文章编号:1000-8152(2008)02-0181-06

### 大型复杂系统的动态SDG模型及传感器布置问题

杨 帆, 萧德云

(清华大学自动化系,北京100084)

摘要: 符号有向图(SDG: signed directed graph)可以用于描述大型复杂系统及其变量之间的因果影响关系, 但是在 描述故障传递关系时不能表示其动态传播规律. 本文在SDG支路上引入时间参数, 用于近似描述变量的变化在系统 中的传递时间, 由此构建的SDG模型称为动态SDG模型. 另外, 要实现故障检测需要有传感器的信息, 传感器的布 置直接影响着故障检测的性能. 本文在动态SDG框架下, 研究了故障的可检测性和可分辨性问题, 提出了一些一般 性的结论, 并给出通过正向推理来求故障传播过程和传感器布置方案的方法. 最后, 通过实例验证该方法的有效性. 关键词: 符号有向图; 故障检测; 传感器布置; 可检测性; 可分辨性

中图分类号: TP202 文献标识码: A

### Dynamic SDG model and sensor location problem for large-scale complex systems

YANG Fan, XIAO De-yun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Signed directed graph (SDG) is used to describe large-scale complex systems and the cause-effect relations among variables. However, SDG cannot show the dynamic propagation patterns when expressing the fault propagation relation. In this paper, time parameters are introduced to the branches of SDG to approximately denote the propagation time of the variable changes in the systems. The SDG model constructed in this way is called the dynamic SDG model. Besides, fault detection is conducted by the use of sensors and is based on the information of sensors, thus the sensor location influences the performances of fault detection directly. The fault detectability and identifiability are then analyzed in the framework of dynamic SDG. A method is proposed to describe the fault propagation process by forward inference and to locate the sensors. Finally, an example is used to illustrate and validate the proposed method.

Key words: signed directed graph; fault detection; sensor location; detectability; identifiability

#### 1 引言(Introduction)

在大型复杂系统中,局部的故障除了直接体现出 来以外,还会通过各个局部之间的连接传播到系统 的其他部分,因而可能造成严重的后果.为了监测系 统状态,及时发现故障,需要使用传感器实时测量各 个变量值.但是,对大型复杂系统而言,变量和故障 众多,而且故障之间的传递关系复杂,如何在有限资 源的条件下,合理、节约地布置各种传感器,尽快地 检测并分辨出每个故障,进而提高故障检测的可靠 性则成为一个关键的问题.因此,要把对系统描述与 传感器布置这一系统设计问题很好地结合起来.

对大型复杂系统而言,状态方程等传统的描述 方法的局限性比较突出,符号有向图(signed directed graph, SDG)以图的形式描述了变量和故障之间的因 果传递关系<sup>[1]</sup>,这样的模型直观、清晰地建立了故 障、变量以及它们之间的联系,适用于大型企业的 故障分析<sup>[2]</sup>.文献[3~5]在此基础上研究了故障在一 定的传感器布置下的可检测性和可分辨性问题,文 献[5~8]讨论了可靠性问题.然而,故障的传递是有 时间延迟的,有些延迟还很明显,这不仅带来了系统 状态的动态变化,而且使故障的可检测性和可分辨 性也随时间的推移表现出一定的变化.所以,根据 静态的SDG模型决定传感器的布置方案就不足以体 现设计者对系统故障检测性能的动态需求.如果把 时间延迟或故障传递时间引入到模型中,可以更准 确、更符合实际地描述故障的传播方式,在此基础 上提出的与时间因素相关的传感器布置方案的设计 方法也将更为合理.本文将分析传递时间对故障检

收稿日期: 2006-10-26; 收修改稿日期: 2007-04-03.

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2003AA412310);国家自然科学基金资助项目(60736026).

测性能的影响,并提出传感器布置的设计方案.

# 大型系统的动态SDG描述(Dynamic SDG description of large-scale systems)

SDG模型把过程变量表示成节点,用连接节点的 支路表示各个过程变量之间的因果影响关系.也就 是说,只要两个变量之间存在着直接的因果影响关 系,就用一条支路连接起来.注意,这个关系是直接 的关系,它具有传递性,而间接关系则通过支路首尾 相接构成的通路表示,不再增加新的支路.如果发生 了局部的故障,故障会直接体现在某个或某几个节 点的取值偏离上,并沿着支路传播开来.因此SDG模 型清楚地描述了故障的传播关系.

