

高速列车信息控制系统的故障诊断技术

周东华^{1,2,3} 纪洪泉¹ 何潇^{2,3}

摘要 介绍高速列车故障诊断的研究意义, 特别关注高速列车信息控制系统的故障诊断研究工作, 给出高速列车信息控制系统的一般性定义. 高速列车信息控制系统主要包括牵引传动控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统和网络系统. 针对每一个子系统, 分别阐述其故障诊断技术的研究现状, 简要分析相应故障诊断技术的思想与优劣特点. 最后探讨高速列车故障诊断研究中亟待解决的问题以及未来可能的研究方向.

关键词 高速列车, 信息控制系统, 故障诊断, 牵引系统, 制动系统

引用格式 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

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170392

Fault Diagnosis Techniques for the Information Control System of High-speed Trains

ZHOU Dong-Hua^{1,2,3} JI Hong-Quan¹ HE Xiao^{2,3}

Abstract The research significance of fault diagnosis for high-speed trains is introduced, and special attention is paid to the fault diagnosis of the high-speed train information control system. A general definition of the information control system is provided. Four subsystems are included, that is, traction drive system, brake control system, train control system, and network system. For each subsystem, the research status of fault diagnosis techniques is reviewed. The basic ideas, advantages, and disadvantages for these fault diagnosis techniques are also briefly discussed. Finally, several challenging problems and promising research directions are pointed out.

Key words High-speed train, information control system, fault diagnosis, traction system, braking system

Citation 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

自 1964 年世界上第一个高速铁路系统(日本新干线)诞生以来, 高速铁路快速发展并取得了举世瞩目的成就^[1-2]. 目前, 世界上有多个国家具备高速铁路系统, 例如中国的 CRH、德国的 ICE、法国的 TGV 以及日本的新干线等. 作为高速铁路系统的核心组成部分, 高速列车是一个大型、复杂的工程系统, 且与旅客的人身、财产安全息息相关. 毋庸置疑, 安全性是高速列车运营的第一要务. 在高速列车运

行过程中, 任何微小或潜在的故障和隐患若不能被及时诊断和有效处理, 都有可能引发连锁反应造成事故, 甚至酿成灾难性后果. 历史上国内外发生的高速列车安全事故^[3-4](见图 1)均造成了重大的人员伤亡与经济损失, 并带来了恶劣的社会影响^[5]. 在我国, 虽然高速列车运营过程中极少出现大规模伤亡事件, 但因为各种事故造成的列车紧急停车、晚点时有发生^[6]. 排除非技术方面(诸如人为操作失误及自然条件恶劣等因素)的原因, 造成高速列车事故的主要原因是系统设备存在安全隐患且安全监控机制不完备. 切实提高高速列车系统设备运行可靠性对进一步提高列车安全性具有非常重要的意义, 并为下一代智能高速列车建设奠定理论和技术基础.

故障诊断技术为增强系统可靠性、降低事故风险, 从而进一步提高高速列车运行安全性提供了重要的理论和技术支撑^[7-10]. 在过去的几十年, 故障诊断技术取得了长足发展, 并在诸如航空航天、流程工业、机器人、交通等多个领域获得成功应用^[9-13]. 传统的分类思想一般将故障诊断方法划分为基于解析模型的方法、基于信号处理/数据的方法和基于知识的方法三大类^[8-9, 14]. 基于解析模型的方法发

收稿日期 2017-07-15 录用日期 2017-11-06
Manuscript received July 15, 2017; accepted November 6, 2017
国家自然科学基金(61490701, 61751307, 61473163, 61522309), 山东省泰山学者项目研究基金(LZB2015-162)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61490701, 61751307, 61473163, 61522309) and Research Fund for the Taishan Scholar Project of Shandong Province of China (LZB2015-162)

本文责任编辑 倪茂林

Recommended by Associate Editor NI Mao-Lin

1. 山东科技大学电气与自动化工程学院 青岛 266590 2. 清华大学自动化系 北京 100084 3. 北京信息科学与技术国家研究中心 北京 100084

1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590 2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 3. Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist), Beijing 100084

展较早且技术成熟,适用于被监控对象数学模型精确已知的情形^[1]. 相比之下,基于数据和知识的方法无需已知系统的精确模型,分别适用于大量历史数据可得和系统知识及专家经验已知的情形^[14-15]. Dai 等^[16]从数据驱动的角度对上述三类故障诊断方法进行了分析与对比,指出这些方法的不同之处在于如何处理数据以及如何发掘和利用隐藏在数据背后的有用信息. 考虑到新的故障诊断方法层出不穷,文献 [10] 从一个新的角度对现有方法进行了重新分类,将其整体上分为定性分析方法和定量分析方法两大类. 其中,定性分析方法包括图论方法、专家系统和定性仿真方法;定量分析方法包括基于解析模型的方法和数据驱动的方法. 不同类别的方法各有千秋,具体采用哪种方法或哪些方法的组合需要针对实际被监控对象,在充分发掘对象特性与知识的基础上,充分利用可以获得的对象信息(模型或数据),选择合适的方法更好地实现故障诊断任务,提高系统可靠性与安全性.



(a) 1998 年德国高速列车 ICE 出轨事故^[3]

(a) German high-speed rail car accident in 1998^[3]



(b) 2011 年中国甬温线动车组追尾事故^[4]

(b) China's high-speed train rear-end accident in 2011^[4]

图 1 高速列车安全事故

Fig. 1 High-speed train accidents

针对高速列车的故障诊断研究,国内的研究机构主要集中在交通院校以及铁路相关部门,例如北京交通大学、西南交通大学、中南大学、中国铁道科

学研究院、中国中车青岛四方车辆研究所等. 此外,以国家自然科学基金委 2015 年启动的重大项目“高速列车信息控制系统实时故障诊断与应用验证”为契机,国内高校如清华大学、南京航空航天大学以及东北大学的故障诊断研究小组也开展了大量的相关工作. 国外的研究机构也是集中在铁路相关的高校及高科技公司,例如德国的西门子公司、法国的法维莱公司等.

本文主要针对高速列车信息控制系统,回顾近年来国内外故障诊断技术的发展现状. 高速列车信息控制系统是集软硬件技术为一体,基于机械、电子、电气、通信以及自动化技术,用以实现传感、通信、运算、控制、监测、诊断以及客运服务等功能,从而保障列车安全、稳定、高效运行的系统的总称. 它是高速列车安全运行的关键,主要包括牵引传动控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统和列车网络系统. 其中,牵引、列控和网络系统分别被喻为高速列车的心脏、大脑和神经;制动控制系统在列车安全运行中的重要地位更是不言而喻. 然而,这些关键系统也是高速列车故障的主要来源之一. 因此,对高速列车信息控制系统实时监控与故障诊断具有重要意义. 此外,本文简要介绍了本课题组在高速列车制动系统故障诊断方面的一些工作. 最后,探讨了高速列车故障诊断研究中亟待解决的问题以及未来可能的研究方向.

1 研究现状及主要成果

1.1 牵引传动控制系统故障诊断

目前,高速列车几乎都采用现代交流传动系统,将高压输电线上的单相交流电经一系列转换变成电压、电流和频率均可控的三相交流电供给三相异步牵引电动机,电动机的输出经传动装置转换为车轮的牵引力和线速度^[17]. 高速列车牵引系统的主要组成单元包括受电弓、主断路器、牵引变压器、变流器、牵引电机、齿轮箱和管理控制单元. 文献 [18] 根据牵引系统的结构特点建立产品结构树,分类统计了动车组在运行过程中牵引系统发生的各种故障,并分析了导致故障的原因,为动车组库检和维修提供参考. 下文将分别简要概述受电弓、牵引变压器、变流器,以及牵引电机与齿轮箱系统的故障诊断研究现状.

