

基于 Petri 网与遗传算法的半导体生产线建模与优化调度

曹政才¹, 余红霞², 乔 非²

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 同济大学 CIMS 研究中心, 上海 201804)

摘 要: 针对半导体生产线调度复杂、难以优化的问题, 本文提出一种基于层次有色赋时 Petri 网技术和遗传算法相结合的优化调度方法. 该方法利用层次化的思想结合自顶向下建模方法对半导体生产线进行模块化建模, 模型不仅能够反映生产线待加工产品的多条加工路径及其资源约束, 还可以对系统的设备维护、各种优先级等特性进行描述, 得到对生产系统更完善更精确的刻画. 通过在遗传算法编码中考虑投料策略、工件选设备规则、批加工调度规则和单件加工设备规则等因素得到更加有效的调度方案, 提高了模型的优化程度. 在此基础上, 对实际半导体生产线的不同调度方案分别进行仿真, 并对仿真结果进行比较, 从而验证了建模方法的正确性及调度策略的有效性.

关键词: 半导体生产线; 层次有色赋时 Petri 网; 遗传算法; 建模; 优化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0340-05

Petri-Net and GA-Based Approach to Modeling and Optimize for Semiconductor Wafer Fabrication

CAO Zheng-cai¹, YU Hong-xia², QIAO Fei²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: As scheduling in semiconductor wafer fabrication is complicated and difficult to optimize, a genetic algorithm (GA) embedded search strategy over a Hierarchical colored timed Petri net (HCTPN) for semiconductor wafer fabrication is proposed. All possible behaviors of the semiconductor wafer fabrication systems such as lot routing, resource restrict, equipment maintenance, priority of the system can described through the HCTPN model, which is modeled by hierarchical theory and top-view method. The chromosome representation of the search nodes in GA is record the information about the appropriate scheduling policy such as release policy, equipment selecting rule, batching rule and dispatching rule. According to the results, using different scheduling strategy to simulate and analyze the performance. The simulation result has proved that the model is efficient and accurate, and the GA scheduler is validity.

Key words: semiconductor wafer fabrication; hierarchical colored timed Petri-Net; genetic algorithm; modeling; optimize

1 引言

半导体生产线作为第三类生产系统—可重入生产系统, 具有可重入、批处理设备与单片加工设备并存、机器负载不均衡等不同于传统生产线的特殊性和复杂性, 被认为是当今最复杂的制造过程之一. 由此造成半导体生产线存在不确定、大规模、复杂的调度环境, 给半导体生产线建模带来很大的困难, 其调度问题已成为 NP 难题. 因此有效的建模工具、建模方法及调度策略是实现半导体制造过程分析和良好调度的一个重要因素.

Petri 网由于其其在处理动态离散事件和复杂系统时, 具有图形标识和数学处理功能, 在半导体制造业生产调度上受到越来越多的重视. 目前, 关于利用 Petri 网技术解决系统任务调度问题的研究可分为两类^[1]: 一类是基于构造 Petri 网可达图的启发式搜索算法, 这种方法主要是利用启发函数建立 Petri 网的局部可达图, 然而, 即使是可达图也不能避免模型爆炸问题^[2,3]; 另一类主要依靠一些搜索算法搜索 Petri 网的最优变迁序列来实现优化. 国内外学者在这方面作了大量研究, 如: Zhang 等人^[4]提出了基于面向对象 Petri 网的半导体生产线调度

模型;翟文彬等人^[5]提出了面向代理的有色赋时 Petri 网的半导体生产线建模方法,将半导体生产线多代理模型按层次划分为设备代理层、设备组层和系统层,有效地降低模型复杂性,提高模型可重用性.Jain 等人^[6]提出基于 GSPN (Generalized Stochastic Petri-Net) 和 SA (Simulated Annealing) 的半导体生产线调度优化,通过 GSPN 对生产线进行建模,然后应用 SA 对该模型进行调度并获取最优解.目前的研究^[7-9]侧重于工件调度,而忽略了对生产线性能有很大影响的投料策略.因此本文提出的方法不仅考虑了工件调度,而且结合了生产线的投料策略,用遗传算法动态搜索出系统的最佳投料策略及工件调度规则,再利用搜索出的调度规则对系统进行调度,实现二次优化,解决了系统中规则单一无法应付复杂多变情况的问题.

