

三联供系统中综合性能评价方法的应用研究

孙鹏¹, 由世俊¹, 张欢¹, 李旭²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司 陕西 西安 710018)

摘要: 针对目前燃气冷热电三联供系统在设计时忽略负荷变化的影响导致系统配置选型偏大的问题, 以燃气内燃机的参考容量和运行策略为设计变量, 选取包含年总运行费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量在内的综合性能指标为优化的目标函数, 建立系统设计优化方法。运用此方法对天津市某酒店建筑的三联供系统进行分析设计, 优化结果为: 内燃机参考容量选取 975 kW, 按照以电定热的策略运行与分供系统相比, 三联供系统节约开支 3.6%, 节能 28.9%, 二氧化碳减排 44.7%。

关键词: 冷热电三联供系统; 综合性能指标; 系统配置; 运行策略

中图分类号: TK01 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2015.02.003

引言

燃气驱动冷热电三联供 (Combined Cooling Heating and Power, CCHP) 系统是建立在能源梯级利用的概念基础上的多联供总能系统。从 80 年代末作为一种新式的能源生产及利用模式开始在中国建筑领域得到研究和发展, 但实际应用经验较少, 并没有达到设计时的理想效果。多数项目在设计阶段均采用峰值电负荷和冷热负荷进行系统选型配置, 忽略了建筑负荷的逐时变化, 导致系统全年低负荷率运行, 系统效率低未能体现出较好的经济、节能和环保效益。

三联供系统的优化设计包含了系统配置优化和运行策略优化, 也称为集成优化。迄今, 三联供系统的优化研究及设计大多对系统单一特性进行^[1-2], 虽然部分研究也考虑了节能性、减排性等对系统设备容量和运行策略的影响^[3-4], 但是对系统进行综合性评价及优化设计的研究较少。

本研究提出采用带权重因子的综合性能指标对三联供系统进行分析的方法, 以实现系统经济、节能和

环保效益的共赢。以天津市某酒店建筑的冷热电三联供系统为依托建立各设备容量和运行策略的数学模型, 并详细阐述了该综合性能指标评价方法, 进一步运用此方法对系统进行了优化分析, 为有关三联供系统的设计工作提供借鉴。

1 三联供系统的运行策略

冷热电三联供系统的配置型式主要取决于当地的能源条件及能源需求结构, 但其基本配置包括动力系统、供热系统和制冷系统。以天津市某实际工程为背景, 其系统主要由燃气内燃机、板式换热器和双效余热/直燃溴化锂吸收式制冷机组成, 余热回收包括高温烟气和缸套水两个部分。原理如图 1 所示, 供入内燃机的燃料用来发电以满足建筑的电负荷, 回收的余热通过吸收式制冷机和板式换热器来满足建筑的冷、热负荷 (采暖热负荷和生活热水负荷) 不足的热量通过直燃烟气吸收式机组中的直燃机进行补充, 不足的电量从公共电网取电进行补充, 暂不考虑发电上网。

在评价运行策略的同时, 对内燃机的选型也做出优化, 直燃烟气吸收式机组的参考容量根据建筑的峰值冷负荷选取。内燃机作为动力设备是三联供系统的核心, 其容量大小的确定, 直接影响内燃机的运行负荷率, 继而影响整个系统的能效, 并且在各运行策略中的实际运行效果相差较大, 因此选取内燃机容量和运行策略为本文的设计变量, 对系统进行优化分析。

根据对建筑逐时负荷的满足情况, 确定在各内燃机容量和不同的运行策略下系统的逐时耗电量和耗气量, 进而累加得到全年耗量, 为之后的优化分析做准备。研究假设:

收稿日期: 2014-05-09; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题: 村镇建筑太阳能利用关键技术研究示范(2011BAJ08B08)

作者简介: 孙鹏(1989-), 男, 河北唐山人, 天津大学硕士研究生。

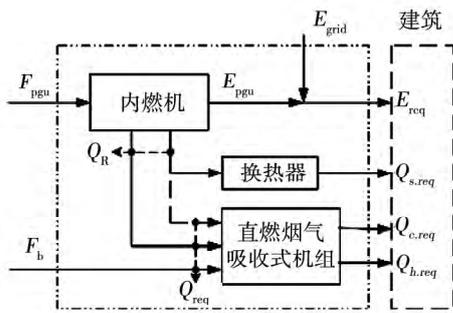


图 1 冷热电三联供系统能量流程图

Fig. 1 The energy flow path in a trigeneration (CCHP) system

(1) 以 1 h 内的负荷情况为计算基准,所得耗量为 1 h 耗量;

