

我国重载电力机车发展历程及思考

樊运新^{1, 2}

- (1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 在对我国交通运输方式的经济性、环保性、安全性进行对比分析的基础上, 阐述了铁路重载运输在我国交通运输中的重要地位。从电力机车性能提升和运用需求这2个不同维度提出了我国重载电力机车主要经历了由直流转向交流, 由单机牵引转向组合列车的2个发展阶段; 从扩大列车编组长度、提升机车车辆轴重、提高行车密度及开展关键技术的研究等方面, 分析了未来我国重载电力机车的发展趋势与方向。

关键词: 重载运输; 电力机车; 重载列车; 编组长度; 轴重; 行车密度

中图分类号: U264.1; U292.92⁺1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.01.002

Development and Trend of Heavy Haul Electric Locomotive in China

FAN Yunxin^{1, 2}

- (1. The State Key Laboratory of System Integration for High-power AC Drive Electric Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Based on the comparative analysis of the economy, environmental protection and safety of China's transportation modes, the important position of heavy haul railway transportation in China's transportation was expounded. From the two different dimensions of performance improvement and operation demand of electric locomotives, it was pointed out that the main development stages of heavy haul electric locomotives were from DC to AC and from single traction to combined trains. From the aspects of enlarging train formation length, lifting axle load of locomotives and rolling stock, increasing traffic density and developing key technology research, the development trend and direction of heavy haul electric locomotives in China in the future were analyzed.

Keywords: heavy haul transportation; electric locomotive; heavy-haul train; marshalling length; axle load; traffic density

0 引言

推进交通运输低碳发展, 节约资源, 解决用高级能源运输初级能源的问题是我国践行绿色发展“十三五”规划的主要工作方向之一。铁路运输尤其是重载铁路运输因其运能大、效率高、运输成本低而受到世界各国铁路部门的广泛重视, 在世界范围内迅速发展。据统计, 对于煤炭等大宗货物的运输, 与公路相比, 重载铁路运输的成本约为其1/4~1/3, 能耗约为其1/14, 吨公里事故损失额约为其1/73^[1-2]。重载铁路运输是全球公认的最具可持续发展的交通运输方式

及铁路货运发展的主流方向。《中国制造2025》技术路线图将研制30 t轴重的重载电力机车列为6个重点发展产品之一^[3-4], 也充分彰显了发展大功率重载电力机车的重要意义。可以说“货运重载”是继“客运高速”之后我国铁路发展的又一大引擎^[5-6]。

1 重载铁路要求

世界各国铁路由于运营条件、技术装备水平各个不同, 采用的重载列车运输型式和组织方式也各有特点。国际重载协会先后于1986年、1994年和2005年3次修订重载铁路标准。根据最新的标准定义, 对于新申请加入国际重载协会的重载铁路, 要求必须满足以

收稿日期: 2018-12-09

下 3 条标准中的至少 2 条：①列车质量不小于 8 000 t；②轴重达 27 t 以上；③在长度不小于 150 km 线路上年运量不低于 4 000 万 t。

2 我国电力机车发展历程

从电力机车性能提升和运用需求 2 个不同维度来看，我国重载电力机车主要经历了 2 个阶段：第一阶段是直流机车向交流机车发展阶段；第二阶段是单机牵引向组合列车发展阶段。

2.1 直流机车向交流机车发展阶段

我国自上世纪 50 年代开始研制直流电力机车以来，通过不断自主创新，在攻克了一系列技术难题的基础上，开发了系列化的直流机车产品，其中，重载电力机车领域以 SS₃ 型、SS₄ 型、SS₄G 型电力机车为典型代表。时代的变迁、技术的进步以及直流机车自身存在的不足等促进了铁路机车向性能更为优秀的交流机车的转变。当前，国内重载交流机车以 HXD₁ 型、HXD₂ 型、CEA1A₁ 型（12 轴）为代表。直流机车向交流机车的转变带来了产品整体性能的大幅提升，如表 1 所示。