高速列车运行过程中要求受电弓和接触悬线保持良好的接触状态. 针对接触网-受电弓系统(简称弓网系统),文献 [19] 提出一种条件监控和故障诊断方法,该方法通过分析受电弓与接触悬线之间的接触点来判断受电弓上的疲惫点,进而完成故障预警. 考虑到弓网系统受扰动以及接触悬线振荡引起接触

力丢失的情形, 文献 [20] 提出一种基于计算机视觉的方法用于控制弓网之间的接触力. 为了避免接触力丢失导致电弧故障, 该方法采用边缘检测和霍夫变换算法来检测受电弓的高度, 并将测量值输送给控制算法以便实时调整受电弓高度, 保证受电弓和接触网的有效接触.

针对高速列车牵引变压器铁芯多点接地故障, 文献 [21] 提出一种包含结构设计、硬件组成和软件算法的解决方案, 在工业 PC 机上得以实现, 并通过现场测试验证了方案在检测变压器铁芯多点接地早期故障方面的有效性. 文献 [22] 针对 V/x 型牵引变压器差动保护中的故障辨识问题, 提出一种基于固有模态函数能量熵和关联维相结合的混合算法, 可以快速准确地辨识出变压器的内部短路故障. 文献 [23] 将核主成分分析 (Kernel principal component analysis, KPCA) 与随机森林 (Random forest, RF) 方法相结合用于高速列车牵引变压器故障诊断. 利用 KPCA 提取故障特性, 进而利用 RF 进行故障分类, 仿真结果表明所提方法具有更高准确率和抗干扰性. 针对牵引变压器外部故障和内部故障诊断问题, 文献 [24] 提出一种基于模型和模糊 Petri 网融合的新方法, 并以武广高速三相 V/x 接线牵引变压器故障数据为实例进行了分析, 验证了所提方法的可行性和有效性.

作为牵引传动系统中的重要部件, 变流器的性能也直接影响着列车运行效率与安全. 通常, 变流器由整流器、直流平滑电路和逆变器三部分组成. 文献 [25] 列举了武汉铁路局自 2007 年高铁正式投入运行以来, CRH2 型动车组牵引变流器运用故障统计, 主要包括由于网压原因以及运用保养问题导致的变流器故障、整流模块故障、传感器故障等. 文献 [26–27] 针对变流器系统故障诊断问题, 基于小波分析提取故障特征, 进而利用神经网络或支持向量机 (Support vector machine, SVM) 进行故障分类. 绝缘栅双极型晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT) 作为牵引变流器的核心功率器件, 其故障诊断问题得到了学者的广泛关注^[28–32]. 文献 [28] 利用符号有向图分析了高速列车牵引系统中 IGBT 故障的传播机制. 文献 [29] 提出一种频域分析方法用于整流器 IGBT 的故障诊断, 其中频域信号来源于整流器输入电流的傅里叶变换. 针对整流器 IGBT 开关管开路故障, 文献 [30] 提出一种基于混合逻辑动态模型和残差评价的诊断方法, 该方法可以在毫秒级时间内定位发生故障的开关管, 从而有效避免灾难性后果发生. 针对逆变器故障诊断问题, 文献 [31] 提出基于小波熵的逆变器开路故障诊断方法, 并对比分析了五种不同形式熵的性能. 针对同样问题, 文献 [32] 以中国 CRH2 型动车组逆变

器为研究对象, 对三电平逆变器进行逻辑参数建模, 进而采用基于模型的诊断方法实现逆变器功率管开路故障的有效诊断. 在电流/电压传感器故障诊断与容错控制方面, 也取得了一些研究成果^[33–35]. 文献 [33] 针对单相脉宽调制整流器控制电路, 采用插入线性修正项的滑膜观测器方法, 提出一种快速、鲁棒的网侧电流传感器和直流侧电压传感器故障诊断与容错控制方案. 针对三相电压源型逆变器, 文献 [34] 通过分析负载电流, 提出一种电流传感器诊断和容错控制方法. 文献 [35] 针对一类带有观测不匹配不确定性的非线性系统, 提出一种基于滑膜观测器的微小传感器故障检测方法, 并将该方法应用于高速列车牵引系统仿真中. 此外, 文献 [36] 针对变流器的直流电路部分, 采用陷波滤波器开展了针对电感器短路故障的诊断与容错控制研究.

牵引电机将变流器输出的电能转换为动能, 进而由齿轮箱调速后输出给车轮, 二者在高速列车牵引传动系统中具有重要地位. 针对高速列车异步牵引电机速度和转矩故障诊断与容错控制问题, 文献 [37–38] 提出一种基于观测器的方法对速度传感器和转矩传动系统进行监控. 当速度传感器发生故障时, 控制系统可切换到无速度传感器模式; 当转矩传动系统发生故障时, 对异步电机的转矩输出采取限制, 同时基于诊断结果为齿轮箱装置提供维护维修信息, 并将所提方法在高速列车 1.2 MW 异步电机仿真测试平台上进行了验证. 文献 [39] 通过分析异步电机相电流旁带特性为转子断条故障提供诊断信息. 针对非线性系统, 文献 [40–41] 分别提出微小执行器和多重微小传感器故障的诊断方法, 并将提出方法应用于 CRH2 型高速列车牵引电机仿真上. 针对连接电机和齿轮箱的万向轴动不平衡检测问题, 也有部分研究成果得以报道^[42–44]. 针对齿轮箱故障诊断问题, 文献 [45] 利用集成经验模态分解 (Ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 和局部线性嵌入提取齿轮振动信号的关键特征, 进而利用分类工具 SVM 实现故障诊断. 文献 [46] 利用广义同余神经网络对高速列车齿轮箱进行故障诊断, 文献 [47] 对齿轮箱实施振动和动态应力试验并分析故障诊断结果. 文献 [48] 提出一种半监督分层聚类融合方法, 并将该方法用于高速列车走行装置故障诊断. 文献 [49] 对几种用于齿轮故障检测的振动信号分析方法进行了概述和对比, 并得到相关结论以便实践者选择合适的检测方法.

1.2 制动控制系统故障诊断

高速列车的制动方式分为电制动、空气制动和非粘着制动三大类^[50], 其中电制动又分为电阻制动和再生制动, 空气制动分为轴盘制动和轮盘制动, 非

粘着制动包括涡轮制动、磁轨制动和风阻制动等。电制动由列车牵引系统在牵引控制单元的控制下完成。非粘着制动方式属于新兴制动方式,有些技术尚未成熟。空气制动对机械设备的可靠性要求较高,须保证在列车其他制动方式失效的情况下,完成规定的制动任务以保证列车安全,因而空气制动又称为基础制动。事实上,这里所说的空气制动严格来讲是指电控空气制动,简称电空制动,它是在传统空气制动机的基础上,通过在每辆车上加装电磁阀等电气控制部件而形成^[51]。电空制动方式也是目前国内外高速列车广泛采用的制动形式,后文中不加特殊说明,仍然用空气制动指代电空制动。虽然电制动具有诸多优势,例如节能和精确控制制动力,但目前空气制动仍然是高速列车必不可少的制动方式。本文主要涉及空气制动控制系统故障诊断技术的研究现状。

