

板带热连轧机活套高度和张力系统的解耦控制*

张殿华 郑芳 王国栋

(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 沈阳 110005)

摘要 针对板带热连轧机活套的高度和张力控制系统,给出一种新的多变量解耦控制策略。通过逆 Nyquist 曲线对角占优性的强弱判定其耦合程度,并采用伪对角化方法使补偿后的活套高度和张力控制系统具有对角占优的特性。最后用 Matlab 中的系统仿真工具 Simulink 对活套多变量控制系统进行仿真实验,结果表明解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果。

关键词 活套系统,解耦,对角占优,Matlab

分类号 TP 273

Strip Tandem Hot Rolling Mill Loopers Height and Tension Decoupling Control

Zhang Dianhua, Zheng Fang, Wang Guodong
(Northeastern University)

Abstract An optimal multivariable looper control system based on new decoupling strategy has been developed for hot strip finishing mills. The variables coupling degree is determined by the diagonal dominance degree of inverse Nyquist curve. Through pseudo-diagonalisation compensating the loopers height and tension control system has the diagonal dominance characters. By using the Simulink toolbox of the Matlab language, the simulation results have shown that, after decoupled, the loopers control performance gets much better.

Key words looper system, decoupling, diagonal dominance, Matlab

1 引言

在板带热连轧机中采用活套控制轧制张力是热连轧的基本特征之一。若轧件所受的张力超过一定值,将产生一系列降低产品质量的不良后果,如轧件被拉窄和缩颈等。因此,对活套需进行双重控制,即活套高度控制和张力控制。

传统的活套控制是通过调整上游机架轧辊速度使活套高度维持在设定值附近,通过控制活套电机力矩使机架间张力恒定。在这种控制策略中,活套高度控制与张力控制是完全独立进行的,没有考虑二者之间存在的耦合关系。而实际情况是:活套高度变化时,机架间张力也发生变化,反之亦然。即活套高度与张力系统是一个典型的双输入/双输出耦合系

统。消除二者的耦合关系,使活套稳定工作,提高产品的尺寸精度,已成为活套控制的一个重要课题。自板带热连轧投入运行以来,有关这方面的研究就一直在进行。随着现代控制理论的发展,活套的控制方法也不断取得新的进展^[1]。

2 活套高度和张力的解耦控制设计

活套控制系统为双输入双输出结构,其动态结构如图 1 所示^[2,3]。图 1 中, σ^* 为带钢张应力设定值, θ^* 为活套高度(角度)设定值。轧机主电机和活套电机分别被等效成一个一阶惯性环节,右虚线框内为活套在工作基准点附近的线性化模型^[4]。系统的频率响应矩阵为

$$\begin{bmatrix} \sigma(s) \\ \theta(s) \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} v^*(s) \\ M^*(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

* 国家“九五”重点科技攻关项目(85-523-04-03)
1999-07-19 收稿,1999-09-08 修回

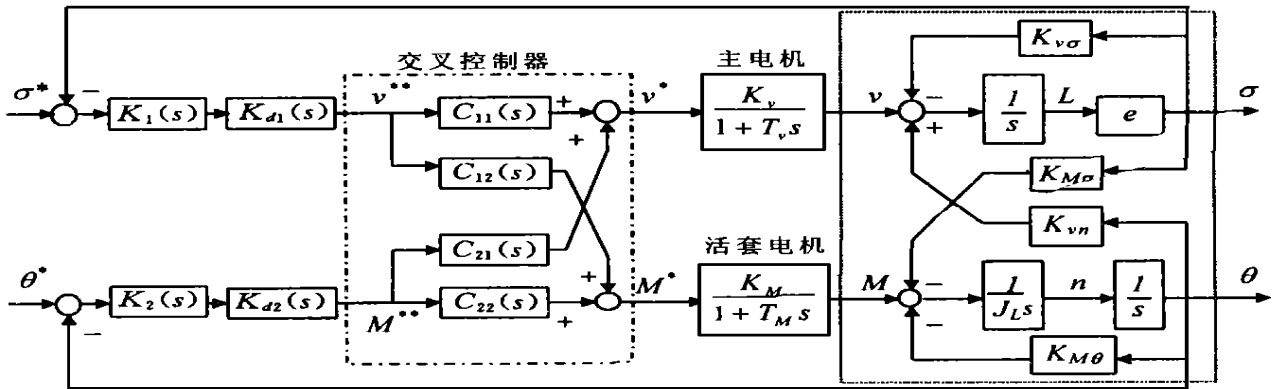


图 1 活套多变量解耦控制系统框图

式中, σ 为带钢张应力实际值, θ 为活套高度(角度)实际值, v^* 为活套高度调节主机速度附加值, M^* 为活套张力调节活套力矩设定值, $G(s)$ 为系统的传递函数矩阵。活套高度和张力的控制系统是一个双输入双输出的耦合多变量系统, 必须对其进行解耦, 才能获得良好的张力控制效果。

