

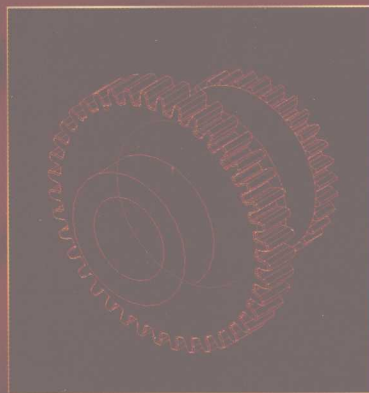


21世纪先进制造技术丛书

自动制造系统 建模、分析与死锁控制

Modeling, Analysis, and Deadlock Control of
Automated Manufacturing Systems

• 李志武 周孟初 著 •



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪先进制造技术丛书

自动制造系统 建模、分析与死锁控制

**Modeling, Analysis, and Deadlock Control of
Automated Manufacturing Systems**

科学出版社

北 京

内 容 简 介

自动制造系统的死锁控制是近二十年来生产自动化科学与工程领域研究的热点问题。图论、自动机和 Petri 网是这一领域研究的主要数学方法,其中以 Petri 网技术的应用最为广泛。

本书阐述了基于 Petri 网理论的自动制造系统的死锁预防策略,反映了这一领域的重要成果和最新进展。内容主要包括 Petri 网的基本信标理论,基于信标的死锁控制策略,基于可达图的死锁控制方法,活性 Petri 网控制器的结构化简方法以及计算机科学中著名的分治策略在活性 Petri 网控制器设计中的应用。

本书可供从事自动制造系统设计与控制的研究人员与工程师参考,并可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动制造系统建模、分析与死锁控制=Modeling, Analysis, and Deadlock Control of Automated Manufacturing Systems /李志武,周孟初著. —北京:科学出版社,2009

(21 世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-024279-2

I. 自… II. ①李… ②周… III. ①自动化系统-系统建模 ②自动化系统-系统分析 ③自动化系统-系统控制 IV. TH165

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 040232 号

责任编辑:王志欣 裴 育 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—2 500 字数: 271 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编：熊有伦(华中科技大学)

编 委：(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中科院沈阳自动化所)

王 煜(香港中文大学)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

江平宇(西安交通大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

周仲荣(西南交通大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

钟志华(湖南大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

顾佩华(汕头大学)

黄 强(北京理工大学)

黄 真(燕山大学)

管晓宏(西安交通大学)

黄 田(天津大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

雒建斌(清华大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008 年 4 月

前 言

死锁是自动化生产系统(如自动柔性制造系统、集成电路制造系统)控制设计时必须考虑和解决的问题。死锁造成的整个或部分系统的停顿,在有些情况下,并不是单纯地降低生产率,而是可能造成重大经济损失甚至灾难性后果。对死锁问题的系统研究,始于 20 世纪下半叶,源于计算机操作系统中的资源分配问题;80 年代以后,制造系统完成了从大批量、品种单一的生产模式向以小批量、多品种以及具备适应市场快速变化能力为目标的现代自动柔性制造系统的转变,自动制造系统中的死锁研究也受到了广泛重视和关注。

资源分配系统中的死锁产生一般认为需要四个必要条件:相互抑制、无优先权、持有并等待和循环等待。研究表明,这四个条件中的前三个在实际资源分配系统中往往是成立的。因此,自动制造系统中抑制死锁产生的途径是使系统的资源分配策略永远不要产生循环等待现象。除了忽略死锁的发生,死锁问题主要有以下三种解决策略:死锁检测与恢复(校正)、死锁避免和死锁预防。死锁检测与恢复策略允许系统出现死锁,一旦检测到系统处于死锁状态,则通过重新分配资源,使系统恢复到正常状态。死锁避免使用一种在线的资源分配机制,使系统不能进入死锁状态。死锁预防策略通过离线计算事先建立一种方法来控制资源的请求,从而保证系统不会发生死锁。

目前国际上研究死锁问题的主要数学方法有图论、形式语言和自动机理论以及 Petri 网。由于 Petri 网的固有优点,最近二十年来被广泛作为研究自动制造系统死锁分析与控制的数学工具,尤其在死锁避免和死锁预防方面取得了丰富的研究成果。遗憾的是,这一领域的最新研究成果和进展目前国内还较少得到系统地介绍。此书的写作目的正是试图填补这一空缺,向读者系统地介绍基于 Petri 网理论的自动制造系统死锁分析与控制的最新进展和研究成果。