为不失一般性,本文只讨论弱连通的图,而不连 通的图可以视为独立的图分别处理.系统故障都直 接体现在根节点上,若不然,则构造一个虚拟节点表 示该故障,由此节点到真实的故障变量节点(非根节 点)连接一条支路.因此,系统的故障由根节点表示, 所谓故障源.由于大规模复杂系统中各个变量之间 的关系复杂,在有向图中可能会出现回路(环).可以 把一个回路所包含的节点集合用一个节点来取代, 这样化简后的图是有向无环图.

动态SDG在保持了SDG模型定义的前提下,为支 路增加了传递时间这个因素,体现了前一变量 $n_1$ 的 变化传递到后一变量 $n_2$ 所需的时间,记为 $\tau(n_1,n_2)$ , 由于考虑的是因果系统,所以, $\tau(n_1,n_2) \ge 0$ .可以 根据SDG的定义<sup>[9]</sup>写出动态SDG的定义如下:

**定义1** 动态SDG模型 $\gamma$ 是有向图G与函数 $\varphi$ ,  $\psi$ 和 $\tau$ 的组合( $G, \varphi, \psi, \tau$ ), 其中:

1) 有向图G为四元组 $(N, A, \partial^+, \partial^-)$ :

a) 节点集合:  $N = \{n_1, n_2, \cdots, n_m\};$ 

b) 支路集合:  $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\};$ 

c) 邻接关联符:  $\partial^+ : A \to N$  (支路的起点);  $\partial^- : A \to N$  (支路的终点).

2) 函数 $\varphi$ :  $A \to \{+, -\}$ , 其中 $\varphi(a_k)$   $(a_k \in A)$ 称 为支路 $a_k$ 的符号.

3) 函数 $\psi$ :  $N \rightarrow \{+, 0, -\}$ , 其中 $\psi(n_k)$  ( $n_k \in N$ )称为节点 $n_k$ 的符号.

4) 函数 $\tau$ :  $A \to R^+$ , 其中 $\tau(a_k)$   $(a_k \in A)$ 称为 支路 $a_k$ 上的传递时间. 如果支路 $a_k$ 的起止节点分 别为 $n_1(= \partial^+ a_k)$ 和 $n_2(= \partial^- a_k)$ , 传递时间也可记 为 $\tau(n_1, n_2)$ .

起始节点为 $n_1$ 、终止节点为 $n_2$ 的支路a可表示 为 $a = (\partial^+ a \rightarrow \partial^- a) = (n_1 \rightarrow n_2)$ ,其中"→" 表示支路方向,即节点间直接的传递关系.首尾相 接的支路成为路径,例如起于 $n_1$ 、终于 $n_m$ 的路径记 为 $l(n_1 \mapsto n_m) = (n_1 \rightarrow \cdots \rightarrow n_m)$ ,其中" $\mapsto$ "表 示路径方向,即确定了起止节点.相应地,路径上的 传递时间为 $τ(n_1 \mapsto n_m)$ . 为了区别变量节点和故障 节点,常把变量节点记为n,故障节点记为f.

故障在支路上的传递时间一般通过实验及经验 知识获得.对于不可测节点之间的故障传递,无法通 过实验获得,一般有两种处理方法:一是通过图的等 价变换,将不可测节点消除,这样处理后,图中的节 点都是可测的;另一种方法是通过经验知识或状态 估计等定量方法估计出不可测节点的取值及其所涉 及到的支路上的传递时间.

SDG可视为支路传递时间为零的动态SDG,也就 是说,在极限情况下,动态SDG就变成了静态的.同 时应该指出,这里的动态SDG实际上没有完全体现 动态变化的过程,故障的传播是不顾细节地瞬时完 成的,而且这里认为传递时间随着故障沿支路传播 而叠加.因此,动态SDG模型是个简化的动态模型.

