

文章编号:1671-6833(2008)02-0065-04

基于 SPEA2 的主蒸汽压力鲁棒控制器设计

王 杰, 王 栓, 王志鹏, 刘 涛, 陈敬建

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对锅炉燃烧工况变化较大, 主汽压对象模型具有不确定性, 常规控制方法很难得到预期的控制效果. 为提高控制品质, 采用 H_∞ 混合灵敏度方法为主蒸汽压力设计鲁棒控制器, 设计中利用 SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) 优化加权阵参数, 找到同时满足频域和时域性能要求的控制器.

仿真结果表明, 设计的主蒸汽控制系统具有良好的鲁棒稳定性和动态品质, 并且避免了传统的试凑.

关键词: 主汽压; H_∞ 鲁棒控制; SPEA2; 加权阵

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

0 引言

锅炉燃烧过程是利用燃料产生的热量生产蒸汽, 再用蒸汽驱动汽轮机做功. 主蒸汽压力是衡量蒸汽产量与外界负荷是否相适应的重要标志^[1], 它受到的主要扰动来源于燃料量扰动(内扰)和汽轮机耗汽量的扰动(外扰), 其调节品质和稳定效果可影响到整个机组的安全经济运行. 由于机组容量的增大, 各部分相互联系密切, 被控对象模型具有不确定性, 常规的控制方法不能有效改善系统控制品质. H_∞ 混合灵敏度设计作为一种鲁棒性设计方法, 它能弥补现代控制理论对数学模型的过分依赖, 在设计过程中考虑了对象模型的不确定性, 兼顾了系统的瞬态性能、抗干扰能力及鲁棒性. 另外, H_∞ 混合灵敏度控制是在频域中通过选择加权阵进行系统设计的, 物理含义明确, 并且与工程技术人员熟悉的经典频域设计方法相似, 因而愈来愈受到广大设计人员的重视和青睐. 然而, H_∞ 设计成功与否取决于反映系统稳定性和性能要求的加权阵的选取^[2]. 不同的对象、不同的设计指标需要不同的加权函数, 它们之间有

一定的普遍适用原则, 但相互之间并没有特定的规律可循, 更多的是依赖于设计者的经验. 文献[3]把各设计目标转化成不等式约束, 将 H_∞ 混合灵敏度加权函数的选取表示为一个多目标优化问题, 这样便可以用进化算法求解. 针对多目标问题的进化算法目标是寻找一组非支配的解即 pareto 最优解^[4]. SPEA 是由 Zitzler 和 Thiele 提出的^[5], 由于其使用了适应度分配策略和基于 pareto 支配的概念, 以及体现小生境的思想但不用设计小生境参数, 可以更好地维持种群的多样性^[6]. 笔者利用 SPEA2^[7] (即改进的 SPEA 算法) 来优化加权阵参数, 找到同时满足频域和时域性能要求的 H_∞ 控制器, 使得主蒸汽控制系统同时满足鲁棒稳定性和动态品质要求.

1 锅炉主汽压力控制系统

以某火电厂风扇磨直吹锅炉为例. 控制系统组成如图 1 所示.

汽压调整过程为: 系统受到内扰或外扰后, 汽压偏离给定值, 此时控制器调节给煤机的控制电流 I_c , 相应风扇磨的进煤量 M 改变, 风扇磨输出

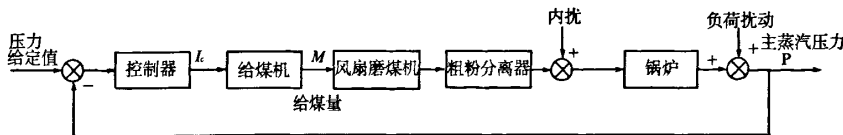


图 1 锅炉主蒸汽控制系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of the main steam pressure control system

收稿日期:2008-03-14; 修订日期:2008-05-11

基金项目:河南省教育厅自然科学基金(2007520048)

作者简介:王 杰(1959-), 男, 郑州大学教授, 博士生导师. 研究方向为智能控制与智能计算, 信息与计算机网络安全.