相比传统控制系统的故障诊断,有关高速列车制动控制系统故障诊断的理论研究成果较少。主要原因包括两个方面:1) 制动控制系统设计时遵循故障导向安全原则^[52],且制动能力有冗余,在发生故障时可以切除部分系统功能或降级运行,车辆回库后进行离线检修并查找故障原因。因而,现有的故障诊断策略大都采用简单的阈值比较,搭配相应的判断逻辑,进行简单故障的诊断。2) 动车组制动系统是发展动车组的核心技术,在我国引进、吸收国外技术并进行自主创新的过程中,制动系统故障诊断技术在不断提高,但出于技术保密国外公司不会透露复杂的故障诊断逻辑。现有文献中,几乎未见国外高速列车制动控制系统故障诊断技术的相关报道。在中国,高速列车发展迅速,制动系统控制与诊断技术也取得了长足的发展。很大部分的制动控制系统故障诊断技术掌握在轨道交通领域一线的研发、设计和运营维护工程师人员手中。文献[53]对2008年上半年沈阳铁路局开行的CRH5型动车组途中发生的制动故障进行了分析,并针对不同故障类型提出了处理建议。文献[54]从高速动车组制动系统的设计原理出发,阐述了制动系统故障诊断与安全措施的设计理念及实现方法。文献[55]介绍了动车组制动系统的故障诊断体系,包括故障数据提取与分析技术,故障模拟技术,以及针对疑难复杂故障通过结合制动试验平台进行故障再现与分析的技术。文献[56]对CRH3型动车组制动供风系统常见故障进行分析,针对不同故障类型提出了应急处理方法。文献[57]对CRH380CL型高速动车组制动系统实际运用过程中高低阶压力切换故障情况和故障产生机理进行了介绍,并提出相应的故障预防性措施。通过实例分析,文献[58]介绍了以高速动车组制动故障自动诊断代码为着手点进行故障调查的方法和过程。

除了上述对现有高速列车制动系统故障诊断功

能的概述以及在此基础上的扩展,也有一些工作对制动系统单个部件及其子系统进行故障诊断研究。文献[59]基于制动系统人工维修方面丰富的经验,结合传统故障诊断专家系统和神经网络的优势,提出了基于神经网络的制动故障诊断专家系统方案。制动控制单元(Brake control unit, BCU)是高速列车制动控制系统的核心部件,其可靠性至关重要。针对传统BCU整机测试无法定位故障回路和无法实现单板测试的不足,文献[60]设计了一种基于虚拟仪器的电路板故障测试系统,实现了对BCU控制器单板进行高速准确的测试,具有一定的实用性和扩展性。文献[61]介绍了基于粗糙集理论的高速列车智能化故障诊断方法,并以制动系统为例,分析了该方法的可行性与实现步骤。作为不确定知识表达和推理领域较为有效的理论模型之一,贝叶斯网络也被用于高速列车制动系统故障诊断。文献[62]以列车自动式空气制动机为研究对象,通过分析列车部件耦合关系的依赖性,建立基于贝叶斯网络的故障诊断模型,并结合实例仿真验证了方法有效性。文献[63]首先分析了传统故障树和贝叶斯网络在故障诊断方面的优势与局限性,建立了基于故障树的故障贝叶斯网络用于故障诊断。随后,以CRH2B型动车组基础制动装置为实例,搭建故障树并完成故障贝叶斯网络的转化,证明了所提方法在复杂系统故障分析方面的优越性。文献[64-65]针对BCU和制动系统传感器开展了故障诊断研究。针对BCU模拟电路软故障在复杂电磁环境下的故障特征提取问题,提出一种基于形态学滤波和小波包能量熵的故障特征提取新方法;针对制动控制系统传感器在复杂电磁环境下的故障特征提取问题,提出一种基于EEMD能量熵的故障提取新方法,并利用最小二乘支持向量机(Least squares SVM, LSSVM)作为分类器进行传感器故障诊断。文献[66]考虑到实际情况中故障数据通常少于正常数据,因而提出一种基于LSSVM的改进方法解决数据不平衡下的分类问题,并将其应用于高速列车制动系统的故障诊断。

近两年,本课题组在高速列车制动系统故障诊断方面也取得了部分研究成果。文献[67]公开了一种动车组制动系统传感器故障的诊断方法,该方法首先利用EEMD提取传感器信号特征,进而利用费舍尔判别分析实现故障分类,有效降低了基于SVM及改进方法进行故障分类算法的复杂度。文献[68]将多元统计过程监控领域中的主元分析和重构贡献图方法应用于动车组空气制动控制系统,实现传感器故障的检测和分离。另有部分工作^[69-70]基于中国中车青岛四方车辆研究所有限公司的高速列车制动试验台(见图2)开展故障诊断算法研究和相应的实验验证工作。该试验台为1:1综合机电测试系

统, 对应于我国某型号动车组制动系统. 试验台上安装的制动设备与实际运营动车组上的制动设备相同, 并可以完成多种制动模式/级别的测试. 文献 [69–70] 针对动车组制动缸子系统, 提出一种新的故障检测指标和故障分离策略, 用于制动缸压力传感器故障、制动缸性能退化以及气体泄漏故障的检测与分离, 并进行了实验验证, 所提方法有效并优于当前故障诊断逻辑. 文献 [71] 针对制动系统气制动泄漏故障的特点, 基于字典建立和稀疏表示工具提出了一种针对泄漏故障的快速检测方法. 针对微小故障检测问题, 文献 [72] 将平滑技术引入到多元统计监控领域, 提出两种微小故障检测指标, 并将其应用于制动系统压力传感器的多重微小故障检测, 实验验证了方法的有效性.



图2 高速列车制动试验台^[69]

Fig. 2 High-speed train brake test bench^[69]

1.3 运行控制系统故障诊断

高速列车运行控制系统, 简称列控系统, 根据列车在线路上运行的客观条件和实际情况, 对列车运行速度及制动方式等状态进行连续监督、控制和调整, 是列车的神经中枢, 可以有效地确保列车运行安全. 目前, 我国运营的大部分高速列车采用的列控系统为 CTCS-3 (Chinese train control system, level 3). 列控系统包括地面设备和车载设备, 本文主要概述列车车载设备故障诊断的研究现状. 主要研究成果分为两类: 1) 利用贝叶斯网络或神经网络等工具对列控系统车载设备进行故障诊断; 2) 针对高速列车位置和速度跟踪问题, 考虑执行器故障以及参数不确定性等因素, 设计故障诊断策略及容错控制方案. 由于第 2 类研究成果与列车运行控制息息相关, 所以也将其归为列控系统故障诊断与容错控制研究范畴.

文献 [73] 以京沪高铁为例, 对 CTCS-3 列控系统在实际运用中常见故障及其处理方法进行了概述, 旨在对现场高铁信号设备的维修提供一定帮助. 文献 [74] 提出一种多源异构数据融合策略, 进而为高铁信号系统提供智能维护决策支持, 并在武广线列控系统车载设备的维护数据上进行了验证. 针

对列控系统速度距离模块, 文献 [75] 利用车载 GPS 信息提出一种基于平行滤波的算法架构用于检测里程表故障, 进而利用不同故障模式的不同特性提出一种基于规则的诊断策略. 贝叶斯网络及其改进算法被广泛应用于列控车载设备的故障诊断研究^[76–79]. 文献 [76] 以故障追踪表为数据源, 建立列控系统的贝叶斯网络, 进而完成故障诊断工作. 在建立贝叶斯网络结构方面, 文献 [77] 主张充分利用现场数据与先验知识, 并通过融合不同方法得到最优的贝叶斯网络结构. 文献 [78] 将模糊理论和贝叶斯网络相结合, 建立了基于模糊贝叶斯决策的列控车载设备故障诊断方法. 文献 [79] 首先基于历史故障数据构建故障诊断决策表, 并对其属性进行约简, 从而降低贝叶斯网络诊断模型的复杂度. 然后, 通过对故障征兆进行文本挖掘, 找出故障征兆间潜在的关联关系, 以更新贝叶斯网络诊断模型, 提高故障诊断可靠性. 此外, 基于案例推理、文本挖掘以及深度学习技术的故障诊断方法也被应用于列控系统. 文献 [80–81] 分别介绍了案例推理技术和神经网络与案例推理相结合的方法在列控车载设备故障诊断中的应用. 文献 [82] 以故障文本信息为依据, 基于文本挖掘对故障追踪表进行分析和特征提取, 进而利用贝叶斯网络完成故障诊断. 文献 [83] 以车载设备的维护数据为依据, 首先提出一种融合语义特征的两级故障特征提取方法, 进而采用基于 SVM 的分类器和分级策略对车载设备两级故障模式进行诊断. 文献 [84] 将当前流行的深度学习应用于列控系统车载设备故障诊断, 并与 K 近邻算法和基于 BP 算法的人工神经网络进行了对比.