本书主要是针对专门从事自动制造系统控制系统设计的研究人员和工程师撰写;也可作为高年级本科生和研究生有关离散事件系统导论、Petri 网理论与应用、自动制造系统建模与控制的教学参考书。为此,在每一章最后精心设计了问题,有些是启发式的,有些问题目前还没有得到很好地解决或者还没有解决。认真思考和解决这些问题,将有助于正确理解本书所述内容以及深入这一领域的研究。

本书共有 7 章。第 1 章是绪论,介绍自动制造系统的组成与特点、死锁产生的背景、各种死锁控制策略的基本思想,回顾了基于 Petri 网的自动制造系统死锁控制的研究成果,同时简单介绍了自动机理论以及图论的方法在死锁分析与控制

中的应用。第 2 章介绍 Petri 网基本理论、自动机以及一些必要的数学基础知识。第 3 章是 Petri 网的基本信标理论, 主要包括等价信标、基本信标和从属信标的概念, 以及从属信标的可控性等, 对于设计结构简单的活性 Petri 网控制器非常重要。第 4 章阐述各种基于信标的死锁预防策略, 包括完全信标枚举和不完全信标枚举的方法; 此外, 还介绍了一种死锁控制的多项式算法。第 5 章主要是基于可达图的死锁预防策略, 并给出了几个变种算法, 旨在改进最初的区域方法的计算复杂性问题。第 6 章是活性 Petri 网控制器的简化, 主要介绍基于隐式库所和基于可达图的方法。针对一类典型的 Petri 网, 第 7 章阐述计算机科学中的分治策略在死锁控制中的应用, 该策略的显著优点是降低了控制器设计的计算复杂性。

本书第一作者特别感谢美国工程院外籍院士、离散事件系统监督控制理论的创始人、University of Toronto 的 W. M. Wonham 教授, Taiwan Ocean University 的郑慕德 (M. D. Jeng) 教授, Defense University 的黄义盛 (Y. S. Huang) 教授, Nigde Universitesi 的 M. Uzam 教授, 广东工业大学的伍乃骐 (N. Q. Wu) 教授, Taiwan Cheng Chi University 的赵玉 (Y. Chao) 教授, Technion-Israel Institute of Technology 的 M. Shpitalni 教授, Conservatoire National des Arts et Metiers 的 K. Barkaoui 教授, Politecnico di Bari 的 M. P. Fanti 教授以及 Martin-Luther University 的 H. M. Hanisch 教授, 作者从和他们的交流合作中受益匪浅。感谢 Alexander von Humboldt 基金会给予的资助使得本书能够顺利完稿。感谢 Alexander von Humboldt 基金会亚洲分部的 K. Schmidt 女士的理解、帮助和宽容。特别感谢中国计算机学会 Petri 网专业委员会的老师们对他多年来在学术研究中的指导、关心、鼓励和帮助。

本书第二作者感谢博士论文指导教师、美国 Rensselaer Polytechnic Institute 的 F. DiCesare 教授以及答辩委员会成员 A. Desrochers 教授和 A. Sanderson 教授, 是他们引导作者进入这一科学领域并帮助作者开始了其学术研究生涯。同时也要感谢 Petri 网领域的杰出贡献者: Indian School of Business 的 N. Viswanadham 教授, University of Illinois at Chicago 的 T. Murata 教授, University of Koblenz-Landau 的 K. Lautenbach 教授, Indian Institute of Science 的 Y. Narahari 教授, University of Connecticut 的 P. B. Luh 教授, University of Texas at Arlington 的 F. Lewis 教授, Rensselaer Polytechnic Institute 的 J. Tien 教授, Simon Fraser University 的 W. Gruver 教授以及 National Taipei University of Science and Technology 的 T. T. Lee 教授等对作者的学术指导和帮助。在过去很多年中, 作者同以下学者保持了良好的合作, 他们是 Taiwan Ocean University 的郑慕德教授, Politecnico di Bari 的 M. P. Fanti 教授, Monmouth University 的王加存 (J. C. Wang) 教授, 广东工业大学的伍乃骐教授, 清华大学的范玉顺 (Y. S. Fan) 教授。还要感谢作者指导的研究生: AIG 的 K. Venkatesh 博士, Alcatel-Lucent 的 H. Xiong 博士, Rowan University 的 Y. Tang 教授, Seton Hall University 的 M. M. Gao 教授以及 NEC 的 J. Q. Li 博士。

