

高速列车牵引传动系统故障测试与验证仿真平台研究

杨超^{1,2} 彭涛^{1,2} 阳春华^{1,2} 陈志文^{1,2} 桂卫华¹

摘 要 牵引传动系统作为高速列车能量传递与转换的核心部分,是保障高铁安全稳定运行的关键系统之一。故障测试与验证平台是确保实时故障诊断技术在高速列车上有效应用的重要手段和途径。围绕高速列车牵引传动系统故障测试与验证平台中面临的挑战性问题 and 关键技术,本文从故障注入、仿真可信度评估、算法性能评估和仿真平台实现等方法和技术方面进行分析,并针对上述难题概述了一些解决方案,提出并构建了一种集高速列车实时仿真、故障运行行为逼真模拟以及随机故障测试和故障诊断算法评估于一体的牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台。最后,总结展望了高速列车安全监测验证平台未来研究方向。

关键词 故障测试, 验证平台, 故障注入, 测试评估, 高速列车牵引传动系统

引用格式 杨超, 彭涛, 阳春华, 陈志文, 桂卫华. 高速列车牵引传动系统故障测试与验证仿真平台研究. 自动化学报, 2019, 45(12): 2218–2232

DOI 10.16383/j.aas.c190395

Fault Testing and Validation Simulation Platform for Traction Drive System of High-speed Trains

YANG Chao^{1,2} PENG Tao^{1,2} YANG Chun-Hua^{1,2} CHEN Zhi-Wen^{1,2} GUI Wei-Hua¹

Abstract As the power system of high-speed train, the traction drive system is one of the key systems to guarantee the safe and stable operation for high-speed train. Fault testing and verification platform is an important way to ensure the effective application of real-time fault diagnosis methods on high-speed trains. Focusing on the challenging issues in the fault testing and verification platform of the traction drive system of high-speed train, this paper analyzes the methods and technologies of fault injection, simulation reliability evaluation, algorithm performance evaluation and simulation platform implementation, and summarizes some solutions to the above problems. Moreover, this paper further proposes and builds a fault testing verification platform for high-speed train traction drive system, which integrates real-time simulation of high-speed train, realistic simulation for fault scenarios, random fault testing and fault diagnosis algorithm evaluation. Finally, the future research direction of the safety monitoring and verification platform for high-speed trains is summarized and prospected.

Key words Fault testing, validation platform, fault injection, testing evaluation, traction drive system of high-speed trains

Citation Yang Chao, Peng Tao, Yang Chun-Hua, Chen Zhi-Wen, Gui Wei-Hua. Fault testing and validation simulation platform for traction drive system of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2218–2232

高速列车的安全运行是高铁运行与发展的首要

收稿日期 2019-05-20 录用日期 2019-09-20

Manuscript received May 20, 2019; accepted September 20, 2019

国家自然科学基金 (61490702, 61773407, 61621062, 61803390), 轨道交通节能控制与安全监测湖南省重点实验室 (2017TP1002), 湖南省研究生科研创新项目 (CX2018B041) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61490702, 61773407, 61621062, 61803390), Key Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring for Rail Transportation (2017TP1002), and Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX2018B041)

本文责任编辑 董海荣

Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 中南大学自动化学院 长沙 410083 2. 轨道交通节能控制与安全监测湖南省重点实验室 长沙 410083

1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083 2. Hunan Provincial Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring for Rail Transportation, Changsha 410083

问题^[1-2], 关乎国计民生, 牵动全国人民的心。经过对国外高铁技术的引进、吸收和自主创新, 我国已经掌握了高铁的核心技术, 从 2007 年时速 200 公里和谐号动车组的首发, 到 2017 年自主研发的时速 400 公里复兴号动车组的发布, 已形成了具有中国特色的高铁技术体系, 总体技术水平进入世界先进行列^[3-4]。预计到 2020 年^[5], 高铁运营里程将达到 3 万公里。伴随着提速和运行里程提升, 高速列车面临着更加复杂甚至恶劣的运行环境, 长期运行更是给列车上器件部件设备等的服役性能带来严峻考验, 给高铁安全运行带来严重的安全隐患。

牵引传动系统作为高速列车能量传递与转换的核心部分, 有着高速列车“心脏”之称, 既是高速列

车安全运行的关键系统之一,也是高速列车高发故障的主要来源之一^[6],一旦牵引传动系统的任何故障或安全隐患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,导致列车被迫停车,甚至给生命和财产安全带来损失^[7].为保障高速列车的安全运行,国内外学者针对牵引传动系统的故障诊断等可靠性方法和技术展开了广泛的研究^[8-13].2015年和2018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”和“高速铁路运行控制与动态调度一体化基础理论与关键技术”,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,就高速列车实时故障诊断等问题开展了深入的研究^[14-15].国外的研究^[16-17]主要受法国阿尔斯通、西班牙CAF、德国西门子、日本川崎、加拿大庞巴迪等世界知名高铁公司主导和资助.

验证平台是相关理论与技术研究不可或缺的重要手段.为确保真实运营车运行的安全可靠,同时降低研发成本、缩短研制周期和车上调试时间、减少验证时间,所有车载技术在投入运行使用之前,都必须通过实验室的仿真实验、测试与试验验证和评估^[18-20].与在正常运行场景下的验证平台的区别在于,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.对规模庞大、结构复杂系统的故障模拟,因涉及故障类型繁多、系统故障演变机理或变迁症状表现复杂,而具有危害性和风险性,因而无法仅仅通过简单地设置故障注入环节实现.

故障测试最早起源于航空航天和武器装备领域^[21],并贯穿其整个设计和研发过程.通过大胆假设和大量测试系统中所有可能的故障情况,对待测对象进行全面的性能测试和评价,为待测对象可靠性设计和性能优化等的抉择提供依据,降低故障发生风险,确保圆满完成任务.因此,故障测试与验证平台已成为促进可靠性理论投入实际应用的孵化器和加速器.然而,一方面国内尚未对高速列车故障测试与验证平台开展系统而深入的研究;另一方面,高铁运行面临着愈发复杂的运行条件,且伴随世界高速列车科技的发展和竞争,许多可用于提升高铁运行安全的新方法和新技术亟需通过测试验证实现车载应用.因此,开展构建面向高速列车牵引传动系统故障测试与验证平台的研究,对提升高速列车牵引传动系统乃至整车的安全运行水平具有重要意义.

为此,本文首先概述了高速列车牵引传动系统故障测试与验证平台构建中面临的挑战性问题 and 关键技术.然后,对故障注入、仿真可信度评估、算法

性能评估、故障测试验证实时仿真平台实现等方法和技术进行综述.在此基础上,针对上述难题概述了一些解决方案,提出并构建一种集高速列车实时仿真、故障运行行为逼真模拟、随机故障测试和故障诊断算法评估于一体的牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台.最后,总结并展望了高速列车安全监测验证平台未来研究方向.

1 现状与挑战

1.1 故障测试与验证平台的研究现状

故障测试与验证平台主要有实物、虚拟和半实物等三种实现方式,本文从实验成本、测试数据的可信度/有效性、模拟故障存在的危险性、测试周期和平台实现的难易度等五方面对三种实现方式进行了对比,如表1所示.

表1 平台实现方式的对比
Table 1 Comparison of platform implementation schemes

实现方式	实验成本	测试数据可信度	模拟故障危险性	测试周期	平台实现难易
实物	高	高	高	慢	难
虚拟	低	低	低	中	易
半实物	中	中	中	快	中

实物平台是最接近真实待测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.受制造成本、测试周期、运行条件等的限制,高速列车实物平台大多存在于各国高速列车制造商和国家级高速列车的科研机构^[22-23],主要用于列车正常运行场景下待测设备、装置的功能性测试和试验.近年来,我国高铁企业与高校合作尝试了实物平台测试工作,清华大学周东华教授团队^[24]在中国中车青岛四方所搭建的1:1高速列车制动系统上开展了故障诊断算法的研究,通过加装零部件等方式,实现了制动缸气体泄漏故障、部件性能退化、传感器故障等的故障场景模拟.其中,泄漏故障的注入/模拟是通过手动改变所加装气压阀的方式实现,因此难以实现故障不同严重程度的精准注入/模拟,且存在一定的实验安全隐患.

虚拟仿真平台大多以模拟、仿真、验证正常运行行为以及“故障导向安全”机制下的故障-停车行为为主要目标.文献^[25]搭建了面向顶层设计的CRH2型高速列车牵引系统虚拟仿真平台,用于对动车组行车时间、最大运行速度和节能等问题的优

化设计研究;文献[26]在所搭建的CRH6型高速列车虚拟平台上进行了谐波抑制方法的研究;文献[27]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[28]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.由于不具备实时仿真机制,上述虚拟仿真平台无法对算法进行实时调试和验证,仅适合对算法实时性要求不高的场合和实时性要求高的算法设计阶段.

