

## • 轨道交通运维技术 •

**栏目评述:**《交通强国建设纲要》提出“大力发展智慧交通”“推广应用交通装备的智能检测监测和运维技术”,轨道交通运维技术成为我国轨道交通领域新的焦点。本栏目从健康管理及状态维修方案、可靠性分析方法、多级维修策略、智能养护技术及装备等多个维度,探索轨道交通运维技术的发展方向。《关于铁路机车车辆健康管理及状态修的思考》一文基于机车状态和检测方法,提出科学合理的剩余寿命预测方案及修程修制改革方向,为推动铁路机车车辆健康管理及状态修的发展提供了理论基础。《基于离散时间贝叶斯网络的列控中心可靠性分析》一文建立基于离散时间贝叶斯网络的列控中心动态概率安全评估模型,通过重要度和敏感性对模型进行可靠性分析,分析结果准确有效,计算效率高。《风险视角下的动车组部件多级非完美维修策略》一文以动车组五级修程时需要更换的部件为研究对象,提出一种可降低维修成本、提高设备可靠度的动车组部件多级非完美维修预防性维修策略。《中低速磁浮线路智能养护技术及装备》一文提出中低速磁浮智能化养护和运维系统解决方案,有效提高了中低速磁浮线路养护的作业效率、降低了人工成本、提高了安全性。随着轨道交通运营里程的不断增加以及新型轨道交通制式的不断涌现,为保障轨道交通运营安全,实现智能化、科学化、机械化的运维管理是未来轨道交通发展的新方向,期待有更多的学者、工程师投入到此领域的研究,为“交通强国、智慧城轨”的发展作出更多贡献。

# 关于铁路机车车辆健康管理及状态修的思考

张卫华 李权福 宋冬利

西南交通大学牵引动力国家重点实验室,成都,610031

**摘要:**为了保障运行安全,减少铁路机车车辆维修成本,提高机车车辆的可用性,健康管理及状态修已经引起铁路机车车辆应用部门高度重视。对铁路机车车辆的修程修制发展进行了汇总,并对机车状态评估与分类的标准做出了合理的确定方式,将机车状态分为基本状态、性能状态、安全状态三种。针对机车状态,根据已有研究经验,结合技术发展,提出未来机车车辆检测状态建议和注意事项。目前寿命预测存在诸多困难,基于机车状态和检测方法,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及状态修的发展。

**关键词:**机车车辆;状态修;健康管理;寿命预测;修程修制

**中图分类号:**U269

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2021.04.001

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Thoughts on Health Management and Condition-based Maintenance of Rolling Stocks

ZHANG Weihua LI Quanfu SONG Dongli

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

**Abstract:** In order to ensure the safety of operation, reduce the maintenance cost of railway rolling stocks, and improve the availability of rolling stocks, health management and condition-based maintenance were highly valued by railway rolling stock operation departments. The developments of the maintenance process and system of railway rolling stocks were summarized, and a reasonable determination of the criteria for the status evaluation and classification of rolling stocks was made, and the sta-

**收稿日期:**2020-04-12

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFB1200401-102A);中国铁路总公司重大课题(K2018J2018);国家能源集团科技创新项目(SHGF-17-54)

tus were divided into three types: basic status, performance status and safety status. According to the status of the rolling stock, based on the previous research experience and combined with the development of technology, some suggestions and matters needing attention for rolling stock detection status were put forward. At present, there were many difficulties in life prediction. Based on the status and detection method of rolling stocks, a residual life prediction scheme and reform direction of maintenance process and system were put forward, in order to promote the development of health management and condition repair of railway rolling stocks and vehicles.

**Key words:** rolling stock; condition-based maintenance; health management; life prediction; maintenance process and system

## 0 引言

铁路从 1825 年诞生至今已近 200 年,列车运营的速度也达到 350 km/h,而且在未来 5 年有望达到 400 km/h。在货运载重方面,我国已研发出 30 t 轴重的机车车辆,国外重载车辆轴重已发展到 45 t;我国重载列车运输水平已发展到 3 万 t,国外已经有 5 万 t 运力的重载列车。

无论是高速还是重载,都给机车车辆的机械结构服役带来新的问题。轴承、齿轮箱、车钩等零部件失效<sup>[1]</sup>,轮对、构架、车体等承载结构疲劳<sup>[2]</sup>,弹簧、减振器等悬挂参数蜕变<sup>[3]</sup>,车轮踏面磨损与损伤<sup>[4]</sup>,不仅给铁路机车车辆的安全服役和可用性带来严峻的挑战,而且对机车车辆性能保持提出了更高的要求。

在修程修制方面,我国高速列车以五级修为一个统计周期。以 CRH380BL 为例,平均每年的维修成本约为购车成本的 15%,维修还会造成列车每年平均停用约 30 d;重载货车(以神华铁路上运行货车为例)年平均维修成本约为购车成本的 1/30;对于电力机车(以和谐型电力机车为例),原铁道部运输局装备部坚持“以可靠性为中心的维修”理论,确定了和谐型机车高级修修程的结构为“2 年检—2 年检—6 年检”,简称“226”结构<sup>[5]</sup>。总地来看,现行铁路机车车辆修程修制主要从计划预防修的角度来考虑,存在部分部件失修、过剩修等现象,造成质保期未充分利用、影响经济效益等问题,因此,更加经济的状态修,越来越受到铁路运输部门的重视。

健康管理技术起源比较早,最初主要应用在武器装备特别是大型军事设备维修方面,是实现基于状态修以及预测修的关键技术,因而受到各大军事强国的青睐。美国首先提出了故障预测与健康管理的概念<sup>[6]</sup>,并于 1982 年将其用于大黄蜂战机 F404 的发动机监测。在机车车辆领域,国外

学者针对车轮、轴承的健康管理作了相关研究。VERMEIJ 等<sup>[7]</sup>总结了荷兰在车轮退化及优化方面的成果,提出了计划预防修的策略;ANTONIO 等<sup>[8]</sup>建立了车轮维修的全寿命周期成本模型。国内方面,LIU 等<sup>[9]</sup>将多层长短期记忆孤立森林(MLSTM iForest)用于高速动车组轴箱轴承的实时故障预警,实现了在不安装振动传感器情况下的轴箱轴承故障预警;ZENG 等<sup>[10]</sup>将随机动力学和神经网络引入在役高速列车的动态性能预测中,实现了基于车组服役状态和轮对、悬挂退化状态,综合评估列车服役安全度;舒敏<sup>[11]</sup>提出了一种基于支持向量机的四类健康状态分类方法和基于过程的多特征值趋势分析方法,实现了轴箱轴承状态分类和趋势预测的准确判断,构建了可靠的评估和预测模型,有效地帮助了动车组优化修程修制,提高了运维效率,降低了维修成本,保障了列车运行安全。

