

文章编号: 1001-0920(2005)03-0275-05

热轧生产轧制计划模型与算法研究

李耀华¹, 王伟¹, 徐乐江², 宁树实¹, 张大波¹

(1. 大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024; 2. 上海宝信软件股份有限公司, 上海 201203)

摘要: 分析了轧制批量计划编制问题, 建立了不确定轧制计划数的轧制计划VRP模型。该模型不仅考虑了轧制计划中板坯在厚度和硬度上的跳跃、板坯宽度的正反跳以及相同宽度板坯连续轧制的长度约束, 而且考虑了轧制计划中烫辊材和主体材的合理安排。构造出一种基于单亲遗传算子的免疫算法用于求解此模型。生产数据的仿真结果表明, 所提出的模型及算法切实可行。

关键词: 生产计划; 轧制计划; 车辆路径问题; 免疫算法

中图分类号: TF3 **文献标识码:** A

Rolling plan model and algorithm in hot rolling plant

LI Yao-hua¹, WANG Wei¹, XU Le-jiang², NING Shu-shi¹, ZHANG Da-bo¹

(1. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China 2. Shanghai Baosight Software Company Limited, Shanghai 201203, China Correspondent: WANG Wei, Email: wangwei@dut.edu.cn)

Abstract Rolling plan problem is analyzed and a rolling plan VRP model with uncertain rolling plan numbers is suggested according to hot rolling production practice. The model considers not only the slab bounce on gauge and hardness, obverse and inverse bounce on width, and the rolling length constraint of the slabs with same width, but also the reasonable arranging of warm-up materials and staple materials. An immune algorithm based on parthenogenetic operators is proposed for solving the model. The simulation with production data shows that the algorithm is feasible.

Key words: production planning; rolling plan; vehicle routing problem (VRP); immune algorithm

1 引言

随着钢铁企业CMS的迅速发展, 炼钢-连铸-热轧一体化生产调度越来越受到人们的关注。其中热轧生产调度的关键问题是轧制计划的确定, 国内外学者对此作了许多研究。文献[1]给出了在热轧作业计划制订中限制板坯宽度、硬度、厚度跳跃的惩罚函数表; [2]提出一种数学规划模型, 采用基于tabu搜索的启发式算法求解近优解; [3]提出用MTSP模型来解决轧制计划的编制问题, 但没有考虑轧制计划的能力约束; [4]将热轧生产批量计划归结为车辆路径问题(VRP), 考虑了板坯宽度的反跳和同宽度板坯的长度约束, 并采用混合遗传算法求解。[5]在

[3]的热轧计划的基础上, 提出一个炼钢-连铸-热轧一体化生产调度模型。这些文献考虑的是热轧规程的约束, 并只考虑对主体材编制计划, 而没有考虑烫辊材的问题。烫辊材在轧制计划中作为轧辊预热阶段轧制的板坯, 尽管数量较少, 但所起的作用却很大。编制多个轧制计划时, 烫辊材板坯的数量会随之增加, 单纯依靠计划人员人工编排是很困难的。

本文针对炼钢-连铸-热轧一体化生产中轧制计划的编制问题, 建立了基于车辆路径问题(VRP)的不确定轧制计划数的轧制计划VRP模型, 该模型不仅考虑了轧制规程的约束, 而且考虑了烫辊材和主体材在轧制计划中的合理安排, 并且构造了一种基

收稿日期: 2004-05-18; 修回日期: 2004-07-20

基金项目: 国家863计划重点项目(2002AA412010)。

作者简介: 李耀华(1974—), 男, 山西原平人, 博士生, 从事生产计划与调度、智能求解算法等研究; 王伟(1955—), 男(满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、模型预测控制等研究。

