

生物质混煤冷热联产系统能效分析

包哲, 王旭, 吴楠楠, 李薇

(华北电力大学环境科学与工程学院, 北京102206)

摘要：对以生物质混煤为燃料的冷热电三联产系统，综合考虑其节能性、经济性和环保性等多种影响因素，建立多目标评价体系进行系统能效分析；并从能值角度出发，对不同的能值指标进行分析，探究混掺生物质对冷热电联产系统的影响，以确定生物质的最佳混掺比例。结果表明：在相同的负荷条件下，以生物质混煤为燃料的冷热电联产系统不仅可以节约系统的运行成本， SO_x 、 NO_x 、 CO_2 减排潜力较大，兼具良好的环境效益和经济效益；在10%、15%、20%3个混掺比例当中，生物质混掺比为20%时的生物质混煤冷热电联产系统能值产出率最大，环境效益最高，经济性和环保性都有比较好的发展前景。

随着我国经济的快速发展，能源的需求量与日俱增，能源短缺问题与经济快速发展之间的矛盾日益增大。冷热电联产系统(combined cooling, heating and power, CCHP)作为一种新型的综合能源系统，不仅可以实现冷、热、电3种形式的能量同时供给，有效提高系统的一次能源利用率和经济效益，还能够消纳可再生能源，使电力系统的运行更加灵活与清洁。目前，国内外对CCHP系统的研究主要以系统评价体系、系统优化、系统重点装置的研发与应用为主。周任军等^[1]

以冷

热电系统

为研究对象，结合

生产成本和环境成本构建目标函数，

分析冷、热、电负荷需求量特点。江丽霞等^[2]

通过研究冷热电联产系统的节能原因，分析比较了多种联产系统方案，揭示了系统能量的基本运行规律、转换特点、评价准则。安志伟等^[3]

分别对冷电联产系统、热电联产系统、冷热电联产系统的节能因素进行探究，结果表明补燃率越大，节能率越小。冯志兵等^[4]

从热力学角度出发，对冷热电联产系统进行分析，并比较了多种评价准则，结果表明燃气轮机温比的升高有利于提升系统的节煤率和一次能源利用率。

Gorsek K等^[5]通过分析冷热电联产系统和分产系统常见的经济性评价指标，比较这两种系统的优异性。Marc A.Rosen等^[6]

从系统的能效性指标出发，对冷热电联产系统的性能进行了综合分析，结果表明选取的评价指标不同，评价结果也有所差异。Armando

Fontalvo等^[7]

从压比、透平效率等参数对系统焓效率的影响出发建立了系统计算模型，结果表明透平效率的提高可减少总烟损。综上所述，目前大部分研究是基于煤炭或生物质直燃的供电方式，通过建立评价模型，分析系统的运行策略和设备的运行工况对系统能源利用率、经济效益和环境效益的影响，而并未探究生物质煤炭混燃供能方式对系统能效性的影响。

我国作为农业大国，生物质产量十分丰富，发展生物质混煤冷热电联产系统，不仅可以有效地解决我国能源短缺危机和大气污染问题，还可以提升生物质发电的经济效益。为此，本文以生物质混煤冷热电联产系统作为案例，研究不同容量下生物质混煤系统的性能特点，从“节能-经济-环保”角度出发，建立冷热电系统综合评价模型，基于多指标分析方法，探究系统指标随生物质与煤混掺比的变化规律，确定最佳混掺比，从而为制定最佳的系统运行方案，提供理论基础。

