

混杂系统优化控制的动态规划方法研究*

尹增山 高春华 李 平

(浙江大学工业控制技术研究所, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室·杭州, 310027)

摘要: 研究了末态自由、时间一定的混杂系统的最优控制问题, 提出了基于可达网络的混杂系统优化控制的动态规划方法, 这种方法能够给出问题的全局最优解, 并有效地降低系统的计算量。

关键词: 混杂系统; 最优控制; 动态规划

文献标识码: A

Optimal Control for Hybrid Systems Based on Dynamical Programming

YIN Zengshan, GAO Chunhua and LI Ping

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University · Hangzhou, 310027, P. R. China)

Abstract: The optimization of hybrid systems with unknown final state and certain running time is studied. Dynamic programming based on reachable net is proposed. This method can reduce the computing effectively and obtain the global optimal solution.

Key words: hybrid systems; optimal control; dynamic programming

1 引言(Introduction)

随着计算机科学的发展, 既包含连续动态, 又包含离散动态的混杂系统大量出现, 如飞行控制、柔性生产制造和机器人系统等。近几年, 混杂系统的研究得到了广泛的重视, 取得了大量成果^[1-3]。

文[4~6]对混杂系统的优化控制问题进行了一定研究, 其中, Branicky 针对一般混杂系统, 提出了基于广义多变量不等式 (generalized quasi-variational inequalities, 简称 GQVI) 方法, 求解 GQVI 的单一粘滞解是困难的^[4]。文[5]则首先把混杂系统进行逻辑、受限动态变换, 使之转化为混合逻辑动态系统 (mixed logical dynamical, 简称 MLD), 然后用混合整数平方规划 (mixed integer quadratic programming, 简称 MIQP) 方法进行优化求解。但是, 混合整数平方规划求解的难度是 NP-Hard 的 (Raman and Grossmann, 1991)。Jin Lu^[6]采用受限的微分动态规划方法求解不考虑切换代价的切换系统, 能给出系统的局部最优解。本文针对一般混杂系统的最优控制问题, 提出了基于可达网络的动态规划方法, 这种方法能给出问题的全局最优解, 并有效降低计算量。

2 混杂系统模型 (Hybrid system model)

考虑以下受控混杂动态系统, 用分段微分方程

表示:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ f(x(k), m(k), u(k), k) &= \\ \begin{cases} f_1(x(k), u(k), k), & \text{if } m(k) = 1, \\ \vdots \\ f_p(x(k), u(k), k), & \text{if } m(k) = p, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y(k) &= \\ g(x(k), m(k), u(k), k) &= \\ \begin{cases} g_1(x(k), u(k), k), & \text{if } m(k) = 1, \\ \vdots \\ g_p(x(k), u(k), k), & \text{if } m(k) = p. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 为状态矢量, $x(0)$ 为初始状态; $y(k) \in \mathbb{R}^r$ 为输出矢量; $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 为控制矢量; $m(k) \in \{1, 2, \dots, p\}$ 为有限整数变量; $f_i: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n$; $g_i: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^r$ 。模型(1)、模型(2)是比较普通的混杂系统模型, 大部分混杂系统都可以用这个模型表示^[6]。

上述模型表明, 混杂系统是由一组依赖于离散变量 $m(k)$ 的微分方程决定的, 称 $m(k)$ 为模态。 $m(k)$ 依赖于前一个模态 $m(k-1)$ 和现在状态 $x(k)$ 。

定义模态变迁条件集:

* 基金项目: 国家自然科学基金(69804009)资助项目。

收稿日期: 2000-04-17; 收修改稿日期: 2000-10-20。

$$S_{ij} = \{x: v_{ij}(x) \geq 0, w_{ij}(x) > 0\}.$$

其中: $\{i, j\} \in \{1, 2, \dots, p\}$, $S_{ij} \in \mathbb{R}^n$, $v_{ij}(x)$, $w_{ij}(x)$ 是状态 x 的矢量函数. 则

$$\begin{cases} \text{if } m(k-1) = i \text{ and } x(k) \in S_{ij}, \\ m(k) = h(m(k-1), x(k), k). \end{cases} \quad (3)$$

模态变迁关系可用自动机模型表示^[1].