#### 3 故障检测和传感器布置问题的基本评 价指标(Criteria of fault detection and sensor location problem)

过程的故障必须通过变量上的传感器检测出来. 但由于技术和经济的原因,不能盲目地为每个变量 设置传感器.必须研究如何用最少的传感器满足检 测故障的要求,这就是传感器分布问题.故障检测最 基本的要求有二:可检测性和可分辨性.可检测性是 指过程的每个故障都至少被一个传感器所检测.可 分辨性是指不同的故障可以通过传感器的检测结果 分辨出来.基于SDG的传感器布置问题已有专门的 研究<sup>[3~8]</sup>,但在动态SDG模型描述下,要专门考虑故 障传播的问题,因此首先定义故障传播的可达性.

### **3.1** 故障传播的可达性与故障传播时间(Fault reachability and fault propagation time)

故障沿SDG的支路方向传播,体现为沿着SDG的 支路方向从一个节点前进到各个节点,而路径长度 即为支路传递时间的叠加.

**定义 2** 从故障节点*f*出发,经时间*t*后影响到的节点集合为*R*(*f*,*t*),即

 $R(f,t) = \{m : \exists l(f \mapsto m), \tau(f \mapsto m) \leqslant t\}, (1)$ 

其中t称为故障传播时间.如果 $n \in R(f,t)$ ,则称在时间t内,故障f到节点n是可达的.

显然,故障的影响随着时间的推移而扩大,因此 只要 $t_1 < t_2$ ,则 $R(f, t_1) \subseteq R(f, t_2)$ .

下面讨论故障检测和传感器布置问题的两个基 本指标——可检测性和可分辨性问题.

## **3.2** 故障的可检测性与检测时间(Fault detectability and detection time)

**定义3** 只要R(f,t)内,存在布置有相应的传

感器(检测相应物理量的传感器)的节点,则称故障f在时间t内可检测<sup>[3]</sup>. *R*(*f*,*t*)中节点上的传感器 个数称为可检测度.

**定义 4** 检测时间为最先检测到故障f的时间, 记为 $T_D(f)$ .

用最短路径法可计算每个传感器节点所需的检测时间,其中最小的为 $T_D(f)$ .

在不考虑传递时间的SDG模型条件下,只需考虑整个SDG的叶子节点.有如下定理.

**定理1** SDG模型下,不考虑节点变量不可检测的情况,只需在叶子节点上布置相应的传感器(测相应物理量的传感器),以满足可检测性条件,且所需传感器数目最少.

证 根据弱连通条件,每个故障源都有至少一条路径与叶子节点相连,所以在叶子节点上布置传感器可以满足可检测性条件.假设有n个节点的传感器布置方式可以满足可检测性条件,则去掉非叶子节点上的传感器,并从这n个节点各沿任意一条路径进行正向推理直到叶子节点,在这些叶子节点上 布置传感器,也能满足可检测性条件,而且数目不超过n(因为可能有支路合并). 证毕.

在考虑传递时间的动态SDG模型下,也只需 在*R*(*f*,*t*)中的叶子节点上选取即可.但是后面可 以看到,这样的布置原则与根据可分辨性条件的布 置原则相反.

### **3.3** 故障的可分辨性与分辨时间(Fault identifiability and identification time)

**定义5** 只要在 $R(f_1, t)$ 中,存在布置有相应的 传感器(检测相应物理量的传感器)的节点,而这些 节点不在 $R(f_2, t)$ 内,换言之,只要在 $I(f_1, f_2, t) \triangleq$  $R(f_1, t) \bigcup R(f_2, t) - R(f_1, t) \cap R(f_2, t)$ 中有节点上 置有传感器,则称故障 $f_1$ 和 $f_2$ 在时间t内可分辨<sup>[3]</sup>.  $I(f_1, f_2, t)$ 中节点上的传感器个数称为可分辨度.

