

针对不可观、不可控事件的 离散事件系统状态控制

ZHENDUI BUKEGUAN BUKEKONG SHIJIAN DE
LISAN SHIJIAN XITONG ZHUANGTAI KONGZHI

王寿光 尤 丹 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

针对不可观、不可控事件的 离散事件系统状态控制

王寿光 尤 丹 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 王寿光 尤 丹 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

针对不可观、不可控事件的离散事件系统状态控制 /
王寿光, 尤丹著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2018.6
ISBN 978-7-5517-1924-7

I. ①针… II. ①王… ②尤… III. ①Petri 网—系统
模型—离散事件系统—研究 IV. ①TP393.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153210 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 145mm × 210mm

印 张: 5.125

字 数: 115 千字

出版时间: 2018 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 6 月第 1 次印刷

组稿编辑: 牛连功

责任编辑: 杨世剑

责任校对: 吕 翀

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1924-7

定 价: 30.00 元

前 言

生活中的所有人造系统,诸如柔性制造系统、网络通信系统、轨道交通系统等,从逻辑层面分析,都是离散事件系统。离散事件系统的禁止状态控制是各领域系统设计必须考虑的关键性问题,关乎制造业的系统产能问题、通信业的信息传输安全问题、轨道交通的运行安全问题等。对于实际系统而言,由于现有的观测技术水平有限,事件观测成本过高,以及器件、线路故障等原因,不可观事件的存在不可避免。通常,不可观事件也是不可控事件。为保证系统正常安全运行抑或是考虑系统经济效益问题,研究存在不可观、不可控事件的离散事件系统的禁止状态控制问题十分必要。

目前,国内外对存在不可观、不可控事件的离散事件系统的禁止状态控制问题的研究成果相对匮乏。本书基于 Petri 网模型框架,研究这类离散事件系统的禁止状态控制问题,即研究“部分可观可控” Petri 网的禁止状态控制问题。主要内容如下。

(1)对于“部分可观可控” Petri 网,建立一个系统的、完善的基本理论框架,用于解决禁止状态控制问题。给出“允许观测变迁序列”“状态控制规范等价”等必要概念,揭示了一些重要的结论,同时提出最优控制策略设计的基本方法。

(2)针对状态控制规范为一条线性约束的一类“完全可观、部分可控” Petri 网,提出一种快速的线性约束最优转换算法,并在

此约束转换基础上, 给出一个最优结构型控制器的设计方法。

(3) 针对状态控制规范为一条线性约束的一类“部分可观可控” Petri 网, 提出多项式计算复杂度的最优控制策略设计方法。该方法的成功提出得益于本书三个重要的研究成果: 一是针对线性约束前向影响子网为“前向无并发”网时, 一种快速的线性约束最优转换算法; 二是针对线性约束后向观察子网为无环的“后向无冲突”网时, 一种快速计算不可观最小减少量的算法; 三是针对不可控允许线性约束的最优控制策略的设计。

(4) 针对状态控制规范为一类“或逻辑”线性约束组的“部分可观可控” Petri 网, 提出多项式计算复杂度的最优控制策略设计方法。该方法的成功提出除了基于上述研究成果外, 还得益于两个研究成果: 一是一类“或逻辑”线性约束组的最优转换方法; 二是针对“或逻辑”不可控允许线性约束组的最优控制策略设计方法。

虽然本书设计的具有实际应用意义的控制策略仅适用于一类 Petri 网或是一类线性约束(组), 但是与文献中现有的方法相比, 本书设计的控制策略既保证了最优性, 同时拥有较广的适用范围。而且, 今后针对“部分可观可控” Petri 网的禁止状态控制问题的研究都可以基于本书建立的基本理论框架展开。

