

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.005

基于 3 维相关性矩阵的故障诊断方法

张 靖^{1,2}, 陈 昌^{1,2}, 柴旭东^{1,2}, 洪 艳^{1,2}, 杨雪旗^{1,2}

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 2. 宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854)

摘要:为解决航天器控制系统难以快速准确地诊断定位故障的问题,提出一种 3 维相关性矩阵的故障诊断方法。根据复杂系统功能原理,建立不同状态的最优化故障传播有向图模型,依据 3 维相关性矩阵的映射关系及检测结果快速映射到故障模式,实现系统故障的快速诊断定位及测试点的最优化设计。结果表明:该方法可以减少测试点的设置数量,降低故障诊断系统的复杂度,提高诊断的快速性。

关键词:故障诊断方法; 3 维相关性模型; 故障有向图

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis Method Based on 3D Correlation Matrix

Zhang Jing^{1,2}, Chen Chang^{1,2}, Chai Xudong^{1,2}, Hong Yan^{1,2}, Yang Xueqi^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligence Control, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to solve the problem that the spacecraft control system is difficult to diagnose and locate fault quickly and accurately, a fault diagnosis method based on 3D correlation matrix is proposed. According to the functional principle of complex system, the optimal directed graph model of fault propagation of different states is established. According to the mapping relationship of the 3D correlation matrix and fast mapping of detection results to fault modes, it realizes the rapid diagnosis and location of system faults and the optimal design of test points. The results show that this method can minimize the number of test points, reduces the complexity of fault diagnosis system and improves the rapidity of diagnosis.

Keywords: fault diagnosis method; 3D correlation model; fault directed graph

0 引言

目前,工程实际应用的故障诊断方法种类繁多,从建模方式区分,主要分为定量模型和定性模型。定量模型是对系统使用状态空间的方式进行描述,通过比较系统实际输入输出值与状态空间模型输出值的偏差来提取故障征兆,进而实现故障定位;定性模型通过寻求系统中的因果关系(如信息传递关系、故障传播关系、物理关系等)进行建模,依据系统的结构、行为功能等方面的知识进行推理诊断^[1-2]。

航天领域武器型号控制系统产品具有系统复杂、耦合性强、集成化程度高的特点,建立如此复杂的定量模型非常困难,不适合采用定量模型诊断的方法^[3-4]。依据故障传播关系建立系统定性模型,通过故障树表征系统的逻辑关系,通过获取的诊断知识及模型推理能够实现系统故障的快速诊断定位。然而受限于产品安装空间狭小、测试条件的限制等因素,获取的诊断知识无法完全满足系统故障

诊断的需求^[5-6]。

通过分析发现:航天武器型号控制系统是一个典型的“时变系统”,在不同的工作状态,系统中仅有部分活跃单机进行工作,其他单机处于静默状态不会参与故障的发生。不同的状态下,系统的有效故障传播模型仅仅是系统故障传播模型的子集,相应地降低了对诊断信息获取的依赖性。

基于此,笔者提出一种 3 维故障相关性矩阵的概念,通过增加系统工作状态维度,将相关性矩阵“立体化”。对不同工作状态下的故障传播模型与对应的诊断知识进行降维调整,简化了系统故障传播模型的复杂度,并降低了系统对测试方法及测点设置的要求,从而提高诊断效率和诊断结果的准确性。

1 系统建模

定义 1 系统在某一状态下的故障传播有向图模型为:

$$g = \{V, T\}。 \quad (1)$$

其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ (p 为故障模式数量)为故障

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-21

基金项目: 民用航天项目(d0204005)

作者简介: 张 靖(1987—),男,河北人,硕士,工程师,从事航天器控制系统故障诊断、专家系统等研究。E-mail: zbbwbb@163.com。

集,代表系统在该状态下可能发生的故障模式集合,比如计算机故障、惯组故障或某个功能模块故障(如电源模块故障、通信模块故障等); $T=\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ (k 为测试点数量)为最优测试点集,代表检测某种故障模式设置的检测手段集合,即测试点集合。一般情况下有 $k \leq p$ 。

定义 2 系统在某一状态下的故障传播有向图模型可由故障集与测试点集的相关性矩阵 \mathbf{K} 表示,即:

$$g = \mathbf{K} = \mathbf{V}^T \mathbf{T} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_p]^T [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_k] = (a_{ij})_{pk} \quad (2)$$

其中: v_p 为故障模式 (p 为正整数); t_k 为测试点 (k); $i = \{1, 2, \dots, p\}, j = \{1, 2, \dots, k\}$ 。矩阵 \mathbf{K} 的行向量表

示某种故障模式 v_p 与测试点集合中每一个测试点的相关性,其值用 a_{ij} 表示, $a_{ij}=1$ 代表相关, $a_{ij}=0$ 代表不相关。

定义 3 假设系统可以分解为 n 个状态,则系统全状态下的故障传播有向图模型可由 3 维相关性矩阵 \mathbf{G} 表示,即:

$$\mathbf{G} = \{\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_n\} \quad (3)$$

