

文章编号: 2095-4980(2019)02-0227-07

## 基于 CBR 和 FTA 的地面站接收系统故障诊断方法

陈 丹, 胡 涛, 王建涛, 蒋 腾

(解放军战略支援部队信息工程大学 数据与目标工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对卫星地面站接收系统中基于案例推理(CBR)中案例库不完整和基于故障树分析(FTA)中计算量复杂等问题, 提出一种基于 CBR 和 FTA 联合故障诊断法。基于二次检索策略进行改进, 解决案例推理检索效率慢的问题; 对于案例库中检索不到的故障, 再利用故障树诊断, 并将故障树分析处理的成功案例添加到案例库中, 不断完善案例库。最后, 结合卫星地面站本振设备故障诊断的实例应用, 正确诊断出案例库中之前不存在的故障, 并且增加案例库中案例数目, 提升之后检索的效率。

**关键词:** 案例推理; 故障树; 故障诊断; 地面站; 接收系统

**中图分类号:** TP206.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201902.0227

## Ground station receiving system fault diagnosis method based on CBR and FTA

CHEN Dan, HU Tao, WANG Jiantao, JIANG Teng

(Data and Target Engineering Institute, PLA Strategic Support Force and Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** The satellite ground station receiving system is based on the incomplete case library in Case-Based Reasoning(CBR). The computation based on Fault Tree Analysis(FTA) is complex. A joint fault diagnosis method based on CBR and FTA is proposed. Firstly, an improved method based on quadratic retrieval strategy is proposed to solve the problem of low retrieval efficiency. Then, re-use the fault tree diagnosis on the fault which cannot be retrieved in the case library, and add the successful cases of fault tree analysis and processing to the case library and continuously improve the case library. Finally, based on the practical application of fault diagnosis of local oscillator equipment in satellite terrestrial stations, the fault which was not included in the case library is correctly diagnosed and the number of cases in the case library is increased, the retrieval efficiency is improved. The effectiveness of the proposed method is verified.

**Keywords:** Case Based Reasoning; fault tree; fault diagnosis; ground station; reception system

卫星地面站是卫星通信系统的重要组成部分, 地面站接收系统要以最佳的状态可靠地接收来自卫星的无线信号。地面站接收设备结构复杂, 难以建立精确、完备的模型, 一旦系统发生故障, 维修过程比较困难。针对这种情况, 文献[1]提出采用基于规则的专家诊断系统, 能有效处理故障问题, 但因部分器件的非线性特性, 使知识获取成为系统瓶颈; 文献[2]提出了基于案例推理(CBR)的飞机引气系统故障诊断, 通过借鉴专家的经验知识进行推理诊断, 适用于没有准确物理模型的诊断领域, 但存在检索效率低等问题; 文献[3]采用基于故障树(FTA)的诊断方法, 但因故障树结构庞大, 计算复杂, 定量分析存在一定困难。由此可见, 对于类似地面站这种复杂的非线性系统的结构体问题, 采用单一的故障方法, 已无法满足其快速及时诊断的需求。

本文将基于CBR和FTA相融合故障诊断技术应用到卫星地面站接收系统中, 设计了地面站新的案例库组织结构和二次检索索引策略。首先采用CBR进行故障特征的提取, 然后进行案例的初步检索, 将检索出的案例集与目标案例进行相似度计算, 从中筛选出相似度高于期望值的案例, 并复用相似度最大的案例的解决方法解决目标案例。若诊断成功, 通过系统案例库对故障树的基本底事件的重要度进行调整, 则诊断结束; 若筛选不

出合适的案例或案例库中不存在相似案例,则采用基于FTA的故障推理方法,将推理成功的案例知识存储到案例库中,同时通过地面站案例库对故障树的基本底事件的重要度进行调整。

