

北京市某大型公共建筑三联供系统的优化

北京建筑工程学院 郝学军[★] 王琳 刘铜 安强 纪格文

摘要 建立了以年度费用最小为目标函数的优化数学模型,对冷热电三联供系统的配置和运行方案进行了优化。结果表明,年度运行费用明显少于传统配置方案,但运行能耗却与传统配置方案相当。

关键词 建筑冷热电三联供 年度费用 年运行能耗 优化

Optimization of BCHP system of a large scale public building in Beijing

By Hao Xuejun[★], Wang Lin, Liu Tong, An Qiang and Ji Gewen

Abstract Establishes an optimization mathematic model with the least annual expenditure as an object function and optimizes configuration and operation options of the BCHP system. The results show that the annual operating expenditure is obviously less than that of traditional configuration option while the annual operating energy consumption is not reduced.

Keywords building cooling heating and power (BCHP), annual expenditure, annual operating energy consumption, optimization

[★] Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China

①

1 工程概况

本建筑总建筑面积 14.957 万 m²,其中地上面积 8.839 万 m²(有较大的中庭),地下建筑面积 6.118 万 m²。建筑体形系数为 0.15。全部为自用写字楼,主要用途为金融管理机构办公。办公人员 4 000 人左右。

2 冷热电负荷预测

为了合理地进行三联供系统的优化,通过 DeST 软件对该建筑的冷、热负荷进行了全年的逐时计算;根据设计单位提供的电气设计图纸进行电负荷预测,电负荷的逐时变化按照文献[1]所述方法进行预测。对该建筑冷热电负荷的预测结果见表 1 和图 1~3。

表 1 全年能耗累计值和峰值

	全年累计值/(MWh)	峰值/kW
冷负荷	25 121.142	12 273
热负荷	14 809.378	9 615
电负荷	63 880.770	11 839

3 系统组成

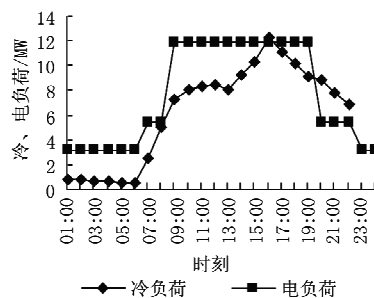


图 1 夏季典型日逐时负荷曲线

本系统属于建筑冷热电三联供系统(BCHP),能源供应规模较小。基于燃气内燃机发电功率较小、发电效率较高、可灵活调节等特点,选用燃气内燃机发电机组作为主要能源供给设备。吸收式冷

①[☆] 郝学军,男,1968 年 10 月生,硕士,副教授
100044 北京市展览路 1 号北京建筑工程学院环境与能源工程学院
(0) 13801325531
E-mail: xjhao@sina.com
收稿日期:2008-01-03
修回日期:2008-03-22

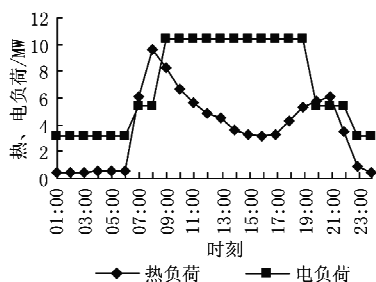


图2 冬季典型日逐时负荷曲线

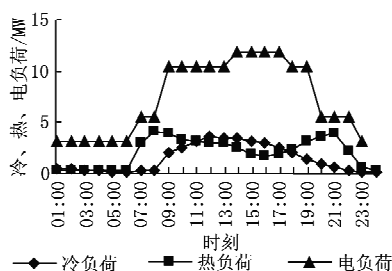


图3 过渡季典型日逐时负荷曲线

温水机与燃气内燃机直接对接,以燃气内燃机的余热作为热源,驱动吸收式冷温水机向建筑物供冷或供热。当制冷量不足时由离心式冷水机组来补充,供热量不足时由燃气锅炉来补充,燃气内燃机的发电量优先满足离心式冷水机组制冷所需电量,发电量不足时由市政电网来补充^[2]。三联供系统流程如图4~6所示。

