

联合循环机组在线性能试验软件开发与应用

高建强, 范晓颖, 赵军友

(华北电力大学 能源与动力工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要:以 DCS 采集的实时数据为基础, 给出了在线性能试验所需的所有过程参数, 介绍了联合循环机组总出力 and 总热耗率等主要热力性能指标的计算方法。基于一体化过程模型开发平台 IMMS, 采用模块化建模方法, 建立了热力性能指标的在线计算模型, 并通过用户界面程序实时显示计算结果。本软件已在某电厂 395 MW 燃气—蒸汽联合循环机组厂级监视信息系统 SIS 中得到了应用。结果表明, 该软件能够满足现场实时监测的要求, 便于运行人员及时掌握和分析机组运行的经济性。

关 键 词: 联合循环; 性能计算; 在线模型; 状态监测

中图分类号: TM611; TP311 文献标识码: A

引 言

常规热力性能试验主要在机组验收期间、大修前后或设备改造前后进行^[1]。做一次标准的热力试验, 必须经过试验方案制定、测点的布置、设备调试、数据采集整理、试验数据计算分析和出具试验报告等过程, 这样不但费时费力, 达不到及时监测效果。而采用实时在线热力试验, 可直接给出机组各种工况下的试验结果, 可以有针对性地监测机组每时每刻的热耗情况, 大大提高了能耗监测的效率和管理水平^[2]。目前, 对燃气—蒸汽联合循环机组常规热力试验已进行了较多的研究^[3~5], 但关于联合循环机组在线热力性能试验方面积累的经验还很少。

本文介绍了某电厂燃气—蒸汽联合循环机组在线热力性能试验软件的开发和应用情况, 讨论了其在线性能计算方法。通过一体化过程模型开发平台, 采用模块化建模方法, 建立了热力性能试验主要指标(机组总出力和机组总热耗)的在线计算模型。DCS 采集的实时数据经在线计算和处理, 作为已知数据, 通过性能计算模型在线计算, 并将结果实时显示到运行员站, 从而便于运行人员及时了解机组运行的经济性。

1 性能指标计算方法

1.1 所需过程参数

在线热力试验所需的参数可分为两类, 即测量参数和计算参数。

测量参数指机组 DCS 采集的过程参数数据, 用于试验的过程参数大多取自这些数据。试验所需测量的参数必须在机组已经达到稳态运行条件后, 才能进行测量计数, 每次记录数据的时间间隔为 20 s。当某个参数有多个数据测点时, 取其平均值作为试验数据。

有些参数安装了测点, 可以实时测得。而有些参数由于无测点而不能直接得到, 只能根据已经测得的数据进行在线计算得到。

机组在线测量的主要参数有: 发电机输出功率、功率因数、冷却水温度、天然气加热器进气温度、压气机进气温度、大气压力、压气机进气相对湿度、发电机频率、运行小时数、燃料流量、燃料中各个成份的摩尔份额。

通过在线计算得到所需要的参数, 主要有: 冷却水流量、燃料的低位发热量和燃料氢碳比(H/C)。

(1) 冷却水流量:

把凝汽器看作一个系统, 由能量守恒可知, 吸热量等于放热量:

$$G_{xh}(h_o - h_i) + G_n h_n = G_g h_g + G_{bc} h_{bc} + G_c h_c \quad (1)$$

式中: G_{xh} 、 G_n 、 G_g 、 G_{bc} 、 G_c —循环冷却水、凝结水、燃料加热器来水、补充水和汽机排汽的流量; h_o 、 h_i 、 h_n 、 h_g 、 h_{bc} 、 h_c —循环水出口、循环水进口、凝结水、燃料加热器来水、补充水和汽机排汽的焓值。

除冷却水流量, 其余各流量可通过测量或计算得到, 焓值可通过测得的压力和温度求得, 从而可求出冷却水流量。

(2) 低位发热量:

$$Q_{\text{ar, net}} = \sum Q_i n_i / \sum \rho_i n_i \quad (2)$$

式中: n_i —天然气各成份的摩尔百分比, %; Q_i —天然气各成份的发热量, kJ/m^3 ; ρ_i —天然气各成份的密度, kg/m^3 。

(3) 燃料氢碳比:

$$H/C = \sum N_{\text{H}i} n_i / \sum N_{\text{C}i} n_i \quad (3)$$

式中: $N_{\text{H}i}$ 、 $N_{\text{C}i}$ —燃料各成份所含的氢和碳的摩尔数。

1.2 性能指标计算

性能计算的方法以 PTC46—1996“全厂性能试验标准”为依据^[9], 主要计算机组总出力 and 机组总热耗两个指标。

由于机组运行条件通常会偏离额定值, 因此需要对实测的机组总出力和总热耗进行修正, 使其折算成为额定条件下的数据, 以便考核机组性能的优劣, 便于运行人员掌握当前运行工况下的热力性能。

