第 23 卷 第 5 期
Vol. 23 No. 5

控 制 与 决 策
Control and Decision

2008 年 5 月
May 2008

文章编号: 1001-0920(2008)05-0492-05

含不可控变迁的 Petri 网监控器设计

张瑶瑶, 吴 敏, 颜钢锋, 刘妹琴
(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 在基于 Petri 网建模的含不可控事件的离散事件系统监控器设计中,当给定的控制目标为 Parikh 矢量约束时,提出通过转换矩阵 R 将不可控变迁导致的非法不等式约束变换为允许约束,并求得相应监控器. 构造矩阵方程求解 R,通过矩阵方程的相容性判断 R 的存在性,并给出利用广义逆矩阵求解 R 的算法,得到对应的允许约束和监控器. 同时提出代价函数,用于寻找控制观测代价最小的监控器. 最后通过实例验证了该算法的正确性和有效性.

关键词: 离散事件系统; Petri 网; 不可控变迁; Parikh 矢量; 广义逆矩阵
中图分类号: TP301 **文献标识码**: A

Supervisor synthesis of Petri net with uncontrollable transitions

ZHANG Yao-yao, WU Min, YAN Gang-feng, LIU Mei-qin
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: ZHANG Yao-yao, E-mail: flyingyaoyao@hotmail.com)

Abstract: In supervisory synthesis of discrete event system (DES) modeled by Petri nets with uncontrollable events, when the specifications are Parikh vector constraints, a method is proposed to transform illegal constraint into admissible constraint by using transformation matrix R. Matrix equation is constructed to obtain R, and the existence of R can be predicted by the compatibility of the matrix equation in advance. Generalized inverse matrix is applied to achieve the solution of R, as well as the admissible constraint and supervisor. The principle of cost is provided to search the supervisor with minimal control and observe cost. A simulation example shows the correctness and effectiveness of the method.

Key words: DES; Petri net; Uncontrollable transition; Parikh vector; Generalized inverse matrix

1 引 言

Petri 网作为系统分析和建模的一种有力工具,在离散事件系统(DES)的研究中得到了广泛的应用,特别是对于基于 Petri 网的 DES 监控问题的研究有了很大进展. Holloway 和 Krogh[1] 提出了基于受控 Petri 网的路径代数法;Li 和 Wonham[2] 提出了向量离散事件系统方法; Yamalidou 等人[3] 提出了库所不变量方法. 另外,Li[4,5] 提出了 Parikh 矢量,使 Petri 网的监控器由标识约束发展到包含标识和 Parikh 矢量的广义混合约束.

Petri 网系统监控器综合中的不可控问题一直是研究的重点. 当被控对象中存在不可控变迁时,根据给定的不等式约束设计出的控制器有可能违背不可控变迁的性质,该约束称为非法约束. 针对标识不等式约束,Moody[6] 对非法约束进行了分析,通过矩阵行变换将非法约束转化为允许约束. Zhang[7] 通过矩阵行变换方法对 Parikh 矢量形式的非法约束进行变换. 但矩阵行变换方法存在一些不足之处:1) 必须要等到整个算法结束后,才能判断是否存在可行的行变换;2) 通过矩阵行变换只能得到部分可行解,还需通过额外的计算才能得到全部可行解.

针对这些不足,本文提出通过求解矩阵方程得到约束变换可行解的方法. 首先,根据 Petri 网的结构以及给定的约束条件构造出矩阵方程,其中变换矩阵 R 为未知量. 其次,通过判断矩阵方程的相容性,即在求解 R 之前,可判断该方程是否有解. 若有解,则根据广义逆矩阵的算法直接得到 R 的通解,其中每个变换矩阵 R 对应于不同的监控器. 最后,本文提出控制/观测代价系数的概念,从所有可行解中选择一个控制观测代价最小解.

收稿日期: 2007-01-06; **修回日期**: 2007-06-20.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60504024); 浙江省教育厅科研项目(20050905).
作者简介: 张瑶瑶(1981 —),女,江苏金坛人,博士生,从事离散系统、Petri 网控制器的研究; 颜钢锋(1959 —),男,浙江永康人,教授,博士生导师,从事离散事件系统和混杂系统的研究.

