文章编号：1671-6612（2021）01-070-08

某医院建筑燃气分布式能源系统运行能效分析与节能评估

吕海涛　张华玲

（重庆大学　重庆　400000）

【摘　要】　通过监测某医院燃气分布式冷热电联供（CCHP）系统冬夏运行工况，获得冬夏季系统运行数据，并以运行数据为基准，分析系统运行状况，计算系统各设备运行效率及系统综合能源利用效率，以国家相关标准为依据，评价系统节能性。结果显示：由于建筑实际负荷需求波动较大，CCHP 系统内燃机全年折算满负荷运行小时数仅 1508 小时，未能达到国家标准要求，系统年平均能源利用效率为 84.5%，但节能率仅为-29.0%，CCHP 系统在监测时段并不节能。

【关键词】　冷热电三联供；负荷需求；运行数据；综合能源利用效率

中图分类号　TU8　　文献标识码　B

Energy Efficiency Analysis and Energy-saving Assessment of a Distributed Energy System in Hospital

Lv Haitao　Zhang Hualing

(Chongqing university, Chongqing, 400000)

【**Abstract**】　In this paper, by monitoring the operating conditions of a combined cooling heating and power (CCHP) system in hospital, the system operation data is obtained in winter and summer. Based on the operation data, the system operation status is analyzed, and efficiency of each equipment and energy utilization ratio of the system are calculated. According to relevant national standards, the energy saving of the system is evaluated. The results show that due to the fluctuations in the actual load demand of the building, the full load operating hours of the internal combustion engine of the CCHP system is only 1508 hours, which is less than the national standard requirements. The energy utilization ratio of the system is 84.5%, but the energy saving ratio is only -29.0%. The system does not save energy during the monitoring period.

【**Keywords**】　combined cooling heating and power; load demand; operation data; energy utilization ratio

作者简介：吕海涛（1995.5-），男，在读硕士研究生，E-mail：540299838@qq.com
通讯作者：张华玲（1968.11-），女，博士，教授，E-mail：hlzhang@cqu.edu.cn
收稿日期：2020-05-07

0　引言

我国建筑能耗持续上升，2017 年我国建筑能耗达到 9.47 亿吨标煤，占全社会能耗量的 21%，其中公共建筑能耗占 38%。燃气分布式冷热电联供（CCHP）系统能够实现能源梯级利用，能源利用效率高、绿色环保、安全性强等优势，一次能源利用效率可高达 90%以上[1]，适用于有稳定冷热负荷需求的单体建筑或区域建筑，如酒店、医院及其他综合类建筑群。我国《能源发展“十三五”规划》中明确提出提高天然气和非化石能源消费比重[2]，借此契机，我国燃气冷热电联供系统在近年来得到了大力的发展，到 2020 年，我国分布式能源装机容量将达到 34.36GW[3]。CCHP 系统中发电设备容量大小直接影响到系统节能效果，发电设备容量过大或者过小都无法使能源得到充分的梯级利用，部分 CCHP 系统实际运行效果并不理想[4,5]。

本文以某医院建筑冬夏季 CCHP 系统监测数据为依据，分析系统运行状况，计算系统各设备运行效率、发电设备年折算满负荷运行小时数、年平均能源利用效率及节能率，并与国家现行标准进行比对。

1　项目概况及运行数据

1.1　项目概况

项目总建筑面积约 17022m^2，图 1 为冬夏典型日设计冷热电负荷，其中夏季最大冷负荷为 2731.4kW，冬季最大热负荷为 1480.8kW，夏季最大小时电负荷为 986.8kW，冬季最大小时电负荷为 911.4kW。建筑供能系统为 CCHP 与螺杆机组，发电设备为内燃机，发电量仅能供建筑使用，不能上传至电网。表 1 为该医院建筑供能系统选用的主要设备性能参数，内燃机日满负荷发电量为 9.6MWh。

表 1　建筑供能系统主要设备性能参数

Table 1　Relevant parameters of equipment

设备	性能参数
燃气内燃机	额定发电功率：400kW
螺杆机组	制冷：1535kW
烟气热水补燃吸收式机组	制冷 1163kW，制热 897kW，热水 400kW