本文采用 Nyquist (NA) 法对系统进行解耦, 并用 Matlab 中的 MFD 工具箱对活套系统进行分析, 设计解耦交叉控制器 $C(s)$ 。

用 NA 法设计 $C(s)$ 的步骤为:

Step 1: 设计预补偿矩阵 $K_p(s)$, 使 $G(s)K_p(s)$ 为对角占优矩阵;

Step 2: 设计 $K_d(s)$, 用其对得出的对角占优矩阵做动态补偿。

其中求取 $K_p(s)$ 是关键, 它决定了最终设计结果。在实际应用中往往将 $K_p(s)$ 设计成最简单的常数矩阵形式。

首先做出原系统带有 Gershgorin 带的逆 Nyquist 曲线。若曲线包括圆点 (0, 0) 或离圆点很近, 则表明原系统为非对角占优, 可引入矩阵 $\hat{K}_{p1} = G(0)$ 对其进行补偿; 若逆 Nyquist 曲线仍不理想, 需选择 K_{p2} 对系统做进一步补偿, 补偿后的系统矩阵可达到对角占优。系统的逆 Nyquist 曲线由 MFD 给出^[4]。

对于 \hat{K}_{p2} , 许多学者提出了比较系统的方法对传递函数进行对角占优化。本文则采用一种最优化的方法来求取 K_{p2} , 该方法称为伪对角化方法 (pseudo-diagonalisation)。最终完成的 $K_p(s)$ 实际上就是 $C(s)$, 且

$$C(s) = \text{inv}(\hat{K}_{p1}) * \text{inv}(\hat{K}_{p2})$$

假设在 $j\omega$ 频率处系统传递函数矩阵的逆 Nyquist 阵列表示为

$$g_{ik}(j\omega) = \alpha_{ik} + j\beta_{ik}, \quad i, k = 1, 2, \dots, q \quad (2)$$

其中 q 为输出变量个数, 在此假定输入与输出个数相同。欲获得一个最优的补偿矩阵 K_p , 可采用如下步骤:

Step 1: 选择一函数的频率点 $j\omega$, 求出系统的逆 Nyquist 阵列 $g_{ik}(j\omega)$;

Step 2: 对各个 Y 值 ($Y = 1, 2, \dots, m; m$ 为逆 Nyquist 数据的列数), 构成一个矩阵 A_Y , 则有

$$a_{il}^Y = \sum_{k=1, k \neq l}^q [\alpha_{ik}\alpha_{kl} + \beta_{ik}\beta_{kl}] \quad (3)$$

$$i, l = 1, 2, \dots, q$$

Step 3: 求解 A_Y 矩阵的特征值与特征向量, 并将最小特征值对应的特征向量记作 k_Y ;