(2) 各设备能够在 0 - 100% 的负荷率下连续运行,并且 100% 可靠。

其中,建筑内用户所需从内燃机有效回收和直燃机提供的总热量与建筑冷热负荷的关系为:

$$Q_{req} = Q_{s,req} / \eta_h + Q_{c,req} / COP_c + Q_{h,req} / COP_h \quad (1)$$

式中: Q_{req} —能量转换设备(溴化锂机组和板式换热器)入口处所需的热量, kWh; $Q_{s,req}$ 、 $Q_{c,req}$ 、 $Q_{h,req}$ —建筑的逐时生活热水负荷、冷负荷和采暖热负荷, kWh; η_h —板换换热效率; COP_c 、 COP_h —溴化锂机组的制冷性能系数和制热性能系数。

内燃机性能方程为:

$$E_{pgu} = F_{pgu} \times \eta_{pgu} \quad (2)$$

$$Q_R = F_{pgu} \times (1 - \eta_{pgu}) \times \eta_{rec} \quad (3)$$

式中: E_{pgu} —内燃机的逐时发电量, kWh; F_{pgu} —内燃机逐时消耗的燃气所提供热量,称为耗气量, kWh; η_{pgu} —内燃机的发电效率,其为负荷率的函数,由设备厂家提供; Q_R —逐时回收的有效余热量, kWh; η_{rec} —余热回收效率。

1.1 以电定热的运行策略

以电定热(Following the electric load)的运行策略是指在某内燃机容量下所产生的电能最大限度地满足用户的电负荷需求,同时通过余热回收来提供热量需求,若所回收的余热不能满足用户的热量需求时,则开启直燃机进行补燃,通常在这种运行策略下,余热回收都不能满足用户的需求,所以补燃是必要的^[6]。采用以电定热的运行策略时,首先在某一内燃机容量 E_N 下进行计算:

(1) 当 $E_{req} + E_p \leq E_N$ 时

额定容量为 E_N 的内燃机的发电量能够满足电负荷需求,不需要从公共电网取电,即

$$E_{grid} = 0 \quad (4)$$

此时,内燃机的发电量 $E_{pgu} = E_{req} + E_p$

式中: E_N —内燃机的容量即发电量, kWh; E_{grid} —从公共电网购电量, kWh; E_{req} —建筑逐时电负荷, kWh; E_p —系统输送能量设备所耗电量, kWh。

由此可得,系统的耗气量为:

$$F_g = F_{pgu} + F_b \quad (5)$$

式中: F_g 、 F_b —系统逐时的总耗气量、直燃机补燃耗气量, kWh。

当余热回收量大于用户所需的热量时,联供系统不需要补燃,此时多余的热量随烟气排放到环境中;反之,需要开启直燃机进行补燃,计算如下:

$$\begin{cases} F_b = 0, & \text{当 } Q_R > Q_{req} \\ F_b = (Q_{req} - Q_R) / \eta_b, & \text{当 } Q_R \leq Q_{req} \end{cases} \quad (6)$$

式中: η_b —直燃机的补燃效率。

(2) 当 $E_{req} + E_p > E_N$ 时

此时内燃机满负荷运行,其发电量即为额定发电量,不足的电量需从公共电网购电补充,即

$$E_{grid} = E_{req} + E_p - E_N \quad (7)$$

同理,根据内燃机满负荷条件下的余热回收量与用户所需热量的大小关系,利用式(5)和式(6)计算燃气消耗量。

1.2 以热定电的运行策略

以热定电(Following the thermal load)的运行策略是指在某内燃机容量下回收的余热最大限度地满足用户热量需求,在这种情况下,当内燃机产生的电量小于系统总电负荷(用户电负荷需求和系统输送能量设备所耗电量之和)时,需从公共电网购电来补充。

采用以热定电的运行策略进行分析时,首先根据满负荷发电量 E_N 计算最大的余热回收量:

$$Q_{max} = E_N \times (1 - \eta_{N \cdot pgu}) \times \eta_{rec} / \eta_{N \cdot pgu} \quad (8)$$

