

# 青藏铁路高铁接触网检测车

王文聪<sup>1</sup>, 赵国栋<sup>1</sup>, 张彩霞<sup>1</sup>, 董海宁<sup>2</sup>

(1. 宝鸡中车时代工程机械有限公司, 陕西 宝鸡 721003;  
2. 中国铁路青藏集团有限公司 供电部, 青海 西宁 810000)

**摘 要:** 为满足青藏铁路兰新高速铁路段线路内海拔高于 2 500 m 的正线区段接触网智能化检测、监测的需求, 研制了青藏铁路高铁接触网检测车。研制过程中采取了一系列针对性措施以适应高原地区高海拔、低气压、缺氧、高寒、大风沙、强紫外线等恶劣的环境条件。该车安装有接触网悬挂状态检测、监测装置, 可对接触网悬挂系统的零部件实施高精度成像检测, 在自动识别和分析检测数据的基础上, 形成维修建议, 指导接触网维护。

**关键词:** 接触网; 检测车; 悬挂状态检测; 青藏铁路; 高原地区; 高海拔; 动力学性能; 高速铁路

中图分类号: U273.94

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.02.028

## Inspection Vehicle for High-speed Railway Catenary System (OCS) in Qinghai-Tibet Railway

WANG Wencong<sup>1</sup>, ZHAO Guodong<sup>1</sup>, ZHANG Caixia<sup>1</sup>, DONG Haining<sup>2</sup>

(1. Baoji CRRC Times Engineering Machinery Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721003, China; 2. Power Supply Department, China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of intelligent detection and monitoring of catenary in the main line section of Lanzhou-Urumqi high-speed railway line above altitude 2 500 m, a catenary detection vehicle for Qinghai-Tibet railway high-speed section was developed. A series of measures had been taken to adapt to the harsh climatic conditions such as high altitude, low atmospheric pressure, anoxia, high cold, windy sand and strong ultraviolet radiation in the plateau area. The vehicle was equipped with catenary suspension condition detection and monitoring device, which could carry out high-precision imaging detection of catenary suspension system components. On the basis of automatic identification and analysis of test data, maintenance suggestions were formed to guide catenary maintenance.

**Keywords:** catenary; inspection vehicle; inspection of suspended status; Qinghai-Tibet railway; plateau area; high altitude; dynamic performance; high-speed railway

## 0 引言

智能化接触网检测车<sup>[1]</sup>是一种满足平原地区使用的电气化铁路接触网智能化检测的轨道工程机械, 该车无法满足高原地区的使用需求。因此, 宝鸡中车时代工程机械有限公司联合中国铁路青藏集团有限公司在智能化接触网检测车平台基础上, 针对青藏铁路兰新线高速铁路高海拔、低气压、缺氧、高寒、大风沙、

