

文章编号: 1001-0920(2010)11-1727-05

并行分布控制网络的实时信号时序流图分析

王剑平, 张云生, 张果, 张晶

(昆明理工大学 a. 信息工程与自动化学院, b. 云南省计算机重点实验室, 昆明 650051)

摘要: 考虑并行分布控制网络中软件过程及物理过程作用和反作用的时间度量特性, 定义带时间标签的信号模型, 采用广义测度函数概念建立信号间的时间关序, 由控制器接口组成网络节点的信号流图拓扑结构, 确定信号作用时序的组合运算, 从而分析软件设计和运行的确定性.

关键词: 并行分布控制网络; 信号模型; 信号流图; 实时时序分析

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Analysis of signal timing sequence flow chart on parallel and distribute control network

WANG Jian-ping, ZHANG Yun-sheng, ZHANG Guo, ZHANG Jing

(a. Faculty of Information Engineering and Automation, b. Computer Technology Application Key Laboratory of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China. Correspondent: WANG Jian-ping, E-mail: kmustwj@126.com)

Abstract: Considering the actions and reactions between the software process and the physical process, time metric characteristic is the basic of control actions to the parallel and distributed control network. The signal model with time tag is defined and signal timing sequence flow charts of control network is built by using generalized timing sequence ultra metrics model, which can ensure the determinacy of real-time system in soft design and running.

Key words: Parallel and distributed control network; Signal model; Signal sequence flow chart; Real-timing sequence analysis

1 引言

控制网络节点上的控制器接口与传感器、执行器或人机界面连接, 由于软件过程和物理过程的作用及反作用连续且长时间地进行, 而物理过程本身是并行和即时的, 时间确定性便成为并行分布网络有别于一般分布网络的约束条件, 时间的度量可测分析则是软件设计和运行的关键.

目前, 针对并行分布控制网络实时信号控制分析有许多方法, 如 Paunicka 等^[1]提出的基于实时中间件技术的分析方法; Henzinger^[2]提出的采用时间触发方式, 以及基于 Giotto 的实时建模方式; Corts 等^[3]提出用 Petri 网络来分析实时可测问题; 还有许多学者^[4,5]采用多采样 Petri 网络方法对实时可测问题进行框架分析.

另外, 经典控制理论在分析控制作用时, 采用信号流图方法成功地描述系统中的并联、串联、反馈联接, 闭环嵌套以及交叉关系, 通过控制网络的组合拓扑结构, 分析系统激励与响应信号之间的因果关系. 但是这种信号流图得到的仅仅是系统各个部分和整体对信号控制作用的因果性, 并没有确定地表达信号在网络节点间及网络整体上的时序关系. 形式上, 实时信号是全局时间的函数; 语义上, 时间是全局共享的概念, 因果性一定按时间顺序发生. 考虑到控制作用在各个节点上执行计算程序存在时间消耗, 信号在网络上传输有延时, 与连接对象有时间配合^[6], 所以利用广义测度理论对实时可测问题进行量化分析具备良好的理论基础.

本文假定并行分布控制网络中信号传输延迟有

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60863004); 国家863计划项目(2007AA010409); 云南省自然科学基金项目(2009CD041).

作者简介: 王剑平(1975—), 男, 湖南衡阳人, 讲师, 博士生, 从事实时并行系统、实时嵌入式系统的研究; 张云生(1948—), 男, 昆明人, 教授, 博士生导师, 从事实时系统、复杂系统等研究.

界. 定义一时间偏序关系, 形式化表达控制模型在运行时间中的约束, 采用广义测度函数概念建立由控制器接口组成的信号时序流图, 再由信号流图拓扑结构确定信号作用时序的组合运算, 从而分析软件设计和运行的确定性^[7,8].

2 信号时序模型

考虑图 1 所示的控制系统, 控制器分布在网络的各个节点上, 其中各个控制器对信号的正确作用和满足对其时间约束是系统稳定工作的关键.

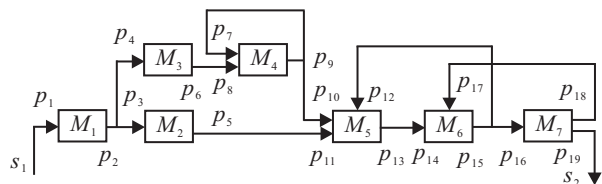


图 1 并行分布控制系统结构

2.1 带时间标签的信号模型描述

定义信号模型为带有时间标签的序对^[9,10].

