

(上接第 30 页)

参考文献:

- [1] 白雪莲,孙纯武,郭林文. 公共建筑空调系统能耗实测与分析[J]. 重庆大学学报,2008,31(6):637-641
- [2] 王振江. 城市能源规划中建筑冷负荷预测方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2010
- [3] 川島実. 熱負荷予測ベンチマークテストの概要報告[J]. 空気調和衛生工学,1994,73(9):37-42
- [4] 严铭卿. 燃气工程设计手册[M]. 北京:中国工业出版社,2009
- [5] 赵荣义,钱以明,范存养,等. 简明空调设计手册[M]. 北京:中国工业出版社,2000
- [6] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中

国工业出版社,2006:33-36

- [7] 徐强,庄智,朱伟峰. 上海市大型公共建筑能耗统计分析[C]//第7届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集,2011,322-325
- [8] 姜益强,张志强,姚杨,等. 用 EnergyPlus 模拟检验影响节能办公建筑的因素[J]. 建筑科学,2006,22(6):23-25
- [9] 王金奎,史慧芳. 窗墙比在公共建筑节能设计中的应用[J]. 低温建筑技术,2010(9):102-103
- [10] 潘毅群. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用[J]. 暖通空调,2004,34(9):4-7
- [11] 罗智特,杜雁霞,贾代勇. 空调动态负荷计算方法及比较[J]. 制冷与空调,2005(2):57-61

办公建筑中冷热电联产系统的应用

同济大学 金琦[☆] 秦朝葵 郑华珍

摘要 利用 EnergyPlus 软件对上海办公建筑负荷进行了模拟计算,分析其全年负荷变化特点,得出上海办公建筑全年各月冷热负荷分配比例及各月的时刻负荷占比变化。结合日本的电力负荷数据得出上海地区办公建筑典型月各时刻热电比,并分析了办公建筑采用不同机型时的经济效益,为冷热电三联供选型提供参考。

关键词 冷热电三联供 办公建筑 热电比 EnergyPlus 负荷

Application of combined cooling heating and power system to office buildings

By Jin Qi[★], Qin Chaokui and Zheng Huazhen

Abstract Simulates annual loads of office buildings in Shanghai by means of EnergyPlus. Analyses the characteristics of load changes in a whole year. Obtains the ratio of heat and cool load in office buildings in Shanghai and the change of hourly load proportion. Combing electric load data in Japan, works out the hourly heat-to-electric ratio of office buildings in typical month in Shanghai. Compares the economic effects of different systems, which provides references for the selection of combined cooling heating and power system.

Keywords combined cooling heating and power system, office building, heat-to-electric ratio, EnergyPlus, load

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

冷热电联产(combined cooling, heating and power, CCHP)是指利用一种形式的一次能源同时生产冷、热、电三种不同形式的能量来满足用户用能需求的技术。CCHP通过能源的梯级利用,将高品质的天然气优先做功,回收余热或热量,可大大提高一次能源利用率。但目前三联供系统并没有获得预期的效益,主要原因之一是系统选型时采用概算指标,导致装机容量过大,设备在部分负荷工况下运行,达不到应有效果^[1],据统计,CCHP系统由于负荷计算不准确将导致30%以上的能源浪费^[2]。采用静态负荷指标难以对CCHP系统合理配置,其经济性不易实现,必须基于建筑动态负荷进行CCHP系统配置。日本对各类建筑的负荷数据进行分类统计、简化,给出建筑的全年冷、热、电、热水负荷变化数据,为三联供系统提供了数据支撑^[3]。我国目前缺乏相关的数据,因此有必要采用软件模拟的方式得到建筑负荷的全年动态变化参数,再对建筑

的负荷进行分析简化,为三联供系统选型提供数据与分析结果。

1 建筑建模

办公建筑的层数、建筑面积变化较大。据统计,上海的办公类建筑的单体规模在2万~11.7万m²之间,平均为4.10万m²,90%建筑面积在6.0万m²以下^[4]。建筑的负荷影响因素较多,本文着眼于办公建筑的典型负荷分析,因此在不影响建筑总体能耗的情况下作以下简化:1)建筑底面形状为长方形,为长方体建筑,层高相同;2)建筑模型各层为一个房间,不进行分区;3)建筑围护结构热工参数相同,建筑均为南向。依据以上简化原则,并且根据JGJ 67—2006《办公建筑设计规范》中的相关规定建立模型,见表1。

