

离散事件动态系统理论:现状和展望¹⁾

郑大钟

(清华大学自动化系,北京 100084)

郑应平

(中国科学院自动化研究所,北京 100080)

摘 要

离散事件动态系统(DEDS)是系统与控制理论中的一个新兴分支与前沿方向.本文论述了DEDS研究兴起的原因,系统地 and 概要地阐述了基于逻辑层次、时间层次和统计性能层次模型的理论方法的框架和主要结果,并对DEDS的进一步研究动向提出了一些展望.

关键词: 离散事件动态系统,建模与分析理论,有限自动机方法,极大代数方法,摄动分析方法.

一、对 DEDS 研究兴起的根本动力是当今快速发展的高技术

对离散事件动态系统(DEDS)的研究最早可以追溯到对排队现象和排队网络的分析.排队论、网络分析和数学规划、计划评审(PERT)和调度排序等方法所要解决的就是DEDS问题.但是,DEDS近年来所以如此受到重视并被认为是系统与控制理论中的一个前沿方向^[1],则是当今一大批高技术发展的需要和推动的结果.

对DEDS研究的兴起出现在1980年前后.当时,随着信息处理技术、计算机技术、机器人技术等的发展完善和广泛应用,在通讯、制造、交通管理、军事指挥等领域内相继出现了一批反映技术发展方向的人造系统,其典型的例子如大规模计算机/通讯网络、柔性生产线或装配线、空中或机场交通管理系统、军事指挥中的C³I系统等.这类人造系统中存在着大量的离散事件过程,它们不同于通常的连续变量过程,不是由物理学定律所描述的,而是服从于人为的一些复杂规则.这类人造系统中的演化过程,不能由通常的微分方程(或差分方程)来表征,而是由离散事件间的错综复杂的相互作用所决定的.区别于通常的连续变量动态系统(CVDS),通常把这类人造系统统称为离散事件动态系统(DEDS).基于对这类人造系统的行为和性能的研究需要,推动着离散事件动态系统理论的形成和发展^[2,3].

本文于1991年2月19日收到.

1) 国家自然科学基金和863高技术CIMS主题资助的课题. 本文曾作为1990年全国控制理论与应用年会(杭州)的大会报告. 本文形成中参加讨论的还有法京怀、刘克等.

对于 DEDS 至今还没有一个具有概括性和简明性并被广泛承认的定义。粗略地说,它是指由离散事件按照一定的运行规则相互作用来导致状态演化的一类动态系统。DEDS 的状态由一批号码和离散变量所表征,并且只能在异步的离散瞬时发生变动;状态的演化过程由离散事件驱动,而状态的演化又导致新事件的出现。这种离散事件的错综复杂的相互作用,推动着系统演化,构成了系统的动态性。在 DEDS 中,系统参量的微小变化常会导致很不相同的演化模式;因此,如果考虑实际问题中不可避免的参量随机变化,则在性能分析中需采用统计平均的方法,这反映了系统演化过程的不确定性。对 DEDS 的控制,其原则等同于通常的控制系统,即归结为通过禁止某些事件的出现来使系统按所期望方式演化,以保证指定的运行性能和避免危及正常运行的各种行为。通常的系统控制理论中的一些基本概念,如稳定性、能控性、能观测性等,都可推广到 DEDS 的研究中来,但其表征形式和相应理论有所不同。

DEDS 研究中最基本的一个问题是系统的建模^[2,5,6]。围绕从不同层次和用不同数学工具来描述 DEDS,以建立形式简明和分析可行的模型,形成了研究 DEDS 的多种方法体系。从逻辑层次研究 DEDS 中事件和状态的序列的建模方法,主要有形式语言/有限自动机、马尔柯夫链、Petri 网等。从时间层次研究 DEDS 运动轨道及其特性的建模方法,主要包括有限递归过程、通讯序贯过程、极大极小代数(或更一般的双子代数)等。而排队网络、广义半马尔柯夫过程等,则是从统计性能层次研究 DEDS 过程性能的建模方法。尽管这三种层次的方法所研究的是同一类过程,但它们不同的侧重点和不同的描述手段使之组成了 DEDS 的一个“模型体系”,以适应于不同的研究目标。目前,基于逻辑层次模型、时间层次模型和统计性能层次模型的研究 DEDS 的各种方法,都已得到了很大发展,开始形成各具特色的理论框架。

我国对 DEDS 的研究大体上起步于 1987 年前后。863 高技术 CIMS (计算机集成制造系统)主题计划的实施,对促进我国在 DEDS 研究上的进展,起了非常重要的推动作用。在仅仅三年多的时间里,对包括逻辑层次、时间层次和统计性能层次的各种主要方法,都开展了系统的和广泛的研究,在理论性研究和应用性研究中已取得一批具有创新意义和应用价值的结果,并且分别在 1988 年 12 月和 1991 年 6 月召开了全国性 DEDS 理论及其在 CIMS 中的应用学术讨论会和 IFAC DEDS 理论与应用学术研讨会^{[4],1)}。

二、DEDS 的三种层次模型及其在理论上的研究进展

在这一部分中,我们力图对十年来在 DEDS 研究中的重要进展进行系统的论述。针对逻辑、时间和统计性能三个层次,介绍 DEDS 的层次模型,并勾划出业已形成的初步理论框架。由于篇幅限制,论述只能是有重点的和简要的。

1. 逻辑层次模型^[7-39]

对于 DEDS 表征其过程的两个基本要素是状态和事件。状态常用一些离散符号来标记,状态的集合即状态空间不要求有任何拓朴结构。事件则为按由系统以外因素所确

1) 郑应平、郑大钟主编, DEDS 理论及其在 CIMS 中的应用学术讨论会论文集,北京, 1988.

定的某种机制离散地瞬时发生,并导致状态的突然转移.在逻辑层次,基本问题就归结为研究事件和状态按逻辑时间的序列,而不涉及物理时间问题.因此,有限自动机、Petri 网等这些具有很强逻辑功能表征能力的工具,对于描述和研究这些要素及其逻辑序列,无疑是非常恰当的手段.对于 Petri 网,已有较多介绍,可见文献[38,39].下面,限于对基于形式语言/有限自动机的 DEDS 逻辑层次模型及其理论进展,进行系统而简要的论述.

DEDS 的有限自动机建模方法是由 Ramadge 和 Wonham 所提出的^[7,8].表 Q 为状态集, $q_0 \in Q$ 为初始状态即演化的出发点.表 Σ 为事件集,当某个事件 $\sigma \in \Sigma$ 发生时将导致状态 $q \in Q$ 按迁移律 $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 转移到新状态 $q' = \delta(q, \sigma)$.表 $Q_m \subset Q$ 为标识状态集,它是某些特殊的状态集,常用以研究系统是否达到此集合.这样,一个 DEDS 在逻辑意义下可看成为一个有限自动机,并表示为一个五元组 $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$.在自动机模型中,系统行为由所产生的事件串 $\sigma_1 \sigma_2 \cdots$ 和对应的状态串 $q_0 q_1 \cdots$ 来表征.表 Σ^* 为所有可能的事件串全体,则由于 δ 不一定对所有 σ 和 q 都有定义,所以 Σ^* 中可能只有部分串可被自动机所接受,它们构成一个子集 $L(G) \subset \Sigma^*$ 称为由 G 产生的语言.其中,有一部分串对应的状态串结束于 Q_m 中的状态,它们构成集合 $L_m(G) \subset L(G)$ 称为由 G 标识的语言.这样,基于自动机模型的系统设计问题归结为一个逻辑设计问题,即使之出现期望的“好”串而不出现不期望的“坏”串.

