

文章编号: 1001-0920(2005)08-0883-04

基于 LM I 的 H 解耦及活套高度张力控制

傅 剑, 杨卫东, 李伯群

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 通过对全解耦、近似解耦和能量解耦的分析并结合工程实际, 提出一种基于 LM I 的输入输出 H 解耦控制方法。该方法综合考虑了耦合通道和控制通道的控制效果, 将解耦问题视为干扰抑制和多自由度跟踪的复合控制问题。在解耦控制设计中有更多的自由度, 可依工程实际要求作相应调整, 获得最优的综合指标。将该解耦方法应用于热连轧高度和张力的控制系统, 仿真结果表明可获得良好的解耦效果和控制特性。

关键词: 输入输出解耦; H 控制; 线性矩阵不等式; 活套高度和张力的控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

LM Is Based H Decoupling Method and the Looper Height and Tension Control

FU Jian, YANG Wei-dong, LI Bo-qun

(School of Information Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China Correspondent: FU Jian, E-mail: fujian-2@sina.com)

Abstract: An in-out decoupling method based on H theory and LM I algorithms is put forward through the analysis of decoupling methods such as completely decoupling, incompletely decoupling and energy decoupling, and the analysis of engineering practice. Taking performance of control channel and decoupling channel into consideration simultaneously, the proposed method provides a way to transform the decoupling problem into a problem of combining disturbance attenuation problem and setpoint track problem with several freedom of motion. So the present method has more freedom in design to fulfill a comprehensive optimization target by satisfying requirements in practice. The method is applied to the looper height and tension control of hot strip mill. Simulation result proves effectiveness of the method in both decoupling effect and control performance.

Key words: In-out decoupling; H control; LM I; Looper height and tension control

1 引言

解耦控制作为多变量系统控制的有效手段, 在工业过程控制中得到了广泛应用。解耦从程度上可分为全解耦和近似解耦两类。以著名的 Morgan 问题展开的一系列状态空间方法属于全解耦方法, 该方法基于不变子空间理论, 采用精确对消实现解耦, 缺点是被控对象的任何摄动都会导致解耦性的破坏。以 Rosenbrock 为代表提出的频域法属于近似解耦方法, 设计目标从全解耦的对角化改为对角优势化^[1], 获得了较好的鲁棒性, 但因是弱解耦, 指标较全解耦差。文献[2]试图寻找一种折中的方法, 它采

用能量的思想, 使任何一个输入能量主要控制对应的一个输出能量, 对其他输出能量的影响尽可能小。

鲁棒控制技术可以处理建模不精确问题, 并且发展了频域方法, 出现了 μ 分析, ARE, H_2/H_∞ , L_1 等多种方法。这些方法都是基于系统正实性且具有相通之处^[3]。近年来, 基于 LM I 约束的凸优化方法引起控制理论界的关注。系统和控制理论中许多分析和综合设计问题, 都可转化成线性矩阵不等式或双线性矩阵不等式的凸优化问题^[4]。

本文提出一种基于 LM I 的输入输出 H 解耦控制方法。它不同于常规解耦以消除变量之间的耦

收稿日期: 2004-09-22; 修回日期: 2004-12-14

作者简介: 傅剑(1973—), 男, 武汉人, 博士生, 从事轧钢先进过程控制、鲁棒控制的研究; 杨卫东(1952—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制、板带轧机自动控制等研究。

合为唯一目标,而是将耦合通道和控制通道的控制效果综合考虑.其主要思想是从 H_2 的观点出发,将解耦问题转换为干扰抑制和多自由度跟踪的复合控制问题.源于LMI的仿射线性适用于多目标求解,并能对性能指标 γ 进行优化^[5],因此使用LMI来设计控制器.该方法属弱解耦但耦合程度可调,易于附加其他约束条件,符合工程实际,在多目标控制的过程控制中具有广阔的应用空间.

采用活套控制轧制张力是热连轧的基本特征之一.活套高度和张力系统是典型的双输入双输出强耦合系统.本文将基于LMI的 H_2 解耦控制算法应用于热连轧高度和张力控制系统,结果表明可以显著减少系统内部的互扰,提高系统(张力)的控制精度.

