



组合概率信息的复杂动态 系统层次故障检诊方法

葛 彤

(上海交通大学水下工程研究所 上海 200030)

邓建华

(西北工业大学 120 信箱 西安 710072)

摘 要 基于对系统故障的功能性特征的考虑和对子系统模态的精确定义,提出一种构造系统诊断用的层次模型的方法,并由此提出一种在此模型中层次地推进检诊过程的方法,基本诊断手段采用 de kleer 的 GDE 通用诊断推理机. 层次的诊断方式极大地提高了诊断的效率,子系统模态的适当定义保证了层次间界限分明,消除了诊断算法在不同层次间可能的重复,产生了简炼的层次间概率传递公式.

关键词 故障检测与诊断, 功能层次模型, 层次检诊方法.

1 引 言

非层次诊断方法(如 J. de kleer 的 GDE 通用诊断推理机系列理论^[1,2]),用于如飞行器一类包含大量元件的复杂动态系统时诊断效率很低. 对于此类系统,必须采用层次诊断方法以提高效率,这就提出了如何构造系统的层次模型以及如何利用此模型推进检诊过程的问题. 只有很少的文献涉及到这些问题^[3,4],并且它们对系统层次模型的构造都没有提出明确的准则,因而其模型层次是含糊的. 这不仅使检诊工作在各层次上可能出现重复,也使概率信息在不同层次间的简洁传递难以实现. 为此,本文从故障的功能性特征出发对子系统及其模态进行严格定义,提出一套严格的系统层次模型构造方法和利用此模型层次推进检诊过程的方法,用于解决这些问题.

2 功能层次模型

被检诊系统(以 OBJ 表示)的最小构成单元为元件,它是可替换的最小单元. 由此可定义子系统的概念.

定义 1. (1)元件是子系统;(2)由子系统组成,具有一定内部结构并完成一定功能

的 OBJ 的一部分是子系统; (3) 只有满足以上两点才是子系统.

显然, 元件和 OBJ 都是子系统.

子系统具有三个要素: 终端变量、组件和内部结构. 子系统通过终端变量和 OBJ 其它部分相互作用, 终端变量形成了子系统的边界, 边界以外的事件(包括终端变量的取值)称为子系统的外部事件, 边界以内所有元件的集合称为子系统的域. 子系统可由更低层次的子系统组成, 这些更低层次的子系统称为高层次子系统的组件. 以 $COM(A)$ 表示 A 的组件集, 应有下列关系: $COM(A)$ 中各子系统的域是 A 的域的一个划分. 组件按一定方式相互作用形成高层次子系统, 这种相互作用的方式即为高层次子系统的内部结构, 以 $stru(\cdot)$ 表示.

子系统的存在总是为了完成某些功能的, 并且在不同的条件下功能不同. 由此可提出子系统模态的概念.

定义 2. 子系统 A 的模态集 $Mod(A)$ 是如下集合:

(1) 对于元件 A , $Mod(A)$ 是一个基本事件空间, 其中每一元素对应 A 的一种功能.

(2) 如果 A 不是元件, 且对于任意 $A_i \in COM(A)$ 定义了 $Mod(A_i)$, 则 $Mod(A) = \{A(j) | j=1, 2, \dots\}$ 是笛卡尔乘积 $\prod_{A_i \in COM(A)} Mod(A_i)$ (此集合也为一基本事件空间) 的一个划分, 并且对于任意的 $C_1, C_m \in A(j)$ ($A(j)$ 为 $Mod(A)$ 中任一元素) 和 A 的外部事件 Φ , 有

$$P(\Phi | C_1) = P(\Phi | C_m). \quad (1)$$

式中 $P(\cdot)$ 为概率符号.

$Mod(A)$ 的每一元素称为 A 的一个模态. 设 $COM1$ 为子系统的集合, 那么笛卡尔乘积 $\prod_{A_i \in COM1} Mod(A_i)$ 称为 $COM1$ 的实现集, 记为 $INS(COM1)$, 其任一元素称为 $COM1$ 的一个实现. 实现中各元素的次序是不重要的, 以下本文将其视为普通的集合.

