

基于免疫优化的机炉协调系统模糊增益调度 H_∞ 鲁棒控制

林金星, 沈 炯, 李益国

(东南大学能源与环境学院, 江苏省 南京市 210096)

Fuzzy Gain Scheduled H_∞ Robust Control for Boiler-turbine Coordinated System Based on Immune Optimization

LIN Jin-xing, SHEN Jiong, LI Yi-guo

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A new fuzzy gain scheduled H_∞ robust control method based on immune optimization is presented to control the nonlinear boiler-turbine coordinated system whose load operating points vary within wide range. Under this method multiple H_∞ robust controllers were designed by using H_∞ mixed sensitivity method at several load operating points that covered the whole load varying range of the boiler-turbine system. Then, the fuzzy inference system was adopted to create the gain scheduling law to switch the controllers softly and the parameters of the gain scheduling law were optimized by using immune genetic algorithm so as to obtain the best global closed-loop control performance. Simulation results show that the boiler-turbine coordinated system designed by the proposed method gives satisfactory regulation quality within wide operating range.

KEY WORDS: boiler-turbine coordinated system; H_∞ robust control; fuzzy inference; gain scheduling; immune optimization

摘要: 针对非线性锅炉-汽轮机系统在负荷点大范围变动情况下的协调控制, 提出了一种新的免疫优化模糊增益调度 H_∞ 鲁棒控制方法。该方法首先利用 H_∞ /混合灵敏度方法设计出多个 H_∞ 局部鲁棒控制器以覆盖机炉系统的负荷变化区间; 然后采用模糊推理生成增益调度准则以实现各局部控制器间的软切换; 最后利用免疫遗传算法对模糊增益调度准则的结构参数进行优化设计, 从而保证闭环系统具有良好的全局控制性能。仿真研究表明: 基于该方法设计出的协调控制系统在大工况范围内具有优良的调节品质。

关键词: 机炉协调系统; H_∞ 鲁棒控制; 模糊推理; 增益调度; 免疫优化

0 引言

随着电力改革的深入, 目前很多大中型火电机组需根据电网要求大范围调整负荷, 机炉对象的动态特性变化较大^[1-2]。常规的协调控制系统大都采用基于时不变对象而整定的PID控制方案, 很难满足大工况最优控制的要求^[3-4]。为了提高协调控制系统变负荷运行下的控制品质, 从现有的文献看主要有基于 H_∞ 鲁棒控制^[5-7]与基于增益调度控制(gain scheduling control, GSC)^[10-14]等途径。

H_∞ 鲁棒控制建立在范数、系统不确定性以及鲁棒性定量的数学描述基础上, 根据已知的模型参数变化范围设计最“不保守”的控制器。但采用 H_∞ 方法设计出的控制器仅能在可允许的模型不确定性界内保证系统的鲁棒稳定性或性能指标要求, 超出这一范围就不能满足要求^[8]。当机组作大范围变负荷运行时, 由于对象参数变化太大, 采用单一 H_∞ 控制器提高控制性能的余地是很有限的^[14]。

GSC基于“分解-合成”法则设计控制系统, 即首先针对系统若干典型工况点的线性化模型, 离线设计一组局部控制器, 然后根据某种调度准则为每个局部控制器分别赋予一定的权重, 最后将这些局部控制器加权求和得出全局控制器。GSC具有结构简单, 易于工程实现的优点。然而, 现有的GSC并不能保证被控系统的全局性能, 只有通过仿真才能粗略地估计出所设计的方案是否成功。造成该问题的关键原因在于缺乏适当的调度准则设计方法。目

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576011); 东南大学优秀博士学位论文基金项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50576011)。

前最常见的调度准则设计方法有两类：第一类是根据调度变量，利用三角或高斯型隶属函数对各局部控制器的控制权重进行分配^[10-14]；第二类是根据各模型与对象的输出偏差，利用模糊逻辑推理出相应的局部控制器控制权重^[15-16]。尽管上述方法在直观上合情合理，但在定量上未必是最优的，而且上述方法对隶属函数参数的选取和模糊规则的建立缺乏系统的方法，往往需要设计者根据经验反复调试。