近年来,基于可靠性和系统安全理论,状态监测、故障预测与健康管理的以可靠性为中心的维修、状态修技术逐渐在轨道交通领域萌芽、发展。杜建波<sup>[12]</sup>从安全系统工程的角度出发,将故障树分析法引入电力机车的检修优化中,并给出高压系统各部件结构的检修优化方案;神华铁路货车公司就重载货车和重载机车设立重大科研项目,进行修程修制的改革,试图形成重载机车车辆的状态修体系,以节约维修成本,提高机车车辆的可用性。在高速列车方面,早在 2016 年原中国铁路总公司就设立“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目,由上海铁路局组织研究与落地,取得了预期的效果。众多地铁公司、机车车辆的主机厂也开展了类似的工作。然而,在众多研究和工程实施中,停留在理论探讨、框架和管理平台构建的居多,研究如何进行修程修制改革,实现真正意义上的状态修,有效节约维修成本的案例还不多。

作为神华重载货车与机车状态修项目、原中

国铁路总公司“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目的组织与参与者,笔者利用本文阐述一些技术观点,分享一点经验,供同行们参考,并请指正。

### 1 状态评估的多维度问题

基于铁路机车车辆运行状态的健康管理与状态修,以实现其能力与状态的保持,其核心就是“状态”。如何评价机车车辆状态,是一个核心问题。笔者认为,机车车辆的运行状态不仅仅表现其自身状态,应该是一个多维度问题,如图 1 所示。

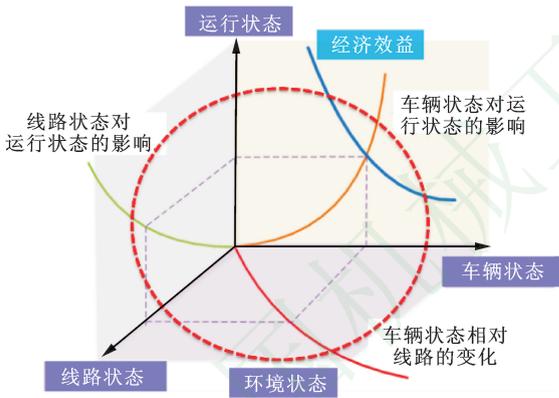
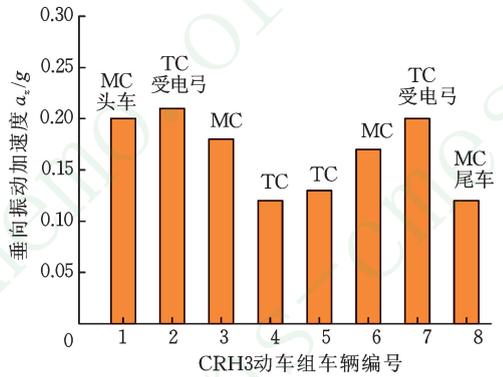


图 1 列车运行状态及其影响因素

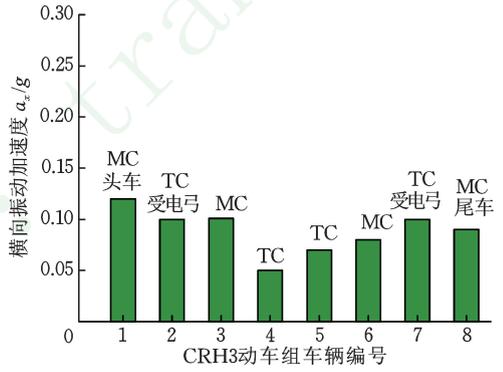
Fig.1 Train operation state and its influencing factors

对于列车的机车车辆而言,其服役状态不仅受到机车车辆本身的状态影响,而且会受到列车编组及车辆位置的影响。笔者在试验中发现,一列 8 辆车编组的高速列车,在不同编组位置,车辆的垂向振动与横向振动不一样,这与车辆位置相关,如车辆位于头尾及中间位置其垂向振动与横向振动就不一样,还与车辆结构是动车(MC)还是拖车(TC)、是否装有受电弓等相关,如图 2 所示。机车车辆运行性能的优劣也与线路状态直接相关,包括线路不平顺值、线路刚度等<sup>[13]</sup>。机车车辆在运行中会经过不同的线路,甚至不同的交路,由于线路结构、地质条件与施工质量不一样,机车车辆在通过这些线路时的响应也会不一样。

图 3 所示为实测的某一高速列车在不同交路运行时的轴箱振动情况。从图 3 可以看出,在北京到杭州区段,轴箱的振动小,因此考虑线路状态对机车车辆运行状态的影响是十分必要的。在机车车辆运行过程中,还受到牵引、制动和惰行等列车运行状态影响,特别是重载列车,牵引与制动工况的纵向力大,而且机车布置位置不同,列车中的纵向力对机车车辆运行品质的影响不尽相同,重载列车脱轨事故就直接与列车纵向力作用相关<sup>[14]</sup>。另外,机车车辆运行状态还受到运行环境,如风雨雪、气温等自然环境影响,甚至与季节相关,如高速列车出现车轮多边形就与季节强相关。地铁车辆中受电弓滑板磨耗也曾经出现在冬季成倍增加,甚至呈数量级增加的情况,如图 4 所示。因此,在进行机车车辆健康状态评估时,不仅要考虑



(a) 垂向



(b) 横向

图 2 某高速列车各车辆的振动加速度  
Fig.2 Vibration acceleration of each vehicle of high speed train

