

# 运载火箭控制系统漏电故障诊断研究

樊友平<sup>1</sup>, 陈允平<sup>1</sup>, 黄席樾<sup>2</sup>, 柴毅<sup>2</sup>, 高波<sup>3</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044;

3. 西昌卫星发射中心, 西昌 615000)

**摘 要:** 从系统的角度分析了运载火箭控制系统漏电故障诊断的特殊性, 指出故障也是系统要素之间的一种联系方式。为了准确、有效地描述系统状态条件同其故障关系间所存在的关联, 提出了条件故障图的描述模型, 界定并分析了描述系统状态关系的状态树, 并将它与故障图相结合形成条件故障图, 用于对故障关系的自动化描述及分析。在此基础上, 引入蚁群算法来确定故障树的最优检测次序, 并指导系统多故障状态的决策。将它们应用于运载火箭的控制系统, 给出了一个特征实例。条件故障图可以有效地描述状态条件对故障关系的影响及作用, 蚁群算法能够实时地、自适应地进行动态路径选择。获得了令人满意的效果。

**关键词:** 运载火箭; 故障诊断系统; 漏电故障; 蚁群算法; 最优检测次序

**中图分类号:** V554; R446

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2004)05-0507-07

## 0 引言

运载火箭控制系统的供电采用直流浮地方式, 其供电母线和运载火箭及设备仪器壳体之间是绝缘的, 当母线和壳之间绝缘电阻下降时, 便产生一条从正母线经过壳体回到负母线的电流通路, 这种现象称为漏电。控制系统的某个部件发生漏电故障后, 就会通过电路传播到系统的每个部件, 而且漏电故障诊断的手段比较特殊(不可能在控制系统内部添加传感器), 控制系统的漏电检测通常是将系统的部件分离后通过接在发控台上的漏电表来进行逐个排查的。这种方法不仅繁琐而且检测缓慢。

本文根据漏电检测诊断的特点, 建立了漏电故障诊断问题的条件故障图, 分析了条件故障图在故障诊断中的应用, 并且根据前面的分析结果, 设计针对漏电故障诊断的蚁群算法以确定故障树的最优检测次序, 实现漏电故障的快速定位。

## 1 控制系统的层次结构分析

运载火箭控制系统中并列的分系统多, 每个分系统又分为若干个逻辑层次, 在结构和功能上具有多层次性, 其系统级和分系统级之间紧密耦合, 作为一个整体分析起来困难大, 所以在问题求解策略上

应采用面向对象的问题约简法, 将整个诊断问题按一定策略分解为比较容易解决的若干子问题<sup>[1]</sup>。

### 1.1 基于结构与行为的层次分解数学模型<sup>[2~5]</sup>

复杂设备由若干相互联系的分系统按某种特定方式组成, 并且具有一定的功能和特征。因此, 可把复杂设备系统模型化为层次结构有向图的一层次集合。设  $S$  表示控制系统, 对  $S$  按结构与功能进行层次分解后,  $S$  在结构上可表示成为一个层次集合:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$S$  进行层次分解的一个层次结构图  $D$  定义为:

$$D = (V, E) \quad (2)$$

其中,  $V = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  为结点集合,  $E = S \times S$  为连接结点的有向边集合, 由各分系统  $S_i$  之间的衔接关系  $R$  所组成。

衔接关系  $R$  是定义在  $S$  上的, 其中  $R \subseteq S \times S$ , 并且  $S_i R S_j, S_i, S_j \in S$ 。这种衔接关系构成了控制系统  $S$  中的故障传播的所有路径。

层次结构有向图  $D$  的结点集  $V$  由可监视结点集  $V_M$  和不可监视结点集  $V_N$  组成, 并且满足:

$$V = V_M \cup V_N \text{ 且 } V_M \cap V_N = \Phi \quad (3)$$

$D$  中由  $S_i$  到  $S_k$  的有向边用  $e_{jk} = (S_j, S_k)$  表示, 并且

$$e_{jk} \in E \text{ 且 } S_j R S_k \quad (4)$$

层次结构有向图  $D$  的衔接矩阵  $A$  表示为:

$$A = \{a_{jk}\} \quad (5)$$

$$\text{其中, } a_{jk} = \begin{cases} 1, & e_{jk} \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由衔接矩阵  $A$ , 可计算系统  $S$  的可达性矩阵:

$$M = (m_{jk}) = [I + A]^k = [I + A]^{k+1} \quad (6)$$

其中,  $k \geq k_0$ , 且  $k < k_0$ ,  $k_0$  是一个正整数,  $I$  是单位矩阵。

祖辈结点集和后代结点集是层次有向图  $D$  中结点集  $V$  上的两个函数, 它们分别定义如下:

$$A_M(S_j) = \{S_k \mid m_{jk} \neq 0, m_{jk} \in M, S_j, S_k \in V\} \quad (7)$$

$$D_M(S_j) = \{S_k \mid m_{kj} \neq 0, m_{kj} \in M, S_j, S_k \in V\} \quad (8)$$