表 1 机车主要性能参数对比

项目	SS ₄	HXD ₁	HXD ₂	CEA1A ₁ （12 轴）
轴式	2(B ₀ –B ₀)	2(B ₀ –B ₀)	2(B ₀ –B ₀)	3(B ₀ –B ₀)
轴重/t	23	25	25	25
启动牵引力/kN	≥ 628	≥ 760	≥ 760	≥ 1 140
持续牵引力/kN	≥ 436.5	≥ 532	≥ 554	≥ 798
持续功率/kW	6 400	9 600	9 600	14 400
最高速度/(km·h ⁻¹)	100	120	120	120
持续速度/(km·h ⁻¹)	51.5	65	65	65

从表 1 可以看出，相比于直流机车，在启动牵引力、持续功率、最高运行速度和持续速度等方面，交流机车的整体性能都得到较大幅度提升。

目前,我国已经形成了系列重载电力机车定型产品，搭建了轴重覆盖 25 t, 27 t, 30 t，轴式覆盖 C₀–C₀, 2(B₀–B₀), 3(B₀–B₀)，轴功率覆盖 1 200 kW, 1 400 kW, 1 600 kW 的大功率交流传动重载电力机车系列化产品平台。

2.2 单机牵引向组合列车发展阶段

以我国最重要的重载专用运煤铁路大秦线和朔黄线的实际运行情况为例，长期以来，重载列车的牵引方式以单台电力机车牵引 6 000 t 及 10 000 t 为主，如图 1 所示。在这种单机牵引的方式下牵引重量的增加对牵引机车性能提出了更高要求，在既定轴重限制条件下的提升空间有限。

我国提出以大秦线、朔黄线为代表的重载专线逐渐采用组合式列车的运输模式^[7]，即在列车车头、列车中部甚至列车尾部各布置 1 台或多台机车，实现多台机车的远程合作组合牵引。这种牵引方式使得整体牵引重量从 1 万 t 提升到 2 万 t（甚至 3 万 t），如图 2 所示。同时，由于各台牵引机车处于整列车的不同位置，所受的纵向、横向作用力及轮轨黏着情况等不尽相同，因此

对于这种组合式牵引来说存在牵引机车的协同控制、操纵模式优化、整车强度、重载钩缓等关键技术需要突破。



图 1 大秦线单机重载牵引列车



图 2 大秦线重载组合列车

通过单机牵引向组合列车的发展，重载线路运能得到了极大的提升，其中开行组合列车前的大秦线在 2005 年的年运量约为 1.5 亿 t，开行组合列车后的 2007 年运量达到 3 亿 t，在 2017 年更是达到 4.32 亿 t^[8]。同样的朔黄铁路自 2016 年开行 2 万 t 重载列车以来，年运量增加超过 4 000 万 t，2017 年的年运量更是达到 3.04 亿 t^[9]。这些数字都验证了重载组合列车的优势。

从我国重载铁路运输规模来看，目前已经满足国际重载协会定义的 3 条标准，我国重载铁路运输技术已达到国际先进行列。

3 我国电力机车未来发展思考

现阶段，我国重载牵引电力机车在单机牵引力、功率以及运行速度等技术指标几乎达到了目前轮轨关系的瓶颈，所以在增加单机牵引力、功率等级等方面存在困难。未来我国重载电力机车发展的着力点、发展的技术方向及存在的技术瓶颈是作为重载装备研发人员必须认真思考的问题。

要实现多拉快跑，主要需解决 3 个问题—提升牵引重量、提高行车速度和增加行车密度。提升牵引重量和提高行车速度主要体现在扩大列车编组长度和提升机车车辆轴重。

3.1 扩大列车编组长度

随着列车编组长度的增加，列车纵向冲击力会不断增加，可能导致车钩横向失稳，在巨大压钩力作用下车钩无法回到对中位置，失去了横向复位能力，甚至引起相邻车体错位，严重时还会发生列车脱线事

故，极大威胁列车的安全运行。因而扩大列车编组长度，必须要考虑如何降低列车纵向冲击力和提高列车牵引动力问题。降低纵向冲击力可通过电控空气制动（ECP）、异步控制等方式实现；提高列车牵引动力可通过多动力单元组合牵引技术实现。

