

- [8] 苏强. 大型燃煤热源热网末端燃气分散调峰优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- [9] Wang Haichao, Jiao Wenlin, Risto Lahdelma, et al. Techno-economic analysis of a coal-fired CHP based combined heating system with gas-fired boilers for peak load compensation[J]. Energy Policy, 2011, 31: 7950-7962
- [10] 中华人民共和国国家统计局-年度数据-能源消费总量[DB/OL]. (2013-09-24). <http://data.stats.gov.cn/workspace/index?m=hgnd>
- [11] 武学素. 热电联产[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [12] 范季贤, 张瑞英. 论热电厂热电成本的合理分摊[J]. 内蒙古电力: 集中供热技术专辑, 1988(3): 91-98
- [13] Gochenour C. Regulation of heat and electricity produced in combined heat and power plants[M]. Washington: The World Bank, 2003: 29-36
- [14] 王加璇, 杨勇平. 我国热价设计理论方法的研究(1)——确定联产的热电成本分摊的损失功率法[J]. 北京动力经济学院学报, 1994, 11(4): 68-74
- [15] 胡三高, 杨勇平. 热电厂供热成本与热价确定方法的评估[J]. 电力技术, 1992(3): 40-43
- [16] 冯霄, 钱立伦, 蔡姬年. 热电联产中热、电分摊比的合理确定[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(4): 409-412
- [17] Commission Decision of 21 December 2006 establishing harmonized efficiency of Directive 2004/8/EC of the European parliament and of the council[R]. Official J European Union, 2007: L 32/183-L 32/188
- [18] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- [19] 杨旭中, 郭晓克, 康慧. 热电联产规划设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009
- [20] 中国建筑科学研究院. GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

# 基于一次能源相对节能率的热电联产区域供热系统最佳热化系数确定<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 廖春晖<sup>☆</sup> 周志刚 赵加宁<sup>△</sup>

**摘要** 以热电联产区域供热系统的一次能源相对节能率最大作为目标函数,提出一种新的最佳热化系数计算方法,并针对凝汽供热两用型热电联产机组建立了数学模型。与基于节煤量的热化系数优化模型相比,一次能源相对节能率方法不涉及热电联产机组发电煤耗率和供热煤耗率两个有争议的参数,而且所需参数的热力学意义更加明确,便于实际计算。

**关键词** 热化系数 一次能源相对节能率 热电联产 区域供热 节煤量

## Optimal thermalization coefficient of combined heating and power-district heating system based on relative primary energy saving rate

By Liao Chunhui<sup>★</sup>, Zhou Zhigang and Zhao Jianing

**Abstract** Taking the maximum relative primary energy saving rate as the objective function, proposes a new calculating method for the optimal thermalization coefficient, and establishes a mathematical model for dual-condensable gas heating and cogeneration units. Compared with the conventional method which based on coal savings, the relative primary energy saving method does not involve the coal consumption for heating and generation of combined heating and power plants which is controversial, and the parameters used in relative primary energy saving method are more reasonable on thermodynamics and easier to use in practice.

**Keywords** thermalization coefficient, relative primary energy saving rate, combined heating and power, district heating, coal savings

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

### 0 引言

热电联产区域供热(combined heating and power-district heating,以下简称 CHP-DH)系统与传统的锅炉供热相比,实现了能源的梯级利用,具有显著的节能效果,在世界范围内得到了广泛的应用。近年来,由于城镇化建设的需要,区域供热系统在我国“三北”地区得到了大力发展。由于供热系统的热负荷随室外气温波动变化很大,为了充分发挥热电联产机组的节能优势,热电联产机组与调峰热源联合供热的系统形式应运而生。在供暖初期和末期,热负荷较低,由热电联产机组单独供热。至供暖高峰期,热负荷增大,启用调峰热源辅助供热,保证 CHP 机组在整个供暖期内都能高效

运行。能否充分发挥出热电联产系统的节能优势,热化系数的取值是关键。

最佳热化系数的确定方法一般包括经济性分析方法<sup>[1-5]</sup>和能耗分析方法<sup>[2-3,6]</sup>。费用年值法作为经济性分析方法的代表,近年来应用较广<sup>[7-9]</sup>。从国家节能减排政策的角度来说,基于能耗分析的最佳热化系数的确定更加重要。一直以来,煤炭在我国一次能源中的比例占 70%左右,区域供热系统也以煤为主要燃料<sup>[10]</sup>,所以原有的能耗分析方法都是基于节煤量的概念提出的。虽然节煤量的