王寿光 尤 丹

于浙江工商大学

2018年2月

主要符号对照表

\mathbb{N}	自然数集
\mathbb{Z}	整数集
\mathbb{N}^+	正整数集
inf	无穷大数
N	Petri 网 $N = (P, T, F, W)$, 其中 P 是库所集合, T 是变迁集合, F 是有向弧集合, W 是弧权值集合
m	Petri 网标识(或状态)
$\cdot x$	$\cdot x = \{y \in P \cup T \mid (y, x) \in F\}$, 节点 $x \in P \cup T$ 的前集
x^\bullet	$x^\bullet = \{y \in P \cup T \mid (x, y) \in F\}$, 节点 $x \in P \cup T$ 的后集
$\cdot X$	$\cdot X = \bigcup_{x \in X} \cdot x$, 节点集 $X \subseteq P \cup T$ 的前集
X^\bullet	$X^\bullet = \bigcup_{x \in X} x^\bullet$, 节点集 $X \subseteq P \cup T$ 的后集
$R(N, m_0)$	Petri 网 N 从初始标识 m_0 开始的可达标识集
$[N]$	Petri 网 N 的关联矩阵
σ, δ	变迁序列
v_σ, v_δ	变迁序列 σ 的 Parikh 向量; 变迁序列 δ 的 Parikh 向量
$v_\sigma(t), v_\delta(t)$	变迁 t 在 σ 中出现的次数; 变迁 t 在 δ 中出现的次数
π	路径
Π	路径集
$P(\pi)$	路径 π 中的库所集
$T(\pi)$	路径 π 中的变迁集
$P(\Pi)$	路径集 Π 中的库所集
$T(\Pi)$	路径集 Π 中的变迁集
T_c	可控变迁集

T_o	可观变迁集
T_{uc}	不可控变迁集
T_{uo}	不可观变迁集
\mathcal{M}	$\mathcal{M} = \mathcal{N}^{tPI}$, Petri 网 $N = (P, T, F, W)$ 的所有可能的状态的集合
\mathcal{F}	禁止状态空间
\mathcal{Q}	容许状态空间
$\mathcal{A}(\mathcal{Q})$	容许状态空间 \mathcal{Q} 的不可控允许标识集
E^*	由集合 E 中元素构成的所有有限长的序列(包括空序列 ε) 的集合
$pr(\sigma)$	变迁序列 σ 的所有前缀变迁序列的集合
$L(N, m_0)$	Petri 网系统 (N, m_0) 的语言
$O(\sigma)$	关于变迁序列 σ 的观测变迁序列
$O^{-1}(\delta)$	关于观测变迁序列 δ 的使能变迁序列集
$\chi(\sigma)$	变迁序列 σ 的所有不可控延伸序列的集合
$\Lambda(\delta)$	关于观测变迁序列 δ 的潜在实施序列集
$L_o(N, m_0)$	Petri 网系统 (N, m_0) 的观测语言
$\bar{G}_S(m_0, \mathcal{Q})$	初始状态为 m_0 , 容许状态空间为 \mathcal{Q} 的 Petri 网的所有允许观测变迁序列的集合
u	控制策略
$R(N, m_0) \downarrow_u$	控制策略 u 的控制下, Petri 网系统 (N, m_0) 的所有可达状态集合
$L(N, m_0) \downarrow_u$	控制策略 u 的控制下, Petri 网系统 (N, m_0) 的所有使能变迁序列集合
$L_o(N, m_0) \downarrow_u$	控制策略 u 的控制下, Petri 网系统 (N, m_0) 的所有观测变迁序列集合
(ω, k)	一条线性约束
$\omega(p)$	库所 p 的权值
W	线性约束组