定义 1 定义从 T 到 V 的函数 $S(T, V) = (T \rightarrow V)$ 为信号模型. 记所有控制器件之间的信号为

$$s = \{(T, V) | s(t) = v\}, s \in S(T, V). \quad (1)$$

其中: $S(T, V)$ 是 s 的信号集, $t \in T$ 是信号的时间标签, $v \in V$ 是信号值, $T = \text{dom}(s)$ 是 s 上的逆像.

定义 2 时序函数

$$S(T, V) \times S(T, V) \rightarrow D(T), d \in D(T). \quad (2)$$

其中: d 为信号发生之间的时序, $D(T)$ 为时间 T 的下降集. 如果 $D(T) = T$, 则信号 $s \in S(T, V)$ 是完备的; 如果 $d \in D(T)$ 且控制器对信号 $s \in S(T, V)$, $t_1, t_2, t_3 \in T$ 作用的时序函数满足下述条件:

$$d(t_1, t_2) = 0, \text{ 当且仅当 } t_1 = t_2; \quad (3)$$

$$d(t_1, t_2) = d(t_2, t_1); \quad (4)$$

$$d(t_1, t_3) \leq d(t_1, t_2) + d(t_2, t_3); \quad (5)$$

$$d(t_1, t_3) \leq \max(d(t_1, t_2), d(t_2, t_3)). \quad (6)$$

则 d 是广义测度时序函数^[11]. 上述关系是指控制系统的信号模型时序.

2.2 控制接口之间的信号时序描述

控制器通过接口对信号产生作用. 记图 1 中控制器的接口 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 为网络上控制器传输信号的接口集, 定义 P_i 为输入接口集, P_o 为输出接口集.

定义 3 函数 $\delta : P \times P \rightarrow D$ 表示控制作用的时间因果关系, D 是前述的时序集 $D(T)$.

给定一个控制器的输入接口 p_1 和输出接口 p_2 , $d(t_1, t_2) = \delta(p_1, p_2)$ 给出在 p_1 输入的信号 $s(t_1, v_1)$ 和在 p_2 产生的信号 $s(t_2, v_2)$ 之间的最小模型时间延

迟, 且满足 $t_2 \geq t_1 + d$. 这表示 d 是控制器对输入信号作用产生输出信号的最小模型时间延迟, 即最快的响应时间, 实际响应时间可能比 d 要慢. 若不产生响应, 则记接口之间的因果时序为 $d = \infty$. 上述对一个控制器的描述, 同样可以用来描述由多个控制器分布组成的分布网络任意两个接口之间的时序.

由上述定义知, 并行分布网络执行满足确定时间关系的关键是, 任何一个接口对信号的处理(即把信号释放到与信号作用的控制器上)是由在接口上接收到信号的时间标记和接口间的时序所决定. 如果任意两个节点代表的接口 p_i 和 p_j 之间的时序关系 $d = \delta(p_i, p_j)$, 则在接口 p_i 上的信号到达时间标记 $t - d$ 时, 可以处理接口 p_j 上具有时间标签 t 的信号. 假设考虑网络延时 d' , 在物理时间 $\tau = t - d + d'$ 时确认接口 p_i 上的信号时间标签小于 $t - d$, 则可在物理时间 τ 或稍后处理接口 p_j 上具有时间标签 t 的信号. 信号的时间标记和时序把时间从控制功能中分离出来, 这样有利于设计控制网络中各个控制器程序执行的调度关系, 避免发生信号的耦合、覆盖和阻塞, 以保证控制处理的实时、准确、稳定性.

3 信号时序流图

上述对带时间标签信号模型的定义和对控制器接口之间时序关系的处理, 也可用于并行分布控制网络任意节点间对控制信号的时序分析^[12].

3.1 以控制器接口为节点的信号流图

图 1 的控制网络结构可构建为如图 2 所示的由控制器接口组成的有向图 $G[P, D]$, 称为信号时序流图. 图中节点 p 代表一个控制器的输入接口或输出接口, 之间有向路径的权重 $d \in D$ 表示控制器的模型延迟时间且 $d \leq \infty$. 如果考虑控制器之间的网络连接, 则连接输出节点和输入节点间的路径定义一连接器, 没有控制作用, d' 表示网络延时. 如果节点之间没有连通路经, 则 $d = \infty$. 显然源节点仅表示外部输入接口, 阱节点仅表示输出外部接口.

