

自动生产线和柔性制造系统的 建模、分析与控制

潘裕焕 庄颂新

(中国科学院沈阳自动化研究所)

摘 要

自动生产线和柔性制造系统是典型的离散事件动态系统,近几年在控制理论界受到极大重视。本文首先对自动生产线的建模与分析的研究概况做了综述,重点放在排队网络模型。然后介绍了柔性制造系统的管理与控制问题。

一、引 言

自动生产线和柔性制造系统是离散事件动态系统的典型实例。随着它们在加工制造业的广泛应用以及对离散事件动态系统理论研究的日益重视,近几年对自动生产线建模与分析方法和柔性制造系统管理与控制的研究,已成为控制理论界非常活跃的研究领域。FAC 和 IEEE 的一些重要国际会议已设立了柔性制造系统或相关的专题。

二、自动生产线的建模与分析

图 2.1 是一个自动生产线的模型。 B_i 表示缓冲器, M_i 表示机器。每台机器可以是一个工作台,也可以是若干工作台的等效。一般讲,缓冲器容量是有限的,机器也存在可靠性问题。当机器 M_i 因上游缓冲器中没有工件等待加工而闲置时,称它处于“饥饿”状态;当下游缓冲器已被充满,无空间放置加工完的工件时,机器被迫停止工作,此时机器处于被阻塞状态。如生产线加工任务分配不平衡,或某台机器出故障都可以引起“饥饿”或阻塞现象。从而降低机器的利用率,造成生产线生产率下降。适当增大缓冲容量将有助于减少机器“饥饿”或阻塞现象的出现,但这要考虑整个生产线的造价。另外,缓冲器中在

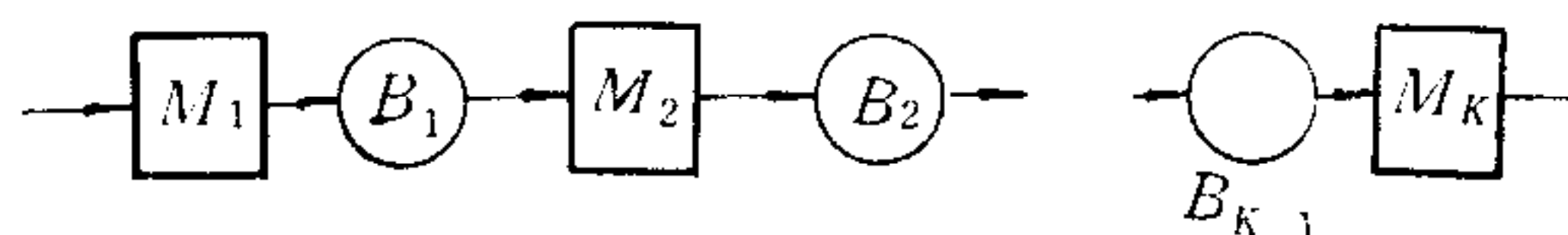


图 2.1

制品量的增加,势必使产品造价增加,影响整个生产线的经济效益.因此,对生产线的分析,主要是得到计算生产率的有效方法;每台机器的利用率;在制品量、产品造价以及缓冲器容量的分配对整个生产线性能的影响等.

关于生产线的建模与分析方法的研究,目前国际上有仿真法^[1]、排队网络法、扰动分析法^[2]三个主要流派.本文主要介绍排队网络法.其要点是将生产线描述成一个串联排队网络,通过求解网络的稳态概率分布计算生产线的各项性能指标.由于缓冲器容量有限,这种串联排队网络是非乘积解的.对于三机器以上的生产线,要得到精确的解析解是十分困难的,所以大部分研究集中在两机器或三机器的情况.

文献[3—6]分析的是机器可靠、加工时间服从负指数分布的两机器系统,给出了缓冲器中在制品数 n 的概率分布 $P(n)$ 的计算公式

$$P(n) = CX^n. \quad (2.1)$$

式中 C, X 是待定参数.

文献[7—10]讨论了机器不可靠,故障间隔时间、修复时间服从几何分布,加工时间为确定的两机器系统.系统状态概率分布为

$$P(n, \alpha_1, \alpha_2) = X^n f(\alpha_1, \alpha_2). \quad (2.2)$$

α 表示机器状态; $\alpha = 0$ 表示机器处于故障修复状态; $\alpha = 1$ 表示机器处于无故障状态. n 为缓冲器内在制品数.我们称 (n, α_1, α_2) 为系统状态.文献[10]给出更进一步的表达式

$$P(n, \alpha_1, \alpha_2) = CX^n Y_1^{\alpha_1} Y_2^{\alpha_2}. \quad (2.3)$$

C, X, Y_1, Y_2 为参数.

