

基于规则的冷凝器压力系统协调控制研究

张 伟¹, 边信黔², 夏国清², 蔡鹤皋¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了基于规则的协调控制方法在冷凝器压力控制中的应用情况。根据守恒定律建立了冷凝器和抽气器的动态数学模型, 在此基础上, 通过引入压力变化速率信号和冷凝器平均温度变化信号, 将基于规则的协调控制方法应用于冷凝器的压力系统控制中, 压力系统控制主要通过循环水泵控制器和抽气器控制器来实现。仿真结果表明, 与传统的压力系统控制相比, 在大幅度负荷变化时基于规则的冷凝器压力系统协调控制方法的控制效果明显改善, 冷凝器压力的超调量减小, 稳定时间缩短, 系统具有更好的动态性能。

关 键 词: 冷凝器; 压力系统; 规则; 协调控制; 数学模型

中图分类号: TK269; TP11 文献标识码: A

引 言

在凝汽式汽轮机组的热力循环中, 保持冷凝器的真空度对于提高汽轮机的功率以及整个动力装置效率具有重要的意义^[1]。但由于系统具有强耦合、非线性、时变和多输入多输出等特性, 其动力学性质也非常复杂, 这对控制器的设计提出了很高的要求, 而且动力系统会在许多恶劣的情况下工作, 有时还可能大幅度改变工况, 因此, 为了保证整个动力系统能在比较可靠的范围内工作, 进一步提高系统的安全性, 对冷凝器压力系统控制的研究就具有很重要的意义。对于冷凝器的压力系统控制主要采用传统的 PID(比例-微分-积分)控制^[2], 但是在大幅度改变工况下, 冷凝器的压力变化较大, 这将影响汽轮机的正常运行, 因此有必要进一步改善冷凝器在大负荷变化时压力控制器的控制效果。在此基础上, 设计了基于规则的冷凝器压力协调控制器, 以改善冷凝器在大负荷变化时对压力的影响。

1 冷凝器数学模型

冷凝器用做汽轮机、汽轮循环水泵和低压汽轮

机等旁路蒸汽排汽装置, 接收来自给水加热器疏水等各路疏水。在冷凝器内凝结成水流入热水井, 再由凝结水泵送出。本文所涉及的模型主要包括热交换和真空抽气。冷凝器中热量传递过程为: 蒸汽凝结放出的热量由金属管壁吸收, 然后通过对流换热方式由循环冷却水带走; 同时, 还存在汽侧质量储存, 金属管壁的储热和管内冷却水的热惯性等过程。冷凝器的蒸汽室必须处于真空状态, 但难免有一定量的空气漏进来, 此外进入的新蒸汽也要带来一部分气体。为了保持真空和防止冷凝器内传热条件的恶化, 采用抽气器不断抽出真空室中的空气。

为了计算简化, 同时又能确保模型的精度, 在建立冷凝器的非线性动态模型之前, 根据冷凝器工作情况, 进行如下假设^[3-7]: (1) 内部各种工质压力和温度同步变化, 内部金属温度和饱和温度同步变化; (2) 冷凝管束按一簇处理; (3) 在蒸汽侧, 不考虑结构对传热系数的影响(如上一部分管束的冷凝液对传热系数的影响); (4) 在能量平衡方程中, 不考虑空气的能量存在; (5) 在冷凝管束中压力和速度是常数; (6) 冷凝水温度可测。

把冷凝器分成两个区: 液面以上称为蒸汽区, 液面以下称为液体区, 如图 1 所示。

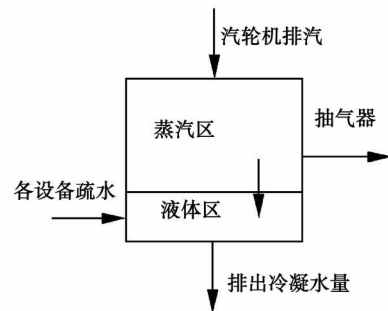


图 1 冷凝器流程简图

蒸汽区, 汽水混合物的质量平衡方程:

收稿日期: 2008-02-25; 修订日期: 2008-12-14

基金项目: 黑龙江省博士后基金资助项目(AUGA41100088); 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(HEUFTO 8004)

作者简介: 张伟(1978-), 男, 辽宁瓦房店人, 哈尔滨工程大学副教授, 哈尔滨工业大学博士后。http://www.cnki.net

$$\frac{d}{d\tau}(V''_{LN} \cdot \rho''_{LN}) = G_{TS} + G_{FS} - G_{LN} - G_{KG} \quad (1)$$