1冷热电联产系统

冷热电联产系统的实质是有效地实现了能源的梯级利用^[8]，冷热电联产系统工作原理如图1所示。

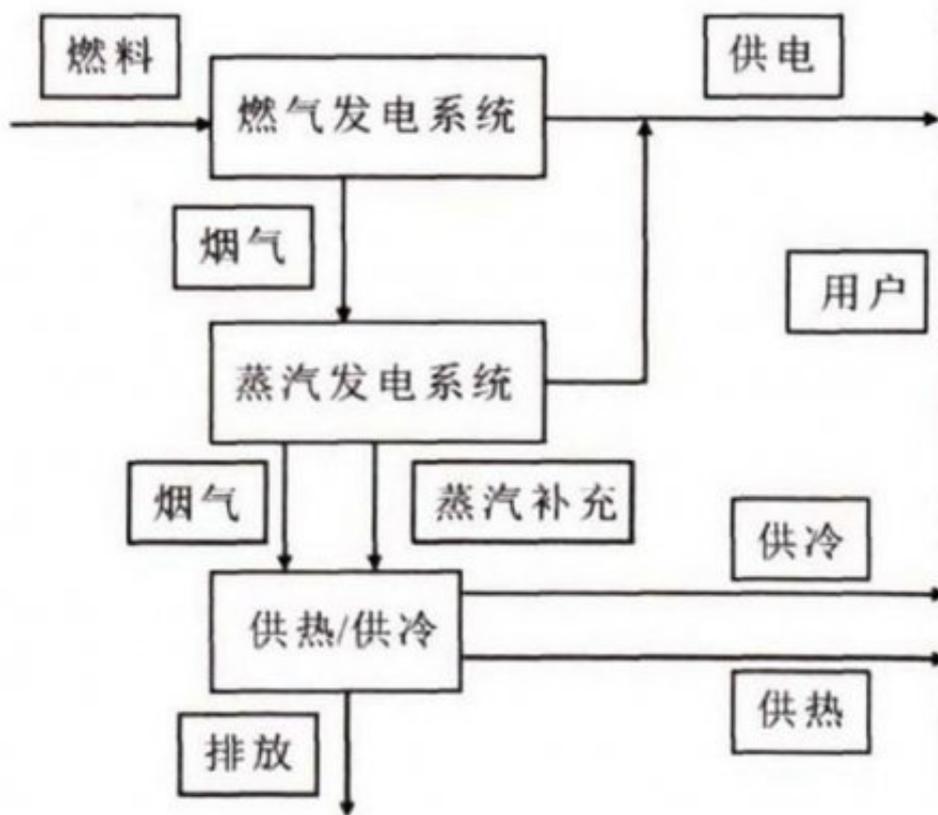


图 1 冷热电联产系统工作原理

Fig.1 Working principle diagram of the CCHP system

燃料燃烧产生的高品位能源用于燃气轮机发电系统向用户供电；所产生的高温烟气一部分输送至蒸汽发电系统，生产的电量再次输送给用户，另一部分烟气进入供冷、供热系统，以满足用户的冷热需求。相比于常规火力发电系统或冷热电分产系统，冷热电联产系统由于高效地实现了能源的梯级利用，其能源利用效率得到了大幅度的提高。据相关数据统计，冷热电联产系统一次能源利用率可达到80%以上^[9]。

2冷热电联产系统综合评价

2.1评价方法

热力学第一定律、第二定律评价方法是常用的CCHP系统评价方法。其中，热力学第一定律分析法主要根据能量之间

的互

相转化和

守恒定律来评价联

产的节能性和经济性。热力学第二定

律分析法主要以功损失和烟效率为评价指标^[10]

。上述这2种评价方法都比较注重热经济性的分析和评价。在冷热电系统的综合评价中，根据评价角度不同，衍生出以下指标类别：1) 经济性指标包括年能耗费用、年一次能源节约费用等；2) 节能性指标包括煤耗量、节能率、一次能源利用等；3) 环境性指标包括CO₂排放量、NO_x排放量、SO₂排放量等。

2.2评价实例

2.2.1节能性分析

节能性分析方法可用来分析联产系统的节煤量和一次能耗率等指标^[11]。

1) 一次能耗率

一次能耗率是指消耗的一次消耗能量与输出能量的比值，一次能耗率越小，系统的一次能源节能性越好。分产系统一次能耗率的计算包括制冷、供热、发电3部分。

制冷系统一次能耗率 P_L 值为

$$P_L = \frac{1}{C_{COP} \times \eta_f} \quad (1)$$

制热系统一次能耗率 P_R 值为

$$P_R = \frac{1}{\eta_f} \quad (2)$$

发电系统一次能耗率 P_D 值为

$$P_D = \frac{1}{\eta_e} \quad (3)$$

分产系统一次能耗率 P_{FC} 为

$$P_{FC} = \frac{P_R + Q_R + P_L + Q_L + P_D + Q_D}{Q_R + Q_L + Q_D} \quad (4)$$

联产系统一次能耗率 P_{LC} 为

$$P_{LC} = \frac{Q_C}{Q_C + Q_L + Q_D} \quad (5)$$

式中： η_f 为区域供热的锅炉效率； η_e 为电厂发电效率； C_{COP} 为压缩式或吸收式制冷机的制冷系数； Q_R 、 Q_L 、 Q_D 分别为分产系统的热量负荷、冷量负荷和电量负荷，kW； Q_C 为联产系统的一次能耗负荷，kW。

