

城市热网驱动的温湿度独立控制 空调系统节能减排效果分析*

清华大学 刘拴强[★] 江 亿

北京华创瑞风空调科技有限公司 刘 昕 陈晓阳

摘要 分析了利用城市热网降低夏季空调电耗的方法,并对采用城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统的应用方式进行了介绍。分析了这种系统与常规空调系统在初投资、运行能耗和运行费用方面的差异,指出采用温湿度独立控制空调系统带来的初投资增量为 16 元/ m^2 ,且在目前的热价基础上运行 3 年即可收回增加的投资。就该系统大面积推广后在节能减排方面的显著效果进行了计算和对比,指出了推广该系统的重要意义。

关键词 城市热网 温湿度独立控制 经济性 节能 减排

Energy saving and pollution reduction effect of temperature and humidity independent control air conditioning system driven by urban heat supply network

By Liu Shuangqiang[★], Jiang Yi, Liu Xin and Chen Xiaoyang

Abstract Presents methods of reducing power consumption of air conditioning system in summer, and the application mode of temperature and humidity independent control (THIC) air conditioning system driven by urban heat supply network. Analyses the difference in initial costs, energy consumption and operation costs between the THIC system and conventional air conditioning system. The result shows that the increment in initial cost of THIC system is 16 Yuan per square metre, and it can be recovered within three years according to the current heating price. Points out the significant effect on energy saving and pollution reduction of popularizing the THIC air conditioning system.

Keywords urban heat supply network, temperature and humidity independent control, economy, energy saving, pollution reduction

[★] Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

我国当前面临着经济快速发展和人口增长与资源环境约束的突出矛盾,再加上温室气体排放引起的全球气候变化已经成为迫切需要解决的问题。因此,节能减排、建设资源节约型社会,已经成为当前最紧要的工作。目前我国北方城镇共有供暖建筑 65 亿 m^2 ,其中约 70% 采用不同类型的集中供暖^[1],以北京市为例,采用城市热网集中供热的面积约有 1 亿 m^2 ,其中相当大的一部分采用热电联产的供热方式。这种方式在冬季运行效率很高,但

是夏季由于没有供热负荷而无法运行热电联产模式,使得电力负荷出现高峰的夏季热电联产发电机组反而停机不发电,或者按纯发电模式低效运行。但是,目前北京市夏季用电尖峰负荷显著高于冬季,2005 年夏季最大负荷已达到 1 065 万 kW,最大峰谷差也突破了 500 万 kW,特别是占建筑用电负荷 40% 的空调系统耗电,已经成为北京地区电力供应紧缺的主要原因和矛盾焦点^[2]。随着北京

①☆ 刘拴强,男,1981 年 6 月生,博士研究生,博士
100084 北京清华大学建筑技术科学系
(010) 62773772
E-mail: Liusq03@mails.tsinghua.edu.cn
收稿日期:2009-01-14

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(编号:2006BAJ01A08-06)

市新建建筑不断投入使用,电制冷空调装机容量逐年递增,这一问题也将日趋尖锐。

1 解决问题的可能途径及可行性分析

针对上述问题,可以利用现有城市热网的热水在夏季驱动空调,解决部分建筑的集中空调问题,这种方式既削减了夏季空调用电负荷,又增加了热电厂的发电量,解决了夏季空调峰值负荷时的供电不足问题,而且还提高了一次能源(以煤为主)的综合利用效率,是热电联产系统可持续发展的关键^[3]。

利用城市热网解决夏季空调问题的途径之一是采用溴化锂吸收式冷水机组,但由于夏季城市热网的热水供回水温度在 90℃/70℃ 左右,此时吸收式制冷机的 COP 通常不超过 0.7,在很多时候是不经济的^[4-5]。而且,空调冷负荷随时间的波动很大,但冷水的冷量很难被蓄存起来,因此,采用吸收式制冷必然导致热网的热负荷有较大波动,这不利于热网的稳定运行。另外一种利用城市热网解决夏季空调问题的途径是采用基于溶液调湿技术的温湿度独立控制空调系统,其中溶液调湿新风机组由城市热网的热水驱动,可以承担占建筑总负荷约 40% 的新风负荷与人员潜热负荷,其余占总负荷 60% 左右的显热负荷由 17℃ 左右的高温冷水机组来承担。由于冷水温度从传统的 7℃ 提高到 17℃,大型离心式制冷机的 COP 可提高 40%^[6] 以上,从而显著降低空气处理的能源消耗。此外,盐溶液还具有很强的蓄能特性,单位体积溶液的蓄能能力可达 500~1 000 MJ/m³^[6-7],这使得系统可以实现连续用热、间歇空调的运行模式,对维持热网的稳定运行提供了重要的保障。