强紫外线等恶劣的环境条件, 开发了一款适用于青藏铁路的高速铁路接触网检测车(简称为“检测车”)。

## 1 总体布置及主要技术参数

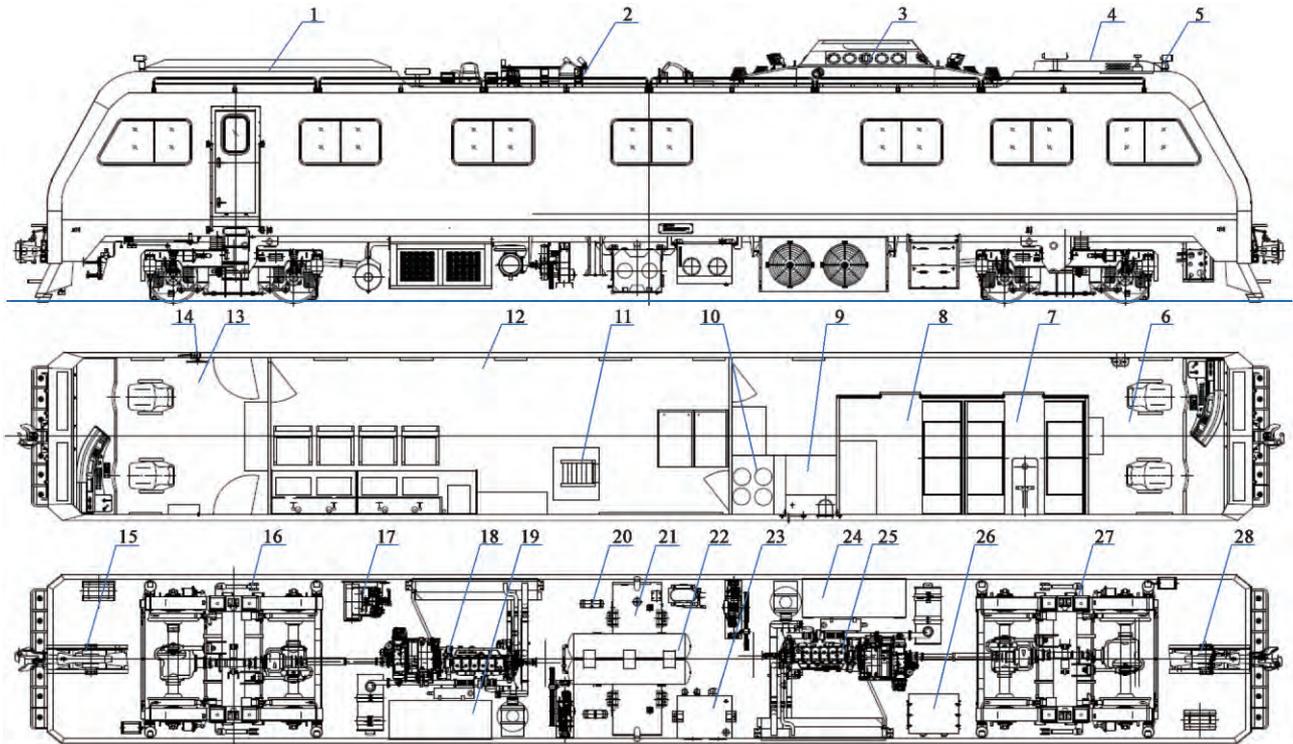
### 1.1 总体布置

检测车采用整体承载式车体结构, 车体由车棚和底架组成。根据车上各设备的安装形式及功能不同, 设备分别采用车上布置、车内布置和车下布置 3 种布置方式。车下布置的设备主要包括行车动力传动系统、走行部、液压系统及控制系统等, 主要部件采用悬挂

收稿日期: 2018-01-11; 收回日期: 2019-01-30

式安装。中间部分包括动力传动系统、发电机组、燃油箱、液压油箱、蓄电池箱、总风缸、制动阀组及检测系统振动补偿装置,车辆两端分别布置 1 台相同的动力转向架,底架及以上部分通过 8 个橡胶旁承坐落在 2 台转向架上;车辆两端安装 2 套 13B 型上作用式车钩及缓冲器、空气系统附件和外接输入、输出插座等。车内布置的功能区域主要为司乘人员、检测人员工作

与休息区域,从左至右依次为前端司机室、检测操作间、供氧设备存放间、卫生间、2 个休息间、后端司机室。前端司机室设置手制动装置。车上中间部分布置的设备为接触网悬挂状态检测、监测装置,两端为前、后端司机室空调装置,车棚上部设置供作业人员上下的登顶天窗。车辆设置 6 路视频监控装置。车辆总体布置如图 1 所示。



1—空调机组; 2—登顶天窗; 3—接触网悬挂状态监测、监测装置; 4—空调机组; 5—视频监控装置; 6—后司机室; 7—休息间; 8—休息间; 9—卫生间; 10—供氧装置存放间; 11—登顶车梯; 12—检测间; 13—前司机室; 14—手制动装置; 15—车钩及缓冲装置; 16—动力转向架; 17—制动阀组; 18—动力传动系统; 19—发电机组; 20—补偿装置; 21—燃油箱; 22—风缸; 23—液压油箱; 24—发电机组; 25—动力传动系统; 26—蓄电池箱; 27—动力转向架; 28—车钩及缓冲装置。

图 1 车辆总体布置图

1.2 车辆主要技术参数

车辆主要技术参数如下:

轮径	840 mm
轨距	1 435 mm
适应环境温度	-30~45 °C
适应最大外轨超高	180 mm
适应相对湿度	月平均 90%, 日平均 95%
适应最高海拔	3 100 mm
轴列式	B-B
整备质量	58(1±4%) t
传动形式	液力传动
最高运行速度	120 km/h
制动方式	空气制动及手制动
空压机排量	2×1.6 m <sup>3</sup> /min
燃油箱容积	1 450 L
车钩中心距轨面高度	(880±10) mm
单机紧急制动距离	800 m (紧急制动, 平直道, 初速 120 km/h)

限界 符合 GB 146.1《标准轨距铁路机车车辆限界》的要求, 以及客运专线铁路机车车辆限界(《铁路技术管理规程》) 高速铁路部分的有关要求

1.3 检测系统主要技术参数

1) 高清成像

高清成像区域的主要技术要求见表 1。

表 1 高清成像区域主要技术要求

拍摄区域	拍摄范围	像素
支持装置	成像范围涵盖轨顶连线以上 4 800~8 100 mm 与轨顶连线的垂直中心线左、右两侧 3 500 mm 范围相交区域, 正反面拍摄	>5 000 万
接触悬挂 (吊弦、线夹等)	成像范围涵盖轨顶连线以上 4 800~8 100 mm 范围区域, 单幅画面覆盖幅宽 2 000 mm, 左、右侧拍摄	1 600 万
附加悬挂	成像范围为附加悬挂区域, 正反面拍摄	1 600 万
吊柱座	成像范围涵盖吊柱座 2 700 mm×2 700 mm 区域, 正反面拍摄	1 600 万
接触悬挂连续视频	成像范围涵盖轨顶连线以上 4 800~8 100 mm 范围区域, 单幅画面覆盖幅宽 2 000 mm, 采集帧频 25 帧/s, 正反面拍摄	200 万

## 2) 静态几何参数

静态几何参数的范围和精度见表 2。

表 2 静态几何参数的范围和精度

参数名称	测量范围	分辨率	最大允许误差
接触线高度 / mm	5 000~7 000	1	±10
接触线拉出值 / mm	±625	1	±10
接触线间垂直距离 / mm	0~500	1	20
接触线间水平距离 / mm	0~800	1	20
定位器坡度 / (°)	0~20	0.1	±0.5

注: ①采样点间隔(沿接触线长度方向)应不大于 250 mm; ②应使用补偿系统, 满足静态几何参数测量精度的要求。

## 2 技术特点

### 2.1 整车

整车采用集成设计, 动力系统采用冗余设计, 设置双套动力系统、双套发电机组, 双套设备互为备份, 检测系统与车辆一体化设计。

### 2.2 检测装置

通过对国内高速铁路接触网检修、施工、维护模式和修程修制进行研究, 结合国内接触网检修的现状, 研发人员优选智能化、高性能、高可靠性检测装置, 以满足接触网几何参数、悬挂状态的实时智能检测的要求, 满足高速铁路接触网检修维护需要。

### 2.3 动力系统

通过调研选型, 研发人员选用潍柴发动机与 VOITH 变速箱匹配, 该柴油机和变速箱可靠性和安全性高, 使用寿命长, 自身配套有控制模块, 可与车辆网络控制系统通信, 实现行车控制和动力单元的故障保护。

### 2.4 电气系统

电气系统采用微机控制技术, 从而实现作业车走行控制、系统保护、辅助用电等各种电气功能。设置双套系统, 形成冗余设计, 提高整车安全性。

### 2.5 车体系统

车体采用整体承载式结构, 合理进行整体布局, 对车顶检测装置安装进行特殊设计, 并进行一体化设计。

### 2.6 运行监控系统

运行监控系统采用了 GYK+BTM 运行监控系统, 满足高速铁路线路运用要求。

## 3 高原适应性设计

检测车的研发采用了以下 8 项高原适应性设计:

