

基于数字孪生的测试性验证技术

袁剑平¹, 李 近², 孙寒冰³

(1. 广东海洋大学 海洋工程学院, 广东 湛江 524088;

2. 九江学院 理学院, 江西 九江 332005;

3. 中船重工集团 第七〇七研究所九江分部, 江西 九江 332005)

摘要: 针对型号测试性验证工作中存在的验证周期长、验证时机滞后、验证环境受限等问题, 开展了基于数字孪生技术的测试性验证技术研究, 重点关注数字孪生技术框架和关键技术研究, 包括基于数字孪生驱动的故障模式分析、基于数字孪生驱动的故障模式空间模拟、基于数字孪生驱动的故障模式分配与注入、基于数字孪生驱动的数据融合技术, 以期实现装备全生命周期的测试性验证与增长。形成一套基于数字孪生驱动的测试性验证流程及方法, 用于指导新研产品的测试性验证工作。

关键词: 数字孪生; 测试性增长; 数据融合

Testability Verification Technology Based on Digital Twins

Yuan Jianping¹, Li Jin², Sun Hanbing³

(1. College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. College of science, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;

3. Jiujiang Branch, CSIC 707 Research Institute, Jiujiang 332005, China)

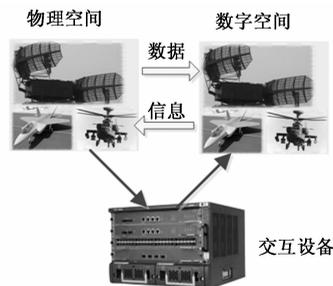
Abstract: In this paper, for the reason of the verification cycle is long, the verification timing is delayed, and the verification environment is limited, we conduct a testability verification work based on digital twins technology, focus on the development of testability verification technology framework and key technologies based on digital twins, included the technology of the failure mode and effect analysis based on digital twins, the technology of simulation of failure mode space based on digital twins, the technology of failure mode sample allocation and injection based on digital twins, the data fusion technology based on digital twins, aim to achieve testability verification and growth of equipment life cycle. Finally, a set of test verification process based on digital twins driver is formed, which can be used to guide the test verification of new research products.

Keywords: data twins; testability growth; data fusion

0 引言

为了解决未来飞行器维修维护和寿命预测的问题, 2011年, NASA定义了能够全方位模拟实际对象物理、功能等特征的数字孪生体。根据NASA的定义, 数字孪生体是综合利用建模知识在数字空间构造出一个完全一样的真实飞行器模型, 相当于真实飞行器在虚拟空间的映射, 根据飞行器运行数据实时更新。洛克希德马丁公司2017年11月将数字孪生列为未来国防和航天工业6大顶尖技术之首; 中国科协2017年12月8日在世界智能大会上, 将数字孪生体列为世界科技十大引领技术之一。

数字孪生包括物理实体、超真实数学模型、物理实体和数学模型之间的交互系统。测试性设计是一个贯穿系统



论证、总体设计、详细设计、试验验证等环节的迭代改进过程。在测试性设计过程中, 引入数字孪生体, 可以实现测试性与设备功能同步设计、同步验证、减少测试性设计中的迭代次数, 提高测试性设计工作效率。在装备物理样机之前, 构建装备虚拟孪生模型, 采用功能分析法完成故障模式分析, 根据分析结果和产品功能电路结构特点, 以及软硬件资源情况, 设计虚拟的检测电路、诊断和预测算法等; 在装备数字孪生体上, 完成初始的测试性设计与验证。待设备测试性物理样机完成之后, 采用实际故障注入的方法完成测试性验证, 验证测试性设计结果。针对试验中发现问题以及指标不达标情况, 在数字孪生模型上开

收稿日期: 2019-12-07; 修回日期: 2020-01-10。

基金项目: 国防科工局稳定支持课题: JCKYS2019604SXJQR-02。

作者简介: 袁剑平(1979-), 男, 江西瑞金人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事智能装备及智能控制技术、故障诊断与容错技术, 仿真技术和水下航行器智能控制技术方向的研究。