本文以层次有色赋时 Petri 网(HCTPN)作为建模工具,遗传算法作为调度策略嵌入 HCTPN 中,HCTPN 模型有效的描述了系统的复杂加工流程及工件的详细加工过程.根据遗传算法的染色体提供的调度策略进行调度,得到系统的性能参数,通过适应值计算来不断优化系统的性能.

2 半导体生产线调度模型

2.1 层次有色赋时 Petri 网

因基本 Petri 网中对个体的变化细节描述过多,另外 token 的含义比较简单,不利于对系统的理解.考虑到半导体生产线的复杂性,如果用基本 Petri 网对生产线进行建模,肯定会使所建模型结构过于庞大,难以分析和实现.因此,在基本 Petri 网基础上衍生出多种新型的 Petri 网,如时间 Petri 网、随机 Petri 网、广义随机 Petri 网、着色 Petri 网、模糊 Petri 网、面向对象 Petri 网等.其中层次有色赋时 Petri 网就是在基本 Petri 网的基础上引入了颜色和时间概念,另外 token 也增加了颜色,进行层次化扩展,加强了自身的描述能力,还能层次化地进行业务流程建模,因此模型具有模块化的特点,便于模型的重用和优化分析.

为便于理解,HCTPN 可以抽象为以下两个定义:抽象变迁和通信库所.

抽象变迁:用变迁表示 Petri 网中的一个子模型,从而使得 Petri 网模型从逻辑上得到简化.

通信库所:是用于连接上下层两个模型之间的接

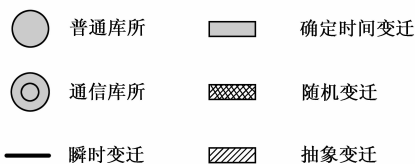


图1 HCTPN库所变迁的图形标识

口.

本文在 Petri 网建模中用到的各库所变迁分别用如图 1 标识表示.

2.2 半导体生产线 Petri 网建模

作为一种复杂的高技术生产系统,半导体生产过程具有自身的特点,因此在建模时面临着许多新挑战.本文利用了分层有色赋时 Petri 网对半导体生产线进行建模,并结合了自顶向下的建模方法,将半导体生产线划分路径调度层、设备组调度层和设备调度层.

在层次化建模中,下层模型被看作是其上层模型的一部分,上下层模型之间的衔接决定着系统中信息的准确传递.各层次模型间需要有信息的输入输出,因此各模型都有一个输入、一个输出以及一个代表下层模型的暗箱组成(最底层模型除外).输入输出用通信库所表示,暗箱用抽象变迁表示.暗箱中的详细内容是通过对比变迁的细化得到.

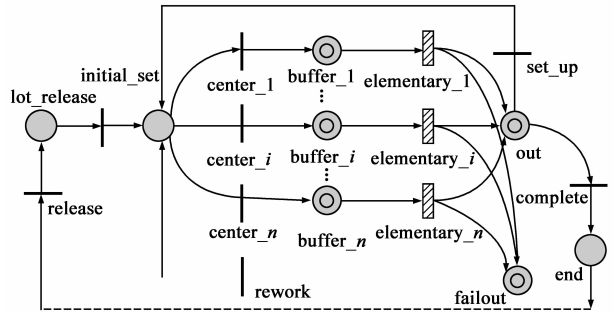


图2 路径调度模型

如图 2 所示.路径模块是用来表示半导体生产工艺加工路线过程.首先针对建模对象的特点根据系统中设备加工工序的相似性以及可在可重入路线中位置的相似性划分为几个不同的加工中心,每组包含若干台设备,加工中心组可以看作特殊的库所.其次在加工中心层面内建立不同工序与设备间的多工序与多台设备间的对应工艺加工关系模型.

设备组调度根据设备当前状态的信息确定工件在哪台设备上加工,如图 3 所示.

