

## 复杂装备故障诊断任务路径规划

李云飞<sup>1</sup>, 胡国平<sup>1</sup>, 李强<sup>2</sup>, 李天<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2. 空军工程大学训练部,陕西西安,710051)

**摘要** 针对复杂装备故障诊断任务路径规划问题进行研究,提出了一种基于图论的故障诊断任务建模方法。将装备的结构关系用邻接矩阵表示,并利用可达矩阵分析查找耦合任务集,使故障诊断任务模型得以简化;分析了故障诊断任务模型中有、无先验知识的任务路径规划2种情况,对经典的深度优先搜索算法和贪心搜索算法进行了改进,并将其应用于地空导弹武器装备分系统中进行任务路径规划,举例结果验证了方法的可行性和有效性,提高了故障诊断效率。

**关键词** 故障诊断;任务规划;任务模型;深度优先算法;贪心算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.005

**中图分类号** TP206+.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0017-04

## A Study of Task Path Planning in Fault Diagnosis for Complicated Equipment

LI Yun-fei<sup>1</sup>, HU Guo-ping<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, LI Tian<sup>1</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the problem in the fault diagnosis task for path planning, a certain fault diagnosis modeling method is proposed based on graph theory, the fault diagnosis task model is simplified, the structural relationship of equipment is represented by adjacency matrix, and the coupled task set is found and merged by using reach matrix. By analyzing and studying the fault diagnosis path planning in depth, two patterns of the fault diagnosis task model are distinguished by containing priori knowledge or not, and the classic depth-first algorithm and the greedy algorithm are improved. The algorithm is applied to the fault diagnosis of surface-to-air missile weapons to plan the path. The results show that the method is feasible and effective, and the fault diagnosis efficiency is improved.

**Key words:** fault diagnosis; task planning; task model; depth-first algorithm; greedy algorithm

为了适应信息化条件下武器装备保障的需要,采用远程协同故障诊断的思想,是今后复杂武器装备故障诊断的一个重要发展方向。远程协同故障诊断综合了网络技术、计算机技术、分布式人工智能等学科,为装备维修人员提供了一个开放的、多诊断资源支持的、协同工作的诊断环境。目前对协同诊断过程研究较多的是任务的分解与分配,如刘建辉、李

盘靖等人运用诊断资源与任务之间的模糊隶属度函数矩阵完成任务的分配<sup>[1]</sup>,而作为任务分配的基础,任务路径规划研究较少,文献[2]仅对任务执行路径运用 Dijkstra 算法进行搜索规划,没有考虑是否存在先验知识和任务之间耦合关系的影响,针对这一问题,本文首先对诊断任务之间的耦合关系进行分析,其次分别研究了先验知识有无情况下贪心算法

收稿日期:2013-03-01

基金项目:陕西省科技研究发展计划资助项目(2012K06-09)

作者简介:李云飞(1988-),男,陕西咸阳人,硕士生,主要从事远程故障诊断研究。E-mail:fqlyf@126.com

和深度优先算法在任务路径规划中的应用。

### 1 故障诊断任务模型的建立

为了有效地对任务执行路径进行规划,首先应该建立故障诊断任务模型,模型的建立可以根据装备的系统功能、结构层次、故障模式等<sup>[3-4]</sup>进行,地空导弹武器系统是一个装备相对分散、分机子系统相对集中的系统,根据这一特点,本文采用结构分解,以明确故障诊断任务。结构分解是从结构组成上对整个系统进行分解,将其总体结构分解为下一层次的子结构,直到最低的功能模块。对地空导弹武器系统而言,结构分解的层次结构一般为武器系统级、设备级、机柜级、组合级,最终到插件级为止。地空导弹武器系统的天线高频设备的接收机机柜一般结构见图1,图中实线有向边表示元器件的物理连接关系,虚线有向边表示虽然元器件间没有直接的物理连接关系,但具有信息交互关系。有向边上的权值为运用 Bayes Network 节点计算模型根据装备运行的历史参数计算推理所得,具体计算方法见文献[5]。图1中共有14个诊断子任务,从组成结构可以把子任务分为3个层级。

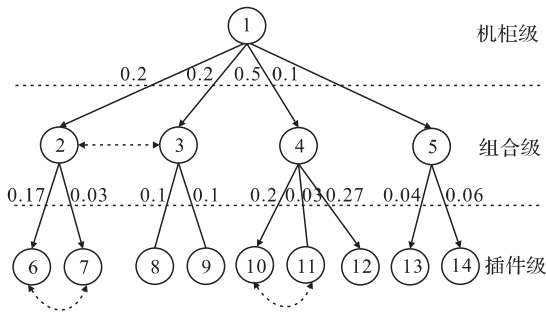


图1 故障诊断任务模型  
Fig.1 Fault diagnosis task model

### 2 诊断任务的去耦合化

故障诊断子任务间往往存在耦合关系,即子任务与子任务之间相互存在信息的交互和影响,当相互耦合的任务分别单独在不同的诊断资源中进行故障诊断时,会增加故障诊断资源间交互协作难度,额外增加系统的通信开销,因此,需要在任务执行路径规划前对诊断子任务进行去耦合化,使诊断任务路径规划结果更加清晰<sup>[6-7]</sup>。

