

## 离散事件和混杂系统的调度控制\*

郑应平

赵丽娜

(同济大学 CIMS 中心 · 上海, 200092)

(中国科学院自动化研究所 · 北京, 100080)

**摘要:** 从系统控制的角度研究了离散事件和混杂系统的调度问题. 回顾了我们以前的工作, 包括拉格朗日松弛技术, 分布实时 set-up 调度, 随机和可维修系统的调度, 神经网络及其它搜索技术的调度, 制造系统或库存系统的安全点策略, 以及并行处理系统的一些新的启发调度规则, 等等. 然后介绍了可重入生产系统调度控制的一些新结果. 可重入生产系统在现代 VLSI 制造系统中是非常重要的. 建立了 QBD 型模型, 并用 Neuts 的矩阵几何方法求解. 用随机搜索方法解决了检测站的设置问题. 数值仿真结果证明了这种方法的有效性和适用性.

**关键词:** 离散事件; 混杂系统; 系统控制; 调度

## Control and Scheduling of Discrete Event and Hybrid Systems

Zheng Yingping

(Center of CIMS, Tongji University · Shanghai, 200092, P. R. China)

Zhao Lina

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences · Beijing, 100080, P. R. China)

**Abstract:** The scheduling of discrete event and hybrid systems is studied from the system control point of view. Some of our previous works are reviewed including the Lagrangian relaxation technique, the distributed real-time set-up scheduling, the stochastic and repairable systems scheduling, scheduling via neural net and other searching techniques, hedging-point strategies for manufacturing/inventory systems, some new heuristic scheduling rules for parallel processing systems, etc.. Some new work are then introduced on the scheduling control of "re-entrant systems", which are important in modern VLSI production systems. A QBD model is built, then solved by using Neuts' matrix-geometric approach. The inspection allocation problem is also solved via searching techniques. The efficiency and validity of the methods are proved by numerical simulation results.

**Key words:** discrete event; hybrid systems; system control; scheduling

### 1 引言, 基本思路与问题

离散事件系统 (DES)<sup>[1~3]</sup> 表征为由示性的离散符号状态在突发事件驱动下逻辑演化的过程, 事件可能是外生的, 受控的, 或由系统内部 (可能是微观的, 底层连续变化的) 状态本身确定的. 而示性的符号状态又可能影响这些微观状态的变化规律. 这种宏, 微观层次上离散与连续变量相互作用的整体则构成了一个混杂系统.

混杂系统 (HS) 实际上表示了复杂系统的最常见特征, 如层次性, 定性的上层和定量的下层间的相互作用, 等等. DES/HS 的模型及其控制问题有不下几十种提法, 文 [4] 中列举的只是其中一部分.

(该文中把 "离散事件" 与 "离散时间" 或 "状态量化" 相混淆是不妥的). 但总的说来无非就是两类: 从上层 DES 的角度, 是把下层微观的连续变量动态 (CVS) 行为看成一种事件产生的机制, 通过控制这种 CVS 行为影响事件发生, 从而调度上层事件来控制并实现系统满意的逻辑行为. 而从底层 CVS 角度, 则利用上层 DES 来产生事件信号, 通过动态特性的切换或状态变量的跳变来影响底层 CVS 物理过程, 达到预定的控制目的. 这些问题在许多 "传统" 的系统和控制理论中亦屡见不鲜, 例如变结构控制<sup>[5]</sup>, 模糊控制, 专家控制<sup>[6]</sup>, 等等.

由于这里涉及的 CVS 控制问题已有大量熟知

\* 国家自然科学基金 (69635030) 重点项目.



的成果,我们将集中讨论 DES 的控制问题.实质上 DES 控制的主要手段就是调度,即决定事件发生及系统定性行为变化的顺序和时点.事实上这不是什么新问题.实践中自出现多工序的生产活动起就须要进行调度.系统工程中的 PERT 技术讲的也是调度.当然绝大部分是简单的问题,经验的方法.由于涉及离散变量的优化,众所周知,主要的困难是组合复杂性.文 [7] 给出对 4536 个不同种类调度问题研究的结果:其中 9% 是可解的, 82% 是 NP 难题,还有 9% 尚未能判定.因此对调度问题近期还不能企望有普适的解答.人们提出了许多启发式规则,并研究它们对哪些具体问题可以给出多好的结果.