①☆ 金琦,男,1991年3月生,在读硕士研究生
201804 上海市嘉定区曹安公路4800号同济大学
(0) 18818203567
E-mail:jq15951981557@sina.com
收稿日期:2013-11-16
修回日期:2014-01-13

表 1 建筑模型相关参数

模型编号	底面长边/m	底面短边/m	建筑层数	层高/m	窗墙面积比/%	建筑面积/m ²	体形系数
1	40	20	6	4	35	4 800	0.19
2	40	30	15	4	45	18 000	0.13
3	40	40	25	4	55	40 000	0.04
4	60	20	6	4	55	7 200	0.18
5	60	30	15	4	35	27 000	0.12
6	60	40	25	4	45	60 000	0.09
7	100	20	6	4	45	12 000	0.20
8	100	30	15	4	55	45 000	0.10
9	100	35	6	4	35	24 000	0.11
10	100	40	25	4	45	100 000	0.08

模拟时使用的参数主要根据 GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》确定,模型建筑的外围护结构选择统一的参数。表 2 为办公建筑室内设计参数。

表 2 办公建筑室内设计参数

夏季			冬季			新风量/(m ³ /(人·h))
温度/℃	相对湿度/%	风速/(m/s)	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m/s)	
25	40~65	0.15~0.30	20	30~60	0.1~0.2	30

2 建筑动态负荷特性

建筑动态负荷主要包括围护结构、新风、人员、照明、电器设备等负荷。本文以上海地区的办公建筑为例,建立简化模型,利用软件模拟并分析模拟结果,通过对模拟数据的整理得出区域规划阶段的负荷估算指标及能耗的年、月、日变化特点,为三联供的设备选型及控制提供参考依据。

2.1 负荷分析

办公楼平均每天的用电时间为 10~12 h,各月电力负荷波动幅度不大,全年生活热水负荷绝对值较小,且随环境温度变化而波动。每天空调运行时间段为 07:00—18:00。冷负荷集中于 6—9 月,热负荷集中在 12—3 月,过渡季基本无冷热负荷。利用 EnergyPlus 软件模拟,得出全年 8 760 h 的逐时负荷。为了便于观察全年逐日的负荷变化情况,将每天的逐时负荷叠加就得到每天的日总负荷。图 1 是 1 号模型全年逐日负荷变化数据图。从图中可以看出,办公建筑全年逐日负荷波动大,夏季日负荷值高,过渡季节日负荷几乎为 0,冬季的日负荷较小。

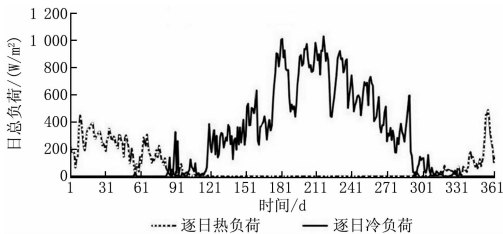


图 1 1 号模型建筑逐日冷热负荷数据

冬季室内设计温度为 20℃,夏季温度为 25℃时,得出 10 栋办公建筑模型的全年负荷的累计值,取同一时刻各建筑负荷的最大值可以得到全年累计负荷的最大值,计算得出全年累计热负荷变化范围为 48~71 MJ/(m²·a),全年累计冷负荷为 365~410 MJ/(m²·a)。同理也可以得出冬季室内设计温度为 22℃时的累计热负荷变化范围为 61~96 MJ/(m²·a),夏季室内设计温度为 24℃时的累计冷负荷变化范围为 395~450 MJ/(m²·a)。