在自动机模型框架下,对 DEDS 的研究集中于系统控制问题,涉及逻辑层次下的控制特性、综合方法、控制器简化等.

1) 事件的能控性和能观测性.一个事件称为是能控的,如果它可被阻止进入系统;否则,称其为是不能控的.它们的相应集合 $\Sigma_c \subset \Sigma$ 和 $\Sigma_{nc} \subset \Sigma$ 分别称为能控事件集和不能控事件集.在制造系统中,“工件到达”就是一个能控事件,因为即使此时机床空闲仍可令其暂不开工而阻止工件进入.另一些事件如“机床发生故障”属于不能控事件,它的一旦出现就必然立即影响系统行为.对偶地,把观测者(控制器)所能观测到的事件称为能观测事件,否则就称为不能观测事件.对应的集合 $\Sigma_o \subset \Sigma$ 和 $\Sigma_{no} \subset \Sigma$ 分别称为能观测事件集和不能观测事件集.

2) 监控理论.在逻辑层次上,DEDS 监控的基本问题是按照已发生的事件/状态过程信息,确定在什么逻辑时刻使 Σ_c 中的哪些事件不进入系统,以达到使某些“坏”串不出现的目的.监控目标可通过引入一个适当的称为监控器的自动机 \mathcal{S} 来实现,其作用是按一定监控规则对每个实时状态确定相应的事件 $\sigma \in \Sigma_c$ 是否容许进入系统 G .通常大多采用事件反馈来进行控制.事件反馈的机制是,监控器根据观测到的所有能观测事件序列的动态信息,对每个能控事件发出“允许”或“禁止”的命令.这样,每当一个新事件发生并被观测到后,监控器就根据这一事件及先前的能观测事件序列发送相应的命令,由此形成事件动态反馈系统.对于这类反馈系统,反映其动态行为的事件串集合满足 $L(\mathcal{S}/G) \subset L(G)$.综合监控器 \mathcal{S} 时,除规定系统 G 的一个可允许事件串集 $L_1(G)$ 外,通常还要规定一个至少必须包含的最小事件串集 $L_2(G) \subset L_1(G)$,使得所设计的 \mathcal{S} 可保证 $L(\mathcal{S}/G)$ 介于 $L_1(G)$ 和 $L_2(G)$ 之间.有关监控器综合问题的解的存在性和计算方法已有比较完善的结果.

3) 最优控制问题.基于自动机模型的最优控制问题定义为,给定一个目标动态语言

L_0 , 综合一个监控器 \mathcal{S} , 使成立 $L(\mathcal{S}/G) \subset L_0$ 且尽可能逼近或等于 L_0 . 对于最优监控器 \mathcal{S} 的存在性问题已有相当的研究. 当事件集为完全能控和完全能观测即 $\Sigma = \Sigma_c = \Sigma_o$ 时, 使 $L(\mathcal{S}/G) = L_0$ 的 \mathcal{S} 一定存在. 当事件集不是完全能控即 $\Sigma \neq \Sigma_c$ 时, 使 $L(\mathcal{S}/G) = L_0$ 的 \mathcal{S} 存在的充要条件是 L_0 为能控子语言. 当事件集不是完全能观测即 $\Sigma \neq \Sigma_o$ 时, 使 $L(\mathcal{S}/G) = L_0$ 的 \mathcal{S} 存在的充要条件是 L_0 为能观测子语言. 而当事件集同时为不完全能控和不完全能观测时, 使 $L(\mathcal{S}/G) = L_0$ 的 \mathcal{S} 存在的充要条件是 L_0 为联合能控和能观测子语言.

4) 监控器的简化. 监控器 \mathcal{S} 简化问题的提法为, 在控制效果相同的前提下, 使 \mathcal{S} 的状态维数越小. 已提出的简化监控器的主要方法有状态划分法^[9], 状态覆盖法^[26], 最小能控事件集设置法^[9]等. 但是, 其中的有些方法计算上具有指数复杂性.

5) 其他控制问题. 已经提出并得到研究的其他控制问题主要有分散控制问题^[14,15], 互联 DEDES 的监控器综合问题^[35], 带强迫性控制事件的 DEDES 控制问题^[24], DEDES 控制系统的设计复杂性问题^[23], DEDES 的递阶控制^[10], 以及考虑观测与控制滞后和状态占有一定时间的简单自动机系统^[36]等. 由于问题的复杂性和缺少合适描述工具, 上述不少问题的结果还只是初步的, 深刻的结果有待于进一步的研究.

概而言之, 基于自动机模型的 DEDES 的形式语言/有限自动机方法, 主要用于研究逻辑层次上的系统控制和控制作用下的系统行为问题. 相对于其他层次的方法, 它具有很强的综合能力. 其主要局限性是难于处理物理时间因素, 因此本质上并没有涉及系统的动态分析. 存在于这类方法的不少结果中的计算复杂性也是其在应用上的主要限制因素之一.

2. 时间层次模型^{2)-6), [40-65]}

在 DEDES 的时间层次模型中, 最有代表性的是基于双子 (dioid) 或更特殊地基于极大代数的线性系统模型. 在时间层次上, 不仅涉及系统中事件和状态演化中的逻辑关系, 而且需要在物理时间级上来刻划和分析演化过程. 研究表明, 即使象缓冲容量无限的串行生产线这样最简单的 DEDES, 其时间层次模型的原始形式也是严重逻辑非线性的, 以致无法用以研究系统演化过程的规律性. 双子或极大代数中的特殊运算规则, 恰好可把逻辑非线性关系转化为线性关系, 从而能在这类代数体系上建立时间层次的和形式简单的线性系统模型. 这就为分析系统演化过程的规律开辟了一条简单的、定量的和可计算的路子.

在集合 S 上定义运算 \oplus (加) 和 \otimes (乘), 且满足封闭性、结合律、交换律、分配律及其他一些条件, 并存在零元和单位元, 由此构成双子. 特殊地, 取 $S = \bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$, 定义 $a \oplus b = \max(a, b)$ 和 $a \otimes b = a + b, \forall a, b \in \bar{\mathbb{R}}$, 单位元 $e = 0$ 和零元 $\varepsilon = -\infty$, 则由此导出极大代数. 尽管 Cuninghame-Green 早在 1962 年就指出了极大代数的一些应用

- 1) 法京怀, 形式语言/识别器上离散事件控制系统若干问题的研究, 中国科学院自动化所博士学位论文, 1989.
- 2) 王龙、郑大钟, 极大代数上的线性系统理论, DEDES 理论及其在 CIMS 中的应用学术讨论会论文集, 1988, 79-87.
- 3) 刘克、郑应平, 每台机器多种加工的基本生产线的周期及控制, 控制理论及其应用年会论文集, 1990, 356-360.
- 4) 王梅生、李彦平, 极大代数意义下矩阵的周期性及其特征值问题, 控制理论及其应用年会论文集, 1990, 342-347.
- 5) 陈文德、齐向东、邓述慧, 离散事件系统的周期分析, 控制理论及其应用年会论文集, 1990, 491-494.
- 6) 齐向东、陈文德、邓述慧, 离散事件系统中矩阵的特征值问题, 控制理论及其应用年会论文集, 1990, 482-485.