其中, \mathbf{K}_n 为系统某一状态下故障传播有向图模型的相关性矩阵 (n 为正整数)。

系统全状态下的故障传播有向图模型如图 1 所示,系统按照不同的工作模式划分为 n 种状态,图中的 $e_{i,j}$ 为故障现象从 v_i 传播到 v_j 的路径。

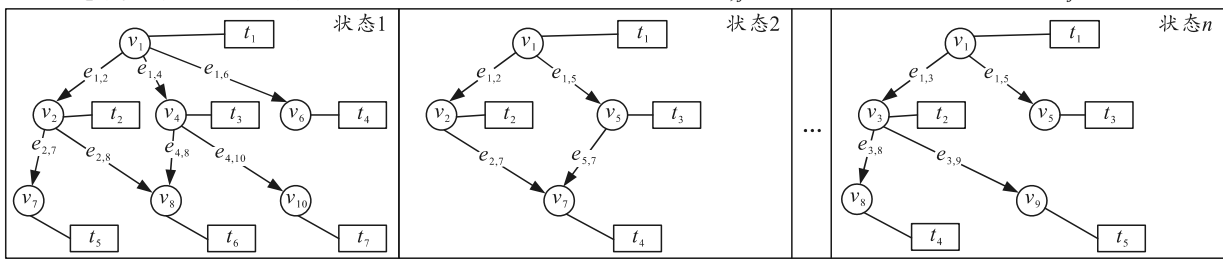


图 1 系统全状态下故障传播有向图模型

2 3 维相关性矩阵

对图 1 所示的系统建立 3 维相关性矩阵,假设系统可分解为 3 个状态,即 $n=3$ 。

以状态 1 为例:该状态下系统的故障传播有向图模型由 $g_1 = \{V_1, T_1\}$ 表示。其中: $V_1 = \{v_1, v_2, v_4, v_6, v_7, v_8, v_{10}\}$,包含了该状态下系统所有可能发生的故障模式; $T_1 = \{t_1, t_2, \dots, t_7\}$,包含了该状态下故障诊断所需的最小测试点集。假设故障模式 v_1 与测试点集 $\{t_1, t_2, \dots, t_7\}$ 具有相关性,故障模式 v_2 与测试点集 $\{t_2, t_3, t_6\}$ 具有相关性,故障模式 v_4 与测试点集 $\{t_3, t_6, t_7\}$ 具有相关性,故障模式 v_6 与测试点集 $\{t_4\}$ 具有相关性,故障模式 v_7 与测试点集 $\{t_5\}$ 具有相关性,故障模式 v_8 与测试点集 $\{t_6\}$ 具有相关性,故障模式 v_{10} 与测试点集 $\{t_7\}$ 具有相关性。则状态 1 条件下系统的故障传播有向图模型可由 2 维相关性矩阵 \mathbf{K} 表示,即:

$$\mathbf{K}_1 = [v_1 \ v_2 \ v_4 \ v_6 \ v_7 \ v_8 \ v_{10}]^T [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4 \ t_5 \ t_6 \ t_7] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理,得到状态 2 和状态 3 下系统的故障传播有向图模型对应的相关性矩阵为:

$$\mathbf{K}_2 = [v_1 \ v_2 \ v_5 \ v_7]^T [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_3 = [v_1 \ v_2 \ v_5 \ v_8 \ v_9]^T [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4 \ t_5] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将系统全状态下的相关性矩阵 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_n$ 组合,即可得到系统全状态 3 维相关性矩阵 \mathbf{G} 。如图 2 所示,采用 3 维坐标系描述系统 3 维相关性矩阵。其中:3 维坐标系的坐标轴分别为故障模式 V 、系统状态 n 和测试点 T ,三者之间的相关性由 3 维坐标系中的点来表示。

3 维相关性矩阵是在对系统所有状态进行优化后,增加了一个“系统状态”维度得到“立体”矩阵。图中的 3 维坐标交点即对应了系统特定状态下的每一个故障模式与最优化测量点的关系,“1”表示相关;“0”表示不相关。故障发生时,系统首先依据当前工况确定系统状态 n ,即确定了最优化测试向量 \mathbf{T} ,对该测试向量进行快速求解,将得到的

测试向量结果代入每一个故障模式对应的行向量中。对应某一个故障模式，若与该故障模式相关的所有测点均出现异常，则该故障模式成立。若存在多个故障成立的情况，则检查故障传播有向图中成立的故障之间是否存在故障传播关系，将传播关系的故障只保留最前端故障，即故障源头。最终筛选出来的故障即为最终定位故障。

