

DOI:10.11784/tdxbz202012016

# 新能源冷热电联供系统优化设计方法研究

王瑞琪<sup>1,2</sup>, 王鹤鸣<sup>3</sup>, 孙波<sup>4</sup>

(1. 国网山东综合能源服务有限公司, 济南 250021; 2. 国网山东省电力公司, 济南 250001;  
3. 山东大学商学院, 威海 264209; 4. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:** 本文以“内燃发电机组-吸收式制冷机”和“内燃发电机组-直燃机”两种新能源冷热电联供系统为研究对象, 分析了系统能流特性, 建立了两种系统的全工况模型, 提出了经济、能源、环境 3 个方面的系统性能评价指标, 并采用判断矩阵法确定各个指标的权重; 在此基础上, 建立了针对核心设备容量的多目标优化模型, 并采用遗传算法求解, 实现了系统容量的优化配置. 以济南市某养殖场年模拟负荷作为算例, 验证了优化配置方法的可行性, 并且分为夏季工况和冬季工况, 详细分析了两种系统的工作模式和异同点, 综合一次能源年节约率、运行费用年节约率和二氧化碳排放年减少率等指标对比了两种系统的运行特性, 相比较于分供系统, 基于内燃发电机组与吸收式制冷机的系统评价指标分别提升了 13.69%、18.73%、43.93%, 基于内燃发电机组与直燃机的系统则分别提升了 10.28%、22.68%、47.59%, 对新能源冷热电联供系统的优化设计提供了可借鉴的思路和方法.

**关键词:** 冷热电联供系统; 优化设计; 内燃发电机组; 直燃机

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1317-10

## System Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Integrated with Renewable Energies

Wang Ruiqi<sup>1,2</sup>, Wang Heming<sup>3</sup>, Sun Bo<sup>4</sup>

(1. State Grid Shandong Integrated Energy Services Co., Ltd., Jinan 250021, China;  
2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;  
3. School of Business, Shandong University, Weihai 264209, China;  
4. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In this paper, RES-CCHP based on internal combustion generating set and absorption chiller and RES-CCHP based on internal combustion generating set and direct combustion engine are considered as research objects. First, the energy flow characteristics of the systems are analyzed. The all-working condition models of the two systems are established, and the performance evaluation indexes of economy, energy, and environment are put forward. The weight of each index is determined by the judgment matrix method. On this basis, a multiobjective optimization model for the core equipment capacity is established, and the genetic algorithm is used to solve the model. Finally, taking the annual simulated load of a farm in Jinan as an example, the feasibility of the optimal allocation method is verified. According to the working conditions in summer and winter, the working modes,

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-04-02.

作者简介: 王瑞琪(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 13698622826@163.com.

通信作者: 孙波, sunbo@sdu.edu.cn.

基金项目: 山东省重大科技创新工程资助项目(2019JZZY010903); 山东省自然科学基金重大基础研究资助项目(ZR2019ZD09); 国家电网公司总部科技资助项目(1400-202016386A-0-0-00); 国家自然科学基金联合资助项目(U2006222).

Supported by the Major Science and Technology Innovation Program of Shandong Province, China(No. 2019JZZY010903), the Major Fundamental Research Program of the Natural Science Foundation of Shandong Province, China(No. ZR2019ZD09), the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(No. 1400-202016386A-0-0-00), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(No. U2006222).

similarities, and differences of the two systems are analyzed in detail. Considering the annual saving rates of primary energy and operation cost and annual reduction rate of carbon dioxide emission, the operation characteristics of the two systems are simultaneously compared. Compared with the separate supply system, the evaluation indexes of the internal combustion generating set and absorption chiller-based system are increased by 13.69%, 18.73%, and 43.93%, respectively, while those of the internal combustion generating set and direct gas turbine-based system are increased by 10.28%, 22.68%, and 47.59%, respectively. These results can provide reference ideas and methods for the optimal design of the CCHP system with renewable energy.

**Keywords:** combined cooling, heating, and power system(CCHP); optimal design; internal combustion generating set; direct-fired absorption chiller

能源危机与环境污染已成为制约社会发展的重要因素,提高能源利用率、大力发展清洁能源已上升为各国的能源发展战略<sup>[1]</sup>。分布式新能源冷热电联供系统(combined cooling, heating, and power system, CCHP)集发电、供热、制冷于一体,通过余热回收和异质能量流相互转换,实现了能量的梯级利用与可再生能源的就地消纳,大幅提升了能源的利用效率,被认为是未来科学用能的最佳方式与能源互联网实现过程中的重要课题<sup>[2-3]</sup>。

我国在新能源 CCHP 系统方面的研究相对较晚,虽已初具规模,但与世界先进水平相比仍有较大差距,尤其是“建多用少”现象极为突出。究其原因,新能源 CCHP 系统能量转换环节多、结构复杂,且多种异质能流与不同品位的同质能流相互耦合,现有工程中的结构设计与容量配置方法多以负荷特性为依据,未能充分考虑多能流关联以及设备结构特性,极易造成能量流不匹配,致使系统优势难以发挥,甚至无法满足节能减排需求<sup>[4]</sup>。

对此,国内外专家学者针对 CCHP 系统结构特性开展了研究<sup>[5-7]</sup>,并采用智能算法优化系统主要设备容量<sup>[8-10]</sup>。其中文献[5]针对 CCHP 系统,从能量角度分析了吸收式制冷机对余热的利用;文献[6]研究了 CCHP 系统与光伏发电、太阳能集热混合系统的能量流特性,并采用粒子群优化算法设计了其中的关键部件;文献[7]提出了混沌多目标遗传算法,对包含风力发电、光伏发电、微燃气轮机、储能装置的独立运行微网容量进行优化配置;文献[8]用改进的细菌觅食优化算法对光风储类的微电网进行优化研究;文献[9]提出一种基于冷热电联供的多能耦合系统优化设计方法。现有研究主要针对基于燃气轮机与吸收式制冷机的冷热电联供系统<sup>[10]</sup>,鲜有对不同组合结构的综合评价比较,且缺乏对异质能流耦合特性的分析,难以在实际新能源 CCHP 系统设计中应用。

