

文章编号: 1005-0523(2025)04-0001-10



## 对高速列车系统完整性与智能运维的思考

张卫华

(西南交通大学轨道交通载运系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在过去的20余年间, 中国高速列车实现了跟跑、并跑到领跑的跨越。如今, 中国高铁不仅商业运营速度世界最高, 在生产 and 上线运营的高速列车数量世界最多, 百公里故障率世界最低, 而且运行平稳性世界最好。高速列车不仅成为国家的一张靓丽名片, 也成为新时代人民共享发展成果的生动写照。总结中国高速列车创新发展的成功, 可以归结我国为高速列车的系统完整性在世界上做得最好。系统完整性包括结构完整性、动力学完整性和功能完整性, 文章对系统完整性给出了定义, 并进行了诠释。高速列车的智能运维是当今研究热点, 文章以保障高速列车的系统完整性为目标, 对高速列车智能运维的“动态”检测评估、“智能”寿命预测和“预防”修程修制进行了讨论。

**关键词:** 高速列车; 智能运维; 系统完整性; 结构完整性; 动力学完整性; 功能完整性

中图分类号: U238

文献标志码: A

本文引用格式: 张卫华. 对高速列车系统完整性与智能运维的思考[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 1-10.

## Considerations on the Integrity and Intelligent Operation and Maintenance of High-Speed Train Systems

Zhang Weihua

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Over the past two decades, China's high-speed trains have advanced from a follower to a global leader, achieving the highest commercial operation speed, deploying the largest fleet of high-speed trains, recording the fewest failures per 100 km, and delivering the best running stability worldwide. High-speed trains have not only become a prominent symbol of national development, but also a vivid representation of equitable access to the benefits of modernization in the new era. The key to this remarkable success lies in the exceptional system integrity achieved in China's high-speed trains. System integrity includes structural integrity, dynamic integrity, and functional integrity. This article defines the concept of system integrity and provides a comprehensive interpretation. Intelligent operation and maintenance of high-speed trains has emerged as a major research focus in recent years. Aiming to safeguard system integrity, this article explores intelligent operation and maintenance strategies, including dynamic condition monitoring and evaluation, intelligent service life prediction, and preventive maintenance planning.

**Key words:** high-speed train; intelligent operation and maintenance; system integrity; structural integrity; dynamic integrity; functional integrity

**Citation format:** ZHANG W H. Considerations on the integrity and intelligent operation and maintenance of

收稿日期: 2025-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3400704); 中国国家铁路集团有限公司科研项目(K2022J004)

high-speed train systems[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 1-10.

高速列车所取得的辉煌成绩和强大的发展后劲,彰显着我国高铁技术的全面进步和厚积薄发的优势。中国高铁的今天,不仅让世人看到了高速列车关键技术的突破<sup>[1-4]</sup>和大规模列车群长期安全运营的成绩,更全面展示了从基础理论、试验平台到创新能力的整体实力。总结我国高速列车发展的经验,分析又快又好创新发展的影响因素,学者多会从技术、体制、精神、人才和平台层面进行探讨<sup>[5-10]</sup>。本文旨在从高速列车系统完整性视角来总结我国高速列车创新发展的成果之路;因为系统完整性深入扎实的研究工作,才保证了我国高速列车的快速健康发展,系统完整性应该是中国高速列车实现高速、平稳、安全运行的基石与根本。

随着人工智能的发展,轨道交通行业掀起了学习与应用人工智能的浪潮,智能运维已经成为轨道交通移动装备研究热点。然而,智能运维到底如何去做,很多研究人员更多是从检测、评估和维修过程如何应用自动化、信息化和人工智能做文章,笔者在文献[11]中对铁路机车车辆健康管理与健康状态修进行了一点思考,对机车车辆状态评估与分类的标准做出了合理的确定方式,并将机车车辆状态分为基本状态、性能状态、安全状态3种,指出了剩余寿命预测方案及修程修制改革方向,以期推动铁路机车车辆健康管理与健康状态修的发展。本文则从保障高速列车系统完整性的角度,再次讨论智能运维,不仅提出高速列车系统完整性中结构完整性、动力学完整性和功能完整性的状态检测与评估项点,同时向学界展示我国已经采取的相应检测技术和装备系统;指出高速列车的智能运维的发展方向就是状态修,而状态修的核心要素就是“动态”检测评估、“智能”寿命预测和“预防”修程修制。

## 1 高速列车系统完整性

对于高速列车,传统的结构完整性主要集中在承载或传递负载的结构部件上,如车体、转向架构架、车轴、轴箱和受电弓杆臂等机械结构,这些部件的失效在很大程度上也是取决于作用于其上的载荷和振动。同时,高速列车还包括材料退

化与磨耗,如悬挂元件和车轮。退化与磨耗不仅影响这些零部件的使用寿命,而且显著影响车辆系统动力学的性能。高速列车作为运送旅客的高端运送装备,其系统动力学性能,包括运动稳定性、运行平稳性与安全性,都是高速列车最核心的技术指标。此外,高速列车需要跑得快、停得住,车载网络能高效可靠运行,涉及旅客乘坐舒适性的空调、卫生、车门等系统需可靠运行等,这些功能子系统的退化会影响高速列车系统的功能或性能的发挥。因此,牵引、制动、网络、空调、卫生与车门等相对独立的子系统,属于功能性系统。