1) 电控空气制动（ECP）技术

电控空气制动（ECP）是一种微机控制的直通式制动系统。本务机车向全部车辆通过列车线缆发送以数据形式传输的制动指令，车辆的电子制动控制装置同时接收到本务机车的制动、缓解等命令，实现全列车同步制动、缓解和再制动。

ECP 技术适用于重载长大编组列车的制动，比传统列车缩短 50%~60% 的制动距离，减少制动管充风和缓解时间，减小车钩力等，与普通列车速度控制对比图如图 3 所示。当前主要采用 ECP 技术的国家有澳大利亚、南非、美国、加拿大、沙特阿拉伯及巴西等。可以预见，ECP 技术必将在未来重载运输中发挥重要作用。

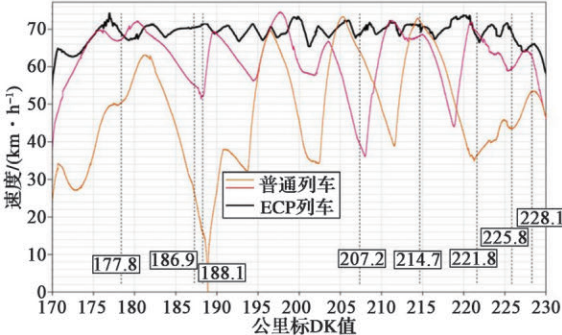


图 3 ECP 列车与普通列车速度控制对比图

2) 异步控制技术

在长大编组模式下可能出现列车的前部、中部、后部牵引制动工况存在差异，特别是在起伏坡道线路上，随着编组长度不断增加，同步控制不能满足需要。

异步控制技术是指处于组合列车中不同位置的机车在主控机车给出牵引或制动命令时，从控机车根据自身当前所处的位置和实际工况进行自适应调整，其牵引或制动状态不一定与主控机车一致，这样能尽量保证组合列车车钩力一致，以减少列车纵向冲击力，如图 4 所示。

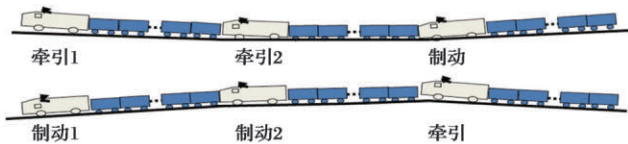


图 4 长大编组列车异步控制示意图

3) 多动力单元组合牵引技术

列车编组长度的扩大，势必增加对牵引力的需求。在单机牵引力难以提升的情况下，可考虑采用多动力单元组合的牵引方式。

多动力单元组合牵引技术是指采用动力单元技术，在长编组列车布置多个分散动力，形成多动力单元组

合列车，并且通过固定编组的模式组成智能重载货运车组，从而实现扩大整列编组长度、提升运输能力、提高运输效率的目的，如图 5 所示。同时，可考虑多动力单元组合牵引列车搭载一体化供电、一体化检测、同步控制、无线遥控等技术。



图 5 多动力单元组合牵引示意图

3.2 提升机车车辆轴重

提高轴重是世界各国重载运输采用的一项重要举措。提升机车轴重，可提升单机牵引定数；提升车辆轴重，可提高单位编组长度的装载能力。

目前，我国电力机车的轴重最高为 30 t，而国外机车轴重最大已达 35 t。因而，建议在既有货运及客货混跑线路，开行 27 t 轴重机车，并在我国 30 t 轴重电力机车的基础上，探索更大轴重（如 35 t）的机车研究，提高机车车辆运转效率，降低牵引能耗。

在车辆方面，我国车辆的轴重最高为 30 t，而北美重载列车普遍采用 32.43 t 轴重，部分采用 35.7 t 轴重；澳大利亚矿石运输货车轴重已达 45 t，载重达 110 t。因此，建议开展更大轴重货车及相关技术研究。

3.3 增加行车密度

移动闭塞是指后续列车根据与先行列车之间的距离和进路条件，自动设定运行速度的基于通信的闭塞方式。这种闭塞制式其列车间的间隔并不固定，只要保证后续列车的制动距离加适当的防护距离即可，从而使行车密度大大提高，是列车运行控制技术的发展趋势。

