

连续退火机组张紧辊带钢张力的建模及解耦控制

白锐^{1,2†}, 佟绍成³, 柴天佑²

(1. 辽宁工业大学 电气工程学院, 辽宁 锦州 121001;

2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

3. 辽宁工业大学 理学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 在带钢连续退火机组中, 张紧辊区域的带钢张力直接影响着机组的运行速度以及带钢质量, 因此, 张紧辊区域的带钢张力是连续退火机组中的关键被控变量. 本文首先建立了张紧辊区域带钢张力的动态机理模型和状态空间模型, 并针对张紧辊带钢张力系统的多变量、强耦合等特性, 采用极点配置和动态解耦算法, 提出了带钢张力的多变量解耦控制器. 仿真实验结果表明, 所提出的解耦控制器实现了多个带钢张力控制回路之间的动态解耦, 并可获得良好的控制效果.

关键词: 带钢张力; 张紧辊; 建模; 解耦控制

中图分类号: TP273+.5 **文献标识码:** A

Modeling and decoupling control for the strip tension of bridling roll in the continuous annealing line

BAI Rui^{1,2†}, TONG Shao-cheng³, CHAI Tian-you²

(1. School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning 121001, China;

2. Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

3. School of Electrical Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning 121001, China;)

Abstract: In the strip continuous annealing line, strip tension of the bridling roll is an important factor that can affect the strip quality and the operation speed of the continuous annealing line. The strip tension of the bridling roll is the key controlled variable in the control system of the continuous annealing line. The dynamical mechanism model and the state space model of the strip tension in the bridling roll are proposed. According to the multivariable coupling characteristic of the strip tension, a decoupling controller of the strip tension is also presented, which is the integration of the pole assignment and multivariable dynamical decoupling method. Simulation experiment results show that the proposed decoupling controller can realize the dynamical decoupling of the multiple strip tension control loops, and the satisfactory control performance also can be achieved.

Key words: strip tension; bridling roll; modeling; decoupling control

1 引言(Introduction)

带钢张力是冶金工业过程中的重要被控对象, 带钢张力的控制效果直接影响着带钢的质量及产量. 目前, 带钢张力的建模与控制已经得到了广泛的研究和重视, 如加热炉带钢张力^[1]、冷轧机带钢张力^[2]、平整机带钢张力^[3]、卷取机带钢张力^[4]、活套带钢张力^[5-6]、跳动辊带钢张力^[7]等.

连续退火机组是冶金工业过程中的重要生产线之一, 保证带钢在连续退火过程中具有合适、稳定的张力, 是提高带钢产品质量和产量的重要手段^[8]. 张紧辊是带钢连续退火机组的重要设备, 其作用是将生产线上带钢张力不同的区域分隔开, 并且完成

多个带钢张力的控制作用.

张紧辊区域的带钢张力模型目前研究较少, 还缺乏该类张力模型的详细报道. 同时, 在张力控制过程中, 通过调节各个辊子驱动电机的电磁力矩来控制张紧辊的各个带钢张力. 任意一个电磁力矩发生变化, 都会对张紧辊区域的所有带钢张力产生影响, 并且张紧辊区域的任意一个带钢张力, 都受到所有辊子电磁力矩的影响, 因此, 张紧辊的各个带钢张力控制回路之间存在耦合特性. 传统的PID控制方法难以较好地解决多变量之间的动态耦合特性, 并且PID控制器参数需要反复凑试, 尤其对于具有多变量、耦合特性的被控对象, PID控制器参数的凑试更

收稿日期: 2011-10-20; 收修改稿日期: 2012-10-26.

†通信作者. Tel.: +86 13898354036.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074014); 辽宁省自然科学基金资助项目(201102089); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目(LJQ2011062); 流程工业综合自动化国家重点实验室开放课题基金资助项目.

加困难, 因此传统PID张力控制方法难以获得良好的控制效果.