尽管对组合优化问题而言这些都不算完满的解答.但作为控制问题,启发式方法已有许多成功的先例.工业上最成功的 PID 控制就是一个“启发式策略”的典型.许多先进控制结构的选择也都是“启发式”的.大量的工作是在这些“启发式”的框架中进行品质评估和参数优化等细化的工作.如果我们反过来找到一种品质判据使某启发式策略恰为其最优解,只要这个判据确有意义,不也就等价于解决了一个优化问题吗?

关肇直先生曾指出,在具有层次结构的大系统中,下层是反馈控制,上层则为管理和调度.多年来我们把调度作为上级 DES 层的主要控制手段,进行了多方面的研究.本文先简单介绍若干已有成果,然后再较具体地介绍 1990 年代由 VLSI 生产提出的一类“可重入 (re-entrant) 生产系统”的控制与调度方面取得的一些最新成果.

## 2 若干已有工作简介

1) P.B.Luh 等<sup>[8]</sup>曾提出一种基于 Lagrange 松弛技术的调度算法,他们用松弛,对偶使原问题可分解为一组低阶问题并易于搜索求解.该方法在多种实际问题中得到成功应用.如在某工厂数百台机床的车间调度中,从对偶 Gap 可以判定与最优结果只有 1%~2% 的误差.我组林建南等<sup>[9,10]</sup>将之推广到多级大系统情形并给出一种递阶算法.该结果得到了 P.B.Luh 的肯定和引用.

2) P.R.Kumar<sup>[11]</sup>等人对相当普遍的一类含多品种装配的批量切换制造系统提出“Set up”调度问题并进行了深入研究.它特别要计入加工品种切换的时间和代价并希望制品总量为有界或最小.他们提出的启发式策略诸如 CLB, CLW, CAF 等都是分布反馈式的,具有熟知的反馈控制的各种优点.

当时他们对“无环”的系统证明了稳定(有界)性,有环情形当时仍在研究之中.我组项东等<sup>[12]</sup>提出了改进的策略 LLS, CLWL, 并通过仿真找到了有环系统失稳的反例(国外同时发表).进而李才伟,刘雪婷等<sup>[13]</sup>研究了这类系统综合品质的优化问题,得到若干新的结果.由于这类问题可用于超大规模集成电路(VLSI)生产调度,并在理论上推动了随机系统稳定性的研究.近年又有许多进展.后面将具体介绍一些我们最近取得的一些新结果.

3) 随机排序和调度是一个古典的问题,我组谢益民曾得到若干新结果<sup>[14]</sup>.在具机器故障的随机调度研究中,李伟等考虑了机器的寿命与修复,在多机任意时间分布情形首次得到了最优调度策略<sup>[15]</sup>.

4) 我们较早注意到神经网络作为并行搜索工具在调度优化中的应用.余启海<sup>[16]</sup>提出一种基于 Hopfield 网络和 Kohonen 自组织模型的并行机调度算法,具满意的性能.宋安华等<sup>[17]</sup>则给出了 FMS 动态调度的一种基于 Hopfield 网络的方法.

5) 在并行处理等重要应用问题中广泛应用着各种启发式调度方法.我组康一梅等对此进行研究并提出多种实用的方法.其中 [18,19] 对  $n$  个独立任务在  $m$  个同等机器上的调度问题提出一种 Bound Fit 算法,在迭代次数和 worst case 品质方面均优于现有公认最好的 Multifit 算法.

6) 由 S.Gershwin 等对随机制造/库存系统提出的安全点(Hedging Point)调度策略自 80 年代以来一直是重要的研究课题.我组张鹏的博士论文<sup>[20]</sup>中取得的新结果包括:将原有机器寿命为时齐马程的假设放松为考虑机器经时(age),建立了随机动态规划模型,证明了安全点策略仍为最优解;推广到多工件生产系统安全点调度策略情形,给出一种搜索其最优参数的遗传算法;等等.