移动闭塞技术根据实际运行速度、制动曲线和进路上列车的位置，动态计算相邻列车之间的安全距离，最大限度缩短列车追踪间距，如图 6 所示。

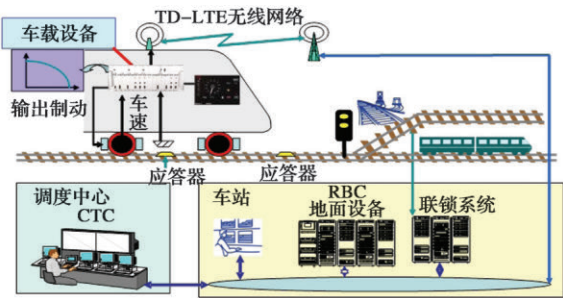


图 6 移动闭塞示意图

我国现有重载铁路采用自动（固定）闭塞技术。以大秦铁路为例，信号系统采用四显示自动闭塞系统，追踪间隔在 10 min 左右，行车密度在既有技术下已趋于最大化。如果要增加行车密度，就有必要考虑压缩列车追踪间距。因此，移动闭塞技术也是重载列车技术研究重点。

3.4 新技术运用

未来重载列车技术的发展还应该考虑轨道牵引装备发展的最新成果，应用新一代技术，实现重载列车

的绿色环保、智能,达到重载运输安全、可靠的目的。绿色方面主要有永磁直驱电机、碳化硅变流技术;智能方面主要体现在 PHM 和自动驾驶技术。

1) 永磁直驱技术

传统的三相异步电机效率已达到较高的水平,而采用齿轮传动方式则存在效率损耗及维护成本高的问题。

永磁电机具有轻量化、高效率、高功率因数、低噪声等优点。直驱方式具有传动损耗低、维护方便、维护成本低等优点,结构如图 7 所示。因永磁电机效率提升及直接驱动减少了机械传动损耗,电力机车整车效率可从 85% 提升到 88%。目前,永磁技术在城轨和动车领域已经开始应用,可以预见其在重载大功率牵引领域也将有广泛发展空间。

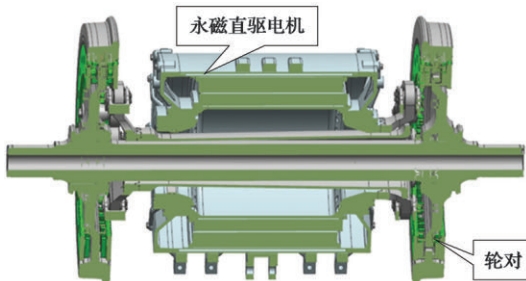


图 7 永磁直驱电机结构示意图

2) 碳化硅变流技术

SiC 作为新型的半导体材料,具有非常优异的材料特性,可以突破 Si 器件的局限性。SiC 器件的优越性体现在高温、高压、高频及高效等方面。以三菱公司京东银座线地铁 SiC 辅助变流器为例,损耗降低 30%,体积缩小 20%,重量减小 15%^[10]。目前,碳化硅变流技术在城轨和轻轨车领域已有相关应用,建议开展碳化硅变流器件在重载轨道交通行业的运用研究,提升机车效率。

3) PHM 技术

PHM 技术是为了满足自主保障、自主诊断的要求而提出来的,是基于状态维修 CBM (视情维修, Condition Based Maintenance) 的升级版。它通过对机车和车辆的状态感知,监控设备健康状况、故障频发区域与周期,经过数据监控与分析,预测故障的发生,从而能大幅度提高运维效率,并为状态修、设计提供数据基础,如图 8 所示。

目前正在通过深入开展受电弓、钩缓系统、牵引系统等关键部件特性研究,并参考美国 F-35 飞机实施 PHM 技术后的运用情况^[11],搭建智能机车运维平台。该平台预计可实现以下 3 个目标:提高运行安全性、可靠性,正线故障率降低 25%;减少停机维修时间,提高车辆的可用性,检修效率提升 30%;降低全生命周期成本,运维成本降低 20%。



图 8 PHM 系统示意图

4) 自动驾驶技术

采用司机操纵的重载列车,存在乘务员工作强度大、偶发误操作、操纵有差异等问题。

现阶段重载列车自动驾驶技术,通过自动驾驶装置从 LKJ 主机获得相关信息后,综合机车的位置、限速、坡道和弯道等信息,经过计算,向机车网络控制系统输出牵引/电制动指令或向制动系统输出空气制动指令,如图 9 所示。