$\vee W$	满足“或逻辑”的线性约束组
$L_{(\omega, k)}$	线性约束 (ω, k) 的合法标识集
$L_{\vee W}$	“或逻辑”线性约束组 $\vee W$ 的合法标识集
$\mathcal{A}_{L_{(\omega, k)}}$	容许状态空间 $Q=L_{(\omega, k)}$ 的Petri网的不可控允许标识集
$\mathcal{G}_S(m_0, (\omega, k))$	初始状态为 m_0 , 容许状态空间 $Q=L_{(\omega, k)}$ 的Petri网的允许观测变迁序列的集合
$\mathcal{A}_{\vee W}$	容许状态空间 $Q=L_{\vee W}$ 的Petri网的不可控允许标识集
$\mathcal{G}_S(m_0, \vee W)$	初始状态为 m_0 , 容许状态空间 $Q=L_{\vee W}$ 的Petri网的允许观测变迁序列的集合
$\omega(t)$	变迁 t 关于线性约束 (ω, k) 的影响权值
T_{ω}^+	(ω, k) 的正影响变迁集
T_{ω}^-	(ω, k) 的负影响变迁集
P_f	禁止库所集
$T_{in}(N')$	Petri网子网 N' 的外部输入变迁集
$T_{out}(N')$	Petri网子网 N' 的外部输出变迁集
N_{ω}^{α}	$N_{\omega}^{\alpha} = (P_{\omega}^{\alpha}, T_{\omega}^{\alpha}, F_{\omega}^{\alpha})$, (ω, k) 的前向影响子网
Π_t	关于变迁 t 的所有基本观察路径的集合
$\Pi(X)$	关于库所集 X 的所有基本观察路径的集合
N_t^{β}	$N_t^{\beta} = (P_t^{\beta}, T_t^{\beta}, F_t^{\beta})$, 关于变迁 t 的后向观察子网
$T_{\omega}^{\#}$	(ω, k) 的待观察变迁集
N_{ω}^{β}	$N_{\omega}^{\beta} = (P_{\omega}^{\beta}, T_{\omega}^{\beta}, F_{\omega}^{\beta})$, 关于约束 (ω, k) 的后向观察子网
c	最大强连通子网
$P(c)$	最大强连通子网 c 中库所集
$T(c)$	最大强连通子网 c 中变迁集
C_A	Petri网中所有的A类最大强连通子网的集合
C_B	Petri网中所有的B类最大强连通子网的集合
$Ft(c_a)$	A类最大强连通子网 c_a 的所有源泉库所的集合
$\Phi_{\omega, \delta}$	关于线性约束 (ω, k) 及观测变迁序列 δ 的不可观最小减少量

$\varphi_\delta(t)$	不可观变迁 t 关于观测变迁序列 δ 的最小实施次数
$\overline{N}_\omega^\beta$	$\overline{N}_\omega^\beta = (\overline{P}_\omega^\beta, \overline{T}_\omega^\beta, \overline{F}_\omega^\beta)$, (ω, k) 的扩展后向观察子网
$R_t(N, m)$	Petri 网 N 中从标识 m 开始仅由变迁 t 实施(一次或多次)可达的所有标识的集合
Q	任意的一个状态空间(或标识集)
\overline{Q}	$\overline{Q} = \mathcal{M} - Q$, 状态空间 Q 的补集
$Q^\#$	Q 的全库所限制状态空间
$\Gamma(Q, t)$	Q 关于 t 的逃逸状态集
Q_t	Q 关于 t 的转换状态空间
$C_{i \rightarrow j}$	从线性约束 (ω_i, k_i) 到 (ω_j, k_j) 的补标识集

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书研究内容	9
第 2 章 Petri 网基本理论	10
2.1 Petri 网基本概念	10
2.2 不可观变迁、不可控变迁	18
第 3 章 “部分可观可控” Petri 网的禁止状态控制 问题理论框架设计	20
3.1 基本概念	20
3.2 控制策略设计	26
3.3 状态控制规范——线性约束	31
3.4 本章小结	35

第 4 章 针对一条线性约束的“完全可观、部分可控”Petri 网最优控制器设计	36
4.1 线性约束最优转换	38
4.2 最优控制器设计	51
4.3 本章小结	57
第 5 章 针对一条线性约束的“部分可观可控”Petri 网最优控制策略设计	58
5.1 前向影响子网和后向观察子网	60
5.2 针对一类前向影响子网线性约束最优转换	66
5.3 针对一类 Petri 网的最优控制策略设计	78
5.3.1 针对不可控允许线性约束的最优控制策略设计	79
5.3.2 不可观最小减少量计算算法	82
5.3.3 针对任意线性约束的最优控制策略设计	90
5.4 实例	93
5.5 本章小结	96
第 6 章 针对“或逻辑”线性约束组的“部分可观可控”Petri 网最优控制策略设计	97
6.1 “或逻辑”线性约束组最优转换	97
6.1.1 不可控允许标识集计算理论框架	98
6.1.2 “或逻辑”线性约束组的转换状态空间计算	105
6.1.3 一类“或逻辑”线性约束组最优转换算法	114
6.2 最优控制策略设计	118

6.2.1	针对“或逻辑”不可控允许线性约束组的最优控制策略设计	119
6.2.2	针对一类“或逻辑”线性约束组的最优控制策略设计	120
6.3	实 例	123
6.4	关于结构型控制器设计	125
6.5	本章小结	130
第7章	总结与展望	132
7.1	总 结	132
7.2	展 望	133
参考文献	135
附 录	141