式中: Q_{max} —从内燃机回收的最大余热量, kWh; $\eta_{N \cdot pgu}$ —内燃机的额定发电效率,即满负荷运行时的发电效率; η_{rec} —直燃烟气吸收式机组的余热回收效率。

(1) 当 $Q_{req} < Q_{max}$ 时

从额定容量为 E_N 的内燃机回收的余热量可以

满足用户的热量需求,不需要补燃,即

$$F_g = F_{pgu} \quad (9)$$

此时,根据式(2)计算内燃机的发电量 E_{pgu} ,当系统总电负荷小于内燃机的发电量时,系统不需要从公共电网取电,此时造成多余电量的浪费;反之,需要从公共电网取电进行补充,取电量如下:

$$\begin{cases} E_{grid} = 0, & \text{当 } E_{req} + E_p < E_{pgu} \\ E_{grid} = E_{req} + E_p - E_{pgu}, & \text{当 } E_{req} + E_p \geq E_{pgu} \end{cases} \quad (10)$$

(2) 当 $Q_{req} \geq Q_{max}$ 时

此时内燃机满负荷运行,发电量为内燃机的额定发电量 E_N ,余热回收量即为 Q_{max} ,其与所需热量之差为补燃的热量。根据式(5)、式(6)计算耗气量,同理,根据系统总电负荷和发电量的关系,利用式(10)计算耗电量。

1.3 混合热电的运行策略

混合热电(Hybrid electric-thermal load)的运行策略实际上是将以电定热和以热定电两种运行策略相结合所得到的运行策略,这种运行策略的特点及目标在于避免联供系统有多余的热量或电量产生,以免造成能源的浪费。

根据内燃机的性能及各项系数,将系统的总耗电量转换成在满足电量需求的条件下能够从内燃机回收的热量:

$$Q_R = (E_{req} + E_p) \times (1 - \eta_{N \cdot pgu}) \times \eta_{rec} / \eta_{N \cdot pgu} \quad (11)$$

(1) 当 $Q_R < Q_{req}$,即建筑热量需求大于总电负荷时,采用以电定热的运行策略,按照 1.1 节中的方程进行求解,内燃机产生的电量最大限度地满足用户的电负荷需求,除回收的余热外不足的部分通过直燃机补燃进行补充。

(2) 当 $Q_R \geq Q_{req}$,即系统总电负荷大于热量需求时,采用以热定电的运行策略,按照 1.2 节中的方程进行求解,从内燃机回收的余热最大限度地满足用户的热量需求,不足的电负荷从公共电网购电来补充。

通过对全年每小时内的负荷的计算,得到系统逐时从电网取电量与天然气耗量,经过全年 8 760 h 数据的累加可得到年总耗电量 $E_{grid,a}$ 和总耗气量 $F_{g,a}$ (kWh)。调整内燃机容量,确定在其它容量下,该三联供系统在以电定热、以热定电和混合热电的运行策略下的年耗电量和耗气量。

2 综合性能评价方法

相关学者认为只要联供系统保证比分供系统节约能量和减少排放,那么联供系统方案就是可行的^[7]。事实上对主要设备购置成本及运行费用的关注也是系统可行性不可或缺的一个因素,同时随着近年来世界各国对环境问题的关注,污染物排放因素也至关重要。本评价方法综合考虑了经济、能耗及排放因素,以对联供系统进行全面的优化分析。

2.1 单目标函数的数学方程

2.1.1 年总费用

经济性目标函数为年总费用最小,包括初投资、运行费用和维护费用 3 部分:

$$C = C_{inv} \times R + C_{run} + C_M \quad (12)$$

$$R = \frac{i \times (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (13)$$

式中: C —系统的年总费用,元; C_{inv} —系统的初投资,元; C_{run} —系统的年运行费用,元; C_M —系统的年维护费用,元; R —等额资金回收系数,按复利计算未来每年支付等额货币; i —银行年利率; n —设备使用年限。