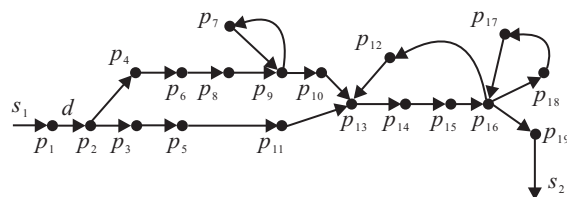


图 2 表征并行分布控制网络的时序流图

对于某一控制模块 M 而言, 其 p_i 是该模块的输入接口, p_j 是该模块的输出接口, 在节点 p_i, p_j 之间定义时序测度 $d = \delta(p_i, p_j)$. d 反映了输入 p_i 和输出 p_j 的最小软件模型延迟时间且 $d \leq \infty$. 节点 p_i, p_j 之间的延时为 $t = d + d'$, 其中 d' 表示连接网络的延时.

若不考虑连接延时 ($d' = 0$), 则 $t = d$; 如果 p_i, p_j 之间没有连通路, 则 $d = \infty$.

3.2 信号时序的组合运算

对信号时序流图中的时序 D 规定时序代数运算为 $(D, \leq, \oplus, \otimes)$. 其中: 二元关系 \leq 是指:

1) 自反的, 即

$$\forall d \in D, d \leq d; \quad (7)$$

2) 反对称的, 即

$$\forall d_1, d_2 \in D, d_1 \leq d_2, d_2 \leq d_1 \Rightarrow d_1 = d_2; \quad (8)$$

3) 传递的, 即

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D, d_1 \leq d_2, d_2 \leq d_3 \Rightarrow d_1 \leq d_3. \quad (9)$$

二元算子 \oplus 表示取小运算, 即

$$\forall d_1, d_2 \in D, d_1 \leq d_2, d_1 \oplus d_2 \leq d_1. \quad (10)$$

二元算子 \otimes 表示加运算, 即

$$\forall d_1, d_2 \in D, (d_1 \otimes d_2)(T) = d_2(d_1(T)). \quad (11)$$

\oplus 和 \otimes 满足结合律和分配律, 即

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D,$$

$$(d_1 \oplus d_2) \oplus d_3 = d_1 \oplus (d_2 \oplus d_3); \quad (12)$$

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D,$$

$$(d_1 \otimes d_2) \otimes d_3 = d_1 \otimes (d_2 \otimes d_3); \quad (13)$$

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D,$$

$$d_1 \otimes (d_2 \oplus d_3) = (d_1 \otimes d_2) \oplus (d_1 \otimes d_3); \quad (14)$$

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D,$$

$$(d_1 \oplus d_2) \otimes d_3 = (d_1 \otimes d_3) \oplus (d_2 \otimes d_3). \quad (15)$$

另外, \oplus 满足交换律, 即 $(d_1 \oplus d_2) = (d_2 \oplus d_1)$, 且是等幂的, 即

$$d \in D, d \oplus d = d. \quad (16)$$

4 信号流图的时序分析

在信号时序流图中, $\forall p_i, p_j \in P$, 可以用时序代数 $(D, \leq, \oplus, \otimes)$ 计算接口 p_i, p_j 之间的所有路径组合的时序测度 $\delta(p_i, p_j)$ 的值.

4.1 串、并联路径组合的时序分析

文献 [6] 已经证明, 满足因果关系控制作用的接口 p_i 和 p_j 之间的 $\delta(p_i, p_j)$ 是单调连续的, 用 \oplus 计算并联路径组合的权重, 用 \otimes 计算串联路径组合的权重. 下述规则证明, 流图中组合路径的时序关系满足 3.2 节的运算规则.

规则 1 并联路径组合的权重是所有支路权重的最大下界.

证明 设 p_i, p_j 间两条并联路径的权重分别是 d_1 和 d_2 , p_j 对 p_i 的最小延迟时间至少同时小于或等

于 d_1, d_2 .

