



高速列车信息控制系统故障注入研究进展

杨超^{1,2}, 彭涛^{1,2*}, 陶宏伟^{1,2}, 阳春华^{1,2}, 桂卫华¹

1. 中南大学自动化学院, 长沙 410083

2. 中南大学轨道交通节能控制与安全监测湖南省重点实验室, 长沙 410083

* 通信作者. E-mail: pandtao@csu.edu.cn

收稿日期: 2019-10-15; 接受日期: 2019-11-01; 网络出版日期: 2020-04-14

国家自然科学基金(批准号: 61490702, 61773407)、湖南省重点实验室(批准号: 2017TP1002)和湖南省研究生科研创新项目(批准号: CX2018B041, CX20190064)资助

摘要 高速列车信息控制系统是确保整车运行安全的关键系统之一,也是高速列车高发故障的主要来源之一.实时故障诊断是提升系统运行可靠性和安全性的有效方案之一,故障注入作为检验其是否满足车载应用要求的关键技术,是实现安全、逼真模拟系统各类故障场景的重要手段.高速列车信息控制系统结构复杂,故障场景呈现出多种复杂特性,从而使实现其有效故障注入方法和技术面临诸多挑战,如故障位置不可访问、故障场景时空变迁特性复杂和系统级故障注入架构缺乏、仿真资源受限等.本文首先综述了故障注入研究现状,对比探讨了面向实时仿真的故障注入的研究意义;然后,分析了面向实时仿真高速列车信息控制系统故障注入存在的问题,并在此基础上给出了一些解决方案;最后,指出了高速列车信息控制系统故障注入未来的研究方向.

关键词 故障注入, 实时仿真, 故障诊断, 高速列车, 信息控制系统

1 引言

近年来,我国高速铁路发展迅速,取得了举世瞩目的进步,形成了具有中国特色的高铁技术体系,总体技术水平和应用水平居世界领先地位^[1~4].作为高铁运营的载体、高端装备的代表,高速列车已成为现代轨道交通运输业最核心、最重要、最便捷的方式之一,是国民经济大动脉、大众化交通工具和现代城市运行的重要骨架.但高速列车运行时速高、运行环境恶劣以及长期运行可能导致的元部件老化等给高速列车运行带来严重的安全隐患^[5~7].

高速列车信息控制系统^[8]涵盖高速列车牵引传动控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统、网络控制系统等子系统,是高速列车的核心(变流)、大脑(控制)和神经(网络),高速列车正是在这些系统的共同作用下实现整车安全运行.实际运营中,信息控制系统也是高速列车高发故障的主要来源

引用格式: 杨超, 彭涛, 陶宏伟, 等. 高速列车信息控制系统故障注入研究进展. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 465-482, doi: 10.1360/SSI-2019-0225

Yang C, Peng T, Tao H W, et al. Review of recent research on fault injection for high-speed train information control systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 465-482, doi: 10.1360/SSI-2019-0225

之一, 其子系统中的任何故障或安全隐患若不能实时诊断并得到及时正确的处理, 都有可能引发连锁事故甚至被迫停车, 带来不好的经济和社会影响. 因此, 为保障高速列车信息控制系统的运行安全, 诸多可靠性技术、预防措施和安全保障体系的研究已引起广泛关注, 如故障模式及影响分析等^[9, 10].

作为提升系统运行可靠性和安全性的有效方案之一, 国内外学者围绕高速列车信息控制系统及其各子系统的实时故障诊断等方法和技术展开了大量的研究^[11~18]. 其中, 2015 年国家自然科学基金委启动的重大项目“高速列车信息控制系统实时故障诊断与应用验证”, 汇集了国内故障诊断领域知名的高校研究团队和高铁龙头研发企业组成的研究小组, 就高速列车信息控制系统中间歇故障、复合故障和微小故障等的实时故障诊断问题开展深入研究^[8, 19~21]. 国外针对高速列车故障诊断技术的研究起步较早, 20 世纪 80 年代德国西门子研制的 ICE 系列高速列车首次实现对整个列车全面诊断, 开启了世界高速列车故障诊断系统研发及应用的大门. 随着世界高速列车市场的快速扩张, 日本川崎、法国阿尔斯通、加拿大庞巴迪、西班牙 CAF 等世界知名高速列车制造商也加大对高速列车实时故障诊断技术的研究和资助.

为确保真实运营车运行的安全可靠, 所有故障诊断算法在投入车载运行使用之前, 需通过实验室仿真环境和现场试验车环境所搭建的应用验证平台的大量测试与验证. 因此, 应用验证平台的研制和使用可有效降低研发成本、缩短研制周期和车上调试时间、提升车载应用的可靠性. 与在正常运行的应用验证平台不同, 故障诊断技术的测试与验证需要在系统故障运行场景下进行. 然而, 一方面, 现有的高速列车信息控制系统应用验证平台大多以模拟、仿真、验证高速列车正常运行行为为主要目标^[22~24], 缺乏安全、逼真的模拟或复现实际故障场景的手段, 现有面向正常运行行为的应用验证平台难以用于对系统中各种故障的发生、演变及其对整个系统运行状况的时空影响进行实时模拟仿真.

另一方面, 高速列车信息控制系统结构复杂且包含大量的元部件, 故障种类多, 故障机理及故障症状十分复杂, 导致故障的发生在故障场景表征上具有多样性和相似性, 在时间上存在随机性和偶然性, 致使系统故障运行状态下的数据隐藏在系统正常运行状态下的海量数据之中, 导致故障特征和症状难以从大数据中挖掘出来; 此外, 列车车载记录装置所记录的故障运行状态数据, 存在明显的局限性, 仅为特定工况条件下系统故障运行状态数据, 无法保证待测故障诊断算法在其他不同工况条件下依然有效. 因此, 仅仅利用实际故障运行状态数据构建应用验证平台, 对待测诊断算法进行测试验证的方案还不完备. 通过上述分析可知, 为推进实时故障诊断技术的车载应用, 搭建专门用于实时故障诊断测试与验证的应用验证平台, 亟需解决高速列车信息控制系统各类故障场景有效故障注入的难题.

综上所述, 面向实时仿真的高速列车信息控制系统中故障注入缺乏系统性方法和实现技术. 本文首先综述了故障注入研究现状, 然后, 分析了面向实时仿真故障注入面临的问题与难点, 并在此基础上从故障注入方法及其实时仿真的实现技术上给出了一些解决方案; 最后, 对高速列车信息控制系统故障注入未来的研究方向进行展望.

2 研究现状

2.1 故障注入

故障注入是 20 世纪 70 年代提出的一种故障仿真技术, 当时并没有引起人们的注意, 直到 20 世纪 90 年代才获得关注并迅速成为可靠性研究领域的一个热点^[25]. 故障注入本质是针对指定的故障类型, 采用某种策略人为地将故障引入目标系统中, 用于观察和分析目标系统在注入故障情况下的运行行为. 常用的故障注入技术可分为 3 类^[26~28]: 基于硬件、基于软件和基于仿真的故障注入. 基于硬

件注入的故障更接近于系统运行现场中发生的真实故障,但对集成度高、结构复杂且器件封装严密的系统进行故障模拟时,可能遇到故障位置不可访问的问题,导致许多硬件故障注入无法进行.基于软件故障注入廉价且易于控制,但仅限于与软件有关的部分,研究表明,有 2/3 的故障无法通过软件故障注入完成^[29].基于仿真的故障注入覆盖故障类型广,可控性和可观测性高,成本较低,但模型开发耗时,故障可信度依赖于模型的准确性.

国内外开展故障注入研究和应用的起源,主要是围绕军事装备、航天航空、核科学和高性能计算机中微电子设备、系统软件等的故障仿真问题.在军事装备方面,文献[30]提出了一种基于全寿命周期数据的测试性验证试验优化设计与综合评估方法,并开发了具有通用性的导弹控制系统的故障注入与综合评估系统;文献[31]开发了基于 CPCI 工业控制计算机的故障注入系统,并应用该系统对某型导弹故障诊断系统的性能进行了静态测试验证.在航空航天领域,文献[32]针对长寿命无人航天器系统,采用基于 VHDL 的故障注入方法,解决了深亚微米技术中间歇性故障容错系统的可靠性评估问题.文献[33]针对飞行器中广泛部署的防碰应用程序,采用随机故障注入方式,模拟程序执行中暂时性故障,验证了所提一种程序级框架 SymPLIFIED.围绕核环境中微电子设备的故障仿真问题,文献[34]开发了一个故障注入平台,用于评估 Virtex-6 FPGA 对单粒子翻转 (single event upset, SEU) 或累积多个 SEU 的敏感性.文献[35]开发了一种基于 VHDL 的故障注入技术,用于分析间歇故障对复杂容错系统的影响.文献[36]提出了一种单比特错误 (single bit error, SBE) 故障注入框架,用于解决故障注入速度与 SBE 精度的折中与优化问题.文献[37]提出了一种新的故障注入方法,解决了 COTS 微处理器中 SEU 灵敏度的检测问题.在系统软件方面,文献[38]提出了一种面向非专门设计 (off-the-shelf, OTS) 软件的二进制级故障注入方法,用于评估 OTS 软件存在的风险.文献[39]提出一种分类算法用于提升现有软件故障注入的有效性.