运用可达性矩阵  $M$ , 层次结构有向图  $D$  中的结点集  $V$  可分解成  $m$  个层次级别  $V_1, V_2, \dots, V_m$ , 其中,

$$V_i = \{S_j \in V \mid D_M \cap A_M(S_j) = A_M(S_j)\} \quad (9)$$

$$V_i = (A_M(S_j) - V_1 \cdots V_{i-1}), k = 2, \dots, m \quad (10)$$

这里  $m(\leq n)$  是使  $V - V_1 - \dots - V_m = \Phi$  的正整数。这称为层次结构。这种对象类满足下列性质:

$$(1) \bigcup_{i=1}^m V_i = V;$$

$$(2) V_i \cap V_k = \Phi, j \neq k$$

(3) 对于  $S_j, S_k \in V$  下列条件之一成立:

若  $m_{jk} = m_{kj} = 1$ , 则  $S_j$  与  $S_k$  在同一闭环路中;

若  $m_{jk} = m_{kj} = 0$ , 则  $S_j$  与  $S_k$  不互相衔接;

(4) 离开对象  $V_j$  中的结点的边只能到对象类  $V_k$  中的结点。

分解从系统级开始, 然后从各分系统、各子分系统、各部件级和各元件逐级展开。具有单一结点复杂设备系统  $S$  本身结构成层次分解模型的第一层次, 而层次结构有向图  $D$  构成控制系统层次分解模型的第二层次级。在此基础上, 根据上述的层次分解模型, 继续对每个分系统按结构与功能进行层次分解, 得到相对应的  $n$  个层次结构有向图:

$$D(V_j, E_j), j = 1, \dots, n \quad (11)$$

这  $n$  个层次结构有向图组成的集合  $\{D_j\}$  构成层次分解模型的第三层次级。依次类推, 层次分解模型第  $i$  层级上与第  $i-1$  层次级上的结点  $V$  相对应的层次结构有向图可表示为:

$$D_{ijk} = (V_{ijk}, B_{ijk}), j = 1, \dots, n \quad (12)$$

综上所述, 控制系统  $S$  按结构与功能进行层次分解的数学模型可描述成

$$H = \{L_i\}, i = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

其中,  $l$  表示分解模型的层次级数,  $L_i$  表示分解模型的第  $i$  层次级, 并且,

$$L_i = \{D_{ijk}\}, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m_j \quad (14)$$

采用上述层次分解模型, 对控制系统  $S$  按结构与功能进行分解后, 顶层级是控制系统本身, 第 2 层次级是组成控制系统  $S$  的各分系统  $S_j$ , 第 3 层次级是组成各分系统  $S_j$  的各子分系统  $S_{jk}$ , ..., 第  $i$  层次级是组成与第  $i-1$  层次对应的各子分系统的各部件, 依此递推逐级分解直至所需要的层次级为止。

## 1.2 基于层次分解方法构建系统的条件故障图<sup>[6]</sup>

运载火箭的控制系统共有三种单相一次电源, 电源与电源之间以及它们与火箭箭体壳之间采用绝缘浮地方式。电源母线在地面分别为  $\pm M1$ 、 $\pm M2$ 、 $\pm M3$ , 箭上分别对应分别为  $\pm B1$ 、 $\pm B2$ 、 $\pm B3$ 。火箭发射前要在下面 10 个状态下分别进行检测。状态 1: 导通绝缘检查; 状态 2: 关瞄准窗; 状态 3: 分系统; 状态 4: 控制与遥测匹配; 状态 5: 控制、遥测、低温动力三大系统匹配; 状态 6: 总检 II 状态总检查; 状态 7: 总检 I 状态总检查; 状态 8: 总检 III 状态总检查; 状态 9: 常规加注后; 状态 10: 发射。同时, 每种状态下接入控制系统的元部件不一样, 而且不同状态下元部件发生漏电故障的状态权值不同, 界于两状态之间的测试项目以前一状态进行故障诊断。为满足描述信息的完备性及描述形式的规范性, 本文提出条件故障图的描述模型。以利于用计算机进行自动化描述和自动化分析。

### 1.2.1 状态关系描述

故障图是以故障模式为结点, 以故障模式间的关系为有向边的一类有向图, 可表示为  $GN = \langle V_N, R_N \rangle$ 。式中,  $V_N$ ——故障模式的集合, 故障模式既有系统中的各种原发故障, 又有表现故障; 既可以是部件或子系统的实在的故障形式, 又可以是系统中某些参数的异常偏离;  $R_N$ ——故障模式间的二元关系集合, 它主要描述的是故障模式间的因果传递关系。

