

燃气发电机组能效指标修正及对标管理

Energy efficiency indicator modification and benchmarking management for
gas turbine units

朱亚迪¹, 李琛², 谢大幸¹, 徐婷婷¹
ZHU Yadi¹, LI Chen², XIE Daxing¹, XU Tingting¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 湖北华电武昌热电有限公司, 武汉 430061)

(1. Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China;

2. Hubei Huadian Wuchang Thermal Power Company Limited, Wuhan 430061, China)

摘要: 为完善能效指标对标管理体系, 提高国内燃气发电机组能效指标管理水平, 结合传统燃煤发电机组对标管理工作经验和燃气发电机组特性, 根据对标管理原则建立了3个层级的能效指标对标体系, 采用数据统计分析、机理分析、仿真计算等方法建立各边界因素影响供电气耗的修正系数计算模型。根据计算模型, 在某E级燃气发电企业数字一体化平台上搭建了厂级能效指标对标管理系统, 实现了能效指标的在线对标和分析, 便于运行人员从横向和纵向2个维度寻找能耗差距, 诊断分析能效偏差的部位和原因, 为机组运行优化调整提供指导。

关键词: 燃气发电机组; 能效指标; 对标管理; 边界因素; 修正系数; 诊断分析

中图分类号: TK 472

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)05-0037-06

Abstract: In order to develop the benchmarking management system for energy efficiency indicators, and improve the energy efficiency indicator management level for domestic gas turbine units, a three-level energy efficiency indicator benchmarking system was established based on the benchmarking experiences in traditional coal-fired units and characteristics of gas turbine units. Data statistical analysis, mechanism analysis, simulation calculation and other methods were used to establish the calculation model for the correction coefficients of power supply gas consumption affected by various boundary factors. According to the calculation model, a plant-level energy efficiency indicator benchmarking management system was established on a digital integrated platform of an E-level gas power generation enterprise, which achieved online benchmarking and analysis of energy efficiency indicators. This system makes it easy for operators to find the energy consumption gap from horizontal and vertical dimensions, and make diagnostic analysis on the location and causes of energy efficiency deviations, which provides guidance for unit operation optimization adjustment.

Keywords: gas turbine unit; energy efficiency indicators; benchmarking management; boundary factors; correction coefficients; diagnostic analysis

0 引言

随着国家能源结构的不断调整, 燃气-蒸汽联合循环发电机组因高效、环保、灵活等优势在我国电力系统中的装机容量逐步增加, 截至2017年年底, 国内燃气-蒸汽联合循环发电机组装机容量达75.70 GW^[1], 根据国家有关规划, “十三五”期间, 我国燃气-蒸汽联合循环发电机组的装机容量将增加50.00 GW^[2]。近年来, 国家对发电机组的节能减排要求越来越严格, 燃气-蒸汽联合循环发电企业也越来越重视机组的节能管理工作。

能效指标对标作为一种实用、有效的节能管理方法, 在我国高耗能企业节能管理工作中应用比较广泛^[3]。相较于燃煤发电企业, 燃气-蒸汽联合循环发电行业的能效指标对标工作仍存在一定的差距, 相关的标准、方法和规范仍有所欠缺^[4-6], 主要原因如下: (1) 我国燃气-蒸汽联合循环发电技术大规模应用比较晚, 对应的能效指标体系、边界因素的修正分析不够完善, 无法有效指导能效指标对标工作的开展; (2) 燃气发电机组技术门类比较多, 国内主流的有GE、西门子和三菱公司的E级、F级燃气轮机, 装机形式包括一拖一、二拖一等, 运行方式包括连续运行、昼夜启停、供热和纯凝等, 导致影响燃气-蒸汽联合循环发电机组能效指标的边界因素较