2　预备知识

2.1　Petri 网基础

Petri 网是 4 元组 $N = \langle P, T, D, \mu_0 \rangle$,其中:$P$ 是 m 个库所的集合;T 是 n 个变迁的集合,$T = T_c \cap T_{uc}$, $T_c \cap T_{uc} = \varnothing$, T_c 是可控变迁的集合,T_{uc} 是不可控变迁的集合;$D \in Z^{m\times n}$ 是 Petri 网的关联矩阵,其元素为库所与变迁连接弧的权值;μ_0 是网的初始标识.

2.2　标识约束和 Parikh 矢量约束

给定无自环 Petri 网 $N = \langle P, T, D, \mu_0 \rangle$,其标识约束和 Parikh 矢量约束问题分别如下:

1) 标识约束. Petri 网的标识 μ 满足如下的约束条件:

$$L\mu \le b. \tag{1}$$

其中:$L \in Z^{n_c\times m}$, $\mu \in Z^m$, $b \in Z^{n_c}$, n_c 是约束条件个数.

2) Parikh 矢量约束. Petri 网的 Parikh 矢量满足如下的约束条件:

$$Cv \le b. \tag{2}$$

其中:$C \in Z^{m_c\times n}$, $v \in Z^n$, $b \in Z^{m_c}$; m_c 是约束条件的个数;v 是 Parikh 矢量,v_i 是 v 的第 i 个元素,表示变迁 t_i 的实施次数.

Petri 网的标识约束问题可转化为 Parikh 矢量约束问题[5].若给定的约束问题为 Parikh 矢量约束的形式,则每个约束条件可直接得到一个控制库所,其连接矩阵为 $-C$,其初始标识为 b[4].

2.3　含不可控变迁的 Parikh 矢量约束问题

对于存在不可控变迁的 Petri 网,可将参数分为可控和不可控部分,即

$$D = [D_c \quad D_{uc}],\ C = [C_c \quad C_{uc}].$$

其中:D_c, C_c 为可控参数;D_{uc}, C_{uc} 为不可控参数. 若要保证控制器的合法性,必须满足 $C_{uc} \le 0$,因为 $C_{uc} > 0$ 意味着存在控制器到不可控变迁的输入弧,违反变迁不可控的性质. 文献[7]提出将约束条件 $Cv \le b$ 中的 C, b 修正成为 C', b',使得 $C_{uc}' \le 0$,且 $C'v \le b'$.

由于 Parikh 矢量约束不等式间的相互无关性,不失一般性,假设约束 $Cv \le b$ 仅有一个不等式,即 $C \in Z^n$. 令 $C(s)$ 表示 C 的第 s 个元素, $\|\cdot\|$ 表示集合 $\cdot$ 的势,Φ 表示空矩阵.

定义 1　$IR = \{s \mid t_s \in T_{uc}\}$, $IR^+ = \{s \mid t_s \in T_{uc}, C(s) > 0\}$, $IR^- = \{s \mid t_s \in T_{uc}, C(s) \le 0\}$.

$$C_{uc} = \begin{cases} [C(n_1) \quad C(n_2) \quad \cdots \quad C(n_i) \quad \cdots], \\ \quad n_i \in IR \text{ 且 } n_{i-1} < n_i, \\ \quad i = 1, 2, \cdots \|IR\|, \quad \|IR\| \ge 1; \\ \Phi, \quad \|IR\| = 0; \end{cases}$$

$$C_{uc(+)} = \begin{cases} [C(n_1) \quad C(n_2) \quad \cdots \quad C(n_i) \quad \cdots], \\ \quad n_i \in IR^+ \text{ 且 } n_{i-1} < n_i, \\ \quad i = 1, 2, \cdots \|IR^+\|, \quad \|IR^+\| \ge 1; \\ \Phi, \quad \|IR^+\| = 0; \end{cases}$$

$$C_{uc(-)} = \begin{cases} [C(n_1) \quad C(n_2) \quad \cdots \quad C(n_i) \quad \cdots], \\ \quad n_i \in IR^- \text{ 且 } n_{i-1} < n_i, \\ \quad i = 1, 2, \cdots \|IR^-\|, \quad \|IR^-\| \ge 1; \\ \Phi, \quad \|IR^-\| = 0. \end{cases}$$