例 1 如图 1 所示, 考虑系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(m(k))x(k) + B(m(k))u(k), \\ y(k) = x(k). \end{cases} \quad (4)$$

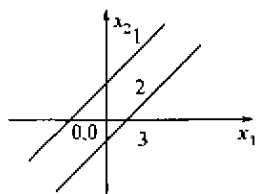


图 1 状态切换示意图
Fig 1 Switching of states

其中:

$$x(k) \in \mathbb{R}^2, x(0) = [-1, 4]^T, m(0) = 1, \\ -1 \leq u(k) \leq 1, y(k) \in \mathbb{R}^2, m(k) \in \{1, 2, 3\},$$

$$A(m(k)) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 1, \\ \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0.4 & 0.4 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 2, \\ \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.5 & 0.4 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 3, \end{cases} \quad (5)$$

$$B(m(k)) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.2 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 1, \\ \begin{bmatrix} 0.7 \\ -0.6 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 2, \\ \begin{bmatrix} 0.9 \\ -0.2 \end{bmatrix}, & \text{if } m(k) = 3, \end{cases} \quad (6)$$

$$m(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_1(k) < x_2(k) - 2, \\ 2, & \text{if } x_1(k) > x_2(k) - 2 \cap x_1(k) < x_2(k) + 2, \\ 3, & \text{if } x_1(k) > x_2(k) + 2, \\ m(k-1), & \text{if } x_1(k) = x_2(k) - 2 \cup x_1(k) = x_2(k) + 2, \end{cases} \quad (7)$$

则:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \{x: x_1 \leq x_2 - 2\}, S_{21} = \{x: x_1 < x_2 - 2\}, \\ S_{22} &= \{x: x_1 \geq x_2 - 2 \cap x_1 \leq x_2 + 2\}, \\ S_{23} &= \{x: x_1 > x_2 + 2\}, S_{33} = \{x: x_1 \geq x_2 + 2\}, \\ S_{12} &= S_{32} = \{x: x_1 > x_2 - 2 \cap x_1 < x_2 + 2\}. \end{aligned}$$

3 混杂系统优化控制 (Optimal control of hybrid systems)

对于式(1)、式(2)所示混杂系统, 其优化控制可以表述为:

问题 1 寻找控制策略 $\{u(k), k = 0, \dots, N-1\}$ 使得如下的性能指标得到满足:

$$J = \min_{u(k), k=0, \dots, N-1} H_N(x(N), m(N), N) + \sum_{k=0}^{N-1} H_k(x(k), m(k), u(k), k) + \sum_i M(x_i, x_j). \quad (8)$$

满足条件:

$$x(0) = x_0, m(0) = m_0, \quad (9)$$

$$x(k+1) = f(x(k), m(k), u(k), k), \quad (10)$$

$$m(k) = h(m(k-1), x(k), k), \quad (11)$$

$$s(x(k), m(k), u(k), k) \geq 0, \quad (12)$$

$$z(x(k), m(k), u(k), k) = 0. \quad (13)$$

其中: $H_N(x(N), m(N), N)$ 为末态代价函数; $H_k(x(k), m(k), u(k), k)$ 为系统演化中状态与控制变量的代价函数; $M(x_i, x_j)$ 为模态切换代价函数; 式(12)、式(13)为关于系统状态与控制的限制, 如饱和限制等.

4 动态规划方法 (Dynamical programming)

4.1 一般混杂系统优化控制动态规划方法及计算量分析 (Dynamical programming for general hybrid systems and computing analysis)

1) 一般混杂系统优化控制动态规划方法.

动态规划方法是 R. Bellman 提出的主要用于求解多级决策问题的方法, 并成功地应用于网络最优路径查找、线性时不变离散系统的优化等问题. 对于问题 1, 我们应用动态规划方法如下:

定义 1(路径) 从一系统状态到达另一系统状态, 所经历的模态序列为一条路径.