的煤粉量也相应发生变化,经粗粉分离器后,细度合格的煤粉由喷燃器送入炉膛燃烧,从而使主汽压力得到校正。

锅炉主汽压力是一个影响机组安全、经济运行的重要参数,然而由于被控对象模型参数是时变的,而且随着运行工况的变化而变化,所以常规 PID 控制很难获得良好的调节效果,为此,笔者采用鲁棒控制方法加以解决。

为采用鲁棒控制方法,首先经过辨识试验及优化拟合计算,获得了主汽压广义受控对象的数学模型:

$$G(s) = \frac{P_s(s)}{u(s)} = \frac{1.5}{(80s+1)^3} \quad (1)$$

式中: P_s 为过热器出口汽压(简称主汽压), MPa; u 为控制信号,即给煤机的控制电流 I_c , mA; DC 广义受控对象包括给煤机、风扇磨煤机、粗粉分离器及锅炉本体的热量/汽压转换过程等。在这个数学模型的基础上,进一步将控制系统设计为标准鲁棒控制问题。

2 主蒸汽压力控制系统 H_∞ 混合灵敏度设计

考虑如图 2 所示的主蒸汽压力控制问题。其中: r 为参考输入; e 为跟踪误差; u 为控制输入; d 为测量干扰; y 为系统输出; $G(s)$ 为被控对象主汽压的数学模型; $K(s)$ 为待求的控制器。

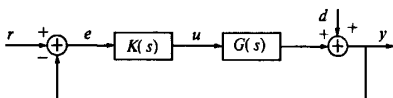


图 2 主蒸汽压力控制问题

Fig. 2 Main steam pressure control problem

从 r 到 e , u 和 y 的闭环传递函数分别为:

$$S = (I + G(s)K(s))^{-1} \quad (\text{称为灵敏度函数})$$

$$R = K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} = K(s)S,$$

$$T = G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} = I - S$$

(称为补灵敏度函数)

用 $W_s(s)$ 、 $W_R(s)$ 和 $W_T(s)$ 分别对信号 e 、 u 和 y 进行加权构成增广系统,并可将其转化成标准 H_∞ 混合灵敏度设计问题。3 个加权阵一经确定,就可采用基于 Riccati 方程的方法求解 H_∞ 控制问题。

由于加权阵反映了所要求的时、频域性能,因而若把加权阵当作设计参数,则 H_∞ 控制器的设计可表示为满足一组不等式约束的最小化问题。

给定标称被控对象 $G(s)$, 寻找 $W_s(s)$ 、 $W_R(s)$ 和 $W_T(s)$, 使得

$$\min \Psi(W_s, W_R, W_T) \quad (2)$$

且满足:

$$\bar{\sigma}[w_s^{-1}(j\omega)] + \bar{\sigma}[W_{T-1}(j\omega)] \geq 1 \quad (3)$$

$$\gamma_0(W_R, W_s, W_T) \leq \varepsilon_0 \quad (4)$$

$$\Phi(W_R, W_s, W_T) \leq \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: Ψ 为要求最小化的性能指标; γ_0 表示广义系统闭环传递函数的最优 H_∞ 范数; Φ_i 为性能指标函数,是一组反映上升时间、超调量及带宽等要求的不等式约束; ε_0 和 ε_i 均为实数,分别表示 γ_0 和 Φ_i 的期望界; n 为性能指标约束的个数。上述约束优化问题一般是一个非凸的、非光滑的及各目标函数相互冲突的多目标问题,进化计算适合于解决此类问题。

3 SPEA2 算法描述

在 SPEA2 算法中,它克服了 SPEA 算法的弱点,在适应度分配策略,个体分布性的评估方法以及非支配集的调整 3 个方面对 SPEA 做了改进。SPEA2 算法使用的是细粒度赋值策略,它组合进了密度信息。在这个算法中,每一个解,不论它是 Pareto 大于还是 Pareto 小于其它解,表示这个解的个体总是被考虑进来。由于 SPEA2 具有前述的诸多优点,故笔者采用该算法来求解上述优化问题。

SPEA2 优化参数的步骤为:

(1) 选取 SPEA2 的控制参数,如进化群体 P 的规模 N 、存档集 Q 的大小 M ,进化代数 T 等。

(2) 产生初始群体 P_0 ,同时使存档集 Q_0 为空,进化代数 $T=0$ 。

(3) 适应度分配:计算 P_t 和 Q_t 所有个体的适应度。

(4) 环境选择:将 P_t 和 Q_t 中所有非支配个体保存到 Q_{t+1} 中。若 Q_{t+1} 的规模超过 M ,则利用修剪过程(Archive Truncation Procedure)降低其规模;若 Q_{t+1} 的规模比 M 小,则从 P_t 和 Q_t 中选取支配个体填满 Q_{t+1} 。

(5) 若 $t \geq T$,则将 Q_{t+1} 中所有非支配个体作为返回结果,保存到 NDS_{Set} 中;否则,进入下一步。

(6) 对 Q_{t+1} 执行锦标赛选择。

(7) 对 Q_{t+1} 执行交叉变异操作,并将结果保存到 $Q_{t+1}, t=t+1$,返回(5)。

为采用优化算法,需对加权阵参数编码,编码策略为:根据系统的鲁棒性和性能要求,确定 3 个加权阵的结构,然后采用二进制编码方法对 3 个加权阵中所有元素的参数进行编码,并把它们串接在一起构成一个染色体或个体。每个个体一旦给定,就确定了 3 个加权阵。

4 控制系统设计

有了上述基础,则主蒸汽压力鲁棒控制系统设计步骤为:

(1) 给定标称对象 $G(s)$, 确定函数 Ψ 和 Φ_i ; 并按鲁棒性和性能指标要求给定 ε_0 和 ε_i .