2 基于LMI的 H_2 解耦方法

文献[2]提出一种介于动态解耦与静态解耦之间的能量解耦方法,即从输入/输出的能量关系上实现解耦,使得任何一个输入的能量主要控制对应的一个输出的能量,对其他输出能量的影响尽可能小.它将解耦问题转化成两个能量关系不等式的求解,通过构造两个线性矩阵不等式条件,得出解耦后的系统是一个严格无源的系统(渐近稳定).该方法思想新颖,对对象条件要求宽松,具有较强的鲁棒性,但其解耦性能和鲁棒性能不易直接设计,不能对每个耦合通道单独设计耦合程度,对控制通道输出的信号未作设计.

针对文献[2]的不足之处,本文提出了基于LMI的输入输出 H_2 解耦方法:

1) 对于输入 in_i ,各个耦合输出端信号 out_j ;
 i) 能量越小越好.将输入 in_i 视为能量有限信号的集合 $\{in_i | in_i = W w, w \in H_2, \|w\|_2 = 1\}$,在各个耦合输出端,认为输入 in_i 是干扰信号.于是将问题转换为干扰抑制问题,使用 H_2 抑制其 L_2 有界类扰动.

2) 对于输入 in_i ,对应控制输出端信号 out_i .能量越大越好.为了兼顾 out_i 的输出指标,采用 γ 供给率指标

$$s(u, y) = \frac{1}{2} (r^2 \|u\|_2^2 - \|y\|_2^2), \quad (1)$$

取代常规的供给率指标 $s(u, y) = y^T u$.取 out_i 控制的 H_2 指标 $\eta_{in_i-out_i} = \frac{1}{2} + \rho \|u\|_2^2$, η 通常取为稳态增益.理想情况下系统实现无差跟踪,其输入能量都从输出端输出. out_i 控制的 H_2 指标既希望 in_i 的能量从 out_i 输出得越多越好,又对 out_i 响应 in_i 的指标作了要求.这样便将问题简化为一个有增益稳态差的多自由度跟踪问题.

解耦问题对应分解为被控变量与控制变量间有增益稳态差的多自由度跟踪问题,以及耦合变量与控制变量间的干扰抑制问题,然后求解这两个鲁棒控制的复合问题.对于一个耦合系统,理想的解耦情况是:受控量尽量跟随控制量的变化,而耦合变量则不受影响.对于线性定常系统,可将干扰抑制和二自由度跟踪问题的控制目标合在一起,求其最小上确界.这与两个问题单独求解最多相差3dB^[6].

跟踪问题的目标和干扰抑制的目标在一定程度上互为拮据.因此需要对各个配对变量的跟踪程度和各个耦合变量的抑制程度,依据现场要求设置不同的权函数,以反映其在不同频段上的权重.

实施解耦控制应注意以下几个问题:

1) 前提条件是系统为稳定系统.对于能稳定能检测系统,根据系统结构规范分解定理^[7],除能控能观状态 \tilde{x}_∞ 外的模态均为稳定模态.对能控能观状态 \tilde{x}_∞ 可以实施状态反馈/输出反馈,使能控能观模态配置在复左半平面,从而将系统校正为稳定系统.

2) 被控变量与控制变量间有增益稳态差的多自由度跟踪问题,耦合变量与控制变量间的干扰抑制问题,实质上都是求解EE增益 $\Gamma_{EE} = \sup_{\|w\|_2=1} \|z\|_2$ 的最小上确界问题^[8].该问题等价于

$$\begin{aligned} & \min \gamma; \\ & \text{s.t.} \begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (2) \\ & P > 0 \end{aligned}$$

线性矩阵不等式约束的优化问题.其中 (A, B, C, D) 是针对问题的增广对象状态空间模型.

3) 该解耦方法鲁棒性能可设计.对于估计的系统扰动,期望对耦合通道输出的影响较小.这实质上是一个EE增益最小上确界问题.