根据以上定义将 OBJ 按组件包含关系划分为多个子系统并形成其相应模态, 即形成一种层次结构, 其最低层为元件, 最高层即为 OBJ 本身.

用来描述子系统功能的模型称为子系统的功能模型, 它是不同模态下子系统对其终端变量提供的约束的总和. 低层子系统的功能模型按某种结构组合成高层子系统的模型, 此模型是和结构有关的, 称为装置模型(device-oriented models), 对其进行抽象, 可形成高层次子系统的功能模型. 以 $mf(A)$ 表示 A 的功能模型, $ms(A)$ 表示 A 的装置模型, 同一子系统随其低层次划分不同可有多个装置模型, 分别以 $stru(ms(A))$ 和 $COM(ms(A))$ 表示 A 的对应于特定装置模型 $ms(A)$ 的内部结构和组件集, 并以“ \rightarrow ”表示映射关系, 则以上关系可表示为

$$ms(A) = \bigwedge_{A_i \in COM(ms(A))} mf(A_i) \wedge stru(ms(A)), \quad (2)$$

$$ms(A) \rightarrow mf(A). \quad (3)$$

这样, OBJ 就以一种多层次、多角度的模型描述出来, 称为功能层次模型.

3 故障检诊策略

故障诊断就是识别系统当前所处元件级实现即各元件模态的过程. 非层次的诊断方法必须同时处理数量巨大的系统可能的元件级实现, 而层次诊断方法则可通过逐次确定

其类别,缩小范围直至元件级的方法极大地提高诊断效率.

利用功能层次模型,在任意时刻 i , 检诊系统动态维护一个 OBJ 的装置模型 m_i , 其中 m_0 对应 OBJ 的功能模型(功能层次模型的顶层), 它可看作具有单组件的装置模型. m_{i+1} 是将 $\text{COM}(m_i)$ 中某组件 A_j 的 $\text{mf}(A_j)$ 代以 $\text{ms}(A_j)$ 得到的, A_j 称为由 m_i 产生 m_{i+1} 的放大组件, $\text{mf}(A_j)$ 和 $\text{ms}(A_j)$ 由功能层次模型提供, 则有

$$m_{i+1} = \left[\bigwedge_{A_i \in \text{COM}(m_i), i \neq j} \text{mf}(A_i) \right] \wedge \left[\bigwedge_{B_k \in \text{COM}(\text{ms}(A_j))} \text{mf}(B_k) \right] \wedge \text{stru}(m_i) \wedge \text{stru}(\text{ms}(A_j)). \quad (4)$$

显然, A_j 的选择标准是其处于故障模态的概率足够大, 而当 $\text{COM}(m_i)$ 中所有元素均不满足此条件时, m_{i+1} 即为 m_i . 这样, 故障检诊策略就由同一模型 m_i 中的诊断机制和产生 $\{m_i | i=0, 1, \dots\}$ 序列的模型递进机制两部分构成.

诊断机制采用通常的 GDE 通用诊断推理机^[2], 它以当前模型 m_i 、当前测量 d_i 和当前候选项集 CAN'_i 为输入, 产生新的候选项集 CAN'_{i+1} . 候选项集 CAN_i 和 CAN'_i 是 $\text{INS}(\text{COM}(m_i))$ 的子集, 其中任一元素称候选项, 并且 CAN_i 中的候选项可解释 $i-1$ 时刻以前的测量, CAN'_i 中的候选项可解释 i 时刻以前的测量. 在时刻 i , 每一候选项对应一概率. 对于候选项 $C_{i1} \in \text{CAN}_i$, 对应概率记为 $P(C_{i1})$, 为 C_{i1} 的先验概率. 对于候选项 $C_{i1} \in \text{CAN}'_i$, 对应概率记为 $P'(C_{i1})$, 为 C_{i1} 的后验概率. 诊断机制根据当前测量 d_i , 利用贝叶斯公式计算 $P'(C_{i1})$.

