文章编号:1001-2060(2013)04-0395-04

蒸汽发生器水位 PID 控制器的 H_a 回路成形优化

刘玉燕 周世梁

(华北电力大学 控制与计算机工程学院 核科学与工程学院 北京 102206)

摘 要: 针对 U 形管蒸汽发生器水位前馈 - 反馈串级三冲 量控制系统的主控制器 PID 参数整定困难和鲁棒性要求高 的特点 提出了一种系统的 PID 参数整定方法。该方法结合 了 PID 型 H_{*} 回路成形控制器综合算法与一阶超前滞后型 权函数优化算法,优化后的 PID 控制器能在保证一定控制品 质前提下最大化系统的鲁棒稳定裕量,且整个优化算法基于 线性矩阵不等式技术,计算代价低。运用所提方法整定了蒸 汽发生器水位控制系统的主控制器参数。仿真结果表明,采 用该方法整定的水位控制系统具有较好的鲁棒性能和鲁棒 稳定性,综合控制品质优于高/低阶权函数优化和标准 H_{*} 回路成形控制器综合相结合的方法。

关键词: H_a 回路成形; 权函数优化; 线性矩阵不等式; 蒸 汽发生器; 水位控制

中图分类号: TK284.1; TP273 文献标识码: A

引 言

在核电厂运行过程中,蒸汽发生器水位低将引 起蒸汽进入给水环管,使管束传热恶化,或引起蒸汽 发生器的管板热冲击;水位过高,则影响汽水分离效 果,造成蒸汽品质恶化,危害汽轮机的叶片。因而水 位控制很大程度上决定了核电站机组的安全、可靠、 经济运行。

蒸汽发生器是一个高度复杂的非线性、时变的 非最小相位系统,并且蒸汽发生器存在"收缩"与 "膨胀"的逆动力学效应和随运行功率而变化的动 力学特性^[1]等因素使得蒸汽发生器的水位控制变 的复杂。

许多先进的蒸汽发生器水位控制方法不断推 出^[2~3 9] 但大都没有被核电工程领域采用。因为高 可靠性要求和核安全理念决定了核电厂蒸汽发生器 水位控制系统的设计倾向于采用经广泛工程应用和 严格理论推导证明有效的技术。因此在不改变控制 策略和控制器类型的情况下^[4] ,充分考虑被控对象 的不确定性 基于严格的理论体系来优化控制器参数 是更容易被核电运营方和核安全当局接受的 方案。

本研究基于 H_∞ 回路成形理论,提出了一种系统的鲁棒 PID 控制器的优化设计方法。设计者仅需指定回路形状约束的几个控制点,采用所提基于线性矩阵不等式(LMI ,Linear Matrix Inequality)技术的快速迭代算法,便可得到鲁棒 PID 控制器。

相比于文献 [2~3]所提方法,所得控制器更易 于工程实现与维护;相比于文献 [17~18]所提的基 于遗传算法或粒子群算法的 PID 参数直接优化方 法,保证了控制系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能,且计 算代价低得多。

1 鲁棒 PID 控制器的 H_a 回路成形优化设计

McFarlane 和 Glover 提出的H_∞LSDP^[6]利用经典 的"回路成形"原理来折衷对象性能和鲁棒稳定性, 采用标准左互质分解鲁棒稳定性方法保证闭环系统 的稳定性。标准H_∞LSDP 的步骤、回路形状的具体 要求可参考文献 [6,12~15]。

文献[11]采用标准H_∞LSDP 方法,设计了蒸汽 发生器水位控制器。所得控制器高达七阶,控制器 参数多达64个,不便于工程实现与调试;且采用试 凑法选择权函数,不能保证所设计控制器的性能最 优化。

本研究采用H_∞PID 型控制器综合方法求解给 定权函数下对应的次优鲁棒控制器^[20]。该方法最 终控制器形式为H_∞综合所得 PID 型控制器K_{PID_∞}串 联后补偿器权函数 W₂,即:

 $K = K_{\text{PD}_{\infty}} W_2$ (1) 其中, W_2 取1,因而不管预补偿权函数 W_1 取何

收稿日期: 2012 - 11 - 13; 修订日期: 2013 - 01 - 08

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(13MS20);中央高校基本科研业务费专项资金资助(13MS28) 作者简介:刘玉燕(1980-),女,山东聊城人,华北电力大学硕士. 种形式 最终控制器都为 PID 型。