①检测车前、后挡风玻璃采用电伴热防紫外线镀膜玻璃, 并附设遮阳式卷帘, 使司机视野清晰, 并能防止车内人员被紫外线灼伤。

②整车采用环氧带防锈底漆与丙烯酸聚氨酯面漆配合, 整体涂装耐候性及耐化学品腐蚀性能好, 并具有优良的抗紫外线性能。

③设置吸氧装置及供氧装置存放间, 满足缺氧环境下工作人员正常的呼吸需求。

④线束、线缆均采用无卤、低烟、阻燃、耐热温度 125 °C 的交联聚烯烃机车电缆, 并采用防护等级 IP68 的聚乙烯软管进行防护。

⑤发动机增加低温启动与进气预热装置, 对燃油管路和过滤装置增加加热装置, 保证柴油机在 -30 °C 环境下的顺利启动。并选用防风沙型多级空气滤芯, 保证柴油机的进气要求。

⑥在空压机至干燥器之间的空气管路加装电加热伴热带, 其他管路采用橡塑保温管进行防寒包扎, 同时对制动阀加装电加热保温套, 防止低温环境下压缩空气过程中产生的水分结冰堵塞空气管路及制动阀组。

⑦发电机组采用进气预热塞、燃油水套加热、低温蓄电池组合的方式, 保证发电机组的低温启动性能。柴油机和发电机整机除必要的通风散热部分外, 其余均需满足 GB 4208—2008 规定的 IP5X 及以上的防尘要求。

⑧检测系统相应设备配置自动加热恒温设备, 设备间采用低温连接导线。镜筒采用 IP67 防护等级, 配置导电 ITO 膜加热玻璃, 可防止镜筒玻璃结霜、凝露和起雾。

## 4 主要系统及部件

### 4.1 车体

车体为整体承载式车体, 由车架和车棚构成。车架主梁采用箱型梁结构, 边梁采用型钢与钢板焊接而成的箱型梁, 该结构形式可保证车架有足够的垂向刚度和良好的抗冲击性能。车棚为全钢焊接结构, 骨架采用铁路客车冷弯型钢焊接结构, 外蒙板采用整板涨拉电磁调平工艺, 以保证外表面的平整度。

设计中依据 TB/T 1335—1996 《铁道车辆强度设计及试验鉴定规范》对车体结构静强度和振动模态的要求, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 分别对车体结构进行了 7 个工况(垂直静载工况, 垂直动载工况, 纵向压缩工况, 纵向拉伸工况, 一端抬车工况, 整体抬车工况和扭转工况)的静强度和 1 种状态(模态分析)进行计算分析, 计算结果表明车体静强度符合标准 TB/T 1335 相关要求, 车体一阶垂直弯曲振动模态频率能够避开转向架的浮沉与点头振动频率。

### 4.2 动力传动系统

兰新客运专线最大海拔高度为 3 074.17 m, 线路最大坡度为 20‰(该段线路长 28 km, 海拔为 3 068.17 m), 针对该区段线路情况, 动力系统选型需满足以下 2 点: 一是在海拔 3 100 m 时, 平直道运行工况下, 车辆最高运行速度达到 120 km/h; 二是在海拔 3 100 m 时, 车辆在 20‰坡度的坡道上顺利起步。因此, 在智能化接触网检测车单动力单元(潍柴 WP12.480 柴油机 + 福伊特

T211re.4 液力传动箱) 的基础上增加 1 套相同的动力单元, 2 套动力单元对称布置, 将装机功率提升至 706 kW。经牵引计算, 双动力单元在满足海拔 3 100 m 时最高运行速度高于 120 km/h, 可在 20‰坡度的坡道上起步并顺利通过, 完全满足青藏铁路兰新高速铁路段运行需求。牵引特性曲线图如图 2 所示, 单动力传动系统布置如图 3 所示

