

DOI: 10.7652/xjtuxb201701011

采用蒸汽喷射器的低负荷给水加热系统 变工况性能研究

李冰心¹, 张国柱², 陈伟雄¹, 刘继平¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 大唐(北京)能源管理有限公司, 100097, 北京)

摘要: 为了解决低负荷运行时燃煤发电机组脱硝效果差及热经济性低的问题,以某 660 MW 超临界机组为研究对象,基于 GSE 仿真平台搭建锅炉汽轮机耦合模型。在此模型基础上,提出以屏式过热器出口蒸汽引射汽轮机 1 级抽汽,通过蒸汽喷射器的混合蒸汽作为新增 0 号高压加热器的汽源以加热给水,并嵌入蒸汽喷射器性能模型,计算得到了不同的喷射器引射比对脱硝效率、机组热经济性以及变工况性能的影响。研究表明:设计负荷为 50% 负荷时,最佳设计引射比为 0.56(对应的设计给水温升为 30℃),此时系统节煤 $0.52 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,脱硝效率提高 13.29%;综合考虑喷射器的运行稳定性和机组的热经济性,建议优化后的系统在 45%~90% 负荷范围内运行,此时可获得较佳的节能减排效果。

关键词: 蒸汽喷射器;低负荷给水加热系统;设计引射比;变工况

中图分类号: TK212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0065-07

Analysis on the Performance of Low-Load Feed Water Heating System with Jet Heat Pump under Variable Working Conditions

LI Bingxin¹, ZHANG Guozhu², CHEN Weixiong¹, LIU Jiping¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Datang (Beijing) Energy Management Co. Ltd., Beijing 100097, China)

Abstract: To improve the denitration effect and the thermodynamic performance of generator unit under low loads, a new feed water heating system coupled with steam ejector is required. A 660 MW coal-burning supercritical unit is taken as the research object. A boiler/steam turbine coupled model is established based on the simulation platform of GSE. On the basis of this model, the steam ejector and the new No.0 high-pressure heater are embedded in by a self-programming model. The platen super-heater outlet steam is the primary steam and the steam from No.1 steam extraction is the induced steam, then the mixture steam flows into the No.0 high-pressure heater to heat the water. The effects of entrainment ratio on the denitration efficiency, the thermal efficiency and the performance under variable working conditions are investigated. Results show that when the design load of the steam ejector is 50% load condition, the optimal design entrainment ratio is 0.56 and the temperature of feed water rises by 30℃; the standard coal consumption rate is decreased by $0.52 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ and the denitration efficiency

收稿日期: 2016-05-04。 作者简介: 李冰心(1991—),女,硕士生;刘继平(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB251504);国家自然科学基金资助项目(51436006,51476128)。

网络出版时间: 2016-10-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161021.1522.002.html>

is increased by 13.29%. Considering the running stability of the ejector and the thermal efficiency of the unit, the optimized system is suggested to operate in the range of 45%–90% load to obtain the best energy-saving and emission reduction effect and thermodynamic performance.

Keywords: steam ejector; low-load feed water heating system; design entrainment ratio; variable working condition

当前火力发电作为我国电力的主要支柱,污染物排放量巨大,其 NO_x 排放量(体积分数)占总排放量的 45% 以上,严重影响了大气环境^[1-2]。《火电厂大气污染物排放标准》规定 2014 年 7 月 1 日前,现役燃煤发电机组的污染物排放必须达到新的限值^[3]。对于北京和广东等地区,要求 NO_x 排放不得高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,对燃煤机组排烟污染物的治理提出了更严苛的要求。为了达到排放标准,国内普遍采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝技术。

此外,随着水电、风电、太阳能发电的高速发展,火电机组承担着艰巨的调峰任务^[4]。据中国电力企业联合会统计,2015 年火电机组年平均运行小时数同比低于往年,且机组负荷率长期处于 70% 负荷以下^[4]。当燃煤机组处于低负荷运行时,汽轮机热耗率上升,汽轮发电机组绝对电效率下降,导致机组热经济性降低^[5];同时,锅炉给水温度降低,省煤器段烟气和工质的换热温差增大,导致省煤器出口烟气温度下降,脱硝效率降低。当烟气温度低于 300°C 时,SCR 装置退出运行^[6]。