针对目前张紧辊带钢张力建模和控制方面存在的问题, 本文以一种典型的4辊式张紧辊为研究对象, 通过对带钢张力产生的机理分析, 首先建立了张紧辊带钢张力的动态机理模型和状态空间表达式模型. 在此基础上, 针对张紧辊带钢张力的多输入多输出、强耦合等特性, 本文将极点配置与多变量动态解耦算法相结合, 设计了张紧辊带钢张力的解耦控制器, 从而实现了多个带钢张力控制回路的解耦控制. 最后通过仿真实验证明了本文方法的有效性.

2 连续退火机组张紧辊带钢张力模型的建立(Model of the strip tension of the bridling roll in the continuous annealing line)

在带钢连续退火生产线中具有多个张紧辊设备, 张紧辊一般由2-5个传动辊所组成. 本文以典型的4辊式张紧辊为例来建立张紧辊的带钢张力模型. 张紧辊的结构如图1所示.

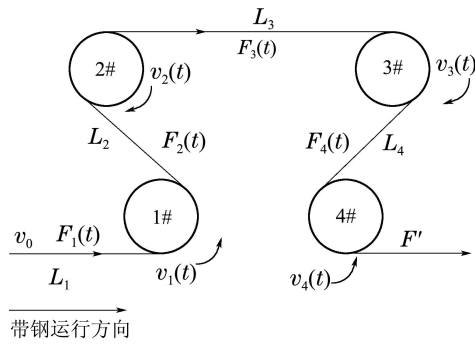


图1 张紧辊的结构
Fig. 1 Structure of the bridling roll

在图1中: 张紧辊由1#-4#传动辊所组成, 带钢运行方向如箭头所示, v_0 为张紧辊的上游带钢速度, $v_i(t) (i = 1, 2, 3, 4)$ 为各个传动辊的速度, $F_1(t)$ 为张紧辊入口处带钢张力, $F_2(t)$, $F_3(t)$ 和 $F_4(t)$ 分别为各个传动辊之间的带钢张力, F' 为张紧辊出口处的带钢张力, 即下游带钢张力. L_1 为张紧辊入口处的带钢长度. L_2 , L_3 和 L_4 分别为各个传动辊之间的带钢长度.

在张紧辊中, 每个传动辊都由一个电动机来驱动, 通过控制各个电动机的电磁力矩来控制带钢张力 $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ 和 $F_4(t)$.

对于第*i*个传动辊, 根据电机的运动方程式可得

$$T_{e,i}(t) - T_{L,i}(t) = J_i \frac{d\omega_i(t)}{dt}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

式(1)中: $\omega_i(t)$ 为第*i*个传动辊的角速度, J_i 为第*i*个传动辊的转动惯量, $T_{e,i}(t)$ 为第*i*个传动辊电机的电磁力矩, $T_{L,i}$ 为第*i*个传动辊电机的负载力矩. $T_{L,i}$ 由带钢张力产生, 其计算公式为

$$T_{L,i}(t) = (F_i(t) - F_{i+1}(t)) \times R_i, \quad (2)$$

式(2)中 R_i 为第*i*个传动辊的半径.

当带钢在两点之间存在秒流量差时, 带钢产生弹性形变, 弹性形变导致了带钢张力的产生^[9-10]. 在图1中, 带钢的秒流量差是由于各个辊子的速度差所引起的, 因此, 根据带钢张力产生的机理可得

$$F_i(t) = k_i \times \int_0^t (v_i(\tau) - v_{i-1}(\tau)) d\tau, \quad (3)$$

$$v_i(t) = \omega_i(t) \times R_i. \quad (4)$$

式(3)中 k_i 为带钢的弹性系数, k_i 的计算公式为

$$k_i = \frac{E \times S}{L_i}. \quad (5)$$

式(5)中 E 为带钢的弹性模量, S 为带钢的横截面积.