由 $D = D(T) \rightarrow D(T)$, $(d_1 \oplus d_2)(T) = d_1(T) \cap d_2(T)$, 可得

$$(d_1 \oplus d_2)(T) \subseteq d_1(T), (d_1 \oplus d_2)(T) \subseteq d_2(T),$$

即

$$(d_1 \oplus d_2)(T) \leq d_1 \text{ 且 } (d_1 \oplus d_2)(T) \leq d_2.$$

故 $d_1 \oplus d_2$ 是 $\{d_1, d_2\}$ 的下界.

如果存在 $\{d_1, d_2\}$ 的下界 d , 则

$$d(T) \in d_1(T) \text{ 且 } d(T) \in d_2(T),$$

$$d(T) \subseteq (d_1(T) \cap d_2(T)) = (d_1 \oplus d_2)(T),$$

$$d \leq d_1 \oplus d_2.$$

所以 $d_1 \oplus d_2$ 是 $\{d_1, d_2\}$ 的最大下界. \square

规则 2 串联轴路组合的权重是所有支路权重之和.

证明 设 p_i 到 p_j 之间有接口 p_k . p_i 到 p_k, p_k 到 p_j 两条串联轴路的权重分别是 d_1 和 d_2 . 显然 p_j 对 p_i 的延迟时间至少经历 p_k 对 p_i 和 p_j 对 p_k 的延迟时间. 因为

$$D = D(T) \rightarrow D(T), (d_1 \otimes d_2)(T) = d_2(d_1(T)),$$

所以 $d_1 \otimes d_2$ 是 d_1, d_2 之和. \square

上述对两条串联或并联路径的权重计算规则, 可以推广到多条串联或并联路径的权重计算. 如图 2 接口 p_1 和 p_{13} 之间的 $\delta(p_1, p_{13})$ 计算如下:

$$\delta(p_1, p_{13}) = vh_1 \oplus vh_2 \oplus vh_3 = \min(vh_1, vh_2, vh_3).$$

其中

$$vh_1 = \delta(p_1, p_2) + \delta(p_2, p_3) + \delta(p_3, p_5) +$$

$$\delta(p_5, p_{11}) + \delta(p_{11}, p_{13}),$$

$$vh_2 = \delta(p_1, p_2) + \delta(p_2, p_4) + \delta(p_4, p_6) + \delta(p_6, p_8) +$$

$$\delta(p_8, p_9) + \delta(p_9, p_{10}) + \delta(p_{10}, p_{13}),$$

$$vh_3 = \delta(p_1, p_2) + \delta(p_2, p_4) + \delta(p_4, p_6) + \delta(p_6, p_8) +$$

$$\delta(p_8, p_9) + \delta(p_9, p_7) + \delta(p_7, p_9) + \delta(p_9, p_{10}) +$$

$$\delta(p_{10}, p_{13}).$$

4.2 有反馈的循环路径组合的时序分析

有反馈的循环是指从接口 p 返回到自身的路径组合, 需要计算时序 $\delta(p, p)$. 循环路径包括: 简单循环路径和有嵌套的循环路径.

一条简单循环路径不包含其他循环路径, 仅由一些串、并联支路组成. 给定一简单循环路径 $C = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, 其中 $p_i (1 \leq i \leq n)$ 是路径中按顺序串联的接口. 如果指定 p_1 为信号 $s(t_1, v_1)$ 的输入接口, 按串联轴路组合权重计算规则, $s(t_1, v_1)$ 和反馈信号 $s(t_f, v_f)$ 之间的时序为

$$d_c = \delta(p_1, p_1) = \delta(p_1, p_2) \otimes \delta(p_2, p_3) \otimes \dots \otimes \delta(p_n, p_1). \quad (17)$$

所以 $s(t_1, v_1)$ 和 $s(t_f, v_f)$ 不是两个并联信号, 即在 p_1 处有两个不同时间标签 t_1 和 t_f 的输入信号.

另外, 如果指定 p_i 为输入接口, 循环路径为 $C' = (p_i, \dots, p_n, p_1, \dots, p_i)$, 则

$$d_{c'} = \delta(p_i, p_i) = \delta(p_i, p_{i+1}) \otimes \dots \otimes \delta(p_n, p_1) \otimes \dots \otimes \delta(p_{i-1}, p_i).$$

因为 \otimes 运算不满足交换律, 所以 $d_c \neq d_{c'}$.