**定义 6** 分辨时间为最先分辨出两个故障*f*<sub>1</sub>, *f*<sub>2</sub>的时间, 记为*T<sub>I</sub>*(*f*).

可检测与可分辨是两个独立的概念. 很显然, 两 个故障均可检测时, 它们不一定可分辨; 两个故障可 分辨也不意味着他们都可检测, 例如只检测到一个 故障. 但是, 一般来说, 只考虑可检测故障的可分辨 性问题. 有以下性质:

**性质1**  $T_I(f_1, f_2) \ge \max\{T_D(f_1), T_D(f_2)\}.$ 

**性质 2**  $I(f_1, f_2, t)$ 的元素个数不随t单调递增.

为了说明性质2,考虑如图1的情况.观察一个时间片断的故障传播情况变化,若时间段选择合适,则可保证 $R(f_1,t)$ 和 $R(f_2,t)$ 中只增加一个节点,设为n,假设是 $R(f_1,t)$ 增加了一个节点, $R(f_2,t)$ 不变.有两

种情况:第一, n在 $R(f_2,t)$ 内(图1(a)),则 $I(f_1, f_2,t)$ 减少1;第二, n不在 $R(f_2,t)$ 内(图1(b)),则 $I(f_1, f_2,t)$ 增加1.这个性质说明,随着时间的推移,原来可分 辨的故障有可能再次不可分辨.因此,可分辨分为 暂时可分辨和永久可分辨.对于暂时可分辨,定义可 分辨的时间为 $T_t$ ,与可分辨度一起作为评价故障的 分辨程度的指标.考虑两个故障首次可分辨的情形,  $R(f_1,t)$ 与 $R(f_2,t)$ 首次不同时对应的节点为n,它是 故障 $f_1$ 的可达节点,两个故障可分辨,此时的时间 为 $T_I(f_1, f_2)$ .但一段时间后n也成为另一故障 $f_2$ 的 可达节点,故障再次不可分辨,则

 $T_t = \min \tau(f_2 \mapsto n) - \min \tau(f_1 \mapsto n), \quad (2)$ 

显然,暂时可分辨一般是不可靠的,它受两个故障发 生时间的扰动影响,也和检测的采样方法有关.



图 1 可分辨性随时间变化的两种情况示意 Fig. 1 Two cases of time-varying identifiability

对比不考虑传递时间的SDG模型下的可检测性 和可分辨性问题,这里的定义方式是一个扩展.不考 虑传递时间,相当于瞬时完成故障的全局传递过程.

#### **3.4** 多重故障情形下的可检测性和可分 辨性(Detectability and identifiability in multifault cases)

上面所讨论的都是单重故障源的情形, 而在实际 系统中, 有可能有多个故障同时发生.

首先考虑双重故障的情形. 当故障*f<sub>i</sub>和f<sub>j</sub>*同时发 生时, 它们的可达节点集合为*R<sub>i</sub>* U*R<sub>j</sub>*, 记为*R<sub>ij</sub>*, 只 需把这*C<sub>n</sub>*<sup>2</sup>个集合作为新的节点合并到原图中, 就转 化为单重故障的可检测性和可分辨性问题. 同理, 对 于多重故障同时发生的情形, 只需把多个故障共同 作用于变量节点的集合同样处理即可<sup>[3]</sup>. 由于多个 故障的排列组合很多, 所以多重故障的计算复杂度 大幅上升. 但应该指出, 在实际系统中, 多个故障同 时发生的概率并不高, 因此没有必要把所有故障都 组合起来, 只需根据实际情况, 把常见的故障组合做 上述处理, 考虑它们同时发生的情况即可.

容易想象,如果传感器设置满足单重故障的可分 辨性,而当多个故障同时发生时,则未必能够分辨. 而反之如何呢?

**定理 2** 若*n*重故障均可分辨,则低于*n*重的故障一定可分辨.

证 首先,设双重故障均可分辨,则 $\forall i, j, k, l,$   $R_i \bigcup R_j \neq R_k \bigcup R_l$ . 下证:  $\forall i, j, \bigcup R_i \neq R_j$ . 若不 然,假设 $\exists i, j, \exists R_i \neq R_j, \bigcup R_i \bigcup R_k - R_j \bigcup R_k =$   $(R_i - R_j) \bigcup R_k = \phi$ . 因此,单重故障一定可分辨. 同理可证当n重故障均可分辨时, n - 1重的故障一 定可分辨. 根据数学归纳法,定理得证.

