

生物质燃气冷热电联供系统性能分析*

王江江 杨 昆 刘娟娟

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 保定 071003)

摘要: 为提高能源的利用效率,缓解传统能源短缺及其利用过程中带来的环境问题,设计了一种以内燃机为驱动装置的生物质燃气冷热电联供系统,对其能量流程进行了分析,并以北京市某面积为 10 000 m² 的宾馆为例,对该系统在热跟随和电跟随两种运行模式下的设备选型、燃料消耗量和补电量以及能效、经济和排放性能进行了分析比较。通过比较可知,联供系统在电跟随模式下比在热跟随模式下的一次能源利用率高 4.3%,缩短投资回收期 1.4 年,但少减排 254.9 t CO₂。因此,该生物质气冷热电联供系统在热跟随模式下的环境效益较好,在电跟随模式下的能源效益和经济效益更佳。

关键词: 生物质燃气 冷热电联供 热跟随 电跟随 性能比较

中图分类号: TK6; S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0196-10

引言

冷热电联供系统(Combined cooling heating and power, CCHP)由于其节能、环保以及电力可靠性高等优点而受到广泛重视^[1]。目前,CCHP 系统大都以天然气为一次能源,而我国天然气资源极为短缺^[2],与此同时,大量化石能源的利用也造成了严重的环境污染。而生物质能源是一种清洁的可再生能源,同时气体生物燃料也是发展冷热电联供系统的适宜燃料^[3-6]:①生物质能资源分散,能量密度较低,收集和运输困难,所以这种资源最为合理的利用方式就是对其进行适度规模化就地集中转化利用。②我国的生物质能资源广泛,适合生物质气化的木材加工废弃物等硬质原料丰富。③目前用于冷热电联供系统的驱动装置主要是内燃机和燃气轮机(小型系统主要以内燃机为主),而生物质燃气机组与内燃机发电机组具有良好的匹配性。

目前,针对天然气(液化石油气等)冷热电联供系统的研究较多,主要包括系统的运行优化^[7-10]、效益分析^[11]、热经济性分析^[10,12-13]、变工况性能^[14]等,但对于生物质燃气冷热电联供系统的研究尚处于起步阶段,主要集中在可行性分析^[15]、技术利用形式^[3,16-17]及其存在的主要障碍、政策^[16]等方面的讨论。本文以生物质气为燃料输入,以内燃机作为联供系统的驱动装置,优化配置生物质燃气联供系

统的设备容量,比较分析其在热跟随和电跟随两种运行模式下的能效、经济性以及环境效益。

1 生物质气冷热电联供系统设计

1.1 系统构成

用于生物质气冷热电联供系统的动力装置主要有往复式内燃机、微型燃气轮机、燃料电池以及斯特林机等。其中由于具有发电效率高、可直接利用低压气源和可燃用低热值气体燃料(生物质燃气热值比较低,一般在 5 ~ 15 MJ/m³)等特点,往复式内燃机已成为沼气发电和生物质气化发电最常用的技术^[3-4]。图 1 所示为以内燃机为核心的生物质气冷热电联供系统的原理图。

生物质首先经过气化、燃料气体净化后进入储气罐,然后利用内燃机进行发电,发电后的烟气进入烟气直燃机组进行供暖或制冷^[16,18],缸套水通过换热器换热与烟气直燃机组产生的卫生热水一起满足用户热水负荷。电量不足从电网购得,多余电量并网,制冷量不足时由电制冷机组补充,烟气量不足时补燃解决。

联供系统的运行模式主要有以下两种^[19-20]:

(1) 热跟随(Following the thermal loads, FTL): 联供系统的驱动设备根据建筑所需要的热量来运行,根据热的多少来确定发电量的多少,当发电量高于所需电量时,多余电量并网输送出去,若不足,则

收稿日期: 2013-10-22 修回日期: 2013-11-21

*北京市自然科学基金资助项目(3122028)、河北省自然科学基金资助项目(E2012502002)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13MS95)和北京优秀博士学位论文培育基金资助项目(20121007901)

作者简介: 王江江,副教授,主要从事分布式能源、冷热电联供系统、建筑环境控制技术研究, E-mail: jiangjiang3330@sina.com

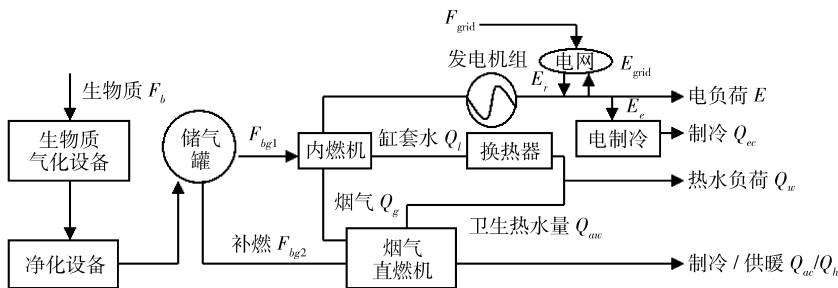


图1 生物质燃气冷热电联供系统能量流程图

Fig. 1 Energy flow chart of biogas CCHP system

从电网购买补充。

(2) 电跟随 (Following the electrical loads , FEL): 联供系统的驱动设备根据所需的电量运行, 当回收的热量高于建筑所需热量时, 多余的热量直接排放到环境中或者供给其他用户使用, 若不足, 则通过储气罐中的生物质气补燃解决。

1.2 系统的能量平衡方程

根据生物质气冷热电联供系统中电能的产耗关系, 有平衡式

$$E_r + E_{\text{grid}} = E_e + E \quad (1)$$

式中 E_r ——系统的发电量, kW·h

E_{grid} ——电网和系统的电能交换量, kW·h

E_e ——电制冷机组所消耗的电量, kW·h

E ——终端用户的耗电量, kW·h

其中, E_{grid} 可能大于 0 也可能小于 0。当系统的发电量大于终端用户所需的电量时, $E_{\text{grid}} < 0$, 多余的电量并网, 但目前不能上网售电, 所以多余电量不产生收益。当系统的发电量小于终端用户所需电量时, $E_{\text{grid}} > 0$, 不足电量从电网购得。

所购买的电能的一次能耗为

$$F_{\text{grid}} = \frac{E_{\text{grid}}}{\eta_e \eta_{\text{grid}}} \quad (2)$$