Step 4: 由上述各个 Y 值得出的最小特征向量构成补偿矩阵 K_p

$$K_p = [k_1, k_2, \dots, k_q]^T \quad (4)$$

以某 6 机架热连轧系统为例, 活套控制系统传递函数中各参数为

$$K_v = 1, \quad T_v = 0.0885s, \quad K_{v\sigma} = 0.3586$$

$$K_M = 0.5, \quad T_M = 0.0324s, \quad J_L = 0.0480$$

$$K_{M\theta} = 0.3428, \quad K_{M\sigma} = 0.0225$$

$$K_{v\theta} = 0.2631, \quad e = 2.1 \times 10^2 \text{ kN/mm}^2$$

所以系统的传递函数 $G(s) = D(s)/d(s)$ 为

$$d_{11}(s) = 1.143s^3 + 35.267s^2 + 8.160s + 251.867 \quad (5)$$

$$d_{12}(s) = 8.554s + 96.654 \quad (6)$$

$$d_{21}(s) = 536s + 16.532 \quad (7)$$

$$d_{22}(s) = 442s^2 + 16.662s + 131.775 \quad (8)$$

$$d(s) = s^5 + 59s^4 + 511s^3 + 603s^2 + 4.103s + 5.579 \quad (9)$$

按上述步骤与方法可求得

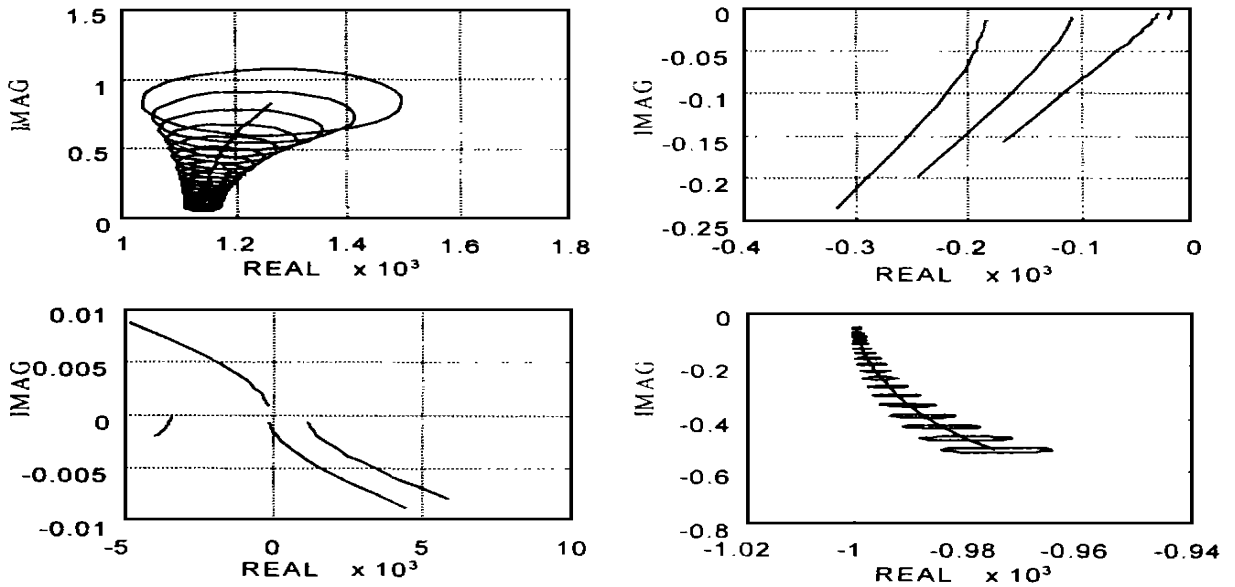


图2 $\hat{K}_{p2}, \hat{K}_{p1}$ 补偿后的逆Nyquist曲线

$$\hat{K}_{p1} = \begin{bmatrix} 45 & 12 & 17 & 32 \\ 2 & 96 & 23 & 62 \end{bmatrix}$$

$$\hat{K}_{p2} = \begin{bmatrix} 0 & 997 & 1 & 0 & 075 & 9 \\ - & 0 & 000 & 2 & - & 1 & 000 & 0 \end{bmatrix}$$

原系统经 K_{p2}, K_{p1} 补偿后, 其逆Nyquist 曲线如图2所示. 可见其对角占优性强, 系统得到了很好的解耦.

图1中的交叉控制器

$$C(s) = \text{inv}(\hat{K}_{p1}) * \text{inv}(\hat{K}_{p2})$$

即

$$C(s) = \begin{bmatrix} 0 & 023 & 3 & 0 & 018 & 8 \\ - & 0 & 002 & 9 & - & 0 & 044 & 7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为了改善系统的动态特性, 需设计 $K_d(s)$ 对得出的对角占优矩阵进行动态补偿. $K_1(s)$ 和 $K_2(s)$ 为PD 调节器, 在实际应用中, $K_d(s), K_1(s)$ 和 $K_2(s)$ 均通过试凑法调节确定, 确定时主要视系统相应的阶跃情况而定.

3 仿真结果

当活套预设定量为18mm 时, 附加频率为2Hz, 幅度为2mm 的正弦扰动信号, 解耦前后带钢张力的变化曲线如图3所示.

仿真结果表明, 对活套高度与张力多变量耦合系统进行解耦控制, 比传统活套控制系统具有更好的控制性能和效果. 当活套高度发生变化时, 带钢张力所受影响比不解耦时小, 因而活套高度可以很好地稳定在设定值附近.