联立式(1)-(5), 可得张紧辊带钢张力的动态机理模型为

$$\begin{cases} \frac{dF_1(t)}{dt} = \frac{ES}{L_1} R_1 \times \omega_1(t) - \frac{ES}{L_1} \times v_0(t), \\ \frac{d\omega_1(t)}{dt} = \frac{1}{J_1} T_{e1}(t) - \frac{R_1}{J_1} F_1(t) + \frac{R_1}{J_1} F_2(t), \\ \frac{dF_2(t)}{dt} = \frac{ES}{L_2} R_2 \times \omega_2(t) - \frac{ES}{L_2} R_1 \times \omega_1(t), \\ \frac{d\omega_2(t)}{dt} = \frac{1}{J_2} T_{e2}(t) - \frac{R_2}{J_2} F_2(t) + \frac{R_2}{J_2} F_3(t), \\ \frac{dF_3(t)}{dt} = \frac{ES}{L_3} R_3 \times \omega_3(t) - \frac{ES}{L_3} R_2 \times \omega_2(t), \\ \frac{d\omega_3(t)}{dt} = \frac{1}{J_3} T_{e3}(t) - \frac{R_3}{J_3} F_3(t) + \frac{R_3}{J_3} F_4(t), \\ \frac{dF_4(t)}{dt} = \frac{ES}{L_4} R_4 \times \omega_4(t) - \frac{ES}{L_4} R_3 \times \omega_3(t), \\ \frac{d\omega_4(t)}{dt} = \frac{1}{J_4} T_{e4}(t) - \frac{R_4}{J_4} F_4(t) + \frac{R_4}{J_4} F'. \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可推导出张紧辊带钢张力的状态空间表达式. 令状态空间变量 $x(t)$ 为

$$\begin{aligned} x(t) = & [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \\ & x_5(t) \ x_6(t) \ x_7(t) \ x_8(t)]^T = \\ & [F_1(t) \ \omega_1(t) \ F_2(t) \ \omega_2(t) \\ & F_3(t) \ \omega_3(t) \ F_4(t) \ \omega_4(t)]^T. \end{aligned} \quad (7)$$

控制变量 $u(t)$ 为

$$\begin{aligned} u(t) = & [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t) \ u_4(t)]^T = \\ & [T_{e1}(t) \ T_{e2}(t) \ T_{e3}(t) \ T_{e4}(t)]^T. \end{aligned} \quad (8)$$

输出变量 $y(t)$ 为

$$\begin{aligned} y(t) = & [y_1(t) \ y_2(t) \ y_3(t) \ y_4(t)]^T = \\ & [F_1(t) \ F_2(t) \ F_3(t) \ F_4(t)]^T. \end{aligned} \quad (9)$$

则根据式(6)可得张紧辊带钢张力的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d, \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (10)$$

其中: A 为状态矩阵, B 为输入矩阵, C 为输出矩阵, d 为已知且定常的干扰向量:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{E \times S \times R_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_1}{J_1} & 0 & \frac{R_1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{E \times S \times R_1}{L_2} & 0 & \frac{E \times S \times R_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{J_2} & 0 & \frac{R_2}{J_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{E \times S \times R_2}{L_3} & 0 & \frac{E \times S \times R_3}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_3}{J_3} & 0 & \frac{R_3}{J_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{E \times S \times R_3}{L_4} & 0 & \frac{E \times S \times R_4}{L_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_4}{J_4} & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_4} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} -\frac{E \times S}{L_1} v_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{R_4}{J_4} F' \\ 0 \end{bmatrix}.$$

3 张紧辊带钢张力系统的耦合特性分析及解耦控制器设计(Coupling characteristic analysis and design of the decoupling controller for the strip tension of the bridling roll)

3.1 耦合特性分析(Coupling characteristic analysis)

多变量系统的回路之间存在着耦合,是指系统的某一个输入与系统的所有输出相互影响,或者系统的某一个输出受到所有系统输入的影响^[11].