通讯作者: 李 近(1981-), 女, 陕西乾县人, 硕士, 讲师, 主要从事数学建模与仿真技术方向的研究。

展测试性迭代改进。通过物理实体与孪生模型的交互迭代、交叉验证, 实现测试性设计与增长。

目前在各个型号装备的测试性试验中, 基本试验方法是: 选取故障样本, 在实际系统或者实物样机上进行故障再现, 判断是否能正确检测或隔离其故障。这种方式的局限性较大, 比如大多数故障模式注入困难, 注入耗时时间长; 个别故障模式注入损坏设备或者存在安全隐患; 实际物理故障注入造成产品可靠性下降; 试验注入成本较高; 只能在系统样机完成以后进行验证, 试验周期滞后。

开展数据孪生驱动的测试性验证技术研究, 能有效解决以上问题, 提高试验验证效率, 节约测试性验证成本, 有利于实现装备全寿命周期内测试性验证与增长。

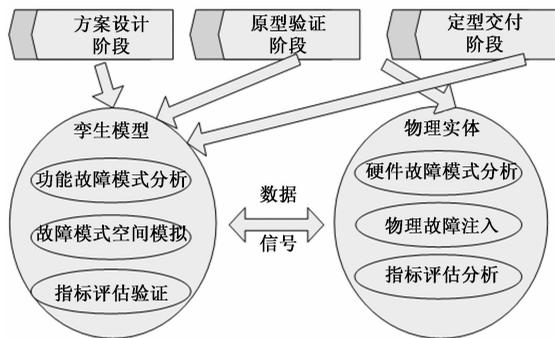


图 1 基于数字孪生技术的测试性验证技术框架

1 基于数字孪生技术的测试性验证技术框架

基于数字孪生的测试性验证技术贯穿于设备方案设计到定型交付的全生命周期内。方案设计阶段: 在物理样机完成之前, 开展测试性设计虚拟验证, 发现前期方案设计的缺陷; 原型验证阶段: 数字样机完成之后, 分别利用测试性数字样机和测试性物理样机开展测试性验证试验, 利用两者各自特点, 取长补短, 优势互补, 完成测试性指标的准确评估; 装备定型阶段, 实时迭代数字孪生模型, 进行不同任务剖面, 不同环境剖面的测试性验证与迭代, 实现测试性增长与验证。基于数字孪生技术的测试性验证技术实现了测试性设计与产品功能设计同步进行, 测试性研制与测试性验证同步开展, 装备性能与装备测试性水平同步增长。

2 基于数字孪生技术的测试性验证关键技术研究

2.1 数字孪生驱动故障模式分析

基于数字孪生模型的故障模式分析贯穿测试性设计、验证与测试性增长的全生命周期内。故障是指产品功能部件不能在规定条件下完成指定功能或者无法产生符合要求的输出。故障模式分析就是根据产品设计方案、功能电路图、系统结构框图、功能框图分析产品故障。数字孪生技术的引入能够在方案阶段通过构建超真实数字孪生模型, 完成方案阶段的故障模式分析。在原形样机和定型交付阶段通过数字孪生模型和物理实体的反复迭代, 实现故

障模式的快速分析与迭代工作。故障模式分析主要包括底层故障分析、故障传递关系分析、故障发生概率等级分析、故障模式影响分析、故障模式严酷度分析等。进一步的, 基于数字孪生模型的故障模式分析, 可以根据虚拟模型各个子模块电路本身的接口关系、连接关系, 模型参数、功能定义完成故障模式自动生成。

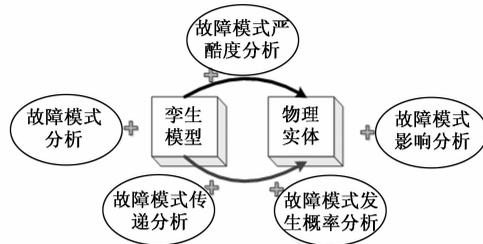


图 2 基于数字孪生驱动的故障模式分析

2.2 数字孪生驱动的故障模式注入

基于数字孪生驱动的故障模式空间模拟, 即采用数字手段模拟出虚拟的故障样本空间, 包括硬件故障模拟和软件故障模拟。其中硬件故障模拟包括物理故障模拟、电气故障模拟、协议故障模拟等。