第1章 引言

1.1 研究背景及意义

离散事件(动态)系统^[1,2]是状态离散且由异步事件的发生驱动状态演化的动态系统。生活中的所有人造系统,如柔性制造系统、网络通信系统、轨道交通系统等,从逻辑层面分析都是离散事件系统。近年来,生活中的这些人造系统日渐趋向自动化、智能化。此外,寻求高的资源利用率已成为工业界、IT界等各个领域发展的必然趋势。然而,随着系统自动化程度及资源利用率的提高,如果缺乏合适的监控措施,系统很可能到达禁止状态。所谓禁止状态是指人为规定的不期望系统到达的状态。禁止状态的出现不仅会使系统效率降低、运行停止,甚至可能带来巨大的经济损失和安全事故。例如柔性制造系统的死锁现象、网络通信系统中因缓冲区溢出而造成的数据丢失现象、轨道交通枢纽上列车间的碰撞、核电站放射性物质泄漏现象等,都是系统的禁止状态。因此,如何对离散事件系统进行监控,以避免其进入禁止状态,即禁止状态控制问题,一直是理论界和工业界研究的热点。这关乎系统的经济效益问题和系统的安全运行问题。

对于实际系统而言,系统中某些事件的发生可能不可控或者不可观。不可控事件指外部控制器无法禁止该事件的发生;不可观事件指该事件的发生与否无法被观测到。既然不可观事件无法观测,那么不可观事件必然也是不可控事件。本书重点研究不可观事件。对于实际系统来说,不可观事件的存在源于如下三大原因。

第一,现有的技术手段无法观测系统中某些事件的发生与否。对于一些大型的复杂系统或者精密系统来说,某些事件的发生与否无法用现有的技术手段去观测。为了解决系统禁止状态控制问题,不得不在这些事件不可观的情况下,设计控制器保证系统不进入禁止状态。

第二,观测系统中某些事件发生与否需要投入的成本过高。对于某些系统来说,尽管用现有的技术可以去观测事件发生与否,但要求采购成本高的仪器,耗费大量的人力、物力安装系统观测装置,等等。在这种情况下,结合经济利益考虑,采用一套适用于这些事件不可观情况下的禁止状态监控措施显得更为合理。

第三,器件、线路故障的发生导致事件不可观。现实生活中的系统不可避免地会面临器件、线路等故障,这使得不可观事件的出现同样不可避免。例如,由于系统使用时间过长或操作不当等原因,可能会出现线路老化、断路等故障,致使传感器失效,使得原本依赖这些传感器观测的事件成为不可观事件。通常,在这种情况下,原有控制策略不再适用。为确保系统安全正常运行,考虑传感器失效情况下的监控措施显得尤为必要。也就是说,要在某些事件不可观的情况下,设计控制器保证系统不进入禁止状态。

对于制造业而言,经济利益是厂商考虑的重要因素。有时,为了不增加额外成本,采用一套适用于个别事件不可观情况下的禁止状态监控措施比更换、修复传感器更加符合厂商利益。当然,这里设计的监控措施是指既能保证生产质量和生产安全,又尽可能不降低系统产能的监控措施。对于以安全性能考虑为首的系统而言,如轨道交通系统、核电站相关系统,则必须确保系统时刻处于安全运行状态。这意味着,当器件故障导致某些事件发生不可观时,在未能更换、修复故障器件期间,为了确保系统安全运行,应急控制措施的采用至关重要。

综上所述,禁止状态控制问题是离散事件系统设计必须考虑的关键性问题,它关乎制造业的系统产能问题、通信业的信息传输安全问题、轨道交通的运行安全问题等,从某种程度上说,与当今社会人们的生活质量与安全问题息息相关。此外,纵观上述三大原因,对于实际系统而言,不可观事件的存在不可避免。为保证系统正常安全运行抑或是考虑系统经济效益问题,研究存在不可观事件系统的禁止状态控制问题十分必要。

