Journal of System Simulation

Volume 29 | Issue 9

Article 27

6-2-2020

Modeling and Simulation of Superheated Steam Temperature Based on Multi-objective Genetic Algorithm

Zhenlong Wu 1. State Key Laboratory of Thermal Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;

Ting He 1. State Key Laboratory of Thermal Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;

Lingmei Wang 2. School of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;;

Fengsheng Jia 3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Superheated Steam Temperature Based on Multiobjective Genetic Algorithm

Abstract

Abstract: The high order inertial transfer functions were used to approximate the distribution parameter model. In order to compare the influence of the order of the leading region and the inertia object model on the accuracy and get the dynamic parameters, *the multi-objective genetic algorithm was used to optimize the model parameters according to the actual operation data of the power plant*. The higher the order, the Pareto front moves forward and recognizes the higher accuracy by the simulation when the orders are in a reasonable range. *The reasonable superheated steam temperature system model was established considering the engineering and accuracy requirements*.

Keywords

superheated steam temperature model, cascade system, multi-objective genetic algorithm, Pareto optimal solution set

Authors

Zhenlong Wu, Ting He, Lingmei Wang, Fengsheng Jia, Yunkai Yang, Haishu Wu, Donghai Li, and Han Lei

Recommended Citation

Wu Zhenlong, He Ting, Wang Lingmei, Jia Fengsheng, Yang Yunkai, Wu Haishu, Li Donghai, Han Lei. Modeling and Simulation of Superheated Steam Temperature Based on Multi-objective Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2081-2086.

第 29 卷第 9 期	系统仿真学报©	Vol. 29 No. 9
2017年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2017

基于多目标遗传算法的过热汽温建模与仿真

吴振龙¹,何婷¹,王灵梅²,贾峰生³,杨云凯⁴,吴海曙⁴,李东海^{1*},韩磊²
 (1. 清华大学 热能系 电力系统国家重点实验室,北京 100084; 2. 山西大学 工程学院,山西 太原 030013;
 3. 国网山西省电力公司电力科学研究院,山西 太原 030001; 4. 大同煤矿集团同达热电有限公司,山西 大同 037001)

摘要:基于过热汽温的分布参数模型,采用高阶惯性传递函数进行逼近。为分析串级回路中导前区、 惰性区模型阶次对辨识精度的影响和得到高阶惯性传递函数的动态参数, 根据电厂实际运行的数 据,采用多目标遗传算法对模型参数进行优化和仿真。通过分析仿真可知, 阶次在合理的范围时阶 次越高时帕累托前锋面越靠前,辨识具有更高的精确度。考虑实际需求与精度的要求,建立该机组 过热汽温系统的串级模型。

关键词: 过热汽温模型; 串级系统; 多目标遗传算法; Pareto 最优解集 中图分类号: TP27 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 09-2081-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709027

Modeling and Simulation of Superheated Steam Temperature Based on Multi-objective Genetic Algorithm

Wu Zhenlong¹, He Ting¹, Wang Lingmei², Jia Fengsheng³, Yang Yunkai⁴, Wu Haishu⁴, Li Donghai^{1*}, Han Lei²

(1. State Key Laboratory of Thermal Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China 3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;
 4. Datong Coal Mine Group Tongda Thermal Power Co., Ltd., Datong 037001, China)

Abstract: The high order inertial transfer functions were used to approximate the distribution parameter model. In order to compare the influence of the order of the leading region and the inertia object model on the accuracy and get the dynamic parameters, *the multi-objective genetic algorithm was used to optimize the model parameters according to the actual operation data of the power plant.* The higher the order, the Pareto front moves forward and recognizes the higher accuracy by the simulation when the orders are in a reasonable range. *The reasonable superheated steam temperature system model was established considering the engineering and accuracy requirements.*

Keywords: superheated steam temperature model; cascade system; multi-objective genetic algorithm; Pareto optimal solution set

引言

火电机组深度调峰和灵活性改造对机组特别 是循环流化床机组的建模和优化控制提出了越来



收稿日期:2017-05-20 修回日期:2017-07-14; 基金项目:山西省煤基重点科技攻关项目(MD2014-07); 作者简介:吴振龙(1992-),男,河南商丘,博士生, 研究方向为火电机组建模与自抗扰控制;何婷 (1992-),女,四川巴中,博士生,研究方向为分布式 能源系统建模与自抗扰控制。 越高的要求^[1]。过热汽温系统是火电机组汽水系统 中非常重要的回路,过热汽温系统的主要作用是维 持蒸汽在过热器出口的温度在允许的范围内,蒸汽 温度过高会降低管壁金属强度,从而影响机组的安 全运行;蒸汽温度过低会降低效率,影响全厂的经 济性运行^[2-3]。因此,火电机组过热汽温系统的建 模得到了越来越多的重视和研究^[4-7]。