式中: G_{TS} —汽轮机排入冷凝器蒸汽量; G_{FS} —辅机排入冷凝器的蒸汽量; G_{LN} —冷凝器中的冷凝量; G_{KG} —抽气器抽出蒸汽量; V''_{LN} —冷凝器中蒸汽容积; ρ''_{LN} —冷凝器中蒸汽平均密度。

液体区, 质量平衡方程:

$$\frac{d}{d\tau}(V'_{LN} \cdot \rho'_{LN}) = G_{LN} + G_{SW} + G_{RBW} + G_{ZXW} - G_{LNW} \quad (2)$$

式中: G_{SW} —排入冷凝器疏水量; G_{ZXW} —冷凝器再循环水量; G_{RBW} —补给冷凝器除氧水箱的水量; G_{LNW} —排出冷凝器的凝水量; V'_{LN} —冷凝器中水容积; ρ'_{LN} —冷凝器中水容积平均密度。

能量平衡方程:

蒸汽区, 汽水混合物的能量平衡方程:

$$\frac{d}{d\tau}(V''_{LN} \cdot \rho''_{LN} \cdot h''_{LN}) = G_{TS} h_{TS} + G_{FS} h_{FS} -$$

$$Q''_{LN} - G_{LN} h'_{LN} - G_{KG} h_{KG} \quad (3)$$

式中: h''_{LN} —冷凝器中蒸汽容积平均焓值; h'_{LN} —冷凝器中水容积平均焓值; h_{TS} —汽轮机排入冷凝器中蒸汽平均焓值; h_{FS} —辅机排入冷凝器中蒸汽平均焓值; Q''_{LN} —冷凝器中蒸汽传给冷凝管束的放热量。

冷凝管束的热量平衡:

$$Q''_{LN} = A_{LN} \cdot (T''_{LN} - T_G) \cdot \alpha_{LN} \quad (4)$$

式中: A_{LN} —蒸汽与冷凝管束之间的传热面积; T''_{LN} —冷凝器中蒸汽温度; T_G —冷凝器中冷凝管束的温度; α_{LN} —蒸汽与冷凝管束之间传热系数。

金属管壁热量平衡:

$$M_C C_G \frac{dT_G}{d\tau} = A_{LN} \cdot (T_{LN} - T_G) \cdot \alpha_{LN} - A_{CHW} \times (T_G - T_L) \cdot \alpha_{LQ} \quad (5)$$

式中: A_L —冷凝管束与循环冷却水之间的传热面积; T_L —循环冷却水温度; α_{LQ} —冷凝管束与循环冷却水之间传热系数。

冷却介质海水热量平衡:

$$M_L C_L \frac{dT_L}{d\tau} = A_L \cdot (T_G - T_L) \cdot \alpha_{LQ} - G_L \cdot C_L \times (T_{LC} - T_{LR}) \quad (6)$$

式中: M_L —循环冷却水质量; C_L —循环冷却水比容; G_L —循环冷却水流量; T_{LC} —循环冷却水入口温度; T_{LR} —循环冷却水出口温度。

液体区, 能量平衡方程:

$$\frac{d}{d\tau}(V_{LNW} \cdot \rho'_{LN} \cdot h'_{LN}) = G_{LN} \cdot h'_{LN} + G_{SW} \cdot h_{SW} +$$

$$G_{ZXW} \cdot h_{ZXW} + G_{RBW} \cdot h_{RBW} - G_{LNW} \cdot h_{LNW} \quad (7)$$

式中: h_{LNW} —排出冷凝器的冷凝水的焓值; h_{ZXW} —冷凝器再循环水的焓值; h_{RBW} —补给冷凝器除氧水箱水的焓值。

2 抽气器模型

抽气器模型为:

$$\frac{dP_{KQ}}{d\tau} = \frac{(G_{KQ} - G_{KQ0}) \cdot R \cdot T}{V} \quad (8)$$

$$P_{PQ} = P_{LN} - P_{KQ} - \Delta P_{LNCQ} \quad (9)$$

式中: ΔP_{LNCQ} —冷凝器入口至抽气口的汽阻; P_{KQ} —冷凝器中空气分压力; P_{PQ} —抽气器的排汽压力; G_{KQ0} —冷凝器漏入的空气量; G_{KQ} —抽气器抽出的空气量。