由第2节可知,张紧辊带钢张力系统是一个4输入、4输出的多变量系统.输入为4个传动辊的电磁力矩,输出为张紧辊区域的4个张力.任意一个输入的电磁力矩发生改变时,都会影响所有输出的带钢张力.例如,当张紧辊系统处于稳态时候,如果1#传动辊的电磁力矩 $u_1(t)$ 发生变化(其他辊子的电磁力矩不变),由式(1)和式(4)可知1#传动辊的速度 $v_1(t)$ 改变, $v_1(t)$ 改变使张紧辊入口处带钢张力的秒流量差发生变化,由式(3)可知 $F_1(t)$ 变化;由于 $v_1(t)$ 改变,因此1#和2#传动辊之间的带钢

秒流量差改变,由式(3)可知 $F_2(t)$ 也发生变化;由于 $F_2(t)$ 发生变化,根据式(2)可知,2#辊子电机的负载力矩 $T_{L,2}(t)$ 发生变化,从而使2#传动辊的速度 $v_2(t)$ 改变, $v_2(t)$ 的改变会使 $F_3(t)$ 发生变化;由于 $F_3(t)$ 的变化会使3#传动辊的负载力矩发生变化,因此 $v_3(t)$ 也会改变, $v_3(t)$ 改变会使 $F_4(t)$ 发生变化.因此,当 $u_1(t)$ 发生改变时,所有的带钢张力 $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ 和 $F_4(t)$ 均发生变化.

同理可知,当其他输入变化时,所有的带钢张力均发生变化.并且,每一个带钢张力均受到所有输入的电磁力矩影响.因此,张紧辊带钢张力系统是一个典型的多变量、强耦合系统.

3.2 解耦控制器设计(Design of the decoupling controller)

令 n 为被控系统的维数, p 为输入变量的维数, q 为输出变量的维数.由式(10)可知,在张紧辊带钢张力模型中: $n = 8$, $p = 4$, $q = 4$.

由式(10)可得被控对象带钢张力的传递函数矩阵为

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \begin{bmatrix} g_{1,1}(s) & g_{1,2}(s) & g_{1,3}(s) & g_{1,4}(s) \\ g_{2,1}(s) & g_{2,2}(s) & g_{2,3}(s) & g_{2,4}(s) \\ g_{3,1}(s) & g_{3,2}(s) & g_{3,3}(s) & g_{3,4}(s) \\ g_{4,1}(s) & g_{4,2}(s) & g_{4,3}(s) & g_{4,4}(s) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

令带钢张力的解耦控制器的形式为

$$u(t) = -Kx(t) + LQ(t). \quad (12)$$

式(12)中: $Q(t) = [Q_1(t) \ Q_2(t) \ Q_3(t) \ Q_4(t)]$ 为参考输入, 其维数为4; K 为状态反馈矩阵, 其维数为 $p \times n = 4 \times 8$; L 为输入变换矩阵, 其维数为 $p \times p = 4 \times 4$.

设计带钢张力的解耦控制器式(12), 使得带钢张力的闭环传递函数矩阵具有如下的形式:

$$G_{KL}(s) = \frac{y(s)}{Q(s)} = \text{diag}\{\bar{g}_{1,1}(s), \bar{g}_{2,2}(s), \bar{g}_{3,3}(s), \bar{g}_{4,4}(s)\}. \quad (13)$$

由式(13)可知, 当采用带钢张力解耦控制器式(12)后, 闭环系统的传递函数矩阵为一个对角阵, 从而使带钢张力控制回路之间实现了解耦, 即可通过 $Q_1(t)$ 来控制 $F_1(t)$, 通过 $Q_2(t)$ 来控制 $F_2(t)$, 通过 $Q_3(t)$ 来控制 $F_3(t)$, 通过 $Q_4(t)$ 来控制 $F_4(t)$.

根据现代控制理论中的解耦控制原理^[12], 带钢张力的解耦控制器设计步骤如下:

步骤 1 将带钢张力模型式(10)记为原系统 $\{A, B, C\}$, 并计算结构特性指数 d_i 和结构特性向量 W_i :

$$\sigma_{i,j} = g_{i,j}(s) \text{分母多项式次数} - g_{i,j}(s) \text{分子多项式次数}, \quad (14)$$

$$d_i = \min\{\sigma_{i,1}, \dots, \sigma_{i,p}\} - 1, \quad (15)$$

$$W_i = c'_i A^{d_i} B, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (16)$$

其中 c'_i 为输出矩阵 C 中的第 i 个行向量.