文献[11]模型为机器不可靠,加工时间、故障间隔时间、故障修复时间均服从负指数分布的两机器系统.得到的系统内部状态概率表达式为

$$P(n, \alpha_1, \alpha_2) = \sum_{j=1}^4 C_j X_j^n Y_{1j}^{\alpha_1} Y_{2j}^{\alpha_2}. \quad (2.4)$$

式中 $1 \leq n \leq N - 1$, C_j, X_j, Y_{1j}, Y_{2j} 为参数, N 为缓冲器容量.文献[12]将上述模型推广到加工时间服从 Erlang 分布的情况,其内部状态概率分布式为

$$P(n, \alpha_1, \alpha_2) = \sum_{i=1}^M C_i X_i^n Y_{11i}^{\gamma_1} Y_{12i}^{\beta_1} Y_{21i}^{\gamma_2} Y_{22i}^{\beta_2}. \quad (2.5)$$

式中 $\alpha_j = 0, 1, \dots, K$, ($j = 1, 2$), K 为 Erlang 分布的相数,

$$\beta_k = \begin{cases} 0, & \alpha_k = 0, \\ 1, & \alpha_k \geq 1, \end{cases} \quad \gamma_k = \begin{cases} 0, & \alpha_k = 0, \\ \alpha_k - 1, & \alpha_k \geq 1, \end{cases} \quad k = 1, 2.$$

$M < 2K + 2$, $1 \leq n \leq N - 1$. C_i, X_i, Y_{ijk} 为参数.

文献[13]的两个 Erlang 模型是假定机器的故障间隔时间服从 Erlang 分布.一个模型叫“常规”模型,另一个叫“修正”模型.两者不同之处是在“修正”模型中,当机器处于“饥饿”或被“阻塞”状态时,“修正”模型可立即对其进行维修,使之恢复到故障间隔时间分布的最初相.文献[13]的仿真结果表明,“常规”模型与负指数模型相比对系统性能没有多大改善,而“修正”模型却有很大改善.这也说明,机器的预防性检修对于提高生产线的效率是很有必要的.系统的状态概率表达式与文献[12]的结果很相似.

对于三机器系统,只有文献[14]在假定所有概率分布都服从几何分布的情况下,给出了机器不可靠情况的解析解.对于三机器以上的系统目前都是研究其近似分析法,其中主要是分解法,即将较长的串联系统分解成若干较短的子系统,通过对子系统的分析,了解原系统的性能.文献[15]的分解法是将生产线按缓冲器的个数分解成若干两机器子系统.图 2.2 是一个四机器系统的分解示意图.子系统的参数是根据分解前后系统在数学上的等效关系确定的,归结为求两点边值问题.文献[15]的模型是几何分布模型,机器不可靠.文献[16]将其推广到负指数分布情况.文献[17]提出一个负指数串联系统的分解法.这是从机理上将系统分解成若干单机器系统.模型中机器被阻塞是主要问题.为了将阻塞现象反映到分解后的子系统中,用 2 相 Cox 分布描述分解后机器的加工过程.图 2.3 是分解后第 i 个子系统模型. μ_i 为原系统机器 M_i 的加工率, a_{i+1} 是 M_{i+1} 的缓冲器被充满的概率.文献[17]假定,每个机器上的工件到达过程(上一个机器工件离开过程)是 Poisson 过程.当然这种假定在负指数模型中,只有当缓冲器容量为无限时,才是完全正确的.文献[18]的分解法是针对生产线缓冲器容量无限;加工时间服从一般分布;故障间隔时间服从负指数分布;故障修复时间服从 Cox 分布的情况.文献[18]假定每台机器的工件离开过程为更新过程,进一步用 Cox 或广义 Erlang 分布逼近离开过程和加工过程,确定每个分解子系统的各项参数.关于负指数串联排队系统的分解分析法,还可参阅文献[19, 20].