但上述H_∞综合方法在权函数阶次较高时容易 求解失败,且权函数的选择会显著影响最终 PID 控 制器的控制性能。针对这个问题,本研究提出了一 种一阶超前滞后型权函数 W₁ 优化算法。该算法在 成形后对象 GW₁ 满足回路形状约束的前提下能够 最大化鲁棒稳定裕量。因所得权函数 W₁ 为一阶,能 保证H_∞PID 型控制器综合有解。且最终所得 PID 控制器具有较好的鲁棒稳定性和鲁棒性能。

相比于文献 [12]、[15]提出的权函数优化算法 一般只能得到高阶权函数,本研究所提方法更具实 际应用价值;相比于文献 [19]需要采用复倒谱算法 拟合低阶权函数,本研究所提方法基于 LMI 技术直 接求解权函数系数,不存在拟合误差导致的所得控 制系统鲁棒稳定裕量下降的问题。另外,回路形状 的约束只需给出几个控制点的对数坐标值,相比于 文献 [12]、[15]和 [19]提出的方法要求选取特定的 传递函数来描述奇异值上下界,简化了回路形状选 择的设计过程。

所提方法的权函数优化和控制器综合算法都基于 LMI 技术,相比基于遗传算法^[14]、混沌优化算法^[13]、粒子群算法^[16]的方法,计算代价要小得多。

1.1 超前滞后型权函数优化

对于 SISO 系统(Single input single output,单输 入单输出系统),仅采用预补偿权函数 $W = W_1 W_2$, 与同时采用预补偿权函数 W_1 和后补偿权函数 W_2 , 所得回路形状、最终控制器和鲁棒裕量是一样的。 因此,为简便起见,仅考虑优化预补偿权函数 W_1 , 后补偿权函数 W_2 取1。经比较分析,采用一阶超前 滞后型补偿器,能取得较好的回路形状。即:

$$W_1 = \frac{k(t_1s+1)}{t_2s+1} = \frac{N(s)}{D(s)}$$
(2)

式中: *k*、*t*₁ 和 *t*₂ 取正实数 ,分别为增益、超前时间常数和滞后时间常数。

设
$$\Lambda = |W_1|^{-2}$$
易得:

$$\Lambda = W_{1}^{-T} W_{1}^{-1} = \frac{|D|^{2}}{|N|^{2}} = \frac{\Omega_{N} (jw)^{T} X_{N} \Omega_{N} (jw)}{\Omega_{D} (jw)^{T} X_{D} \Omega_{D} (jw)}$$
(3)

其中:

$$\Omega_{\rm N} = \Omega_{\rm D} = [jw \quad 1]^T \tag{4}$$

$$X_{\rm N} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0\\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$X_{\rm D} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

易得:

$$k = \sqrt{a_{22}} \tag{7}$$

$$t_1 = \sqrt{a_{11}/a_{22}} \tag{8}$$

$$t_2 = \sqrt{b_{11}}$$
 (9)

由 k、t₁ 和 t₂ 为正实数,可得:

$$a_{11} > 0$$
 (10)

$$a_{22} > 0$$
 (11)

$$b_{11} > 0$$
 (12)

权函数优化问题,可表示为保证成形后对象 G_s 处于设计者给定的奇异值区间内最小化满足不等式 (13)的 γ^{2} [16] 则:

$$\begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \leqslant$$

$$\gamma^{2} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix}$$

$$(13)$$

$$\Re_{T}(3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{|D|^{2}}{|N|^{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \leq \gamma^{2} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{|D|^{2}}{|N|^{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix}$$
(14)

在式(14) 两边同乘以正实数
$$|N|^2$$
 得:

$$\begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \Omega_{N}^{T}X_{N}\Omega_{N} & 0 \\ 0 & \Omega_{D}^{T}X_{D}\Omega_{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \leq$$

$$\gamma^{2} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \Omega_{N}^{T}X_{N}\Omega_{N} & 0 \\ 0 & \Omega_{D}^{T}X_{D}\Omega_{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G \\ K & 1 \end{bmatrix} (15)$$
则上式可改写为:

$$M_{\Omega G}^{T} \begin{bmatrix} X_{\mathrm{N}} & 0\\ 0 & X_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} M_{\Omega G} \leqslant \gamma^{2} M_{\Omega G \mathrm{K}}^{T} \begin{bmatrix} X_{\mathrm{N}} & 0\\ 0 & X_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} M_{\Omega G \mathrm{K}}$$
(16)