前景^[40],但把极大代数成功地用于 DEDS 的建模与分析而为这种方法做了开创性工作的则为 Cohen 及其合作者^[41-46].

Cohen 的原始工作是针对一类确定性的、无决策的、可由事件图表征的 DEDS. 缓冲容量无限的串行生产线,在确定性假设下,就是这类 DEDS 的一个例子. 推导证明^[43],在极大代数运算意义下,这类 DEDS 的模型是如下的线性系统模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= A\mathbf{x}(k) \oplus B\mathbf{u}(k), \quad k = 1, 2, \dots \\ \mathbf{y}(k) &= C\mathbf{x}(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x} \in \bar{\mathbb{R}}^p$ 、 $\mathbf{u} \in \bar{\mathbb{R}}^q$ 和 $\mathbf{y} \in \bar{\mathbb{R}}^q$ 分别为系统的状态、输入和输出, k 为系统时钟, A 、 B 和 C 为相应维数的常阵,式中运算号 \otimes 已被省略. 在引入反馈律 $\mathbf{u}(k) = K\mathbf{y}(k-1)$ 后,则还可导出闭环系统输出递推模型

$$\mathbf{y}(k) = M\mathbf{y}(k-1), \quad M \triangleq CA^*BK, \quad A^* = E \oplus A \oplus \dots \oplus A^{p-1}. \quad (2)$$

其中 E 为单位阵. 模型 (1) 和 (2) 是 DEDS 的极大代数法用以分析系统的基本依据. 随后的研究表明,对于更为复杂的确定性无决策 DEDS,在通过一些必要的处理后,也可导出类似形式的线性系统模型.

在线性系统模型的框架下,对 DEDS 的研究集中于系统行为的规律性的分析. 下面是对这种方法的进展的一个概括性的论述.

1) 稳定性. 对由线性系统模型表征的一类 DEDS, 表 y_j 为输出 \mathbf{y} 的第 j 个分量, 称系统输出是稳定的, 当且仅当存在一个正实数 λ , 使对所有初始输出成立

$$\lim_{k \rightarrow \infty} [y_j(k)]^{1/k} = \lambda, \quad j = 1, \dots, q. \quad (3)$$

类似地,也可定义系统状态的稳定性. 对于缓冲容量无限的串行生产线一类 DEDS,其状态和输出稳定性是等价的.

2) 周期性稳态. 对于稳定的 DEDS, 一定存在一个正整数 k_0 , 输出(状态)当 $k \geq k_0$ 时呈现为周期性稳态,即成立

$$\mathbf{y}(k+d) = \lambda^d \mathbf{y}(k), \quad \forall k \geq k_0. \quad (4)$$

其中, λ 是矩阵 M 的极大代数意义下的特征值, 正整数 d 是 M 的周期性阶数, k_0 表征结束过渡过程的时钟节拍. 已经证明^[56], 若把初始输出(状态)取为 M 的一个特征向量, 则有 $k_0 = 1$ 即可避免过渡过程而直接进入周期性稳态. 王梅生等证明¹⁾, 可把初始值空间进行划分, 对应于不同初始域系统以不同节拍 k_0 进入周期性稳态.

3) 特征结构. 研究表明, 系统行为特别是周期稳态行为, 与系统矩阵在极大代数意义下的特征值和特征向量有着重要和直接的关系. 因此, 对系统特征结构的研究, 构成了 DEDS 的线性系统理论的一个重要组成部分. 如果系统矩阵 M 是不可约的, 则特征值 λ 为唯一. 计算 λ 的主要算法有: 从 M 生成的有向图 $G(M)$ 计算关键回路平均权重的图论方法^[43], 由 Karp 提出的一个有效算法^[51]

$$\lambda = \max_{j=1, \dots, q} \min_{0 \leq k \leq q-1} \left\{ \frac{(M^q)_{ij} - (M^k)_{ij}}{q-k} \right\}, \quad \forall i \quad (5)$$

以及王龙等²⁾给出的具有闭合形式和便于并行计算的一个有效算法

$$\lambda = \text{tr}H, \quad H = M \oplus M^2/2 \oplus \dots \oplus M^q/q. \quad (6)$$

1) 同上一页脚注 4)

2) 同上一页脚注 2)

如果系统矩阵 M 是可约的, 则可能有一个特征值或多个特征值. 文献[42]研究了 M 可变换为两个不可约子矩阵耦合的情况, 陈文德等²⁾⁵⁾⁶⁾推广讨论了 M 变换为多个不可约子矩阵耦合的情况, 并且分别给出了算法. M 的特征向量定义为满足极大代数意义下 $Mh = \lambda h$ 的列向量 h , 对其属性和算法也已有较多研究. 文献[57]中还研究了由有限几个实验数据估计和辨识特征结构的算法, 这对于难以准确建模的系统无疑是有意义的.

4) 能控性和能观测性. 称一个 DEDS 是能控的, 当且仅当其事件图中每一个内部变迁都只少与一个输入变迁相连. 称一个 DEDS 是能观测的, 当且仅当其每一个内部变迁都只少与一个输出变迁相连. 文献[42]中最早引入这两个特性的定义, 随后得到了广泛的注意, 但深刻的研究结果尚不多.

5) 最小实现. 一个 DEDS 在经过适当处理后可导出如下的线性递推形式模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= A\mathbf{x}(k-1) \oplus B\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= C\mathbf{x}(k). \end{aligned} \quad (7)$$

相应的传递函数阵(即脉冲响应阵的 z 变换式)为

$$G(z) = C(z^{-1}A)^*B, \quad (z^{-1}A)^* = E \oplus z^{-1}A \oplus \dots \quad (8)$$

由系统脉冲响应阵确定矩阵组 (A, B, C) 的问题称为实现问题. 文献[49]针对 SISO 情形研究了最小实现问题, 提出了有关性质和相应算法.

6) 研究领域的拓展. DEDS 的线性系统理论的研究领域正在被进一步拓展. 文献[54, 55]中研究了参数摄动对稳态性能的影响, 给出了估计式和性能鲁棒性条件. 文献[60, 62, 63]基于线性系统模型对摄动分析(PA)方法的基本结果作了验证和数学处理上的严格化. 文献[50]在引入参数为同步分布随机变量假设下对稳态周期性的存在性和概率分布作了初步研究.

7) 2-D 线性系统理论. Cohen 等在推广极大代数为 2-D 代数系 $\text{Min Max}\langle \gamma, \delta \rangle$ 的基础上建立了 DEDS 的 2-D 线性系统模型. 2-D 代数系中, 标准量 γ 和 δ 表为次数和时钟后移算子. 基本信息式 $\gamma^n \delta^t$ 意为“事件在时钟节拍 t 发生的最多可能次数是 n ”或“事件第 n 次发生的最早可能时钟节拍是 t ”. 信息式合成规则为

$$\begin{aligned} \gamma^n \delta^t \oplus \gamma^{n'} \delta^t &= \gamma^{\min(n, n')} \delta^t, \\ \gamma^n \delta^t \oplus \gamma^n \delta^{t'} &= \gamma^n \delta^{\max(t, t')}. \end{aligned}$$

建立在 2-D 代数系上的 DEDS 线性系统模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\gamma, \delta) &= A(\gamma, \delta)\mathbf{x}(\gamma, \delta) \oplus B(\gamma, \delta)\mathbf{u}(\gamma, \delta), \\ \mathbf{y}(\gamma, \delta) &= C(\gamma, \delta)\mathbf{x}(\gamma, \delta). \end{aligned} \quad (9)$$

2-D 模型扩充了描述信息, 有助于研究更广泛的问题. 目前, 对应于极大代数模型的不少重要结果, 如周期性稳态、特征结构等, 都已在 2-D 模型中建立.