半实物仿真平台兼具实物和虚拟仿真平台优点,克服了两者的不足,近年来备受关注.半实物仿真平台主要由实物部分和实时仿真部分组成,依据实时仿真部分的仿真对象可分为快速控制原型(Rapid control prototyping, RCP)与硬件在回路仿真(Hardware in the loop, HIL)两种方式.其中,HIL中实物部分为实际控制器,实时仿真部分的仿真对象为被控系统,仿真时钟与实际控制器时钟完全一致.在得到与实物实验等同效果的同时,HIL缩短了开发周期,节约测试成本,实验过程更加安全,具有重复性和可控性,因此,相比实物与RCP仿真方式,HIL仿真更适用于实时故障诊断技术的研究与开发工作^[29].文献[30]搭建了CRH3型高速列车牵引传动系统半实物仿真平台,用于所提低频抑制算法的验证;文献[31]搭建了基于HIL的某型高速列车牵引传动系统半实物仿真平台,用于验证网侧整流器谐波抑制方法;文献[32]提出一种基于高层体系结构-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架构,并基于架构搭建了涵盖CRH2型高速列车的牵引传动系统、制动控制系统和网络控制系统等的半实物仿真平台.这些高速列车牵引传动系统半实物仿真平台主要集中于系统正常运行的模拟和控制算法等的验证,无法直接用于故障场景的模拟.近年来,一些高速列车牵引传动系统半实物仿真平台,通过基于仿真的方式,可模拟仿真某些子系统内或功能模块内的异常工况,文献[8]实现了单相三电平牵引整流器开路故障模拟,文献[33]对牵引变流器中网侧电流器和直流电压传感器的开路、增益和噪声故障进行了模拟.然而,通过这些简单增设故障注入环节的办法,一方面,难以用来构建故障类型繁多、故障场景复杂的系统级故障注入/测试平台,另一方面,无法对整车各子系统运行状况的时空影响进行模拟.

上述具备故障模拟功能的高速列车验证平台对比情况如表2所示.基于实物、虚拟和半实物的

速列车验证平台,一方面缺乏对故障注入/测试机制和技术系统、深入的研究,在故障测试过程中对注入故障严重程度的可控性、故障类型的覆盖面、故障测试的实时性等方面存在各自不足.另一方面,也难以通过简单设置故障注入环节或增加故障测试功能来实现故障运行行为发生、演变及传播等场景的安全、可靠、逼真地模拟.进而,导致现有验证平台难以满足高速列车相关安全可靠技术与车载应用过程中对实时故障测试、诊断算法验证和评估的紧迫需求.

表2 现有具备故障模拟功能的高速列车验证平台对比
Table 2 Comparison of the existing high-speed train verification platform with fault simulation injection

实现方式	可控性	故障场景的覆盖面	实时性
实物	手动为主,可控性差	硬件故障为主	满足算法实时性测试
虚拟	自动操作,可控性高	故障类型限制小	不满足算法实时性测试
半实物	自动操作,可控性高	个别元部件、简单故障,难以模拟复杂故障场景	基本满足算法实时性测试

相比于近些年才突飞猛进、备受关注的我国高速列车领域及其安全运行问题研究,由于执行任务所处环境的特殊性和极端性,航空航天和武器装备对于装备及其元部件安全测试方面的研究起步较早,发展至今已较为成熟,特别是测试性验证,已贯穿于设备研制、定型和使用等在内的全生命周期.在航天航空领域,文献[34]提出了一种内置测试(Built-in tests, BIT)设计方法,用于飞机舱内空气环境控制系统的维护测试;文献[35]提出了一种航空发动机的故障诊断及其故障测试方法,解决了某型航空发动机研制阶段的可靠性设计中存在的问题;文献[36]对航天发射系统运行安全评估研究进行了综述;文献[37]详细介绍了著名的Charles Stark Draper实验室为载人航天器所设计的一种面向故障容错飞行计算机系统(Fault tolerant flight computer system, FTCS)的测试体系结构,并采用廉价、现成的硬件搭建相应的测试系统;文献[38]详细介绍了某轻型运输机航空电子装置设计阶段所进行的功能性、互操作性、干扰性和兼容性等的测试,及该测试系统在集成和测试中遇到问题和解决方案.在武器装备领域,文献[39]采用基于模糊理论的存储可靠性测试仿真方法对某型导弹控制仪表存储单元的可靠性进行了故障测试分析;在对国内武器装备测试性设计现状进行分析的基础上,文献[40]提出了一套适应于国内武器装备现状的测试性设计、验证方法;文献[41]从实物和非实物验证两个方面综述了国内外现有测试性验证技术的标准规

范, 并对发展趋势做了展望; 文献 [21] 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故障注入与综合评估系统; 文献 [42] 开发了基于 CPCI (Computer PCI) 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。

高速列车牵引传动系统中元部件的故障机理及其症状演变形式与航天航空和武器装备中的存在明显不同 [6, 41-42], 致使上述针对航天航空和武器装备故障测试与验证的研究成果无法直接应用于高速列车牵引传动系统故障测试与验证平台的研制中。

1.2 高速列车牵引传动系统故障测试与验证平台面临的挑战

我国高速列车牵引传动系统目前均采用动力分散式交流传动系统, 一般由受电弓、牵引变压器、牵引变流器 (四象限整流器、中间直流环节、逆变器)、牵引电机和牵引控制单元 (Traction control unit, TCU) 等部件组成, 如图 1 所示。结合故障测试与验证平台相关研究现状的分析, 高速列车故障测试与验证实时仿真平台的构建主要面临着面向实时仿真的故障测试/注入、以及故障注入模式下评估机制和故障测试验证平台的实时仿真实现等的挑战。

1.2.1 面向实时仿真的故障注入

故障注入是 20 世纪 70 年代提出的一种可靠性评测技术, 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技术研究领域的一个热点 [43]。故障注入方式主要可分为基于硬件、基于软件和基于仿真的故障注入方式 [44-46]。基于硬件的故障注入更接近于系统运行现场中发生的真实故障, 故障传播性好, 但由于系统高度集成、结构复杂且封装严密等特点, 进行故障测试时不可能开封分解测试, 导致许多硬件故障注入无法进行; 基于软件的故障注入廉价且易于控制, 但通过软件

完成的故障注入主要局限于软件有关的部分; 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, 因而受到更多的关注, 但模型开发耗时, 故障可信度依赖于模型的准确性。与此同时, 基于仿真的故障注入在解决具有子系统强关联特点的复杂系统故障传播、故障位置无法访问等问题时面临较大挑战。

1) 面向实时仿真的故障注入系统架构。高速列车由牵引传动系统、制动控制系统、网络控制系统等多个子系统组成, 列车运行时各子系统间运行状态相互关联且相互影响。如牵引传动系统中的牵引电机发生故障, 不仅会造成高速列车动力性能的降低, 也将对制动控制系统的正常运行造成影响, 使其制动效果变差。因此, 某一子系统发生故障不仅会造成本系统的运行状态异常, 也将通过各子系统间存在的某种关联关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, 现有基于仿真的高速列车验证平台 [47] 一般不具备对各种异常或故障的发生、演变及其对整车各子系统运行状况的时空影响的模拟功能, 且难以仅仅通过简单地设置故障注入环节或增加故障测试功能来构建规模庞大、结构复杂的故障测试验证平台。

2) 故障症状变迁机理复杂和故障位置不可访问的故障场景模拟/注入。在半实物仿真环境下, 牵引传动系统已知的可能发生的故障场景分为故障位置可访问和故障位置不可访问两类。

故障位置可访问的故障场景, 主要是指半实物仿真中实时仿真器的仿真对象。对仿真对象进行故障注入时, 可以最大限度地利用研制过程中各种分析、仿真和试验所获得的故障监测与隔离的相关数据和依据, 可以分层、分解和任意组合的方式进行测试/注入, 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。

然而, 高速列车牵引传动系统包含大量元部件,

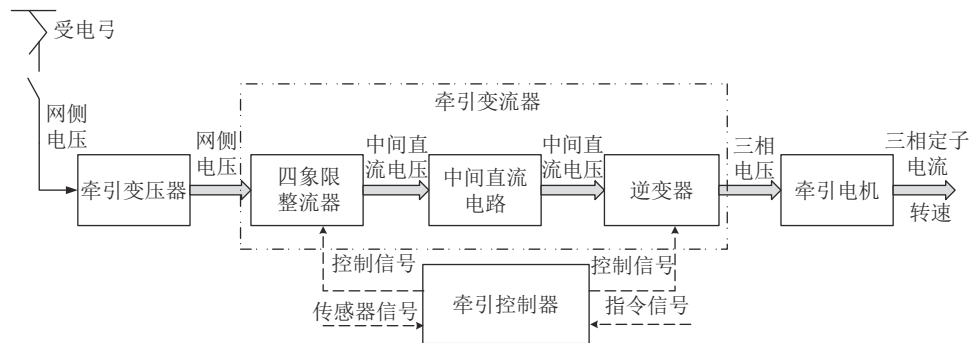


图 1 牵引传动系统示意图

Fig. 1 Diagram of traction drive system

故障种类多、原因多,使得故障机理及症状演变十分复杂,如图2所示,牵引传动系统结构自下而上分为元件级、器件级、部件级和子系统级4层.其中,牵引传动系统中绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)在高温下会加速老化,可能逐渐失效,造成其性能发生症状变化,这种变化具有时间上的演变特性;当IGBT失效烧损后,其所造成的故障可能沿信号流方向在同层或邻近层进行传递,也可能自底向上逐级传递到器件级、部件级、子系统级乃至系统级,这种变化既有时间上的演变,又有空间上的迁移,即具有时空上的变迁特性.