其中:

$$M_{\Omega G} = \begin{bmatrix} \Omega_{\rm N} & 0\\ 0 & \Omega_{\rm D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & G\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(17)

$$M_{\Omega GK} = \begin{bmatrix} \Omega_{\rm N} & 0\\ 0 & \Omega_{\rm D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G\\ K & 1 \end{bmatrix}$$
(18)

奇异值曲线位于上界 ^s 之下由不等式(19) 给出:

$$G^{T}G < |\bar{s}|^{2}\Lambda \tag{19}$$

可变换为:

$$\begin{bmatrix} G^T & |\bar{s}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ |\bar{s}| \end{bmatrix} < 0$$
 (20)

$$\begin{bmatrix} G^{T} & |\bar{s}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{N}^{T} X_{N} \Omega_{N} & 0 \\ 0 & - \Omega_{D}^{T} X_{D} \Omega_{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ |\bar{s}| \end{bmatrix} < 0$$

$$M_{\Omega G\bar{s}}^{T} \begin{pmatrix} X_{\rm N} & 0\\ 0 & -X_{\rm D} \end{pmatrix} M_{\Omega G\bar{s}} < 0$$
 (22)

其中:

$$M_{\Omega G\bar{s}} = \begin{bmatrix} \Omega_{\rm N} & 0\\ 0 & \Omega_{\rm D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G\\ |\bar{s}| \end{bmatrix}$$
(23)

同理,奇异值曲线位于下界。之上,即

$$|\underline{s}|\Lambda < G^{T}G$$
 (24)
可改写为:

$$0 < M_{\Omega G_s}^T \begin{pmatrix} X_N & 0\\ 0 & -X_D \end{pmatrix} M_{\Omega G_s}$$
(25)

其中:

$$M_{\Omega G_{s}} = \begin{bmatrix} \Omega_{N} & 0\\ 0 & \Omega_{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G\\ |s| \end{bmatrix}$$
(26)

根据所选定的频率点 ω_k ,k = 1.2,…,N,得到 每个频率点的 K_{PD} ; (jw_k) 和 $G(jw_k)$,并得出对应的 LMI(16)、(22)和(25),加上3个超前滞后型权函 数对决策变量约束的LMI(10)、(11)和(12),共计 3+3N个LMI。求这组LMI 描述的广义特征值最小 化问题,即可得到确保 G_s 幅频曲线位于s与s界定 的范围之内,且最大化 γ^2 的 X_D 和 X_N 。然后由(7)、 (8)、(9)得到超前滞后单元的参数 $t_1 \ t_2$ 和k。相 对于文献[15]提出的低阶权函数优化方法,本研究 所提方法不需要采用复倒谱算法拟合权函数,而是 直接给出权函数的解析表达式,因而不存在拟合误 差的问题。另外,所提方法也适用于其它类型的权 函数,如比例积分型、二阶超前滞后型等。

1.2 H_∞回路成形 PID 控制器传递函数确定 设采用如下形式的 PID 控制器:

$$K_{\rm PID}(s) = K_{\rm P} + \frac{K_{\rm I}}{s} + \frac{K_{\rm D}s}{\frac{s}{\tau} + 1}$$
(27)

给定 τ 值是为了避免优化算法中出现非线性不

等式, τ 取值一般为 5 ~ 200 s,一般鲁棒稳定裕量对 τ 的取值不太敏感。实际运用时,可选取几个典型 τ 值,如 5、10、50、200 和 500 s,根据优化指标确定最 佳的 τ 值。

1.3 迭代求解算法

由于优化 W_1 时假定控制器 K 已知 ,而 W_1 优化 结束后需要重新进行H_a综合求解控制器 K_{PID} ,所以 必须采用迭代算法来求解此优化问题。算法的输入 为: 设计者选定的频率点 ω_k , $k = 1 2 , \dots N$; 成形 后对象幅频曲线的上边界 \overline{s} 和下边界 \underline{s} 、能保证系 统稳定的初始 PID 控制器 K_{PID_0} 和对应的 τ 值。

第一步: 设i=1, $\varepsilon_{\max 0} = 0$ 。

第二步: LMI(16)、(22) 和(25) 中 K 取 K_{PID i-1}。 按1.1 节所提权函数优化方法,得到次优权函数 W_{1 i}。

第三步:按1.2 节所提方法,得到 *W*₁,对应的次 优鲁棒 PID 控制器 *K*_{PD},和对应的鲁棒裕量,即:

 $\varepsilon_{\max i} = 1/\gamma_{s_{\text{opt}}i}$

第四步: 若在最后指定的若干次迭代 $|\varepsilon_{\max_i} - \varepsilon_{\max_{i-1}}|$ 的值都小于预定的允许偏差值,或 者 ε_{\max_i} 达到设计者期望的最小值 ε_{\max} ,则退出迭 代,并得到次优 PID 控制器 $K_{\text{PID out}}$; 否则,i = i + 1, 并转向第二步。

第二步、第三步中相关 LMI 求解可利用 MAT-LAB LMI 工具箱里的 feasp、minex 和 gevp 函数 实现。

该迭代算法不能保证能获得全局最优的权函数 和控制器 ,但对初始 PID 控制器的选择不太敏感 ,且 能保证 ε_{max_i} 单调递增^[12,15]。

2 蒸汽发生器水位控制仿真

2.1 控制策略

一般压水堆核电厂对于 15% 以上负荷,给水调 节系统采用经典的串级三冲量控制策略如图 1 所 示,图中分别给出水位给定值(L_{ref})、水位控制器 (C_L)、流量控制器(C_F)、阀门对象(G_V)、蒸汽发生 器水位对象(G_{SC})、前馈增益(k_{ff})、蒸汽流量(q_{sl})和 给水流量(q_{fw})。对于 15% 以下负荷,由于给水流量 测量不准确,给水调节系统采用带蒸汽流量前馈的 单回路控制策略。受篇幅所限,本研究仅采用所提 方法整定中高负荷(30%~100% FP)下的主控制器 的参数。 高负荷下副调节器(即流量调节器)采用比例 控制律。因为副变量调节精度要求不高,因此其参 数较容易整定,其比例系数整定原则为尽量使各种 工况下流量调节比较迅速。比例系数取 0.833,副 反馈增益取 1。

因副回路惯性时间常数很小,采用蒸汽扰动静 态前馈就能获得良好的控制效果。前馈通道的比例 系数取2.200。



图 1 蒸汽发生器水位前馈 - 反馈 串级三冲量控制方框图

Fig. 1 Block diagram of the feed forward – feedback cascade three impulse water level control in a steam generator

2.2 仿真模型

本研究采用的仿真模型为 E. Irving 提出的蒸汽 发生器集中参数模型^[7]:

$$y(s) = \left(\frac{G_1}{s} - \frac{G_2}{1 + \tau_2 s}\right) (q_{m fw} - q_{m st}) + \frac{G_3 s}{\tau^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau^{-1} s + s^2} q_{m fw}$$
(28)

式中: $q_{m,fw}$ 一给水流量; $q_{m,st}$ 一蒸汽出口流量; y一蒸汽发生器的水位。

式(28)中, $G_2 \ , G_3 \ , \tau \ , \tau_2 \ , T$ 随功率不同取值 不同。表1给出各参数在 $30\% \ , 50\% \ , 100\%$ 额定功 率点处的值。

主给水阀的传递函数可取^[8]:

$$G_{v}(s) = e^{-0.5s} \left[1/(1 + 2\frac{\varepsilon}{\omega}s + \frac{s^{2}}{\omega^{2}}) \right]$$
 (29)

其中, $e^{-0.5s}$ 为纯滞后传递函数,它考虑了发出 开启信号和实际打开阀门之间的阀门响应时间。 ε =1.028 ω =3.112 rad/s。

- 2.3 主控制器参数的整定
- 2.3.1 本研究所提方法整定

广义主对象的传递函数为:

$$G_{\rm gm} = \frac{K_{\rm p}G_{\rm v}G_{\rm FW}}{1 + K_{\rm p}G_{\rm v}G_{\rm FW}}$$
(30)

其中,*G*_{FW}为蒸汽发生器给水流量到水位的传 递函数,即:

$$G_{\rm FW} = \frac{G_1}{s} - \frac{G_2}{1 + \tau_2 s} + \frac{G_3 s}{\tau^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau^{-1} s + s^2}$$
(31)

表1 蒸汽发生器水位各参数的值

Tab. 1 Values of various parameters of the

water level in a steam generator

	相对功率/%		
	30	50	100
G_1	0.058	0.058	0.058
G_2	1.830	1.050	0.470
G_3	0.310	0.215	0.105
$ au_2$	4.500	3.600	3.400
au	43.400	34.800	28.600
Т	17.700	14.200	11.700