考虑上述两种方法的优缺点，同时为进一步提高协调系统的控制品质，本文提出一种新的免疫优化模糊增益调度 H_∞ 鲁棒控制方法。该方法首先利用 H_∞ /混合灵敏度方法设计出多个局部鲁棒控制器以覆盖机炉系统的负荷变化区间；然后利用模糊推理生成调度准则，构成模糊增益调度器，同时利用免疫遗传算法(immune genetic algorithm, IGA)优化其结构参数，从而实现对各局部控制器输出权重的最优分配。通过将定性推理和定量优化相结合，本文给出了GSC中调度准则的一种系统化、最优化设计方法，避免了现有方法中依赖设计者经验设计调度准则以及无法保证闭环系统全局控制性能的不足。大工况仿真结果验证了本文方法的有效性。

1 锅炉-汽轮机模型

机炉协调控制系统中的锅炉-汽轮机模型采用在国际上很具有代表性的Bell-Åström模型^[2,3,7,17]，它表达了瑞典Sydvenska Kraft AB电站单元机组P16/G16的动态特性，模型描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 = (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ \dot{x}_3 = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \end{cases} \quad (1)$$

式中：状态变量 x_1 、 x_2 和 x_3 分别为汽包压力(MPa)、输出电功率(MW)及液体密度(kg/cm³)，输入 u_1 、 u_2 和 u_3 分别为燃料门开度、主汽门开度及给水门开度，输出 y_1 、 y_2 和 y_3 分别为汽包压力、输出电功率及汽包水位(m)，变量 a_{cs} 和 q_e 分别为蒸汽品质和蒸发率(kg/s)，由式(2)得到：

$$\begin{cases} a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{cases} \quad (2)$$

输入 u_1 、 u_2 和 u_3 受式(3)幅值和速率限制

$$\begin{cases} 0 \leq u_1, u_2, u_3 \leq 1, & -0.007 \leq \dot{u}_1 \leq 0.007 \\ -2 \leq \dot{u}_2 \leq 0.02, & -0.05 \leq \dot{u}_3 \leq 0.05 \end{cases} \quad (3)$$

文献[17]给出了模型(1)在典型工况点 (x_i, u_i) ， $i=1,2,\dots,7$ 的稳态特性数据，如表 1 所示。

表 1 被控对象的工况点
Tab. 1 Operating points of the plant

工作点	x_1^0	x_2^0	x_3^0
1	7.41	25.27	299.6
2	8.47	36.65	342.4
3	9.53	50.52	385.2
4	10.58	66.65	428
5	11.64	85.06	470.8
6	12.70	105.8	513.6
7	13.76	128.9	556.4

令 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3]^T$ 、 $\mathbf{u}=[u_1, u_2, u_3]^T$ 、 $\mathbf{y}=[y_1, y_2, y_3]^T$ ，并将模型(1)在上述 7 个典型工况点的线性化模型的传递函数记为 $G_i(s)$ ， $i=1,2,\dots,7$ 。

2 基于 IGA 优化的模糊增益调度 H_∞ 控制

2.1 系统结构

增益调度控制系统的结构如图1所示。其中， r 、 e 、 u 和 y 分别为设定值、控制误差、控制量和系统输出； K_1, \dots, K_k 分别为在对象 k 个不同工况区域设计的局部鲁棒控制器； v 为调度变量； g_1, \dots, g_k 为增益调度器的输出，分别对应于各局部控制器输出的权重。实际多模型控制输出的控制量为

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{l=1}^k g_l(v(t))K_l(s)\mathbf{e}(t) \quad (4)$$

式中： $K_l K_l(s)$ 为局部控制器 l 的传递函数； s 为拉氏算子。

由文献[12]可知，机组大范围变负荷运行的工作点主要集中在由表1中各典型工况点构成的滑压曲线附近。因此本文在滑压曲线上按负荷大小将机组运行工况划分为“低负荷”和“高负荷”2个局部工况区：{[25.27MW, 85.06MW], [66.65MW, 128.9MW]}，分别覆盖机组工况1~5和工况4~7间的模型。针对这两个工况区，分别设计相应的局部控制器 K_1 和 K_2 。