一次能源节约率 P_{PER} 为

$$P_{PER} = 1 - \frac{P_{LC}}{P_{FC}} \quad (6)$$

2) 节煤量

节煤量是指在相同的热、冷、电负荷条件下，联产系统相较于分产系统所节约的煤量，该指标可直接反映系统的经济性和节能性。

分产系统制冷煤耗量为

$$M_E = \frac{Q_L \times b}{C_{\text{COP}} \times \eta_y} \quad (7)$$

分产系统制热煤耗量为

$$M_R = \frac{3\,600 \times Q_R \times \eta_r}{q \times \eta_{\text{gr}}} \quad (8)$$

分产系统发电煤耗量为

$$M_D = Q_D \times (1 - \eta_D) \times b \quad (9)$$

分产系统煤耗量为

$$M_F = M_E + M_R + M_D \quad (10)$$

联产系统煤耗量为

$$M_L = \frac{3\,600 \times Q_C}{q} \quad (11)$$

联产系统节煤量为

$$\Delta M = M_L - M_F \quad (12)$$

式中： η_y 为制冷时压缩机的效率； b 为电网的供电煤耗率； q 为煤的低位发热量，kJ/kg； h_r 为热网效率； η_{gr} 为锅炉供热效率； η_D 为厂用电率。

2.2.2 经济性分析

1) 运行费用

分产系统的运行费用为

$$T_{FC} = \sum_{S=1}^3 \left[T_S \times \sum_{h=1}^{24} (E_{FC} \times C_h + F_{FC} \times C_f) \right] \quad (13)$$

联产系统的运行费用为

$$T_{LC} = \sum_{S=1}^3 \left[T_S \times \sum_{h=1}^{24} (E_{LC} \times C_h + F_{LC} \times C_f) \right] \quad (14)$$

费用节约率为

$$C_{CR} = 1 - \frac{T_{LC}}{T_{FC}} \quad (15)$$

式中： T_S 为典型日实际运行时间； E 为外购电网电量系统运行期间每小时从电网购买的电量； F_{FC} 、 F_{LC} 分别为联产和分产系统每小时消耗的燃料量； C_h 、 C_f 分别为电价和气价。

2) 环境费用

环境费用指大气污染物 (SO_2 和 NO_x) 减排所带来的经济效益。根据2017年颁布实行《中华人民共和国环境保护税法》，具体的污染物减排量和相关收益计算公式如下。

SO₂ 减排量为

$$M_{\text{SO}_2} = \Delta M \times \eta_{\text{SO}_2} \times \lambda_{\text{SO}_2} \quad (16)$$

NO_x 减排量为

$$M_{\text{NO}_x} = \Delta M \times \eta_{\text{NO}_x} \times \lambda_{\text{NO}_x} \quad (17)$$

减少环境保护税为

$$C_H = \sum \frac{D}{\varepsilon} \times \lambda \quad (18)$$

节煤费为

$$C_M = 0.4 \times \Delta M \quad (19)$$

式中： η_{SO_2} 、 η_{NO_x} 分别为系统煤质的含硫率、含氮率； λ_{SO_2} 、 λ_{NO_x} 分别为烟气除尘系统的脱硫率、脱氮率； D 为大气污染物的减排量，kg； ε 为污染当量值，kg； λ 为具体适用税额，元。

2.2.3 环保性分析

冷热电系统的大气排放物中99.5%为CO₂，因此CO₂减排潜力成为评价系统中重要的环境指标。冷热电系统CO₂减排率Eer可表示为：

$$E_{ER} = \frac{C_{CDE_F} - C_{CDE_L}}{C_{CDE_L}} \quad (20)$$

$$C_{CDE_F} = \mu_g \times M_F \quad (21)$$

$$C_{CDE_L} = \mu_g \times M_L \quad (22)$$

式中： C_{CDE_F} 和 C_{CDE_L} 分别为冷热电分产系统、联产系统的 CO_2 排放量，kg； μ_g 为煤燃烧产生的 CO_2 排放量，t/t。

2.2.4 案例分析

本文案例中冷热电联产子系统分别包括汽轮机发电机、高温烟气供热、溴化锂制冷机组。冷热电分产子系统分别为汽轮机发电机组、高温烟气供热、压缩式制冷机。将冷热电联产系统与分产系统进行综合比较，系统具体技术参数^[12]见表1。基于本文系统评价模型，计算多种评价指标，计算结果见表2。