式中 F_{grid} ——联供系统补电量所消耗的能量, kW·h

η_e ——火电厂的发电效率

η_{grid} ——电网输配电效率

生物质原料与生物质气之间的关系为

$$F_b = \frac{F_{bg1} + F_{bg2}}{\eta_{bg}} \quad (3)$$

式中 F_b ——输入生物质气化设备原料的能量, kW·h

F_{bg1} ——内燃机消耗的生物质气的能量, kW·h

F_{bg2} ——烟气直燃机组的补燃量, kW·h

η_{bg} ——气化效率

内燃机消耗生物质气的能量为

$$F_{bg1} = \frac{E_r}{\eta_e} \quad (4)$$

式中 η_e ——发电效率

回收的缸套水热量为

$$Q_l = F_{bg1} (1 - \eta_e) \eta_l \quad (5)$$

式中 Q_l ——缸套水的余热回收量, kW·h

η_l ——缸套水的余热回收效率

回收的烟气能量为

$$Q_g = F_{bg1} (1 - \eta_e) \eta_g \quad (6)$$

式中 Q_g ——烟气的余热回收量, kW·h

η_g ——烟气的余热回收效率

冷负荷之间的平衡关系为

$$Q_{ec} + Q_{ac} = Q_c \quad (7)$$

其中

$$Q_{ec} = E_e E_{\text{cop}} \quad (8)$$

$$Q_{ac} = Q_g A_{\text{cop}} \quad (9)$$

式中 Q_{ec} ——电制冷机组的制冷量, kW·h

Q_{ac} ——烟气直燃机的制冷量, kW·h

Q_c ——终端用户所需的冷负荷, kW·h

E_{cop} ——电制冷机组的性能系数

A_{cop} ——烟气直燃机制冷性能系数

热水负荷之间的平衡关系为

$$Q_l \eta_h + Q_{aw} = Q_w \quad (10)$$

式中 Q_{aw} ——烟气直燃机的卫生热水量, kW·h

η_h ——换热器效率

Q_w ——热水负荷, kW·h

烟气直燃机的制冷/供暖量为

$$Q_{ac} = Q_g A_{\text{cop}} \quad (\text{或 } Q_h = Q_g H_{\text{cop}}) \quad (11)$$

式中 Q_h ——终端用户的热负荷, kW·h

H_{cop} ——烟气直燃机供暖性能系数

当内燃机烟气余热回收不能满足制冷/供暖的需求时, 烟气直燃机制冷/供热补燃量可表示为

$$F_{bg2} = \frac{Q_{ac}}{A_{\text{cop}}} - Q_g \quad (\text{或 } F_{bg2} = \frac{Q_h}{H_{\text{cop}}} - Q_g) \quad (12)$$

1.3 系统的评价指标

冷热电联供系统评价的指标主要有热力性能评价指标、经济性能评价指标以及环境性能评价指标。热力性能评价指标常用一次能源利用率 (Primary energy rate, PER), 经济性评价指标常用投资回收期, 环境性能评价指标常用 CO₂ 排放量来评价^[21]。

(1) 一次能源利用率

一次能源利用率是指系统输出能量与输入能量

的比值,并且把功、热、冷等同看待,可以直接相加,其计算式为

$$\gamma_{\text{PER}} = \frac{E + Q_c + Q_h + Q_w}{F_b + F_{\text{grid}}}$$

(13)

式中 γ_{PER} ——一次能源利用率

(2) 投资回收期

投资回收期是指工程项目净收益的累计值偿还投资总额所需要的时间,一般以年为单位。其计算式为

$$N_s = \frac{F}{A}$$

(14)

式中 N_s ——投资回收期,年
 F ——系统的投资总额,万元
 A ——每年的运行利润,万元

2 工程案例

2.1 项目简介

北京市某城乡结合区域拟建一宾馆,面积为10 000 m²,该宾馆1层为大厅和餐厅,2层为会议室、办公室及娱乐室等,3~6层为客房。为了满足

本宾馆的用电、冬季采暖、夏季空调制冷及生活热水的需要,本项目拟以生物质气为燃料的冷热电联供系统为供能系统,现分析其可行性。

2.2 负荷分析

在冷热电联供系统的方案设计中,冷热电负荷的准确预测是整个方案的基础,对整个方案运行的经济性和节能性起着关键性作用。目前,通常采用建筑物的设计负荷来进行冷热电负荷的计算。但是,设计负荷不能反映建筑负荷逐时变化的特点,由此选择的设备,可能会造成容量过大,设备之间互相不匹配,在部分负荷下运行效果不佳等情况^[22]。

本文采用清华大学开发的 DeST 软件来进行该宾馆动态冷热负荷的模拟,该宾馆的电负荷根据照明开关时间、电气设备逐时使用率及依照国家《公共建筑节能设计标准》中规定的用电指标等计算求得,这部分电负荷只包括了建筑负荷,并不包括冷热源确定以后所形成的系统负荷。模拟过程中的具体参数可参照文献[19]。图2给出了该宾馆的全年逐时冷热电负荷,图3为生活热水负荷,图4分别为该宾馆冬季和夏季典型日负荷。