针对高速列车速度和位移跟踪控制问题, 文献 [85] 首先建立列车动力学模型, 研究列车运行中牵引(制动)力与位移、速度及加速度的关系, 分析列车系统的固有特性, 进而结合控制目标建立有效的鲁棒自适应及容错牵引/制动控制策略. 研究考虑了列车的运行空气阻力和轨道环境附加阻力、牵引电机/制动装置的饱和非线性特性、相邻车厢间的作用力以及可能的执行器/传感器故障. 文献 [86] 在牵引/制动系统发生故障, 列车线性模型参数已知、线性模型部分参数未知和非线性模型三种情况下分别设计了相应的容错控制策略. 文献 [87] 基于高速列车动力学模型提出一种牵引与执行器故障程度识别模型, 并基于此采取重构容错控制, 从而保证列车速度和位移的正常、可靠跟踪. 针对类似问题, 文献 [88–89] 分别提出神经自适应容错控制和分布式容错控制策略.

1.4 网络及其他系统故障诊断

列车网络控制系统主要实现车辆内部和车辆之

间的通信传输、协调控制以及系统诊断功能,其主要的硬件组成包括中央控制单元、终端单元、输入/输出单元和显示器。相比上述牵引、制动和列控系统,针对高速列车网络控制系统的故障诊断研究几乎未见系统性报道。这是因为高速列车网络系统在设计阶段就具有很高的安全性和可靠性要求,并伴有硬件冗余^[90-91]。通常,一些典型的网络测试方法可以有效地诊断列车网络系统的异常。例如,文献[92]介绍了基于检测设备 FLUKE DTX-1800 的高速动车组网络通信双绞线(绞线式列车总线和多功能车辆总线)检测方法和实际生产过程中常见故障处理办法。

除了上述针对高速列车信息控制系统的故障诊断研究工作之外,文献中报道较多的研究主要针对列车的走行部/悬挂系统。例如,文献[93]针对列车走行部的四种模式,即原车、抗蛇行减振器失效、空气弹簧失气和横向减振器失效,提出一种基于排列组合熵的故障诊断方法。针对同样问题,文献[94]提出基于 EEMD 和 5 种信息熵相结合的方法。文献[95]针对横向减振器故障信号非线性非平稳的特点,提出基于白噪声统计特性与 EEMD 相结合的故障诊断算法。针对列车主动悬挂系统,文献[96]提出一种基于模型的方法诊断执行器间歇故障,并通过仿真结果验证了方法可行性。文献[97]提出一种基于递归最小二乘算法的状态监测策略,并将其应用于高速列车垂直主悬挂系统故障检测。

2 亟待解决的问题

目前,为确保高速列车行车安全,其信息控制系统已经具备基本的故障诊断功能以及相应的安全控制策略。除极个别的安全事故以外,高速列车总体运行安全可靠,是安全系数非常高的交通工具。然而,由各种不明事故造成的高速列车紧急停车或晚点仍时有发生。此外,故障排查与设备维护在很大程度上依赖于技术人员的经验,有时甚至难以定位故障根源而只能更换器件以消除故障隐患。因此,当前监控策略处理复杂类型故障的能力以及故障自动检测与定位水平仍然有待提升。下文给出了高速列车故障诊断研究中存在的几个亟待解决的问题,并简要探讨了这些问题可能会采取的思路、方法或技术。

1) 现有的先进故障诊断算法没有在高速列车信息控制系统中得到充分利用。故障诊断技术发展已有 40 余年,期间有大量经典、成熟的故障诊断算法得以发表。而目前高速列车各个子系统采用的故障诊断策略通常比较简单,虽然总体上可以有效保障列车运行安全但细节上如故障定位能力尚有不足。若可以把现有的先进诊断算法成功地应用到高速列车系统中,将有效地提高其故障诊断能力和设备维

护能力。其难点在于先进的故障诊断算法通常要求被监控对象符合一些假设条件,若实际系统不满足假设条件,诊断算法的应用将会受到限制。为解决该问题,通常需要降低诊断算法对系统的要求以满足实际系统的特性,在诊断算法的最优性与实用性方面进行权衡。

2) 当前监控策略未能充分利用高速列车运维产生的大量数据。高速列车运行过程中信息控制系统需要对大量的测点及回路进行监视和控制,每节列车上安装有成百上千个传感器,且每日开行高速列车数量超越 4000 列(截至 2016 年 8 月)。因此,每天都会有大量数据产生,这些数据具有海量性、多样性以及数据整体价值大但密度低的大数据特征。有效地利用这些数据将有助于挖掘更多故障诊断相关信息。为实现该目的,需要针对高速列车运维数据的特点,研究相适应的数据建模方法,具体的技术路线可以借鉴诸如潜变量建模理论、时间序列分析、机器学习、大数据分析建模等技术。

3) 目前高速列车故障诊断技术针对的故障形式相对简单,对于复杂类型故障的研究较少。例如,间歇故障在我国高速列车技术人员中又称“活故障”,是指持续时间短,未经处理可自行消失,并可重复出现的非永久故障。这类故障广泛存在于实际系统却难于排查,若不能及时诊断并加以有效处理,可能会演变为永久故障并导致不良后果。因此,间歇故障的复现以及有效诊断值得研究。及时准确地诊断微小故障有助于将故障扼杀在萌芽状态,并为系统维护、维修提供有价值信息。然而,由于幅值微小且容易被噪声淹没,微小故障诊断具有一定挑战性。高速列车的多个子系统结构复杂,部件众多,容易发生复合故障。相比单一部件故障,复合故障的诊断尤其分离任务更具挑战性。现有文献中,已有部分研究成果用于解决上述复杂故障的诊断问题^[98-99],但其应用对象并非是高速列车信息控制系统。针对信息控制系统的间歇、微小与复合故障诊断问题,除了可以借鉴上述研究成果,还需要根据运维工程师的专家知识或通过大量的离线/在线测试去探究这些故障的具体表现形式与特征,进而提出相应的有效诊断方法。

4) 闭环控制下故障传播机理分析与诊断未得到很好解决。高速列车信息控制系统具有多级闭环控制结构,各个子系统之间密切相关,具有复杂的能量和信息的变换与传递。这种闭环控制结构为故障传播提供了条件,从而给闭环控制下故障诊断带来了困难。以空气制动控制系统为例,在制动过程达到稳态后,如果预控压力传感器发生漂移或偏差故障、闭环回路内发生气体泄漏,或充当控制器的 BCU 模块的控制输出发生偏差,都可能导致执行器——电空转换阀的继续动作,而故障根源却不易确定。在被控对

象数学模型已知的情况下, 已有研究成果针对一般线性系统报道闭环控制对故障诊断性能的影响^[100]. 当被控对象数学模型未知且观测量较少时, 分析闭环结构给故障诊断带来的影响会更加困难. 此时, 可以考虑利用系统辨识工具或数据驱动的方法^[101] 研究闭环下故障诊断问题.