1.2.1 联合循环总出力

联合循环总的设备出力应按下式从“试验条件”修正到“额定条件”:

$$P_c = (P - \Delta P_{\text{pf}} - \Delta P_{\text{wt}} - \Delta P_{\text{wf}} - \Delta P_{\text{f}}) \times \prod_{i=1}^6 E_i \quad (4)$$

式中: P_c —修正的联合循环总出力, kW ; P —实测的联合循环总出力, kW ; ΔP_{pf} —功率因数与额定值的差异对总出力的修正, kW ; ΔP_{wt} —凝汽器冷却水温度与额定值的差异对总出力的修正, kW ; ΔP_{wf} —凝汽器冷却水流量与额定值的差异对总出力的修正, kW ; ΔP_{f} —燃气加热器进口温度与额定值的差异对总出力的修正, kW 。

E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 、 E_6 分别为压气机进气温度、大气压力、压气机进气相对湿度、发电机频率、燃料成份和燃烧小时数等的实测值修正到额定值的功率修正系数。图 1 为联合循环总出力的修正系数随压气机进气温度的变化曲线。

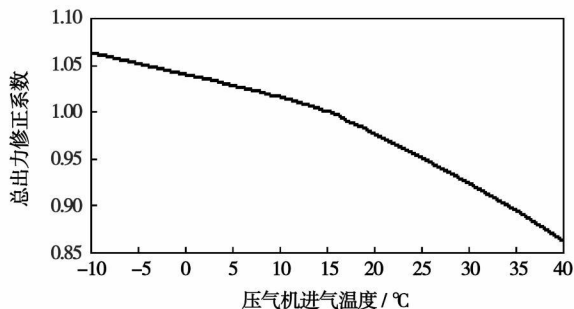


图 1 联合循环总出力修正曲线

1.2.2 联合循环总热耗率

(1) 实测的燃气热耗量:

$$Q = W_f \times Q_{\text{ar, net}} \quad (5)$$

式中: W_f —燃料流量, kg/h ; $Q_{\text{ar, net}}$ —燃料低热值, kJ/kg ; Q —燃气轮机的热耗量, kJ/h 。

(2) 修正的燃气轮机热耗量:

按下列方法, 将燃气轮机热耗量从“试验条件”修正到“额定条件”:

$$Q_c = Q \times \prod_{i=1}^6 F_i \quad (6)$$

式中: Q_c —修正的燃气轮机热耗量, kJ/h 。

F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 分别为压气机进气温度、大气压力、压气机进气湿度、发电机频率、燃料成份和燃烧小时数等的实测值修正到额定值的功率修正系数。

(3) 修正的联合循环设备总热耗率:

$$q_c = Q_c / P_c \quad (7)$$

式中: q_c —修正的联合循环设备总热耗率, $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

2 在线模型的建立

性能计算模型的数学表达形式与机组的设备流程有关。由于电厂机组的设备多、型式多、系统工作流程差异大, 因而其模型的通用性差。这给模型的实现、软件的维护带来困难。为解决模型开发、运行维护等方面所存在的问题, 本文的模型开发以一体化模型开发平台 (IMMS) 为基础, 利用模块化建模方法, 建立机组性能计算模型。

2.1 IMMS 简介

一体化过程模型开发平台主要由模型开发环境、通用算法库和通讯等部分组成, 如图 2 所示^[7-8]。它在 Windows98 以上版本操作系统的支持下运行, 平台规范了算法结构, 算法采用 Fortran 语