基于LMI的不对称输入输出 H_2 解耦控制算法如下:

- 1) 判断受控系统 (A, B, C) 的能稳定能观测性,不满足要求则转步骤8);
- 2) 实施状态反馈/输出反馈,使能控能观模态配置在复左半平面,从而将系统校正为稳定系统;
- 3) 根据耦合通道解耦要求设置干扰抑制的权函数;
- 4) 设置控制通道的跟踪误差和控制输出的权值;
- 5) 对估计的系统扰动或未建模摄动设置权函数;
- 6) 将原优化目标加权化为一个总目标,求解该

问题:

7) 观测解耦效果, 不满足要求则修改目标中的加权参数;

8) 停止计算

3 活套高度和张力的综合模型

活套高度和张力的综合控制系统是强耦合的两人两出系统, 控制量分别是活套电机的电流和主轧机的轧辊线速度, 期望输出是活套的高度和热轧带钢的张应力. 该系统一般为不稳定系统

活套张力矩^[9]为

$$M_T = M_T(w, h, \theta, \tau) = \tau w h T_T(\theta). \quad (3)$$

其中: τ 为带钢受到的张应力, w 为带钢板宽, h 为带钢板厚, $T_T(\theta)$ 为张力矩随角度变化的非线性系数

活套重力矩为

$$M_w = M_w(w, h, \theta) = w h T_w(\theta). \quad (4)$$

其中: w 为带钢板宽, h 为带钢板厚, $T_w(\theta)$ 为重力矩随角度变化的非线性系数

活套运动转矩平衡方程为

$$M = M_T + M_w + J\dot{\omega} + (K_D\omega + K_S\theta). \quad (5)$$

其中: M 为活套电机折算到活套上的总动力矩, M_T 为活套张力矩, M_w 为活套重力矩, J 为活套转动惯量, K_D 为活套粘性系数(值很小, 常忽略), K_S 为活套弹性系数(值很小, 常忽略), θ 为活套角度, ω 为活套角速度, $\dot{\omega}$ 为活套角加速度

机架间张应力公式^[10]为

$$\tau = \frac{E}{L + \int_0^t (v_i - v_{i+1}) d\tau} (L_1(\theta) + L_2(\theta) - (L + \int_0^t (v_i - v_{i+1}) d\tau)). \quad (6)$$

其中: τ 为带钢受到的张应力, E 为带钢杨氏模量, L

为机架间的距离, $L_1(\theta)$ 为从本机架出口到活套辊顶端带钢的距离, $L_2(\theta)$ 为本机架活套辊顶端到下游机架入口的带钢距离, v_i 为本机架出口带钢的速度, v_{i+1} 为下游机架带钢的入口速度

张应力对前后滑的影响公式为

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\frac{h}{R}} \tan \left[\frac{1}{2} \arctan \sqrt{\frac{\epsilon}{1-\epsilon}} + \frac{\pi}{8} \ln(1-\epsilon) \sqrt{\frac{h}{R}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{R}} \left(\frac{\tau_f}{K} - \frac{\tau_b}{K} \right) \right], \\ K &= 1.15 \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left(\frac{u_m}{10} \right)^{\alpha_3 T + a_4} \times \\ &\quad \left[a_6 \left(\frac{\epsilon}{0.4} \right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\epsilon}{0.4} \right], \\ v_i &= v_{0i} (1 + f), \quad u_m = \frac{v_{0i}}{l_c} \ln \frac{h_0}{h}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

其中: γ 为中性角, h_0 为轧入厚度, h 为轧出厚度, R 为轧辊半径, ϵ 为相对变形程度, τ_f 为前张应力, τ_b 为后张应力, K 为金属变形阻力, $(\alpha, a_1, \dots, a_6)$ 为变形阻力数学模型回归系数, v_i 为本机架出口带钢速度, v_{0i} 为本机架轧辊线速度, u_m 为平均变形速度, l_c 为变形区接触弧长水平投影