随着电子对抗、信息物理系统、人工智能等新兴应用场景和技术的发展,在电子对抗技术领域,文献[40]采用基于已知中间件的故障位置猜测策略,使已知故障攻击方式可有效适用于随机故障模型.文献[41]概述了对称和非对称密钥,并阐述了基于故障注入的加密设备攻击方法和对策.在信息物理系统研究方面,文献[42]针对面向服务的信息物理系统 (service-oriented cyber-physical systems, SOCPs),提出了一种基于契约的建模方法,并采用故障注入来分析所建立的信息物理系统 (cyber-physical system, CPS) 模型,以评估该系统的可靠性.在人工智能领域,文献[43]探讨了考虑故障/噪声注入下 RBF 神经网络在线学习的收敛性和目标函数构建等问题.文献[44]提供了单线性输出节点、多线性输出节点和 single sigmoid 输出节点的在线节点故障注入算法的目标函数和收敛性证明.然而,目前针对高速列车故障注入的研究主要停留于列车网络通讯系统^[45]和牵引传动系统^[46]等高速列车信息控制系统中的单个子系统,鲜有针对高速列车信息控制系统故障注入研究的系统、深入的报道.

2.2 基于故障注入的应用验证平台

故障注入方法和实现技术的研究,与应用验证平台的构建方式直接相关.目前应用验证平台的构建方式主要有 3 种:基于实物试验台、基于虚拟/亚实时仿真和基于实时仿真.基于实物试验台的应用验证平台是最接近真实对象实际运行场景的实现方式,按照额定功率等级可分为功率等比 (1:1) 试验台和功率缩比试验台.此类应用验证平台一般采用基于硬件的故障注入方式,可最逼近真实地模拟出实际的故障场景,所产生的故障运行数据可信度高.文献[47]介绍了清华大学周东华教授团队在中车青岛四方车辆研究所有限公司搭建的 1:1 高速列车制动系统上开展的故障诊断算法研究,通过加装零部件等方式,实现了制动缸气体泄漏故障等的故障场景模拟,参见文献[47]的图 2.但一方面受制造成本、测试周期、运行条件要求、试验安全性等的考虑和限制,实物试验平台基本只存在于各国高

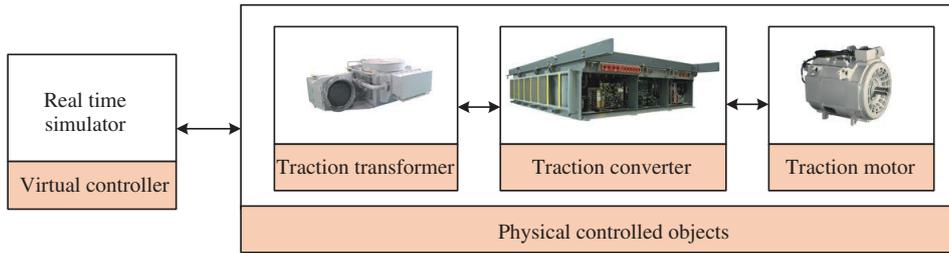


图 1 (网络版彩图) 基于 RCP 的半实物仿真

Figure 1 (Color online) Rapid control prototyping-based realtime simulation platform

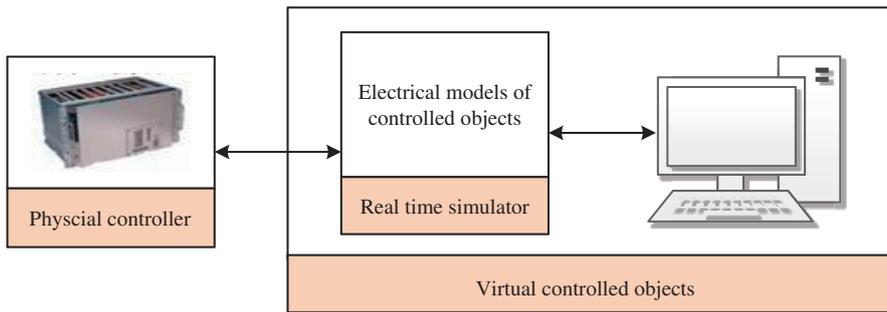


图 2 (网络版彩图) 基于 HIL 的半实物仿真

Figure 2 (Color online) Hardware in the loop-based realtime simulation platform

速列车制造商和国家级高速列车的科研机构^[48,49]。另一方面,面向实物试验台的故障注入一般难以实现故障严重程度的精准注入/模拟,无法完全覆盖真实系统中所有可能发生的故障场景。

基于虚拟/亚实时仿真的应用验证平台搭建简单、成本低、测试周期短,但其仿真时间标尺大于自然时间标尺^[50]。该应用验证平台一般采用基于仿真的故障注入方式,理论上可将已知的可执行故障在可模拟范围内的任何细节之处实现注入。文献[51]开发了基于元胞自动机的列车运动仿真模型,用于重建列车碰撞过程,即事故重建;文献[52]设计并搭建用于故障容错控制算法研究的列车自动运行系统虚拟仿真平台,该平台仿真了一段包含4个启停区间、5个站点,共计70余公里的高速列车行驶曲线,并模拟了不确定型执行器故障。然而,由于缺乏实时仿真的手段,上述虚拟/亚实时仿真平台无法对算法实时性进行有效验证,仅适合对算法实时性要求不高的场合。

基于实时仿真的应用验证平台,其仿真时间标尺等于自然时间标尺^[50],兼备实物试验台在故障模拟逼真度高和虚拟仿真在故障场景覆盖面广的优点,且可灵活采用基于硬件、软件和仿真3种故障注入方式。目前,半实物仿真是实时仿真的主流实现形式,按照实时仿真目标的不同,可分为快速控制原型(rapid control prototyping, RCP)和硬件在回路仿真(hardware in the loop, HIL)两种方式。如图1所示,RCP方式中的实时仿真目标为控制器,由图形化模型搭建而成,实物为被控对象,这种方式主要针对控制方法与策略的验证与开发,在对实物被控对象进行故障注入时,与实物试验并无区别,同样存在测试成本高且实验风险较大等不足,因此RCP方式很少运用到故障实时仿真当中。如图2所示,HIL方式中的实时仿真目标为被控对象,实物为控制器,在得到与实物试验台相近的效果的同时,缩短开发周期、节约测试成本,实验过程更加安全,具有重复性与可控性。因此,相比实物试验与RCP仿真方式,基于HIL仿真更适用于故障实时仿真与故障诊断技术的测试与验证工作。文献[53,54]均

表 1 基于故障注入的应用验证平台对比

Table 1 Comparison of the fault-injection-based application verification platform

Platform implementation	Fault injection	Real-time testing for algorithm	Coverage of fault scenarios	Price/time cost	Confidence level	Refs.
Physical test bench system	Hardware /software	Satisfied	Hardware fault in dominant	Expensive /high	High, physical truth	[47, 48]
Virtual/subreal-time simulation	Simulation	Dissatisfied	Less limited	Cheaper /low	Low, a little different from reality	[51, 52]
Realtime simulation	Hardware /software /simulation	Satisfied	Individual components & simple faults, difficult to complex faults	Cheap /medium	Medium, close to reality	[53, 54]

在基于 HIL 的半实物仿真平台中, 实现了对牵引整流器开路故障和网侧电流传感器和直流电压传感器的开路、增益和噪声故障的故障注入. 然而, 基于实时仿真应用验证平台的研制中模型开发耗时, 故障运行数据可信度依赖于故障对象模型的准确性.

从可采用的故障注入技术、是否满足故障诊断算法实时性测试的要求、故障场景覆盖面、测试成本/周期、测试所得数据的可信度等 5 个方面, 本文对现有基于故障注入的高速列车应用验证平台作了对比分析, 如表 1 所示. 相比基于实物试验台和虚拟/亚实时仿真方式, 基于实时仿真的应用验证平台, 不仅可灵活使用 3 种故障注入方式, 解决系统中复杂故障场景的故障注入问题, 且在试验周期、成本等方面更具优势, 更适用于故障诊断算法的测试与验证. 然而, 面向实时仿真高速列车信息控制系统故障注入研究还处于起步阶段, 现有故障注入主要是采用简单地设置故障注入环节的方式, 一方面, 难以实现故障类型繁多、故障场景复杂的高速列车信息控制系统的故障注入; 另一方面, 由于缺少系统级的故障注入体系架构, 现有故障注入方法无法对高速列车信息控制系统各子系统运行状况的时空影响进行模拟, 且现有故障注入实现技术难以解决故障注入所带来的实时仿真资源受限的问题, 如时序资源和解算资源的分配矛盾. 因此, 针对高速列车信息控制系统实时故障诊断应用验证平台, 开展面向实时仿真的故障注入方法及其实现技术的研究, 对实现故障场景的逼真模拟, 加快诊断算法车载验证与应用具有十分重要的意义.

3 面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障注入问题分析

本文主要考虑位置可访问的故障注入方法和位置不可访问的故障注入方法及其实现技术, 位置可访问的故障, 主要是指虚拟仿真对象发生的故障. 在进行故障注入时, 可以最大限度地利用分析、建模和试验过程中得到的大量输入输出变量, 理论上可以通过对任意变量进行调理, 或者直接替换模型的方式实现各种故障的注入与模拟.

