

中文引用格式:曹源,李健,孙永奎,等.重载铁路线路综合检测车设计[J].中国安全科学学报,2026,36(1):57-62.

英文引用格式:CAO Yuan, LI Jian, SUN Yongkui, et al. Design of a comprehensive inspection vehicle for heavy-haul railway line[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 57-62.

重载铁路线路综合检测车设计*

曹源¹教授, 李健¹, 孙永奎^{**1}副教授, 宿帅¹教授,

杨卫峰²正高级工程师, 王文昆²高级工程师

(1 北京交通大学 自动化与智能学院, 北京 100044; 2 株洲时代电子技术
有限公司, 湖南 株洲 412007)

中图分类号: X924.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0430

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0501100); 国家自然科学基金资助(U2368202, 52202392, U1934219, 52372308, U2468203)。

【摘要】 为精确辨识与评估重载铁路线路服役状态, 设计并研制重载铁路线路综合检测车, 集成包括轨道状态巡检、钢轨轮廓检测、轨道几何参数检测、钢轨探伤检测、轮轨力检测、振动检测 6 大检测系统; 通过定位同步系统同步检测和关联分析线路多源状态数据, 并分级报警可疑病害。结果表明: 重载铁路线路综合检测车自 2023 年 7 月下线投入运行以来, 依托最高 80 km/h 的运行能力, 采集线路几何参数、表面巡检图像、内部 B 型图、轮轨力和振动等多源数据, 建立典型病害库; 结合定位同步系统与多源数据时空映射模型, 自动对齐与关联分析检测数据, 准确溯源线路病害成因、降低误报率和漏报率; 构建的可疑病害分级报警机制依据超限等级实施限速、上报和记录等差异化处置, 在确保行车安全的同时提升重载铁路线路养护与列车运行效率。

【关键词】 重载铁路; 综合检测车; 轨道状态巡检系统; 定位同步系统; 线路病害

Design of a comprehensive inspection vehicle for heavy-haul railway line

CAO Yuan¹, LI Jian¹, SUN Yongkui¹, SU Shuai¹, YANG Weifeng², WANG Wenkun²

(1 School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2 Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: To achieve accurate identification and evaluation of the service state of heavy-haul railway lines, a heavy-haul railway line comprehensive inspection vehicle was designed and developed, integrating six major inspection systems: a track condition inspection system, a rail profile measurement system, a track geometry measurement system, a rail flaw detection system, a wheel-rail force measurement system, and a vibration measurement system. A positioning and synchronization system is employed to enable synchronized acquisition and correlation analysis of multi-source line-condition data, and to provide graded alarms for suspected defects. The results show that, since its commissioning in July 2023, the heavy-haul railway line comprehensive inspection vehicle, operating at speeds up to 80 km/h, has continuously

* 文章编号: 1003-3033(2026)01-0057-06; 收稿日期: 2025-07-10; 修稿日期: 2025-11-10

** 通信作者: 孙永奎(1993—), 男, 河南永城人, 博士, 副教授, 主要从事铁路系统故障诊断与运维方面的研究。E-mail: sunyk@bjtu.edu.cn。

collected multi-source data including track geometry parameters, surface inspection images, internal B-scan images, wheel-rail forces, and vibration signals, and has established a database of typical defects. By combining the positioning and synchronization system with a multi-source spatiotemporal mapping model, the system realizes automatic alignment and correlation analysis of inspection data, enabling accurate tracing of defect causes and reducing both false positives and missed detections. Furthermore, the proposed graded alarm mechanism for suspected defects supports differentiated responses such as speed restriction, reporting, and record-keeping according to exceedance levels, thereby ensuring train operation safety while improving both heavy-haul railway maintenance efficiency and train operation efficiency.