5) 故障诊断技术的实际应用问题未得到很好解决. 高速列车信息控制系统故障诊断技术的发展不仅要有抽象的理论作为支撑, 还要具体落实到实用技术上. 通过调研发现, 虽然在高速列车故障诊断领域有诸多成果发表, 但大部分工作还是基于仿真模拟来验证方法有效性, 距离实际应用还有较大差距. 实用诊断技术的产生需要以安全性和可靠性为大前提, 综合考虑接口实现、原系统升级、软件兼容、经济性等多方面因素, 并进行充分的方案论证与大量的实验室/真实环境测试, 以及故障诊断领域研究人员和轨道交通领域专家的努力.

3 总结与展望

在过去的二十年中, 轨道交通技术在世界范围内经历了巨大变革. 自 2007 年 4 月 18 日实施第六次大提速以来, 我国的高铁事业已经取得了卓越的发展成就, 占据了发展速度最快、集成能力最强、营运里程最长、营运速度最高以及在规模最大等多项世界第一. 高速列车的安全可靠运行是高铁事业发展的先决条件. 早在 2006 年 2 月国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006~2020 年)》中, 就已经将“重大产品、复杂系统和重大设施的可靠性、安全性和寿命预测技术”列为需要重点研究的前沿技术之一, 而故障诊断技术正是保障系统安全、可靠运行的核心技术之一. 此外, 由发改委、交通运输部和铁路总公司于 2016 年正式印发的《中长期铁路网规划》也确立了我国高速铁路建设持续、快速发展的基调. 高铁事业的发展需求与人们对列车安全性的极高要求给高速列车故障诊断技术带来了挑战, 同时也带来了一些新的发展机遇. 基于此背景, 本文针对高速列车信息控制系统, 回顾了近年来国内外故障诊断技术的研究现状, 并指出了几个具有挑战性的问题.

展望未来, 高速列车信息控制系统故障诊断领域的研究包括以下几个方面:

1) 基于数据和知识相结合的故障诊断技术可能会成为高速列车故障诊断研究的一个发展趋势. 以控制理论为基础的基于解析模型的故障诊断方法发展最早且目前最为成熟, 在被控对象数学模型已知且准确的前提下, 通常能够给出令人满意的诊断结果. 然而, 高速列车是大规模复杂系统, 即使对于一个小部件, 例如空气制动系统中的电空转换阀, 也很

难建立其精确的数学模型. 而且, 高速列车运行环境恶劣, 通常会受到雷电、雨雪、侧风等恶劣天气, 以及振动、冲击等强干扰的影响. 这样的客观条件给基于模型的故障诊断方法带来了一定限制. 实际的高速列车系统都会配备大量的传感器用于关键设备及关键状态的监测或控制, 例如牵引系统中的电压/电流传感器、制动系统中的压力传感器, 这样就有大量的历史数据和实时数据可以获得. 此外, 还可以从一线工程师和专家那里获得大量的经验知识, 这就为研究基于数据和知识的高速列车信息控制系统故障建模和分析方法提供了必备条件.

2) 伴随着近年来计算机技术、机器学习与数据挖掘等智能技术的快速发展, 很多新方法和新技术例如深度学习也很有可能被应用到高速列车故障诊断中.

3) 高速列车信息控制系统不但可以获取压力、电流、电压等普通传感信息, 还可以获得图像、声波等信息. 若能有效地整合不同类型信息, 将有助于提高故障诊断的精度, 因此基于多源信息融合技术的故障诊断也是一个重要的研究方向.

4) 高速列车运行通常呈现出典型的“批次性”特点, 即同一列车需要在某一特定地域区间内反复执行运输任务. 因此, 借鉴针对批次工业过程的“迭代学习”思想, 设计可以利用历史运行信息和历史故障信息的诊断算法也值得深入思考.

References

- 1 Zheng S Q, Kahn M E. China's bullet trains facilitate market integration and mitigate the cost of megacity growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(14): E1248-E1253
- 2 Peng Qi-Yuan, Li Jian-Guang, Yang Yu-Xiang, Wen Chao. Influences of high-speed railway construction on railway transportation of China. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, **51**(3): 525-533
(彭其渊, 李建光, 杨宇翔, 文超. 高速铁路建设对我国铁路运输的影响. 西南交通大学学报, 2016, **51**(3): 525-533)
- 3 The 360doc. 1998 German high-speed rail car accident and 2005 Japanese railway accident [Online], available: <http://www.360doc.com/content/11/0725/18/2950524-135793573.shtml>, November 12, 2017
(360 个人图书馆. 1998 年德国高铁车祸与 2005 年日本列车出轨 [Online], <http://www.360doc.com/content/11/0725/18/2950524-135793573.shtml>, 2017 年 11 月 12 日)
- 4 The Sina Photo. High-speed train rear-end scene [Online], available: http://slide.news.sina.com.cn/c/slide_1.815-18359.html#p=10, November 12, 2017
(新浪图片. 航拍动车追尾事故现场 [Online], http://slide.news.sina.com.cn/c/slide_1.815-18359.html#p=10, 2017 年 11 月 12 日)
- 5 Fan Y X, Li Z, Pei J J, Li H Y, Sun J. Applying systems thinking approach to accident analysis in China: case study

- of “7.23” Yong-Tai-Wen high-speed train accident. *Safety Science*, 2015, **76**: 190–201
- 6 Jia Hua-Qiang, Li Li-Jun. Thoughts on improving the manufacturing level and operation quality of high-speed railway EMU in China. *Chinese Railways*, 2014, (1): 30–33
(贾华强, 李利军. 提高我国高铁动车组装备制造水平和运行品质的思考. 中国铁路, 2014, (1): 30–33)
- 7 Willsky A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, 1976, **12**(6): 601–611
- 8 Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, 1990, **26**(3): 459–474
- 9 Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Modern Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
(周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000.)
- 10 Zhou Dong-Hua, Hu Yan-Yan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 748–758
(周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术. 自动化学报, 2009, **35**(6): 748–758)
- 11 Ding S. *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms and Tools* (2nd edition). London, UK: Springer-Verlag, 2013.
- 12 Qin S J. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 2012, **36**(2): 220–234
- 13 Chen Qing, Xiao Qian. Research status and development trend of fault diagnosis technology for high speed trains. *Value Engineering*, 2016, **35**(11): 254–255
(陈庆, 肖茜. 高速列车故障诊断技术的研究现状及发展趋势. 价值工程, 2016, **35**(11): 254–255)
- 14 Ge Z Q, Song Z H, Gao F R. Review of recent research on data-based process monitoring. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(10): 3543–3562
- 15 Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis: Part II: qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 313–326
- 16 Dai X W, Gao Z W. From model, signal to knowledge: a data-driven perspective of fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(4): 2226–2238
- 17 Liu Jian-Qiang. The traction drive system of high-speed train. *Power Electronics*, 2011, (3): 56–62
(刘建强. 高速列车电气系统技术讲座第二讲: 高速列车牵引传动系统. 电力电子, 2011, (3): 56–62)
- 18 Liu Shi-Jia. Statistics and analysis of traction system faults for electric multiple unit. *Railway Locomotive and Car*, 2013, **33**(5): 80–85
(刘诗佳. 动车组牵引系统故障统计分析. 铁道机车车辆, 2013, **33**(5): 80–85)
- 19 Karaköse E, Gençoğlu M T. An analysis approach for condition monitoring and fault diagnosis in pantograph-catenary system. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Manchester, UK: IEEE, 2013. 1963–1968
- 20 Aydin İ, Karaköse E, Karaköse M, Gençoğlu M T, Akın E. A new computer vision approach for active pantograph control. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. Albena, Bulgaria: IEEE, 2013. 1–5
- 21 Song J, Lin X N, Zheng Y, Guo Q W, Sun J W. Traction transformer core multipoint grounded fault on-line monitoring system. In: Proceedings of the 2014 International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, China: IMECS, 2014.
- 22 Tian X J, Li Y H, Li X Q. Hybrid algorithm for traction transformer differential protection based on intrinsic mode function energy entropy and correlation dimension. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2014, **8**(7): 1274–1283
- 23 Dai C X, Liu Z G, Hu K T, Huang K. Fault diagnosis approach of traction transformers in high-speed railway combining kernel principal component analysis with random forest. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2016, **6**(3): 202–206
- 24 Dai Chen-Xi, Liu Zhi-Gang, Hu Ke-Ting, Gao Song. Fault diagnosis for traction transformer of high speed railway on the integration of model-based diagnosis and fuzzy Petri nets. *Power System Protection and Control*, 2016, **44**(11): 26–32
(戴晨曦, 刘志刚, 胡轲琰, 高松. 基于模型与模糊 Petri 网融合的高铁牵引变压器故障诊断. 电力系统保护与控制, 2016, **44**(11): 26–32)
- 25 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)
- 26 Li Yu-Chao, Tian Yong-Zhu, Gao Qin-Xiang. Study of 200 km/h traction converter fault diagnosis technology based on BP neural network. *Railway Locomotive and Car*, 2007, **27**(2): 4–7
(李玉超, 田永洙, 高沁翔. 基于 BP 神经网络的 200 km/h 牵引变流器故障诊断技术的研究. 铁道机车车辆, 2007, **27**(2): 4–7)
- 27 Dai Chong-Jing. Research of Fault Diagnosis in the Traction Converter of CRH3 EMU [Master thesis], Southwest Jiaotong University, China, 2015.
(代崇敬. CRH3 动车组变流器故障诊断的研究 [硕士学位论文], 西南交通大学, 中国, 2015.)
- 28 Xu X, Lu N Y, Yong J Q, Jiang B. Fault propagation analysis of IGBT fault in CRH5 traction system based on signed directed graph. In: Proceedings of the 2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu). Chengdu, China: IEEE, 2016. 1–6