自动驾驶技术的应用,在提升自动化水平的同时,提升舒适性和平稳性,降低司机的工作强度,优化人力配置,降低人员管理的复杂度和难度,节省人力资源,降低人力成本;可通过列车运行规划与能耗优化模型,实现最优运行,降低能耗。目前,自动驾驶技术在地铁系统有较成熟的应用,未来在重载机车上将有广泛的应用前景。

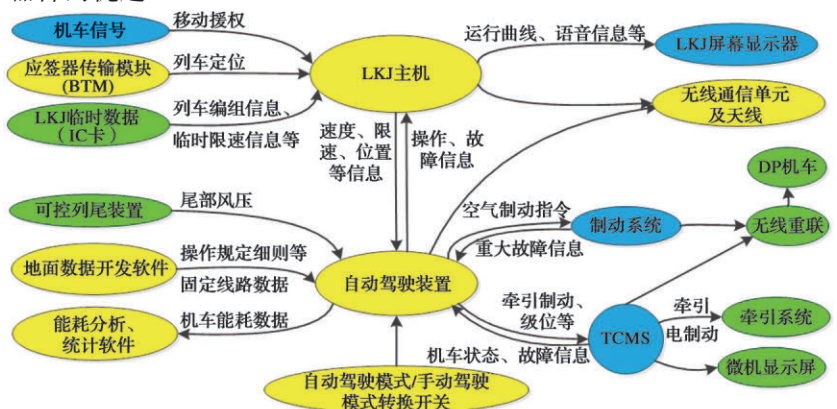


图 9 重载机车自动驾驶系统框图

4 结论

我国铁路运输与运量的矛盾在今后很长一段时期内将持续存在,在铁路的货物运输中仍将有 60% 以上是大宗重质货物,因此,发展重载运输无疑是唯一可选择的投资少、见效快的货物运输组织方式。而电力机车作为重载运输的核心动力来源,对其技术发展趋势的研究与创新也将持续作为未来工作的重心。

因此,在以后的工作中应聚焦电力机车“增大机车车辆轴重、发展自动监测检测和自动驾驶等技术”的发展趋势,以产品、技术和创新为主线,围绕提高机车车辆轴重、提高运输效率、提高装备智能化水平、提高安全保障能力、

(下转第 22 页)

砂管支架、车钩牵引销止挡螺栓、齿轮箱注油孔盖、基础制动器、车体侧墙门、蓄电池箱门、头灯盖等。

HXd1 型机车车钩牵引扁销止挡螺栓、牵引杆托板固定螺栓、HXD2 型机车蓄电池箱门防脱落装置分别如图 18~图 20 所示。车钩牵引扁销最外侧止挡螺栓加 2 个卡箍,卡箍用防缓螺母紧固,防止螺栓左右移动,止挡螺栓头部开孔,加开口销。牵引杆托板内六角固定螺栓加圆形防缓片,防缓片爪子插入螺栓头防止松动。蓄电池箱门中部加装插销与构架相连接,日常通过插销锁闭。

SS4G 型机车走行部也相应加装了防脱落装置,在此不再赘述。

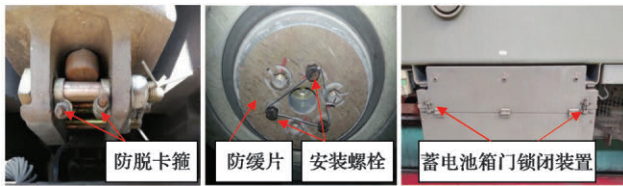


图 18 车钩牵引扁销止挡螺栓 (HXD1) 图 19 牵引杆托板固定螺栓 (HXD1) 图 20 蓄电池箱门锁闭装置 (HXD2)

2.7 其他技术管理措施

①对钩缓系统进行寿命化管理。针对重载机车钩缓系统的特殊性,对钩缓系统施行寿命管理,在 C3 级修程对 HXd1 型机车缓冲器进行换修,其他部件下车做探伤检查;C4 级及以上修程时,对 HXd1 型、HXD2 型机车钩缓系统全部更新。