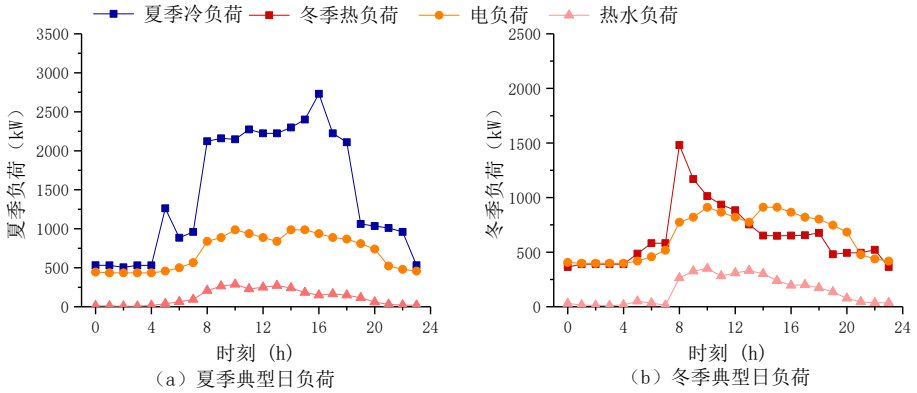


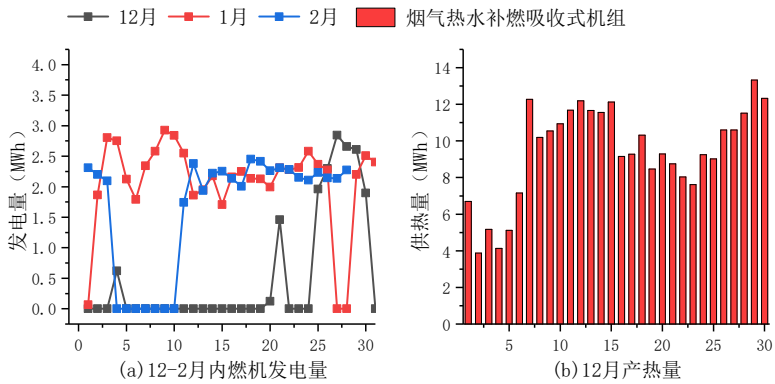
图 1　冬夏典型日冷热电负荷

Fig.1　Typical daily thermal and electrical loads

1.2　系统冬夏季产能情况

通过监测该医院建筑供能系统运行状况，得到内燃机发电量、内燃机耗气量、螺杆机耗电量、溴化锂机组产热/冷量和溴化锂机组耗气量等日运行数据。

图 2 为 CCHP 系统 12 月至次年 2 月的内燃机日发电量及溴化锂机组日产热量情况，日最高产热量约 13MWh，接近典型日设计热负荷需求总量 15.5MWh。由图 2（a）可见，内燃机日最高发电量约为 2.92MWh，出现在 1 月，远低于内燃机满载日发电量为 9.6MWh，12 月开机时数低，冬季折算满负荷运行小时数仅 440h。根据实地调研得知，医院建筑冬季电负荷需求低，在电负荷需求较低的时段，内燃机停机，系统不能充分发挥天然气资源梯级利用的优势。



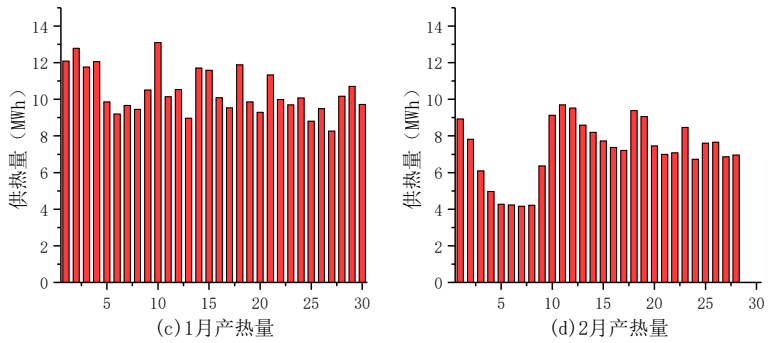


图 2　系统 12-2 月产能情况

Fig.2　System capacity from December to February

图 3 为建筑供能系统 2019 年夏季 7 月至 9 月的系统日产能情况，由图可知，7 月下旬至 9 月上旬，CCHP 系统内燃机运行状况较冬季有改善，日发电量均能稳定在 5MWh 以上，其中日最高发电量约 8MWh，出现在 8 月，夏季内燃机折算满负荷运行小时数约 1035h。内燃机余热驱动吸收式制冷机所生产的冷量不能满足的建筑冷负荷需求，系统优先通过吸收式制冷机直燃工况制冷，而非采用螺杆机制冷，仅 8 月冷负荷需求较大时才开启螺杆机辅助供冷。