这些故障症状演变特性使高速列车牵引传动系统故障发生、发展、演变的逻辑关系十分复杂.传统的故障注入方法^[48]难以解决高速列车牵引传动系统在时空上具有关联和因果关系的运行故障症状变迁的模拟问题,也难以直接应用于面向半实物仿真的高速列车牵引传动系统故障测试验证平台之中.

故障位置不可访问的故障场景,主要是指无法通过对待测对象进行开封、分解等方式实现故障注入的故障场景,如基于HIL半实物仿真平台中实物部分的实际控制器.由于此类待测对象内部元部件高度模块化以及插件化封装,在进行测试时,将面临由于模块化/插件化封装的元部件无法开封或分解注入等情况所带来的位置不可访问问题,致使故障注入不可执行^[21].

1.2.2 故障注入模式下的仿真可信度评估

仿真可信度是仿真系统性能评估中最重要的指标,仿真可信度能否达到要求,直接关系到仿真系

统应用的成败.人们在仿真技术发展的初期就注意到了不同仿真模型可信度的问题^[49],1962年BiggS和Cwathorne对“警犬(Bloodhound)”导弹系统仿真进行的全面评估,标志着可信度评估工作的萌芽.进入90年代后,仿真可信度评估问题才引起普遍关注,逐渐成为系统仿真研究领域的热点问题^[50].源于相似理论思想的基于效用函数同度量化方法,是仿真可信度评估领域中一种有效的基层指标量化方法,文献^[51–53]分别针对某型特种车辆、大型飞行器信息系统以及航电火控系统仿真对象,提出了基于相似理论的效用函数可信度指标同度量化方法.

高速列车牵引传动系统运行故障因具有异质、异构、多维度、多层次特点的症状变迁特性,给进行故障注入的结果可信度评估带来诸多困难.一方面高速列车仿真可信度评估的相关研究较少;另一方面,上述同度量化都是针对一维或平面仿真数据的可信度指标,面向异质异构多维可信度指标的同度量化方法尚未见报道.因而,现有仿真可信度评估方法^[53–54]也无法有效解决高速列车牵引传动系统中具有时空关联和因果特性的故障症状变迁仿真的可信度评估问题,且无法满足实时故障仿真与验证的要求.

此外,各种评估方法的量纲、属性、规则不同,如何将各种定量、定性的指标转化为综合性的定量变量,以及相似性、等效性原理应用于故障位置不可访问的故障测试/注入所带来的可信度群体评估结果非一致性困扰等问题,都会导致评估结果出现失真、决策行为出现偏误.

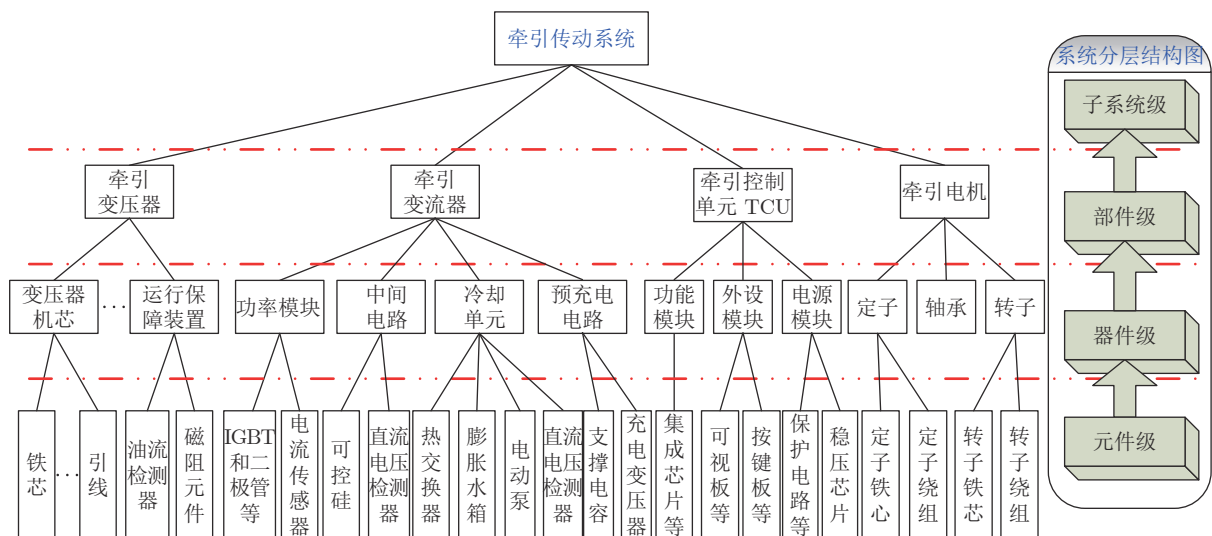


图2 高速列车牵引传动系统分层示意图

Fig. 2 Hierarchy of traction drive systems of high-speed train

1.2.3 待测算法性能评估

待测算法的性能评估结果能否达到要求, 直接影响其能否投入到实际车载应用. 算法性能评估分为定性和定量方法. 定性评估强调观察、分析、归纳与描述, 但评价结果模糊笼统, 弹性较大, 难以精确把握, 主要适用于定量指标难以描述等原因造成难以对不同算法之间性能进行合理比较的场合. 文献 [55] 在针对牵引变流器开路故障诊断性能评估时, 采用了鲁棒性、成本、实现难易等进行定性比较, 从而体现各诊断算法的优越性; 文献 [56] 在针对牵引变流器开路故障建模方法, 采用精细化程度、实时性和可移植性等评估指标与其他建模方法进行了定性比较.

定量评估依据统计数据, 建立并应用数学模型计算出待测算法的各项指标值来评估分析, 评估结果较为合理和科学, 且能使性能差异直观明确化, 因而被广泛采用. 针对牵引传动系统接地故障诊断, 文献 [12] 采用故障检测率、故障检测延迟、故障隔离率等指标对所提方法进行了验证和性能评估; 文献 [57] 采用故障检测率、故障虚警率和检测延迟三个指标对所提牵引传动系统传感器故障检测方法进行了测试和评估; 文献 [58–59] 采用故障漏检率、虚警率、诊断正确率和检测延迟等指标评估了所提牵引传动系统微小故障诊断方法的性能.

然而, 目前针对高速列车故障诊断算法的性能评估并没有较为统一的规范或行业标准, 学术界更加看重算法的鲁棒性和时效性, 而产业界更为看重的是算法可用性、安全性等指标^[60]. 性能评估指标中的侧重差异, 致使许多先进故障诊断算法在工程应用中受限. 因此, 建立规范和实用的故障诊断算法的性能评估指标, 对于加速相关算法车载应用尤为重要.

1.2.4 故障测试验证实时仿真平台的实现技术

由表 1 可知, 相比实物和虚拟验证平台, 半实物仿真平台在确保所构建故障测试验证平台具备低测试成本、高安全性和高准确性的要求下具有明显的优势. 为了保证半实物平台实时性的需要, 实时仿真部分中仿真对象需要采用高性能处理芯片快速解算实时仿真模型.

实时仿真器作为半实物仿真技术中最重要的部分, 最初主要分为数字信号处理器 (Digital signal processor, DSP)、精简指令集计算机和复杂指令集系统计算机^[61–63] 等三种实现方式. 世界上第一台商用实时数字仿真器于 1991 年正式面世, 该实时仿真器采用 DSP 为实时仿真处理器^[64]. 随着仿真模型的规模增大, 控制器输出频率的增高, 仅仅通过 DSP 或者通用计算机的计算能力, 已经无法满足实

时仿真的需要. 为此, 德国 dSPACE 等实时仿真器制造商开始采用现场可编程门阵列 (Field programmable gate array, FPGA) 作为实时仿真处理器的硬件架构^[65]. 然而, 随着系统复杂程度增加, FPGA 芯片资源的优化分配和硬件成本成为构建系统半实物平台的主要矛盾, 文献 [66] 针对电力系统中的传输线、非线性元器件等, 进行了实时仿真, 但占用大量 FPGA 逻辑运算资源与接口资源. 文献 [67] 采用了 DSP+FPGA 双芯片处理器结构, 构建了模块化多电平变流器的实时仿真平台, 这种结构一定程度上减轻了 FPGA 的解算负担, 但是需要对各个处理器之间的接口延迟与仿真时序进行合理规划.

如表 3 所示, 与 DSP 芯片相比, FPGA 芯片在以牺牲硬件资源换取纳秒级运算速度的同时, 也带来了特有的硬件资源和时序资源约束, 对实时仿真部分中仿真对象的建模提出了更苛刻的要求, 特别是在故障注入模式下, 故障注入模型的加入将更加凸显硬件资源和时序资源的分配矛盾, 导致有限硬件资源下的时序错误. 若不能正确地处理, 将无法完成模型实时解算的任务, 进而限制可模拟的故障模式或场景. 因此, 在故障注入模式下解决半实物仿真环境中实时仿真资源优化分配的问题是构建验证平台的难点所在.

