

# 基于多信号流模型的诊断策略动态生成

林志文<sup>1</sup>, 马锐<sup>2</sup>, 万福<sup>2</sup>

(1. 海军装备技术研究所, 北京 102442; 2. 海军指挥学院, 南京 211800)

**摘要:** 针对静态故障树诊断序列长、人工可干预度差和不支持多现象并行推理问题, 提出了基于 D-矩阵和 Rollout 信息启发搜索算法的故障诊断策略动态生成方法, 介绍了基于 TEAMS 多信号流模型的 D-矩阵数据获取方法和 Rollout 信息启发搜索算法的 DLL 独立封装技术、输入输出数据规范和动态交互控制方法; 基于此开发的交互式智能诊断系统 (IIDS) 软件平台经实际现场测试诊断验证, 对诊断现场出现的多种客观条件, 如系统工作模式或测试资源变化、用户干预和多故障现象并发推理等具有很好的适应性, 故障覆盖率和隔离率指标高, 对提高装备故障诊断的效率、准确性和灵活性具有显著作用。

**关键词:** 多信号流模型; D-矩阵; 诊断策略; 动态生成

## Dynamic Generation Method for Malfunction Diagnosis Strategy Tree Based on Multi-signal Flow Model

Lin Zhiwen<sup>1</sup>, Ma Rui<sup>2</sup>, Wan Fu<sup>2</sup>

(1. Naval Equipment Technology Institute, Beijing 102442, China;

2. Naval Command Institute, Nanjing 211800, China)

**Abstract:** To solve the applying problems of long diagnostic sequence, poor artificial intervention and no support to parallel diagnosis of multiple fault phenomena about the static generation method for the malfunction diagnosis strategy tree, with considering the field testing and diagnosis of ship equipments, on the basis of the TEAMS multi-signal flow model data structure, the study of crack method to D-matrix and the standalone DLL files, input/output specification and interactive control method of the search algorithm intrigued by the ROLLOUT information, the dynamic generation method for the malfunction diagnosis strategy tree is designed in the paper. The generation method for the D-matrix data based on the TEAMS multi-signal flow model and the interactive control method for search algorithm intrigued by the ROLLOUT information is introduced in the study. Based on the dynamic diagnosis strategy of the malfunction tree and the distributed test diagnosis methods, a platform of interactive intelligent diagnosis system (IIDS) is developed. The system with high adaptability to the objective conditions for the diagnosis of the scene, such as system operating mode or test resource changes, user intervention and parallel diagnosis of multiple fault phenomena, it's proved to have good effect in improving efficiency, accuracy, flexibility of equipment fault diagnosis.

**Keywords:** multi-signal flow model; D-matrix; diagnosis strategy; dynamic generation

## 0 引言

一般情况下, 舰船装备发生故障后, 艇员故障诊断方法主要依托现场提供的装备历史故障案例和指导手册 (包括纸质和电子), 并按照案例或手册引导逐步开展相关测试、诊断和维修。这种方法由于以预先编制好的故障树为主导, 一般也称为静态故障树方法<sup>[1-2]</sup>。存在问题: 一是对于大型复杂装备, 如雷达、声纳等, 由于涉及分机、电路板、模块很多, 编制的静态故障树就会很深, 造成诊断效率低; 二是预先编制的静态故障树在实施过程中, 只能按照故障树预定的顺序进行诊断, 如果故障树某中间测试节点出现错误或由于实际情况无法遂行测试, 故障树方法就可能造成错误结果或无法推理; 三是预先编制的静态故障树一般以某一故障症状开始推理, 而实际艇员修理过程一般是多个故障现象同时观测后再进行推理, 思路不一样, 同样造成诊断效率低下<sup>[2]</sup>。针对问题, 本文拟在传统静态故障树基础上, 优化设计诊断故障树生成方法, 使之具备从测

试性模型同时支持静态、动态故障树生成的能力, 并开发相应交互式智能诊断系统软件, 配套现场分布式通用测试诊断系统, 实现故障诊断自适应推理, 提供智能、快速、灵活、动态生成符合用户需求的故障树, 以适应现场修理作业环境, 提高诊断效率。