①☆ 廖春晖,男,1984年4月生,在读博士研究生

△ 赵加宁(通信作者)

150090 哈尔滨工业大学二校区市政环境工程学院

E-mail: zhaojianing@sina.com

收稿日期:2013-11-05

修回日期:2013-12-24

<sup>\*</sup> 国家“十二五”科技支撑计划项目课题(编号:2012BAJ04B01),国家自然科学基金资助项目(编号:51208158)

概念简单明确,但是应用原有的数学模型进行计算时,部分参数的物理意义不够明确,取值难以确定。另一方面,新建的 CHP-DH 系统中,燃气和可再生能源等其他类型的燃料所占比例越来越大,在一个 CHP-DH 系统中,可能同时使用多种不同的燃料,仍以节煤量来分析系统的最佳热化系数就显得不太方便。本文在一次能源相对节能率的基础上,以 CHP-DH 系统一次能源相对节能率最大为目标函数,提出了一种新的最佳热化系数计算方法,并针对 NC 型热电联产机组建立了数学模型。与原有的方法相比,一次能源相对节能率的方法概念清楚,数学模型中各参数的意义明确,易于确定,是该方法用于确定 CHP-DH 系统的最佳热化系数的优势所在。

### 1 基于节煤量的最佳热化系数确定方法

CHP-DH 系统的热源包括热电联产机组和调峰锅炉,如图 1a 所示。热电联产机组在生产电能的同时向区域供热系统提供一部分热能,不足的部分由调峰锅炉承担。对应的热电分产(separated

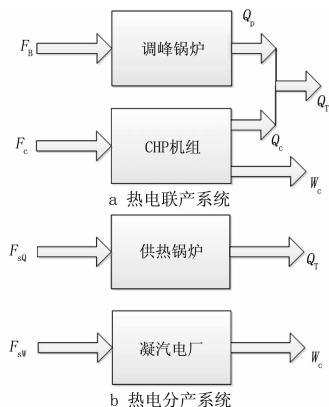


图 1 热电联产与热电分产系统示意图

$F_b$ 为调峰锅炉供热总能耗; $F_c$ 为热电联产机组供热和发电总能耗; $Q_b$ 为调峰锅炉的总热负荷; $Q_c$ 为热电联产机组的总热负荷; $Q_T$ 为区域供热系统的总热负荷; $W_c$ 为热电联产机组总发电量; $F_{sb}$ 为热电分产系统供热锅炉的总能耗; $F_{sp}$ 为热电分产系统凝汽电厂的总能耗

图 1 热电联产与热电分产系统示意图

$$\Delta b = P_0 h_T (b_{TR} - b_T) - P_0 T_d (b_{TR} - b_R) + Q_{Ty} (b_{fl} - b_{jl}) + Q_{cy} (b_{jl} - b_l) \quad (3)$$

式中  $\Delta b$  为热电联产的年节煤量, kg;  $P_0$  为热电联产机组额定发电功率, MW;  $h_T$  为热电联产机组供热能力年利用时间, h;  $b_{TR}$  为热电联产机组凝汽工况发电标准煤耗率, g/(kW·h);  $b_T$  为热电联产机组额定抽汽工况发电标准煤耗率, g/(kW·h);  $T_d$  为热电联产机组发电能力年利用时间, h;  $b_R$  为纯凝机组的发电标准煤耗率, g/(kW·h);  $b_{fl}$  为区域锅炉房供热标准煤耗率, kg/(MW·h);  $b_{jl}$  为调

heating and power) 系统包括凝汽电厂和供热锅炉,如图 1b 所示。凝汽电厂的发电量等于热电联产机组的发电量,而供热锅炉提供区域供热系统所需的全部热能。

CHP-DH 系统的热化系数是指热电联产机组的设计热负荷在区域供热系统总设计热负荷中所占的比例<sup>[11]</sup>:

$$\alpha = \frac{Q_c}{Q_T} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为热化系数;  $Q_c$  为热电联产机组的设计热负荷, MW;  $Q_T$  为区域供热系统的总设计热负荷, MW。