以某 660 MW 超临界湿冷机组为例,额定工况时给水温度为 278°C ,标准煤耗率为 $279.68 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,50% 负荷时给水温度为 235°C ,标准煤耗率为 $291.69 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。从满负荷(660 MW)到 50% 负荷(330 MW),机组每发电 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 会多损耗 12.01 g 标准煤,机组热经济性下降^[5];同时,省煤器出口烟气温度降低 41.45°C ,影响 SCR 装置脱硝效果,空气预热器出口热风温度降低 40.99°C ,进而影响锅炉内燃烧的稳定性。

为改善火电机组低负荷运行时的脱硝效率及热经济性,李千军等提出了一种低负荷给水加热系统^[7]。该系统引入蒸汽喷射器^[8],利用主蒸汽引射压力的汽源为给水加热。该研究分析了引射比对系统性能的影响,并提出存在合适的引射比,可提高机组的脱硝效果和热经济性,但未考虑引入蒸汽喷射器后对锅炉的影响,同时缺乏对系统的变工况性能及热经济性规律的研究。

本文以某 660 MW 超临界机组为研究对象,搭建基于 GSE 仿真平台的锅炉汽轮机耦合系统模型。在此基础上引入蒸汽喷射器,利用屏式过热器出口蒸汽引射汽轮机 1 级回热抽汽,使混合蒸汽进入新增 0 号高压加热器以加热给水。以 50% 负荷为设计负荷,研究不同设计引射比下低负荷给水加热系统对 SCR 脱硝效果和热经济性的影响及系统性能变化规律,并确定了低负荷给水加热系统的优化运行方法。

1 模型建立

1.1 建模对象

某 660 MW 燃煤超临界机组的原则性热力系统如图 1 所示。锅炉结构为 II 型布置、单炉膛、一次中间再热,尾部为双烟道。其中,炉膛采用垂直式水冷壁,各级过热器、再热器和省煤器分别布置在炉膛上方、水平烟道和尾部烟道,采用 H 型鳍片管省煤器。通过二级减温喷水调节主蒸汽温度,通过尾部烟气挡板位置调节再热蒸汽温度。设计煤种为烟煤,煤中水及各元素的收到基质量分数见表 1。汽轮机为超临界、单轴、三缸四排汽、一次中间再热凝汽式汽轮机,共设 8 级表面式回热加热器:“三高、四低、一除氧”。汽轮机额定工况进汽压力为 24.2 MPa 、温度为 566°C 。

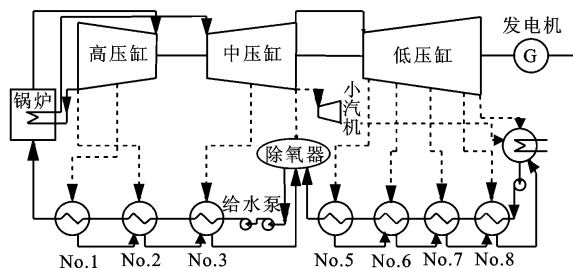


图 1 660 MW 燃煤超临界机组的原则性热力系统图

该发电机组 SCR 脱硝反应使用的催化剂是 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 和 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$,其活性反应温度为 $320\sim 420^\circ\text{C}$ 。烟气温度过低时,不仅脱硝反应缓慢,而且烟气中的水、硫氧化物和氨气会反应形成硫酸铵盐并附着于催化剂的表面,降低其活性^[9]。因此,反应器入口温度是影响脱硝效率的最大因素,参

考文献[10-11]可得到如下关系式

$$y = -0.045t^2 + 30.15t - 496.2 \quad 300 < t \leq 320$$

(1)

$$y = -0.0059t^2 + 4.1848t - 661 \quad 320 < t \leq 430$$

(2)

式中: y 、 t 分别为脱硝效率和 SCR 入口温度。

表 1 设计煤种煤质分析结果

低位发热量 /MJ·kg ⁻¹	w/%					
	M	C	H	O	N	S
19 652	16.01	52.5	3.03	9.96	0.54	0.64

1.2 模型搭建及验证

采用 GSE 仿真软件内的 Jtopmeret 建模工具,根据仿真系统建模的方法,具有一定体积的节点代表换热介质存在的空间,用流线将各个体积节点连接形成流动,换热板代表管壁实现换热。遵循模块化建模思想,将整个发电机组分为锅炉系统和汽轮机系统。其中,锅炉系统主要分为烟风及空气预热器系统、汽水系统;汽轮机系统分为汽轮机本体、回热系统及凝汽器。在仿真平台上分别建立各子系统模型并耦合,得到锅炉系统仿真模型(见图 2a),汽轮机侧系统仿真模型(见图 2b)。