引理 1[8]　令 $R \in Z^{m_c\times m}$,如果 $C'v \le b'$,则 $Cv \le b$ 成立. 其中:$C' = RD_p + C$; $b' = b - R\mu_0$ 且 $R \ge 0$, $b' \ge 0$.

证明　将 $C' = RD_p + C$, $b' = b - R\mu_0$,代入 $C'v \le b'$,得 $(RD_p + C)v \le b - R\mu_0$ 即 $R(D_pv + \mu_0) + Cv \le b$. 因为 $\mu = \mu_0 + D_pv \ge 0$,得 $R(D_pv + \mu_0) \ge 0$,所以 $Cv \le b$. □

对于 Petri 网约束条件 $Cv \le b$,若不满足 $C_{uc} \le 0$,则给出矩阵 $M = \begin{bmatrix} D_{uc} & \mu_0 & I \\ C_{uc} & -b & 0 \end{bmatrix}$,通过参数 R 修正得到

$$M' = \begin{bmatrix} D_{uc} & \mu_0 & I \\ RD_{uc} + C_{uc} & R\mu_0 - b & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{uc} & \mu_0 & I \\ C_{uc}' & -b' & R \end{bmatrix},$$

即 R 的选取必须保证 $C_{uc}' \le 0$, $b' \ge 0$.

3　基于广义逆矩阵的不等式约束变换

$C_{uc(+)} > 0$ 意味着在 Petri 网的控制器中存在着从控制库所到不可控变迁的弧,这就违反了不可控变迁的性质. 为实现控制目标,必须通过线性变换将 $C_{uc(+)} > 0$ 转变成 $C_{uc(+)}' \le 0$. $C_{uc(+)}' < 0$ 意味着控制器中库所到不可控变迁的弧转变成从不可控变迁到库所的弧,理论上是可行的. 但 Moody 等人[6]指出,从实际意义角度而言,无法理解将变迁控制的事件转换为从变迁接受数据的事件,不符合实际意义. 因此,从实际角度出发,本文研究如何将约束变迁中的 $C_{uc(+)} > 0$ 转换成 $C_{uc(+)}' = 0$,即切断控制器库所与不可控变迁之间的关系,并保持 $C_{uc(-)}' \le 0$. 为此,提出使用广义逆矩阵的方法寻找满足约束条件的修正参数 R 来实现这一转换.

要满足 $C_{uc(+)}' = 0$,即需求解

$$C_{uc(+)}' = RD_{uc(+)} + C_{uc(+)} = 0.$$

广义逆矩阵中{1}-逆形式可用于矩阵不等式的求解. 以下证明中,以 $X\{1\}$ 表示 X 的{1}-逆的全体, X^- 表示任意一个 X 的{1}-逆.

引理 2[8] $HA^- A = H$ 成立,当且仅当 $\mathrm{span}(H^{\mathrm{T}}) \subset \mathrm{span}(A^{\mathrm{T}})$,其中 $\mathrm{span}(A)$ 为矩阵 A 的列空间向量张成的子空间.

