

S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环机组 D10 型 汽轮机性能诊断分析

蔡雨¹, 赵丽娟², 丁勇能², 李蔚¹

(1. 浙江大学 能源工程学院, 杭州 310027; 2. 杭州华电半山发电有限公司, 杭州 310015)

摘 要:根据某电厂 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环机组 D10 型汽轮机的结构特点,对比分析各个试验期的性能数据,发现该机组经过 10 多年运行性能下降明显。结合机组检修发现的问题,诊断 D10 型汽轮机热力性能下降的主要原因是高压缸动、静叶部分受损和通流部分结垢导致通流面积减小,提出了相应的预防措施及相关建议,该性能分析结果可为国内同类机组的优化运行提供参考。

关键词:燃气 – 蒸汽联合循环机组;D10 型汽轮机;通流部分结垢;性能诊断;性能试验

中图分类号:TK 267 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 – 1951(2017)06 – 0028 – 04

0 引言

GE 公司 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环发电机组作为配套国家“西气东输”的第 1 批天然气发电机组,运行已达 10 多年之久,机组的经济性明显下降。D10 型汽轮机作为 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环机组配套的汽轮机,其性能好坏直接影响到燃气 – 蒸汽联合循环发电机组的整体效率。

为保证机组安全、经济运行,对汽轮机进行热经济性诊断具有非常重要的意义^[1-2]。为此,国内外学者在汽轮机经济性诊断领域进行了大量研究和实践^[2-3],并取得了丰硕的成果。国外在汽轮机经济性诊断方面,主要采用热经济诊断方法对机组优化运行在线管理系统进行建模研究。随着计算机技术和应用数学的发展,模糊数学、神经网络、遗传算法、小波分析等数学方法与热经济性分析方法结合形成了许多新的分析方法,并应用到机组的安全、经济性诊断和优化运行中^[4]。如国内上海交通大学的“可组态的汽轮机在线热经济性分析系统”^[5],华北电力大学的“机组经济性在线监测诊断指导系统”,东南大学的“全图形化热力发电厂通用计算软件”^[6]等,已在实际应用中取得一定的成果。目前,常用基于汽轮机相对内效率的方法来评价通流部分

热经济性^[7]。

本文在分析某电厂 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环机组 D10 型汽轮机设计参数和结构特点的基础上,对比分析 #2 机组各个试验期的性能试验数据,诊断 D10 型汽轮机热力性能下降的原因,提出问题预防措施及相关建议。

1 D10 型汽轮机设计参数和结构特点

1.1 D10 型汽轮机设计参数

某电厂 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环机组由 1 台 PG9351 型燃气轮机、1 台 D10 (D10 – 9. 563/2. 146/0. 4086/565. 5/565. 5/295. 2) 型汽轮机以及 1 台 390H 发电机组成,单轴布置,以天然气为燃料,联合循环机组额定负荷 388. 8 MW,配用杭州锅炉厂生产的三压余热锅炉。D10 型汽轮机为三压、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、纯凝式机组,机组设计参数见表 1。

1.2 汽轮机结构特点

D10 型汽轮机高中压缸采用合缸结构,通流部分反向布置,高压缸有 12 个压力级、中压缸有 9 个压力级、低压缸有 2 × 6 个压力级,低压缸采用双流程向下排汽结构。两缸设计减少了轴的总长度,使机组轴系长度缩短。

表 1 D10 型汽轮机设计参数

额定功率/MW	额定转速/(r · min ⁻¹)	冷却水温度/℃	压力/MPa			温度/℃		
			高压主蒸汽	中压蒸汽	低压蒸汽	高压主蒸汽	中压蒸汽	低压蒸汽
141	3 000	20	9. 563	2. 146	0. 409	565. 5	565. 5	295. 2

高压动叶设置分段冲孔围带,中、低压动叶为自带冠动叶。高中压缸是单层缸结构,无回热系统。

汽轮机缸体、轴承箱及护套采用水平中分面型,以便维护^[8]。汽轮机转子采用锻造,由 4 个径向轴承支撑,径向轴承为可倾瓦式,可自对中。汽轮机采用全周进汽,没有调节级,调节系统采用电子液压调节系统^[8]。本机配备高压、中压和低压蒸汽旁路。

