

基于结构奇异值 μ 综合的热轧带钢AGC鲁棒控制

杨斌虎, 杨卫东, 陈连贵

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于鲁棒结构奇异值 μ 理论, 建立了热轧带钢AGC的鲁棒控制模型, 把AGC系统中分散的摄动集中成一个对角阵进行描述, 分析了 μ 综合控制在热轧带钢中的摄动抑制机理, 应用鲁棒稳定与鲁棒性能准则约束条件, 设计了热轧带钢AGC μ 控制器. 仿真结果表明 μ 综合控制能有效地抑制AGC系统中的摄动, 对模型不确定性具有很好的鲁棒性.

关键词: 自动厚度控制; 鲁棒控制; μ 综合控制; 结构奇异值

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust μ synthesis control for AGC system in hot rolling processing

YANG Bin-hu, YANG Wei-dong, CHEN Lian-gui

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on structural singular value μ theory, dispersive perturbation in AGC system is concentrated to a diagonal matrix, the robust control model for AGC system in hot rolling processing is built, and the disturbance attenuation mechanism of μ synthesis is analyzed. The μ synthesis controller for AGC system is designed by adopting robust stabilization and robust performance restriction rule. The simulation results indicated that μ synthesis control is effective on disturbance attenuation under the condition of perturbations.

Key words: automatic gauge control; robust control; μ synthesis control; structural singular value

1 引言(Introduction)

厚度精度是热轧带钢质量控制的主要指标, 自动厚度控制(automatic gauge control, 简称AGC)系统对带钢全长厚度偏差进行控制. 传统AGC的理论基础是弹跳方程, 各种影响厚度控制精度的因素通过参数补偿的方式, 带入到弹跳方程中, 然后调节压下进行控制^[1], 这种建立在经典控制理论基础上的AGC并未充分考虑系统结构和参数变化的不确定性. 事实上, 不确定性存在于整个轧制过程中, 由此造成厚度控制精度难以得到根本改善. 现代鲁棒控制理论充分考虑不确定性对系统的影响, 所设计的控制器能使系统的性能指标在不确定性的情况下保持不变. 比较成熟的 H_∞ 鲁棒控制采用适当传递函数的 H_∞ 范数来描述系统, 使系统鲁棒稳定与鲁棒性能在一定约束条件下同时得到满足, 因此获得了广泛的应用, 但这种方法适用于摄动比较集中的系统, 如果被控对象存在多个摄动源时保守性较大. 在实际系统中, 摄动源总是很分散的, 把分散的不

确定性集中成一个对角阵的控制方法称为 μ 综合控制^[2], μ 综合控制可以把稳定鲁棒性与性能鲁棒性有机的结合起来^[3], 因此受到越来越多的关注. 本文运用 μ 方法设计了热轧带钢AGC鲁棒控制系统, 使得系统在受到多种不确定扰动的情况下仍能保持良好的鲁棒性, 仿真结果表明, 这种控制是有效的.

2 μ 综合控制机理^[2~5](Mechanism of μ synthesis control)

鲁棒控制中关于不确定性的描述, 是相对于标称模型而言的, 所谓标称模型就是模型的已知部分. 对于摄动比较集中的系统, 不确定性可以通过估计其上确界, 用 H_∞ 范数条件约束来实现鲁棒性能的满足. 当摄动比较分散时, 实际系统中的结构不确定性用块对角矩阵表示为

$$\Delta = \{\text{diag}\{\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_S I_{r_S}, \Delta_1, \dots, \Delta_F\}\}. \quad (1)$$

式中: $\delta_i \in \mathbb{C}$, $\Delta_j \in \mathbb{C}^{m_j \times n_j}$, $\sum_{i=1}^S r_i + \sum_{j=1}^F m_j = n$.