证明 必要性:$HA^- A = H$ 两边取转置为 $A^{\mathrm{T}}(A^{\mathrm{T}})^- H^{\mathrm{T}} = H^{\mathrm{T}}$,则 $\mathrm{span}(H^{\mathrm{T}}) \subset \mathrm{span}(A^{\mathrm{T}})$ 是显然的;充分性:若 $\mathrm{span}(H^{\mathrm{T}}) \subset \mathrm{span}(A^{\mathrm{T}})$,则存在矩阵 X^{T},使得 $H^{\mathrm{T}} = A^{\mathrm{T}} X^{\mathrm{T}}$,于是

$$HA^- A = ((HA^- A)^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = (A^{\mathrm{T}}(A^{\mathrm{T}})^- H^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = (A^{\mathrm{T}}(A^{\mathrm{T}})^- A^{\mathrm{T}} X^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = (A^{\mathrm{T}} X^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = (H^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = H.$$

□

引理3[8] 设 $A \in Z^{m\times n}$, $H \in Z^{m\times q}$,则矩阵方程 $XA = H$ 相容,当且仅当存在 A^- 使得 $HA^- A = H$. 当矩阵方程组相容时,其特解可表示为 $X = HA^-$,其中 A^- 为 A 的任意$\{1\}$-逆.

证明过程参见文献[8].

定理 1 设 $A \in Z^{m\times n}$,秩为 r,如果存在非奇异矩阵 P,Q 使得 $PAQ = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, I_r 为 $r\times r$ 的单位矩阵,则 $A^- \in A\{1\}$ 可表示为 $A^- = Q\begin{bmatrix} I_r & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} P$,其中:$B_{12}, B_{21}, B_{22}$ 分别为 $r\times(m-r)$, $(n-r)\times r$, $(n-r)\times(m-r)$ 的任意矩阵.

证明 设 X 为任意一个 A^-,由于存在非奇异阵 P,Q 使 $A = P^{-1}\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q^{-1}$,则由 $AXA = A$ 可得

$$P^{-1}\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q^{-1} X P^{-1}\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q^{-1} = P^{-1}\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q^{-1},$$

于是

$$\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q^- X P^- \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

若记 $Q^{-1} X P^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$,代入上式,可得 $B_{11} = I_r$. 因此

$$Q^{-1} X P^{-1} = \begin{bmatrix} I_r & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}, \quad X = Q\begin{bmatrix} I_r & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} P.$$

□

定理 2 对于存在不可控变迁的 Petri 网, D_p 为其关联矩阵,约束条件为 $Cv \le b$,若满足 $\mathrm{span}(-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}) \subset \mathrm{span}(D^{\mathrm{T}}_{uc(+)})$,则存在解 $R = -C_{uc(+)} D^-_{uc(+)}$,满足方程 $C'_{uc(+)} = RD_{uc(+)} + C_{uc(+)} = 0$.

证明 由引理 2 可得,若 $\mathrm{span}(-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}) \subset \mathrm{span}(D^{\mathrm{T}}_{uc(+)})$,则满足

$$D^{\mathrm{T}}_{uc(+)}(D^{\mathrm{T}}_{uc(+)})^-(-C_{uc(+)}) = (-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}),$$

即 $(-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}) D_{uc(+)} D^-_{uc(+)} = -C_{uc(+)}$.

由引理 3 可知,若

$$(-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}) D_{uc(+)} D^-_{uc(+)} = -C_{uc(+)},$$

则存在解 $R = -C_{uc(+)} D^-_{uc(+)}$,满足

$$RD_{uc(+)} + C_{uc(+)} = 0.$$

□

注 1[3] 约束矩阵 C'中的零元素表明控制库所与系统变迁之间无连接,即控制器结构不会出现自环.

4 含不可控变迁的 Petri 网监控器设计

文献[6,7]中的算法均需在求解运算完毕,得出解是否存在后,才能判断是否存在符合要求的控制器. 利用本文提出的广义逆矩阵运算方法,只需在求解初期检验矩阵方程是否满足相容条件,就能判断是否存在符合要求的控制器,因此更为简洁方便. 下面给出利用广义逆矩阵求解约束线性变换的算法:

输入:关联矩阵 D_p,约束矩阵 C;

输出:线性变换后的约束阵 C'

BEGIN

初始化并判断相容性条件:

若不满足 $\mathrm{span}(-C^{\mathrm{T}}_{uc(+)}) \subset \mathrm{span}(D^{\mathrm{T}}_{uc(+)})$,则不存在满足条件的变换矩阵,EXIT;