本文将图论的相关概念引入到地空导弹装备故障诊断中,运用邻接矩阵  $T$  直接将武器装备的树形结构层次图转化为矩阵形式,根据矩阵  $T$ ,可以得到反映系统元件间可达关系的可达矩阵  $P$ ,运用矩阵

$P$  处理诊断子任务之间的耦合关系,找出存在耦合的诊断子任务集,并把相互耦合的诊断子任务集进行合并,通过化简得到非耦合的诊断任务关系,最后由化简后的可达矩阵  $A$  得到新的故障诊断模型,具体过程如下。

由图(1)可得该分系统的邻接矩阵  $T$  与可达矩阵  $P$  分别为:

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 P &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

为了得到该系统中的任务耦合关系,通过  $P \cap P^T$  计算得到耦合任务查找矩阵  $\bar{P}$ ,根据矩阵  $\bar{P}$ ,找出存在耦合关系的任务集并将其合并为一个诊断子任务,最后得到去耦合的化简矩阵  $A$ ,见式(2)。

式(2)中,矩阵  $\bar{P}$  中线性相关的行数分别为第2,3行,第6,7行,第10,11行,则可得对应的耦合任务集分别为任务{2,3},任务{6,7},任务{10,11},对耦合任务集中的任务应分配给同一诊断资源进行处理。通过对耦合任务集的合并,故障诊断模型中的任务集为{1},{2,3},{4},{5},{6,7},{8},{9},{10,11},{12},{13},{14},把故障诊断模型的可达

矩阵  $P$  简化为可达矩阵  $A$ , 根据矩阵  $A$  可以重新构造去耦合化的故障诊断任务模型, 见图 2。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

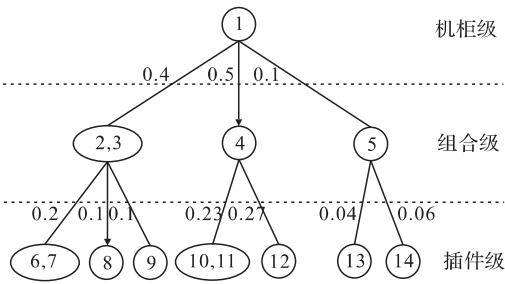


图 2 简化的故障诊断任务模型

Fig.2 Simplified fault diagnosis task model

### 3 诊断任务路径规划

#### 3.1 无先验知识的任务路径规划

当故障诊断任务模型中不包含对任务执行路径影响的先验知识时,故障诊断任务路径规划属于无信息的搜索,即不考虑图 2 中有向边权值的情况下,对树形结构进行搜索。这与搜索算法从树形结构的根节点遍历到叶子节点的过程是一致的,但排故过程中的信息搜索是具方向性的,其往往选择一条分

支路径进行搜索,当到达叶子节点时如果故障得到排除,则故障诊断过程结束,如果故障没有排除,则选择另一条路径继续进行搜索,直到故障被排除为止,或者故障诊断任务失败。上述过程与搜索算法中的深度优先搜索过程基本一致,区别是当遇到叶子节点时,即可能的故障源,便输出其到根节点的路径,所以本文中对无先验知识的路径规划问题采用改进的深度优先搜索算法。

定义  $i$  代表故障诊断模型中节点的编号,  $n$  代表节点的数目, 数组  $visited[]$  表示节点是否被访问过, 当节点被访问过记为 1, 未被访问过记为 0。

初始化  $i=0$ , 即从根节点开始访问;  $i=0, 1, \dots, n; visited[i]=0$ 。

改进的深度优先算法步骤如下:

**步骤 1** 访问节点  $i$ , 置  $visited[i]=1$ , 转入步骤 2;

**步骤 2** 搜索节点  $i$  未被访问的子节点, 若存在子节点  $j$ , 则转入步骤 1, 否则转入步骤 3;

**步骤 3** 判断该节点是否为叶子节点, 如果是, 转入步骤 4, 如果不是, 转入步骤 5;

**步骤 4** 输出此叶子节点到根节点所经历的节点序列, 判断数组  $visited[]$  中的数据是否为全 1, 如果是, 则搜索过程结束, 如果否, 则转向步骤 5;

**步骤 5** 回溯至上层父节点, 转入步骤 2。

执行改进的深度优先搜索算法, 可得表 1 的故障诊断任务执行顺序表。在表 1 中, 共有 7 条诊断任务执行路径可供参考, 反应了该故障诊断任务模型中的所有任务执行路径, 由改进的深度优先搜索算法得到的故障诊断任务执行路径的优点是不需要任何先验知识, 可操作性强, 不受主观因素的影响, 但由于其缺少先验知识, 只给出了诊断任务执行时的参考路径, 却没有给出参考路径间的优先选择顺序, 这种情况比较适合新装备的故障诊断或在先验知识不足的情况下进行。