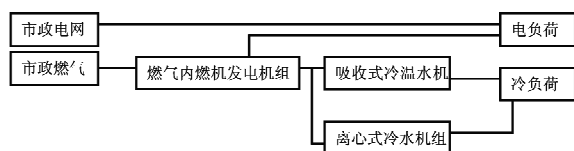


图4 夏季三联供系统流程

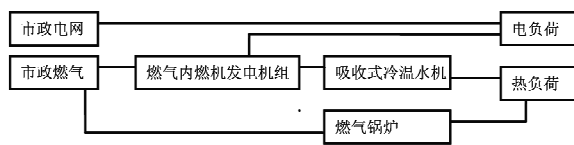


图5 冬季三联供系统流程

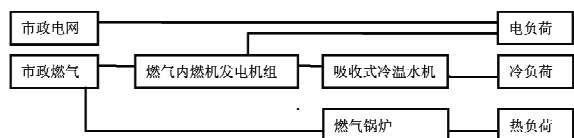


图6 过渡季三联供流程

4 三联供系统的优化

4.1 优化数学模型^[3]

从经济性出发,对冷热电三联供系统进行优化

的目标为年度费用的最小化。年度费用包含初投资和运行能耗费用,因此年度费用的目标函数可表示为

$$C = \min(C_i + C_r) \quad (1)$$

式中 C 为最小的年度费用; C_i 为各个设备年度等值初投资; C_r 为年度能耗费用。

$$C_i = R(C_{ge} + C_{ar} + C_{er} + C_{gb}) \quad (2)$$

式中 $C_{ge}, C_{ar}, C_{er}, C_{gb}$ 分别为燃气内燃机、吸收式冷温水机、离心式冷水机组、燃气锅炉的初投资,元,可按厂家提供数据近似看作设备容量的函数; R 为等额支付系列资金恢复系数, $R = i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$, 其中 i 为年利率, n 为设备使用寿命。

$$C_r = \sum P_g G_g \Delta t + \sum P_e E_e \Delta t \quad (3)$$

式中 P_g, G_g, P_e, E_e 分别为系统运行时间间隔 Δt 内的燃气价格、燃气体积、市政电价、市政供电量。由于天然气价格与市政电价并非定值,所以 Δt 取 1 h, 总能耗费用为不同时段值的累加。

约束条件主要考虑设备性能、设备负荷率以及各个设备与建筑物负荷之间的能流平衡。

设备性能约束:

$$E_{ge} = G_{ge} \eta_{E_{ge}} X_{ge} \quad (4)$$

$$Q_{ge} = G_{ge} \eta_{Q_{ge}} X_{ge} \quad (5)$$

$$Q_{ar} = Q_{ari} \eta_{ar} X_{ar} \quad (6)$$

$$Q_{er} = E_{er} \eta_{er} X_{er} \quad (7)$$

式(4)~(7)中 E_{ge} 为燃气内燃机的发电量; G_{ge} 为燃气体积; $\eta_{E_{ge}}$ 为燃气内燃机的发电效率; X_{ge} 为燃气内燃机的启停状态参数; Q_{ge} 为燃气内燃机的产热量; $\eta_{Q_{ge}}$ 为燃气内燃机的产热效率; Q_{ar} 为吸收式冷温水机的制冷量; Q_{ari} 为吸收式冷温水机所需的热量; η_{ar} 为吸收式冷温水机的效率; X_{ar} 为吸收式冷温水机的启停状态参数; Q_{er} 为离心式冷水机组制冷量; E_{er} 为离心式冷水机组耗电量; η_{er} 为离心式冷水机组的效率; X_{er} 为离心式冷水机组的启停状态参数。

设备负荷率约束:

$$V_{ge} \times 0.6 \leq E_{ge} \leq V_{ge} \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{ar} \leq V_{ar} \quad (9)$$

$$0 \leq Q_{gb} \leq V_{gb} \quad (10)$$

$$0 \leq Q_{er} \leq V_{er} \quad (11)$$

式(8)~(11)中 $V_{ge}, V_{ar}, V_{gb}, V_{er}$ 分别为燃气内燃机、吸收式冷温水机、燃气锅炉和离心式冷水机组

的容量; Q_{gb} 为燃气锅炉供热量。

能流平衡约束:

$$C_l = Q_{er} + Q_{ar} \quad (12)$$

$$H_l = Q_{gb} + Q_{ar} \quad (13)$$

$$E_{ge} + E_e = E_l + E_{er} \quad (14)$$

$$Q_{ge} = Q_{dh} + Q_{ari} \quad (15)$$

式(12)~(15)中 C_l 为冷负荷; H_l 为热负荷; E_e 为从电网的购电量; E_l 为电负荷; Q_{dh} 为排除的余热。

式(1)~(15)构成了该冷热电三联供系统的优化配置和运行的数学规划模型。

4.2 已知条件

计算该模型所需要输入的已知条件为:建筑物全年负荷的逐时值、天然气和电力的能源价格,以及设备初投资与容量的函数关系和设备效率与负荷率的函数关系。其中建筑全年负荷的逐时值在上文中已经给出,北京市电力价格和天然气价格见表 2,3。