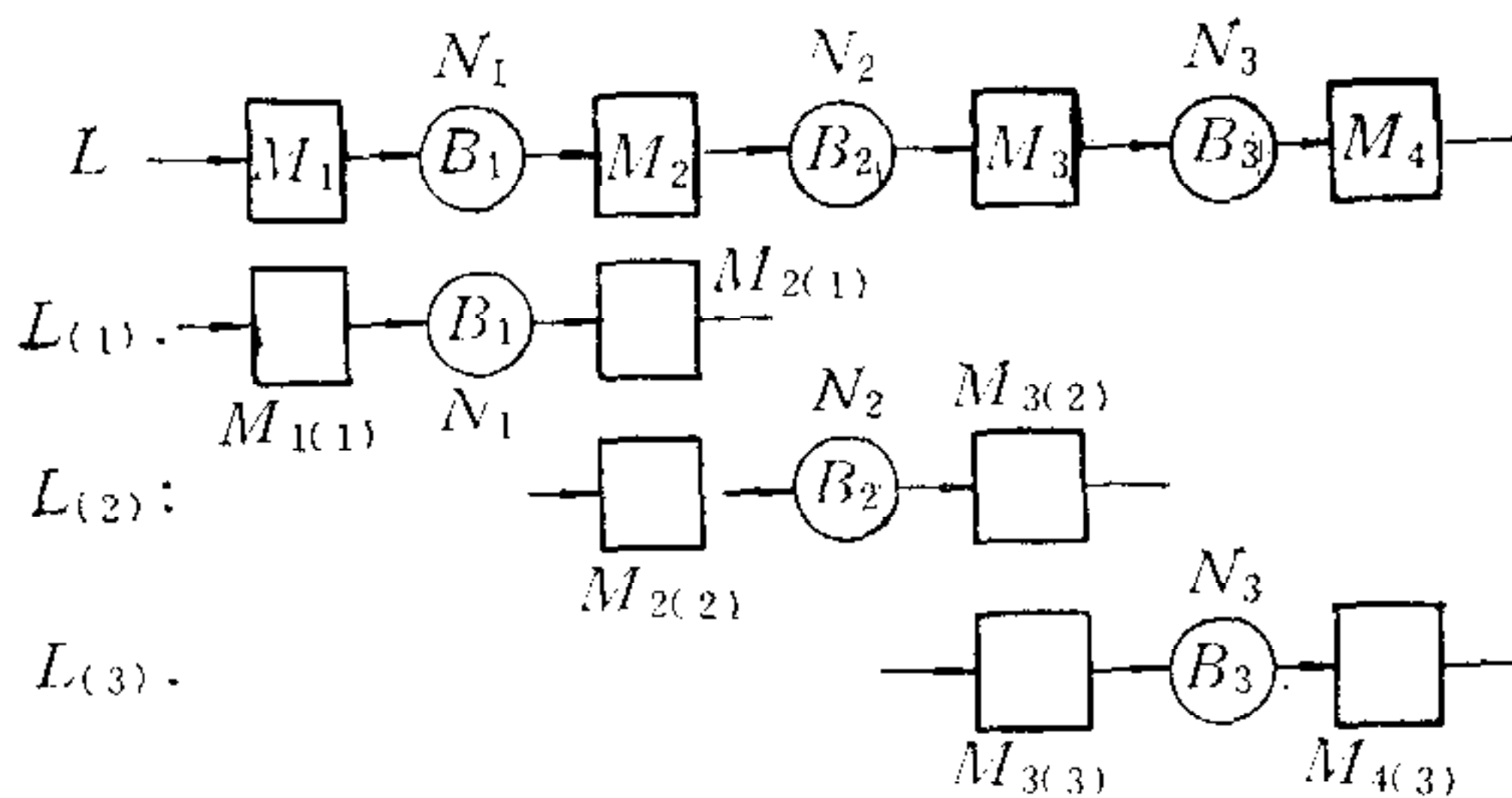


图 2.2

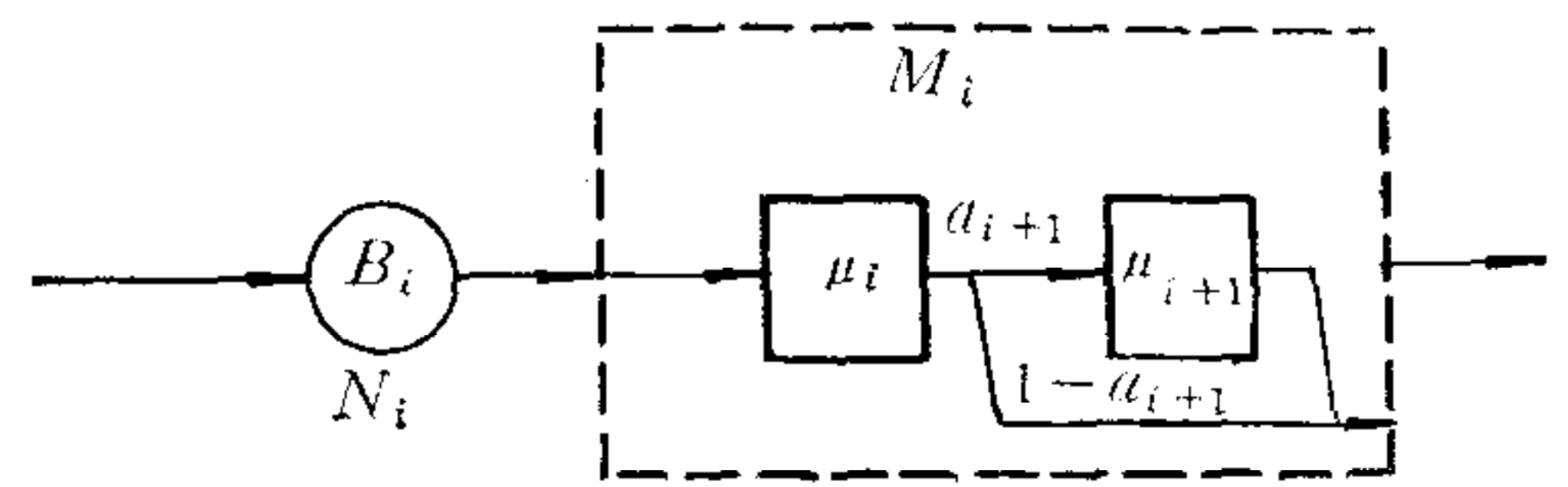


图 2.3

文献[15]的分解法对于生产线概率分布较复杂的情况较难实现.而文献[17]的思想可能会更有前途.

三、柔性制造系统 (FMS) 的管理与控制

一个 FMS 是由若干机器和相关的存贮单元通过自动材料处理系统联系起来,在计算机或计算机网络控制下的集成生产加工系统.关于 FMS 的建模与分析方法可参阅文献[21],本文主要介绍其管理与控制问题.

FMS 是较复杂的大系统,其管理与控制一般要采用多级递阶结构.低级为控制级,高级为决策级.在各级的决策与控制中,生产的计划与调度、加工过程的路径确定是主要问题.这也是运筹学领域的学者非常重视的研究课题.文献[22,23]讨论了流动车间的调度问题,提出了周期调度算法.这是一种启发式组合方法,优化指标为充分利用系统内的瓶颈机器.这样可以使调度问题的计算量大为减少.文献[24—26]提出了 FMS 中的最

优路径算法。文献[24]考虑了如图 3.1 所示网络的动态路径问题。网络中机器不可靠，缓冲器容量受限。由 M_0 加工完的工件可送入 B_1 由 M_1 加工，也可送入 B_2 由 M_2 加工。将工件加工过程描述成一个有报酬的 Markov 过程，用动态规划法求解最优路径。对于实时控制来讲，计算量太大，难以实现。为此，文献[24]又提出了一种启发式算法，算法的思想是在确定工件路径时，要使网络各分支中各机器完成全部加工任务的期望时间相接近，称为工作时间平衡法。文献[26]用网络流优化的方法求解最优路径。关于 FMS 的路径问题，还可参阅文献[27]。FMS 的管理与控制方案可分为离线与在线两种。离线方案中要建立一个大型数据库，除存放一些有关刀具管理、工序管理等数据文件外，要将路径控制策略及工件装载调度等预先确定，并存放在数据库中。为了使系统在某台机器出故障后能继续进行工件加工，需要为工件提供另外的加工路径。为此，要根据加工系统