建立条件故障图, 首先要描述系统中各种状态之间的关系。可将状态分为系统状态和部件状态两种类型。

系统状态是对系统工作的整体状态的称谓。它首先包括系统全状态, 即系统工作的所有状态的总称, 全状态又可以被分解为若干分状态, 分状态又可

以包含自己的子分状态,从而建设起基于状态包含关系的状态层式结构,在层式结构中,任何下层状态都包含于其上层状态,而上层状态也由其下层状态叠加构成。可用集合来表示这种包含关系:以所有的最底层状态集合为其集建立集簇,则任何系统状态都是此集簇的元素,表示为 $Q(i)$ ,而系统状态集全 $\{Q\}$ 是此集簇的子集。因而若状态 $i$ 是 $j$ 的上层状态,则有 $Q(j) \subset Q(i)$ 。为满足自动化分析的需要及与故障图的匹配,将这种状态关系描述为树结构。

**定义1 状态根树。**有向根树 $T = \langle V, R \rangle$ ,它的结点与系统状态集 $\{Q\}$ 的元素一一对应,即:结点 $v_i$ 对应状态 $Q(v_i)$ ,且满足:若 $r(v_j, v_i) \in R$ ,则 $Q(v_j) \cap Q(v_i) = \emptyset$ 。称有向树 $T$ 为状态集 $\{Q\}$ 的状态根树。

通俗地说,状态根树是状态层式结构的树状描述,根结点表示系统状态全集,叶结点集合则表示系统状态基集。例如,根据上面的分析可以建立电源I负母线供电模型(见图1)。

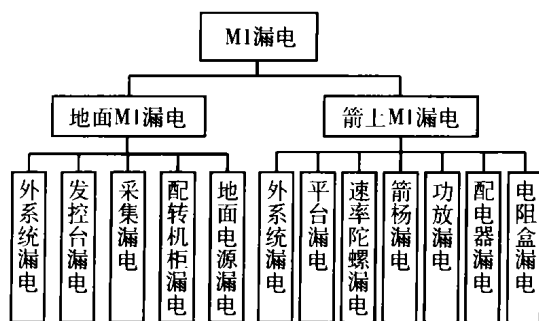


图1 M1漏电查找故障的层次结构模型

Fig.1 Level model for M1 electricity leakage searching

**定义2 状态树。**有向树 $T$ 的结点的集合为 $V$ ,对于状态集合 $\{Q\} = \{Q_s\} + \{Q_b\}$ ,如果存在 $V_1 \subset V$ ,且满足:

(1) $V_1$ 的结点和 $V_1$ 在有向树 $T$ 中的内边构成 $\{Q_s\}$ 的一个层根树,且其中出度为0的结点在树 $T$ 中出度也为0;

(2) $V - V_1$ 与 $\{Q_b\}$ 一一对应,且 $\forall v - v_1, d^-(v) \neq 0$ ;

(3) $\forall v \in V$ ,如果存在边 $r(v_i, v_j)$ ,则 $P(v_j) \subset P(v_i)$ ;如果 $P(v_j) \subset P(v_i)$ 则必有通路 $v_j \rightarrow v_i$ 。则称有向树 $T$ 为 $\{Q\}$ 的状态树。

通俗说,状态树就是以系统状态根树为核心,将部件状态并联描述出来的一个树状结构。

### 1.2.2 条件故障图结构

**定义3 条件故障图。**一个有向图 $G_K = \langle V_K, R_K \rangle$ 及一个状态树 $T_u = \langle V_u, R_u \rangle$ ,若 $V_K$ 包括两类结点,即: $V_K = V_N + V_T$ ,且对于任意的 $v_i \in V_T$ ,存在唯一对应结点的 $v_u \in V_u$ ,使得 $v_i$ 间满足 $v_u$ 间的状态关系。同时满足:

(1)结点集 $V_N$ 及其内边构成一个故障图 $G_{KN}$ ;

(2) $\forall v_T^{(i)} \in V_T, v_N^{(i)} \in V_N$ ,不存在边 $(v_N^{(i)}, v_T^{(i)}) \in R$ ;