步骤 2 组成判别矩阵 W , 并判断矩阵 W 的非奇异性:

$$W = [W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4]^T. \quad (17)$$

若矩阵 W 为非奇异矩阵, 则可通过选择合适的 K 和 L , 使闭环传递函数矩阵具有式(13)的形式, 因此能够实现解耦, 进行下一步: 若矩阵 W 为奇异矩阵, 则不具有合适的 K 和 L 使闭环传递函数矩阵具有式(13)的形式, 因此不能解耦, 直接进入步骤10.

步骤 3 令由结构特性指数 d_i 组成的中间变换矩阵为 F , 矩阵 F 的公式为

$$F = [c'_1 A^{d_1+1} \ c'_2 A^{d_2+1} \ c'_3 A^{d_3+1} \ c'_4 A^{d_4+1}]^T. \quad (18)$$

步骤 4 取预输入变换矩阵 \bar{L} 和预状态反馈矩阵 \bar{K} 为^[12]

$$\bar{L} = W^{-1}, \quad \bar{K} = W^{-1}F. \quad (19)$$

利用式(10)和式(12)可得

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}Q(t) + d, \\ y(t) = \bar{C}x(t), \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\bar{A} = A - BW^{-1}F$, $\bar{B} = BW^{-1}$, $\bar{C} = C$. 在解耦控制器设计过程中, 要求 $\{\bar{A}, \bar{B}\}$ 需为完全可控, 其目的是使解耦后的各个单输入单输出系统可以具有期望的动态性能.

步骤 5 判断 $\{\bar{A}, \bar{C}\}$ 的可观测性, 并引入线性变换 $\tilde{x} = T^{-1}x$, 化 $\{\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}\}$ 为解耦规范型 $\{\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}\}$:

$$\tilde{A} = T^{-1}\bar{A}T, \quad \tilde{B} = T^{-1}\bar{B}, \quad \tilde{C} = \bar{C}T. \quad (21)$$

步骤 6 由 $\{\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}\}$ 和 $\{\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}\}$ 计算出变换矩阵 T^{-1} , 令

$$\bar{Q}_c = [\bar{B} \ \bar{A}\bar{B} \ \dots \ \bar{A}^T\bar{B}], \quad (22)$$

$$\tilde{Q}_c = [\tilde{B} \ \tilde{A}\tilde{B} \ \dots \ \tilde{A}^T\tilde{B}], \quad (23)$$

则 T 的计算公式为^[12]

$$T = \bar{Q}_c \tilde{Q}_c^T \left(\tilde{Q}_c \tilde{Q}_c^T \right)^{-1}. \quad (24)$$

步骤 7 对解耦规范型 $\{\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}\}$ 选取状态反馈矩阵 \tilde{K} , \tilde{K} 的维数为 $p \times n = 4 \times 8$, \tilde{K} 的形式如下:

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} \tilde{k}_1 & & & \\ & \tilde{k}_2 & & \\ & & \tilde{k}_3 & \\ & & & \tilde{k}_4 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

则状态反馈矩阵 \tilde{K} 可使 $\{\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}\}$ 实现动态解耦^[12]. 在式(25)中, $\tilde{k}_i (i = 1, \dots, 4)$ 均为含有两个元素的行向量.

步骤 8 采用极点配置方法确定矩阵 \tilde{K} 的各个元素, 从而使解耦后的各个单输入单输出系统具有期望的动态性能.

步骤 9 对原系统 $\{A, B, C\}$, 即带钢张力模型式(10), 确定出满足动态解耦和期望极点配置的输入变换矩阵 L 和状态反馈矩阵 K ^[12]:

$$K = W^{-1}F + W^{-1}\tilde{K}T^{-1}, \quad (26)$$

$$L = W^{-1}. \quad (27)$$

步骤 10 设计结束.