2.2 负荷动态特性

负荷动态特性即建筑冷热负荷的逐时变化特性,反映了不同影响因素下的建筑冷热负荷水平。通过建筑冷热负荷动态特性,可以更全面地了解建筑冷负荷情况。

2.2.1 设计负荷概算指标

负荷指标反映的是在最不利条件下的建筑负荷。本文采用上海室外计算温度对应下的逐时冷负荷的平均值作为该建筑模型的冷负荷概算指标,该类型建筑所有模型样本冷负荷的平均值作为该类建筑的冷负荷概算指标^[5],即:

$$q_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{i,j}}{mn}$$

(1)

式中 q_0 为建筑冷负荷指标, W/m²; m 为该类型建筑模型样本数; n 为室外计算干球温度出现的次数; $q_{i,j}$ 为模型 i 第 j 次出现室外计算干球温度时的建筑冷负荷, W/m²。

上海冬季室外计算温度为 -1.2℃,冬季室内

设计温度为 20℃。夏季空调室外计算干球温度为 34.6℃,湿球温度为 28.2℃,日平均温度为 31.3℃,夏季室内设计温度为 25℃。供暖期是 12 月

31 日至次年 2 月 28 日^[6]。采用式(1)求得相应的热负荷指标为 56 W/m²、冷负荷指标为 107 W/m²,夏季与冬季的样本点负荷见表 3。

表 3 建筑模型供冷/供暖样本点负荷

W/m²

	建筑编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
冬季瞬时热负荷	59.2	57.9	56.0	64.1	60.0	51.9	65.5	52.3	51.8	54.7
	56.9	55.5	53.8	61.6	52.4	49.9	62.7	50.3	49.6	52.0
夏季瞬时冷负荷	96.1	101.2	100.4	98.0	96.0	97.9	99.3	97.7	95.6	97.6
	111.6	117.7	117.4	113.2	113.4	116.4	118.4	115.1	114.0	115.8
	105.3	110.7	110.7	106.4	104.0	108.2	109.0	106.7	105.0	107.0

注:样本点是指每个建筑模型中所取的样本,表中每个模型的热负荷取了 2 个样本点,冷负荷取了 3 个样本点。

2.2.2 冷热负荷动态特性

用 8 760 h 的逐时冷热负荷值除以相应的冷热负荷指标,得到介于 0~1.0 之间的量纲一数据(大于 1.0 的值按 1.0 处理),以表征建筑冷热负荷动态特性。结果显示,大部时间的负荷都只能达到负荷指标的 60%,其余时刻设备均在低效率下运行。办公建筑夏季冷负荷大,冬季热负荷较小,过渡季长且过渡季负荷小,办公建筑负荷全年波动大。

2.3 电力负荷及生活热水负荷

生活热水一般只在高档办公楼里才供应,与冷热负荷相比,生活热水负荷所占比例较低,而电力负荷采用软件计算结果,是根据输入的照明和设备小时系数计算的,与实际偏差较大,并且目前电力负荷基本没有计算软件和计算方法,而完整的、科学分类的实测电力数据亦不可得。考虑到日本与上海的经济水平较为接近,所以电力、生活热水负荷的数据可以采用日本已有的统计数据。

图 2 显示了日本标准办公建筑各月电力、生活热水负荷占其全年总负荷的比例。如图 2 所示,全

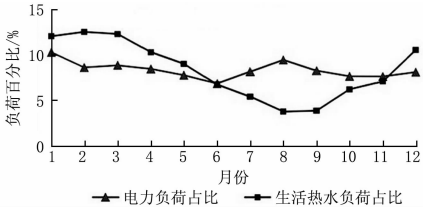


图 2 各月电力、生活热水负荷占其全年总负荷比例

年电力负荷波动幅度不大,生活热水负荷波动较大。对于标准的办公建筑,其全年电力负荷为 156 kW·h/m²,生活热水负荷为 2.6 kW·h/m²。各月电力负荷值相差很小,并且每天的电力负荷总体变化趋势一致。生活热水负荷各月、平均每天的负荷变化幅度较大。