Keywords: heavy-haul railway; comprehensive inspection vehicle; track status inspection system; positioning synchronization system; track defect

0 引言

重载铁路是货物运输的重要途径,发展重载铁路是国家重大战略^[1-2],而安全是重载铁路发展永恒的主题^[3-4]。重载列车具有轴重大、编组长等特点,使得重载铁路线路所受冲击大、连续作用时间长,造成了线路病害多、运营安全隐患大等重载铁路线路运维方面的突出问题^[5]。重载铁路线路多源状态信息的同步感知是实现线路病害精确辨识、服役状态预测的重要基础,在提升现场运维效率、保证重载列车行车安全等方面具有重要而深远的意义。

国内外针对铁路线路检测方法展开了大量研究^[6-7],例如:日本 East-i 综合检测车的检测内容主要包含轨道几何参数、轮轨作用力等;法国安全设施快速检查 (Rapid Inspection of Safety Installations, IRIS) 综合检测车检测内容主要包括轨道几何参数、车体加速度等;意大利阿基米德综合检测车检测内容主要包括轨道几何参数、车辆加速度等;英国新型测量车 (New Measurement Train, NMT) 综合检测车检测内容主要包括轨道几何参数、钢轨表面伤损、扣件状态等;美国联邦铁路管理局的交通部 (Department of Transport, DOT) X220 型轨道检测车上搭载巡检系统和轨道几何测量系统来检测轨道状态。巡检系统可实时采集线路的高分辨率图像,并利用视觉检测技术识别线路故障,轨道几何测量系统在检测过程中记录故障事件的位置^[8];意大利国家铁路基础设施公司开发了一种时速可达 200 km 的铁路无人驾驶检测车辆 (Unmanned Railway Vehicle, URV),可在线路上自动执行轨道检测、实时监控和危险区域检查等任务^[9]。国内随着铁路第 6 次大提速,传统铁路线路检测手段难以满足铁路发展需要,我国开始自主研发综合检测车。由中国铁道科学研究院研发的 0 号高速综合检测车,能

够采集轨道几何参数、车辆加速度和轮轨动力学等状态信息^[10]。随后,中国铁路高速列车 (China Railway High-speed, CRH) 380 系列综合检测车也投入使用^[11]。除高速铁路,重载铁路的综合检测也逐渐受到各部门重视。曹广河^[12]介绍了朔黄铁路综合检测车系统的研制情况,该系统配备了轨道检测系统、超声波钢轨探伤系统、同步定位系统等,能够采集轨道表面图像、轨距、超高、钢轨内部 B 型图等状态信息,通过综合分析数据来检测轨道几何参数、钢轨表面和内部伤损、波磨等病害。彭丽宇等^[13]详细介绍了重载铁路综合检测车的关键检测技术及实现原理。王贵鑫^[14]进一步详细介绍了重载铁路综合检测车的数据综合分析功能及其应用。中国铁道科学研究院开发的车载轨道检测系统能够利用激光摄像检测技术、数字图像处理技术在线检测轨道几何参数,为铁路工务部门提供有效数据,指导轨道养护维修^[15]。宝鸡中车时代工程机械有限公司生产的钢轨探伤车 (Gui Tan Che, GTC)-80 型钢轨探伤车配备超声波探伤系统、轨道状态巡检系统和钢轨轮廓检测系统,能够以 80 km/h 的检测速度完成钢轨、扣件、轨枕等部件的状态检测和分析管理功能^[16]。虽然国内外一流设备制造厂商和科研院所所在重载综合检测车方面均有一定研究,且具备轨道检测、钢轨超声波探伤等功能,但轨道检测与钢轨探伤通常是安装在不同的检测车辆上,难以实现两者的同步检测和分析。此外,现有检测系统仍缺乏对振动、轮轨力等关键信息的综合检测能力,而这些信息能反映轮轨间的动态相互作用。

鉴于此,笔者拟研制一种重载铁路线路综合检测车,来综合采集重载铁路线路众多信号,包括线路几何参数、表面巡检图像、内部伤损 B 型图、轮轨力、振动等,并关联分析多源检测数据,以期为重载铁路线路运维提供参考依据。

1 重载铁路线路特点及综合检测必要性

1.1 重载铁路线路特点分析

重载铁路是煤炭等货物资源运输的重要通道,具有以下特点:

1) 运营场景复杂。重载铁路运营环境复杂,行车密度大,具有小半径曲线、长大坡道、客货混跑等多种场景。且不同场景下重载铁路线路呈现出不同的劣化速率与劣化模式,而线路的服役性能与运维紧密相关。