高速列车系统完整性框架如图1所示,包括高速列车结构完整性、高速列车动力学完整性和高速列车功能完整性。

1) 高速列车结构完整性,是指高速列车结构或者构件及机械类部件在复杂环境与载荷下的承载能力、使用寿命与可靠性达到设计所赋予的任务使命的能力,也就是结构完整性的传统定义。

2) 高速列车动力学完整性,是为车辆或者列车动力学研究定义的,以描述其在整个使用寿命内保持可接受的动力行为和动力学性能的能力。其中,动力学行为代表车辆部件上和部件之间负载和振动情况,而动力学性能则涉及整个车辆系统的运动稳定性、运行平稳性与安全性。

3) 高速列车功能完整性,是为功能子系统定义的,以描述其在整个预期寿命内保持良好功能的能力,包括其功能子系统及反映到整体系统的功能、性能及可靠性。

4) 高速列车系统完整性,是以上结构完整性、动力学完整性和功能完整性的集合,最终反映出列车整体的性能水平与保持能力。

可以看到,动力学完整性、结构完整性和功能完整性的集合就是高速列车的系统完整性<sup>[12-13]</sup>。我们在发展高速列车时,关键是如何做到其系统完整性,如何保证结构、动力学与子系统功能的完整性。

## 2 高速列车系统动力学完整性

车辆系统动力学在高速列车系统完整性中起

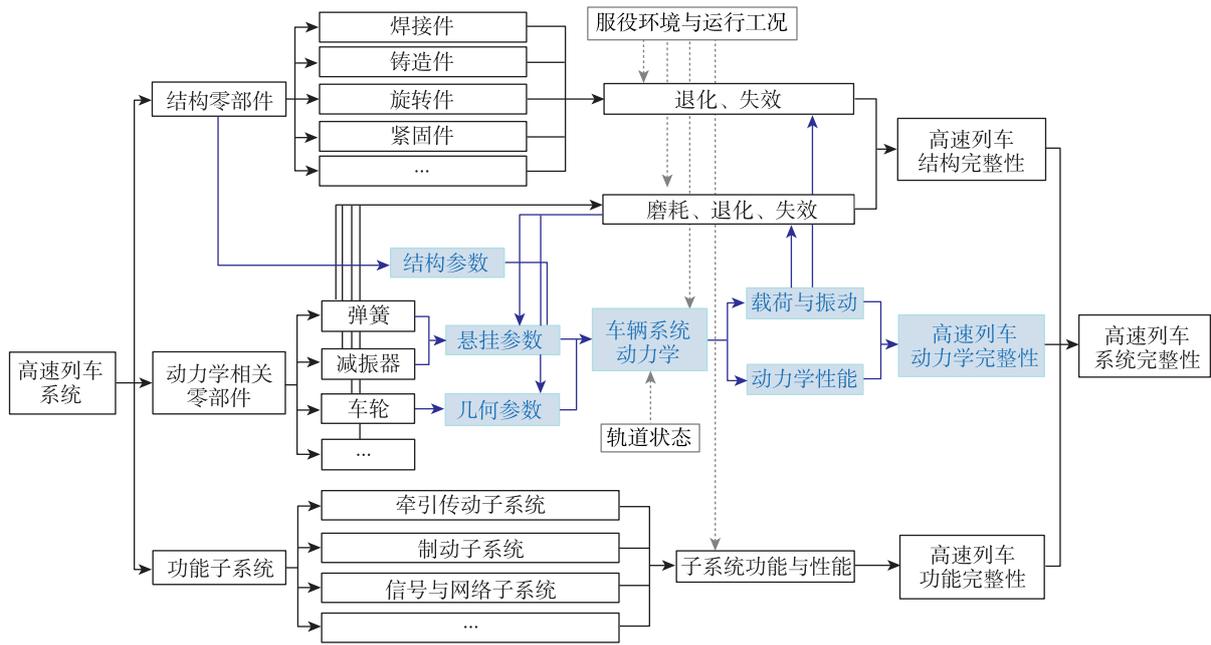


图1 高速列车系统完整性框架  
Fig. 1 System integrity of high-speed train

着核心作用。车辆系统动力学的输入包括来自结构部件的结构参数(例如质量、惯性矩、尺寸),来自悬架部件的悬架参数(例如刚度和阻尼),以及来自车轮的几何参数(例如车轮轮廓和锥度),甚至还有来自环境的影响(风雨雪及温湿度等)。当列车在特定的轨道和环境条件运行时,可以获得列车各部件上的载荷和振动情况,以及整个车辆系统的动力学性能。

高速列车的动力学完整性是为车辆或者列车系统动力学研究定义的,以描述其在整个使用寿命内保持可接受的动力行为和动力学性能的能力。其中,动力行为代表车辆部件上和部件之间载荷和振动情况,包括载荷与振动的分布、传递、传播和放大特征;而动力学性能则涉及整个车辆系统动力学性能,包括安全性、稳定性和平稳性指标,如图2所示。

由图2可知,高速列车的系统动力学完整性的核心内涵包括模型完整性,工况完整性,指标完整性和方法完整性4个方面。

1) 模型完整性。模型的完整性也就是模型对象的正确性,不仅高速列车自身模型要完整,也需要考虑到影响其动力学性能的相关系统,这正是高速列车耦合大系统动力学的优势,考虑了对象的系统性<sup>[14-15]</sup>;根据研究需要,模型应尽可能做到精细,