多,需要深入分析和研究。

关于燃气发电机组运行特性的分析,国内研究人员在理论分析和仿真建模等方面做了大量的研究工作。祖航等^[7]针对 GE 公司 6F 型机组,分析不同环境温度和燃气轮机负荷率对其运行特性的影响;李志鑫^[8]针对 9FA 单轴联合循环机组,根据运行数据分析环境因素、老化以及运行方式对机组运行特性的影响;吴强等^[9]对 9E 型燃气发电机组调峰运行的经济性和可靠性进行了分析;何青等^[10]针对 SGT-4000F 机型,从热力学第一、第二定律出发,对机组的供热经济性进行了深入分析;许可等^[11]利用 Ebsilon 仿真技术,对三菱 M701F4 型燃气供热机组的供热特性进行了分析研究。在燃气发电机组对标管理研究方面,国内一些发电企业主要从生产管理制度、流程等角度进行了研究和分析^[12-13]。

本文将建立燃气-蒸汽联合循环发电机组能效指标对标管理体系,采用仿真计算、大数据统计分

析等技术手段,明确影响对标公平性、合理性的边界因素的修正方法,为燃气-蒸汽联合循环发电企业的能效指标对标工作奠定基础。

1 能效指标对标体系的建立

燃气发电机组能效指标较多,在对标时应选择反映机组能源利用状况和能耗水平、主机系统能耗水平以及主要系统和关键设备运行状况的指标,根据以上原则建立三级能效指标对标体系。

第 1 层级指标为供电标准气耗,反映燃气-蒸汽联合循环发电机组的整体能耗水平;第 2 层级指标应包括发电厂用电率、燃气轮机效率、汽轮机热耗、余热锅炉效率等直接影响供电标准气耗的能耗指标;第 3 层级指标应包括辅机耗电率、燃气轮机运行指标、汽轮机运行指标、凝汽器真空度、余热锅炉运行指标等直接影响第 2 层级指标的能耗指标。燃气发电机组能效指标对标体系如图 1 所示。

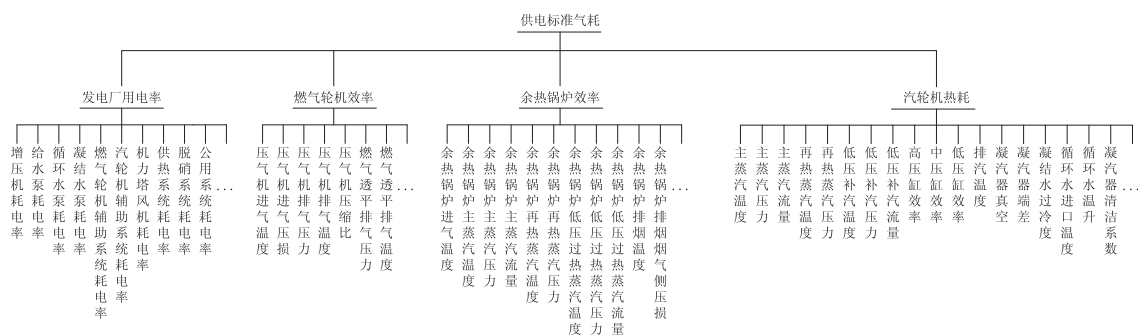


图 1 燃气发电机组能效指标对标体系

Fig. 1 Benchmarking system of energy efficiency indicators for gas turbine units

2 能效对标边界因素修正

燃气-蒸汽联合循环发电机组运行特性比较复杂,受环境温度的影响较大,运行方式包括调峰运行、连续运行,同时还有供热和纯凝之分,机组所面临的客观边界因素众多,对能效指标对标的公平性和合理性产生较大影响,因此,必须通过深入的技术分析消除这些边界因素的影响。本文将采用仿真计算、数据统计分析方法建立相关因素对供电气耗的修正计算模型。

2.1 环境温度修正

环境温度对燃气-蒸汽联合循环发电机组的影响可分为 3 个方面:环境温度变化对燃气轮机的出力 and 效率产生影响;环境温度变化对燃气轮机排烟温度产生影响,进而影响余热锅炉蒸汽参数,最终对汽轮机出力和效率产生影响;环境温度变化对冷却水温度产生影响,导致凝汽器真空度变化,进而影响汽轮机出力和效率^[14]。这 3 个方面的影响存在