然而, 高速列车信息控制系统结构复杂, 自下而上分为元件级、部件级、子系统级和系统级 4 层. 相应的故障症状可能沿信号流方向在同层或邻近层进行传递, 也可能自底向上逐层传递到部件层、子系统层乃至系统层, 对系统的影响具有空间上的迁移特性; 在老化的过程中, 老化程度随着元器件使用时间的增加而逐渐加深, 对系统的影响不仅具有空间上的迁移特性, 还有时间上的演变特性, 即具有时空上的变迁特性. 故障的时空变迁特性导致高速列车信息控制系统故障的发生、发展和演变机理

十分复杂,使得现有的故障注入方法难以解决高速列车信息控制系统中具有时空变迁特性的故障注入与模拟问题。

位置不可访问的故障,主要是指实物对象发生的故障。对封装了的实物模块或部件进行测试时,无法开封、分解注入。直接对实物进行破坏性试验,可以实现实物的故障注入,但往往不具备可重复性,难以生成足够的测试数据,并且,针对同一对象不同种类不同程度的故障,需要进行不同的实物破坏性试验,显著提高了故障注入的成本。此外,系统隔离保护的设置使故障症状变迁特性与无隔离性时不同,导致故障症状变迁关联、因果关系不同,给故障注入与模拟带来了困难。

不同子系统运行状态和工作原理既有区别又相互影响。某一子系统发生故障不仅会造成本系统的不同元器件异常运行,也会通过各子系统间的联系进行传播并影响到其他子系统的运行状态。由于缺少系统级的故障注入体系架构,给高速列车信息控制系统各种故障的发生、演变及其对整车各子系统运行状况的时空影响的模拟带来困难。

在高速列车信息控制系统实时仿真平台的某一时序路径中加入故障注入模块,会导致其他并行路径的时序紊乱,也会增加解算资源占用;对系统进行时序优化时,往往因其他路径时间裕量的增加而占用更多解算资源。而实时仿真平台的解算资源十分有限,扩展困难且价格昂贵,如何在现有解算资源的条件下实现高速列车信息控制系统各类故障的注入与模拟,也是故障注入实现所面临的难题。

4 面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障注入解决方案

4.1 故障注入方法

4.1.1 位置可访问的故障注入

针对位置可访问的故障,根据其故障特性可分为空间上具有迁移特性的故障和时空上具有变迁特性的故障。对于具有空间迁移特性的故障,若故障发生影响的是故障对象的输入输出变量,则使用基于信号调理的故障注入方法进行故障注入与模拟^[55]。若故障发生影响的是故障对象的拓扑结构和机理模型,则使用基于模型替换故障注入方法进行故障注入与模拟^[56~58]。对于具有时空变迁特性的故障,故障发生不仅会影响故障对象的拓扑结构和机理模型,还会在机理模型中引入在时间上具有演变特性的参数,则使用基于信号调理和模型替换混合的故障注入方法进行故障注入与模拟^[59]。

假定发生的是影响故障对象输入输出变量的故障 F_d , $d = 1, 2, 3, \dots, D$, D 是故障类型的数目,获取与故障对应的故障场景信号 $\mathbf{S}_d = [s_{d1}, \dots, s_{dz_d}, \dots, s_{dZ_d}]$, 其中 $z_d = 1, 2, 3, \dots, Z_d$, Z_d 是故障对象发生故障 F_d 时故障场景信号的总和。通过信号调理的逆运算,将故障信号 \mathbf{f}_d 从故障场景信号 \mathbf{S}_d 中分离出来, $\mathbf{f}_d = [f_{d1}, \dots, f_{dz_d}, \dots, f_{dZ_d}]$ 。逆运算具体操作为 $\mathbf{f}_d = \mathbf{S}_d \bar{\oplus} \mathbf{S}_{d0}$, 其中 $\mathbf{S}_{d0} = [s_{d01}, \dots, s_{d0z_d}, \dots, s_{d0Z_d}]$ 为故障 F_d 发生前系统正常运行的信号,信号操作的逆运算可以是相等、相减、相除等运算。

考虑信号类型和幅频特性等信息,先将故障信号 \mathbf{f}_d 近似为 \mathbf{f}_{d0} ,再将 \mathbf{f}_{d0} 规范为故障信号的规范近似描述 \mathbf{f}_{nd0} ,具体如下:

$$\mathbf{f}_{nd0} = \text{Nor}(\mathbf{f}_{d0}) = \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{i=1}^{n_j} [\Gamma(t - (T_{tj} + T_{pj} \times \tau_j) - T_{pj} \times (i-1)) - \Gamma(t - T_{tj} - T_{pj} \times (i-1))] \times \text{TH}\{\text{cs}_j\}, \quad (1)$$

其中 $\text{Nor}(\mathbf{f}_{d0})$ 表示对 \mathbf{f}_{d0} 进行规范化, $\mathbf{f}_{nd0} = [f_{nd10}, \dots, f_{ndz_d0}, \dots, f_{ndZ_d0}]$ 是对应故障场景信号 $\mathbf{S}_d = [s_{d1}, \dots, s_{dz_d}, \dots, s_{dZ_d}]$ 处的规范近似故障信号, Γ 是阶跃函数; $j = 1, 2, 3, \dots, N_d$ 是第 j 类脉冲序列,

N_d 是第 d 类故障不同类型脉冲序列的总个数, $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$ 是脉冲数, $n_j = \text{ceil}[\frac{T_{t(j+1)} - T_{tj}}{T_{pj}}]$ 表示第 j 类脉冲的总个数, ceil 表示小数位进位取整; T_{pj} 表示第 j 类脉冲序列的脉冲周期; T_{tj} 表示第 j 类脉冲序列的触发时间; τ_j 是第 j 类脉冲序列的脉冲占空比; t 表示系统运行时间; $\text{TH}\{\}$ 是阈值函数; cs_j 是第 j 类脉冲序列的脉冲幅值; $\sum_{j=1}^{N_d} \sum_{i=1}^{n_j} [\]$ 用来表征信号时间特性, 当 $\tau_j \rightarrow 0$, 且 $T_{pj} \rightarrow \infty$ 时, 第 j 类脉冲序列用于表示瞬态性信号; 当 $0 < \tau_j < 100\%$ 时, 第 j 类脉冲序列用于表示间歇性信号, 当 $\tau_j \rightarrow 100\%$ 时, 第 j 类脉冲序列用于表示永久型信号; $\text{TH}\{\}$ 用来表征故障信号的信号类型, 分为数字信号和模拟信号, $\text{TH}\{\}$ 的阈值用来限制脉冲序列输出幅值大小的边界值; cs_j 用来表征故障信号的幅频特性.

将规范近似故障信号 f_{nd0} 与系统正常运行的信号 S_{d0} 进行信号调理, 生成故障调理信号 S_{F_d} , 信号调理操作为 $S_{F_d} = S_{d0} \oplus f_{nd0}$, 调理操作可以为相等、相加、相乘等运算. 根据故障发生对系统的影响, 将经过信号调理生成的故障场景信号替换故障对象原有的输入或输出变量, 完成基于信号调理的故障注入与模拟.

假定发生的是影响故障对象拓扑结构和机理模型的故障 F_h , 首先构建故障对象正常运行的机理模型 $M[\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}]$, 其中 $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_a, \dots, x_A]$ 是模型 M 的输入变量, x_a 是第 a 个输入变量, $a = 1, 2, 3, \dots, A$, A 为输入变量的总数; $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_b, \dots, \theta_B]$ 为模型 M 的模型参数, θ_b 是第 b 个模型参数, $b = 1, 2, 3, \dots, B$, B 为正常运行机理模型参数的总数; $\mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_c, \dots, y_C]$ 为模型 M 的输出变量, y_c 是第 c 个输出变量, $c = 1, 2, 3, \dots, C$, C 为输出变量的总数.

发生故障 F_h 后, 构建故障对象在该故障状态下的机理模型为 $M_{F_h}[\mathbf{X}_h, \boldsymbol{\theta}_h, \mathbf{Y}_h]$, 其中 $\mathbf{X}_h = [x_{h1}, \dots, x_{ha}, \dots, x_{hA}]$ 是模型 M_{F_h} 的输入变量, x_{ha} 是第 a 个输入变量, $a = 1, 2, 3, \dots, A$, 与模型 M 中 x_a 对应的输入变量相同; $\boldsymbol{\theta}_h = [\theta_{h1}, \dots, \theta_{hb}, \dots, \theta_{hB}]$ 为模型 M_{F_h} 的模型参数, θ_{hb} 是第 b 个模型参数, $b = 1, 2, 3, \dots, B_h$, B_h 为发生故障 F_h 时机理模型参数的总数; $\mathbf{Y}_h = [y_{h1}, \dots, y_{hc}, \dots, y_{hC}]$ 是模型 M_{F_h} 的输出变量, y_{hc} 是第 c 个输出变量, $c = 1, 2, 3, \dots, C$, 与模型 M 中 x_c 对应的输出变量相同.

将故障对象的故障机理模型 M_{F_h} 的输入端与正常机理模型 M 的输入端相连, 在模拟故障 F_h 时, 将正常机理模型 M 的输出信号 \mathbf{Y} 断开, 接入故障机理模型 M_{F_h} 的输出信号 \mathbf{Y}_h , 完成基于模型替换的故障注入与模拟.