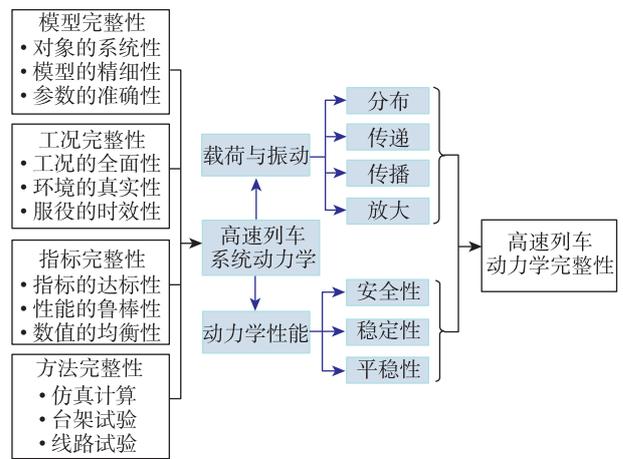


图2 高速列车动力学完整性内涵  
Fig. 2 Dynamic integrity of high-speed train

如从传统的多刚体模型发展到刚柔耦合模型,确保模型的精细性;作为动力学研究的基础,模型参数直接影响到最终的计算结果,因此需要确保参数的准确性。

2) 工况完整性。工况的完整性主要指计算时所考虑的工况要尽可能符合实际情况,考虑不同的高速列车运行条件,如牵引、制动、直线、曲线、坡度等运行工况,做到工况的全面性;需要真实体现列车运行遇到的风霜雨雪等运行环境,确保环境的真实性;服役过程会带来的结构、材料和参数的变化,

也就是具有时变性,因此计算模型与参数需要有时效性。

3) 指标完整性。指标就是动力学性能指标,运动稳定性、运行平稳性和安全性是动力学指标的3个要素。首先这些动力学指标需要达到相关标准要求,确保指标的达标性;其次,这些性能指标需要具有良好的稳定性,也就是在外部运行条件发生改变,或者列车自身参数发生变化时,动力学性能需要有良好的鲁棒性;最后就是这些指标参数需要均衡,也就是能相互兼顾,特别是直线、曲线的稳定性与安全性指标的均衡性。

4) 方法完整性。方法的完整性就是研究手段的完整性,包括仿真计算、台架试验与线路试验,其中,仿真计算主要是用于高速列车动力学研究与参数设计;台架试验主要是用于样车(或转向架)动力学性能验证及参数优化,线路试验是用于产品的应用考核与检验。随着我国高速列车线路试验研究的开展,线路试验也包括了研究性线路试验,特别是开展的运行列车的跟踪试验。

高速列车系统动力学的应用贯穿高速列车设计、试验和运行全过程。在设计阶段,需要进行整车的动力学研究,确定转向架的动力学参数,特别是悬挂参数;在台架和线路试验阶段,需要根据动力学研究的结果,进行动力学性能优化与安全性验证;在运行阶段,利用动力学研究方法,特别是数字孪生模型,对高速列车进行健康管理和安全评估。

### 3 高速列车结构完整性

传统的结构完整性旨在设计(结构、强度)、制造(锻造、压力加工、焊接等)、检验(外观、内在缺陷),以及运行(定期检验与无损检测)的各个阶段采用断裂力学原理对存在的缺陷或预计可能产生的缺陷进行定量的失效分析,以保证设备的安全可靠运行。本文所诠释的高速列车结构完整性,应该是广义的结构完整性。

#### 3.1 高速列车“结构件”定义

就高速列车而言,首先需要明确何为“结构”,一辆高速动车组是由成千上万的零部件所组成,有车体、转向架、牵引变压器、牵引变流器、牵引电机、牵引控制、列车控制网络系统、制动系统等8大主系统,空调系统、集便装置、车门、车窗、风挡、钩缓装置、受电弓、辅助供电系统、车内装饰和座椅

等10大辅助系统。就核心部件转向架而言,转向架也是由构架、轮对、轴箱和轴箱轴承、一系悬挂弹簧阻尼、二系悬挂弹簧阻尼、基础制动系统等组成,如果是动力转向架,转向架上还装有牵引电机、齿轮箱和联轴器等传动系统的大部件,另外转向架上还有清障器等小零部件<sup>[6]</sup>。因此,高速列车作为一个复杂的机电装备,哪些零部件属于结构件,根据高速列车的基本构造与功能属性,更加结构完整性的基本定义,这里给出高速列车结构件的基本定义。