**推论** 对某些故障所影响的变量集合,若n重故障可分辨,则低于n重的故障均可分辨,且与其他故障可分辨.

# 4 布置传感器的一般选择(General choice of sensor location)

#### 4.1 问题描述(Problem description)

传感器布置问题就是使传感器的布局能够满足 故障检测的要求.除去引言中提到的可靠性要求外, 此处研究的要求就是可检测性、可分辨性.有两类 问题:第一,给定时间,通过布置最少的传感器满足 上述要求.文献[3,4]已针对不考虑传递时间的情形 给出算法,引入传递时间后方法相同.第二,限制传 感器数目,寻找一个布置方法,使得用最少的时间能 够满足要求.

**4.2** 根据SDG结构特征得出的若干结论(Some results based on the structure characteristic of SDG)

首先根据前面的定义和性质给出若干结论,供工 程实际中参考.

**结论1** 若 $R(f_1,t)$ 与 $R(f_2,t)$ 不交,且均不为空,则可在两个集合中分别取离故障源 $f_1$ 和 $f_2$ 传递时间最短的一点.

如图2(a)所示,故障源f<sub>1</sub>和f<sub>2</sub>在此时互不影响,所 以只要可检测则必定可分辨.但应该指出,一旦由于 支路的合并,在正向推理中两个故障源的可达节点 重合,则继续正向推理得到的节点不可能再使故障 可分辨,因此,只能把传感器布置在上游节点处.

**结论 2** 若∃t, 使得 $R(f_1,t) \neq R(f_2,t)$ , 且均不 为空, 则可在 $R(f_1,t)$ — $R(f_1,t) \cap R(f_2,t)$ 和 $R(f_2,t)$ —  $R(f_1,t) \cap R(f_2,t)$ 中各取离故障源  $f_1$ 和 $f_2$ 传递时间 最短的一点.

**结论3** 若故障源*f*<sub>1</sub>和*f*<sub>2</sub>的可达子节点完全相同,则可根据传递时间选择传感器布置方法,使故障暂时可分辨.

如图2(b)所示,  $f_1 n f_2$ 的可达子节点都是 $n_1 n n_2$ , 各支路的传递时间标于图中.如果 $f_1 n f_2$ 同时出现故障,并设时间为0,则在时间1到3之间,故障只 传播到 $n_1$ ,此时故障是可分辨的,但在时间3以后, 故障传播到 $n_1 n n_2$ ,则不可分辨,  $T_t = 2$ . 然而如 果 $f_1 n f_2$ 不是同时发生的,那么可分辨性也将发生 变化. **结论 4** 若存在节点n, 使得 $n \notin R(f_1, t)$ , 且对  $\forall t, 有n \in R(f_2, t)$ .

如图2(c)所示,节点n可以保证 $f_1$ 和 $f_2$ 的永久可分辨.



Fig. 2 Several common cases of fault propagation

# **4.3** 布置传感器的实际选择方法(Actual selection method of sensor location)

由于多个故障发生的时间是随机的,所以不可 能一劳永逸地将每种情况下的故障传播现象分析清 楚,并讨论传感器布置方式对可检测性和可分辨性 的影响.在实际中,往往通过沿着支路的正向推理 来进行.参考动态贝叶斯网的推理算法<sup>[10]</sup>,以下给 出动态SDG的推理及选择传感器布置方案的一个方 法,步骤如下.

1) 将故障源节点*f<sub>i</sub>*加入到证据节点集合*E*和可 达节点集合*R<sub>i</sub>*. 系统推理时间*T<sub>sus</sub>置零*.

 判断检测证据节点集合是否为空.如果为空, 结束,否则继续.

3) 将证据节点中的一步正向可达集合中的节点 加入到证据节点的可达集合*R<sub>E</sub>*中,并更新它们的故 障检测时间*T<sub>D</sub>*(*f<sub>i</sub>*)(支路起始节点的故障检测时间 加上支路上的传递时间).

4) 求 $R_E$ 中节点的故障检测时间中最小者 $T_k$ , 以及在 $T_k$ 时刻的待更新节点集合 $N_{T_k}$ .

