

基于 LabVIEW 与 Multisim 的火控系统半实物联合仿真方法

齐晓冰, 朱 斌, 李佳亮

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 针对当前装甲装备火控系统电路组成与功能特点, 对火控系统维修保养过程中的故障诊断方法与测试需求进行了研究, 提出了一种火控系统半实物联合仿真方法, 介绍了该仿真建模方法的设计思路与实现方法; 该方法可充分发挥 LabVIEW 和 Multisim 软件的优势, 通过半实物联合仿真的方法, 以仿真模型代替部分或者全部火控系统部组件, 能够很好地实现火控系统不同级别的电路功能模拟、故障复现, 快速完成故障诊断分析, 解决了当前装甲装备火控系统维修诊断设备通用性差、规范化程度低、开放性差, 难以真实的模拟系统级、部件级功能、故障注入和故障检测等问题, 为装甲装备火控系统故障诊断与测试设备开发提供了有效平台, 为基层部队开展维修训练和维护保障提供了有效途径。

关键词: 火控系统; 电路; 半实物; 联合仿真

Semi Physical Co-simulation Method of Fire Control System Based on LabVIEW and Multisim

Qi Xiaobing, Zhu Bin, Li Jialiang

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at electric circuit constitution and function characteristics for fire-control system of current battlefield armored equipment, carrying a research on fault diagnosis method and testing requirements in the process of fire-control system maintenance, a semi physical co-simulation method for fire control system is proposed in this paper. The design ideas, realization means and application function of the method are introduced. This method gives full play to the advantages of LabVIEW and Multisim, with the hardware-in-the-loop simulation method, using simulation model replacing part or all of the fire-control system components, realizes circuit function simulation and fault recurrence for different levels of fire-control system, fast completes fault diagnosis analysis. This method can solve the maintenance diagnostic equipment for fire-control system of current armored equipment in poor universality, the low degree of standardization, poor openness, difficult to really simulate function, fault injection and fault detection on system or component level, etc. So it can provide an effective platform for the development of fire-control system fault diagnosis and test equipment of our battlefield armored equipment, and provide platform for the grass roots units to carry out the repair and maintenance training.

Keywords: fire control system; circuit; semi physical; co-simulation

0 引言

火控系统在陆战装甲装备中占有极其重要的地位, 对发挥火力优势、夺取战争胜利影响关键^[1]; 一旦故障, 将严重影响装备战斗力。同时, 由于其技术密集度高, 操作流程较为复杂, 实际应用中较易出现故障^[2], 故障后如何快速有效地判断故障、排除故障, 一直是困扰部队的难题, 也是各类故障诊断与测试设备研究的重点。目前, 陆战装甲装备在使用分队或装备现场实施故障诊断与测试时普遍存在测试信息不完备、故障耦合性强、测试约束多等缺陷, 易造成故障隔离困难、虚警率高等问题^[3]; 而目前配备的大多数火控系统故障诊断与测试设备在开发过程中缺乏故障模拟与故障注入功能, 难以全面真实地模拟装备故障, 使得设备的故障诊断

与测试功能缺乏针对性, 无法真正解决部队基层的故障判定与排除难题, 不利于部队维修保障能力的形成和提高。针对上述问题, 本文提出了一种基于 LabVIEW 和 Multisim 的火控系统半实物联合仿真方法及其实现过程, 实现陆战装甲装备火控系统电路功能仿真、故障模拟、故障注入以及故障诊断与测试验证, 用于满足装甲装备火控系统故障诊断与测试设备开发过程中的故障生成与性能验证。

1 总体设计方案

LabVIEW 是由美国国家仪器公司研制开发的一种图形化编程开发平台, 可以方便地实现数据采集与分析、仪器与设备控制等功能, 普遍用于虚拟仪器的开发与设计, 是测试设备与控制系统控制与交互界面开发的理想选择^[4]。Multisim 是加拿大 IIT 公司推出的一种给予 SPICE 元件模型的电子电路设计与仿真软件, 既可接受电路原理图形式的图形输入, 又可利用电路硬件描述语言输入, 具有强大的建模仿真功能与计算分析能力^[5], 使用广泛。Multisim 12.0 以上版本更是提供了一个与 LabVIEW 实时交互的插件 NI LabVIEW-Multisim Co-simulation Plugin for LabVIEW, 很好地解决了