**定义:**高速列车的结构件指用于承载或者传递力(或扭矩)的完整构件或者部件。

在这一定义下,复杂机械结构的转向架中,构架、车轮、车轴是典型的结构件,但各种起承力作用的减振器座、牵引座、基础制动和齿轮箱吊座都不算结构件;因为它们不是完整独立的构架,而是依附于转向架构件上的,转向架构架涵盖这些座子,并在强度或疲劳试验时,就需要同时在这些座子上加载相应的载荷。如果是动车转向架,牵引传动系统中的齿轮箱和联轴器是传力(扭矩)的部件,也属于结构件;同样是牵引传动系统的电机,它就不完全是结构件,它是产生力(扭矩)设备,但它同时需要机械结构起到支撑与约束作用,这些机械结构同样需要从结构完整性上设计、制造与考核;像牵引电机这样功能性部件,首先需要进行功能完整性考核,同时还需要进行结构完整性考核。转向架上还附加有基础制动部件,尽管制动系统在高速列车的设计时,有专门的部门进行设计,不属于转向架设计部门的工作,但由于与转向架设计十分密切,基础制动在转向架设计中越来越倾向于一起考虑。基础制动的夹钳等机械零部件还是需要按照完整性的要求进行设计、制造与试验。在转向架上还有一个十分重要的部件就是轴承,在牵引系统的电机、齿轮箱中都有多个轴承,承力最大、严重影响运行安全的是轴箱轴承。轴承是一个部件,也是承力件,而且还伴随运动,轴承的内外圈、滚子和保持架等多存在结构疲劳破坏问题,因此,转向架上的轴承是十分重要的结构件。

高速列车最大的部件是车厢,其实车厢由车体、内装、座椅(或卧铺)、卫生间、配电间、门窗、风挡等组成,另外还装有钩缓等。车体,也称车体钢结构,是主要承载结构,典型的结构件,这也是高速

列车生产企业重点要打造的大部件,需要经过结构完整性研究的各种流程,以保证在30年左右长服役周期内的完整性。车厢内还有很多部件都是外购件,如内装件、门窗、风挡、钩缓等,这些外购件的产品质量一般都是由外购件生产厂家来保证,但门窗、风挡等由于要受力,也需要生产厂家考虑结构完整性的问题。

### 3.2 高速列车结构完整性的基本内涵

结构完整性研究在航空航天、核能、石化等行业已较为完善,在高速列车的研究中并没有系统贯穿,但相关实际工作已在各环节中开展,无论是设

计、制备到试验,其实都是按照结构完整性要求开展的。因此,高速列车的结构完整性,是在其他行业开展结构完整性研究的基础上,根据高速列车的功能、性能与服役环境要求,进行系统梳理和重新定义。高速列车的结构完整性的基本内涵如图3所示,涉及设计完整性、分析完整性、制备完整性、试验完整性、评估完整性和运维完整性,最后实现高速列车的结构完整性。从图3所示的高速列车结构完整性的基本内涵,也可以简单理解为从设计、分析、制备、试验等流程上,保证在每一个流程上都做到完整,这就可以实现结构的完整性。

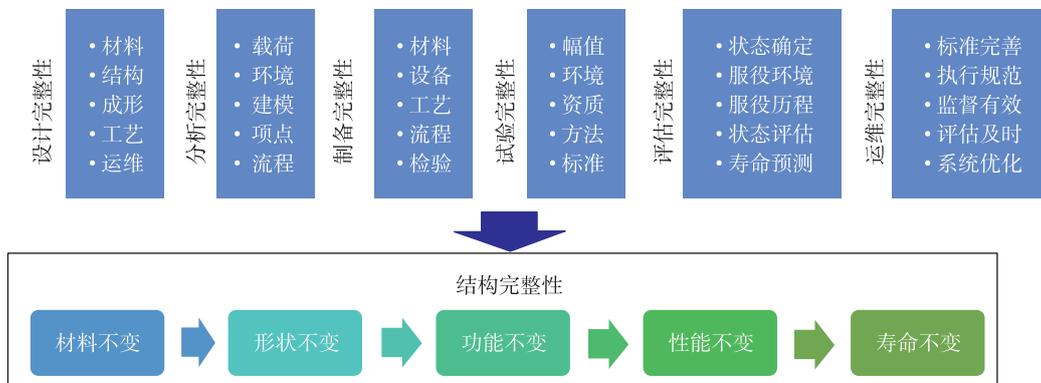


图3 高速列车结构完整性的基本内涵  
Fig. 3 Basic connotation of structural integrity of high-speed trains

为了保证结构的完整性,首先要认定结构完整性到底有什么要求或者是如何定义的。结构的完整性体现在能力的保持,这就需要在整个服役期间做到5个“不变”。

1) 材料不变。所谓材料不变,是指材料在服役过程中其组织成分与组织结构不能产生明显的改变。材料不变的要求对有机材料而言,是难以做到的;因为环境因素,如温度、湿度、光照、盐雾等都容易对有机材料产生作用,使之发生变化,最终影响到性能。对金属材料而言,特别是钢材等黑色金属,材料不变似乎容易做到,但结构件表面还是会受到环境的影响,结构件表面的材料在组分甚至组织上发生变化,特别是氧化物的产生,导致性能的改变。如何才能做到材料不变,这是结构完整性研究重点之一。

2) 形状不变。所谓形状不变,是指结构形状与尺寸在服役过程中不能明显产生变化。由于在高速列车的结构件一般都是承载结构,长期载荷的作

用,加上环境的影响,结构的形状(含尺寸)就有可能产生变化。高速列车作为一个复杂而又紧密的机械装备,有些结构件,如定位拉杆、轴承等,细微的形状与尺寸变化就会引起结构件或者零部件的性能发生变化,甚至引起失效。如何控制结构件的形状变化是结构完整性研究的基本任务。