表 3 实时仿真器不同处理器芯片的对比

Table 3 Comparison of different processor chips in real-time simulator

芯片	运算方式	运算频率	平均耗时范围	运算负载影响	单价	不足
DSP	串行	GHz	毫秒-微秒级	大	低	模型平均解算速度慢, 且与模型解算规模成反比
FPGA	并行	MHz	纳秒级	小	高	资源有限, 时序受约束

2 牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台

2.1 牵引传动系统故障测试与验证

2.1.1 基于 HLA-RTI 仿真的高速列车故障注入系统架构

针对牵引传动系统故障及其症状在其他子系统中变迁影响模拟的问题, 文献 [68] 首先公开了以牵引传动系统为核心的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真的系统架构, 如图 3 所示, 建立了系统级故障注入/模拟模式下故障测试验证平台的实时仿真 (试验) 机制, 可实现故障在各子系统间变迁影响的模拟.

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半实物仿真平台的 HLA-RTI 和反射内存网的混合网络系统架构, 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, 并将故障注入控制接入主干网 HLA 与反射内存网, 达到对系统各层级进行故障注入的分布式控制目的, 进而实现对包括牵引传动系统在内的各个子系统故障演变以及故障变迁过程时空特性的模拟与仿真.

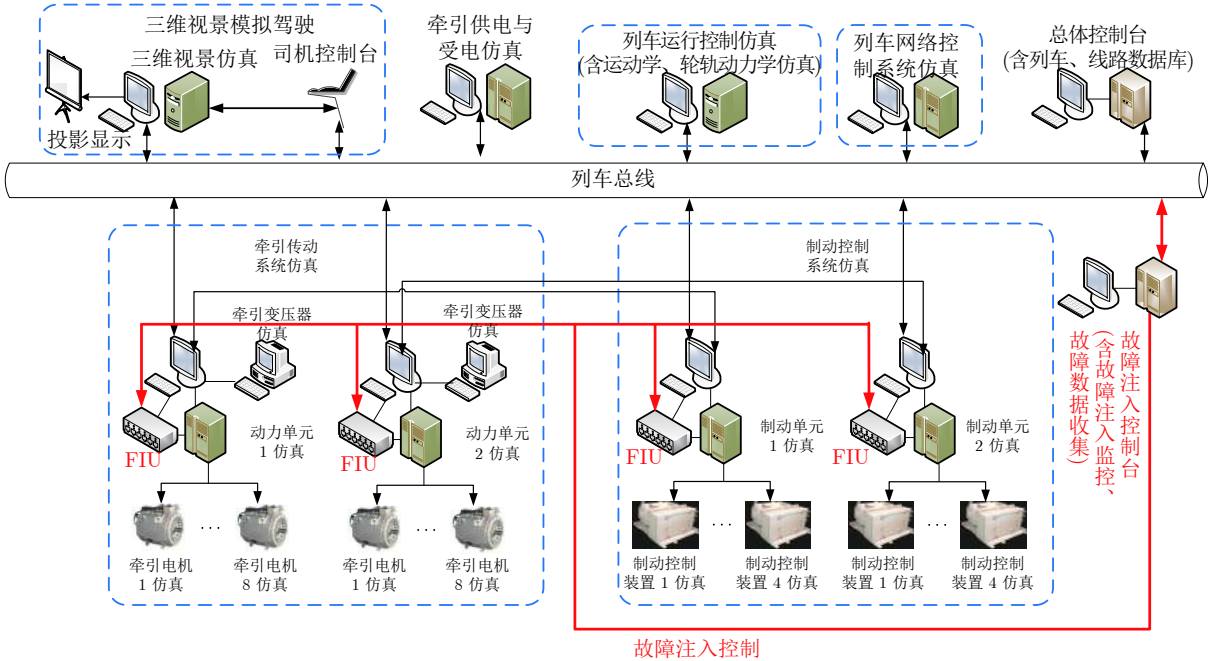


图 3 高速列车信息控制系统故障测试实时仿真系统架构

Fig. 3 Real-time simulation system architecture for the fault testing and verification of information control system in high-speed train

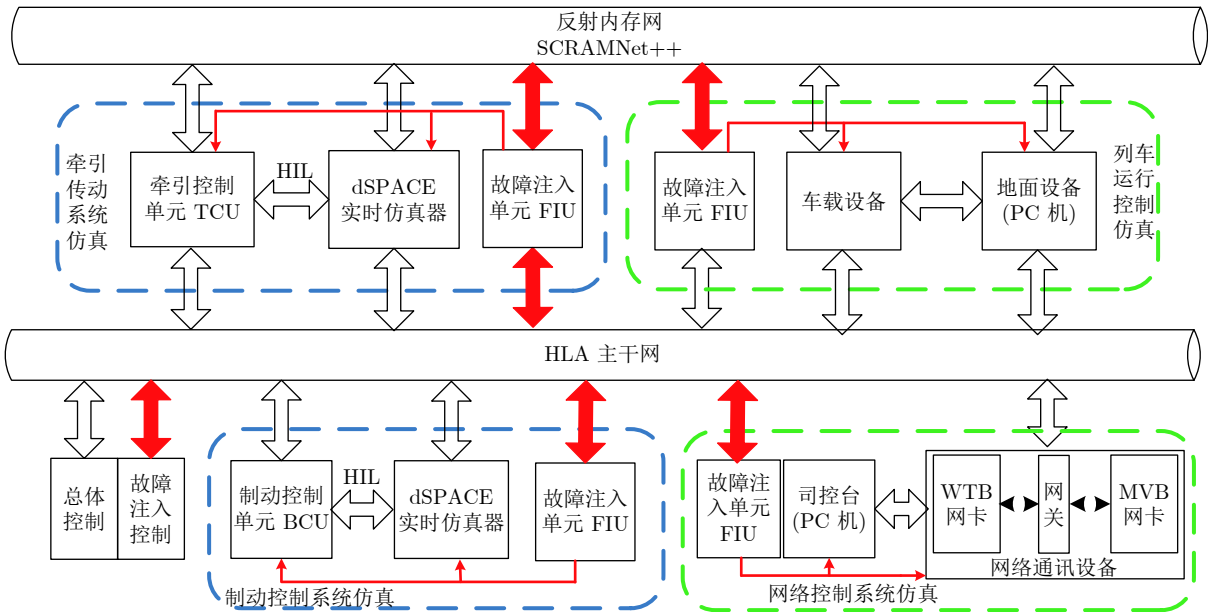


图 4 基于 HLA-RTI 的高速列车信息控制系统故障测试与验证实时仿真结构

Fig. 4 HLA-RTI-based real-time simulation architecture the fault testing and verification of information control system in high-speed train

2.1.2 面向实时仿真的故障注入

针对牵引传动系统中存在的具有演变和变迁特性的故障场景和故障位置不可访问的故障注入/模拟问题, 文献 [69–70] 公开了一种基于信号与模型混合的故障注入方法, 实现了牵引传动系统中牵引电机、牵引变流器、传感器和牵引控制单元中 23 类故障的模拟。

1) 故障位置可访问的故障注入. 对于一类具有时间演变特性的故障位置可访问的故障场景, 文献 [69] 公开了一种基于模型替换的故障注入方法, 通过考虑系统运行状态和外部环境因素, 建立故障机理模型中故障敏感参数性能退化过程的演变规律; 在故障注入时刻, 将故障机理模型替换正常机理模型, 修改故障机理模型中的故障敏感参数, 实现基于模型替换的故障场景模拟. 基于该思想, 文献 [71] 建立了牵引电机转子导条性能退化演变模型, 实现了故障症状演变特性的模拟。

对于一类具有时空变迁特性的故障位置可访问的故障场景, 文献 [72] 提出了一种基于信号调理的故障注入方法, 定义了信号调理操作, 从时间特性、信号特性和幅频特性等三个方面建立了系统可观测位置故障信号的统一时空特性描述, 将所构建的故障信号与系统正常信号进行信号调理操作得到故障注入信号, 最后在指定位置进行信号注入, 为实现此类故障场景的逼真模拟, 提供了一种解决方案。

对于一类时空上具有关联、因果关系的症状变

迁特性的故障位置可访问的故障场景, 文献 [70] 公开了一种基于时空特性分析的故障传播信号建模方法, 建立包含各观测点间的演变故障信息和故障传播时间的故障传播模型, 为实现此类故障场景的故障注入/模拟, 提供了一种解决思路。

2) 故障位置不可访问的故障注入. 对于故障位置不可访问的故障场景, 文献 [69] 公布了一种基于信号与模型混合的故障注入方法. 首先, 将故障场景分为位置可访问和不可访问的两部分; 接着, 对故障位置不可访问部分已知的故障机理或端口故障信号采用基于模型或基于信号调理的单一故障注入方法描述; 然后, 对故障位置可访问部分进行故障机理和故障信号的描述; 随后, 分别从模型和信号方面, 建立故障位置可访问部分与不可访问部分之间的耦合关系或时空关联关系; 最后, 按照所建立的耦合关系或时空关系, 对基于信号和基于模型故障注入模块分别进行控制, 从而实现对此类故障的模拟. 基于该思想, 文献 [73–74] 分别提出了基于替代模型的单粒子瞬态效应注入和基于故障分析的牵引变流器一致性建模方法, 实现了牵引控制单元位置不可访问故障^[27]和牵引变流器功率器件封装模块开路故障场景的有效模拟。