收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-04-20。

作者简介: 齐晓冰(1989-), 女, 河南滑县人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事导航、制导与控制方向的研究。

朱 斌(1973-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事导航、制导与控制方向的研究。

Multisim 与 LabVIEW 实时联合仿真问题。本文正是基于上述基础软件构建⁶⁻⁸。

本文提出的半实物联合仿真方法总体方案为: 以 cPCI 计算机、多功能采集板卡以及可编程逻辑阵列为基础建立仿真系统硬件平台, 通过电缆实现与火控系统实物部件的信息交互; 利用 Multisim 建立火控系统电路模型(包括正常电路模型与故障电路模型)与仿真测试激励, 利用 LabVIEW 建立测试控制、故障模拟、软硬件调度等程序模块, 通过虚拟端口及联合仿真插件实现与 Multisim 的数据交互。仿真时, 以 LabVIEW 建立的软件平台为核心, 根据仿真需要, 适时调用 Multisim 仿真模型与/或实物部件, 并完成仿真信息与实物测试数据的实时交互与融合分析, 实现火控系统各类故障的复现与诊断。其总体结构如图 1 所示。

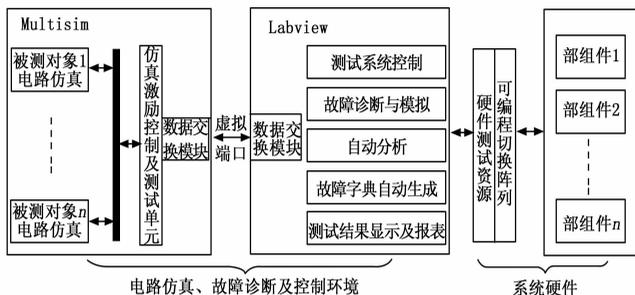


图 1 总体结构框图

构建后的仿真系统依托 Multisim 模型和 LabVIEW 控制软件, 与可编程阵列以及实物部件相结合, 可以全软件、半实物或者全实物等不同形式实现火控系统电路功能仿真、故障复现以及故障诊断。

2 硬件平台建立

仿真系统硬件平台以 cPCI 计算机为核心, 以多通道模拟量采集板卡、开关量采集板卡为主要资源, 以开发的混合式智能型开关矩阵模块、模拟负载模块、信号切换控制模块、信号检测模块为扩展构建。既作为 Multisim 和 LabVIEW 应用软件的运行载体, 又是实现系统资源动态分配与适时测试、全软件与硬件在环功能仿真和故障模拟、软硬件联合半实物仿真与故障诊断的硬件基础。其功能结构如图 2 所示。

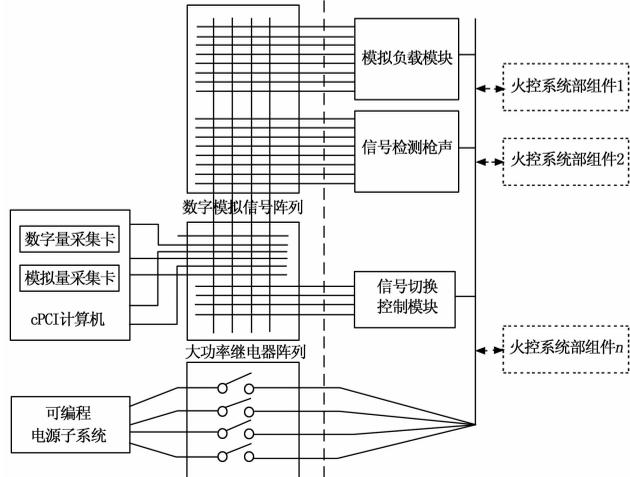


图 2 诊断系统硬件平台功能图

2.1 混合型智能开关矩阵模块

采用集成模拟开关阵列电路(如图 3 所示)和高电压、大电流继电器阵列构成的混合式智能开关矩阵, 实现仿真系统与被测对象的动态连接、测量信号的选择与切换控制, 使硬件平台具备硬件在环功能仿真和故障模拟功能, 并提高了仿真系统硬件平台的可配置性和灵活性。