假定发生的是具有时空变迁特性的故障 F_w , 首先建立故障对象在该故障状态下的机理模型 $M_{F_w}[\mathbf{X}_w, \boldsymbol{\theta}_w, \mathbf{Y}_w]$. 针对故障机理模型 $M_{F_w}[\mathbf{X}_w, \boldsymbol{\theta}_w, \mathbf{Y}_w]$ 中的模型参数 $\boldsymbol{\theta}_w$, 构建故障敏感参数 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_w$, 建立其性能退化过程与系统运行状态变量 \mathbf{R} 和环境参数 \mathbf{E} 之间的表征关系: $\hat{\boldsymbol{\theta}}_w = \mathbf{g}_w(\mathbf{R}, \mathbf{E})$, 其中 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_w = [\hat{\theta}_{w1}, \dots, \hat{\theta}_{wk_w}, \dots, \hat{\theta}_{wK_w}]$ 是对性能退化过程敏感的模型参数, $\hat{\theta}_{wk_w}$ 是第 k_w 个敏感参数, $k_w = 1, 2, 3, \dots, K_w$, K_w 是发生故障 F_w 时所建模型 M_{F_w} 中故障敏感参数的总和, $1 \leq K_w \leq B_w$, 其中 B_w 为机理模型参数的总和; $\mathbf{g}_w(\mathbf{R}, \mathbf{E}) = [\mathbf{g}_{w1}(\mathbf{R}, \mathbf{E}), \dots, \mathbf{g}_{wk_w}(\mathbf{R}, \mathbf{E}), \dots, \mathbf{g}_{wK_w}(\mathbf{R}, \mathbf{E})]$, 其中 $\mathbf{R} = [r_1, \dots, r_p, \dots, r_P]$ 是影响敏感参数演变的系统运行状态变量, r_p 是第 p 个影响敏感参数演变的运行状态变量, $p = 1, 2, 3, \dots, P$, P 是影响敏感参数演变的运行状态变量总数; $\mathbf{E} = [e_1, \dots, e_q, \dots, e_Q]$ 是影响敏感参数演变的环境参数, e_q 是第 q 个影响敏感参数演变的环境参数, $q = 1, 2, 3, \dots, Q$, Q 是影响敏感参数演变的环境参数的总和.

当发生故障 F_w 时, 使用基于信号调理的方式, 模拟故障敏感参数 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_w$ 随系统运行状态变量 \mathbf{R} 和环境参数 \mathbf{E} 的变化而形成的时间上的演变特性, 使用基于模型替换的方式, 将正常的机理模型 M 切换为故障机理模型 M_{F_w} , 完成基于信号调理和模型替换混合的故障注入与模拟.

4.1.2 位置不可访问的故障注入

针对位置不可访问的故障 F_u , 通过建立故障传播特性模型, 进行故障注入与模拟^[60~62]. 首先根据电路拓扑, 找到与故障对象 M 相邻且位置可访问的元部件 N , N 一般为实时仿真系统中虚拟仿真对象, 构建 N 的故障传播特性模型 $N_{F_u} = T \cdot M_{F_u}$, 其中 M_{F_u} , N_{F_u} 分别为实物故障对象 M 、元部件 N 的故障机理模型 $M_{F_u}[\mathbf{X}_u, \boldsymbol{\theta}_u, \mathbf{Y}_u]$ 和 $N_{F_u}[\mathbf{X}_u, \boldsymbol{\theta}_u, \mathbf{Y}_u]$, T 为故障机理模型 M_{F_u} 和 N_{F_u} 之间的广义转移函数, 将故障对象 M 处位置不可访问的故障 $F_u(M)$ 转化为故障对象相邻元部件 N 处位置可访问的故障 $F_u(N)$. 然后根据故障类型对系统的影响, 使用 4.1.1 小节中的 3 种故障注入方式, 实现故障 $F_u(N)$ 的注入与模拟.

4.2 故障注入实现技术

4.2.1 面向实时仿真的故障注入架构

缺少系统级的故障注入体系架构无法模拟高速列车信息控制系统中各种故障的发生、演变及其对整车各子系统运行状况时空影响, 针对这一问题, 文献 [63] 提出了一种基于故障注入的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真平台架构, 如图 3 所示, 建立了多个子系统故障注入协同仿真机制. 在此基础上, 构建了面向协同仿真的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真的高层体系结构 – 运行支撑环境 (high level architecture-run time infrastructure, HLA-RTI) 和反射内存网的混合网络系统结构, 如图 4 所示. 在该协同仿真架构下, 系统中各个子系统根据不同的实时性要求与硬线连接要求, 通过 HLA 主干网与反射内存网进行通信和数据传输. 将故障注入控制接入反射内存网与 HLA-RTI 主干网, 达到对系统不同层级、不同实时性要求的故障注入的协同控制故障注入的协同控制, 提出构建一种面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障测试与验证平台故障注入架构, 如图 5 所示. 并在此架构上, 采用基于信号调理的、基于模型替换的、基于信号调理和模型替换混合的故障注入实现技术, 实现高速列车信息控制系统中故障位置可访问和故障位置不可访问的故障场景的逼真模拟.

4.2.2 故障注入下的时序与解算资源优化

实时仿真系统所用到的实时仿真器, 包括 CPU 板卡和 FPGA 板卡. 仿真系统中对实时性要求高的机理模型主要在 FPGA 板卡中实现, FPGA 一般由 3 个基本单元组成: 可编程逻辑块 (configurable logic block, CLB), 用以实现电路的逻辑功能; 可编程布线互连资源 (programmable routing resource, PRR), 用以实现逻辑块间的相互连接; 可编程输入/输出模块 (programmable input/output blocks, IOB), 用来实现信号的输入输出^[64]. 其中, CLB 是 FPGA 中最主要的运算单元, 由查找表 (look up table, LUT) 与寄存器 (flip flop, FF) 分别实现组合逻辑与时序逻辑功能.

通过 FPGA 进行实时仿真, 是以牺牲解算资源换取速度的方式来实现快速性和实时性的^[65], 考虑系统故障类型多、场景描述复杂等因素, 实时仿真需对时序资源进行优化, 尽可能减少逻辑资源占用. 首先, 遍历系统模型的时序逻辑电路中所有时序起点终点以及其间的组合逻辑电路, 分别建立系统正常运行状态下的时序有向图 \mathbf{G}_0 和故障注入下的时序有向图 \mathbf{G}_{f0} . $\mathbf{G}_0 = [G_{01}, \dots, G_{0i}, \dots, G_{0I}]$, G_{0i} 表示 \mathbf{G}_0 中的时序向量量子图, I 是 \mathbf{G}_0 中时序向量量子图的个数, 每个时序向量量子图包含若干个节点和有向边, 如图 6 所示. 其中 v_x 表示节点, e_{xy} 表示节点 v_x 与 v_y 之间的有向边.

加入故障注入模型后, 故障注入下的时序有向图 $\mathbf{G}_{f0} = [G_{f01}, \dots, G_{f0j}, \dots, G_{f0J}]$, G_{f0j} 表示 \mathbf{G}_{f0} 中的时序向量量子图, J 是 \mathbf{G}_{f0} 中时序向量量子图的个数, 如图 7 所示.