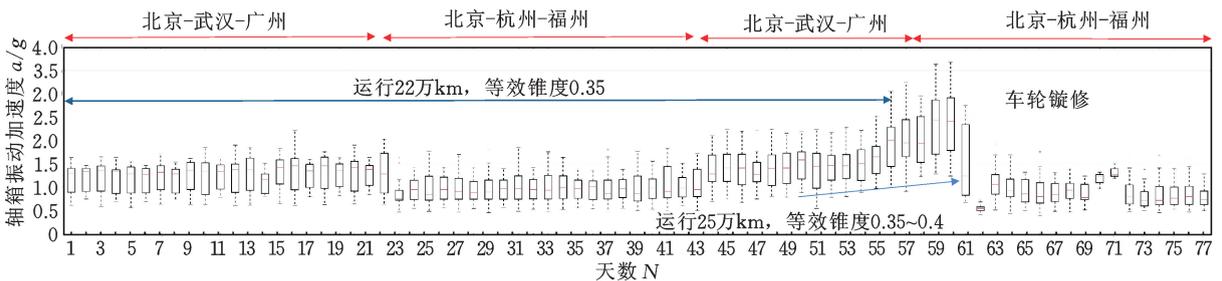


图 3 某高速列车在不同交路运行时的轴箱振动情况

Fig.3 Vibration of axle box of a high-speed train running on different routes

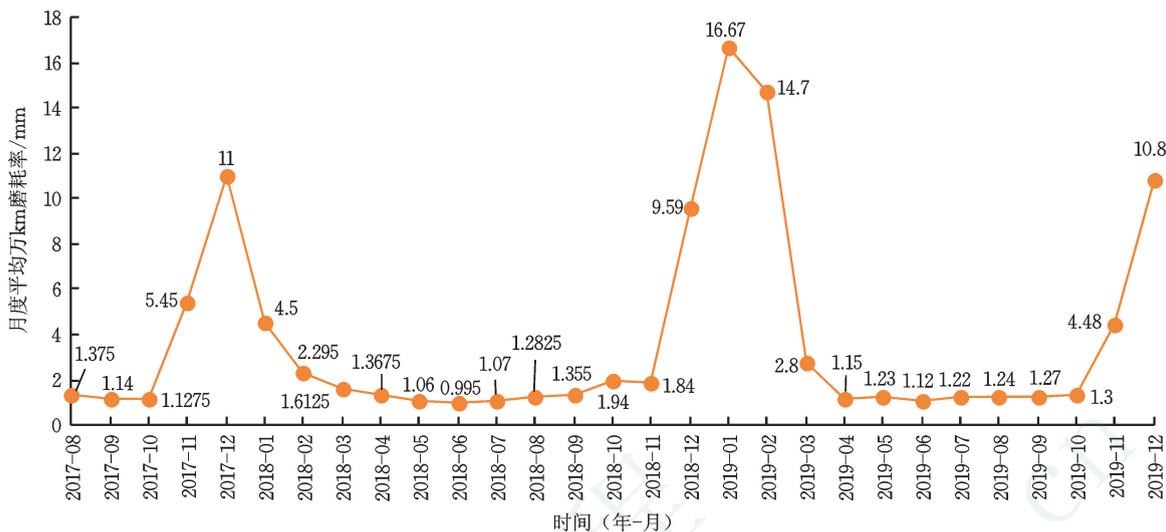


图4 某地铁线路受电弓滑板在不同时间的磨耗情况

Fig.4 Abrasion of pantograph slide plate of a metro line in different times

车辆自身的状态,同时需要考虑线路、运行、环境等其他因素的影响,实现多维度下的状态评估。当然,在进行机车车辆状态修过程中,还需要进一步考虑维修的经济性,这是一个目标或者约束条件。

## 2 状态的分类与选择问题

铁路机车车辆状态有很多,需要维修的零部件也很多,因此,机车车辆健康管理和状态修首先要确定管理与修的对象,也就是关注谁的状态。应该从装备的完整性与性能保持角度来关注状态。根据重要程度与功能性,机车状态可以大致划分为以下三种。

(1)基本状态——体现零部件状态的完好性。机车车辆是由成千上万的零部件组成的,每一个零部件都有它的功能与作用,在机车车辆长期服役过程中,零部件的完好性是机车车辆完整性与性能保持的保证。为此,需要通过定期的维修与检修,来保证零部件状态的完好性。

(2)性能状态——体现整体服役性能的保持性。成千上万的零部件组成机车车辆后,机车车辆就有了自己的服役性能,如机车的牵引能力、货车的承载能力、客车的乘坐舒适性等。机车车辆性能状态的保持性决定了机车车辆的可用性,性能状态的保持能力体现了机车车辆性能的稳定性与结构的可靠性。一旦性能状态退化,说明机车车辆的重要零部件状态已经变化,所表现出来的性能已无法达到设计要求,需要修理或者更换。例如,机车车辆走行部悬挂件的性能参数退化、车轮踏面磨耗,这些变化虽然缓慢,但最终会影响到整车的

动力学性能。由于机车车辆零部件状态决定了整车的性能,因此可根据性能状态逆向找出引起整机性能状态退化的零部件状态的变化。

(3)安全状态——体现运行的安全性。作为运输系统的移动装备,其运行的安全性是最重要的,一旦出现安全状态问题,机车车辆就需要立刻停止运行。例如,走行部上轴箱轴承、齿轮箱、电机等旋转件出现故障失效,车体、构架、轮对等承载结构件出现疲劳断裂等,这些状态的出现都将直接影响到行车安全,这些零部件状态就是安全状态。

当然,安全状态是最重要的,最好能做到在途的检测与评估;性能状态属于能力保持范畴,能力的蜕化是有过程的,需要定期检验与评估。作为健康管理,主要关注的状态就是性能状态与安全状态,通过对这些状态的监控与评估,检验机车车辆的性能和安全状态。但作为状态修,就需要关注基本状态,也就是每一个零部件的状态,保证其零部件状态的完好性和整机状态的完整性。当然,鉴于零部件的功能、作用和可靠性,在制定修程修制时,需要分门别类对不同零部件制定针对性的维修策略。

## 3 状态的获取与评估问题

无论是健康管理还是状态修,状态获取都是关键。上文提到,PHM源于美国空军和航空系统,由于安全性的挑战更加严峻,同时飞机本身价格昂贵,可以不遗余力地采用监控的方式来保证飞行安全,但铁路机车车辆作为大众交通运输工具,产品价格亲民,因此,如何依靠昂贵

的状态监测来实现健康管理,这是应该谨慎思考的问题。笔者根据之前参与研究的经验,提出几点建议:

(1)安全优先,在途监测。作为移动运输装备,安全第一。因此,涉及直接危及行车安全的状态尽量做到在途监测,如轴箱轴承、齿轮箱、电机等旋转件,这些部件的故障难以避免,同时也有比较成熟的监测技术与产品,这些零部件状态应该做到在途监测。上文提到车体、构架、轮对等承载结构件若出现疲劳断裂,也会直接影响到行车安全,从理论上来说这些结构件也应该做到在途监测,然而这方面的监测技术与产品不够成熟,而且实施起来比较困难,因此,针对这些状态的健康管理,应该采取其他的健康管理策略,可以通过一定措施来保证其长期服役的可靠性。