于单亲遗传算子的免疫算法来求解此模型

2 轧制计划VRP模型

2.1 问题提出

根据宝钢一钢公司的实际情况,炼钢-连铸-热轧一体化生产计划的编制流程设计为图1的分层决策结构,用户合同经质量设计和生产设计后,归并或拆分为适合于实际生产的生产合同。在制订生产计划时,首先由合同计划编制系统根据生产合同和整个生产线的情况,分别下发炼钢、连铸、热轧的一系列日计划;然后由炼钢、连铸和连轧计划编制系统制订详细的炼钢计划、浇次计划和轧制计划,并将结果反馈回合同计划编制系统;最后由合同计划编制系统从全局优化效果出发,结合反馈结果重新下发优化后确定的生产日计划,炼钢、连铸和连轧计划编制系统根据新的日计划,分别编制出相应的作业计划下生产线。本文研究连轧计划编制系统中的主要问题,即根据热轧日计划编制出相应的轧制计划序列

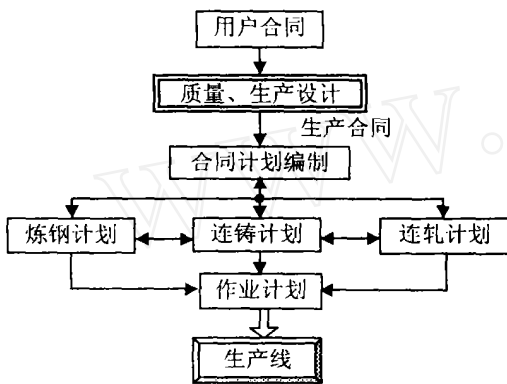


图1 一体化生产计划编制流程

编制轧制计划主要考虑的因素有:产品质量、轧辊更换和轧辊磨损。通常,一个完整的轧制计划的轧件宽度具有双梯形结构,如图2所示。其中:正梯形是烫辊材部分,数量相对较少;反梯形是主体材部分,是轧辊的主要生产阶段,大量的轧制任务主要在此完成。轧制计划编制的工艺约束如下:

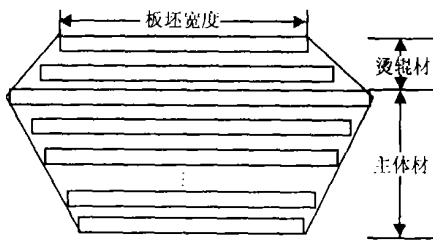


图2 轧制计划的双梯形结构

1) 烫辊材,一般有以下约束:对烫辊材长度有一定限制;烫辊材的宽度渐增变化,对变化范围

有限制;开始轧制时板卷硬度不能太大;硬度变化幅度要小;厚度变化幅度要小,最好是非减方向变化

2) 主体材,一般有以下约束:对主体材长度有一定限制;主体材宽度非减方向变化,跳跃幅度要小,跳跃差一般不大于25 cm;宽度反跳时,跳跃差一般不大于15 cm;相同宽度板坯连续轧制不能超过一定长度;宽度、厚度、硬度不允许同时跳跃;

厚度变化要平稳,不能反复跳跃,最好是非减方向变化;硬度变化要平稳,渐近递增或渐近递减均可,但不能反复跳跃;当宽度、硬度、厚度三者发生冲突时,优先级为硬度-厚度-宽度

2.2 轧制计划VRP模型的建立

轧制计划编制对象是生产日计划中生产合同所对应的板坯,轧制计划编制就是将日计划中的所有板坯在满足工艺约束的条件下,排列成一个或多个关于宽度的双梯形的轧制计划。本文将轧制计划的编制归结为车辆路径问题(VRP),轧制计划的编制和VRP都是组合优化问题,但二者的目标函数、约束条件等是不同的。本文构造虚拟板坯0作为VRP问题的源点,即车辆中心点,各块板坯作为各顾客,一个轧制计划作为一个车辆,各个轧制计划内板坯之间规格(宽度、厚度和硬度)上的差异总惩罚值作为运输费用,要求使用最少的车辆(轧制计划数)服务每个顾客(板坯),且只能服务一次,目标为车辆数最少情况下总运输费用(各个轧制计划内板坯之间的总惩罚值)最小。这样,可建立如下不确定轧制计划数的轧制计划VRP模型,用于解决将热轧日计划中的n块板坯编制为m个轧制计划的问题