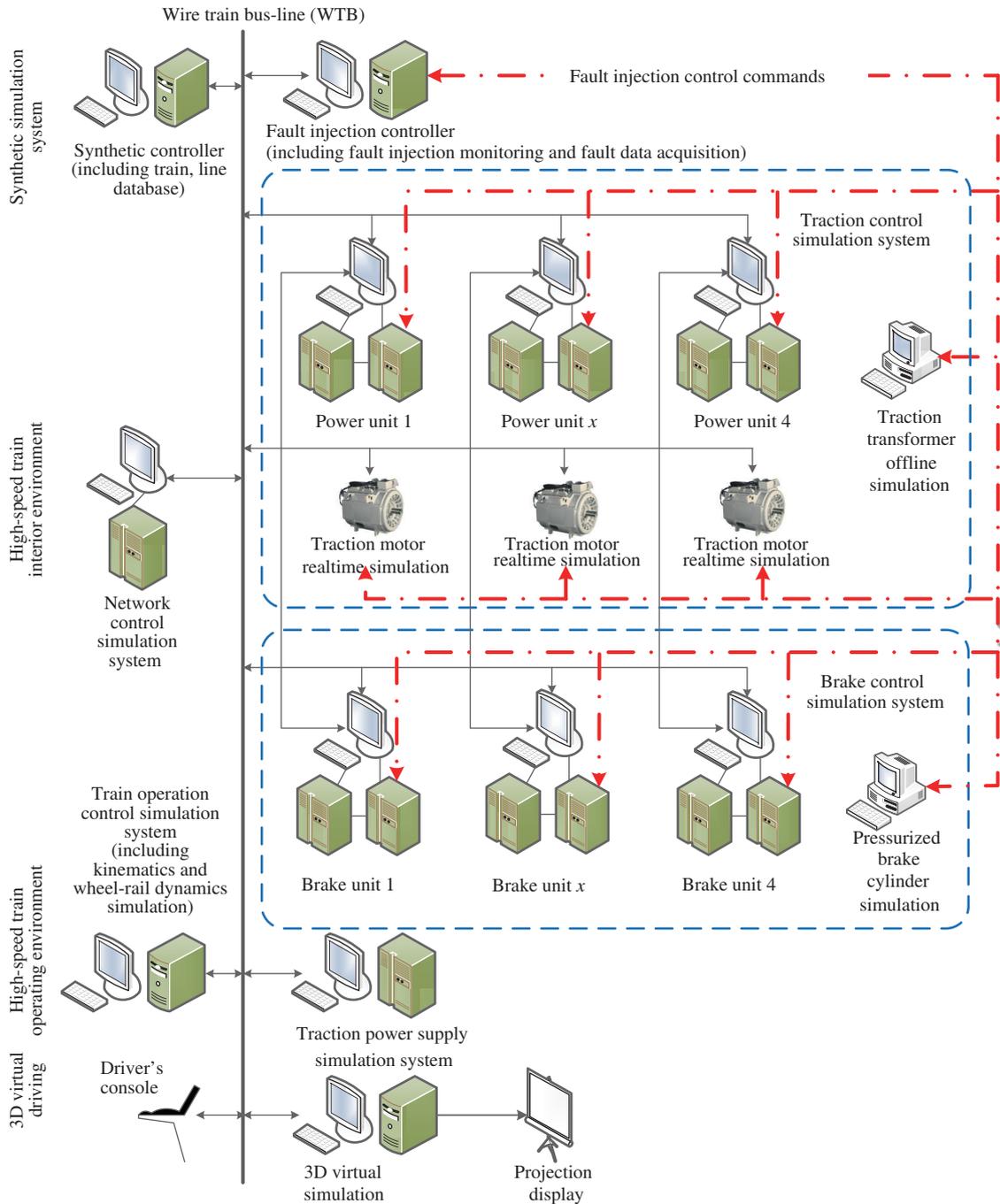


图 3 (网络版彩图) 基于故障注入的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真平台架构

Figure 3 (Color online) Fault injection-based real-time simulation platform framework of fault testing and verification for high-speed train information control system

然后, 遍历计算 G_0 与 G_{f_0} 每条时序路径的时间裕量, 分别得到 G_0 与 G_{f_0} 的时间裕量集合 SL_0 与 SL_{f_0} , 找出 SL_{f_0} 中因加入故障注入模型而导致小于 0 的时间裕量集合 SL'_{f_0} , SL'_{f_0} 是 SL_{f_0} 的子集. 最后, 针对时间裕量小于 0 的路径, 在 G_{f_0} 的时序路径中加入新的节点分割路径, 假定 v_x 和 v_y

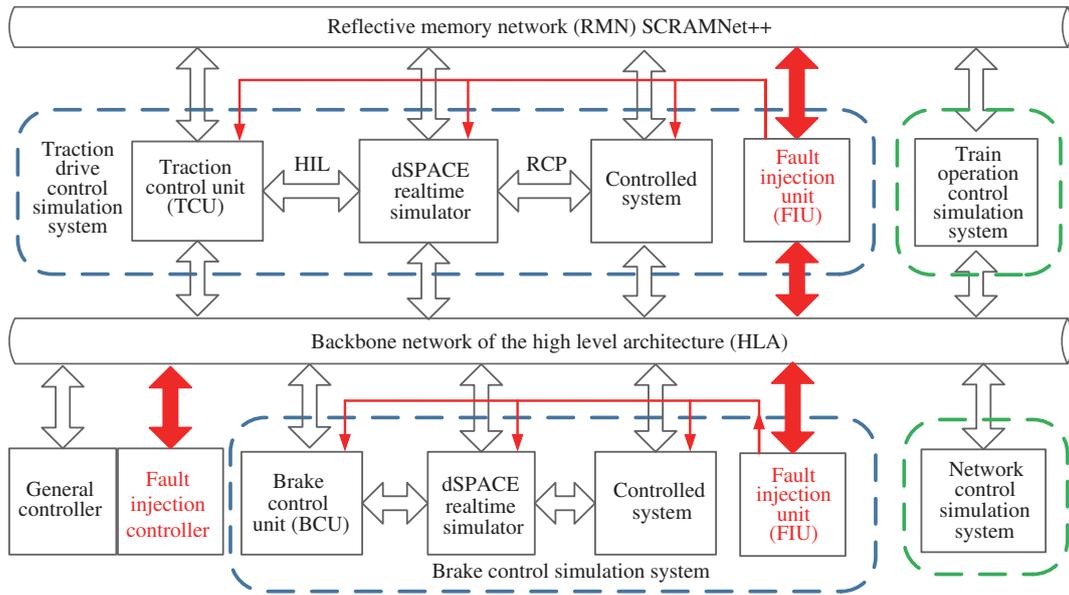


图 4 (网络版彩图) 基于 HLA-RTI 的高速列车信息控制系统故障测试与验证平台故障注入协同仿真结构示意图
 Figure 4 (Color online) HLA-RTI-based co-simulation structure of fault injection for the fault testing and verification of high-speed train information control system

是一条路径上相邻的两个节点, 且 v_x 到 v_y 的时间裕量 $\text{slack}(v_x, v_y) < 0$, 则需要在 v_x 和 v_y 之间加入新的节点 v_z 进行路径分割, 路径分割后, v_x 到 v_z 的时间裕量 $\text{slack}(v_x, v_z) > 0$, 且 v_z 到 v_y 的时间裕量 $\text{slack}(v_z, v_y) > 0$, 迭代更新计算每条时序路径的时间裕量, 直至每条路径相邻节点时间裕量大于等于 0 且小于 G_0 中的最小时间裕量, 得到路径优化后的时序有向图, 完成故障注入下的时序优化。

将模型响应/解算速度要求高的虚拟仿真对象, 如牵引变流器、牵引电机电气部分、制动缸等, 放入 FPGA 板卡中进行解算; 而将模型响应/解算速度要求较低的虚拟仿真对象, 如牵引电机机械部分、司控台、列控中心等, 放入 CPU 板卡中进行解算. 针对虚拟仿真对象机理模型中不随时间变化的参数, 使用时不变参数分离方法, 先将该类参数从机理模型中分离出来, 然后进行合并, 使用合并后的参数对机理模型进行简化, 减少 FPGA 解算资源的占用, 完成故障注入下的解算资源优化。

4.3 应用案例

使用本文所述面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障注入解决方案, 中南大学与中车株洲电力机车研究所有限公司联合研制了高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真平台, 如图 8 所示, 开发并发布了相关系列测试软件 [66], 可以实现 36 种单故障 (含 2 种微小故障)、17 种复合故障, 共计 53 种典型故障的注入与模拟. 目前, 该平台已为中车株洲电力机车研究所有限公司用于实时故障诊断算法的测试与验证研究. 基于该平台进行了高速列车信息控制系统实时故障诊断技术的测试与验证, 已发表相关研究成果 [67~69].

5 高速列车故障注入研究趋势

在“走出去”“一带一路”“中国制造 2025”等国家战略和部署的需求驱动下, 作为我国高端轨道交通装备的代表, 高速列车的智能化、数字化、集成化程度进一步提高. 这必将进一步增强高速列车信