通常讨论的热化系数都是指小时热化系数,此外,还有年热化系数  $\alpha_y$ 。

$$\alpha_y = \frac{Q_{cy}}{Q_{Ty}} \quad (2)$$

式中  $Q_{cy}$  为热电联产机组年总供热量, MW·h;  $Q_{Ty}$  为区域供热系统年总供热量, MW·h。

节煤量是指在提供相同的热能和电能的前提下,CHP-DH 系统比热电分产系统少消耗的燃煤量。热化系数增大时,热电联产机组承担的总供热量增加,减少了锅炉供热量,由于锅炉的供热效率较低,此时节煤量有增大的趋势,这是有利的一面;但热化系数增大时,热电联产机组在部分负荷工况下运行的时间增加,热电联产机组的整体效率将降低,使得节煤量趋于减小。所以应当存在一个最佳的热化系数,使得 CHP-DH 系统的节煤量最大。

基于节煤量的最佳热化系数确定方法,以节煤量最大作为目标函数,因此,节煤量的计算直接影响着最佳热化系数的确定。节煤量的计算方法主要有 3 种:

#### 1) 方法 1<sup>[2]</sup>

峰锅炉的供热标准煤耗率, kg/(MW·h);  $b_l$  为热电联产机组的供热标准煤耗率, kg/(MW·h)。

该方法将节煤量分为发电节煤量和供热节煤量两部分,式(3)右侧后两项表示热电联产机组供热和调峰锅炉供热的节煤量。热电联产机组发电量被分成额定抽汽工况发电量和纯凝工况发电量两部分,然后分别与分产凝汽电厂相比计算节煤量,在式(3)中由右侧第 1 项和第 2 项表示。实际上热电联产机

组大部分时间运行在介于额定抽汽工况和纯凝工况之间的非设计工况,这种电量的划分完全是人为规

$$\Delta b = \alpha_y W_{Ty} (b_{TR} - b_T) - \alpha W_{cy} (b_{TR} - b_R) + \alpha_y Q_{Ty} (b_{jl} - b_l) \quad (4)$$

式中  $W_{Ty}$  为热电联产机组额定抽汽工况发电量,  $MW \cdot h$ ;  $W_{cy}$  为热电联产机组总发电量,  $MW \cdot h$ 。

该方法与方法 1 相似,式(4)右侧前两项表示

$$\Delta b = W_{gr} (b_R - b_{gr}) - W_n (b_n - b_R) + Q_{cy} (b_{fl} - b_l) + Q_{py} (b_{fl} - b_{jl}) \quad (5)$$

式中  $W_{gr}$  为供热抽汽发电量,  $MW \cdot h$ ;  $b_{gr}$  为热电联产机组供热抽汽发电煤耗率,  $kg/(MW \cdot h)$ ;  $W_n$  为热电联产机组凝汽发电量,  $MW \cdot h$ ;  $b_n$  为热电联产机组凝汽发电煤耗率,  $kg/(MW \cdot h)$ ;  $Q_{py}$  为调峰锅炉年总供热量,  $MW \cdot h$ 。

该方法同样将系统提供的电能和热能进行了划分,并分别计算节煤量。式(5)右侧第 1 项表示供热抽汽发电所获得的节煤量;第 2 项表示通过凝汽器的蒸汽发电贡献的节煤量。高温高压蒸汽通过汽轮机做功并发电是一个连续的过程,将热电联产机组发电量分为抽汽发电和凝汽发电并不容易。第 3 项是热电联产机组供热相对于锅炉供热的节煤量,第 4 项是调峰锅炉供热的节煤量。

3 种节煤量计算方法共同点在于计算模型中都涉及到了 2 个关键参数:热电联产机组抽汽工况下的发电煤耗率和供热煤耗率。但是这 2 个参数并不是严格的热力学指标,而是为了方便计算热电联产系统发电和供热能耗人为划分的。实际上,这 2 个参数的确定有多种方法,包括热量法<sup>[12]</sup>、焓分析法<sup>[13]</sup>、损失功率法<sup>[14]</sup>、电折扣法<sup>[15]</sup>、热折扣法<sup>[15]</sup>、热电联合法<sup>[16]</sup>等。

以某一 300 MW 级凝汽供热两用机组为例,机组额定工况设计参数见表 1,采用不同方法确定的热电联产机组发电和供热煤耗率见表 2。

表 1 NC300/220 型热电联产机组额定工况设计参数

主蒸汽压力/MPa	16.7
主蒸汽温度/°C	537
主蒸汽流量/(t/h)	925
再热蒸汽压力/MPa	3.236
再热蒸汽温度/°C	537
供热抽汽压力/MPa	0.45
供热抽汽量/(t/h)	500
排汽压力/kPa	5.39