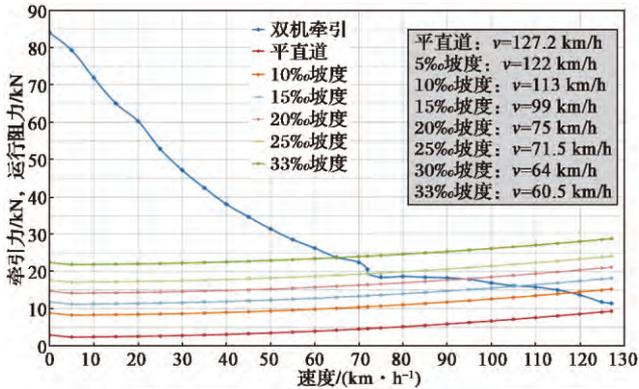


图 2 牵引特性曲线图

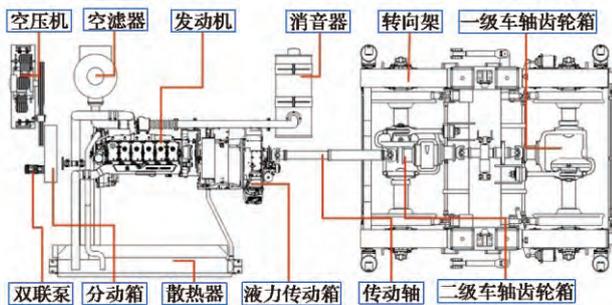


图 3 单动力传动系统布置图

#### 4.3 制动系统

制动系统由空气制动系统和手制动组装置成。空气制动系统采用 JZ-7 型空气制动机, 主要由自动制动阀 (大闸)、单独制动阀 (小闸)、中继阀、分配阀、作用阀等组成。系统设压力调节机控制系统, 确保系统安全。空气系统风源由 2 台排量为 1.6 m<sup>3</sup>/min 的活塞式空气压缩机提供, 压缩空气经过油水分离器、空气干燥器、总风缸及滤尘器, 经过多级净化处理, 为制动及其他用风系统提供清洁和稳定的压力空气。经充风时间校核计算, 在海拔 3 100 m 大气压力下初充风时, 空压机在额定转速下, 总风缸压力从 0 kPa 升到 800 kPa 所需时间为 2.3 min, 满足 TB/T 2180《电气化铁道接触网综合检修作业车技术条件》所规定的小于等于 4 min 的时间要求。

手制动采用由蜗轮、蜗杆机构组成的手制动装置, 该机构可在任意位置实现自锁, 满足在 20‰坡度的坡道上驻车制动要求。

#### 4.4 电气控制系统

电气控制系统采用 DC 24 V 供电。电气控制系统由车控单元、发动机控制单元 ECM、液力传动箱控制单元 VTDC、显示器等组成, 各控制单元通过 CAN 总线和 RS232 总线通信。车辆的主要运行信息均可在显

示屏上显示, 便于观察。检测车设有前、后操纵台, 可以实现双向操纵。

操作控制系统采用分布式网络二选一的冗余备份控制方案, 2 套相同功能的控制系统互为备份, 每套控制系统包含各自的功能模块以及二级网络, 操纵台柜门上设置控制系统 I、控制系统 II 转换开关。二选一的冗余备份方案提高了控制系统的可靠性与稳定性, 同时, 该方案具有良好的可拓展性与开放性, 便于实现 2 套控制系统之间的在线切换。2 套控制系统完全相同, 降低了软件开发成本、生产测试成本, 便于售后维护。

#### 4.5 供电装置

该车供电方式分为直流供电和交流供电。

直流供电电压额定值为 DC 24 V, 直流供电主要为柴油机启动、车内外直流照明以及行车控制供电。直流电源由 4 组 N200 蓄电池组和充电发电机组组成, 蓄电池采用 2 串 2 并的联接方式。当柴油机正常运转时, 柴油机自带的发电机除给整车供电以外, 同时还给蓄电池组充电; 柴油机停机时由蓄电池组给整车供电。

交流供电采用 2 台三相交流柴油发电机组供电, 每台发电机组的额定功率为 34 kW, 交流供电主要为空调、电暖器、检测装置及其他电动工具供电。整车最大交流负载为 25.4 kW, 在海拔 3 100 m 时, 发电机组供电功率为 55 kW, 满足整车交流负载供电要求。发电机输出功率与海拔高度的关系如图 4 所示。