很强的耦合性,传统的热力计算方法难以确定环境温度对燃气-蒸汽联合循环发电机组发电气耗的综合影响,本文采用热力学仿真软件进行变工况计算分析。

利用 Thermoflow 分别建立 GE 公司的 PG7171E、PG9351FA,西门子公司的 SGT-2000E、SGT-4000F 以及三菱公司的 M701F4 等国内主流机型的热力学仿真计算模型,以 ISO 工况(大气温度为 15℃、大气压力为 101.3 kPa、相对湿度为 60%)为基准进行不同环境温度下的变工况计算,得到的供电气耗修正系数见表 1。

从表 1 可以看出,当环境温度在 -4~8℃, 10~22℃, 22~40℃ 范围内时修正系数相差较小,因此,环境温度对各容量等级燃气-蒸汽联合循环发电机组供电标准气耗的修正系数 S_1 如下。

F 级机组

$$S_1 = K_1 + 1.0141K_2 + 1.0083K_3,$$

E 级机组

$$S_1 = K_1 + 1.0144K_2 + 1.0064K_3,$$

表 1 不同环境温度下不同机型供电电气耗修正系数							
Tab. 1 Correction coefficients for power supply gas consumption of different models at different ambient temperatures							
环境温度/℃	F 级机组				E 级机组		
	GE	西门子	三菱	平均	西门子	GE	平均
-4	1.016 66	1.021 91	1.004 61	1.014 39	1.011 88	1.013 00	1.012 44
-2	1.014 59	1.019 14	1.003 74	1.012 49	1.009 75	1.010 20	1.009 98
0	1.012 59	1.016 48	1.002 96	1.010 68	1.007 82	1.007 75	1.007 78
2	1.010 67	1.013 93	1.002 25	1.008 95	1.006 09	1.005 64	1.005 86
4	1.008 81	1.011 48	1.001 62	1.007 30	1.004 55	1.003 86	1.004 21
6	1.007 02	1.009 14	1.001 06	1.005 74	1.003 21	1.002 44	1.002 82
8	1.005 30	1.006 91	1.000 59	1.004 26	1.002 07	1.001 35	1.001 71
10	1.003 65	1.004 78	1.000 20	1.002 87	1.001 12	1.000 60	1.000 86
12	1.002 06	1.002 75	0.999 88	1.001 57	1.000 37	1.000 19	1.000 28
14	1.000 55	1.000 84	0.999 64	1.000 34	0.999 82	1.000 13	0.999 97
15	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00
16	0.999 66	1.000 32	1.000 40	1.000 12	1.000 30	1.000 41	1.000 35
18	0.999 77	1.000 57	1.001 38	1.000 57	1.000 95	1.001 03	1.000 99
20	1.000 40	1.001 24	1.002 68	1.001 44	1.002 00	1.001 99	1.001 99
22	1.001 56	1.002 31	1.004 28	1.002 72	1.003 44	1.003 29	1.003 37
24	1.003 26	1.003 79	1.006 19	1.004 41	1.005 28	1.004 93	1.005 11
26	1.005 48	1.005 67	1.008 42	1.006 52	1.007 51	1.006 92	1.007 21
28	1.008 23	1.007 97	1.010 95	1.009 05	1.010 14	1.009 24	1.009 69
30	1.011 51	1.010 67	1.013 78	1.011 99	1.013 16	1.011 91	1.012 53
32	1.015 32	1.013 77	1.016 93	1.015 34	1.016 58	1.014 92	1.015 75
34	1.019 66	1.017 29	1.020 39	1.019 11	1.020 39	1.018 27	1.019 33
36	1.024 52	1.021 21	1.024 15	1.023 29	1.024 59	1.021 96	1.023 27
38	1.029 92	1.025 53	1.028 23	1.027 89	1.029 19	1.025 99	1.027 59
40	1.035 85	1.030 27	1.032 61	1.032 91	1.034 19	1.030 36	1.032 27