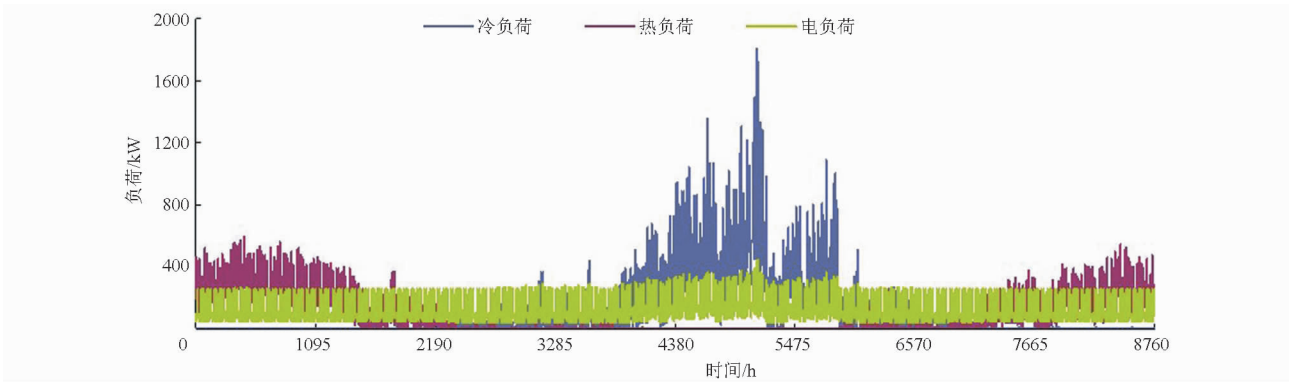


图2 宾馆的全年逐时冷热电负荷曲线

Fig. 2 Hourly cooling, heating and power loads of the hotel

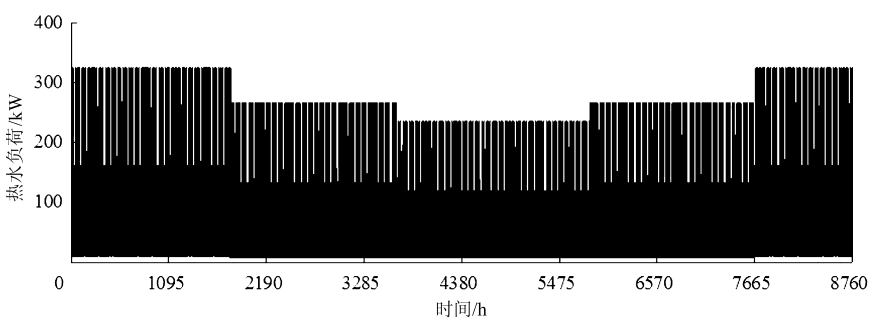


图3 宾馆的全年逐时热水负荷曲线

Fig. 3 Hourly hot water load of the hotel

2.3 设备选型

2.3.1 发电设备的选择原则

在冷热电联供系统中,发电设备的容量是一个至关重要的参数,发电设备容量的选择对联供系统

的运行性能起着关键性作用。最常用的方法是根据建筑的全年延时负荷曲线,使联供系统的发电设备在一年中能够最大化地运行在满负荷状态下。这种方法可防止发电设备容量过大造成系统在实际运行

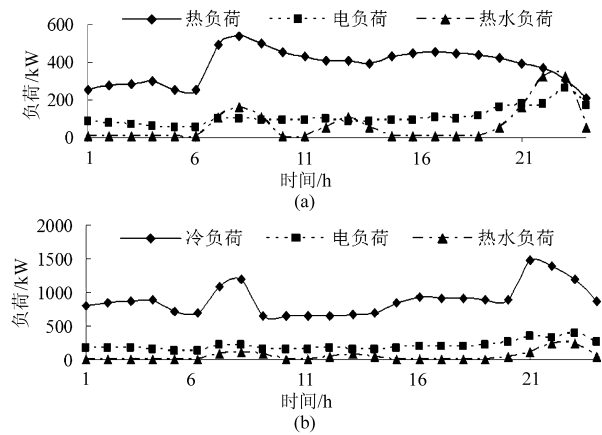


图4 典型日负荷曲线
Fig.4 Typical daily load curves
(a) 冬季 (b)夏季

中的负荷率小,设备运行效率低;也可防止设备容量过小,使系统的补电和补燃量过大而不经济^[23]。本文采用该方法,分别在热跟随和电跟随两种运行模式下,进行发电设备的容量选择,不足电力从电网补充,电力并网不上网。该宾馆的热负荷和电负荷的全年延时曲线如图5所示。

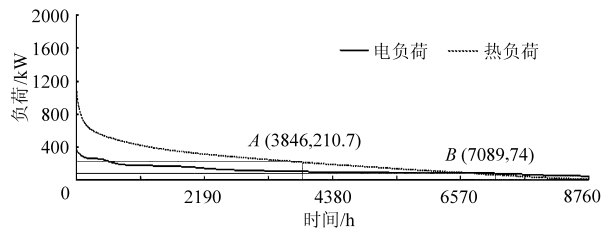


图5 宾馆热电需要量的全年延时曲线
Fig.5 Cumulative curves of heat and electricity demands of the hotel

经过计算,可得图5中的点A(3846,210.7)和点B(7089,74)所围成的面积分别为热电负荷曲线下的最大面积,因此驱动装置在热跟随模式下的最大回收热量为210.7 kW,在电跟随模式下的最大发电量为74 kW。

2.3.2 余热驱动制冷设备的选择原则

余热驱动制冷设备主要包括吸收式制冷机和吸附式制冷机。目前,吸收式制冷技术已经较为成熟,在冷热电联供系统中得到了广泛的应用,尤其是溴化锂吸收式机组。而吸附式制冷机现在大多处于实验阶段,尚未真正的形成产业^[21]。本系统的设计选用溴化锂吸收式制冷机组。

在余热驱动制冷设备的容量选择上,传统的选择方法应满足最不利的冷负荷情况,按照传统的方法来选择可能导致溴化锂机组长时间处于部分负荷运行状态,热效率不高。为此,王明辉提出了利用最佳冷化系数的方法来进行制冷机组的选型,并通过实例证明了采用此方法可以改善传统选型中制冷机

组容量过大的问题^[24]。Cardona等通过分析得出了吸收式制冷机组的最佳容量是冷负荷峰值的70%^[25]。本文采用Cardona提出的方法来选择吸收式制冷机组,此时需要配备电制冷机组来弥补高峰时的冷负荷。

2.3.3 设备选型

设备的性能参数如表1所示^[19,21,26-29]。

表1 系统设备性能参数	
Tab.1 System equipment performance parameters	
参数	数值
火电厂发电效率 η_e^h	0.45
电网输电效率 η_{grid}	0.92
内燃机发电效率 η_e	0.35
气化效率 η_{hg}	0.78
缸套水余热回收效率 η_l	0.403
烟气余热回收效率 η_g	0.395
电制冷机组性能系数 E_{cop}	3.4
燃气直燃机组制冷/供热性能系数 A_{cop}/H_{cop}	1.3/0.9
换热器效率 η_h	0.8

(1) 热跟随

根据该宾馆热负荷的全年延时曲线,可确定点A,设发电装置的容量为M,则

$$M = \frac{210.7\eta_e}{(1-\eta_e)(\eta_l+\eta_g)} \tag{15}$$

由式(15)可得,发电机容量为142 kW。吸收式制冷机组的容量按照冷负荷峰值的70%选取,则主要的设备有发电功率为142 kW的内燃机一台,制冷量为1 263 kW的烟气直燃机一台以及制冷量为542 kW的电制冷机一台。