## 1 基于案例推理的故障诊断方法

CBR 来源于人们对事物的思考方式,当面对新发生的事物时,往往会提取新事物的特征,然后联想到过去发生的相似案例,参照过去解决问题的方法对新问题进行比较、分析并提出相应的解决方法。基于 CBR 系统利用经验知识解决问题。当出现新故障时,通过检索案例库查找与当前相似的案例<sup>[4-5]</sup>,并对其处理措施做适当调整使之适应于处理新故障,形成一个新的故障案例,从而得到解决当前故障的措施。

### 1.1 案例的表示与案例库的架构

大型复杂系统的结构非常复杂且产生故障形式繁多。对于每次发生的故障,专业技术人员都要建立相应的故障档案,详细记录故障发生的经过、原因、处理措施等信息。通过对这些故障案例进行分析、归纳,总结出一个合理的故障案例规范化描述框架,该框架包括案例的基本信息、故障经过、故障原因、故障对策、效果评价。案例的表示方法有多种,在解决某一问题时,不同的表示方法可能产生不同的效果。本文采用基于面向对象的故障案例表示,其模型为<sup>[6]</sup>:  $case(D,S,M,E)$ 。其中:

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  表示案例的描述信息,包括故障案例背景信息、故障描述等;  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  表示故障征兆属性集;  $M$  是解决故障措施;  $E$  是对  $M$  处理的故障效果进行评价。

实现案例检索的关键步骤是建立合适的案例存储与索引机制<sup>[7]</sup>。在基于 CBR 的智能诊断系统中,具有相同故障模式的案例具有共性特征,因此可以将地面站案例库按照故障模式进行分类存储。即将故障案例按照不同分系统、不同设备型号建立具有层次结构存储和索引机制,如图 1 所示。

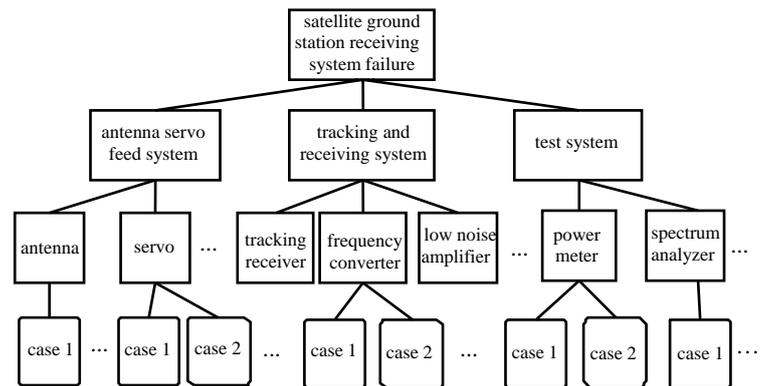


Fig.1 Case hierarchical index for ground station receiving system

图 1 地面站接收系统案例分层索引

### 1.2 基于故障案例的二次检索和匹配

#### 1.2.1 传统的案例检索和匹配

案例检索是利用案例库的索引机制,根据新案例的故障特征从案例库中找到与当前求解问题最相似的一个案例。本文采用最近邻法计算出目标故障案例与故障案例库中的各个案例之间的相似度。最近邻法<sup>[8]</sup>是一种相似性的关联检索方法,通过计算旧案例与目标案例相匹配的特征权重之和来评估案例之间的相似性,从中选出最佳案例。

令  $x$  为目标案例,  $y$  为旧案例,  $x_k$  或  $y_k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) 为案例第  $k$  个属性值,  $w_k$  是第  $k$  个特征属性的权值 ( $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ )。考虑到地面站接收系统装备故障诊断过程中经验的重要性以及该领域知识的复杂性,权重系数由专家给出各个指标的重要程度判断矩阵,通过层次分析法得到。目标案例与旧案例的距离<sup>[9]</sup>:

$$Dist(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k A(x_k, y_k)}{\sum_{k=1}^n w_k}} \quad (1)$$