3) 功能不变。所谓功能不变,是指结构件在服役过程的基本功能不能丧失。在高速列车轻量化要求越来越高的时代,高速列车所有结构件的存在都是有它的理由的;这个理由就是要完成某一项或者多项功能,也许是承载,也可能是支承,甚至可能是为了美观。因此,当然不希望结构件功能在服役过程中出现下降甚至丧失的情况。

4) 性能不变。所谓性能不变,是指结构件在服役过程的性能参数不能有明显变化,这也是能力保持的核心指标。随着结构材料机械性能的改变,结构形位尺寸的改变,都会导致结构件性能的变化。在高速列车中,结构件的刚度、阻尼和承载能力的

退化都是难以避免的,结构完整性研究,旨在避免或者减少这样的性能变化,提高性能的鲁棒性。这也是结构完整性研究最核心的任务。

5) 寿命不变。所谓寿命不变,是指结构件的全生命周期在服役过程中不能产生变化,也就是服役寿命应该达到设计寿命的要求。我国高速列车的设计寿命从早期的20年、25年,现在已经延伸到30年,甚至已接近设计寿命的高速列车还在考虑是否可以延长服役时间。因此,高速列车设计寿命的保证,甚至延长使用寿命,是结构完整性研究的重要课题。

前面已经比较系统介绍了高速列车动力学完整性和结构完整性,对于高速列车的功能完整性,相对来说比较容易理解,结合智能运维的状态检测与评估后文一并介绍,这里不再赘述。

#### 4 基于系统完整性的高速列车智能运维

智能运维是目前轨道交通移动装备运维技术发展方向。高速列车有着严格的修程修制,目前基

本还是严格按照修程修制进行定期(时间或者里程)预防性策略,但更加科学合理的状态修越来越受到重视。系统开展状态修在国能装备公司重载货车上有过成功的尝试<sup>[7]</sup>,并取得良好的效果,相信随着智能运维技术的发展,状态修也可以很好地在高速列车上得到应用。

##### 4.1 高速列车系统完整性的状态检测与评估

高速列车智能运维的目的就是保持高速列车的能力,对于传统机械系统而言,一般关注的是结构完整性状态和功能系统状态。本文所关注的是系统完整性保持,也就是结构完整性、动力学完整性和功能完整性的保持。基于系统完整性的高速列车智能运维的状态检测与评估项点如图4所示,智能运维就是围绕这些状态项点进行检测与评估,并通过针对性的维修来实现这些状态的保持。具体的维修是根据状态评估的情况实施的,相关的检修技术这里并不介绍,下面结合目前我国铁路,特别是高速列车的检测系统来诠释如何进行系统完整性状态检测的。

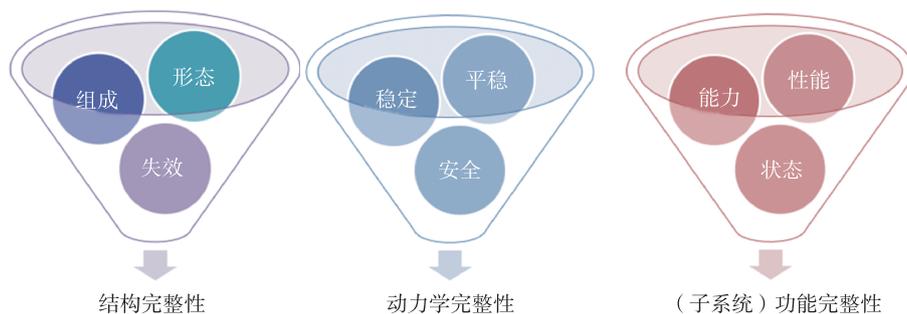


图4 基于系统完整性的高速列车智能运维项点

Fig. 4 Intelligent operation and maintenance points for high-speed trains based on system integrity

##### 4.1.1 结构完整性的状态检测与评估

结构完整性直接影响到高速列车的行车安全性,结构完整性的状态十分重要,是首要关注点。就高速列车结构完整性而言,其状态主要是指组成、形态与失效。

1) 组成,是指高速列车上的各零部件是否完整,也就是是否有缺失,如果车上,特别是转向架上,有零部件缺失是不允许的。因此,基于视觉的检测系统不断涌现,发展了不同用途的地面视觉检测系统,包括早期铁路5T<sup>[18-19]</sup>中的TFDS(车载图像检测系统或货车运行故障图像检测系统),后来客车的TVDS(车辆动车组运行故障图像检测系统)和

高铁的TEDS(动车组运行故障图像检测系统),都是在线路上安装高速、高清拍摄系统,对车下设备,特别是转向架进行零部件完整性检测,看有没有零部件的遗失。

2) 形态,是指高速列车上的各个零部件是否正常,也就是其尺寸大小与位置是否发生改变。其实铁路5T中的TFDS、客车的TVDS和高铁的TEDS也具备形态的检测功能,但形态检测远比零部件缺失检测困难得多,如螺帽有没有在拧紧状态,是不是出现螺帽松动,需要对螺帽位置进行辨识。如果螺帽上有标记还比较好辨识,只需要对标记位置辨识有没有改变就行;如果没有,就需要