对于如图1所示的标准反馈系统, w 为评价控制性能与模型摄动的外部输入向量, z 为评价控制性能与模型摄动的输出向量, 不确定性用式(1)定义的 Δ 表示, 系统传递函数矩阵 $M \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 的结构奇异值 μ 定义为

$$\mu_{\Delta}(M) = (\min\{\sigma_{\max}(\Delta|\det(I - M\Delta) = 0)\})^{-1}. \quad (2)$$

式中: $\mathbb{C}^{m \times n}$ 表示复数域, $\sigma_{\max}(\Delta)$ 表示 Δ 的最大奇异值.

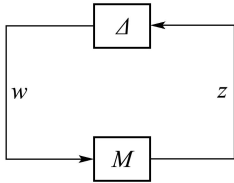


图1 鲁棒稳定问题

Fig. 1 Robust stabilization

设 P 为包含标称对象模型和不确定加权函数的系统模型; K 为 μ 反馈控制器, 则对应的 μ 综合控制方框图如图2所示.

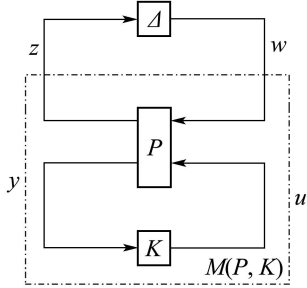


图2 μ 综合控制方框图

Fig. 2 μ synthesis control structure

图中: y 是量测输出; u 为控制输入. 闭环系统 $M \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 的结构和性质由 P 在 K 的作用下决定, 其线性分式表达式为

$$M = F_l(P, K) = P_{11} + P_{12}(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}. \quad (3)$$

引理 1 对于图1所示系统, 如果 $\|M\|_{\infty}$ 有界, 对满足 $\|\Delta\|_{\infty} < \gamma$ 的所有摄动, 闭环系统鲁棒稳定的充分必要条件是

$$\sup_{\omega} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) \leq \frac{1}{\gamma}. \quad (4)$$

引理 2 当系统含稳定摄动 Δ , 且满足 $\|\Delta\|_{\infty} < 1$ 时, 其鲁棒稳定条件等价于使闭环系统 $M \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 内部稳定, 并使 w 到 z 的标称闭环传递函数矩阵 $F(G, K)$ 的 H_{∞} 范数满足 $\|F(G, K)\|_{\infty} \leq 1$. 而闭环系统 $M \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 内部稳定, 且 $\|F(G, K)\|_{\infty} \leq 1$, 等价于在其输入输出信号 w 和 z 之间接上一个满足不等式 $\|\Delta\|_{\infty} < 1$ 的稳定假象摄动时, 整个闭环系统鲁棒稳定.

根据以上引理, 系统鲁棒稳定性的条件是存在控

制器 K , 使得 $\sup \mu_{\Delta}(M(j\omega)) < 1$. 系统在模型不确定性的影响下, 能有效抑制干扰 w 的条件是

$$\|T_{ew}\|_{\infty} = \|F_U(F_L(P, L), \Delta)\| \leq 1, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \|\Delta_P\| \leq 1, \quad (6)$$

$$\sup \mu_{\Delta}(M(P, K)) < 1. \quad (7)$$

从 μ 综合的角度, 需要把鲁棒性能条件转换为 μ 条件, 相应的把鲁棒性能控制转换为 μ 综合控制, 控制的核心问题是求解合适的 μ 值, 使其对应的控制器 K , 令下式满足

$$\sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) < 1, \quad (8)$$

即

$$\inf \sup \mu_{\Delta}(M(j\omega)). \quad (9)$$

由于 K 值难以确定, $\mu_{\Delta}(M(P, K))$ 近似为 $\min(\sigma(DF_L(P, K)D^{-1}))$, 这样 μ 综合问题就是

$$\inf_{k \in k_l} \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \inf_{D \in D} \sigma\{(DF_L(P, K)D^{-1})(j\omega)\}. \quad (10)$$