2.4 热电比

为便于分析全年负荷变化情况,引入热电比指标。热电比 γ 是指同一时间内耗热量与耗电量的比值:

$$\gamma = \frac{Q_{re}}{Q_e} = \frac{Q_c + Q_h + Q_s}{Q_e} \quad (2)$$

式中 Q_{re} 为耗热量, kW; Q_c 为空调制冷能耗, kW; Q_h 为空调供热能耗, kW; Q_s 为生活热水能耗, kW; Q_e 为耗电量, kW。考虑到通常采用的蒸汽型吸收式机组的 COP 在 1~1.2 之间,为便于计算, COP 取为 1,即实际的建筑冷负荷值为空调制冷能耗量。各月负荷占比乘以对应的全年冷负荷、热负荷、生活热水负荷、电力负荷,则可以得出各月的耗热量、耗电功率。由式(2)得各月的平均热电比。从图 3、4 中可以看出,办公建筑全年月平均热电比变化很大,冬季热电比为 0.5 左右,夏季最高可达 2.08,4 月、11 月最小,分别为 0.26 和 0.18。

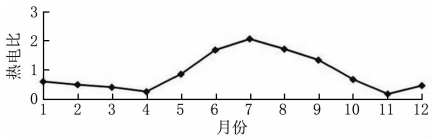


图 3 月平均热电比

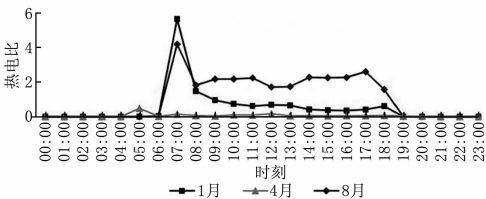


图 4 典型月份不同时刻热电比

3 CCHP 系统应用分析

天然气 CCHP 系统具有很高的能源效率、经济性和环保性能。采用上文得到的冷热负荷数据和日本已有的电力负荷、生活热水负荷统计数

据,结合办公建筑的电力负荷、冷负荷、生活热水负荷、热负荷的实际情况来考虑三联供设备选型问题。规划天然气系统应综合考虑用户类型、负荷特性以及外部环境和当地政策,选择合适的系统方式。

3.1 CCHP 系统组成

CCHP 系统包括发电机组、余热驱动的制冷机组以及余热驱动的供热及生活热水系统和控制系统。主要有两种运行方式:以电定热和以热定电^[3]。

系统选择主要是确定原动机和余热利用系统。原动机的选择考虑的因素有发电功率、发电效率、余热利用率、供气压力、造价以及环境保护。余热利用优先顺序是生活热水>供暖>制冷,余热利用设备的设置顺序应按设备用热品质而定,沿余热热水系统的上游至下游依次布置吸收式制冷机组、供暖换热器和供热水换热器,最后为调节热负荷的冷却塔。

3.2 系统选择分析

分别取 8 月、1 月、4 月为制冷季、供暖季、过渡季的典型代表月。如图 5~8 所示,1 月、8 月平均

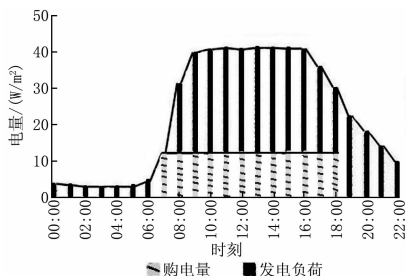


图5 1月各时刻电力图

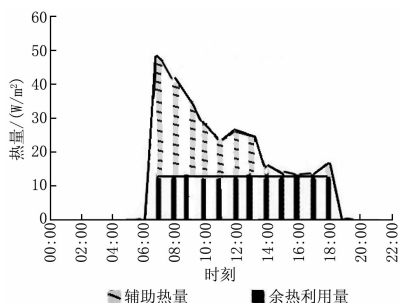


图6 1月各时刻热力图

每天 07:00 的电力消耗少,而热负荷相对大,从而造成热电比很大。4 月可以不考虑热量消耗。实际应用时并非由 CCHP 系统负担全部的电力负荷,实行“购电控制”措施,即在低负荷时段控制