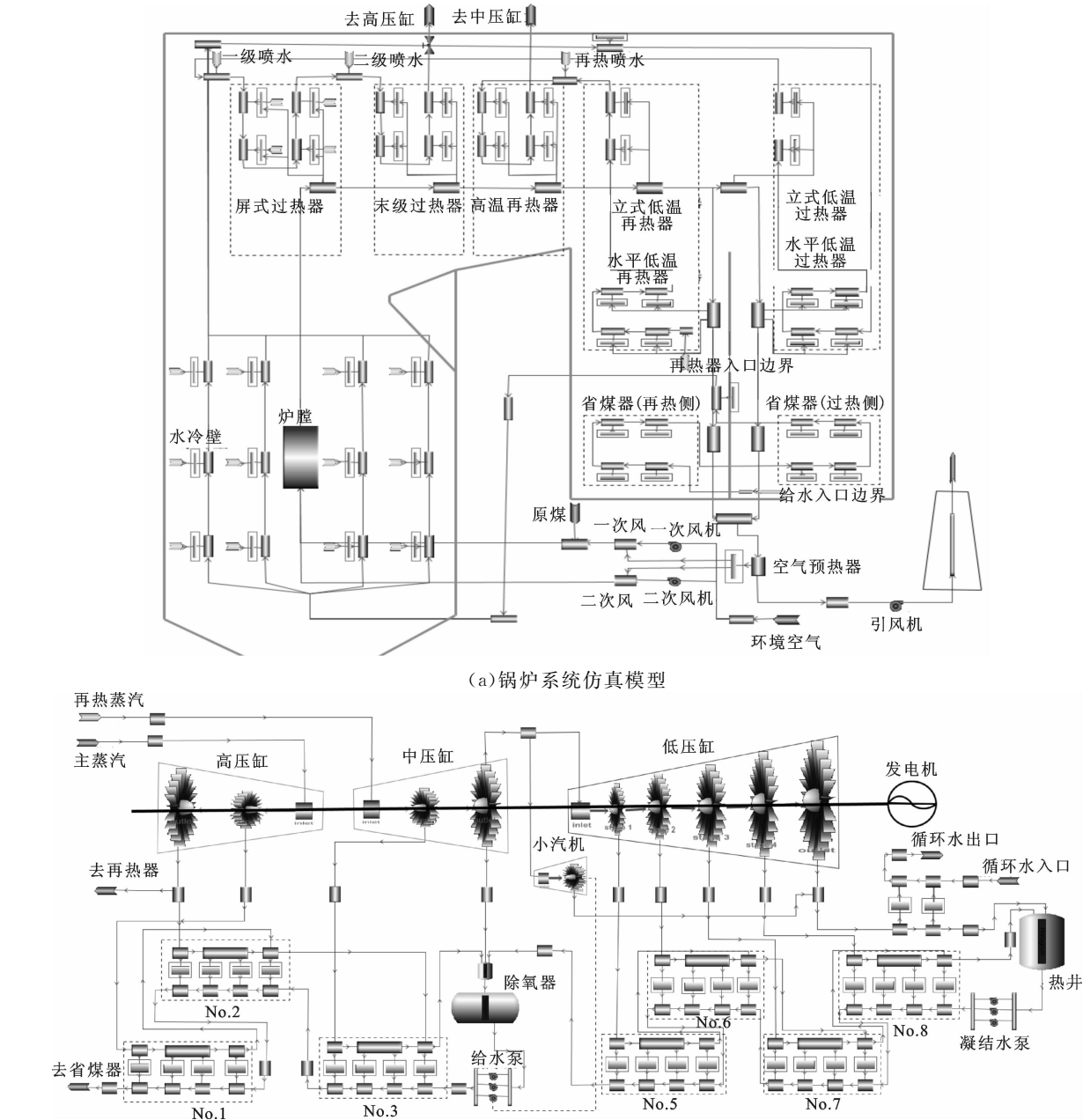


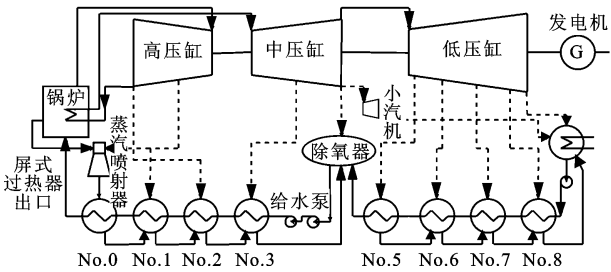
图 2 660 MW 超临界机组模型

锅炉侧的主要受热面出口的介质温度及排烟温度分别是判断仿真模型精确性和锅炉内燃料(烟气)能量利用程度的重要参数,而省煤器出口烟气温度是决定脱硝装置中催化剂活性的关键参数。利用搭建好的机组耦合模型可得到各工况下各受热面出口的烟气和工质温度。本文研究低负荷给水加热系统,以 50%负荷为例。表 2 是机组主要参数的误差校核,可知关键参数误差在±0.02%以内,省煤器出口烟温和排烟温度误差在±0.5%以内,说明模型具有较高的精确性。

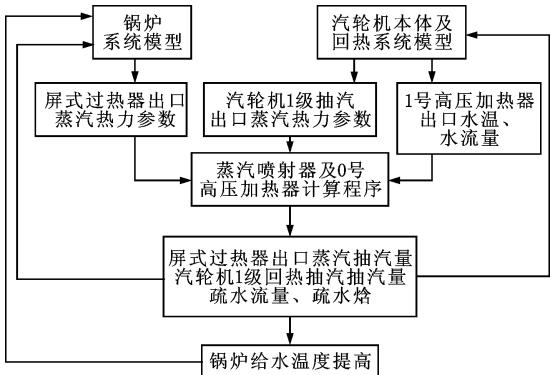
表 2 50%负荷下主要参数校核

参数	设计值	仿真值	误差/%
功率/MW	330	330.02	0.01
主蒸汽压力/MPa	17.3	17.29	0.01
主蒸汽温度/℃	571	571.03	0.01
给水温度/℃	245	249.36	0.02
热再热蒸汽温度/℃	569	569.03	0.01
省煤器出口烟温/℃	313	314.37	0.44