2) 线路病害多。重载铁路线路结构复杂,包含钢轨、扣件、枕木、道砟、路基等多个部件。重载铁路部件长期暴露于自然环境中,易受降雨、地下水位变化等因素影响;同时,重载列车因具有大轴重、长编组等特点,常引发轮轨型面异常磨损等问题。这些因素共同构成了影响运营安全与运输效率的严峻挑战。重载铁路线路主要病害包括曲线钢轨病害、线路道岔病害、线路爬行病害、钢轨接头病害等。曲线钢轨病害的主要原因是钢轨冷负荷过大,轨道因承受不住重力导致磨损过重,从而产生变形。线路道岔病害主要是由于列车在通过道岔时,通常会产生较大的横向水平力,使得道岔这一薄弱环节极易出现病害。线路爬行病害主要受列车运行产生的纵向力、列车制动、车轮撞击、钢轨温度变化等因素影响,使得钢轨沿着道床发生纵向移动,严重影响行车安全。钢轨接头病害由于始终处于高频使用的状态,承受较大的冲击,极易发生接头损坏、螺栓松动等病害。

3) 运营安全隐患大。重载列车运行本质上是车辆、轨道、环境等多系统通过轮轨相互耦合的复杂动态过程。该过程不仅呈现典型的高维强非线性特性,还因其运行环境的复杂多变,使得轮轨关系、车辆系统动态及轨道激扰等关键环节均表现出显著的动态时变特性和高度随机性。长期服役工况下,轨道、轨下基础等线路各零部件的变形失效问题愈加明显,轮轨相互作用的动力学行为特征逐渐劣化,影响行车安全。

1.2 综合检测必要性分析

重载铁路运营环境复杂、伤损频发,亟需利用先进的检测技术及时检测重载铁路线路病害,为现场运维提供科学指导。重载铁路线路关键部件的伤损成因和机制多样,基于单一传感器的监测数据难

以满足精确辨识其服役状态。然而现有的检测车通常仅检测线路几何参数、超声和巡检图形,缺乏综合检测振动、轮轨力等关键信息的能力,同时现有检测车不具备多源数据的关联分析功能,导致现有检测车在线路服役状态辨识精度偏低。例如重载铁路线路表面状态的检测容易受煤灰、油污等因素干扰,因此如果仅从图像层面分析,可能会导致钢轨表面损伤的误报、漏报。近年来,随着传感器技术的发展,基于多源信息融合的诊断与检测方法在多个领域呈现出其突出优势。为精确辨识重载铁路线路状态,需集成多种传感器构建综合检测系统,全面采集线路关键参数,通过关联分析多源数据来精确辨识线路病害。

2 重载铁路线路综合检测车总体设计

重载铁路线路综合检测车集成了6大检测系统,包括轨道状态巡检系统、钢轨轮廓检测系统、轨道几何参数检测系统、钢轨探伤检测系统、轮轨力检测系统、振动检测系统。重载铁路线路综合检测车通过检测数据网络与各检测系统连接并实现检测数据的传输、存储、管理和关联分析;同时利用定位同步系统向各子系统发送里程信息和触发命令。里程信息是确保各检测系统的数据保持里程同步,以便关联分析多源数据。其中轨道状态巡检系统是里程触发,即定位同步主机将里程信息和脉冲信号传输给巡检相机,巡检相机接收到脉冲信号后进行帧拍摄,同时为每一帧赋里程信息;其他检测系统均为时间触发,即按照各检测系统中设定的采样频率进行数据采集。整体框架如图1所示。

2.1 轨道状态巡检系统

轨道状态巡检系统可实时检测轨道状态,包括钢轨扣件缺失、钢轨表面缺陷、轨枕、轨道板裂纹及掉块、道床空间异物入侵等。采用高速线阵相机、高精度里程同步技术,采集轨道表面高清图像后,应用深度学习图像处理技术,实现轨道表面缺陷、扣件伤损等检测,并实现数据存储、数字化管理、智能识别和浏览回放功能。巡检相机安装位置如图2所示。