(2) 电跟随

在电跟随运行模式下,根据该宾馆电负荷全年延时曲线可确定点B,则发电设备容量为74 kW。同理,吸收式制冷机按照宾馆冷负荷峰值的70%进行选取,则主要的设备有发电功率为74 kW的内燃机一台,制冷量为1 263 kW的烟气直燃机一台以及制冷量为542 kW的电制冷机一台。

通过对远大公司烟气直燃机已有型号制冷量、制热量以及卫生热水数据之间的关系分析可得^[27]:制冷量与制热量的比值在1.3左右,制冷量与卫生热水量的比值在2.9左右,制热量与卫生热水量的比值在2.24左右。通过对该建筑冷热负荷的模拟分析可得,该宾馆建筑的最大冷负荷为1 804 kW,最大热负荷为756.6 kW,最大热水负荷为323.41 kW,按照最大冷负荷的70%进行制冷机组的容量选型可得烟气直燃机的制冷量为1 263 kW,制热量为1 263/1.3=971.5 kW,生活热水量为1 263/2.9=426.2 kW,能够满足该宾馆建筑的最大热负荷和生活热水负荷。

2.4 性能分析

2.4.1 运行分析

在两种不同运行模式下,补电量和补热量是必

不可少的,为了了解其运行性能,分别计算了两种不同运行模式下的补电量和燃料消耗量,如图6和图7所示。

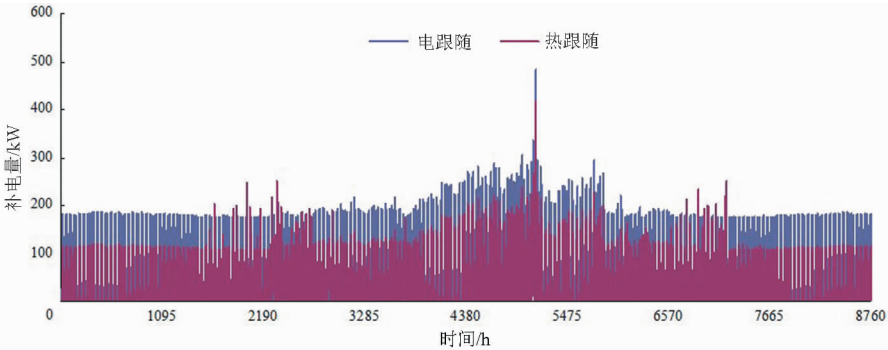


图6 联供系统不同运行模式下的补电量

Fig.6 Supplementary power of CCHP system in different operation modes

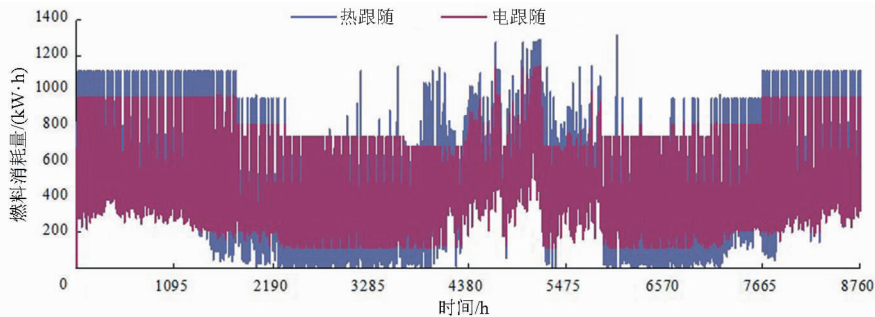


图7 联供系统不同运行模式下的燃料消耗量

Fig.7 Fuel consumption of CCHP system in different operation modes

由图6可知,两种运行模式下的补电量在夏季较高,从全年来看,电跟随模式下的补电量较多;由图7可知,在冬季和夏季,热跟随模式下的燃料消耗量要大于电跟随模式,而在过渡季正相反。

2.4.2 能效分析

热跟随模式下,该宾馆的全年电需求量、发电量、补电量以及上网电量之间的平衡关系如图8所示,冬季和夏季典型日的负荷平衡关系如图9、10所示。

由图8可得:夏季电需求较大,需要补电;在过渡季节,也需要补电,这是因为过渡季节宾馆热需求较低,在热跟随的运行模式下系统发电量不能满足

宾馆用电;冬季宾馆的热需求量较高,系统会产生多余电量。由图9可得:系统在冬季典型日全天内都需要补热来满足宾馆的热负荷,在20:00—24:00之间电需求量较大,需要电网补电,而在其他时间系统会产生多余电量,并网传送。由图10可得:系统在夏季典型日内电需求量较大,除了在5:00、6:00之外,均需电网补电,在21:00、22:00需要电制冷补充来满足宾馆冷负荷。

