

文章编号: 1001-0920(2009)07-1001-06

控制系统的 SDG 模型描述及故障传播分析

杨帆, 萧德云

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 讨论了控制系统的符号有向图(SDG)模型描述和故障在控制系统中的传播方式及分析方法. 该方法按控制回路信息流向的正反推理, 分析初始和稳态响应的故障传递规律, 通过基本单元的组合可以扩展到各类控制系统的 SDG 描述和故障传播分析. 以锅炉水位控制系统为例, 验证了该方法的有效性.

关键词: 符号有向图; 控制系统; 故障传播; 故障分析

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A

SDG based model description and fault propagation analysis in control systems

YANG Fan, XIAO De-yun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: XIAO De-yun, E-mail: xiaody@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Signed directed graph (SDG) based model description of control systems as well as the fault propagation ways and analysis methods in control systems are presented. This method analyzes the initial and steady state responses according to the two directions of information flow in control loops, and can be expanded to the SDG model description and fault propagation analysis of various control systems by the combination and connection of several basic elements. The boiler water level control system is illustrated as a case study to validate the effectiveness of the method proposed.

Key words: Signed directed graph; Control system; Fault propagation; Fault analysis

1 引言

符号有向图(SDG)用节点和支路构成图模型来描述复杂过程系统中变量之间的互相影响关系,适用于系统中故障的传播分析.

20 世纪 70 年代以来,不少学者针对其模型和推理进行研究,取得了一系列的成果,并将其应用于故障诊断和安全评价等方面. Iri 等^[1,2]给出了 SDG 的数学定义及其在故障诊断中的应用. 利用 SDG 模型,通过图上相容通路的搜索寻找故障源及传播路径^[3-5]. 但是,当回路存在时,这种搜索可能会遇到问题,造成结果不唯一. 对于非控制回路的情形,文献^[6,7]已提出解决方法,但控制回路的情形比较复杂. 在控制系统中,人为的控制作用可能会导致故障传播的一些特殊性质,如阻断或改变故障传播路径. 特别是有效的控制作用将产生被控变量的补偿响

应,因而虽在被控变量上显示为正常,但事实上导致了其他变量的偏差,使基于相容通路的简单推理不能得到正确的结果^[1]. 究其原因在于,以静态形式描述的 SDG 模型无法完整表达动态特性. 因此,必须针对控制系统,研究其动态特性在 SDG 模型中的描述方法以及故障传播规律在 SDG 中的表现形式和分析方法.

Maurya 等^[8,9]从数学方程角度精确地描述了将微分方程组(DE)和代数方程组(AE)转化为 SDG 的建模方法,提出了用 SDG 分析其初始响应和最终响应的方法. SDG 模型是系统初始响应的定性模型,在稳态情形下,基于 SDG 的分析会遇到一些问题,如产生不唯一解,或与初始响应的传播通路不同等,其本质原因在于回路的作用. 对于过程系统中不可缺少的控制环节,因其作用的特殊性和典型性,描

收稿日期: 2008-07-04; 修回日期: 2008-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60736026); 中国博士后科学基金项目(20080440386).

作者简介: 杨帆(1980—),男,北京人,博士,从事大规模复杂系统的建模、故障分析和安全评价的研究; 萧德云(1945—),男,福建仙游人,教授,博士生导师,从事辨识建模、故障诊断等研究.

述形式和推理结果集中体现了上述问题. Maurya 等^[9,10]研究了控制回路的描述,定义了外部干扰、传感器偏移、控制器失灵等故障类型的表示方法,可将微分代数方程组(DAE)描述的控制系统转化为SDG模型.

本文将在总结典型控制系统SDG模型描述方法的基础上,拓展成为一般方法,通过基本单元的SDG模型组合,构成复杂控制系统的SDG模型,并利用SDG模型分析各类控制系统的故障传播规律,特别是稳态下的传播规律.

2 基本控制系统的SDG模型描述及故障传播分析

首先总结SDG模型的基本概念和故障传播分析方法,再分析基本控制系统中的故障传播规律.