表 2 北京市电力价格 元/(kWh)

谷段(23:00~7:00)	平段(7:00~10:00, 20:00~23:00)	峰段(10:00~20:00)
0.336 9	0.752 5	1.193 3

表 3 北京市天然气价格 元/m³

供暖	供冷
1.95	1.85

设备初投资与容量的函数关系为

$$\text{燃气内燃机发电机组 } C_{ge} = 5\,000V_{ge} \quad (16)$$

$$\text{吸收式冷温水机 } C_{ar} = 1\,800V_{ar} \quad (17)$$

$$\text{离心式冷水机组 } C_{er} = 970V_{er} \quad (18)$$

$$\text{燃气锅炉 } C_{gb} = 800V_{gb} \quad (19)$$

数学模型中各个设备的性能系数 η 随部分负荷率的下降而下降,均为实际负荷下的效率,燃气内燃机部分负荷率下降到 0.6 以下时,其热效率衰减加剧,故将其部分负荷率作为约束条件,如式(8)。

将这些已知条件代入上述数学模型就可得到该三联供系统的最优配置和运行方案。

4.3 优化结果

以系统年度费用最小为目标进行优化后的设备容量配置方案见表 4。

表 4 优化后的配置方案 kW

燃气内燃机	吸收式冷温水机	离心式冷水机组	燃气锅炉
5 245	8 523	3 750	4 129

运行方案如图 7~12 所示。

过渡季冷热负荷分配与冬、夏季相似。

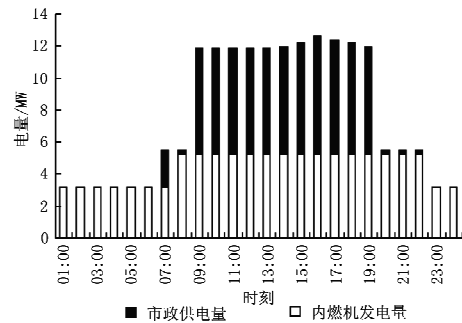


图 7 夏季电负荷平衡图

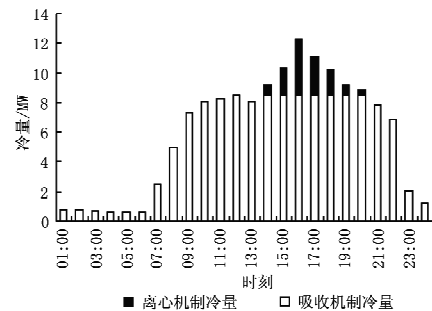


图 8 夏季冷负荷平衡图

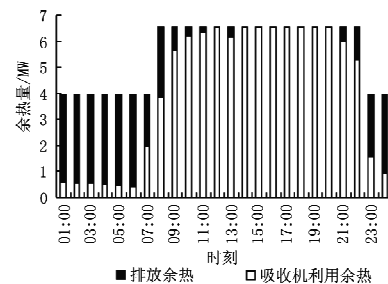


图 9 夏季余热平衡图

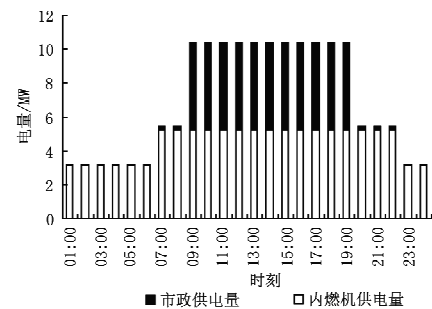


图 10 冬季电负荷平衡图

优化后的年运行费用和年运行能耗与传统配置运行方案的比较见表 5。

表 5 优化前后方案比较

	传统方案	优化方案
年运行费用/万元	5 533.7	4 689.6
年运行能耗/(MWh)	108 760.4	100 652.4

注:能耗按文献[4]的方法折合为等效电量。

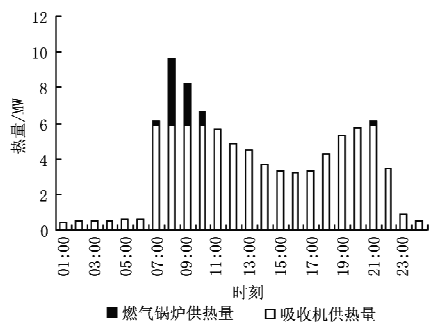


图 11 冬季热负荷平衡图

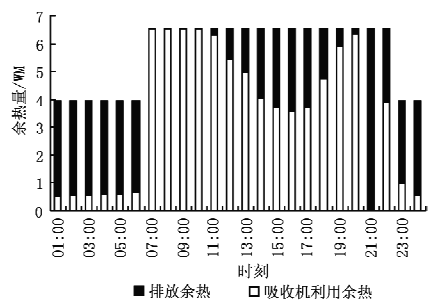


图 12 冬季余热平衡图

4.4 优化结果分析

从优化后的各设备配置情况及冷热电平衡图可看出：

1) 当以经济效益为目标优化时，允许燃气内燃机部分负荷运行，承担该建筑物低谷时的电负荷和冷热负荷；当电负荷和冷热负荷处在高峰时燃气内燃机满负荷运行，并且用电制冷和燃气锅炉作为补充，而不是令燃气内燃机一直满负荷运行。这是由于燃气当量电力价格按照天然气的热值以及内燃机的发电效率进行折算后明显低于市政电价，所以该系统尽量使用天然气作为能源，以达到经济效益最优的目的。

2) 当以经济效益为目标优化时，由于系统能

源需求大部分由天然气满足，虽然各设备配置基本能够保证利用率和运行的经济性，但是由于建筑物冷热负荷的逐时变化与内燃机余热所能提供的冷热量不能很好地匹配，所以造成大量余热的浪费。