由式(7)解得前后张应力对前后滑的影响. 利用影响系数法在工作点展开的系统物理量的动态结构如图 1 所示

4 仿真研究

以某 1 700 热轧厂 5# 主轧机和活套参数为例, 在工作点(高度 22°; 张应力 0.70 kg · mm², 板厚 3.01 mm, 板宽 1 200 mm, 带钢 Q 235(A 3F), 温度 920 883.7) 建立热连轧高度和张力的综合控制 M M O 状态空间新模型

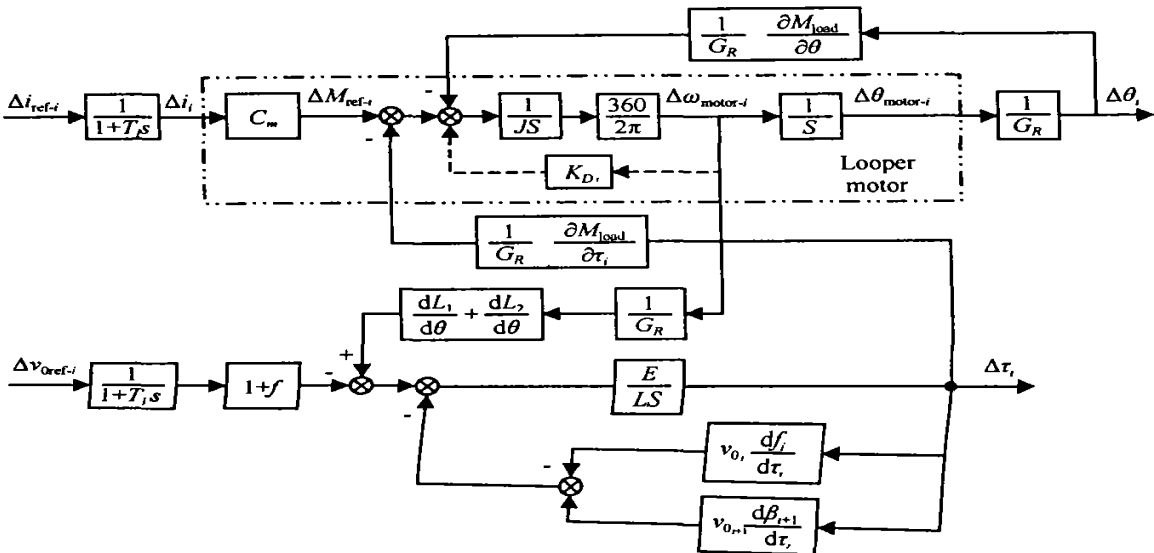


图 1 系统物理量的动态结构

取状态变量 $x = [\Delta\tau, \Delta\theta, \Delta\omega, \Delta i_i, \Delta v_{0_i}]^T$, 控制输入 $u = [\Delta i_{ref-i}, \Delta v_{0_{ref-i}}]^T$, 输出 $y = [\Delta\theta, \Delta\tau]$, 得到状态空间模型

$$\dot{x} = A_p x + B_p u, y = C_p x.$$

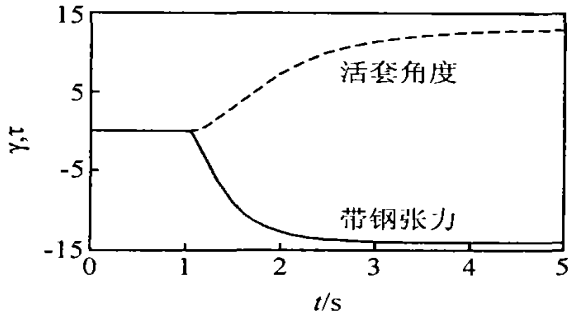
其中

$$A_p = \begin{bmatrix} -\frac{E}{L} (v_{0_i} \frac{dL_i}{d\tau_i} + v_{0_{i+1}} \frac{d\beta_{i+1}}{d\tau_i}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{G_R} \frac{\partial M_{load}}{\partial \tau_i} \frac{1}{J} \frac{360}{2\pi} & -\frac{1}{G_R} \frac{\partial M_{load}}{\partial \theta} \frac{1}{J} \frac{360}{2\pi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{L} (\frac{dL_1}{d\theta} + \frac{dL_2}{d\theta}) \frac{1}{G_R} & 0 & -\frac{E}{L} (1 + f_i) & 0 & 0 \\ 1/G_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_D}{J} \frac{360}{2\pi} & \frac{G_m}{J} \frac{360}{2\pi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_v & 0 \end{bmatrix},$$