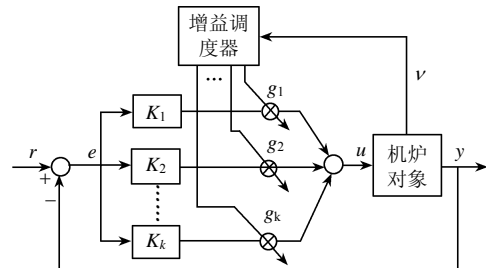


图 1 增益调度控制系统结构
Fig. 1 Structure of the gain scheduling control system

2.2 基于 H_∞ /混合灵敏度方法的局部控制器设计

对由局部控制器和机炉对象构成的闭环反馈控制系统提出如下期望设计要求：①在设定值变化时，控制输出以尽可能小的误差和尽可能快的响应速度跟踪设定值；②限制过大的控制输出；③当各种因素影响下对象模型产生不确定时闭环系统鲁棒稳定。由于 H_∞ 控制理论可以同时兼顾系统的响应性能和鲁棒稳定性，而且在频域中设计，物理意义明显。因此，本文利用 H_∞ /混合灵敏度方法设计局部控制器，其原理框图如图2所示。

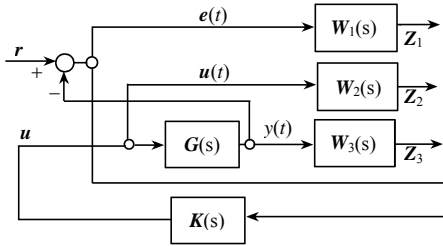


图 2 H_∞ /混合灵敏度设计系统

Fig. 2 Design system of H_∞ /mixed sensitivity

图中， $G(s)$ 为机炉对象在某一标称点的线性化模型传递函数， $K(s)$ 为需求的局部控制器(为方便起见，这里分别略去 $G(s)$ 和 $K(s)$ 的下标)； $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$ 分别为引入的系统性能权、控制量限制权、不确定性权函数。本文以输出乘性摄动等效表示模型不确定性，则设计要求①~③可归结为品质和稳定性的混合灵敏度问题^[8,18]：求真实有理函数控制器 $K(s)$ 使闭环系统内稳定，且满足性能指标

$$\min \begin{Bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \\ W_3 T \end{Bmatrix} \infty \Rightarrow \begin{Bmatrix} W_1 (I + GK)^{-1} \\ W_2 K S \\ W_3 GK (I + GK)^{-1} \end{Bmatrix} \infty \leq 1 \quad (5)$$

式中： S 和 T 分别为闭环系统的灵敏度函数和补灵敏度函数， $\|\cdot\|_\infty$ 表示传递函数的 H_∞ 范数。式(5)中最上面一项的意义：为了保证系统足够的信号跟踪能力，应尽可能降低 $S(s)$ 在低频段的增益，权函数 $W_1(s)$ 即用于实现此要求；式(5)中中间一项的意义：通过权函数 $W_2(s)$ 以限制控制信号的幅值；式(5)中最下面一项的意义：设标称模型 $G(s)$ 的输出乘性摄动的界函数为 $W_3(s)$ ，则由小增益定理可知控制器 $K(s)$ 使摄动后系统都稳定的充分条件，即为 $\|W_3(j\omega)T(j\omega)\|_\infty \leq 1, \forall \omega$ 。

在 H_∞ /混合灵敏度设计中，加权函数的选择是关键，直接决定了闭环系统在整个频率范围内的性能。

性能权函数 $W_1(s)$ 的频率特性应具有低通性质，以得到良好的信号跟踪性能。理想情况下为实

现无静差控制， $W_1(s)$ 在低频区的斜率应为 -20 dB 每十倍频，但为了避免数值计算上的困难^[19]，本文对 K_1 和 K_2 的性能权函数均取为

$$W_1(s) = \text{diag}\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\} \left(\frac{0.02s + 1}{s + 0.01} \right) \quad (6)$$

式中， ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 为设计参数，在混合灵敏度迭代求解中确定其最大的可能值，即最大带宽。

控制量限制权函数 $W_2(s)$ 的静态增益应足够大，以抑制过大的控制器输出，但为了保证足够的系统带宽，其静态增益应适当小，经多次实验本文对 K_1 和 K_2 的控制量限制权函数均取为 $W_2(s) = 0.01I_{3 \times 3}$ 。