范永胜等人在基于机理分析的基础上,建立了

http://www.china-simulation.com

第 29 卷第 9 期	系统仿真学报	Vol. 29 No. 9
2017年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2017

从 37%~100%负荷下的 4 个过热汽温串级模型,得 到的模型与现场试验数据比较吻合^[4]。Wen Xiao qiang 等人利用 300 MW 燃煤机组的在线数据,通 过 部 分 最 小 二 乘 回 归 (Partial Least-squares Regression, PLS)算法建立主蒸汽温度的非线性模 型^[5]。针对线性参数变化模型,量子粒子群优化算 法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)用 来优化模型参数^[6]。此外,Lina He 等人通过主成分 分析方法(Principal Component Analysis, PCA)处理 现场数据后,通过神经网络技术(Neural network, NN)建模的方法来改进传统的机理模型^[7]。

在本文中,线性化分布参数建模方法用于建 立循环流化床机组的过热气温模型,并采用高阶 惯性环节对过热汽温系统进行描述,针对不同串 级系统内外回路的阶次,借助多目标遗传算法 (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA)根据电 厂实际运行的数据对动态参数进行辨识,分析不同 阶次对于辨识结果的影响,在综合考虑建模的精度 要求和实际工程的需要选择合适的阶次,借助水平 图(Level diagram,LD)进行帕累托(Pareto)最优解的 确定,得到优化参数,建立过热汽温串级系统的模 型;并与实际运行模型进行对比,分析辨识的模型 与实际运行数据之间的偏差量,说明了建立模型的 可靠性,为以后的相关仿真和控制优化做基础。

1 过热汽温系统建模

本文建立的过热汽温模型是基于山西大同煤 矿集团同达热电厂的#2 机组二级减温水系统实际 运行数据建立的模型,该过热汽温系统是通过减温 水调节阀开度进行主蒸汽温度进行温度调节,采用 分段控制的结构如图1所示。本文中主要研究的为 图1 虚线框中的部分,即二级减温水调节的部分。 从减温水调节阀到中间点温度T_a的测点为导前区, 从中间点温度T_a的测点到过热器出口温度T_b的测 点为惰性区。

根据线性化分布参数建模方法可以得到某一 个工况点附近的传递函数为^[4]:

$$\frac{T_{exit}(s)}{D_{sn}(s)} = -K_{DT} \cdot e^{-\tau_0 s - \frac{\alpha_D T_m s}{1 + T_m S}}$$
(1)

其中:
$$\tau_0 = V \cdot \bar{\rho} / D$$
 (2)

$$\alpha_D = (\alpha_2 \cdot A) / (D \cdot C_p) \tag{3}$$

$$T_m = (M \cdot C) / (\alpha_2 \cdot A) \tag{4}$$

$$\alpha_2 = B \cdot \frac{\lambda^{0.6} C_p^{0.4}}{\mu^{0.5}} \cdot D^{0.8}$$
(5)

$$K_{DT} = (I_2 - I_{sp}) / (D \cdot C_{p1})$$
(6)





式(1)~(6)中, T_{exit} 为过热器出口温度,即 T_b ; D和 D_{sp} 分别为主蒸汽流量和通过减温水调节阀减的流量; C_p 和 C_{p1} 分别是二级减温水中蒸汽的平均 定压比热和过热器出口蒸汽的定压比热; I_2 和 I_{sp} 分别是在二级过热减温器中蒸汽的焓值和减温水 的焓值; τ_0 是蒸汽流过二级减温器的平均时间; α_D 是流动过程中的动态参数; V和 ρ 是二级减温水中 的容积以及蒸汽的平均密度; T_m 为金属蓄热的时 间常数; A和 α_2 分别是过热器表面积和对流放热系 数; M和 C分别是壁管金属的质量和比热; λ 和 μ 为蒸汽的热导率和动力粘度; B为常数。