式中  $A(x_k, y_k)$  定义如下:

$$A(x_k, y_k) = \begin{cases} 0, & \text{if } x_k, y_k \text{ 是离散的, 且 } x_k = y_k \\ 1, & \text{if } x_k, y_k \text{ 是离散的, 且 } x_k \neq y_k \\ \frac{|x_k - y_k|}{\max x_k - \min y_k}, & \text{if } x_k, y_k \text{ 是连续的} \end{cases} \quad (2)$$

综述,故障案例  $x$  和  $y$  之间的相似度计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$Sim(x, y) = 1 - Dist(x, y) = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_i A(x_i, y_i)}}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

### 1.2.2 改进的检索方式

传统的案例检索方式需要计算目标案例与所选案例的案例库的相似度，计算量复杂，检索速度慢。本文提出基于二次案例检索方法对案例进行检索，通过第一次初步检索缩小案例集的范围，再按照传统案例的检索思路进行案例相似度匹配。即，先用目标故障案例的相关属性对案例库进行初步检索，再用最近邻法计算目标案例和初步检索后的故障案例集之间的相似度，选取相似度最大的案例为最佳案例，最后复用最佳案例的成功维修策略对目标故障进行诊断和维修。检索过程如图 2 所示。

初步检索是先选取案例库特征向量中属性权重系数最大的关键属性值  $P_i(k)$ ，与目标案例相对应的特征属性值  $P_0(k)$  进行分析。令案例第  $k$  个属性值的取值范围为  $m(p(k))$ ，若  $P_i(k)$  满足式(4)，则初步检索出案例  $P_i$  满足第一次案例检索条件。其中  $\beta$  为设定的检索阈值，可以通过调整  $\beta$  值来控制初步检索的精确度。 $\beta$  取值越小，说明初步检索范围越小，检索出的案例集越少；反之，则检索出的案例集越大。其取值通常根据所检索属性的取值范围，通过多次试验确定，以保证通过一次检索后，能够有效滤除其他非相关类型的故障。

$$\frac{|P_i(k) - P_0(k)|}{m(p(k))} < \beta, \quad \beta \in (0,1) \quad (4)$$

### 1.3 案例的重用和修改

案例的重用是指从故障案例库中索引到目标故障案例与旧案例的故障现象完全相同时，直接采用旧案例中的故障对策解决目标故障案例。但实际应用中，这种情况非常少，通常是通过计算目标案例与案例库中旧案例的相似度，选取与案例库中最相似的案例。复用的故障解决方案需根据当前故障的实际情况同时依据相应的调整规则，对相似案例成功的诊断结果进行修改，以满足当前问题的需要。故障对策调整是基于 CBR 诊断系统中最艰难的任务，很难找到通用的调整方法和规则，需要专家的参与。对故障案例调整后得到一个新的故障案例，若新旧 2 个案例的相似度低于设定的阈值，说明新的案例有变化，具有保留价值。该案例将按着一定的存储策略添加到案例库中。

## 2 基于故障树的诊断模型

### 2.1 故障树模型

故障树分析是公认的对复杂设备系统进行安全性、可靠性分析和进行故障诊断的一种重要方法，工程上应用广泛<sup>[10-11]</sup>。FTA 通过对造成系统故障的硬件、软件、运行环境、人为因素等进行分析，把系统最不希望发生的故障状态作为顶事件，从顶事件出发，寻找直接导致顶事件发生的全部因素，再依次找到下一级事件发生的全部直接因素，直至追溯到引起系统发生故障的全部原因<sup>[12-13]</sup>。通过逻辑关系“与”、“或”、“非”等将这些事件联系起来就形成逻辑框图，即故障树。其结构模型如图 3 所示。其中处于故障树底层的事件为底事件，即系统发生故障的最小单元。处于故障树顶事件和底事件之间的事件称为中间事件。