针对以上分析,本文首先针对“内燃发电机组-吸收式制冷”和“内燃发电机组-直燃机”两种典型

新能源 CCHP 系统结构,分析能量流特性以及性能指标;进而建立系统优化配置模型,并采用多目标遗传算法优化系统的容量;最后,以济南市某养殖场为例,验证所提优化配置方法的合理性,并综合对比不同系统的性能差异,从而为不同资源禀赋下的 CCHP 系统结构设计提供重要参考。

## 1 系统结构与能量流分析

### 1.1 两种系统结构

本文研究的两种新能源 CCHP 系统均以生物质和光伏发电作为清洁能源,并以内燃发电机组作为动力子系统。制热制冷子系统均回收了动力子系统的余热加以利用,体现了能源梯级利用的思想。不同之处在于,“内燃发电机组-吸收式制冷机”系统通过电制冷机,吸收式制冷机和燃气锅炉 3 种设备完成冷、热能源的供给以及能量的转换,“内燃发电机组-直燃机”系统以烟气热水直燃机替代了这 3 种设备,同样可以满足用户冷热负荷。两种系统结构如图 1 和图 2 所示。

其中,基于内燃发电机组与吸收式制冷机的系统结构较为复杂,但灵活性较高,且锅炉作为制热子系

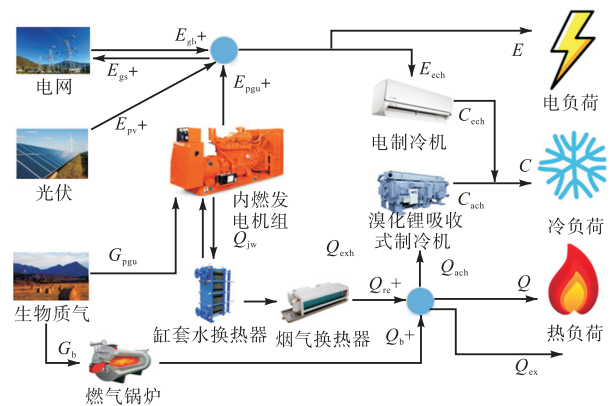


图 1 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统  
Fig.1 CCHP system based on the internal combustion engine and absorption chiller

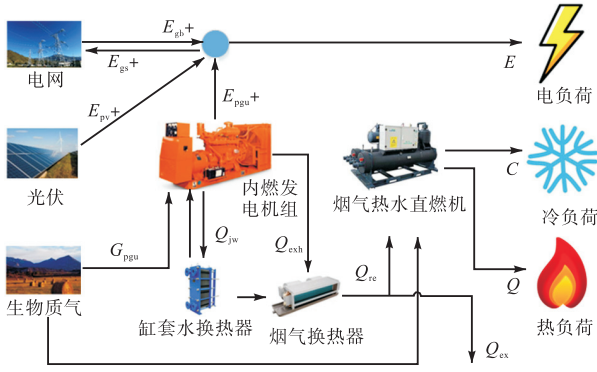


图2 基于内燃发电机组和直燃机的CCHP系统结构  
Fig.2 CCHP system based on the internal combustion engine and direct-fired absorption chiller

统的重要成分,其供热能力强且便于调节、成本低廉。基于内燃发电机组与直燃机的系统结构较为简捷,建设和施工方便,且直燃机效率较高,与新能源结合,该系统可以发挥出更高的性能。

### 1.2 能量流分析

新能源 CCHP 系统包含大量的能量生产和转换设备,导致异质能量流存在耦合关系。尤其是核心动力设备内燃发电机组,通过燃烧生物质气产生电能,同时产生大量余热,通过能量转化设备,可满足用户的电、冷、热需求。因此,梳理系统能量流耦合特性和平衡关系,是研究系统优化配置的基础。

$t$ 时刻系统冷热电功率平衡方程为

$$\begin{bmatrix} E(t) \\ Q_{h,load}(t) \\ Q_{c,load}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta(t) & 1 & -1 & \delta(t)-1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & COP_{ech} & 0 & 0 & 0 & 0 & COP_{ach} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{pv}(t) \\ E_{gb}(t) \\ E_{pgu}(t) \\ E_{ech}(t) \\ E_{gs}(t) \\ Q_{ex}(t) \\ Q_{re}(t) \\ Q_b(t) \\ Q_{ach}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $E(t)$  为  $t$  时刻用户电负荷, kW;  $E_{pv}(t)$  为光伏电池模块输出功率, kW;  $E_{pgu}(t)$  为内燃发电机组输出的电功率, kW;  $E_{gb}(t)$  为从电网购电功率, kW;  $E_{gs}(t)$  为向电网售电功率, kW;  $\delta(t)$  为  $t$  时刻系统和电网的购售电状态变量;  $E_{ech}(t)$  为电制冷机的耗电功率, kW;  $COP_{ech}$  为电制冷机性能系数 (coefficient of performance, COP);  $COP_{ach}$  为吸收式制冷机性能系数;  $Q_{re}(t)$  为系统总余热回收功率, kW;  $Q_b$  为  $t$  时刻燃气锅炉输出热功率, kW;  $Q_{ach}(t)$  为吸收式制冷机的输入功率, kW;  $Q_{h,load}(t)$  为用户热负荷, kW;  $Q_{ex}(t)$  为系统产生冗余热功率, kW;  $Q_{c,load}(t)$  为用户冷负荷, kW。