式中 k_l 是能使控制对象 P 稳定的实有理控制器的集合. μ 控制器的求解可以通过交替运用 Riccati 方程设计 H_{∞} 控制器 K , 然后根据设计的 K 用 μ 值进行系统鲁棒稳定性和鲁棒性能的寻优, 常用的寻优方法是 D - K 递推设计法. 这种方法要利用 μ 的上界性质(最大奇异值最小化问题是凸优化问题), 首先在 D 不变的条件下, 用 H_{∞} 理论最小化 K 求出 K 的最优解; 再在 K 不变的条件下, 求出 D 的最优估计矩阵, 这样, 反复迭代, 交替优化, 最后得到最优控制器^[6] K .

3 热轧带钢AGC系统 μ 鲁棒控制综合 (μ synthesis robust control of AGC system for hot strip milling)

根据以上分析, 本文的目的就是要为厚度设定模型设计反馈控制器 K , 使其在参数不确定性的影响下, 仍能保持系统闭环稳定, 且对外扰的衰减程度满足 $\|T_{ew}\|_{\infty} < 1$.

传统AGC的系统结构^[7~9]如图3所示, 图中: P 为被控对象(轧机), K 为控制器, r 为给定信号. 对 r 的设置, 有绝对AGC与相对AGC两种方法. 控制的目的是使得在轧辊压下的作用下, 轧件厚度与给定值一致, 并同时抑制模型摄动及各种噪声干扰.

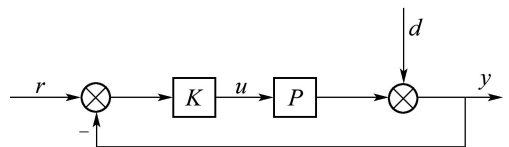


图3 AGC系统结构图

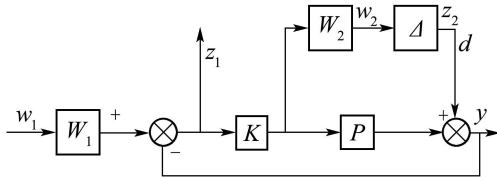
Fig. 3 Structure of AGC system

造成热轧带钢厚度偏差的主要原因^[1,2]可以从轧件与轧机两方面得到解释, 从轧件方面主要是温度波动造成的来料温度不匀、水印、来料厚度不匀等, 温度波动通过“硬度”即变形抗力值的形式对轧辊轧制力产生影响, 并最终影响到出口厚度值上. 从轧机方面主要原因是轧件参数波动, 如支撑辊偏心、轧辊热膨胀、轧辊磨损等. 考虑以上这些因素, 传统的基于弹跳方程的AGC出口厚度计算公式为

$$h = S_0 + \frac{P - P_0}{C_P} + \frac{F}{C_F} + O + G. \quad (11)$$

式中: h 为轧件厚度, S_0 为空载辊缝, P 为轧制力, P_0 为预压靠力, C_F 为辊系对弯辊力的刚度, F 为弯辊力, O 为油膜轴承的油膜厚度, G 为辊缝零位, C_P 为轧机机座刚性系数.

由于摄动的广泛分布与系统未建模特性的影响, 由上式反映的厚度控制模型鲁棒性较差, 利用 μ 控制机理, 把广泛分布的摄动集中成一个对角阵进行描述, 对应的控制结构图如图4所示. 图中, W_1 为输入加权函数, 用来滤除控制输入中的高频信号, W_2 为摄动加权函数.