在电跟随模式下,该宾馆的热需求、烟气余热回收量、补燃量以及废热之间的平衡关系如图11所示,冬季和夏季的负荷平衡关系如图12、13所示。

由图11可得:在电跟随的运行模式下,系统烟

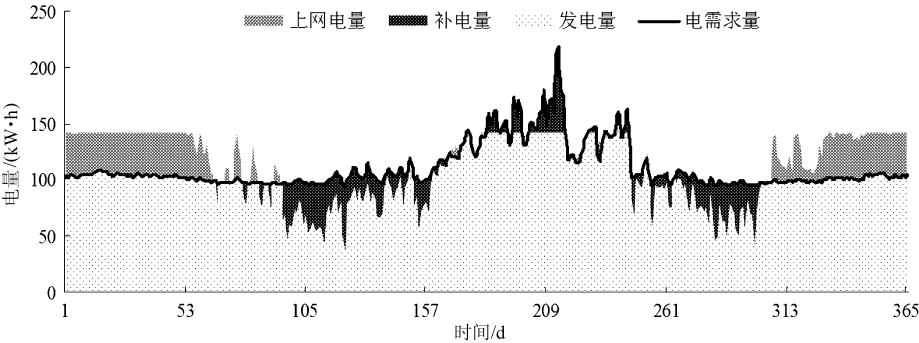


图8 宾馆全年的电量平衡关系

Fig.8 Annul electricity balances of the hotel

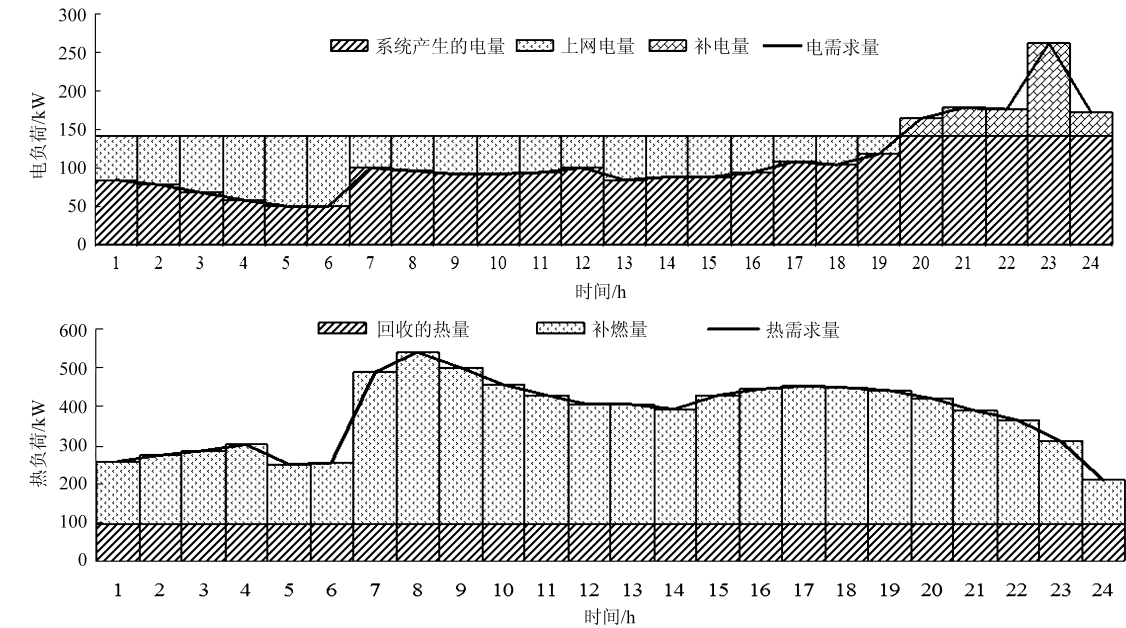


图 9 冬季典型日负荷平衡关系
Fig. 9 Typical daily load balances of the hotel in winter

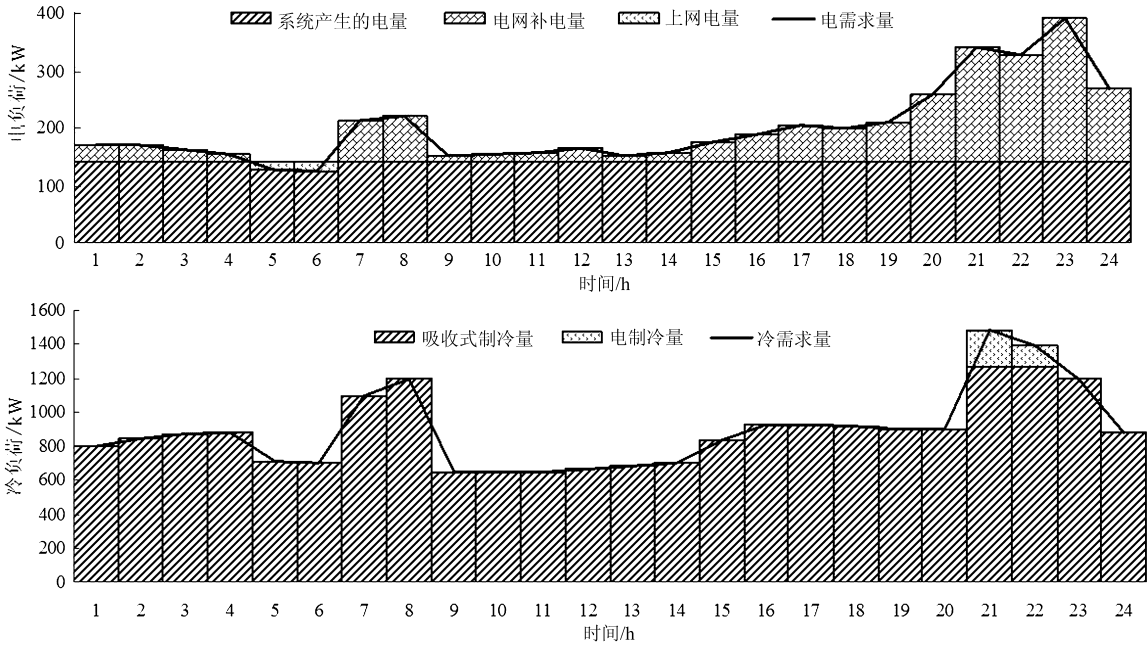


图 10 夏季典型日负荷平衡关系
Fig. 10 Typical daily load balances of the hotel in summer

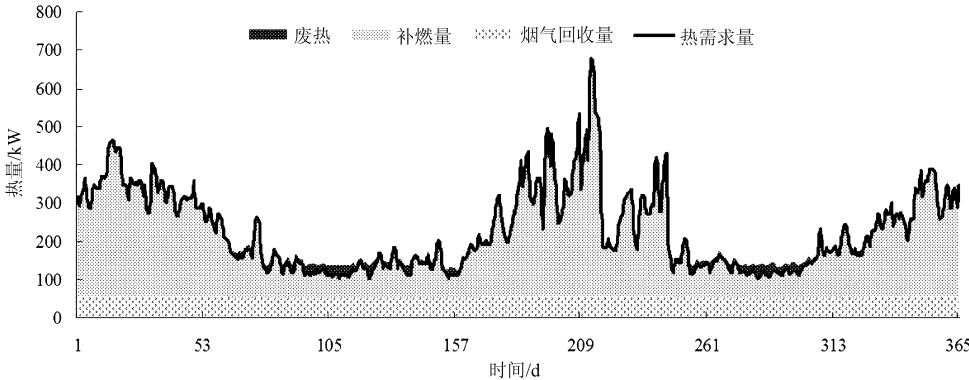


图 11 宾馆全年的热需求平衡关系
Fig. 11 Annual heat balances of the hotel

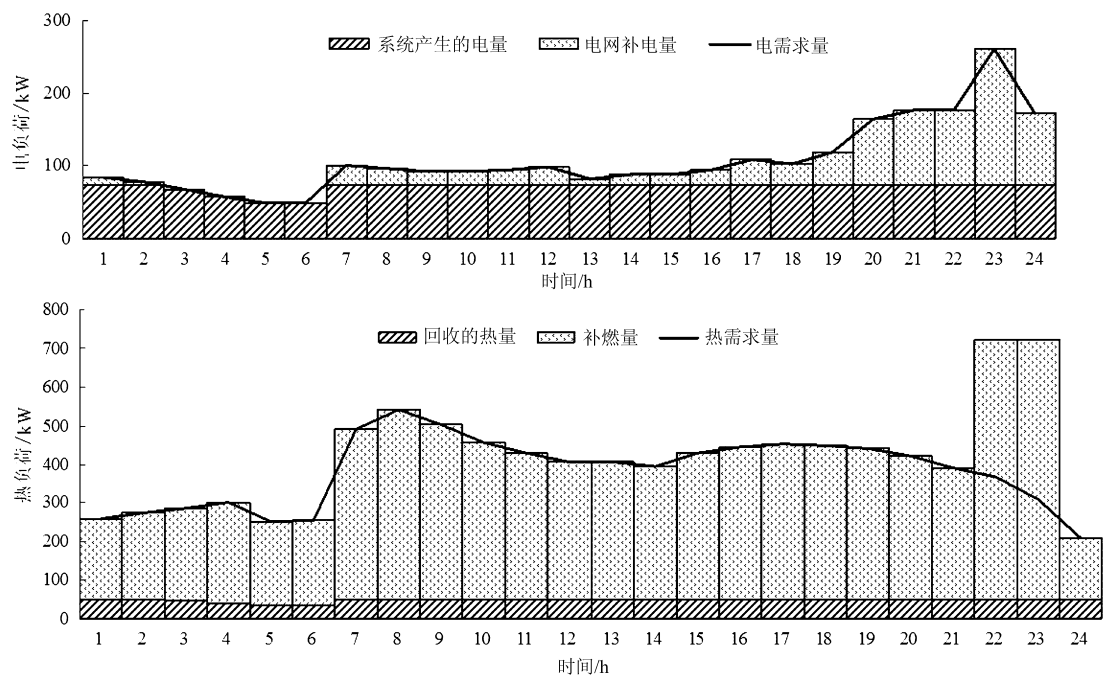


图 12 冬季典型日负荷平衡关系
Fig. 12 Typical daily load balances of the hotel in winter

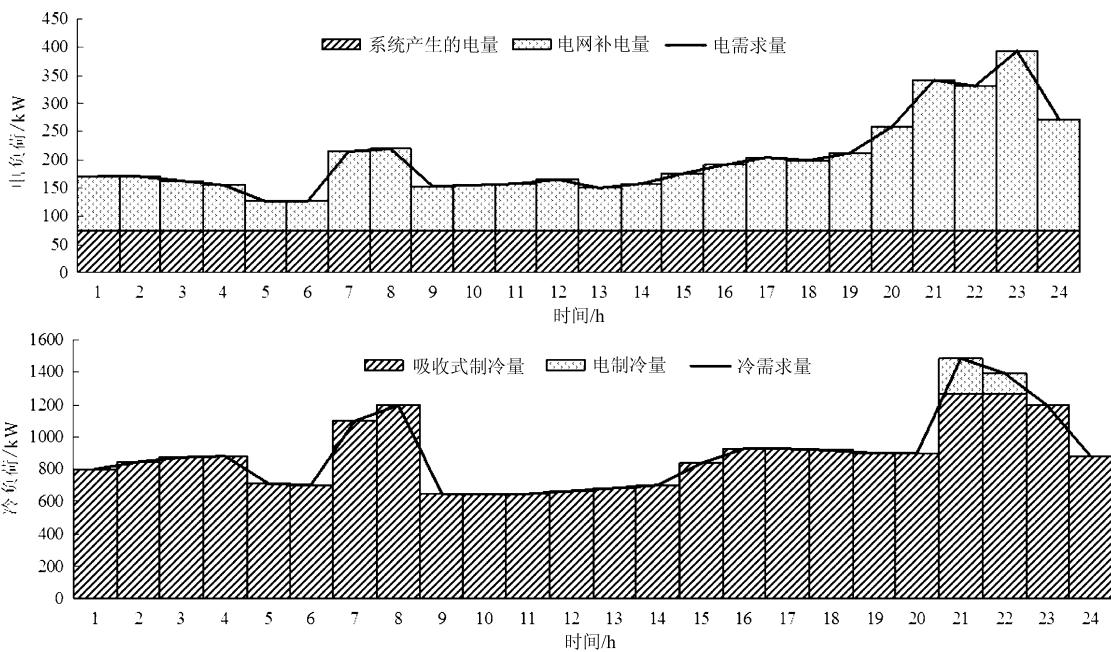


图 13 夏季典型日负荷平衡关系