3) 故障注入实现技术. 针对基于信号与模型混合的故障注入方法, 文献 [69] 设计了相应的故障注入器, 用于对故障注入行为与影响进行有效控制, 如图 5 所示。

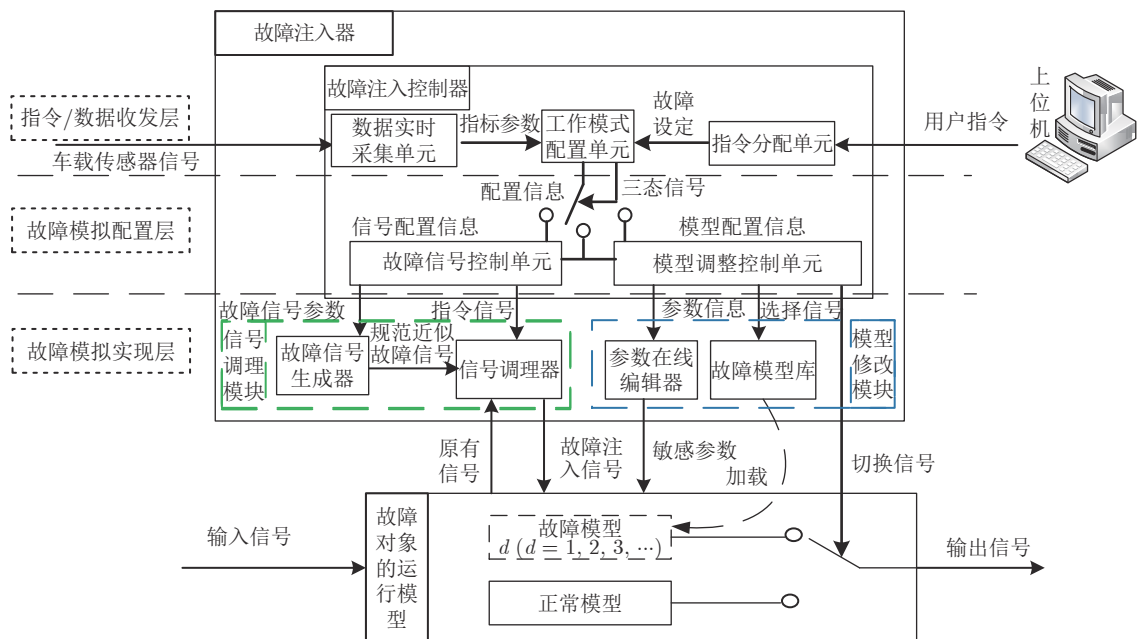


图 5 基于信号与模型混合的故障注入器示意图^[69]

Fig. 5 Diagram of mixed signal and model-based fault injector^[69]

故障注入器的控制部分按照功能划分为指令/数据收发层和故障模拟配置层. 指令/数据收发层, 由数据实时采集单元、指令分配单元和工作模式配置单元组成; 数据实时采集单元用于接收车载传感器所采集的数据, 并通过所采集的数据计算出系统运行状态变量和环境参数, 并将这些数据发送到工作模式配置单元; 指令分配单元用于接收来自上位机的用户指令, 分析用户对于故障类型和参数等的设定, 将这些故障设定发送到工作模式配置单元; 工作模式配置单元用于接收数据实时采集单元和指令分配单元发送的数据和指令, 依据用户设定和系统实时状态动态地调整故障注入/模拟的工作模式和配置信息, 并发送故障模拟的配置信息到故障模拟配置层.

故障模拟配置层, 由信号调理控制单元和模型修改控制单元组成, 信号调理控制单元用于接收指令/数据收发层发送的信号配置信息, 发送规范近似故障信号中的故障参数信息与指令信号到信号调理模块, 实现对信号调理模块工作状态的控制; 模型修改控制单元用于接收指令/数据收发层发送的模型配置信息, 发送敏感参数信息与模型选择信号到模型修改模块, 并直接发送故障模型切换信号给故障对象, 实现对模型修改模块工作状态的控制.

2.1.3 故障注入模式下的仿真可信度评估

针对故障注入的结果可信度群体评估存在的诸多困难. 首先, 采用基于 Prony 变换的可信度指标确定方法, 将评估指标的可信度分为整体可信度和特征可信度, 给出指标可信度的量化模型, 完成故障症状变迁仿真下单项动态评估指标的初选; 接着, 同时考虑评价指标和专家评价, 提出基于相关假设的复杂仿真系统可信度群体评价方法, 实现对高速列车牵引传动系统故障仿真可信度群体评价客观性的提升^[75]. 最后, 针对可信度群体评估结果非一致性困扰的问题, 文献 [76] 提出了一种基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度群组评估方法. 进而建立了考虑关联关系的评估模型, 对指标间和专家间的关联关系进行描述, 并结合直觉模糊的逼近理想解排序法、理想点法 (Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 方法, 使得最终的可信度值可以用精确数表示, 提升了可信度群体评估结果的准确性, 为实现具有时空关联和因果特性的故障症状变迁仿真的可信度评估提供一种有效的方案.

2.1.4 待测算法性能评估

针对现有故障检测和诊断方法的性能评估指标在学术研究和工程应用中存在差异性的问题, 文献 [77] 公开了一种基于三级指标的故障测试性能评估方

法, 通过权重的设置, 可满足不同场合下对故障诊断等待测算法性能评估的需求. 该方法依据待测算法特点和客观、全面评估的需求, 通过甄选评估指标, 突出考虑可维修性、检测可用性和诊断可靠性以及综合评估算法性能, 建立了三级评估指标, 如表 4 所示.

表 4 三级故障测试性能评估指标
Table 4 Three-level-based performance evaluation index for fault testing

综合性能指标	关键性能指标	基本性能指标
综合性能指标	可维修性指标群	平均检测延迟
		灵敏度
		检测率
	检测可用性指标群	误检率
		漏检率
		故障位置辨识度
	诊断可靠性指标群	故障类型辨识度
		故障参数辨识度

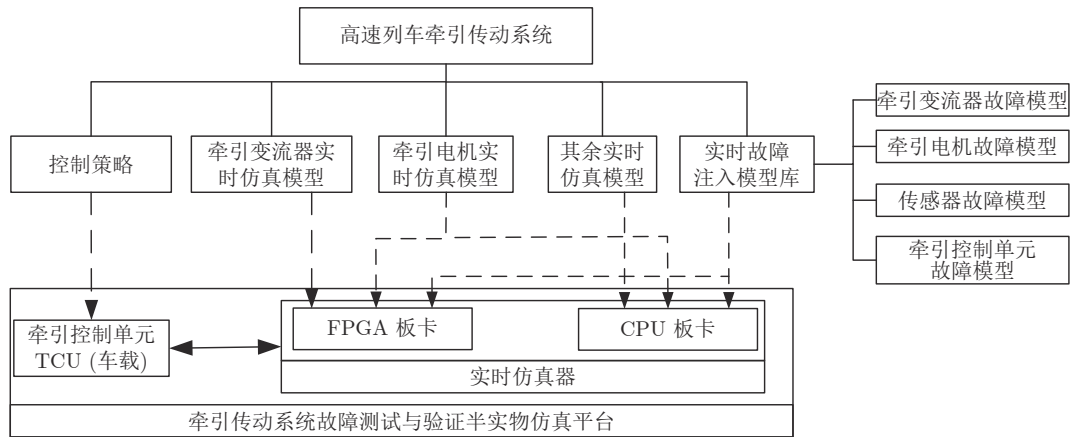
依据已有的基本性能指标, 建立了关键性能指标, 包括可维修性指标群、检测可用性指标群、以及诊断可靠性指标群, 可以兼顾学术研究和工程应用的需求对诊断算法进行更客观地评估. 其中, 关键性能指标则由相应的指标集中所含基本性能指标进行组合加权得到. 在计算所得关键性能指标的基础上建立综合性能指标, 为百分数值. 具体而言, 综合性能指标由所有关键性能指标进行加权得到. 可为研究人员和工程技术人员提供一个交互性更好的算法性能评估标准.

此外, 针对基于枚举法所需的故障测试次数带来的测试周期及成本负担与有限故障测试次数之间存在的测试有效性和评估结果的客观性之间的矛盾, 文献 [77] 公开了一种随机抽取的测试集生成方法, 将所搭建的牵引传动系统故障注入模型中故障发生位置、故障类型、故障参数 (包括故障注入时间和故障严重程度表征参数等) 作为三层随机变量, 并逐一进行随机抽样, 生成大量、随机的故障测试场景, 构成代表性强、覆盖面广的测试试验数据集, 以提高测试与评估结果的客观性.