进行虚拟硬件故障注入模拟时, 虚拟故障注入器位于虚拟故障诊断器和与虚拟系统互连的虚拟 LRU (或激励设备) 之间。能够模拟物理链路 (导线、接口) 断路、桥接、接地等故障; 能够模拟模拟信号故障模式; 包括输入信号参数漂移、噪声叠加、幅值超差、固高、固低、翻转等故障, 即模拟与系统互连的虚拟 LRU (或激励设备) 发生故障时的输出; 虚拟故障注入器也可独立连接至与虚拟孪生故障诊断器外部接口, 施加电气特性上的故障应力; 模拟协议通信错误等系统故障诊断器和 LRU 间互连总线的通信协议上的故障, 以及虚拟系统故障诊断器内部各 LRU 的故障。当虚拟故障诊断器可以独立运行或故障注入器可模拟系统故障诊断器工作所需所有信号时, 故障注入器直接与系统故障诊断器外部总线连接, 施加通信协议上的故障注入。

在程序映像被加载和执行之前, 将故障脚本注入到目标程序源代码中, 目标源程序就包含了故障代码, 当系统执行该代码时, 就按提前设置的故障执行方式, 产生错误操作。故障注入器是包含控制器的微型计算机系统, 能解析程序指令, 产生驱动信号, 将驱动信号注入系统中。故障代码实现方式, 包括修改变量赋值、改变代码执行顺序等操作。修改后的目标源代码, 编译后烧录进故障注入器芯片中。

程序变异是软件故障注入的主要方法, 程序变异是根据软件源代码故障模式分析后, 根据故障类型, 生成不同的故障程序代码。根据试验程序, 分别选定不同的程序代码, 在编译程序时, 将故障程序与源代码整合编译, 这样

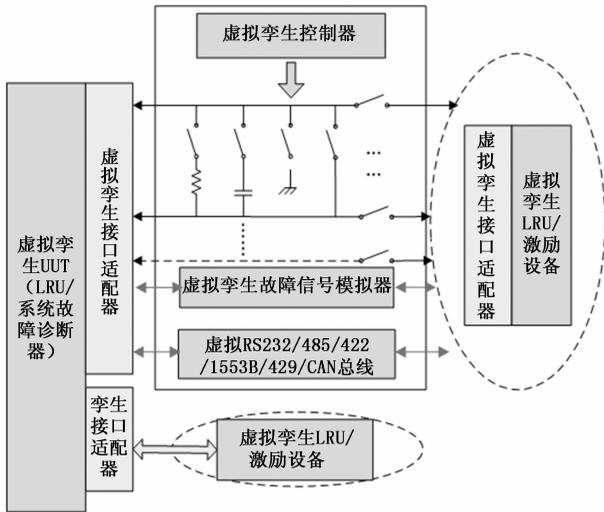


图 3 数字孪生硬件故障模拟注入

包含故障代码的源程序变成了可执行代码，完成了软件故障注入。

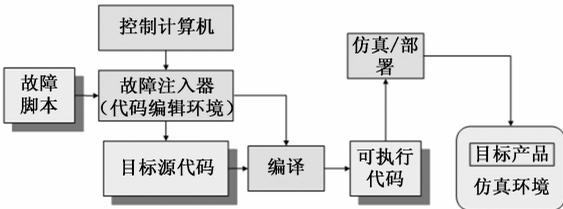


图 4 数字孪生软件故障模拟注入

2.3 数字孪生驱动故障模式分配与注入方法

2.3.1 故障模式分配

根据虚拟孪生模型功能组成、性能参数、系统故障模式，系统需求分析，明确分配任务、确定分配原则、选择分配算法，执行分配过程，最后输出系统层次结构、分配结果及说明、分配建议等。分配任务包括：1) 待分配的目标；2) 系统结构体系；3) 确定分配层次。根据分配的目标，如检测率、隔离率、虚警率等。分配原则包括：1) 按故障率分配；2) 按重要度分配；3) 按测试资源分配。分配算法包括：1) 经验分配法；2) 加权分配法；3) 故障率分配法。分配过程包括：1) 逐层进行分配；2) 验算分配结果；3) 输出分配结果。

2.3.2 故障模式注入

具体故障注入时，数字孪生模型利用仿真引擎进行故障注入，并调用测试诊断孪生模型，进行故障诊断。同时，系统需要调用的还有环境仿真孪生模块，通过设置系统运行的环境条件，工作时序，触发状态等模拟实际故障注入状态。根据虚拟模块诊断结果，判断是否能成功检测。