如图 1 中从初态 $x(0) = (0, 2.4)$ 到达状态 $x(5) = (2.1, 0)$, 经历模态顺序 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 2 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 为一条路径.

下面首先给出一条固定路径的动态规划方法:

算法 1

I) 循环. 从 $l = N-1$ 到 0.

分别应用模态 $m(l)$ 对应微分方程(10)式求解:

$$J = \min_{u(k), k=0, \dots, N-1} H_N(x(N), m(N), N) + \sum_{k=0}^{N-1} H_k(x(k), m(k), u(k), k) + \sum_i M(x_i, x_j)$$

满足于条件(9)、条件(11)~条件(13).

II) 验证. 把求出的控制 $\{u(k), k = 0, \dots, N-1\}$ 代入式(10), 依次求出每一步模态、状态, 验证是否与给定路径相同及满足限制条件.

III) 找出系统所有路径, 对于每条路径采用上述方法求解, 然后求出所有路径的最小值, 其对应的控制 $\{u(k), k = 0, \dots, N-1\}$ 即为系统所求.

2) 一般混杂系统优化控制动态规划方法计算量分析.

对于有 M 个离散状态的控制系统, 取式(8)中循环步数为 N , 则路径总数为 M^{N-1} , 计算复杂度(不考虑连续部分计算量)为: $N \times M^{N-1}$.

实际上, 在很多情况下, 由于连续和离散条件的约束, 有很多路径是不存在的. 如关于例 1 的优化控制问题, 令 $N = 6$, 则路径有且只可能有两类: $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 2$; $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1$. 则不是 $3^5 = 243$ 条路径. 为此, 我们提出系统的路径优化方法.

4.2 混杂系统优化控制路径优化 (Path optimization)

定义 2 (T 时间可达性, T 时间不可达性) 对于给定的 x_1^i, x_2^j (x_1^i, x_2^j 可为状态点、状态区域、模态等), 如果能够找到一满足约束的控制策略, 使系统在此控制策略下, 在最多不超过时间 T 内, 从 x_1^i 到达 x_2^j , 则称 x_2^j 关于 x_1^i 是 T 时间可达的, 否则称 x_2^j 关于 x_1^i 是 T 时间不可达的.

定义 3 (K 步可达性, K 步不可达性) 给定 x_1^i, x_2^j (x_1^i, x_2^j 可为状态点、状态区域、模态等), 如果能够找到一满足约束的控制策略, 使系统(1)、系统(2)在此控制策略下, 在最多不超过 K 步内, 从 x_1^i 到达 x_2^j , 则称 x_2^j 关于 x_1^i 为 K 步可达的, 否则称 x_2^j 关于 x_1^i 为 K 步不可达的.

根据 K 步可达性, 可以去掉所有不可能路径, 简化路径数量. 如假设例 1 中已求出从 $x(0)$ 到达模态 2 是 5 步可达, 而 4 步不可达; 从 $x(0)$ 到达模态 3 是 8 步可达, 而 7 步不可达. 如令式(8)中 $N = 7$, 则可以判断, 第 7 步时系统只能处于模态 1 或模态 2 (如处于模态 3, 则系统经过 7 步从 $x(0)$ 到达模态 3, 这与 $x(0)$ 是模态 3 的 7 步不可达相矛盾). 同理, 开始 5 步模态只能为 1, 这样就只可能存在 3 条路径 $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1$, $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 1$. 由此可见: 根据 K 步可达性, 可以大大减少计算量.

定义 4 (N 步可达网络) 如图 2 所示, N 步可达网络是由从 $x(0)$ 出发, K (K 为不大于 N 的任意正整数) 步可达的所有模态组成的有向网络. 网络节

点为模态, 节点 i 内数字 $K(i)$ 表示从初态 $x(0)$ 到模态 i 的可达步数. 模态 i 与模态 j 间有向连线表示 i 到 j 是不需要经过其它模态直接可达的, 连线上数值 $K_i(j)$ 表示系统从初态 $x(0)$ 出发, 经过模态 i 到达模态 j 的可达步数.

