

一种协调控制系统参数的鲁棒整定方法

田 亮, 刘鑫屏, 于希宁, 刘吉臻
(华北电力大学自动化系, 河北保定 071003)

摘 要: 对某 330 MW 机组简化非线性动态模型进行线性化后, 利用环路成形 H_∞ 方法设计鲁棒控制器。通过遗传算法寻优发现, 性能指标较好的鲁棒控制器分布在一特定空间内, 将鲁棒控制器分解为控制阵和解耦阵, 发现其解耦的原则是: 在汽轮机调门扰动时要尽快补充锅炉燃料量并保证机前压力不发生超调。按此原则设计简单的单向解耦, 并采用工程方法整定 PID 控制器, 其传递函数同鲁棒控制器低阶项极为相似。仿真实验证明, 按此方法设计的协调控制系统具有较好的动态特性和鲁棒性。

关 键 词: 协调控制; 鲁棒性; PID 控制; 参数整定

中图分类号: TP273 文献标识码: A

1 引 言

目前多数大型火电机组都参与电网调峰, 机组负荷波动频繁。良好的协调控制系统能够保证机组变负荷下运行的稳定性与经济性。目前协调控制系统基本都采用 PID 控制, 包括以机跟炉、炉跟机为基础的协调、DEB 和 IEB 等。在固定的负荷-压力工作点下, 这些系统具有较好的稳定性和动态性能, 但在工作点或对象参数发生较大变化时很难保证系统动态性能指标。先进控制方法如模糊多模型控制、多变量预测控制、多变量内模控制和鲁棒控制等虽有很好的特性, 但难以获得实际应用, 一个重要的原因就是控制器参数通过模型推导得到, 缺乏具有工程意义的参数整定方法。将先进控制算法得到的控制器简化为 PID 控制器, 寻找具有工程物理意义的参数整定方法, 是目前研究的热点^[1~3]。

2 对象模型

2.1 模型描述

火电机组是一个复杂的多变量、非线性对象。

在机组控制系统设计中, 一般将耦合强烈的负荷-压力对象进行协调控制。内蒙古达旗电厂 3 号机组, 锅炉为北京 B&W 公司的 B&WB-1025/18.44-M 亚临界一次中间再热单汽包自然循环煤粉炉; 汽轮机为北重-阿尔斯通公司的 T2A-330-30-2F-1080 亚临界一次再热三缸双排汽凝汽式汽轮机。通过机理与实验分析, 得到机组在 55%~100% 负荷范围内滑压运行工况下对象模型为^[3]:

$$r'_m = u_B(t-18) \quad (1)$$

$$120 \frac{dr_B}{dt} = -r_B + r'_m \quad (2)$$

$$3\,266 \frac{dp_b}{dt} = -0.250\,1p_i u_T + 6.77r_B \quad (3)$$

$$12 \frac{dN_E}{dt} = -N_E + 0.250\,1p_i u_T \quad (4)$$

$$p_i = p_b - 0.000\,455(6.77r_B)^{1.3} \quad (5)$$

模型参数包括: 输入燃料指令 u_B (%), 汽轮机调门开度 u_T (%); 输出机前压力 p_i (MPa), 机组负荷 N_E (MW); 中间参数 r'_m 磨煤机内存煤量 (%), r_B 锅炉燃烧率 (%), p_b 为汽包压力 (MPa)。

2.2 模型线性化

模型工作点线性化后可描述为:

$$\begin{bmatrix} P_T \\ N_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{PB}(s) & W_{PT}(s) \\ W_{NB}(s) & W_{NT}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_B \\ u_T \end{bmatrix} \quad (6)$$

在 100% 负荷工作点 (负荷 330 MW; 压力 18.6 MPa; 燃料指令 48.744%; 调门开度 70.939%), 线性化模型为:

$$W_{PB}(s) = \frac{0.382(1-13s)}{(1+120s)(1+184s)} e^{-18s}$$

$$W_{NB}(s) = \frac{6.77(1-13s)}{(1+120s)(1+184s)(1+12s)} e^{-18s}$$

$$W_{PT}(s) = -\frac{0.262}{1+184s}$$

收稿日期: 2005-06-06; 修订日期: 2005-09-13

基金项目: 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室、华北电力大学青年教师科研基金资助项目(20041110)