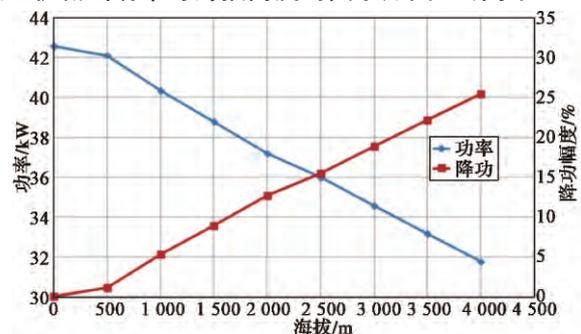


图 4 发动机 (发电机组) 降功曲线图

#### 4.6 接触网检测系统

检测系统主要由高清成像检测、几何参数测量、数据分析处理、时空同步定位等模块组成。高清成像检测设备用于对接触网支持装置及接触悬挂进行精确定位和高清成像, 采用了多相机拍摄和图像拼接方法对目标进行完美呈现, 还通过接触网全景连续拍摄设备对接触网进行连续记录。静态几何参数检测设备主要由相机组件、光源、光源控制单元、接触网几何参数信号处理单元、补偿装置、工业控制计算机等组成, 用于对接触网静态几何参数的测量。数据分析设备由工业控制计算机、服务器、网络设备等组成, 主要负责实现对接触网各单元高清图像的智能分析、数据存储和查询。时空同步定位系统通过速度编码器、GPS 装置、GYK 装置、杆号图片 OCR 识别信息的融合处理,

给检测系统提供对应的区段、杆号等准确的实时地理位置信息。

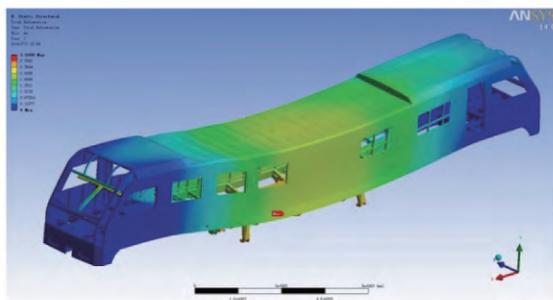
为满足检测系统在高海拔、高寒地区的使用需求,车外安装设备采用适应  $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  的工业级电子元器件,固定支持装置拍摄相机、附加悬挂拍摄相机、吊柱拍摄相机选择适应  $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境温度的军品级相机,同时对光测距仪、电动云台和其他电子设备配置自动加热恒温设备,镜筒采用 IP67 防护等级,配置导电 ITO 膜加热玻璃,在车顶环境温度低于空气的露点温度时,启动镜筒玻璃加热,可防止镜筒玻璃结霜、凝露和起雾。

检测系统在完成对接触网悬挂系统的零部件高清成像检测、几何参数测量、数据分析处理后,能形成维修建议,指导接触网维护。

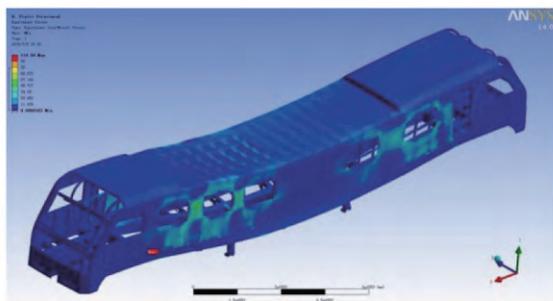
## 5 试验及运用情况

### 5.1 车体静强度试验

车体静强度试验委托国家铁路产品质量监督检验中心机车车辆检验站进行试验,对车体进行静强度试验。试验单位分别对车体结构进行了多个工况(1.0倍垂向载荷工况,1.3倍垂向载荷工况,纵向拉伸载荷工况,纵向压缩载荷工况,一位端救援工况,二位端救援工况,整车起吊工况,扭转工况)试验,试验结果均表明车体静强度符合 TB/T1335《铁道车辆强度设计及试验鉴定规范》及设计要求。



