

doi: 10.7690/bgzd.2021.08.017

# 远程火箭炮武器系统故障模拟仿真

黄少罗, 李思雨, 吴巍屹

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

**摘要:** 为解决远程火箭炮(简称远火)武器装备出现故障后不能有效地进行故障原因分析和排除的问题, 对其故障进行模拟仿真。分析远火武器系统装备故障产生的机理, 根据其特性和故障的传播特点, 运用故障机理建模和半实物仿真模拟的方法, 构建描述远火故障属性的机理模型和相关数据库, 借助人工神经网络算法分析故障的传播特点规律, 并通过实例进行仿真实验验证。仿真结果表明: 该研究对远火武器系统维修训练提供一种技术指导, 具有一定实际意义。

**关键词:** 远火武器系统; 机理建模; 模拟仿真; 人工神经网络

**中图分类号:** TJ307 **文献标志码:** A

## Fault Simulation of Long Range Rocket Gun Weapon System

Huang Shaoluo, Li Siyu, Wu Weiyi

(Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the failure of the long-distance rocket weapon equipment can not be effectively analyzed and eliminated, the fault is simulated. The mechanism of equipment failure in far fire weapon system is analyzed. According to its characteristics and propagation characteristics, the mechanism model and related database describing the fault properties of far fire are constructed by using the methods of fault mechanism modeling and semi physical simulation. The propagation characteristics of the fault are analyzed by artificial neural network algorithm, and the simulation experiments are carried out through examples. The simulation results show that the research provides a technical guidance for the maintenance training of the far fire weapon system, and has certain practical significance.

**Keywords:** far fire weapon system; mechanism modeling; simulation; artificial neural network

### 0 引言

远火武器系统作为我国陆军成建制现代化的武器装备, 涵盖机械工程、自动化、液压、指挥控制等技术, 由功能不同但彼此相互作用的装备器件构成, 属于复杂武器系统。参训人员在实装训练中, 由于其装备操作复杂、信息化程度高等原因, 一旦出现故障, 不能及时进行故障分析与排除, 严重影响军队的训练质量和相关科研<sup>[1]</sup>。面对此问题, 笔者从远火武器装备故障机理出发, 通过对远火指控系统进行实装和半实物仿真模拟, 运用故障失效模式及后果分析(system failure mode and effects analysis, SFMEA)方法, 列举系统不同器件故障的基本属性和故障传播特性, 构建基于远火故障属性的机理模型和相关数据库, 结合装备正常运行信息流, 仿真模拟出故障现象<sup>[2]</sup>, 为分析远火武器系统装备故障机理与维修训练提供技术指导。

### 1 远火故障机理建模

构建描述远火武器系统故障机理模型和相关数

据库(故障发生时状态参数)能够较为准确地实现远火故障机理建模和故障模拟仿真<sup>[3]</sup>。借助人工神经网络解析发生故障, 运用半实物仿真方法, 构造出与实装比例 1:1 且功能相同的模拟器, 人为设置故障进行实验, 模拟与真实故障相同的现象、故障信息流等, 最终检验模型的准确性。实现上述方法的步骤如下:

1) 构建描述远火武器系统故障机理模型和相关数据库应该结合远火武器系统装备的性能和整体架构, 精准、体系、全方位地描述装备工作异常时的现象, 明确当前状态是否产生故障; 其次依据当前装备故障分析其运行模式和产生的后果, 分析出远火武器系统故障属性; 全面归纳总结故障发生的特点规律, 筛选出故障属性中的中心元素, 构建出描述远火武器系统故障机理模型和相关数据库<sup>[4]</sup>。

2) 远火武器系统正常工作就是武器系统内部正常信息流的传递, 故障信息流对故障现象严酷度起到决定性作用。通过描述远火武器系统故障机理

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-05-18

基金项目: 军内重要科研项目(LJ2018A050336)

作者简介: 黄少罗(1965—), 男, 湖南人, 博士, 教授, 从事装备保障与应用研究。E-mail: 174994395@qq.com。

模型和相关数据库，运用人工智能智能地认知故障产生过程和模拟出故障现象，可得到故障产生概率。

3) 运用半实物仿真设计出相关功能的模拟器对故障进行仿真实验。实验包含 2 部分：1) 参训人员对描述远火武器系统故障机理模型和相关数据库操作，接受指令，对故障相关信息进行体现<sup>[5]</sup>；2) 后台逻辑推理故障过程、运算发生概率。

## 2 构建远火故障机理模型及数据库

远火武器系统在操作训练中，由于机械设计、液压系统等在武器设计以及生产中存在的内在缺陷，维护保养、操作不当、部件达到使用寿命等都会产生装备故障，严重制约武器系统的作战使用效能。装备故障由内在原因产生并表现出相应的外在故障现象。当远火武器系统故障产生时，体现出与正常工作状态不同的现象，也可能是在将要发生故障时体现出相应的预兆<sup>[6]</sup>。

