

文章编号: 1001-0920(2005)09-1006-06

基于物元的流程报警系统重构算法及应用

顾祥柏^{1,2}, 朱群雄¹

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国石化工程建设公司, 北京 100101)

摘要: 根据流程工业的特点, 提出了流程工业系统的物元表示方法. 结合流程报警系统的特点, 提出了面向时序数据的关联函数的计算方法和基于可拓学的系统重构方法. 采用关联函数对重构系统进行聚类处理, 建立了面向流程工业应用的实用系统重构算法. 通过在乙烯裂解炉报警系统中的应用, 验证了该算法的有效性.

关键词: 物元; 关联函数; 系统重构; 乙烯裂解炉

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

Alarm System Reconstruction Algorithm and Application for Process Industry Based on Matter-element

GU Xiang-bai^{1,2}, ZHU Qun-xiong¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. SINOPEC Engineering Incorporation, Beijing 100101, China. Correspondent: ZHU Qun-xiong, E-mail: zhuqx@mail.buct.edu.cn)

Abstract: According to the characteristics of process industry, Matter-element representation method is proposed for process industry systems. A dynamic dependent function calculation formula is established for time series data. And an extensible system reconstruction method is provided. Information integration oriented by process industry application is realized through information mining algorithm on the basis of dependent function for reconstruction system. The application to ethylene cracking furnace alarm system validates the effectiveness of the proposed method.

Key words: Matter element; Dependent function; System reconstruction; Ethylene cracking furnace

1 引言

系统重构分析是在约束分析的一般系统论基础上提出的研究子系统与总系统关系的分析方法, 主要研究如何把子系统更有效地合成为总系统以及如何由子系统(包括因素)的特性研究总系统的特性^[1]. Jones 提出了用聚集状态矩阵和一般化性态函数确定主子状态, 由其逐步得到无偏重构的方法以及对分水平(等级)数据确定主要变量水平的方法^[2]. 全系统的信息可采用子系统-全系统关系联合运算后得到^[3].

流程工业是多层次、多系统集成的大规模系统, 需要各种层次和各子系统的信息来实现不同的功能. 流程工业信息具有连续性、动态性、交互性等复杂特性, 信息的表达方式对集成影响较大, 目前尚无良好的统一描述方法. 为了采用统一的信息模型, 可用相同类型的信息表达方式来刻画不同类型的信息. 本文提出采用物元的概念^[4]统一描述流程工业信息, 利用物元的可积运算可用指标系统和流程系统构造适合于各种不同应用需求的重构系统, 解决信息集成过程中可能发生的语义冲突和信息冗余等问题.

收稿日期: 2004-08-23; 修回日期: 2004-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(29976003); 教育部科学技术研究重点项目(01024); 中石化科学技术研究开发项目(E03007).

作者简介: 顾祥柏(1966—), 男, 江苏盐城人, 教授级高工, 博士, 从事数据挖掘、项目管理等研究; 朱群雄(1960—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、数据挖掘等研究.

如果完全从数据出发进行定量分析, 可对子系统进行可拓重构, 对于重构后的系统采用关联函数进行分析, 提取重构系统的特征, 生成有效实用的重构系统, 从而方便地解决实际应用中的问题

2 流程系统物元表示方法

为了重构流程工业的系统, 可根据应用子系统的需求, 确定相应的指标和因素, 构成新的系统 下面以流程参数和流程报警为例, 给出流程系统的物元表示方法

物元 (R) 描述事物, 是事物名、事物特征描述和特征值的有序三元形式语言, 可表示为 $R = [N, C, C(N)]$ 其中 N 为所描述的事物, C 为事物的属性 (特征), $C(N)$ 为属性值 (可以是模糊值或其他形式语言). 流程工业参数测量和控制信息动态物元表示方法如下式所示:

$$R_{\text{IC}}(t) = \begin{bmatrix} U_{\text{IC}} & \{ \text{测量或控制回路} \} \\ \text{设计最大值} & (\text{量纲} \quad \text{数值}) \\ \text{设计正常值} & (\text{量纲} \quad \text{数值}) \\ \text{设计最小值} & (\text{量纲} \quad \text{数值}) \\ \text{控制状态} & (\text{控制状态} \quad \text{状态值}) \\ \text{控制设定} & \begin{bmatrix} \text{设定值来源} & \text{实体参数/手动} \\ \text{设定值} & \text{量值} \end{bmatrix} \\ \text{流程中位置} & \begin{bmatrix} \text{设备} & \text{设备号} \\ \text{管道} & \begin{bmatrix} \text{管道号} & \text{来自设备号} \\ & \text{去设备号} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\text{IC}} & N_{\text{IC}_1}(t) & \dots & N_{\text{IC}_r}(t) \\ C_{\text{IC}_1} & V_{\text{IC}_{11}}(t) & \dots & V_{\text{IC}_{1r}}(t) \\ C_{\text{IC}_2} & V_{\text{IC}_{21}}(t) & \dots & V_{\text{IC}_{2r}}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\text{IC}_6} & V_{\text{IC}_{61}}(t) & \dots & V_{\text{IC}_{6r}}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: U_{IC} 是参数测量和控制的论域, $N_{\text{IC}_j}(t)$ 是参数测量和控制回路, C_{IC_i} 是参数测量和控制的特征 (分别为设计最大值、设计正常值、设计最小值、测量值、报警、联锁、控制状态、控制设定、维护、流程中位置), $V_{\text{IC}_{ij}}(t)$ 是对应流程参数测量与控制特征的特征值, $i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, r$

流程的报警等级一般可分为高高报 (AHH)、高报 (AH)、低报 (AL)、低低报 (ALL) 4 个状态, 显然可分为高报和低报两类 流程工业的报警系统可以考虑两类指标: 高报报警率 ($AR: AR = \text{报警次数} / (\text{最近一次报警时间} - \text{第一次报警时间})$) 和低报报警率 报警的等级对于报警系统是很重要的, 因此需将报警等级的有关信息予以保留 流程报警的动态物元可表示为

$$R_{\text{ARS}}(t) =$$

$$\begin{bmatrix} U_{\text{ARS}} & \{ \text{流程测量控制参数} \} \\ \text{高报报警率} & AR^h \\ \text{低报报警率} & AR^l \\ \text{报警等级} & \begin{bmatrix} \text{高高报} & \begin{bmatrix} \text{报警状态} & \text{状态值} \\ \text{报警设定} & \text{量值} \\ \text{报警次数} & \text{数值} \\ \text{报警时间} & \text{量值} \end{bmatrix} \\ \text{高报} & \begin{bmatrix} \text{报警状态} & \text{状态值} \\ \text{报警设定} & \text{量值} \\ \text{报警次数} & \text{数值} \\ \text{报警时间} & \text{量值} \end{bmatrix} \\ \text{低报} & \begin{bmatrix} \text{报警状态} & \text{状态值} \\ \text{报警设定} & \text{量值} \\ \text{报警次数} & \text{数值} \\ \text{报警时间} & \text{量值} \end{bmatrix} \\ \text{低低报} & \begin{bmatrix} \text{报警状态} & \text{状态值} \\ \text{报警设定} & \text{量值} \\ \text{报警次数} & \text{数值} \\ \text{报警时间} & \text{量值} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\text{ARS}} & N_{\text{IC}_1}(t) & \dots & N_{\text{IC}_r}(t) \\ AR^h & T_{\text{IC}_{11}}(V_{\text{IC}_{11}}(t)) & \dots & T_{\text{IC}_{1r}}(V_{\text{IC}_{1r}}(t)) \\ AR^l & T_{\text{IC}_{21}}(V_{\text{IC}_{21}}(t)) & \dots & T_{\text{IC}_{2r}}(V_{\text{IC}_{2r}}(t)) \\ ALel & T_{\text{IC}_{31}}(V_{\text{IC}_{31}}(t)) & \dots & T_{\text{IC}_{3r}}(V_{\text{IC}_{3r}}(t)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: U_{ARS} 是报警系统的论域, $AR^h, AR^l, ALel$ 是指标, $V_{\text{IC}_{1j}}(t)$ 是 $N_{\text{IC}_j}(t)$ 的高报报警率, $V_{\text{IC}_{2j}}(t)$ 是 $N_{\text{IC}_j}(t)$ 的低报报警率, $V_{\text{IC}_{3j}}(t)$ 是 $N_{\text{IC}_j}(t)$ 的报警等级, $T_{\text{IC}_{ij}}$ 是将 $V_{\text{IC}_{ij}}$ 变换成与 $N_{\text{IC}_i}(t)$ 对应特征值可积的相关变换因子, $i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, 3$