时间层次上的 DEDS 线性系统模型及其相应理论的重要优点, 表现为其线性属性、严格的理论体系、以及易于处理物理时间因素. 这种方法存在的主要问题是所能处理的问题范围较窄, 无论是使其能更多反映和处理实际因素(如生产线中缓冲区容量有限、堵塞、托盘配置等)方面, 还是在拓宽其理论领域(如带决策机制系统的建模与分析、随机 DEDS 的建模与分析、综合问题等)方面, 都有待进行进一步的研究. 一个具有挑战性的

2) 5) 6) 见 132 页注

课题是, 如何把通常的线性系统控制理论中的行之有效的分析、控制和优化技术, 经过合适的改造后推广应用到 DEDS 的研究中来。

3. 统计性能层次模型¹⁾, [66-102]

为从统计性能层次上研究 DEDS, 需要采用排队网络、广义半马尔柯夫过程 (GSMP) 等随机模型。在属于这一层次的方法中, 摄动分析 (PA) 方法具有一定的代表性和重要性, 它是由何毓琦 (Y.C. HO) 等所建立和发展的。PA 方法的代表性工作见文献索引 [66]。

PA 方法中采用的模型十分接近于或者就是 GSMP。一个 GSMP 通常包括四个基本方面。1) 伪状态 $x(t, \omega) \in X$, $\omega \in \Omega$, 其中 Ω 和 ω 分别表示基本概率空间和随机样本。 x 对应于 DEDS 中过程的物理状态, 是一个随机过程。2) 状态转换由事件的发生来触发。表 $\Gamma(x)$ 为可使状态转换的所有可能事件的集合即事件表, 则对每个事件 $i \in \Gamma(x)$, 其由事件发生到状态转换的等待时间 $t(i)$ 是一个随机变量, 它的概率分布 $F(\cdot)$ 可是 $[0, \infty)$ 上的任意分布。当 $F(\cdot)$ 为负指数分布时, 整个系统是马尔柯夫的; 对一般情况, 过程只能称为半马尔柯夫的。而使状态 x 转换的真正事件即是对应的等待时间最短的事件 $i^* = \arg \min t(i)$, $i \in \Gamma(x)$ 。3) 状态 x 由 i^* 触发后转换得到的新状态 x' 一般为不唯一, 需要按路径概率分布 $P(x'; x, i^*)$ 加以确定。由此, GSMP 的演化同时包含确定 $t(i)$ 和 x' 的随机试验。4) 在完成到状态 x' 的转移后, 需重新构造事件表 $\Gamma(x')$, 包括去除与 x' 无关的事件和加入新的与 x' 有关的事件, 同时用由触发时间 $t(i^*)$ 起算的增量时间来表示 $\Gamma(x')$ 中所有事件的等待时间。

PA 方法的基本思路是, 通过一次仿真或试验以获得系统在标称参数下动态响应的一个样本即标称轨道, 再运用比较简单的运算由标称轨道构造出某个参数变动后的摄动轨道, 由此来分析系统性能对变动参数的灵敏度。PA 方法实质上是排队网络方法和计算机仿真方法的一个创造性的结合, 比之前者可大为拓宽适用范围, 比之后者可显著减少仿真机时。

从仿真或试验导出的标称轨道 GSMP 模型出发进行摄动分析的三个基本步骤为: 1) 摄动的产生。一般多考虑 GSMP 中各事件等待时间的概率分布所产生的摄动, 如生产线中的工件平均来率、机床平均加工时间等。设 t 为等待时间, 其分布 $F(t, \theta)$ 同时依赖于参数 θ , 先产生具有 $[0, 1]$ 上均匀分布的一个随机变量 u , 且由计算得到

$$t = F^{-1}(u, \theta).$$

现若参数变动由 θ 到 $\theta + \Delta\theta$, 相应地 t 的分布变为 $F(t, \theta + \Delta\theta)$, 而由同样的随机变量 u 可定出变动后的等待时间 $t + \Delta t = F^{-1}(u, \theta + \Delta\theta)$ 。这就使得构造摄动轨道时, 只要用 $t + \Delta t$ 代替 t 作为等待时间, 无需重复确定 u 的随机实验。2) 构造摄动轨道。摄动轨道按照摄动后等待时间 $t(i) + \Delta t(i)$ 和 GSMP 定义的规则来构造。通常, 可区分为两种情况: i) 摄动 $\Delta t(i)$ 足够小时, 不会影响由事件等待时间确定触发事件的结果, 即不改变 i^* 的最小地位, 故仍可采用原来的确定路径的结果。这种情况中, 摄动轨道和标称轨道有着完全相同的状态——事件逻辑顺序, 只是序列中间隔时间可能产生变动如由 d 变到

1) 郑应平, DEDS 的广义半马氏过程模型仿真分析——摄动方法的一些新进展, DEDS 理论及其在 CIMS 中的应用学术讨论会论文集, 1988, 39—43.

$d+\Delta d$, 并称两条轨道为确定性相似. 对于满足确定性相似的情况, 由 $\Delta r(i)$ 到 Δd 的摄动传播可用一些简单规则描述并易于计算机实现. ii) 摄动 $\Delta r(i)$ 较大导致触发事件 i^* 改变时, 摄动轨道和标称轨道间不再为确定性相似. 在摄动轨道中, 标称轨道中原有的某些事件会消失, 另一些新的事件会产生. 所以, 此时基本上需要重建摄动轨道. 对于一阶摄动, 即仅只改变相邻两个事件发生顺序的有限摄动, 已建立了构造摄动轨道的规则. 对于更高阶摄动, 也已有所研究. 但若分岔之后两条轨道间几乎没有一点共同之处可以利用, 则 PA 方法对这类情况就无能为力了. 3) 灵敏度分析. 利用构造得到的摄动轨道参量, 可计算系统性能对变动参数的灵敏度, 即标称轨道性能对变动参数 θ 的偏导数. 对满足确定性相似的情况, 灵敏度计算可以闭合形式给出, 但结果只是 $E\{\partial PM(\theta, \omega)/\partial\theta\}$ 即梯度的数学期望.