否则进行如下变换:

$i = 1$; $j = 1$;

REPEAT

IF $(D_{uc(+)}(i,j) == 0)$ AND $(\exists p > i, D_{uc(+)}(p,j) \ne 0)$

THEN

$D_{uc(+)}(i,:) \Leftrightarrow D_{uc(+)}(p,:)$;

$D_{uc(+)}(i,:) = D_{uc(+)}(i,:) / D_{uc(+)}(i,j)$;

FOR $x = i+1$ TO m DO

$D_{uc(+)}(x,:) = D_{uc(+)}(x,:) - D_{uc(+)}(x,j) D_{uc(+)}(i,:)$;

FOR $y = j+1$ TO r DO

$D_{uc(+)}(:,y) = D_{uc(+)}(:,y) - D_{uc(+)}(i,y) D_{uc(+)}(:,j)$;

$i = i+1$; $j = j+1$;

UNTIL $(i == m)$ OR $(j == r)$

$P = D_{uc(+)}(m+1 : m+r, 1 : r)$;

$Q = D_{uc(+)}(1 : m, r+1 : r+m)$;

$B = D_{uc(+)}(1 : m, 1 : r)^{\mathrm{T}}$;

引入矩阵:$\alpha = [\alpha_{ij}] \in Z^{a\times b}$,

其中 α_{ij} 表示 α 的第(i,j)个元素;

$\alpha_{ij} = 0$, 如果 $\forall i,j : i \le b_1 \cap j \le b_2$,

其中 $[b_1, b_2] = \text{size}(B)$;

$D^-_{uc(+)} = P \times [B + \alpha] \times Q$;

$R = -C_{uc(+)} \times D^-_{uc(+)}$, $C' = RD_p + C$.

END

令 $\beta(\alpha_{ij})$ 为一组可行解,则 $\Omega = \{\beta(\alpha_{ij})\}$ 为上述算法得到的全部可行解的集合.

Ω中的任意元素均满足 Parikh 矢量约束问题的容许控制策略,但在实际的物理系统中,对变迁的控制和观测并不是无条件的. 例如在炼油中,对温度的观测可通过温度传感器实现,但对油的纯净度需用昂贵的观测设备;同样,不同的控制设备也会有不同的代价. 因此本文引入了控制和观测的代价函数[9],分别反映控制变迁(控制库所到变迁)和观测变迁(变迁到控制库所)的代价. 令控制代价为 $Z_c \in \mathbb{Z}^n$,观测代价为 $Z_o \in \mathbb{Z}^n$. 对于不可控变迁 t_s,其控制代价为 $M_c \gg 1$.

为使控制观测代价最小,得到如下的整数规划问题:

$$\min_{\beta\in\Omega} \Delta = C'Z,$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} b - R\mu_0 \geq 0, \\ R \geq 0, \\ C_{uc(-)} \leq 0. \end{cases}$$

其中

$$Z(i) = \begin{cases} Z_c(i), & C'(i) \geq 0; \\ -Z_o(i), & C'(i) < 0. \end{cases} \tag{3}$$

这里: $C'(i)$ 为 C 的第 i 个元素; b 由控制指标给定; R, C 和 $C'_{uc(-)}$ 可由算法得到. 令 β^*为在最小的控制观测代价下的最优容许控制策略,则相应的最小代价为 $\Delta_{\min}$.

5 实　例

零件从输入缓存进入机器,加工完成后,放入临时缓存,成品通过自动导航小车 AGV1 从临时缓存放入输出缓存. 机器有可能会出现故障并损坏零件,损坏的零件先放入临时缓存,并等待通过自动导航小车 AGV2 放入废弃零件缓存中. 如图 1 所示,虚线部分为添加的控制器.