特别感谢 University of Arizona 的 F. Y. Wang 教授多年来的鼓励和帮助。

与本书相关的研究工作曾得到国家自然科学基金委员会 (项目编号: 69505022, 60474018, 60228004, 60574066, 60773001), 中国科学院 (项目编号: 2F05NO1), 美国新泽西州科学技术委员会, 中华人民共和国教育部长江学者奖励计划, 中华人民共和国教育部高等学校博士点基金 (项目编号: 20070701013), 2007-2008 Technion-Xidian 学术交流, 中华人民共和国高技术发展规划 (项目编号: SQ2007AA04 Z428731) 等项目的支持。由于作者水平所限, 书中不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。

作者

2008 年 11 月 30 日

符号表

$\mathcal{C}(x)$	包含节点 x 的回路集
C	Petri 网中的回路
$C(x)$	包含节点 x 的回路
$\hat{C}(r)$	资源 r 的容量
C^R	回路 C 的资源库所集
C^T	回路 C 的变迁集
C_U	T -半流 U 导出的基本回路
$C_U(x)$	含有节点 x 的 T -半流 U 导出的基本回路
D	库所子集
$EP(x, y)$	从 x 到 y 的基本路径
$EP_{C_U}(x, y)$	由 $x, y \in C_U$ 确定的基本路径, 且 $\forall z \in EP(x, y), z \in C_U$
$\mathcal{F}_U$	$\{C_U C_U \text{ 是 } T\text{-半流 } U \text{ 的导出回路}\}$
E_S	信标 S 关键标识的集合
F	Petri 网 N 有向弧的集合
M	Petri 网的标识
M_0	Petri 网的初始标识
$M(p)$	库所 p 在标识 M 下的托肯数
$M(D)$	$\sum_{p \in D} M(p)$, 即 D 中所有库所在标识 M 下的托肯数总和
$M = M_0 + [N] \vec{\sigma}$	Petri 网 (N, M_0) 的状态方程
$M_{\min}(S)$	$\min\{M(S) M \in R(N, M_0)\}$
$M_{\max}(S)$	$\max\{M(S) M \in R(N, M_0)\}$
$M^{\min}(S)$	$\min\{M(S) M = M_0 + [N]Y, M \geq 0, Y \geq 0\}$
$M^{\max}(S)$	$\max\{M(S) M = M_0 + [N]Y, M \geq 0, Y \geq 0\}$
$M[t]$	变迁 t 在标识 M 下是使能的
$\mathbb{N}$	$\{0, 1, 2, \dots\}$
$\mathbb{N}^+$	$\{1, 2, \dots\}$
$\mathbb{N}_k$	$\{1, 2, \dots, k\}$
$\mathbb{N}^k$	k 维非负整数向量的集合
N	Petri 网
(N, M_0)	Petri 网系统或称标识网

$[N]$	Petri 网 N 的关联矩阵
$[N](p, \cdot)$	库所 p 的关联向量 (行向量)
$[N](\cdot, t)$	变迁 t 的关联向量 (列向量)
$N_i(N_j)$	Petri 网
$N_i \circ N_j$	N_i 和 N_j 通过共享库所的复合 Petri 网
$N_i \otimes N_j$	N_i 和 N_j 的同步复合 Petri 网
P	Petri 网中的库所集
(P, T, F)	普通 Petri 网
(P, T, F, W)	一般 Petri 网
P^0	闲置库所集
P_A	工序库所集
P_R	资源库所集
P_R^F	不包含在任何资源回路中的所有资源库所的集合
P_V	控制库所集
Post	后置关联矩阵
Pre	前置关联矩阵
$Q_S(p)$	工序库所 p 关于信标 S 的最大可能资源需求量
$\mathbb{R}$	实数集
$R(N, M_0)$	Petri 网 (N, M_0) 的可达标识集
$R^S(N, M_0)$	Petri 网 (N, M_0) 的线性可达标识集
$\text{rank}(A)$	矩阵 A 的秩
$RG(N, M_0)$	Petri 网 (N, M_0) 的可达图
S	(严格极小) 信标
S_R	$S \cap P_R$, 信标 S 的资源库所集
S_A	$S \cap P_A$, 信标 S 的工序库所集
$[S]$	信标 S 的补集
$\mathbb{T}$	$N = (P, T, F, W)$ 中所有 T -半流的集合
T_i	$N = (P, T, F, W)$ 中变迁子集 $T_i \subseteq T$ 构成的 T -半流的集合
T	Petri 网 N 的变迁集
Th_S	信标 S 补集的多集表示
U	T -半流
W	Petri 网的权函数