当系统向电网售电时,  $\delta(t)$  的取值为 0, 购电时取值为 1。其表达式为

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & E(t) \leq E_{pgu}(t) + E_{pv}(t) \\ 1 & E(t) > E_{pgu}(t) + E_{pv}(t) \end{cases} \quad (2)$$

内燃发电机组  $t$  时刻输入功率<sup>[11-12]</sup>为

$$G_{pgu}(t) = \frac{E_{pgu}(t)}{\eta_{ig}(t)} \quad (3)$$

式中  $\eta_{ig}(t)$  为  $t$  时刻内燃发电机组的发电效率。  
 $t$  时刻从内燃发电机组回收的余热功率为

$$\begin{cases} Q_{re}(t) = Q_{jw}(t) + Q_{exh}(t) \\ Q_{jw}(t) = G_{pgu}(t)(1 - \eta_{ig}(t))f_j(t)\eta_{jw} \\ Q_{exh}(t) = G_{pgu}(t)(1 - \eta_{ig}(t))f_e(t)\eta_{exh} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Q_{jw}(t)$  为  $t$  时刻发电机组缸套水余热回收功率, kW;  $Q_{exh}(t)$  为  $t$  时刻发电机组烟气余热回收功率, kW;  $f_j$  为缸套水占机组余热的比例系数;  $\eta_{jw}$  为缸套水换热器的效率;  $f_e$  为烟气占机组余热的比例系数;  $\eta_{exh}$  为烟气换热器的效率。

对于系统回收的余热无法供给用户的热负荷需求时,开启燃气锅炉进行补充供热。其  $t$  时刻的燃气锅炉输入功率为

$$G_b(t) = \frac{Q_b(t)}{\eta_b} \quad (5)$$

式中  $\eta_b$  为燃气锅炉热效率。

系统中有两种制冷设备:电制冷机和溴化锂吸收式制冷机。其中,溴化锂吸收式制冷机的输出功率为

$$Q_{c,ach}(t) = Q_{ach}(t) \cdot COP_{ach} \quad (6)$$

式中  $Q_{c,ach}(t)$  为  $t$  时刻吸收式制冷机输出功率, kW。

当吸收的余热不足以满足用户用冷需求时,电制冷机和吸收式制冷机同时运行,电制冷机的耗电功

率为

$$E_{ech}(t) = \frac{Q_{c,ech}(t)}{COP_{ech}} \quad (7)$$

式中  $Q_{c,ech}(t)$  为  $t$  时刻电制冷机的输出功率, kW.

对基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统进行能量流分析如下.

此系统与基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统动力子系统能量流是基本一致的, 因为动力子系统部分均是由内燃发电机组组成的. 主要区别在于此系统的制冷和制热子系统以直燃机取代了电制冷机、吸收式制冷机、燃气锅炉设备. 其中, 直燃机的制热部分方程与燃气锅炉相似, 区别仅在于制热系数.

系统中仅存在一种制冷设备即烟气热水直燃机, 直燃机一般包括高温发生器、低温发生器、高温换热器、低温换热器、蒸发器、冷凝器等部件. 直燃机满足系统的冷负荷需求,  $t$  时刻的制冷输出为

$$Q_{c,d}(t) = Q_d(t) \cdot COP_d \quad (8)$$

式中:  $Q_d(t)$  为系统回收余热和直燃机补燃的总和;  $COP_d$  为直燃机的制冷系数. 系统的冷热电平衡方程易得.

## 2 优化配置

### 2.1 约束条件

在系统的优化求解过程里, 系统不仅需要满足热平衡、冷平衡和电平衡方程, 还需要满足不等式关系

$$0 \leq E_{pgu} \leq N_{pgu,max} \quad (9)$$

$$0 \leq Q_b \leq N_{b,max} \quad (10)$$

$$0.2 \leq \theta \leq 1 \quad (11)$$

式中:  $N_{pgu,max}$  为内燃发电机组最大容量, kW;  $N_{b,max}$  为锅炉最大容量, kW;  $\theta$  为内燃发电机组最低负载率.

### 2.2 评价指标

合理的性能评价指标能够辅助维持系统运行的稳定性和高效性. 在实际的应用中, 经济性、节能性和环保性也是 CCHP 系统最为关键的 3 项指标. 本文选取分供系统作为对照系统, 分供系统由电网供电, 电制冷机供冷, 燃气锅炉供热.

#### 2.2.1 经济指标

年综合成本包括了系统运行消耗的燃料成本、系统设备的投资年化成本和电网电能交互成本. CCHP

系统年综合成本节约率为

$$I_{AOE} = \frac{C_{SP} - C_{CCHP}}{C_{SP}} \quad (12)$$

式中:  $C_{CCHP}$  为联供系统的年综合成本, 元;  $C_{SP}$  为分供系统的年综合成本, 元.

联供系统和分供系统的年综合成本分别为

$$\begin{cases} C_{CCHP} = C_{EC}^{CCHP} + C_{EQ}^{CCHP} + C_{OM}^{CCHP} = \\ \sum_{t=1}^{8760} [K_{gb}(t)E_{gb}^{CCHP}(t) - \\ K_{gs}(t)E_{gs}^{CCHP}(t)]T + \\ C_{gas} + C_{IN}^{CCHP}R + \sigma C_{IN}^{CCHP} \\ C_{SP} = C_{EC}^{SP} + C_{EQ}^{SP} + C_{OM}^{SP} = \\ \sum_{t=1}^{8760} K_{gb}(t)E_{gb}^{SP}(t)T + \\ C_{IN}^{SP}R + \sigma C_{IN}^{SP} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $C_{EC}^{CCHP}$  为联供系统的年燃料成本, 元;  $C_{EQ}^{CCHP}$  为联供系统的设备投资年化成本, 元;  $C_{OM}^{CCHP}$  为联供系统的年维护成本, 元;  $C_{EC}^{SP}$  为分供系统的年燃料成本, 元;  $C_{EQ}^{SP}$  为分供系统的设备投资年化成本, 元;  $C_{OM}^{SP}$  为分供系统的年维护成本, 元;  $K_{gb}(t)$  为  $t$  时刻电网购电的价格, 元/(kW·h);  $K_{gs}(t)$  为  $t$  时刻上网售电的价格, 元/(kW·h);  $E_{gb}^{CCHP}(t)$  为  $t$  时刻联供系统购电的功率, kW;  $E_{gs}^{CCHP}(t)$  为  $t$  时刻联供系统售电的功率, kW;  $C_{gas}$  为联供系统年燃料成本, 元;  $C_{IN}^{CCHP}$  为联供系统的总投资成本, 元;  $R$  为投资的回报系数;  $\sigma$  为系统运行维护费用的比例系数, 本文取 0.03;  $E_{gb}^{SP}(t)$  为  $t$  时刻分供系统的购电功率, kW;  $C_{IN}^{SP}$  为分供系统的投资成本, 元;  $T$  为计算时间间隔, 取 1 h.