1.2 国内外研究现状

离散事件系统的禁止状态控制问题由来已久^[3]。对于事件全部可控、可观的系统的禁止状态控制问题,各种基于 Petri 网、自动机、形式语言的方法竞相被提出,监控器设计的研究是解决该问题的重点,现在,这类问题的监控技术已相当成熟。然而,对于存在不可控或是不可观事件系统的禁止状态控制问题尚未得到完

全解决。如前文所述,不可观事件必然也是不可控事件,因而不可观事件具有不可观测且不可控制的双重特性,这使得存在不可观事件的系统的禁止状态控制问题比事件全部可观但存在不可控事件的系统的禁止状态问题更为复杂。

Petri 网具有良好的动态系统描述功能,有直观的图形化表现形式和丰富的分析手段,是研究离散事件系统的重要研究工具。因此,大量的研究工作基于 Petri 网模型研究系统的禁止状态控制问题,本书也是如此。在 Petri 网模型框架下,“事件”被建模为“变迁”,“状态”也可称作“标识”。给定一个状态控制规范(以下简称控制规范),Petri 网状态空间可被划分为容许状态空间和禁止状态空间。称 Petri 网系统满足控制规范,即意味着该 Petri 网的可达状态被限制在容许状态空间中(或者说,该 Petri 网的可达状态不会进入禁止状态空间)。对于变迁全部可控、可观的 Petri 网(以下称“完全可观可控” Petri 网)而言,只需要按照控制规范直接设计控制器,即可保证系统不进入禁止状态空间。而对于存在不可控变迁或是存在不可观变迁的 Petri 网来说,直接按照控制规范设计控制器并不能保证系统不进入禁止状态空间。这是因为,这样设计的控制器可能存在输出弧与不可控变迁或不可观变迁相连、输入弧与不可观变迁相连的现象,而因为这些变迁的不可控、不可观性,这种连接方式其实是不符合实际的、无效的控制。也就是说,系统会由容许状态经不可控或者不可观变迁的实施进入禁止状态,而这种变迁的实施无法被控制器所禁止。

近年来,许多学者研究变迁全部可观但存在不可控变迁的 Petri 网(以下称“完全可观、部分可控” Petri 网)的禁止状态控制

问题。Krogh 和 Holloway^[3] 首先提出“允许状态”(或“允许标识”)这一重要概念。允许状态指从该状态开始不论经不可控变迁如何实施,都不会到达禁止状态的状态。显然,“允许状态空间”是容许状态空间的一个子空间。图 1-1 描述了针对一个 Petri 网 N 的各个状态空间的关系。要想使系统满足控制规范,考虑到不可控变迁的存在,必须将系统状态限制在“允许状态空间”中而不再是容许状态空间。这是因为,容许状态空间的某些状态会因不可控变迁的实施到达禁止状态,而这种现象无法被外部控制器所禁止。

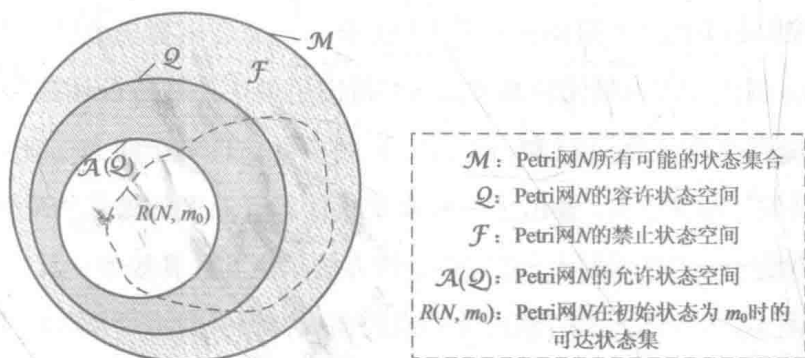


图 1-1 针对 Petri 网 N 的各个状态空间的关系图

在大多数情况下,系统的控制规范(一般指容许状态空间)可以由线性不等式约束(组)描述。如果该控制规范对应的“允许状态空间”同样可以用线性不等式约束(组)的逻辑关系描述,那么可以相应地设计“结构型”控制器或是“逻辑型”控制器。基于上述原因,大量的研究工作致力于针对“完全可观、部分可控”Petri 网,探索如何将原本描述容许状态空间的线性约束(组)转换为描述允许状态空间的线性约束(组),简称为线性约束转换方法