(3)如果 $(v_N^{(i)}, v_T^{(i)}) \in R$ ;则有如下两项条件连通规则:如果结点 $v_N^{(i)}$ 在结点集 $V_N$ 没有入点,则结点 $v_T^{(i)}$ 是结点 $v_N^{(i)}$ 的条件结点,表示结点 $v_T^{(i)}$ 是结点 $v_N^{(i)}$ 的存在条件;如果结点 $v_N^{(i)}$ 在结点集 $V_N$ 有入点 $v_N^{(j)}$ ,则结点 $v_T^{(i)}$ 是边 $v_N^{(j)}, v_N^{(i)}$ 的条件结点,表示结点 $v_N^{(i)}$ 是 $v_N^{(j)}$ 同 $v_N^{(i)}$ 间有直接连通的条件,则称此有向图 $G_K$ 为建立条件树 $T_u$ 上的条件故障图。

在故障图中溶入了状态条件结点,使得故障传播成为了条件传播,在传播过程中,条件的交汇中重叠形成新的条件传播,在传播过程中,条件的交汇或重叠就形成新的条件。按照状态关系特点,状态条件的传递规则主要包括:

(1)一个条件故障图 $G_K$ ,其中 $G_{KN}$ 内存在一个通路 $v_N' \rightarrow v_N''$ ,令 $V_T$ 为通路 $v_N' \rightarrow v_N''$ 中经历的结点和边和条件和边的条件结点的集合,则 $\cap P(V_i) | v_i \in V_T$ 为通路 $v_N' \rightarrow v_N''$ 的条件。

(2)如果两个通路 $v_N' \rightarrow v_N''$ 和 $v_N' \rightarrow v_N''$ 在 $v_N'$ 点相交,两个通路的条件量分别为 $P_1, P_2$ ,则定义结点 $v_N'$ 在两个通路下的条件量:如果结点 $v_N'$ 为“与关系”结点,则条件为 $P_1 \cap P_2$ ;如果结点 $v_N'$ 为“或关系”结点,则条件为 $P_1 \cup P_2$ 。

## 2 基于蚁群算法的系统多故障状态的决策

### 2.1 多故障状态及故障最优检测次序问题<sup>[7]</sup>

当被诊断设备是一个复杂系统时,故障树不可避免地出现多故障状态现象。考虑如图2所示一个典型多故障状态的逻辑关系图。

该故障树具有 $n$ 个最小故障割集。一个故障现象 $P$ 对应 $n$ 条故障检测路径 $l_1, l_2 \dots l_n$ 和 $n$ 个可能故障原因 $R_1, R_2 \dots R_n$ 。第 $i$ 条检测路径具有 $m_i$ 个检测点 $T_1, T_2 \dots T_i$ 。通过分别检测第 $i$ 条路径 $l_i$ 便可确定第 $i$ 个故障原因 $R_i (i=1, 2 \dots n)$ 。但是由此可以产生两个问题:

(1)实施故障诊断时 $n$ 条检测路径 $l_1, l_2 \dots l_n$ 的先后次序如何选择?

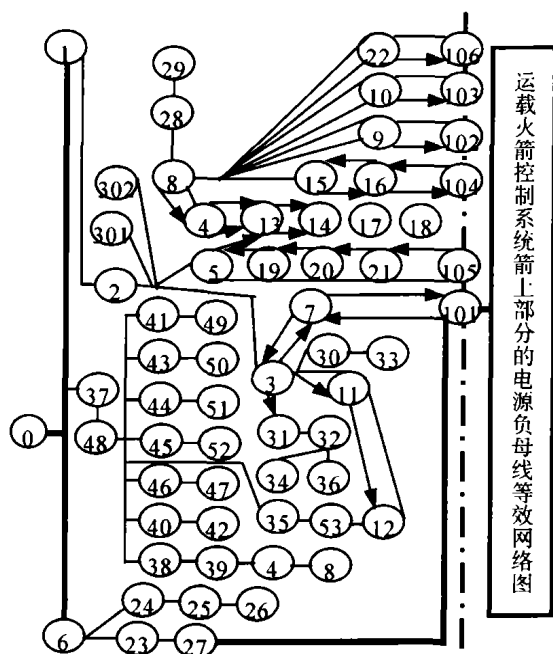


图 2 电源 I 负母线等效网络图

Fig. 2 Equivalent network model of power I negative bus

障碍物,而且通过蚁群信息素轨迹在不同路径上的变化,经过一段时间的正反馈,最终收敛到最短路径上。利用蚁群算法的特性,可以很好地实现  $n$  条检测路径次序的优化选择。

### 2.2.1 蚂蚁算法特性及模型

蚂蚁圈模型是全局优化较好的蚂蚁算法,假如路径  $i, j$  在  $t$  时刻的信息素轨迹强度为  $p$  ( $0 \leq p < 1$ ), 则轨迹强度的更新方程为:

$$t_{ij}(t+1) = pt_{ij}(t) + \sum \Delta t_{ij}^k(t) \quad (15)$$

设  $Z_k$  为第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所走的路径长度, 则  $\Delta t_{ij}^k(t) = Q/Z_k$ , 其中  $Q$  是一个常数。如果设  $\eta_{ij}$  为路径  $(i, j)$  的长度, 路径可见度的相对重要性为  $\beta$  ( $\beta \geq 0$ ), 路径轨迹的相对重要性为  $\alpha$  ( $\alpha \geq 0$ ),  $U$  为可行顶点集, 蚂蚁  $k$  在  $t$  时刻的转移概率为  $P_{ij}^k(t)$  可定义为:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[t_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in U} [t_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, & j \in U \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