## 1 多信号流模型表达

多信号流模型主要为克服结构模型和信息流模型对于系统功能性故障描述的不足而提出的测试性建模方法, 其主要观点如下: ①针对可测试性设计, 模型设计的目的是保证能够识别系统功能性故障产生的原因; ②建模空间为故障空间, 而不是完整的系统空间, 故障空间的维度值与功能空间的维度值相关, 当功能空间是多维度值时, 故障空间也相应是多维的; ③模型只需确定系统的功能属性, 无需构建系统的定量关系; ④测试性模型能够描述系统中各个部件单元相关的信号属性和测试的信号属性之间的因果关系<sup>[3]</sup>。多信号流模型在结构上更接近系统的物理结构<sup>[4]</sup>, 且模型中的信号相互独立, 建模过程简洁清晰, 模型的集成和验证相对简单, 分析评估结果可信度高, 在舰船电子装备测试性分析和故障诊断中得到广泛应用。目前基于多信号流模型的测试性分析和评估成熟软件主要是美 QSI 公司的 TEAMS 软件, 因此本文将故障诊断策略树动态生

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2016-12-19。

**作者简介:** 林志文 (1975-), 男, 福建莆田人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事舰船装备自动测试、综合诊断、电磁兼容和信息化保障技术方向的研究。

成技术的研究基点放在多信号流模型和 TEAMS 软件模型应用方法。

多信号流模型的表现形式通常由层次化的系统模块组件、模块关联的诊断功能分解描述(系统功能分解、功能流信息等)和测试功能属性描述(测试点、测试位置、测试资源、测试过程和判定准则)组成,多信号流模型的关键要素表达如下:

① 系统模块组件集合:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_L\} \quad (1)$$

可分解且具有独立完整的系统级功能的组件单元集合,即层次化的系统模块组件描述。

② 模块关联的诊断功能集合:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\} \quad (2)$$

代表系统信号流中能够准确描述的模块组件特征属性或模块组件可能发生的故障模式集合,即诊断功能分解描述。

③ 测试点集合:

$$TP = \{TP_1, TP_2, TP_3, TP_4\} \quad (3)$$

代表用于测试诊断并发现功能故障的虚拟位置集合。

④ 可用测试集合:

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\} \quad (4)$$

代表用于测试诊断并发现功能故障的所有测试集合(包含与所有测试相关的判定准则和属性信息)。测试点集合和可用测试集合即代表了测试功能属性描述。

## 2 D 矩阵数据生成

TEAMS 软件建立的多信号模型是以文件形式和数据库保存的,诊断策略树生成所需要的 D 矩阵数据 TEAMS 软件并没有直接对外开放。本节我们主要研究通过 TEAMS 软件多信号流模型获取 D 矩阵数据的方法<sup>[4-5]</sup>。

对 TEAMS 文件内容分析可知,TEAMS 的多信号流模型的文件中跟 D 矩阵数据相关的主要是 \*.dep、\*.nsi、\*\_grf.map 和 \*.prm 几个文件。利用这几个文件可以分别得到 D 矩阵数值、故障/模块/测试/资源集数据、故障名称数据和测试费用、级别、概率数据,然后进一步可以获得 D 矩阵的完整信息。TEAMS 多信号流模型文件获取 D 矩阵信息主要步骤如图 1 所示。

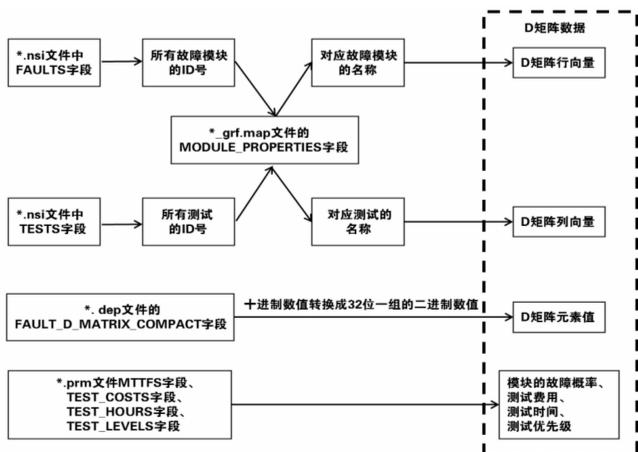


图 1 从 TEAMS 多信号流模型文件获取 D 矩阵

FAULTS 字段中获取所有故障模块的 ID 号,然后根据故障模块的 ID 号从 \*\_grf.map 文件的 MODULE\_PROPERTIES 获得对应故障模块的名称,则每个故障模块对应一个 D 矩阵行向量。