以上方法在不同程度上显示了离散事件系统控制问题的本质特征,以及传统反馈控制思想的可用性.大部分工作是以制造系统为背景的,但对交通,通信等一大类问题也是适用的.例如我们曾在 ATM 通信网络的调度和品质优化方面做了不少工作(包括两个博士,四个硕士的学位论文),相信这也是 DES 调度控制理论的重要应用领域.

## 3 可重入生产系统调度问题

### 3.1 问题描述

可重入生产系统是一类以半导体特别是 VLSI 生产系统为代表的复杂系统.90 年代以来半导体



制造业飞速发展, VLSI 技术每 3 5 年就将更新换代. 这时, 价值以 10 亿美元计的核心设备 (如光刻机) 也将被淘汰, 更新. 因此厂商力求提高该机器的利用率, 尽快收回成本. 这种系统的调度优化问题已引起了国内外许多学者的重视<sup>[21,22]</sup>. 这类排队问题的显著特点就是工件在加工过程中可能多次访问同一台机器<sup>[21]</sup>. 这使得除特殊情况 (如满足 Kelly 网条件) 外, 系统不具有乘积形式的解. 而且这种系统是有环的, 即使工件来流小于系统加工能力, 也可能出现不稳定. 总之这种系统的调度和性能分析至今仍是挑战性的问题. 除了提高上述瓶颈机器的利用率 (通常达 90 然也是公司追求的目标).

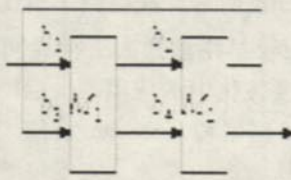


图 1 典型可重入生产系统

典型的可重入生产系统如图一所示. 有  $S$  个加工站  $1, 2, \dots, S$ , 假设每个加工站只包含 1 台机器. 系统中只有一种工件. 共有  $L$  个加工步骤, 每一工步为一级. 为每个工步设置一个缓冲区  $b_i, i = 1, \dots, L$ . 用  $\sigma(i)$  表示  $b_i$  所在的加工站. 工件加工路径是  $\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(L)$ . 可重入是指对某些  $i \neq j$ , 系统具有  $\sigma(i) = \sigma(j)$  的性质. 设缓冲区容量为  $H_1 = \infty, H_i < \infty, i = 2, \dots, L$ . 用  $X: X_i \leq H_i, i = 1, \dots, L$  表示状态集.

### 3.2 控制与调度策略

基于物理的考虑, 我们设计了两种简单易行的启发式调度策略. 1) 对闭环系统, 提出并行顺流定级法 (PPOD)<sup>[23]</sup>, 将优先级赋予加工时间最短的缓冲区, 然后顺着工件流动的方向依次赋予优先级, 先赋者优先级高. 这种策略, 不受加工站个数的限制, 且具有较好的性能. 2) 对开环系统, 针对参数随机性引起的饥饿, 提出附加于调度策略的储备调度方法<sup>[24]</sup>: 在各缓冲区前都尽量保证储备有一定量的工件, 以减少其它加工站的工件输送不过来而引起饥饿. 仿真结果表明, 适当选择最小储备量, 可以缩短工件循环时间.

控制与调度效果受诸多因素的影响, 如处理时间的方差, 系统中瓶颈加工站的个数, 需重复访问次数, 紧急定单的加入等等因素, 尚无一定规律, 仍是大家关注, 研究的焦点.

原有调度策略以启发式为主, 它们之间的比较

目前主要通过仿真. 随着各种模型理论体系的建立, 寻求基于模型的最优投料与调度策略, 是重要研究方向. 线性规划、二次规划和动态规划以及各种软计算寻优工具也将发挥重要作用.

### 3.3 建模

为了对系统进行定性与定量分析, 获得更多的理论结果, 我们提出了描述可重入生产系统的拟生产灭过程 (QBD) 型模型.

QBD 型模型是指状态转移阵具有如下标准形的马氏链<sup>[25]</sup>:

$$P = \begin{bmatrix} B_0 & A_0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & A_1 & A_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & A_1 & A_0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots \end{bmatrix}$$

其中  $B_0, A_0, A_1, A_2$  是数或有限维矩阵.

定义  $A = A_0 + A_1 + A_2, B[R] = B_0 + RA_2$ .