MMAS 模型(Max-Min ant system)对基本蚂蚁算法(AS)进行了 3 点改进:为了更加充分地进行寻优,各路径信息素初值设为最大值  $t_{\max}$ ;一圈中只有最短路径的蚂蚁才进行信息素修改增加,这与 AS 蚂蚁圈模型调整方法相似;为避免算法过早收敛于非全局最优解,将各路径的信息素浓度限制在  $[t_{\min}, t_{\max}]$  之间,超出这个范围的值被强制设为  $t_{\min}$  或者  $t_{\max}$ 。从实验结果看,MMAS 算法在防止算法过早停滞及有效性方面对 AS 算法有较大的改进。

### 2.2.2 最优路径选择算法设计

设第  $i$  条路径  $l_i$  上第  $j$  个故障检测点  $T_{ij}$  的难易度为  $d(i, j)$ , ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m_i$ ) 因为若需要确定故障源  $R_i$ , 最多需要进行  $m_i$  次检测, 最少只需要 1 次检测, 故该路径检测的最大代价为:

$$Max(i) = \sum_{j=1}^{m_i} d(i, j) \quad (17)$$

最小代价为:

$$Min(i) = \min\{d(i, 1), d(i, 2), \dots, d(i, m_i)\} \quad (18)$$

单位蚂蚁在该路径上释放的信息素浓度为:

$$Q(i) = \frac{1}{Max(i) + Min(i)} \quad (19)$$

显而易见,如果一条路径的检测难度越小,蚁群更倾向于选择该路径,并在其上释放的信息素也就越多。

(2)对于某一条选定的路径  $l_k$ , 它的  $m_k$  个检测点  $T_{kj}$  ( $j=1, 2, \dots, m_k$ ) 检测的先后次序如何确定?

根据实践经验,显而易见这两种次序不是随意确定,原因如下:

(1)不同的故障源(最小割集)的重要度一般是不一样的,重要度大的故障源应予以优先考虑;

(2)对不同检测点进行检测的难易度一般是不一样的,容易的检测点一般予以优先考虑。

因此,必须同时考虑故障的重要度和检测的难易度两个因素,实现故障的最优检测次序。对于某一选定的检测路径  $l_k$  的  $m_k$  个检测点,可按检测难易度由易至难的次序进行检测,如果检测到故障条件,即可确认故障源  $R_k$ , 立即中止检测;否则继续直至  $m_k$  个检测点全部检测完毕。如果  $m_k$  检测点都不符合故障条件,则可以排除故障源  $R_k$  的可能性,转入其他的检测路径进行检测。这种优化可根据专家知识或实践经验很容易实现。优化的关键问题是对  $n$  条检测路径  $l_1, l_2, \dots, l_n$  的最优次序的选择,本文引入一种新的人工智能的方法,即蚁群算法可以很好地实现。

## 2.2 基于蚂蚁算法的动态最优路径选择<sup>[8~10]</sup>

蚂蚁算法具有全局优化、并行分布式处理等诸多特性,这里特别强调的是随机自适应性。当蚂蚁巢穴与食物源之间出现障碍物时,蚂蚁不仅可绕过

设  $t$  时刻第  $i$  条路径上信息素的浓度为  $\tau(t, i)$ , 该路径对应的故障源  $R_i$  的重要度为  $\eta(i)$ , 如果同时考虑路径的信息素浓度和故障源的重要度两个因素对路径选择的影响, 则可以定义  $t$  时刻蚁群对第  $i$  条路径  $l_i$  选择的概率为(16)式的形式。

设  $G(V, E)$  为赋权连通简单图。其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为顶点集,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{n-1}\}$  为边集合,  $n$  为顶点总数。  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ,  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  分别为网络的连接矩阵、距离矩阵、检测难度限制矩阵<sup>[8]</sup>。连接矩阵  $A$  其值取 0-1 矩阵,  $a_{ij}$  为 0 表示  $(i, j)$  之间无边相连, 反之  $a_{ij}$  为 1 表示  $(i, j)$  之间存在边。  $b_{ij}$  和  $c_{ij}$  在  $(i, j)$  之间无边时取值为 0, 反之取其给定值。  $m$  为蚂蚁的数量, 则目标函数为:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} a_{ij} \quad (20)$$

$$\text{其中, } s. t. \begin{cases} c_{ij} a_{ij} > 0 \\ c_{ij} > 0 \\ a_{ij} > 0 \\ (i, j) \text{ 边} \in E_x \\ E_x \subset E \end{cases}$$