为了兼顾 30% 和 100% 工况点下的调节品质, 选择 50% 工况点模型为标称模型设计中高负荷下 的控制器。开环幅频曲线上下界确定是否合适对控 制效果影响很大。在分析对象的幅频特性后,选取 如表 2 所示的控制点。对这些控制点做插值和平滑 化处理,即可得到幅频曲线的上界。和下界。。

表 2 开环幅频曲线上下界控制点

Tab. 2 Upper and lowerlimit control points on the open loop plant amplitude – frequency curves

频率/rad•s ⁻¹	幅值下界	幅值上界
10 -3	10 ²	10 ⁵
10 -2	10 ¹	10^{4}
10 -1	10 ^{0.25}	10 ²
10 -0.5	10^{0}	10 ¹
10 ⁰	10 -0.5	10 ^{0.5}
10 ^{0.5}	10 -1.5	10 - 0.5
10 ¹	10 - 3	10 -1.5
10 ²	10 - 8	10 - 2
10 ³	10 -11	10 - 2

初始权函数取 $W_0 = 1$ 。取 10^{-3} rad/s 到 10^3 rad/s 区间内等对数间隔 50 个点为优化频率点。优化后的 W和对应静态控制器 K_{∞} 和最大鲁棒稳定裕量如表 3 所示。

2.3.2 其它H_∞成形整定方法

为了对比所提方法的有效性,给出其它两种基 于H_∞成形方法的控制器设计方法。

方法一采用文献 [19] 给出的带梯度约束的权 函数优化算法,并结合传统H_∞LSDP 综合法^[6] 求解 控制器。以下简称为 SWOS (Smooth Weight Optimization &Standard H_∞ controller synthesis)。该方法中 需要采用复倒谱算法拟合权函数,要取得较小的拟 合误差,一般要求需要较高阶次的权函数。梯度限 制取 80 dB/dec。权函数阶次取使得拟合误差最小 的阶次。而权函数阶次过高会导致 PID 型控制器综 合算法求解失败。

方法二采用的权函数优化方法同 SWOS,但结合本研究所提方法求解控制器。以下简称为 SWOPID (Smooth Weight Optimization & PID typeH_a Controller Synthesis)。对于本研究的被控对象,计算发现若取 二阶以上的权函数都会导致控制器求解失败。为了 尽量减少拟合误差 梯度限制取 15 dB/dec。

方法三为本研究所提方法,即本研究超前滞后 型权函数优化算法结合 PID 型 H_a 回路成形控制器 综合算法。以下简称为 LLSWOPID (Lead – Lag Structured Weight Optimization& PID type H_a Controller Synthesis)。

2.3.3 权函数和控制器参数

上述方法采用的权函数参数、控制器参数如表 3 所示。

衣う	权凶奴和拴利益梦奴	

Tab. 3 Weight function and parameters of the controller

	权函数阶次	控制器阶次	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{max}}$
SWOS	十阶($W_1 = W_{m1}$)	二十六阶	0.2323
SWOPID	二阶 一阶($W_1 = W_{m2}$)	二阶(PID)	0.0391 0.0479
LLSWOPID	一阶($W_1 = W_{m3}$)	二阶(PID)	0.2097

表中, $W_{m1} = (0.1412s^{10} + 15.01s^9 + 732.5s^8 + 2146s^7 + 6249s^6 + 5297s^5 + 1756s^4 + 835.3s^3 + 1.976s^2 + 0.008287s + 2.841 × 10^{-6}) / (s^{10} + 12.52s^9 + 136.3s^8 + 420.9s^7 + 1034s^6 + 1042s^5 + 770.3s^4 + 153s^3 + 0.3347s^2 + 0.0002526s + 1.474 × 10^{-7})$

$$W_{m2} = \frac{7.39s + 0.6423}{s + 0.00144}$$
$$W_{m3} = \frac{8.903s + 4.773}{0.945s + 1}$$

SWOPID 求得的 PID 控制器参数 $K_{\rm p} \, \times \, K_{\rm I} \, \times \, K_{\rm D} \, \times \, \tau$ 分别为 1.6494、0.0305、3.0356、5。