表 1 系统具体技术参数

Tab.1 The technical parameters of the system

参数	数值
供热的锅炉效率 η_f	0.8
电厂发电效率 η_g	0.33
制冷机性能系数 C_{COP}	4.13
制冷压缩机效率 η_y	0.75
供电煤耗 $b/(\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.43
煤低位发热 $q/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	29 270
热网效率 η_r	0.98
锅炉供热效率 η_{gr}	0.75
电厂用电率 η_D	0.16
煤质含硫率 $\eta_{\text{SO}_2}/\%$	0.9
煤质含氮率 $\eta_{\text{NO}_x}/\%$	1.2
烟气脱硫率 $\lambda_{\text{SO}_2}/\%$	90
烟气脱氮率 $\lambda_{\text{NO}_x}/\%$	90
大气污染当量值 ε/kg	0.95

表 2 系统节能指标及 CCHP 系统的综合效益

Tab.2 Energy saving indicators for different systems and comprehensive benefits of the CCHP system

节能指标	冷热电联产系统	冷热电分产系统
煤耗量/ $(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	10 092	13 192.28
一次能耗率	1.10	1.48
CO ₂ 排放量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	26.44	34.56
节能指标	CCHP 系统效益	
CO ₂ 减排率	0.23	
SO ₂ 减排量/kg	27.90	
NO _x 减排量/kg	33.48	
节约环境保护税/ $(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	740.21	
节煤费用/ $(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	1 240.11	
节煤量/kg	3 100.28	

由表2可知：在供应相同冷、热、电负荷的条件下，从节能指标来看，冷热电分产系统的一次能耗率为1.48煤耗量为13192.28kg/h；冷热电联产系统的一次能耗率为1.10，煤耗量为10092kg/h。对比可知，采用冷热电联产系统后，节煤量可达3100.28kg/h。从环保的指标来看，冷热电分产系统CO₂排放量为34.56t/h，联产系统CO₂排放量为26.44t/h，CO₂减排率为0.23。同时，冷热电联产系统还可以减少排放27.90kg的SO₂和33.48kg的NO_x。从经济指标来看，冷热电联产系统环境保护税可节约740.21元/h，节约煤费用达1240.11元/h。综上所述，冷热电联产系统不仅可以提升一次能源的利用率，减少耗煤量，节约生产升本，还能有效的减少CO₂、SO₂、NO_x等温室气体和大气污染物的排放。

2.2.5 生物质混煤冷热联产系统多目标分析

从上述可以看出，相比于冷热电分产系统，冷热电联产系统在节能性指标、经济性指标和环保性指标分析中优势明显。在此基础上，将进一步对常规燃煤冷热电联产系统和生物质混煤冷热电联产系统的运行性能进行对比分析。

由于系统运行性能的好坏与其节能性、经济性和环保性均有密不可分的联系，因此本文基于多目标评价指标 D_{DB} 值，首先通过专家打分法对节能性指标 (P_{PER})、经济性指标 (C_{CR}) 和环境性指标 (E_{ER}) 进行权重打分^[13-14]，根据打分结果构建递阶层次结构模型和相应的判断矩阵；然后根据式(23)和式(24)对所构建的矩阵进行一致性检验，如果一致性指标比例小于 0.1，则一致性检验通过；随后根据专家打分值以及判断矩阵中特征值和特征向量之间的关系，计算各个综合评价指标的权重；最后将各指标权重系数代入式(25)中，其中 D_{DB} 值为节能性、经济性和环保性三者相结合的多目标评价指标值。各指标权重反映不同影响因素在 D_{DB} 中的贡献程度， D_{DB} 值越大，系统的整体性能越好。

$$C_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (23)$$

$$C_{CR} = \frac{C_{CI}}{R_{RI}} \quad (24)$$

$$D_{DB} = \alpha \times P_{PER} + \beta \times C_{CR} + \gamma \times E_{ER} \quad (25)$$

式中： C_{CI} 和 R_{RI} 为一致性指标； λ_{\max} 为判断矩阵最大的特征根； α 、 β 、 γ 分别表示节能性指标、经济性指标和环保性指标的权重系数。经专家打分^[13]，通过层次分析法可得 α 、 β 、 γ 值，结果见表 3。