(2)能力保持,沿途监测。能力保持决定了机车车辆的可用性,十分重要。但与能力相关的状态,如牵引力、制动力、动力学性能等,都是渐变的,如图3中车辆动力学性能恶化的时间有一月有余,而且往往也没有固定的定量变化规律,因此,这些状态不用在途实时监测,可以通过铁路现有的5T(THDS,TFDS,TADS,TPDS,TCDS)检测设备、高铁动车组入库检测设备等进行沿途检测,以验证其能力状态。沿途检测可以利用车载设备检查,也可以采用地对车的检测技术,不需要对每列车、每节车安装车载检查检测系统,从而可以节约监测设备的安装成本。

(3)装备完整,中途检查。对于基本状态,特别是不直接影响行车安全和能力保持的零部件,其状态平时不用去管理它,可以在各种检修过程中安排检查与评估,看其状态是否达到设计要求,是否需要更换,以保证其装备的完整性,因此,这里的“中途检查”是指在服役过程中检查,基本是通过计划修来保证的。

除此以外,围绕状态检测还应该注意如下问题:

(1)车载既有检测数据的利用。尽管目前铁路机车车辆还没有实施系统的健康管理及状态修,其实已经有许多检测项点,包括车载的监测系统,如机车的6A(AGDR,AFDR,AVDR,APDR,ABDR,ATDR)系统、高速动车组的走行部旋转件温度检查系统等,也包括线路上的地对车检测设备,如传统的5T以及这几年随着高铁发展而发展起来的地面检测系统。之前这些检测方法仅仅用于特定状态的检测,实际上这些检测数据还

可以充分挖掘与利用。原中国铁路总公司“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目,就是在既有车载WTDS数据、入库检测和检修等数据基础上进行数据挖掘,扩大监测与评估功能的:如从旋转轴承的温度阈值预警,发展到可以实时在途的故障预测,提前预报故障状态;又如轮对踏面入库检测数据的挖掘,实现了轮对镟修优化与维修管理。目前神华货车状态修项目,更多的是通过5T数据的利用进行状态评估的。

(2)检测评估状态的延伸。在状态监测时,大多数是针对性检测,有点“头痛医头、脚痛医脚”的意思,事实上有些状态检测的数据可以评估其他相关的状态。如通过轴箱体对轴承振动的检测,实现轴承早期故障的预测预警。然而,轴箱体的振动信息,还反映出车轮失圆(包括多边形)、车轮踏面剥离、擦伤等损伤,以及钢轨表面波磨、剥离、擦伤等缺陷状态信息。因此,围绕机械系统,应用机车车辆系统动力学理论,就可以通过有限的状态监测,实现更多状态的评估。

(3)状态之间数据的关联。机车车辆是一个完整系统,它的性能是由各种零部件及其参数体现的。零部件状态的退化,在导致某一性能状态明显改变的同时,也会附带引起其他状态的改变。或者说,某些状态的改变,也可能意味着有其他状态的出现或者改变。因此,在健康管理时,为了实现对更多状态的评估,通过状态之间的关联性分析,可以反映出那些没有直接检测项点的状态,提高数据的利用率。在原中国铁路总公司“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目中,通过车载WTDS数据中的轴箱轴承温度检测数据、构架失稳检测数据、车轮踏面入库检测数据等一些看似不相关的数据,实现了车轮多边形的预测<sup>[15]</sup>。

(4)新型检测技术的研发。健康管理及状态修的前提是状态检测。就走行部而言,传统的检测技术基本是从其他行业应用转移过来的,不仅检测与评估功能单一,价格高,而且产品稳定性差,检测系统的故障率甚至比检测对象的故障率还高,干扰了机车车辆的正常运行,难以满足铁路机车车辆长期服役的应用要求,为此,针对铁路机车车辆状态检测技术的创新是十分必要的。但需注意一些针对性问题的解决:①解决大量程与高分辨率的矛盾。对于像轴箱这样的振动,轴承失效的早期故障引起的振动加速度只有几倍的 $g$ (重力加速度),甚至更小;通常的线路不平顺引起

的轴箱振动加速度<sup>[16]</sup>可以达到十几倍甚至几十倍 $g$ ;而一旦出现钢轨波磨或者车轮多边形,引起的轴箱振动加速度达到上百倍甚至几百倍 $g$ 。一个加速度传感器如何满足评估不同振动烈度状态的监测需要,解决大量程要牺牲分辨率的问题,或许双量程或者多量程加速度传感器技术是解决的途径。②解决高频与低频的矛盾。和量程类似,也可能遇到同一测点所评估出来的状态所处的频率范围很大,造成传感器的频率范围不能完全覆盖高频和低频的情况。这时,就需要双频、多频,甚至全频的传感器技术,以解决高低频兼顾的需求矛盾。③解决测点空间干涉矛盾。有些测点体积或者安装空间小,而希望检测的状态又多,传感器安装出现干涉。这时,一方面要研发体积小的传感器,另一方面更需要开发多功能的复合传感器。走行部轴承所用温振复合传感器,就是解决这一矛盾的利器。④解决振动导致传感器失效的问题。传感器失效很多是由振动环境引起的,除了传感器本体的故障,更有可能是传感器信号线振动造成接头接触不良而引起检测系统故障。因此,一方面需加强传感器抗振设计,另一方面可以采用带无线传输的智能传感器,从根本上解决类似问题。当然,更加彻底的解决途径是通过非接触传感方式,把检测探头安装在振动小的转向架上,甚至振动更小的车体上,来对转向架上零部件状态进行监测,避免强振动造成监测系统的失效。⑤解决全息化感知与监测点太多的问题。随着健康管理及预测研究的深入,为了掌握更多的状态信息,就希望有更多的监测点,这使得监测系统复杂庞大,一方面增加了造价,另一方面又降低了监测系统的可靠性。为此,发展“场”监测技术来有效减少测点,是未来发展的方向。如动车走行部有很多旋转部件,可以采用“温场”监测技术,一个探头完成对所有旋转件(不仅仅是轴承)温度的测定,就避免了在旋转件的各个轴承附近都安装温度传感器的情况;可以采用“声场”的监测技术,对走行部上可能因为失效诱发声音的部件,如车轮踏面、轴承和齿轮箱等部件状态进行监测,也避免了在走行部上安装过多的振动传感器问题;当然还可以采用“视场”监测技术,对零部件缺失、几何状态(形状、尺寸或者装配关系)、异常情况(蛇行失稳、脱轨、烟火等)进行状态评估。这样巧妙使用“场”监测技术,对走行部进行“望闻问切”式的诊断,可大大减少温度与振动等传感器的安装数量。