锅炉排烟温度/℃	108	108.54	0.50

蒸汽喷射器模块和新增 0 号高压加热器模块均采用自编程序建模的方法实现,并嵌入锅炉汽轮机模型与其耦合,得到低负荷给水加热系统仿真模型,其原则性热力系统如图 3a 所示,蒸汽喷射器及 0 号



(a)低负荷给水加热系统原则性热力系统



(b)低负荷给水加热系统计算流程

图 3 采用蒸汽喷射器的低负荷给水加热系统

高压加热器模块计算流程如图 3b 所示。蒸汽喷射器和辅助加热器的匹配计算中:喷射器出口到 0 号加热器有 3%的压力损失,0 号加热器上端温差 1.7℃,下端温差 5.6℃。

2 结果分析与讨论

2.1 引射比对低负荷给水加热系统的影响

读取原机组的屏式过热器出口蒸汽、汽轮机 1 级抽汽和 1 号高压加热器出口水的热力参数,在不同的给水温升下设计蒸汽引射比和相应的喷射器尺寸^[12]。其中 3 个关键的结构设计尺寸是:工作流体喷嘴喉部面积 A_t (直径 d_t)、工作流体喷嘴出口面积 A_{p1} (直径 d_{p1})及混合腔喉部面积 A_2 (直径 d_2),其他尺寸可以通过优化设计计算得到。表 3 是以 50%负荷为设计负荷、在不同引射比下设计的喷射器尺寸(引射比取相应给水温升下根据蒸汽喷射器性能计算得到的最大引射比)。