作者简介: 田 亮(1976-), 男, 内蒙古磴口人, 华北电力大学讲师。

$$W_{NT}(s) = \frac{856s}{(1+120s)(1+12s)}$$

模型在 55% 负荷工作点 (负荷 180 MW; 压力 12.8 MPa; 燃料指令 26.588%; 调门开度 56.228%), 线性化模型为:

$$W_{PB}(s) = \frac{0.481(1-10s)}{(1+120s)(1+232s)} e^{-18s}$$

$$W_{NB}(s) = \frac{6.77(1-10s)}{(1+120s)(1+232s)(1+12s)} e^{-18s}$$

$$W_{PT}(s) = -\frac{0.228}{1+232s}$$

$$W_{NT}(s) = \frac{745s}{(1+232s)(1+12s)}$$

机炉协调控制器设计困难在于: 制粉动态的存在造成两个控制输入对输出的影响不对称。\$u_T\$ 对 \$p_i\$ 和 \$N_E\$ 的调节都比较快, 而 \$u_B\$ 对 \$p_i\$ 和 \$N_E\$ 的调节都很慢。这样, 无论是以机跟炉还是炉跟机方式为基础的协调, 总会出现一个控制作用较快的机侧回路和一个较慢的炉侧回路。两个回路之间存在强耦合, 比较容易实现的解耦在机侧回路。例如, 在炉跟机方式下, 很容易实现 \$u_B\$ 对 \$N_E\$ 的解耦, 但其发挥的作用是十分有限的, 因为机侧回路本身是一个快速回路, 抗干扰能力已经较强。具有真正意义的解耦在炉侧回路, 但由于炉侧回路包含纯迟延、大惯性和非最小相位环节, 无法实现完全解耦, 即使是部分解耦, 也需要采用大的微分作用以抵消制粉惯性, 这对系统的抗干扰是不利的。

3 鲁棒控制器设计

目前鲁棒控制器多采用环路成形 \$H_\infty\$ 方法, 其设计过程一般是: 由设计者提出期望的环路形状 (忽略闭环稳定性), 对成形后的对象采用标准 LCF 鲁棒稳定方法进行综合, 获得控制器^[4]。

3.1 环路成形

针对开环对象 \$G\$, 选择合适的预补偿器 \$W_1\$ 和后补偿器 \$W_2\$, 使成形后的对象 \$G = W_2 G W_1\$ 的奇异值满足一定分布。一般只选择预补偿器 \$W_1\$, 后补偿器 \$W_2\$ 为单位阵。

3.2 鲁棒稳定设计

针对成形后对象 \$G\$, 进行如下 \$H_\infty\$ 综合:

$$\epsilon_{\max}^{-1} = \inf_k \left\| \left[\begin{array}{cc} (I + GK_\infty)^{-1} & (I + GK_\infty)^{-1} G \\ K_\infty (I + GK_\infty)^{-1} & K_\infty (I + GK_\infty)^{-1} G \end{array} \right] \right\|_\infty \quad (7)$$

满足 \$\epsilon_{\max} \in (0.3, 0.5)\$, 此方法保证在对象 \$G\$ 的奇异值变化不大的情况下系统闭环后的频域指标。

3.3 鲁棒控制器形式

$$K = W_1 K_\infty W_2 \quad (8)$$

由于预补偿器 \$W_1\$ 和 \$\epsilon_{\max}\$ 的选择带有一定随机性, 导致同一对象可能设计出不同的鲁棒控制器。为了比较不同的鲁棒控制器之间的差别, 采用了遗传算法寻优的方法, 即先规定基本的系统闭环性能指标, 设计一鲁棒控制器样本, 然后按照一定的变异规则去改变预补偿器 \$W_1\$ 和 \$\epsilon_{\max}\$, 验证得到控制器是否满足性能指标, 满足的予以保留, 不满足的剔除。经过一定的循环后得到第一代样本, 然后提高性能指标, 按照以上的遗传变异规则, 使第一代样本进化为第二代, 如此类推, 直到获得满意结果。经过多次仿真发现, 鲁棒控制器收敛到一个确定的范围内, 控制器的欧氏距离小于一定值。