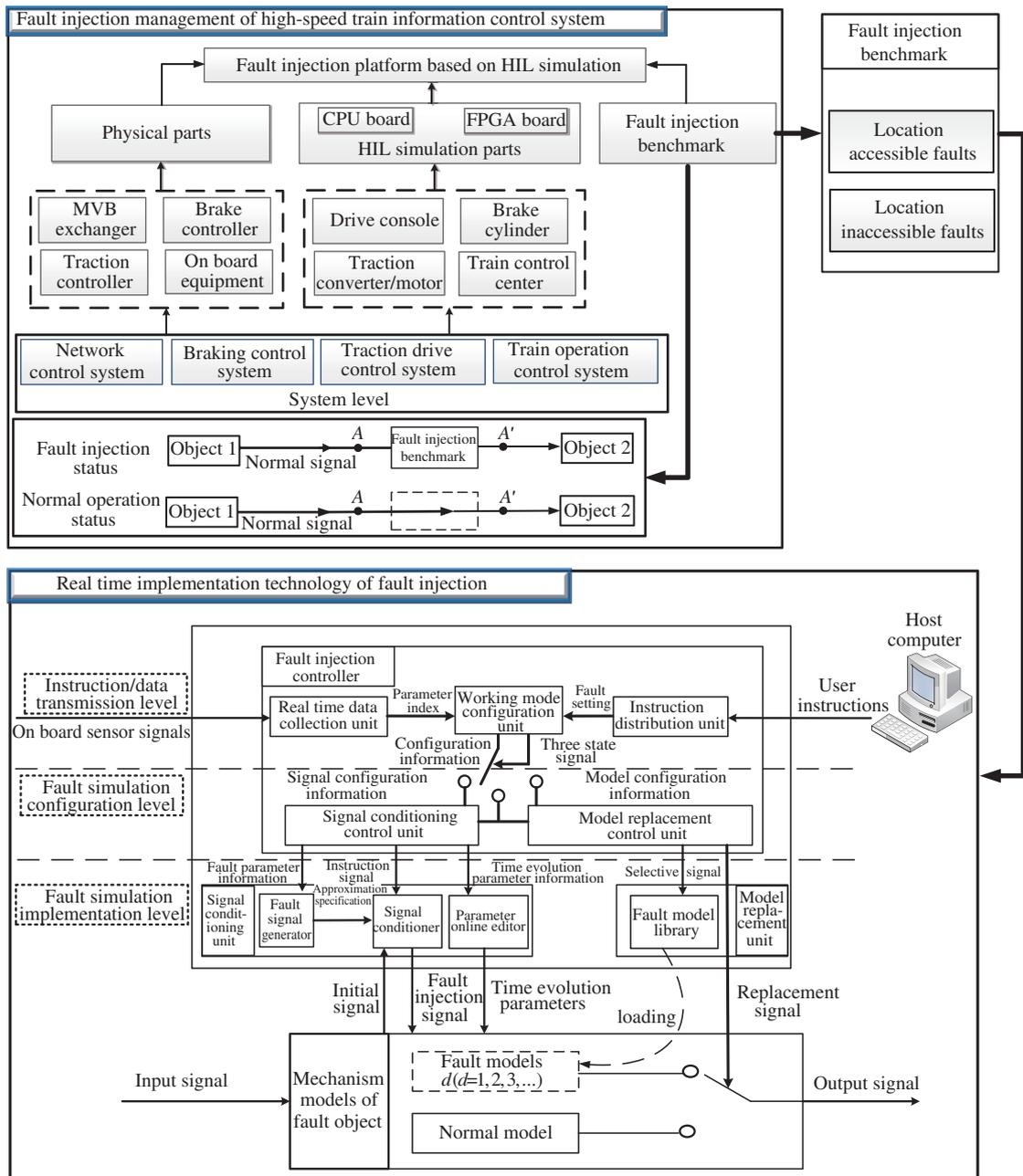


图 5 (网络版彩图) 面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障测试与验证平台故障注入架构

Figure 5 (Color online) The real-time simulation-oriented fault injection architecture for fault testing and verification platform of high-speed train information control system

息控制系统各子系统的内在联系和系统复杂性, 致使故障场景更为复杂多样. 这对实现更为安全、逼真模拟信息控制系统中复杂故障场景的故障注入提出了新的挑战. 此外, 国家“十三五”重点研发计划先进轨道交通重点专项中对时速 400 公里可变轨距高速列车的研制^[70], 必将使高速列车运营里程和运营速度迎来新一轮提升, 给高速列车信息控制系统运行的安全性提出更为严格的要求, 为故障预测、健康管理等提升系统安全性可靠性的新方法和技术的车载应用验证研究带来了机遇和挑战. 因此,

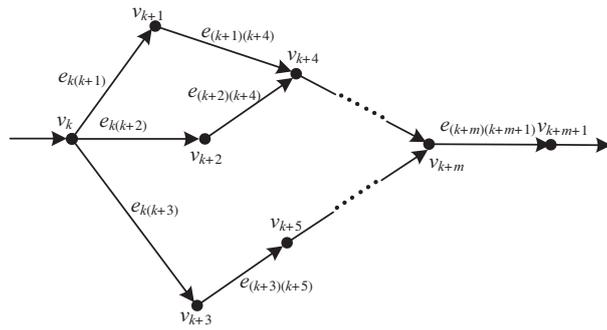


图 6 G_0 的时序向量子图

Figure 6 Sequential vector subgraph of G_0

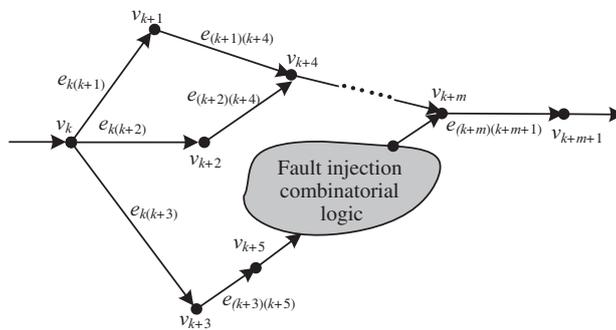


图 7 G_{f_0} 的时序向量子图

Figure 7 Sequential vector subgraph of G_{f_0}

高速列车信息控制系统故障注入的研究包括以下 3 个方面.

(1) 面向数字孪生仿真的故障注入研究. 基于仿真的故障注入凭借实验成本低、测试安全性高和故障场景覆盖面广等优势依旧是故障注入的优先研究方向之一, 其故障场景模拟的逼真水平与仿真技术手段的进步紧密相关. 目前, 仿真手段已从离线虚拟仿真, 到主流的半实物实时仿真, 并将发展到可反映实体功能、实时状态及演变趋势, 实现物理世界与信息世界交互融合的数字孪生仿真^[71]. 该仿真方式是通过数字化的手段, 将物理世界中的实体在数字世界中构建一个能真实反映其功能、状态等的数字映射系统, 借此来实现对物理实体的了解、分析和优化, 可提供更加细腻的信息和更加逼真的模拟效果. 目前, 该仿真技术已率先用于航空航天中的故障预警及维修决策问题^[72], 以及大规模城市建设中的网络安全防护问题等的研究^[73], 但对故障场景模拟的故障注入方法研究却鲜有报道. 因此, 面向数字孪生仿真开展故障注入研究必将是未来值得期待和努力的方向.

(2) 面向小样本故障运行数据的故障注入研究. 利用高速列车运行中实际产生的故障数据验证待测算法, 是车载应用验证中可信用度最高的一种方式. 高速列车信息控制系统中故障的发生具有明显的随机性、偶然性和多样性等特点; 从实际系统中采集到的系统故障运行下的数据样本十分有限, 远低于系统正常运行下可采集到的数据样本, 而有限的故障数据样本往往难以满足对待测算法进行大量测试与应用验证的要求. 目前, 故障样本量的确定和分配是测试性验证中两个热点研究内容^[74, 75], 其目的是有效减少测试性验证试验中所需的故障样本量. 然而, 现有研究主要聚焦于有效利用现有故障样本数据, 忽略了对故障样本特征的深度挖掘和故障场景的可靠增产. 因此, 如何充分、高

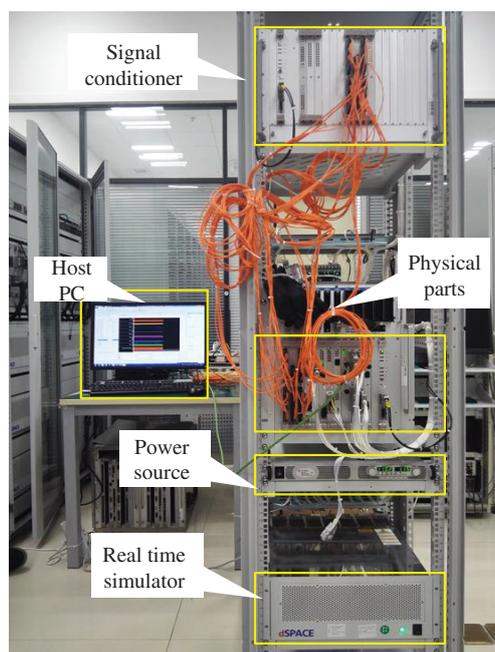


图 8 (网络版彩图) 基于故障注入的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真平台

Figure 8 (Color online) Real-time simulation platform for the fault injection-based fault testing and verification of high-speed train information control system

效地利用真实、有限的实际故障样本,生成、模拟出能逼真反映实际故障场景的大量增广型故障数据,研究面向小样本故障运行数据的故障注入方法便具有十分重要的意义。

(3) 面向健康退化过程的故障注入研究. 为满足高速列车安全监测机制由被动型转为主动型的迫切需要^[5],以系统状态监测、故障预测与健康管理等为主体的主动安全保障技术由此成为当前高速列车科技发展的趋势,国家“十三五”重点研发计划先进轨道交通重点专项已将此列为我国轨道交通需要优先发展的方向. 与故障诊断不同,故障预测与健康管理等方法和技术的研究关注系统故障发生前的监测、预警与控制,因此,对主动安全监测方法和技术的车载应用验证,就需要实现对高速列车信息控制系统健康退化过程的逼真模拟. 然而,现有系统的故障注入方法和技术主要聚焦于故障后(失效)场景的模拟,难以实现系统故障前健康退化过程的有效模拟,给高速列车主动安全监测技术的测试以及车载应用验证带来了极大困难. 关于系统故障前健康退化注入的研究,目前主要针对单个器件/部件^[76,77],对于系统级的模拟研究还处于起步阶段. 为此,如何可靠、逼真地模拟高速列车信息控制系统健康退化场景是未来故障注入研究中新兴的需求和具有挑战性的难题。

6 结束语

故障注入技术的发展与实时故障诊断等可靠性技术的发展及应用密不可分,高速列车信息控制系统故障注入面临的挑战主要源于系统本身结构及其故障场景的复杂性,以及故障诊断算法测试与验证对实时、安全、逼真地模拟系统各类故障场景的困难性。

本文系统地总结了高速列车信息控制系统故障注入方法及其实现技术的研究现状,探讨了研究面向实时仿真故障注入的意义;深入分析了面向实时仿真的高速列车信息控制系统故障注入所面临的问

题, 如故障位置不可访问、故障场景时空变迁特性复杂和系统级故障注入架构缺乏、仿真资源受限等, 进而从故障注入方法和实现技术两方面给出了若干解决方案; 目前, 基于所述方案所构建的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真平台, 已为我国高铁龙头研发单位和国内外故障诊断领域学者所使用, 用以研究和测试先进的故障诊断算法; 最后, 结合现有研究中存在的不足和用户更为复杂的故障场景安全、逼真模拟的需要, 指出高速列车信息控制系统故障注入的研究趋势。