### 2.1 故障失效模式及后果分析

从功能和构成出发，借助以可靠性为中心的维修和失效模式与影响分析 (failure mode and effects analysis, FMEA) 等理论，对于组成设备和其软件部分可能发生的故障进行研究。远火武器系统在正常工作状态下发现故障后，结合故障现象、检修材料、武器正常运行原理，对其故障失效模式及后果分析，构建相应模型，识别故障模式，研究导致故障发生的原因<sup>[7]</sup>。故障失效模式及后果分析以故障模式为支撑，故障影响效果为中心，通过等效置换的方法分析查找故障原因、位置、后果影响。构建故障模型的过程中，重点研究故障的核心要素属性和传播特性。

如表 1 所示，故障核心要素能真实地反映远火武器系统出现的故障，包括故障点(位置)、故障形式、故障原因、故障产生机率、故障严酷度、故障作用效果、传播特性。

表 1 故障核心要素

核心要素	解释
故障点	远火武器系统发生故障的物理元器件
故障形式	故障发生时表现出来的现象，例如短路、指示灯报警等
故障原因	产生故障的主客观因素
产生机率	结合现有维修资料，求解故障发生机率
故障严酷度	故障对远火武器装备预计带来最差潜效果的度量
故障作用效果	故障的产生对远火武器系统正常效能发挥的制约
传播特性	故障将对与之关联的模块造成异常状态(连锁反应)

## 2.2 构建故障机理模型及数据库

为了贴近部队装备保障的实际需求，提高保障效率和维修水平，构建描述远火武器系统装备故障模型及相关数据库十分必要。可建立一个 7 元模型， $Y=(L,S,R,P,D,E,C,V)$ 。

$Y$  是描述故障模型的函数名，7 元模型参数分别表示： $L$  故障点， $S$  故障形式， $R$  故障原因， $P$  故障产生机率， $D$  故障严酷度， $E$  故障作用效果， $C$  故障传播特性(连锁反应)， $V$  故障特性取值范围。针对远火武器系统中的第  $i$  个故障，描述故障机理模型关系数据库如表 2，故障机理模型数据库取值如表 3。

表 2 描述故障机理模型数据库

故障点	故障形式	故障原因	产生机率	严酷度	作用效果	传播特性
$L_1$	$S_1$	$R_1$	$P_1$	$D_1$	$E_1$	$C_1$
$L_2$	$S_2$	$R_2$	$P_2$	$D_2$	$E_2$	$C_2$
...	...	...	...	...	...	...
$L_i$	$S_i$	$R_i$	$P_i$	$D_i$	$E_i$	$C_i$

表 3 故障机理模型数据库取值

模型参数	定义域	取值范围(整数)
故障点 $L$	$V_1$	1-100
故障形式 $S$	$V_2$	1-20
故障原因 $R$	$V_3$	1-50
产生机率 $P$	$V_4$	(0,1)
严酷度 $D$	$V_5$	1-4
作用效果 $E$	$V_6$	1-50
传播特性 $C$	$V_7$	向量组(后继产生的故障点和产生机率)

## 3 神经网络在故障机理模型中的应用

远火武器系统结构是指内部模块相关组合及连接关系，武器系统内部元器件或工作单元彼此关联受到内外环境影响，相同故障在不同时间和空间下产生的故障严酷度不一样<sup>[8]</sup>，导致故障的传播是不明确的，表现为上一工作单元发生故障后不一定会导致后续单元或者元器件产生故障，即故障传播机率。故障传播有 3 种模式：

- 1) 发散模式：单一故障可能诱发其他故障；
- 2) 聚合模式：若干个元器件或工作单元中的一个产生故障都会引起后继器件故障；
- 3) 叠加模式：多个元器件或工作单元同时产生故障才能引起后继单元故障。

由于故障在后续传播的复杂和不确定性，即前一模块的故障与后继模块之间的故障联系，只有“真、假”2 种情况，传播机率用(0,1)表示。

神经网络是 20 世纪 80 年代 AI 智能领域的研究热点，神经网络是把信息处理按照人脑神经元网络进行抽象，构建数据模型，根据特定网络拓

扑进行连接，2 个神经元之间的连接关系是信息间的交互程度。在远火武器系统故障模型的研究中，把描述远火故障机理模型定义为神经元，神经元之间的连接定义故障传播关系，传播机率是交互程度。图 1 为应用 3 层经典神经网络在故障机理模型中。

