

doi: 10.7690/bgzd.2021.07.014

远火武器系统虚拟维修的仿真技术研究

李思雨¹, 黄少罗¹, 吴巍屹¹, 王武², 张建平¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 西北机电工程研究所智能化技术室, 陕西 咸阳 712009)

摘要: 针对某型远程火箭炮武器系统虚拟维修训练中故障模拟难点, 在研究故障产生机理的基础上, 运用面向对象方法建立由维修对象、故障源、故障现象、故障传播有向图和检测点等组成的故障模型, 研究虚拟环境中故障特征信号、故障现象的模拟及仿真运行流程, 并利用 Virtools 实现某远程火箭炮火控系统典型故障的建模与仿真。结果表明, 该模型能实时生成故障现象和故障数据。

关键词: 远程火箭炮武器系统; 虚拟维修; 故障机理; 建模方法

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Research on Simulation Technology of Virtual Maintenance for Long Range Rocket Launcher Weapon System

Li Siyu¹, Huang Shaolu¹, Wu Weiyi¹, Wang Wu², Zhang Jianping¹

(1. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Intelligent Technology Department, Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712009, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of fault simulation in virtual maintenance training of a certain type of long-range rocket launcher weapon system, on the basis of studying the mechanism of fault generation, a fault model composed of maintenance object, fault source, fault phenomenon, fault propagation directed graph and detection point is established by using object-oriented method, and the simulation and operation of fault characteristic signal and fault phenomenon in virtual environment are studied. The typical fault modeling and simulation of certian type long-range rocket launcher fire control system is realized by Virtools. The results show that the model can realize fault phenomena and data in real-time.

Keywords: long range rocket launcher weapon system; virtual maintenance; fault mechanism; modeling methods

0 引言

预防性维修存在针对性差、工作量大、耗时长和费用高等局限。采用虚拟维修训练能有效地为装备维修操作、故障检测和技术保障等训练提供先进的实验环境和模拟手段, 可提升维修人员发现故障、排除故障的能力。从装备故障机理出发, 根据故障传递路径, 对装备出现故障的时机和状况进行预测, 从而能够及时采取有针对性的预防措施, 迅速保持和恢复装备的可靠性。

笔者以某型远程火箭炮火控系统自检故障问题为对象, 研究其自检不通过的故障机理, 按照故障检测和定位、故障隔离、装备分解、更换、重新装配、调校及检测等步骤, 以换件维修方式为主, 建立故障机理模型。根据这一过程, 构建一种基于图论^[1]的故障传播模型, 解决了虚拟维修系统中故障现象及故障数据实时生成和模拟问题, 使受训人员能够在更接近真实的虚拟环境中实施故障诊断操作。

1 故障建模分析

1.1 虚拟维修训练需求分析

虚拟维修训练需求分析包括故障现象与故障检测数据的分析。在进行故障排除的维修训练过程中, 故障现象是进行维修操作的首要资料, 也是进行故障分析定位的着眼点。在故障排除过程中必须对可能出现故障的部组件进行检测, 以部组件的状态来判断和定位故障源。检测过程中维修人员依据检测对象的状态数据来判断故障, 同时也是根据此检测结果来决定如何进行维修。

1.2 故障产生机理分析

故障机理模型是对装备在动力、机械、电气等方面故障原理的抽象描述, 是虚拟维修系统的核心。故障机理模型仿真为故障现象提供可靠的数据支撑。根据研究方法的不同, 可从2方面对故障产生机理进行分析: 1) 以故障源在故障传播路径中与其他节点的维修部件之间关系为对象研究, 即故障传播

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-04-20

作者简介: 李思雨(1988—), 男, 河北人, 硕士, 从事装备保障理论与应用技术研究。E-mail: 174994395@qq.com。

有向图分析法^[2]；2) 逐级分层分析故障源与故障现象之间的因果关系，即故障树分析法^[3]，比较适用于大系统可靠性、安全性分析和风险评价。

1.3 仿真方法分析

故障仿真方法主要包括机理仿真和现象仿真。前者是较为理想的方法，可以完整和有效地仿真故障现象及故障特征数据，但在虚拟环境中实现该模式较为困难且成本很高；后者是以故障模型表现形式为基础的建模方法，不考虑部组件发生故障时内部结构因素，仅仅关注部组件发生故障的输出信息，因而拥有很强的移植性并易于故障注入。若能将故障产生机理研究透彻，用较为简单的现象模拟方法就能达到符合要求的故障效果^[4]。笔者将采用故障现象模拟，对故障建模及仿真进行研究。