通过历史数据的对比进行表述。对于尺寸变化,更多是用于车轮或者滑板的磨耗检测上,如铁路5T系统中的TWDS(轮对状态在线检测系统)采用LY(轮对故障检测系统)对轮对外形尺寸自动检测,检测项点包括:踏面磨耗、轮缘厚度、车轮直径、轮对内距;又如SJ(受电弓及车顶状态动态监测系统),对受电弓和车顶高压设备进行完整性检查。随着高速列车动车所向“动车医院”的概念发展,后来还有了列车360°外观图像检测系统,对整个列车的外观从上到下、从左到右进行周身的检查。图5是成都运达科技股份有限公司网站上展示的列车360°外观图像检测系统,该系统采用多维视觉采集方案对通过检测区域列车的关键部件及系统,包括走行部、牵引、受流、制动供风、车门车窗、空调等进行实时高清成像,通过计算机视觉、深度学习和基于数据驱动的分级预警等人工智能技术,实现列车关键部件异常情况自动识别报警。



图5 360°列车外观图像检测系统

Fig. 5 360° train appearance image detection system

3) 失效,是指高速列车上的各个零部件是否出现结构件疲劳失效或者部件的故障,部件的故障主要指轴承、齿轮箱、电机等运动部件的故障。如铁路5T系统中的THDS(红外轴温探测系统)和TADS(货车滚动轴承早期故障轨边声学诊断系统),主要对转向架上的轴承(主要是轴箱轴承)进行状态检测,通过轴承的热状态和运行声音状态进行评估。在结构疲劳失效方面,理论上5T中的TFDS、客车的TVDS和高铁的TEDS也具备结构件疲劳失效的检测能力,但对结构件裂纹比较困难,这也许是未来需要加强研究的检测技术。由于高速列车车轮的结构完整性直接影响行车安全,因此,在高速列

车的运维体系中有专门针对车轮疲劳失效进行的检测,包括LU(移动式轮辋轮辐探伤系统)、LA(固定式轮辋轮辐探伤系统),它们被设置在动车检修库的动车检修轨道的作业坑道里,利用超声探伤技术自动检测轮对的轮辋和轮辐缺陷。图6是作业中的LU设备;LY-LD(轮对故障动态检测系统),包括LY对车轮踏面的磨耗、擦伤、剥离等几何缺陷状态进行检测,同时通过在轨道上安装的超声波探测阵列,对车轮轮辋进行裂纹检测。对于车轴,由于高速动车组车轴普遍采用空心轴承,利用中心孔,也可以进行超声波裂纹检测技术,进行整根车轴的缺陷检测,如图7所示。



图6 作业中的LU设备

Fig. 6 LU equipment in operation



图7 空心车轴超声波裂纹检测系统

Fig. 7 Hollow axle ultrasonic crack detection system

#### 4.1.2 动力学完整性的状态监测与评估

动力学完整性决定了高速列车的运行品质,对于用于旅客运输的移动装备,动力学性能尤为重要。就高速列车动力学完整性而言,其状态主要是指车辆系统动力学的3个要素:稳定性、平稳性、安全性。

1) 稳定性。是指高速列车是否出现蛇行失稳运动,高速列车各车辆的运动稳定性是否存在问

题。对于高速列车的失稳运动检测,一般采用车载检测与地面检测两种方法。铁路5T系统就有TPDS(铁路列车运行安全预警系统),后来动车组也采用了类似系统,它通过一定长度的测力钢轨,对轮轨力实现检测,通过轮轨力,特别是横向轮轨力的特征,分析有没有周期性的轮轨力,从而判断车辆运动有没有失稳。高速动车组加装了BIDS(失稳监测装置),通过安装在转向架构架对角处的横向加速度传感器检测振动响应,当转向架构架横向加速度峰值连续10次以上达到超过极限值 $8\sim 10\text{ m/s}^2$ 时,视为转向架产生蛇形运动,车辆处于失稳状态。

2) 平稳性。是指高速列车运行是否平稳,也就是车体的振动是否在运行平稳性控制范围内。我国在高速列车早期产品中没有这方面的检测系统,到了复兴号动车组研制时,为了掌握其动车组运行品质,开始加装动车组平稳性检测系统,也就是在车体上安装2个车体加速度传感器采集车体横向和垂向加速度,加速度传感器斜对称安装在转向架中心一侧1 000 mm的车体下方<sup>[20]</sup>,通过振动加速度值分析得到平稳性指标,看是否满足《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)要求,或者评判是否有异常振动,包括振动频率与幅值的分析。早期和谐号动车组因为轮轨匹配等问题,时常出现抖车(车体结构共振)或者晃车(车体运动失稳)的情况,但苦于没有车体振动监测系统,给引起异常振动的原因分析带来不便。

3) 安全性。是指高速列车运行是否存在安全隐患,也就是列车运行是否正常。其实铁路5T中的TPDS(铁路列车运行安全预警系统),就是为列车安全运行而设的,它通过轮轨力的测定,一方面看车辆是否运动失稳,另外看有没有超偏载等情况。在车辆系统动力学的3个要素指标中,稳定性是首先需要保证的,车辆一旦运动失稳,就直接影响到列车运行的安全性。因此,高速列车中专门有BIDS和动车组平稳性检测系统,确保高速列车运动稳定性不出问题,间接来保障运行安全。动车组特有的WTDS(动车组车载信息无线传输系统),会每隔一段时间就把车载的安全相关信息,包括前面提到的BIDS和动车组平稳性检测系统的信息,以及轴箱、齿轮箱、电机等轴承温度或振动等信息,传递到地面,通过地面动车所设置的分析系统,采用人工智能的分析方法,对高速列车的运行安全状态