Fig. 13 Typical daily load balances of the hotel in summer

气余热回收量较少,补燃量较大。在过渡季节,为了满足宾馆的生活热水负荷需要加大补燃量,系统会产生多余的热量。由图 12 可得:系统在冬季典型日内补电量和补燃量均较大,在 22:00、23:00 为了满足宾馆的热水负荷需要加大补燃量,所产生的热量超出了宾馆热负荷。由图 13 可得:系统在夏季典型日内电需求量较大,系统产生的电量较少,补电量较大;而冷负荷平衡关系与热跟随模式下的相同。

2.4.3 一次能源利用率

冷热电联供系统的一次能源利用率越高,表明

系统的热力性能越好。图 14 给出了该宾馆生物质冷热电联供系统在热跟随和电跟随两种运行模式下的逐月一次能源利用率,可知:联供系统在两种运行模式下的一次能源利用率的趋势大致相同,在夏季较高,过渡季节较低。

综合全年来看,系统在电跟随模式下的一次能源利用率为 73.8%,热跟随模式下的一次能源利用率为 69.5%。所以,从一次能源利用率的角度来看,本文所分析的实例在电跟随模式下的热力性能更好。

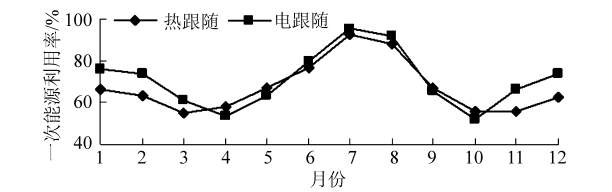


图 14 联供系统逐月一次能源利用率曲线

Fig. 14 Monthly primary energy rate of CCHP system

2.4.4 投资回收期

系统的初投资可以通过安装容量进行估算,该生物质燃气冷热电联供系统的初投资如表 2 所示^[30-32]。系统在不同运行模式下的投资回收期的分析如表 3 所示^[22-33],该系统在热跟随和电跟随运行模式下的投资回收期分别为 10.06 年和 8.66 年。