2.2 牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台构建

2.2.1 实时仿真资源的优化分配

针对故障注入模式下实时仿真模型需占用大量解算资源的需求与有限的硬件资源之间的矛盾, 文献 [29] 提出了基于多处理器联合仿真的硬件在回路仿真架构, 如图 6 所示. 该结构采用了 FPGA+DSP

图 6 仿真平台解算资源分配示意图^[29]Fig. 6 Diagram of the resource distribution in simulation platform^[29]

的双芯片结构, 其中, FPGA 芯片用于处理牵引传动系统中响应速度和运算精度要求高的元部件, 如牵引电机电气部分和牵引变流器等; DSP 芯片用于处理响应速度和运算精度要求不高的元部件, 如变压器、牵引电机机械部分和部分故障注入算法等。

针对故障注入模式下实时仿真中的时序错误问题, 文献 [78] 公开了一种时序资源优化方法, 有效解决了故障注入模式下半实物仿真环境中时序资源优化分配的问题。基于该思想, 图 7 给出了牵引传动系统及其某类故障注入模型的解算时序规划, 故障实时仿真模型的解算时间为 810 ns。

2.2.2 基于 HIL 的故障测试与验证实时仿真平台

利用第 2.1 节所述的故障测试验证方法和技术, 文献 [78] 研制了基于 HIL 的高速列车牵引传动系统故障测试与验证半实物仿真平台, 如图 8 所示。其中, 牵引控制单元 (TCU) 为中车株洲电力机车研究所有限公司提供的 CRH2 型高速列车车载控制器; 实时仿真器由德国 dSPACE 公司生产, 采用基于 FPGA+DSP 的双处理器运算环境; 自主开发的牵引传动系统故障测试软件^[79], 实现了实时仿真平台数据监控和故障测试所需功能, 如图 9 所示。

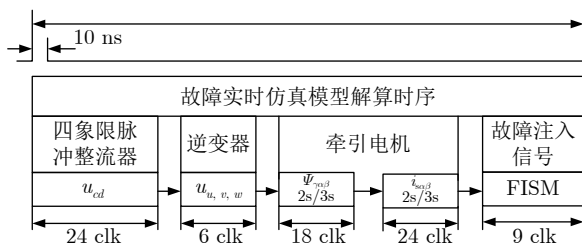
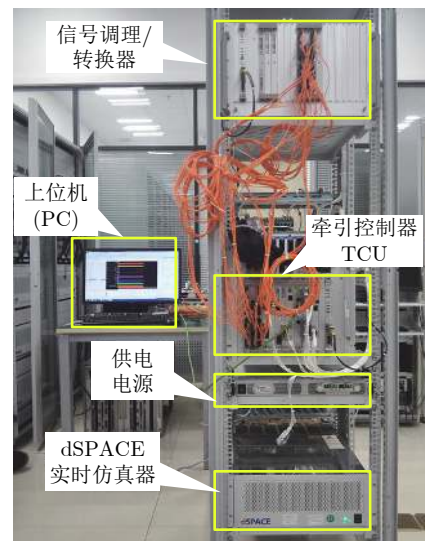
图 7 某类故障注入下实时仿真模型解算的时序规划^[29]Fig. 7 Timing planning of real-time simulation model solution under a fault condition^[29]图 8 基于 HIL 的牵引传动系统故障测试与验证半实物仿真平台^[78]Fig. 8 HIL-based fault testing and validation simulation platform for traction drive system^[78]

图 9 牵引传动系统故障测试软件的用户界面

Fig. 9 The user interface of fault testing software of traction drive system

此外,文献[80]发布了高速列车牵引传动系统虚拟故障测试软件,可供免费下载。

3 总结与展望

本文从高速列车故障测试与验证平台缺乏且亟需研制的实际需求出发,针对牵引传动系统故障测试与验证半实物仿真平台研制中存在的面向实时仿真的系统架构、故障注入、故障注入模式下仿真可信度评估、故障测试评估和半实物仿真实现等问题,本文概述了一些面向高速列车牵引传动系统故障测试验证平台研制的新方法和技术,进而提出并构建了一种集高速列车实时仿真、故障运行行为逼真模拟、随机故障测试和故障诊断算法评估于一体的牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台。最后,介绍了与我国牵引传动系统龙头单位合作研发的高速列车牵引传动系统故障测试与验证实时仿真平台。该平台不仅可以逼真地模拟高速列车牵引传动系统中的常见故障场景,还可以对待评估故障诊断算法进行较客观、全面的评价,为进一步优化、调试故障诊断算法及其能否满足车载应用的决策提供测试验证环境和依据。目前,已有一些实时诊断算法在该平台上完成了测试与验证工作^[10, 12, 57-59]。展望未来,高速列车安全监测验证平台的研究包括以下两个方面:

1) 面向故障预测与健康管理等方法的测试验证机制和技术研究。随着高速列车安全监测机制由被动型转为主动型的迫切需要^[1],以系统状态监测、故障诊断和故障预测与健康管理等为主体的主动安全监测技术由此成为当前高速列车科技发展的趋势,且国家“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。然而,对于故障预测与健康管理等方法的测试机制和技术还未见全面深入的研究,这将给这些先进算法的测试优化以及投入车载应用带来阻碍。特别是,面临着如何可靠、逼真地模拟高速列车元部件的健康退化场景,如何有效、合理的建立故障预测与健康管理等算法的测试机制和评估指标等难点问题。

2) 面向安全测试验证的先进仿真方法和实现技术研究。仿真手段已从离线虚拟仿真,到近期的半实物实时仿真,进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与融合的数字孪生仿真环境^[82]。该仿真模式为故障诊断、故障预测与健康管理等提供新的思路和解决方案,且已在航天航空等领域有了初步应用^[83],实现了飞行器结构寿命预测过程的逼真透视化的监测、准确的故障预警及精准的维修策略定制等功能。但相关研

究还处于起步阶段,特别是数字孪生技术在高速列车安全监测方面的研究和应用尚未见报导。因此,如何基于数字孪生模型搭建高速列车安全测试验证仿真平台,为故障预测与健康管理等主动安全监测方法、技术提供更加细腻的信息和更加逼真的模拟效果,将是未来值得期待和努力的方向。

References

- 1 Qin Yong, Ma Hui, Jia Li-Min. Development trend and active safety technology for advanced rail transit system. *China Railway*, 2015, **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, **2015**(12): 77-81)
- 2 Chen C L. Reshaping Chinese space-economy through high-speed trains: opportunities and challenges. *Journal of Transport Geography*, 2012, **22**(2): 312-316
- 3 Yang Ge. Fuxing bullet train on the revival road. *China Awards for Science and Technology*, 2017, **2017**(8): 20-23
(杨戈. 复兴路上驶来“复兴号”. 中国科技奖励, 2017, **2017**(8): 20-23)
- 4 Li Zheng. Starting from “Fuxing” to see overtaking in corners. *People's Daily*, 2017-06-27(005)
(李拯. 从“复兴号”启程看弯道超车. 人民日报, 2017-06-27(005))
- 5 National Development and Reform Commission. The “13th five-year” development plan for railway [Online], available: http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201711/t20171124_867822.html. December 9, 2019
(国家发展和改革委员会. 铁路“十三五”发展规划 [Online], available: http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201711/t20171124_867822.html. 2019年12月9日)
- 6 Jiang Bin, Wu Yun-Kai, Lu Ning-Yun, Mao Ze-Hui. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system. *Control and Decision*, 2018, **33**(5): 841-855
(姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 冒泽慧. 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**(5): 841-855)
- 7 Dai Shun-Hua. Introduction and failure analysis of traction converter for CRH₂ EMUs. *Railway Locomotive and Car*, 2013, **33**(2): 93-97
(戴舜华. CRH₂型系列动车组牵引变流器介绍及故障分析. 铁道机车车辆, 2013, **33**(2): 93-97)
- 8 Ge X, Pu J, Gou B, Liu Y. An open-circuit fault diagnosis approach for single-phase three-level neutral-point-clamped converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, **33**(3): 2559-2570
- 9 Fernando G, Javier P, Patxi M, Jon D O, Gaizka A. A review in fault diagnosis and health assessment for railway traction drives. *Applied Sciences*, 2018, **8**(12): 2475-2494
- 10 Zhang K K, Jiang B, Yan X G, Shen J. Interval sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to a traction device in china railway high-speed. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, **68**(3): 2585-2597