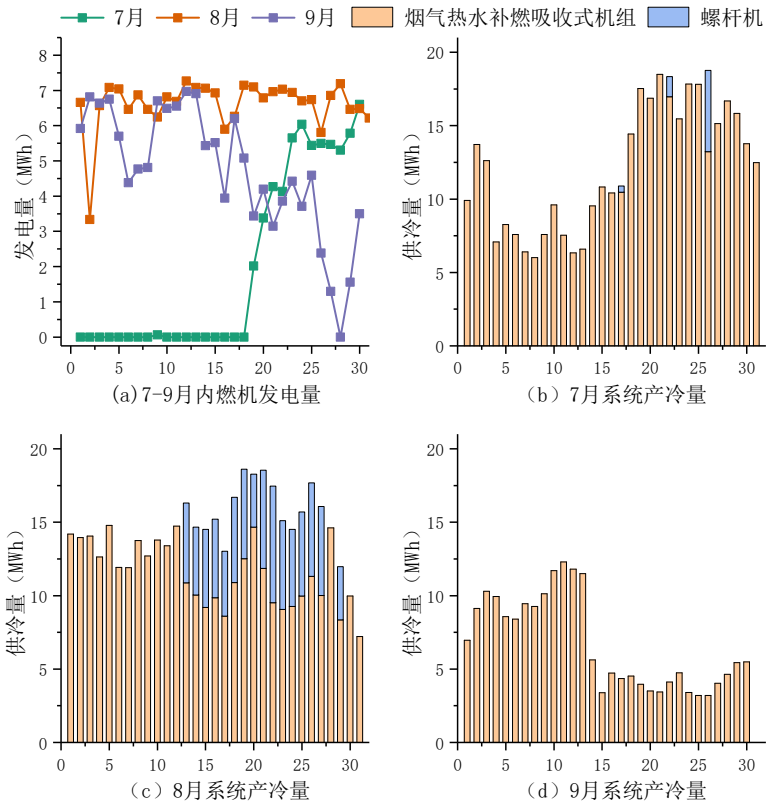


图 3　系统 7-9 月产能情况

Fig.3　System capacity from July to September

1.3　系统冬夏季能耗情况

图 4 为 12-2 月每日的能耗数据，可见，由于内燃机多数时间仅低负载运行，甚至未能达到开机条件，发电余热不足以满足建筑热负荷需求，还需通过直接燃烧天然气补充，系统未能充分发挥天然气资源梯级利用的优势。