(a) 应力云图



(b) 变形云图

图5 车体静强度计算

### 5.2 型式试验

2016年7月在陇海线眉县至兴平区间,由国家铁路产品质量监督检验中心对检测车进行了综合性能、动力学性能、单机紧急制动距离、试运行、曲线和道

岔通过性能试验。

#### 1) 综合性能试验

综合性能试验包含一般要求检查、限界检查,柴油机及动力传动系统、走行系统、制动系统、车体、车架、电气系统、照明装置、液压系统和作业装置检查与试验。经试验,检查结果均符合相关标准及设计要求。

#### 2) 动力学性能试验

检测车进行动力学性能试验的最高试验速度为  $130\text{ km/h}$ 。试验结果:检测车检测车车体振动加速度、平稳性指标、运行安全性指标和转向架主要部件动力传动系数指标均符合 GB/T 17426—1998《铁道特种车辆和轨行机械动力学性能评定及试验方法》的相关要求。

#### 3) 单机紧急制动距离试验

检测车的单机紧急制动距离试验在轨面状况良好的干燥轨道上进行。试验结果:检测车制动初速度为  $120\text{ km/h}$  时,紧急制动距离最大为  $700\text{ m}$  (小于相关规定的  $800\text{ m}$ );制动初速度为  $80\text{ km/h}$  时,紧急制动距离最大为  $273\text{ m}$  (小于相关规定的  $400\text{ m}$ ),符合 GB/T 10082《重型轨道车技术条件》中紧急制动距离的相关规定。

#### 4) 试运行试验

检测车最高试验速度为  $120\text{ km/h}$ ,试验总时间为  $150\text{ min}$ ,运行总里程不少于  $100\text{ km}$ 。试验结果:柴油机无自动熄火、过热及转速不稳现象;液力变速箱换挡轻便灵活,无挂挡失败、跳挡、脱挡、冲击及其他不正常声响;柴油机冷却水温、机油压力及液力传动箱油温符合设计要求;各仪表工作正常,开关使用可靠;试运行期间各部件温升符合设计要求。

#### 5) 曲线和道岔通过性能试验

检测车以  $5\text{ km/h}$  的速度慢速通过  $R145\text{ m}$  曲线和道岔。试验结果:通过曲线过程中各部件的正常运动不受限制,连接风管、跨接电缆、传动装置的连接软管、连接线等长度适中,传动装置、车轴带动的传动结构未受损,钢轨未产生永久变形;通过道岔时,走行部不受约束,钢轨未产生永久变形。

### 5.3 专项试验

2016年9月在兰新线西宁—浩门区间,由国家铁路产品质量监督检验中心机车车辆检验站对检测车进行了高原试运行试验和司机室噪声测试。

#### 1) 高原试运行试验

根据青藏铁路的作业工况要求,在海拔  $3100\text{ m}$  下进行高原试运行试验,总里程不少于  $100\text{ km}$ 。试验结果:检测车在单套动力单元和双套动力单元运行时,均能够顺利通过坡度  $20\%$  的坡道,冷却水温和液力变速箱油温符合设计要求;双套动力单元满负荷运转时,在海拔  $3100\text{ m}$  的平直道上最高试验速度大于  $120\text{ km/h}$ ,期间,冷却水温和液力变速箱油温符合设计要求;双

套动力单元同时运行,完成不同挡位运行试验,冷却水温和液力变速箱油温符合设计要求。

## 2) 司机室噪声测试

经过试验,在司机室在门窗密闭的情况下,检测车自行速度为 120 km/h,柴油机以额定功率输出时,司机室中央位置处稳态噪声为 76.5 dB(A),小于规定的 88 dB(A);司机座位上方 1 m 处稳态噪声为 73.2 dB(A),小于相关规定的 90 dB(A)。司机室噪声符合 TB/T 2180—2006《电气化铁道接触网综合检修作业车技术条件》中的相关规定。

## 5.4 检测系统低温试验

2016 年 11 月检测系统完成了低温性能试验,试验项目包括低温工作、低温贮存 2 项,试验温度为 (-40±2)℃。试验过程前、中、后,样品外观无变形异常现象,且能正常工作。