4 鲁棒控制器工程分析

4.1 控制器分解

控制器具有如下形式:

$$\begin{bmatrix} u_B \\ u_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & C_{12}(s) \\ C_{21}(s) & C_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_i \\ \Delta N_E \end{bmatrix} \quad (9)$$

传递函数阵可以变形为:

$$C = C_2 \circ C_1 = \begin{bmatrix} 1 & C_{22}(s)^{-1} C_{12}(s) \\ C_{11}(s)^{-1} C_{21}(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11}(s) & 0 \\ 0 & C_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以认为: \$C_1\$ 是控制阵, 包含炉侧控制器 \$C_{11}(s)\$ 和机侧控制器 \$C_{22}(s)\$; \$C_2\$ 是为解耦阵, 包括炉对机解耦传递函数 \$C_{11}(s)^{-1} C_{21}(s)\$ 和机对炉解耦传递函数 \$C_{22}(s)^{-1} C_{12}(s)\$。

4.2 解耦特性分析

首先分析鲁棒控制器的解耦特性。将 \$C_2\$ 与对象模型结合, 在开环状态下分别在炉侧和机侧控制器后加入阶跃扰动, 其解耦特性如图 1 所示。

对协调控制系统而言, 影响最大的是机对炉耦合 (在本系统中为调门指令对机前压力), 而炉对机耦合 (在本系统中为燃料指令对机组负荷) 的影响较小。由图可以看出, 鲁棒控制器实现了机对炉的单向解耦, 而炉对机的耦合没有进行过多处理, 这样可以将 \$C_2\$ 简化为:

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & C_{22}(s)^{-1} C_{12}(s) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

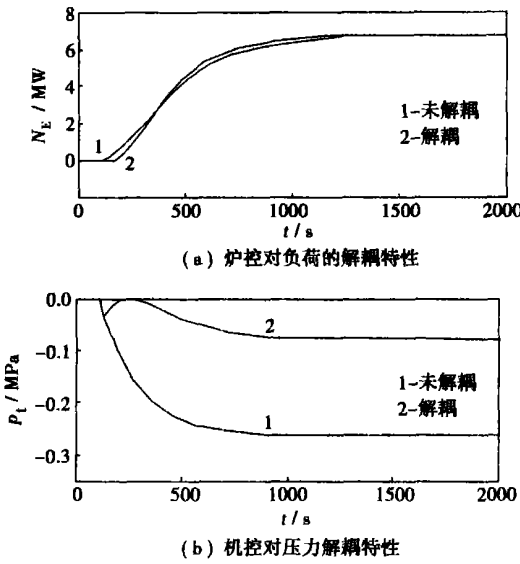


图 1 鲁棒控制器解耦特性

由于对象线性化模型存在纯延迟和非最小相位环节, 机对炉的完全解耦是不可能实现的, 一种简单解耦的传递函数为: $C_{TB}(s) = \frac{U_B}{U_T} (1 + K_f s)$, 其中 K_f 为制粉惯性时间。在机侧扰动下, 采用 $C_{TB}(s)$ 与鲁棒控制解耦传递函数 $C_{22}(s)^{-1} C_{12}(s)$ 的压力响应曲线对比如图 2(a) 所示。