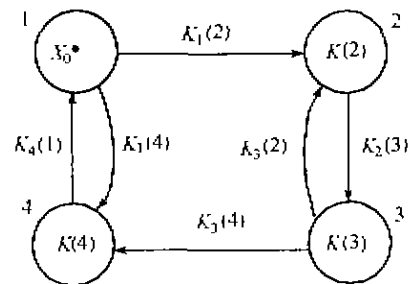


图 2 N 步可达网络

Fig. 2 N steps reachable net

定义 5 (相邻模态) 在 N 步可达网络中, 如果模态 i 到模态 j 是不需要经过其它模态直接可达的, 则称模态 j 为模态 i 的相邻模态.

问题 2 N 步可达网络的求解.

一般混杂控制系统的可达性求解是 NP-Hard 的^[6], 据此可以证明, 对于一般混杂系统的 N 步可达网络求解也是 NP-Hard 的. 为了减少计算量, 我们给出以下一种求解方法, 这种方法是非 NP-Hard 的, 称这种方法求出的 N 步可达网络为强 N 步可达网络.

算法 2 混杂控制系统 N 步可达网络求解算法:

- 1) 列出所有模态, 并根据模态转移关系进行连线;
- 2) 求解系统初态 $x(0)$ 到其相邻模态的可达步数.

这是连续系统 K 步可达性问题. 有两种方法求解:

I) 对初态 $x(0)$, 计算式(10)1 步, 如果系统在一容许控制下达到下一模态, 则 $x(0)$ 到其相邻模态具有 1 步可达性, 否则对式(10)再进行一步运算, 直到找到一容许控制使系统进入下一模态. 从而可求出 $x(0)$ 到其相邻模态的可达步数.

II) 考虑式(1)对应的连续化系统, 问题转化为 T 时间可达性问题, 即求解在边界约束条件下, 系统状态 x 从 $x(0)$ 运动到其相邻模态的最小时间 T . 这是边界受约束的连续系统极值求解问题, 根据极大值原理容易求解. 所以可达步数 K 可以求解: $K = \lceil T/T_0 \rceil + 1$ ($\lceil T/T_0 \rceil$: 小于 T/T_0 的最大整数, T_0 : 连续系统离散化所取步长).

- 3) 求解系统运动从模态 r 进入其相邻模态 i ($i = 1, \dots, m$) 到离开模态 i 并进入 i 相邻模态 j 的 K 步

可达性,记为 $K_{i,r}$. 分两种情况:

I) 模态变迁只在边界发生,这是初端和末端已知的 K 步可达性问题,根据步骤(2)中两种方法可求.

II) 模态变迁在第一次进入下一模态的任意位置发生,如例1.这时首先要求出从模态 r 进入模态 i 的最大区域,然后求解从这一区域到达模态 j 的 K 步可达性.(从模态 r 进入模态 i 的最大区域为模态 r 与模态 i 边界在模态 r 对应微分方程经过一步演化进入区域),同步骤2)方法, $K_{i,r}$ 可求.

4) 求解系统初态 $x(0)$ 到系统所有模态的 K 步可达性,这是网络最短路径问题,可以用动态规划方法求解.

5) 去掉所有关于初态 $x(0)$ 的 N 步不可达的模态.

4.3 混杂系统优化控制动态规划方法计算量的进一步减少(Reducing more computing)