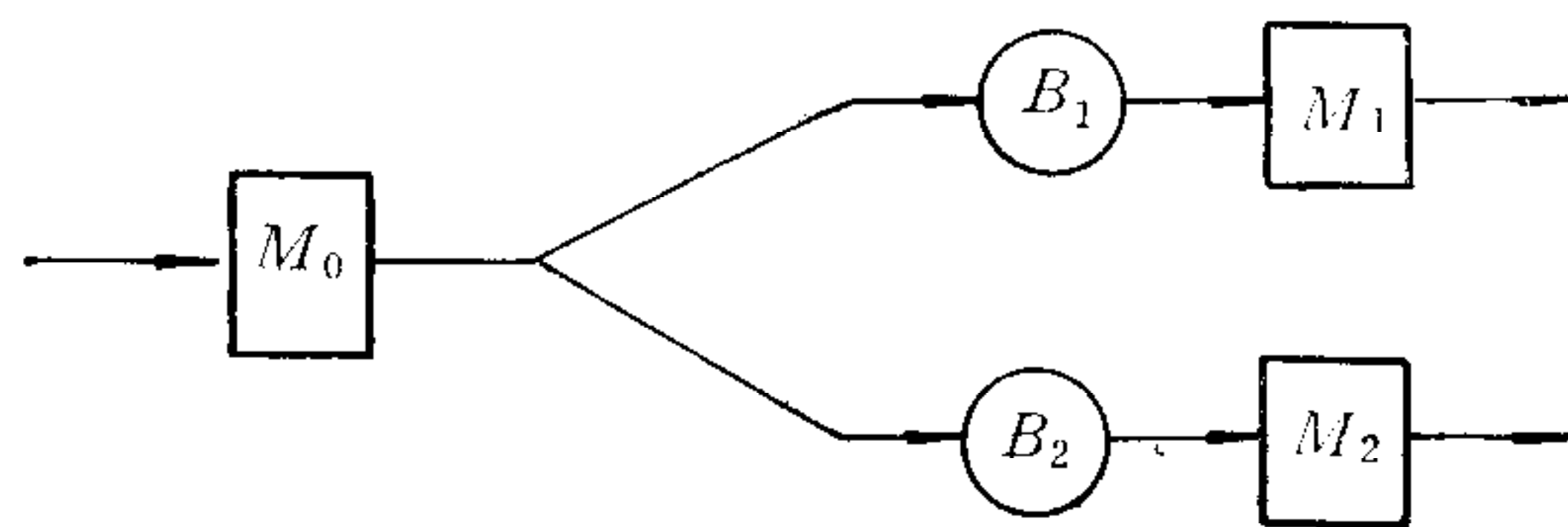


图 3.1

的状态做出决策表，根据不同的状态、采取相应的决策。有些离线系统还配有预测软件，可预测系统可能出现的紧急情况，准备好相应的处理措施。

FMS 的在线控制要根据系统当前状态（各缓冲器内在制品数量，各机器状态），甚至材料处理系统（如搬运小车，机械手）的占用情况确定最优控制策略。但是，由于所涉及的控制问题多为复杂的组合优化问题，真正实现最优控制是不可能的^[28]。因此，研究一些计算量小的简单的启发式或次优控制算法将是十分必要的。

文献[29,30]的三级控制系统是一个在线反馈系统，图 3.2 是其结构框图。最高级为流量控制级，用以确定待加工工件族中每个成员的短期生产率。实际上这是一个工件混合决策级，要考虑各种工件的需求量、缓冲器中在制品量以及机器的可靠性等因素。文献[29]将这一级描述成随机连续动态控制问题。第二级为路径决策级，将 FMS 描述成随机排队网络，网络外部的工件到达率是流量控制级所给定的工件生产率。第三级是工件装入系统序列控制级，确定工件装入系统的顺序与时间，考虑的信息是每台机器前的工件排队情况和输出情况。文献[29]同时给出一个部分状态反馈的次优控制方案，不考虑关于缓冲器内在制