参考文献

- 1 Miao B R, Zhang W H, Chi M R, et al. Analysis and prospect of key technical features of next generation high speed train. *J China Railway Soc*, 2019, 41: 58–70 [缪炳荣, 张卫华, 池茂儒, 等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望. *铁道学报*, 2019, 41: 58–70]
- 2 Shen R Y. Development and prospect of locomotive and rolling stock technology in China. *J Chin railway Soc*, 2019, 41: 36–42 [申瑞源. 我国机车车辆技术的发展与展望. *铁道学报*, 2019, 41: 36–42]
- 3 Lu F. Breaking through the fog-uncovering the source of China's high-speed rail technology. *Manage world*, 2019, 35: 164–194, 200 [路风. 冲破迷雾 – 揭开中国高铁技术进步之源. *管理世界*, 2019, 35: 164–194, 200]
- 4 Zheng S, Kahn M E. China's bullet trains facilitate market integration and mitigate the cost of megacity growth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 1248–1253
- 5 Qin Y, Ma H, Jia L M. Development trend of advanced rail transit system and active security technology. *China Railway*, 2015, 12: 77–81 [秦勇, 马慧, 贾利民. 先进轨道交通系统发展趋势与主动安全保障技术. *中国铁路*, 2015, 12: 77–81]
- 6 Wei L. Research on safety problems related to high speed trains. Dissertation for Ph.D. Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016 [魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究. 博士学位论文. 西安: 西南交通大学, 2016]
- 7 Xu H M, Zhang P, Guo Z. Summary of research on safety of high speed train operation under strong wind. *China Railway*, 2019, 5: 17–26 [胥红敏, 张鹏, 郭湛. 大风作用下高速列车运行安全性研究综述. *中国铁路*, 2019, 5: 17–26]
- 8 Zhou D H, Ji H Q, He X. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains. *Act Autom Sin*, 2018, 44: 1153–1164 [周东华, 纪洪泉, 何潇. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2018, 44: 1153–1164]
- 9 Feng D, Lin S, Yang Q Q, et al. Reliability evaluation for traction power supply system of high-speed railway considering relay protection. *IEEE Trans Transp Electrification*, 2019, 5: 285–298
- 10 Zhang K X. Study on EMU reliability evaluation and optimization methods of maintenance strategy. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2015 [张可新. 动车组可靠性评估及维修策略优化方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015]
- 11 Yang C, Gui W, Chen Z, et al. Voltage difference residual-based open-circuit fault diagnosis approach for three-level converters in electric traction systems. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 3012–3028
- 12 Garramiola F, Poza J, Madina P, et al. A review in fault diagnosis and health assessment for railway traction drives. *Appl Sci*, 2018, 8: 2475–2494
- 13 Garramiola F, del Olmo J, Poza J, et al. Integral sensor fault detection and isolation for railway traction drive. *Sensors*, 2018, 18: 1543–1562
- 14 Bustos A, Rubio H, Castejón C, et al. EMD-based methodology for the identification of a high-speed train running in a gear operating state. *Sensors*, 2018, 18: 793–809
- 15 Shang G W, Zhang J Z, Feng J, et al. Fault analysis method of on-board equipment of train control system based on rough set theory. *J China Railway Soc*, 2018, 40: 60–67 [上官伟, 张军政, 冯娟, 等. 基于粗糙集理论的列控车载设备故障分析方法. *铁道学报*, 2018, 40: 60–67]
- 16 Yin J T, Xie Y F, Yang C H. Fault detection of initial broken bars of traction motor rotor based on RVMD. *Control Decis*, 2018, 33: 497–502 [尹进田, 谢永芳, 阳春华. 基于 RVMD 的牵引电机转子初期断条故障监测. *控制与决策*, 2018, 33: 497–502]
- 17 Chen Z, Li X, Yang C, et al. A data-driven ground fault detection and isolation method for main circuit in railway electrical traction system. *ISA Trans*, 2019, 87: 264–271
- 18 Tao H W, Peng T, Yang C, et al. Combined diagnosis method for multi-class faults of traction rectifiers for high-speed

- trains. *Act Autom Sin*, 2019, 45: 2294–2302 [陶宏伟, 彭涛, 杨超, 等. 高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法. *自动化学报*, 2019, 45: 2294–2302]
- 19 Chen H T, Jiang B. A review of fault detection and diagnosis for the traction system in high-speed trains. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2019. doi: 10.1109/TITS.2019.2897583
 - 20 Chen H T, Jiang B, Lu N Y, et al. Deep PCA based real-time incipient fault detection and diagnosis methodology for electrical drive in high-speed trains. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 4819–4830
 - 21 Jiang B, Wu Y K, Lu N Y, et al. Overview of fault diagnosis and prediction technology for high speed train traction system. *Control Decis*, 2018, 33: 841–855 [姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述. *控制与决策*, 2018, 33: 841–855]
 - 22 Feng J, Cao J G, Wu Z H. Analysis and study of the influence on the train side harmonic as a SMES fabricated into the EMU converter system. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 1–5
 - 23 Feng J H, Wang J, Li J H. Analysis and design of comprehensive simulation platform for traction drive system of high speed train. *J China Railway Soc*, 2012, 34: 21–26 [冯江华, 王坚, 李江红. 高速列车牵引传动系统综合仿真平台的分析与设计. *铁道学报*, 2012, 34: 21–26]
 - 24 Ding R J, Gui W H, Chen G H. Semi-physical real-time simulation of AC drive system of electric locomotive. *China Railway Sci*, 2008, 29: 96–102 [丁荣军, 桂卫华, 陈高华. 电力机车交流传动系统的半实物实时仿真. *中国铁道科学*, 2008, 29: 96–102]
 - 25 Johnson B W, Smith D T, DeLong T A. A Survey of Fault Simulation, Fault Grading and Test Pattern Generation Techniques With Emphasis on the Feasibility of VHDL Based Fault Simulation. Technical Report RL-TR-97-110, Virginia University Charlottesville, 1997
 - 26 Goloubeva O, Rebaudengo M, Reorda M S, et al. *Fault Injection Techniques Software-Implemented Hardware Fault Tolerance*. New York: Springer, 2006
 - 27 Lenka R K, Padhi S, Nayak K M. Fault injection techniques—a brief review. In: *Proceedings of 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, Greater Noida, 2018. 832–837
 - 28 Kooli M, Di N G. A survey on simulation-based fault injection tools for complex systems. In: *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, Santorini, 2014. 1–6
 - 29 Barbosa R, Silva N, Duraes J, et al. Verification and validation of (real time) COTS products using fault injection techniques. In: *Proceedings of Commercial-off-the-Shelf-Based Software Systems (ICCBSS'07)*, 2007. 233–242
 - 30 Li T M. Research on optimization design and integrated evaluation of testability verification test for equipments. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 [李天梅. 装备测试性验证试验优化设计与综合评估方法研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2010]
 - 31 Zhang Y H, Yi Z H. Research of fault injection in missile fault diagnosis system. *J Projectiles Rockets Missiles Guid*, 2007, 27: 292–294 [张艳红, 易志虎. 导弹故障诊断系统中的故障注入方法研究. *弹箭与制导学报*, 2007, 27: 292–294]
 - 32 Gil-Tomas D, Gracia-Moran J, Baraza-Calvo J C, et al. Injecting intermittent faults for the dependability assessment of a fault-tolerant microcomputer system. *IEEE Trans Rel*, 2016, 65: 648–661
 - 33 Pattabiraman K, Nakka N M, Kalbarczyk Z T, et al. SymPLFIED: symbolic program-level fault injection and error detection framework. *IEEE Trans Comput*, 2013, 62: 2292–2307
 - 34 Zhang R S, Xiao L Y, Li J, et al. A fault injection platform supporting both SEU and multiple SEUs for SRAM-based FPGA. *IEEE Trans Device Mater Reliab*, 2018, 18: 599–605
 - 35 Gil-Tomas D, Gracia-Moran J, Baraza-Calvo J C, et al. Analyzing the impact of intermittent faults on microprocessors applying fault injection. *IEEE Des Test Comput*, 2012, 29: 66–73
 - 36 Kretzschmar U, Astarloa A, Jimenez J, et al. Compact and fast fault injection system for robustness measurements on SRAM-Based FPGAs. *IEEE Trans Ind Electron*, 2014, 61: 2493–2503
 - 37 Portela-Garcia M, Lopez-Ongil C, Valderas M G, et al. Fault injection in modern microprocessors using on-chip debugging infrastructures. *IEEE Trans Dependable Secure Comput*, 2011, 8: 308–314
 - 38 Cotroneo D, Lanzaro A, Natella R. Faultprog: testing the accuracy of binary-level software fault injection. *IEEE Trans Dependable Secure Comput*, 2018, 15: 40–53
 - 39 Natella R, Cotroneo D, Duraes J A, et al. On fault representativeness of software fault injection. *IEEE Trans Softw*