## 5.5 试运行考核试验

2016 年 10 月至 2017 年 1 月,在西宁供电段完成运用考核,其运行里程累计超过 1 300 km,作业时间超过 40 h。运用考核结果表明,检测车整车技术状态正常,检测系统各项功能运用良好,整车主要功能及主要部件的质量能满足高原地区、高寒条件下的运用要求。

2017 年 2 月底,检测车通过了中国中车组织的技术评审。

截至 2018 年 12 月底,检测车运行里程累计超过 8 000 km,作业时间超过 150 h,运用情况良好。

## 6 结语

高速铁路接触网检测车的研发以智能化接触网检

测车为基础,并针对青藏铁路兰新高速铁路线路高海拔的特殊环境条件进行研发设计,经车体静强度试验、整车型式试验、检测系统低温试验、高原试运行试验和兰新高速铁路段实际运用的验证,整车满足高海拔、低气温等特殊环境的 120 km/h 速度等级的运行和接触网智能化检测、监测的需求。

## 参考文献:

- [1] 赵国栋.智能化接触网检测车[J].今日轨道交通,2014(9):83-89.
- [2] 孙竹生.内燃机车总体及机车走行部[M].北京:中国铁道出版社,1984.
- [3] 张成贵,蒋世明.内燃机车总体[M].北京:中国铁道出版社,1982.
- [4] 铁道部运输局供电部,中国铁道科学研究院,西南交通大学.高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统)总体技术规范:铁运[2012]136号[S].北京:中华人民共和国铁道部,2012.
- [5] 中国铁路总公司.接触网悬挂状态检测监测装置(4C)暂行技术条件:TJ/GD 006—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014.
- [6] 国家铁路产品质量监督检验中心.CT21000型车体检测报告[R].北京:国家铁路产品质量监督检验中心,2016.
- [7] 国家铁路产品质量监督检验中心.接触网检测车(JX300型)检验报告[R].北京:国家铁路产品质量监督检验中心,2016.
- [8] 国家铁路产品质量监督检验中心.接触网检测车(JX300 II型)检测报告[R].北京:国家铁路产品质量监督检验中心,2016.

作者简介:王文聪(1990—),女,现从事轨道交通工程机械总体设计工作。

(上接第 79 页) 相关故障诊断方法已部署于朔黄机务段地面诊断系统,极大地提高了地面检修工作效率及机车运行效率。

## 参考文献:

- [1] 吴勇忠.浅析HX<sub>01</sub>型电力机车牵引变流器突出故障与处理[J].科技展望,2016,26(33):28.
- [2] 戴晨曦,刘志刚,胡轲琨.关于高铁CRH2型动车组逆变器故障诊断研究[J].计算机仿真,2016,33(4):217-222.
- [3] 张雅琴,滕青芳,李国飞,等.基于电流残差的逆变器开路故障诊断方法[J].兰州交通大学学报,2016,35(3):112-118.
- [4] 陈怡恬,陈特放,成庶,等.基于输入电流的牵引变流器开关管开路故障诊断方法[J].电气工程学报,2016,11(5):11-20.
- [5] 陈特放,钟艳科.基于小波分析和SVM的主变流器故障诊断[J].机车电传动,2009(1):57-59.
- [6] 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[J].铁道机车车辆,2007,27(2):4-7.

- [7] 李全林,何忠韬.SOM神经网络在电力机车主变流器故障诊断中的应用[J].铁道机车车辆,2009,29(2):13-16.
- [8] 魏志磊,苏宏升.基于遗传神经网络的电力机车主变流器故障诊断[J].电子质量,2009(12):39-42.
- [9] 岳生吉,王焕民,牛彩云.基于粗糙集的机车牵引变流器故障诊断方法[J].铁路计算机应用,2012,21(3):62-65.
- [10] 朱琴跃,叶双挺,谭喜堂,等.基于改进蚁群神经网络的牵引逆变器故障诊断[J].机电一体化,2014,20(11):52-57.
- [11] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [12] FRIEDMAN J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine[J]. Annals of Statistics, 2001, 29(5): 1189-1232.

作者简介:王建华(1982—),男,工程师,长期从事电力机车运用检修和技术管理工作。