### 3 漏电故障诊断系统的设计与实现

#### 3.1 多智能体诊断系统系统框架<sup>[11]</sup>

根据漏电故障诊断的特点, 笔者提出了可重构的多智能体诊断系统结构(见图 3), 这种结构把传统的多故障综合诊断化为面向依据监控信号, 监控对象的结构等特征重构形成的多智能体模块诊断, 诊断机制更加灵活、准确而且易于修改、扩充。

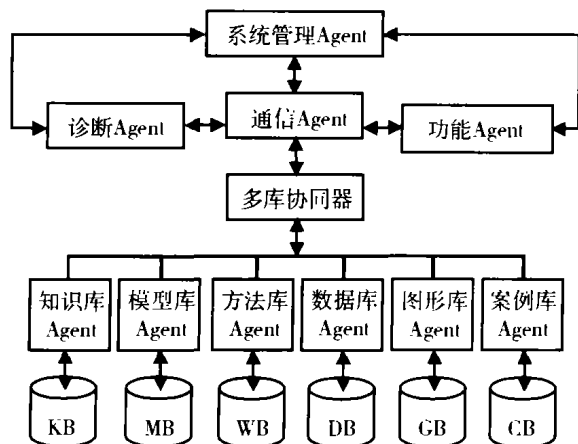


图3 可重构多智能体诊断系统

Fig. 3 Reconfigurable multi-agent diagnosis system

在多 Agent 诊断系统中, 系统管理 Agent、诊断 Agent 和功能 Agent 是系统中的 3 种不同性质的 Agent。系统管理 Agent 是进行任何诊断任务的第一步, 是系统运行的基础, 它主要负责诊断系统中 Agent 的任务分配、管理与协调, 体现了系统诊断的思路与策略。诊断 Agent 真正完成各个子故障的诊断, 确定整套设备的状态好坏。功能 Agent 则协调系统管理 Agent 完成一系列任务, 如用户交互、征兆获取等。通信 Agent 作为一种特殊的功能 Agent 在本系统中被单独提出来, 它是整个系统运行的核心, 所有 Agent 之间的协作和交互都要通过它来进行, 它管理着系统全局数据区。

#### 3.2 通用的故障诊断智能体模型<sup>[12]</sup>

一般来说复杂系统采用分层分块, 逐层细化达到设计目的, 故而诊断系统也应设计为分层次的、从系统级、子系统到部件级逐层细化。根据物理电路图划分框架(图 4)。

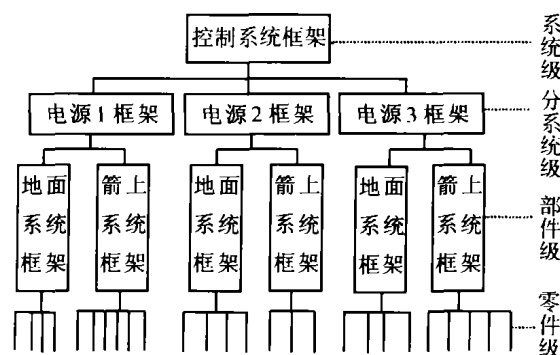


图4 运载火箭控制系统框架

Fig. 4 Framework for launching rocket controlling system

不管被诊断对象处于什么层次, 也不管诊断采取什么样的推理方法, 采取什么样的模型。诊断工作存在着一些内在的、共性的、抽象的因素。例如, 被诊断对象都有与外界打交道的通道: 输入、输出。加载在这些输入、输出端口上的测试结果组成了征兆, 而各种推理过程的不同性质上是体现在对测试结果、征兆使用方法的不同性上。因此能够以一种通用的代理者模型来描述诊断。诊断代理者包括输入、输出、下级代理者和诊断行为。这个模型如图 5 所示。这种抽象模型可以用面向对象编程中的类来实现。