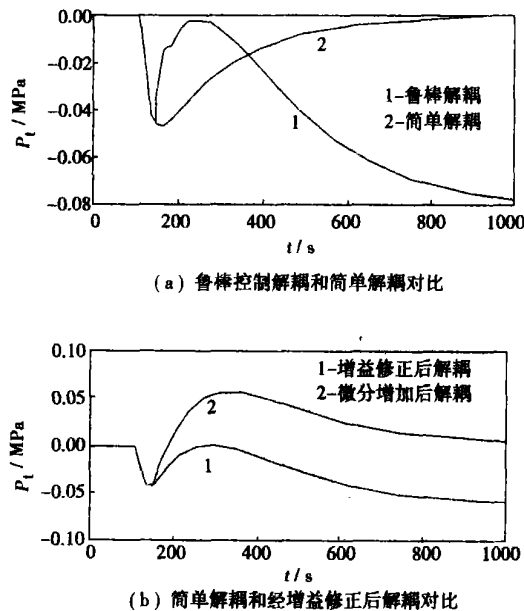


图 2 不同解耦方式机前压力响应曲线

当 u_T 增加时, 锅炉释放蓄热导致 p_t 下降, 机对炉的解耦作用在于: u_T 扰动通过解耦通道迅速增加

燃料量, 锅炉增加蒸发量以维持 p_t 。由于锅炉惯性和延迟比较大, 在 u_T 增加的初期, p_t 不可避免地迅速降低, 而其降低的程度则取决于燃料量补充速度。所以, 解耦通道关键在于能够在 u_T 扰动的初期迅速改变燃料量; 而在扰动的后期, 由于 p_t 变化较慢, 在 PID 控制器的控制作用下可以维持其稳定。

由图 2(a) 可见, 扰动初期响应, 鲁棒控制解耦比简单解耦响应略微快一点, 但在变负荷过程中, 减小 p_t 波动的幅度是十分明显的。为了提高解耦效果, 需要增加 $C_{TB}(s)$ 的微分作用, 图 2(b) 曲线 2 为将 $C_{TB}(s)$ 微分作用增加后机前压力响应曲线, 存在过调现象, 解耦通道的过调对 p_t 的控制是不利的。为了减小过调, 并且保持扰动初期燃料的响应速度, 可以减小解耦传递函数 $C_{TB}(s)$ 的增益。 $C_{TB}(s)$ 增益应该使 p_t 刚好不产生过调。图 2(b) 中曲线 1 为对 $C_{TB}(s)$ 进行增益修正后 p_t 响应曲线, 与鲁棒控制的响应曲线(图 2(a) 中曲线 1) 十分相似。由于鲁棒控制具有高阶动态环节, 简单解耦的响应速度要比鲁棒控制的慢。虽然经过增益修正后, $C_{TB}(s)$ 无法实现静态解耦, 但可以由炉侧调节器来弥补。

4.3 控制器简化

可以采用工程上的方法对解耦后系统机侧、炉侧控制器参数进行整定。仿真采用了自动寻优方法得到理想的 PID 参数。与鲁棒控制器参数低阶项对比如表 1 所示, 两者十分接近。

表 1 PID 控制器与鲁棒控制器参数对比

	PID 控制器参数	PID 控制器等价传递函数	鲁棒控制器低阶对应项
炉侧	$K_P=12, K_I=0.04,$ $K_D=900$	$\frac{900s^2+12s+0.04}{s(8s+1)}$	$\frac{1375s^2+18.71s+0.0497}{s(7.582s+1)}$
机侧	$K_P=3, K_I=0.06,$ $K_D=0$	$\frac{3s+0.06}{s}$	$\frac{4.151s+0.06265}{s}$

5 仿真实验

采用以上方法设计协调控制系统并整定 PID 参数, 在 55% 和 100% 负荷—压力工作点进行仿真, 负荷升降速率设定为 1 MW/min, 压力及负荷响应曲线如图 3 所示。可以看出, 机组负荷快速跟随负荷指令变化, 压力波动小于 0.25 MPa。

不同工作点对比实验中, 没有改变控制器参数。在工程中, 可以利用一些机组运行参数对控制器进行修正。例如, 借鉴 DEB400 的增益调度方式对炉侧控制器增益进行修正^[9], 可以获得更好的控制效果。