对 PA 方法的改进, 主要围绕克服现有框架下存在的两个基本缺陷. 缺陷之一是, 对大多数问题确定性相似条件不能满足^[76]. 缺陷之二是, 对于随机系统, 通常更有意义的是 $\partial E\{PM(\theta, \omega)\}/\partial\theta$ 即数学期望的梯度. 并且, 对于绝大多数实际问题, 算子 E 和 $\partial/\partial\theta$ 的互换可能不成立. 为了解决这些缺陷, 相继提出了平滑 PA 方法^[88]和推广 PA 方法^[89,90]. 平滑 PA 方法证明了, 若能找到仿真过程的一组特征量 $z(\theta, \omega)$ 使性能函数可写成为 $PM(\theta, z)$, 那么当顺序变换

$$\frac{\partial}{\partial\theta} E\{PM(\theta, \omega)\} = E_z \left\{ \frac{\partial}{\partial\theta} PM(\theta, z) \right\} \quad (10)$$

成立时, PA 方法就有充分根据. 由于常可通过选取 z 使 PM 更为平滑, 条件 (10) 较易于满足. 此方法对于一些特殊情形十分有效, 但对较为复杂情形选择 z 和验证条件 (10) 的问题仍未很好解决. 推广 PA 方法是基于状态马尔柯夫过程具有标准转移概率且不可约和系统为遍历的两个假定, 通过“剪——接”途径从标称轨道 NP 构造一个合法的摄动轨道 PP . 构造 PP 的过程是: 对参数微小变化, PP 和 NP 开始时满足确定性相似; 当摄动积累到时刻 t_{01} 使事件顺序改变, PP 和 NP 出现分岔而难以比较, 把 PP 冻结在新状态 x' 上; 沿 NP 向前搜索, 到时刻 $\tau_{01} > t_{01}$ 在 NP 上出现与 x' 相同的状态时停止, 这种状态出现的必然性由遍历性假设所保证; 在由 τ_{01} 到出现新的顺序改变时刻 t_{02} 之间再次采用确定性相似规则构造 PP , 而在 t_{02} 时刻及以后, 重复冻结和搜索过程; 这一过程继续到完成为止. 通过“剪去” NP 在区间 $(t_{01}, \tau_{01}), (t_{02}, \tau_{02}), \dots$ 上的那些段, 再对保留部分采用无穷小摄动规则, 就可由 NP 构造出 PP . 过程为马尔柯夫的假定, 保证了可把任意起始于同一状态的轨道段互换而不改变过程统计性质. 这种方法的不足是, 一为估计方差较大, 二为 NP 必然需比 PP 长很多而使计算效率很低.

总之, 从统计性能层次, 摄动分析不失为研究 DEDES 的一种比较简单和实用的方法, 并已在一些实际问题中得到应用. 但由于上面提及的基本缺陷并未根本解决, 既影响了其在理论上的严格性和普遍性, 也导致应用上的局限性. 最近, 何毓琦教授提出了适当增加仿真次数以来寻找更为实用的方法的设想.

研究 DEDES 的这三种层次模型及其相应的方法, 从某种意义上来说, 构成了离散事件动态系统理论中的一个“模型体系”和“方法体系”. 尽管它们之间在概念、描述和处理手段上互有渗透和沟通, 而且这种趋势正变得日益明显, 但无论从理论还是从应用的角度它

们都具有独立存在和发展的合理性。一段时间中,曾经试图对 DEFS 建立类似于通常的线性系统理论的统一模型和统一方法,看来是不够现实的和难以实现的.这种认识的基本依据是实际的 DEFS 问题中本身就存在着不同研究层次和不同研究目标的需要.离散事件动态系统是一类比较复杂的大系统,结构上常具有多层递阶的形式,在不同层次上有着不同的时间尺度(高层属于逻辑时间,低层属于物理时间),在不同层次上有着不同的目标(高层侧重逻辑控制和协调优化,低层侧重于实时运行和性能分析),而不同层次上的系统特性也不相同(高层多为确定性的和静态的,低层多为动态的和随机的或确定性的).因此,可适应不同层次和不同要求的一个“模型体系”和“方法体系”的建立,才能符合研究 DEFS 的需要.可以认为,这就是三种层次模型和方法间的内在关系与离散事件动态系统理论框架的基本特点.

三、DEFS 研究中值得注意的一些新动向

对 DEFS 的研究至今才走过 10 年的历程. 和系统与控制理论的其他分支相比较, DEFS 还是一个很不成熟的处于发展阶段的分支. 目前, DEFS 的研究在以不减的势头继续得到重视的同时, 出现了一些值得注意的动向. 这对于调整研究布局和工作重点无疑有着借鉴的意义.

首先, 对 DEFS 的研究显示出更加依附于实际背景和更加贴近于实际应用的趋势. 在所有可能的应用领域中, 生产线系统仍然是主要的应用领域之一. 涉及生产线系统的调度排序和性能优化的许多实际课题, 包括过程的实时调度和监督控制、阻塞现象的分析和控制、机器利用率与生产率等生产性性能指标的优化、以及缓冲区容量和托盘数目的最优配置等, 都成为 DEFS 理论中研究的方面. 有关在各个领域的应用研究的综合报道可见文献[3]. 这种依附实际和贴近应用的研究趋势, 在对现有 DEFS 理论和方法的可用性和合理性作出检验的同时, 反映了人们期望从实际中寻找“第一代问题”以推进和发展 DEFS 理论. 正如系统与控制理论的发展过程所已经展示的, 许多最好的理论总是从解决重要实际问题的研究中产生和发展起来的. 对 DEFS 理论的研究, 同样需要这种原动力, 而不是停留于对已有理论的某些改善和对已有结果的某些拓展.

其次, 控制问题正在成为 DEFS 研究中的一个重点. 如果说对系统的建模和分析的研究还只属于“认识世界”的范畴, 那么对系统的控制的研究则属于“改造世界”的范畴. 在已有的方法中, 只有形式语言/有限自动机方法涉及了控制问题, 但仅局限于逻辑层次和定性阶段. 实际上, 在时间层次和统计性能层次上也同样存在着许多控制问题需要研究, 只是现有的建模方法和相应理论还不能提供有效的研究手段. 近来, 这种情况已开始变化, 对控制问题的研究已日益受到重视. 在 1990 年美国 CDC 会议上的有关 DEFS 论文中, 论述 DEFS 控制的论文数的比重已明显增加, 这从一个侧面反映了这种发展趋势. 在国内, 不管是解决实际问题的需要还是随着理论研究工作的深入, 同样显示了这种苗头. 从某种意义上可以认为, 对 DEFS 的研究正在从系统理论阶段进入到系统控制理论阶段, 这是研究工作走向深入的一个标志. 这种过渡, 对于 DEFS 理论的研究工作者是一种机会, 展示了更为广阔的研究领域, 也提供了更为丰富的研究问题. 完全有理由期待, 通