2.2 钢轨轮廓检测系统

钢轨轮廓检测系统,基于激光摄像式非接触扫描测量技术,实时采集、处理和显示钢轨轮廓,精确测量钢轨垂直磨耗、侧面磨耗、总磨耗等参数,精准评价钢轨伤损等级。轮廓检测系统安装如图3所示。

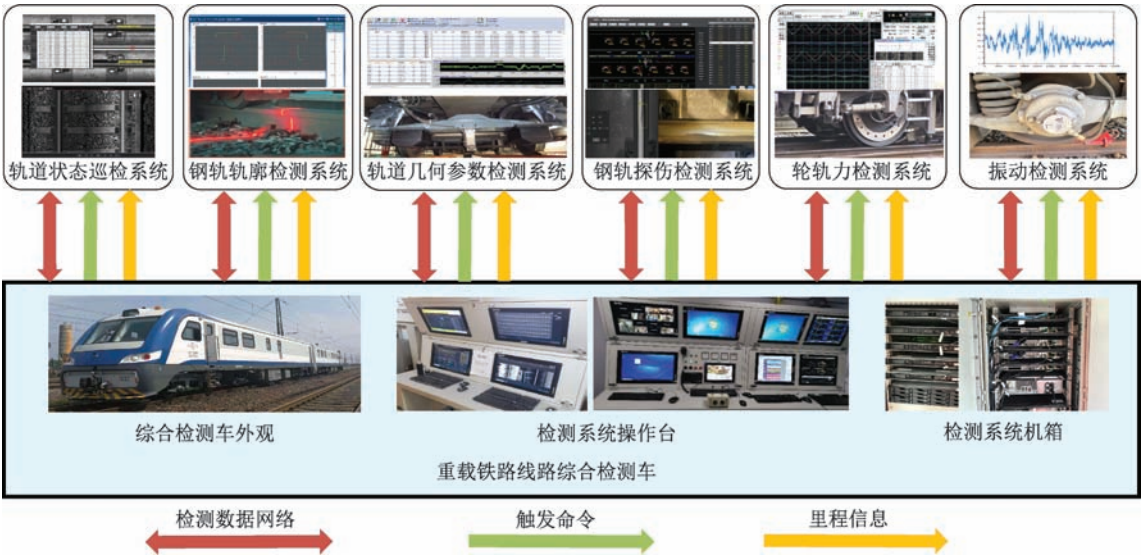


图 1 重载铁路线路综合检测车架构

Fig. 1 Framework of heavy-haul railway line comprehensive inspection vehicle



图 2 巡检相机安装位置

Fig. 2 Installation position of the inspection camera

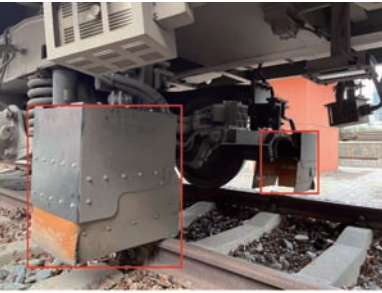


图 3 钢轨轮廓检测组件安装位置

Fig. 3 Installation position of rail profile detection component

2.3 轨道几何参数检测系统

轨道几何参数测量系统,以惯导装置(内部集成三轴加速度计、三轴陀螺仪惯性元件及导航计算机、存储器,采集速传信号、同步信号及振动补偿信号)为主要检测设备,基于惯性导航原理建立导航坐标系,实现载体相对定位和姿态测量,结合钢轨轮廓测量系统,实现振动补偿和轨距测量,精确辨识轨道几何参数(轨距、超高、轨向、高低等)。惯导装置

安装位置如图 4 所示。



图 4 惯导装置安装位置

Fig. 4 Installation position of inertial measurement unit

2.4 钢轨探伤检测系统

设计专用的超声波传感器组件,实现超声波在钢轨轨头的全覆盖(含一次波和二次波),提升探伤系统检测轨头伤损的能力。研制基于激光三角测量原理和廓形匹配的新一代激光自动对中系统,结合磨耗补偿算法的高精度伺服控制技术实时调整探轮位置,基于正压风帘防泥水、传感器自动温控技术保障系统的环境适应性,使探伤车满足重载铁路探伤作业需要。开发重载铁路钢轨伤损智能识别系统,结合信号降噪技术和后处理规则,基于深度学习技术,自动伤损识别钢轨探伤车采集的超声检测数据,识别钢轨内部伤损的伤损类型、伤损等级、股别、里程、深度等信息。超声探轮的安装位置如图 5 所示。