式中: K_1 为春秋季(10~22 ℃)发电量占年度总发电量的比重; K_2 为夏季(≥ 22 ℃)发电量占年度总发电量的比重; K_3 为冬季(≤ 10 ℃)发电量占年度总发电量的比重。

一般情况下,春秋季指 3,4,5,10,11 月;夏季指 6,7,8,9 月;冬季指 1,2,12 月。

2.2 燃料成分修正

燃料成分的变化将会影响燃气透平、压气机的运行性能,进而影响燃气轮机及其联合循环的运行性能^[15]。我国天然气气源多样,包括川气、西气以及不同国家进口的管道气和液化天然气(LNG)等,由于其成分有很大不同,造成机组运行特性存在不可调控的差异,因此在能效指标对标过程中必须考虑燃料成分影响产生的差异。

统计不同设备厂家提供的燃气-蒸汽联合循环发电机组性能修正曲线,获得不同机型不同碳氢质量比(m_c/m_H)下,燃料低位热值 Q_{LHV} (kJ/kg)与联合循环热耗修正系数的数据,并进行数据汇总、制图、图表分析、曲线拟合,得出 E 级和 F 级机组燃料成分的

修正系数 S_2 ,见表 2。

表 2 天然气成分对供电电气耗的影响系数
Tab. 2 Influence coefficient of power supply gas consumption affected by natural gas composition

机组等级	m_c/m_H	修正系数 S_2
F 级	3.00	$1.335\ 5E-07\times Q_{LHV}+0.993\ 56$
	3.15	$1.394\ 2E-07\times Q_{LHV}+0.993\ 62$
	3.30	$1.781\ 9E-07\times Q_{LHV}+0.992\ 00$
E 级	3.00	$2.515\ 9E-07\times Q_{LHV}+0.988\ 00$
	3.15	$0.742\ 9E-07\times Q_{LHV}+0.996\ 50$
	3.27	$2.605\ 8E-07\times Q_{LHV}+0.989\ 50$

注: m_c/m_H 不为上述数值上的,采用插值法进行计算。

2.3 负荷率修正

燃气轮机经常参与电网调峰,负荷率的变动会导致燃气轮机运行特性发生变化,燃气轮机排气参数发生波动,进而影响联合循环的经济性能,因此,负荷率是影响能效指标对标的关键因素之一。

采用对机组运行数据进行统计分析的方法获取负荷率修正系数 S_3 的计算模型,所选取的数据包括 16 台 F 级发电机组和 12 台 E 级燃气发电机组,时

间范围为 2015—2017 年,最终的近似拟合曲线如图 2 所示。

由统计结果可以看出:当负荷率 ≤ 0.75 时,F 级机组修正系数的函数为 $N^{-0.17}$ (N 为机组负荷率),E 级机组修正系数的函数为 $N^{-0.18}$;当负荷率 >0.75 时,F 级机组修正系数的函数为 $N^{-0.05}$,E 级机组修正系数的函数为 $N^{-0.07}$ 。

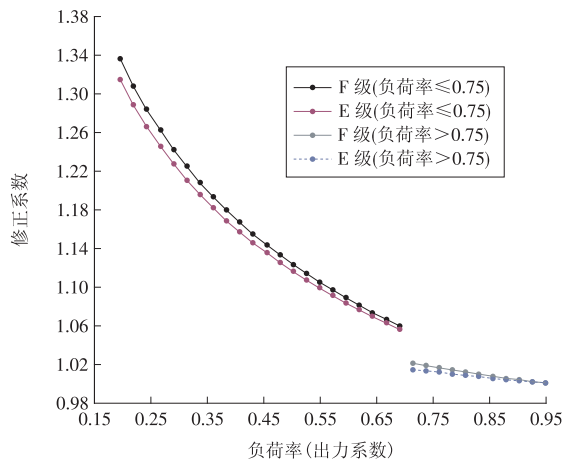


图 2 负荷率对供电气耗的影响

Fig. 2 Power supply gas consumption affected by the load rate

2.4 机组启停机次数修正

为满足电网负荷需求,燃气-蒸汽联合循环发电机组启停比较频繁,尤其在长三角和珠三角等经济发达地区,电网昼夜负荷偏差较大,燃气-蒸汽联合循环发电机组经常会出现昼启夜停的情况。频繁的启停不仅影响机组的安全性和可靠性,对机组的经济性也会造成较大的影响^[16]。