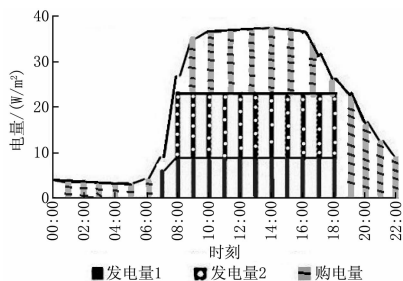


图7 8月各时刻电力图

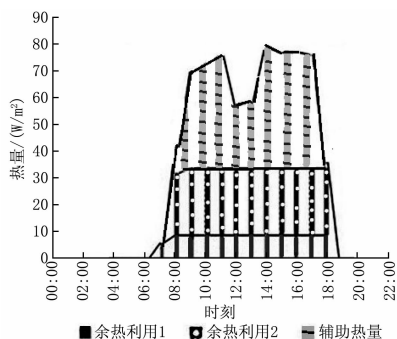


图8 8月各时刻热力图

发电机的发电量,维持一定的购电量——最低购电量。考虑到国内 CCHP 系统发电上网受到政策限制,因此选择以电定热的模式。从图 5,6 中可以看出,1 月 07:00 时热负荷大而电力负荷小,以 07:00 时的电力负荷确定 1 台原动机的容量,由于机组有确定的热电比,则对应产生的热量也可以确定。

以 1 月份确定的各时刻发电量、产热量为基础,再运行 1 台发电机组,如图 7 中的发电量 2 部分所示,对应的余热如图 8 中余热利用 2 部分所示。以上分析时选择机组热电比为 1.5,实际情况应以最大经济效益选择合适的机组以及热电比。

4 系统运行经济分析

4.1 计算公式及效益模拟

由于采取以电定热的模式,考虑尽量减少热量损耗。分析在不同热电比情况下,运行 CCHP 系统的经济性。上海办公建筑的平均面积为 4 万 m^2 。在天然气价格为 3.9 元/ m^3 、电价为 1.1 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)的情况下,通过下列公式可以计算得到 CCHP 系统的运行经济效益,计算过程中,CCHP 系统产生的蒸汽量折算成天然气耗量。

$$P = EC_e + L_{\text{gy}}C_g - L_gC_g \quad (3)$$

式中 P 为 CCHP 系统收益,元; E 为发电系统的发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; C_e 为电价,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); L_{gy} 为

CCHP 系统产生的余热量折合的天然气耗量, m^3 ;
 C_g 为天然气价格, 元/ m^3 ; L_g 为发电系统天然气耗量, m^3 。

根据相关数据可以得到 1 月、8 月平均每天逐时耗热量、耗电功率, 如图 9 所示。

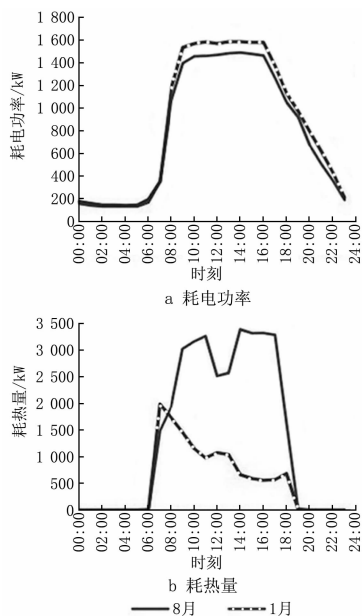


图 9 8 月、1 月平均每天逐时耗电功率与耗热量

计算使用的 2 台机组型号及热电比如下: 1) 美国产型号 G3508LE 机组, 额定功率 1 025 kW, 热电比 1.42。2) 美国产型号 1160GQKA 机组, 额定功率 1 160 kW, 热电比 1.04。

如图 10, 11 所示, 对于热电比较高的 G3508LE 机组平均每天产生的余热量大, 在夏季应用良好, 但冬季浪费较大。对于热电比较小的 1160GQKA 机组, 由于其额定功率大一些, 日常能满足电力负荷的需求, 但是夏季供热不足, 冬季浪费较少。