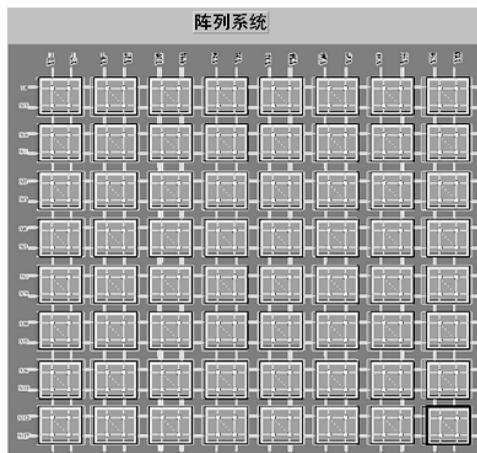


图 3 集成模拟开关阵列配置示意图

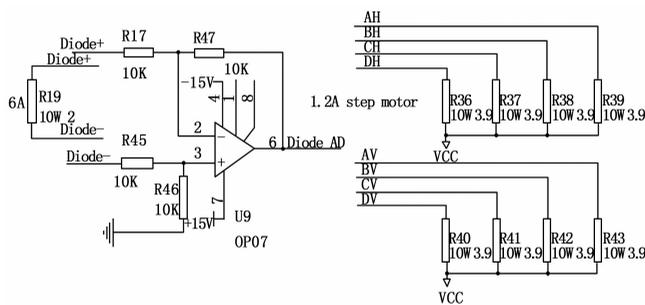


图 4 模拟负载电路

2.2 模拟负载模块

半实物仿真时需要为实物部件/组件提供模拟负载, 用以判定火控系统相关部件中功率驱动信号的驱动能力。为此, 需要在部件的功率输出端增加相应的模拟负载, 以贴近实际工作环境, 确定功率输出的驱动能力, 判定实物部件/组件的相关性能。图 4 给出了火控计算机的步进电机驱动电路的模拟负载。

2.3 信号切换模块

采用硬件接口转换完成被测对象连接关系的自动转换, 通过开关阵列内部的转换电路和电缆共同实现。开关阵列根据测试和故障状况动态分配测试资源, 配置被测对象的连接关系, 而电缆则根据适配器插头所分配的部件插头的定义实现一一对应关系。当工作在全实物模式时, 可以通过开关阵列将测试资源配置为监测模式, 实现系统的在线监测。一旦有故障存在则可针对故障状况配置为部件/组件测试模式。

2.4 信号检测模块

对信号加以调理、隔离、放大等, 实现被测量和仿真系统的电气匹配, 包括: 信号范围调整、电流到电压的转换、功率负载的转换、频率电压的转换、超标信号的隔离、传感器信号的调整、输出信号的功率放大、输出信号的类型转

换等。

3 Multisim 建模与仿真

3.1 火控系统电路功能建模

Multisim 作为一种通用的电路仿真软件，对装甲装备各类军用控制系统电路所采用的元器件等缺乏充足的应用支撑。然而，它提供了特殊应用元件类型的建模封装功能，可利用此功能预先构建火控系统的专用元件库、工具库和常用单元电路库。这样不仅有利于火控系统仿真电路的建立，更有利于系统在相关武器系统电路的仿真中扩展。在构建了火控系统电路专用元件库和专用工具库的基础上，即可在 Multisim 软件的支持下，建立火控系统的仿真电路，进行火控电路的原理仿真。图 5 给出了应用 Multisim 软件实现的火控计算机 CPU 板仿真电路。通过本技术生成的火控系统仿真电路，可取代火控系统相应的实物电路实现火控系统的软件仿真。