(2) 确定3个加权阵 $W_s(s)$ 、 $W_R(s)$ 和 $W_T(s)$ 的结构形式, 确定参数的搜索空间.

(3) 对参数进行编码, 构成个体.

(4) 用上述 SPEA2 算法进行优化.

(5) 优化完毕, 对输出的个体进行解码, 这样便对应出来3个加权函数阵.

(6) 将加权函数阵运用于控制系统中, 用“2-Riccati”方法求出控制器.

5 仿真

考虑上述的主蒸汽压力控制对象, 控制目标是保证闭环系统具有尽可能快的响应速度. 同时满足: ①增益裕量 $G_m \geq 8$, ②相位裕量 $P_m \geq 75$. 进而采用上述方法优化加权阵的选取并设计该对象的 H_∞ 控制器.

5.1 加权阵的确定及参数的编码

根据系统的鲁棒性和性能要求, 3个加权阵的结构如下:

$$W_s(s) = \frac{k_1}{\frac{1}{\omega_1}s + 1}$$

$$W_T(s) = k_3 s \left(\frac{1}{\omega_2}s + 1 \right),$$

$$W_R(s) = k_2.$$

当3个加权函数结构给定时, 如下参数集便可以确定3个加权阵:

$$H = \{k_1, \omega_1, k_2, k_3, \omega_2\}.$$

设定参数搜索域为: $k_1 \in R_1 = [100, 1\ 000]$, $\omega_1 \in R_2 = [0.000\ 01, 0.01]$, $k_2 \in R_3 = [0.000\ 1, 10]$, $k_3 \in R_4 = [0.1, 10]$, $\omega_2 \in R_5 = [100, 1\ 000]$, 采用二进制编码方法对每个参数进行编码, 并把它们串接在一起构成一个染色体或个体.

5.2 目标函数的确定

(1) 系统响应速度可通过闭环系统中单位阶跃响应的误差函数来衡量. 设系统的中单位阶跃响应为 $y(t)$, 则取要求最小化的函数为

$$\Psi = \int_0^{T_0} [1 - y(t)]^2 dt \quad (6)$$

式中: T_0 为一个比系统过渡过程时间大的时间常数, 取 $T_0 = 300$.

(2) 由增益裕量 G_m 的要求. 取 $\Phi_1 = -G_m$, $\varepsilon_1 = -8$

(3) 由相位裕量 P_m 的要求, 取 $\Phi_2 = -P_m$, $\varepsilon_2 = -75$

(4) 取 γ_0 指标的期望界 $\varepsilon_0 = 1$

5.3 仿真结果

设算法中进化群体 P 的规模 N 为 80, 存档集 Q 的大小 M 为 10, 进化代数 T 为 100, 搜索得到一组较为满意的解如下. 3个加权阵分别为:

$$W_s(s) = \frac{951}{10\ 000s + 1},$$

$$W_R(s) = 0.000\ 1,$$

$$W_T(s) = 7.52s(0.001\ 25s + 1).$$

同时得到了一个四阶的控制器:

$$K(s) = \frac{1.485 \times 10^6 s^3 + 5.567 \times 10^4 s^2 + 695.9s + 2.9}{s^4 + 149.2s^3 + 117.8s^2 + 45.79s + 0.004\ 578}$$

设计结果: $G_m = 8.285\ 7$, $P_m = 75.943\ 1$. 主要性能指标与文献[8]所采用的人工试凑方法比较如表1所示:

表1 性能指标比较

Tab.1 Performance comparison

	γ^{-1}	$\ S\ _\infty$	$\ T\ _\infty$
文献[8]方法	0.15	1.2	1.5
本方法	1.000	1.247\ 3	0.998\ 9

得到的单位阶跃响应、Bode图、灵敏度的奇异值曲线、补灵敏度的奇异值曲线分别如图3、图4、图5所示.