表 3 不同评价指标权重值
Tab.3 Different evaluation index weight values

项目	α	β	γ
权重	0.273 2	0.433 4	0.293 3
一致性指标比例	0.043 < 0.1		

表 4 为燃煤冷热电系统和生物质混煤冷热电系统在 1 年中典型月份的多目标评价结果。由表 4 可知：燃煤冷热电联产系统中 D_{DB} 值最大的季节为过渡季，其次是夏季和冬季；而生物质混煤冷热电联产系统 D_{DB} 值最大的季节为夏季，其次是冬季和过渡季。从经济效益来看，生物质混煤冷热电系统没有明显的优势，但从环境效益来看，生物质混煤联产系统具有更高的 CO_2 减排潜力。

表 4 燃煤和生物质混煤冷热电系统多目标评价结果
Tab.4 The solutions of multi-objectives evaluation for two CCHP systems

系统	时间	一次能源 节约率/%	经济性 指数	CO ₂ 减排率/%	D_{DB}
燃煤联产 系统	夏季	27.18	0.85	18.56	0.50
	过渡季	15.31	2.54	15.23	1.19
	冬季	26.82	0.37	20.21	0.29
生物质 混煤联产 系统	夏季	39.94	2.01	35.12	1.08
	过渡季	12.76	-0.41	28.34	-0.06
	冬季	29.82	1.42	33.05	0.79

3 生物质混煤冷热电系统能效分析

由于生物质混煤冷热电联产系统环境效益更佳，故探寻不同的燃料混掺比，对发挥生物质能的最大作用具有重要研究意义。能值概念及能值分析理论^[15]

最早由美国著名系统生态学家H.T.Odum提出，能值分析理论作为一个能够同时考虑自然系统和经济系统，并比较它们产品的分析方法，已被广泛应用

于生态系统、农业生产和社会经济等领域的研究^[15-17]

。本文基于能值分析理论，以100、200、300MW
燃煤发电机组为例^[18-19]

，通过计算不同系统的能值产出率、可再生能源利用率和能值可持续性指标，研究不同容量混生物质燃煤系统中的最佳生物质混掺比。当生物质混掺比例过大时，容易造成锅炉结渣，且生物质混掺比高于20%时，系统性能主要受燃烧升温速率和燃烧工况的影响^[20-21]，因此本文选择生物质混掺比例分别为10%、15%、20%（质量分数）。

3.1 能值分析指标

3.1.1 能值产出率

能值产出率 (E_{EYR}) 为系统能值的投入和产出之比, 是评价系统生产运行效率的重要指标。 E_{EYR} 越高, 说明系统生产运行效率越好。

$$E_{EYR} = \frac{R + N + F}{F} \quad (26)$$

式中: R 为可再生能源能值; N 为不可再生能源能值; F 为总反馈能值。

3.1.2 环境负载率

环境负载率 (E_{ELR}) 为不可再生能源和社会反馈的能值之和与可再生能源能值的比值。本文在原有环境负载率模型的基础上, 综合考虑了生产中废物的综合利用, 在模型中加入了社会反馈能值。 E_{ELR} 越低, 说明系统的环保性越好。

$$E_{ELR} = \frac{N + F - W_N}{R + W_R} \quad (27)$$

式中， W_N 为余能利用后不可再生能源能值； W_R 为余能利用后可再生能源能值。

3.1.3 能值可持续性指标

能值可持续性指标 (E_{ESI}) 为 E_{EYR} 和 E_{ELR} 的比值。可持续性指标分为 3 种情景：当 $E_{ESI} < 1$ 时，说明系统不可持续发展；当 $1 \leq E_{ESI} < 10$ 时，说明系统在经济性和环保性都有比较好的发展前景；当 $E_{ESI} \geq 10$ 时，说明系统在环保方面具有可持续发展潜力远大于系统的经济效益，系统的经济性略低。

$$E_{ESI} = \frac{E_{EYR}}{E_{ELR}} \quad (28)$$

3.2 结果分析

3.2.1 能值产出率

图2为当生物质混掺比为10%、15%和20%时不同生物质混煤冷热电系统的能值产出率。如图2所示：当混掺相同比例的生物质时，随着机组负荷的增加，能值产出率呈先升高后降低的变化规律；对于同一机组，随着混掺生物质比例的增加，能值产出率呈现逐渐升高的趋势；3种机组负荷下，200MW机组的能值产出率最高，即生物质系统生产效率最大。可见，仅从能值产出率角度来看，混掺20%生物质的200MW生物质混煤冷热电系统更具有竞争力。