对于末态一定的系统,如果从初态到此末态的路径有多条,则可以简化计算.假设系统从末态逆推 $l(1 \leq l \leq N-1)$ 步,第 $l-1$ 步有多条路径可以选择,则标注 l ,即记录下步数 l 、模态 $m(l)$ 、控制 $u_{N-1}, \dots, u_l$ 和此时计算出最优值 J (用于下一次计算,不再需要计算已计算的部分),并选择任一路径继续计算,依次标注出所有路径有分岔时步数,直到计算完 N 步,到达初态 $x(0)$.完成一条路径计算.下一次计算则不必重新从末态开始.只需要依次找到最后一个标注,利用记录步数 l 、模态 $m(l)$ 、控制 $u_{N-1}, \dots, u_l$ 和此时计算出最优值 J 继续进行运算,在计算过程中有路径分岔,则继续标注.如一标注分岔路径都已计算完毕,则取消这个标注,直到所有标注都计算完毕,则从此末态到达初态的所有路径都已经计算完毕.可以看出,这样计算量比每条路径都从末态重新开始要大大减少,并且在 N 步计算中,同时最多需要标注 N 步,可见需要增加的存储量不是很大.

4.4 基于可达网络的混杂系统优化控制(Optimal control based on reachable net)

给定强 N 步可达网络后,结合4.3部分提出的简化计算量方法,可以给出以下混杂系统优化控制的动态规划方法.

算法3

循环.从 $i=1$ 到 $m(m: N$ 步可达网络中的模态数).

I) 初始化.选择第 N 步模态 $m(N)$,令 $l=N$, $R_1=0, S_1=0, S_2=0$.

II) 根据强 N 步可达网络预测下一模态 $m(l-1)$:

① $m(l-1)$ 为以 $m(l)$ 为相邻模态的模态或 $m(l)$ 本身;

② 如 $m(l-1)$ 为 $m(l)$ 本身,则:

$$K(m(l-1)) + S_1 + S_2 \leq l-1;$$

③ 如 $m(l)$ 为 $m(l-1)$ 相邻模态,则 $m(l-1)$ 为满足 $K(m(l-1)) \leq l-1$ 且 $K_r(m(l-1)) + K_{m(l-1),m(l)}r \leq l-1$ 的模态(如 $K_{m(l-1),m(l)}r$ 为多个,依次选择 $K_{m(l-1),m(l)}r$),令 $R_1=r, S_1=K_r(m(l-1)), S_2=K_{m(l-1),m(l)}r$.

III) 如模态 $m(l-1)$ 可为多个,则标注 l ,即记录下步数 l 、模态 $m(l)$ 、控制 $u_{N-1}, \dots, u_l$ 和此时计算出的最优值 J ,并选择任一模态.

IV) 如 $m(l-1)$ 与 $m(l)$ 相同,则采用模态 $m(l-1)$ 对应微分方程逆推计算(10)式1步并令 $l=l-1$;否则采用模态 $m(l-1)$ 对应微分方程逆推计算(10)式 S_2 步并令 $l=l-S_2$.

V) 返回II)直到 $l=0$ (计算出一条路径最优控制).

VI) 验证.把求出的控制 $u(k), k=0, \dots, N-1$ 代入式(10),依次求出每一步模态、状态,验证是否与给定路径相同及满足限制条件.

VII) 找到最末一个标注,并取出此时记录的步数 l 、模态 $m(l)$ 和最优值 J 、控制 $u_{N-1}, \dots, u_l$,返回II)直到计算完所有标注(即计算出以模态 i 为末态的所有可能路径的最优控制).

VIII) 求出所有路径中最优值及对应最优控制.

5 示例(Example)

考虑例1所示系统,令式(10)中:

$$H_N(x(N), m(N), N) = 0, M(x_i, x_j) = 0,$$

$$H_k(x(k), m(k), u(k), k) = x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k).$$

$$\text{其中: } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}, R = 1.$$

设 $N=10$,则目标函数为:

$$J = \min_{u(k), k=0, \dots, 9} \sum_{k=0}^9 x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k).$$

I) 根据算法2,建立强 N 步可达网络如图3所示.