4 仿真实验(Simulation)

4.1 解耦控制器(Decoupling controller)

采用某钢厂的连续退火机组数据进行仿真研

究. 带钢张力模型式(10)中的各个参数如下:

带钢弹性模量为 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 带钢的横截面积为 $S = 872 \times 0.275 \text{ mm}^2$, 张紧辊上游带钢长度 $L_1 = 5 \text{ m}$, 各个传动辊之间的长度 $L_2 = L_3 = L_4 = 1 \text{ m}$, 各个传动辊半径 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.25 \text{ m}$, 各个传动辊的转动惯量 $J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = 20.01$, 张紧辊入口处带钢速度为 $v_0 = 650/60 \text{ m/s}$, 张紧辊下游带钢张力 $F' = 2100 \text{ N}$. 利用上述参数, 可获得带钢张力模型中的状态矩阵 A 和输入矩阵 B .

根据第3.2节中控制器设计步骤, 可得带钢张力的解耦控制器, 具体过程如下:

利用步骤1-2可得判决矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} 125830 & 0 & 0 & 0 \\ -629160 & 629160 & 0 & 0 \\ 0 & -629160 & 629160 & 0 \\ 0 & 0 & -629160 & 629160 \end{bmatrix},$$

可判断出矩阵 W 为非奇异矩阵.

利用步骤3-5: 获得矩阵 $\bar{L}, \bar{K}, \bar{A}, \bar{B}$ 和 \bar{C} , 并可判断出 $\{\bar{A}, \bar{B}\}, \{\bar{A}, \bar{C}\}$ 为可观测, 并获得解耦规范型 $\{\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}\}$.

利用步骤6: 利用式(22)-(24), 计算出变换矩阵的逆矩阵 T .

利用步骤7-8: 解耦后的带钢张力模型为4个单输入单输出系统, 且每个系统均为2维系统. 令各个系统期望的极点分别为

$$\begin{aligned} \lambda_{1,1} &= -2, \lambda_{1,2} = -4, \lambda_{2,1} = -2 + j, \\ \lambda_{2,2} &= -2 - j, \lambda_{3,1} = -2, \lambda_{3,2} = -4, \\ \lambda_{4,1} &= -2 + j, \lambda_{4,2} = -2 - j, \end{aligned}$$

则利用极点配置算法可以得出矩阵 \tilde{K} 为

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 8 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 4 \end{bmatrix}.$$

利用步骤9: 利用式(26)-(27)可获得输入变换矩阵 L 和状态反馈矩阵 K , 从而获得多变量解耦控制器式(12), 并且解耦后带钢张力的闭环传递函数矩阵为

$$G_{KL}(s) = \frac{y(s)}{Q(s)} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{s^2 + 6s + 8}, \frac{1}{s^2 + 4s + 5}, \frac{1}{s^2 + 6s + 8}, \frac{1}{s^2 + 4s + 5} \right\}.$$

4.2 仿真实验1(The first simulation experiment)

利用本文的解耦控制器进行仿真实验. 当没有采用解耦控制的时候, 令张紧辊的4个电磁力矩即4个控制变量 $u_1(t) = u_2(t) = u_3(t) = u_4(t) = 10.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 则各个带钢张力的仿真曲线如图2所示. 当采用本文提出的解耦控制之后, 则各个带钢张力的仿真曲线如图3所示.

由图2可知, 在没有解耦控制器作用之前, 各个带钢张力曲线紧紧耦合在一起; 由图3可知, 当加入解耦控制器之后, 各个带钢张力曲线之间消除了相互耦合的关系.