进行进一步的分析与评估,最大程度保证列车的运行安全性。

#### 4.1.3 (子系统)功能完整性的状态监测与评估

牵引、制动、网络等高速列车的子系统的功能完整性决定了高速列车能否正常运行。虽然各功能子系统的功能任务、呈现形式、系统结构等可能不同,但就高速列车(子系统)功能完整性而言,其完整性内涵就体现在能力、性能、状态3个方面。

1) 能力,也就是各子系统的系统能力有没有缺失。如牵引系统是否具备牵引的能力,制动系统有没有制动的能力。

2) 性能,是指能力发挥的水平是否达到设计要求。如制动系统虽然可以实施制动,但由于制动能力不够,无法保障制动距离在设计控制范围内,影响到列车运行性能,甚至是运行安全。

3) 状态,是指功能子系统的各元器件的状态是否“在线”(是否正常),这体现出功能子系统是否可靠。如牵引系统目前的能力与性能是正常的,但可能某个元器件有性能蜕变甚至失效的风险(趋势),使得整个子系统最后演变为不完整的状态。

对于功能子系统的功能完整性检测,是通过各子系统自身的状态检测系统完成的。一般而言,各功能子系统都会有自检功能,自行完成完整性检查,这也是与结构完整性和动力学完整性检查需要依靠地面设备来完成的本质区别。

## 4.2 智能运维状态修的核心要素

智能运维是一个概念,是指以智能化技术作为手段的高速列车运维技术。一般概念的运维,研究的核心或者着眼的重点是“维”,也就是维护,包括保养与检修。智能维修的发展方向是状态修,状态修(condition-based maintenance, CBM)是一种基于实时或周期性监测数据、通过分析装备运行状态来制定维修策略的先进维护模式,从它的英文名称就可以看到是一种基于状态的维修。关于轨道交通移动装备的状态修讨论笔者在文献[11]详细论述过,这里给出状态修的核心要素。

1) “动态”检测评估。状态修首先是了解和掌握其状态。在高速列车的服役过程中,材料的退化、结构件的失效和参数的变化等都会影响到高速列车的最终的性能与服役安全性,高速列车的状态是时变的,是动态变化的,实时或者定期进行状态

检测十分必要,也就是强调服役状态的动态监测。与此同时,根据状态情况与状态的变化趋势,需要及时进行评估,以保障评估的时效性。因此,状态检测与评估的核心要素是“动态”。

2)“智能”寿命预测。状态修的难点是基于状态信息的寿命预测,有了预测的服役寿命,就可以进行维修决策。但寿命预测的准确性一直是状态修的难点,它一方面影响到状态修的质量,另一方面会影响高速列车运行品质与安全性。目前寿命预测的方法,一是根据大量的数据统计,特别是历史数据来推算,这一方法优点是简单、高效,但不够准确,也就是没有真正根据某一部件或系统的状态来预测,是按照一个普遍规律来预测的;二是严格根据状态数据,特别是历史数据和当前相关部件的数据,来进行预测的,这就是基于数据驱动的寿命预测;三是根据机理来进行的寿命预测,无论是动力学,还是结构可靠性,所有状态的发展都是有前因后果的,是按照某一种理论、规律或模型在发展的,如车轮磨耗到一定程度或者一定形状,车辆的动力学性能就会恶化,根据车轮磨耗与动力学性能之间的映射关系,就可以进行车轮磨耗寿命预测,这样的方法似乎更科学,好理解,但这种方法往往由于机理不清或规律不准,造成寿命预测困难。因此,这几年学界更多强调机理和数据的融合,也就是机理与数据双驱动的寿命预测,以提高寿命预测的准确性。不管寿命预测采用哪一种方法或者策略,唯一的核心要素和发展趋势的是“智能”,唯有智能,才有可能准确寿命预测。

3)“预防”修程修制。高速列车通过保养与维护来实现能力的保持,也就是保证其系统完整性。无论是目前高速动车组的五级修程修制,还是正在发展的状态修,都是预防修。目前我国高速列车的修程修制制定是根据大量运用与检修经验,来确定合理的检修项点与检修周期,来保障检修期内的状态与能力是高概率下可以保持的。状态修的发展,其实也不是有“状态”(有问题)就马上修,这往往不符合经济性要求,状态修通过状态评估与寿命预测,再动态确定维修项点,甚至维修周期,如车轮镟修,尽管车轮有镟修间隔要求,但目前基本上可以根据车轮磨耗状态来延长或是缩短维修间隔,实现经济镟修。因此,高速列车修程修制的改革,都会

以“预防”作为修程修制制定的基本要求。

## 5 结束语

本文在学界首次系统地提出了高速列车系统完整性的完整概念,并给出了高速列车结构完整性、动力学完整性和(子系统)功能完整性的定义。笔者试图总结我国高速列车创新发展的经验,但高速列车系统完整性也是笔者在两年前才提出,并不断进行完善的,仍需要广大学者一起来总结提高,以期成为我国高速列车创新研究的基本框架,支撑我国高速列车的健康发展。