#### 3.3 系统运行实例<sup>[13]</sup>

应用 Visual C++ 语言实现了计算机辅助运载

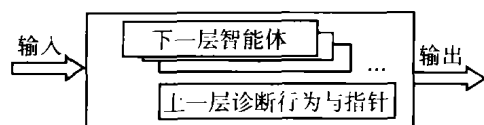


图 5 故障诊断智能体模型

Fig. 5 A model of fault diagnosis agent

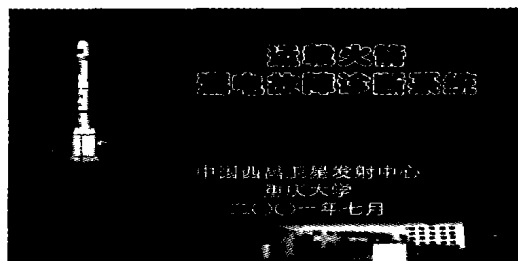


图 6 诊断系统运行的主界面

Fig. 6 Diagnosis system run main interface

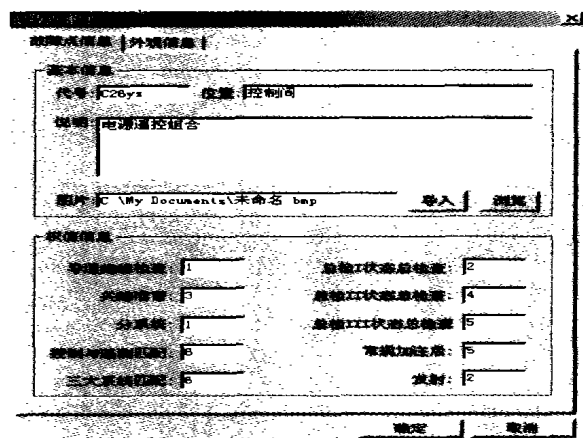


图 7 部件属性的界面

Fig. 7 Component attribute interface

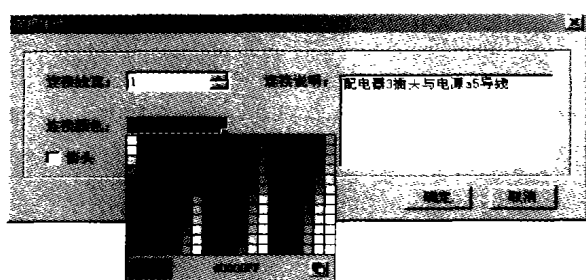


图 8 关系属性的界面

Fig. 8 Relation attribute interface

火箭控制系统漏电故障关系传播图的图形输入,并应用于漏电故障的诊断分析上,取得了令人满意的结果。下面以运载火箭控制系统的电源 I 负母线漏电故障诊断为例,给出了部分应用结果。图 6 是诊断系统运行的主界面。图 7 和图 8 是绘制故障关系

传播图时编辑部件属性和部件关系后屏幕的硬拷贝。图 9 是漏电故障诊断程序运行后,形成的诊断交互界面,图中的小长方形及编号代表线路中的元部件。图 10 是系统运行后生成的诊断报告。

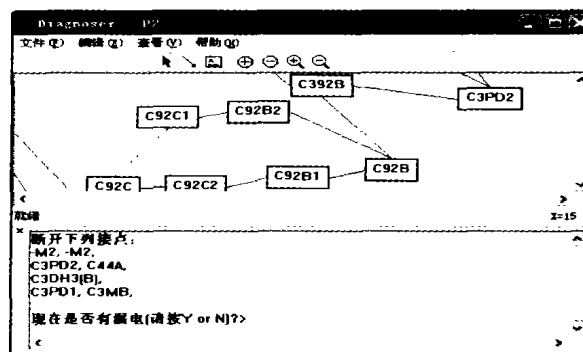


图 9 诊断交互界面

Fig. 9 Human-machine interface

CZ-3B的运载火箭的控制系统漏电故障诊断					
故障现象					
火箭发射前功能检查时, M2负母线漏电30uA					
负责人		曹雪红			
时间		2003-3-6 13:48:59			
步骤号	建议动作	实际动作	系统响应	中间结论	
1	断开TB2	断开TB2	系统漏电	中间结论	
2	断开TB1	断开TB1	系统漏电	中间结论	
3	断开TB4	断开TB4	系统漏电	中间结论	
4	断开C91B1	断开C91B1	系统不漏电	C91B1漏电	
5	连上TB2	连上TB2	系统不漏电	中间结论	
6	连上TB1	连上TB1	系统漏电	TB1漏电	
7	连上TB4	连上TB4	系统漏电	TB4漏电	
故障诊断结论					
C91B1漏电, TB1漏电, TB4漏电					

图 10 生成的诊断报告

Fig. 10 Diagnosis report

#### 4 结束语

在假定各节点发生故障的概率相同或不同情况下,利用 CZ-3B 型运载火箭控制系统的电路在该平台上验证了诊断算法,验证结果表明:诊断对象的知识输入简单,不易出错;漏电故障定位准确,能一次找出所有漏电故障;该系统充分利用了专家知识和对象系统结构知识,既提高了诊断效率,又保证了诊断软件的鲁棒性。测试诊断结果充分证实了该方法能够有效地用于火箭控制系统漏电故障的诊断,诊断效率大大提高。在提高诊断效率的问题上,引入了诊断代价的概念,这符合实际的情况,但是,怎样综合诊断代价和故障权重两个因素还有待进一步的研究,以达到多目标最优。