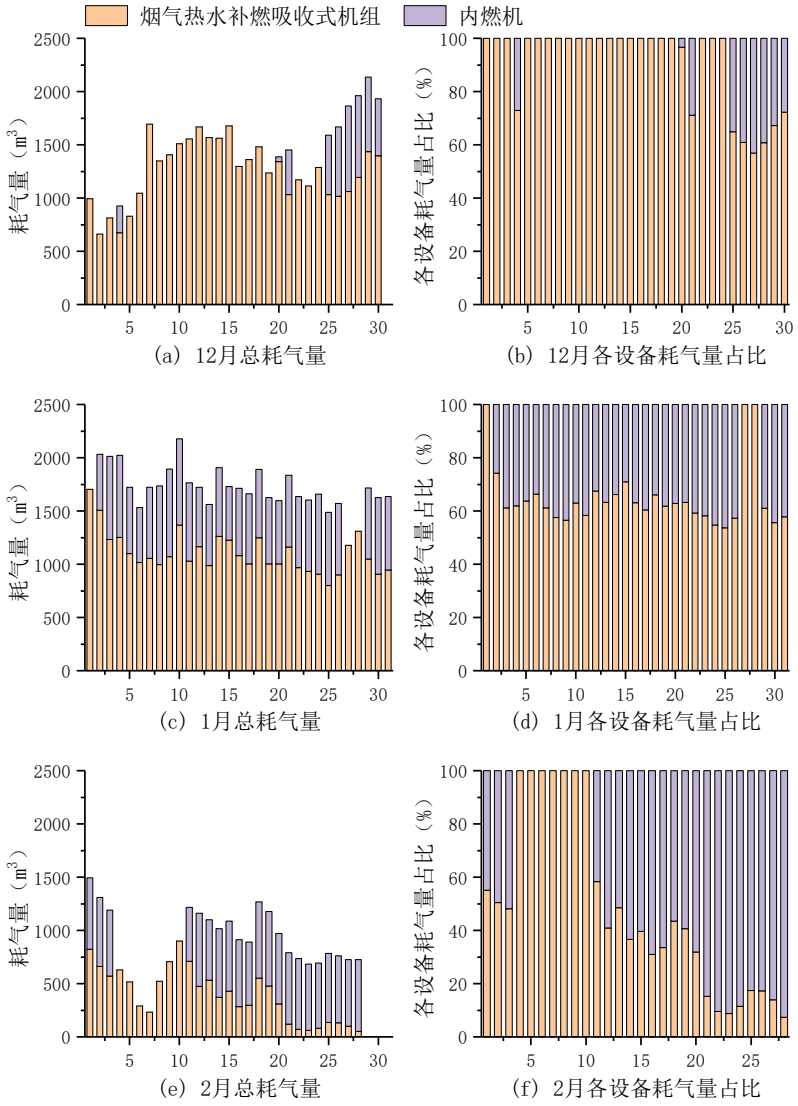
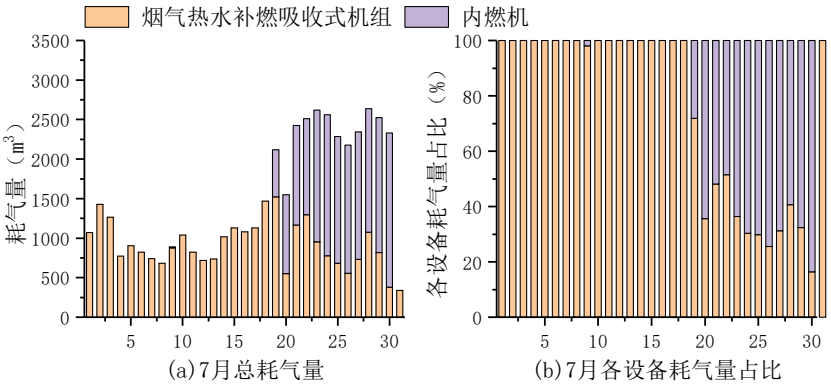


图 4　系统 12-2 月能耗情况

Fig.4　System energy consumption from December to February

图 5 为 7–9 月每日耗气量数据，可见，夏季系统运行状况较冬季有改善，除 7 月上旬内燃机有停机时段，CCHP 系统其余时段均能发挥天然气能源梯级利用的优势，系统生产的冷量中，仅有少量由溴化锂机组直燃工况运行提供。