2) 确定 D 矩阵列向量集合。首先从 \*.nsi 文件中 TESTS 字段中获取所有测试的 ID 号,然后根据测试的 ID 号从 \*\_grf.map 文件的 TEST\_PROPERTIES 获得对应测试名称,则每个测试对应一个 D 矩阵列向量。

3) 确定 D 矩阵元素值,即故障与测试的依赖关系。D 矩阵每一行的元素值可以从 \*.dep 文件的 FAULT\_D\_MATRIX\_COMPACT 字段中获取。FAULT\_D\_MATRIX\_COMPACT 字段中数值与 D 矩阵每行元素值的对应关系为:将 D 矩阵每行的二进制数值 32 位分成一组,当最右侧不满 32 位时后面补 0 变成 32 位。将 32 位二进制数据转换成十进制数值,则可到 FAULT\_D\_MATRIX\_COMPACT 字段中对应的值。所以将 \*.dep 文件 FAULT\_D\_MATRIX\_COMPACT 字段中每组的十进制数值转换成 32 位二进制数值,并将右段多余的 0 删除就可以得到 D 矩阵每一行的元素值。

4) 确定 D 矩阵的附加信息。D 矩阵元素值只是 D 矩阵的基础信息,对于舰船装备实际故障诊断,在诊断过程中,为了生成最优的诊断策略,不仅要知道故障和测试的依赖关系,还要知道测试费用、测试编组、测试优先级和故障经验概率等信息<sup>[4-5]</sup>。这些信息可以从 \*.prm 文件中获得。具体为:从 MTTFS 字段获取各模块的故障概率,从 TEST\_COSTS 字段获取各测试的费用,从 TEST\_HOURS 字段获取各测试需要的时间,从 TEST\_LEVELS 字段获取各测试的优先级。

5) 确定故障模式与隔离模块的对应关系。D 矩阵代表了故障模式与测试的对应关系,在实际的维修过程中可以根据诊断的需要隔离到不同的级别。所以必须确定故障模式与要隔离模块的对应关系。具体方法为:从 \*.dep 文件的 FAULT\_MODULE\_MAPS 字段中获取故障模式对应的隔离模块序号,然后根据隔离模块序号从 \*.nsi 文件的 MODULES 字段中获取的隔离模块的 ID 号,再根据隔离模块的 ID 号从 \*\_grf.map 文件的 MODULE\_PROPERTIES 获得对应隔离模块的名称。

## 3 技术实现与分析

### 3.1 总体思路

改进传统基于静态诊断故障树浏览系统“僵化”故障诊断执行模式,在传统浏览系统外增加诊断推理软件,提供独立于浏览系统、同时支持静态和动态诊断故障树的“灵活”故障诊断执行平台,既可以按原来的方式执行预先生成的静态诊断故障树,又可以根据现场实际情况变化,依据用户多种干预选择(如仪器选择、故障现象选择和测试选择等)结果,动态灵活生成符合用户当前需求的故障诊断故障树,并提供新案例录入功能,以弥补测试诊断需求分析过程遗漏的故障模式解决方案。

如图 2 所示,在动态生成实现过程中采用 TEAMS-Designer 多信号流模型生成的 \*.dep、\*.nsi、\*\_grf.map 和 \*.prm 文件来进行故障诊断推理,软件的具体原理为:首先利用文件分别得到 D 矩阵数据、故障/模块/测试/资源集数据、故障名称数据和测试费用、级别、模块故障概率数据等。然后在实际诊断过程中随外部控制条件,如症状、资源、测试

1) 确定 D 矩阵行向量集合。首先从 \*.nsi 文件中

放弃、测试另选等变化从 D 矩阵中获取子 D 矩阵，然后再利用 Rollout 信息启发算法（封装为 DLL 件格式）生成特定的诊断策略树，引导用户开展测试和诊断，从而实现动态诊断策略的实现。