2 故障建模

故障建模实质是构建部组件处于失效状态时表现特性的建模过程。虚拟维修训练系统中的故障建模是指在正常状态的部组件模型基础上加入故障因素或描述参数使其表现出相应的故障模型。根据故障产生机理，建立故障源、故障现象和故障特征数据之间关系的关联模型，使仿真结果能够同时生成故障现象和故障特征数据，通过用户图形界面与训练人员进行交互，实现对故障的诊断和定位。

2.1 故障建模准备

故障建模准备阶段需要的工作^[5]：

- 1) 系统部件只存在正常和故障 2 种状态；
- 2) 当且仅当所有输入均为正常，则认为该系统部件处于正常状态；
- 3) 故障单元与各组成单元间的关联关系中只将故障关系作为研究对象。

2.2 故障建模步骤

1) 构建系统结构模型。建立模块之间的信号连接关系，得到故障源集合 C 。

2) 添加故障模式。在不考虑对系统影响极小的故障情况下，设置底层测试单元的故障状态。

3) 添加信号测试点^[6]。根据实际装备故障诊断测试点的位置和具体故障诊断的需要来设置信号测试点。假设故障模型的所有信号测试点为集合 TP ，同时根据测试信号与信号测试点的一一对应关系，测试点集合有测试集 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 和信号集 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ，其中 T_i 表示在 TP_i 处测试信号 S_i 。

4) 添加测试单元的系统功能。为建立故障模型中各故障源与系统功能之间的依赖关系，构建了测试单元与系统功能的对应关系，如表 1 所示。

表 1 测试单元与系统功能的对应关系

功能	C_1	C_2	C_3	C_4
F_1	√	-	√	-
F_2	-	√	√	√
F_3	√	-	√	√

5) 生成故障测试依赖矩阵。依赖矩阵表示故障模型中各测试点与故障现象之间的依赖关系。依据二者之间的依赖程度建立依赖矩阵 D ，矩阵中的每一个元素对应于故障有向图中的每一条有向边，有向边的权重就是矩阵元素的度量值，称为依赖度^[7]。将故障模型的故障关联关系推理转化为数学描述，可以得到依赖矩阵：

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix}。$$

在依赖矩阵中，

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & T_j \text{与故障 } F_i \text{ 相关} \\ 0 & T_j \text{与故障 } F_i \text{ 不相关} \end{cases}。$$

2.3 故障模型运行结构

根据以上建模分析，通过改进文献^[5]提出的故障模型，设计如图 1 所示的系统故障模型运行结构，其主要包括维修对象、故障现象和故障传播有向图 3 部分。

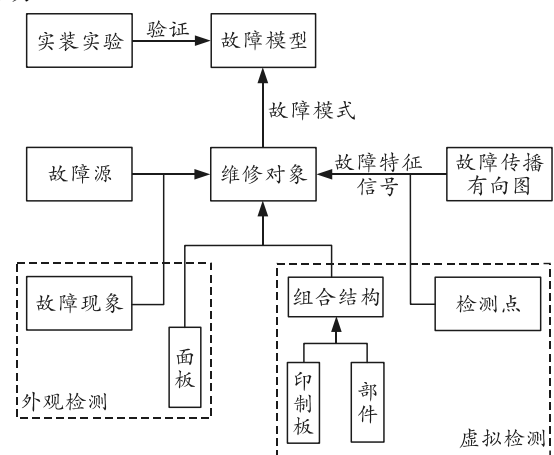


图 1 系统故障运行结构

维修对象是指故障源、故障传播路径上中间节点对象，具有维修对象名称、检测点编号与名称、当前工作状态、正常状态及故障状态检测特征数据等属性。当前工作状态表示检测点是否存在故障；

检测特征数据用于判定维修对象是否处在故障状态, 维修对象的类型不同, 其代表的内容也不同。具体操作上可以通过真实、虚拟检测仪器测得虚拟装备当前状态参数, 以判断中间节点是否处在故障状态。