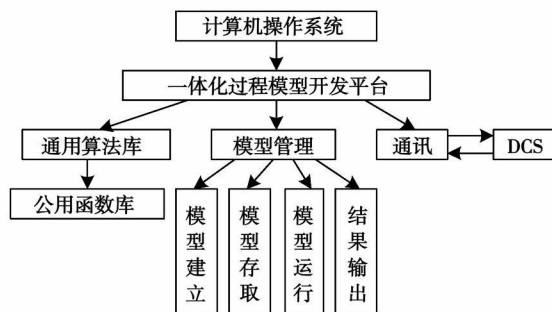


图 2 模型开发平台功能

言编写。平台提供了一个开放的、积木式的模块化建模环境, 为系统模型功能的扩展、完善和修改提供了一个方便快捷的开发手段。

该平台具有资源占用少、高度模块化、算法通用性强、建模速度快、计算精度高和良好的人机界面等优点。

2.2 建立模型

通过对系统的分析与分解, 建立某类型设备或过程的通用性能计算模型, 并将其处理成具有标准化的输入、输出和系数的子程序, 即过程或设备算法。各个算法预先调试好后放入库中, 构成通用算法库, 作为建立系统中该类过程或设备性能计算模型的基本单元。

在线热力性能试验模型主要包括各修正系数求解模块、计算参数模块和判断模块等。建立模块时从算法列表中调用已处理好的通用算法, 采用这些算法建立若干个计算模块。

主要通用算法有线性插值 (LOOKUP、LOOKUP2)、多路比较 (COMPARE)、五路乘法 (MULT5)、通用加法 (GENSUM) 和多路除法 (MULT-DIV) 等。模块结构对应于算法结构, 包括输入、输出和特性参数, 每个模块都包括序号、模块名、算法名、执行速率和模块状态等。输入和输出代表过程参数, 如压气机进气温度、发电机频率等, 其数值随运行工况变化; 系数用来设置设备结构和特性参数等。开发者可以根据建模的需要, 自行定义 3 种数据的类型和数量。

系统模型是由许多算法模块组成的集合体。建立模型时把一个模块的输出量作为下一个模块的输入量来实现模块之间的搭接, 从而建立所需的计算模型。通过引入测点参数, 可方便地实现模型的在线计算, 图 3 为联合循环总出力计算的模块图。

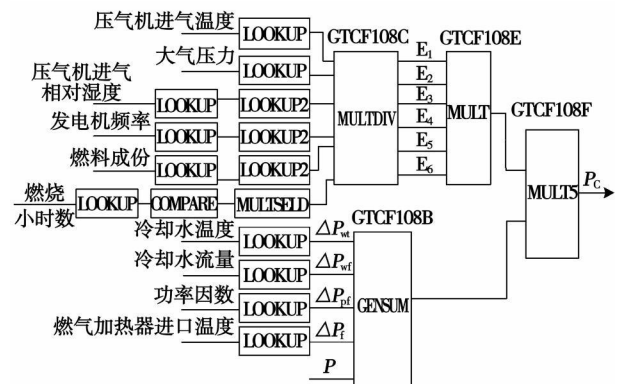


图 3 联合循环总出力计算模块图

图 3 中各个模块框上方的标识 GTCF108B、GTCF108C、GTCF108E、GTCF108F 分别代表了功率损失之和、取倒数、各系数的乘积、联合循环总出力计算等模块的模块名; 各个模块框内下部的标识, 如 GENSUM、MULTDIV、LOOKUP 等, 分别是各模块的算法名; 模块间的连线代表模块间数据的传递关系。该模块连接图也是模型开发的界面, 用鼠标点击其中一个模块后, 就会出现一个新窗口, 显示所选模块的详细参数, 并可对各模块参数进行修改、调试。

模型计算所需数据从数据库中读取, 而模型的计算结果再存入数据库, 数据库数据的读取和存放通过一体化模型开发平台提供的通讯软件实现, 同时通过用户界面程序实时显示分析计算结果。

3 应用实例

某电厂配备两台 STAG109FA 单轴联合循环机组, 主设备包括 PG9351FA 型燃气轮机、D10 型蒸汽轮机、390H 型发电机以及自然循环、无补燃、三压再热型余热锅炉。机组最重要的性能参数为机组总出力和总热耗率, 表 1 为机组在额定运行条件下的热力性能保证值^[6]。

表 1 机组额定工况下热力性能保证值

		数值
性能指标	机组总出力/kW	395 860
	机组总热耗/ $\text{kJ} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	62491
	压气机进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	15.4
	大气压力/MPa	0.101 61
运行条件	空气相对湿度/%	80
	冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$	22.0
	冷却水流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	6 595.028
	发电机功率因数	0.85
	低位发热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	48 686.3
	燃料氢/碳比	3.95