初投资包括设备费用、电力增容费和燃气增容费,一般认为设备费用只与设备容量有关。

$$C_{inv} = C_{CE} + C_{DF} + C_Z \quad (14)$$

式中: C_Z —电力与燃气增容费,电力增容费由峰值电负荷确定,燃气增容费由年燃气消耗量确定,元。 C_{CE} 、 C_{DF} —内燃机与直燃机的初投资,分别为额定发电量和额定制冷量的函数,元。

运行费用与系统的运行有关,系统运行费用指系统消耗能源的费用,是从公共电网取电的费用与消耗燃气的费用之和。

$$C_{run} = J_g \times V_{g,a} + J_e \times E_{grid,a} \quad (15)$$

式中: $E_{grid,a}$ —年总耗电量, kWh; $F_{g,a}$ —年总耗气量 (kWh),通过 $V_{g,a} = 3.6 \times F_{g,a} / LHV$ 将 $F_{g,a}$ 转换为天然气计费单位; J_g —天然气价格,元/m³; J_e —从电网购电价格,元/kWh; $V_{g,a}$ —联供系统年消耗天然气的体积, m³; LHV —天然气的低位热值, MJ/m³。

维护费用是指系统日常监测、定期检修的费用。对特定的机组来说,设备的质量、使用率和工作条件

等都会对维护费用有一定的影响,本研究中燃气内燃机的维护费用认为只与设备容量有关,直燃机的维护费用与年总制冷量和总制热量有关。

$$C_M = C_{MGE} + C_{MDF} \quad (16)$$

式中: C_{MGE} 、 C_{MDF} —内燃机与余热直燃机的年维护费用,元。

2.1.2 一次能源消耗量

一次能源是指从自然界取得未经改变或转变而直接利用的能源,如煤、天然气等。系统一次能源消耗量 PEC (Primary energy consumption) 为总的能源消耗量,包括能量的生产、输送和分配过程中的能量损失,其表达式为^[8]:

$$PEC = E_{grid,a} \times ECF_{PEC} + F_{g,a} \times FCF_{PEC} \quad (17)$$

式中: PEC —系统的一次能源消耗量, kWh; ECF_{PEC} 、 FCF_{PEC} —电和天然气的一次能源转换因子。

2.1.3 二氧化碳排放量

近年来,气候变暖已成为全世界最关心的环保问题,造成全球变暖的主要原因是大量的温室气体二氧化碳(CO_2)的排放,为更好地体现联供系统的减排性,本研究中的二氧化碳排放量 CDE (Carbon dioxide emission) 通过能源排放因子来计算。

$$CDE = E_{grid,a} \times ECF_{CDE} + F_{g,a} \times FCF_{CDE} \quad (18)$$

式中: CDE —系统二氧化碳排放量, t; ECF_{CDE} 、 FCF_{CDE} —电和天然气的二氧化碳排放因子^[9], t/(kWh)。

2.2 综合性能评价方法的数学方程

在对冷热电三联供系统进行系统配置和运行策略的优化时,单纯考虑经济性、节能性及减排性其中一个因素,优化结果存在不一致性。而综合性能指标 PFI (Performance factor indicator)^[10] 能够同时考虑联供系统的总费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量,分别引入 3 个权重因子,采用按比例分配的方案进行权重因子的确定来计算综合性能指标,并与传统的分供系统进行比较, PFI 越小说明该三联供系统的综合性能越好,系统配置和运行策略越合理。其中,分供系统型式为:用户用电量需求从公共电网取电满足,采暖热负荷和生活热水负荷通过高效燃气锅炉来满足,空调冷源采用电制冷机组^[11]。

$$PFI = \omega_1 \frac{C_{CCHP}}{C_{CON}} + \omega_2 \frac{PEC_{CCHP}}{PEC_{CON}} + \omega_3 \frac{CDE_{CCHP}}{CDE_{CON}} \quad (19)$$

式中: C_{CCHP} 、 PEC_{CCHP} 、 CDE_{CCHP} —内燃机容量和运行策略下,联供系统的年总费用、一次能源损耗和二氧化碳排放; C_{CON} 、 PEC_{CON} 、 CDE_{CON} —满足用户负荷需求的条件下,分供系统的年总费用、一次能源损耗和二氧化碳排放; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 —经济性、节能性和减排性的权重因子。

表达式中的权重因子分别表示对联供系统各运行特性的关注程度,按照系统实际的特性去调节权重因子,即根据系统具体的特性指标去分配权重因子的比例,从而综合、均等地考虑系统的经济性、节能性和减排性。