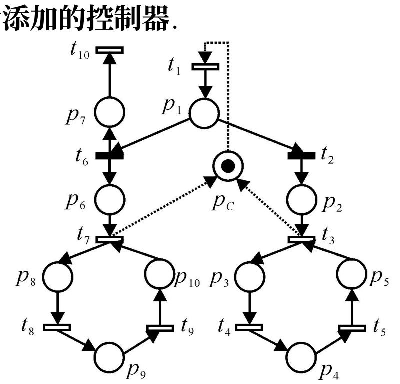

图 1　机器加工的 Petri 网模型

该模型存在两个不可控变迁 t_2 和 t_6. 其中: t_2 表示零件正在处理,不能人为打断该处理过程; t_6 表示机器出现故障.

表 1 给出了库所与变迁的描述.

表 1　库所与变迁描述

库　所		变　迁	
p_1	机器工作	t_1	零件进入机器
p_2	临时缓存	t_2	正处理零件(不可控)
p_3	AGV1 工作	t_3	AGV1 取零件
p_4	AGV1 停止	t_4	AGV1 放零件
p_5	AGV1 准备就绪	t_5	AGV1 启动
p_6	临时缓存	t_6	机器故障(不可控)
p_7	机器损坏,等待修理	t_7	AGV2 取零件
p_8	AGV2 工作	t_8	AGV2 放零件
p_9	AGV2 停止	t_9	AGV2 启动
p_{10}	AGV2 准备就绪	t_{10}	修理机器

假设机器加工完后的临时缓存为单位容量,即 $\mu_2 + \mu_6 \leq 1$,可将其转换为 Parikh 矢量形式的约束条件,得到控制指标

$$v_2 - v_3 + v_6 - v_7 \leq 1. \tag{4}$$

直接设计控制器

$$C = [0\ \ 1\ \ -1\ \ 0\ \ 0\ \ 1\ \ -1\ \ 0\ \ 0\ \ 0],$$

由于 $C(2) = 1$, $C(6) = 1$,即存在控制器到变迁 t_2, t_6 的弧,违背了不可控变迁的性质,必须通过矩阵变换,使得 $C'(2) = 0$, $C'(6) = 0$.

关联矩阵

$$D_p = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{uc} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

根据定理 2,可通过求解方程 $RD_{uc(+)} + C_{uc(+)} = 0$ 得到变换参数 R. 其中: $C_{uc} = [1\ \ 1]$, $C_{uc(+)} = [1\ \ 1]$, $IR^+ = \{2, 6\}$, $\| IR^+ \| = 2$, $C_{uc(-)} = \Phi$, $IR^- = \phi$, $\| IR^- \| = 0$.

首先,判断方程 $RD_{uc} = -C_{uc(+)}$ 的相容性

$$D^{\mathrm{T}}_{uc(+)} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$-C_{uc(+)}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}-1\\-1\end{bmatrix}.$$

显然, $\mathrm{span}(-C_{uc(+)}^{\mathrm{T}})\subset \mathrm{span}(D_{uc(+)}^{\mathrm{T}})$, **因此方程** $RD_{uc(+)}=-C_{uc(+)}$ **存在解. 由算法可得**

$$Q=\begin{bmatrix}-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\-1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\1&1&0&0&0&1&0&0&0&0\\1&1&0&0&0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&0&1\end{bmatrix},$$

$$B=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix},$$

$$P=\begin{bmatrix}1&-1\\0&1\end{bmatrix}.$$

引入参数变量 $\alpha_{11}\ \alpha_{12}\ \cdots\ \alpha_{19}$ **和** $\alpha_{21}\ \alpha_{22}\ \cdots\ \alpha_{29}$, **令**

$$\alpha=\begin{bmatrix}0&0&\alpha_{11}&\alpha_{12}\cdots&\alpha_{19}\\0&0&\alpha_{21}&\alpha_{22}\cdots&\alpha_{29}\end{bmatrix},\ \alpha_i\in Z.$$

代入 $D_{uc(+)}^{-}=P\times(B+\alpha)\times Q$, **得**

$$R=-C_{uc(+)}D_{uc(+)}^{-}=$$
$$[\alpha_{14}-\alpha_{15}+1\quad -\alpha_{14}-\alpha_{15}\quad -\alpha_{11}\quad\cdots\quad -\alpha_{18}],$$

$$C'=RD_p+C=\begin{bmatrix}-\alpha_{14}-\alpha_{15}+1\\0\\\alpha_{14}+\alpha_{15}-\alpha_{11}+\alpha_{13}-1\\\alpha_{11}-\alpha_{12}\\\cdots\\\alpha_{15}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