$$\min m; \tag{1}$$

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (C_{ijz} X_{ijk} T_{izk} + C_{ijx} X_{ijk} T_{ik}); \tag{2}$$

$$\text{s.t. } y_{ik} = \begin{cases} 1, & i = 1, 2, \dots, n; \\ m, & i = 0 \end{cases}; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} T_{izk} \leq Q_{kz}, k = 1, 2, \dots, m; \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{n_{zk}} z_{ijk} q_j T_{jzk} y_{jk} \leq R, i = 1, 2, \dots, n_{zk}; \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} T_{ik} \leq Q_{ki}; \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{n_{ik}} z_{ijk} q_j T_{jzk} y_{jk} \leq R, i = 1, 2, \dots, n_{ik}; \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1; \tag{8}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1; \tag{9}$$

$$z_{ijk} = y_{ik}, z_{ijk} = y_{jk}, i, j = 1, 2, \dots, n; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} = n - 1. \quad (11)$$

其中

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 生产后} \\ & \text{直接生产板坯 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$T_{izk} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 为主体材} \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$T_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 为烫辊材} \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 包含板坯 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$Z_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{板坯 } j \text{ 和 } i \text{ 同属于轧制计划 } k \\ & \text{且与板坯 } i \text{ 同宽度连续轧制;} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$c_{ijz} = p_{ijz}^w + p_{ijz}^g + p_{ijz}^h,$$

c_{ijz} 为主体材中板坯 i 到板坯 j 的惩罚值, $p_{ijz}^w, p_{ijz}^g, p_{ijz}^h$ 分别为板坯间宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值, $c_{i0z} = 0, c_{0iz} = 0, c_{iiz} =$;

$$c_{ijt} = p_{ijt}^w + p_{ijt}^g + p_{ijt}^h,$$

c_{ijt} 为烫辊材中板坯 i 到板坯 j 的惩罚值, $p_{ijt}^w, p_{ijt}^g, p_{ijt}^h$ 分别为板坯间宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值, $c_{i0t} = 0, c_{0it} = 0, c_{iit} =$;

n 为计划的板坯总数, 板坯 0 为虚拟板坯;

m 为轧制计划数;

n_{zk} 为轧制计划 k 内主体材板坯数;

n_{tk} 为轧制计划 k 内烫辊材板坯数;

q_i 为板坯 i 的轧制长度;

Q_{kz} 为轧制计划 k 主体材长度约束;

Q_{tz} 为轧制计划 k 烫辊材长度约束;

R 为轧制同宽度板坯的长度约束

轧制计划数的最小值由下式确定:

$$m_{\min} = \text{int} \left[\frac{\sum_{i=1}^n q_i}{Q_{kz} + Q_{tz}} \right], \quad (12)$$

其中 int 表示取整

目标函数(1)保证轧制计划数最少; 目标函数(2)是批量计划中各轧制计划内板坯间宽度、厚度、硬度跳跃的总惩罚值函数; 约束条件(3)保证每块板坯必须分配并且只能分配到一个轧制计划中; 约束条件(4)和(5)为主体材总长度约束和相同宽度板坯轧制长度约束; 约束条件(6)和(7)为烫辊材总长度约束和相同宽度板坯轧制长度约束; 约束条件(8)和(9)保证每块板坯只能处理一次, 不能重复计算; 约

束条件(10)为只有同一轧制计划内的板坯才考虑相同宽度板坯轧制长度约束; 约束条件(11)是为避免 VRP 中的子回环问题 其中板坯间宽度、厚度、硬度跳跃惩罚系数在文献[1]中已有表述, 文献[4]给出了宽度反跳的惩罚系数

3 轧制计划 VRP 模型的求解算法

VRP 是 NP-难问题, 单纯使用一种算法求解大规模 VRP 很难获得满意的结果 本文在基本的 VRP 中加入了更多的约束, 这样模型变得更加复杂 免疫算法对于求解大规模组合优化问题具有很大的潜力 本文构造出一种基于单亲遗传算子的免疫算法, 并结合专家系统方法来求解轧制计划 VRP 模型

3.1 抗体编码方式

文献[6]研究了车辆路径问题的遗传算法, 构造了车辆路径问题的染色体编码方法, 并对染色体进行可行化映射 本文将该方法移植到车辆路径问题的免疫算法抗体编码上, 并作了适当修改, 通过这种编码方式, 算法自动满足约束条件(3), (8)~(11).