本系统是以该电厂 395 MW 单轴燃气—蒸汽联合循环机组为对象开发的, 现已成功应用于该电厂厂级监视信息系统 (SIS) 中, 通过一年的运行和调试后, 结果表明其运行稳定。表 2 为 2 号机组在某一工况下的运行结果, 经过分析认定, 计算结果合理, 满足工程上的要求。

从表 2 中可以看出, 机组在接近额定负荷的某个运行条件下, 压气机进气温度、冷却水温度等因素对联合循环机组设备总出力和总热耗率的影响较

大,可以说明这些因素的实际运行条件与额定条件的偏差较大。而压气机进气相对湿度、发电机频率等因素对性能影响不明显,表明基本是在额定条件下运行。

表 2 2 号机组某工况运行结果

2 号在线热力性能试验					
	实测数据	功率修正		热耗修正	
压气机进气温度/°C	25.66	E_1	1.052 6	$F1$	1.052 6
大气压力/MPa	0.100 929	E_2	1.010 1	$F2$	1.010 1
压气机进气相对湿度/%	65.67	E_3	1	$F3$	1
发电机频率/Hz	50.12	E_4	1	$F4$	1
燃烧小时数/h	6 455.00	E_5	1.025 4	$F5$	1.012
燃料低热值/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	48 072.03	E_6	1	$F6$	1
燃料流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	13.43	—	—	—	—
冷却水温度/°C	30.74	$\Delta P_{\text{wt}}/\text{kW}$	-6 226.43	—	—
冷却水流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	725 0.083	$\Delta P_{\text{wt}}/\text{kW}$	3 12.23	—	—
燃气加热器进口温度/°C	18.27	$\Delta P_{\text{t}}/\text{kW}$	5.47	—	—
发电机出力/MW	364.77	—	—	—	—
		$\Delta P_{\text{it}}/\text{kW}$	3 571.70	—	—
功率因数	0.92	$\Delta P_{\text{it}}/\text{kW}$	3 175.17	—	—
		$\Delta P_{\text{it}}/\text{kW}$	3 396.53	—	—
氢碳比(H/C)	3.91	—	—	—	—
		发电机出力:402 554.62 kW			
修正结果		燃机热耗量:2 476 653.312 kJ/h			
		联合循环设备总热耗率:6 153.34 kJ/(kWh)			

据,使在线计算得到的性能指标数值尽可能准确,同时实时给出计算结果,避免了常规热力性能试验带来的不便。试验所需要的过程参数的测量精度直接影响计算结果,因此需要电厂热工人员精心维护好相关测点。

参考文献:

[1] 杨顺虎. 燃气—蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003

[2] 樊泽国, 刘云祥, 马俊杰, 等. 实时在线热力试验系统在内蒙古电网应用的可行性分析[J]. 内蒙古电力技术, 2005, 23(1): 39—40

[3] 阎保康, 宋志刚. 大型燃气—蒸汽联合循环机组热力性能试验研究[J]. 华东电力, 2003, 9: 74—76

[4] 王克勤, 金晓刚. S106B 燃气—蒸汽联合循环机组热力性能试验分析[J]. 浙江电力, 2002(5): 5—8

[5] 焦树建. 浅论联合循环热力性能的验收试验[J]. 燃气轮机技术, 2003, 17(1): 1—14

[6] JAMES FREDERICK. Combined cycle thermal performance test report [R]. Zhangjiagang City: Zhangjiagang Huaxing Electric Co Ltd, 2006

[7] 陈鸿伟, 陈 聪, 高建强, 等. 锅炉金属壁温在线监测系统模型的开发与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 125—129

[8] 高建强, 陈 聪, 李永华, 等. 基于 B/S 模式的锅炉金属壁温在线监测系统[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 68—71

(编辑 韩 锋)

4 结 论

(1) 在线热力性能试验软件有针对性地实时监测联合循环机组的设备总出力 and 总热耗率情况, 并将出力、热耗及其各影响因素的情况实时显示, 便于运行人员及时了解机组的运行情况, 提高了能耗监测效率和管理手段, 有助于提高机组运行的经济性。