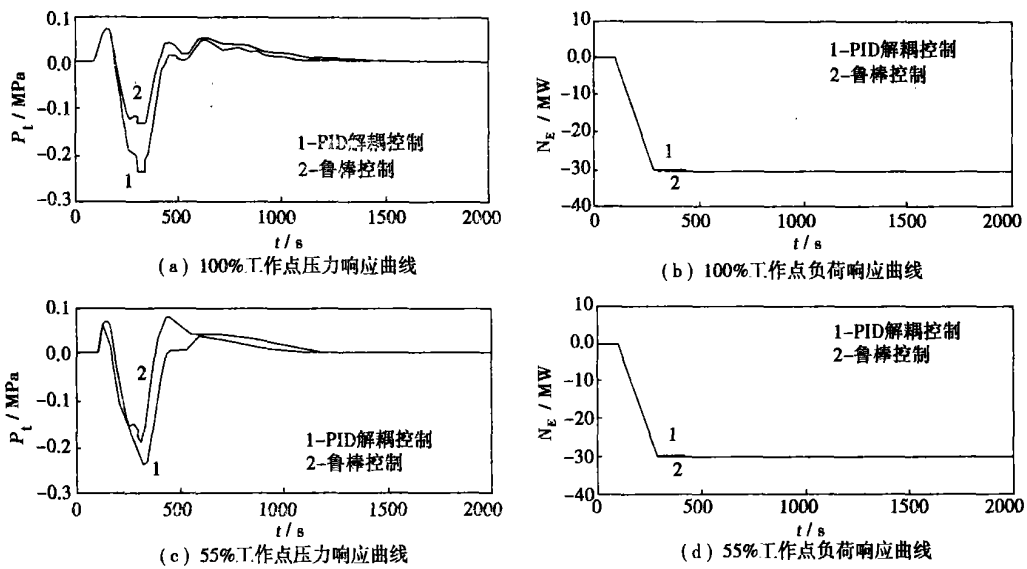


图 3 负荷扰动仿真实验

6 结束语

本文研究了某 330 MW 机组非线性模型, 并求取了其工作点线性化传递函数, 然后在其 100% 负荷—压力工作点设计了鲁棒控制器。通过对鲁棒控制器进行简化, 发现其解耦原则接近机对炉的单向解耦, 据此原则简单的单向解耦 PID 控制器, 并用工程方法整定参数, 得到最优的 PID 控制器同鲁棒控制器降阶后两者传递函数非常近似。通过仿真实验比较不同工作点下负荷扰动的响应曲线, 证明了采用此方法得到的 PID 控制器是鲁棒的。这样的协调控制系统设计方法和参数整定方法具有物理意义明

确, 便于工程实用的优点, 类似的协调控制系统已经在日本 Chita 电站 700 MW 机组中获得应用。

参考文献:

- [1] 吴国垣, 李东海, 薛亚丽. 机炉协调控制的分散 PID 整定[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 262—265.
- [2] 于达仁, 翁一武, 王仲奇. 火电单元机组的柔性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 129—133.
- [3] 田 亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的 330 MW 机组非线性动态模型. 中国电机工程学报, 2004 24(8): 180—184
- [4] TANWEN. Robust control for an non linear boiler-turbine system[J]. *Control Theory And Applications* 1999(6): 863—867.
- [5] 于达仁, 徐志强, 翁一武, 等. DEB 的新认识—增益调度控制[J]. 热能动力工程, 1999 14(5): 379—381.

(辉 编辑)

(上接第 83 页)

设定值响应和干扰响应, 区别于传统整定方法的单一目标优化, 显示了方法的灵活性。(4)当协调控制系统采用其它控制结构时, 只需重新定义目标函数和扰动方式, 本文的方法仍可适用, 显示了方法的通用性。

参考文献:

- [1] 宋春平. 自适应预估控制研究及其在火电机组中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [2] 王东风, 韩 璞, 曾德良. 单元机组协调控制系统发展和现状[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 69—73.
- [3] 黄焕袍, 武利强, 韩京清, 等. 火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2004 24(10): 168—173.