②扩大重载机车走行部检修范围。针对重载机车运行中出现的部件裂损问题,在探伤范围中增加了机车从板探伤、护轮管探伤。2 万 t 列车在发生紧急制动后,头部主控机车回段整备时重点检查车钩及缓冲器状态,中部从控机车直接扣临修入检修库,将车钩及缓冲器下车进行探伤检查。

③实行技术包保制度。质量系统技术人员对重载机车走行部实行质量包保,定期对所包保机车走行部

进行全面检查,确保走行部质量可靠。

④加强技术攻关减少列车冲击。深入研究机车网络控制、制动机、LOCOTROL 等系统的基本原理及内在联系,从机车控制电路着手,通过增加联锁冗余的方式对电路进行技术改进,减少重载机车紧急制动电路“虚、松、短、破”问题的发生,提高安全回路的可靠性,尽可能减少不明原因非常制动故障的发生。

⑤持续研究平稳操纵办法。结合线路纵断面、不同机车组合、列车载重及季节性特点等情况,不断研究积累重载列车平稳操纵办法,强化重载列车司机业务培训,提高操纵水平,使重载列车运行平稳,安全正点。

3 结语

通过分析重载机车走行部暴露出的质量问题,结合重载机车多年来的运用维修实践,对走行部其他可能发生裂损的部件进行了风险研判,并有针对性地提出技术改进措施和质量管理办法,经过多年运用实践,效果良好。当然,对重载机车走行部质量安全和重载牵引技术还需要继续深入研究,持续推进人防、物防、技防“三位一体”安全保障体系建设,确保重载列车开行安全可靠。

参考文献:

- [1] 张曙光. HXd1 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [2] 张曙光. HXd2 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [3] 周建斌, 陈国胜, 晋军辉, 等. HXd1 型机车转向架轮对驱动系统 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31(1): 9-13.
- [4] 杨帆, 陈国胜. HXd1 型电力机车转向架两年检修技术探讨 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(1): 72-74.
- [5] 刘伶. HXD2 机车车钩大容量缓冲器存在的问题及解决措施 [J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(5): 66-68.

作者简介: 袁日东 (1973—), 男, 高级工程师, 主要从事铁道机务技术管理、安全管理工作。

(上接第 12 页) 智慧化服务等方面, 重点开展电力机车研发创新工作, 助推我国运输结构调整。

参考文献:

- [1] 王东, 闫平, 乔延洪, 等. 铁路重载运输效益评价研究 [J]. 中国铁路, 2008(10): 13-16.
- [2] 钱立新. 世界重载铁路运输技术的最新进展 [J]. 机车电传动, 2010(1): 3-7.
- [3] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 《中国制造 2025》重点领域技术路线图 [EB/OL]. (2016-03-21)[2018-12-01]. <http://www.cm2025.org/show-16-90-1.html>.
- [4] 何静, 刘建华, 张昌凡. 重载机车轮轨黏着利用技术研究综述 [J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 30-39.
- [5] 王宇强, 魏玉光. 我国铁路重载铁路单元式列车组合模型研究 [J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(6): 23-28.
- [6] 胡亚东. 我国铁路重载运输技术体系的现状与发展 [J]. 中国

铁道科学, 2015, 36(2): 1-10.

- [7] 耿志修. 大秦线开行 2 万吨重载组合列车系统集成与创新 [J]. 中国铁路, 2007(9): 25-29.
- [8] 梁成谷. 我国铁路重载运输再创世界奇迹 大秦铁路年运量突破 4 亿 t [J]. 铁道运输经济, 2010, 33(1): 14.
- [9] 中国电力企业联合会. 朔黄铁路 2 万吨重载列车运输煤炭突破 4 000 万吨 [EB/OL]. (2017-03-13)[2018-12-01]. <http://www.ccec.org.cn/hangyeguangujiao/qiyezixun/2017-03-13/165859.html>.
- [10] 刘皓. 有轨电车全 SiC 辅助变流器设计与研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594.

作者简介: 樊运新 (1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 副总工程师, 长期从事电力机车系统集成设计工作。