### 2.2 故障树的定性与定量分析

#### 2.2.1 定性分析

构建故障树的目的是寻求系统故障树的最小割集从而对故障树进行定性和定量分析。在故障树中，由某些特定故障树底事件组成集合，当集合中全部事件发生时，顶事件必定发生，则称这个故障集合为系统故障树的

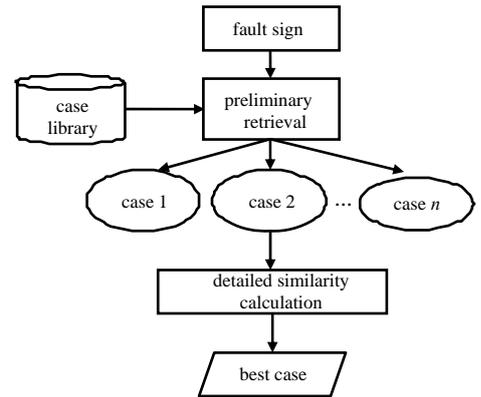


Fig.2 Fault case retrieval process  
图 2 故障案例检索过程

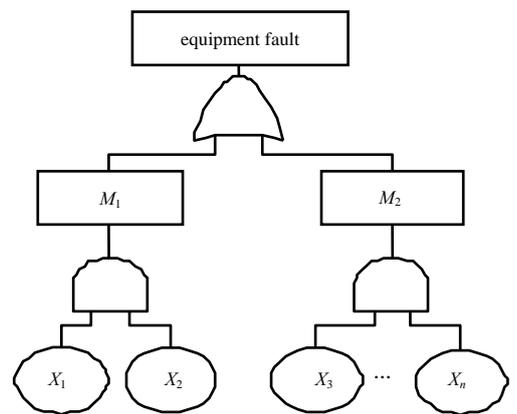


Fig.3 Diagram of fault tree  
图 3 故障树结构图

一个割集<sup>[14]</sup>。若将割集中去掉任意一个底事件后就构不成割集，则称这种不可分割的集合为最小割集。

最小割集的求解通过构建其结构函数进行分析，根据基本事件的“与”门、“或”门关系，图 3 的结构函数  $\psi$  为<sup>[15]</sup>：

$$\psi(x) = \sum_{i=1}^k (\prod_{j=1}^m x_{ij}) \quad (5)$$

式中： $x_{ij}$  为底事件； $k, m$  为自然数。对于简单的故障树，只要将故障树的结构函数展开，运用代数运算加以化简；复杂的则采用下行法或上行法求其最小割集。

2.2.2 定量分析

对故障树进行定量分析的主要目的是计算顶事件发生概率及系统的一些可靠性指标(如重要度、故障率、累积故障概率、首次故障时间等)和底事件的重要度，即故障树的各个底事件对顶事件发生的影响。研究底事件重要度对提高系统的可靠度、确定故障检测的部位、减少排故时间、有效提高整个系统的可用度有重要的作用。其中底事件的结构重要度、概率重要度和关键重要度从不同角度反映了部件对系统的影响程度，是本文主要考虑的重要度指标，具体含义如下：

1) 结构重要度：某个底事件的结构重要度，是在不考虑发生概率值情况下，仅从部件所处的结构位置的重要度考虑。因为底事件  $x_i(i=1,2,\dots,n)$  的状态取值只能为 0 或 1，当  $x_i$  处于某一状态时，其余  $(n-1)$  个底事件组合的状态数为  $2^{n-1}$ 。底事件  $x_i$  的结构重要度  $I_{\phi(x_i)}$  计算如下<sup>[16]</sup>：

$$I_{\phi(x_i)} = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{(x/x_i=1)} [\phi(1_i, x) - \phi(0_i, x)] \quad (6)$$

式中： $(0_i, x) = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ； $(1_i, x) = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ 。