- Eng, 2013, 39: 80–96
- 40 Feng J Y, Chen H, Gao S, et al. Fault analysis on a new block cipher DBlock with at most two fault injections. *Chin J Electron*, 2018, 27: 1277–1282
- 41 Bareghi A, Breveglieri L, Koren I, et al. Fault injection attacks on cryptographic devices: theory, practice, and countermeasures. *Proc IEEE*, 2012, 100: 3053–3055
- 42 Lago L D, Ferrante O, Passerone R, et al. Dependability assessment of SOA-based CPS with contracts and model-based fault injection. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 360–369
- 43 Ho K I J, Leung C S, Sum J. Convergence and objective functions of some fault/noise-injection-based online learning algorithms for RBF networks. *IEEE Trans Neural Netw*, 2010, 21: 938–947
- 44 Sum J P, Leung C, Ho K I J. On-line node fault injection training algorithm for MLP networks: objective function and convergence analysis. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2012, 23: 211–222
- 45 Cai B G, Yin Q, Shangguan W, et al. Research on simulation fault injection method of train operation control system. *J China Railway Soc*, 2014, 36: 55–60 [蔡伯根, 尹青, 上官伟, 等. 列车运行控制系统仿真故障注入方法研究. *铁道学报*, 2014, 36: 55–60]
- 46 Ge X, Pu J, Gou B, et al. An open-circuit fault diagnosis approach for single-phase three-level neutral-point-clamped converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2018, 33: 2559–2570
- 47 Ji H Q, He X, Sai H S, et al. Fault detection of EMU brake cylinder. In: *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, 2016. 6668–6672
- 48 Huang Z H, Wang G G, Jiang D W, et al. Summary of high-speed test trains at home and abroad. *China Railway*, 2013, 4: 100–105 [黄振晖, 王贵国, 蒋大旺, 等. 国内外高速试验列车综述. *中国铁路*, 2013, 4: 100–105]
- 49 ALSTOM. The AGV, Alstom’s latest very high-speed train, starts test runs at 360 km/h. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2008/12/The-AGV-Alstoms-latest-very-high-speed-train-starts-test-runs-at-360-km-h-20081208>
- 50 Li H M. Study on real-time simulation system. *Ordnance Ind Autom*, 2002, 21: 56–57 [李洪敏. 实时仿真系统研究. *兵工自动化*, 2002, 21: 56–57]
- 51 Zhou Y H, Tao X, Luan L, et al. Revisiting the 7/23 train accident using computer reconstruction simulation for causation and prevention analysis. *Math Comput Simul*, 2018, 148: 1–15
- 52 Gao S, Dong H, Ning B, et al. Adaptive fault-tolerant automatic train operation using RBF neural networks. *Neural Comput Applic*, 2015, 26: 141–149
- 53 Gou B, Ge X, Wang S, et al. An open-switch fault diagnosis method for single-phase pwm rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 31: 3816–3826
- 54 Xia J, Guo Y, Dai B, et al. Sensor fault tolerant control method for electric traction PWM rectifier using sliding mode observer. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, 2016. 1–6
- 55 Yang C H, Yang C, Peng T, et al. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5719–5727
- 56 Peng T, Tao H W, Yang C H, et al. A uniform modeling method based on open-circuit faults analysis for NPC-three-level converter. *IEEE Trans Circ Syst II*, 2019, 66: 457–461
- 57 Tao H W, Peng T, Yang C, et al. Open-circuit fault analysis and modeling for power converter based on single arm model. *Electronics*, 2019, 8: 633
- 58 Peng T, Tao H W, Yang C H, et al. An open-circuit fault injection method for three-level rectifier and its fault injector. *China Patent*. ZL201611115114.6, 2016-12-07
- 59 Yang C H, Yang C, Peng T, et al. A fault injection method and its system. *China Patent*. ZL201710003376.1, 2017-01-04
- 60 Yang X Y, Yang C H, Peng T, et al. Single event transient injection method based on substitution model. *J Shanghai Inst Technol (Nat Sci)*, 2015, 15: 299–304 [杨笑悦, 阳春华, 彭涛, 等. 基于替代模型的单粒子瞬态效应注入. *上海应用技术学院学报 (自然科学版)*, 2015, 15: 299–304]
- 61 Yin J T, Xie Y F, Chen Z W, et al. Fault tracing method based on fault propagation and causality and its application in traction drive control system. *Act Autom Sin*, 2020, 46: 4757 [尹进田, 谢永芳, 陈志文, 等. 基于故障传播与因果关系的故障溯源方法及其在牵引传动控制系统中的应用. *自动化学报*, 2020, 46: 4757]

- 62 Yang C H, Yin J T, Peng T, et al. A fault tracing method and its system. China Patent. CN201811589378.4, 2018-12-25
- 63 Yang C H, Feng J H, Peng T, et al. A co-simulation method for fault scenarios of information control system in high-speed train. China Patent. ZL201510362521.6, 2017-10-13
- 64 Lei G Q. Research on parallel algorithm and architecture of graph computing based on FPGA. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 [雷国庆. 基于 FPGA 的图计算并行算法和体系结构研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2015]
- 65 Yang X, Yang C, Peng T, et al. Hardware-in-the-loop fault injection for traction control system. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2018, 6: 696–706
- 66 Central South University. Fault test software for high-speed train information control system Version 1.0. China Software Copyright. 2019SR1086965, 2019-10-28
- 67 Chen H T, Jiang B, Chen W, et al. Data-driven detection and diagnosis of incipient faults in electrical drives of high-speed trains. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 4716–4725
- 68 Chen Z W, Ding S X, Peng T, et al. Fault detection for non-Gaussian processes using generalized canonical correlation analysis and randomized algorithms. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 1559–1567
- 69 Zhang K K, Jiang B, Yan X G, et al. Interval sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to a traction device in china railway high-speed. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 2585–2597
- 70 中华人民共和国科学技术部. 先进轨道交通重点专项 2016 年度时速 400 公里及以上高速客运装备关键技术项目公开任务申报指南. http://www.most.gov.cn/tztg/201605/t20160513_125543.htm
- 71 Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Ann*, 2017, 66: 141–144
- 72 Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *Int J Aerospace Eng*, 2011, 2011: 1–14
- 73 Li X, Liu X, Wan X X. Overview of digital twins application and safe development. *J Syst Simul*, 2019, 31: 385–392 [李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述. *系统仿真学报*, 2019, 31: 385–392]
- 74 Zhao X Y, Wang K, Qin L, et al. Sequential design scheme of testability verification based on simulation data. *J Nav Aeronaut and Astronaut Univ*, 2019, 34: 146–168 [赵学远, 王康, 秦亮, 等. 基于仿真数据的测试性验证程序贯设计方方案. *海军航空工程学院学报*, 2019, 34: 146–168]
- 75 Chen R, Lian G Y, Zhang X S, et al. Methods of experiment sample size determination based on fault injection experiment. *Comput Meas Control*, 2015, 23: 3994–3997 [陈然, 连光耀, 张西山, 等. 基于故障注入的测试性验证试验样本量确定方法. *计算机测量与控制*, 2015, 23: 3994–3997]
- 76 Oliveira R P B, Loschi R H, Freitas M A. Skew-heavy-tailed degradation models: an application to train wheel degradation. *IEEE Trans Rel*, 2018, 67: 129–141
- 77 Wang H, Liserre M, Blaabjerg F, et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2014, 2: 97–114

Review of recent research on fault injection for high-speed train information control systems

Chao YANG^{1,2}, Tao PENG^{1,2*}, Hongwei TAO^{1,2}, Chunhua YANG^{1,2} & Weihua GUI¹

1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring of Rail Transit, Central South University, Changsha 410083, China

* Corresponding author. E-mail: pandtao@csu.edu.cn

Abstract The high-speed train information control system (HST-ICS) is one of the key systems to ensure a train's overall safety and one of the main fault sources in high-speed trains. Real-time fault diagnosis is an effective solution for improving the system operation's reliability and safety. To verify whether it meets the requirements of the train's on-board applications, fault injection is an important way to realize safe and realistic simulations of various fault scenarios. The HST-ICS structure is complex, and its fault scenarios present a variety of complex features, such as an inaccessible fault location, temporal and spatial transition characteristics, lack of system-level fault injection architecture, and simulation resource constraints. These scenarios make effective fault injection challenging. First, this paper reviews the state-of-the-art fault injection and discusses the significance of real-time simulation-oriented fault injection (RTS-FI). Then, the challenges of RTS-FI for HST-ICS are analyzed further, and some solutions are provided. Finally, future research regarding fault injection for HST-ICS is discussed.

Keywords fault injection, real-time simulation, fault diagnosis, high-speed train, information control system



Chao YANG was born in 1991. He received an M.E. degree in control engineering from Central South University, Changsha, in 2017. Currently, he is working toward a Ph.D. degree from Central South University. His research interests include fault injection and test, fault modeling, and fault diagnosis.



Tao PENG was born in 1965. She received a Ph.D. degree from Central South University, Changsha, in 2005. Currently, she is a full professor at Central South University. Her research interests include fault detection and diagnosis of complex automation control systems.



Hongwei TAO was born in 1990. He received an M.E. degree in electrical engineering from Central South University, Changsha, in 2018. Currently, he is working toward a Ph.D. degree from Central South University. His research interests include fault modeling and fault diagnosis.



Chunhua YANG was born in 1965. She received a Ph.D. degree from Central South University, Changsha, in 2002. Currently, she is a full professor at Central South University. Her research interests include monitoring and diagnosing complex industrial processes and intelligent automation control systems.