不确定性权函数 $W_3(s)$ 的幅值应不小于所有需要考虑的模型不确定性的最大奇异值。由 2.1 节可知，控制器 K_1 和 K_2 应分别镇定机炉对象工况 1~5 及 4~7 间的模型。因此，对于图 2 中的标称模型 $G(s)$ ，其模型不确定性主要来源于两类：一类是在中低频段由工况点变化引起的参数不确定性；另一类是由模型线性化时忽略的高频未建模动态。令对象在标称点的线性化模型为 $G_0(s)$ ，在工况点 i 的线性化模型为 $G_i(s)$ ，当以输出乘性摄动等效表示模型不确定性时，根据文献[19]可知模型 $G_0(s)$ 和 $G_i(s)$ 间的“距离”可表示为： $\bar{\sigma}((G_i - G_0)G_0^{-1}(j\omega))$ ，其中 $\bar{\sigma}(\cdot)$ 为矩阵的最大奇异值。令机炉对象在工况点 3 和 6 的模型 $G_3(s)$ 和 $G_6(s)$ 分别为设计控制器 K_1 和 K_2 的标称模型，本文根据

$$\max_i \bar{\sigma}((G_i - G_3)G_3^{-1}(j\omega)) / |10j\omega + 1| / |j\omega + 1| \leq |W_3(j\omega)| \quad \forall \omega, i = 1, 5 \quad (7)$$

$$\max_j \bar{\sigma}((G_j - G_6)G_6^{-1}(j\omega)) / |10j\omega + 1| / |j\omega + 1| \leq |W_3(j\omega)| \quad \forall \omega, j = 4, 7 \quad (8)$$

分别确定标称模型 $G_3(s)$ 和 $G_6(s)$ 的输出乘性不确定性权函数为

$$W_3(s) = \left(\frac{80s^2 + 1200s + 50}{9500s + 400} \right) I_{3 \times 3} \quad (\text{对 } G_3(s)) \quad (9)$$

$$W_3(s) = \left(\frac{100s^2 + 800s + 50}{5500s + 350} \right) I_{3 \times 3} \quad (\text{对 } G_6(s)) \quad (10)$$

输出乘性不确定性及权函数的奇异值曲线如图3所示，其中，图3(a)和(b)中曲线1分别为标称模型 $G_3(s)$ 和 $G_6(s)$ 的输出乘性不确定性权函数的奇异值，图3(a)中曲线2和3分别对应式(7)中 i 取 1 和 5 时左边的奇异值，图3(b)中曲线2和3分别对应式(8)中 j 取 4 和 7 时左边的奇异值。

基于上述权函数和对象传递函数，利用 MATLAB/Robust Control Toolbox 中的 `augtf` 函数

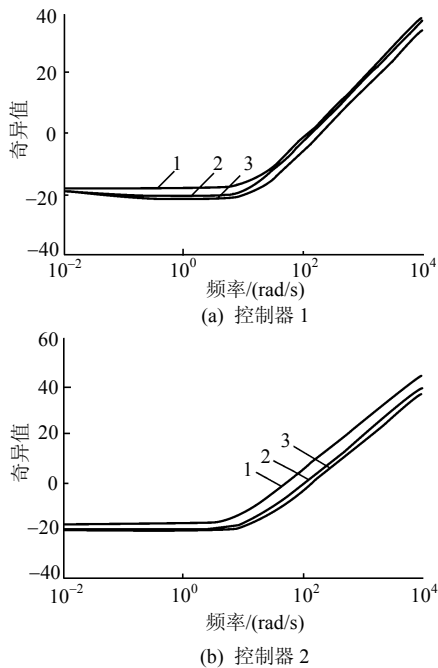


图 3 不确定性及权函数

Fig. 3 Uncertainties and weighting functions

构成增广被控对象，再利用 hinftopt 函数解得具有稳定极点和零点的 9 阶控制器。

2.3 基于 IGA 优化的模糊增益调度器

当机组作变负荷运行时，需要增益调度器对各局部控制器的输出权重进行合理分配，但增益调度器中调度准则精确的数学模型描述难以建立。本文采用模糊推理方法动态生成调度准则，构成模糊增益调度器(FGS)，并利用IGA优化FGS的参数，从而获得最优的全局控制性能。