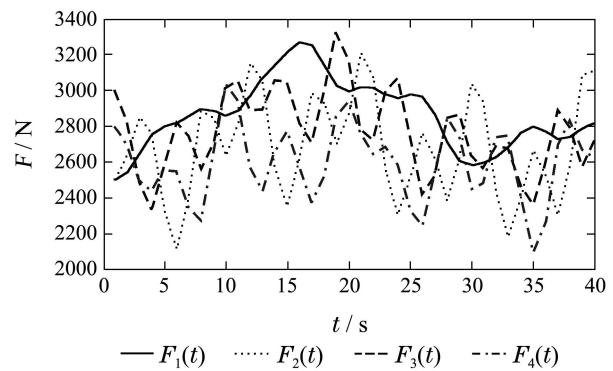


图2 未解耦的张力仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of the strip tensions without the decoupling control

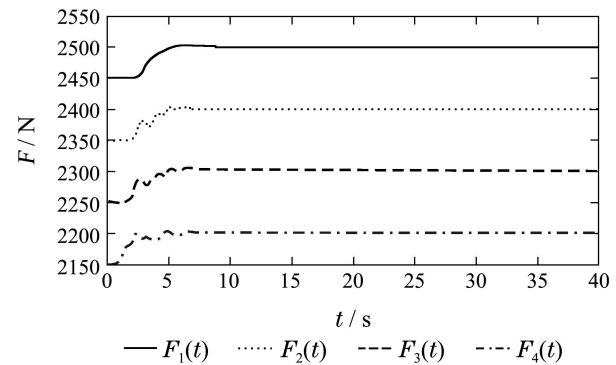


图3 解耦后的张力仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of the strip tensions with the decoupling control

4.3 仿真实验2(The second simulation experiment)

采用本文的带钢张力解耦控制器, 可以实现多个带钢张力控制回路之间的解耦, 即可以利用参考输入 $Q_1(t)$ 来独立控制 $F_1(t)$, 利用参考输入 $Q_2(t)$ 来独立控制 $F_2(t)$, 利用参考输入 $Q_3(t)$ 来独立控制 $F_3(t)$, 利用参考输入 $Q_4(t)$ 来独立控制 $F_4(t)$. 以带钢张力 $F_2(t)$ 和 $F_3(t)$ 为例, 采用解耦控制之后的仿真曲线如图4-5所示.

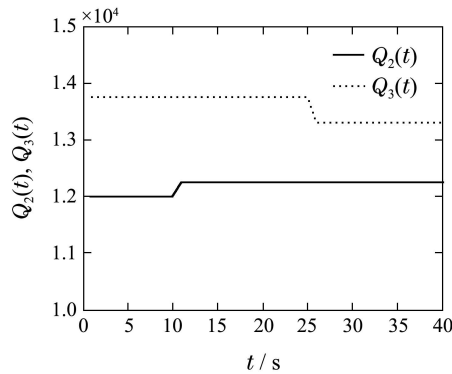


图4 参考输入 $Q_2(t)$ 和 $Q_3(t)$ 的仿真曲线
Fig. 4 Simulation curves of the reference input variables $Q_2(t)$ and $Q_3(t)$

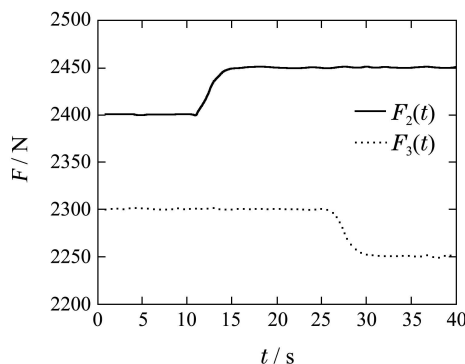


图5 输出变量 $F_2(t)$ 和 $F_3(t)$ 的仿真曲线
Fig. 5 Simulation curves of the output variables $F_2(t)$ and $F_3(t)$

在图4和图5中: 在0–10 s时, 带钢张力 $F_2(t)$ 稳定在 2400 N, 带钢张力 $F_3(t)$ 稳定在 2300 N; 在第 10 s时, 需要将 $F_2(t)$ 由 2400 N 提高到 2450 N, 此时只需要将与 $F_2(t)$ 相对应的参考输入 $Q_2(t)$ 增加即可. 由图4和图5可看出, $Q_2(t)$ 增加后, $F_2(t)$ 也随之增加, 并且 $F_2(t)$ 的增加不影响 $F_3(t)$.