3 基于物元的系统重构方法

采用可拓学的可积 (构成系统或空间) 分析原理^[3], 对建立的动态物元表示的流程信息进行分析, 可以建立流程工业的重构系统 对于流程工业而言, 指标体系与流程工业研究对象实体集合之间的正交性是明显的, 在利用指标和因素构造系统时, 应根据实际应用情况分析指标及其相关的流程工业研究对象实体集合, 以便建立起具有实用价值的重构系统, 并应考虑重构后的系统可与其他系统进一步重构的可操作性, 如流程报警系统与联锁系统的二次重构 采用动态物元的可积分析原理, 可得到如下流程报警的重构系统:

$$R_{\text{ARS}}(t) \otimes R_{\text{IC}}(t) = \begin{bmatrix} U_{\text{ARS}} \otimes U_{\text{IC}} & N_{\text{IC}_1}(t) \\ AR^h \otimes (\otimes_{i=1}^6 C_{\text{IC}_i}) & T_{\text{IC}_{11}}(V_{\text{IC}_{11}}(t)) \otimes (\otimes_{i=1}^6 V_{\text{IC}_{i1}}(t)) \\ AR^l \otimes (\otimes_{i=1}^6 C_{\text{IC}_i}) & T_{\text{IC}_{21}}(V_{\text{IC}_{21}}(t)) \otimes (\otimes_{i=1}^6 V_{\text{IC}_{i1}}(t)) \\ ALel \otimes (\otimes_{i=1}^6 C_{\text{IC}_i}) & T_{\text{IC}_{31}}(V_{\text{IC}_{31}}(t)) \otimes (\otimes_{i=1}^6 V_{\text{IC}_{i1}}(t)) \end{bmatrix}$$

$$K^l = \begin{matrix} & \text{NIC}_1 & \text{NIC}_2 & \dots & \text{NIC}_r \\ \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} k_{11}^l & k_{12}^l & \dots & k_{1r}^l \\ k_{21}^l & k_{22}^l & \dots & k_{2r}^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1}^l & k_{n2}^l & \dots & k_{nr}^l \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8b)$$

将式(8)中各列的数据压缩到 $[0 + \epsilon, 1]$ (ϵ 为一任意小的正数)的闭区间内,从而使信息矩阵为正矩阵

$$K^h = [k_{ij}^h]_{n \times r}, K^l = [k_{ij}^l]_{n \times r} \quad (9)$$

第 2 步 建立聚类相似矩阵 X. 对于相关关联函数正矩阵(9),令 $X^h = K^{hT} K^h, X^l = K^{lT} K^l$, 则

$$X = X^h + X^l \quad (10)$$

为 r 维对称相似矩阵

证明 对于 $X^h = K^{hT} K^h$, 将式(8)代入得

$$\begin{aligned} X^h &= K^{hT} K^h = \begin{bmatrix} k_{11}^h & k_{12}^h & \dots & k_{1r}^h \\ k_{21}^h & k_{22}^h & \dots & k_{2r}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1}^h & k_{n2}^h & \dots & k_{nr}^h \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{11}^h & k_{12}^h & \dots & k_{1r}^h \\ k_{21}^h & k_{22}^h & \dots & k_{2r}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1}^h & k_{n2}^h & \dots & k_{nr}^h \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n k_{i1}^h k_{i1}^h & \dots & \sum_{i=1}^n k_{i1}^h k_{ir}^h \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n k_{ir}^h k_{i1}^h & \dots & \sum_{i=1}^n k_{ir}^h k_{ir}^h \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_{11}^h & x_{12}^h & \dots & x_{1r}^h \\ x_{21}^h & x_{22}^h & \dots & x_{2r}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{r1}^h & x_{r2}^h & \dots & x_{rr}^h \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, r.$