2.1 SDG模型描述

SDG模型把过程变量表示成节点,用连接节点的支路表示变量之间的因果影响关系.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.若发生了局部的故障,就会直接体现在某个或某几个节点的取值偏差上,并沿着相容支路构成的通路传播开来.SDG模型中的每个节点根据阈值分为“+”、“-”和“0”三种状态,分别表示偏大、偏小和正常;支路符号用“+”和“-”分别表示变量之间的正负影响关系.借助这些符号以及它们所构成的相容通路,SDG模型清楚地描述了故障在系统中的传播关系.

当故障发生时,状态变量的响应有3个阶段:初始响应、中间响应和最终响应.在复杂过程系统中,中间响应非常复杂,不便于分析,一般只关心初始响应和最终响应这头尾两个阶段.初始响应是指变量在有外部输入后最初体现的响应,为分析方便,可将输入和外部干扰设为阶跃函数以表示突然的变化.当系统表示为DAE时,AE部分的SDG模型在支路上的传播是即时的,不需要时间;而DE部分则需要传递时间.所以当AE所对应的最佳匹配唯一时,将AE部分的支路长度定义为0,将DE部分的支路长度定义为1,则初始响应就是通过最短路径在所有变量上出现的非零响应^[8].对于稳定的系统,最终响应是一种稳态响应,是在动态特征结束后的稳态值,因此只需分析令DE或DAE中的DE部分为零后得到的AE.当方程组与状态变量的最佳匹配唯一时,可通过SDG上的通路传播来分析最终响应;当最佳匹配不唯一时,一般是不能通过通路传播来分析的.只能将各种情况一一罗列,再通过构造冗余方程和模型性质分析等方法将虚假解和不稳定解除^[11].但也有特殊情况,若其中一个最佳匹配对应

的SDG仅包含负环,则仍可通过SDG的通路来分析最终响应^[8].

2.2 PID控制系统的SDG模型描述

控制系统的原理分为经典控制和现代控制两类.现代控制是基于状态方程或矩阵的控制方法,这是SDG建模中最容易处理的,只需以状态变量和输入、输出变量作为变量节点,按照矩阵元素值取其符号,便构造出了相应的SDG模型.当系统为高阶时,可近似为带延迟的一阶系统,构造SDG模型的方法同前,只是延迟要在赋予了故障传递时间的动态SDG模型中体现^[12].现代控制方法虽然描述准确,但在实际应用中最常用的还是经典控制方法,其中最基本的是PID控制.

PID控制回路如图1(a)所示,被控变量为 x ,控制变量为 q ,设定值为 r .将设定值与被控变量的检测值 x_m 相比较的偏差量 e 输入控制器,控制器的输出 u 加到执行器,再作用到控制对象上,组成一个闭环.由于被控变量还受系统其他干扰的影响或其他变量的耦合,又加入了干扰变量 x_j 和干扰通道.假设被控对象和执行器都是线性放大器,即比例环节,放大倍数分别为 k 和 k_v ,均设为正.设PID控制器的控制规律为

$$\begin{cases} u = u_P + u_I + u_D, \\ u_P = k_c e, \\ (d/dt) u_I = k_c e / \tau_I, \\ u_D = k_c \tau_D (de/dt). \end{cases} \quad (1)$$

其中: k_P 为比例系数(设为正), τ_I 和 τ_D 分别为积分和微分时间常数.

根据PID控制规律列写这个系统的DAE如下:

$$x_m = x + x_{mb}, \quad (2)$$

$$e = r - x_m, \quad (3)$$

$$u_P = k_c e, \quad (4)$$

$$(d/dt) u_I = k_c e / \tau_I, \quad (5)$$

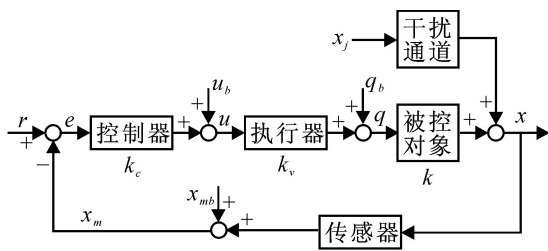
$$u_D = k_c \tau_D (de/dt), \quad (6)$$

$$u = u_P + u_I + u_D + u_b, \quad (7)$$

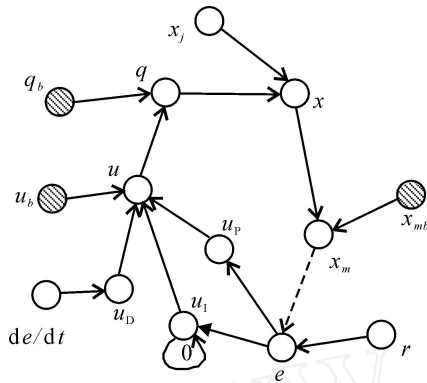
$$q = k_v u + q_b, \quad (8)$$

$$x = kq + a_j x_j. \quad (9)$$

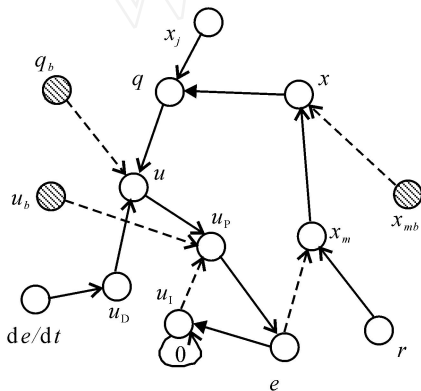
其中AE部分的各个方程与各个变量之间有两组最佳匹配,如表1所示;对应的SDG模型见图1(b)和1(c),其中带阴影的节点是偏差节点.需要说明的是,图中的 de/dt 作为一个单独的节点,虽然它与 e 之间只差一阶导数关系,但形式和作用不尽相同.在实际应用中,往往将所有节点的扰动都设为一个阶跃函数,SDG模型只用来分析变化趋势,因此 de/dt 也可用 e 代替,但只有在分析初始响应时起作用.此时, de/dt 对 u_D 的作用与 e 对 u_P 的作用一样,只是持



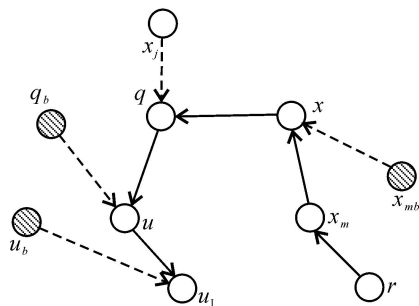
(a) 控制系统框图



(b) 最佳匹配1对应的SDG模型



(c) 最佳匹配2对应的SDG模型



(d) 稳态SDG模型

图 1 PID 控制回路及其 SDG 模型

续时间短暂。

由于式(9)表示被控对象,如果从概念出发,支路只应该从 q 指向 x ,表示因果关系,于是排除了图

1(c) 的情形.况且当它表现出一定的动态特性时,例如等号左边出现了 dx/dt ,则这一方程变为 DE,因此最佳匹配唯一,图 1(c) 的情形也就不存在了(当然,因为图 1(b) 和 1(c) 都只含有负环,所以分析初始响应的结果相同).用图 1(b) 可分析初始响应,例如当调高设定值 r 时, e, u, u, q, x, x_m 都会在瞬时变为“+”,而 u_1 也会逐渐变为“+”,因为只有 e 到 u_1 的支路是 DE 支路.从物理意义上看,这个传递路径是与实际的信息流向吻合的,因此可以直接根据系统的方框图建立 SDG 模型并分析初始响应.