在第 25 s 时, 需要将 $F_3(t)$ 由 2300 N 降低到 2250 N, 此时只需要将与 $F_3(t)$ 相对应的参考输入 $Q_3(t)$ 减少即可. 由图4和图5可看出, $Q_3(t)$ 减少后, $F_3(t)$ 也随之减少, 并且 $F_3(t)$ 的减少不影响 $F_2(t)$.

因此, 通过上述分析可知, 采用本文的带钢张力解耦控制器实现了各个带钢张力控制回路之间的解耦, 即可以采用相应的参考输入来独立的控制相应的带钢张力, 并且不影响其他带钢张力.

5 结论(Conclusions)

本文以典型的4辊式张紧辊为研究对象, 建立了张紧辊带钢张力的动态机理模型和状态空间表达式模型, 并针对张紧辊带钢张力的多输入多输出、强耦合等特性, 采用极点配置和多变量动态解耦算法, 设计了带钢张力的多变量解耦控制器, 最后通过仿真实验证明了本文方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] LEE C W, SHIN K H. Strip tension control considering the temperature change in multi-span systems [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, 19(4): 958 – 967.
- [2] 李仲德, 杨卫东. 冷连轧机厚度和张力系统的多变量解耦鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 581 – 586. (LI Zhongde, YANG Weidong. Multivariable decoupling robust control for the thickness and tension system of tandem cold rolling mill [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(4): 581 – 586.)
- [3] 贺建军, 喻寿益, 钟掘. 基于极点配置的平整机张力解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(2): 244 – 248. (HE Jianjun, YU Shouyi, ZHONG Jue. Decoupling control of tension based on pole assignment for temper mill [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(2): 244 – 248.)
- [4] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H_∞ controllers [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(1): 113 – 120
- [5] 童朝南, 武延坤, 刘磊明, 等. 液压活套多变量系统的建模及积分变结构控制 [J]. 自动化学报, 2008, 34(10): 1305 – 1311. (TONG Chaonan, WU Yankun, LIU Leiming, et al. Modeling and integral variable structure control of hydraulic looper multivariable system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(10): 1305 – 1311.)
- [6] 童朝南, 武延坤, 王丽君, 等. 活套系统的神经网络离散变结构控制 [J]. 控制与决策, 2008, 23(9): 1011 – 1015. (TONG Chaonan, WU Yankun, WANG Lijun, et al. Discrete variable structure control based on neural network on looper system [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(9): 1011 – 1015.)
- [7] 白锐, 佟绍成. 连续退火机组跳动辊区域带钢张力的建模与仿真 [J]. 信息与控制, 2010, 39(6): 700 – 706. (BAI Rui, TONG Shaoheng. Modeling and simulation of the strip tension in dancer roll of the continuous annealing line [J]. *Information and Control*, 2010, 39(6): 700 – 706.)
- [8] LIU Q, CHAI T Y, WANG H. Data-based hybrid tension estimation and fault diagnosis of cold rolling continuous annealing processes [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(12): 2284 – 2294.
- [9] 白锐, 张振山, 柴天佑. 冷轧连续退火机组带钢张力仿真系统 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5477 – 5481. (BAI Rui, ZHANG Zhenshan, CHAI Tianyou. Modeling and simulation for strip tension in continuous annealing process [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5477 – 5481.)
- [10] 郑申白, 韩静涛, 王江. 连轧张力的运动力学稳态方程 [J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(6): 39 – 42. (ZHENG Shenbai, HAN Jingtao, WANG Jiang. Kinematic mechanics steady equation of continuous rolling tension [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 17(6): 39 – 42.)
- [11] 柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. (CHAI Tianyou. *Multivariable Adaptive Decoupling Control and Its Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [12] 郑大钟. 线性系统理论 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2002. (ZHENG Dazhong. *Linear System Theory* [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

作者简介:

白锐 (1976–), 男, 博士, 副教授, 研究领域为复杂工业过程的建模及控制, E-mail: broffice@126.com;

佟绍成 (1960–), 男, 博士, 教授, 研究领域为非线性控制、模糊控制;

柴天佑 (1947–), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 研究领域为多变量解耦控制、综合自动化.