抗体编码采用自然数编码, 用矢量 $K = (s_1, s_2, \dots, s_m \times n)$ 表示抗体 K , 其中 $s_i (i = 1, 2, \dots, t)$ 为 $[1, m \times n]$ 之间互不重复的自然数, 表示抗体中第 i 个基因 确定第 $l = s_i - \lfloor \frac{s_i - 1}{n} \rfloor \times n$ 个顾客与第 $k = \lfloor \frac{s_i - 1}{n} \rfloor + 1$ 个车辆的关系 ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整). 即确定第 l 个顾客是否由第 k 个车辆服务及其在服务中的次序, 本文是指第 l 块板坯是否归入第 k 个轧制计划及在第 k 个轧制计划中的次序 随机产生一组抗体 $K_j (j = 1, 2, \dots, \text{pop})$, 即可构成一个抗体种群 (pop 为种群中的抗体数). 抗体可行化映射过程如下 (以一个抗体为例):

1) 初始化抗体 $K = (s_1, s_2, \dots, s_m \times n)$: 令各轧制计划中的板坯数 $\text{num}_i = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$, 当前计划中板坯的总轧制长度 $l_{o_i} = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$, 轧制计划的长度约束为 L , 各板坯的状态为 $f_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$.

2) 令 $j = 1$.

3) 取 s_j , 计算

$$l = s_j - \left\lfloor \frac{s_j - 1}{n} \right\rfloor \times n,$$

$$k = \left\lfloor \frac{s_j - 1}{n} \right\rfloor + 1$$

4) 判断 f_l 的状态: 如果 $f_l = 0$, 则板坯 l 仍为自由板坯; 如果 $l_{o_k} < L$, 则将板坯 l 加入轧制计划 k , $\text{num}_k = \text{num}_k + 1$ (num_k 为当前板坯 l 在轧制计划中 k 的序号), $l_{o_k} = l_{o_k} + \text{板坯 } l \text{ 的长度}$, $f_l = 1$; 如果 $l_{o_k} < L$ 不成立, 则转 5); 如果 $f_l = 0$ 不成立, 则直接转 5).

5) $j = j + 1$, 转3), 直到 $j = m \times n + 1$

6) 检查所有板坯的状态标志 $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 如果全为1, 则表明所有板坯都按要求分配到轧制计划中; 否则, 认为是一个不可行解, 重新进行处理

3.2 抗体记忆细胞群

抗体记忆机制是免疫算法的一个重要特点, 首先确定抗体记忆群的规模(本文设为30); 然后在求解过程中每次抗体种群产生后, 将适应度最好的一定数量的抗体(本文设为5)存入记忆抗体群. 每次入选抗体记忆库时, 如果记忆库已满, 则替换掉适应度值较差的抗体

在每次产生初始抗体群时, 一部分抗体从抗体记忆库中选出, 另一部分采用随机方法产生. 这样既可拥有较优的抗体, 又能保证抗体的多样性

3.3 新抗体生成

单亲遗传算法(PGA)是一种特殊的遗传算法, 它不使用交叉算子, 仅通过单个个体繁殖后代, 在采用序号编码求解组合优化问题时更加方便. 下例是单亲遗传算子——基因换位算子的实例, 其他算子与此类似. 本文采用自然数编码, 抗体内自然数不可重复. 相互次序对结果会有影响. 为此采用单亲遗传算子, 它具有操作简单、计算效率高、不存在早熟收敛等优点. 本文生成新抗体以单点基因换位为主, 辅以多点基因换位和基因移位等单亲遗传算子.