表 1 代数方程与变量的最佳匹配结果

| 方程 | 最佳匹配 1 的匹配变量 | 最佳匹配 2 的匹配变量 |
|-------|--------------|--------------|
| 方程(2) | x_m | x |
| 方程(3) | e | x_m |
| 方程(4) | u_p | e |
| 方程(6) | u_D | u_D |
| 方程(7) | u | u_p |
| 方程(8) | q | u |
| 方程(9) | x | q |

2.3 PID 控制系统的故障传播分析

最终响应的情形与此不同,方程(5)的左边为 0,或者从最终响应的概念也可得知,稳态时 $e = 0$.故 u_p 和 u_D 都为 0,所以上述 DAE 将转化为

$$x_m = x + x_{mb}, \tag{10}$$

$$x_m = r, \tag{11}$$

$$u = u_1 + u_b, \tag{12}$$

$$q = k_v u + q_b, \tag{13}$$

$$x = k q + a_j x_j. \tag{14}$$

于是最佳匹配就唯一了,对应的 SDG 见图 1(d),这正是图 1(c) 的简化.故障传播路径只有两条: $r \rightarrow x_m$

$x \rightarrow q$ 和 $x_j \rightarrow q \rightarrow u \rightarrow u_1$.当设定值 r 增大时,只要控制作用有效,则稳态时, x_m, x, q, u 和 u_1 都会增大;但如果只是 x_{mb} 增大,则 x_m 不受影响,而 x 会增大,这就是控制回路的作用.可见,图 1(c) 的这一情形也是有意义的,它反映了稳态情形的信息传递关系.从物理意义上来说,当控制回路起作用时,被控变量由设定值决定,而控制器就像一个增益无限大的放大器,其输入为零,输出由需求决定,这个信息传递关系恰是表现为与实际信息传递关系相反.因此可以按照方框图上信息流向相反的方向,从设定值 r 出发,到控制器输出 u 终止,建立 SDG 模型,并以此分析稳态响应.

以上是 PID 控制,如果没有 D 作用,则将图 1(d) 删去 de/dt 以及 u_D 所关联的节点和支路即可,稳态响应仍如图 1(d) 所示.由于 I 控制作用,某些变