#### 4 剩余寿命评估问题

智能化的一个重要作用就是支撑运维。基于状态感知、状态辨识与状态评估,实现健康状态的评估与管理,其目的是保持健康状况,这实际上就是状态修的理念。状态修很重要的一项工作就是零部件的剩余寿命预测。寿命预测准确,才能实现更加精准的状态修,用最小的维修量和维修成本,实现能力或性能的保持。

剩余寿命预测十分困难,主要表现在:①服役载荷的随机性,正如第2节所阐述的状态评估多维度问题,机车车辆零部件的服役载荷除了与本车性能状态有关,还与运行环境及运行工况等相关,评估用的服役载荷真实统计困难。②零部件性能的随机性,零部件材料、制备、安装等环节都会影响服役寿命,同样的载荷,使用寿命却不一样。如文献[17]的研究表明,轴承钢接触疲劳寿命同时受到材料的含氧量、含硫量及工艺的影响。③失效形式的随机性,同样的零部件,可能会出现失效形式、位置和大小不一的情况。如文献[18]在研究滚动轴承故障机理的过程中指出,轴承失效可以是内圈、外圈、滚子或保持架发生故障,故障类型可能是胶合、磨损、断裂、保持架破坏等,这与载荷、材料和性能的随机性有关,更与零部件初始缺陷状态有关。

剩余寿命预测的方法或者途径有以下几种:

(1)历史使用寿命的统计。这种方法是建立在机车车辆零部件有完整的使用寿命样本基础上的,通过对样本分析,给出基于统计意义的不同可靠度下零部件全寿命,再根据已服役时间得到剩余寿命。如文献[19]即是基于线路试验获得受电弓串联结构部件应力谱样本,开展受电弓系统的可靠性预测理论研究的。

(2)已知载荷和状态的预测。目前金属结构件的疲劳寿命预测已经比较成熟,关键是要准确掌握零部件的服役载荷,这样就可以根据不同运行条件下的载荷工况进行零部件的全寿命预测,当然这同样是在不同可信度下的寿命预测值。有了全寿命和已经服役的时间(也可以是里程)就可以算出剩余寿命。采用以上两种寿命预测方法,就可以不对零部件状态进行在途监测了。文献[20]利用多体动力学和有限元结合的方法对机车车体的关键部件进行疲劳寿命预测,并用线路实验验证了其可行性。图5所示为神华重载货车的状态修研究中关于车钩寿命预测的研究技术路线<sup>[21]</sup>,

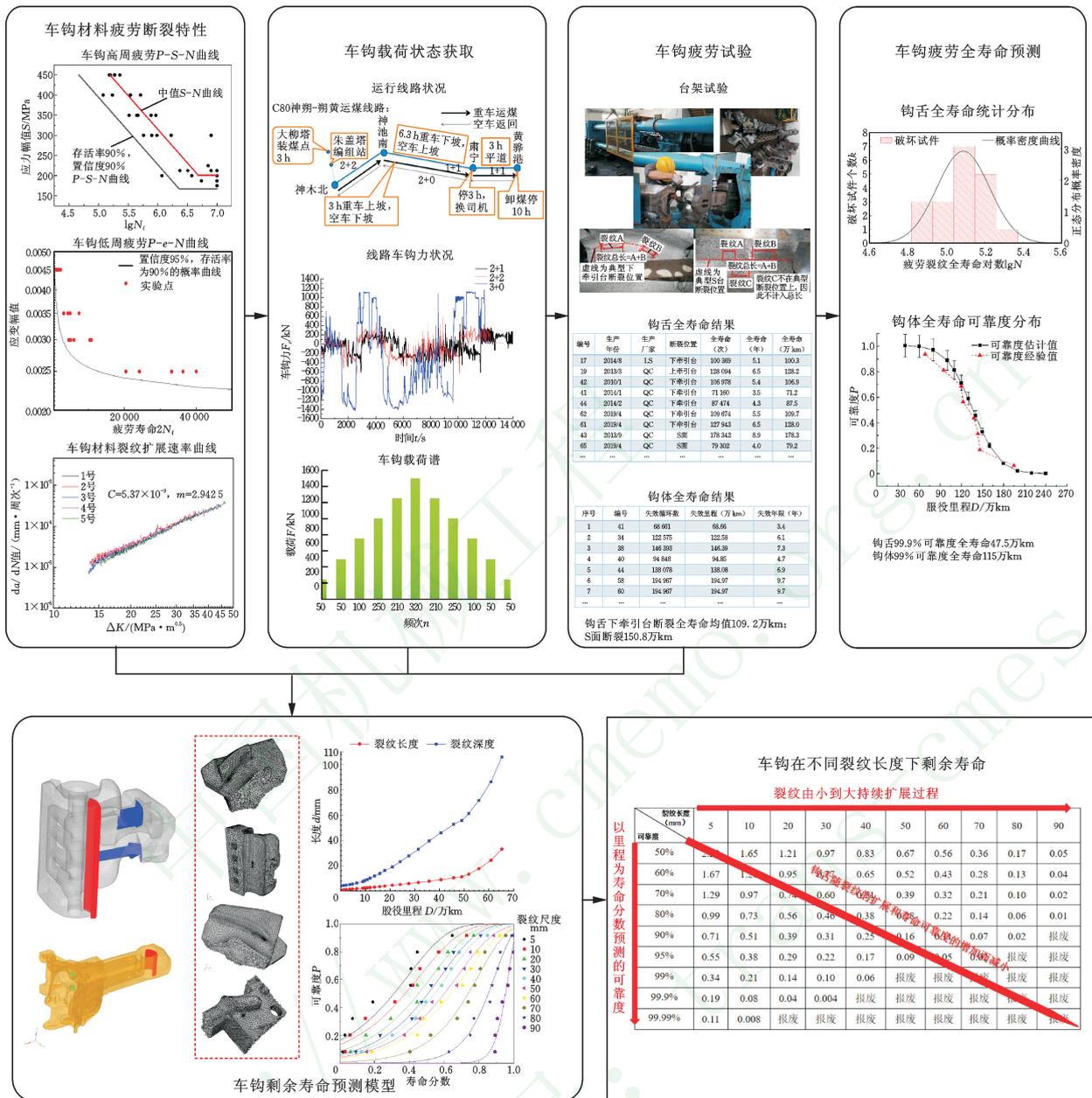


图5 重载货车车钩寿命预测

Fig.5 Life prediction of heavy duty freight car coupler

首先获取材料基本的疲劳强度特性和服役载荷，通过台架试验得到全寿命试验结果；同时基于裂纹扩展速率曲线和裂纹扩展模拟，实现出现断裂后的剩余寿命分析，得到在出现不同裂纹长度时的剩余寿命。