假设输入为泊松流, 加工时间服从负指数分布, 除第一个外, 其余缓冲区容量均有限. 这时可重入生产系统可化成 QBD 型模型. 我们对两种两站四缓冲区的可重入生产系统进行了建模分析<sup>[26,27]</sup>. 写出系统的状态转移阵, 然后将其按缓冲区容量分块, 就可以得到如  $P$  所示形式的转移阵. 其中每个子矩阵的维数是有限缓冲区容量的连乘积.

在随机调度 (RS) 下, 系统状态转移阵是不可约的. 可以证明矩阵  $A$  也不可约. 但在 LBFS (Last buffer first serve) 策略作用下, 系统状态转移阵是可约的. 这时将状态分成不可约吸收集和可约集的和. 然后只需对不可约的吸收集进行处理. 因为可约状态将以概率 1 收敛于不可约集. 对于不可约的转移阵  $P$  和  $A$  阵, 可以进一步研究稳定性. 随机系统的稳定性是指状态正常返. 系统正常返的充要条件是:

$$\pi A_2 e > \pi A_0 e.$$

$\pi$  是  $A$  的不变测度.

对不同的系统, 可以得到这一充要条件的具体形式.

如果系统稳定, 平稳分布  $X = [X_0, X_1, \dots]$  具有矩阵几何解的形式<sup>[25]</sup>, 即满足

$$X_i = X_0 R^i, i \geq 0.$$

其中  $R$  是二次非线性矩阵方程

$$R^2 A_2 + R A_1 + A_0 = R$$



的最小非负解.

$$\begin{cases} X_0(B_0 + RA_2) = X_0, \\ X_0(I - R)^{-1}e = 1. \end{cases} \quad (1)$$

$I$  为单位阵,  $e$  为相应维数的全 1 列矢量.

当输入输出为其它分布时, 也可将系统化成为 QBD 型、G/M/1 型或 M/G/1 型模型. G/M/1 型系统的稳态分布仍具有矩阵几何解<sup>[25]</sup>. QBD 模型是目前求解稳态解效果很好的一种方法. 而且可以用它对不同的调度策略进行定量比较<sup>[26]</sup>, 结果表明调度效果还与系统结构有关.

### 3.4 检测站的设置

考虑到生产过程中可能因意外产生不合格产品或废品, 每个生产系统中都要设置检测站. Narahari<sup>[28]</sup> 对有检测站的系统建模, 将检测站当作加工站处理. 我们在此基础上研究了检测站的设置的寻优问题<sup>[29]</sup>. 对满足乘积形式解的系统, 用均值分析作为系统性能分析的工具, 可以很快计算出在一定检测站设置下系统的总代价. 再用模拟退火方法寻找检测站的近优设置位置. 对 3 站 12 个缓冲区的系统仿真, 模拟退火的计算量最多为穷举法的 17.7%, 而最优代价误差最大只有 0.43%.

### 3.5 小结

随着研究的深入, 可重入生产系统的设计与结构优化也应引起人们的重视. 除了上述各种方法外, 随机比较, 扰动分析等研究方法也将逐步引入可重入生产系统的研究. 由于系统的复杂性, 针对不同系统, 还须考虑更多新的解决方案. 总之, 这方面研究无疑对制造业有较大实用价值, 同时对 DES 控制理论也有重要推动作用.

## 4 结论与展望

以上介绍的仅为我们从 DES 控制理论的角度处理调度问题的若干结果. 还有大量工作有待进一步深入研究. 和传统控制理论一样, 主要矛盾仍是实际环境不可避免存在的复杂性和不确定性问题诸如: 研究快速算法以便对多变的环境条件迅速反应; 研究调度策略的鲁棒性即对误差的不敏感性; 对各种启发式策略如何合理评估和比较, 形成针对各类问题的策略库及选用指南; 软计算和人工智能中其它搜索技术的应用; 最后, 控制理论还有大量深刻的思想和有效的技术, 相信它们在离散事件和混杂系统的控制中将发挥更大的作用.