2.5 轮轨力检测系统

轮轨力检测系统包含测力轮对和遥测设备。测力轮对每个单侧轮包括 32 个应变片,采用专用粘接



图 5 超声探轮安装位置

Fig. 5 Installation position of ultrasonic probe wheel

剂粘贴。轮轨力遥测设备包括固定在测力轮对车轴上的信号采集、发射模块、天线,固定在转向架上的信号接收模块、感应供电模块。最终轮轨力检测系统能够实时检测轮轨垂向力、轮轨横向力、轮轴横向力等轮轨动态作用的关键参数。测力轮对安装位置如图 6 所示。



图 6 测力轮对安装位置

Fig. 6 Installation position of instrumented wheelset

2.6 振动检测系统

振动检测系统用于检测轴箱振动加速度,为分析车辆动力学性能变化、伤损辨识等提供数据支撑。振动加速度传感器的安装位置如图 7 所示。

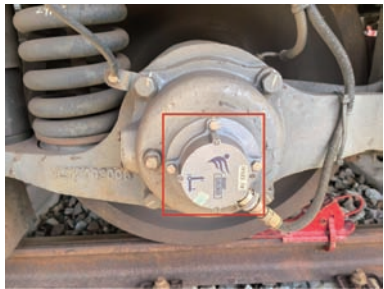


图 7 振动加速度传感器安装位置

Fig. 7 Installation position of vibration acceleration sensor

2.7 定位同步系统

定位同步系统采集编码器或速传信号,解算出综合检测系统里程,同时采集射频标签信号或到站信

号,校准里程累加误差,校准后统一修正里程数据。

3 重载铁路线路综合检测车特点

3.1 系统集成度高

通过 6 大检测系统综合采集轨道表面巡检图像、钢轨廓形、轨道几何参数、钢轨内部 B 型图、轮轨作用力、振动等信号,最高运行速度达 80 km/h。

3.2 数据关联分析

多个检测系统的检测数据由定位同步系统实现里程同步后,通过数据关联分析,综合分析引起线路病害的真正原因,降低误报率和漏报率,确保线路病害分析的可靠性,为线路设备的维修提供依据。以超声和巡检图像关联分析为例,通过构建多源数据时空映射模型,结合定位同步系统输出的里程信息,实现超声和巡检图像数据自动对齐,当超声探伤发现可疑波形时,系统自动调取该位置的巡检图像进行联合分析,快速判断是否需要紧急处置。重载铁路线路综合检测车数据关联分析界面如图 8 所示。



图 8 数据关联分析界面

Fig. 8 Data association analysis interface

3.3 可疑病害分级报警

现场维护可依据综合检测车发现的病害等级进行分级处置。例如针对超限检测,如检测到 IV 级超限时,应立即限制行车速度 30 km/h 并及时处理;检测到 III 级及以上超限,应及时上报处理;其余伤损及超限情况应及时记录。通过分级报警处置,能在确保行车安全前提下保障列车高效运行。

4 结 论

1) 文中设计并研制的重载铁路线路综合检测车,能够实现对重载铁路线路轨道表面巡检图像、钢轨廓形、轨道几何参数、钢轨内部 B 型图、轮轨力及振动响应等多源信息的一体化同步获取,形成覆盖结构外观、几何参数、内部损伤及动力行为的全要素检测能力,为线路服役状态的精确辨识奠定了基础。

2) 重载铁路线路综合检测车能够基于里程对齐和时间同步的数据关联分析与病害分级预警,对可疑病害进行等级判别和空间定位,提升了重载铁路线路病害识别的准确性和风险管控的及时性。