启动次数主要通过影响机组发电厂用电率来影响供电气耗,因此,首先应确定启动次数对厂用电率的影响,其修正系数同样是通过统计收集到的数据进行统计分析来确定的。将启动次数与厂用电率数据拟合出图 3 所示的曲线,可得到厂用电率修正关系。

(1) 400 MW 级机组

$$y = 0.0057x + \xi,$$

式中: y 为发电厂用电率; x 为 1 000 h 内的启动次数; ξ 为基础发电厂用电率。

得出修正偏差为 $5.7 \times n \div t / 100$ (n 为统计期启动次数; t 为统计期等效利用小时数)。

(2) 200 MW 级机组

$$y = 0.0062x + \xi,$$

可得出修正偏差为 $6.2 \times n \div t / 100$ 。

通过统计分析,厂用电率每增加 1 百分点,机组供电气耗增加 1%,从而可以得出启动次数对供电气耗的修正系数 S_4 。

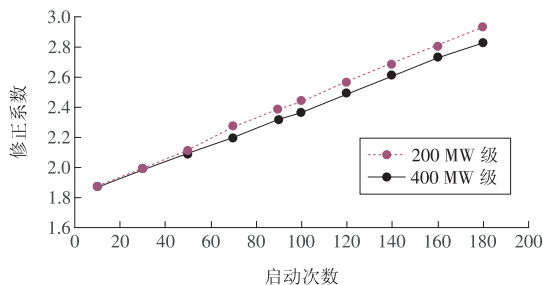


图 3 启动次数与厂用电率关系曲线

Fig. 3 Relationship between the number of startups and the power consumption rate

400 MW 级机组

$$1 + 5.7\% \times n \div t。$$

200 MW 及以下机组

$$1 + 6.2\% \times n \div t。$$

2.5 供热修正

供热修正系数 S_5 的计算方法参照燃煤机组供热修正系数计算方法。

$$S_5 = 0.878 \times C_{pi} \times R_{pi},$$

式中: R_{pi} 为机组全年平时均热电数据比值; C_{pi} 为不同抽汽压力供热的供电煤耗调整系数,用下列公式计算(p_i 为供热抽汽平均压力)

$p_i=0 \sim 0.879$ 时,

$$C_{pi} = 1.506 - 0.970 \log(p_i + 0.1)。$$

$p_i=0.879 \sim 3.920$ 时,

$$C_{pi} = 1.505 - 1.404 \log(p_i + 0.1)。$$

2.6 冷却方式修正

国内燃气发电机组冷端系统冷却方式包括直流冷却和循环冷却,其中循环冷却包括自然通风塔冷却和机械通风塔冷却 2 种方式,冷却方式主要影响机组厂用电率,冷却方式影响系数 S_6 见表 3。

表 3 冷却方式修正系数 S_6

Tab. 3 Correction coefficient of cooling methods

冷却方式	修正系数 S_6
直流冷却	
$h \leq 10$ m	1.000
$h > 10$ m	$1 + (h - 10) \div h \times \eta_{cb}$
循环冷却	
机械通风冷却塔	$1 + \eta_{ji}$
自然通风冷却塔	1.002

注: h 为循环水泵进水口中心线到凝汽器入口水管中心线的垂直距离; η_{cb} 为循环水泵耗电率; η_{ji} 为机力塔耗电率。

通过分析各边界因素对机组供电气耗的影响,可得出供电气耗的修正量

$$g_{sz} = \frac{g}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_6} + S_5,$$