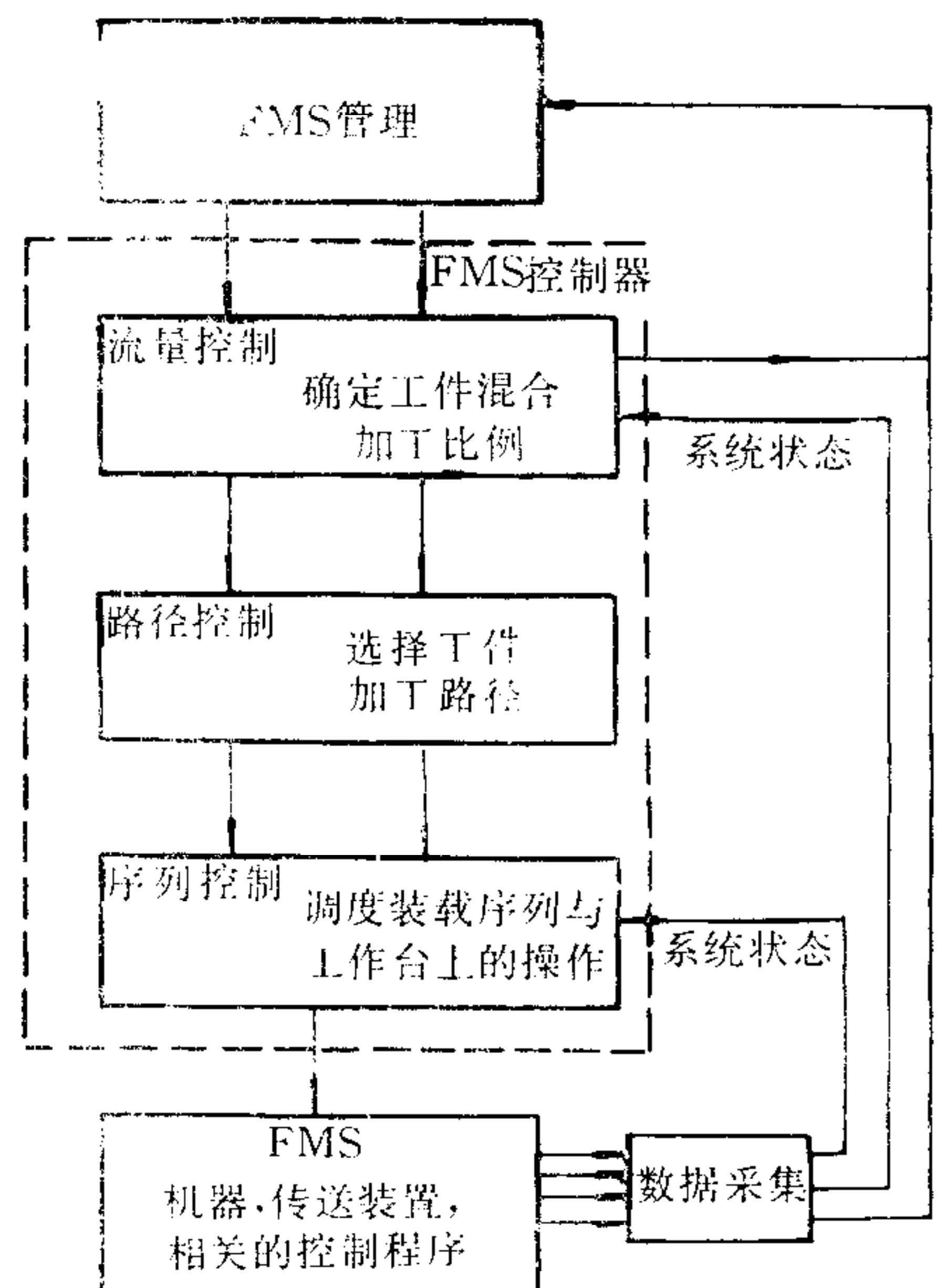


图 3.2

品量以及机器的可靠性等因素。文献[29]将这一级描述成随机连续动态控制问题。第二级为路径决策级，将 FMS 描述成随机排队网络，网络外部的工件到达率是流量控制级所给定的工件生产率。第三级是工件装入系统序列控制级，确定工件装入系统的顺序与时间，考虑的信息是每台机器前的工件排队情况和输出情况。文献[29]同时给出一个部分状态反馈的次优控制方案，不考虑关于缓冲器内在制

品量的信息。这种次优控制系统的性能对 FMS 的模型参数敏感性强,容易引起阻塞或“饥饿”现象,需要管理人员经常监视系统运行情况,必要时做人为调节。

文[29]所讨论的主要是 FMS 实时运行控制。但对于较大型的 FMS,其更高层次的控制决策和整个系统的管理也是十分重要的。过去,许多 FMS 的效益都没有达到设计指标,其主要原因是系统管理问题,文献[31]介绍了一个 FMS 的决策支持系统。系统为三级递阶结构,其最高级为长期计划级,用以加工系统的工件混合更换、系统布局修改和扩充制定几个月或几年的计划。第二级为中期计划级,计划周期为几天或几个星期。其任务是将整个生产目标划分成工件的匹加工,在每个匹加工过程中有效地分配资源,对上级生产计划或材料供应的变动做相应的调整。第三级是完成几分钟或几小时的短期计划。主要涉及 FMS 的实时运行所需的详细决策,如加工任务的调度与分配、工件和材料处理系统的移动、刀具管理、系统监视与诊断以及对系统出现故障,或生产要求的突然改动等扰动做出适当的调整。