各权重因子的比值为相对应的联供系统性能与分供系统的比值,若系统某性能较突出,即对应的比值较小,则这一比值对综合性能指标 PFI 的贡献较大,同时其敏感度较高,即根据比例分配较小的权重因子,分配比例为:

$$\begin{cases} \omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = \frac{\min(C_{CCHP})}{C_{CON}} : \frac{\min(PEC_{CCHP})}{PEC_{CON}} : \frac{\min(CDE_{CCHP})}{CDE_{CON}} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\min(C_{CCHP})$ —以只对总费用进行优化时的最小费用,元; $\min(PEC_{CCHP})$ —只对一次能源消耗进行优化时的最小能源消耗量, GJ; $\min(CDE_{CCHP})$ —只对二氧化碳排放进行优化时的最小排放量, t。

3 天津某酒店三联供系统的优化结果

3.1 天津某酒店建筑概况

该酒店建筑面积约为 6 万 m^2 ,建筑类型定义为多层民用公共建筑,包括酒店住宿、餐饮、健身、会议等功能区,需要 24 h 制冷、采暖、供应生活热水,因此该建筑具有较大的利用冷热电三联供系统的潜力。

通过能耗模拟软件 eQUEST 3-64 对该建筑进行模拟,得到全年逐时的负荷数据,为内燃机配置和运行策略的优化提供基础。该酒店所需要承担的全年总采暖负荷为 1 498 772 kWh,全年冷负荷为 3 755 449 kWh,全年生活热水负荷为 2 638 470 kWh,承担的总电负荷为 4 421 381 kWh,建筑全年逐时的冷热负荷如图 3 所示,其中,电负荷和热水负荷全年波动较小,图中未显示。

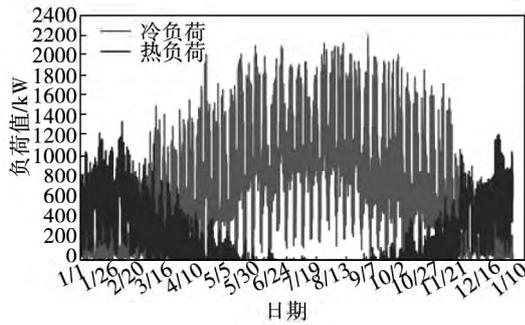


图 2 建筑全年冷热负荷分布

Fig. 2 Cooling and heating load distribution of the hotel in a whole year

3.2 综合性能指标优化结果

根据天津市的相关实际情况及该项目的设备资料,对优化分析中的各相关值进行选取,如表 1 所示。

表 1 综合性能指标 PFI 计算中相关量的确定
Tab. 1 Determination of relevant quantities in the PFI (performance factor indicator) calculation

参 数	数 值
补燃效率 η_b	0.85
余热回收效率 η_{rec}	0.8
制冷性能系数 COP_c	1.56
制热性能系数 COP_h	0.83
发电效率 η_{pgu}	0.264 - 0.381
银行年利率 i	7%
设备使用年限 n	20 a
天然气价格 J_g	2.8 元/ m^3
购电价格 J_e	0.86 元/kWh
低位热值 LHV	35.159 7 MJ/ m^3
电力增容指标	1 280 元/kWh
燃气增容指标	1 500 元/ $m^3 \cdot h^{-1}$
电的一次能源转换因子 ECF_{PEC}	3.336
天然气的一次能源转换因子 FCF_{PEC}	1.047
电的二氧化碳排放因子 ECF_{CDE}	0.968 t/kWh
天然气的二氧化碳排放因子 FCF_{CDE}	0.22 t/kWh

注:表中未注明的 E_p 、 C_{CE} 、 C_{DF} 、 C_{MGE} 、 C_{MDF} 的数据由设备厂家提供 η_{pgu} 的具体取值由设备厂家根据负荷率确定。

首先,采用单目标函数对系统进行优化,得到总费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量的最小值,如表 2 所示,确定权重因子值为 $\omega_1 = 0.42$, $\omega_2 =$

0.33 $\omega_3 = 0.25$ 。根据文献 [13] 以及建筑施工说明确定分供系统的相关参数:电厂集中发电效率为 33%;电制冷机组平均 COP 为 3.5;燃气热水锅炉热效率为 0.89;电制冷冷水机组价格 0.55 元/W;燃气热水锅炉价格 0.25 元/W。