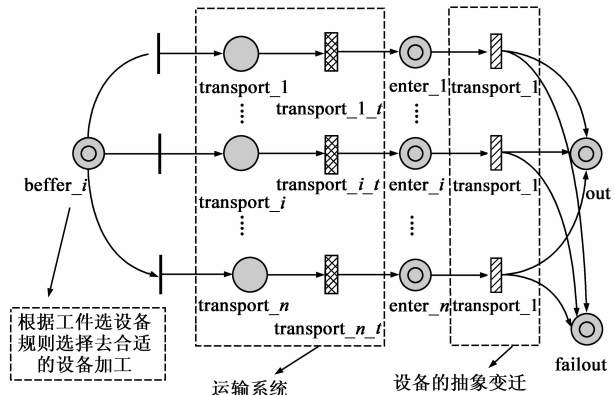


图3 设备组调度模型

设备模块表示设备状态(加工过程、紧急工件处理和设备维护等),设备调度用于确定工件在加工设备上的加工序列和开始加工时间,主要解决工件在设备组内各设备上的调度和资源分配问题,描述了工件的详细加工过程,其调度模型如图 4 所示。

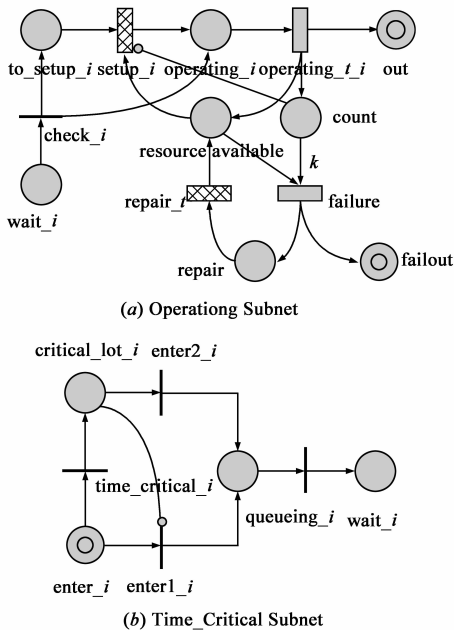


图4 设备调度模型

3 半导体生产线调度描述

遗传算法的主要特点是群体搜索策略和种群中个体之间的信息交换搜索不依赖于梯度信息,适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题,由于这个特点,本文用遗传算法搜索出适合生产线的调度方法的组合,其算法实现流程如图 5 所示。

(1)染色体编码

根据半导体生产线调度的特点,遗传编码采用基于调度规则的编码方法,并结合投料策略。本文的染色体有四种类型的基因: g_l 、 g_m 、 g_d 和 g_b , 分别表示投料规则、工件选设备规则、单片加工规则和多批加工规则。其中 $g_l = (a, b)$, a, b 分别表示投料规则 UNIF 和 CONWIP; $g_m = (c, d, e, f)$, 各基因位由表 1 中的工件选设备规则表示; $g_d = (i, j, k, l)$, 同样的,基因位由表 1 中的单片加工设备调度规则表示; $g_b = (m, n)$, m, n 分别表示 MAXC 和 MINC。表 1 中各规则含义如下:

UNIF:固定时间间隔投料规则, CONWIP:固定在制品投料规则, MTT:最短测试时间, MST:最小整定时间, UTIL-L:最低设备利用率, SEPT:最短预期加工时间, MAXC:最大加工批量, MINC:最小加工批量, FIFO:先来先服务, EDD:最早交货期优先, SPT:最短加工时间, LPT:最长加工时间。