$x \in P \cup T$	Petri 网的节点 (可以是一个库所或变迁)
$\bullet x = \{y \in P \cup T \mid (y, x) \in F\}$	x 的前置集
$x^\bullet = \{y \in P \cup T \mid (x, y) \in F\}$	x 的后置集
$\bullet X = \cup_{x \in X} \bullet x$	节点集合 X 的前置集
$X^\bullet = \cup_{x \in X} x^\bullet$	节点集合 X 的后置集
$ X $	集合 X 的基, 即 X 中元素的个数
$X \setminus Z$	$\{x \mid x \in X, x \notin Z\}$ (集合 X 与 Z 的差集)
$\mathbb{Z}$	整数的集合
Π	极小信标的集合
Π_E	Π 中基本信标的集合
Π_D	Π 中从属信标的集合
$\psi(p)$	库所 p 的结构界
ξ_S	S 的控制深度变量
λ_D	库所集合 D 的特征 P -向量
$\eta_D = [N]^T \lambda_D$	库所集合 D 的特征 T -向量
σ	变迁序列
$\sigma(t)$	t 在 σ 中出现的次数

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 自动制造系统	1
1.2 自动制造系统的 Petri 网模型	4
1.3 死锁控制方法	8
1.4 小结	21
第 2 章 Petri 网基本理论	23
2.1 多集	23
2.2 基本定义	23
2.3 结构不变式	29
2.4 信标和陷阱	32
2.5 可达图	37
2.6 Petri 网的基本子类	39
2.7 自动机	40
2.8 Petri 网模型、控制器和受控系统	42
2.9 广义相互抑制约束	43
2.10 小结	44
第 3 章 Petri 网的基本信标	45
3.1 等价信标	45
3.2 基本信标	48
3.3 从属信标的可控性	51
3.4 基本信标的选择	59
3.5 小结	61
第 4 章 基于信标的死锁预防策略	65
4.1 S ³ PR 网的控制	65
4.1.1 信标枚举法	69
4.1.2 基本信标法	74
4.1.3 部分信标枚举方法	77

4.1.4	部分信标枚举方法的改进	83
4.1.5	控制库所后置集的改进设计	87
4.2	S^3PGR^2 网的控制	91
4.2.1	S^4R 网的定义以及 C/D-RUN 策略	91
4.2.2	算例	95
4.3	G-system 的控制	97
4.3.1	G-system 的定义	97
4.3.2	G-system 中从属信标可控性	99
4.3.3	死锁控制策略	104
4.3.4	算例	107
4.4	小结	111
第 5 章	基于可达图的死锁预防策略	113
5.1	优化的活性 Petri 网控制器设计	113
5.1.1	区域理论的 Petri 网诠释	115
5.1.2	应用实例	120
5.2	基于信标控制和区域理论的活性 Petri 网控制器	121
5.3	次优化的活性 Petri 网控制器设计	127
5.3.1	无死锁初始标识	127
5.3.2	死锁预防策略	129
5.3.3	算例	131
5.4	信标选择与死锁控制	134
5.4.1	控制信标选择的集合覆盖方法	135
5.4.2	关键标识的选择	139
5.4.3	迭代的信标控制方法	144
5.4.4	算例	145
5.5	小结	152
第 6 章	活性 Petri 网控制器的简化	153
6.1	基于隐式库所的方法	153
6.1.1	隐式库所	153
6.1.2	剔除隐式库所算法	154
6.1.3	活性受限库所的剔除	157
6.2	基于可达图的方法	161
6.2.1	基于可达图的冗余性测试	161
6.2.2	算例	164
6.3	小结	171

第 7 章 死锁控制的分治策略	172
7.1 问题求解的分治策略	172
7.2 Petri 网的分解	175
7.3 子控制器设计与全局控制器综合	178
7.4 算例	183
7.5 实验研究	186
7.6 小结	190
参考文献	192

第1章 绪 论

1.1 自动制造系统

制造活动通常被认为是将原料、人力、动力以及设备集成起来制造高质量产品的转换过程。包含这些制造活动的系统称为制造系统。一个制造系统主要包含两个子系统：物理子系统和控制子系统。物理子系统包括物理资源，如机床、机器人、自动引导小车、传输带、夹具、缓冲存储器等。控制子系统也称决策子系统，用于控制物理资源的运行，以达到组织和优化生产的目的。通常，根据生产流程，制造过程可分为连续制造（如化学、石油工业）和离散制造（如生活消费品、计算机工业）。离散制造系统又可分为装配系统和非装配系统。