从表 2 可以看出,不同的热电能耗分摊方法得到的发电和供热煤耗率相差很大,当其他条件保持不变时,计算出的节煤量也不一样。到目前为止,

定的,计算结果的可靠性值得商榷。

2) 方法 2<sup>[3]</sup>

发电节煤量,第 3 项表示供热节煤量。区别在于对热电联产机组凝汽工况发电量和额定抽汽工况发电量的计算方法不同。

3) 方法 3<sup>[6]</sup>

表 2 热电联产机组发电和供热煤耗率

	发电煤耗率/(g/(kW·h))	供热煤耗率/(kg/GJ)
热量法	218.7	37.0
焓分析法	320.1	18.5
损失功率法	309.1	20.5
电折扣法	187.7	42.7
热折扣法	285.7	24.8
热电联合法	275.7	26.6

应该采用哪一种方法来确定热电联产机组的发电和供热煤耗率仍存在很多争议。

节煤量的计算表达式比较简单,但是没有得到公认的各个变量取值方法,给实际应用带来了困难,也影响了结果的可信度。

## 2 基于一次能源相对节能率的最佳热化系数确定方法

从上文对基于节煤量的最佳热化系数计算方法的分析可以发现,3 种节煤量的计算方法都试图分别计算 CHP-DH 系统发电和供热的节煤量,并且将热电联产机组的发电量人为划分成凝汽发电和抽汽发电两部分。这相当于将 CHP-DH 系统分成了好几个子系统,带来的问题就是计算参数增加,而且因为是人为规定,物理意义不明确,难以准确赋值进行计算。

从整个 CHP-DH 系统的角度来考虑,无论是用户还是热源管理者,关心的只是最终提供了多少电能和热能,消耗了多少一次能源,并不在意哪些电能是抽汽发电,哪些是凝汽发电。当 CHP-DH 系统与热电分产系统提供相同的电能和热能时,比较二者消耗的能源总量即可了解 CHP-DH 系统的节能潜力。这正是一次能源相对节能率的概念。

一次能源相对节能率  $R_p$  是指热电联产系统与热电分产系统相比所节约的一次能源百分比<sup>[17]</sup>:

$$R_p = 1 - \frac{F_{cs}}{F_{ss}} \quad (6)$$

式中  $F_{cs}$  为热电联产系统供热和发电总能耗,

$MW \cdot h$ ;  $F_{ss}$  为热电分产系统供热和发电总能耗,  $MW \cdot h$ 。

计算 CHP-DH 系统在整个供暖期内的  $R_p$  值时,式(6)变为

$$R_p = 1 - \frac{\sum F_{cp} + \sum F_B}{\sum F_{sw} + \sum F_{sQ}} \quad (7)$$

式中  $\sum F_{cp}$  为供暖季热电联产机组供热和发电的总能耗,  $MW \cdot h$ ;  $\sum F_B$  为供暖季调峰锅炉供热总能耗,  $MW \cdot h$ ;  $\sum F_{sw}$  为热电分产系统凝汽电厂提供与热电联产系统等量电能时的总能耗,  $MW \cdot h$ ;  $\sum F_{sQ}$  为热电分产系统供热锅炉提供与联产系统等量热能时的总能耗,  $MW \cdot h$ 。

根据上述的分析,存在一个最佳热化系数,使得 CHP-DH 系统的节煤量最大,同样地,也应当存在一个最佳热化系数,使得系统的一次能源相对节能率最大。基于此,用于计算最佳热化系数的数学模型目标函数为

$$\max(R_p) = F(\alpha_0) \quad (8)$$

式中  $\alpha_0$  为最佳热化系数。

式(7)中包含  $\sum F_{cp}$ ,  $\sum F_B$ ,  $\sum F_{sw}$  和  $\sum F_{sQ}$  四项,因此,要将其转换成热化系数  $\alpha$  的表达式。本文以 NC 型热电联产机组为例,推导各项的计算表达式。CHP-DH 系统的热负荷只考虑季节性供暖热负荷,不包括工业供热负荷等常年性热负荷。

热电联产机组的总能耗与机组的进汽量密切相关,因为凝汽供热两用型热电联产机组的进汽量变化幅度很小,故假定供暖期内热电联产机组的进汽量等于额定进汽量,而供暖期内热电联产机组的运行时间与供暖时间相同,所以,热电联产机组整个供暖期总能耗为

$$\sum F_{cp} = 24N_{zh}F_{cp} \quad (9)$$

$$\sum F_{sw} = \frac{24}{\eta_{wr}} \times \left\{ (N_{zh} - 5) \left( \frac{1-\alpha}{\beta_0} \right)^{\frac{1}{b}} \left[ W_c - m - n \frac{(b+\alpha)Q_c}{(b+1)\alpha} \right] + n(N_{zh} - 5) \frac{(b+1-\beta_0)Q_c}{(b+1)\alpha} + 5W_c + m(N_{zh} - 5) \right\} \quad (13)$$

$$\sum F_{sQ} = \frac{24Q_c}{\eta_{Qr}\alpha} \left[ N_{zh} - \frac{\beta_0(N_{zh} - 5)}{b+1} \right] \quad (14)$$