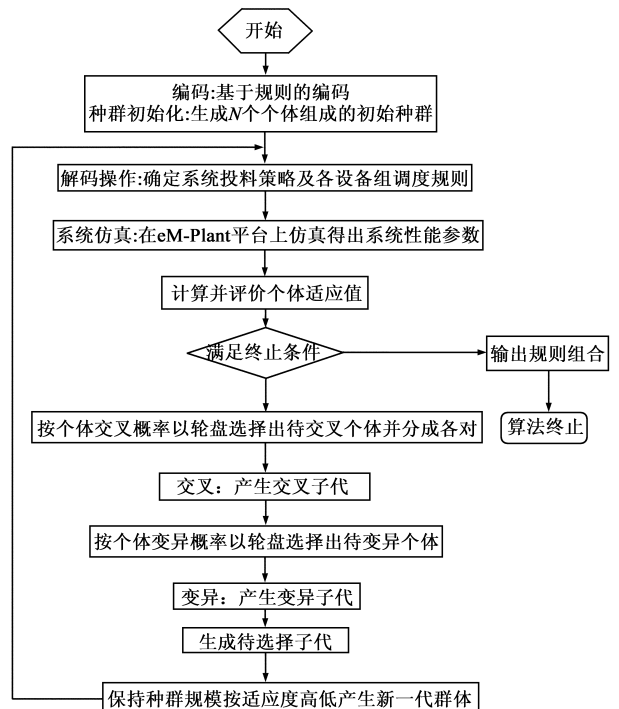


图5 遗传算法流程图

表 1 染色体基因

Lot Release Policy		Machine Selecting Rule		Batching Rule		Dispatching Rule	
Name	Code	Name	Code	Name	Code	Name	Code
UNIF	1	MIT	1	MAXC	1	FIFO	1
CONWIP	2	MST	2	MINC	2	EDD	2
		UTIL-L	3			SPT	3
		SEPT	4			LPT	4

(2)染色体解码

对于 n 个设备组的调度,采用一个特定编码的染色体,第 1 个基因表示工件的投料策略,其余 $2 \sim n + 1$ 个基因分别表示 n 个设备组的调度规则,如第 i 个基因的第 1 个元素表示第 $i - 1$ 个设备组的工件选设备规则,如果该设备组的设备是批加工设备,则其调度规则为基因的第 2 个元素代表的调度规则,否则为基因的第 3 个元素代表的调度规则。

(3)适应度函数

本文研究的目标问题是优化工件的准时交货率、产量、移动量和平均加工周期等性能指标,以满足客户的要求。因此选取准时交货率、产量、移动量和平均加工周期作为染色体的评价指标,这是个多目标问题,最简单的方法是将所有指标进行加权得到一个适应值,其计算公式如下:

$$f(c) = w_1 f_1(c) + w_2 f_2(c) + w_3 f_3(c) + w_4 f_4(c) \quad (1)$$

其中, $f(c)$ 表示 c 染色体的适应值, $f_i(c)$ 为第 i 个目标函数的值, w_i 为第 i 个目标函数的权值, f_1, f_2, f_3, f_4 分别表示准时交货率、产量、移动量和平均加工周期的

值,由于各个目标函数单位不一致,需对其进行归一化,本文采取的方法是,对各个目标函数按大小进行排序.具体的,对于 f_1 ,将所有染色体按照准时交货率的高低进行排序,准时交货率越高的染色体等级越高,其余以此类推,得到各个染色体的各个目标函数值,根据设定的权值计算得出各染色体的适应值.

(4) 选择算子

算子选择采用轮盘赌法与最佳个体保存法相结合.在轮盘赌法中对于适应值为 f_i 的染色体 i 被选择的概率为 $p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$.为保证每代优良个体不被破坏,

采用最佳个体保存法:将种群中适应值最高的个体不进行配对交叉而直接复制到下一代中去.

(5) 交叉算子

采用两点交叉方法,即在双亲的染色体上随机地选择两个固定的点,把这两个点的基因进行交叉,如:

$$\begin{array}{ccc} 12\ 3456 & \Rightarrow & 124326 \\ 65\ 4321 & & 653451 \end{array}$$

遗传算法中,交叉概率 p_c 一般取 0.4 ~ 0.99,这些参数的选取往往与所求解的问题有关,需根据经验或反复实验确定,这个过程非常繁琐,增加了实际应用的难度.Srinivas 等人提出了一种自适应遗传算法 AGA,交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 随个体适应度大小和种群分散程度自动调整.其交叉概率 p_c 的自适应计算公式为

$$p_c = k_1(f_{\max} - f_{\text{avg}})/(f_{\max} - f_{\min}) \quad (2)$$

其中: k_1 为常数; f_{\max} , f_{avg} , f_{\min} 分别为当前种群的最大、平均和最小适应值.