LLSWOPID 求得的 PID 控制器参数 $K_P \, {}_{N} \, {}_{N}$

由表 3 可见, SWOS 所得控制器阶次高达二十 六阶,对应控制系统的鲁棒裕量却只略大于 LLSWOPID 所得鲁棒裕量。可见并不是权函数或控 制器阶次越高,鲁棒裕量就越大。

图 2、图 3 和图 4 给出了 LLSWOPID、SWOPID、 SWOS 所得成形后对象的奇异值。比较图 2 和图 4 可得 相比于 LLSWOPID 所得成形后对象 ,SWOS 所 得成形后对象在中频段更为平滑,低频段增益更高, 但并没有显著增加穿越频率值,也没有显著减小中 频段斜率。另外,由于拟合权函数时存在拟合误差, SWOS 所得成形后对象的奇异值曲线在 0.001 6 rad/s 附近低于奇异值下边界。

由图 3 可以看出,SWOPID 所得成形后对象在 低频段增益更高,但并没有显著增加穿越频率值,也 没有显著减小中频段斜率。同样,由于拟合误差,成 形后对象的奇异值曲线在 0.177 8 rad/s 附近高于 奇异值上边界。







2.3.4 整定结果比较

对蒸汽发生器高负荷水位控制系统进行仿真, 在 50 s 加入 200 mm 的水位给定值阶跃变化 400 s 时蒸汽流量增大 80 kg/s。3 种整定方法所得控制 系统在 30%、50% 和 100% 工况下控制效果如图 5、 图 6 和图 7 所示。



图 3 成形前/后对象奇异值曲线 及其上、下边界(SWOPID)













Fig. 5 Water level response o the stepped change of the set point under various operation conditions (LLSWOPID)



图 6 不同工况下水位对给定值阶 跃变化的响应(SWOPID)





图 7 不同工况下水位对给定值阶 跃变化的响应(SWOS)



从图 5、图 6 和图 7 可以看出 在 50% 负荷下本 研究所提方法设计的控制系统,在超调量、稳态误 差、调节时间和鲁棒稳定性上均优于作为对比的两 种方法。虽然表 3 中给出 SWOS 所得鲁棒裕量值更 大,但由图 4 可看出,在 0.1778 rad/s 附近存在近似 零极点对消现象(进一步增强梯度约束条件,如取 15 dB/dec,可缓解或避免这种现象,但也会造成鲁 棒稳定裕量减小^[19]),因而实际鲁棒稳定性并不能 够得到保证。

实际上 对于控制系统的H_∞LSDP 控制器设计 不能片面追求鲁棒裕量指标 而要根据被控对象的特性

第4期

设定合理的回路形状要求以及控制器的阶次与结构。

3 结 论

本研究提出了一种基于 LMI 的超前滞后型权 函数优化算法,并结合该算法与 PID 型H_∞控制器综 合法,给出了一种系统的鲁棒 PID 控制器H_∞LSDP 优化设计方法。基于该方法整定了蒸汽发生器水位 控制系统 PID 型主控制器的参数,仿真结果证实了 用所提方法整定的控制系统,具有良好的鲁棒稳定 性和鲁棒性能,其综合控制品质优于作为对比的两 种H_∞LSDP 方法。

所提方法设计的控制系统与 SWOS、SWOPID 设 计的控制系统的对比结果表明:在 30% FP、50% FP 和 100% FP 下负调量降低至少 50% FP;在 50% FP 和 100% FP 工况下均无超调;在 30% FP、50% FP 和 100% FP 工况下询节时间缩短至少 15%;在工况变 为 100% FP 和 30% FP 时 均能保持系统稳定。

参考文献:

- ZHOU Gang ZHANG Da-fa ,YANG Shi-ben. Simulation and Analysis on Dynamics Characteristic for Nuclear Steam Generator Water Level Process [J]. Journal of System Simulation 2006 ,18(12): 3383 – 3386.
- [2] 米克嵩 谷俊杰 徐培培. 内模控制方法在核电厂蒸汽发生器 水位系统的应用[J]. 核动力工程 2010 31(6):29-32.
 MI Ke-song GU Jun-jie XU Pei-pei. Application of internal model control methods in the water level control systems of the steam generators in a nuclear power station[J]. Nuclear Power Engineering, 2010 31(6): 29-32.
- [3] 邓志红,施小成,夏国清,等. 核电厂蒸汽发生器的容错控制
 [J].核动力工程 2010,107-111.
 DENG Zhi-hong SHI Xiao-cheng,XIA Guo-qing et al. Fault tolerant control of the steam generators in nuclear power stations [J].
 Nuclear Power Engineering 31(1):107-111.
- [4] 陈 智 张 英 张 帆 筹. 岭澳核电站蒸汽发生器水位控制 系统改进方案仿真研究[J]. 核动力工程 2010 66-70. CHEN Zhi ZHANG Ying ZHANG Fan et al. Simulation study of the versions for improving the water level control system in the steam generators in Lingao Nuclear Power Station [J]. Nuclear Power Engineering 2010 31(4):66-70.
- [5] 董化平,张建民. 秦山第二核电厂蒸汽发生器液位控制系统 PID 参数整定[J]. 核动力工程 2005 26(3):272-276. DONG Hua-ping ,ZHANG Jian-min. PID parameter setting of the liquid level control system in the steam generators in Qinshan No.2 Nuclear Power Station [J]. Nuclear Power Engineering 2005 26 (3):272-276.
- [6] McFarlane D C ,Glover K. Aloop shaping design procedure using H ∞ synthesis [R]. IEEE Trans AC ,1992.
- [7] E. Irving ,C. Miossec ,Tassart J. Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive con-

trol [C] //Proc. 2nd Int. Conf. Boiler Dynamics and. Control in Nuclear Power Stations. BNES London ,1980: 309 - 329.

- [8] 张建民. 压水堆核电站控制 [R]. 深圳: 广东大亚湾核电站培 训中心,1998:113-154. ZHANG Jian-ming. Pressurizedwater reactor control in a nuclear power station [R]. Shenzhen: Guangdong Daya Bay Nuclear Power Station Training Center,1998:113-154.
- [9] 陈 红,曾 建,王广军. 蒸汽发生器水位的自抗扰控制[J].
 中国电机工程学报 2011 30(32):103-107.
 CHEN Hong ZENG Jian ,WANG Guang-jun. Self disturbance-resistant control of the water level in a steam generator [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2011 30(32): 103-107.
- [11] Jong JooSohn Poong Hyun Seong. A steam generator model identification and robust H_∞ controller designwith m-gap metric for a feedwater control system [J]. Annals of Nuclear Energy 2010 ,37 (2):180-195.
- [12] Alexander Lanzon. Weight optimization in loop-shaping [J]. Automatic 2005 41:1201 – 1208.
- [13] 曾丽兰,王道波. 一种改进的 H_∞回路成形权重函数优化选 取方法[J]. 信息与控制 2006 35(4):487-492.
 ZENG Li-Jan, WANG Dao-bo. Improved method for optimizing and choosing weight functions in the formation of H_∞ loop [J]. Information and Control 2006 35(4):487-492.
- [14] 王海泉, 郭迎清, 祁新杰. 多目标遗传算法在 H_∞ 鲁棒控制器 设计中的应用[J]. 推进技术 2009 30(4):468 - 473.
 WANG Hai-quan ,GUO Ying-qing ,QI Xin-jie. Applications of the multi-target genetic algorithm in the robust design of H_∞ controllers [J]. Propulsion Technology 2009 30(4):468 - 473
- [15] Shu Katayama ,Kazuhiro Yubai Junji Hirai. Iterative Design of the Reduced-Order Weight and Controller for the H_∞ Loop-Shaping Method Under Open-Loop Magnitude Constraints for SISO Systems [J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELEC-TRONICS 2009 56(10): 3854 – 3863.
- [16] SomyotKaitwanidvilai ,PiyapongOlranthichachat. Robust loop shaping-fuzzy gain scheduling control of a servo-pneumatic system using particle swarm optimization approach [J]. Mechatronics , 2011 21:11-21.
- [17] 李凤宇 涨大发 王少明 等. 基于遗传算法的蒸发器水位 PID 控制研究[J]. 原子能科学技术 2008 42(B09):137-141.
 LI Feng-yu ZHANG Da-fa ,WANG Shao-ming et al. Study of the water level PID control in a steam generator based on the genetic algorithm[J]. Atomic Energy Science and Technology 2008 42 (B09):137-141.
- [18] 彭 威 张大发. 基于改进粒子群算法的蒸汽发生器水位控制优化[J]. 船海工程 2010 39(5):208-210.
 PENG Wei. ZHANG Da-Fa. Optimization of the water level control in a steam generator based on improved particle swarm algorithm [J].
 Ship and Ocean Engineering 2010 39(5):208-210.
- [19] Osinuga ,M ,Patra ,S ,Lanzon. Smooth weight optimization in H_ infinity loop-shaping design [J]. A Systems and Control Letters. 2010; 59(11):663-670.
- [20] AU Genc ,Astate-space algorithm for designing H _∞ loop shaping PID controllers , tech. rep. [R], Cambridge University , Cambridge ,UK ,Oct. 2000.