表 3 蒸汽喷射器设计尺寸

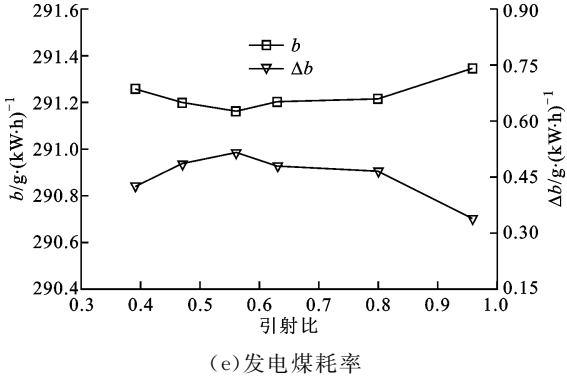
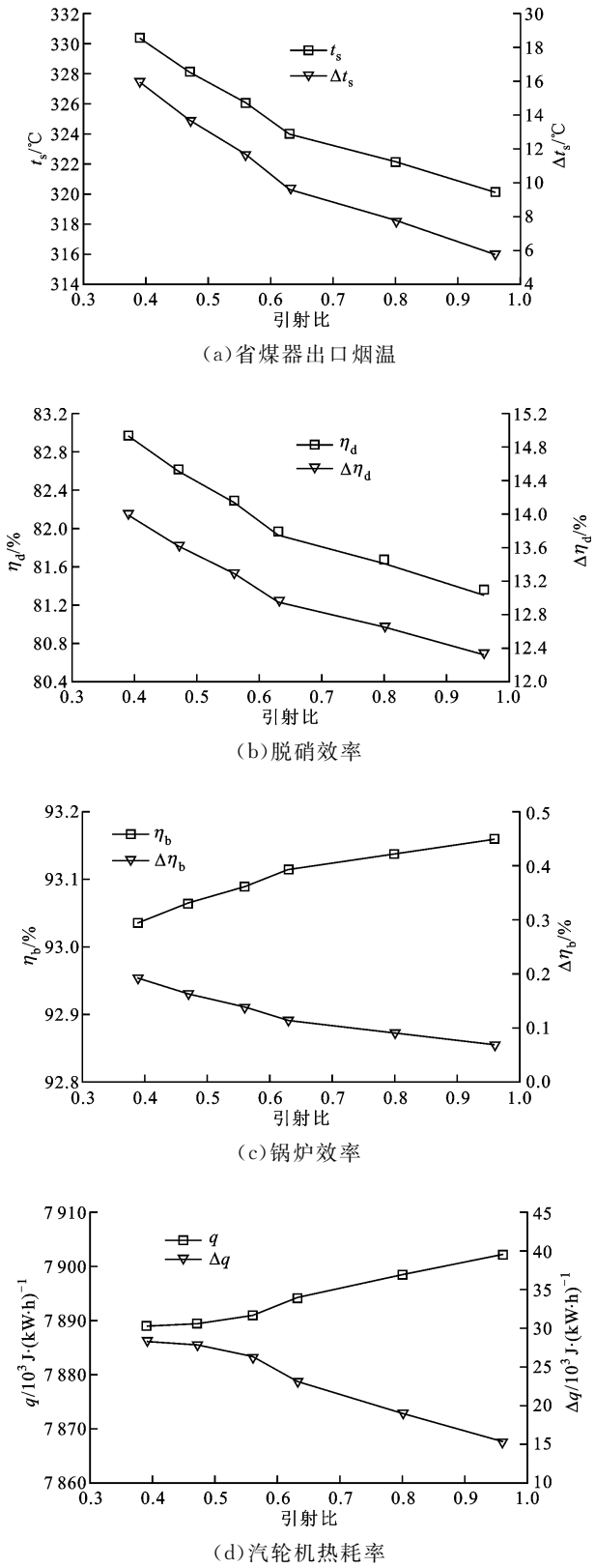
设计负荷	引射比	给水温升/℃	d_t /mm	d_{p1} /mm	d_2 /mm
50%负荷	0.96	15	16.5	20.2	40.0
	0.80	20	19.9	24.3	45.1
	0.63	25	23.4	28.5	48.8
	0.56	30	26.2	31.9	52.8
	0.47	35	29.2	35.6	55.7
	0.39	40	32.1	39.2	58.1

改变蒸汽喷射器的尺寸,基于搭建好的低负荷给水加热系统模型,可以计算得到不同的引射比下机组的各受热面的出口工质、烟气温度及机组的热经济性指标。图 4 是设计负荷为 50%负荷时,不同的引射比对省煤器出口烟温 t_s 、脱硝效率 η_a 、锅炉效率 η_b 以及机组热经济参数的影响规律。由图可知:随着引射比的减小,锅炉给水温度升高,使省煤器出口烟温上升,脱硝效率能提高 12%~14%左右,但同时排烟温度增大,导致锅炉效率 η_b 降低;增加 0 号高压加热器使汽轮机绝对内效率 η_i 上升,汽轮机热耗率 q 下降,汽轮机发电机组绝对电效率 η_e 提高。因此,随引射比的减小和温升的增大,标准煤耗率 $b=0.123/(\eta_b\eta_p\eta_e)$ 先减小后增大,在引射比为 0.56(即温升 30℃)时有最大节煤量。