高速列车智能运维是目前研究的热点,石家庄铁道大学成立了高速列车智能运维铁路行业重点实验室,华东交通大学成立了机车车辆智能运维铁路行业重点实验室。特别是华东交通大学连续主办了三届“机车车辆智能运维学术论坛”,笔者有幸在“第三届机车车辆智能运维学术论坛”上第一次从系统完整性角度谈高速列车智能运维,也就是本文的相关内容。当然,这仅仅是一点思考,还需要有更多理论支撑与工程实践。希望笔者的一点思考,能对高速列车智能运维技术的进步与体系的建设有所帮助。

### 参考文献:

- [1] 黄强. 高速列车系统集成[M]. 北京: 科学出版社, 2025.  
HUANG Q. High-speed train system integration[M]. Beijing: Science Press, 2025.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司. 快速发展的中国高速铁路[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.  
China Railway. The rapid development of China's high-speed railways[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [3] 中国国家铁路集团有限公司. 中国高速铁路[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.  
China Railway. China's high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023.
- [4] 傅志寰, 李中浩. 中国高速列车: 关键技术篇[M]. 人民交通出版社, 2025.  
FU Z H, LI Z H. China's high-speed train: key technologies[M]. China Communications Press, 2025.
- [5] 严嵩艳, 唐方成. 我国高铁技术创新的制度逻辑及变革路径[J]. 科研管理, 2022, 43(2): 1-8.  
YAN A Y, TANG F C. Institutional logic and developmental path of technological innovation of China's high-speed

- rail system[J]. *Science Research Management*, 2022, 43(2): 1-8.
- [6] 周川云. 中国高速列车技术创新网络研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
ZHOU C Y. The research on technological innovation network of China's high-speed train[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [7] 沈锐. 新时代高铁精神内涵解读[J]. *理论学习与探索*, 2021(4): 74-76.  
SHEN R. Interpretation of the connotation of high-speed spirit rail in the new era[J]. *Theory Studying and Exploration*, 2021(4): 74-76.
- [8] 汪一舟. 论中国高铁制造发展模式的工匠精神[J]. *齐齐哈尔大学学报(哲学社会科学版)*, 2017(6): 55-57.  
WANG Y Z. The Theory of craftsman spirit about china high-speed railway development[J]. *Journal of Qiqihar University(Philosophy & Social Science Edition)*, 2017(6): 55-57.
- [9] 郑世林, 胡惜玥. 项目动员制: 一种关键核心技术攻关和自主产品迭代赶超的新型举国体制[J]. *产业经济评论*, 2025(1): 5-27.  
ZHENG S L, HU X Y. Project mobilization: a new type of national system for breakthrough of key core technology and iterative caught-up of independent products[J]. *Review of Industrial Economics*, 2025(1): 5-27.
- [10] 李彦. 中外高铁发展的公共政策规划比较研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(15): 108-113.  
LI Y. Comparative study on public policy planning of high-speed rail development in China and abroad[J]. *Science Technology and Industry*, 2023, 23(15): 108-113.
- [11] 张卫华, 李权福, 宋冬利. 关于铁路机车车辆健康管理与健康状态修的思考[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(4): 379-389.  
ZHANG W H, LI Q F, SONG D L. Thoughts on health management and condition-based maintenance of rolling stocks[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(4): 379-389.
- [12] ZHANG W H, ZENG Y C, SONG D L, et al. Vehicle dynamics-centered framework for defining and assessing system integrity of high-speed trains[M]//*Advances in dynamics of vehicles on roads and tracks III*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 134-144.
- [13] ZHANG W H, ZENG Y C, SONG D L, et al. Theory and practice for assessing structural integrity and dynamical integrity of high-speed trains[J]. *Railway Sciences*, 2024, 3(2): 113-127.
- [14] ZHANG W H. Dynamics of coupled systems in high-speed railways-theory and practice[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [15] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2022.  
ZHANG W H. Dynamics of coupled systems in high-speed railways: theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2022.
- [16] 张卫华. 动车组总体与转向架[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.  
ZHANG W H. EMU overall and bogies[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [17] 康凤伟, 王洪昆, 王蒙, 等. 铁路货车状态修方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2023.  
KANG F W, WANG H K, WANG M, et al. Method and practice of condition-based maintenance for railway freight cars[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [18] 梁凤超. 铁路车辆运行安全监控(5T)系统的应用[J]. *科技视界*, 2017(34): 176-177.  
LIANG F C. Application of railway vehicle operation safety monitoring (5T) system[J]. *Science & Technology Vision*, 2017(34): 176-177.
- [19] 高艳艳, 王玉辉, 李志平. 铁路车辆运行安全监控系统“5T”的应用研究[J]. *科技资讯*, 2016, 14(28): 54.  
GAO Y Y, WANG Y H, LI Z P. Research on the application of railway vehicle operation safety monitoring system “5T”[J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(28): 54.
- [20] 张瑞芳, 辛恩承, 刘峰, 等. 基于运行模态参数辨识的动车组异常振动在线监测技术[J]. *中国铁路*, 2023(9): 1-8.  
ZHANG R F, XIN E C, LIU F, et al. Online monitoring technology for abnormal vibration of EMU based on operation modal parameter identification[J]. *China Railway*, 2023(9): 1-8.



通信作者: 张卫华(1961—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 国家973计划项目首席科学家, 享受国务院政府特殊津贴专家, 研究方向为轨道交通移动装备系统动力学。E-mail: tpl@swjtu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)