2) 概率重要度：底事件  $x_i$  发生概率  $p_i$  变化时，对系统顶事件变化的影响重要程度。设  $q(1_i, p)$  为底事件  $x_i$  发生( $x_i=1$ )， $q(0_i, p)$  为底事件  $x_i$  不发生( $x_i=0$ )。其计算如下<sup>[16]</sup>：

$$I_{q(x_i)} = q(1_i, p) - q(0_i, p) \quad (7)$$

3) 关键重要度：底事件失效概率变化率引起的顶事件失效概率的变化率。关键重要度是反映系统故障诊断的重要参考指标，它反映了元、部件触发系统故障可能性的大小。关键重要度计算公式如下<sup>[16]</sup>：

$$I_{c(x_i)} = \frac{\partial q / q}{\partial p_i / p_i} = \frac{p_i}{q} I_{q(x_i)} \quad (8)$$

3 基于 FTA 和 CBR 的混合故障诊断策略

由于 CBR 的方法只是存储和学习了部分专家知识，对于案例库中没有的故障案例或检索出相似度较低的案例没有任何考虑，因此需要与其他的智能诊断方法相结合。本文将 FTA 与案例推理方法相结合，提出一种集成的智能诊断方法，其诊断过程如图 4 所示。

融合故障诊断的步骤如下：

步骤 1：当地面站接收系统出现故障时，首先需要获取此次故障的特征属性值，利用案例检索机制对目标案例进行推理诊断。在现有的案例库中利用二次检索原理搜索具有相似故障特征值的所有案例，从检索的案例集中选取阈值超过设定值的案例，根据最终得到的处理结果进行相应的故障处理。若通过案例相似匹配后，检索不到任何结果，或是检索的相似度低于设定阈值，则转换到基于故障树的方法进行诊断。

步骤 2：若结论成立，则说明该部件是故障部位，诊断结束，并将这次的故障案例添加到地面站案例库中。若结论不成立，则转换到基于故障树的方法进行人工诊断，利用故障树的定量分析求出各个底事件的关键重要度，并根据底事件的关键重要度的大小指导系统进行维修，完成诊断后，将这次诊断结果整理成案例的形式添加到系统案例库中。

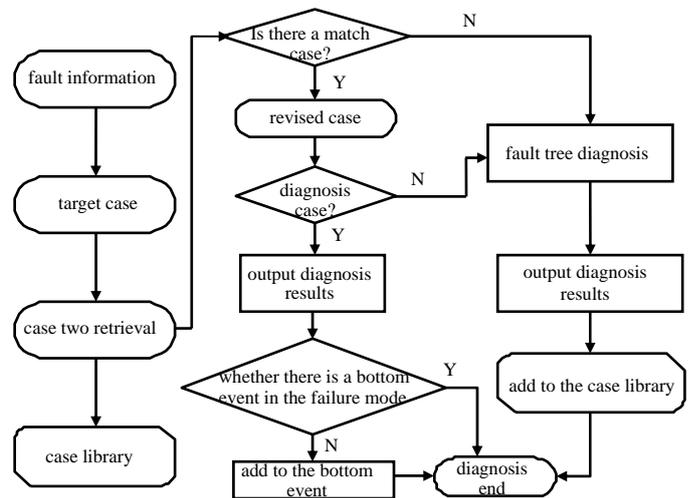


Fig.4 Flowchart of fusion diagnosis  
图 4 融合诊断流程图

### 4 基于 CBR 和 FTA 的联合故障诊断

故障问题：某卫星通信地面站出现载波失锁现象，由于各监测点均有数据输出，因此可确定收发支路各连接线缆及接头无异常；DT-4503 型号变频器自动倒换到备用变频器，载波失锁现象消失。使用信号源、频谱仪对主用变频器进行测试，得到下变频器前输入频率达到 3 845.65 MHz，输出频率为 1 040.65 MHz，实测变频器电平为-53.8 dBm。对此目标故障问题进行详细诊断，过程如下。