2 D10 型汽轮机性能诊断

2.1 性能试验结果

参照 ASME PTC 6.2—2011^[9]《联合循环电站汽轮机性能试验规程》对 D10 型汽轮机进行机组性能试验,制定详细的试验方案。在汽轮机高压进汽调节阀全开(VWO)状态下, #2 机组带基本负荷(Baseload),320 MW,280 MW,250 MW 和实际机组运行状态(320 MW normal)共 5 种工况进行联合循环出力试验,确定联合循环机组在规定运行条件下的输出电功率、热耗率及高/中压缸效率,以客观评估汽轮机的运行状况。试验结果见表 2。

对 #2 燃气 – 蒸汽联合循环机组在不同负荷下的性能试验结果进行分析发现,随着机组负荷的下降,机组热耗率上升,而高、中压缸效率随着负荷的变化幅度不大。在 2016 年 4 的性能试验中,机组热耗率和机组设计数据对比如图 1 所示,由图 1 可知,各个负荷工况下联合循环机组热耗率比设计数据普遍增高。

将本次机组性能试验结果与 2006 年和 2011 年 B 修后的性能试验结果进行比较,进一步分析 D10 型汽轮机投运以来各项经济指标的变化情况。#2 机组各试验期 Baseload 工况下出力、热耗及缸效试验结果见表 3。根据 S109FA 燃气 – 蒸汽联合循环发电机组在各试验期 Baseload 工况下性能试验结果,

做出各试验期机组功率和热耗率对比曲线(如图 2 所示)及高、中压缸效率对比曲线(如图 3 所示)。

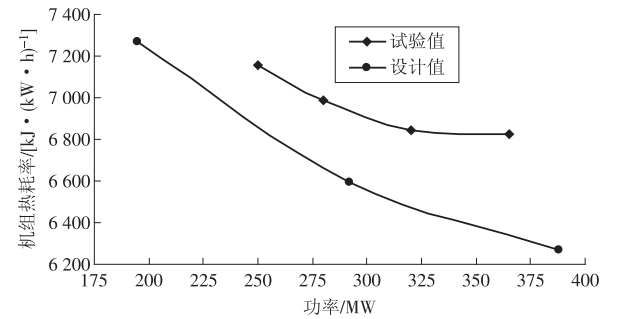


图 1 各负荷工况下机组热耗率和设计数据对比曲线

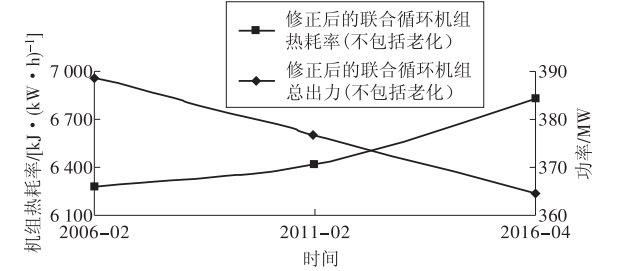


图 2 各试验期机组功率和热耗率对比曲线

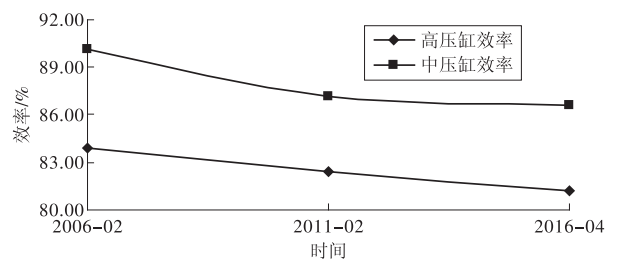


图 3 各试验期机组高、中压缸效率对比曲线

由表 3 可知,2016 年与 2006 年、2011 数据相比,D10 型汽轮机高压缸的效率由设计值 83.90% 下降到 82.43%,再下降到 81.19%,共下降 2.71 百

表 2 #2 机组在不同负荷下的性能试验结果

项目	Baseload	320 MW	280 MW	250 MW	320 MW normal
高压缸效率/%	83.42	83.38	83.66	82.92	83.81
中压缸效率/%	86.65	85.82	86.27	86.62	86.24
修正后总出力/MW	364.44	320.12	279.37	249.11	319.34
修正后热耗率/[kJ·(kW·h) ⁻¹]	6824.92	6842.87	6989.72	7153.92	6845.65