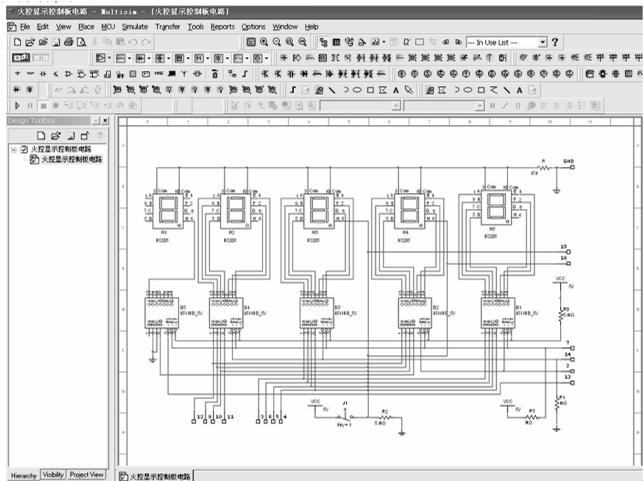


图 5 计算机 CPU 板仿真电路

3.2 故障建模与故障注入

3.2.1 故障建模

在仿真试验中，元器件故障模型是在其功能模型的基础上建立起来的。而功能模型是指不用考虑元器件的内部物理结构，利用其电学特性，所建立的关于其输入输出特性的数学方程式。因此，元器件故障模型可以通过修改功能模型参数的参数建模法，或者利用常见功能模型重新组合再修改参数的子电路建模法来建立。

通常情况下，电路的故障建模是在各个元器件的故障模型基础上，进行电路连接的过程。一般电路系统的故障模型都与特定的仿真引擎相关。在 Multisim 中，建立故障电路的仿真模型，其实质就是修改元器件功能模型参数，或者用元器件故障模型替换无故障元器件的过程。为了保证电路系统原有的网络结构，本文采用“元器件重组法”来建立电路的故障仿真模型，其过程如图 6 所示。其要点是针对元器件的关键失效模式，建立对应的、准确的故障模型。

3.2.2 故障注入

故障注入是指把建立的故障模型人为地引入到系统中，加速系统失效或产生故障，并进行测试的过程。按照注入方法的不同，可以把故障注入技术分为三类：基于物理的故障注入、基于软件的故障注入和混合故障注入。本文主要是针

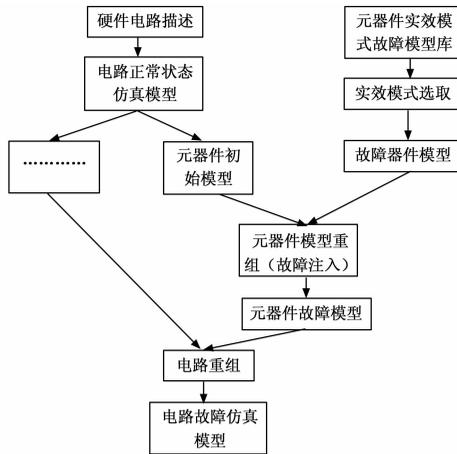


图 6 故障仿真模型建立流程

对仿真环境下电路系统测试性研究，采用基于 Multisim 软件的仿真故障注入方法。

目前，仿真故障注入方法主要分三类：

- 1) 修改电路原理图法：对电路原理图进行直接修改，把故障模型注入到指定位置；
- 2) 修改网络拓扑文件法：把故障信息直接写入到电路网表文件中，从而生成带有故障信息的网表文件；
- 3) 修改模型定义法：修改元器件模型的定义文件，注入所需故障。

这 3 种方法在本质上都是用元器件模型重组后的故障模型替换无故障元器件，从而形成带有故障信息的电路网络拓扑。而修改电路原理图的方法比较直观，便于设计人员操作，本文主要采用这种注入方法。同时为了保证故障电路特性的正确性，对单故障电路进行单独测试分析，对多故障电路采取如图 7 所示的注入流程。