2 城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统构成及应用方式

由城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统主要由水冷式溶液调湿新风机组、溶液再生器、高温冷水机组、干式风机盘管(或毛细管辐射末端)等设备组成(上述设备的具体原理请参阅文献^[8]),其中前两种设备共同组成湿度控制系统处理潜热负荷,城市热网的热水用于溶液再生器中对经过除湿后的稀溶液进行再生浓缩,而后两种设备则组成温度控制系统处理显热负荷。该空调系统的原理如图 1 所示。

夏季运行时,由高温冷水机组产生 17℃ 左右的冷水,进入室内的干式风机盘管对室内空气进行

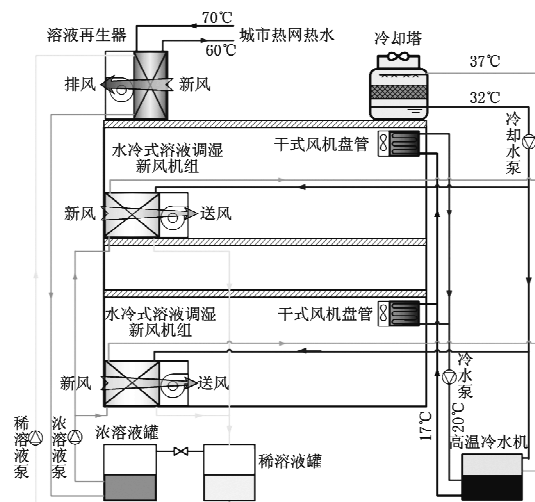


图1 城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统夏季运行原理

显热降温(等含湿量降温,即干工况处理),承担包括太阳辐射、围护结构传热、人员和设备产生的热量等全部显热负荷,以维持适宜的室内温度。此时,冷水机组的 COP 可以提高到 8.0 以上,而大型离心式制冷机当冷水温度为 7℃ 时的 COP 在 5~5.5 之间,即 COP 可以提高 40% 以上,则制冷机运行的电耗可以减少 40% 以上。同时,由城市热网的热水(70℃/60℃)驱动溶液再生器不断将稀溶液再生为浓溶液,进入浓溶液罐储存,再通过溶液循环泵将浓溶液输送到位于建筑各层的水冷式溶液调湿新风机组中,对新风进行除湿,并使用冷却塔的冷却水对除湿过程的溶液进行冷却。经过除湿之后的新风含湿量已经降低到 8 g/kg 左右,送入室内后即可承担包括人员产湿、渗透新风产湿等室内全部潜热负荷。

当运行冬季工况时,通过管路切换,将城市热网的热水通入溶液调湿新风机组中,对新风进行加热加湿,处理至 20℃,7.5 g/kg 左右送入室内,以维持适宜的室内湿度。同时,将热水通入干式风机盘管中对室内进行加热。

3 系统应用实例及经济性分析

为了具体说明采用城市热网驱动的温湿度独立控制空调与常规空调方式在运行经济性、节能减排方面的显著优势,笔者以北京地区某 20 000 m² 写字楼为例,分析该系统与常规空调系统在初投资、运行能耗、节能减排等方面的差异。

3.1 负荷计算

根据建筑的人员密度情况以及卫生要求,确定

该建筑总新风量为 69 000 m³/h。同时,根据围护结构参数及北京市夏季设计日气象参数进行建筑负荷计算,结果如表 1 所示。分析负荷计算的结果可以看到,当采用温湿度独立控制空调系统时,由

热网驱动的溶液调湿新风机组承担约 40% 的总负荷,高温冷水机组承担约 60% 的总负荷。如果采用常规空调方式,则所有的负荷均由普通冷水机组承担,设计峰值冷负荷为 2 406 kW。

表 1 夏季设计日负荷计算结果

	时刻											
	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
显热负荷/kW	1 021	1 273	1 374	1 427	1 368	1 369	1 467	1 484	1 472	1 455	1 214	
潜热负荷/kW	845	922	922	922	896	896	922	922	922	922	811	
总负荷/kW	1 867	2 195	2 296	2 349	2 264	2 265	2 389	2 406	2 394	2 377	2 025	
显热指标/(W/m²)	51	64	69	71	68	68	73	74	74	73	61	
潜热指标/(W/m²)	42	46	46	46	45	45	46	46	46	46	41	
总负荷指标/(W/m²)	93	110	115	117	113	113	119	120	120	119	101	