随着人工智能、专家系统技术的发展,有些学者在计算机辅助制造技术基础上,对加工制造系统的智能控制、管理与控制专家系统进行了研究。文献[32]给出了一个加工单元的管理专家系统的例子 (CEMAS)。这也是三级结构系统。最高级为决策级,对单元的各工作台进行调度;第二级为信息级,记录单元的实际状态;第三级为执行级,控制机器的加工过程。CEMAS 由数据库、知识库、知识获取块和解释块四个主要部分组成。知识库包括如下规则:① 从全部待加工任务中确定加工顺序的规则,实际上就是加工任务的调度规则;② 紧急情况处理规则;③ 单元工作状态预测规则;④ 对技术检验应做出的反应规则等。CEMAS 可以实现监控或与管理人员协调两种操作方式。文献[33]提出了人工智能在加工制造系统中生产计划与控制问题上应用的一些设想。通过目标搜索进行各种决策,是人工智能在加工过程控制的主要应用。文献[33]还指出加工制造系统的管理与控制应该由知识库来支持,而这个知识库应该是多层和分布式的。

四、结 束 语

柔性制造系统的管理与控制是很复杂的离散事件动态大系统的管理与控制问题。目前还没有一个完整的理论可以应用,真正实施的系统大多是以 CAD/CAM 技术为基础建立起来的离线系统。各国学者都在研究探索新理论和新方法,使得这一复杂的优化问题能够实施。目前看来,除了使用排队系统的方法外,人工智能、专家系统的方法也将是一个可行的方向。因此,关于柔性制造系统的研究是一门综合性的,或边缘性的学科。它将综合控制理论、系统理论、人工智能等多个方面,反过来它也很可能促使一门新的学科——离散事件动态系统的形成。

由于篇幅所限,本文不可能非常详细地介绍目前存在的各种方法,文后所列参考文献,希望能供有兴趣的读者进一步追溯和参考。

参 考 文 献

- [1] Groover, M. P., Automation, Production Systems and Computer Aided Manufacturing, Prentice-Hall, Inc..