公式(1)中所示的模型可以看做是工况参数的 函数表达式,可以通过高阶惯性环节 K / (1+Ts)" 进行表示。导前区、惰性区对象的模型分别采用如 下高阶惯性环节进行逼近:

$$G_1 = -\frac{K_1}{(T_1 s + 1)^{n_1}} \tag{7}$$

$$G_2 = \frac{K_2}{\left(T_2 s + 1\right)^{n_2}} \tag{8}$$

式(7)~(8)中的 n₁∈[2, 3]、n₂∈[3, 5]且均为整数; K₁, K₂, T₁和 T₂分别是导前区、惰性区增益与时

第 29 卷第 9 期		Vol. 29 No. 9
2017年9月	吴振龙, 等: 基于多目标遗传算法的过热汽温建模与仿真	Sep., 2017

间常数,是需要辨识的过热汽温模型的参数。

基于多目标遗传算法的过热汽温 系统建模与优化

多目标遗传算法是基于遗传算法通过针对多 个目标进行优化而来的^[8],在本文中采用带有精英 策略的快速非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)。NSGA-II 通过降低非劣排序遗传算法的复杂性,能够加快运 行速度和收敛速度等特点。

NSGA-II 是基于 Pareto 最优解讨论的多目标 优化算法,通过给出多目标优化问题的 Pareto 最优 解集,从而帮助决策者挑选出合适的 Pareto 解,如 图 2 所示,在 Pareto 前锋面外的解集(图中红色圆圈 所示的解集)则不是 Pareto 最优解^[8]。决策者可以根 据自己的需求,在有多个目标函数时可以通过借助 LD、散点图(Scatter diagram plots, SCp)或者平行坐 标(Parallel coordinate, PAc)等可视化方法,在 Pareto front 中选择合适的理想解作为决策的最终解。



图 2 Pareto front 的示意图 Fig. 2 Diagram of Pareto front

在本文中,优化的目标函数有 2 个,如式 (9)~(10)所示:

$$Y_{1} = \sum_{i=1}^{n} \left| y_{1} - y_{1}^{m} \right|$$
(9)

$$Y_2 = \sum_{i=1}^{n} \left| y - y^m \right|$$
 (10)

式中: Y₁和 Y₂为种群个体的适应度函数; y₁和 y 分别为中间点温度和过热器出口温度实际值; y₁^m 和 y^m为个体模型在于实际激励下的输出中间点温 度和过热器出口温度; n 为采样的长度。本文中数 据采集于该电厂的实际运行数据,实际减温水调节 阀开度的激励变化和中间点温度、过热器出口温度 的测量值见图 3 所示。从图 3 中可知阀门激励是一 个阶跃变化的过程,具有实际的工程意义。



图 5 头阶网门开度和温度的头阶数据值 Fig. 3 Actual data values of valve opening and temperature

在选定适应度函数后,对多目标遗传算法进行参数设置:种群大小为 200,进化的代数为 50。根据不同的 *n*₁、*n*₂的值,对适应度函数 *Y*₁和 *Y*₂进行优化,可以得到不同 *n*₁、*n*₂值的 Pareto front,相关结果见图 4 所示。

从图 4 可知, 在选择不同 n_1 和 n_2 值后通过多 目标遗传算法优化得到的 Pareto front 是不相同的。 从式(8)~(9)中可知, Y_1 优化的结果主要取决于 n_1 , Y_2 优化的结果主要取决于 n_2 。具体的讲, 在 $n_1=2$ 时, Pareto front 中 Y_1 能够达到的最优解在 490 附 近; 对应的在 $n_1=3$ 时, Pareto front 中 Y_1 能够达到 的最优解在 470 左右。在 n_1 固定不变时, 随着 n_2 的增大 Pareto front 中 Y_2 能够达到的最优解也在不 断的变小。

http://www.china-simulation.com



图 4 n_1 和 n_2 取不同值时的 Pareto front Fig. 4 Pareto fronts with different n_1 and n_2

通过上面的分析可知,在*n*₁和*n*₂的值变大时, 优化得到的 Pareto front 会往前推进,即*n*₁和*n*₂的 值在合理范围内变大能够更好的逼近实际的机组 模型,能够更好的反应机组的动态特性。然而随着

http://www.china-simulation.com

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss9/27 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709027 第 29 卷第 9 期 2017 年 9 月

系统阶次的升高,对系统设计控制器的成本和复杂 度也会随之增加^[9]。在实际的建模过程中,需要综 合考虑建模精度与工程实际应用中的需求。在本文 中,我们选择 n₁=3 和 n₂=5 作为串级系统导前区模 型和惰性区模型的阶次。