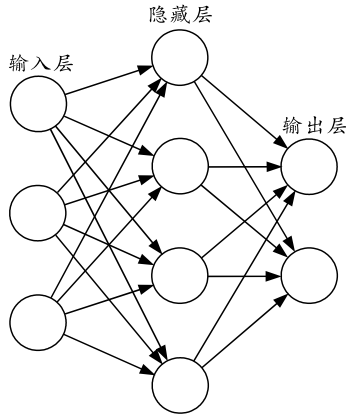


图 1 神经网络

- 1) 输入层: 半实物仿真设计实现故障机理模型信息。
- 2) 隐藏层: 把输入层获取的信息，研究故障过程，分析综合信息流向最终取得故障信息。
- 3) 输出层: 通过隐藏层对故障信息的训练，输出的结果是由故障输入引发的所有故障信息即相关现象和产生机率。

基于神经网络的故障机理研究的核心思想：在

远火武器系统故障仿真实验中，主控计算机通过设置故障类型产生故障状态，完成故障设置，借助故障机理模型，通过人工神经网络，研究故障联系，预判故障传播趋势，进行故障模拟和求解产生机率。

#### 4 远火故障模拟仿真技术实现

远火武器系统的故障仿真是基于故障机理模型，参训人员获取信息(输入信息)，通过人工神经网络训练，展现出相关故障现象和传播趋势，最终输出相关故障信息<sup>[9-10]</sup>。

##### 4.1 基于半实物仿真的故障实现

故障模拟仿真通过半实物仿真的远火武器系统训练模拟器来实现。总体设计思路：采用与实装一致的组合面板，构建系统基本硬件环境，通过计算机模拟组合内部电路功能、实现各组合的逻辑控制，建立一个逼真的人机交互操作界面(环境)。远火武器系统训练模拟器导演台(指控系统)的主控计算机设置故障类型产生故障状态(注入故障)，可以从数据库查找到对应的故障点，经由 I/O 卡设置相应的继电器为故障状态，继电器则切断远火指控系统操作面板上相应指示表的正确指示，同时接通告警灯和告警喇叭以及对应的故障指示灯，从而正确显示故障现象，借助仿真软件中的神经网络进行推理演算。模拟器平台体系结构如图 2 所示。

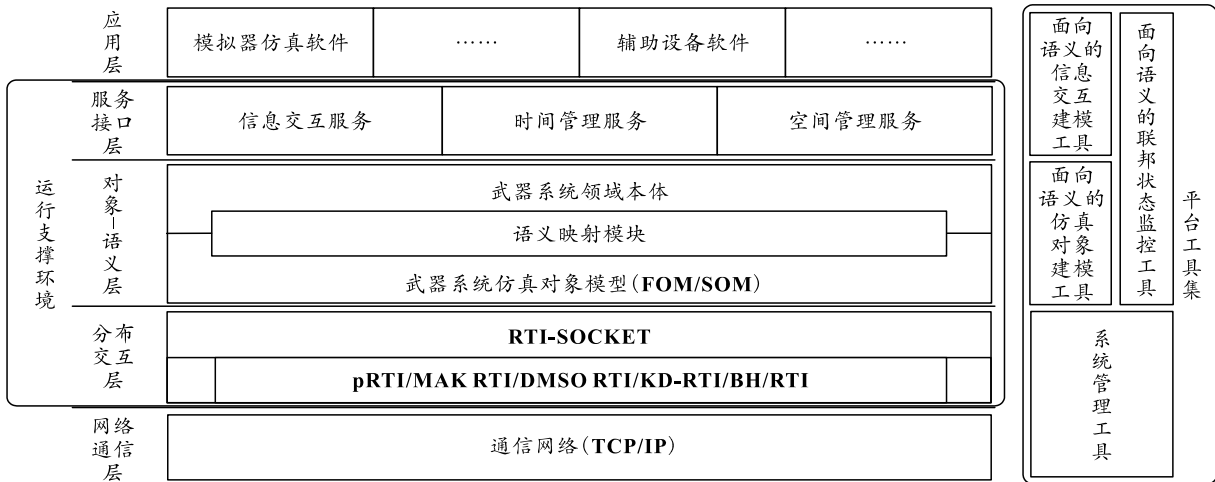


图 2 模拟器平台体系结构

结合故障机理模型，单体设备方面，通过分析得出各个单体设备的故障模式、发生现象、产生的故障信号特征<sup>[11]</sup>。然后，分析各单体设备之间的连接关系和工作原理，通过分析传输信号的种类、数据组成、收发时序等参数，远火故障状态模拟原理如图 3 所示。