注:修正后总出力、热耗率不包括老化。

表 3 #2 机组各个试验期 Baseload 工况下性能数据

项目	设计值	2006-02 验收试验	2011-02 B 修后	2016-04 性能试验
高压缸效率/%	83.90	—	82.43	81.19
中压缸效率/%	90.10	—	87.20	86.65
修正后总出力/MW	389.06	388.61	376.53	364.44
修正后热耗率/[kJ·(kW·h) ⁻¹]	6264.70	6277.44	6414.26	6824.92

注:修正后总出力、热耗率不包括老化。

分点;中压缸的效率由设计值 90. 10% 下降到 87. 20%,再下降到 86. 65%,共下降 3. 45 百分点;机组的热耗率由设计值 6 264. 70 kJ/(kW · h) 上升到 6 824. 92 kJ/(kW · h),共上升了 8. 94%;机组出力由设计值 389. 06 MW 降低到 364. 44 MW,共降低了 6. 33%。由图 2、图 3 可以看出,随着运行时间增长,机组热经济性能下降速率增大。可见,经过 10 多年的运行期,机组经济性显著下降,热耗明显增加。

2.2 原因分析

在 10 多年的运行期内,某电厂 3 台燃气 – 蒸汽联合循环机组 D10 型汽轮机发生过诸多问题,虽然经过修复和维修,但明显影响了汽轮机的运行性能,导致汽轮机缸效下降、热耗增加。下面是运行中出现的主要问题。

(1) #2 机组高压缸部分动叶、静叶受损。#2 机组高压缸部分动叶、静叶由于高压主汽阀阀座硬质密封合金脱落,导致高压缸部分动叶和静叶受损。高压第 1 ~ 4 级动叶、静叶受损情况严重,部分级数的叶顶汽封均有明显损伤,叶片由于受异物撞击汽边发生严重变形(如图 4 所示),致使蒸汽流通截面面积变小,蒸汽流通阻力变大^[10],蒸汽的做功能力减小。



图 4 第 1 级动叶受损

(2) 高、中压缸通流部分结垢。在对高、中压缸揭缸检查时发现,高、中压缸通流部分结垢严重(垢样经分析,系致密性氧化铁垢,如图 5 所示),垢体中含有金属离子对叶片产生电化学腐蚀^[11],导致叶片叶型损失增大,通流部分流通面积变小,降低蒸汽做功能力。在同样的负荷下,由于通流部分结垢,使

得汽轮机进汽量增加,叶片所受的弯曲和离心应力随之增加,降低了机组安全性^[12-14]。



图 5 机组通流结垢

2.3 问题处理

该电厂在检修期间对所出现的问题进行了及时处理。

(1) 损坏的 1 ~ 4 级隔板返厂进行焊补、打磨修复;汽轮机高中压转子返厂,更换部分动叶,围带进行机加工,转子做动平衡试验。

(2) 对高中压缸结垢部件采用高压水冲洗、喷砂丸进行清洗。

通过上述处理,汽轮机叶片结垢层处理良好,机组恢复正常运行,各参数都在指标范围内,实现机组安全、经济运行。为防止机组出现上述问题,需要采取相关的预防措施:加强对各个环节蒸汽质量的监督,确保蒸汽品质满足要求,防止通流部分结垢。

3 改造方案

某制造厂家针对 D10 型汽轮机通流改造提出初步设计方案,具体见表 4。

针对制造厂家提供的通流改造方案,以全轴系改造方案为例,改造后机组高压缸效率提升至 86. 0% ~ 87. 0%,比设计值 83. 9% 提高了 2. 1 ~ 3. 1 百分点;中压缸效率提升至 92. 0% ~ 93. 0%,比设计值 90. 1% 提高了 1. 9 ~ 2. 9 百分点;改造后汽轮机功率可提高 1. 3%。可见,通过汽轮机通流部分改造,机组的经济性能可以大幅提高,达到节能增效、减排降耗的目的。鉴于 D10 型汽轮机的性能下降明显,通流节能增效改造势在必行。

表 4 D10 型汽轮机通流部分改造方案

项目	全轴系改造	通流叶片更换	通流升级改造	原始设计
改造后高压缸效率/%	86. 0 ~ 87. 0	83. 9	84. 6	83. 9(含阀门)
改造后中压缸效率/%	92. 0 ~ 93. 0	90. 1	90. 6	90. 1(含阀门)
改造后低压缸效率/%	90. 5 ~ 91. 5			91. 1
功率增加	+ 1. 3%	+ 0. 0%	+ 0. 8%	388. 84 MW