在被控对象中，功率输出 x_2 是反映系统工况的重要变量，而且容易测量。因此选功率输出作为调度变量，即 $s(t) = x_2(t)$ 。对 x_2 定义 2 个模糊子集： $\{L$ (低), H (高) $\}$ ，采用三角形隶属度函数，如图 4 所示，则 FGS 共有 4 个可调参数： a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 。用于确定各局部控制器输出权值的模糊推理规则为

R_1 : If x_2 is H Then g_1 is Small($f_1^1 = 0$), g_2 is

Big($f_2^1 = 1$)

R_2 : If x_2 is L Then g_1 is Big($f_1^2 = 1$), g_2 is

Small($f_2^2 = 0$)

采用加权平均解模糊化得到清晰化的控制器输出权重：

$$g_i = \frac{\sum_{j=1}^2 \mu_j f_j^i}{\sum_{j=1}^2 \mu_j}, \quad i=1,2 \quad (11)$$

其中， μ_1 和 μ_2 分别为模糊集合 H 和 L 对调度变量 x_2 的隶属度。

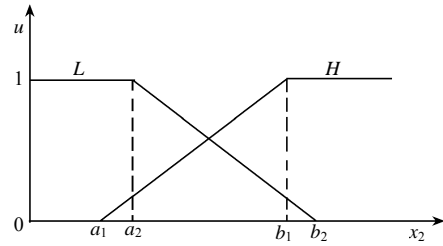


图 4 功率对应的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of power

以上建立了 FGS 的模糊规则和推理机制，但各模糊子集隶属度函数参数的初始值可能不是最佳的，所以有必要对它们进行优化设计。优化问题可归结为：寻求一组最优参数 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 ，以极小化如下的二次型代价函数

$$J = \int_0^t [e(t)^T Q e(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (12)$$

式中： t 为仿真时间； Q 和 R 为加权矩阵。

对于参数 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 的寻优，若采用传统的基于梯度信息的 BP 算法，由于被控对象的非线性将导致训练误差不能从模糊推理系统的输出端直接得到，因而难以实现，考虑到 IGA 对优化问题本身没有特别地限制，因此本文提出利用 IGA 优化 FGS 的参数。

IGA 是近来提出的一种全局概率优化算法^[20]，它在遗传算法的基础上，结合生物免疫系统独有的计算机制，如抗原识别、免疫记忆、抗体多样性、浓度控制等，以提高遗传算法的搜索能力。根据 IGA 的特点，本文将反映控制效果的性能指标即式(12)所示的二次型代价函数作为抗原，将隶属函数中待调整的参数 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 作为抗体，所要求的最优解就是那些与抗原有最大亲和力的抗体。对抗体采用二进制编码，编码长度为 4×8 ，即每 8 位代表一优化参数。IGA 的核心是对生物抗体浓度自适应调节过程的模拟。假设种群由 N 个抗体组成，抗体 i 的浓度定义为

$$C_i = \sum_{j=1}^N A_{i,j} / N \quad (13)$$

式中： $A_{i,j}$ 为抗体 i 和 j 的亲合度评价值，为了克服传统免疫算法基于信息熵计算 $A_{i,j}$ 造成的不足，本文从抗体结构空间和解空间(适应度值)2 方面综合计算抗体的亲合度评价值，详见文献[21]。

IGA 优化 FGS 参数的具体过程如下：

(1) 产生初始抗体种群。

设置种群抗体数 N ，总进化代数 N' 和记忆细胞数 N'' 。根据先验知识，将问题的初始解作为初

始记忆细胞,并与随机产生的抗体共同构成初始抗体群 $\{x_i\}_{i=1}^N$ 。确定交叉、变异概率 p_c 、 p_m 。确定图1中的指令输入信号。令 $n=1$ 。

(2) 计算亲和力。

对于每一个抗体 x_i , $i=1,2,\dots,N$, 针对相同的指令输入信号,分别对图1所示的机炉协调控制系统进行仿真,并计算每一个抗体 x_i 所对应的代价函数 $J(i)$ 及其与抗原的亲和力 $(A_a)_i = 1/(1+J(i))$