(3) 在途实测状态下的动态预测。对于寿命分散度大，而且对行车安全又十分重要的零部件（如轴承），建议采用在途实时监测载荷（或者相关状态量）条件下动态实时寿命的预估，以实现更加准确的寿命评估。如文献[22]提出了一种基于非线性退化模型的滚动轴承剩余使用寿命预测方法，根据测量的实时信息更新模型参数以达到更好的预测效果。有两种在途剩余寿命的评估方

法：①已知时间与状态关系的寿命预测。假设零部件的使用时间与状态的关系是确定的，如图6所示的状态统计平均值的趋势曲线（即寿命曲线）是已知的（当然这需要通过大量的实验或者应用获得），当检测到某使用时刻  $t$  的状态量时，就可以根据寿命曲线推算出使用出现状态量限值的时间，得到这个状态点时的剩余寿命。由于实际的寿命曲线是基于统计意义的，因此所预测的剩余寿命是在某一概率密度下得到的。②未知时间与状态关系的寿命预测。已知某零部件的状态，如振动、应力等，进行实时在途检测。根据实测的历史状态特征，可以确定该零部件使用时间  $t$  与状态  $f$  的函数关系，如图7所示的  $f(t)$ 。假设  $f(t)$

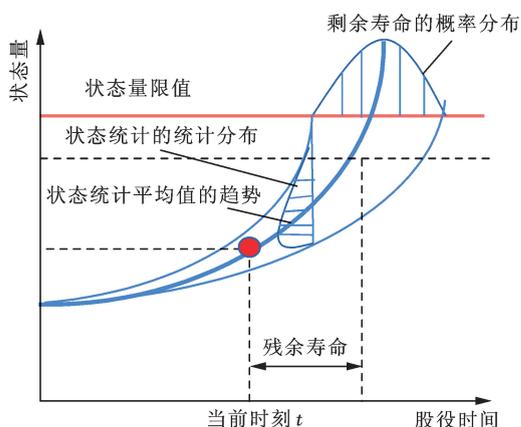


图6 已知时间状态关系的寿命预测

Fig.6 Life prediction of known time state relationship

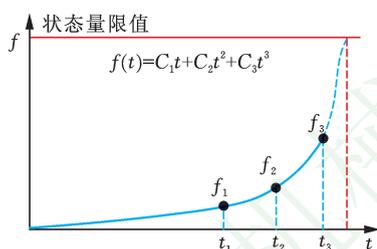


图7 未知时间与状态关系的寿命预测

Fig.7 Life prediction of unknown time state relationship

为三次多项式函数,有三个未知系数需要确定,具体的时间与状态关系式也是未知的,随着这个零部件的服役,开始出现明显“状况”,状态量变大,这时可以将三个不同时刻( $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ )和三个状态( $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ )代入时间与状态关系式  $f(t)$ ,得到三个关系式,联立方程,求出关系式  $f(t)$  中的三个系数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ,这时的关系式  $f(t)$  就是一个确定的函数。由关系式  $f(t)$  就可以准确预测后面使用时间内的状态发展趋势,得到状态量到限值出现的剩余使用时间,也就是剩余寿命。

## 5 修程修制问题

根据原中国铁路总公司的相关文件<sup>[23]</sup>,既有铁路机车车辆(包括高速动车组)的维修策略,普遍采用固定修程的预防性维修,也就是采用不同维修等级(体现维修程度与内容)、不同维修间隔(时间或者里程)来形成修程修制。

由于预防性维修的基本出发点是通过定期维修、更换零配件来实现状态(性能与能力)的保持的,因此这是一种保守的维修策略,其修程修制的制定,也是在大量运行与维修经验的基础上进行的。我国在高速铁路发展初期,基本采用国外相应的维修体系,但随着我国高速列车更大规模、更

高速度、更长运行里程的服役,取得了大量运用经验,已经发现原有的修程修制不是完全符合目前我国高速动车组运维要求的,维修成本也居高不下,相关领域研究人员开始完善其修程修制,并尝试应用于状态修。上海铁路局基于动车组运用修故障数据,采用生存分析与可靠性理论确定了部件合理的维修间隔<sup>[24]</sup>,为动车组维修项目周期的优化提供了参考。

状态修最终需要体现在修程修制的改革与优化上,原中国铁路总公司所设立的项目“动车组健康管理及运维决策系统研究”,也是为状态修的修程修制改革探索而服务的。下面结合笔者参与的机车车辆状态修研究,谈几点认识:

(1)状态修不是有“状态”就修。状态修,顾名思义就是出现“状态”就修,也就是“有病就看”,可以理解为视情修。但实际上这是不科学的,因为铁路机车车辆,如果修理就要停车、架车等,就会打乱车的正常运用秩序,因此笔者理解的状态修,是通过健康管理,掌握影响铁路机车车辆运行的安全与性能状态,提前安排维修,以保证在下一个维修节点时,不出现“状态”,实现能力的保持。因此,状态修不应该是“有状态就修”。当然,如果有安全状态突发,这就真成了有状态就修的情况,但这是突发情况,不是状态修的本意。

(2)状态修的本质是视情预防。尽管状态修不是有“状态”就修的视情修,但实际上状态修的本质是视情预防。状态修的难点就是准确进行状态判断,也就是对状态准确“视情”后,确定影响这个状态的因素(零部件)在下一个修程节点时是否需要维修或换件,以保证在下一个服役维修周期内能力的保持。

(3)状态修的核心是动态地计划修。铁路机车车辆是一个复杂的机电系统,零部件的维修或者更换的复杂程度不一样,有的是整备条件下可以进行,有的需要架车进行,还有些需要分解车才能进行,因此,根据铁路机车车辆运行性质、结构条件,制定了针对性的修程修制,如机车有小修、中修和大修,高速动车组则分了从一级到五级的维修等级。在实施状态修时,由于大部分零部件及其相关联的状态是不可能进行状态监测的,还是要通过固定修程的计划修进行。状态修主要针对安全状态、性能状态,以及一些虽属于辅助设备,但它的故障同样会影响行车的部件,如冷却风机,甚至包括上面的防尘过滤系统,结合修程来实