2.4 数字孪生驱动故障模式分配与注入方法

数字孪生驱动的指标评估与分析需要用到多种数据源的融合技术，涉及的数据包括物理实体的验证数据，孪生

模型的验证数据，历史维修数据，其他数据等。根据故障模式空间总样本量，利用实际物理故障注入和虚拟故障注入以及维修数据中的故障检测情况，评估出系统的检测率、隔离率、模糊组大小，冗余测试、不可检测故障等。

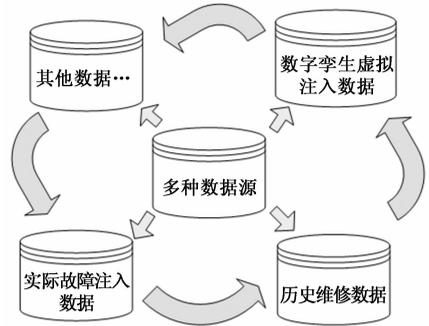


图 5 多种数据源融合技术

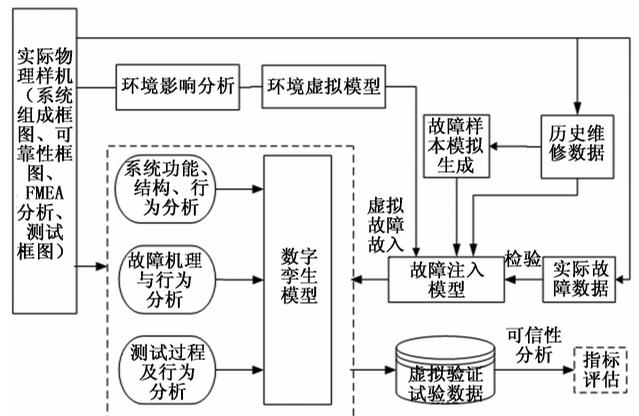


图 6 基于数字孪生模型的测试性验证流程

3 基于数字孪生模型测试性验证流程

基于数字孪生模型的测试性验证，首先根据对实际物理样机或者设计资料、包括系统组成软硬件结构、可靠性框图、FMEA分析结果等，建立数字孪生模型虚拟仿真引擎、构建故障机理、测试和诊断过程等。根据历史维修数据、FMEA分析数据构建故障模拟样本空间，从模拟样本空间选取虚拟故障样本进行故障注入。

3.1 构建验证对象数字孪生模型

根据对象设计资料，运行数据、可靠性数据等建立验证对象数字孪生模型。以某虚拟风电机为例，首先构建风电机实体，包括叶片、发电机、变速箱，传感器等。其次根据实体组成构建虚拟仿真模型，包括行为模型、诊断模型、规则模型等。用有限元法模拟叶片变形，齿轮齿应力、轴承温度等。利用发电和风速曲线来描述发电，用偏航角和横摆率之间的积分来表示摆动，通过力分析来模拟风速约束。

3.2 验证试验流程

基于数字孪生模型的测试性试验方案的主要内容包括：

试验初步样本量的确定; 样本量的分配; 样本量的补充; 备选故障样本库的建立; 试验样本的选择; 参数评估。还是以风机为例

1) 样本量的确定。根据对风电机 FMEA 分析以及风电机测试性指标要求, 利用基于数字孪生模型的验证系统内置的试验样本确定方法, 进行样本量确定。例如按照最低可接收值试验方案得到多组样本量, 再在多组样本量中选取大于所有故障模式总和的最小值作为初步样本量。

进行样本量确定时, 依据检测方式把故障模式分为两部分, 一部分是系统自身 bit 能检测到的故障模式, 另一部分必须借助外部测试设备才能检测到的故障模式。在样本量确定时, 必须分别对这两部分进行样本量确定。

2) 样本量的分配。试验样本量确定完成后, 采用准随机抽样方法进行抽样, 根据各相应层故障模式发生概率, 利用系统内置的准随机抽样方法进行抽样, 从而得到不同结构层次故障样本量。具体分配方法如下:

根据受试对象相应结构层级不同的故障模式的故障相对发生频率 C_{pi} 乘以确定的样本总量 N 的 3 倍, 即 $C_{pi} = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i}$ 乘以 $3N$ 所确定的累积范围, 利用 $00 \sim (3N-1)$ 范围内随机分布, 在所有故障模式中随机抽取 N 次, 然后将 N 次抽到的结果进行分类统计, 得到各个分配的样本量。