#### 4.1 CBR 诊断阶段

步骤 1：故障特征提取

通过对目标故障问题进行分析，得出此次故障非连接线缆及接头的原因。从中提取出 6 个故障特征，将这些特征属性整理成故障案例 C 形式，其中  $C=\{C_1=<1, \text{变频器 } x \text{ 型号, DT-4503}>, C_2=<3, \text{输入频率, } 3\ 845.65>, C_3=<4, \text{载波, 出现失锁}>, C_4=<2, \text{电平, } -53.8>, C_5=<3, \text{输出频率, } 1\ 040.65>, C_6=<1, \text{故障指示灯, 红灯亮}>\}$ ，并将这些特征属性录入系统中。

步骤 2：计算案例相似度

由于实验用库案例较少，限于篇幅，本文直接进行二次案例相似度的检索。利用最近邻法计算出目标案例与地面站案例库中初选案例集中案例的相似度，并进行排序。以地面站接收系统中案例“FD0009”为例，相似度的计算过程如下：

经过故障案例的初步检索后，在初次筛选的案例集中，根据故障案例库查询到“FD0009”案例的故障特征为 A， $A=\{a_1=<1, \text{变频器 } x \text{ 型号, DT-4503, } 0.1>, a_2=<4, \text{载波, 出现失锁, } 0.1>, a_3=<3, \text{输入频率, } 3\ 800.65, 0.2>, a_4=<3, \text{输出频率, } 1\ 344, 0.1>, a_5=<2, \text{电平, } -45, 0.2>, a_6=<5, \text{设备温度, } 35, 0.2>, a_7=<1, \text{故障指示灯, 红灯不亮, } 0.1>\}$ 。由式(1)计算出目标案例与案例库中案例“FD0009”的局部相似度如表 1 所示。其中权重向量  $\omega$  采用层次分析法进行确定<sup>[17]</sup>，采用 1~9 比率标度，由专家组协同建立判断标度表，最后确定出每一个特征属性的权重值。

表 1 局部相似度计算  
Table1 Local similarity calculation

C	A	sim	w
C <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	1.00	0.1
C <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	1.00	0.1
C <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	0.80	0.2
C <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	0.78	0.1
C <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	0.50	0.2
0	a <sub>6</sub>	0	0.2
C <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	0	0.1

根据式(3)可得出目标案例 C 与旧案例 A 的相似度  $Sim(C,A)=0.538$ ，同理可计算出目标案例与其他案例的相似度，分别为  $Sim(C,FD00008)=0.50, Sim(C,FD00010)=0.23, Sim(C,FD00011)=0.33, Sim(C,FD00012)=0.13, Sim(C,FD00013)=0.25$ ，并根据相似度进行排序。

步骤 3：选择最佳案例

参考文献[18]中阈值设置的方法，设置阈值为  $\alpha=0.7$ ，系统只保留相似度大于阈值  $\alpha$  的作为候选案例。系统推理过程如上文所述，如果查询结果中存在高于相似度阈值的案例，则复用相似度最高的案例解决方案对目标案例进行故障处理，若故障成功解决，则此次诊断过程结束，若故障未能解决或查询结果中不存在高于相似度阈值的案例，则转向 FTA 诊断。

#### 4.2 FTA 诊断阶段

步骤 1：构建地面站接收系统下变频器故障的故障树是分析问题的关键。以下变频器设备故障为顶事件，建立相应的故障树，如图 5 所示。其中 M<sub>1</sub> 为下变频器设备故障，x<sub>1</sub> 为线缆接头故障，x<sub>2</sub> 为 5 V 电源故障，x<sub>3</sub> 为 12 V 电源故障，x<sub>4</sub> 为变频模块故障，x<sub>5</sub> 为本振故障。

步骤 2：求故障树底事件的重要度

对图 5 故障树模型进行定性分析，求得其结构函数为  $\psi(x)=x_1x_2+x_1x_3+x_1x_4+x_1x_5$ ，因此故障树的最小割集为  $\{x_1x_2\}, \{x_1x_3\}, \{x_1x_4\}, \{x_1x_5\}$ 。设图 5 中基本事件发生的概率分别为： $q_1=0.01, q_2=0.02, q_3=0.03, q_4=0.04, q_5=0.1$ ，其值由平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)和故障平均修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)确定<sup>[19]</sup>： $q=MTTR/(MTBF+MTTR)$ 。则根据式(6)~式(8)可求得各