因为 $k_{ij}^h > 0$, 所以 $x_{ij}^h = \sum_{p=1}^n k_{pi}^h k_{pj}^h > 0$ 进一步有

$$\sum_{p=1}^n k_{pi}^h k_{pj}^h = \sum_{p=1}^n k_{pj}^h k_{pi}^h, \text{ 即可证得矩阵 } X^h \text{ 为 } r \text{ 维对称相似矩阵}$$

同理可证矩阵 X^l 为 r 维对称相似矩阵 由此证得 $X = X^h + X^l$ 为 r 维对称相似矩阵

对于流程工业,高报和低报的重要程度可以视为相当 为研究整个报警的信息状态,可将高报和低报的相似矩阵合并构成一个完整的报警信息相似矩阵(10),从而便于研究流程系统总的报警状况

$x_{ij}^h(x_{ij}^l)$ 表示两个流程参数 P_i 与 P_j 之间相似程度的变量,当 $x_{ij}^h(x_{ij}^l)$ 接近于 1 时,表明这两个参数的相关程度越大,属于高报类(低报类)的支持度也越大

第 3 步 传递闭包聚类: 通过上述标定得到的报警信息相似矩阵,反映了样本间关于高报和低报的相似关系,但它只具有自反性和对称性,不具有传递性,因此采用平方法得到 X 的传递闭包

$$\begin{cases} X \circ X = X^2, X^2 \circ X^2 = X^4, \\ \dots, X^{2^k} \circ X^{2^k} = X^{2^{k+1}}. \end{cases} \quad (11)$$

其中 $k = \lg n$.

在 X 为相似矩阵的前提下,一定存在一个 X , 使得 $X^{2^k} = X^{2^{k+1}}$, 则 $t(X) = X^{2^{k+1}}$ 就是论域上的一个等价矩阵 对等价矩阵选择不同的 λ 值,便得到不同的水平截集,进而得到聚类结果

5 乙烯裂解炉报警系统的信息集成

现代化工流程报警系统的一个突出问题是设置的报警太多.为了合理降低报警量,提高报警的有效性,可利用化工流程的操作数据,采用第 3 节的重构算法和第 4 节的关联函数聚类算法,提取报警系统的特征,动态优化管理流程报警系统 按照 EEMUA^[7] 的推荐,保持操作员有效处理报警的频率是每 10 min 一次报警(即一天 150 次报警),操作员可以管理处理的最大报警率为每 5 min 一次报警(即一天 300 次报警).合理化报警系统可按某个目标报警率来优化报警系统的设置,提高操作员处理报警的效率 按照 EEMUA 准则,高级别报警应占报警总数的 10%,中级别报警应占报警总数的 20%,其余为低级别报警

流程工业要求在操作周期内平稳操作,以确保装置的生产能力和下游装置的平稳生产.因此流程报警系统状态的分类不需要频繁地实时更新.下面以某乙烯厂的裂解炉报警系统(图 1)为例,说明基于物元的流程报警系统重构算法在流程工业优化操作中的应用 按照乙烯裂解炉的工艺流程和操作规程,选取裂解炉系统关键报警参数及其影响因素如下:

参数报警位号集=

- {FC10632(原料油总流量),
- FC1061(A 组进料流量),
- FC1062(B 组进料流量),
- FC1063(C 组进料流量),
- FC1064(D 组进料流量),
- FC1065(A 组蒸汽流量),
- FC1066(B 组蒸汽流量),
- FC1067(C 组蒸汽流量),
- FC1068(D 组蒸汽流量),
- TC10629A(急冷气出口温度),
- TC10629B(急冷气出口温度),
- TII0624A(A 组炉管 CO T),