过各种层次的研究和踏实深入的工作,把对 DEDS 的系统控制理论的研究不断推向完善。

参 考 文 献

- [1] ———, Challenge to Control——A Collective View, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-32**(1987), 12, 274—285.
- [2] ———, Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems, *Proc. IEEE*, **77**(1989), 1.
- [3] ———, Special Section on Discrete Event Systems, *IEEE Control Systems Magazine*, **10**(1990), 4, 66—112.
- [4] ———, Proceedings of the IFAC Workshop on Discrete Event System Theory and Applications in Manufacturing and Social Phenomena, Int. Academic Publishers, 1991.
- [5] Varaiya, P. and Kurzhanski, A. B. (Eds.), Discrete Event Systems: Models and Applications, Lecture Notes in Control and Information Science, Springer-Verlag, 1988.
- [6] 曹希仁,离散事件动态系统,自动化学报, **11**(1985), 4, 438—446.
- [7] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Supervision of Discrete Event Processes, *Proc. of 21st IEEE CDC*, 1982, 1228—1229.
- [8] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Supervisory Control of Discrete Event Processes, in *Feedback Control of Linear and Nonlinear Systems*, Berlin: Springer-Verlag, 1982.
- [9] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes, Report 8311, University of Toronto, Toronto, Canada, 1984.
- [10] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Modular Feedback Logic for Discrete Event Systems, *SIAM J. Control and Optimization*, **25**(1987), 5, 1202—1218.
- [11] Wonham, W. M. and Ramadge, P. J., On the Supremal Controllable Sublanguage of a Given Language, *SIAM J. Control and Optimization*, **25**(1987), 637—659.
- [12] Lin, F. and Wonham, W. M., On the Computation of Supremal Controllable Sublanguages, Report 8506, University of Toronto, Toronto, Canada, 1985.
- [13] Lin, F. and Wonham, W. M., On Observability of Discrete Event Systems, *Information Sciences*, **44**(1988), 173—198.
- [14] Lin, F. and Wonham W. M., Decentralized Supervisory Control of Discrete Event Systems, *Information Sci.*, **44**(1988), 199—224.
- [15] Cieslak, R., et al., Supervisory Control of Discrete Event Processes with Partial Observations, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-33**(1988), 3, 249—260.
- [16] Wonham, W. M., On Control of Discrete Event Systems; Report 8508, University of Toronto, Toronto, Canada, 1985.
- [17] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Modular Supervisory Control of Discrete Event Systems, in *Analysis and Optimization of Systems*, New York: Springer-Verlag, 1986.
- [18] Wonham, W. M. and Ramadge, P. J., On Modular Synthesis of Supervisory Controls for Discrete Event Processes, *Proc. of Int. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing*, 1984.
- [19] Lin, F., Vaz, A. F. and Wonham, W. M., Supervisor Specification and Synthesis for Discrete Event Systems, *Int. J. Control*, **48**(1988), 321—332.
- [20] Ramadge, P. J., Observability of Discrete Event Systems, *Proc. of 25th IEEE CDC*, 1986, 1129—1130.
- [21] Denham, M. J., Control of Discrete Event Processes, *Proc. of 25th IEEE CDC*, 1986, 1717—1718.
- [22] Ostroff, J. S. and Wonham, W. M., A Temporal Logic Approach to Real Time Control, *Proc. of 24th IEEE CDC*, 1985, 656—657.
- [23] Tsitsiklis, J. N., On the Control of Discrete-Event Dynamical Systems, *Proc. of 26th IEEE CDC*, 1987, 419—422.
- [24] Golaszewski, C. H. and Ramadge, P. J., Control of Discrete Event Processes with Forced Events, *Proc. of 26th IEEE CDC*, 1987, 247—251.
- [25] Wonham, W. M., Some Remarks on Control and Computer Science, *IEEE Control Systems Magazine*, **7**(1987), 2, 9—10.
- [26] Vaz, A. F. and Wonham, W. M., On Supervisory Reduction in Discrete Event Systems. *Int. J. Control*, **44**(1986), 2, 475—491.
- [27] Li, Y. and Wonham, W. M., On Supervisory Control of Real-Time Discrete-Event Systems, *Proc. of ACC*,

- 1987, 1715—1720.
- [28] Tadmor, G. and Maimon, O., From System Constraints to Supervisors in Large Discrete Event Systems, Proc. of Int. Symp. Mathematics of Networks and Systems, 1987.
- [29] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Modular Supervisory Control of Discrete Event Systems, *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 1(1988), 1, 13—30.
- [30] Wonham, W. M., Hierarchical Control of DES, Lecture Notes, Washington University, 1987.
- [31] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M., Supervisory Control of a Class of Discrete Event Systems, *SIAM J. Control and Optimization*, 25(1987), 1, 201—230.
- [32] Ramadge, P. J., Some Tractable Supervisory Control Problems for Discrete Event Systems Modeled as Buchi Automata, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-34(1989), 1, 10—19.
- [33] Tsitsiklis, J. N., On Supervisory Control of Discrete Event Dynamical Systems, *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2(1989), 1, 95—107.
- [34] Li, Y. and Wonham, W. M., On Supervisory Control of Real Time Discrete Event Systems, *Information Sciences*, 44(1988), 1, 159—183.
- [35] Papadimitriou, C. H. and Tsitsiklis, J. N., On Supervisor Control of Interconnected Discrete-Event Systems, Rep., 1989.
- [36] 李勇华、高为炳, 离散事件系统实时监控的性能适定性, *控制与决策*, 5(1990), 4, 1—5.
- [37] 朱岭、周政、于景元, 离散事件系统状态反馈控制的几何理论, *控制与决策*, 6(1991), 1, 25—30.
- [38] Peterson, J. L., Petri Net Theory and the Modelling of Systems, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.
- [39] 袁崇义, Petri 网理论, 东南大学出版社, 1989.
- [40] Cuninghame-Green, R. A., Minimax Algebra, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 166, Springer-Verlag, 1979.
- [41] Cohen, G., et al., A linear-System-Theoretic View of Discrete-Event Processes, Proc. of 22nd IEEE CDC, 1983, 1039—1044.
- [42] Cohen, G., et al., Linear System Theory for Discrete Event Systems, Proc. of 23rd IEEE CDC, 1984, 539—544.
- [43] Cohen, G., et al., Linear-System Theoretic View of Discrete-Event Processes and Its Use for Performance Evaluation in Manufacturing, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-30(1985), 3, 210—220.
- [44] Cohen, G., et al., Dating and Counting Events in Discrete-Event Systems, Proc. of 25th IEEE CDC, 1986, 988—993.
- [45] Cohen, G., et al., A 2-D Discrete Event Linear System Theory, Tech. Rep., 1982.
- [46] Cohen, G., et al., Algebraic Tools for the Performance Evaluation of Discrete Event Systems, in Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems, Proc. IEEE, 77(1989), 1, 39—85.
- [47] Olsder, G. J. and Roos, C., Gramer and Cayley-Hamilton in the Max-Algebra, Rep. 85—30, Delft Univ. of Tech., 1985.
- [48] Olsder, G. J. and de Vries, T. E., On an Analogy of minimal Realizations in Conventional and Discrete-Event Dynamic Systems, Tech. Rep., Delft Univ. of Tech., 1982.
- [49] Olsder, G. J., Some Results on the Minimal Realization of Discrete-Event Dynamic Systems, Rep. 85—35, Delft Univ. of Tech., 1985.
- [50] Olsder, G. J., et al., Discrete Event Systems with Stochastic Processing Times, Rep. 88-11, Delft Univ. of Tech., 1988.
- [51] Karp, R. M., A Characterization of the minimum Cycle Mean in a Diagraph, *Discrete Mathematics*, 23 (1978), 309—311.
- [52] 徐心和, “线性”离散事件动态系统, *控制与决策*, 2(1987), 3, 4.
- [53] 徐心和、于海斌, 用于离散事件系统研究的代数方法, *信息与控制*, 19(1990), 3, 4, 5, 6.
- [54] 郑大钟、王龙, 参数摄动时一类离散事件动态系统的渐近性能估计和鲁棒性条件, *控制理论与应用*, 6(1989), 3, 47—55.
- [55] 王龙、郑大钟, 线性离散事件动态系统的鲁棒性, *控制理论与应用*, 7(1990), 2, 27—31.
- [56] 王龙、郑大钟, 线性离散事件动态系统控制的一些新结果, *清华大学学报*, 30(1990), 1, 18—26.
- [57] 王龙、郑大钟, 线性离散事件动态系统的辨识, *应用数学*, 3(1990), 1, 14—21.
- [58] 王龙、郑大钟, 线性离散事件动态系统的可达性, *高校应用数学学报*, 5(1990), 2, 292—301.
- [59] Zheng, Da-Zhong and Wang, Long, Algebraic Characteristics and Structure Decomposition for the ‘Linear’ Discrete Event Dynamic Systems, Preprint of 11th IFAC World Congress, 6(1990), 237—242.
- [60] 高建强、程新刚, 关于加工生产线的一种新的模型及其扰动分析, *自动化学报*, 16(1990), 3, 226—233.