式(13)中的投资回收系数  $R$  可表达为

$$R = \frac{r(1+r)^k}{(1+r)^k - 1} \quad (14)$$

式中:  $k$  为设备寿命, 本文中为 15 年;  $r$  为基准折现率, 本文中为 8%.

#### 2.2.2 能源指标

联供系统和分供系统的工作过程中, 一次能源的消耗包括生物质气、煤炭、天然气等多种形式. 本文将消耗一次能源所产生的热量折算为标准煤的消耗量.

CCHP 系统中的一次能源年节约率为

$$I_{PESR} = (F_{PESR}^{SP} - F_{PESR}^{CCHP}) / F_{PESR}^{SP} = \sum_{t=1}^{8760} \left\{ \left[ \frac{E_{gb}^{SP}(t) - E_{gb}^{CCHP}(t)}{\eta_{TP} \eta_{GR} \nu} + \left[ \frac{Q_b^{SP}(t) - \eta_b G_{pgu}(t) - Q_b^{CCHP}(t)}{\eta_b \nu} \right] \right] \right\} / \left[ \frac{E_{gb}^{SP}(t)}{\eta_{TP} \eta_{GR} \nu} + Q_b^{SP}(t) / \eta_b \nu \right] \quad (15)$$

式中： $F_{PESR}^{SP}$  为分供系统一次能源的年消耗量，kg； $F_{PESR}^{CCHP}$  为联供系统一次能源的年消耗量，kg； $\eta_{TP}$  为电厂发电效率； $\eta_{GR}$  为电网线路的传输效率； $\nu$  为标准煤的折算系数，本文取 8.13 (kW·h)/kg； $Q_b^{SP}(t)$  为分供系统中锅炉供热功率，kW。

### 2.2.3 环境指标

二氧化碳作为主要的温室气体，对自然环境的污染巨大。本文选取二氧化碳年减排率作为 CCHP 系统的环境指标。

系统的二氧化碳年减排率为

$$\begin{cases} I_{CRE} = (V_{CRE}^{SP} - V_{CRE}^{CCHP}) / V_{CRE}^{SP} \\ V_{CRE}^{SP} = E_{gb}^{SP}(t) \mu_c + G_b^{SP}(t) \mu_g \\ V_{CRE}^{CCHP} = E_{gb}^{CCHP}(t) \mu_c + (G_{pgu}^{CCHP}(t) + G_b^{CCHP}(t)) \mu_b \end{cases} \quad (16)$$

式中： $V_{CRE}^{SP}$  为分供系统的二氧化碳年排放量，kg； $V_{CRE}^{CCHP}$  为联供系统的二氧化碳年排放量，kg； $\mu_c$  为电网燃煤二氧化碳排放系数，g·(kW·h)； $\mu_b$  为生物质气二氧化碳排放系数，g·(kW·h)； $\mu_g$  为天然气二氧化碳排放系数，g·(kW·h)。

### 2.3 目标函数

本文选取经济性、环保性和节能性综合最优为目标优化配置 CCHP 系统。但在该优化问题中，有多个优化目标，各目标之间存在矛盾关系。本文利用线性加权的方法，将联供系统多目标优化问题变为单目标优化问题。

以上述的联供系统综合评价标准为基础，构建优化配置的目标函数为

$$\max V = \omega_1 I_{PESR} + \omega_2 I_{AOC} + \omega_3 I_{CRE} \quad (17)$$

式中： $\omega_1$  为联供系统一次能源节约率权重系数； $\omega_2$  为联供系统综合成本节约率权重系数； $\omega_3$  为联供系统二氧化碳年减排率权重系数； $V$  为联供系统优化设计综合优化目标。

权重系数是指各目标在优化求解的过程里所占的比例，满足

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (18)$$

各目标权重系数的取值不同，对应的优化运行的结果也就有着巨大的差异。本文通过判断矩阵法，对 3 个子目标进行优化运行过程中的重要性分级。为了

充分发挥 CCHP 系统在环保方面的优势，本研究选取环境指标作为 1 级指标，重要性参数设为 5。能源指标作为 2 级指标，重要性参数设为 3。经济指标作为优化调度的第 3 级指标，重要性参数设为 1。由此可构建判断矩阵<sup>[13]</sup>为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/5 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

确定了各个指标对应的权重依次为  $\omega_1 = 0.2583$ ， $\omega_2 = 0.1047$ ， $\omega_3 = 0.6370$ 。