2.2 蒸汽喷射器的变工况性能

机组负荷变化时,蒸汽喷射器入口的高、低压蒸汽参数随之改变,给水温升随蒸汽喷射器出口压力

的升高而增大。当出口压力大于临界背压时,其运行性能明显下降,因此在研究低负荷给水加热系统变工况性能的时候,分析喷射器性能的稳定和给水加热效果是非常有必要的。根据上一节结果,在 50% 负

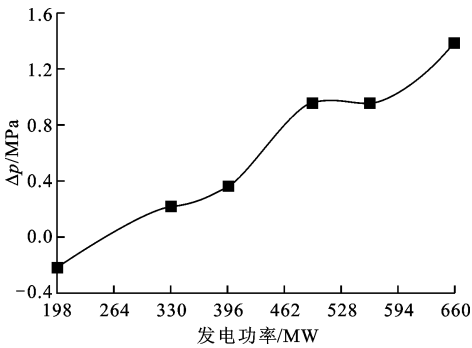


(e)发电煤耗率

图 4 引射比对主要参数的影响规律

荷时,选择 0.56 作为喷射器的设计引射比,改变机组负荷,可得到喷射器的出口压力、临界背压及对应的引射比。

图 5a 为随着负荷变化对应的喷射器临界背压与出口压力差值的变化规律(纵坐标为喷射器临界背压和出口压力之差,大于 0 则说明喷射器性能较好,反之性能明显下降)。由图可知:当机组负荷低于 38% 负荷(250.8 MW)时,蒸汽喷射器处于非临界运行模式,机组性能较差;当机组运行负荷高于 38% 负荷时,临界背压大于出口压力,蒸汽喷射器处于稳定运行模式,但考虑到其设计、制造及运行中的偏差,应取一定的余量(参考文献[12]余量取 0.1



(a)蒸汽喷射器的临界背压与出口压力之差的变工况规律

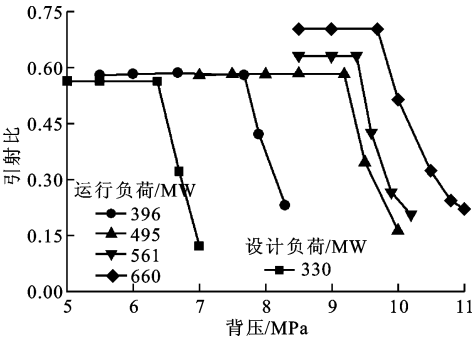


图 5 设计负荷为 50% 负荷、引射比为 0.56 时蒸汽喷射器的变工况性能曲线

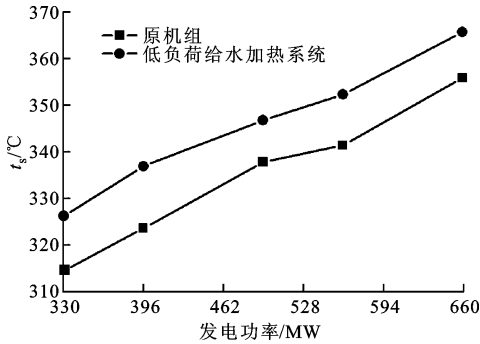
MPa)以保证系统的安全性。因此,以 50%负荷为设计负荷、设计引射比为 0.56 的低负荷给水加热系统在机组运行工况大于 45%负荷(297 MW)时,喷射器能维持在性能较好的临界运行模式,当机组负荷处于启动工况时不建议连接蒸汽喷射器。

图 5b 为对应的喷射器变工况性能。由图可知:在机组从 50%负荷升至 75%负荷(495 MW)的过程中,蒸汽喷射器的引射比基本不变,临界背压增大;从 75%负荷到满负荷的过程中,临界背压增大,引射比略微上升 0.1 左右。这说明蒸汽喷射器变工况性能稳定。