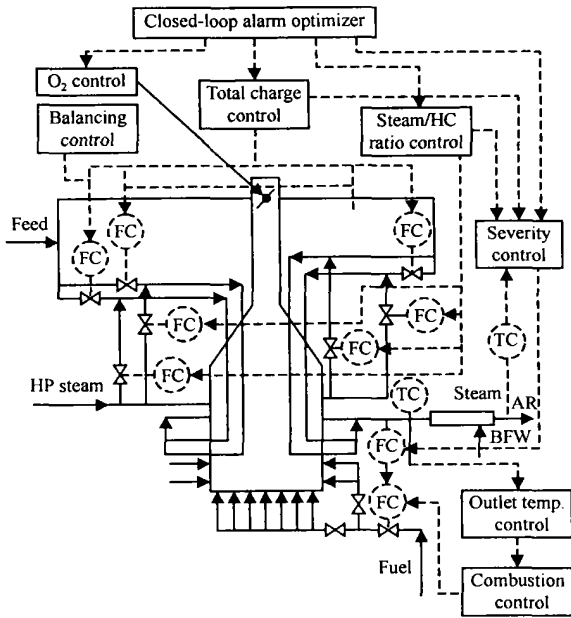


图1 乙烯裂解炉报警系统

TI10625A (B组炉管COT),
 TI10626A (C组炉管COT),
 TI10627A (D组炉管COT),
 TC10632 (4组炉管平均COT),
 TI10628A (TLE出口温度),
 TI10628B (TLE出口温度),
 TI10628C (TLE出口温度),
 TI10628D (TLE出口温度),
 PC1061 (底部燃料压力),
 PC10635 (侧壁燃料压力),
 FC10634 (锅炉给水总流量),
 LC1063 (锅炉液位),
 TI10671 (超高压蒸汽温度),
 TC1065 (超高压蒸汽温度),
 FI10635 (超高压蒸汽流量)。

对上述主要参数的实际生产数据采样, 根据文献[6]的定理1取 $\delta=0.01$, 按照裂解炉的操作周期, 假设5天更新一次报警分类, 即样本更新周期 $N=5$ 天。这时采样数据长度为1440个样本, 可以代表5天的报警动态实际状态。对于本例采样样本长度选为1440。

对采样数据按式(4)构成重构的流程报警系统。利用上侧关联函数和下侧关联函数公式计算系统中相应的关联函数, 按式(8)~(10)构建重构报警系统的相似矩阵, 并取 $\epsilon=0.0001$; 再按式(11)进行传递闭包运算, 通过合理选用水平截集 λ 得到有效的报警分组。水平截集 λ 对报警分类数和低级别报警分辨率有很大的影响, 对于图1所示的裂解炉报警系

统, 按照EEMUA评价指标, 选取水平截集 $\lambda=0.8$, 得到的裂解炉报警参数聚类谱系如图2所示。据此可将参数分成4个报警组。

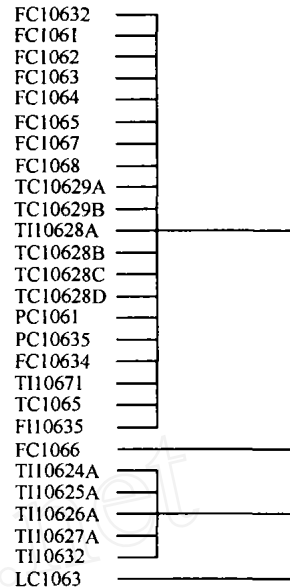


图2 乙烯裂解炉报警参数聚类谱系

通过对报警系统进行重构和聚类, 把相关的报警信息集成到一起, 设置报警时对相关类进行建组, 每组每次只给操作员提供一两次报警, 并屏蔽掉其他的报警参数, 从而实现减少报警量的目的。为了给操作员或管理者提供合理的报警组信息, 有必要对报警组中各过程参数报警的优先等级进行排序, 将其按照高报和低报两类并按关联函数值由大到小的顺序排列。得到的报警集成信息为: $\{(FC1066)\}$, $\{(TI10626A)\}$, $\{(FC1067), (FI10635)\}$, $\{(LC1063)\}$, $\{(TI10627A)\}$, $\{(FC1068)\}$ 。