表 1 无先验知识任务路径规划结果

Tab.1 Task planning result without containing priori knowledge

序号	诊断任务路径
1	$T_{6,7} \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$
2	$T_8 \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$
3	$T_9 \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$
4	$T_{10,11} \rightarrow T_4 \rightarrow T_1$
5	$T_{12} \rightarrow T_4 \rightarrow T_1$
6	$T_{13} \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$
7	$T_{14} \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$

#### 3.2 有先验知识的任务路径规划

在故障诊断中, 先验知识可以以专家经验、故障

历史数据等形式给出。本文中先验知识以故障发生概率的形式在诊断任务模型节点之间的有向边上分布着。借助先验知识,通过诊断任务路径规划,找出导致装备故障发生最大可能的故障源,其基本思想是选择当前已搜索路径中权值最大的边进行访问,这与贪心搜索算法中选择当前最优路径进行搜索的思想是一致的,可以根据故障诊断路径规划的特点对贪心搜索算法进行改进,在每次搜索到叶子节点时输出从叶子节点到根节点所经历的节点路径。

算法描述如下:

**步骤 1** 访问节点  $i$ , 预置  $visited[i]=1$ , 转入 **步骤 2**;

**步骤 2** 判断节点  $i$  是否存在未被访问的子节点, 存在转入 **步骤 3**, 不存在转入 **步骤 4**;

**步骤 3** 比较连接子节点的有向边权值与已访问节点中的待搜索有向边的权值, 选取权值最大的节点, 转入 **步骤 1**;

**步骤 4** 判断是否为叶子节点, 如果是, 转入 **步骤 5**, 如果不是, 转入 **步骤 6**;

**步骤 5** 顺序输出该节点到根节点所经历的所有节点, 判断  $visited[]$  数组中是否全为 1, 如果是, 结束搜索, 如果不是, 转入 **步骤 6**;

**步骤 6** 回溯至上层父节点, 转入 **步骤 2**。

执行改进的贪心算法, 可以得到表 2 的故障诊断任务执行路径顺序表。当故障诊断模型包含有先验知识时, 先验知识可以使故障诊断的任务执行朝着导致故障发生的最大概率的方向进行诊断搜索, 运用先验知识, 依据概率大小得出了 7 条诊断路径, 故障诊断人员可以根据故障发生的概率大小对装备进行排故, 提高了故障诊断效率。

表 2 有先验知识任务路径规划结果

Tab.2 Task planning result contain priori knowledge

序号	诊断任务路径	概率值
1	$T_{12} \rightarrow T_1 \rightarrow T_1$	0.27
2	$T_{10,11} \rightarrow T_4 \rightarrow T_1$	0.23
3	$T_{5,7} \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$	0.20
4	$T_8 \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$	0.10
5	$T_9 \rightarrow T_{2,3} \rightarrow T_1$	0.10
6	$T_{14} \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$	0.06
7	$T_{13} \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$	0.04

断任务模型中的耦合任务集, 并就诊断任务模型中是否存在先验知识 2 种情况分别作了研究, 对经典的深度优先搜索算法和贪心搜索算法作了改进, 通过具体实例验证了搜索算法的有效性。该方法尚未考虑诊断资源对诊断任务规划的影响, 是今后诊断任务建模与规划进一步研究的内容。

参考文献(References):

[1] 刘建辉. 远程协同故障诊断任务分配研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(7): 1164-1167.  
LIU Jianhui. The study of task distribute for remote fault diagnosis[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2011, 30(7): 1164-1167. (in Chinese)

[2] 李伟, 张黎. 基于协同策略的故障诊断应用技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(2): 92-97.  
LI Wei, ZHANG Li. The study of fault diagnosis application based on cooperative policy [J]. Computer measurement & control, 2010, 18(2): 92-97. (in Chinese)

[3] Janos Gertler, Jin Cao. Design of optimal structured residuals from partial principal component models for fault diagnosis in linear systems [J]. Journal of process control, 2005, 15(6): 585-603.

[4] Likhachew M, Ferguson D. Anytime dynamic a star: an anytime replanning algorithm [C]//International conference on robotics and automation (ICAR). Bangkok, Thailand: IEEE press, 2005: 352-354.

[5] 张荣涛. 复杂装备远程智能监测、诊断与维护系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.  
ZHANG Rongtao. The study of remote monitor diagnosis and maintenance system for complicated equipment[D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2002. (in Chinese)

[6] Zhou X J, Xia L F, Jay Lee. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation [J]. Reliability engineering and system safety, 2007, 92(8): 530-534.

[7] Bangemann T, Rebeuf X, Reboul D. Protes-creating distributed maintenance systems through an integration platform [J]. Computers in industry, 2006, 57(6): 539-551.

(编辑: 田新华)

4 结语

本文通过邻接矩阵和可达矩阵分析处理故障诊