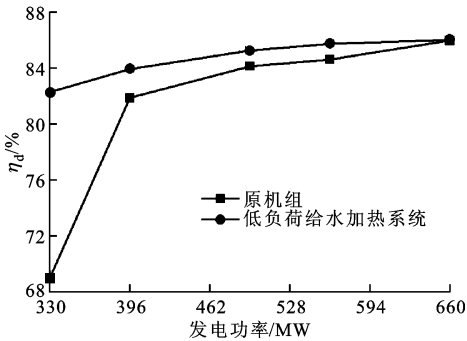
2.3 低负荷给水加热系统的变工况性能

现阶段燃煤发电机组频繁参与调峰,机组大部分时间处于变工况运行状态,因此对低负荷给水加热系统变工况性能的研究很有必要。本节改变机组运行负荷,通过对省煤器出口烟温、锅炉效率、汽轮机热耗率和节煤量进行分析来研究低负荷给水加热系统的变工况性能。图 6 为加入喷射器后的低负荷给水加热系统与原机组的主要参数对比。

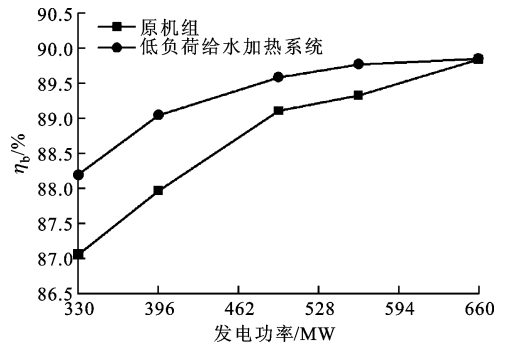
由图 6 可知:低负荷给水加热系统较之原机组,随着负荷的增大,省煤器出口烟温提高了 10℃左右,处于低负荷时的机组脱硝效率显著提高,但同时排烟温度上升,锅炉效率下降了 0.2%左右。此外,



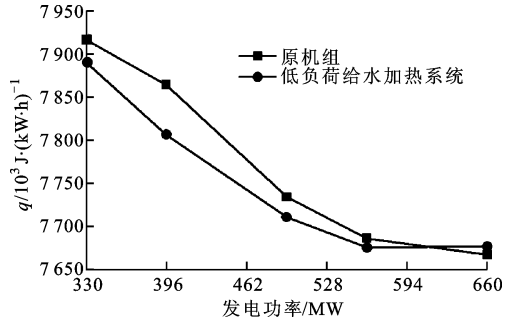
(a)省煤器出口烟温变化



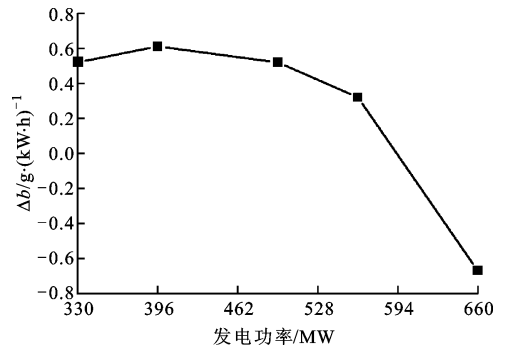
(b)脱硝效率变化



(c)锅炉效率变化



(d)汽轮机热耗率变化



(e)节煤量变化

图 6 主要参数的变工况规律

随着锅炉给水温度的升高,汽轮机热耗率下降,但是根据图 5b 可知,当机组运行在额定负荷时,喷射器的引射比会上升 0.1,导致其引射的汽轮机 1 级抽汽量增大,进入中压缸的蒸汽流量降低,汽轮机相对内效率下降,使得汽轮机热耗率增大。因此,图 6d 中随着机组运行负荷的提高,低负荷给水加热系统的汽轮机热耗率先减小后增大。当机组运行在 90%负荷(594 MW)以下时,汽轮机热耗率下降,导致机组热效率 η_{tp} 上升,标准煤耗量降低,热经济性提高。当机组运行在 90%负荷以上时,节煤量为负,热经济性较差。考虑到机组热经济性,建议低负荷给水加热系统运行在 90%负荷及以上时,切断蒸汽喷射器和 0 号高压加热器。

3 结 论

本文基于 GSE 仿真平台搭建了 660 MW 燃煤超临界机组模型,在此模型基础上加入蒸汽喷射器,研究了设计负荷为 50% 负荷时,低负荷给水加热系统在不同设计引射比下对 SCR 反应温度和机组热经济性的影响规律,获得低负荷给水加热系统的变工况性能和机组热经济性的规律,并确定系统优化运行方法,得到的结论如下。