(3) 更新记忆细胞。

将抗体群按 $(A_a)_i$ 的降序排列,将前 N'' ($N'' < N'$) 个高抗原亲和力的抗体代替记忆细胞中低抗原亲和力的 N'' 个抗体。

(4) 抗体选择(促进或抑制)。

根据式(13)计算各抗体的浓度,抗体的选择标准由抗体亲和力和浓度抑制因子两个因素共同确定

$$p_i = \lambda(A_a)_i + (1-\lambda)e^{-\eta C_i} \quad (14)$$

其中, λ 和 η 为预先给定的系数,分别取为0.7和1.25。式(13)使高抗原亲合力的抗体得到促进,高浓度的抗体得到抑制,从而增进抗体的多样性。

(5) 产生新抗体。

根据式(14),采用转盘法选出 N 个抗体。以概率 p_c 和 p_m 对选出的 N 个抗体进行与遗传算法相同的交叉和变异操作。在新产生的种群中,选出与抗原亲和力最高的 $N-N''$ 个抗体与更新过的记忆细胞共同构成新一代抗体种群。

(6) 判别终止条件。

令 $n=n+1$, 如果 $n > N'$, 则终止计算,取最后产生的抗体群中与抗原亲和力最高的抗体作为问题的解;否则重复执行(2)~(6)。

3 仿真研究

IGA的参数取为:种群抗体数 $N=30$,总进化代数 $N'=50$,记忆细胞数 $N''=5$,交叉概率 $p_c=0.9$,变异概率 $p_m=0.1$;为了保证模糊推理规则的完备性,将模糊子集“L”、“H”的可调参数 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 的调节范围分别限定在[47.52, 53.52]、[47.52, 53.52]、[102.8, 108.8]和[102.8, 108.8]之间。二次型性能指标中的加权矩阵取为: $Q=I_{3 \times 3}$, $R=\text{diag}\{724, 141, 5\}$,其值由输出变量的相对重要性以及输入输出间的稳态关系决定^[17]。为了使设计出的控制系统适用于更宽的操作范围,对于每个抗体,分别给定如下两组指令输入信号:

(1) $r_1 = 86.4 + (108 - 86.4)\Gamma(t - 200) + (129.6 -$

$108) \cdot \Gamma(t - 700)$; $r_2 = 36.65$, $r_3 = 0$;

(2) $r_1 = 86.4$, $r_3 = 0$, $r_2 = 36.65 + (66.65 - 36.65)\Gamma(t - 200) + (105.8 - 66.65) \cdot \Gamma(t - 700)$,其中, $\Gamma(t)$ 是 $t=0$ 时刻突变的阶跃函数,则每个抗体对应的代价函数为

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N [e(k)^T Q e(k) + u(k)^T R u(k)] \quad (15)$$

式中 N 为仿真步数。

用IGA优化计算50代,进化过程中最优抗体适应值(即其与抗原的亲和力 $1/(1+J)$)随进化代数的变化曲线如图5所示。优化得到的最优隶属函数参数值分别为: $a_1=51.5$ 、 $a_2=49.1$ 、 $b_1=106.1$ 、 $b_2=105.2$ 。

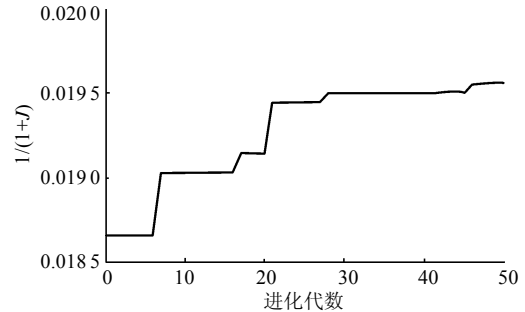
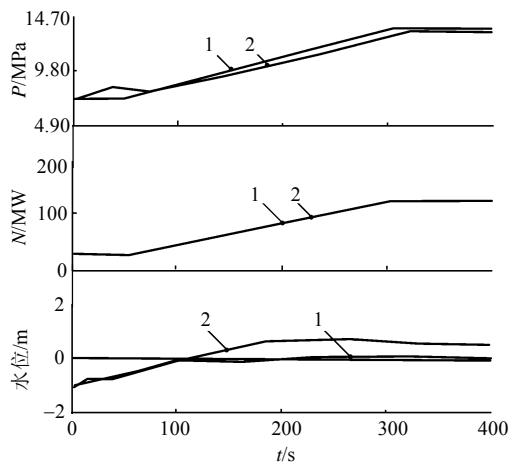