表 2 单目标优化结果

Tab. 2 The results obtained from the single-objective optimization

目标函数	联供系统最小值	分供系统
年总费用/万元	646	676
一次能源消耗量/GJ	61 333	86 728
二氧化碳排放量/ $t \cdot a^{-1}$	3 585	6 601

对不同内燃机容量和不同运行策略下的 PFI 进行计算,如图 3 所示。从图中可以看出,以电定热的运行策略是该综合性能指标优化得到的最优策略,内燃机容量选取 975 kW,其对应的 PFI 为 0.811,此时的年总运行费用为 652 万元,一次能源年消耗量为 61 626 GJ,二氧化碳的年排放量为 3 652 t。

在对内燃机容量进行枚举法计算时,当容量较小,不足以满足建筑负荷时,在 3 种运行策略下都需要从电网购电和进行补燃,耗电量和耗气量相差不大,因此在图 3 中内燃机容量较小时,3 种运行策略的曲线重合度较高,并随着内燃机容量的增大而分离。

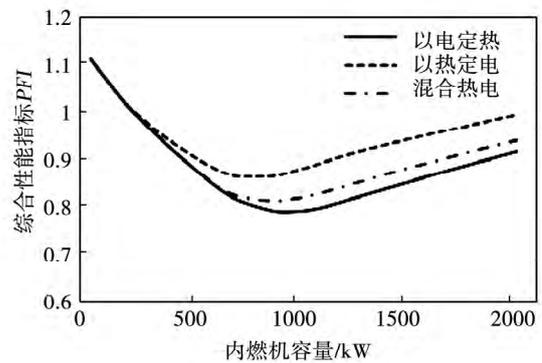


图 3 综合性能指标的优化结果

Fig. 3 Results of the comprehensive performance index obtained from the optimization

在现有的能源价格条件下,通过综合性能指标优化所得到系统经济、节能和减排性能都较均衡,与表 2 中分供系统的数据相比,节约年总费用 24 万

元,节钱率 3.6%,节约一次能源 25 102 GJ,节能率为 28.9%,对环境减排二氧化碳 2 949 t,年减排率为 44.7%。

4 结 论

本研究详细说明了综合性能指标在燃气冷热电三联供系统中进行优化设计和分析的步骤:首先根据建筑逐时负荷建立在不同容量和运行策略下的数学模型,求得系统的能源消耗量,之后分别以年总费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量 3 个单目标函数进行优化,确定各权重因子值,最后通过综合性能指标的计算对三联供系统进行容量配置和运行策略的优化设计。

在现有的能源价格条件下,将该方法运用到天津某酒店工程的实际分析中,综合性能指标优化结果与分供系统进行对比,节能、减排效果明显,并且费用有所降低,从运行效果的角度,证明了该方法的实践可行性。

该带有权重因子的综合性能指标在三联供系统中的应用,能够全面、协调地分析系统的经济效益、节能效益和减排效益。随着社会发展和科技进步,可以改变权重因子的取值,从而更好地体现社会对不同效益的关注度,使该方法具有更广的实用性和灵活性。并且该综合性能评价方法不仅仅适用于三联供系统的优化选型,对其它多目标的优化设计同样具有指导意义。

参考文献:

[1] 李 旭. 内燃机与直燃机联合的冷热电三联供系统优化设计研究[D]. 天津: 天津大学 2012.
LI Xu. Research of the optimized design of an inner combustion engine and direct combustion engine cooling ,heating and power cogeneration system [D]. Tianjin: Tianjin University 2012.

[2] Gamou S ,Ito K ,Yokoyama R. Optimal operational planning of cogeneration systems with microturbine anddesiccant air conditioning units [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power ,

2005 ,127(3) : 606 - 614.

[3] P J Mago ,L M Chamra [J]. Ramsay. Micro-combined cooling ,heating and power systems hybrid electric-thermal load following operation [J]. Applied Thermal Engineering 2010 ,30: 800 - 806.

[4] 刘长军. 楼宇热电冷联供系统的节能分析与应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学 2006.
LIU Chang-jun. Energy saving analysis of a cooling ,heating and power cogeneration system for buildings[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University 2006.