在确定阶次 $n_1=3$ 和 $n_2=5$ 的情况下,采用 LD 进行决策^[10]。其中 Y 坐标采用|| $J(\theta)$ ||₂ 作为衡量标 准,可以得到图 5 所示的结果,能够看出目标函数 Y_1 和 Y_2 具有相反的趋势,即 Y_1 减小时会伴随着 Y_2 增 大。将得到的 Pareto front 对应下的四个参数的集 合采用相同方法进行可视化,如图 6 所示。从图中 可以看出 K_1 和 T_2 、 K_2 和 T_1 随着决策点变化时具有 相同的变化趋势,选择|| $J(\theta)$ ||₂=0.94 时的动态参数, 如图 5 和图 6 中的紫色五角星所示。此时决策最优 解下的动态参数分别为 $K_1=1.76$ 、 $T_1=15.28$ 、 $K_2=1.43$ 和 $T_2=41.32$ 。



Fig.5 Pareto set based on $||J(\theta)||_2$ with fixed order

在选定参数情况下,将图 3 中阀门开度作为 激励信号,建立的动态模型与机组实际输出的数 据对比,见图 7 所示;为了进一步的说明建模的 精确度,分析实际输出的温度与建立模型在相同 激励下的温度输出的相对偏差,如图 8 所示。可 知y₁和y的相对偏差量分别在±0.3%和±0.15%内, 可知建立的模型能与机组实际运行的数据比较好 的拟合,具有很高的精确度,为后面关于过热汽 温系统进行进一步的仿真和优化控制提出了一个 可靠的模型。







第 29 卷第 9 期	系统仿真学报	Vol. 29 No. 9
2017年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2017

3 结论

本文通过基于机理建立的模型基础上,采用高 阶惯性环节对机理模型进行逼近。通过借助多目标 遗传算法在不同导前区模型和惰性区模型的阶次 下对动态模型参数进行优化,仿真对比发现:阶次 在合理的范围内,阶次越高会提高动态参数的准确 度。综合工程应用和实际仿真结果,建立同达热电 厂#2 机组的二级减温水模型,并通过实际数据和 模型数据的对比和分析相对偏差量说明了模型的 可靠性。在接下来的工作中,根据建立的模型进行 控制结构的优化设计和仿真等工作,并将优化后控 制逻辑投入实际回路中进行应用。

参考文献:

- 刘吉臻,曾德良,田亮,等.新能源电力消纳与燃煤 电厂弹性运行控制策略 [J].中国电机工程学报,2015, 35(21): 5385-5394. (Liu Jizhen, Zeng Deliang, Tian Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.)
- [2] 王传峰,李东海,姜学智,等.基于概率鲁棒性的锅 炉过热汽温串级 PID 控制器 [J]. 清华大学学报(自然 科学版), 2009, 49(2): 249-252. (Wang Chuanfeng, Li Donghai, Jiang Xuezhi, et al. Cascade PID controllers for superheated steam boiler temperatures based on probabilistic robustness [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(2): 249-252.
- [3] Wu Z, Li D, Wang L. Control of the Superheated Steam Temperature: A Comparison Study Between PID and Fractional Order PID Controller [C]// Control

Conference (CCC), 2016 35th Chinese. USA: IEEE, 2016: 10521-10526.

- [4] 范永胜, 徐治皋. 基于动态特性机理分析的锅炉过热 汽温自适应模糊控制系统研究 [J]. 中国电机工程学 报, 1997, 17(1): 23-28. (Fan Yongsheng, Xu Zhigao. Study of Adaptive Fuzzy Control of Boiler Superheated Steam Temperature Based on Dynamic Mechanism Analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 23-28.)
- [5] Wen X, Jian S. Modeling of Main Steam Parameters in Large Thermal Power Plant [C]// MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. Paris, France: Atlantis Press, 2016, 77: 02011.
- [6] Wang D, Yuan S. Identification of LPV Model for Superheated Steam Temperature System Using A-QPSO
 [J]. Simulation Modelling Practice and Theory (S1569-190X), 2016, 69(1): 1-13.
- Jiao S, He L, Wang Z, et al. Main Steam Temperature System Modeling Based on PCA and Neural Networks
 [C]// Computational Intelligence and Design, 2008.
 ISCID'08, International Symposium on. USA: IEEE, 2008, 1: 303-308.
- [8] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2002, 6(2): 182-197.
- [9] Liu X, Li D, Jiang X, et al. Simulation Study of Auto-disturbance-rejection Controller for High-order Systems [J]. Journal-Tsinghua University (S1007-0214), 2001, 41(6): 95-99.
- [10] Blasco X, Herrero J, Sanchis J, et al. A New Graphical Visualization of N-dimensional Pareto Front for Decision-making in Multi-objective Optimization [J]. Information Science (S0020-0255), 2008, 178(20): 3908-3924.

http://www.china-simulation.com

• 2086 •