单点基因换位: 假设换位的位置为2和5, 基因序号为

1 2 3 4 5 6 7 8,

换位前的染色体为

5 8 1 6 15 20 30 23,

换位后的染色体为

5 15 1 6 8 20 30 23

3.4 免疫算法求解步骤

1) 算法初始化: 给出算法参数, 并给出初始种群

2) 当前种群抗体的确定: 利用抗体记忆库产生当前抗体群

3) 判断当前种群中的抗体是否满足约束条件(4)~(7), 如果不满足, 则采用专家系统方法进行修正, 直到满足为止, 并计算各抗体的适应值

4) 新抗体的产生: 对当前种群中的抗体进行单亲遗传算子操作, 依次以概率 p_e, p_m, p_s 进行单点基因换位、多点基因换位和单点基因移位操作, 生成新的种群抗体

5) 群体的更新: 采用赌轮选择和锦标赛选择方法对抗体进行更新. 首先对新种群进行可行化处理,

计算其适应值; 然后进行选择更新操作, 并更新抗体记忆库, 记录当前群体的最优抗体

6) 判断是否满足结束准则: 是则转到7); 否则转到2), 重复进行进化操作

7) 判断当前最优解并与前一 M 条件下的最优解比较: 如果当前最优解的适应值较优, 则将当前种群的最优抗体作为算法的解, 并输出结果; 否则, $M = M + 1$, 转2)进行计算

4 仿真研究

为验证轧制计划模型及算法, 从热轧带钢厂的生产数据中随机抽取270块板坯来编制轧制计划, 模型中的宽度、硬度和厚度的惩罚系数采用文献[1]提供的惩罚函数表, 宽度反跳的惩罚系数采用文献[4]提供的宽度反跳惩罚函数表. 根据板坯的实际情况, 假定轧制计划烫辊材的长度约束 $Q_{\tau} = 10$ km, 主体材的长度约束 $Q_{kz} = 140$ km, 长度约束波动范围为1 km. 这样, 轧制计划的轧制能力为150 km, 轧制同宽度板坯的长度约束 $R = 5$ km.

在算法求解中, 本文选取参数如下: 抗体记忆规模为30, 抗体记忆库每次更新抗体数为5, 单亲遗传算子的单点基因换位概率 $p_e = 0.95$, 多点基因换位概率 $p_m = 0.15$, 单点基因移位概率 $p_s = 0.15$, 算法结束准则为连续迭代300代. 仿真结果如图3、图4和表1所示, 最优目标函数值为1687.1. 由于计划板坯数据较多, 本文只列出轧制计划编制结果. 由表1结果可知算法将270块板坯编制成两个轧制计划, 烫

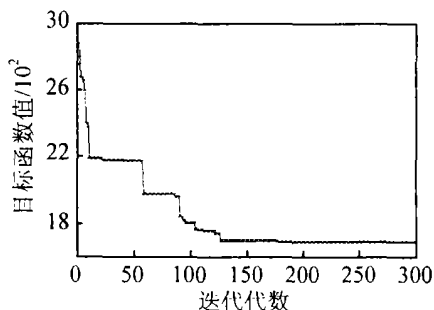


图3 目标函数随迭代次数变化

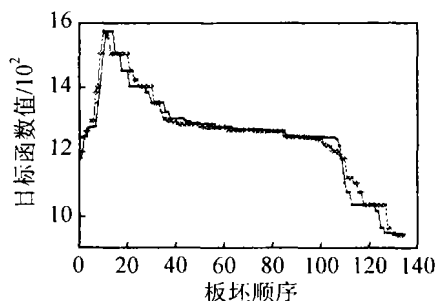


图4 轧制计划内板坯宽度变化

表 1 轧制计划编制结果

编号	板坯数	轧制长度 (km)	烫辊材		主体材	
			板坯数	长度	板坯数	长度
1	134	149.7	9	9.5	125	140.2
2	136	148.8	10	9.1	126	139.7