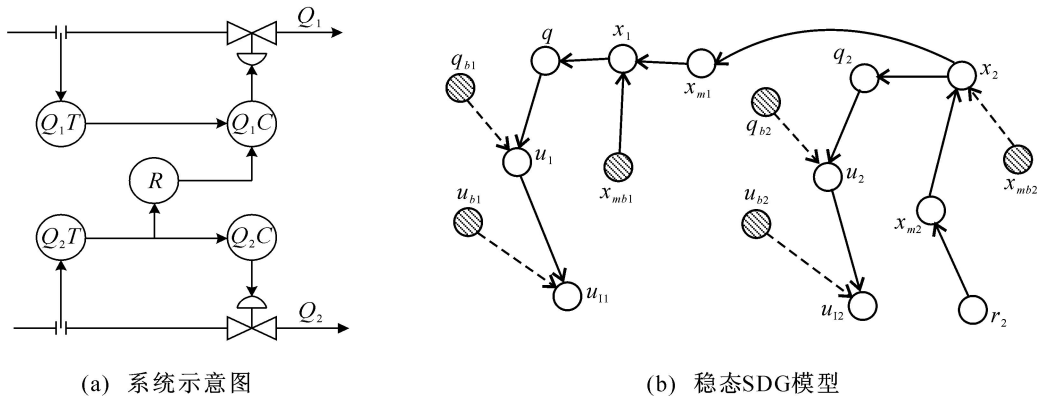


图2 双闭环比值控制系统及其SDG模型

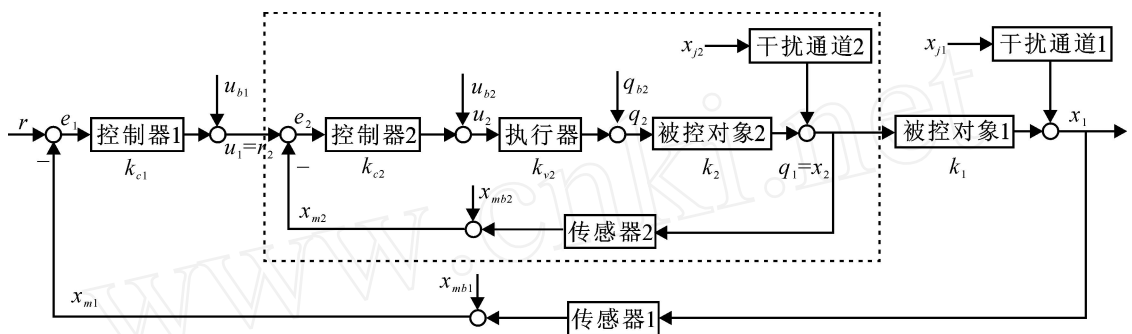


图3 串级控制系统框图

量表现出补偿响应,例如 x_m 相对于 x_{mb} 的偏差响应只体现在初始阶段. 如果没有I作用, 仅仅为P控制, 则稳态响应并不能使得 $e = 0$, 是有差控制, 因此需删去图1(d)中 u_1 所关联的节点和支路, 初始响应和稳态响应都按该图进行分析.

以上是控制回路起作用的情形, 可反映传感器、控制器和执行器三者的输出偏差以及外部变量的偏差对控制变量影响的故障传递规律. 当控制回路不起作用时, 一般有两种情况: 1) 结构性故障, 如传感器、控制器、执行器失灵, 造成部分支路断开, 于是控制回路成为开路; 2) 过大的偏差, 导致控制器饱和, 此时的I控制作用不能消除残差, 因而最终响应并不能使 $e = 0$, 类似于只有P控制作用的情形. 文献[7]对这些情形作了相应的论述, 但因本质上都是开环, 故可按打开回路后的情形进行分析.

3 复杂控制系统的稳态SDG模型描述及故障传播分析

有了上述PID控制回路的分析, 其他控制方法和复杂的控制系统也可以类似地转化为SDG模型, 只是在处理各种故障情形时需在结构上(如支路增减、符号变化)作些调整. 由于初始响应与方框图是一致的, 在此不作分析, 只分析稳态响应.

例如图2(a)所示的双闭环比值控制系统, 控制目标是使 Q_1 为 Q_2 的 R 倍, 实现方法是将 Q_2 的 R 倍作为 Q_1 的设定值. 由于两个闭环是单独设定的, 其

间只通过比值联系, 稳态的SDG模型就是两个单回路系统稳态SDG模型的组合, 见图2(b).

串级控制也是单回路情形的扩展, SDG模型既可通过前述的方程与变量匹配的方法求得, 也可通过单回路情形的适当组合来得到. 例如图3的串级控制系统的稳态SDG模型, 其中外环的控制变量 u_1 同时作为内环的设定值 r_2 , 这样将两个单回路控制系统的SDG模型联系到一起便得到了图4的模型, 其中支路方向也是与方框图中的信息流量相反. 可见, 有效的内环控制可以在稳态下将作用在内环上的故障限制在内环里, 而对外环没有影响.

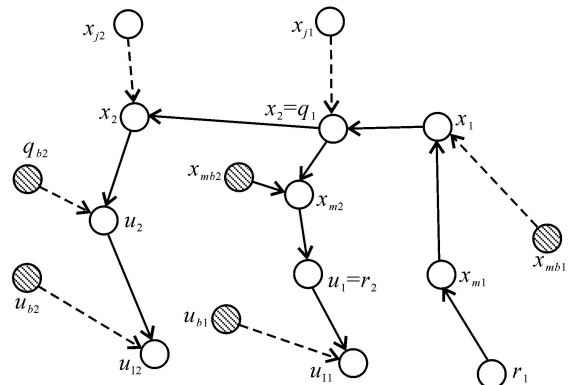


图4 串级控制系统的稳态SDG模型

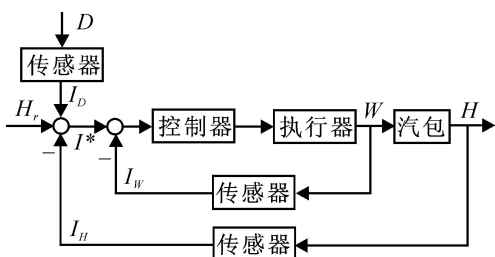
类似的控制系统还有均匀控制等, 对它们进行稳态响应分析时, 均可由单回路控制系统的SDG模型组合而成, 其组合方式根据具体的控制方法决定,

有时需借助代数方法辅助完成^[11]. 该 SDG 模型的支路方向与方框图的信息流向相反, 且均为有向无环图.

