用技术的整合研究[R]. 同济大学,2009

(上接第 21 页)

不同的综合性大型公共建筑,可以根据自身办公区和商场区面积的大小,通过表 2 提供的能耗数据得出整个大楼各分项能耗的参考值。这为客观地比较不同大型公共建筑用能水平的高低提供了技术手段,可以为大型公共建筑的节能改造提供参考。同时可以看出,商办综合楼中商场区各项能耗密度约是办公区的 2~3 倍(室内设备除外),应该加以重视。

7 致谢

本研究在实施过程中得到上海市建设和交通委员会的大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 上海市节能监察中心. 上海市建筑节能专栏研究报告 2008[R]. 上海:上海市节能协会,2008
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2007[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007
- [3] 江亿. 建筑节能:走中国特色的节能之路[J]. 中国建设信息,2008(6)
- [4] 王惠文. 最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000
- [5] 王荣光,沈天行. 可再生能源利用与建筑节能[M]. 北京:机械工业出版社,2006