施动态的计划修,因此,状态修是根据状态的情况来确定下一个维修节点的维修内容,维修内容是动态的,但修程及其间隔应该是相对固定的。

尽管高速列车、重载机车车辆和城轨车辆的修程修制有一定差异,但模式上与技术是一致的。因此,基于以上认识,铁路机车车辆的状态修需遵循以下规则:

(1)同步寿命。铁路机车车辆大部分零部件都要采用计划修来保证其性能与能力的保持<sup>[25]</sup>。因此,结合计划修的间隔,在进行零部件的归类维修基础上,实现同一类零部件同寿命很重要。这些需要零部件工艺厂家对零部件的质量和使用寿命有保证。神华货车状态修在这方面做了大量工作,取得了很好的经济效益。

(2)延长周期。计划修普遍认为是经济的维修模式,存在过度维修情况,延长零部件的使用时间,是提高经济性的直接途径。因此,在之前计划修的基础上,在保证其整车性能的前提下,适当延长零部件的服役周期是努力的方向。例如,中国国家铁路集团有限公司、中国铁道科学研究院等相关单位开展了延长和谐型电力机车高级修周期的可行性分析研究<sup>[26]</sup>,延长零部件的使用时间,首先是要进一步提高零部件的质量,更重要的是要做到寿命的预测,通过理论分析、试验研究和装车验证,做到在延长其使用寿命后保证其性能。目前高速列车的维修体制就是在维修间隔周期上进行调整,有些动车组的三级修周期延长一倍,经济效益明显。

(3)动态变化。可以把计划修理解成静态模式,因为之前的计划修基本上是固定模式,甚至成为规范或标准,很少调整。其实,计划修同样应该根据实际运用的情况,不断优化与调整计划修的维修间隔与维修内容及工艺。随着大数据、信息化时代的到来,铁路机车车辆 PHM 的实施,对计划修进行科学的动态调整是有条件做到的。如复兴号高速列车的三级修周期从原来的 120 万 km 准备调整到 140 万 km 甚至 160 万 km,目前正在应用考核。

(4)动静结合。状态修最基本的理解就是对装备进行状态监测、评估与管理,可以理解成一种动态的维修体制,与计划修的静态体制形成对比。其实动静是相对的,即使是与性能状态密切相关的零部件,如车轮(踏面),根据监测到的状态进行状态维修,其基础还是计划修,无非是根据在控的

零部件健康状态,进行剩余寿命预测,结合计划修的安排,动态安排维修。出现了安全状态,就需要及时维修相关零部件,这就属于动态的维修行为。

## 5 结语

铁路机车车辆状态修还没有全面实施,原因就是难以准确评估状态和预测剩余寿命,状态修的推行存在风险。笔者参加原中国铁路总公司“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目和神华重载机车车辆状态修项目算是一种尝试,取得了成效。上海铁路局用本课题组成果实施了车轮踏面镟修管理,研究了不同踏面凹形磨耗程度下,车辆临界速度、轮轨作用力、振动信号的蛇行运动频率等动力学特性和指标随车轮镟修后运行里程的变化情况,总结得到踏面凹形磨耗对高速列车动力学的影响规律<sup>[27]</sup>,每年可以节约 5000 万元的直接维修费用。廖小东等<sup>[28]</sup>通过对配属的所有 CRH380BL 型动车组主变压器油温数据进行超过 1 年的跟踪监测,得到主变压器散热装置油温与滤棉相关性演变规律模型,把原修程规定的滤棉 4 天换 1 次,改成视情维修,避免在柳絮季节更换不及时,而在非柳絮季节更换过勤,完美实现了状态修。在神华重载货车状态修研究中,一方面对磨损件、易耗件通过质量管理,进行适当的延寿与使用周期的整合,尽量做到同寿,以减少计划修的维修内容,另一方面通过状态对车辆性能的影响研究,利用状态监测与性能评估,在状态可控的基础上,放宽状态限值,尽可能延长重要零部件使用周期。神华货车状态修的实施,极大节约了维修成本,可以达到节约维修成本 20% 以上的研究目标。

虽然状态修在关键部件的研究中取得了初步成效,但是受限于状态获取的技术瓶颈与研究成果的充分积累,真正实现状态修还任重道远。

## 参考文献:

- [1] 王开云,翟婉明,封全保,等.重载机车车钩自由角对轮轨动态安全性能的影响[J].中国铁道科学,2009,30(6):72-76.  
WANG Kaiyun, ZHAI Wanming, FENG Quanbao, et al. Influence of Free Angle of Coupler on Dynamic Safety Performance of Wheel Rail for Heavy Duty Locomotive[J]. China Railway Science, 2009, 30(6):72-76.
- [2] 杨海滨,朱涛,肖守讷,等.基于结构应力法的车体