表 2 生物质气冷热电联供系统初投资				
Tab.2 Initial investment of biogas CCHP system				
运行模式	设备	单位成本容量 /(元·kW ⁻¹)	容量 /kW	总投资 /万元
热跟随	气化系统	2 500	1274	318.50
	内燃机	4 800	142	68.16
	烟气直燃机	1 200	1 263	151.56
	电制冷机	970	542	52.574
	总计			590.794
电跟随	气化系统	2 500	1 129	282.25
	内燃机	4 800	74	35.52
	烟气直燃机	1 200	1 263	151.56
	电制冷机	970	542	52.574
	总计			521.904

表 3 生物质气冷热电联供系统在不同运行模式下的投资回收期

Tab.3 Payback period of biogas CCHP system in two operation modes

项目	热跟随	电跟随
初投资/万元	590.794	521.904
电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.917	0.917
生物质气热值/(kJ·m ⁻³)	5 016	5 016
生物质气价/(元·m ⁻³)	0.17	0.17
年需生物质气量/m ³	2 851 025.32	2 418 996.65
供暖价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.16	0.16
制冷价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.27	0.27
年供电收入/万元	62.44	56.61
年供暖收入/万元	19.24	19.24
年制冷收入/万元	25.52	25.52
投资回收期/a	10.06	8.66

2.4.5 CO₂减排量

由于传统的冷热电联供系统通常采用天然气为燃料,在这里将天然气冷热电联供系统作为基准来分析比较生物质气冷热电联供系统的 CO₂减排量。该生物质气冷热电联供系统每年消耗生物质气量在热跟随和电跟随模式下分别为:14 300.74 GJ 和 12 133.69 GJ;天然气热值为 35 169 kJ/m³^[34],若该系统采用天然气作为一次燃料在两种运行模式下消耗量分别为:406 629.13 m³和 345 010.95 m³。由

于天然气的主要成分为甲烷,其容积百分比通常为 90.0%~99.8%^[35],因此 1 m³天然气燃烧约产生 1 m³CO₂,约 1.9 kg。而从整个生命周期来说,生物质能对全球 CO₂的贡献基本为“0”^[36]。所以从燃料方面来说,生物质气冷热电联供系统较天然气冷热电联供系统在热跟随和电跟随两种模式下 CO₂减排量分别为 772.6 t 和 655.5 t。

该系统在热跟随和电跟随两种模式下电网的补电量分别为:212 544.15 kW·h 和 350 748.22 kW·h。根据专家统计,每度电排放 0.997 kg CO₂,所以联供系统通过电网补电所排放的 CO₂量在两种运行模式下分别为 211.9 t 和 349.7 t。

所以该生物质冷热电联供系统在热跟随和电跟随两种运行模式下的 CO₂减排量分别为:560.7 t 和 305.8 t。从 CO₂减排量来看,热跟随模式下的环境效益更佳。

2.4.6 综合性能对比

综上所述,该宾馆的生物质气冷热电联供系统在两种运行模式下的一次能源利用率、投资回收期及 CO₂减排量的对比如表 4 所示,可知:该生物质气冷热电联供系统采用热跟随模式时的环境效益较好,采用电跟随模式时能源效率和经济效率更佳。

表 4 综合性能对比			
Tab.4 Comparison of comprehensive performance			
运行模式	一次能源 利用率/%	投资回收 期/a	CO ₂ 减排量/t
热跟随	69.5	10.06	560.7
电跟随	73.8	8.66	305.8

3 结论

- (1) 生物质气冷热电联供系统不仅避免了生物质能的浪费和其废弃物对环境的污染,而且对缓解传统能源紧张,减少环境污染方面具有重要意义。
- (2) 在冷热电联供系统的设计中,建筑的全年逐时冷热电负荷的准确计算起着至关重要的作用,不仅是确定驱动设备容量的依据,防止设备容量过大或者过小,从而造成的系统运行效率不高,系统运行不经济等情况,而且在分析系统运行成本上也是非常重要的。
- (3) 对于所研究的建筑而言,通过计算比较该生物质气冷热电联供系统两种运行模式下的性能可得:联供系统在电跟随模式下比在热跟随模式下的一次能源利用率高 4.3%,投资回收期少 1.4 年,但少减排 254.9 t CO₂。因此,采用热跟随模式时的环境效益较好,采用电跟随模式时能源效益和经济效益更佳。