##### 4.2 实验验证

以远火武器系统射击指挥车电液控制系统为研究对象，在射击指挥车训练模拟器上进行仿真实验，结合已有的故障信息，构建描述故障机理模型，借助人工神经网络对故障发生原因、传播特点进行仿真研究。

电液系统由油箱、手动泵、控制阀组、伺服泵总成、操控台、感应器、控制阀组控制电路和伺服泵总成控制电路 8 部分构成，每个部分工作状态定义为  $S_1 \sim S_8$ ，把远火武器系统工作状态简单化，正常(取值为 1)和异常(取值为 0)2 种状态，操控台观察电液系统工作状态，其中  $X=(X_1, \dots, X_8)$ ，表示  $S_1 \sim S_8$  的输入。

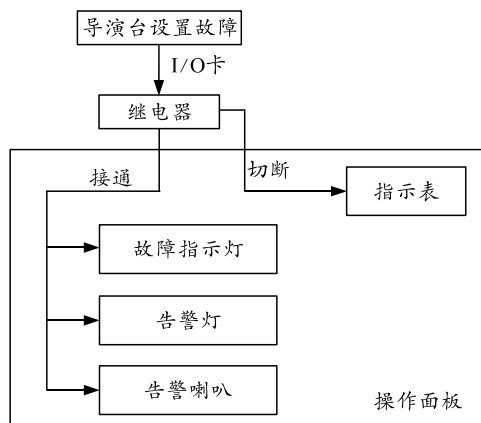


图 3 远火故障状态模拟原理

通过神经网络对故障传播进行训练和推理，输入与输出二者关系： $y=a(kx+x_i)$ ，式中， $k$  为传播系数的行向量， $x$  输入列向量， $x_i$  是当前输入神经元所处工作状态量， $a$  为故障传播函数。在本例中，传播系数  $k$  取值为 1，因为简化了远火工作状态（“0 或者 1”），神经网络传递函数中存在硬极限函数，当输入为 0 时，输出小于 0；当输入为 1 时，输出大于等于 0。综上故障传播函数： $y=\text{hardlim}(kx+x_i)$ 。

在 Microsoft Visual Studio 2017 环境下，借助 C# 创建电液系统仿真软件，设置故障信息，伺服泵总成控制电路异常即电磁方向控制阀  $DK_2$  不能工作，即  $x_8=0$ ，输出结果如图 4。故障点为伺服泵总成，工作异常部分标记为控制阀组区域，当下系统运行的油路标记为  $P_1, P_2$  区域，操控台预警整个系统工作异常标记为控制阀组控制电路。仿真实验如图 4 所示。

## 5 结束语

远火武器系统内部结构高度信息化集成，设备之间的连接与控制关系复杂，故障发生时模式较多；同时，由于软件的作用增加了系统故障的耦合性和不确定性。故障机理建模与模拟仿真技术对远火武器系统维修训练提供了一种技术指导，从工程技术应用方面考虑，对于研究大型复杂武器装备也具有实际意义。

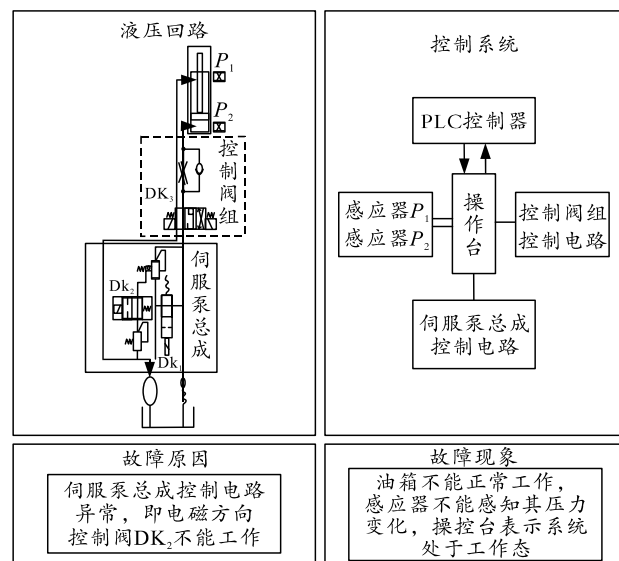


图 4 仿真实验

## 参考文献：

- [1] 黄少罗, 李文博. 远程火箭炮武器系统保障效能仿真与评估技术研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2016(4): 51-59.
- [2] 徐曼菲, 康林, 邱枫. 一种基于 Em-Plant 的生产线多层次仿真建模方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 80-84, 93.
- [3] 许庆, 侯兴明, 张永福. 面向仿真的航天装备维修保障效能评估指标参数体系[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 4-10.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] 贾晨星, 朱元昌, 邸彦强. 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.
- [11] 李思雨, 黄少罗, 孟硕. 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.