3 冷凝器压力的协调控制

在建立冷凝器模型的基础上设计冷凝器的压力控制系统, 冷凝器压力控制系统包括循环水泵控制系统和抽气器控制系统。系统在稳定工况以及负荷微小波动的情况下, 循环水泵控制系统采用单一的压力信号来控制泵的转速, 抽气器控制系统同样采用压力信号来控制冷凝器的抽气量。在传统的控制系统作用下, 当大幅度变负荷的情况时, 泵的转速和抽出的蒸汽量不能及时的响应, 造成冷凝器的压力波动大, 从而影响汽轮机以及整个动力系统的工作。

协调控制是一种解决大系统控制问题的策略^[8]。为了协调大系统各部件的运行状态, 使用了专家协调系统来判别系统内部各部件运行状态的变化情况, 同时也需要改造系统原有的控制器。当专家系统发出指令时, 采用专家系统的指令来执行; 当专家系统不发出指令时, 就采用原有的系统控制器来进行控制。系统中的每一个部件都需要利用专家系统来判别与其相关联部件状态的变化率大小, 当变化率超过某一阈值时, 激活专家系统中的某一条控制规则, 由专家系统向该部件的控制器直接发出控制命令, 代替原有控制器的控制命令, 直接控制该部件的状态变化。

针对大幅度变负荷的情况, 冷凝器压力控制系统基于规则的协调控制器引入了压力变化速率信号和冷凝器平均温度变化信号, 与原来的压力信号和冷凝器中非凝结量的温度一起来判断冷凝器压力波动的大小及方向, 这样可以有效改善冷凝器的过渡品质。冷凝器压力控制系统基于规则的协调控制器

主要包括循环水泵控制器和抽气器控制器, 控制原理如图 2 所示。整个协调控制系统分为: 协调层, 控制层以及执行层。

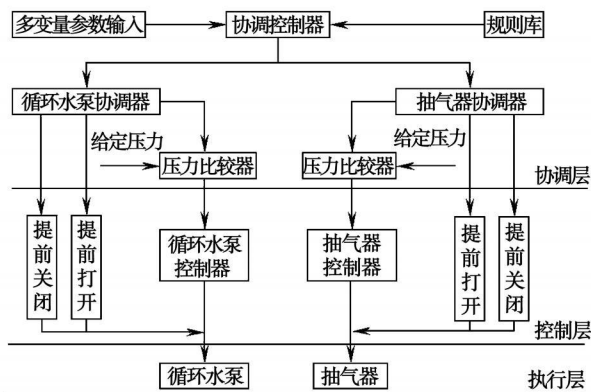


图 2 冷凝器协调控制原理

在负荷变化过程中, 当冷凝器压力波动范围较小时, 采用原有的冷凝器压力控制策略来控制; 当冷凝器压力波动范围较大时, 采用冷凝器协调控制器。多变量参数输入后, 首先通过协调控制器结合规则库中的规则进行判断。判断结果有 7 种, 同时发出相应的指令:

(1) 大幅度升负荷(低负荷工况—全负荷工况): 多变量参数输入后, 协调控制器结合规则库中相应的指令, 发出信号给循环水泵控制器和抽气器控制器, 让循环水泵和抽气器提前打开。然后, 循环水泵协调器和抽气器协调器分别接受协调器的指令, 让控制阀与抽气器提前打开或关闭水泵, 同时各自发出指令给压力比较器进行压力比较, 在压力基本上接近稳定的时候, 采用原有的冷凝器压力控制策略来进行调节。

(2) 中幅度升负荷(低负荷工况—中负荷工况, 中负荷工况—全负荷工况): 因为循环水泵的运行要消耗一定的有用功, 因此在中幅度升负荷时协调控制器只给抽气器控制器发出提前打开的控制信号。

(3) 非大幅度变负荷: 采用原有的控制策略。

降负荷时各协调控制器发出的信号与大幅度升负荷工况恰好相反。

4 仿真结果及分析

在冷凝器负荷变化不大时, 采用传统 PID 的控制方法, 是完全符合系统要求的; 当机组负荷大幅度变化时, 加入协调控制器后, 冷凝器压力超调量明显减

小, 过渡过程时间也略有缩短。在负荷从低负荷升至全负荷时, 采用传统 PID 的控制方法时, 冷凝器压力的超调量很大, 而加入了基于规则的协调控制器后, 压力的超调量明显减少, 这是因为压力控制系统引入了压力变化速率信号和冷凝器平均温度变化信号, 使抽气器的阀门以及循环水泵阀门提前加大开度或者减小开度, 从而减小了大负荷变化对整个系统的冲击。具体的压力变化曲线如图 3~图 6 所示。