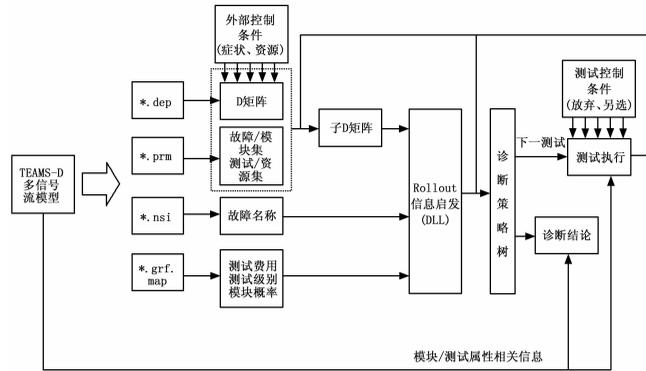


图 2 动态诊断策略树生成框图

### 3.2 诊断故障树动态生成技术途径

1) TEAMS 存储多信号流模型主要采用文件形式。因此本文研究 D 矩阵数据生成的获取主要从 TEAMS 文件中获取多信号流模型数据。

2) 动态条件一旦变化，将生成新的 D 矩阵数据，并再次调用 Rollout 信息启发算法。因此，为了便于实时调用，提高效率，Rollout 信息启发算法将以 DLL 的形式封装，其输出诊断策略树也将以符合诊断策略树模式统一定义的 XML 文档形式输出，便于其它用户调用；

3) 动态推理软件平台开发时，主界面基于 WEB 浏览方式，而对测试程序的执行调用还保留原有的 TPSCOM 形式，包含运行平台初始化、测试程序加载、测试组执行和运行平台退出 4 个接口函数，对仪器软面板的调用采用原有的 SPCOM 接口。

### 3.3 局部 D 矩阵生成

舰船电子装备现场诊断过程中可能发生一些客观情况，例如装备工作模式不同、测试资源缺乏、用户测试干预等，此时将导致部分测试不可执行，如果仍用全局 D 矩阵生成的静态诊断策略树将会由于某些测试无法完成导致诊断过程不能继续运行，甚至引导到错误维修结论。另外，当在现场维修过程中，如果存在多个故障现象，则同时基于多个故障现象进行诊断推理可以加快故障定位速度，提高故障诊断的效率，而全局 D 矩阵生成的静态诊断策略树不能利用多个故障现象。因此，在实际的诊断过程中可以根据实际情况导致的不可测测试、用户测试干预以及多个故障现象，利用全局 D 矩阵生成局部 D 矩阵，然后根据局部 D 矩阵生成诊断策略，这样，生成的诊断策略中将没有不可执行测试，另外也可以提高诊断效率。局部 D 矩阵的生成主要包括以下 3 种情况。

1) 当前测试  $t_j$  不可测的情况。

在实际维修的过程中，可能由于缺乏测试需要的资源或者由于当前测试点找不到导致当前的测试  $t_j$  无法完成，如果仍用原有静态诊断策略，将由于当前测试  $t_j$  无法完成，诊断策略无法继续进行。此时可以将原来 D 矩阵测试  $t_j$  对应的列删除形成新的局部 D 矩阵，然后再在新的局部 D 矩阵基础上利用 Rollout 算法生成新的诊断策略。

2) 用户主动选择测试  $t_j$  的情况。

在实际维修的过程中，修理人员可能会根据实际情况改变测试的顺序，在当前诊断的过程中用户主动选择测试  $t_j$ ，此时，可以根据用户选择的测试  $t_j$  的测试是否通过，在原来 D 矩阵的基础上生成局部 D 矩阵，然后再在新的局部 D 矩阵基础上利用 Rollout 算法生成新的诊断策略。

3) 多个故障现象并存的情况。

在实际的维修过程中，可能存在多个故障现象并存的情况，如果同时利用多个故障现象进行故障隔离，则可以提高故障隔离效率，而如果仍用原来的静态诊断策略，则不能充分利用多个故障现象，只能一步步判断，导致故障隔离时间较长。新的动态故障诊断策略树生成中，支持同时根据多个故障现象，生成诊断策略树，具体方法为：当出现多个故障现象时，利用故障现象的测试对应的 D 矩阵数值为 1 的行的交集生成局部 D 矩阵，然后继续利用 Rollout 算法生成策略诊断树，从而提高故障隔离的效率。