[5] 吴利辉. 楼宇三联供系统容量配置及运行策略优化研究 [D]. 上海: 东华大学 2012.
WU Li-hui. Study of the optimization of the capacity configuration and operation strategy of a trigeneration system for buildings [D]. Shanghai: East China University 2012.

[6] Fang Fang ,Qing H. Wang ,Yang Shi. A Novel Optimal Operational Strategy for the CCHP System Based on Two Operating Modes [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS 2011.

[7] Heejin Cho ,Pedro J. Mago ,Rogelio Luck ,Louay M. Chamra. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost ,primary energy consumption ,and carbon dioxide emissionby utilizing an optimal operation scheme [J]. Applied Energy 2009 ,86: 2540 - 2549.

[8] U. S. Department of Energy Energy Information Administration Glossary. U. S. Department of Energy 2007 <http://www.eia.doe.gov>.

[9] U. S. Department of Energy ,Environmental Protection AgencyEnergy Star Program. U. S. Department of Energy 2008 ,<http://energystar.gov>.

[10] P J Mago ,L M Chamra. Analysis and optimization of CCHP systems based onenergy ,economical ,and environmental considerations [J]. Energy and Buildings 2009 ,41: 1099 - 1106.

[11] Hui Li ,Lin Fu ,Kecheng Geng ,Yi Jiang. Energy utilization evaluation of CCHP systems [J]. Energy and Buildings 2006 ,38: 253 - 257.

[12] 朱天生,吴静怡,吴大为. 基于燃气内燃机的分布式冷热电联产系统应用分析 [J]. 暖通空调 2009 ,39(10) : 108 - 111.
ZHU Tian-sheng ,WU Jing-yi ,WU Da-wei. Analysis of the applications of gas internal combustion engine-based distributed type cooling ,heating and power cogeneration systems [J]. Heating , Ventilation and Air Conditioning 2009 ,39(10) : 108 - 111.

(丛 敏 编辑)

ture at the outlet 9.6%. **Key Words:** gas turbine ,swirler ,NO_x ,numerical simulation

三联供系统中综合性能评价方法的应用研究 = **Study of the Applications of the Method for Evaluating the Comprehensive Performance of a Trigeneration System** [刊, 汉] / SUN Peng , YOU Shi-jun , ZHANG Huan (College of Environment Science and Engineering , Tianjin University , Tianjin , China , Post Code: 300072) , LI Xu (China Northwest Architecture Design Research Institute Co. Ltd. , Xi'an , China , Post Code: 710018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(2) . - 187 - 192

In the light of the problem that the influence of dynamic loads are currently ignored during the design of a gas cooling , heating and power trigeneration system and excessively large capacities given in the models of the equipment items chosen in the configuration of the system may result , with the reference capacity and operation strategies for the internal gas combustion engine serving as the design variables and the comprehensive performance indexes , including the total annual operation expenses , amount of primary energy sources consumed and the quantity of carbon dioxide emissions serving as the target functions for optimization , established was a method for designing and optimizing a system. By using the method thus established , an analysis and design of a trigeneration system for a building of a hotel in Tianjin city were conducted. The optimization results are given as follows: the reference capacity of the inner combustion engine should be chosen as 975 kW and when the system is operating according to the strategy of “determining heat generation on the basis of power demand” , as compared with any single supply system , the trigeneration system can save expenses by 3.6% , an amount of energy by 28.9% and reduce the carbon dioxide emissions by 44.7%. **Key Words:** cooling , heating and power trigeneration system , comprehensive performance index , system configuration , operation strategy

泡状流中含气率和气泡尺寸分布的超声非接触测量方法 = **A Method for Ultrasonic Non-contact Measuring the Gas Content and Dimension Distribution of Bubbles in a Bubble Flow** [刊, 汉] / HU Bian (Hunan Wuling Electric Power Engineering Co. Ltd. , Changsha , China , Post Code: 410004) , SU Ming-xu , CAI Xiao-shu (Particle and Two-phase Flow Measurement Research Institute , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(2) . - 193 - 199

Set up was a set of supersonic non-contact measurement device for performing an on-line measurement of the gas content and bubble dimensions of a gas-liquid two-phase bubble flow in a circulation system. For a vertical rectangu-