## 参考文献:

- [1] 邢琰, 吴宏鑫, 王晓磊. 航天器故障诊断与容错控制技术[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 221-226 [Xin Yan, Wu Hongxin, Wang Xiaolei. Survey of fault diagnosis and fault-tolerance control technology for spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2003, 26(1): 28-33]
- [2] Zhang Yue, Li Deying. Hierarchical structure decomposition Models of failure diagnosis for spacecraft systems[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1996, 16(10): 38-43
- [3] Kokawa M. Fault location using diagraph and inverse direction search with application[J]. Automatica, 1983, 19(2): 729-735
- [4] Lin K Y, Yang Z. Using structure information to guide diagnosis[J]. Transactions of Tianjing University, 1997, 3(1): 48-53
- [5] Davis R. Diagnostic reasoning based on structure and behavior [J]. Artificial Intelligence, 1984, 24(2): 347-410
- [6] Song Zhiping, Li Yinghong, Qu Yu'an. Conditional trouble graph for describing fault relation of a complex system[J]. Systems Engineering and Electronics[J], 2003, 25(1): 116-118
- [7] 樊友平. 可重构故障诊断系统的理论与方法及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003 [Fan Youping. Research on theory and approach of reconfigurable intelligent fault diagnosis system and its application, Ph. D. Dissertation. Chongqing: Chongqing University, 2003]
- [8] Dorigo Marco, Bonabeau Eric, Theraulaz Guy. Ant algorithms and stigmergy [J]. Future Generation Computer System, 2000, 16(8): 851-871
- [9] Stutzle Thomas, Hoos Holger H. Max-Min ant system[J]. Future Generation computer System, 2000, 16(8): 889-914
- [10] Ding Jianli, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. Dynamic optimization routing method based on ant adaptive algorithm[J]. Control and Decision, 2003, 18(6): 751-753
- [11] 樊友平, 黄席樾, 柴毅. 基于细胞免疫应答理论重建故障诊断智能体[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(1): 50-55 [Fan Youping, Huang Xiyue, Chai Yi. Reconfiguration of fault diagnosis multi-agent based on cell immune response theory[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(1): 50-55]
- [12] 曾雪红, 樊友平, 黄席樾. 运载火箭控制系统漏电故障诊断问题求解[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(12): 48-54 [Zeng Xuehong, Fan Youping, Huang Xiyue. Leak current fault diagnosis problem-solving in launch vehicle controlling system[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(12): 48-54]
- [13] 唐贤明, 樊友平, 黄席樾. 运载火箭控制系统漏电诊断平台的设计与实现[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(1): 28-33 [Tang Xianming, Fan Youping, Huang Xiyue. Designing and realization of leak current fault flat roof for launch vehicle controlling system[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(1): 28-33]



作者简介: 樊友平(1970-), 男, 湖北荆州人, 博士, 现为武汉大学电气工程学院博士后, 研究方向为智能控制与知识工程、复杂控制系统的智能故障诊断等。

通信地址: 鄂武汉市武昌区东湖南路8号武汉大学电气工程学院博士后流动站(430072)

E-mail: Fyopingnxinrong@yahoo.com.cn

## Research on the leak current fault diagnosis system for launch vehicle control system

FAN You-ping<sup>1</sup>, CHEN Yun-ping<sup>1</sup>, HUANG Xi-yue<sup>2</sup>, CHAI Yi<sup>2</sup>, GAO Bo<sup>3</sup>

(1. Electrical Engineering College, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Automation College, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. XiChang Satellite Launching Center, XiChang 615000, China)

**Abstract:** In point of view of the system, the characteristic of leak current fault diagnosis in launch vehicle controlling system was analyzed. The fault was a connecting way for system factors. In order to describe the relation between system condition and fault relation in analyzing fault relation of a complex system exactly and effectively, a descriptive model of conditional fault graph was presented. After being defined and analyzed, the state-tree of the system condition was combined with fault graph to form a conditional fault graph. Then a new intelligent algorithm called ant algorithm was introduced to achieve the optimal test sequence and direct decision for the multiple fault state of the system. A characteristic example was applied in the control system of launch vehicle. The graph can describe the influence and effect of the condition on the fault relation effectively. It is applicable to automatic description and analysis of fault relation. Ant algorithm can choose dynamic routing real-timely and adaptively. The application to the fault diagnosis for the control system of launch vehicle shows the effectiveness of the method.

**Key words:** Launch vehicle; Fault diagnosis system; Leak current fault; Ant algorithm; Optimal test sequence