### 3.4 Rollout 算法 DLL 封装

在交互式诊断的过程中，每诊断一步都将生成新的局部 D 矩阵数据，并调用 Rollout 算法生成诊断策略<sup>[5]</sup>，为了便于 Rollout 算法的实时调用，提高调用效率，我们将 Rollout 算法封装到动态库 DLL 文件，在具体动态策略生成时主程序直接加载 DLL 文件，调用 Rollout 算法生成诊断策略。DLL (Dynamic Linkable Library) 动态链接库是一个包含可由多个程序同时使用的代码和数据的库。DLL 不是可执行文件，只是提供了一种方法，使进程可以调用不属于其可执行代码的函数。DLL 的结构和应用程序很相近，每个应用程序都有一个入口函数 WinMain，而每个 DLL 都有一个入口函数 DLLMain，DLL 中含有资源、数据段和代码段，可以像应用程序一样使用回调函数 (CALLBACK)，也可以使用自定义消息。DLL 在构成不同于应用程序的地方，主要有输入符号表和输出符号表，以方便应用程序调用 DLL 的函数<sup>[6-7]</sup>。

### 3.5 软件实现

软件在具体实现的过程主要涉及到的技术包括：主界面设计、数据库设计、基于 Servlet、JSP 和 Tomcat 服务器的远程应用服务技术、Rollout 算法的 DLL 封装、诊断数据文件的交互和 TPS 的加载等，下面进行具体介绍。主界面采用 Visual Studio 2010 开发，编程语言为 C#，后台数据库为 MS SQL Server 2005，数据库连接方案采用 ADO 方式。应用程序采用 C# 实现，所有的数据查询计算以及分析在数据库服务器端执行，计算及分析结果在客户端显示。交互式智能诊断系统的软件模块主要包括：开始诊断、诊断复现、案例录入、记录查询和统计预测 5 个模块。

### 3.6 结果分析

根据软件实现方案，研制了交互式智能诊断系统 (IIDS) 软件，故障推理界面如图 3 所示。相比于国内外其它同类产品，该软件集模型导入、动态诊断、案例录入、记录查询复现及统计分析等功能于一体的，具有人机交互功能的智能诊断系统，既可以按原来的方式执行预先生成的静态诊断策略树，又可以根据现场实际情况变化，依据用户多种干预选择（如仪器选择、故障现象选择和测试选择等）结果，动态灵活生成符合用户当前需求的故障诊断策略树。另外，IIDS 还可以与原浏览

$$\sigma_a = \frac{1}{f_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (f_i' - f_i)^2}{2m}} \quad (6)$$

其中:  $\frac{1}{f_0}$  为低频噪声,  $f_i'$  和  $f_i$  分别为连续测量的两个瞬时频率值,  $2m$  为测量次数,  $m$  一般取 100。从阿伦方差定义可以看出, 标准差越小时短稳性能越好。本时延测量系统采用的是标称频率 50 MHz 的带温补功能的晶振 (TCXO), 频率温度稳定度好, 短稳好, 可以有效提高时延测量精度。

### 6 结论

本文所提及的分布式测试系统主要由测控终端、网关节点和分布在测试区域内的数据采集装置组成, 所提的时延测量技术适用于分布式测控系统中实现网关节点和数据采集装置之间的时间同步。本文从实现原理上对这种采用时延测量技术来实现时间同步的方法给予了详细的阐述, 并进行了功能仿真验证以及试验验证。仿真及试验结论表明: 该测量方法简单、实用, 可以实现信号传输链路的高精度时延测量, 是一种行之有效的时延测量方法, 可以准确获得信号传输到各个测试装置的时延差, 进而实现各测试装置的时间同步。该时间同步技术适用于需要时间同步精度比较高的瞬态类信号分布式测试系统, 尤其适用于一些不能接受高成本时钟同步芯片或者不能接收到

(上接第 20 页)