这些聚类等级可作为报警分组的聚类中心, 处理报警时优先处理这些报警中心的过程参数, 而暂时屏蔽掉其他参数报警信息。这样可降低操作员处理报警的盲目性。

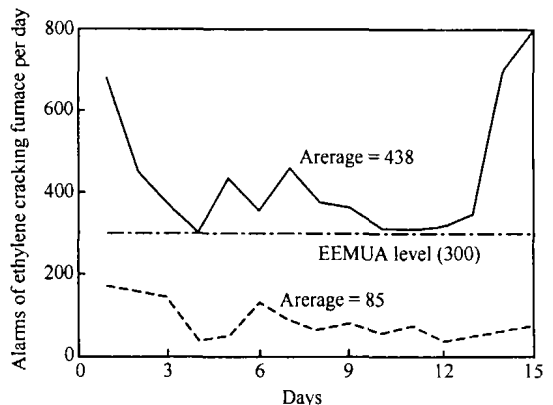


图3 裂解炉系统报警优化结果和趋势对比

裂解炉DCS系统每分钟记录一次过程参数值,图3给出了15天中报警系统优化管理前后的报警次数对比。其中点划线为EEMUA推荐的报警评价指标,实线为采用算法前的报警次数,虚线为采用算法后的报警次数。由此可见,基于物元概念的流程报警系统的重构,实现相关信息集成和聚类分析处理后的报警次数大大下降,在不影响正常报警的前提下,有效地提高了操作员处理报警的效率。

6 结 语

现代化工流程关系非常复杂,无论是数据一致性处理还是相似矩阵计算,建立全流程系统的相似矩阵在实施上都存在一定的困难,因此有必要按照各种应用的需要组成不同的子系统,在实际应用时,再根据应用目的将相关子系统按照可拓学原理进行重构,生成面向应用的有限重构空间。为解决重构空间计算的复杂性,可采用基于关联函数的聚类算法,对所考虑的系统空间进行简化。本文通过流程工业报警系统的应用实例,验证了基于物元的系统重构和信息集成方法是有效实用的。对于流程工业更为复杂的实际应用,本文提出的方法还需要进一步完善。

参考文献(References)

[1] Cavallo R E, Klir G J. Reconstructability Analysis[J]

Int J of General System, 1981, 7: 7-32

[2] Jones B. A Program for Reconstructability Analysis [J] *Int J of General System*, 1989, 15: 7-32

[3] Shu G F. Meta-synthetic System Reconstruction and Applications in Macro-economic Researches [J] *J of System Science and System Engineering*, 2001, 16(5): 349-353

[4] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994

(Cai W. *Matter-element Model and Its Application* [M]. Beijing: Scientific and Technical Document Publishing House, 1994)

[5] Dang Y G, Liang B S, Ye Y J. Construction of the Dependent Function in Cluster Analysis [J] *J of Guangdong University of Technology*, 1998, 15(2): 121-124

[6] Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. CURE: An Efficient Clustering Algorithm for Large Database [J] *Information System*, 2001, 26(1): 35-58

[7] The Engineering Equipment and Materials Users Association (EEMUA). *Plant Systems — A Guide to Design, Management and Procurement* [M]. London: Publication No 191, 1999.

(上接第1005页)

参考文献(References)

[1] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of A synchronous Dynamical Systems with Rate Constraints on Events [A] *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 1345-1351.

[2] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of Networked Control Systems [J] *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 84-99

[3] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems [J] *IEEE Trans on A C*, 1998, 43(4): 475-482

[4] Peleties P, Decarlo R. Asymptotic Stability of m -switched Systems Using Lyapunov-like Functions [A] *Proc of American Control Conference* [C]. Boston, 1991: 1679-1648

[5] Morse A S. Supervisory Control of Families of Linear Setpoint Controllers—Part I: Exact Matching [J] *IEEE Trans on A C*, 1996, 41(10): 1413-1431

[6] Hespanha J P. Stability of Switched Systems with

Average Dwell-time [A] *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 2655-2660

[7] Zhai G, Hu B, Yasuda K, et al. Disturbance Attenuation Property of Time-controlled Switched Systems [J] *J of Franklin Institute*, 2001, 338(7): 765-779

[8] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 41-67.

(Yu L. *Robust Control—Linear Matrix Inequality Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 41-67.)

[9] Xie L H. Output Feedback H_∞ Control with Parameter Uncertainty [J] *Int J Control*, 1996, 63(4): 741-750

[10] Toker O, Ozbay H. On the NP-hardness of Solving Bilinear Linear Matrix Inequalities and Simultaneous Stabilization with Static Output Feedback [A] *Proc of American Control Conference* [C]. Piscataway, 1995: 2525-2526