### 3 求解算法

本文采用遗传算法求解两个 CCHP 系统配置结果。根据该优化问题的实际情况，确定了如图 3 所示的优化求解流程。

对于基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统，首先输入 CCHP 系统的特征参数(如内燃发电机组发电效率、电制冷机 COP、吸收式制冷机 COP 等)、建筑负荷、全年光伏电池组出力和遗传算法的参数(种群数、交叉率、变异率、遗传代数等)。本文采用以电定热的运行模式，优化变量为内燃发电机组容量和最低负载率，其他设备容量通过能量平衡关系计算可得。将优化变量初始化并编码，然后计算目标函数的适应度。检查计算结果是否满足优化条件，若满足则进行解码得到优化结果，否则原始种群通过复制、交叉、变异后组建新的种群，并且重新计算适应度，直到满足优化条件。

而对于基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统，由于制冷制热设备不同，其能量平衡方程稍有不同，但优化变量同样是内燃发电机组容量和最低负载率，后续计算过程与基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统计算过程类似。

优化求解均在 Matlab 软件中实现。遗传算法求解流程如图 3 所示。

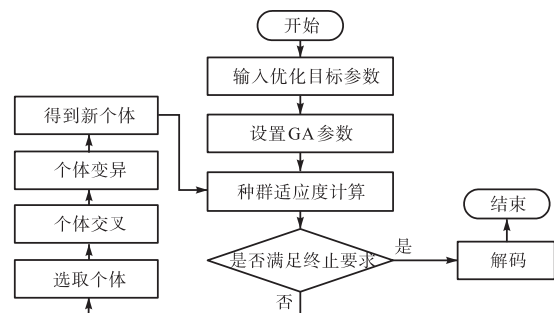


图 3 遗传算法流程

Fig.3 Flow chart of the genetic algorithm

### 4 仿真验证

#### 4.1 算例介绍

本文以济南市某养殖场为例,收集其建筑情况,利用其全年逐时冷、热、电负荷数据验证方法的可行性.该养殖场的建筑物信息如表 1 所示.建筑物的全

年电、热、冷负荷曲线如图 4 所示.

表 1 建筑物信息

Tab.1 Building information

建筑物高度/m	照明负荷/(W·m <sup>2</sup> )	设定温度/℃	人员密度/(人·m <sup>2</sup> )	设备用电功率/(W·m <sup>2</sup> )
3.1	12	24	0.16	21

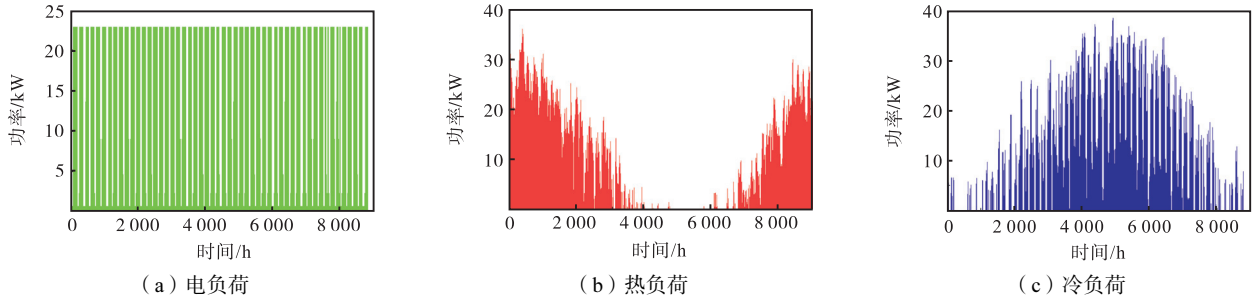


图 4 建筑物全年电、热、冷负荷曲线

Fig.4 Annual electrical, thermal, and cooling load curves of buildings

#### 4.2 参数设置

本文以上述建筑的冷、热、电负荷数据为例,在 Matlab 软件平台优化求解了联供系统中各设备的容量和系统评价指标.电网效率、直燃机制冷 COP 等联供系统的相关参数如表 2 所示.联供系统中各设备购置单价如表 3 所示.采用分时电价制计算,具体如表 4 所示.遗传算法的求解参数如表 5 所示.

表 2 联供系统的相关参数

Tab.2 Parameters of the CCHP system

电网输电效率	电厂发电效率	电制冷机 COP	吸收式制冷机 COP	锅炉热效率	直燃机 COP	
0.92	0.35	4	1.2	0.82	1.2	0.85

表 3 设备购置单价

Tab.3 Equipment purchase price 元/kW

内燃发电机组	电制冷机	吸收式制冷机	锅炉	直燃机	
				制冷	制热
4 367	970	1 280	1 000	1 500	1 000

表 4 济南市各时段电价

Tab.4 Price of electricity in different periods in Jinan

时段	购电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	售电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )
平(07:00—8:00, 11:00—19:00)	0.678	0.36
峰(08:00—11:00, 19:00—23:00)	1.069	0.62
谷(23:00—24:00)	0.363	0.12

表 5 遗传算法的求解参数

Tab.5 Solving parameters of genetic algorithm

种群大小	进化代数	交叉概率	变异概率
3.1	12	24	0.16

#### 4.3 结果分析

##### 4.3.1 配置结果

根据上述求解算法,在 Matlab 软件中计算得到

的基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统配置结果如表 6 所示.

基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统配置结果如表 7 所示.

表 6 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统配置结果

Tab.6 CCHP system configuration results based on the internal combustion engine and absorption chiller

内燃发电机		吸收式制冷机	电制冷机	锅炉容量/kW
容量/kW	最低负载率	容量/kW	容量/kW	
20	0.2	43	26	65

表 7 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统配置结果

Tab.7 CCHP system configuration results based on the internal combustion engine and direct-fired absorption chiller

内燃发电机		直燃机容量/kW	
容量/kW	最低负载率	制冷	制热
21	0.2	69	65

##### 4.3.2 指标分析

在 Matlab 软件中,计算得到了两个系统的性能指标如表 8 和表 9 所示.