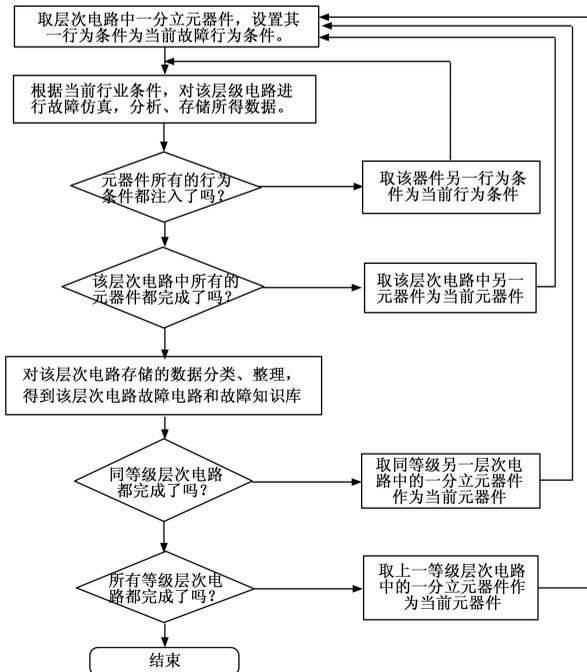


图 7 故障电路注入流程

3.3 火控系统电路故障仿真

3.3.1 电路故障仿真方法

在完成火控系统电路原理仿真基础上, 根据故障分析结果, 可通过故障建模和故障注入生成火控系统的故障电路。

在 Multisim 环境下, 通过对电路的仿真, 模拟电路系统的故障工况, 从而研究诊断系统对火控系统的测试能力。它将 Multisim 软件仿真和故障注入技术相结合, 很好地实现了火控系统不同级别的电路功能模拟、故障复现, 有效验证了故障诊断系统的测试能力, 同时也为改进故障诊断系统的设计提供了依据。其主要实现过程如图 8 所示。

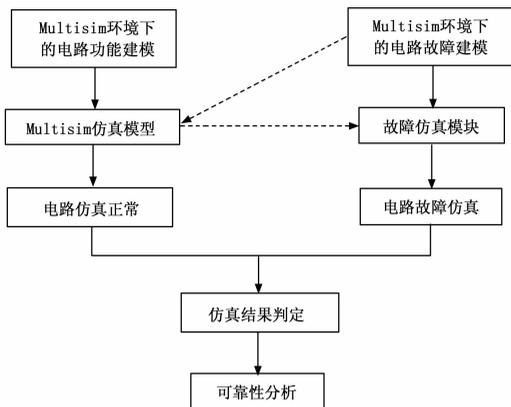


图 8 Multisim 环境下电路故障的仿真方法

3.3.2 电路故障仿真策略

随着电路系统功能日益多样化, 其规模也越加庞大复杂, 在进行电路故障仿真时, 通常会面临以下问题:

- 1) 需要建立的元器件模型种类繁多, 数量庞大;
- 2) 元器件在受到各种环境应力的影响下, 在加上其参数的离散性、容差、老化、非线性, 使得电路的行为条件很难确定;
- 3) 复杂电路的故障模式数量庞大, 往往使得仿真工作量和需要的存储容量难以接受。

火控系统电路复杂庞大, 为更好地实现电路仿真, 须采取相应的优化仿真策略。本文为了有效降低仿真模拟的计算量和存储容量, 选择采用电路划分层次策略和分类策略。

1) 划分层次策略: 对电路进行层次划分和建立元素的宏模型, 把系统的仿真分多步、顺序进行, 从而降低了每次仿真的计算量。其层次分解的策略是: 将电子系统按照功能划分成系统级、模块级、电路级和分立元器件级, 把每个电路的基本组成单元称为元素。仿真按照由底至顶的顺序进行。

2) 对下层输出信号进行分类的策略: 对下层的输出信号基于合并和竞争学习的算法进行分类, 提取有限的典型信号, 将其对应的故障作为上层的行为条件。可以减少仿真的次数, 并减少存储容量。