参 考 文 献

- 1 杨承,杨泽亮,蔡睿贤. 基于全工况性能的冷热电联产系统效率指标比较[J]. 中国电机工程学报,2008,28(2):8-13.
Yang Cheng, Yang Zeliang, Cai Ruixian. Comparison of CCHP efficiencies based on off-design characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(2):8-13. (in Chinese)
- 2 付林,李辉. 天然气热电冷联供技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:11.
- 3 关海滨,孙荣峰,闫桂焕,等. 生物质气化的分布式冷热电联供系统研究[J]. 农业机械学报,2010,41(11):98-104.
Guan Haibin, Sun Rongfeng, Yan Guihuan, et al. Distributed CCHP based on biomass gasification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(11):98-104. (in Chinese)
- 4 杨世关,李继红,李刚. 气体生物燃料技术与工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,2013:11.
- 5 国家能源局. 生物质能发展“十二五”规划[Z]. 国家能源局,2013.
- 6 任永志,崔亨哲,郭军,等. 生物质气化发电机组中内燃机的运行特性分析[J]. 可再生能源,2006,2:19-22.
Ren Yongzhi, Cui Hengzhe, Guo Jun, et al. The performance and analysis of SI engine in biomass gasification for power system [J]. Renewable Energy,2006,2:19-22. (in Chinese)
- 7 李政义. 动态负荷下天然气冷热电联供系统运行优化[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- 8 Wang J, Jing Y, Zhang C. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2010,87(4):1325-1335. (in Chinese)
- 9 Mago P J, Chamra L M. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(10): 1099-1106.
- 10 Sahoo P K. Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(13): 1580-1588.
- 11 程超. 天然气冷热电联供系统效益分析与市场研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- 12 李芳芹,魏敦崧. 天然气冷热电联供的热经济性分析[J]. 煤气与热力,2002,22(6):494-499.
Li Qinfang, Wei Dunsong. Termal economy analysis of natural gas cooling-heating combined power[J]. Gas & Heat, 2002, 22 (6):494-499. (in Chinese)
- 13 及鹏,刘凤国,鞠睿,等. 天然气冷热电联供过程热经济学优化分析[J]. 煤气与热力,2009,29(9):7-11.
Ji Peng, Liu Fengguo, Ju Rui, et al. Thermoeconomic optimization analysis of natural gas-based combined cooling, heating and power system[J]. Gas & Heat,2009,29(9):7-11. (in Chinese)
- 14 冯志兵,金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报,2006,26(4):25-30.
Feng Zhibing, Jin Hongguang. Part-load performance of CCHP with gas Turbine and storage system[J]. Proceeding of the CSEE, 2006,26(4):25-30. (in Chinese)
- 15 李新禹,苏文. 生物质能用于热电冷三联供系统的可行性探讨[J]. 节能与环保,2009(9):9-11.
Li Xinyu, Su Wen. Discussion on the feasibility of CCHP sysrem based on biomass[J]. Energy Conservation and Eneironment Protection,2009(9):9-11. (in Chinese)
- 16 王志伟,雷廷宙,何晓峰,等. 基于生物质气化的冷热电联供系统探讨[J]. 节能技术,2008,26(5):451-454.
Wang Zhiwei, Lei Tingzhou, He Xiaofeng, et al. Discussion on CCHP system based on biomass gasification[J]. Energy Conservation Technology,2008,26(5):451-454. (in Chinese)
- 17 Francisco J, Antonio C, Jose C. Biomass based micro-turbine plant and distribution network stability[J]. Energy Conersion & Management,2004,45(17):2713-2727.
- 18 杨勇平. 分布式能量系统[M]. 北京:化学工业出版社,2011:113.
- 19 王江江. 楼宇级冷热电联供系统优化及多属性综合评价方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2011.
- 20 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.
Jing Youyin, Bai He, Zhang Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceeding of the CSEE,2012,32(20):82-87. (in Chinese)
- 21 孔祥强. 冷热电联供[M]. 北京:国防工业出版社,2011:81-110.
- 22 张杰. 典型建筑应用三联供系统的研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2012.
- 23 Piacentino A, Cardona F. An original multi-objective criterion for the design of small-scale polygeneration systems based on realistic operating conditions[J]. Applied Thermal Engineering,2008,28(17-18):2391-2404. (in Chinese)
- 24 王明辉. 引入最佳冷化系数优化设计建筑楼宇冷热电系统[J]. 能源工程,2006(5):61-65.
Wang Minghui. Optimal design combined of cold heat and power system in buildings by introducing the best cold turn coefficient [J]. Energy Engineering,2006(5):61-65. (in Chinese)
- 25 Cardona E, Piacentino A. A methodology for sizing a trigeneration plant[J]. Applied Thermal Engineering,2003,23(13):1665-1680.
- 26 金红光,郑丹星,徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2010.43.

27 远大空调有限公司. 远大 X 型非电空调选型设计手册[M]. 长沙:远大空调有限公司,2011.

28 安金卉. 生物质气化过程模拟研究[D]. 河南:郑州大学,2012.

29 江苏能源局. 江苏省天然气发电项目运行特性及建设发展调研报告[R]. 南京:江苏能源局,2011.

30 张世平,董长青,杨勇平,等. 基于生物质能和天然气互补的分布式能量系统[J]. 现代电力,2007,24(4):42-47.
Zhang Shiping, Dong Changqing, Yang Yongping, et al. Construction of biomass and natural gas fueled distributed energy system (BNDES) [J]. Modern Electric Power,2007,24(4):42-47. (in Chinese)

31 Wang J, Jing Y, Zhang C. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2010,87(4):1325-1335.

32 黄锦涛,丰镇平,袁劲松. 分布式冷热电联供系统经济性分析[J]. 沈阳工程学院学报,2005,1(1):17-21.
Huang Jintao, Feng Zhenping, Yuan Jinsong. Economic analysis of distributed triple-generation system[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering,2005,1(1):17-21. (in Chinese)

33 张世平. BNDES 系统的构筑及其生命周期评价[D]. 保定:华北电力大学,2008.

34 陆伟,张士杰,肖云汉. 燃气轮机与燃气内燃机在联供系统中的应用比较[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):905-910.
Lu Wei, Zhang Shijie, Xiao Yunhan. Comparison of the application in CCHP between gas turbing and gas engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2008,29(6):905-910. (in Chinese)

35 程文龙,赵锐,陈则韶,等. 对一种利用液化天然气冷能实现零排放的能量系统的评估[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):102-107.
Cheng Wenlong, Zhao Rui, Chen Zeshao, et al. Evaluation of a CO₂ zero emission energy system with air separation by using LNG cold energy[J]. Proceeding of the CSEE,2005,25(16):102-107. (in Chinese)

36 周中仁,吴文良. 生物质能研究现状及展望[J]. 农业工程学报,2005,21(12):12-15.
Zhou Zhongren, Wu Wenliang. Status quo and prospects of biomass energy[J]. Transactions of The CSAE,2005,21(12):12-15. (in Chinese)

Performance Analysis of a Biogas Combined Cooling Heating and Power System

Wang Jiangjiang Yang Kun Liu Juanjuan

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve energy efficiency and to relieve shortage of fossil energy and environmental problems, a biogas combined cooling heating and power (CCHP) system driven by internal-combustion engine was designed, and its energy flow was presented. As a case study, the biogas CCHP system for a hotel in Beijing, about 10 000 m², was analyzed and compared in two operation modes: following the electrical loads (FEL) and following the thermal loads (FTL). The equipment configuration, fuel consumption and supplementary power and the energy, economic and emission performances were calculated and compared in the two operation modes. The results indicate that the primary energy rate (PER) of the CCHP system in FEL is 4.3% higher than in FTL; the investment payback period is 1.4 years shorter; and the CO₂ emission reduction is 254.9 t less. The biogas CCHP system in FTL has more environmental benefit and in FEL is more efficient and economical.

Key words: Biogas Combined cooling heating and power Following the thermal loads Following the electrical loads Performance comparison