系统通过 COM 接口进行双向异步信息交互, 即 IIDS 系统可以根据测试诊断情况通过 COM 接口实时搜索查询到 IETM 相关内容, 浏览系统也可以通过 COM 接口启动 IIDS 系统开展动态故障诊断过程。另外, 在测试性分析评估软件 (TEAMS/TADS) 和 IIDS 系统之间增加对多信号流模型的导入接口, 随时可以通过接口直接获取模型数据和诊断树、测试—诊断依赖性关系矩阵 (D 矩阵), 且不经其它修改即可直接开展静态/动态故障诊断方法, 避免前期所采用的诊断策略数据导入浏览系统过程, 降低复杂性。



图 3 交互式智能诊断系统 (IIDS) 故障推理界面

### 4 结束语

针对静态故障树方法在舰船电子现场测试诊断中发现的问题, 立足于 TEAMS 多信号流模型数据结构, 本文提出了基于 D-矩阵和 ROLLOUT 信息启发搜索算法的故障诊断策略树动态生成方法, 并开发了交互式智能测试系统 (IIDS) 软件平台, 提高了装备故障诊断的效率、准确性以及测试的通用性、

GPS 信号的复杂测试环境。

### 参考文献:

- [1] 王 爽, 胡冬旭. 基于 FPGA 的分布式测控装置设计与应用 [J]. 国外电子测量技术, 2015 (10): 11-13.
- [2] 赵德平, 韩建平. 基于 TDC\_GP2 的高精度时间差测量的关键技术研究 [J]. 材料与冶金学报, 2014, 4: 016.
- [3] 支超有, 姜丰收. 混合总线分布式测试技术研究及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3139-3140.
- [4] 沈 艳. 分布式测试系统协作理论及其通信平台实时性研究 [J]. 电子科技大学, 2004, 6.
- [5] 逢锦昊, 苏 涛, 杨 涛, 等. 基于 FPGA 的多路高速数据传输同步时延测量系统 [J]. 电子器件, 2015 (02): 447-451.
- [6] 王首浩, 仲 悦, 张 巍, 等. 一种用于分布式控制的光纤通信协议设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 9: 101.
- [7] 徐盛晨. 基于 FPGA 的实时数据采集与传输系统的设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [8] 马文起, 耿虎军, 郭肃雨, 等. 一种基于 FPGA 和 Matlab 的时延测量方法 [J]. 无线电工程, 2014, 44 (11): 38-40.
- [9] 庄晓燕. 分布式测试系统时钟网络结构与同步算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [10] 洪 锋, 张玉亮, 杨博真, 等. 水下传感器网络时间同步技术综述 [J]. 电子学报, 2012, 41 (5): 960-965.

和灵活性。

但是在诊断推理过程中, 故障诊断策略树的生成速度主要依赖于 D-矩阵的大小和搜索算法的效率。虽然采用的 Roll-out 算法效率较高, 但是当模型中故障模块数量和测试数目较大时, 故障推理时间仍然较长。因此, 提高算法的搜索速度, 进一步提升故障诊断策略树的生成效率是本文后期需要进一步关注和研究的重点。

### 参考文献:

- [1] 林志文, 基于多信号模型的系统测试性分析与评估 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 2 (14): 222-224.
- [2] 何巨模, 林志文, 舰船装备综合测试诊断技术与工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [3] Deb S, Pattipati K, Raghavan V, et al. A Multi-Signal Flow Graphs: A Novel Approach for System Testability Analysis and Fault Diagnosis [J]. IEEE Aerosp, Electron Syst Mag, 1995, 10 (5): 14-25.
- [4] Somnath Deb, Krishna Pattipati, and Roshan Shrestha, QSI's Integrated Diagnostic Toolset [A]. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON [C]. 1997.
- [5] Teams user guide [EB/OL]. Qualtech Systems, 2003, www.teamsQ-SI.com.
- [6] Fang Tu, Krishna R. pattipati, Rollout Strategies for Sequential Fault Diagnosis [J]. IEEE transactions on system, man, and cybernetics, part a: system and humans, 2003, 33 (1): 86-99.
- [7] Krishna R. Pattipati, Mark G. Alexandridis, Application of Heuristic search and Information Theory to sequential Fault Diagnosis [J], IEEE, 1989: 291-296.
- [8] 林志文, 马力, 基于多信号流模型和 Tomcat 服务器的远程综合诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9): 180-186.
- [9] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (12): 1616-1619.