图4 AGC μ 综合控制图Fig. 4 μ synthesis control of AGC

设系统状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ z(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_V} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{ASR}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_\sigma V_R}{T_\sigma} \left(\frac{\partial f}{\partial S} \right) & -\frac{K_\sigma (1+f^*)}{T_\sigma} & -\frac{1}{T_\sigma} & 0 & \frac{K_\sigma L_\theta}{g T_\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{g} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{A_\theta L_\theta}{J} & 0 & -\frac{\phi K_1 T_1}{J} & \frac{\phi}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_V} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{ASR}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\phi K_1 T_1}{J} & K_1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{C_P}{C_P + Q} & 0 & \frac{1}{C_P + Q} \left(\frac{\partial P}{\partial \sigma} \right)^* & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

式中: $x(t) = [\Delta S, \Delta V_R, \Delta \sigma, \Delta \theta, \Delta \omega, \Delta I]^T$, $u(t) = [\Delta S_r, \Delta V_{Rr}, \Delta \omega_r]^T$, $y(t) = [\Delta h]^T$, $\Delta S_r, \Delta V_{Rr}, \Delta \omega_r$ 分别为轧机辊缝、轧辊圆周速度和活套电机转速的设定值变化量, 它们作为系统输入向量, 输出为带钢出口厚度. 对应的状态向量为: ΔS 为辊缝的变化量, ΔV_R 为轧辊的圆周速度, $\Delta \sigma$ 是机架间的张应力, $\Delta \theta$ 为活套角的变化量, $\Delta \omega$ 为活套电机的角速度, Q 为轧件塑性刚度, 矩阵内参数意义详见参考文献[9].

对应的系统传递函数阵为

$$P(S) = C(SI - A)^{-1}B. \quad (16)$$

系统的鲁棒输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}. \quad (17)$$

式中

$$G(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) & 1 & -P(s) \\ 0 & -W_2(s) & W_2(s)P(s) \\ W_1(s) & 1 & -P(s) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

这里: $w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$, $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$.

对 $G(s)$ 分块, 则输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}, \quad (19)$$

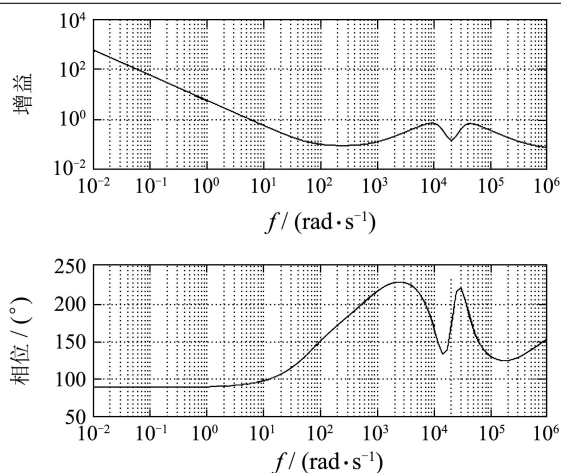
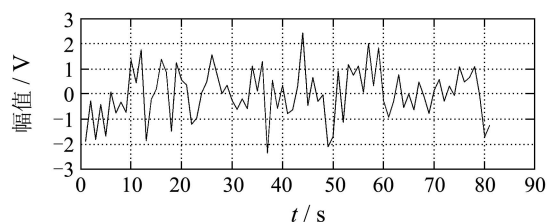
则 z 到 w 的闭环传递函数为

$$H_z w(s) = G_{11}(s) + G_{12}(s)K(s)[I + G_{22}(s)K(s)]^{-1}G_{21}(s). \quad (20)$$

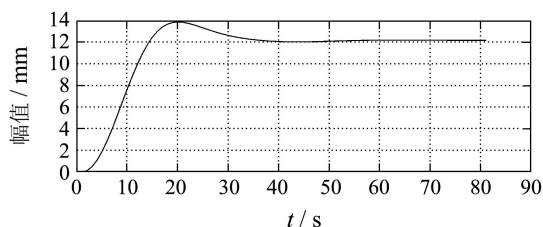
由 $\|H_{zw}\|_\infty < 1$ 交替迭代D-K, 求得对应 K 值.