4 仿真软件实现

4.1 软件基本结构

仿真系统软件分为系统综合控制、中间件集合、系统应用三层, 在操作系统与底层驱动的支持下工作。其中系统综合控制层完成测试资源的动态分配、连接关系的实时切换、虚拟端口的映射管理以及软/硬件协同等功能; 中间件集合层完成仿真模型的管理、模型的载入、硬件通道的读取与控制、逻辑推理、仿真结果存取以及数据库管理等功能; 系统应用

层面向最终应用, 可以完成火控系统电路功能仿真、部件测试、电路故障模拟、故障推理诊断、诊断结果分析以及数据显示与报表生成等功能。其功能结构见图 9。



图 9 系统软件功能结构图

4.2 故障诊断基本流程

故障诊断系统通过测试通道获取实物部件/组件经过可编程阵列之后的状态信息、通过虚拟端口获取 Multisim 仿真结果等信息, 在逻辑推理模块的支持下, 识别确定部件/组件或仿真模型的故障, 并定位故障节点。故障诊断以常见故障为主, 模拟专家解决问题的思路, 在原理分析的基础上, 结合电路实际连接关系, 选取较为方便的测试点, 从最简单的操作入手, 以对分法压缩故障范围, 实现单板、外围元器件故障定位。

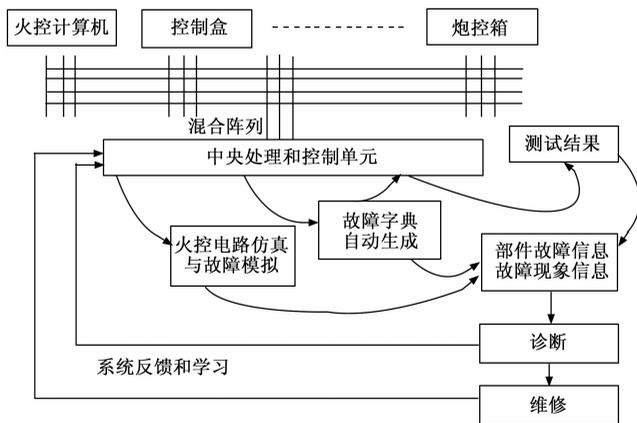


图 10 故障诊断基本流程

图 10 所示为故障诊断基本流程。其过程是, 根据故障现象和系统硬件提供的实时工作状态, 结合正常电路分析、故障模拟的仿真结果及前期故障诊断获得的经验数据, 生成故障字典; 根据故障字典生成新的测试向量与状态采集点, 进一步进行精准定点测试; 而后将上述综合信息传送给故障诊断模块, 进行知识处理和分析, 得到部件及其功能单元或仿真电路的故障部位与故障原因。

5 结语

以 Multisim 和 LabVIEW 为基础, 结合硬件测试环境而构建的火控系统半实物仿真平台, 属于硬件在环仿真。与现有火控系统纯软件仿真平台相比, 可以借助硬件在环仿真克服不同装甲装备功能和故障不容易复现或只能模拟单一功能或

(下转第 115 页)

结合 4 个不同时间的 VonMises 应力云图, 可以得到靶板的破坏模式为剪切破坏, 在整个侵彻过程中靶板不断吸收高速子弹的能量, 子弹速度在这个能量交换的过程中逐渐减小。在侵彻过程后期, 靶板发生剪切破坏, 保持高侵彻速度的子弹贯穿整个靶板。

在侵彻过程中, 子弹速度非常快, 子弹在剪切穿甲过程中与靶板的摩擦过程非常剧烈。由于整个侵彻过程持续的时间极短, 子弹与靶板摩擦产生的热量不容易向四周传递, 瞬间产生的热量也加速了靶板的防护失效。观察侵彻后云图上靶材的颜色、靶板的破坏形状以及靶板贯穿的周围样貌可知, 靶板在断裂破坏区域发生了一定程度的塑性变形。