结合表 8 和表 9 分析两个系统的各项性能指标.相对于分供系统,本文提出的两种 CCHP 系统结构均能大幅节约成本和节能减排,尤其是二氧化碳减排率均达到了 40%以上,这是在系统结构中加入了新能源(光伏和生物质气)的结果.对于同一个建筑的负荷和相同的综合性优化目标下,设计一个基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统在降低成本上较设计一个基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统更具优势.当出于经济性考虑时,建议选择基于

表 8 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统各评价指标

Tab.8 Evaluation indexes of CCHP system based on the internal combustion engine and absorption chiller

经济指标 $I_{AOC}$	能源指标 $I_{PESR}$	环境指标 $I_{CRE}$
13.69	18.73	43.93

表 9 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统各评价指标

Tab.9 Evaluation indexes of CCHP system based on the internal combustion engine and direct-fired absorption chiller

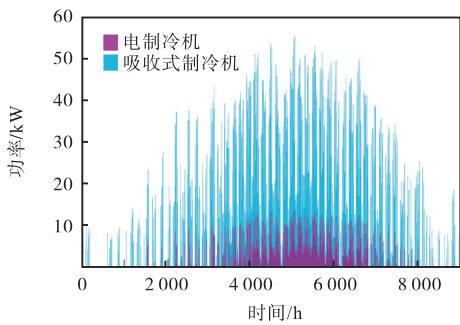
经济指标 $I_{AOC}$	能源指标 $I_{PESR}$	环境指标 $I_{CRE}$
10.28	22.68	47.59

内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统。但是

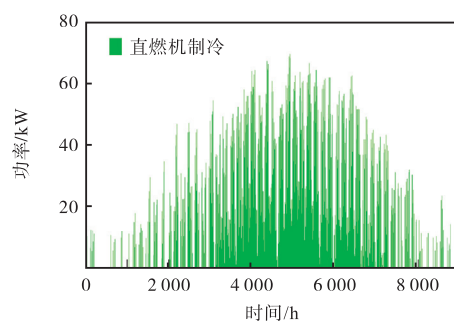
基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统在节能和环保上,易达到更好的效果,故可用于更加追求节能环保的情况。

4.3.3 运行结果分析

根据两个系统的配置结果,得到了两个系统全年的设备出力计划,如图 5~图 7 所示。由全年出力结果分析可知,在白天,特别是在夏季阳光特别强烈的时候,光伏能够满足大部分的电力负荷。同时,发电机组的输出也相对较少。在夜晚,或者光线很弱的时候,由发电机组补充供电;而当电力需求与发电机组额定容量之比小于最低负载率时,将在电网购电满足电力需求。当电负荷大于发电机组的额定功率时,不足的电力将来自电网;相反,多余的电量出售给电



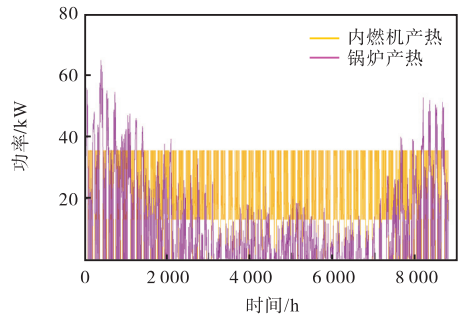
(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统



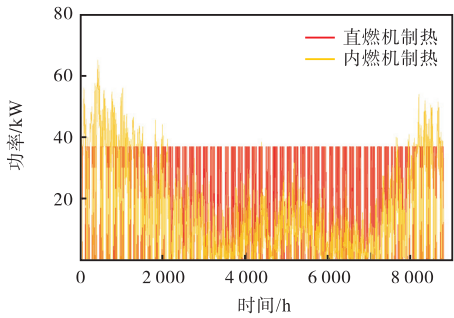
(b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统

图 5 CCHP系统中制冷设备出力计划

Fig.5 Refrigerating plant output plan of the CCHP system



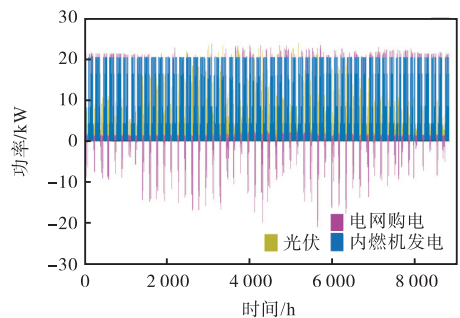
(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统



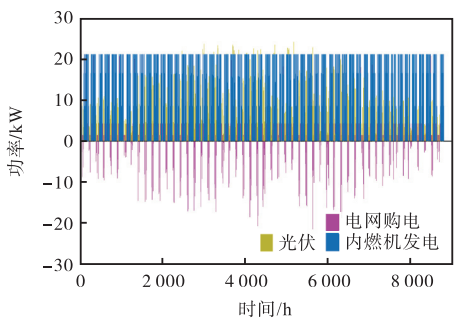
(b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统

图 6 CCHP系统中制热设备出力计划

Fig.6 Heating equipment output plan of the CCHP system



(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统



(b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统

图 7 CCHP系统中发电设备出力计划

Fig.7 Generating equipment output plan of CCHP

网. 由图 5 冷能分布可以看出, 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统主要由吸收式制冷机满足冷负荷, 这是由于发电机组提供大量余热用于制冷, 不足部分再由电制冷机补充. 由图 6 可以看出, 热负荷主要由发电机组余热供给, 不足部分由锅炉或

者直燃机补充.

本文选取其中冬季和夏季两个典型的冷、热、电日负荷数据为计算样本, 如图 8 所示, 对系统的运行情况进行详细比较和分析.