在 i 时刻, 模型递进机制除了由模型 m_i 按(4)式产生 m_{i+1} 以外, 还由 CAN'_i 产生 CAN_{i+1} . 设 $C_{i1} \in \text{CAN}'_i$, A_j 为由模型 m_i 产生 m_{i+1} 的放大组件, 且 A_j 非元件, C_{i1} 中包含 A_j 的某模态 $A_j(k)$, $A_j(k) = \{C_p(A_j) | p=1, 2, \dots, n\}$, $C_p(A_j)$ 为 $\text{COM}(A_j)$ 的 n 个实现. 当 m_i 扩展为 m_{i+1} 后, C_{i1} 扩展为 CAN_{i+1} 中的 n 个候选项 $C_{(i+1)lp}$, $p=1, 2, \dots, n$, 且

$$C_{(i+1)lp} = (C_{i1} - \{A_j(k)\}) \cup C_p(A_j). \quad (5)$$

根据定义 2 中(1)式, 对任意外部事件 Φ 有

$$P(\Phi | C_p(A_j)) = P(\Phi | C_q(A_j)) (\forall C_p(A_j), C_q(A_j) \in A_j(k)), \quad (6)$$

由此可得

$$P(C_{(i+1)lp} | d_i = v_{ik}) = P(C_{i1} | d_i = v_{ik}) P(C_p(A_j) | A_j(k)), \quad (7)$$

$P(C_{(i+1)lp} | d_i = v_{ik})$ 即可作为 $i+1$ 时刻候选项 $C_{(i+1)lp}$ 的先验概率 $P(C_{(i+1)lp})$.

元件的初始模态概率为系统的先验知识. 本文假设各元件模态转变相互独立, 则因为同一子系统的组件集中各组件的域互不相交, 同一组件集中各子系统模态转变也相互独立. 这样, 由功能层次模型的底层逐层向上, 可求得所有子系统模态及组件集实现的初始概率.

4 举例

考虑图 1 作动器系统 OBJ, 其元件包括作动器 ACT、液压系统 HY、电源 BAT1、BAT2 以及传感器 SEN1、SEN2、SEN3(分别测量液压 p 和电压 v_1, v_2), 则可形成另外两个子系统 A 和 D 如图中所示. 子系统模态划分可如下进行: 所有子系统均包括两个模态, 一个对应正常功能, 另一个对应故障, 其功能未知, 则子系统 OBJ 和 A 的正常模态对

应所有组件均正常的情况,而 D 的正常模态对应 BAT1 和 BAT2 均正常的情况. 设各元件故障模态概率均为 0.1, 诊断过程如表 1 所示, 候选项以其所包含的正常模态集对应的子系统集简单表示, 每一候选项对应一概率, 表中只示出概率最大的前两个候选项. 可以看出, 诊断过程没有进入子系统 D 的内部, 而非层次诊断方法通常将遍历所有元件. 即使对于层次方法, 当没有精确分清各层次时, 各层中的诊断也可能产生相应的重复.