(6) 变异算子

变异算子只是为选择、交叉过程中可能丢失的某些遗传基因进行修复和补充,采用概率变异法进行变异,其自适应变异概率 p_m 的计算公式为

$$p_m = k_2 + k_3(f_{\max} - f_i)/(f_{\max} - f_{\min}) \quad (3)$$

其中: k_2 , k_3 为常数.

(7) 终止条件

以预先设定的最大进化代数 N_{gen} 作为停止条件.

4 仿真平台设计

根据建立的 HCTPN 模型,半导体生产线的性能可以通过仿真技术进行分析和评价.本文利用面向对象的仿真软件 eM-Plant,根据实际情况将仿真平台分为三层:模型层、调度与控制层和系统性能分析层(如图 6).模型层实现对半导体生产线的制造资源进行仿真建模.控制与调度层负责针对变迁的触发条件、时延和路径选择,使用 Simtalk 语言编写工件与设备的调度规则和控制策略实现仿真的控制与调度.性能分析层从不

同的视图和数据库获取仿真数据,进行定量的性能分析和评价.模型层和调度与控制层的通信用 eM-Plant 的 Socket 对象实现,调度与控制层和分析层的信息交互通过 ODBC 接口实现.

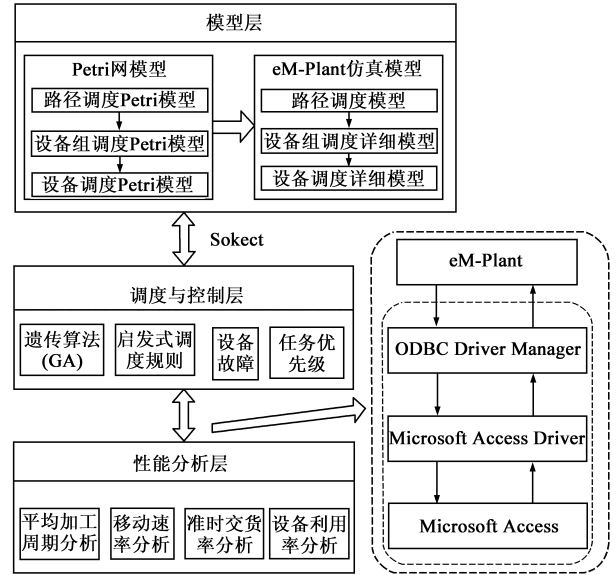


图6 仿真实验平台

5 仿真实验结果及分析

为验证基于 Petri 网与遗传算法的半导体生产线调度对实际半导体生产线的有效性,本文以上海某半导体公司的 4 寸生产线的实际生产数据进行调度研究,建立了基于 HCTPN 的路径调度模型、设备组调度模型和设备调度模型,以提高工件的准时交货率及产量和移动量、降低工件的平均加工周期为目标,分别采用了几种调度策略进行仿真比较.该半导体生产线的产品品种很多,有 400 余种,可分为产品工艺大类 35 种.每种产品可能对应多个产品版本,目前共有 888 种产品版本.同时在线上流动的产品版本大约 100 余种.共有加工设备 140 余台,按照功能的不同,可划分为四个功能区域,即注入溅射区域、光刻区域、刻蚀区域与氧化薄膜区域,具体分为 40 个设备组.

比较与分析:本文用 eM-Plant 仿真平台上,选择系统的仿真时间为 100 天,分别对 FIFO、SPT、LPT 调度规则与遗传算法调度策略下生产系统中工件的总移动量、总产量、准时交货率和平均加工周期进行比较.从图 7 可以看出,在产品移动量上,遗传算法明显优于 SPT 和 LPT,与 FIFO 基本持平.图 8 中,实验结果显示 GA 大幅提高了生产率,至少提高了 8.5%.图 9 的结果同样显示 GA 具有较好的准时交货率.图 10 中,GA 明显缩短了平均加工周期.基于实际生产数据的仿真结果比较与分析表明,利用 GA 调度具有较高的移动量,提高了准时交货率和总产量,降低产品的平均加工周期.遗传算法调度策略对于提高系统性能明