- 29 Tian Z S, Ge X L. An on-line fault diagnostic method based on frequency-domain analysis for IGBTs in traction PWM rectifiers. In: Proceedings of the 8th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016. 3403–3407
- 30 Gou B, Ge X L, Wang S L, Feng X Y, Kuo J B, Habetler T G. 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 Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(5): 3816–3826
- 31 Hu K T, Liu Z G, Lin S S. Wavelet entropy-based traction inverter open switch fault diagnosis in high-speed railways. *Entropy*, 2016, **18**(3): Article No. 78
- 32 Dai Chen-Xi, Liu Zhi-Gang, Hu Ke-Ting. Research of fault diagnosis for the high-speed railway CRH2 EMUs inverters. *Computer Simulation*, 2016, **33**(4): 217–222
(戴晨曦, 刘志刚, 胡珂英. 关于高铁 CRH2 型动车组逆变器故障诊断研究. 计算机仿真, 2016, **33**(4): 217–222)
- 33 Xia J H, Guo Y B, Dai B J, Zhang X H. 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: IEEE, 2016. 1–6
- 34 Gou B, Ge X L, Liu Y C, Feng X Y. Load-current-based current sensor fault diagnosis and tolerant control scheme for traction inverters. *Electronics Letters*, 2016, **52**(20): 1717–1719
- 35 Zhang K K, Jiang B, Yan X G, Mao Z H. Sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to high-speed railway traction device. *ISA Transactions*, 2016, **63**: 49–59
- 36 Gou B, Ge X L, Pu J K, Feng X Y. A fault diagnosis and fault tolerant control method for DC-link circuit using notch filter in power traction converter. In: Proceedings of the 8th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016. 3230–3235
- 37 Guzinski J, Diguët M, Krzeminski Z, Lewicki A, Abu-Rub H. Application of speed and load torque observers in high-speed train drive for diagnostic purposes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(1): 248–256
- 38 Guzinski J, Abu-Rub H, Diguët M, Krzeminski Z, Lewicki A. Speed and load torque observer application in high-speed train electric drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(2): 565–574
- 39 Boccaletti C, Bruzzese C, Honorati O, Santini E. Rotor bars breakage in railway traction squirrel cage induction motors and diagnosis by MCSA technique, Part II: theoretical arrangements for fault-related current sidebands. In: Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics, and Drives. Vienna, Austria: IEEE, 2005. 1–6
- 40 Wu Y K, Jiang B, Shi P. Incipient fault diagnosis for T-S fuzzy systems with application to high-speed railway traction devices. *IET Control Theory and Applications*, 2016, **10**(17): 2286–2297
- 41 Wu Y K, Jiang B, Lu N Y, Yang H, Zhou Y. Multiple incipient sensor faults diagnosis with application to high-speed railway traction devices. *ISA Transactions*, 2016, **67**: 183–192
- 42 Ding Jian-Ming, Lin Jian-Hui, Wang Han, Lin Sen. Detection of the dynamic unbalance with cardan shaft applying the second wavelet transform and singular value decomposition. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, **50**(12): 110–117
(丁建明, 林建辉, 王晗, 林森. 万向轴动不平衡检测的二代小波变换奇异值方法. 机械工程学报, 2014, **50**(12): 110–117)
- 43 Ding J M, Lin J H, He L, Zhao J. Dynamic unbalance detection of cardan shaft in high-speed train based on EMD-SVD-NHT. *Journal of Central South University*, 2015, **22**(6): 2149–2157
- 44 Ding J M, Lin J H, Yu S W. Dynamic unbalance detection of cardan shaft in high-speed train applying double decomposition and double reconstruction method. *Measurement*, 2015, **73**: 111–120
- 45 He Xiao-Qin, Chang You-Qu. A novel approach for reliable gearbox fault diagnosis in high-speed train driving system based on nonlinear feature extraction. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015, (6): 31–39
(何晓琴, 常友渠. 一种运用非线性特征提取的动车牵引齿轮箱故障可靠诊断新方法. 现代制造工程, 2015, (6): 31–39)
- 46 Tang R X, Cheng X Q. Fault diagnosis for the gearbox of a high-speed train on generalized congruence neural networks. In: Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Engineering. Dalian, China: ASCE, 2015. 2209–2215
- 47 Zhang B, Tan A C C, Lin J H. Gearbox fault diagnosis of high-speed railway train. *Engineering Failure Analysis*, 2016, **66**: 407–420
- 48 Xiao W C, Yang Y, Wang H J, Li T R, Xing H L. Semi-supervised hierarchical clustering ensemble and its application. *Neurocomputing*, 2016, **173**: 1362–1376
- 49 Lee W Y, Lee D H, Ji H Y. Comparison of vibration signal analysis methods for effective gear fault detection. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **709**: 456–459
- 50 Zhang Jian-Bai, Peng Hui-Shui, Ni Da-Cheng, Liu Xiong. Overviewing braking technology of the high-speed trains. *Electric Drive for Locomotives*, 2011, (4): 1–4
(张建柏, 彭辉水, 倪大成, 刘雄. 高速列车制动技术综述. 机车电传动, 2011, (4): 1–4)
- 51 Wang Yue-Ming. *EMU Braking Technology*. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
(王月明. 动车组制动技术. 北京: 中国铁道出版社, 2010.)
- 52 Hu Zhun-Qing, Peng Jun-Bin, Cheng Wei-Dong. *EMU Braking System*. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012.
(胡准庆, 彭俊彬, 程卫东. 动车组制动系统. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.)