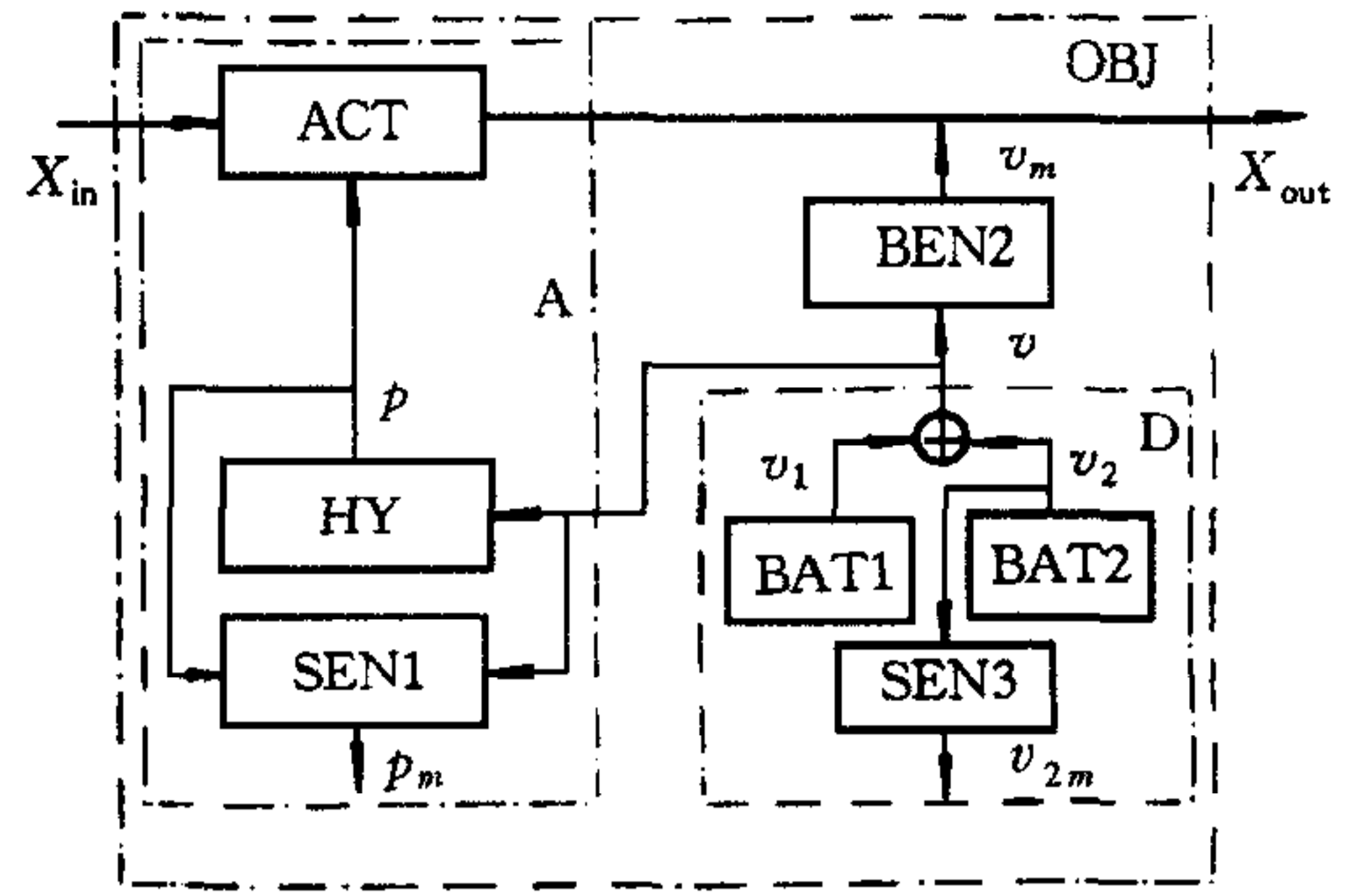


图 1 作动器系统

表 1 诊断过程

i	CAN_i	CAN'_i	$COM(m_i)$
0	$(\{\}, 0.65) (\{OBJ\}, 0.34)$	$(\{OBJ\}, 1) (\{\}, 0)$	OBJ
1	$(\{A\}, 0.56) (\{D\}, 0.27)$	$(\{A\}, 0.9) (\{A, SEN2\}, 0.05)$	A, D, SEN2
2	$(\{ACT\}, 0.42) (\{HY\}, 0.42)$	$(\{HY\}, 0.74) (\{ACT, HY\}, 0.09)$	ACT, HY, SEN1, D, SEN2

参 考 文 献

- [1] de Kleer J, Williams B C. Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 1987, 32(1):97—130.
- [2] de Kleer J, Williams B C. Diagnosis with behavioral modes. In: Proc. IJCAI-89, 1989, 2:1324—1330.
- [3] Ameen A H. Device understanding and modeling for diagnosis. *IEEE Expert*, 1991, 6(2):26—32.
- [4] Franz L, Wolfgang N. Integrating model-based monitoring and diagnosis of complex dynamic systems. In: Proc. IJCAI-91, 1991, 2:1024—1030.