3.2 设备选型与初投资对比

根据负荷计算结果,对采用常规空调方式和城市热网驱动的温湿度独立控制空调方式两种设备选型及初投资进行了估算,如表 2 所示。由估算比较结果可知,对于 20 000 m² 的写字楼,采用城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统比常规空调方式初投资增加约 31.7 万元,折合 16 元/m²。

表 2 两种空调系统设备选型及初投资比较

设备名称	温湿度独立控制空调系统		常规空调系统	
	技术参数	数量	技术参数	数量
冷水机组	制冷量 744 kW	2 台	制冷量 802 kW	3 台
冷水循环泵	流量 213 t/h	3 台	流量 140 t/h	4 台
冷却水泵	流量 170 t/h	4 台	流量 170 t/h	4 台
冷却塔	流量 170 t/h	3 台	流量 170 t/h	3 台
风机盘管	TFP-136, 制冷量 3.1 kW	478 台	42CE-04, 制冷量 3.7 kW	496 台
新风机组	WCVF-10, 风量 10 000 m ³ /h	7 台	风量 10 000 m ³ /h	7 台
再生器	WHSR-20, 风量 20 000 m ³ /h	3 台		
热水泵	流量 100 t/h	2 台		
稀溶液泵	流量 14 t/h	2 台		
浓溶液泵	流量 12.8 t/h	2 台		
储液罐	体积 5 m ³	2 个		
蓄能溶液	50% LiBr	10 t		
初投资费用总计	728.25 万元		696.55 万元	

注:1) 表中所列设备数量为实际采购数量,水泵和溶液泵均有 1 台备用;

2) 初投资费用包括所有空调系统设备、空调楼宇自控系统及设备安装费用。

3.3 运行能耗分析

3.3.1 系统运行峰值耗电量计算比较

在城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统中,由于占总负荷近 40% 的新风负荷是以热水为驱动力的,因此该空调系统的装机容量,即峰值运行电耗较常规系统会显著降低,这对于降低电网夏季空调高峰时的用电压力有着非常重要的意义。表 3 对两种空调系统全部设备的功率进行了统计,

表 3 两种空调系统峰值功率比较 kW

设备名称	温湿度独立控制空调系统		常规空调系统	
	单台功率	功率合计	单台功率	功率合计
冷水机组	92.5	185	160	480
冷水循环泵	30	60	22	66
冷却水泵	22	66	22	66
冷却塔	5.5	16.5	5.5	16.5
风机盘管	0.09	43.0	0.052	25.8
水冷式溶液调湿新风机组	5.3	37.1	3.7	25.9
再生器	13.6	40.8		
热水泵	9.5	9.5		
稀溶液泵	3	3		
浓溶液泵	2.7	2.7		
合计		463.6		680.2

由比较结果可知,对于 20 000 m² 的写字楼,采用温湿度独立控制空调系统,可减少电网峰值负荷约 218 kW,折合 10.9 W/m²,与常规空调系统相比峰值耗电量降低了 32%。

3.3.2 夏季空调能耗比较

首先根据夏季设计日逐时负荷计算逐时的耗电量和耗热量,然后根据夏季平均负荷系数确定整个夏季的运行能耗,结果如表 4 所示。由结果可知,对于 20 000 m² 的写字楼,采用温湿度独立控制空调系统,夏季耗电量约 496.3 MWh,而常规空调系统则需要耗电 738.1 MWh,前者可减少耗电量约 242 MWh,折合 12.1 kWh/m²。此外,20 000 m² 写字楼应用城市热网热水驱动的温湿度独立控制空调系统,在整个供冷季所需的耗热量约 4 679 GJ,折合 0.23 GJ/m²。

表 4 夏季空调系统能耗比较

比较项目	温湿度独立控制空调系统		常规空调系统
	耗电量/(kWh/d)	耗热量/(GJ/d)	
设计日能耗	4 726	45	7 030
供冷季能耗	496.3	4 679	738.1
			0

当运行冬季工况时,上述两种系统都是利用城市热网的热水进行加热、加湿,因此能耗区别不是很明显。此外,北方地区城市热网集中供暖大多是按照面积收费,因此,本文对两种空调系统冬季工况的运行能耗及费用不作比较。