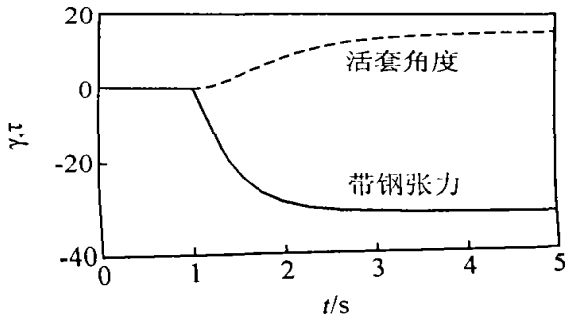
$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/T_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_v \end{bmatrix}^T,$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

在主轧机的轧辊线速度和活套电机的电流输入端施加一个幅值为5的阶跃信号, 输出出现振荡



(a) 活套电机电流输入响应

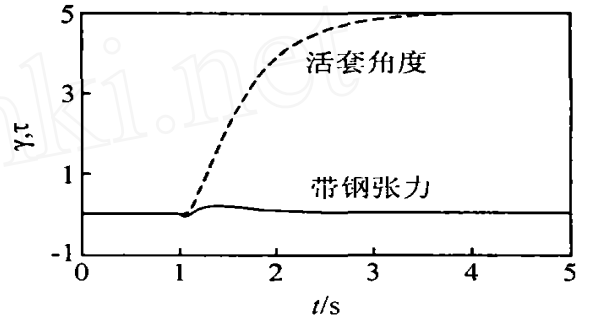


(b) 主轧机轧辊线速度输入响应

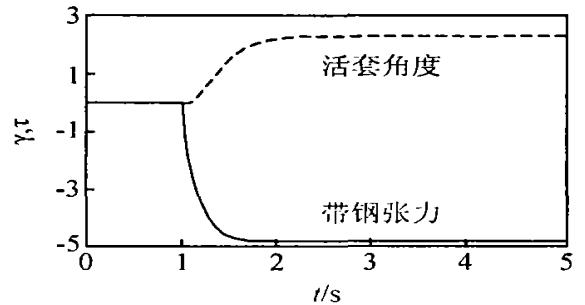
图2 极点配置的控制效果

现象, 分析其状态矩阵发现有不稳定极点 根据工程实际设置状态反馈, 进行极点配置的控制效果如图2所示

在活套高度和张力的复合控制系统中, 张应力对带钢的影响相对较大 活套角度控制主要是给热连轧机速度匹配提供一定的裕度, 在一定范围内能够满足要求; 不利因素是活套角度波动通过耦合影响到带钢张应力, 引起带钢宽度和厚度的变化 因此在设置权函数时, 重点是保证活套电流变化对张应力的影响要小 采用输入输出H解耦控制效果如图3所示



(a) 活套电机电流输入响应



(b) 主轧机轧辊线速度输入响应

图3 H解耦控制效果

从图3可以看出, 活套电流对张应力耦合的影响较小(活套角度变化5°动态过程中对张应力的最大耦合值不到0.2MPa), 轧辊速度对活套角度的耦合稍大些(但从15°降为2°, 张应力变化5MPa(几乎为设定点基准值的2倍), 活套角度才有2°的耦合, 符合工程要求

5 结论

本文提出的基于LMI的H解耦控制方法属弱解耦但耦合程度可调, 且只要求对象能稳定能检测 该方法鲁棒性能可设计, 易于附加其他约束条件, 符合工程实际, 但是权函数调试较为复杂 若与智能优化算法相结合, 利用综合调试效果和先验知识来调整权函数, 将是一条切实可行的途径

(下转第891页)

Miner. 实验结果表明, 该算法特别适合于稠密型并有较短平均事务长度和较长频繁项集的数据集. 本算法还有待在更多的数据集上进行测试, 有待进一步优化以提高算法的性能. 特别是实验中发现, 算法第 8 行进行子集检测这一步花费的时间较长, 所以需要进一步改进.