- 11 Yin Jin-Tian, Xie Yong-Fang, Yang Chun-Hua. Monitoring of incipient rotor bars broken fault in traction motors based on RVMD method. *Control and Decision*, 2018, **33**(03): 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**(03): 497–502)
- 12 Chen Z, Li X, Yang C, Peng T, Yang C, Karimi H R, Gui W. A data-driven ground fault detection and isolation method for main circuit in railway electrical traction system. *ISA Transactions*, 2019, **87**: 264–271
- 13 Tao Hong-Wei, Peng Tao, Yang Chao, Yang Chun-Hua, Chen Zhi-Wen, Gui Wei-Hua. Joint fault diagnosis method of multi-class faults for traction rectifier in high-speed train. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(12): 2294–2302
(陶宏伟, 彭涛, 杨超, 阳春华, 陈志文, 桂卫华. 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**(12): 2294–2302)
- 14 Zhou Dong-Hua, Ji Hong-Quan, He Xiao. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(7): 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**(7): 1153–1164)
- 15 Dong H, Lin X, Yao X, Bai W, Ning B. Composite disturbance-observer-based control and H_∞ control for high speed trains with actuator faults. *Asian Journal of Control*, 2018, **20**(2): 735–745
- 16 Fernando G, Jon D O, Javier P, Patxi M, Gaizka A. Integral sensor fault detection and isolation for railway traction drive. *Sensors*, 2018, **18**(5): 1543–1562
- 17 Alejandro B, Higinio R, Cristina C, García-Prada J C. EMD-based methodology for the Identification of a high-speed train running in a gear operating state. *Sensors*, 2018, **18**(3): 793–809
- 18 Rankin D J, Jiang J. A hardware-in-the-loop simulation platform for the verification and validation of safety control systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, **58**(2): 468–478
- 19 Ding Rong-Jun, Gui Wei-Hua, Chen Gao-Hua. HIL real-time simulation of electric locomotive AC drive system. *China Railway Science*, 2008, **29**(4): 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**(4): 96–102)
- 20 Lv C, Cao D P, Zhao Y F, Auger D J, Sullman M, Wang H J, Dutka L M, Skrypchuk L, Mouzakitis A. Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, **5**(1): 56–68
- 21 Li Tian-Mei. Research on optimization design and integrated evaluation of testability verification test for equipments [Ph.D. dissertation]. National University of Defense Technology, China, 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]. 国防科学技术大学, 中国, 2010.)
- 22 Huang Zhen-Hui, Wang Gui-Guo, Jiang Da-Wang, Cao Yuan, Zhang Yu-Zhuo. 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, 曹源, 张玉琢. 国内外高速试验列车综述. *中国铁路*, 2013, (4): 100–105)
- 23 ALSTOM, The AGV, Alstom's latest very high-speed train, starts test runs at 360 km/h [Online], available: <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>. December 5, 2019
- 24 Ji H Q, He X, Sai H S, Tai X H, Zhou D H. Fault detection of EMU brake cylinder. In: Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, China: IEEE, 2016. 6668–6672
- 25 Fang X, Yang Z, Lin F. Virtual development platform of high-speed train traction drive system in view of top-level goals. In: Proceedings fo the 2013 Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Beijing, China: IEEE, 2013. 1–5
- 26 Feng J, Cao J, Wu Z. Analysis and study of the influence on the train side harmonic as a SMES fabricated into the EMU converter system. *IEEE Transactions on Applied Super-Conductivity*, 2019, **29**(2): 1–5
- 27 Zhou Y H, Xin T, Lei L, Ning J J. Revisiting the 7/23 train accident using computer reconstruction simulation for causation and prevention analysis. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2018, **2018**(148): 1–15
- 28 Gao S, Dong H, Ning B. Adaptive fault-tolerant automatic train operation using RBF neural networks. *Neural Computing and Applications*, 2015, **2015**(26): 141–149
- 29 Yang Xiao-Yue. Real-time fault simulation and diagnosis for traction control system of high-speed train [Ph.D. dissertation]. Central South University, China, 2018.
(杨笑悦. 高速列车牵引传动控制系统故障实时仿真与诊断方法研究 [博士学位论文]. 中南大学, 中国, 2018.)
- 30 Liu Z, Xiang C, Wang Y, Liao Y, Zhang G. A model-based predictive direct power control for traction line-side converter in high-speed railway. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, **53**(5): 4934–4943
- 31 Song W, Jiao S, Li W, Wang J, Huang J. High-frequency harmonic resonance suppression in high-speed railway through single-phase traction converter with LCL filter. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2016, **2**(3): 347–356
- 32 Feng Jiang-Hua, Wang Jian, Li Jiang-Hong. Integrated simulation platform of high-speed train traction drive system. *Journal of the China Railway Society*, 2012, **34**(2): 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**(2): 21–26)
- 33 Xia J, Guo Y, Dai B, Zhang X. 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, Japan. 2016, 1–6
- 34 William T H, George M B. Design of built-in tests for active fault detection and isolation of discrete faults. *IEEE Access*, 2018, **6**(2018): 50959–50973
- 35 Hao Chun-Sheng, Qin Yue. Fault diagnosis methods and test-