4 μ 控制系统仿真(Simulation of μ control system)

以某钢厂七机架精轧机组F4机架为例, 考查系统的摄动抑制能力, 具体轧制规程为: $B = 1200 \text{ mm}$, $Q = 235$, $R = 380 \text{ mm}$, $H_0 = 32 \text{ mm}$, $h_7 = 2.0 \text{ mm}$, $FT_0 = 1020^\circ \text{C}$, $FC = 870^\circ \text{C}$. 运用MATLAB中的Simulink和Robust Control Toolbox, 建立数字仿真系统进行仿真, 加权函数选择为: $W_1 = \frac{1}{s+10}$, $W_2 = \frac{0.5(s+10)}{s+200}$, 采用D-K迭代法, 经过二次迭代后的 $f_i(P, K)$ 的最大奇异值 $\sigma_{\max}$ 和 μ 控制器Bode图如图5所示, 此时 $\mu = 0.95$. 将所得的控制器带入系统中, 则系统在随机噪声信号下的响应曲线如图6所示. 从图中可知系统在不确定性影响的情况下, μ 综合控制能使系统在保持鲁棒稳定性的情况下取得有很好的性能鲁棒性.

图5 μ 控制器Bode图Fig. 5 Bode graph of μ synthesis control

(a) 随机噪声信号



(b) F4 机架AGC系统响应

图6 系统扰动及响应

Fig. 6 Response of system to perturbations

5 结论(conclusion)

热连轧是个典型的多变量复杂系统,不确定性分布于整个轧制过程中,基于 μ 综合理论的AGC控制器既保证了系统的鲁棒稳定性,又保证了系统的鲁棒性能,对系统内部多方面的摄动能够得到有效的抑制,仿真结果表明这种控制方法对模型参数不确定性,具有很好的稳定鲁棒性和性能稳定性。

需要指出的是,由于实际轧制过程的复杂性,要保证AGC系统的最优鲁棒性能,还需考虑多变量的约束条件。

参考文献(References):

- [1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
(SUN Yikang. *Model and Control of Hot Strip Milling*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002.)
- [2] DOYLE J C. A review of μ for case studies in robust control[C]//*Proceedings of the IFAC 10th Triennial World Congress*. Munich, FRG: Pergamon Press, 1988, 8: 365 – 370.
- [3] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [4] Lin J L. μ -K iteration: A new algorithm for μ -synthesis[J]. *Automatica*, 1993, 29(1): 219 – 224.
- [5] BALAS G J, DOYLE J C, GLOVER K. *μ -Analysis and Synthesis Toolbox*[M]. Natick, Ma: The Math Works Inc, 1994.
- [6] 李连峰, 王广雄, 姚远. 全局最优鲁棒控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 266 – 269.
(LI Lianfeng, WANG Guangxiong, YAO Yuan. Global optimal robust controller design[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2): 266 – 269.)
- [7] OKADA M, MURAYAMA K, URANO A, et al. Optimal control system for hot strip finishing mill[J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(8): 1029 – 1034.
- [8] HEARNS G, GRIMBLE M J. Robust multivariable control for hot strip mills[J]. *Isij International*, 2000, 40 (10): 995 – 1002.
- [9] ASANO K, YAMAMOTO Kazuhiro, KAWASE T, et al. Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(3): 337 – 344.
- [10] 何虎, 孙一康. 热连轧活套系统分析与控制方式比较[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(5): 482 – 485.
(HE Hu, SUN Yikang. System analysis and control method Compare of looper for hot strip milling[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2000, 22(5): 482 – 485.)

作者简介:

杨斌虎 (1971—), 男, 北京科技大学博士生, 研究领域为自适应控制、鲁棒控制, E-mail: yangbinhu@sina.com;

杨卫东 (1952—), 男, 北京科技大学教授, 博士生导师, 研究领域为轧制控制, E-mail: ywd1952@263.net;

陈连贵 (1970—), 男, 北京科技大学博士生, 研究领域为非线性控制, E-mail: clgui007@sina.com.