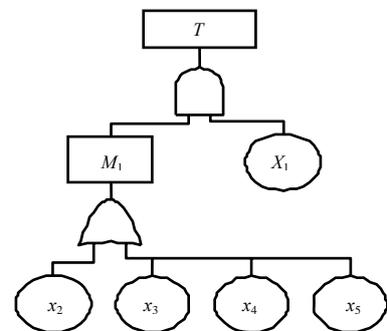


Fig.5 Diagram of ground station down converter fault tree  
图 5 地面站下变频器故障树结构图

个基本底事件的重要度, 如表 2 所示。

### 步骤 3: 结果分析

关键重要度反映了元、部件触发系统故障可能性的大小, 因此, 地面站接收系统发生故障, 应首先检查关键重要度大的设备。

由表 2 可知, 在进行数据接收通道设备故障诊断时, 应按照关键重要度  $x_1, x_5, x_4, x_3, x_2$  的

顺序对系统进行检查。在上文问题描述中, 收发支路各连接线缆未发现异常, 因此首先排除底事件  $x_1$ 。然后用替换法进行逐步检查, 先检查底事件  $x_5$ , 拆下本振合子, 换上好的本振合子开机检查, 故障现象消失, 变频器正常工作, 地面站工作恢复正常。经排查此次出现故障的原因是本振损坏。最后把此次诊断结果以案例的形式添加到案例库, 对原有案例库进行补充。

表 2 图 5 所示故障树底事件的重要度

Table2 Importance of fault tree at the end of the event in Fig.5

basic event	structural importance	probability importance	critical importance
$x_1$	0.500 0	0.187 40	0.686 3
$x_2$	0.062 5	0.001 70	0.017 8
$x_3$	0.062 5	0.001 60	0.025 2
$x_4$	0.062 5	0.009 85	0.155 6
$x_5$	0.062 5	0.009 90	0.521 0