辊材和主体材都在长度约束范围内, 并且都在轧辊最大能力的范围内(烫辊材为 10 km 左右, 主体材为 140 km 左右)。

由轧制计划编制结果及相关图表可知, 宽度、硬度和厚度都满足跳跃规范, 轧制长度最大限度地接近轧制计划的最大能力(150 km), 这有利于充分发挥轧辊的生产能力。由图 3 可以看出, 随着迭代次数的增加, 优化效果越来越明显, 但计算时间也会增加。具体的迭代次数需要根据生产实际情况来决定。

5 结 论

本文分析了炼钢-连铸-热轧一体化生产中热轧轧制计划编制问题, 建立了不确定轧制计划数的轧制计划 VRP 模型。该模型不仅考虑了轧制计划中板坯厚度和硬度的跳跃、板坯宽度的正反跳和相同宽度板坯轧制的长度约束, 而且考虑了烫辊材和主体材的合理分配问题。文中构造了基于单亲遗传算子的免疫算法, 对轧制计划 VRP 模型进行求解。通过实际生产数据排产结果表明, 本文建立的模型和算法切实可行, 轧制计划编制的效果良好, 可应用于生产实际。

参考文献(References)

[1] Kosiba E D, Wright J R, Cobbs A E. Discrete event

sequencing as a traveling salesman problem [J]. *Computers in Industry*, 1992, 19: 317-327.

- [2] Leo Lopez, Michael W Carter, Michel Gendreau. The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach [J]. *European J of Operational Research*, 1998, 106: 317-335.
- [3] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Boshan Iron and Steel Complex [J]. *European J of Operational Research*, 2000, 124: 367-382.
- [4] 张涛, 王梦光, 杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型和算法[J]. *系统工程学报*, 2000, 15(1): 54-60
(Zhang T, Wang M G, Yang J X. The model and algorithm for the hotmilling batch planning with uncertain number[J]. *J of System Engineering*, 2000, 15(1): 54-60.)
- [5] 朱宝琳, 于海斌. 炼钢-连铸-热轧生产调度模型及算法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2003, 9(1): 33-36
(Zhu B L, Yu H B. Production scheduling model and algorithm for steel making-continuous casting - hot rolling processes [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(1): 33-36.)
- [6] 姜大立, 杨西龙, 杜文, 等. 车辆路径问题的遗传算法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 1999, 6: 40-45
(Jiang D L, Yang X L, Du W, et al. A study on the genetic algorithm for vehicle routing problem [J]. *System Engineering - Theory and Practice*, 1999, 6: 40-45.)

(上接第 274 页)

参考文献(References)

- [1] Siljak D D. *Large-scale dynamic system: Stability and structure* [M]. New York: Elsevier North-Holland, 1978.
- [2] Moylan P. A connective stability result for interconnected passive systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1980, 25: 812-813.
- [3] Shigui R. Connective stability for large-scale systems described by functional differential equations[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(2): 198-200.
- [4] Jain S, Khorrami F. Decentralized control of large-scale power systems with unknown interconnections [A]. *Proc of the 4th IEEE Conf on Control Applications* [C]. New York, 1995: 618-623.

- [5] Malikov A I, Matrosov V M. Lyapunov vector functions in the analysis of dynamical properties of systems with structural changes[J]. *Int J of Computer and System Sciences*, 1998, 37(2): 207-214.
- [6] Chen X B, Stankovic S S. Overlapping decomposition and decentralized LQG control for interconnected power systems [A]. *Proc of IEEE SMC 96* [C]. Beijing, 1996, 3: 1904-1909.
- [7] 须田 信英, 児玉 慎三, 池田 雅夫. 曹长修译. *自动控制中的矩阵理论* [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [8] Zhou K M, Pramod P K. Stability robustness bounds for linear state-space models with structured uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1987, 32(7): 621-623.