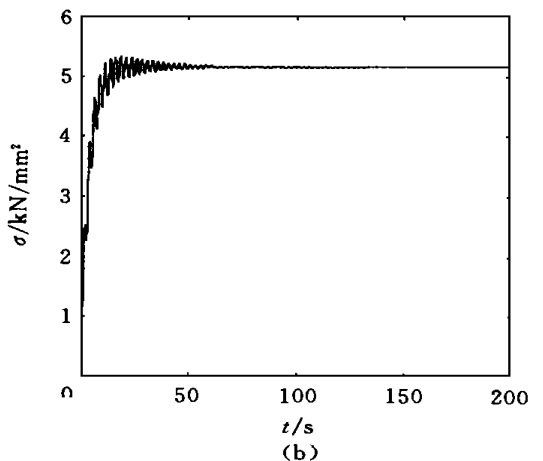
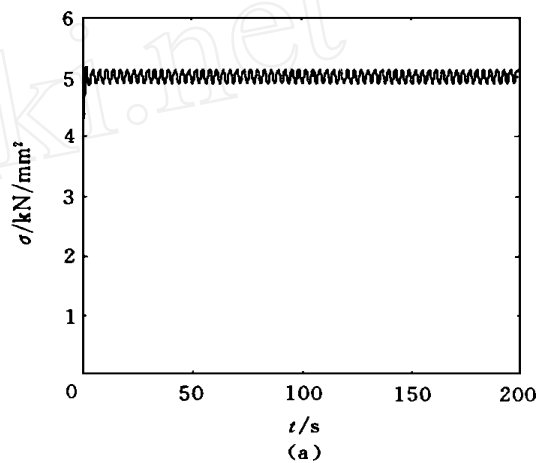


图3 高度受扰动时系统的张力响应

- (a) 不解耦系统的张应力响应
- (b) 解耦系统的张应力响应

(下转第216页)

4 数值示例

考虑采样时间 $T = 0.2$, 预测长度 $N = 5$ 。计算无超调控制时, 由(21)和(22)知加权因子的范围是 $\lambda_1 = 0.6203$, $\lambda_2 = 31.0535$ 。取 $\lambda_1 = 0.01$, $\lambda_2 = 3.5$, $\lambda_3 = 32$, 结果如图2和图3所示, 由此验证了本文的结论。可见, 对应于两种无超调控制, 当 λ 较小时, 控制动作变化比较剧烈; 反之, 控制则比较滞后。

5 结论

本文通过对一类典型工业对象的闭环分析, 得出了无超调控制的参数整定条件。这对相应问题具有现实的指导意义。

参考文献

- 1 Garica C E, Prett D M, Morari M. Model predictive

control: Theory and practice—A survey. *Automatica*, 1989, 25(3): 335-348

- 2 Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control- Part I & II. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-160
- 3 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 4 席裕庚, 厉隽悱. 广义预测控制系统的闭环系统. *控制理论与应用*, 1991, 8(4): 419-424

作者简介

孙明珠 男, 1972年生。南开大学计算机与系统科学系博士研究生。研究方向为预测控制。

陈增强 男, 1964年生。1997年在南开大学计算机与系统科学系获工学博士学位, 现为该系教授。研究领域为自适应控制, 智能预测控制及其在工业过程中的应用。

袁著祉 男, 1937年生。1962年毕业于南开大学数学系, 现为该校教授, 博士生导师。研究方向为自适应控制, 智能控制, 计算机控制与管理。

(上接第160页)

4 结论

本文通过逆Nyquist曲线对角占优性的强弱来判定活套高度和张力控制系统的耦合程度, 并采用伪对角化方法使补偿后的系统具有对角占优的特性。最后使用Matlab中的系统仿真工具Simulink对活套多变量控制系统进行仿真实验, 结果表明, 解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果。

参考文献

- 1 张殿华, 郑芳, 邹霄燕. 热连轧机活套控制系统的研究与发展. *基础自动化*, 1999, 6(3): 1-4
- 2 Yoshiro Seki, Kunio Sekiguch, Yoshiharu Anbe *et al.* Optimal multivariable looper control for hot strip finishing mill. *IEEE Trans on Industry Application*, 1991, 27

(1): 124-130

- 3 Kenya Fukushima. Looper optimal multivariable control for hot strip finishing mill. *Trans ISIJ*, 1988, 28: 463-469
- 4 薛定宇. 控制计算机辅助设计——Matlab语言及应用. 北京: 清华大学出版社, 1996. 221-282

作者简介

张殿华 男, 1962年生。1984年在东北大学自动控制系获硕士学位, 现为东北大学副教授。研究方向为轧制过程自动化。

郑芳 女, 1974年生。1999年在东北大学压力加工系获硕士学位, 现为宝钢技术中心工程师。研究方向为板带轧制工艺及过程自动化。

王国栋 男, 1942年生。东北大学教授, 博士生导师。研究方向为板带轧制工艺及过程自动化。