- 1980.
- [2] Ho, Y. C., A Survey of the Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems, *Annals of Oper. Res.*, 1985.
- [3] Gordon, W. J. and G. F. Newell, Cyclic Queueing Systems with Restricted Length Queues, *Oper. Res.*, **15** (1967), 2, 266—277.
- [4] Hatcher, J. M., The Effect of Internal Storage on the Production Rate of a Series of Stages Having Exponential Service Times, *AIIE Trans.*, **1**(1969), 2, 150—156.
- [5] Kraemer, S. A. and R. F. Love, A Model for Optimization of the Buffer Inventory Storage Size in a Sequential Production Systems, *AIIE Trans.* **2**(1970), 1, 64—69.
- [6] Hitomi, K., M. Nakajima and Y. Osaka, Analysis of the Flow-Type Manufacturing Systems Using the Cyclic Queueing Theory, *ASME J. of Eng. for Industry*, No. 77-WA/PROD-32, 1977.
- [7] Buzaccott, J. A., Automatic Transfer Lines with Buffer Stock, *Int. J. of Prod. Res.* **5**(1967), 3, 183—200.
- [8] Artamonov, G. T., Productivity of a Two-Instrument Discrete processing Line in the presence of Failures, *Cybernetic* **12**(1977), 3, 464—468.
- [9] Schick, I. C. and S. B. Gershwin, Modeling and Analysis of Unreliable Transfer Line with Finite Interstage Buffers, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report ESL-FR-834, 1978.
- [10] Gershwin, S. B. and I. C. Schick, Modeling and Analysis of Two and Three-Stage Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-R-979, 1980.
- [11] Gershwin, S. B. and O. Berman, Analysis of Transfer Lines Consisting of Two Unreliable Machines with Random Processing Times and Finite Storage Buffer, *AIIE Trans.* **13**(1981), 1, 2—11.
- [12] Berman, O., Efficiency and Production Rate of a Transfer Line with Two Machines and a Finite Storage Buffer, MIT Lab. for Infor. and Deci Systems, Report LIDS-R-899, 1979.
- [13] Pan, Y. H. and S. B. Gershwin, Modeling and Analysis of Production Lines with and without Preventative Maintenance, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-P-1294 1983.
- [14] Gershwin, S. B. and I. C. Schick, Modeling and Analysis of Three Stage Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers, *Oper. Res.* **31**(1983), 2, 618—624.
- [15] Gershwin, S. B., An Efficient Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Production Lines with Finite Storage Space, *Proceed. of 6th Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems*, Part 2, pp. 645—658, 1984.
- [16] Choong, Y. F. and S. B. Gershwin, A Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Capacitated Transfer Lines with Unreliable Machines and Random Processing Times, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-P-1476, 1985.
- [17] Altoik, T., Approximate Analysis of Exponential Tandem Queues with Blocking, *Europ. J. of Oper. Res.* **11** (1982), 390—398.
- [18] Altoik, T., Performance Analysis of Production Lines, Tech. Report No. 83, North Carolina Agricultural and Technical University, 1983.
- [19] Boxma, O. and A. Konheim, Approximate Analysis of Exponential Queueing Systems with Blocking, *Acta Infor.*, **15**(1981), 19—66.
- [20] Takahashi, Y., H. Nigahara and T. Hasegwa, An Approximation Method for Open Restricted Queueing Networks, *Oper. Res.* **28**(1980), 594—602.
- [21] 曹希仁, 离散事件动态系统, *自动化学报*, **11**(1985), 438—447.
- [22] Hitz, K. L., Scheduling of Flexible Flow-Shop, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-R-879, 1979.
- [23] Hitz, K. L., Scheduling of Flexible Flow-Shop-II, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-R-1049, 1980.
- [24] Hahne, E. L., Dynamic Routing in an Unreliable Manufacturing Network with Limited Storage, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-TH-1063, 1981.
- [25] Tsitsihlis, J., Characterization of Optimal Policies in a Dynamic Routing Problem, MIT Lab. for Infor. and Deci. Systems, Report LIDS-R-1178, 1982.
- [26] Kimemia, J. G. and S. B. Gershwin, Flow Optimization in Flexible Manufacturing Systems, *Int. J. Prod. Res.* **23**(1985), 1, 81—96.
- [27] Buzaccott, J. A., Optimal Operating Rules for Automated Manufacturing Systems, *IEEE Trans on AC*, **AC-27**(1982), 1, 80—86.
- [28] Gershwin, S. B., R. R. Hildebrant, R. Suri and S. K. Mitter, A Control Theorist's Perspective on Recent

- Trend in Manufacturing Systems, Proceed. of 23rd IEEE Conf. on Deci. & Contr., 1984.
- [29] Kimemia, G. J., Hierarchical Control of Production in Flexible Manufacturing Systems, MIT Lab. for Inf. and Deci. Systems, Report LIDS-TH-1215, 1982.
- [30] Kimemia, G. J. and S. B. Gershwin, An Algorithm for the Computer Control of Production in Flexible Manufacturing Systems, *IIE Trans.* 15(1983), 4, 353—362.
- [31] Suri, R. and C. K. Whitney, Decision Support Requirements in Flexible Manufacturing, *J. Manufacturing Systems*, 3(1984), 1, 61—69.
- [32] Gliviak, F., J. Kuba, A. Micovsky and E. Karabinosova, A Manufacturing Cell Management Systems CEMAS, Proceed. of 3rd Int. Conf. on AI and Information Control Systems of Robots, 153—156, 1984.
- [33] Warman, E. A., Manufacturing and Artificial Intelligence, Proceed. of IFAC Symp. on AI, 1983.

MODELING, ANALYSIS AND CONTROL OF PRODUCTION LINES AND FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

PAN YUHUAN ZHUANG SONGXIN

(Shenyang Institute of Automation, Academia Sinica)

ABSTRACT

Production lines and Flexible Manufacturing Systems are the typical discrete event dynamic systems and have received much attention in the field of automatic control in recent years. A survey of the modeling and analysis of production lines is given in this paper, putting emphasis on the models of queueing networks. Also, the problems of the management and control of Flexible Manufacturing Systems is discussed in detail.