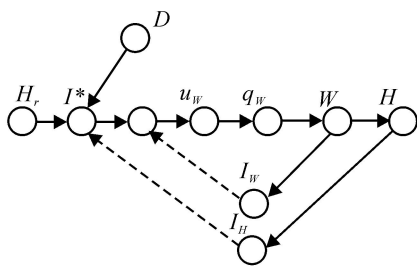
4 实例分析

在锅炉系统中, 水位的三冲量控制被广泛使用, 其中主要的被控变量是水位. 考虑到蒸汽流量和给水流量的影响, 因此这个控制系统实质上是一个前馈 - 串级控制系统, 如图 5(a) 所示^[13]. 其中: H 表示水位; W 表示基本扰动 —— 给水量; D 表示负负荷扰动 —— 蒸汽流量; H_r 为水位的设定值; I_H, I_W 和 I_D 分别为水位、给水量和蒸汽流量的检测值; 外环的偏差 I^* 作为给水量设定值.

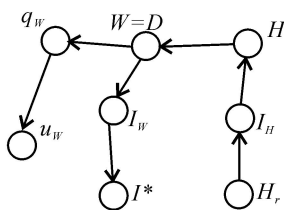
初始响应的 SDG 模型如图 5(b) 所示, 可从 DAE 或方框图直接得出, 反映了初始阶段的故障影响. 但是当控制作用引入后, 经过一个复杂的中间过程, 一些偏差逐渐恢复到了正常范围. 如果控制作用是有效的, 则故障的影响就有可能被阻断而不再继续传播. 但对于某些故障, 情况又有所不同, 因为控制作用改变了故障传播通路. 根据前述方法, 类似于串级控制系统的情形, 建立稳态 SDG 模型的主干部分, 如图 5(c) 所示. 显然, 它与图 5(b) 有很大区别,



(a) 系统框图



(b) 初始响应SDG模型



(c) 稳态的SDG模型

图 5 三冲量控制系统及其 SDG 模型

传播通路的方向几乎是相反的. 与图 1 类似, 可将其他故障原因作为节点加入图 5(c) 中, 于是便可据此判断稳态故障传播通路. 例如检测给水量传感器若有偏差, 在初始阶段会直接影响到水位 H , 在水位检测值 I_H 等一系列变量上体现偏差, 这在图 5(b) 上可以正向推理得到; 但是系统稳定以后, 由于内环的控制作用, 故障被限制在内环以内, 而外环的水位 H 将恢复到正常值, 外环上的其他变量也都不表现故障, 这与图 5(c) 的分析结果一致.

需注意的是, 模型描述要注意实际需求, 并不是越精确越好. 基于 SDG 模型的定性分析一般不去分析过于细致的内容, 所以不一定要把每个环节都表示出来. 本例的三冲量控制若放在整个系统中, 只是一个很小的环节, 因此一般只构建水位的单回路控制系统即可说明主要问题.

5 结 论

本文从理论到实际分析了以反馈为主要思想的经典控制系统的 SDG 模型描述, 其稳态描述一般可以转化为单回路控制的扩展和变型. 由于人为的控制作用, 控制系统在初始和稳态响应阶段的表现有很大不同, 当控制系统转化为 SDG 模型时, 稳态下故障传播的方向不同于初始响应的故障传播方向. 对于单回路控制系统而言, 初始响应的 SDG 与回路中的信息流向相同, 仍是回路形式, 可以根据方框图直接建模和推理; 而稳态 SDG 模型是有向无环图, 其主干为设定值 测量值 被控量 控制量 控制器输出, 与信息流向正好相反, 可借此进行稳态响应分析. 上述规律是基于反馈的控制系统的一般规律, 更为复杂的控制系统也可由单回路系统对应的 SDG 环节组合而成. 在分析实际问题时, 不用为系统列写所有的方程, 而是很方便地将局部控制系统的 SDG 纳入整个系统中.