按式(3)计算 2 台机组的运行效益。图 12, 13 分别为 8 月和 1 月平均每天运行 G3508LE, 1160GQKA 机组的效益曲线。

虽然 G3508LE 机组的热电比较高, 但其发电效率为 34.14%, 低于 1160GQKA 机组的 39.4%。在供暖季节, 由于 2 台机组的余热量都足以保证建筑所需要的热量, 热电比较大的 G3508LE 机组的优越性没有体现, 大量的热量没有利用。因此热电比为 1.04 的 1160GQKA 机组效益高于热电比为 1.42 的 G3508LE 机组。

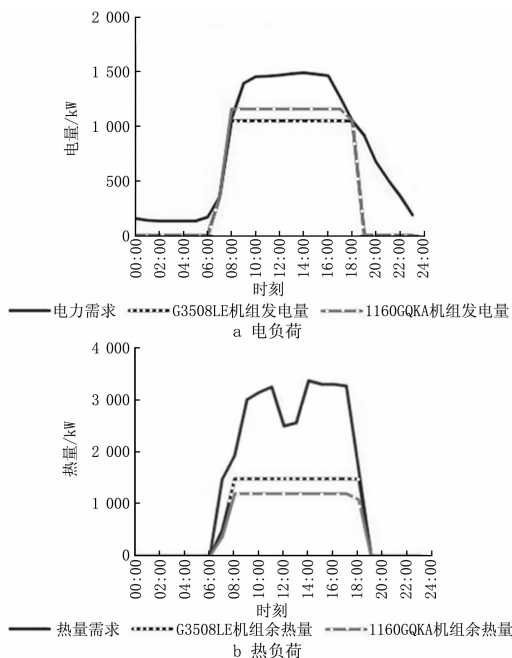


图 10 8 月电负荷及热负荷构成图

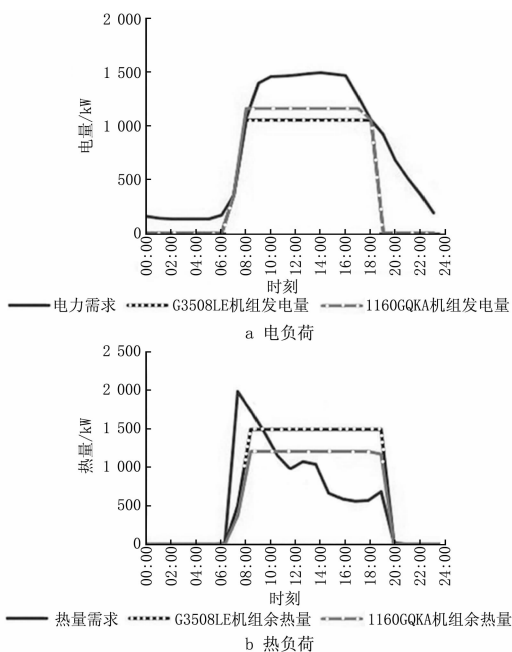


图 11 1 月电负荷及热负荷构成图

4.2 机组选择优化

采用 1 台机组供应建筑物的电、热的可调性能不高, 出现故障时容易造成电力供应不足。采用 2 台机组阶梯开启可调性能较高。第 1 台机组容量选择主要以保证冬季的热量需求为主, 兼顾电力负荷需求。选择 2 台机组, 型号为 G3412TA, 额定功率 519 kW, 热电比 1.12。冬季只运行 1 台机组,