A HIERARCHICAL FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS METHOD WITH PROBABILITY INFORMATION FOR COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

GE TONG

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

DENG JIANHUA

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract First, a method to construct hierarchical models of a system for fault detection and diagnosis (FDD) is presented, based on consideration of the function feature of faults and accurate definition of the conception of mode. Second, a hierarchical FDD strategy is also presented, which uses the constructed models as fundamental descriptions of the system, and de Kleer's general diagnosis engine (GDE) as the fundamental FDD tool. The hierarchical

scheme can greatly improve diagnosis efficiency. Accurate definition of mode makes the system's hierarchies clear, prevents the algorithm from redundancy and produces compact probability transmission formulas.

Key words Fault detection and diagnosis, function-oriented hierarchical model, hierarchical FDD method.

《自动化学报》征稿简则

一、《自动化学报》是中国自动化学会和中国科学院自动化所主办的全国性高级学术期刊,双月刊。在美国出版英译版,季刊。

二、本刊刊载自动化科学与技术领域的高水平理论性和应用性学术论文。内容包括:1.自动控制理论;2.系统理论与系统工程;3.自动化技术及其在国民经济各领域中的创造性应用;4.自动化系统计算机辅助技术;5.机器人与自动化;6.人工智能与智能控制;7.自动控制系统中的新概念、新原理、新方法、新设计;8.自动化学科领域的其它重要问题。

三、本刊以发表论文和短文为主,并不定期地发表综述文章、问题讨论、书刊评论、国内外学术活动信息等。

四、本刊不接受已在国内外期刊上发表(包括待发表)的稿件,但不排除已在国内外学术会议上发表或准备发表的优秀论文(对于此种情况,作者必须在稿件首页脚注说明)。

五、稿件内容的正确性、真实性和可靠性由作者自行负责。

六、来稿一式三份寄北京中关村中国科学院自动化所《自动化学报》编辑部,邮编 100080。编辑部在收稿后一周内寄送回执。作者请自留底稿,稿件概不退还。稿件是否录用一般在半年内通知作者。

七、稿件刊登与否由本刊编委会最后审定,已被接受的稿件需严格按审查意见和《作者加工稿件须知》修改并一式两份寄编辑部。同时与编辑部签订版权协议。

八、编委会有权对来稿作适当文字删改或退请作者修改。文章发表后,按篇酌致稿酬,并赠送 30 本抽印本,在稿件的修改及联系过程中,如果不特殊说明,本刊只与第一作者联系。

九、来稿格式及要求:

1. 来稿要求论点明确,论证严格,语言通顺,文字简练。一般定稿时论文尽量不超过 5000 字;短文不超过 3000 字;其它形式文章视具体内容由编辑部决定。

2. 论文和短文的文章结构请参照本刊近期发表的文章格式,论文摘要限制在 200 字左右,其内容包括研究目的、方法、结果和结论等。文中非标准缩写词(中文或英文)须在首次出现时定义清楚,公式、图、表均须分别用阿拉伯数字全文统一编号。

3. 计量单位一律采用国际单位,即 SI 单位。名词术语必须规范化、标准化,前后一致。外国人名、地名、书刊名称除已通用者外一律用原文。

4. 参考文献按文中出现的先后次序排列。期刊的格式为:[编号]作者(姓在前,如 Wiener L N, Kalman R E, Wang H 等)。文章题目。期刊名(外文可根据国际惯例使用缩写词),年,卷号(期号):页码顺序编排。图书的格式为:[编号]作者(姓在前)。书名。出版地点:出版者,年份,页码顺序编排。正文未引用的文献及未公开发表的文献不得列入参考文献栏目。

5. 文末附英文摘要(内容与中文一致)。摘要包括英文标题、作者姓名和工作单位、文章摘要、关键词。摘要一般不超过 250 个单词。

6. 来稿请尽可能打印。打印稿请用四号字,行间空距不小于 7 毫米。手写稿件请用 20×20 标准稿纸正楷抄写,但其中外文部分必须打印,字体必须工整清晰。文中符号、大小写等必须清楚。