故障现象是由一系列非正常功能症状组成, 可以从屏幕显示、指示灯、声音等方面表达。具体操作上可以通过外观检测方法进行判断。

需要注意的是, 模型还包括 2 个关系表, 分别是故障源与故障现象关系表、检测点与维修对象关系表。维修对象有可能存在多个检测点, 故与检测点是一对多的关系, 而故障源与故障现象则是多对多的关系。由于笔者是以单故障系统为研究对象, 因此只要确定故障源所产生的故障现象即可, 同时可在实际装备上进行故障试验, 着重采集单体操作面板的故障现象、采集单体设备输入、输出端口的信号特征等, 对故障模型进行修正和完善。

3 故障仿真

3.1 检测特征数据

检测特征数据是指维修对象处在故障状态时检测到的重要特征数据, 根据故障模式的不同可以分为外形、外表和功能数据 3 类^[8]。

1) 外形数据。

外形数据主要用于故障元器件发生形变等检测特征数据的建立, 在 3 维建模软件中完成, 正常数据是其已有 3 维模型, 而故障数据则通过改变其参数或利用拉伸、形变工具建立。在进行故障仿真时, 实时地用故障状态下 3 维模型替换正常模型, 即可实现数据的更新。

2) 外表数据。

外表数据主要用于磨损、腐蚀等故障机理造成表面质量发生变化的故障检测特征数据的建立, 可以通过改变其表面纹理完成。先期将纹理图案制成贴图导入仿真软件, 实时选取不同贴图来改变物体纹理, 则可实现故障数据更新。

3) 功能数据。

功能数据主要用于建立电子元器件和其他不能用外形数据、外表数据表达的检测特征数据, 是维修对象完成其功能的参数。每类功能数据都包括标准值和故障值, 只要为维修对象建立不同的功能模型, 那么更新参数即可使维修对象状态发生变化。

3.2 故障现象模拟

故障现象主要包括装备运行时声音的改变、显示出的报警提示、功能中止及功能结果异常等现象。在虚拟维修训练系统中, 可以通过对装备运行时的声音、图像、动画的模拟来较好地再现故障现象。

1) 声音及报警提示模拟。

声音及报警提示是故障现象的重要组成部分。通常装备故障报警主要包括显示屏提示、报警灯提示和报警声提示等。这些报警信息均通过装备自检程序生成, 因此对装备不同运行状态下声音及报警提示的还原越真实, 越能提升虚拟现实的真实感, 传达给受训人员的信息就越多, 对受训人员发现和分辨故障能力的培养具有重要作用。

2) 异常功能结果模拟。

异常功能结果同样是故障现象的重要组成部分。故障装备有时会出现不中止运行且无报警提示的现象, 也是排查训练中的难点。这种情况下, 往往通过功能结果异常来反映装备故障, 利用相应的图像和动画对异常功能结果进行模拟, 有利于排查训练的顺利进行。

3.3 仿真运行流程

故障仿真运行流程如图 2 所示。用户通过图形界面点选故障源后, 交互信息管理响应其操作。此时, 从装备模型库中启动相应装备的正常模型, 并在虚拟环境中加载 3 维模型; 从故障现象脚本库中选取相应的故障脚本改变维修对象的外观特征数据; 从故障特征数据库中选取相应的参数来改变故障信号检测数据, 将此外观特征数据与故障信号检测数据相结合, 即产生相应的故障模型^[9]。计算机根据装备故障模型, 产生满足故障诊断训练需求的信号, 同时受训人员能根据示波器、万用表等工具测得的数据来诊断虚拟装备的故障, 完成虚拟装备维修训练。

4 仿真模型设计

4.1 故障模型

笔者建立了一个某型远程火箭炮火控系统自检不通过的故障模型, 其故障源为保险熔断, 故障现象为火控系统发出的命令均收不到返回值, 运行火控片段命令时, 火控操作显示台上均显示“错误”。