- 53 Wang De-Ming, Li Dong-Kai. Cause analysis and treatment suggestions on brake failures of the EMU. *Railway Locomotive and Car*, 2008, **28**(S): 243–245
(王德明, 李东凯. 动车组制动故障原因分析及处理建议. 铁道机车车辆, 2008, **28**(S): 243–245)
- 54 Li Wan-Xin, Zhang Yang, Lin Rong-Wen, Wang Le. Fault diagnosis and safety measures of EMU braking system. *Railway Locomotive and Car*, 2011, **31**(5): 39–42
(李万新, 章阳, 林荣文, 王乐. 和谐号动车组制动系统故障诊断及安全措施. 铁道机车车辆, 2011, **31**(5): 39–42)
- 55 Cao Hong-Fa, Qiao Feng, Wen Xi-Yuan, An Zhi-Peng. Reproduction and analysis of failure for braking system of CRH₃ EMU. *Railway Locomotive and Car*, 2011, **31**(5): 43–47
(曹宏发, 乔峰, 温熙圆, 安志鹏. 和谐号动车组制动系统故障再现及分析. 铁道机车车辆, 2011, **31**(5): 43–47)
- 56 Liang Xue, Yuan Fei. Common faults and emergency treatment of the air supply system for EMU. *Technology Innovation and Application*, 2015, (32): 153
(梁雪, 袁飞. 动车组制动供风系统常见故障与应急处理. 科技创新与应用, 2015, (32): 153)
- 57 Kang Lei, Li Yun-Long, Qiao Feng, Yang Chuan, Yang Zai-Bao. Cause analysis and preventive measures of high-low braking ratio disturbed fault for CRH380CL high-speed EMU braking system. *Railway Locomotive and Car*, 2016, **36**(6): 29–34
(亢磊, 李云龙, 乔峰, 杨川, 杨再保. CRH380CL 型高速动车组制动系统高低阶压力切换故障原因分析及预防措施. 铁道机车车辆, 2016, **36**(6): 29–34)
- 58 Qin Jia-Ying, Chen Shu-Jun. Description of the trouble diagnostic method for the braking system for high speed multiple units based on practical example. *Rolling Stock*, 2016, **54**(7): 41–43
(秦佳颖, 陈澍军. 基于实例的高速动车组制动系统故障诊断方法介绍. 铁道车辆, 2016, **54**(7): 41–43)
- 59 Yan Shu-Rong. A kind of study program of fault diagnosis expert system for brake of high-speed train. *Computer Knowledge and Technology*, 2010, **6**(32): 9097–9098
(严书荣. 一类高速列车制动故障诊断专家系统方案研究. 电脑知识与技术, 2010, **6**(32): 9097–9098)
- 60 Wang Meng. Design of PCB Board Testing System Based on LabVIEW [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2012.
(王猛. 基于 LabVIEW 的电路板故障测试系统的设计 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2012.)
- 61 Tian Jing-Yi, Yang Ye, Yang Xue-Feng, Guo Yang. Intelligent fault diagnosis method for high-speed trains. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2013, **40**(4): 531–533
(田静宜, 杨业, 杨雪峰, 郭阳. 高速列车智能化故障诊断方法. 化工自动化及仪表, 2013, **40**(4): 531–533)
- 62 Zhong Wen-Qi. Research of Fault Diagnosis of Train for Bayesian Network [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2012.
(钟文奇. 基于贝叶斯网络的列车故障诊断研究 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2012.)
- 63 Xu Lei, Wang Dan, Song De-Gang, Song Long-Long, Wang Tai-Yong. Fault diagnosis and research of the foundation brake rigging system based on the combination of fault tree and Bayesian network theory. *Manufacturing Automation*, 2016, **38**(2): 51–55
(徐磊, 王丹, 宋德刚, 宋龙龙, 王太勇. 基于 FTA 和贝叶斯网络的动车组制动系统故障分析. 制造业自动化, 2016, **38**(2): 51–55)
- 64 Ding Guo-Jun. Fault Diagnosis Methods for EMUs Brake Control System [Ph. D. dissertation], Beijing Jiaotong University, China, 2013.
(丁国君. 动车组制动控制系统故障诊断方法研究 [博士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2013.)
- 65 Ding Guo-Jun, Wang Li-De, Shen Ping, Yang Peng. Sensor fault diagnosis based on EEMD energy entropy and LSSVM. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, **32**(7): 22–25
(丁国君, 王立德, 申萍, 杨鹏. 基于 EEMD 能量熵和 LSSVM 的传感器故障诊断. 传感器与微系统, 2013, **32**(7): 22–25)
- 66 Liu J, Li Y F, Zio E. A SVM framework for fault detection of the braking system in a high speed train. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **87**: 401–409
- 67 Zhou Dong-Hua, He Xiao, Ji Hong-Quan. Diagnosis method for sensor faults of motor train unit braking system, Patent CN104596780B, April 26, 2017
(周东华, 何潇, 纪洪泉. 一种动车组制动系统传感器故障的诊断方法, 专利 CN104596780B, 2017 年 4 月 26 日)
- 68 Zhou Dong-Hua, He Xiao, Ji Hong-Quan, Tai Xiu-Hua, Sai Hua-Song. Sensor fault diagnosing method and system for air braking control system of motor train unit, Patent CN105204496B, January 12, 2018
(周东华, 何潇, 纪洪泉, 台秀华, 赛华松. 动车组空气制动控制系统传感器故障诊断的方法与系统, 专利 CN105204496B, 2018 年 1 月 12 日)
- 69 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
- 70 Zhou D H, Ji H Q, He X, Shang J. Fault detection and isolation of the brake cylinder system for electric multiple units. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017. DOI: 10.1109/TCST.2017.2718979
- 71 Guo Tian-Xu, Chen Mao-Yin, Sai Hua-Song, Tai Xiu-Hua, Zhou Dong-Hua. Rapid fault detection method for leakage failure of air brake system on high-speed rail. In: Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC2016). Chengdu, China: Systems Engineering Society of China, 2016. 6704–6708
(郭天序, 陈茂银, 赛华松, 台秀华, 周东华. 高速列车制动系统气制动泄漏故障快速检测方法. 第 35 届中国控制会议 (CCC2016). 成都, 中国: 中国系统工程学会, 2016. 6704–6708)
- 72 Ji H Q, He X, Shang J, Zhou D H. Incipient fault detection with smoothing techniques in statistical process monitoring. *Control Engineering Practice*, 2017, **62**: 11–21
- 73 Liu Yuan-Ping. Analysis and treatment measures for common faults of CTCS-3 train control system. *Technology*