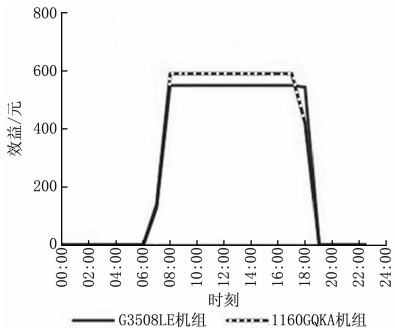


图 12 8月平均每天逐时效益

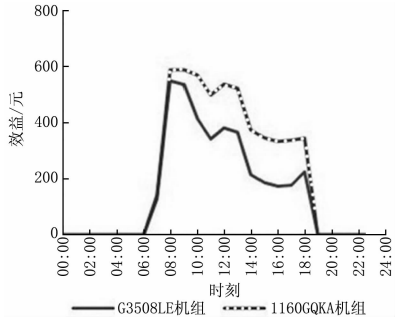


图 13 1月平均每天逐时效益

夏季阶梯开启燃气发电机承担建筑的部分电力负荷、热力负荷。按式(3)计算其运行效益,图 14 为冬季运行 1 台 G3412TA 机组和夏季运行 2 台 G3412TA 机组的效益曲线。从图中可以看出,夏季装机容量为冬季 2 倍时,其效益也为冬季的 2 倍。主要是因为冬、夏季机组发电量及余热都能充分使用。

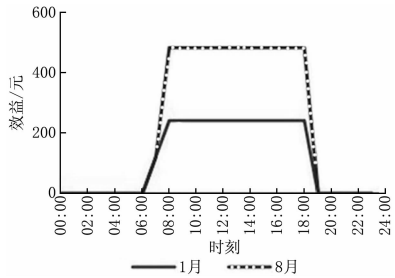


图 14 1月、8月平均每天运行效益

图 15 为 1 月分别运行 G3508LE, 1160GQKA, G3412TA 机组时平均每天各时刻发电 1 kW·h 的效益曲线。装机容量最小的 G3412TA 机组的效益最高,主要是因为它产生的余热能全部用来给建筑物供暖。效益较低的是 G3508LE 机组,因为其排热量最大,余热没能充分利用。图 16 为 8 月分别运行 G3508LE, 1160GQKA, 2 台 G3412TA 机组时平均每天每发电 1 kW·h 的效益曲线。从图

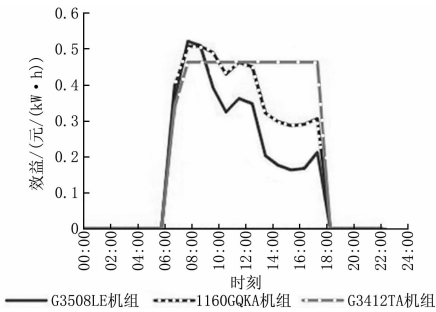


图 15 1月平均每天发电 1 kW·h 的效益

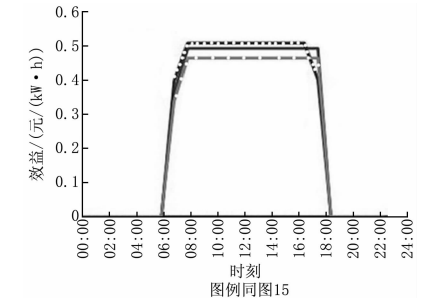


图 16 8月平均每天发电 1 kW·h 的效益

中可以看出,夏季热负荷大,各机组的余热量能充分利用,没有排热时,发电 1 kW·h 的效益以热电比最小的 1160GQKA 机组最大。

由以上分析可得,大的装机容量在夏季虽然能带来更好的效益,但是在冬季也会产生大量的排热,造成资源浪费。小的装机容量机组在冬季产生的余热能全部利用,发 1 kW·h 电产生的效益更大,也没有排热产生,夏季 2 台容量较小的机组运行更容易调控。

5 结语

本文给出了上海地区办公建筑热电比分布曲线,为 CCHP 系统设备选型提供依据。办公建筑全年热电比波动大,而又要考虑最低购电量,因此在选择 CCHP 系统时装机容量不宜过大。合理的机组选型应根据不同时刻热电比确定,满足基本负荷,由于冬夏负荷相差将近一倍,建议在选择机组时按冬季的负荷选择,夏季则阶梯使用 2 台机组。从而使得冬夏季机组发电量及余热都能充分使用。对于制冷季,其提供的热量不足以完全满足建筑物所需要的冷量,因此考虑采用补燃型的吸收式制冷机。三联供系统的经济效益很大程度上取决于机组整体运行效率,选型时应使效益最大化。