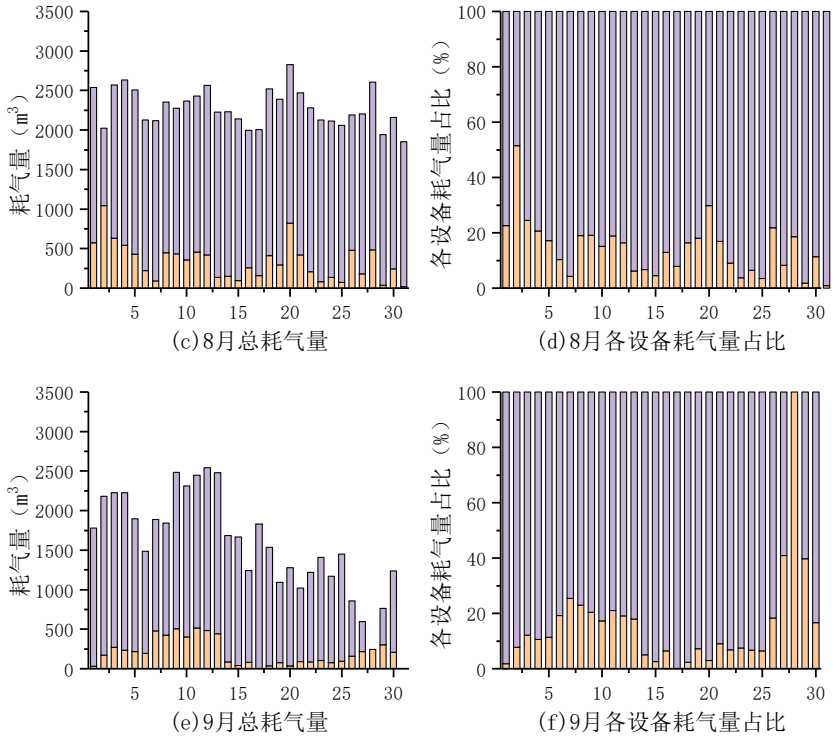


图 5　系统 7-9 月耗气情况

Fig.5　System energy consumption from July to September

2　系统及设备运行效率分析

本文选取冬夏季负荷需求比较稳定的月份的运行数据分析内燃机日平均运行效率及 CCHP 系统日平均综合能源利用效率；选择内燃机停机较多月份的运行数据分析溴化锂机组直燃工况的日平均效率。

2.1　系统冬季运行效率分析

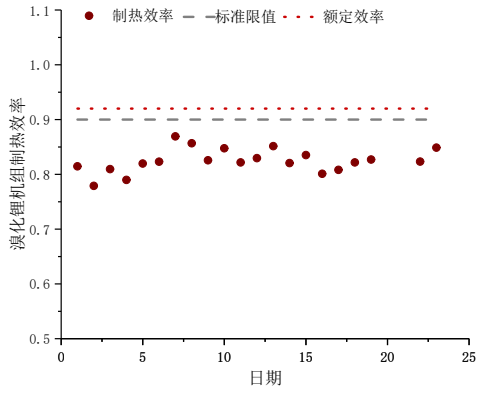


图 6　溴化锂机组直燃工况的日平均制热效率

Fig.6　Heating efficiency of lithium bromide unit

内燃机 12 月上旬多数时间处于停机状态，由溴化锂机组直接燃烧天然气供热，以这部分运行数据为依据，计算溴化锂机组日均实际运行效率，其实际运行效率为 0.8~0.9，如图 6 所示，略低于 GB 50189-2015 能效限值[6]。

选取负荷需求比较稳定的 1 月份运行数据，计算内燃机日均发电效率，其实际运行效率在 0.33~0.37 范围，如图 7 所示，未能达到内燃机额定发电效率。

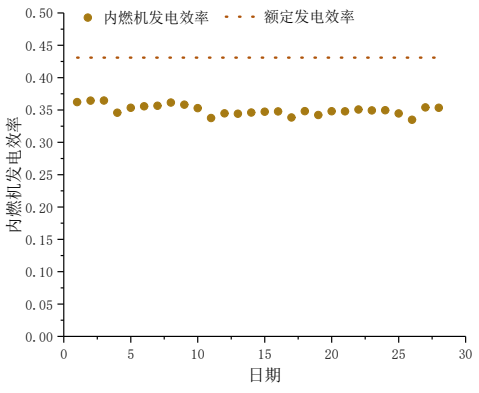


图 7　内燃机日平均发电效率

Fig.7　Electrical efficiency of internal combustion engine

依据图 6 与图 7 给出的实际运行效率，取溴化锂机组热效率 0.85，内燃机发电效率 0.35，计算得

内燃机日平均热效率为 0.35~0.55 范围以及系统日平均综合能源利用效率为 0.8~0.9，图 8（a）与图 8（b ）所示，可见冬季实际运行效率高于 DL/T 5508-2015[7] 中规定的系统年综合能源利用效率不应小于 70%的限值。

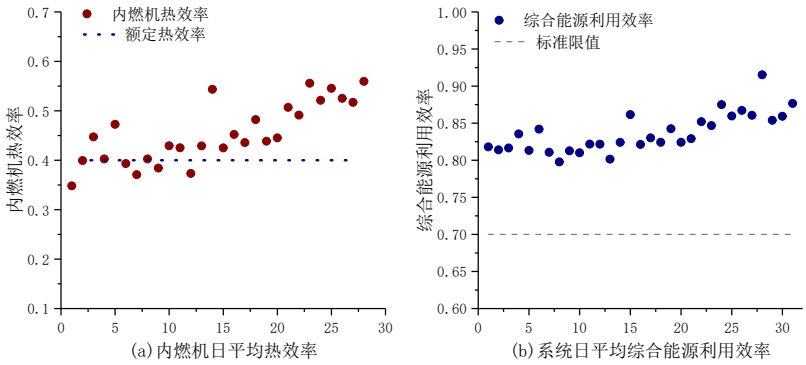


图 8　内燃机热效率及系统日平均综合能源利用率

Fig.8　Thermal efficiency of internal combustion engine and energy utilization ratio of system