如果在循环路径中任意两节点间有并联的支路组合, 则可以先计算并联支路组合的权重, 再计算串联组合的循环路径的总权重.

如果循环路径有嵌套, 则对于任意一个信号汇集的接口, 以此接口为起点分别计算包含此接口在内的所有循环路径的权重, 然后利用下节所述关联关系考虑此接口对信号处理的约束条件.

4.3 关联关系的时序分析

在有反馈的循环路径中, 给定信号 $s(t_1, v_1)$ 和反馈信号 $s(t_f, v_f)$ 不是并联信号, 即在 p_1 处有两个不同时间标签 t_1 和 t_f 的输入信号. 特别对于有循环嵌套的情况, 存在多个输入接口. 虽然这些接口之间没有路径, 但它们不是完全独立的. 控制器要响应这其中一个接口上具有时间标记 t 的事件, 就必须确定所有在其他接口上的事件的时间标记小于或等于 t . 为此定义一关联关系.

定义 4 如果对于任意两个没有直接连接路径的接口 p_i 和 $p_j, \exists p \in P_o$, 使得 $\delta(p_i, p) < \infty$ 和 $\delta(p_j, p) < \infty$, 其中 P_o 是控制器的输出接口集, 则 p_i 和 p_j 汇集成关联等价类 $q_{ij} = \{p_i, p_j\}$.

如图 2 中, 给定输入接口 p_7 和反馈输入接口 p_8 同时影响着控制器输出接口 p_9 , p_7 和 p_8 是关联等价的, 可以合并为一个接口 $q_{7\&8} = \{p_7, p_8\}$. 由此, 图 2 所示的信号流图结构可变换为图 3 所示的结构. 一个前馈输入接口和一个给定输入接口也是关联的. 另外, 如果任意一个控制器的中间状态在响应多个接口的输入事件时被修改, 则此状态可视为隐含的输出接口.

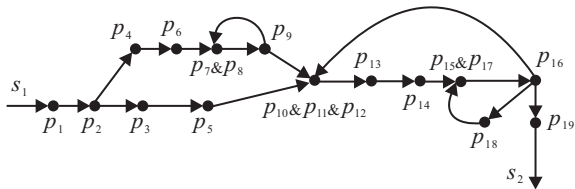


图 3 具有关联关系的时序流图

类似于前述基本时序因果关系, 可以得出关联组合的时序关系: 对于任意两个关联等价类 q 和 q' , 关

联关系 $d = \delta(q, q')$ 表示, 当确认 q 中所有信号的时间标签到达时间标记 $t - d$ 时, 可以处理 q' 中任意具有时间标签 t 的信号. 显然, 如果 $\delta(q, q') = \infty$, 则无需知道 q 中信号的情况便可处理 q' 中的信号.

4.4 基于时序流图的执行策略

分布并行控制的关键是可以按时序确定性地调度各节点控制器的执行. 构造具有关联关系的信号队列 S , 队列偏序 (T, \leq) 表示, 如果在 q_1 中接口上的信号 s_1 具有时间标签 t_1 , 在 q_2 中接口上的信号 s_2 具有时间标签 t_2 , 且

$$t_1 + \delta(q_1, q_2) \leq t_2,$$

则表示在队列中 s_1 小于 s_2 .

定义 5 分别记任意包含接口 p' 和包含 p 的关联等价类为 $Q(p')$ 和 $Q(p)$, 如果当前的物理时间不小于 $\tau = \max\{Q(p')|t - d(Q(p'), Q(p)) + d'\}$, 则输入接口 p 上具有时间标记 t 的信号 s 是信号队列 S 中最小的, 其中 d' 是接口 $Q(p')$ 对信号的处理时间或网络延迟时间.

定义 5 表明, 在一个关联顺序中, 已经发现所有时间标签小于 t 的信号. 因此在接口 p 上具有时间标记 t 的信号 s 可以在物理时间 τ 或者稍后处理. 这样在关联接口 p 上的时序执行策略可按如下规则执行:

规则 3

- 1) 选择 $s \in S$, s 是 S 中最小的;
- 2) 处理信号 s , 产生一组新的信号 S' ;
- 3) 修改队列 $S = (S \setminus s) \cup S'$;
- 4) 返回 1).