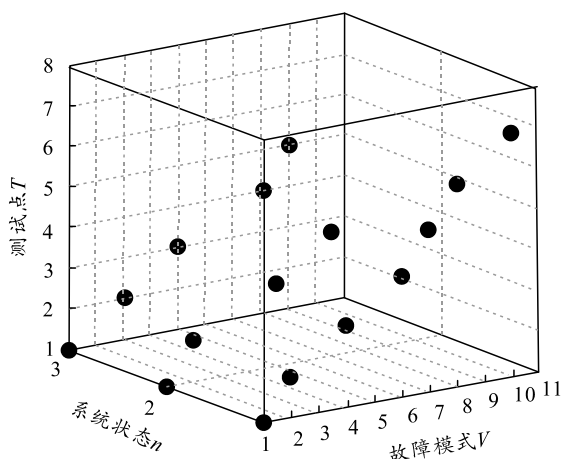


图 2 全系统 3 维相关性矩阵

依据 3 维相关性矩阵进行故障诊断的方法计算量小、速度快，对测试量要求低，非常适合于系统复杂、高耦合性、集成化程度高，且测试资源受限的航天领域控制系统产品的故障诊断。

3 故障诊断定位

以系统在状态 1 条件下 v_4 出现故障为例。如图 1 所示，由于 v_8, v_{10} 在故障传播有向图中处于 v_4 后端；因此， v_8, v_{10} 受 v_4 影响也会出现故障，对应的 $\{t_3, t_6, t_7\}$ 测点出现异常。

故障定位过程如下：

1) 故障诊断系统判断系统当前状态为状态 1，依据状态 1 故障传播有向图模型生成系统状态 1 下的相关性矩阵，如式(4)所示。

2) 依据 $\{t_1-t_7\}$ 测点的实际测试结果对状态 1 条件下的测试向量进行置位 ($\{t_1, t_2, t_4, t_5\}$ 测点正常，测试向量中对应的位置 0； $\{t_3, t_6, t_7\}$ 测点异常，测试向量中对应的位置 1)，求得的测试向量 $M=\{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\}$ 。

3) 将式(4)中的矩阵 K_1 表示成行向量： $N_1=\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ ， $N_2=\{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0\}$ ， $N_3=\{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\}$ ， $N_4=\{0, 0, 0, 1, 0, 0, 0\}$ ， $N_5=\{0, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$ ， $N_6=\{0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}$ ， $N_7=\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 1\}$ 。

将 2) 中求得的测试向量 $M=\{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\}$ 与 N_1-N_7 分别进行按位相与运算 (例： $M \& N_i = \{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\}$)，若 $M \& N_i = N_i$ ，则表示与 N_i 对应的故障模式相关联。显然， $M \& N_{3,6,7} = N_{3,6,7} = N_i$ ， N_3 与 v_4 相关联， N_6 与 v_8 相关联， N_7 与 v_{10} 相关联。由此可知，故障初步定位到 $\{v_4, v_8, v_{10}\}$ 。

4) 将 N_3, N_6, N_7 进行按位相或运算，即 $N_3 \parallel N_6 \parallel N_7 = \{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\} \parallel \{0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\} \parallel \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 1\} = \{0, 0, 1, 0, 0, 1, 1\} = N_3$ ， N_3 对应的故障模式为 v_4 ，表明 v_4 故障存在于故障传播有向图的前端，是故障产生的根本原因， v_8 故障与 v_{10} 故障是受 v_4 故障影响导致的。

5) 输出故障诊断结果，定位 v_4 发生故障。故障诊断结果与 v_4 发生故障的假设完全一致，表明该方法能快速准确地映射到相应的故障模式。

图 1 中的状态 2—状态 n 为不同时刻的系统状态，与状态 1 是相互独立的，无内在联系，故障定位方式同状态 1。

4 结束语

目前，基于 3 维相关性矩阵的故障诊断方法已成功应用到航天型号产品中。使用结果表明：该方法计算量小、速度快，对测试资源要求低，非常适合系统复杂、高耦合性，集成化程度高，且测试资源受限的航天领域控制系统产品的故障诊断。

参考文献：

- [1] 江山青, 李英顺, 张银图. 基于故障树和规则的火控系统故障诊断专家系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 45-49.
- [2] 吕镇邦, 陶来发, 孙倩, 等. 机载诊断模型的工程化开发方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(1): 76-80.
- [3] 陈侃, 李昌禧. 故障传播有向图的故障定位研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(4): 14-17.
- [4] SUN R. Multiblock global orthogonal projections to latent structures for fault diagnosis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2020, 204: 56-72.
- [5] LIU S, SUN Y, ZHANG L Y, et al. Fault diagnosis of shipboard medium-voltage DC power system based on machine learning[J/OL]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106399. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061520309753>.
- [6] 周虹, 陈志雄. 基于符号有向图的飞机故障风险评估方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2018(4): 402-409.