- Wind*, 2012, (17): 74
(刘源萍. CTCS-3 级列控系统常见故障分析处理方法. 科技风, 2012, (17): 74)
- 74 Yang L B, Xu T H, Wang Z X. Agent based heterogeneous data integration and maintenance decision support for high-speed railway signal system. In: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China: IEEE, 2014. 1976–1981
- 75 Liu J, Cai B G, Wang J. A fault detection and diagnosis method for speed distance units of high-speed train control systems. In: Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, China: IEEE, 2016. 10258–10263
- 76 Cheng Yu. Research on Bayesian Network Based Fault Diagnosis of Train Control Systems [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2014.
(程雨. 基于贝叶斯网络的列控系统故障诊断研究 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2014.)
- 77 Zhao Yang, Xu Tian-Hua, Zhou Yu-Ping, Zhao Wen-Tian. Bayesian network based fault diagnosis system for vehicle on-board equipment of high-speed railway. *Journal of the China Railway Society*, 2014, **36**(11): 48–53
(赵阳, 徐田华, 周玉平, 赵文天. 基于贝叶斯网络的高铁信号系统车载设备故障诊断方法的研究. 铁道学报, 2014, **36**(11): 48–53)
- 78 Li Yi. Application Research on Fault Diagnosis of On-board Equipment of Train Control System Based on Fuzzy Theory and Bayesian Network [Master thesis], Lanzhou Jiaotong University, China, 2015.
(李逸. 模糊贝叶斯决策在列控车载设备故障诊断中的应用研究 [硕士学位论文], 兰州交通大学, 中国, 2015.)
- 79 Liang Xiao. Bayesian Network Based Fault Diagnosis Method of On-board Equipment for Train Control System [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2016.
(梁潇. 基于贝叶斯网络的列控车载设备故障诊断方法 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2016.)
- 80 Wang Zhen-Xian. CBR-based Fault Diagnosis System for Vehicle Equipment of High-Speed Railway [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2015.
(王振显. 基于案例推理的高铁信号系统车载设备故障诊断 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2015.)
- 81 Cao Zhe. Research on the Fault Diagnosis System for the Vehicle Equipment Based on Neural Network and Case-based Reasoning [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2016.
(曹哲. 基于神经网络与案例推理的车载设备故障诊断研究 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2016.)
- 82 Zhao Yang, Xu Tian-Hua. Text mining based fault diagnosis for vehicle on-board equipment of high speed railway signal system. *Journal of the China Railway Society*, 2015, **37**(8): 53–59
(赵阳, 徐田华. 基于文本挖掘的高铁信号系统车载设备故障诊断. 铁道学报, 2015, **37**(8): 53–59)
- 83 Wang Feng. Study on Text Mining Based Fault Diagnosis Method for Vehicle On-board Equipment of High Speed Railway [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2016.
(王峰. 基于文本挖掘的高铁车载设备故障诊断方法研究 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2016.)
- 84 Yin J T, Zhao W T. Fault diagnosis network design for vehicle on-board equipments of high-speed railway: a deep learning approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, **56**: 250–259
- 85 Song Qi. Robust Adaptive and Fault-tolerant Control of High Speed Trains [Ph.D. dissertation], Beijing Jiaotong University, China, 2014.
(宋琦. 高速列车的鲁棒自适应及容错控制 [博士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2014.)
- 86 Tao Tao. Fault-tolerant Control of High-speed Trains [Ph.D. dissertation], Beijing Jiaotong University, China, 2015.
(陶涛. 高速铁路列车容错控制 [博士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2015.)
- 87 Zhang Qiu-Ming. Actuator Fault Degree Identification and Fault-tolerant Control of High Speed Trains [Master thesis], Beijing Jiaotong University, China, 2016.
(张秋明. 高速列车执行器故障程度识别和容错控制 [硕士学位论文], 北京交通大学, 中国, 2016.)
- 88 Gao R Z, Wang Y J, Lai J F, Gao H. Neuro-adaptive fault-tolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*, 2016, **367–368**: 449–462
- 89 Wang Y J, Song Y D, Gao H, Lewis F L. Distributed fault-tolerant control of virtually and physically interconnected systems with application to high-speed trains under traction/braking failures. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(2): 535–545
- 90 Yang Wei-Feng, Feng Jiang-Hua, Yi Wei-Min. Safety design of network control system in high-speed train. *Electric Drive for Locomotives*, 2014, (3): 14–17
(杨卫峰, 冯江华, 易伟民. 高速列车网络控制系统安全性设计. 机车电传动, 2014, (3): 14–17)
- 91 Chang Zhen-Chen, Li Qiang. Network control system for CRH380CL high-speed EMU. *Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles*, 2017, **40**(3): 1–5
(常振臣, 李强. CRH380CL 高速列车网络控制系统. 电力机车与城轨车辆, 2017, **40**(3): 1–5)
- 92 Yu Hai-Bo. Automatic fault detection and location of high-speed EMU network twisted pair. In: Proceedings of the 8th China Intelligent Transportation Annual Meeting. Hefei, China: China Intelligent Transportation Systems Association, 2013. 330–335
(于海波. 高速动车组网络双绞线自动检测及故障自动定位. 第八届中国智能交通年会论文集. 合肥, 中国: 中国智能交通协会, 2013. 330–335)
- 93 Shi Guo-Liang, Li Xiao, Jin Wei-Dong, Gou Xian-Tai. Fault analysis of high-speed train bogie based on permutation entropy. *Application Research of Computers*, 2014, **31**(12): 3625–3627
(石国良, 李晓, 金炜东, 苟先太. 基于排列组合熵的高速列车走行部故障分析. 计算机应用研究, 2014, **31**(12): 3625–3627)

- 94 Qin Na, Wang Kai-Yun, Jin Wei-Dong, Huang Jin, Sun Yong-Kui. Fault feature analysis of high-speed train bogie based on empirical mode decomposition entropy. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, **14**(1): 57–64 (秦娜, 王开云, 金炜东, 黄进, 孙永奎. 高速列车转向架故障的经验模态熵特征分析. 交通运输工程学报, 2014, **14**(1): 57–64)
- 95 Li Hui, Jin Wei-Dong. Lateral damper fault diagnosis of high-speed train based on statistical characteristics of white noise and EEMD. *Application Research of Computers*, 2016, **33**(9): 2648–2651 (李辉, 金炜东. 基于白噪声统计特性与 EEMD 的高速列车横向减振器故障诊断. 计算机应用研究, 2016, **33**(9): 2648–2651)
- 96 Yan R Y, He X, Zhou D H. A diagnosis scheme for intermittent faults in active suspension systems of high speed trains. In: Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China: IEEE, 2016. 1297–1302
- 97 Liu X Y, Alfi S, Bruni S. An efficient recursive least square-based condition monitoring approach for a rail vehicle suspension system. *Vehicle System Dynamics*, 2016, **54**(6): 814–830
- 98 Zhou Dong-Hua, Shi Jian-Tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(2): 161–171 (周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述. 自动化学报, 2014, **40**(2): 161–171)
- 99 Zhang Ke, Zhou Dong-Hua, Chai Yi. Review of multiple fault diagnosis methods. *Control Theory and Applications*, 2015, **32**(9): 1143–1157 (张可, 周东华, 柴毅. 复合故障诊断技术综述. 控制理论与应用, 2015, **32**(9): 1143–1157)
- 100 Liu Y, Wang Z D, He X, Zhou D H. A class of observer-based fault diagnosis schemes under closed-loop control: performance evaluation and improvement. *IET Control Theory and Applications*, 2017, **11**(1): 135–141
- 101 Wang K, Chen J H, Song Z H. Data-driven sensor fault diagnosis systems for linear feedback control loops. *Journal of Process Control*, 2017, **54**: 152–171

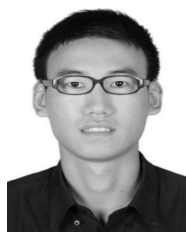


周东华 山东科技大学和清华大学教授. 主要研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制, 故障预测与最优维护技术. 本文通信作者.

E-mail: zdh@mail.tsinghua.edu.cn

(**ZHOU Dong-Hua** Professor at Shandong University of Science and Technology and Tsinghua University.

His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, fault prediction, and optimal maintenance. Corresponding author of this paper.)



纪洪泉 山东科技大学师资博士后. 2018 年在清华大学获博士学位. 主要研究方向为统计过程监控, 微小故障诊断. E-mail: jihongquansd@126.com

(**JI Hong-Quan** Postdoctoral fellow at Shandong University of Science and Technology. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2018.

His research interest covers statistical process monitoring and incipient fault diagnosis.)



何潇 清华大学自动化系副教授. 2010 年在清华大学获博士学位. 主要研究方向为机器人的群智能自主控制, 高速列车信息控制系统的故障诊断.

E-mail: hexiao@tsinghua.edu.cn

(**HE Xiao** Associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2010. His research interest covers intelligent autonomous control for robot swarms,

and fault diagnosis of the high-speed train information control system.)