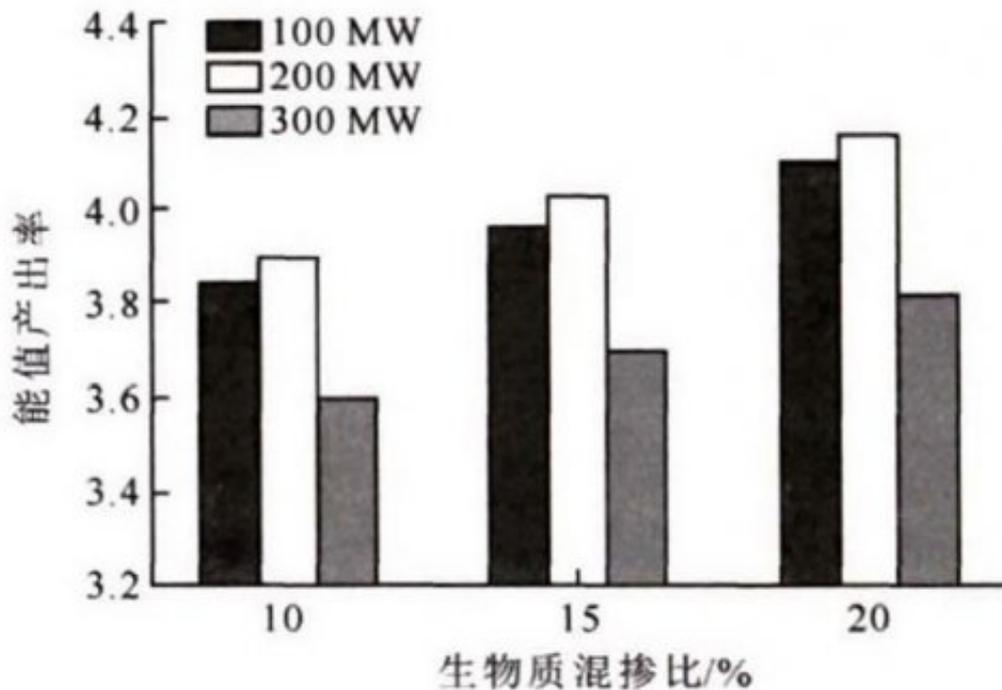


图2 生物质混掺比为10%、15%和20%时
不同系统能值产出率

Fig.2 The emergy yield ratios of different CCHP systems at
three biomass-blending ratios (10%, 15% and 20%)

3.2.2环境负载率

图3为当生物质混掺比为10%、15%和20%时不同系统的环境负载率。如图3所示：当混掺相同比例生物质时，对于不同系统，随着机组负荷的增加，环境负载率逐渐升高；对于同一机组，随着混掺生物质比例的增加，环境负载率逐渐降低。这可能是由于混掺生物质的能值整体占比较小，对于混煤冷热电联产系统影响较小。3种机组负荷下，100MW机组的环境负载率最小，即承受环境的压力最小。这是由于100MW的生物质混煤冷热电系统的产能相对较小，因此产生的环境污染也最少。可见，仅从环境负载率角度来看，混掺20%生物质的100MW生物质混煤冷热电系统更具有竞争力。