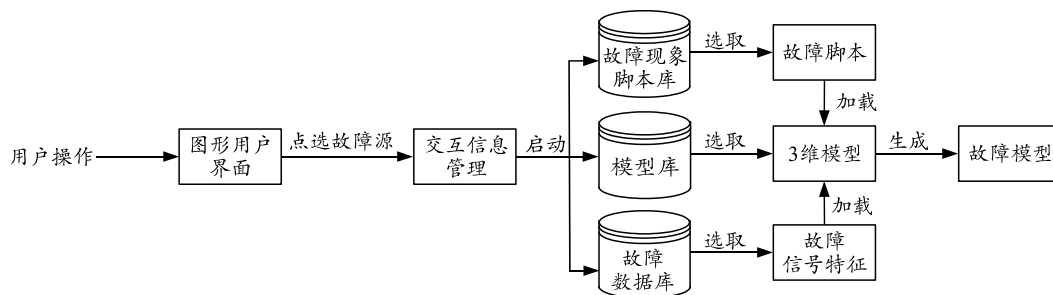


图 2 故障仿真运行流程

分析其故障传播有向图如图 3 所示。其中，○ 为测量节点；1 为显示面板检测点，2 为显示面板与导线检测点，3 为导线与转接板检测点，4 为转换板上检测点，5 为火控计算机主控电路板上检测点。



图 3 故障传播有向图

根据上图进行如下分析：引起自检不正常的因素很多，可以定性研究、确定性的因素主要包括主控板故障、供电故障、直流电源板故障、保险熔断和通信线缆故障等。

对发生的故障现象进行故障分析与检测^[10]：

1) 在火控操作显示台上，对火控计算机各功能板自检显示“未检测到设备”；

2) 观察火控计算机机箱前面板状态指示灯均不亮；

3) 检查火控配电箱上给火控计算机供电正常；

4) 火控计算机前面板上电源指示灯不亮，用万用表测量检测口 1XS9 上的直流电压输出不正常；

5) 根据此位置特征检测数据可确定故障源为火控计算机保险盒内保险丝熔断，更换后即自检通过，故障排除。

4.2 故障仿真

1) 故障现象仿真脚本设计。

在 Virtools 中采用动画演示来反映故障现象，以听觉和视觉效果反馈给用户。动画演示主要再现火控系统正常自检及自检不通过现象，在功能现象模拟过程中加入判断点，判断维修对象是否有故障，如果对象存在故障，则功能演示停止，进入故障现象演示状态^[11]。

2) 维修对象检测特征数据。

某型远程火箭炮火控系统的检测特征数据是 3 维几何模型，分为正常和故障 2 类。故障几何模型的外观特征是出现报警及画面提示，在建模过程中通过改变操作面板模型参数并制作出相应的故障提

示现象来实现。在 3 维建模中完成保险丝的正常和故障几何模型，然后导入 Virtools 软件中，即可根据故障仿真实时进行故障生成。

保险熔断这一故障的检测特征数据，主要由其有向图节点的正常电压值与故障电压值组成，电压值存储在数据库中，同时建立临时数据表，存储每个检测节点的实时数据。在故障仿真时，有选择地改变传播路径上节点当前数据。

4.3 故障仿真程序

故障仿真程序是实现单个故障源故障模型的一个或多个脚本程序，包括场景加载、维修对象故障数据更新和故障现象演示 3 部分。运行仿真脚本后，在虚拟环境中能够生成故障源以及与故障源对应的故障现象等，为维修检测训练提供条件。

5 结束语

笔者从虚拟维修训练系统中故障模拟存在的难点问题为落脚点，结合训练需求分析故障产生机理，利用故障有向图分析法，初步设计了故障模型运行结构。在故障仿真过程中，对故障特征数据和故障现象模拟明确了要求，并解决了测试数据的实时生成与检测问题，完善了仿真流程，为我军复杂武器系统虚拟维修训练提供一种思路。

参考文献：

- [1] 冯永新. 设备故障基于图论的层次诊断模型研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(3): 137-143.
- [2] 吴军强. 基于图论的故障诊断技术及其发展[J]. 机电工程, 2003, 20(5): 188-190.
- [3] 周径伦, 龚时雨, 颜兆林. 系统安全性分析[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 73-113.
- [4] 李思雨, 黄少罗, 孟硕, 等. 远火射击指挥车半实物仿真训练模拟器设计与实现[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(3): 68-72.
- [5] 刘颖, 朱元昌, 邸彦强. 面向维修训练的故障建模、仿真与评估[J]. 计算机工程, 2007, 33(13): 245-247.