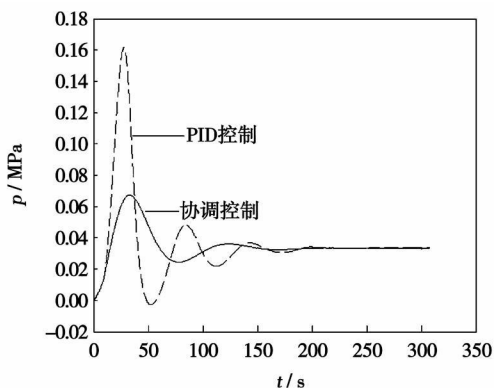


图 3 负荷从低负荷升至中负荷的压力变化

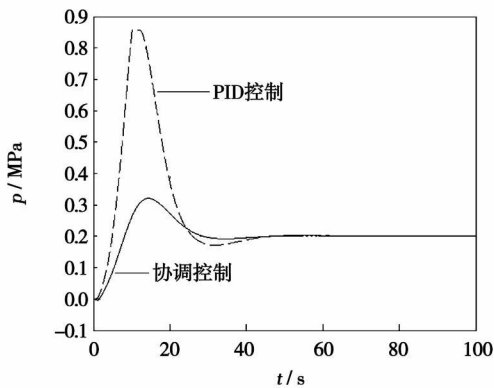


图 4 负荷从低负荷升至全负荷的压力变化

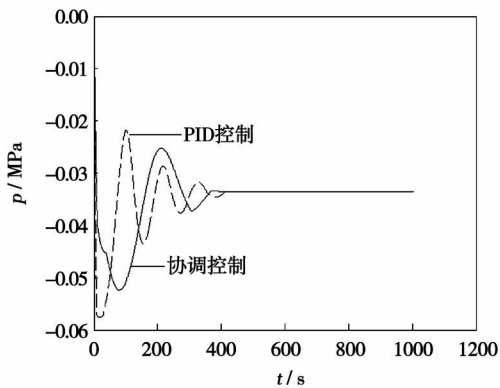


图 5 负荷从中负荷降至低负荷的压力变化

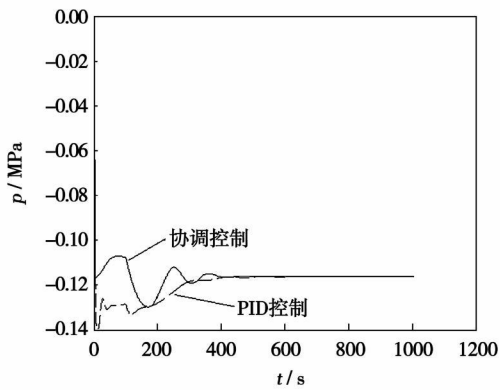


图 6 负荷从全负荷降至低负荷的压力变化

5 结 论

基于协调控制设计了冷凝器压力控制系统, 此系统由循环水泵协调控制器和抽气器协调控制器所组成。在大幅度变负荷时, 通过引入压力变化速率信号和冷凝器平均温度变化信号, 与原来的压力信号和冷凝器中非凝结量的温度一起判断冷凝器压力波动的大小及方向, 并产生控制信号。通过对仿真结果的分析, 说明了所设计的冷凝器压力协调控制

器, 在大范围变负荷时, 冷凝器的压力超调量明显减小, 稳定时间也有所减少, 从而使整个动力系统能够在更加安全的范围内运行。

参考文献:

- [1] 张丁旺. 汽轮机装置及调节[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.
- [2] ABBASSI A, BAHAR L. Application of neural network for the modeling and control of evaporative condenser cooling load[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25: 3176-3186.
- [3] 史 凯. 船用核动力装置凝给水系统运行管理专家系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [4] 于炳瀛. 冷凝器智能协调控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [5] 冯慧雯, 丁学俊. 凝汽器设计参数变化对真空影响的分析[J]. 汽轮机技术, 1994, 36(2): 72-77.
- [6] 徐奇焕. 凝汽器传热端差分析及降低端差的途径[J]. 汽轮机技术, 1997, 39(3): 174-177.
- [7] 俞茂铮, 姚秀平. 大功率汽轮机凝汽器汽相流动与传热特性的数值分析[J]. 动力工程, 1995, 15(6): 42-48.
- [8] 陈禹六. 大系统理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

(编辑 伟)