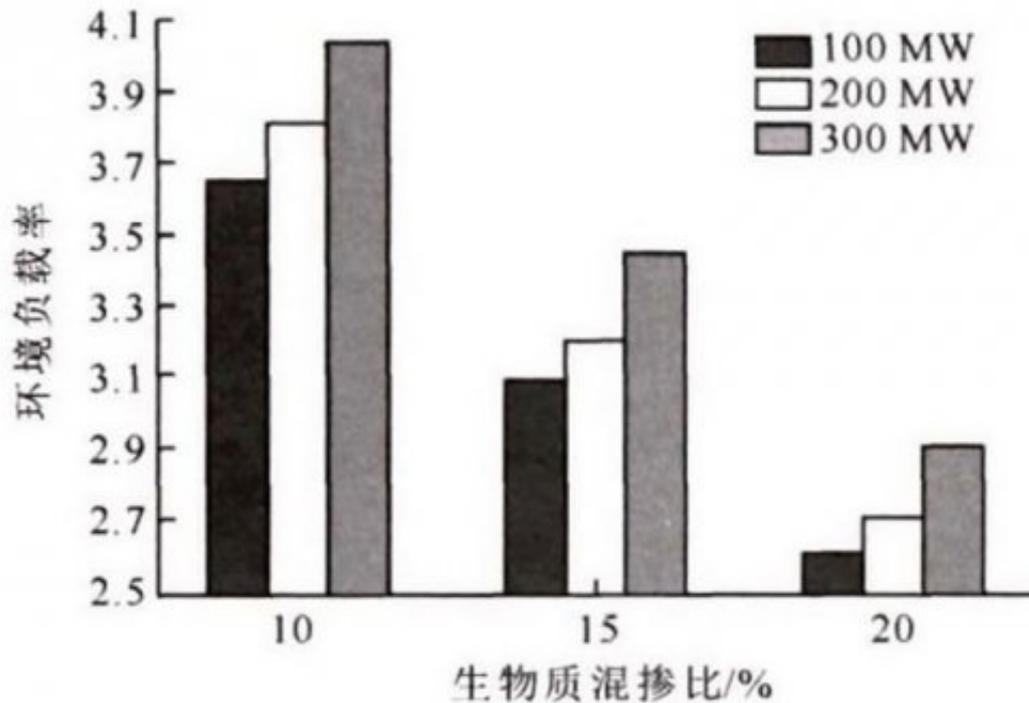


图3 生物质混掺比为10%、15%和20%时
不同系统环境负载率

Fig.3 The environmental load ratios of different CCHP systems at three biomass-blending ratios (10%, 15% and 20%)

3.2.3 能值可持续指标

图4为当生物质混掺比为10%、15%和20%时不同系统的能值可持续指标。如图4所示：当混掺相同比例生物质时，随着机组负荷的增加，能值可持续指标逐渐降低，即系统越小，能值可持续指标升高越明显，对应系统的能值可持续性越好；对于同一机组，随着混掺生物质比例的增加，能值可持续指标值逐渐升高，不同机组能值可持续性上升趋势相当。

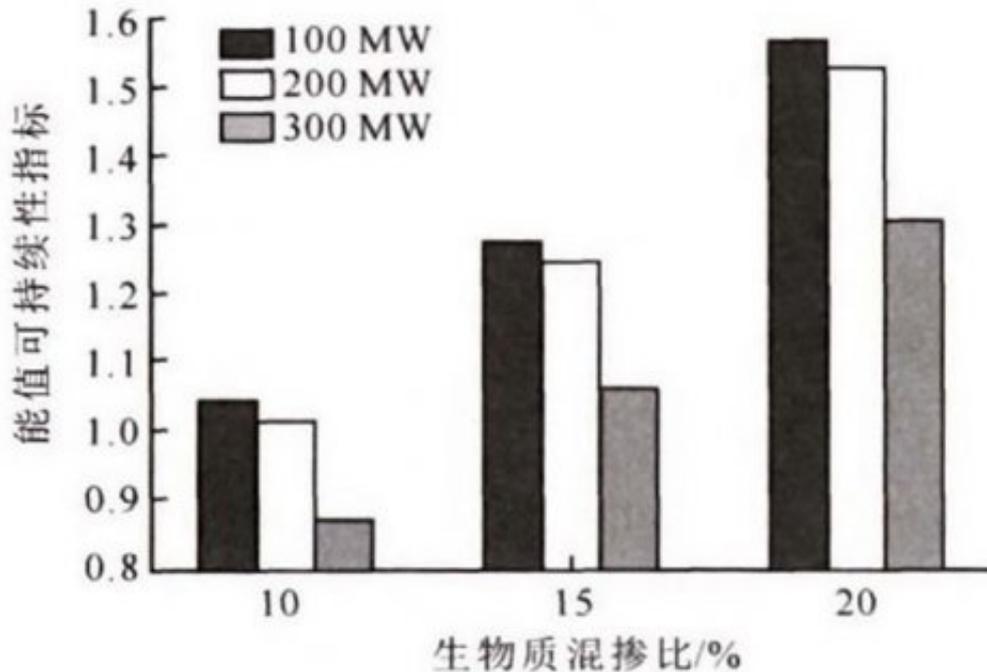


图4 生物质混掺比为10%、15%和20%时
不同系统能值可持续指标

Fig.4 The energy sustainability indexes of different CCHP systems at three biomass-blending ratios (10%, 15% and 20%)

对于300MW生物质混煤冷热电系统，当生物质混掺比为10%时，能值可持续指标值小于1；当混掺比为15%、20%时，能值可持续指标值均大于1。这表明随着生物质混掺比例的增加，该系统的所属状态发生了改变，即从长远角度来看，该系统具有较强的发展活力以及可持续性。对比3种负荷生物质混煤冷热电系统，100MW负荷机组的能值可持续指标值最大，即可持续性最强。综上所述，从能值可持续性综合指标来说，混掺20%的100MW生物质混煤系统更有利于总体发展，竞争力也更强。