- ing procedure of aeroengine. *Aeroengine*, 2014, **40**(3): 71–74
(郝春生, 秦月. 航空发动机故障诊断及测试流程分析. 航空发动机, 2014, **40**(3): 71–74)
- 36 Chai Yi, Mao Wan-Biao, Ren Hao, Qu Jian-Feng, Yin Hong-Peng, Yang Zhi-Min, et al. Research on operational safety assessment for spacecraft launch system: Progress and challenges. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(10): 1829–1845
(柴毅, 毛万标, 任浩, 屈剑锋, 尹宏鹏, 杨志敏, 等. 航天发射系统运行安全性评估研究进展与挑战. 自动化学报, 2019, **45**(10): 1829–1845)
 - 37 Cunningham A, Kass M. Development, integration, and test architecture for a software-based hardware-agnostic fault tolerant flight computer. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2016, **19**(4): 38–43
 - 38 Ananda C M. General aviation aircraft avionics: Integration and system tests. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, **24**(5): 19–25
 - 39 Shi Y, Wu X, Chen H, Xu T. A research of weapon system storage reliability simulation method based on fuzzy theory. *Physics Procedia: Part C*, 2012, **24**: 2266–2272
 - 40 Li Yu-Jie, Wu Yan-Jun. Methods study for testability of weapon equipment. *Ship Electronic Engineering*, 2017, **37**(11): 126–129
(李玉洁, 吴延军. 武器装备的测试性设计方法研究. 舰船电子工程, 2017, **37**(11): 126–129)
 - 41 Yang Jin-Peng, Lian Guang-Yao, Qiu Wen-Hao, Chen Ran. Research status and development trend of equipment testability verification technology. *Modern Defence Technology*, 2018, **46**(2): 186–192
(杨金鹏, 连光耀, 邱文昊, 陈然. 装备测试性验证技术研究现状及发展趋势. 现代防御技术, 2018, **46**(2): 186–192)
 - 42 Zhang Yan-Hong, Yi Zhi-Hu. Research of fault injection in missile fault diagnosis system. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, **2007**(3): 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, **2007**(3): 292–294)
 - 43 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. Virginia University Charlottesville, 1997.
 - 44 Hsueh M C, Tsai T K, Iyer R K. Fault injection techniques and tools. *Computer*, 1997, **30**(4): 75–82
 - 45 Lago L D, Ferrante O, Passerone R, Ferrari A. Dependability assessment of SOA-based CPS with contracts and model-based fault injection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(1): 360–369
 - 46 Kooli M, Di Natale G. A survey on simulation-based fault injection tools for complex systems. In: Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS), Santorini, Greece. 2014. 1–6
 - 47 Cui Heng-Bin, Ma Zhi-Wen, Han Kun, Feng Xiao-Yun, Tong Li. Research on the real-time simulation of the traction drive system in electric multiple units. *China Railway Science*, 2011, **32**(6): 94–101
(崔恒斌, 马志文, 韩坤, 冯晓云, 全力. 电动车组牵引传动系统的实时仿真研究. 中国铁道科学, 2011, **32**(6): 94–101)
 - 48 Zhang Y, Tang T, Zheng W, Niu H. A train control system simulation and analysis method. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2012, **7**(1): 57–66
 - 49 Wang Zi-Cai. Development and formation of simulation science. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(6): 1279–1281
(王子才. 仿真科学的发展及形成. 系统仿真学报, 2005, **17**(6): 1279–1281)
 - 50 Li Wei, Lin Sheng-Lin, Zhou Yu-Chen, Ma Ping, Yang Ming. Research progress on credibility assessment of a complex simulation system. *Scientia Sinica Informationis*, 2018, **48**(7): 29–44
(李伟, 林圣琳, 周玉臣, 马萍, 杨明. 复杂仿真系统可信度评估研究进展. 中国科学: 信息科学, 2018, **48**(7): 29–44)
 - 51 Li Jun, Yuan Shi-Hua. Research on credibility evaluation method applied to vehicle dynamic simulation. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, **35**(1): 44–47
(李军, 苑士华. 车辆动力学仿真的可信度评估方法研究. 北京理工大学学报, 2015, **35**(1): 44–47)
 - 52 Gao Wen-Tian, Wu Yong, Zhang Jian-Dong, Tian Hai-Bao, Jiao Jing-Tao. A grey theory model using in the simulation credibility evaluation of integrative avionics system. *Fire Control and Command Control*, 2012, **37**(4): 54–57
(高文天, 吴勇, 张建东, 田海宝, 焦敬涛. 改进型灰色聚类法对航电火控系统仿真可信度评估. 火力与指挥控制, 2012, **37**(4): 54–57)
 - 53 Fang K, Yang M. Dynamic AHP net for simulation systems verification. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, **33**(3): 707–711
 - 54 Dou Jian-Bin, Wang Xiao-Bing, Shan Bin, Zhang Yan. Credibility evaluation of hardware-in-the-loop simulation test for guided weapons. *Journal of System Simulation*, 2017, **29**(12): 3023–3029
(豆建斌, 王小兵, 单斌, 张燕. 制导武器半实物仿真试验可信度评估研究. 系统仿真学报, 2017, **29**(12): 3023–3029)
 - 55 Yang C, Gui W, Chen Z, Zhang J, Tao P, Yang C, et al. Voltage difference residual-based open-circuit fault diagnosis approach for three-level converters in electric traction systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, to be published.
 - 56 Tao H W, Peng T, Yang C, Chen Z W, Yang C H, Gui W H. Open-circuit fault analysis and modeling for power converter based on single arm model. *Electronics*, 2019, **8**(6): 633–648
 - 57 Chen Z, Ding S, Peng T, Yang C, Gui W. Fault detection for non-gaussian processes using generalized canonical correlation analysis and randomized algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(2): 1559–1567
 - 58 Chen H, Jiang B, Lu N, Mao Z. deep PCA based real-time incipient fault detection and diagnosis methodology for electrical drive in high-speed trains. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology*, 2018, **67**(6): 4819–4830
- 59 Chen H, Jiang B, Chen W, Yi H. Data-driven detection and diagnosis of incipient faults in electrical drives of high-speed trains. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, **66**(6): 4716–4725
 - 60 National Standard. GB/T 21562-2008: Railway applications — specification and demonstration of reliability, maintainability and safety (RAMS). 2008.
(国家标准. GB/T 21562-2008. 轨道交通-可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例. 2008.)
 - 61 Rubaai A, Ofoli A R, Cobbinah D. DSP-based real-time implementation of a hybrid H1 adaptive fuzzy tracking controller for servo-motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**(2): 476–484
 - 62 Pak L F, Faruque M O, Nie X, Dinavahi V. A versatile cluster-based real-time digital simulator for power engineering research. *IEEE Transactions on Power System*, 2006, **21**(2): 455–465
 - 63 Dufour C, Blanger J. A PC-based real-time parallel simulator of electric systems and drive. In: Proceedings of the 2004 International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering, Dresden, Germany: IEEE, 2004. 105–113
 - 64 RTDS Technology Incorporated. Real-Time Simulation [Online], available: <http://www.rtds.com>. December 5, 2019
 - 65 dSPACE GmbH. dSPACE Product Manual [Online], available: <http://www.dspace.com>. December 9, 2019
 - 66 Chen Y, Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of power systems. *IET Generation Transmission and Distribution*, 2013, **7**(5): 13–20
 - 67 Saad H, Member S, Ould-bachir T, Mahseredjian J, Dufour C. Real-Time Simulation of MMCs Using. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **36**(1): 259–267
 - 68 Yang Chun-Hua, Feng Jiang-Hua, Peng Tao, Shang Jing, Yang Xiao-Yue, Zhang Yu, Yang Chao, Xu Li-En. A collaborative fault simulation system for high-speed train information control system, China Patent ZL201510362521.6, October 13, 2017
(阳春华, 冯江华, 彭涛, 尚敬, 杨笑悦, 张宇, 杨超, 徐立恩. 一种高速列车信息控制系统协同故障仿真系统, 中国专利 ZL201510362521.6, 2017 年 10 月 13 日)
 - 69 Yang Chun-Hua, Yang Chao, Peng Tao, Tao Hong-Wei, Zhao Shuai, Shi Lu, Yin Jin-Tian, Yang Xiao-Yue, He Ze-Zhou, Liu Bo, Li Sheng. A fault injection method and its system, China Patent ZL201710003376.1, August 30, 2019
(阳春华, 杨超, 彭涛, 陶宏伟, 赵帅, 史露, 尹进田, 杨笑悦, 贺泽洲, 刘博, 李晟, 故障注入方法及系统, 中国专利 ZL201710003376.1, 2019 年 8 月 30 日)
 - 70 Yin Jin-Tian, Xie Yong-Fang, Chen Zhi-Wen, Peng Tao, Yang Chun-Hua, Yang Chao. Fault tracing method based on fault propagation and causality with its application to the traction drive control system. *Acta Automatica Sinica*, 2019, DOI: 10.16383/j.aas.c19025
(尹进田, 谢永芳, 陈志文, 彭涛, 阳春华, 杨超. 基于故障传播与因果关系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, 2019, DOI: 10.16383/j.aas.c19025)
 - 71 Peng Tao, Zhao Shuai, Yang Chun-Hua, Shi Lu, Yang Chao, Yin Jin-Tian, Yang Xiao-Yue, He Ze-Zhou, Liu Bo, Tao Hong-Wei, Li Sheng. Fault injection method and fault injector for the rotor bar of squirrel cage asynchronous motor, Patent CN 201611107891.6, December. 6, 2016
(彭涛, 赵帅, 阳春华, 史露, 杨超, 尹进田, 杨笑悦, 贺泽洲, 刘博, 陶宏伟, 李晟, 鼠笼型异步电机转子导条故障注入方法及故障注入器, 中国专利 CN 201611107891.6, 2016 年 12 月 6 日)
 - 72 Yang C, Yang C, Peng T, Yang X, Gui W. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(7): 5719–5727
 - 73 Yang Xiao-Yue, Yang Chun-Hua, Peng Tao, Lu Shi, Yang Chao. Single event transient injection method based on substitution model. *Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science)*, 2015, **15**(3): 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**(3): 299–304)
 - 74 Tao H, Peng T, Yang C., Chen Z, Yang C, Gui W, Hamid R K. A uniform modeling method based on open-circuit faults analysis for NPC-three-level converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, **66**(3): 457–461
 - 75 Li S, Peng X, Peng T. A group evaluation method for complex simulation system credibility based on 2-order additive fuzzy measure. In: Proceedings of the 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC2016). Yinchuan, China: IEEE, 2016. 147–154
 - 76 Li Sheng, Peng Xiao-Qi, Peng Tao. Aggregation method for simulation credibility index based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets with correlations. *Control and Decision*, 2018, **33**(1): 126–134
(李晟, 彭小奇, 彭涛. 基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法. 控制与决策, 2018, **33**(1): 126–134)
 - 77 Peng Tao, Fang Di-Kai, Yang Chao, Chen Zhi-Wen, Tao Hong-Wei, Gui Wei-Hua, Ti Jun-Wei. A random fault injection-based diagnosis algorithm evaluation method, China Patent CN201811638187.2, December 30, 2018
(彭涛, 方帝凯, 杨超, 陈志文, 陶宏伟, 桂卫华, 提军伟. 一种基于随机故障注入的诊断算法评估方法, 中国专利 CN201811638187.2, 2018 年 12 月 30 日)
 - 78 Yang X, Yang C, Peng T, Chen Z, Liu B, Gui W. Hardware-in-the-loop fault injection for traction control system. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, **6**(2): 696–706
 - 79 Central South University. dSPACE-based fault testing software for traction drive control system (D-TDCS-FT, v1.0). China Software Copyright 2018sr878040, October 10, 2018
(中南大学. 基于 dSPACE 的牵引传动控制系统故障测试软件 (D-TDCS-FT, v1.0). 中国软件著作权 2018sr878040, 2018 年 10 月 10 日)

- 80 Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring for Rail Transportation [Online], available: <http://gfist.csu.edu.cn/IndexE.html>, December 9, 2019
- 81 Wang H, Liserre M, Blaabjerg F, Rimmen P P, Jackbsen J B, Kvisgaard T, Landkildhus J. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, **2**(1): 97–114
- 82 Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartack, S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2017, **66**(1): 141–144
- 83 Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, Spottswood S M. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, **2011**: 1687–5966



杨超 中南大学自动化学院博士研究生。2017 年获得中南大学控制学科硕士学位。主要研究方向为高速列车故障诊断与测试仿真技术。

E-mail: chaoyang@csu.edu.cn

(**YANG Chao** Ph.D. candidate at the School of Automation, Central South University. He received his master degree from Central South University in 2017. His research interest covers fault diagnosis and test simulation methods for high-speed train.)



彭涛 中南大学自动化学院教授。2005 年获得中南大学博士学位。主要研究方向为复杂系统的故障注入、诊断与容错控制。

E-mail: pandtao@csu.edu.cn

(**PENG Tao** Professor at School of Automation, Central South University. She received her Ph.D. degree from Central South University in 2005. Her research interest covers fault injection, diagnosis and fault tolerant control for complex systems.)



阳春华 中南大学自动化学院教授。国家杰出青年基金获得者。2002 年获得中南大学博士学位。主要研究方向为复杂工业过程建模与优化, 故障诊断和智能系统。本文通信作者。

E-mail: ychh@csu.edu.cn

(**YANG Chun-Hua** Professor at the School of Automation, Central South University. She is also a winner of national science fund for distinguished young scholars. She received her Ph.D. degree from Central South University in 2002. Her research interest covers complex industrial process modeling and optimization, fault diagnosis, and intelligent system. Corresponding author of this paper.)



陈志文 中南大学自动化学院副教授。2016 年获得德国杜伊斯堡 - 埃森大学博士学位。主要研究方向为基于模型和数据驱动的故障诊断技术。

E-mail: zhiwen.chen@csu.edu.cn

(**CHEN Zhi-Wen** Associate professor at the School of Automation, Central South University. He received his Ph.D. degree from University of Duisburg-Essen, Germany in 2016. His research interest covers model-based and data-based fault diagnosis.)



桂卫华 中国工程院院士, 中南大学自动化学院教授。1981 年获得中南矿冶学院硕士学位。主要研究方向为复杂工业过程建模, 优化与控制应用, 故障诊断与分布式鲁棒控制。

E-mail: gwh@csu.edu.cn

(**GUI Wei-Hua** Academician of the Chinese Academy of Engineering, and professor at the School of Automation, Central South University. He received his master degree from Central South Institute of Mining and Metallurgy in 1981. His research interest covers complex industrial process modeling, optimization and control applications, fault diagnosis and distribute robust control.)