- [61] Cheng, Xingang and Zheng Ying-Ping, Some Results on Near-Complete Decomposability of Discrete Event Systems, Preprint of 11th IFAC World Congress, 6(1990), 250—252.
- [62] 涂蕃生, 串行生产线的数学模型及其性能估算, 自动化学报, 16(1990), 6, 495—502.
- [63] 王秀峰, 串行生产线的“线性”动态方程描述及其扰动分析新算法, 自动化学报, 16(1990), 6, 542—546.
- [64] 吴铁军、吕勇哉, 离散事件动态系统稳定性分析方法, 自动化学报, 16(1990), 5, 408—414.
- [65] 张梅、吴智铭, 可控可观性分析在 FMS 中的应用, 控制与决策, 6(1991), 1, 20—24.
- [66] Ho, Y. C., A Selected and Annotated Bibliography on Perturbation Analysis, Tech. Rep., 1987.
- [67] Ho, Y. C., et al., A Gradient Technique for General Buffer Storage Design in a Serial Production Line, *Int. J. Prod. Res.*, 17(1979), 6, 557—580.
- [68] Ho, Y. C., Parameter Sensitivity of a Statistical Experiment, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-24(1979), 6, 982—983.
- [69] Ho, Y. C., et al., A New Approach to Determine Parameter Sensitivities on Transfer Line, *Management Science*, 29(1983), 6, 700—714.
- [70] Ho, Y. C. and Cassandras, C. G., A New Approach for the Analysis of Discrete Event Dynamic Systems, *Automatica*, 19(1983), 2, 149—167.
- [71] Ho, Y. C. and Cao, X. R., Perturbation Analysis and Optimization of Queueing Networks, *J. of Optimization Theory and Applications*, 40(1983), 4, 559—582.
- [72] Suri, R., Implementation of Sensitivity Calculation on a Monte Carlo Experiment, *J. of Optimization Theory and Applications*, 40(1983), 4, 625—630.
- [73] Ho, Y. C., Cao, X. R. and Cassandras, C. G., Infinitesimal and Finite Perturbation Analysis for Queueing Networks, *Automatica*, 19(1983), 4, 439—445.
- [74] Suri, R. and Cao, X. R., The Phantom Customer and Marked Customer Methods for Optimization of Closed Queueing Networks with Blocking and General Service Times, Tech. Rep., Havard Univ., 1983.
- [75] Cao, X. R. and Ho, Y. C., Estimation of Sojourn Time Sensitivity in Queueing Networks Using Perturbation Analysis, *J. of Optimization Theory and Applications*, 44(1987), 3, 353—375.
- [76] Cao, X. R., Convergence of Parameter Sensitivity Estimates in a Stochastic Experiment, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-30(1985), 9, 845—853.
- [77] Cassandras, C. G. and Ho, Y. C., An Event Domain Formalism for Sample Path Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-30(1985), 12, 1217—1221.
- [78] Ho, Y. C. and Cao, X. R., Performance Sensitivity to Routing Changes in Queueing Networks and Flexible Manufacturing Systems Using Perturbation Analysis, *IEEE Robotics and Automation*, 1(1985), 165—172.
- [79] Ho, Y. C. and Yang, P. Q., Equivalent Networks, Load Dependent Servers, and Perturbation Analysis—An Experimental Study, Proc. of Conf. on Teletraffic Analysis and Computer Performance Evaluation, 1986.
- [80] Cassandras, C. G., On-Line Optimization for a Flow Control Strategy, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32(1987), 11, 1014—1017.
- [81] Zazanis, M. A. and Suri, R., Comparison of Perturbation Analysis with Conventional Sensitivity Estimate for Stochastic Systems, Tech. Rep., Univ. of Wisconsin, 1985.
- [82] Cao, X. R., Sensitivity Estimates Based on One Realization of a Stochastic System, *J. of Statistical Computation and Simulation*, 27(1987), 211—232.
- [83] Cao, X. R. and Ho, Y. C., Sensitivity Analysis and Optimization of Throughput in a Production Line with Blocking, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32(1987), 11, 959—967.
- [84] Cassandras, C. G. and Strickland, S. G., An Augmented Chain Approach for On-Line Sensitivity Analysis of Markov Processes, Proc. of 26th IEEE CDC, 1987, 1873—1878.
- [85] Suri, R. and Dille, J., A Technique for On-Line Sensitivity Analysis of Flexible Manufacturing Systems, *Annals of Operations Research*, 3(1985), 381—391.
- [86] Suri, R. and Zazanis, M. A., Infinitesimal Perturbation Analysis and the Regenerative Structure of the GI/G/1 Queue, Proc. of 26th IEEE CDC, 1987, 677—680.
- [87] Suri R., Infinitesimal Perturbation Analysis for General Discrete Event Dynamic Systems, *J. of ACM*, 34(1987), 3, 686—717.
- [88] Gong, W. B. and Ho, Y. C., Smoothed Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32(1987), 858—866.
- [89] Ho, Y. C. and Li, S., Extensions of the Infinitesimal Perturbation Analysis, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-33(1988), 5, 427—438.
- [90] Li, S., A Tutorial on the Extended Perturbation Analysis, Tech. Rep. Univ. of Arizona, 1988.

- [91] Cassandras, C. G. and Strickland, S. G., On-Line Sensitivity Analysis of Markov Chain, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-34**(1989), 1, 76—86.
- [92] Ho, Y. C., Performance Evaluation and Perturbation Analysis of DEDS, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-32**(1987), 7, 563—572.
- [93] Suri, R., Robustness of Queueing Networks Formulas, *J. of ACM*, **30**(1983), 564—594.
- [94] Yao, D. W. and Buzacott, J. A., Queueing Models for a Flexible Machining Station, Part I: The Diffusion Approximation, *Europe J. of Oper. Res.*, **19**(1985), 233—240.
- [95] Yao, D. W. and Buzacott, J. A., Queueing Models for a Flexible Machining Station, Part II: The Method of Coxian Phases, *Europe J. of Oper. Res.*, **19**(1985), 241—252.
- [96] Gong, W. B., Smoothed Perturbation Analysis of Markovian Queueing Networks, Proc. of ACC, 1988, 456—461.
- [97] Ho, Y. C., Li, S. and Vakili, P., On the Efficient Generation of Discrete Event Sample Paths under Different System Parameter Values, Tech. Rep., Harvard Univ., 1988.
- [98] Li, S., Marked Event Method in the Optimization of Discrete Event Dynamical Systems, Tech. Rep., 1988.
- [99] Li, S. and Ho, Y. C., Sample Path and Performance Homogeneity of Discrete Event Dynamic Systems, Tech. Rep., Harvard Univ., 1988.
- [100] 王梅生, 离散事件动态系统的扰动分析, *控制与决策*, **4**(1989), 1, 56—61. **4**(1989), 2, 58—63.
- [101] 汪自勤、宋文忠、冯纯伯, 离散事件动态系统的分析与优化——排队网络模型方法, *信息与控制*, **18**(1989), 6, 31—40.
- [102] Huang, Z.-T. and Jiang, S.-B., On the Statistical Properties of Perturbation Analysis, Preprint of 11th IFAC World Congress, **6**(1990), 253—258.