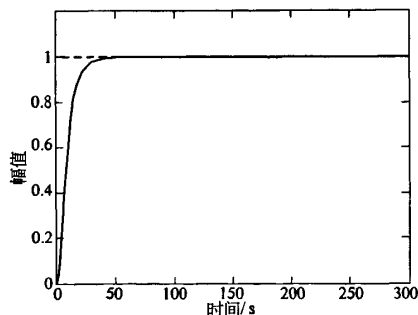


图3 闭环系统单位阶跃响应

Fig.3 Unit - step Response of the Closed - loop System

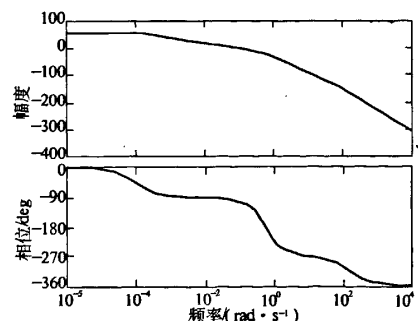


图4 系统开环 Bode 图

Fig.4 Bode diagram of open loop system

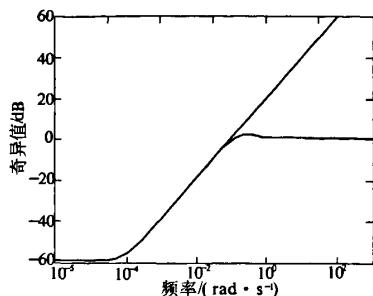


图5 S的奇异值曲线

Fig. 5 Singular values curve of sensitivity function

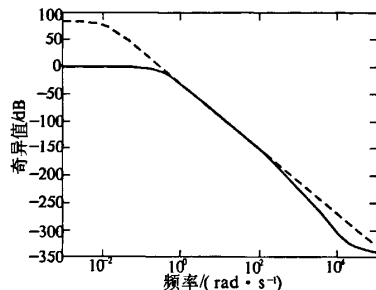


图6 T的奇异值曲线

Fig. 6 Singular values curve of complementary sensitivity function

从以上结果可以看出,采用 SPEA2 优化取得了良好的设计效果,不仅达到了给定的设计目标要求,而且避免了人工试凑的方法。

6 结论

笔者基于 SPEA2 算法,对主蒸汽压力控制系统设计出了 H_∞ 鲁棒控制器。把多个不同的设计要求转换为不等式约束,并且将 H_∞ 加权函数的选取表示为一个多目标优化问题,采用 SPEA2 优化加权阵参数,为主汽压力系统找到了同时满足频域和时域性能要求的 H_∞ 控制器。这种方法直

观易懂,不仅使得加权阵的选取规范化,避免了传统试凑方法所需要的设计者经验,并且通过优化可以取得良好的设计效果。

参考文献:

- [1] 薛美盛,孙德敏,吴刚. 火电厂锅炉主蒸汽压力的阶梯式广义预测控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 685-689.
- [2] OLOOMI H, SHAFI B. Weight selection in mixed sensitivity robust control for improving the sinusoidal tracking performance [J]. In: Proc IEEE CDC. Hawaii, 2003. 300-305.
- [3] TANG K S, MAN K F, GU D W. Structured genetic algorithm for robust H_∞ control systems design [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1996, 43(5): 575-582.
- [4] 张永,吴晓蓓,向峥嵘,等. 基于多目标进化算法的高维模糊分类系统的设计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 210-215.
- [5] ZITZLER E, THIELE L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [6] 马清亮,胡昌华. 多目标进化算法及其在控制领域中的应用综述[J]. 控制与决策, 2006, 21(5): 481-486.
- [7] ZITZLER E, LANUMANN M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization [J]. In: Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control, 2002.
- [8] 高云霞,田沛,李沁. H_∞ 混合灵敏度控制在主汽压系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 92-95.

Robust Controller Design for Main Steam Pressure Based on SPEA2

WANG Jie, WANG Shuan, WANG Zhi-peng, LIU TAO, CHEN Jing-jian

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Main steam pressure is an important physical quantity that reflects the energy supply-demand relationship between the boiler and turbine; it has a significant role in the unit operation. Because boiler burning behavior varies greatly and the model of main steam pressure is of highly uncertainty, conventional control method can not obtain the expected control effect. In order to improve system control quality, a robust controller for main steam pressure is designed by use of the H_∞ mixed sensitivity approach in this paper. The controller, which satisfies given frequency-domain and time-domain performance indexes, can be found by using SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) to optimize the weighting functions. Simulation results show that the design of the main steam pressure control system has an excellent robust stability and dynamic quality and normally used trial and error method can be avoided.

Key words: main steam pressure; H_∞ robust control; SPEA2; weighting function matrix