参考文献(References)

- [1] Agrawal R, Imielinski T, Swami A. Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases [A]. *Proc of the 1993 ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data* [C]. Washington: ACM Press, 1993: 207-216
- [2] Agrawal R, Srikant R. Fast Algorithms for Mining Association Rules [A]. *Proc 20th Int Conf on Very Large Data Bases* [C]. Santiago: Morgan Kaufmann, 1994: 487-499
- [3] Agrawal R, Mannila H, Srikant R, et al. *Fast Discovery of Association Rules: Advances in Knowledge Discovery and Data Mining* [M]. Boston: MIT Press, 1996: 307-328
- [4] Ashoka S, Edward O. An Efficient Algorithm for Mining Association Rules in Large Databases [A]. *VLDB* 1995 [C]. Zurich, 1995: 432-444
- [5] Park J S, Chen M S, Yu P S. An Effective Hash-based Algorithm for Mining Association Rules [A]. *SIGMOD '95* [C]. San Jose, 1995: 175-186
- [6] Han J, Pei J, Yin Y. Mining Frequent Patterns without Candidate Generation: A Frequent-pattern Tree Approach [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2004, 8(1): 53-87.
- [7] Bayardo R J. Efficiently Mining Long Patterns from Databases [A]. *SIGMOD '98* [C]. Seattle, 1998: 85-93
- [8] Gouda K, Zaki M J. Efficiently Mining Maximal Frequent Item sets [A]. *1st IEEE Int Conf on Data Mining* [C]. San Jose, 2001: 163-170
- [9] Han J, Micheline K. *Data Mining: Concepts and Techniques* [M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 225-278
- [10] 朱玉全, 孙志挥, 季小俊. 基于频繁模式树的关联规则增量式更新算法 [J]. *计算机学报*, 2003, (1): 91-96
(Zhu Y Q, Sun Z H, Ji X J. Incremental Updating Algorithm Based on Frequent Pattern Tree for Mining Association Rules [J]. *Chinese J of Computers*, 2003, (1): 91-96)

(上接第 886 页)

参考文献(References)

- [1] 吴麒, 高黛陵. *控制系统的智能设计* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
(Wu Q, Gao D L. *Intelligent Design Methods for Control Systems* [M]. Beijing: Engineering Industry Press, 2003)
- [2] Mao W J, Chu J. Input-output Decoupling of Linear Time-invariable Systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(1): 146-148
- [3] Hu Z J, Shi S J, Wen Z X. Application and Development of Linear Matrix Inequality in Control Theory [J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 1999, 33(11): 1458-1467.
- [4] Jeremy G V, Richard D B. A Tutorial on Linear and Bilinear Matrix Inequalities [J]. *J of Process Control*, 2000, 10(5): 363-385
- [5] Li J, Wang O H, Niemann D. *Relationship between LMI and ARE with Their Applications to Absolute Stability Criteria, Robustness Analysis and Optimal Control* [R]. Durham: Duke University, 1998
- [6] Safonov M G, Chiang R Y. CACSD Using the State Space L Theory — A Design Example [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(5): 477-479
- [7] 郑大钟. *线性系统理论* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
(Zheng D Z. *Linear System Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [8] 俞立. *鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
(Yu L. *Robust Control — Linear Matrix Inequalities Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [9] Fu J, Yang W D, Liu T L, et al. Polynomial Approach Algorithm in Real Time Calculation of Loop Tension Moment [J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(3): 226-228
- [10] An B J, Park S H, Kim B Y, et al. *Tension Control System for Hot Strip Mill* [M]. Isie: Pusan Korean, 2001: 1452-1457.