- [4] 吴国垣, 李东海, 薛亚丽, 等. 机炉协调控制的分散 PID 整定[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(2): 262—265.
- [5] VLACHOS C, WILLIAMS D, GOMM J B. Genetic approach to decentralized PI controller tuning for multivariable processes[J]. *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 1999, 1: 58—64.
- [6] HOUCK G, JOINES J, KAY M. A genetic algorithm for function optimization: a matlab implementation[R]. U.S.A: North Carolina State University, 1995.
- [7] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 协调控制系统多变量 PID 控制器的自整定方法[J]. 自动化仪表, 2003, 24(6): 10—15.
- [8] LIU H B, LI S Y, CHAI T Y. Intelligent decoupling control of power plant main steam pressure and power output[J]. *Electrical Power and Energy Systems* 2003, 25: 809—819.

(辉 编辑)

A study has been conducted for a 60 kW PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) distributed power generation system, which provides electricity and heat energy for architectural buildings. A power generation system model was established based on the dynamic flow of masses and an electrochemical reaction process. To meet the requirements of the system for power generation efficiency and stable operation and to take into account the specific features of multi-parameter nonlinear and firm dynamic coupling, during the control design of the system, one will no longer focus on a specific parameter, but pay close attention to the coordinated operation of the system as a whole. Through the simulation of the typical power demand of fifteen families in a day a dynamic simulation test was performed of the system. The results of the test indicate that the proposed control scheme for the system is feasible and an optimal search of the working points enables the system to response adequately to a real-time loading. Moreover, single neuron-element PI decoupling controllers can at all times ensure a stable operation of the system under ideal pressures and humidity conditions. All the above can serve as a guide for the further design optimization of the system as well as for its development and applications. **Key words:** proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), distributed power generation, dynamic simulation, coordinated control, single neuron PI decoupling control, optimal search

基于遗传算法的机炉协调系统 PID 控制器优化 = **Optimization of PID Controllers of a Boiler-turbine Coordinated Control System Based on a Genetic Algorithm** [刊, 汉] /XUE Ya-li, LI Dong-hai, LU Chong-de (Key Laboratory on Electric System and Power Generation Equipment Control and Simulation Affiliated to the Thermal Energy Engineering Department under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 80 ~ 83, 87

The design of an effective boiler-turbine coordinated control system is of major significance for enhancing the thermotechnical automation level of power plants. With respect to the boiler-turbine control system of a thermal power plant the authors have proposed a parameter optimization method for a genetic algorithm-based multivariable PID controller. By utilizing the general-use framework provided by a genetic algorithm a global optimization of the control parameters was conducted under a specified control system structure and controller format. The proposed method features a global-parallel optimization and is target-function oriented. A simulation study carried out by comparing with a generalized ZN setting method has shown that the dynamic performance of the coordinated control system after optimization has been markedly improved. Moreover, it can be easily extended to parameter optimization under other control schemes, displaying the feasibility and usability of the method under discussion. **Key words:** genetic algorithm, PID controller, boiler-turbine coordinated control

一种协调控制系统参数的鲁棒整定方法 = **A Robust Tuning Method for the Parameters of a Coordinated Control System** [刊, 汉] /TIAN Liang, LIU Xin-ping, YU Xi-rong, et al (Automation Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 84 ~ 87

After the linearization of a simplified nonlinear dynamic model for a 330 MW unit a robust controller was designed by utilizing a loop-shaping H_∞ method. Through a search optimization by using a genetic algorithm it has been found that robust controllers with better performance indexes are distributed within a specific space. The robust controller was decomposed into a control matrix and decoupling matrix. The principle of its decoupling was found to be as follows: in case of disturbances occurring at the governing valve of a steam turbine it is necessary to supply additional fuel to the boiler as rapidly as possible and avoid overshoot of the throttle pressure ahead of the turbine. In compliance with this principle a simple single-direction decoupling is designed and the PID controller is tuned using a relevant engineering method. The transfer function of the PID controller is very similar to that of the low-order item of a robust controller. Simulation experiments have demonstrated that the coordinated control system designed by using the above method possesses relatively good dynamic characteristics and robustness. **Key words:** coordinated control system, robustness, PID control, parameter tuning

基于模糊理论的黑体炉系统故障诊断的设计及实现 = **Design and Realization of Fault Diagnosis for a Black-**