(陈 滨 编辑)

430223) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4). - 386 ~ 389

By adopting the weight-gaining scanning electronic microscopy (SEM) ,X-ray diffraction analysis and line scanning analysis etc. methods studied was the oxidation of Super304H steel caused by steam. It has been found that the oxidation rate of Super304H steel at 400 °C approaches to a straight line and is more close to a parabola at 400 °C and above. The oxide film is of double-layer structure ,the outer layer of which is mainly composed of Fe_3O_4 ,being bulky particles and loosely arranged while the inner layer of which is mainly composed of $FeCr_2O_4$,being slim and small particles and compactly arranged. **Key words**: supercritical ,high temperature oxidation caused by steam Super304H steel

电站锅炉低 NO_x 燃烧建模优化研究与应用 = Optimization Study and Application of the Modeling of the Low NO_x Combustion of a Utility Boiler [刊 ,汉] WANG Chun-lin ZHANG Le (Hangzhou University of Electronic Science and Technology Hangzhou ,China ,Post Code: 310018) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4). - 390 ~ 394

To reduce the NO_x emissions of utility boilers ρ ptimized and controlled was the combustion of a boiler to utilize the test data and a large number of on-line acquired operation data of the NO_x emission characteristics of an actual boiler respectively to study how to establish a model based on the supporting vector machine algorithm and BP neural network algorithm. On this basis the performance of the modeling based on both algorithms under different data for modeling was compared. It has been found that the supporting vector machine model is superior to BP neural network model in terms of the generalization ability. The supporting vector machine algorithm was used in combination with the genetic algorithm to conduct an actual combustion optimization test of a 330 MW pulverized coal-fired boiler ,lowering the NO_x emissions of the boiler from 708.5 mg/m³ to 576.1 mg/m³. This shows that the method in question is an effective combustion optimization method for boilers to reduce NO_x emissions. **Key words**: boiler , NOx supporting vector machine ,BP neural network

蒸汽发生器水位 PID 控制器的 H_∞回路成形优化 = H_∞ Loop Shaping Optimization of the Water Level PID (Proportional Integral and Differential) controller of a Steam Generator [刊 ,汉]LIU Yu-yan ZHOU Shi-liang(College of Control and Computer Engineering ,College of Nuclear Science and Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4). - 395 ~ 401

In the light of such specific features as difficulty in setting the PID parameters of the main controller of the water level feed-forward and feed-back cascade three-impulse control system of a U-shaped steam generator and a high standard set for the robustness presented was a systematic method for setting the PID parameters. The method under discussion combined PID type $H\infty$ loop shaping controller comprehensive algorithm with the first-order forward and lagging-behind type weight function optimization algorithm given by the authors. The optimized PID controller can maximize the robustness stability allowance of the system under the precondition of a certain control quality being ensured and the whole optimization algorithm is based on the linear matrix inequation technology and has a low calculation cost. The method under discussion was used to set the parameters of the main controller of the water level control system of a steam generator. The simulation results show that the water level control system set by using the method in question can achieve a relatively good robustness and robust stability and the comprehensive control quality is superior to that achieved by using the method combining the high/low order weight function optimization algorithm with the standard $H\infty$ loop shaping controller comprehensive algorithm. **Key words**: loop shaping ,weight function optimization Jinear matrix inequation steam generator water level control

料仓内超浓粉体卸料的数值模拟及实验研究 = Numerical Simulation and Experimental Study of the Discharging of Super Concentrated Powder from a Bunker [刊 汉]LI Han-ming ZHU Hong-fei SUN Shan-shan, YUAN Zu-lin (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2013 28(4). – 402 ~ 408

To solve the key problem existing in the study of the numerical simulation of the flow characteristics of super concentrated powder presented was a new mathematic model for depicting the discharging process of powder in a bunker. On the basis of the discrete model for particles ,the model in question was established by depicting the solid phase concentration and the particle swarm movement characteristics in a local space ,thus capable of effectively simulating the discharging and accumulation process of powder in the bunker. The model under discussion was used