新技术、新产品

Titan 250 燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2008年4月号报道, 美国 Solar Turbine 公司最近推出新型的 Titan 250 燃气轮机, 加入其 Titan 燃气轮机行列, 它将使 Solar 产品范围的输出功率扩大到 22.4 MW。

基于由 Solar 各型燃气轮机得到的已证实的技术, Titan 250 将比具有同样底座的 Titan 130 提供多于 50% 的输出功率并使排放减少 30%。

Titan 250 燃气轮机是一种工业型双轴设计, 它使用 16 级轴流压气机, 具有进口可转导叶和 5 级可转导叶。压比为 24:1, 空气质量流量为 67.3 kg/s。如同 Titan 130、Mars 和 Taurus 燃气轮机系列的机型, 它结合有垂直中分面机匣。

燃气发生器涡轮部分是二级反动式设计, 最大额定转速为 10 500 r/min。

动力涡轮部分是三级反动式设计, 额定最大转速为 7 000 r/min。

压气机叶片涂层是无机铝, 涡轮喷嘴叶片和动叶片使用精密的铝化物扩散涂层。

在压缩机站和机械驱动装置应用中, Titan 250 的输出功率为 22 370 kW, 热耗率为 9 000 kJ/(kWh); 在电力生产应用中, Titan 250 的输出功率为 21 745 kW, 热耗率为 9 260 kJ/(kWh)。

(吉桂明 供稿)

should be comprehensively considered in order to choose optimum parameters. Among the various operating conditions being calculated, i. e. when for the waste-heat recovery steam generator at the tail portion of the kiln the main steam temperature is 300 °C, the main steam absolute pressure, 1.6 MPa, feedwater temperature, 170 °C, both high and low pressure node temperature differences, 15 °C, and both the high and low pressure approach point temperature differences, 11 °C, the low-pressure steam temperature of the heat-recovery steam generator at the head of the kiln, 180 °C, low-pressure steam absolute pressure, 0.25 MPa, the system feedwater temperature, 50 °C, and the back pressure of the steam turbine, 8 kPa, to sum up, under the condition of all the above items, the power generated by the system will be maximal, reaching 13 791.878 kW. **Key words:** cement production line, waste-heat power generation system, thermotechnical parameters, calculation analysis

基于规则的冷凝器压力系统协调控制研究 = Study of the Rules-based Coordinated Control of a Condenser Pressure System [刊, 汉] / ZHANG Wei, CAI He-gao (College of Electromechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), BIAN Xin-qian, XIA Guo-qing (Automation College, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 188 ~ 191

Studied was the application of a rules-based coordinated control method for the pressure control of condensers. According to the conservation law, set up was a dynamic mathematical model for condensers and air extractors. On this basis, through an introduction of pressure change rate signals and condenser average temperature change ones, the rules-based coordinated control method was employed for the control of condenser pressure systems. The control of the pressure systems was accomplished mainly through the controllers of both circulating water pumps and air extractors. The simulation results show that compared with traditional control over pressure systems, in the case of load changes by a big margin, the control effectiveness achieved by the rules-based coordinated control method for the condenser pressure system can boast a conspicuous improvement with the overshoot of the condenser pressure being reduced and the duration to attain a steady state shortened. As a result, the system features a better dynamic performance. **Key words:** condenser, pressure system, regularity, coordinated control, mathematical model

船用增压锅炉强化燃烧三维有限元分析 = Three-dimensional Finite Element Analysis of the Intensified Combustion in a Marine Supercharged Boiler [刊, 汉] / ZHANG Guo-lei, LI Yan-jun, WEN Liang (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHU Xin-yuan (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 192 ~ 195

With a supercharged boiler serving as an object of study and by using method “SIMPLE” to seek solutions to a $N-S$ equation, performed was a numerical calculation and analysis of the combustion and in-furnace heat transfer characteristics of the burners. Based on the calculation results obtained from software Fluent, the authors have analyzed and obtained the law governing the change under various pressures of such items as in-furnace temperature field, velocity and turbulent intensity in the back flow zone, tentatively unveiling the mechanism of supercharged and intensified combustion. The simulation calculation results show that with an increase of the in-furnace pressure, the in-furnace heat exchange intensity of the supercharged boiler will be enhanced, and the furnace volume heat release rate, obviously heightened. The foregoing simulation calculation results have laid a definite theoretical basis for further establishing in-furnace thermodynamic calculation methods for the supercharged boilers. **Key words:** supercharged boiler, numerical simulation, intensified combustion, volume heat release rate