- 结构疲劳裂纹扩展与剩余寿命评估[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(1):15-20.
- YANG Haibin, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Fatigue Crack Growth and Residual Life Evaluation of Car Body Structure Based on Structural Stress Method[J]. Railway Rolling Stock, 2019, 39(1): 15-20.
- [3] HU Zeyao, SONG Dongli, ZENG Yuanchen, et al. Analysis of the Service Life of Railway Hydraulic Dampers Considering Temperature and Loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 235(1):3-11.
- [4] 池哲翔. 数据驱动下的高速动车组车轮可靠性评估与维修决策研究[D]. 北京:清华大学, 2020.
- CHI Zhexiang. Research on Reliability Evaluation and Maintenance Decision of High Speed EMU Wheel Driven by Data[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [5] 宁友波, 寇树仁, 淡红升, 等. 延长和谐型电力机车高级修周期的可行性分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(6):77-81.
- NING Youbo, KOU Shuren, DAN Hongsheng, et al. Feasibility Analysis of Prolonging Advanced Repair Period of Harmonious Electric Locomotive[J]. Railway Rolling Stock, 2015, 35(6):77-81.
- [6] 曾声奎, PECHT M G, 吴际. 故障预测与健康管理的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5):626-632.
- ZENG Shengkui, PECHT M G, WU Ji. Current Situation and Development of Fault Prediction and Health Management (PHM) Technology[J]. Journal of Aeronautics, 2005, 26(5):626-632.
- [7] VERMEIJ I, BONTEKOE T, LIEFTING G, et al. Optimisation of Rolling Stock Wheelset Life through Better Understanding of Wheel Tyre Degradation[J]. International Journal of Railway, 2008, 1(3): 83-88.
- [8] ANTONIO R A, STOW J. Assessing the Potential Cost Savings of Introducing the Maintenance Option of “Economic Tyre Turning” in Great Britain Railway Wheelsets[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 168: 317-325.
- [9] LIU Lei, SONG Dongli, GENG Zilin, et al. A Real-time Fault Early Warning Method for a High-speed EMU Axle Box Bearing[J]. Sensors, 2020, 20(3):823.
- [10] ZENG Yuanchen, ZHANG Weihua, SONG Dongli, et al. Response Prediction of Stochastic Dynamics by Neural Network: Theory and Application on Railway Vehicle[J]. Computing in Science & Engineering, 2019, 21(3):18-30.
- [11] 舒敏. 动车组轴箱轴承健康状态评估与趋势分析[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- SHU Min. Health Status Assessment and Trend Analysis of Axle Box Bearings of EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] 杜建波. 基于故障树的电力机车高压系统故障分析及检修优化[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2019.
- DU Jianbo. Fault Analysis and Maintenance Optimization of High Voltage System of Electric Locomotive Based on Fault Tree [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.
- [13] 石怀龙, 屈升, 张大福, 等. 高速动车组线路动力学响应特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(10):30-37.
- SHI Huailong, QU Sheng, ZHANG Dafu, et al. A Study on Dynamic Response Characteristics of High-speed EMU Lines[J]. Acta Railway Sinica, 2019, 41(10):30-37.
- [14] 徐甜甜. 重载列车脱轨无线预报警系统的开发及电磁干扰问题的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- XU Tiantian. Development of Wireless Warning System for Derailment of Heavy-haul Train and Study on Electromagnetic Interference [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [15] ZHENG Zejun, SONG Dongli, QI Xiaoyue, et al. Wheel Polygonalization Identification Method Based on Fluctuation of Temperature Data and Wheel Set Dynamic Monitoring Data [C]// 2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). San Francisco: IEEE, 2019: 18958134.
- [16] 宋庆伟, 张大福, 王建斌, 等. 轴箱吊耳振动测试及共振疲劳评估[J]. 机车电传动, 2019(6):134-139.
- SONG Qingwei, ZHANG Dafu, WANG Jianbin, et al. Vibration Test and Resonance Fatigue Evaluation of Axle Box Lugs[J]. Locomotive Electric Drive, 2019(6):134-139.
- [17] 赵钟会, 万业恕, 游泳, 等. 轴承钢接触疲劳寿命及其影响因素的回归分析[J]. 特殊钢, 1985(2):34-42.
- ZHAO Zhonghui, WAN Yesu, YOU Yong, et al. Regression Analysis of Contact Fatigue Life of Bearing Steel and Its Influencing Factors[J]. Special Steel, 1985(2):34-42.

- [18] 何翔. 滚动轴承故障机理及智能化检测技术研究[D].成都:西南交通大学,2017.  
HE Xiang, Study on Rolling Bearing Fault Mechanism and Intelligent Detection Technology [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.
- [19] 宋冬利. 多状态多模式受电弓机械系统混合可靠性模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
SONG Dongli. Research on Hybrid Reliability Model of Multi-state and Multi-mode Pantograph Mechanical System[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.
- [20] 肖守讷,周贝,阳光武,等. 机车车体关键部件的疲劳寿命预测与试验验证[J].铁道机车与动车,2014(11):35-37.  
XIAO Shoune, ZHOU Bei, YANG Guangwu, et al. Fatigue Life Prediction and Test Verification of Key Parts of Locomotive Body[J]. Railway Locomotive and Bullet Train,2014(11):35-37.
- [21] 西南交通大学. 关键零部件剩余寿命预测模型及车辆子系统评判方法研究[R].成都:神华重载铁路货车状态检修成套技术研究及装备研制研究报告,2020.  
Southwest Jiaotong University. Research on Prediction Model of Remaining Life of Key Components and Evaluation Method of Vehicle Subsystem [R]. Chengdu: Research Report on Condition Based Maintenance Technology and Equipment Development of Shenhua Heavy Haul Railway Freight Car, 2020.
- [22] LEI Y, LI N, JIA F, et al. A Nonlinear Degradation Model Based Method for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Element Bearings[C]// Prognostics & System Health Management Conference. Beijing:IEEE, 2015:RP0035.
- [23] 中国铁路总公司. 铁路动车组运用维修规程[M]. 北京:中国铁道出版社,2013.  
China Railway Corporation. Application and Maintenance Regulations for Railway EMU[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2013.
- [24] 姜陈,周斌,谢名源. 动车组运用维修间隔优化方法的研究[J].铁道标准设计,2019,63(7):146-152.  
JIANG Chen, ZHOU Bin, XIE Mingyuan. Study on Optimization Method of Maintenance Interval for Emu Trains [J]. Railway Standard Design, 2019,63(7):146-152.
- [25] 中国铁路总公司. HXD1C型电力机车检修技术规程[M].北京:中国铁道出版社,2017.  
China Railway Corporation. Technical Specification for Maintenance of HXD1C Electric Locomotive [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [26] 宁友波,寇树仁,淡红升,等. 延长和谐型电力机车高级修周期的可行性分析[J].铁道机车车辆,2015,35(6):77-81.  
NING Youbo, KOU Shuren, DAN Hongsheng, et al. Feasibility Analysis of Extending Advanced Repair Period of Harmonious Electric Locomotive[J]. Railway Rolling Stock, 2015,35(6):77-81.
- [27] 曾元辰,张卫华,宋冬利. 高速列车踏面凹形磨耗及其动力学影响规律[J].铁道机车车辆,2018,38(4):5-9.  
ZENG Yuanchen, ZHANG Weihua, SONG Dongli. High-speed Trains and Its Dynamics[J]. Railway Rolling Stock, 2008,38(4):5-9.
- [28] 廖小东,叶丹,谢名源,等. CRH380B(L)型动车组主变压器散热装置维修决策优化研究[J].铁道机车车辆,2018,38(1):81-87.  
LIAO Xiaodong, YE Dan, XIE Mingyuan, et al. Research on Maintenance Decision Optimization of Main Transformer Cooling Device of CRH380B(L) EMU[J]. Railway Rolling Stock, 2008,38(1):81-87.

(编辑 王艳丽)

作者简介:张卫华,男,1961年生,博士、教授、博士研究生导师。研究方向为机车车辆设计理论、车辆系统动力学及机车车辆试验。发表论文300余篇。E-mail: tpl@swjtu.edu.cn。