任何一组满足约束 $b-R\mu_0\geq 0$, $R\geq 0$, $C_{uc(-)}\leq 0$ **的可行解均为给出的控制指标**(4) **的容许控制.**

给出每个变迁的控制代价和观测代价分别为

$$Z_c=[4\quad M\quad 6\quad 4\quad 5\quad M\quad 6\quad 4\quad 6\quad 2]^{\mathrm{T}},$$
$$Z_o=[3\quad 4\quad 7\quad 3\quad 2\quad 9\quad 8\quad 2\quad 3\quad 3]^{\mathrm{T}},$$

其中 $M\gg 1$. **由式**(3) **可得**

$$\min_{\beta\in\Omega}\Delta=C'Z,$$
$$\mathrm{s.t.}\begin{cases}b-R\mu_0\geq 0,\\R\geq 0,\\C'_{uc(-)}\leq 0.\end{cases}$$

其中

$$Z(i)=\begin{cases}Z_c(i),\ C'(i)\geq 0;\\-Z_o(i),\ C'(i)<0.\end{cases}$$

利用 lingo **工具包求解整数规划问题, 得到的最后结果为当** $\alpha_{11}=\alpha_{12}=\cdots=\alpha_{18}=\alpha_{19}=0$ **时**,

$$\Delta_{\min}=19,$$
$$R=[1\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0],$$
$$C'=\beta^{*}=[1\quad 0\quad -1\quad 0\quad 0\quad 0\quad -1\quad 0\quad 0\quad 0],$$

控制库所初始值为 $b'=b-R\mu_0=1$, **最终控制器结构如图 1 中虚线所示.**

6　结　　论

对于含有不可控变迁的 Parikh **矢量不等式约束问题, 本文提出构造矩阵方程的方法来设计其监控器, 利用矩阵相容性条件判断是否能将非法约束转化为允许约束, 并通过算法直接得到监控器的所有可行解. 在这些可行解对应的一组监控器中, 希望找到一个最优监控器, 但最优的标准并不是确定的. 如文献**[10,11]**将可达集作为判断指标, 而本文中的最优监控器意味着最小代价监控器, 以控制观测代价作为选择标准. 针对不同的应用场合, 提出不同的最优标准进行监控器的选择将是未来的研究方向.**

参考文献(References)

[1] Holloway L E, Krogh B H. Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1990, 35(5): 514-523.

[2] Li Y, Wonham W. Control of vector discrete-event systems Ⅱ—Controller synthesis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(3): 512-530.

[3] Yamalidou K, Moody J O, Lemmon M D, et al. Feedback control of Petri nets cased on Place lnvariants[J]. Automatica, 1996, 32(1): 15-18.

[4] Iordache U V, Antsaklis P J. Synthesis of supervisors enforcing general linear constraints in Petri nets[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(11): 2036-2039.

[5] Wang S G, Yan G F. A novel method of design of Petri net controller enforcing general linear constraints[J]. J of software, 2005, 16(3): 960-967.

[6] Moody J O, Antsaklis P J. Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 462-472.

[7] Zhang Y Y, Yan G F. Synthesis of Petri net supervisors enforcing general constraints[J]. J of Zhejiang University, 2006, 7(4): 623-628.

[8] 王桂松, 杨振海. 广义逆矩阵及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006.
(Wang Gui-song, Yang Zhen-hai. Generalized inverse matrix and the application[M]. Beijing: Press of Beijing University of Technology, 2006.)