3) 综合检测结果能够用于评估线路状态、检修优先级排序及维修方案优化,为重载铁路线路现场运营维护提供量化、可追溯的决策依据,提高运维管理的科学性和精细化水平。

参考文献

- [1] 吕军, 顶涛, 宋宗莹, 等. 群组列车前后车间距对重载列车气动特性影响[J]. 机车电传动, 2024(5): 75-81.
LYU Jun, XIANG Tao, SONG Zongying, et al. Impacts of inter-train distances on aerodynamic drag reduction in heavy-haul train groups[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(5): 75-81.
- [2] 张哲, 赵开功, 郑昀, 等. 基于重载机车乘务员的职业安全健康心理分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增1): 21-26.
ZHANG Zhe, ZHAO Kaigong, ZHENG Yun, et al. Occupational safety and psychological health analysis of heavy-haul locomotive crew[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 21-26.
- [3] 张文山. 重载铁路企业安全生产标准化评价体系的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增1): 46-51.
ZHANG Wenshan. Research and application of safety production standardization evaluation system for heavy-haul railway enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 46-51.
- [4] 温登钦, 王飞, 时瑾, 等. 重载铁路长大下坡曲线段列车行车安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 87-94.
WEN Dengqin, WANG Fei, SHI Jin, REN Shujing. Safety analysis of train operation in long downhill curve sections of heavy haul railways[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 87-94.
- [5] 曾周, 胡晓宇, 冉祥瑞, 等. 2万t重载列车车辆数量对纵向冲动的的影响研究[J]. 机车电传动, 2024(1): 22-30.
ZENG Zhou, HU Xiaoyu, RAN Xiangrui, et al. Research on the influence of quantity of 20000-ton heavy-haul train wagons on longitudinal impulse[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(1): 22-30.
- [6] 刘震锋, 陈建政, 李伟. 基于线结构光的钢轨断面磨耗改进检测算法[J]. 机车电传动, 2024(3): 138-145.
LIU Zhenfeng, CHEN Jianzheng, LI Wei. Improved detection algorithm for rail profile wear based on line structured light[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(3): 138-145.
- [7] 贾晋中, 陆生, 彭丽宇. 朔黄铁路重载综合检测车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016: 4-11.
- [8] BAILLARGEON J, STUART C. Machine vision data products for the automated track inspection program[R]. United States: Federal Railroad Administration, 2021.
- [9] DEBATTISTI N, TARSITANO D, VIGNATI M. On the design and development of an unmanned railway vehicle for high-speed railway-line surveillance[J]. International Journal of Rail Transportation, 2025(13): 1-26.
- [10] 侯卫星, 刘刚, 康熊. 0号高速综合检测列车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 19-63.
- [11] 陈春雷. CRH380AM-0204高速综合检测列车设备研制[J]. 中国铁路, 2017(10): 69-76.
CHEN Chunlei. Study on development of CRH380AM-0204 high speed comprehensive inspection train[J]. China Railway, 2017(10): 69-76.
- [12] 曹广河. 朔黄铁路综合检测车系统研制[C]. 中国铁道学会铁路重载运输技术交流会, 2014: 484-488.
- [13] 彭丽宇, 陶凯, 黎国清. 重载铁路综合检测列车和数据综合分析系统[J]. 铁道建筑, 2016(12): 109-113.
PENG Liyu, TAO Kai, LI Guoqing. Comprehensive inspection train and data comprehensive analysis system of heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2016(12): 109-113.
- [14] 王贵鑫. 重载铁路综合检测列车和数据综合分析系统研究[J]. 运输经理世界, 2022(22): 71-73.
- [15] 李颖, 王昊, 侯智雄, 等. 基于控制器局域网总线车载轨道检测系统设计研制[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 163-170.
LI Ying, WANG Hao, HOU Zhixiong, et al. Design and development of on-board track inspection system based on CAN bus[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 163-170.
- [16] 张向阳, 张高峰. GTC-80型钢轨探伤车[J]. 机车电传动, 2013(6): 94-96.
ZHANG Xiangyang, ZHANG Gaofeng. GTC-80 Rail flaw detection car[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(6): 94-96.

作者简介: 曹源 (1982—),男,河南开封人,博士,教授,主要从事铁路系统运维方面的研究。E-mail: ycao@bjtu.edu.cn。