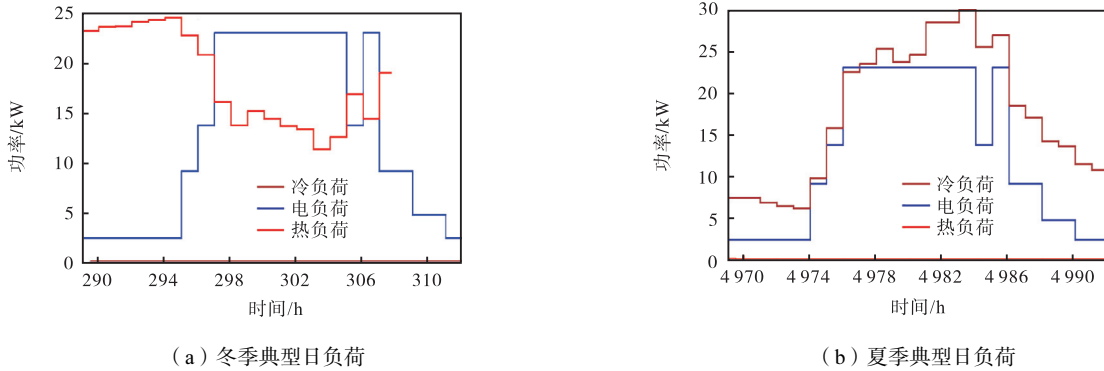


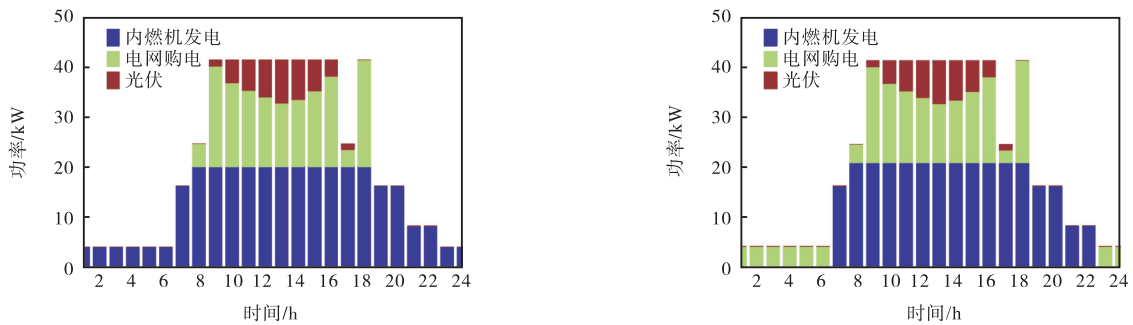
图 8 济南市某养殖场典型日负荷

Fig.8 Typical daily load curves of an office building in Jinan

两个系统的冬季工况设备日逐时出力曲线如图 9 和图 10 所示.

天每时刻都有出力的, 而基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统中, 在夜间的 23:00 到次日 06:00, 即夜间的 23:00—次日 06:00, 内燃发电机组无需出力, 此时段的电需求较低, 由电网购电来满足.

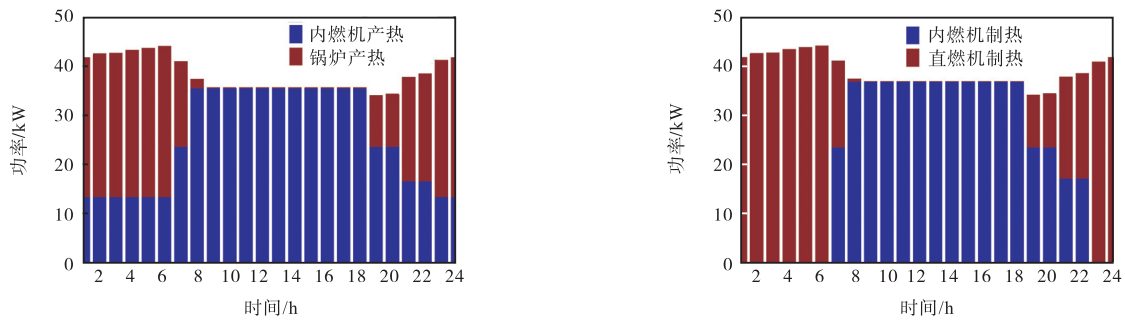
由图 9 可知, 在冬季工况中, 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统的内燃发电机组是全



(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统供电设备日逐时出力 (b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统供电设备日逐时出力

图 9 冬季工况各系统供电设备的日逐时出力

Fig.9 Daily hourly output curves of power supply equipment of each system in winter



(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统供热设备日逐时出力 (b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统供热设备日逐时出力

图 10 冬季工况各系统供热设备的日逐时出力

Fig.10 Daily hourly output curves of heating equipment of each system in winter

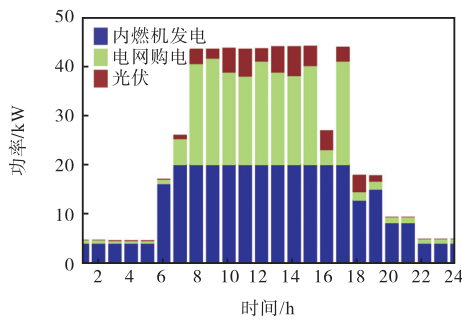
内燃发电机组是一种发电效率受负载率影响的设备,其在较低负载率情况下运行效率较低.虽然本文优化计算中设定了内燃发电机组的最低负载率不低于 0.2,但是无疑直燃机系统结构的运行模式更有利于发挥内燃发电机组的性能;且其夜间停机模式有利于内燃发电机组的维护和保养.

由于基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统内燃发电机组夜间出力较少,这也导致该结构下需要向电网购买更多的电能.