(1)综合蒸汽喷射器性能和给水加热效果、机组的热经济性和 SCR 装置脱硝效果等因素,以 50% 负荷为设计负荷时,最佳设计引射比为 0.56,此时机组可节煤 $0.52 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,脱硝效率提高 13.29%。

(2)提出低负荷给水加热系统的最佳运行方案:机组负荷升至 45% 负荷时连接蒸汽喷射器以构成低负荷给水加热系统,当机组运行至 90% 负荷时,考虑到热经济性的问题,可再次切断。

参考文献:

- [1] 张晓鲁. 开发推广先进燃煤发电技术支撑电力工业可持续发展 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(12): 52-57. ZHANG Xiaolu. Developing and promoting advanced coal-fired power generation technologies to support sustainable developing of the electric power industry [J]. Engineering Science, 2012, 14(12): 52-57.
- [2] 周亮亮, 刘朝. 洁净燃煤发电技术全生命周期评价 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 7-14. ZHOU Liangliang, LIU Chao. Assessment on whole life cycle of clean coal-fired power generation technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2): 7-14.
- [3] 环境保护部. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [4] 中国电力企业联合会. 追梦不止筑梦不息: 中国电力工业实现跨越发展 [J]. 中国电力教育, 2015(10): 22-27. China Electricity Council. Dream more than ever: Chinese power industry to achieve leaping development [J]. China Electric Power Education, 2015(10): 22-27.
- [5] 严俊杰, 黄锦涛, 张凯, 等. 发电厂热力系统及设备 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 319-321.
- [6] 薛纪纬. SCR 催化剂的制备和脱硝性能影响因素的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 56-57.
- [7] 李千军, 刘光耀, 韩伟, 等. 采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 25-28. LI Qianjun, LIU Guangyao, HAN Wei, et al. Heat-

ing feed-water of thermal power units using jet heat pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 25-28.

- [8] YAN J J, SHAO S F, LIU J P, et al. Experiment and analysis on performance of steam-driven jet injector for district-heating system [J]. Appl Therm Eng, 2005 (25): 1153-1167.
- [9] KWON D W, NAM K B, HONG S C. Influence of tungsten on the activity of a Mn/Ce/W/Ti catalyst for the selective catalytic reduction of NO with NH_3 at low temperatures [J]. Applied Catalysis: A General, 2015 (497): 160-166.
- [10] JABLONSKA M, PALKOVITS R. Copper based catalysts for the selective ammonia oxidation into nitrogen and water vapour-Recent trends and open challenges [J]. Applied Catalysis: B Environmental, 2016 (181): 332-351.
- [11] HUANG W, DAI S, AI C, et al. Discussion about SCR denitration control technology under full load in a coal-fired boiler [J]. Energy Conservation Technology, 2015, 32(2): 189-193.
- [12] SHI C Y, CHEN H Q, CHEN W X, et al. 1D model to predict ejector performance at critical and subcritical operation in the refrigeration system [J]. Energy Procedia, 2015(75): 1477-1483.

[本刊相关文献链接]

- 吴毅, 王佳莹, 王明坤, 等. 基于超临界 CO_2 布雷顿循环的塔式太阳能集热发电系统. 2016, 50(5): 101-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201603016]
- 陈宇佳, 杜长河, 李亮. 蒸汽冷却带肋矩形通道流动和换热特性数值研究. 2016, 50(3): 101-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201603016]
- 费继友, 曾俊雄, 高铁瑜, 等. 涡旋核心分布对斜置肋片蒸汽冷却通道换热特性的影响. 2015, 49(5): 61-66. [doi: 10.7652/xjtuxb201510010]
- 李森, 李亮, 杜长河. 球窝/球凸结构下的 U 型通道蒸汽冷却性能. 2015, 49(9): 65-71. [doi: 10.7652/xjtuxb201501011]
- 杨卫卫, 曹兴起, 何雅玲, 等. 一种带中间换热器的双热源高温热泵系统. 2014, 48(11): 112-116. [doi: 10.7652/xjtuxb201409019]
- 武心壮, 邱斌斌, 种道彤, 等. 单喷嘴蒸汽射流凝结引起的压力振荡研究. 2014, 48(1): 128-135. [doi: 10.7652/xjtuxb201408022]
- 李千军, 刘光耀, 韩伟, 等. 采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究. 2013, 47(11): 99-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201305018]

(编辑 荆树蓉)