4结论

1)考虑多种影响因素，建立了基于一次能源节约率、运行费用节约率和CO₂减排率三者相结合的冷热电联产系统多目标评价体系。

2)综合分析生物质混煤冷热电联产系统的能效性，并兼顾良好的环境效益和经济效益，3个混掺比例当中，20%为最佳生物质混掺比。本文对于选择合适的能源利用方式和生物质混合比例提供了重要依据和方法。

[参 考 文 献]

- [1] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. 电网技术, 2012(6): 8-14.
ZHOU Renjun, RAN Xiaohong, MAO Falong, et al. Energy-saving coordinated optimization scheduling of distributed cold, heat and power triple supply system[J]. Power System Technology, 2012(6): 8-14.
- [2] 江丽霞, 金红光, 蔡睿贤. 冷热电三联供系统特性分析与设计优化研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(增刊 1): 21-24.
JIANG Lixia, JIN Hongguang, CAI Ruixian. Research on characteristics analysis and design of cold heat and power system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(Suppl.1): 21-24.
- [3] 安志伟. 燃气热电联产系统的节能研究[J]. 机电信息, 2018(3): 49.
AN Zhiwei. Energy saving research of gas-fired cogeneration system[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(3): 49.
- [4] 冯志兵, 金红光. 冷热电联产系统的评价准则[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 725-728.
FENG Zhibing, JIN Hongguang. Evaluation criteria for CCHP systems[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 725-728.
- [5] GORSEK A, GLACIC P. Integration of a steam turbine[J]. Process Applied Thermal Engineering, 2003, 10(23): 1227-1234.
- [6] ROSEN M A, LE M N, DINCER I. Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(1): 147-159.
- [7] FONTALVO A, PINZON H, DU ARTE J, et al. Exergy analysis of a combined power and cooling cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1/2): 164-171.
- [8] MAGO P J, CHAMRA L M. Analysis and optimization of

- CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations[J]. *Energy & Buildings*, 2009, 41(10): 1099-1106.
- [9] MARAVER D, SIN A, ROYO J, et al. Assessment of CCHP systems based on biomass combustion for small-scale applications through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters[J]. *Applied Energy*, 2013, 102(2): 1303-1313.
- [10] 董磊. 冷热电联产系统运行优化与分析评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 31.
DONG Lei. Research on operation optimization and analysis evaluation of CCHP System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 31.
- [11] ZHU K, LI X, TAN Z, et al. Model of analyzing technological economy of distributed CCHP energy system on energy saving and emission reduction[J]. *Technology Economics*, 2012, 23: 2258.
- [12] 张春鑫. 冷热电联产系统节能分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012: 32.
ZHANG Chunxin. Energy-saving analysis of CCHP system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012: 32.
- [13] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国安全科学学报*, 2008(5): 152-157.
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. *China Safety Science Journal*, 2008(5): 152-157.
- [14] 李龙. 智能电网多能源协调评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 17.
LI Long. Multi-energy coordination assessment of the smart grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 17.
- [15] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 129-131.
- LAN Shengfang, QIN Pei. Emergy analysis of ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 129-131.
- [16] YI H, SRINIVASAN R S, BRAHAM W W, et al. An ecological understanding of net-zero energy building: Evaluation of sustainability based on emergy theory[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 654-671.
- [17] FANG D L, CHEN B, TASAWAR H, et al. Emergy evaluation for a low-carbon industrial park[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 392-400
- [18] 柳志平. 基于能值理论的生物质混煤发电/热电联产系统评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 43.
LIU Zhiping. Evaluation of biomass coal-fired power generation/cogeneration system based on emergy theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 43.
- [19] 刘殿海, 杨勇平, 杨昆, 等. 计及环境成本的火电机组供电成本研究[J]. *中国电力*, 2005, 38(9): 24-28
LIU Dianhai, YANG Yongping, YANG Kun, et al. Research on power supply cost of thermal power unit considering environmental[J]. *Electric Power*, 2005, 38(9): 24-28
- [20] 嵇顺. 生物质混煤协同优化燃烧机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018: 35.
JI Shun. Study on cooperative optimization of combustion mechanisms of biomass and coal blends[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018: 35.
- [21] 刘翔. 生物质混煤燃烧及灰熔融动力学特性的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 12.
LIU Xiang. Study on co-combustion kinetics and ash fusion kinetics of biomass with bituminous coal[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 12.

(责任编辑 杨嘉蕃)

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/160342.html>