式(13),(14)中  $W_c$  为热电联产机组额定供热工况发电功率,  $MW$ ;  $\eta_{wr}$  为热电分产系统凝汽发电厂

式中  $N_{zh}$  为供暖期时间,  $d$ ;  $F_{cp}$  为热电联产机组额定工况下设计能耗,  $MW$ 。

其余 3 项与供热系统负荷特性以及热电联产机组特性有关,式(10)为供热系统的负荷特性曲线方程<sup>[18]</sup>:

$$Q_n = \begin{cases} Q'_n & (N \leq 5 \text{ d}) \\ (1 - \beta_0 R_n^b) Q'_n & (5 \text{ d} < N < N_{zh}) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $Q_n$  为某一室外温度  $t_w$  下的供暖热负荷,  $MW$ ;  $Q'_n$  为供热系统的设计热负荷,  $MW$ ;  $N$  为供暖期内室外日平均温度低于某一室外温度  $t_w$  的供暖延续天数,  $d$ ;  $R_n$  为量纲一延续天数,  $R_n = (N-5)/(N_{zh}-5)$ ;  $\beta_0, b, \mu$  为量纲一数,由各城市气象资料确定,  $\beta_0 = (5 - t'_w)/(t_n - t'_w)$ ,  $b = (5 - \mu t_{pj})/(\mu t_{pj} - t'_w)$ ,  $\mu = N_{zh}/(N_{zh}-5)$ , 其中  $t'_w$  为供暖室外计算温度,  $^{\circ}C$ ,  $t_{pj}$  为供暖期室外日平均温度,  $^{\circ}C$ ,  $t_n$  为供暖室内计算温度,  $^{\circ}C$ , 取  $18^{\circ}C$ 。

热电联产机组运行过程中,当进汽量不变,抽汽量增加则发电功率降低;反之亦然。当进汽量不变时,NC 型热电联产机组的供热负荷与发电功率之间的关系可表示为<sup>[19]</sup>

$$\dot{W}_c = m + n\dot{Q}_c \quad (11)$$

式中  $\dot{W}_c$  为热电联产机组供热负荷等于  $\dot{Q}_c$  时的发电功率,  $MW$ ;  $\dot{Q}_c$  为热电联产机组某一抽汽量对应的供热负荷,  $MW$ ;  $m$  和  $n$  为热电联产机组负荷特性方程系数。

CHP-DH 系统调峰锅炉供暖期总能耗为

$$\sum F_B = \frac{24Q_c}{\eta_{Qr}} \left[ 5 + \frac{b(N_{zh} - 5)}{b+1} \left( \frac{1-\alpha}{\beta_0} \right)^{\frac{1}{b}} \right] \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (12)$$

式中  $\eta_{Qr}$  为调峰锅炉供暖期平均热效率。

在供暖期内,热电分产系统发电和供热的能耗分别为

发电效率, 100%。

至此,基于一次能源相对节能率最大化的目标函数就成为了热化系数  $\alpha$  的函数。最佳热化系数  $\alpha_0$  的值应该介于供热系统最小负荷比(室外温度 5

℃时热负荷与设计热负荷之比)与1之间。这是因为当 $\alpha$ 小于最小负荷比时,热电联产机组始终运行在额定工况下, $\alpha$ 值越大,热电联产机组所承担的热负荷比例越大,节能效果越明显。

根据以上分析可知,一次能源相对节能率方法在计算中所涉及的参数包括:1) 工程地点的供暖设计气象参数  $t'_w, t_{pj}, N_{zh}$ ; 2) 供暖室内设计温度  $t_n$ ; 3) 热电分产系统凝汽发电厂发电效率  $\eta_{wr}$ ; 4) 调峰锅炉供暖期平均热效率  $\eta_{Qr}$ ; 5) 热电联产机组运行特性方程 ( $W_c, Q_c, m$  和  $n$ ); 6) 热化系数  $\alpha$ 。前4项参数的物理意义都非常明确,很容易确定。相对来说,热电联产机组的特性参数较难确定,可以在机组出厂时要求生产厂家提供,也可根据同类型机组实际运行数据进行推算,或者采用软件模拟等方法来确定。