[6] 矫永康, 李小民, 毛琼. 多信号模型在虚拟故障建模与仿真中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1613-1615.

[7] 焦锋, 王丽平, 侯建民. 基于依赖矩阵的构件软件复杂性的度量模型[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(5): 55-56.

[8] 王上军, 时和平, 赵兴业. 虚拟维修训练中故障建模与仿真[J]. 军械工程学院学报, 2010, 22(6): 50-53.

[9] 陈鸿, 陶东香, 张娜. 面向维修训练的航空电子装备故障建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 26(12): 134-138.

[10] 高美娟, 刘白林, 张振华. 火控系统故障预测与健康管理技术[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(5): 1-4.

[11] 贾晨星, 朱元昌, 邱彦强. 面向操作的装备虚拟训练系统机理建模方法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 1096-1100.

(上接第 27 页)

5 结束语

战场态势认知可以将战场的态势信息转化为作战意图, 是作战指挥控制中心关注的重点。战场态势认知系统可以帮助指挥员了解战场敌我双方战场态势要素。深入研究战场态势认知技术对于提高指挥员战场指挥决策的高效性和准确性具有重要意义, 成为军事力量倍增器。笔者介绍了战场态势认知概念, 讨论了战场态势认知相关研究方法和关键技术, 可为研究战场态势认知问题提供理论基础。

参考文献:

[1] 李婷婷, 刁联旺. 智能化态势认知技术与发展建议[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(2): 55-58.

[2] 刁联旺, 王晓璇, 周芳. 战场态势要素动态变化与对抗局势预测方法[C]//2019 第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2019: 629-634.

[3] 肖圣龙, 石章松, 吴中红. 现代信息条件下的战场态势感知概念与技术[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 13-15, 138.

[4] 李婷婷, 刁联旺. 态势认知内涵与要素体系研究[C]//2019 第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2019: 536-540.

[5] 王云峰. 基于贝叶斯模型的信息安全防御研究[D]. 郑州: 河南理工大学, 2015.

[6] 邓连印, 申志强. 基于美军互操作作战图族的战场态势一致性研究[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(3): 60-64.

[7] 强立, 杨凡德. 基于角色的态势产品生成控制方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 1-6, 17.

[8] 曹江, 高岚岚, 吕明辉, 等. 对战场态势相关概念的再认识[C]//第四届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2016: 404-407.

[9] 李维杰. 社会智能基础问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院: 2011.

[10] 李崇东. 基于大数据支持的军事决策系统构建研究[J]. 软件工程, 2016, 19(3): 21-23, 20.

[11] 陈力. 基于聚类的战场态势评估技术研究及系统实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[12] 尹莉莉. 水面无人艇态势评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[13] 侯锋, 张军, 李国辉. 共用战场态势信息系统研究综述[J]. 测绘科学, 2007(6): 17-20, 204.

[14] 覃中信, 涂丹, 张军, 等. 一种基于 XML 的 COP 系统数据集成模型[J]. 微计算机信息, 2006(15): 11.

[15] 李本银. 广义环境下 UAV 故障诊断与应急决策方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.

(上接第 45 页)

[2] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, et al. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels[C]//Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, et al. Computer Vision-ECCV 2012. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 702-715. [DOI: 10.1007/978-3-642-33765-950].

[3] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.

[4] DANELLJAN M, HAGER G, KHAN F, et al. Scale Space Tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016(99): 1.

[5] WANG N, SHI J, YEUNG D Y, et al. Understanding and

Diagnosing Visual Tracking Systems[C]// IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE Computer Society, 2016.

[6] LI Y, ZHU J. A Scale Adaptive Kernel Correlation Filter Tracker with Feature Integration[C]//European Conference on Computer Vision. 2015.

[7] WANG M M, LIU Y, HUANG Z Y. Large Margin object tracking with circulant feature maps[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, Hawaii, United States: IEEE, 2017: 4800-4808.

[8] MA C, YANG X, ZHANG C, et al. Long-term correlation tracking [C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015: 5388-5396.