(2) 借助一体化过程模型开发平台, 建立的模块化在线性能试验模型, 各模块功能独立, 可以很方便的在系统中对模块进行添加、删除和修改, 并且模块的修改、调整可以在线或离线进行, 无需对模块进行重新编译, 建模效率高。平台具有很强的容错和自诊断功能, 系统易于维护。

(3) 在线性能试验软件尽可能地采用实测数

· 书 讯 ·

《废热锅炉技术问答》

由吉化集团组织编写的《化工设备技术问答丛书》包括《废热锅炉技术问答》、《工业汽轮机技术问答》、《塔设备技术问答》、《泵技术问答》、《化工容器技术问答》、《换热器技术问答》共 6 分册。本分册以问答形式深入浅出、图文并茂地介绍了废热锅炉的结构及工作原理、废热锅炉的运行与维护、废热锅炉系统的辅助设备及其附件、废热锅炉水处理、废热锅炉防腐和保护、废热锅炉及辅助设施检修等内容。

读者对象: 运行技术人员及管理人员。

2008 年 8 月出版

负荷结构对冷热电联供系统优化配置的影响= **Influence of Load composition on the Optimized Configuration of a Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Cogeneration System**[刊, 汉]/LI Zhao-zhen, SHI Yu-mei, HUANG Xing-hua (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, Post Code: 200240)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(6). — 606~610

Being a factor specific to the optimization of a cogeneration system, load composition exercises a major influence on the configuration mechanism of the system in question. The research in this regard will be certainly beneficial to the proper popularization of this technology in China. The authors have established a nonlinear integrated optimization model of mixed integer type for the cogeneration system featuring a simultaneous supply of cooling, heating and electrical power. Several specific cases were calculated at different load proportions based on the loads actually measured from a hotel. The influence of heating/electric power ratio and cooling/electric power ratio on the optimal capacity of various equipment items was examined by making use of a sensitivity analysis. The results of the study show that at different load make-ups, the optimal capacity of the equipment items and its variation tendency undergo significant changes. It is difficult for the currently prevalent operating modes, namely heating production determination on the basis of electric power generation or electric power generation determination on the basis of heating requirements, to decide the optimal capacity of a gas turbine. The optimal capacity of an absorption type refrigerator is also influenced by various load settings. The optimal capacity of a boiler and an electric refrigerator may be approximately determined respectively and separately by heating/electric power ratio and cooling/electric power ratio. The research results can serve as a reference for the popularization of the cogeneration system (simultaneous supply of heating, cooling and electric power) in various climatic regions. **Key words:** combined supply of cooling, heating and electric power, load ratio, sensitivity analysis, configuration optimization, gas turbine

联合循环机组在线性能试验软件开发与应用= **Development and Application of an On-line Performance Test Software for Combined Cycle Units**[刊, 汉]/GAO Jian-qiang, FAN Xiao-ying, ZHAO Jun-you (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(6). — 611~614

On the basis of the real-time data acquired by a distributed control system (DCS), given were all the process parameters necessary for an on-line performance test along with the description of a method for calculating the main thermodynamic performance indexes of a combined cycle unit, namely, its gross power output and total heat rate etc. Based on an integrated modular model software (IMMS) and by adopting a modular modeling method, an on-line model for calculating the thermodynamic performance indexes was established. Moreover, through an user interface program, the calculated results were real-time displayed. The software in question has been applied in the plant-level supervisory information system (SIS) of a 395 MW gas-steam combined cycle unit in a power plant. The results show that the software can meet the requirement for an on-site real-time monitoring, thus facilitating relevant operating personnel to timely grasp and analyze the operation cost-effectiveness of the unit. **Key words:** combined cycle, performance calculation, on-line model, condition monitoring

微型燃气轮机冷热电联供系统变工况性能研究= **A Study of the Off-design Performance of a Micro Gas Turbine-based Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Cogeneration System**[刊, 汉]/HE Bin-bin, YANG Yong-ping, DUAN Li-qiang (Beijing City Key Laboratory on Safe and Clean Utilization of Energy Sources and Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(6). — 615~619

A micro gas turbine-based combined cooling, heating and power (CCHP) cogeneration system has been designed and a model for analyzing the off-design performance of the system, established. In combination with specific calculation cases, an analytic computation has been performed of the thermodynamic performance of the system in question operating at an