## 参考文献

- 1 Ho Y C, ed. Discrete event dynamic systems. Analyzing Complexity and Performance in the Modern World, New Jersey: IEEE Press, 1991
- 2 Cassandras C G. Discrete Event Dynamic Systems. Homewood, IL: R.D. Irwin Inc. and Aksen Associate Inc., 1994. (此书获 1999 年第 14 届 IFAC 世界大会最佳教科书奖)
- 3 郑应平. Lecture Note on Discrete Event Dynamic Systems. Seoul National University, 1995
- 4 Nabinaz G, et.al. Modelling and Control of Hybrid Systems. A Survey, Preprints of the 13th IFAC World Congress, San Francisco, 1996, J: 293-304
- 5 高为炳. 变结构控制系统导论. 北京: 科学出版社, 1991
- 6 Åström K J, et al. Expert control. Automatica, 1986, 22(3): 277-286
- 7 Lenstra J K, et al. 调度理论的新方向. Operations Research Letter, 1984, 2: 255-259
- 8 Luh P B, et al. Parallel machine scheduling using lagrangian relaxation. Proc. Int. Conf. CIMS, Troy, USA, 1988
- 9 Lin J N, Zheng Y P. Development of a Multilayer Hierarchical Scheduling Algorithm Manufacturing Systems with Identical Machines. Proc. American Control Conference, 1989
- 10 Lin J N, Zheng Y P. Two-level multilevel hierarchical optimization method for scheduling parallel machines in manufacturing systems. Proc. IFAC Symp. Large Scale Systems, Berlin, 1989
- 11 Perkins J, Kumar P R. Stable, Distributed, Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing/ Assembly/ Disassembly Systems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1989, 34: 139-148
- 12 Xiang D, Zheng Y P. A New approach to real-time distributed scheduling strategy for manufacturing networks. CIMS 论文集. 中国科学院自动化研究所, 北京, 1989, 2: 71-89
- 13 Liu X T, Zheng Y P, Li C W. An optimal, distributed, real-time scheduling policy in flexible manufacturing systems. Preprints of the 13th IFAC World Congress, San Francisco, 1996, J: 323-328
- 14 谢益民, 郑应平. 具有同一交工期和指数加工时间的单机随机调度. 自动化学报, 1993, 19(6): 741-744
- 15 李伟. 可修制造系统的随机调度与优化分析. 博士后研究总结报告. 中国科学院自动化研究所, 北京, 1995
- 16 余启海. 基于神经网络的调度优化方法: [硕士学位论文]. 中国科学院自动化研究所, 北京, 1990
- 17 Song A H, Zheng Y P. Modelling and control of on-line scheduling system in FMS. Preprints of 12th IFAC World Congress, Sydney, 1993



- 18 康一梅, 郑应平. Job-shop 多机实时调度的并行算法. 控制与决策, 1994, 9(2)
- 19 康一梅, 郑应平. 同等并行处理机上独立任务的调度自动化学报, 1997, 23(1): 81-84
- 20 张鹏. 制造系统优化控制和调度若干问题的研究: [博士学位论文]. 中国科学院自动化研究所, 北京, 1998
- 21 Kumar P R. Re-entrant lines. Queueing Systems, 1993, 13: 87-110
- 22 郑应平. 关于电子工业 CIM 的一些动向. 中国科学院自动化研究所, 北京, 1992
- 23 Zhao Lina, Zheng Y P. A new scheduling policy for reentrant lines and its comparison with others. Accepted by IEEE SMC'99. Japan, 1999
- 24 Zhao Lina, Zheng Y P. Saving scheduling in open reentrant lines. Accepted by IEEE SMC'99. Japan, 1999
- 25 Neuts M F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models. The Johns Hopkins University Press, 1981
- 26 Zhao Lina, Zheng Y P. Performance analysis of a certain type of multi-class queueing networks. Studies in Informatics and Control, 1999, 8(3): 233-241
- 27 赵丽娜, 郑应平. 开环可重入生产系统的排队网络模型及求解算法. 控制与决策, 2000
- 28 Narahari Y, Khan L M. Modeling reentrant manufacturing systems with inspection stations. Journal of Manu. Sys., 1996, 15(6): 367-378
- 29 赵丽娜, 郑应平. 用模拟退火方法解决可重入生产线中检测站的设置问题. 机械工程学报, 2000