式中: g_{sz} 为供电气耗修正值, $m^3/(kW \cdot h)$; g 为供电气耗完成值, $m^3/(kW \cdot h)$ 。

3 厂级能效指标对标管理系统开发

根据所建立的能效指标对标体系,在某E级燃气发电企业数字一体化管控平台的基础上,开发了厂级能效指标对标管理系统,实现了以下功能:综合能效指标和关键运行小指标纵向对标及分析;综合能效指标和运行小指标的横向及纵向对标。

3.1 能效指标纵向对标及分析

能效指标纵向对标涉及的指标包括全厂及单元机组的发/供电量、厂用电率、发/供电煤耗、负荷率等综合性能指标和单元机组高压主蒸汽温度、真空度、凝汽器端差、6 kV辅机耗电率等运行小指标。

对于全厂指标,分析与计划值和同期值的偏差以及偏差产生的原因。如某月供电煤耗与前一年

同期相比下降了18.09 g/(kW·h),通过计算分析可得出:第1台套机组的运行导致供电煤耗降低了86.57 g/(kW·h),第2台套机组的运行导致供电煤耗升高了68.80 g/(kW·h)。

对于单元机组运行小指标,分析每台套机组供电煤耗与计划值和同期值的偏差以及偏差产生的原因。如某台套机组与前一年同期相比,供电煤耗升高了28.00 g/(kW·h),其中燃气轮机热效率降低导致煤耗升高了13.57 g/(kW·h),汽轮机热效率对供电煤耗的影响为10.85 g/(kW·h)。

3.2 能效综合指标和运行小指标的横向及纵向对标

根据图1所示的能效指标对标体系,以柱状图的形式进行综合指标和小指标的横向及纵向对标,如图4所示。

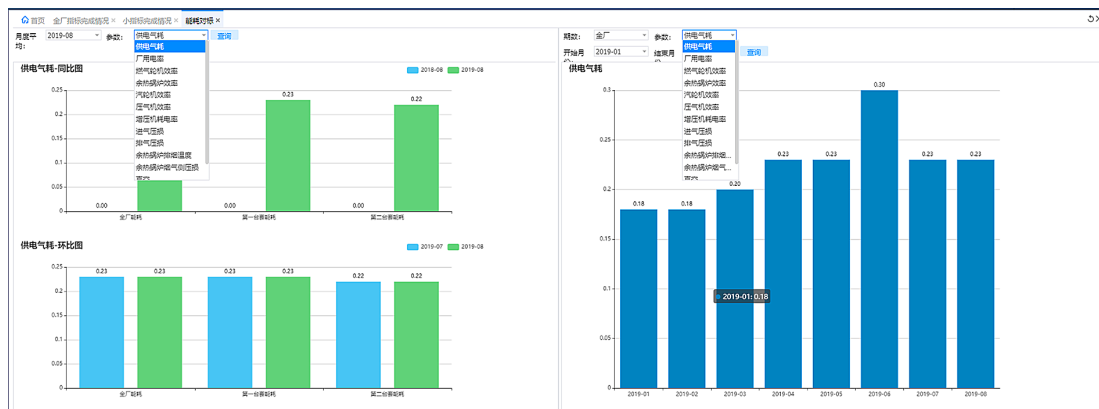


图4 综合指标和小指标横向及纵向对标

Fig. 4 Horizontal and vertical benchmarking of comprehensive indicators and small indicators

4 结束语

燃气发电机组能效指标对标管理是发电企业寻找差距、找出自身问题的关键技术手段。本文根据燃气发电机组的设备特征及热力学机理,建立了燃气发电机组能效对标指标体系,使得指标对标层次分明;通过对不同厂家、不同形式机组的大量数据进行统计分析和热力学仿真,研究了对供电气耗影响较大的边界因素,建立了各边界因素对供电气耗影响修正系数计算模型;在某E级燃气发电企业数字一体化平台的基础上,建立了燃气发电企业能效指标对标管理系统,实现了对标管理工作的信息化,可为同类型机组的对标管理提供参考。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 2017年电力统计基本数据[EB/OL]. (2018-10-09). <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongxinxi/niandushuju/2018-12-19/187486.html>.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 电力发展“十三五”规划

(2016—2020年)[EB/OL]. (2016-11-07) [2019-09-18]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/news/20161107/786746.shtml>.