(下转第 502 页)

心内容之一,由于属性约简中条件属性繁多、相容性及不唯一性,使得找出一个决策表的最小约简是NP难题.本文从免疫优化的角度出发,根据RS理论中核属性相对稳定的参数信息作为免疫疫苗优化抗体编码,并由条件属性和决策属性的近似分类质量给出了免疫适应度优化目标,提出了一种在优化初始群体基础上压缩属性的免疫克隆竞争选择算法.通过引入聚类竞争机制,加速了抗体亲和力的成熟,提高了全局搜索能力,同时也提高了抗体群的多样性.在加强局部及全局搜索能力的同时,保持了该算法快速收敛特性.仿真实验分析表明,该方法能有效地对多维条件规则集进行约简,在获得最简约简的同时保持了较好的约简完备性.但本文未能对约简前后的数据分析及挖掘质量展开进一步实验比较和性能评价,这是后续研究工作中的一项重要内容.

参考文献(References)

[1] Wong S K M, Ziarko W. On optimal decision rules in decision tables [J]. Bulletin of Polish Academy of Sciences, 1985, 32(11/12): 693-696.

[2] Kryszkiewicz M. Rough set approach to incomplete information systems [J]. Information Sciences, 1998, 112(1): 39-49.

[3] Tsang G C Y, Chen De-gang, Tsang E C C, et al. On attributes reduction with fuzzy rough sets[C]. IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Pasadena, 2005: 775-780.

[4] 王亚英, 张春慨, 邵惠鹤. 启发式知识约简算法的研究与应用[J]. 控制与决策, 2001, 16(6): 886-889.
(Wang Ya-ying, Zhang Chun-kai, Shao Hui-he. Research and application of heuristic algorithm for reduction of knowledge[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 886-889.)

[5] 苗夺谦, 王珏. 粗糙集理论中概念与运算的信息表示[J]. 软件学报, 1999, 10(2): 113-116.
(Miao Duo-qian, Wang Jue. An information representation of the concepts and operations in rough Set theory[J]. J of Software, 1999, 10(2): 113-116.)

[6] Dai Jian-hua, Li Yuan-xiang. Heuristic genetic algorithm for minimal reduction decision system based on rough set theory[C]. Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Beijing, 2002: 4-5.

[7] 梁霖, 徐光华. 基于克隆选择的粗糙集属性约简方法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(11): 1231-1235.
(Liang Lin, Xu Guang-hua. Reduction of rough set attribute based on immune clone selection[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(11): 1231-1235.)

[8] Pawlak Z. Rough sets [J]. Int J of Computer Information Science, 1982, 11(5): 341-356.

[9] Burnet F M. The clonal selection theory of accquired immunity [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1959.

[10] De Castro L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems, 2002, 6(3): 239-251.

[11] 焦李成, 杜海峰, 刘芳, 等. 免疫优化计算学习与识别[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
(Jiao Li-cheng, Du Hai-feng, Liu Fang, et al. Immunological computation for optimization, Learning and Recognition [M]. Beijing: Science Publisher, 2006.)

[12] 李订芳, 章文, 李贵斌, 等. 基于可行域的遗传约简算法[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(2): 312-314.
(Li Ding-fang, Zhang Wen, Li Gui-bin, et al. Genetic reduction algorithm based on feasible region[J]. Mini-Micro Systems, 2006, 27(2): 312-314.)

[13] 张国云, 章兢, 向文江. 滚动轴承技术故障诊断的支持向量机方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 16(4): 227-229.
(Zhang Guo-yun, Zhang Jing, Xiang Wen-jiang. A novel SVM approach to the technique state diagnosis of the trundle bearing [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 16(4): 227-229.)

(上接第496页)

[9] Basile F, Chiacchio P, Giua A. Petri net monitor design with control and observation costs[C]. Proc IEEE the 39th Int Conf on Decision and Control. Sidney, 2000: 424-429.

[10] Basile F, Chiacchio P, Giua A. On the choice of suboptimal monitors for supervisory control of Petri nets[C]. Proc of the 1998 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. San Diego, 1998: 752-757.

[11] Basile F, Chiacchio P, Giua A. Suboptimal supervisory control of Petri nets in presence of uncontrollable transitions via monitor places[J]. Automatica, 2006, 42(6): 995-1004.