进行样本量分配时, 依据检测方式把故障模式分为两部分, 一部分是系统自身 bit 能检测到的故障模式, 另一部分必须借助外部测试设备才能检测到的故障模式。

3) 样本量的补充。样本量分配结束后, 从考虑样本覆盖充分性的角度考虑, 应当对未被抽到的故障模式进行量的补充, 具体的, 分别对未分配到样本的故障模式补充 1。覆盖充分性包括风电系统结构覆盖充分性、测试覆盖充分性、类型覆盖充分性, 功能覆盖充分性等。

4) 样本库的建立。样本量分配完成后, 根据分配和补充结果建立故障模式样本库, 原则上, 每个故障对应的故障样本总数应该大于分配给它的样本量; 对于分配的样本量该故障模式样本数时, 应该按照顺序对故障模式进行循环注入。

同样, 建立故障样本库时, 应分别对 BIT 可检的故障模式和外部测试设备可检的故障模式建立样本库。

5) 试验样本的选取。从样本库中选取响应的试验样本进行故障注入。启动数字孪生模型, 依据事先拟定好的程序流程, 按顺序从样本库中选取试验样本。

6) 故障注入。具体故障注入时, 风电机数字孪生模型验证系统包括风电机数字孪生模型, 以及环境仿真环境。将选取好的故障模式编译并注入到数字孪生模型中, 并调用测试诊断程序, 进行故障诊断。环境仿真环境, 需要设置系统运行的环境条件, 工作时序, 触发状态等模拟实际故障注入状态。

7) 结果统计。根据故障模式注入情况, 统计故障检测和隔离成功的故障模式数。判断设计是否满足测试性指标要求。

3.3 基于数字孪生模型的测试性验证优势

基于数字孪生模型的故障注入方式克服了实物故障注入的缺点, 不受地点、环境等客观条件的限制。同时, 传统的测试性验证试验, 必须在实物样机完成以后, 才能进行测试性验证。而基于数字孪生的测试性验证试验, 只需要在虚拟的数字孪生模型上进行故障注入, 可以在系统设计阶段、使用阶段、改型阶段等任一阶段完成试验任务, 极大的提高了装备研制效率。

具体故障注入时, 基于数字孪生模型的测试性验证试验消除了故障注入位置、条件限制, 降低了故障注入难度, 规避了故障注入可能对设备带来的不可修复性损害。同时在样本选取时, 能尽可能的充分的考虑到装备全生命周期内的故障样本, 充分保障故障样本结构和数量的合理性。

4 结束语

本文主要阐述了数字孪生技术在测试性验证中的使用, 利用数字孪生技术超真实逼近实际装备、故障模拟成本低、故障注入时间短等优势, 可以极大降低武器装备全寿命周期的测试性验证成本, 突破常规测试性验证技术的限制, 实现从方案设计到样机研制到产品交付等各个阶段的测试性验证。

参考文献:

- [1] 陶 飞. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (1): 1-2.
- [2] 戴 晨. 数字化产品定义发展趋势. 从样机到孪生 [J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2018: 2-4.
- [3] 田 仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [4] 厚 泽, 王啓宁. 基于虚拟验证技术的导弹装备测试性综合评估研究 [A]. 第六届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛 [C]. 2016, 10: 3-4.
- [5] 熊刚强. 装备通用质量特性的学习与对策探讨 [J]. 理论·实践, 2014 (4): 74-77.
- [6] 温熙森, 邱 静, 等. 装备可测性设计与评估技术综述 [J]. 装备研究, 2003 (1): 1-5.
- [7] 郑应荣. 系统级层次化测试性建模与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 3-4.
- [8] 肖慧鑫, 王静滨. 未来武器装备可靠性维修性保障性发展趋势 [J]. 技术基础研究与应用, 2006 (4): 1-2.
- [9] 周嫣然. 基于大数据时代的数据可视化分析 [J]. 网络安全技术与应用, 2014 (11): 47-48.
- [10] 周训文. 人工智能及其专家系统在航空航天领域中的应用 [R]. 航空情报研究报告: 11-13.