3 结论

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对高速子弹侵彻 6 mm 的靶板进行了数值模拟。借助仿真软件可以直观地看到高速碰撞的整个过程和弹靶的受力情况。在子弹初速度为 1 300 m/s 的情况下, 靶板被子弹贯穿, 贯穿之后子弹剩余速度约为 1 240 m/s。侵彻过程中最大加速度为 1.2×10^6 m/s², 此刻对应的冲击力也最大。在子弹与靶板直接接触的区域发生了断裂, 子弹与靶板直接接触的附近区域产生了弹塑性形变。

采用有限元软件完成高速弹丸对防护复合材料的碰撞和侵彻过程的数值模拟、仿真与分析。细致地反映了高速弹头侵彻过程中参数和物理量的变化, 并且其结果直接以图形方式显示高速碰撞的整个过程。在仿真试验过程中可以调整改变各种参数进行计算, 从而得到各种不同情况下的试验结果, 对比各组试验结果, 可以找出各种参数对试验结果的影响, 找到影响试验结果的关键因素, 总结出其中的规律, 从而有效地对子弹和防护材料设计进行优化。通过有限元仿真软件对高速弹头侵彻过程进行数值模拟与之前采用简化理论模型近似分析的方法相比, 在弹靶模型的建立, 侵彻过程运动方程的求解以及计算结果的精度和可靠性方面具有不可替代的优势。在进行现场试验之前通过采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对子弹侵彻过程分析, 得到了大量有价值的信息, 这些数据可以作为现场试验的重要依据, 同时有限元仿真软件得到的结果也是对现场试验的扩展, 对现场试验起着重要的辅助作用, 从而有助于更加准确的分析侵彻过程,

也节约了大量试验成本, 缩短了研发周期。

参考文献:

- [1] 许庆新, 黄建中, 沈荣瀛. 装甲材料侵彻试验仿真 [J]. 振动与冲击, 2006, 25 (02): 117-119, 124, 189.
- [2] 谷长春, 石明全. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰撞过程的数值模拟 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (15): 4621-4624.
- [3] 李茂, 朱锡, 侯海量, 等. 冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10 (6): 60-67.
- [4] 张元豪, 陈长海, 朱锡. 钢/玻璃钢组合结构对高速弹丸的抗侵彻特性 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12 (01): 93-100.
- [5] Guo Y Z, Li Y L. A Novel Approach to Testing the Dynamic Shear Response of Ti-6Al-4V [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 25 (3): 299-311.
- [6] Dey S, Borvik T, Teng X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44 (20): 6701-6723.
- [7] 刘兵, 陈小伟. 平头弹穿透间隙式双层靶的穿甲模式 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36 (01): 24-30.
- [8] 王生武, 石秀华, 王永虎, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的加筋板入水冲击仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (06): 1401-1403.
- [9] 尚晓江, 舒建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [11] 吴三灵, 李科杰, 张振海, 等. 强冲击试验与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] Dey S, Borvik T, Hopperstad O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30 (8/9): 1005-1038.
- [13] Borvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration [J]. European Journal of Mechanics, A/Solids, 2001, 20 (5): 685-712.
- [14] 谢恒, 吕振华. 破片侵彻纤维复合材料板的有限元数值模拟 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2012, 52 (01): 96-101.

(上接第 111 页)

故障模式的困境, 不仅可以真实再现实际操作时某一板卡或部件功能和故障模式, 还能够模拟多部件多故障模式, 并进行在线调试。从系统的角度出发, 硬件在环仿真技术允许在系统中接入实物硬件, 也就是可以把实体电路板或部件放在系统中进行测试, 以使得电路板或者部件能在满足系统整体性能指标的环境中得到检验。由于该系统为虚实结合的系统, 故实验结果比纯数字仿真更接近实际。另一方面, 本仿真平台采用开放型设计, 相关电路参数和系统程序可以随时修改, 用以满足不同装甲装备火控系统功能仿真、故障模拟及故障诊断, 提高了使用价值, 拓宽了实际用途。

参考文献:

- [1] 朱克夫. 现代坦克系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.