5)  $T_{sys} = T_{sys} + T_k$ ,并对 $N_{T_k}$ 中的所有节点进行 正向推理.

6) 将所有的更新节点集合N<sub>Tk</sub>增加到证据节点 集合E和可达节点集合R<sub>i</sub>中.

7)如果某一个证据节点的一步可达节点都已更 新状态,则从E中删除该节点.

8) 在可达节点集合 $R_i$ 中布置传感器可保证故障i的可检测性,在 $R_i \cup R_j - R_i \cap R_j$ 中布置传感器可保证故障i和j的可分辨性(求初次可分辨时,只需取使 $R_i$ 和 $R_i$ 不同的节点即可).

9) 若有新的故障发生,则把新的故障源节点加入到证据节点集合*E*中,并把*T<sub>sys</sub>*置为当前时刻.转到2).

在实际应用中,传递时间并不准确,这将影响通 过算法得到的传感器布置方案的正确性,但是由于 通常设定一定的可检测度和可分辨度,而不是简单 地满足最低要求,因此所取得的结果即可稍有偏差, 也是符合实际需要的.

#### 5 应用实例(Case study)

以一个泵系统为例<sup>[11]</sup>,其节点含义见表1,其动态SDG如图3(a)所示,支路上标明支路的传递时间. 通过上面的算法可以得出每个故障传播的过程,例如*x*<sub>2</sub>的故障传播到各个节点的时间如图3(b)所示.

求x<sub>4</sub>和x<sub>12</sub>的故障可达节点集合,在201 s之前不 交,因此是可分辨的.在201 s之后,x<sub>18</sub>和x<sub>19</sub>上也检 测到故障,它们不能分辨两个故障,但故障可达集合 中的其他节点都可分辨.

由于SDG的对称性,分析时可以只考虑一半 (图3(c)).如果 $x_1$ 和 $x_4$ 同时发生故障,它们的故障 可达集合除了 $x_2$ 和它们自身以外是相同的,所以可 以在 $x_2$ 和 $x_3$ 放置传感器,在100 s后可分辨两个故障,  $x_2$ 的检测时间为100 s,  $x_3$ 的检测时间是1 s.

考虑x3和x5同时发生故障的情形,如果它们本身

都是不可测的,则如果不考虑故障传递时间,它们是 不可分辨的,因为它们的后继节点完全相同.但考虑 了故障传递时间后,则可根据*x*<sub>6</sub>,*x*<sub>7</sub>,*x*<sub>9</sub>和*x*<sub>18</sub>的检测 时间分辨出来,*x*<sub>6</sub>和*x*<sub>7</sub>的检测时间之差为*x*<sub>3</sub>到*x*<sub>5</sub>的 故障传递时间,*x*<sub>9</sub>和*x*<sub>18</sub>的检测时间之差为两个故障 到*x*<sub>19</sub>的传递时间之差.

	表	1	泵系统的节点含义
Table	1	Sig	gnifications of the nodes in
		41-	

the pump system				
节点含义	节点编号			
水源	1			
闸门	2, 5, 10, 13			
泵	3, 11			
电源	4, 12			
流量转换器	6, 14			
流量控制阀	7, 15			
手动或气动阀	8, 16			
气动阀	9, 17			
接收装置	18, 19			



日5 11 从小兆时外心550 快至次做件付油之任

Fig. 3 Dynamic SDG model of a pump system and the fault propagation process

#### 6 结论(Conclusions)

SDG模型在大型系统的描述中有很多优势,但 其定性、静态的特点限制了它的应用.在实际的系 统中,定量、动态特性的描述表现为传递时间、增 益、趋势、过程、概率等多种因素,本文只将传递 时间引入模型描述,形成动态SDG模型,可以用来 近似地分析故障传播的规律.同时,由于考虑了故 障的动态传播,所以传感器布置方案更接近于实 际,可以根据可检测性和可分辨性等要求进行选 择.特别是当故障源种类多样,多重故障发生的概 率较高时,可以针对各种可能性利用正向推理进 行分析.由于对信息的掌握有偏差,因此这种方法 并不精确,但已能够满足实际需求,为决策者提供 理论依据.