## 5 结论

针对案例推理方法存在检索效率低的问题, 本文提出了二次检索案例策略。同时由于地面站案例库的不完备性, 不能确定地得到可靠的故障解决方案, 因此联合 CBR 和 FTA 形成了混合智能诊断方法。即先采用案例推理的方法进行推理, 对于检索结果中检索不到合适案例的故障问题, 再转向 FTA 进行诊断。这种集成的智能诊断方法, 缩小了求解案例库的范围, 针对大型的卫星地面站案例库能更为有效地节省求相似度的时间。最后, 以卫星地面站出现载波失锁和数据接收通道设备故障为例, 对故障检测过程进行说明, 并得到了可靠的解决方案, 证明了混合诊断方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 于志坚. 航天测控系统工程[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (YU Zhijian. Aerospace measurement and control system engineering[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [2] 王万杰,陶孙杰,冯旭详. 遥感卫星接收系统故障诊断专家系统设计[J]. 电讯技术, 2015,55(5):491-496. (WANG Wanjie, TAO Sunjie,FENG Xuxiang. Design expert system for fault diagnosis of remote sensing satellite receiving system[J]. Telecommunications Technology, 2015,55(5):491-496.)
- [3] 何永勃,王丽哲,杨燕辉. 基于 CBR 的飞机引气系统故障诊断案例库构造[J]. 中国民航大学学报, 2013,31(6):29-32. (HE Yongbo,WANG Lizhe,YANG Yanhui. A case study of CBR-based fault diagnosis case system[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013,31(6):29-32.)
- [4] 王守敏. 基于 CBR 的民航故障诊断系统与维修训练评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008. (WANG Shoumin CBR-based civil aircraft fault diagnosis system and maintenance training evaluation method[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.)
- [5] TUNG Y H, TSENG S, WENG J F, et al. A rule-based CBR approach for expert finding and problem diagnosis[J]. Expert Systems with Applications, 2010,37(3):2427-2438.
- [6] 李国栋. 基于 CBR 的卫星故障诊断方法研究及应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.(LI Guodong. Study and application on Case-Based Reasoning fault diagnosis for Satellite[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [7] 杨斌宇. 基于案例的推理在智能决策支持系统中的应用[D]. 吉林:吉林大学, 2004. (YANG Binyu. Case based reasoning in intelligent decision support system[D]. Jilin,China:Jilin University, 2004.)
- [8] 张冬. 过程装备故障诊断系统与钻井泵阀无冲击理论研究[D]. 北京:北京化工大学, 2009. (ZHANG Dong. Process equipment fault diagnosis system and drilling valve no impact theory[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2009.)
- [9] 张耀辉,李浩,李林宏,等. 基于案例推理的装甲装备故障诊断方法[J]. 兵工自动化, 2014(9):21-22. (ZHANG Yaohui, LI Hao,LI Linhong,et al. Fault diagnosis method of armored equipment based reasoning[J]. Ordnance Industry Automation, 2014(9):21-22.)
- [10] WANG Yingying,LI Li,CHANG Ming,et al. Fault diagnosis expert system based on integration of fault-tree and neural network[C]// IEEE International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering. Wuhan,China:IEEE, 2009:1-4.
- [11] FA Bo,YIN Yixin,FU Chunfa. The bidirectional associative memory neural network based on fault tree and its application to inverter's fault diagnosis[C]// IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Shanghai,China:IEEE, 2009:209-213.

- [12] 刘师范. 基于故障树的某型功放故障诊断系统的设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2014(3):62-63. (LIU Shifan. Design and implementation of fault diagnosis system for a certain type of power amplifier based on fault tree[J]. Electronics and Software Engineering, 2014(3):62-63.)
- [13] JALEEL J A, SADINA M F. Reliability analysis using fault tree method and its prediction using neural networks[C]// IEEE International Conference on Control Communication and Computing(ICCC). Wuhan, China: IEEE, 2013:119-124.
- [14] 李严. 基于联想记忆神经网络的故障识别[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2012. (LI Yan. Fault recognition based on associative memory neural network[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2012.)
- [15] 金亮亮. 基于故障树的航天器故障诊断专家系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008. (JIN Liangliang. Fault tree-based fault diagnosis of spacecraft expert system[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.)
- [16] 夏虹, 刘永阔, 谢春丽. 设备故障诊断技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2010. (XIA Hong, LIU Yongkuo, XIE Chunli. Equipment fault diagnosis technology[M]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology Press, 2010.)
- [17] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 24(7):93-100. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Analytical method and its application of analytic hierarchy process weight[J]. Mathematics Practice and Understanding, 2012, 24(7):93-100.)
- [18] 文天柱, 许爱强, 孙伟超. 基于可拓案例推理的故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11):2124-2130. (WEN Tianzhu, XU Aiqiang, SUN Weichao. Fault diagnosis method based on extension case-based reasoning [J]. Journal of Beihang University, 2015, 41(11):2124-2130.)
- [19] WIBOONRAT M. Energy sustainability and management of data center[EB/OL]. [2017-12-18]. [https://www.onacademic.com/detail/journal\\_1000039875508910\\_097c.html](https://www.onacademic.com/detail/journal_1000039875508910_097c.html).

#### 作者简介:



陈丹(1992-), 女, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为故障诊断.  
email:1406673715@qq.com.

胡涛(1979-), 男, 安徽省桐城市人, 副教授, 主要研究方向为微波技术、电子对抗.

王建涛(1983-), 男, 河南省商丘市人, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理.

蒋腾(1994-), 女, 河南省商丘市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.