2.2　系统夏季运行效率分析

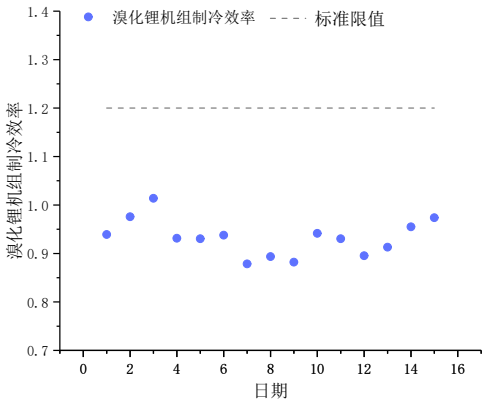


图 9　溴化锂机组直燃工况时的日平均制冷效率

Fig.9　Cooling efficiency of lithium bromide unit

内燃机 7 月上旬基本处于停运状态，选取 7 月上半月内燃机停运时的运行数据，计算溴化锂机组实际日均制冷效率在 0.8~1.05 范围，如图 9 所示，略低于 GB 50189-2015[6]中规定的能效限值。

夏季选择负荷需求比较稳定的 8 月运行数据，计算螺杆机组日平均制冷效率为 3.5~4.5，CCHP 系统综合能源利用效率为 0.7~1.1，如图 10（a）与图 10（b）所示，螺杆机组效率低于 GB 50189-2015[6]规定的能效限值；其中， 8 月 15 日至 27 日系统日平均综合能源利用率较高，分析运行策略发现，这一阶段建筑冷负荷主要由余热驱动吸收式制冷机组供给，冷量不足部分由螺杆机辅助产冷，而非溴化锂机组直燃供冷，天然气资源有较好的梯级利用。

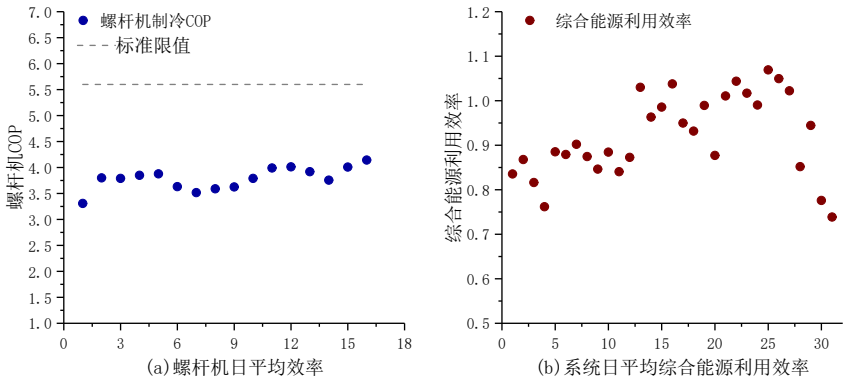


图 10　螺杆机运行效率及 CCHP 系统日平均综合能源利用率

Fig.10　Efficiency of screw chiller and energy utilization ratio of system

综上所述，该医院建筑 CCHP 系统在检测时段冬夏季实际运行负荷需求波动大，溴化锂机组直燃工况及螺杆机实际运行效率均未达到国家标准规定得能效限值，系统日平均综合能源利用效率能满足国家标准。

3 系统节能性评估

为了进一步评价 CCHP 系统运行情况，本文以系统年平均能源综合利用率、系统发电设备设计最大利用小时数以及系统节能率为评价指标，分析对比系统运行状况。

3.1 系统年平均能源利用效率

分布式冷热电能源系统年平均能源综合利用率可由下式计算[8]：

$$\alpha=\frac{3.6W+Q_1+Q_2}{B\times Q_L}\times 100\% \quad (1)$$

式中：α 为年平均余热利用率，%；W 为年净输出电量，kWh；Q_1 为年余热供热总量，MJ；Q_2 为年余热供冷总量，MJ；B 为年天然气总耗量，m^3；Q_L 为燃气低位发热量，取 38.931MJ/m^3。