#### 参考文献(References):

- IRI M, AOKI K, O'SHIMA E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1979, 3(1-4): 489 – 493.
- [2] 杨帆, 萧德云. SDG 建模及其应用的进展[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 767 774.
  (YANG Fan, XIAO Deyun. Review of SDG modeling and its application[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 25(3): 330 334.)
- [3] RAGHURAJ R, BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Locating sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria[J]. American Institute of Chemistry Engineering Journal,

1999, 45(2): 310 - 322.

- [4] BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Design of sensor network based on the SDG of the process for efficient fault diagnosis[J]. *Industrial* and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(4): 999 – 1019.
- [5] BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(2-7): 735 – 741.
- [6] BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Comprehensive design of a sensor network for chemical plants based on various diagnosability and reliability criteria, part 1: Framework[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(7): 1826 – 1839.
- [7] BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Comprehensive design of a sensor network for chemical plants based on various diagnosability and reliability criteria, part 2: Applications[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(7): 1840 – 1860.
- [8] 杨帆, 萧德云. 故障检测的可靠性描述及传感器分布优化算法[J]. 应用科学学报, 2006, 24(2): 125 – 130.
   (YANG Fan, XIAO Deyun. Reliability description of fault detection and optimization algorithm of sensor location[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 24(2): 125 – 130.)

- [9] IRI M, AOKI K, O'SHIMA E, et al. A graphical approach to the problem of locating the origin of the system failure[J]. *Journal of Operations Research*, 1980, 23(4): 295 – 311.
- [10] 胡玉胜. 有环·动态Bayes网络研究及其应用[D]. 北京: 北京科技 大学, 2001.
   (HU Yusheng. The research and application of cyclic and dynamic

Bayes network[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2001.)

[11] KOKAWA M, MIYAZAKI S, SHINGAI S. Fault location using digraph and inverse direction search with application[J]. *Automatica*, 1983, 19(6): 729 – 735.

作者简介:

**杨** 帆 (1980—), 男, 清华大学自动化系博士研究生, 主要从 事安全评估、故障诊断研究, E-mail: yang-f98@mails.thu.edu.cn;

**萧德云** (1945—), 男, 清华大学自动化系教授、博士生导师, 主要从事辨识建模、故障诊断、混合动态系统、多传感器融合、计算 机控制系统、城市智能交通系统等领域的教学和科研工作, E-mail: xiaody@tsinghua.edu.cn.

#### 下期要目

基于新模型的多目标Memetic算法及收敛分析 ······	魏静萱,	王宇平
Hammerstein-Wiener模型最小二乘向量机辨识及其应用 ······ 宋海鹰,	桂卫华,	阳春华
两种连接形式的拖挂式移动机器人路径跟踪控制 苑 晶,	黄亚楼,	孙凤池
脉冲切换系统的鲁棒 $H_{\infty}$ 动态输出反馈控制 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	李 娇,	刘玉忠
不确定双向联想记忆神经网络的稳定性分析关焕新,	王占山,	张化光
网络控制系统的 $H_{\infty}$ 状态反馈控制器设计	郭亚锋,	李少远
线性不确定系统的 $H_{\infty}$ 状态反馈鲁棒重复控制 ····································	,余锦华,	何勇
基于支持向量机的参数自整定PID非线性系统控制 ······	刘 涵,	刘 丁
基于多近似模型的交互式遗传算法	周勇,	郭一楠
测量数据丢失的随机不确定离散系统的鲁棒H2状态估计 · · · · · · · · · · · 王 武,	杨富文,	詹耀清
基于LMI与相对测量转换的深空飞行器编队控制李 鹏,	崔平远,	崔祜涛
基于混沌遗传算法的柔性机械手滑模控制器优化设计 张袅娜	张德江,	冯 勇
具有快变时延和丢包的网络控制系统镇定	俞立,	周明华
压电迟滞系统的3阶滑模跟踪控制器设计	王 伟,	刘向东
离散广义系统的严格耗散分析与控制李 琴,靖 新,	张庆灵,	衣 娜
运动控制中的鲁棒自适应死区补偿	王中华,	张 勇