THE CURRENT STATE AND DEVELOPING TRENDS OF DEDS THEORY

ZHENG DAZHONG

(Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

ZHENG YINGPING

(Institute of Automation, Academia Sinica, Beijing 100080)

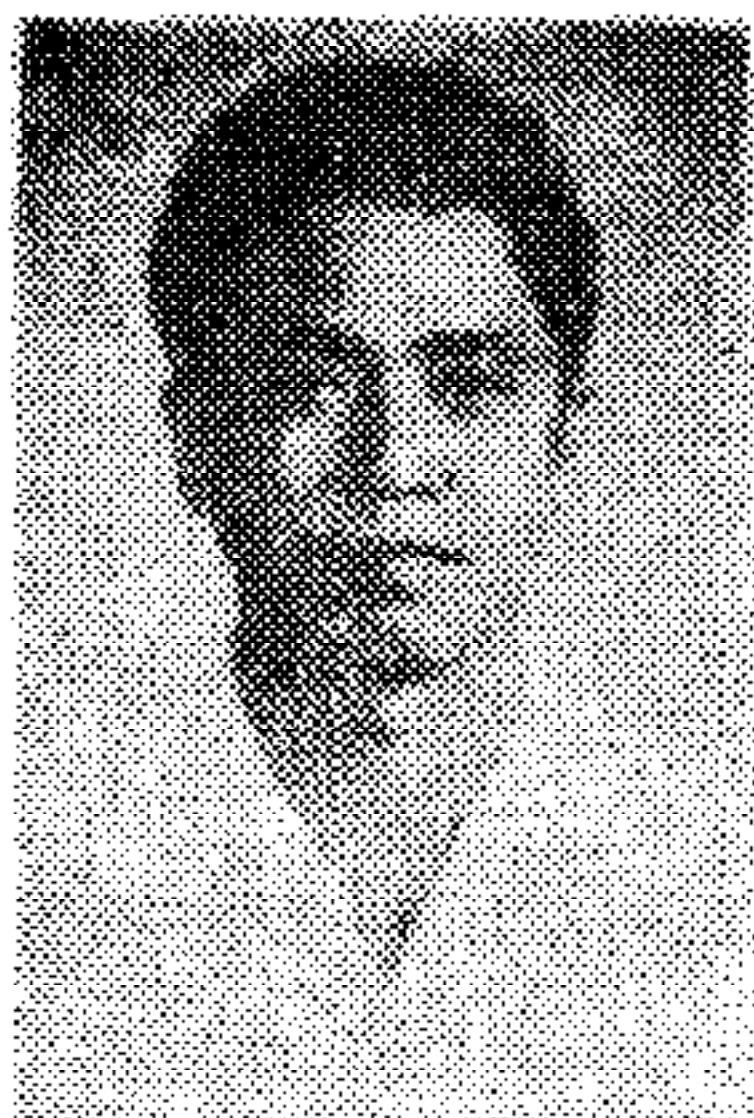
ABSTRACT

The study of the discrete event dynamic systems (DEDS) is one of the frontiers of research in the control system theory, that is emerging as a new branch in the field. This paper discusses the motivations of the increasing interests in the branch and briefly but systematically reviews the framework and main results in the theory as well as the methods developed, at the logical level, temporal level, and stochastic performance level of models. This paper will also point out some forecasts of the new trends in the study of DEDS.

Key words: Discrete event dynamic systems; modeling and analysis theory; finite automat method; maximum algebra method; perturbation analysis method.



郑大钟 1959年毕业于清华大学自动控制系。现为清华大学自动化系教授。主要研究领域有线性系统理论、最优控制、大系统分散控制、鲁棒控制、离散事件动态系统等。在国内外发表论文近50篇，出版著作5本。担任中国自动化学会理事，控制理论专业委员会副主任，《自动化学报》和《控制与决策》编委。



郑应平 1963年北京大学数力系毕业,1967年中国科学院自动化所研究生毕业,现为自动化所研究员。主要研究方向有线性系统、最优控制、对策理论、系统学、离散事件动态系统等。完成和发表论文60余篇。担任IFAC理论委员会委员,中国自动化学会常务理事,控制理论专业委员会副主任,国际和国内多种刊物的编委。

《自动化学报》征稿简则

一、《自动化学报》是中国自动化学会主办的高级学术期刊,每年出版六期;本刊的英文翻译版在美国出版,每年四期。

二、本刊刊载自动化科学与技术领域的高水平学术论文和科学研究成果。内容包括:1.自动控制理论;2.系统理论与系统工程;3.自动化技术及其在国民经济各领域中的创造性应用;4.自动化系统计算机辅助技术;5.机器人与自动机;6.人工智能与智能控制;7.自动控制系统中的新概念、新原理、新方法、新设计;8.信息理论与信息处理技术;9.自动化学科领域的其它重要问题。

三、本刊发表的文章以论文和短文两种形式为主,并不定期地发表综述性文章和书刊评论、问题研讨、读者来信、国内外学术活动信息等。

四、本刊原则上只发表原始性稿件,但不排除刊登已在国内外学术会议上发表或准备发表的优秀论文的可能性(对于此种情况,作者必须如实说明)。

五、来稿格式及要求

1. 来稿要求论点明确、论证充分、语句通顺、文字简练。一般定稿时论文不超过6000字;短文不超过3000字;其它形式文章视具体内容由编辑部决定。

2. 稿件首页应包括下列内容:标题;作者姓名、工作单位、详细通讯地址(包括邮政编码)、电话号码;中文摘要;关键词。

3. 论文和短文的文章结构请参照本刊最近发表的文章格式。论文摘要必须在200字以内;短文100字左右。文中非标准缩写词(中文或英文)须在首次出现时定义清楚;公式、图、表均须分别用阿拉伯数字全文统一编号。插图应贴于稿纸并附在文末。

4. 计量单位一律用国际单位,即SI单位制。名词术语必须规范化、标准化,前后一致。外国人名、地名、刊名除已通用者外一律用原文。

5. 参考文稿按文中出现的先后次序排列,文献如为期刊,按[编号],作者(姓在前,如Widner, L. N., Kalman, R. E. and Wang, H.等);文章题目,期刊名(外文可根据国际惯例使用缩写词),卷号(年份),期号,页码顺序编排。文献如为图书,则按[编号],作者(姓在前),书名,版次(初版不写),出版者,地点,年份,页码顺序排列。文中未引用的文献不得列入参考文献栏目。

6. 文末附英文文摘。文摘包括英文标题、作者姓名和工作单位、文章摘要、关键词(和中文文摘一致)。论文文摘一般不超过250词,短文150词左右。

7. 来稿务必用16开20×20标准绿格稿纸誊写清楚。打印稿亦应按此规格每页打400字。外文摘要及外文参考文献请间行打字。

六、作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责。

七、本编辑部在收稿后一周内通知作者,并在稿件修订过程中与作者保持联系。如果作者在来稿中不作特殊说明,编辑部将只与第一作者联系。

八、已被本刊接受发表的稿件,按审查意见和“作者加工稿件须知”修改后一式两份寄编辑部。其中按论文类发表的稿件尚需附所有作者的近照(按护照规格)和120字的作者简介。

九、来稿刊登与否由编委会最后审定。编委会对来稿作适当文字删改或退请作者修改。来稿一经发表,按篇酌致稿费,并赠送30本抽印本,经审查后不拟刊登的文稿,一般在半年内退还。

十、来稿(一式两份)请寄北京市中关村中国科学院自动化研究所转《自动化学报》编辑部,邮政编码100080。