图5 抗体群中最优抗体的进化曲线

Fig. 5 Evolutionary curve of the best antibody in opulations

为验证控制系统性能,做大范围滑压运行(工况1→工况7)仿真试验。在 $t=50$ s 时,将负荷从25.2 MW以0.4 MW/s的速率斜坡升至128.9 MW,将汽包压力从7.41 MPa以0.024 MPa/s速率斜坡升至13.76 MPa,汽包水位设定值保持为0。

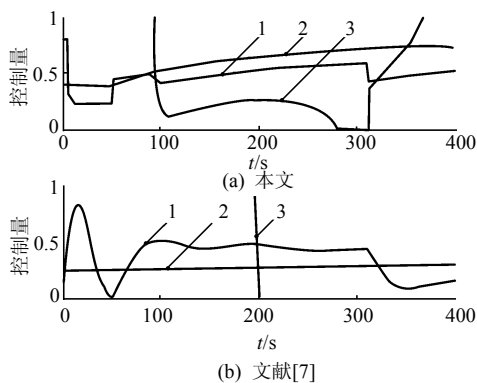
为了比较,本文对由文献[7]中采用 H_∞ 回路成形技术设计出的单一鲁棒控制器(以100%工况点作为标称点,阶次为8)构成的控制系统也作同样的仿真试验。仿真结果如图6和7所示。图6为控制系统的输出响应。可见,采用本文的增益调度控制方法可取得令人满意的控制效果,功率输出精确跟踪设定值变化,汽包压力具有极小的超调,汽包水位稳定在设定值附近。而采用文献[7]的单一控制器方法,汽包压力和汽包水位输出则具有较大幅度的超调。图7为控制系统的控制器输出响应。可见,本文方法燃料调节阀和蒸汽调节阀开度的变化幅度比文献[7]的相应开度稍大,但给水调节阀开度变化与文献[7]相比则较为平稳,文献[7]给水调节阀开度出现快速地从全开(1)到全关(0)的变化过程,这会严重减小执行器的寿命,而且也不利于机炉系统的安全运行。



1—本文；2—文献[7]

图 6 控制系统输出响应曲线

Fig. 6 Output response curves of control system



1—燃料调节阀开度；2—蒸汽调节阀开度；3—给水调节阀开度。

图 7 控制器输出响应曲线

Fig. 7 Curves of the controller output response

4 结论

H_∞ 鲁棒控制和增益调度控制的有效结合可较好地解决非线性机炉协调系统控制问题，为此本文提出一种新的免疫优化模糊增益调度 H_∞ 鲁棒控制方法，实现了 H_∞ 鲁棒控制和增益调度控制的优势互补。此外，通过将定性推理和定量优化相结合，本文给出了增益调度控制系统中调度规则的一种系统化、最优化设计方法，避免了现有方法中凭经验设计调度规则以及无法保证系统闭环全局控制性能的不足。典型非线性机炉协调控制系统的大范围变负荷仿真试验验证了本文所提方法的有效性。

但应注意到，本文在进行系统整体结构设计时，将机组工作区间按照负荷高低平均划分为 2 段，针对每段分别设计局部控制器。这只是一工程上的近似方法，并未充分考虑各区间非线性特征的强弱，也没有从理论上证明划分的合理性，尽管仿真结果令人满意，但有必要就此进行深入研究。