3.4 运行费用分析

城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统与常规空调系统每单位面积的运行费用以及运行费用比可按照下面的公式计算:

$$Z_1 = J_E E_1 + J_H H_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = J_E E_2 \quad (2)$$

$$Y = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{E_1}{E_2} + \frac{J_H H_1}{J_E E_2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中 Y 为单位面积运行费用之比; Z_1 为温湿度独立控制空调系统单位面积运行费用; Z_2 为常规空调系统单位面积运行费用; E_1 为温湿度独立控制空调系统单位面积耗电量; E_2 为常规空调系统单位面积耗电量; J_H 为热价,元/GJ; J_E 为电价,元/(kWh); H_1 为单位面积温湿度独立控制空调系统耗热量。

北京市平均电价取为 1.0 元/(kWh),空调系统运行费用比随热价变化如图 2 所示,当夏季热价为 45 元/GJ 时,温湿度独立控制空调系统与常规空调系统运行费用基本相等。而目前北京城市热网夏季热价为 30 元/GJ 左右,如果采用温湿度独立控制空调系统,则整个夏季空调的运行费用约为常规空调的 85%,可节约 15%的运行费用,只需运行 3 年多即可收回增加的初投资。

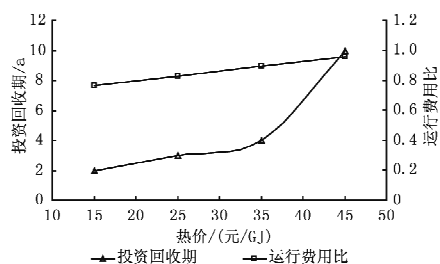


图2 运行费用比及投资回收期随热价的变化

实际上,现在夏季的热用户很少,管网输送热水的损失比较大、成本比较高,如果能够大面积推广采用城市热网热水驱动的温湿度独立控制空调系统,增加夏季热网的负荷,则热价有望降低到 20 元/GJ 左右,此时仅需 2 年即可收回增加的初投资,具有很好的经济效益。

4 节能减排效益综合分析

由于热网的热用户增加了,夏季热电厂的发电量(或发电效率)得以提高。此外,降低空调系统运行电耗,就意味着降低了电厂由于燃煤所产生的 CO_2 、 SO_2 及 NO_x 的排放量,对于国家节能减排的意义非常显著。目前,北京市有 1 亿 m^2 的建筑面积采用城市热网集中供暖,如果能把其中的 10%,即 1 000 万 m^2 改造为温湿度独立控制空调系统,将产生非常显著的经济效益和社会效益,如表 5、6 所示。

表 5 经济效益统计对比

项 目	温湿度独立控制 空调系统	常规空调 系统
总冷负荷/(W/ m^2)	120	120
总投资额/(元/ m^2)	364	348
峰值耗电量/(W/ m^2)	23	34
年运行耗电量/(kWh/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$))	24.9	37
削减峰值电量/(W/ m^2)	11	
年节约电量/(kWh/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$))	12.1	
年可节省标准煤/(kg/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$))	4.5	
相当于节约电厂和市电网 投资额/(元/ m^2)	53	

注:1) 每 t 标准煤的发电量约 2 700 kWh;

2) 建造电厂的投资约为 3 500 元/(kVA),输电电投资约 1 400 元/(kVA)。

表 6 减少污染物排放的社会效益统计对比

	kg/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)
年节省标准煤	4.50
年减少 CO_2 量	11.99
年减少 SO_2 量	0.101
年减少 NO_x 量	0.041
年减少烟尘	0.011
年减少煤渣	1.476

注:按每节省 1 t 标准煤减排二氧化碳 2.664 t、减排二氧化硫 0.022 4 t、减排氮氧化物 0.009 t、减排烟尘 0.002 5 t、减排煤渣 0.328 t 计算。

由表 5 可知,城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统的应用,如果不考虑节约的电厂及输送电网建设费用,前期投资额略高于常规空调系统,如果考虑上述费用,则对整个社会来说反而是节约了总的投资。特别是对空调季节用电高峰期的电力供应缓解能力显著,不用多投入电力供应设备,却有效缓解了电力需求。

由表 6 可知,热网驱动的温湿度独立控制空调系统如果可以推广 1 000 万 m^2 ,则每年可以减少 CO_2 排放量近 12 万 t,减少 SO_2 排放量 1 010 t,可见其节能减排意义非常显著。

5 结论

综合上述分析可知,推广城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统,具有很好的经济效益。(下转第 17 页)