当前5项确定后,就可以计算不同热化系数对应下的  $R_p$  值,  $R_p$  最大时所对应热化系数就是 CHP-DH 系统的最佳热化系数。

下面举例说明最佳热化系数的确定方法。设定工程地点为北京,相应的气象参数  $t'_w, t_{pj}, N_{zh}$  分别为  $-7.6\text{ }^\circ\text{C}, -0.7\text{ }^\circ\text{C}, 123\text{ d}^{[20]}$ ; 室内供暖设计温度  $18\text{ }^\circ\text{C}$ , 机组型号为 NC300/220, 热电分产系统供热锅炉运行效率与纯凝汽机组设计发电热效率分别取 70% 和 43%。北京地区最小热负荷比为 0.48, 因此取热化系数变化范围为  $[0.48, 1]$ , 间隔 0.01 取值进行计算, 结果如图 2 所示。

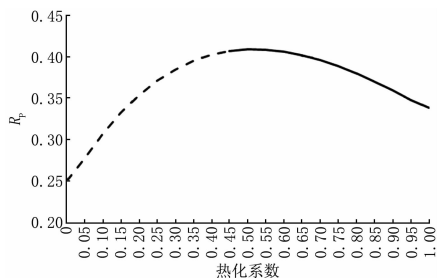


图2 北京地区 CHP-DH 系统热化系数与  $R_p$  关系示意图

图中虚线部分表示热化系数在  $(0, 0.48)$  范围内变化时的情况, 与实线组成了一组抛物线, 抛物线的顶点位于实线上, 本例中最大  $R_p$  值 (0.41) 出现在热化系数为 0.52 时, 这说明在给定的条件下, 该 CHP-DH 系统的最佳热化系数为 0.52。

以上计算是基于 NC 型热电联产机组进行的, 如果热电联产机组的类型改变, 数学模型也要进行调整, 主要区别在于热电联产机组的总能耗  $\sum F_{cp}$

和热电分产系统的发电能耗  $\sum F_{sw}$  的计算。根据不同类型热电联产机组的实际负荷特性重新推导计算式, 代入目标函数方程中即可。

与节煤量计算方法相比, 一次能源相对节能率方法的计算式略显复杂, 为了计算方便, 笔者应用 Matlab 编写了计算程序。通过输入计算所需各变量值, 可以快速计算出不同条件下的最佳热化系数值。这为进一步的分析研究提供了方便。

### 3 结论

本文基于一次能源相对节能率的概念, 提出了以一次能源相对节能率最大为目标函数的 CHP-DH 系统最佳热化系数计算方法, 并针对 NC 型热电联产机组建立了数学模型。

由于存在多种热能消耗分摊方法, 热电联产机组的发电煤耗率和供热煤耗率难以确定, 导致节煤量分析方法难以被应用于实际, 而一次能源相对节能率的方法避开了这个问题。此外, 一次能源相对节能率的方法中涉及的参数物理意义明确, 便于取值计算, 因此, 用于区域供热系统最佳热化系数的确定具有一定的优势。

应用一次能源相对节能率方法的关键在于获取准确的热电联产机组特性参数, 这需要生产厂家的支持或者根据大量实际数据进行推算。一次能源相对节能率方法的计算式较复杂, 采用编程计算比较方便。

### 参考文献:

- [1] 方英鹤. 热电站供热机组的选择和对热化系数的探讨 [C]// 吉林省电机工程学会学术论文选, 1981: 21-28
- [2] 叶元煦, 齐中英. 热电合供系统最佳热化系数的确定 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985(增刊): 60-65
- [3] 康风雷. 城市热化系统的技术经济评价 [J]. 节能, 1983(6): 9-14
- [4] 杨玉恒. 热电联产与供热工程的热化系数及其计算 [J]. 内蒙古电力: 集中供热技术专辑, 1988(3): 41-47
- [5] 杨玉恒. 超高压中间再热大型供热机组热化系数最优值的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(4): 53-59
- [6] 武学素, 张仲民, 崔树庆, 等. 热化系数最佳值的确定方法 [J]. 西安交通大学学报, 1988, 22(6): 95-100
- [7] 陈春寅, 付林, 袁卫星, 等. 分布式燃气调峰供热方式热化系数研究 [J]. 暖通空调, 2013, 43(1): 91-94