一般说来，生产系统中只有品种单一、批量大、设备专用、工艺稳定、效率高，才能构成规模经济效益。反之，如果多品种、小批量、设备专用性低，则在价格形式相似的情况下，频繁调整工夹具，工艺稳定难度增加，生产效率会大大降低。然而，科学技术的发展使得人类社会对产品功能与质量的要求越来越高，产品更新换代的周期越来越短，产品的复杂程度也随之增加。传统的制造系统已远远不能满足市场对多品种小批量产品的需求，大批量生产模式受到了严峻的挑战。同时，激烈的市场竞争也迫使传统的大规模生产方式发生了根本改变，批量生产时代正逐渐被能适应市场动态变化的多品种、小批量生产模式所代替。一个自动化制造系统的生存能力和竞争能力在很大程度上取决于是否能在很短的开发周期内，生产出低成本、高质量的不同品种产品的能力。这就使系统的柔性对系统的生存越来越重要。如何在保证生产率的前提下提高制造业的柔性，在保证产品质量的前提下缩短产品生产周期、降低产品成本，使中小批量生产始终能与大批量生产相抗衡，柔性制造系统（flexible manufacturing systems, FMS）便应运而生。通常将柔性制造系统定义为由计算机数控机床和一个物料传输系统构成，并能够高效地生产中小批量产品的计算机控制系统^[1]。

图 1-1 给出了一个典型 FMS^[2] 的构成。硬件设备包括四台计算机数控加工中心和一個用于在加工设备之间传输工件的自动引导小车（automated guided vehicle, AGV）。中心计算机通过局域网和各个单元控制器进行通信与协调。单元控制器负责控制可编程控制器（programmable controller, PC）或者个人计算机，每一台 PC 用于一个物理资源（设备）的控制。由于 FMS 的控制系统一般很复杂，实际中往往采用这种分层递阶的控制模式。DBMS（database management systems）是数据库

管理系统的缩写,它用于建立、使用和维护系统中的各种数据库,并对数据库进行体的管理和控制,以保证数据库的安全性和完整性。

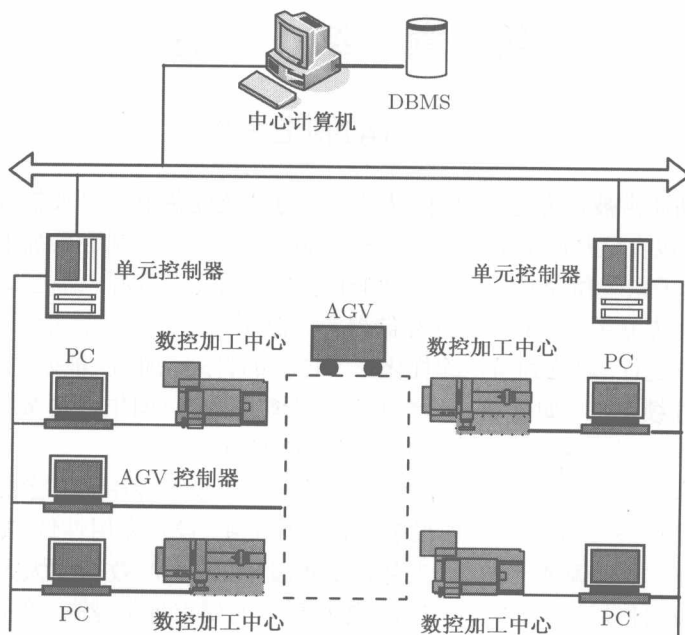


图 1-1 典型 FMS 的构成

图 1-2 是一个简单的 FMS,它包含三台机床 M1、M2、M3、机器人 R、一个输入传送带 I 和一个输出传送带 O。机器人负责工件在输入传送带、机床和输出传送带之间的传输。假定 M1 可同时加工三个工件, M2(M3) 可同时加工两个工件,机器人每次可夹持一个工件。该系统生产两种零件 P1 和 P2。P1 首先在 M1 或 M3 上加工,然后在 M2 上加工; P2 要求首先在 M2 上加工,然后在 M1 上加工。这个系统可视为一个典型的离散事件系统 (discrete event systems, DES),其主要特征如下。

(1) 事件驱动: 系统的行为可由一个离散的状态空间描述。当某些或某个事件触发时,系统的状态发生变化,即从一个状态跃迁到另外一个状态。

(2) 异步: 系统中事件的发生是异步的。例如, M2 完成对一个工件的加工和机器人为 M3 卸料是异步行为。

(3) 顺序关系: 一些事件的发生必须遵循某种顺序关系。在“机器人为 M1 卸料”这一事件发生前,必然有“机器人为 M1 上料”这一事件的发生。产品 P2 必须在 M2 上完成加工之后,才可能在 M1 上加工。

(4) 并发性: 在 M1 上加工 P1 类型的工件和在 M2 上加工 P2 类型的工件可