3) 由表 5 可以看出，优化方案比传统方案年运行费用节省近 1 000 万元，具有一定的经济效益，但运行能耗与传统方案相当。

4) 根据优化后的初投资及年能耗费用可求得该三联供系统的投资回收年限，预测其回收年限不大于 5 a，故按静态法计算。

$$N = \frac{I}{A} \quad (20)$$

式中 N 为投资回收年限； I 为投资增量； A 为年能耗费用节省量。

由此求得该三联供系统回收期限为 3 a，因此具有一定的经济可行性。

5 结论

优化后的系统比传统的以热定电方案有明显的经济优势。但由于燃气内燃机发电机组的余热利用不能与建筑物冷热负荷很好地匹配，所以并没有发挥节能优势。对于建筑冷热电三联供系统，经济上的最优不一定是能耗上的最优。

参考文献：

- [1] 李辉, 江亿, 朱颖心. 热电冷联产系统中电负荷的模拟计算[C]//2004 年暖通空调制冷学术年会论文集, 2004
- [2] 段洁仪, 冯继蓓, 梁永建. 北京中关村软件园燃气轮机冷热电三联供方案[C]//03'中国分布式能源会议论文集, 2003
- [3] 张蓓红. 热电(冷)联供系统优化配置及运行策略的研究[D]. 上海: 同济大学, 2005
- [4] 江亿, 刘兰斌, 杨秀. 能源统计中不同能源核算方法的探讨[J]. 中国能源, 2006, 28(6): 5-8
- [5] Jens Pfafferott, Sebastian Herkel, Martina Jäschke. Design of passive cooling by ventilation; evaluation of a parametric model and building simulation with measurements[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(11): 1129-1143
- [6] Olsen E L, Chen Qinyan. Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(6): 561-571
- [7] 易伶俐. 北方地区办公建筑应用夜间通风研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- [8] Ruud M D, Mitchell J W. Use of building thermal mass to offset cooling loads[G]//ASHRAE Trans, 1990, 96(2): 820-829
- [9] Eto J H, Powell G. Implication of office building thermal mass and multi-day temperature profiles for cooling strategies [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1985, 41(1): 67-73
- [10] 武丽霞. 严寒地区大型超市应用夜间通风与人工制冷耦合运行研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [11] ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2004

(上接第 48 页)