参考文献(References)

[1] 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] Iri M, Aoki K, O 'Shima E, et al. A graphical approach to the problem of locating the origin of the system failure [J]. J of the Operations Research, 1980, 23(4): 295-311.

[3] Shiozaki J, Matsuyama H, O 'Shima E, et al. An improved algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process [J]. Computers and Chemical Engineering, 1985, 9(3): 285-293.

[4] Zhang Z Q, Wu C G, Zhang B K, et al. SDG multiple fault diagnosis by real-time inverse inference [J].

- Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87 (2): 173-189.
- [5] 杨帆, 萧德云. 概率 SDG 模型及故障分析推理方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(5): 487-491.
(Yang F, Xiao D Y. Probabilistic SDG model and approach to inference for fault analysis[J]. Control and Decision, 2006, 21(5): 487-491.)
- [6] Oyeleye O O, Kramer M A. Qualitative simulation of chemical process systems: Steady-state analysis [J]. AIChE J, 1988, 34(9): 1441-1454.
- [7] 王强. 基于 SDG 的控制系统有效性方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
(Wang Q. Research on dynamic description and inference approaches in SDG model-based fault analysis [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.)
- [8] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: Algorithms and analysis [J]. Industrial and Chemical Research, 2003, 42(20): 4789-4810.
- [9] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: Control loops and flowsheet analysis [J]. Industrial and Chemical Research, 2003, 42(20): 4821-4877.
- [10] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A signed directed graph-based systematic framework for steady-state malfunction diagnosis inside control loops [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(6): 1790-1810.
- [11] 杨帆. SDG 模型在故障分析中的动态描述与推理方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
(Yang F. Research on dynamic description and inference approaches in SDG model-based fault analysis [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.)
- [12] Yang F, Xiao D Y. Approach to fault diagnosis using SDG based on fault revealing time [C]. Proc of Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. NY: IEEE, 2006: 5744-5747.
- [13] 金以慧. 过程控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
(Jin Y H. Process control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.)

(上接第 1000 页)

参考文献 (References)

- [1] Sadayuki Tsugawa. A cooperative driving system with automated vehicles and inter vehicle communications in demo 2000 [C]. IEEE Proc of Intelligent Transportation Systems. Oakland, 2001: 918-923.
- [2] Radoslav Natchev, Ralf Heidger. Trajectory computation for tracker evaluation and linkage processing [C]. IEEE Proc of ESAV. Capri, 2008: 248-253.
- [3] Swaroop D V A H G, Rajagopal K R. Intelligent cruise control systems and traffic flow stability [C]. Transportation Research. Berkeley, 1999: 329-352.
- [4] Tae Soo No, Kil To Chong, Do-Hwan Roh. A Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2001, 50(3): 116-124.
- [5] Lydie Nouveliere, Said Mammam. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique [J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(3): 943-945.
- [6] Zhu T J, Zheng H Y. Application of unscented Kalman filter to vehicle state estimation [C]. Int Colloquium on Computing, Communication, Control and Management. Washington DC, 2008, 2: 135-139.
- [7] Liu X H, Karl Hedrick J. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons [C]. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf Proc. Oakland, 2001: 625-630.
- [8] Chol S B, Hedrick J K. Robust throttle control of automotive engines: Theory and experiments [J]. ASME of DSMC, 1996, 118(4): 92-98.
- [9] Kun Li, Ioannou P. Modeling of traffic flow of automated vehicles [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(3): 99-113.
- [10] 江青茵. 无辨识自适应控制预估算法及应用 [J]. 自动化学报, 1997, 23(2): 160-166.
(Jiang Q Y. Predictive algorithms of identification free algorithms for adaptive control and its application [J]. Acta Automatica Sinica, 1997, 23(2): 160-166.)
- [11] Stewart G W. Introduction to matrix computations [M]. New York: Academic Press, 1973.
- [12] Fu M Y, Jiu H, Ruan Y B Li. A new kind of robust design method of intelligent vehicle lateral control [C]. IEEE Proc of Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004, 3: 2438-2442.