- [3] 国家发展改革委. 重点耗能行业能效对标指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 3-5.
- [4] 李青, 公维平. 火力发电厂节能和指标管理技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [5] 徐创学, 刘鲁清, 李玉军, 等. 区域公司与厂级联合实时节能对标信息管理系统的应用[J]. 热力发电, 2012, 41(5): 12-17.
- XU Chuangxue, LIU Luqing, LI Yujun, et al. Development and application of benchmarking information management system for combined real-time energy-saving in regional power grid company and power plants[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5): 12-17.
- [6] 兰俊杰, 陈海平, 仲雅娟. 基于供电标准煤耗率的发电企业对标分析[J]. 节能, 2012(10): 34-36.
- LAN Junjie, CHEN Haiping, ZHONG Yajuan. Benchmarking analysis of power generation enterprises based on standard coal consumption rate of power supply[J]. Energy Conservation, 2012(10): 34-36.
- [7] 祖航, 王秋颖. 环境温度及负荷率对燃气-蒸汽联合循环

- 热电联产机组性能的影响[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 49-52.
- ZU Hang, WANG Qiuying. Effects of ambient temperature and load ratio on performance of gas-steam combined cycle cogeneration units[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 49-52.
- [8] 李志鑫. S109FA 燃气-蒸汽联合循环发电热耗率影响因素分析[J]. 华电技术, 2018, 40(9): 66-69.
- LI Zhixin. Analysis of influencing factors of heat consumption rate of S109FA gas-steam combined cycle power generation[J]. Huadian Technology, 2018, 40(9): 66-69.
- [9] 吴强, 候星恒, 范方. 9E 级燃气机组在电网调峰中的作用[J]. 华电技术, 2011, 33(6): 23-31.
- WU Qiang, HOU Xingheng, FAN fang. Function of 9E-series gas turbine power generating set in peak load regulation of power grid[J]. Huadian Technology, 2011, 33(6): 23-31.
- [10] 何青, 罗宁. 燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 49-56.
- HE Qing, LUO Ning. Thermal-economic analysis of combined heat and power generation unit of gas-steam combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 49-56.
- [11] 许可, 李蔚, 李明超, 等. 燃气-蒸汽联合循环热电联产机组供热特性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 1-7.
- XU Ke, LI Wei, LI Mingchao, et al. Heat supply performance analysis of gas-steam combined cycle cogeneration unit[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 1-7.
- [12] 靖长财. 燃气联合循环机组能耗指标评价方法及应用[J]. 神华科技, 2018, 16(4): 86-89.
- JING Changcai. Evaluation method and application of energy consumption index of gas combined cycle unit[J]. Shenhua Science and Technology, 2018, 16(4): 86-89.
- [13] 韦晓峰, 高帅. 390 MW 西门子燃气-蒸汽联合循环机组能效对标及优化措施[J]. 燃气轮机技术, 2017, 30(2): 58-60.
- WEI Xiaofeng, GAO Shuai. Energy efficiency benchmarking and optimization measures for Siemens 390 MW gas-steam combined cycle units[J]. Gas Turbine Technology, 2017, 30(2): 58-60.
- [14] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 王松岭, 董君, 陈海平. 燃用焦炉煤气的燃气轮机性能分析[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(2): 108-113.
- WANG Songling, DONG Jun, CHEN Haiping. Performance analysis of coke-oven-gas fired gasturbine[J]. Turbine Technology, 2006, 48(2): 108-113.
- [16] 陶刚. 日启停对 9FA 型燃气-蒸汽联合循环机组安全性及可靠性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- (本文责编: 刘芳)
-
- 作者简介:
朱亚迪(1991—), 男, 安徽宿州人, 工程师, 工学硕士, 从事燃气发电机组节能诊断及智能化建设方面的工作(E-mail: yadi-zhu@chder.com)。