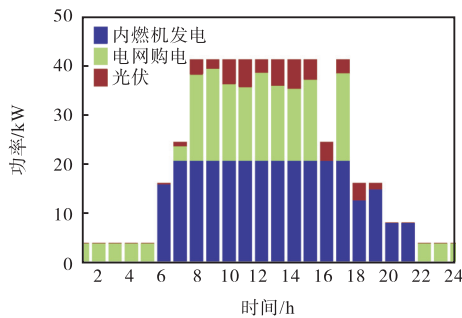
由图 9 和图 10 可知,在冬季工况中,由于基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统中的内燃发电机组在夜间停机,导致其没有足够的余热用于供暖,迫使直燃机组输出更多的热以满足热负荷.两个结构在白天的热出力是基本一致的,其中基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统的锅炉相当于基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统中直燃机制暖部分.

两个系统的夏季工况设备日逐时出力曲线如图 11 和图 12 所示.

对比图 9、图 11 可知,夏季工况光伏出力时长大于冬季工况光伏出力时长,这是由于夏季光照时间较长,故而光伏电池组可以在夏季生产出更多电力提供给用户.但是可以观察到夏季光伏的峰值出力低于



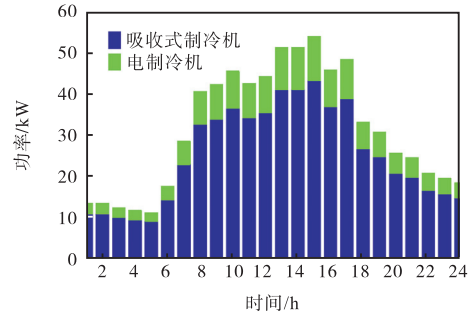
(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统供电设备日逐时出力



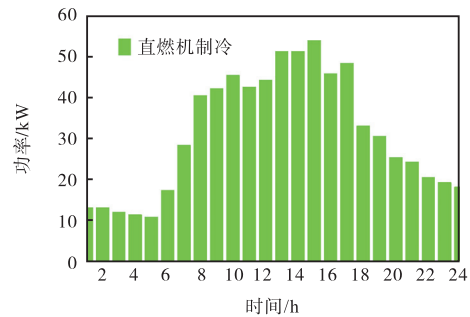
(b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统供电设备日逐时出力

图 11 夏季工况各系统供电设备的日逐时出力

Fig.11 Hourly daily output curves of power supply equipment of each system in summer



(a) 基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统供冷设备日逐时出力



(b) 基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统供冷设备日逐时出力

图 12 夏季工况各系统供冷设备的日逐时出力

Fig.12 Hourly daily output curves of cooling equipment of each system in summer

冬季光伏的峰值出力,这是由于光伏电池的出力受到温度影响较大,光伏发电效率与温度呈负相关.由于夏季光伏板的温度过高,导致了夏季工况中光伏出力峰值较低的现象.

由图 12 可知,由于负荷是一致的,基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统中电制冷机和吸收式制冷机的出力总和等于基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统中直燃机制冷部分出力.但是前者的制冷出力由两部分组成,由于存在电制冷部分,更加灵活可控;而后者的制冷出力全部由直燃机组组成,减少了电力的消耗,更加环保.

### 5 结论

(1) 经过本文提出的优化配置方法,新能源 CCHP 系统在经济性、节能性和环保性等方面相比传统分供系统有了明显提升,验证了所提优化方法和系统结构的优越性.

(2) 对比显示基于内燃发电机组和吸收式制冷机的 CCHP 系统在经济性、灵活性、可控性上更具优势,而基于内燃发电机组和直燃机的 CCHP 系统在节能性、环保性上更具优势,且其日常维护和保养更加方便.

## 参考文献:

- [1] Mu Yunfei, Chen Wanqing, Yu Xiaodan, et al. A double-layer planning method for integrated community energy systems with varying energy conversion efficiencies[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 1-12.
- [2] Gao Penghui, Dai Yanjun, Tong Yenwah, et al. Energy matching and optimization analysis of waste to energy CCHP (combined cooling, heating and power) system with exergy and energy level[J]. *Energy*, 2015, 79: 522-535.
- [3] Yan Yi, Zhang Chenghui, Li Ke, et al. An integrated design for hybrid combined cooling, heating and power system with compressed air energy storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1151-1166.
- [4] Stanek W, Gazda W, Kostowski W. Thermo-ecological assessment of CCHP (combined cold-heat-and-power) plant supported with renewable energy[J]. *Energy*, 2015, 92(3): 279-289.
- [5] Chahartaghi M, Sheykhi M. Energy, environmental and economic evaluations of a CCHP system driven by Stirling engine with helium and hydrogen as working gases[J]. *Energy*, 2019, 174(1): 1251-1266.
- [6] Yang G, Zhai X Q. Optimal design and performance analysis of solar hybrid CCHP system considering influence of building type and climate condition[J]. *Energy*, 2019, 174(1): 647-663.
- [7] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 26-33.  
Wang Chengshan, Hong Bowen, Guo Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 26-33 (in Chinese).
- [8] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(22): 16-22.  
Wang Ruiqi, Li Ke, Zhang Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(22): 16-22 (in Chinese).
- [9] Lu Shilei, Li Yuwei, Xia Hongwei. Study on the configuration and operation optimization of CCHP coupling multiple energy system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 177: 773-791.
- [10] 韩刚, 由世俊, 张欢. 基于负理想点的燃气冷热电联产系统优化方法[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2016, 49(10): 1106-1111.  
Han Gang, You Shijun, Zhang Huan. Optimization method for gas cchp system based on negative ideal point[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2016, 49(10): 1106-1111 (in Chinese).
- [11] Wang Jiangjiang, Jing Youyin, Zhang Chunfa. Optimization of capacity and operation for CCHP energy system by genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1325-1335.
- [12] Wei Dajun, Chen Alian, Sun Bo, et al. Multi-objective optimal operation and energy coupling analysis of combined cooling and heating system[J]. *Energy*, 2016, 98(1): 296-307.
- [13] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. *电网技术*, 2005, 29(6): 11-16.  
Zhao Xia, Zhao Chengyong, Jia Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(6): 11-16 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)