图 6 为系统年总费用节省率随负荷不确定性的变化,可以看出年总费用节省率随负荷不确定性的增加逐渐减小。这说明,负荷不确定性会削弱三联供系统的优势。随着负荷不确定性的增加,三联供系统的核心设备容量基本保持不变,而辅助供能设备的容量增加,也可以认为是三联供系统中分供式供能方式所占的比例增大,导致整个联供系统相对于分供式系统的优势降低。

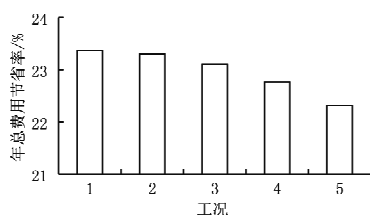


图 6 年总费用节省率随负荷不确定性的变化

5 结论

考虑负荷不确定性,建立了以年总费用期望值为目标函数的联供系统优化模型。针对一宾馆建筑的联供系统配置进行了研究,结果表明,负荷不确定性对三联供系统的优化配置容量有明显影响。考虑负荷不确定性后,三联供系统核心设备的优化配置容量基本保持不变,燃气轮机容量略有减小,而辅助设备的配置容量增加较大。经济性研究表明,考虑负荷不确定性后,联供系统的年度初投资

(上接第 8 页)

度独立控制空调系统的意义包括:

1) 由于采用热网的热水解决了占建筑总负荷 40%左右的空调除湿负荷,使得空调系统的耗电量有明显下降,降低了夏季空调高峰时的电力供应需求。

2) 解决了目前城市热网夏季热用户少、热损失大、热电厂发电量小(或发电效率低)等问题。

3) 可以使得最终用户夏季空调系统的运行费用降低 20%左右。

4) 可以显著降低 CO_2 , SO_2 , NO_x 等污染物的排放。

国家“十一五”规划纲要提出了“十一五”期间单位 GDP 能耗降低 20%左右,主要污染物的排放总量减少 10%的指标,各地区、各部门也都把节能减排工作摆到了非常重要的位置,推广城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统,正是响应了政府节

和年运行费用都有所增加,相对于分供式系统,联供系统的经济优势下降。本文结果可为联供系统配置和性能的可靠计算提供借鉴。

参考文献:

- [1] 刘莉,黄锦涛,丰镇平. 100 kW 微型燃气轮机冷热电联产的经济性分析[J]. 工程热物理学报,2004,25(6): 909-912
- [2] Salem S, Borghetti S, Tiomno T. Economic potential of natural gas-fired cogeneration in Brazil: two case studies [J]. Applied Energy,2000, 67 (3): 245-263
- [3] Oh Si-Doek, Oh Hoo-Suk, Kwak Ho-Young. Economic evaluation for adoption of cogeneration system [J]. Applied Energy, 2007, 84(3): 266-278
- [4] Zhang B H, Long W D. An optimal sizing method for cogeneration plants [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(3): 189-195
- [5] Gamou S, Yokoyama R, Ito K. Optimal unit sizing of cogeneration systems in consideration of uncertain energy demands as continuous random variables[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43 (9/12): 1349-1361
- [6] 李赟,黄兴华. 冷热电三联供系统配置与运行策略的优化[J]. 动力工程,2006,26(6):894-898
- [7] 张士杰,李宇红,叶大均. 燃机热电冷联供自备电站优化配置研究[J]. 中国动力工程学报,2004, 24(10): 183-188
- [8] 孔祥强. 基于燃气内燃机和吸附制冷机的微型冷热电联供系统研究[D]. 上海: 上海交通大学,2005

能减排的号召,具有重要的节能环保意义。

参考文献:

- [1] 江亿. 我国供热节能中的问题及解决途径[J]. 暖通空调,2006,36(3):37-41
- [2] 纪洪. 蓄冷空调用电技术在北京地区的应用[J]. 供用电,2007,24(1):13-15
- [3] 陈晓阳,江亿,李震. 湿度独立控制空调系统的工程实践[J]. 暖通空调,2004,34(11):103-109
- [4] 严德隆,张维君. 热电冷三联产综合节能条件[J]. 中国能源,1996(4):29-33
- [5] 付林,江亿. 热电冷三联供系统的节能分析[J]. 节能,1999(9):3-7
- [6] 江亿,李震,陈晓阳,等. 溶液式空调及应用[J]. 暖通空调,2004,34(11):88-97
- [7] 张小松,费秀峰. 溶液调湿蒸发冷却系统及其蓄能特性初步研究[J]. 大连理工大学学报,2001,41(S1): 30-33
- [8] 刘晓华,江亿. 温湿度独立控制空调系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2006