4 结论和建议

(1)由历次试验结果对比分析可知,S109FA 燃气-蒸汽联合循环机组热耗率增加了 8.94%,机组出力降低了 6.33%,高、中压缸效率与设计值相比分别下降了 2.71 个百分点和 3.45 百分点,可见,机组的热经济性已经明显下降。因此,应及时对运行中出现的问题进行有针对性的定期检查,对出现的问题及时处理,确保其安全性。

(2) 实施汽轮机通流部分改造,是提高 D10 型汽轮机经济性能的根本解决措施。因此,建议结合机组检修安排,对其进行通流部分改造,从而达到节能增效的目的。

参考文献:

- [1]温建国. 600 MW 汽轮机性能诊断[D]. 北京:华北电力大学, 2009.
- [2]邓伟. 600 MW 超临界汽轮机热力性能诊断及供热分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [3]王攀, 王泳涛, 王宝玉. 基于多因素耦合变工况理论的汽轮机组节能诊断技术的研究及应用[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(6): 461-463.
- [4]ORTEGA F, MENENDEZC, ORDIERES J, et al. Analysis of heat transference in the regenerative exchanger of a thermal power plant [J]. Neural computing & applications, 2000 (9): 218-226.
- [5]范卫军, 邬振耀, 忻建华, 等. 可组态的汽轮机组在线热经济性分析系统[J]. 发电设备, 1999(4): 47-50.

(上接第9页)

- [15] 朱林, 苏盛, 段献忠, 等. 基于 IEC 61850 过程总线的分布式母线保护研究[J]. 继电器, 2007, 33(s1): 40-44.
- [16] 李莹. 分布式微机母线保护的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2000.
- [17] 唐治国, 汪思满, 康丰, 等. 多级级联分布式母线保护方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 136-141.
- [18] 马超. 基于 IEC61850 的分布式母线保护研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [19] 李伟. 分布式微机母线保护的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [20] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 42-48.
- [21] 周玉兰, 詹荣荣, 舒治淮, 等. 2003 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 48-53.
- [22] 戴志辉. 继电保护可靠性及其风险评估研究[D]. 北京:

- [6] 张雄, 胥建群, 周克毅. 全图形化热力发电厂热力系统通用计算软件[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(5): 271-306.
- [7] 李慧. 抽汽式汽轮机通流部分节能潜力诊断方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2010.
- [8] 孔庆甫. D10 汽轮机的高压通流受阻运行分析[J]. 浙江电力, 2010, 29(8): 31-52.
- [9] 阎维平, 阚伟民, 肖小清. ASME PTC 6.2—2011 联合循环电站汽轮机性能试验规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 3-90.
- [10] 丁勇能, 朱伟雄. 9FA 燃机/汽轮机主蒸汽截止和控制阀故障[J]. 设备管理与维修, 2010(4): 18-19.
- [11] 汪学峰. 汽轮机叶片结垢原因分析及解决措施[J]. 东方汽轮机, 2010(3): 55-58.
- [12] 林庆城. 汽轮机通流部分结垢原因及防范措施[J]. 热力发电, 2005, 34(7): 27-29.
- [13] 丁旭春, 王毅, 殷志龙, 等. 超临界 630 MW 机组汽轮机通流结垢诊断及处理[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 138-141.
- [14] 李勇, 徐君诏, 黄萍力. 凝汽式汽轮机通流部分结垢诊断方法研究[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(5): 371-373.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

蔡雨(1991—),男,安徽宿州人,在读硕士研究生,从事汽轮机通流部分性能诊断方面的研究工作(E-mail: 676837964@qq.com)。

李蔚(1974—),女,浙江金华人,副研究员,从事汽轮机热力设计、转子系统稳定性分析方面的研究工作(E-mail:energy@zju.edu.cn)。

华北电力大学,2012.

- [23] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
- [24] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-92.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

陈琦(1985—),男,江苏盐城人,工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作(E-mail: carl - qi. chen@ sac - china. com)。

陈福锋(1979—),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作。

张尧(1984—),男,陕西商洛人,工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作。