参考文献

- [1] Nag P K. Power plant engineering[M]. Second Edition. Boston: McGraw-Hill Company, 2002.
- [2] Garduno-Ramirez R, Lee K Y. Wide range operation of a power unit via feed forward fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 421-426.
- [3] 奕秀春, 李士勇, 张宇. 单元机组的 T-S 模糊协调控制系统及其 LM 分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 91-95. Luan Xiuchun, Li Shiyong, Zhang Yu. T-S fuzzy coordinated control system for power unit its analysis using lmi[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 91-95(in Chinese).
- [4] Peng H, Ozaki T, Yukihiro T, et al. Exponential arx model-based long-range predictive control strategy for power plants[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(12): 1353-1360.
- [5] Kwon W H, Kim S W, Park P G. On the multivariable robust controller of a boiler-turbine system[C]. Proc. IFAC Symp. Control Power Syst. Power Plant, Seoul, Korea, 1989: 219-223.
- [6] Hwang C S, Kim D W. A design of robust two-degree-of-freedom boiler-turbine control systems using H_∞ optimization method[C]. Proc. SICE'95, Sapporo, Japan, 1995, 1263-1268.
- [7] Tan W, Niu Y G, Liu J Z. Robust control for a nonlinear boiler-turbine system[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(6): 863-867.
- [8] 郑建华, 张立荣, 杨涤. 大范围模型参数变化系统的 H_∞ /加权混合灵敏度设计方法研究[J]. 自动化学报, 1998, 24(5): 707-710. Zheng Jianhua, Zhang Lirong, Yang Tao. H_∞ mixed sensitivity design method for system with large range of model parameter variations [J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(5): 707-710(in Chinese).
- [9] Rugh W J, Shamma J S. Research on gain scheduling[J]. Automatica, 2000, 36(10): 1401-1425.
- [10] Prasad G, Swidenbank E, Hogg B W. A local model networks based multivariable long-range predictive control strategy for thermal power plants[J]. Automatica, 1998, 34(10): 1185-1204.
- [11] Huang Zuyi, Li Donghai, Jiang Xuezhi et al. Gain scheduled servo system for boiler-turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 191-198.
- [12] 陈彦桥. 单元机组模糊多模型协调控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
- [13] 李益国, 沈炯, 薛景岩, 等. 火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法[J]. 热能动力工程, 2004, 19(2): 186-190. Li Yiguo, Shen Jiong, Xue Jinyan. Multi-model robust forecast control of thermal plant power loads[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(2): 186-190(in Chinese).
- [14] Kallapa P, Ray A. Fuzzy wide-range control of fossil power plants for life extension and robust performance[J]. Automatica, 2000, 36(1): 69-82.
- [15] 皮道映, 孙优贤. 多模型 MIMO 系统的模糊加权控制策略[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 387-390. Pi Daoying, Sun Youxian. A fuzzy-weighted control strategy for multi-model mimo systems[J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(3): 387-390(in Chinese).

- [16] 仇韬, 丁艳军, 吴占松, 等. 基于预测模型的多PID控制器模糊加权控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 121-124.
Qiu Tao, Ding Yanjun, Wu Zhansong, et al. A new fuzzy-weighted control used multiple PID controller based on prediction model [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 121-124(in Chinese).
- [17] Dimeo R, Lee K Y. Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(4): 752-759.
- [18] Hilbert K. Robust control and H_∞ optimization: tutorial paper[J]. Automatica, 1993, 28(3): 255-273.
- [19] Chiang R Y, Safonov M G, Haiges K. A fixed H_∞ controller for a supermaneuverable fighter performing the Herbst maneuver[J]. Automatica, 1993, 29(1): 111-127.
- [20] Chun J S, Kim M K, Jung H K et al. Shape optimization of electronic devices using immune algorithm[J]. IEEE Transactions on Magenetica, 1997, 33(2): 1876-1879.
- [21] 林金星, 沈炯, 肖国涛, 等. 一种基于分层模糊控制的免疫遗传优化算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 46-49.

Lin Jinxing, Shen Jiong, Xiao Guotao *et al.* Immune genetic optimization algorithm based on multilayer fuzzy control[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(1): 46-49 (in Chinese).



林金星

收稿日期: 2007-11-15。

作者简介:

林金星(1978—), 男, 汉族, 江苏人, 东南大学能源与环境学院博士生, 主要研究方向为热工过程建模与控制, jxlin2004@126.com;

沈炯(1957—), 男, 汉族, 江苏人, 东南大学能源与环境学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为热工过程先进控制;

李益国(1973—), 男, 汉族, 山西人, 东南大学能源与环境学院副教授, 主要研究方向为热工过程建模与控制。

(责任编辑 王庆霞)