显优于启发式规则。

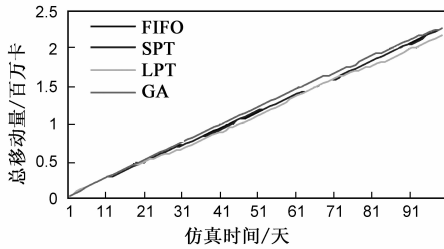


图7 总移动量

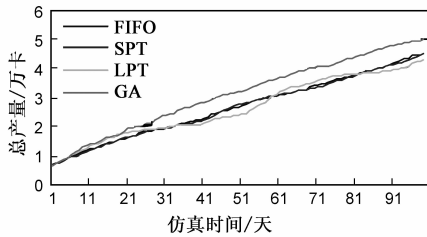


图8 总产量

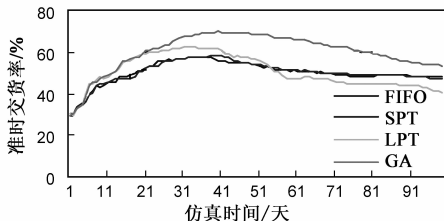


图9 准时交货率

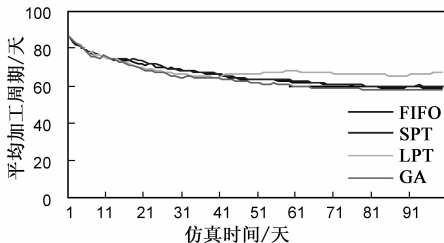


图10 平均生产周期

6 结论

本文根据半导体生产线的特点,建立了分层 Petri 网模型,并运用该模型对实际半导体生产线进行了应用研究,一方面说明了该模型能够对半导体制造过程进行有效的描述,展示了 Petri 网在描述资源共享、重入、设备故障等方面的强大功能;另一方面,把模型和调度算法结合起来,描述了遗传算法在 Petri 网模型中是如何嵌入的,从而为优化调度提供强有力的模型支持;另外,仿真结果表明,利用 Petri 网和 GA 结合对实际半导体生产线进行建模调度十分有效,且方法可行,获得了令人满意的结果。

参考文献:

[1] 吴启迪,乔非,李莉,等.半导体制造系统调度[M].北京:电子工业出版社,2006.

Q D Wu, F Qiao, L Li, et al. Semiconductor Manufacturing

System Scheduling[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.

[2] G Mejía, N G Odrey. An approach using petri nets and improved heuristic search for manufacturing system scheduling [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2005, 24(2): 79-92.

[3] M C Zhou. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A Petri net approach [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(3): 333-357.

[4] H Zhang, Z B Jiang, C T Guo, H R Liu. An extended object-oriented Petri-net modeling based simulation platform for real-time scheduling of semiconductor wafer fabrication system [A]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. Taipei, Taiwan, October, 2007, 4: 3411-3416.

[5] 翟文彬,褚学宁,张洁,马登哲.面向代理的半导体生产线建模技术研究.计算机集成制造系统,2005,11(3): 326-330.

W B Zhai, X N Chu, J Q Yan, D Z Ma. Research on AOCTPN based modeling technology of semiconductor fabrication line [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(3): 326-330. (in Chinese)

[6] V Jain, R Swarnkap, M K Tiwari. Modeling and analysis of wafer fabrication scheduling via generalized stochastic Petri net and simulated annealing [J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(15): 3502-3527.

[7] J H Chen, L C Fu, M H Lin, A C Huang. Petri-net and GA-based approach to modeling, scheduling, and performance evaluation for wafer fabrication [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2001, 17(5): 619-638.

[8] S Y Lin, L C Fu, T C Chiang, Y S Shen. Colored Timed Petri-Net and GA Based Approach to Modeling and Scheduling for Wafer Probe Center [A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation [C]. Taipei, Taiwan, 2003. 1434-1439.

[9] T C Chiang, Y S Shen, L C Fu. Adaptive Lot/Equipment Matching strategy and GA based approach for optimized dispatching and scheduling in a wafer Probe center [A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation New Orleans [C]. La, April 2004, 3125-3130.

作者简介:



曹政才 男,1974年出生,工学博士,副教授,主要研究方向:复杂系统建模、优化与控制,机器人技术。

E-mail: giftzc@mail.buct.edu.cn