计算得到冬夏季 CCHP 系统平均能源利用效率分别为86.7%和84.5%，年平均能源效率为85.4%，满足国家标准中不小于 70%的要求。

3.2 发电设备折合满负荷运行小时数

分布式冷热电能源系统发电设备折合满负荷运行小时数可按下式计算[8]：

$$n=\frac{W_{year}}{Cap_e} \quad (2)$$

式中：n 为发电设备设计最大利用小时数，h；W_{year} 为发电设备全年发电总量，kWh；Cap_e 为所有发电设备的总装机容量，kW。

计算得到系统发电设备实际全年折合满负荷运行小时数为 1508h，小于规范应大于 2000h 的要求。

3.3 系统节能率

分布式冷热电能源系统节能率由以下公式计算[8]：

$$\gamma=\left(1-\frac{B\times Q_L}{\frac{3.6W}{\eta_{e0}}+\frac{Q_1}{\eta_0}+\frac{Q_2}{\eta_{e0}\times COP_0}}\right) \quad (3)$$

$$\eta_{e0}=122.9\times\frac{1-\theta}{M} \quad (4)$$

式中：γ 为节能率，%；B 为年天然气总耗量，m^3；Q_L 为燃气低位发热量，取 38.931MJ/m^3；W 为年净输出电量，kWh；Q_1 为年余热供热总量，MJ；Q_2 为年余热供冷总量，MJ；η_{e0} 为常规供电方式的平均供电效率，%；η_0 为燃气锅炉平均热效率，%，按 GB 50189 取值，本文取 0.9；COP_0 为电制冷平均性能系数，按 GB 50189 取值，本文取 5.6；122.9 为计算系数，g/kWh，取自 GB/T2589；M 为电厂供电标准煤耗，307g/kWh，取 2018 年全国统计数据；θ 为供电线路损失率，6.21%，取自全国统计数据。

系统节能率仅为-29.0%，相比常规电动制冷与燃气锅炉方式，该系统不节能，主要是该 CCHP 系统目前还未能充分发挥天然气能源梯级利用的优势。

4 结论

通过分析了某医院建筑供能系统的运行状况，得到以下研究结论：

（1）医院建筑实际使用中冷热电负荷需求波动大，其中电负荷下降导致内燃机无法按设计工况开机运行，内燃机全年满负荷运行小数数仅 1508h，未能达到规范 GB 36160.1-2018 的要求。

（2）内燃机在运行过程中发电效率接近额定效率，内燃机热效率高于额定效率，溴化锂机组直燃工况及螺杆机组实际运行效率均低于 GB 50189-2015 规定的能效限值。CCHP 系统年平均能源利用效率为 84.5%，达到规范 GB 36160.1-2018 的要求。

（3）该 CCHP 系统天然气能源未能充分发挥梯级的优势，系统不节能，节能率为−29.0%。运行策略也应做调整，夏季应避免溴化锂机组直燃工况供冷，内燃机余热产冷不足部分应优先运行螺杆机，并由内燃机提供的电能。说明即使 CCHP 系统在冷热负荷需求较稳定的医院建筑中使用，内燃机容量确定合理并配合良好的运行策略才能取得预期的节能效果。

参考文献：

[1] 冼静江,林梓荣,詹宁华,等.分布式天然气CCHP系统在广东地区的发展现状与应用前景[J].城市燃气,2018,(6):7-10.

[2] 国家发展改革委,国家能源局.能源发展“十三”五规划[R].2016.

[3] Han J, Ouyang L, Xu Y, et al. Current status of distributed energy system in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,55:288-297.

[4] 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2018[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[5] Feng L, Dai X, Mo J, et al. Comparison of capacity design modes and operation strategies and calculation of thermodynamic boundaries of energy-saving for CCHP systems in different energy supply scenarios[J]. Energy Conversion and Management, 2019,188:296-309.

[6] GB 50189-2015, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.

[7] DL/T 5508-2015,燃气分布式供能站设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.

[8] GBT 36160.1-2018,分布式冷热电能源系统技术条件[S].北京:中国标准出版社,2018.

（上接第63页）

[16] Özkaraca Osman, Pınar K, Cihan D, et al. Thermodynamic Optimization of a Geothermal-Based Organic Rankine Cycle System Using an Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Energies, 2017,10(11):1691.

[17] 杨富斌. 基于热经济性分析人工网络建模的车用有机朗肯循环性能优化[D].北京:北京工业大学,2018.

[18] 贺超.低品位热源驱动的有机朗肯循环性能研究[D].重庆:重庆大学,2013.

[19] Wang S, Yuan Z. A Hot Water Split-Flow Dual-Pressure Strategy to Improve System Performance for Organic Rankine Cycle[J]. Energies, 2020,13.