例如图 3 中, 在关联等价接口 $q_{10,11,12} = \{p_{10}, p_{11}, p_{12}\}$ 上的信号在时间 $t - d$ ($d = \min\{\delta(p_{10}, p_{13}), \delta(p_{11}, p_{13}), \delta(p_{12}, p_{13})\}$) 已经出现, 则可以处理 p_{13} 上时间为 t 的信号.

按照规则 3, 当接收到输入信号后, 检查信号的时间标签和本控制器模块的模型延迟时间, 据此输出带时间标签的信号, 这样便可将时间的约束条件包含在模型设计中, 以保证软件执行的确定性.

5 结 论

本文将控制信号定义为带有时间标签的序对, 分离出信号的时间特性, 采用偏序集表示时间标签, 对并行分布控制网络建立由控制器接口组成的有向图, 即信号时序流图. 根据广义测度时序函数的组合运算方法和由流图节点表现的输入、输出接口的因果关系和关联关系, 得到任意节点上对信号处理和/或传输的时间约束条件和时序关系. 这种基于信号时序流图的方法, 不依赖于网络的具体设置, 不要求回溯, 保持确定的模型语义, 从而保证了系统设计和软件运行的

确定性.

参考文献(References)

[1] Paunicka J L, Corman D E, Mendel B R. A CORBA-based middleware solution for UAVs[C]. The 4th Int Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. Magdeburg: IEEE, 2001: 261-267.

[2] Henzinger T A, Horowitz B, Kirsch C M. Giotto: A time-triggered language for embedded programming[C]. Proc of 1st Int Workshop on Embedded Software. Tahoe: Springer-Verlag, 2001: 166-184.

[3] Corts L, Eles P, Peng Z. A Petri net based model for heterogeneous embedded systems[C]. Proc of NORCHIP Conf. Oslo, 1999: 248-255.

[4] Kummert R, Kuske D. The topology of mazurkiewicz traces[J]. Theoretical Computer Science, 2003, 305(1): 237-258.

[5] Daniele Varacca. Probability, nondeterminism and concurrency: Two denotational models for probabilistic computation[D]. BRICS: University of Aarhus, 2003.

[6] Alur R, Dill D. A theory of timed automata[J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126(1): 183-235.

[7] Lee E A, Zhen H, Zhou Y. Causality interfaces and compositional causality analysis[C]. Foundations of Interface Technologies. California, 2005: 44-52.

[8] Henzinger T A, Matic S. An interface algebra for real-time components[C]. Proc of the 12th IEEE Real-time and Embedded Technology and Applications Symposium. San Jose, 2006: 253-263.

[9] De Bakker W, De Vink E P. Denotational models for programming languages: Applications of Banach's fixed point theorem[J]. Topology and Its Applications, 1998, 85(3): 35-52.

[10] Liu X, Matsikoudis E, Lee E A. Modeling timed concurrent systems using generalized ultrametrics[R]. Berkeley: University of California, 2006.

[11] Lee E A. Modeling concurrent real-time processes using discrete events[J]. Annals of Software Engineering, 1999, 7(4): 25-45.

[12] Zhao Y, Liu J, Lee E A. A programming model for time-synchronized distributed real-time systems[C]. Proc of the 13th IEEE Real-time and Embedded Technology and Application Symposium. Bellevue, 2007.

(上接第1726页)

[11] Tang G Y, Zhao X H, Liu Y J. Sensitivity approach of optimal control for linear discrete large-scale systems with state time-delay[C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou: IEEE Press, 2004: 115-117.

下 期 要 目

基于小世界网络模型的无线传感器网络拓扑研究综述 郑耿忠, 等

具有长时延及丢包的网路控制系统 H_∞ 滤波 蔡云泽, 等

一种基于反推技术和 ESO 补偿的解偶控制方法 刘贺平, 等

基于差分进化算法的移动传感器网络节点的分布优化 靳立忠, 等

白化权函数已知的区间灰数预测模型 曾 波, 等

基于新型转子磁链辨识方法的多电机系统同步控制 张今朝, 等

支持向量预选的凸壳顶点法 李仁兵, 等

不确定移动机器人编队间接自适应模糊动力学控制 吴孔逸, 霍 伟

基于 HsMM 的系统在线故障预报 张正道, 崔宝同