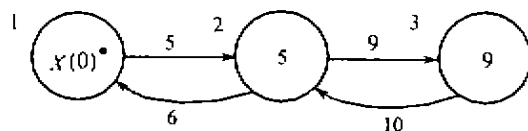


图3 例1中强 N 步可达网络

Fig. 3 N steps strong reachable net for example 1

II) 根据算法 3, 对可能的路径 (共有 33 条路径) 采用动态规划方法求解, 最优解 $J = 129.7751$, 最优控制如表 1 所示:

表 1 最优控制结果

Table 1 Result of optimal control				
K	$X_1(k)$	$X_2(k)$	$M(k)$	$U(k)$
0	-1.0000	4.0000	1	1.0000
1	-0.5000	3.8000	1	1.0000
2	0	3.6000	1	1.0000
3	0.5000	3.4000	1	0.8900
4	0.9450	3.2220	1	0.3958
5	1.1429	3.1428	2	-0.1802
6	0.7882	1.8224	2	-0.1321
7	0.5381	1.1235	2	-0.0621
8	0.3870	0.7019	2	0.0009
9	0.3102	0.4350	2	0.0466
10	0.2808	0.2701	2	

6 结论 (Conclusion)

本文提出了混杂系统优化控制基于可达网络动态规划方法, 充分考虑了混杂系统连续和离散的双重动态特性, 通过建立可达网络, 简化了路径数量, 极大地降低了计算量, 示例证明这种方法是有效的。

参考文献 (References)

- [1] Branicky M S, Boarkar V S and Mitter S K. A unified framework for

hybrid control model and optimal control theory [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1998, 43(4): 31-45

- [2] Lygeros J, Tomlin C and Sastry S. Controllers for reachability specifications for hybrid systems [J]. Automatica, 1999, 35(4): 349-370
- [3] Blondel V D, Tsitsiklis J N. Complexity of stability and controllability of elementary hybrid systems [J]. Automatica, 1999, 35(4): 479-489
- [4] Branicky M S and Mitter S K. Algorithms for optimal hybrid control [A]. In: Proc. IEEE Conf. Decision Contr. [C], New Orleans, USA, 1995, 2661-2666
- [5] Bemporad A and Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. Automatica, 1999, 35(4): 407-427
- [6] Lu Jin, Liao Lizhi and Nerode A, et al. Optimal control of systems with continuous and discrete states [A]. In: Proc. IEEE Conf. Decision Contr. [C], San Antonio, Texas, USA, 1993, 2292-2297

本文作者简介

尹增山 1971 年生, 现为浙江大学工业控制研究所博士, 研究方向为生产制造系统, 智能控制和混杂系统. Email: yinzeng@mail.hz.zj.cn

高春华 1971 年生, 1997 年于西安交通大学获博士学位, 现为浙江大学工业控制研究所副研究员, 主要研究方向为流程 CIMS, 混杂系统, Petri 网理论与应用等。

李平 1954 年生, 1988 年在浙江大学获博士学位, 现为浙江大学工业控制研究所博士生导师, 主要研究兴趣为工业过程模型化, 智能控制, 流程工业 CIMS

(上接第 28 页)

变结构控制, 混合控制器要稍复杂一些, 输出过渡过程时间相对要长一些, 但是, 仿真表明, 这种不足仍在工程应用所允许的范围内。

参考文献 (References)

- [1] Shitsel Y B, Raznopolov O A and Ozerov L A. Control of multiple modular dc-to-dc power converters in conventional and dynamic sliding surfaces [J]. IEEE Trans. Circuits System, 1998, 45(10): 1091-1100
- [2] Utkin V I. Variable structure systems with sliding modes [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222
- [3] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools

for switch and hybrid systems [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482

本文作者简介

孙凯 1976 年生, 1999 年在清华大学自动化系获学士学位, 现为清华大学自动化系博士生, 主要方向为离散事件动态系统和混合动态系统的理论与应用. Email: sunkai99@mails.tsinghua.edu.cn

赵千川 1969 年生, 1996 年在清华大学获得工学博士学位, 现为清华大学自动化系副教授, 主要从事离散事件动态系统和混合动态系统的理论与应用研究。

郑大钟 1935 年生, 现为清华大学自动化系教授, 博士生导师, 研究领域包括线性系统理论, 最优控制, 大系统分散控制, DEDS, 混合动态系统等。