

老旧内燃机车纯电改造的研究和运用

刘海华¹, 赵 献², 王少春², 高素君², 付金贵², 韩淑娟²

- 内蒙古包钢钢联股份有限公司工程服务公司, 内蒙古 包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司运输部, 内蒙古 包头 014010)

摘要:随着全球经济的发展,能源匮乏和环境污染日益严重,低碳环保、节能减排已成为全球关注的焦点。在此背景下,包钢(集团)公司积极响应国家号召,推动老旧内燃机车的淘汰与更新,致力于实现绿色、低碳的铁路运输。文章以包钢厂区纯电机车的研发与应用为研究对象,探讨了其改造思路、技术方案及实际运用效果。通过实际运用表明,纯电机车在节能降耗、减少碳排放、降低噪音等方面效果显著。文章的研究为各行业提供了绿色铁路运输的解决方案,也为推动我国轨道交通装备的绿色转型和“一带一路”高质量共建提供了实践参考。

关键词:纯电机车;节能减排;绿色铁路运输

中图分类号:U262

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2025)02-0089-07

Research and Application of Pure Electric Transformation for Old - fashioned Diesel Locomotives

Liu Haihua¹, Zhao Xian², Wang Shaochun², Gao Sujun², Fu Jingui², Han Shujuan²

- Engineering Service Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Transportation Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: With the development of global economy, the energy poor and environmental pollutions are becoming increasingly serious as well as low carbon and environmental protection, energy conservation and emission reduction have become the focus of global attention. In this context, Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd. actively responds to the call of the country, promotes elimination and replacement of old - fashioned diesel locomotives, which are committed to achieving green and low - carbon railway transportation. In this article, the transformation ideas, technical solutions and practical application effects are discussed by taking the research and development and application of pure electric locomotives in factory region of Baotou Steel as object of study. The practical application shows that the effects of pure electric locomotives on saving energy as well as reducing consumptions, carbon emissions and noises are significant. The research of this article provides the solutions for green railway transportation of all industries as well as practical references for promoting green transformation of rail transit equipment in our country and high quality co - construction of the “Belt and Road”.

Key words: pure electric locomotive; energy conservation and emission reduction; green railway transportation

随着世界各国经济的高速发展,人们对生活质量提出愈来愈高的要求,但随之相伴的是整个社会对各类资源的高度依赖以及对不可再生能源的过度开发和利用。当今世界,能源越来越匮乏,环境污染愈加严重,全球共性问题愈发突出,“低碳环保、节能减排”等绿色环保思想早已映入人们的眼帘,并且已成为全世界各国领导人共同关注与强调的话题^[1]。为了加快老旧内燃机车淘汰更新换代工作,推动铁路装备高质量发展,国家铁路局组织编制了《铁路内燃机车大气污染防治监督管理办法》和《老旧型铁路内燃机车淘汰更新监督管理办法》。

目前,包钢厂区内铁路运输都以内燃机车作为牵引动力,老旧内燃机车的尾气排放已是国家的大气污染源之一,国家铁路局和环保部强烈要求铁路运输企业解决内燃机车污染排放问题。老旧内燃机车噪音大,全负荷运转时噪音达到 90 dB 以上,严重超出国家标准的要求。在国家新发展形势的要求下,包钢(集团)公司积极响应国家号召,结合公司的实际情况,在现有设备设施基础上,开发新技术,利用新能源,在提高产能的同时,实现节能减排^[2]。

1 纯电机车的研发背景

包钢厂区内老旧内燃机车的运输成本受环保要求、油价上涨、设备性能等影响不断增加,尤其是厂内运输主要依靠牵引动力的 GK 型液力传动内燃机车,目前已运用 30 年左右,性能逐年下降。液力传动内燃机车的缺点是柴油机运转频繁处于交变负荷中,油耗高、燃烧不充分、环境污染严重、工作效率低。在机车待命时,柴油机需要消耗大量燃油怠速运转来满足机车发电、预热、保温、等待等需求。另外,液力传动内燃机车还存在柴油机、传动箱等主要部件故障率高、维护费用高等突出问题。

世界首台燃料电池机车于 2002 年由美国开发完成;2006 年世界上第一台燃料电池混合动力机车问世。近几年来,国内外燃料电池混合动力机车取得很大的发展。2021 年中国中车股份有限公司与同济大学联合研制出氢燃料电池混合动力机车。同年,大同机车厂研制的氢燃料电池混合动力机车在国家电投锦州一白音华铁路试运行,2023 年底该机车已安全运行超 3 万公里。2024 年 6 月,中车戚墅堰机车有限公司自主研发生产的氢能源机车正式交付智利安托法加斯塔—玻利维亚铁路公司。这是国

内第一台出口的氢能源机车,对推动中国轨道交通绿色装备走进国际市场意义重大。2024 年 6 月 28 日,中国中车集团公司在北京面向全球集中发布 7 款新能源机车,这 7 款新能源机车具有“内燃发动机+磷酸铁锂动力电池”的混合动力机车、“磷酸铁锂动力电池”纯电动机车、“氢燃料电池”纯电机车三种动力配置,分别为 1 000 kW、1 500 kW、2 000 kW 三种功率,可全面满足国内外钢铁冶金、矿产、电力、煤炭、港口等企业铁路运输场景需要。系列化新能源机车的研制是中国中车致力于推动国内老旧设备更新迭代,轨道交通装备绿色低碳转型,科技创新自立自强,为高质量共建“一带一路”提供“中国方案”的具体实践^[3]。

2 纯电机车改造思路

老旧内燃机车的原车构造复杂、改造难度大,改造中技术特点具有以下几个方面:

(1)噪音低、排放少。纯电动机车以磷酸铁锂电池为动力,采用永磁电动机代替发动机,从根本上解决了由柴油机尾气排放造成的空气污染和噪音。

(2)整车搭载大容量磷酸铁锂电池,充电速度快、安全性高、使用寿命长、续航里程长。

(3)结构简单、操作简便。纯电动机车主要以电气设备为主,机械结构简单,运转部件少,维护简便,更易操作。

(4)具有能量回馈制动。在机车制动时,能将动能转化成电能并储存到动力电池中,起到馈电制动的的作用,提高行车安全,减少闸瓦磨损,延长续航里程。

(5)具有实时显示整车行驶状态数据和在线监测功能,通过智能仪表和云平台实现远程电脑端和手机端的机车状态远程监控,及时发出故障预警,保障机车安全运行。

(6)无线遥控系统。司乘人员可在机车前后或距离 100 m 范围内对机车进行远程遥控作业。通过遥控器可实现对机车调速、制动、换向等功能,同时还具有牵引防空转、遥控器倾倒报警、无线信号中断时机车紧急制动等安全措施。遥控运行时机车具有巡航定速的闭环恒速控制,机车超速时可实现机车紧急制动,遥控器具有电池低电压监测功能^[4]。

3 技术方案及实施

机车上部从前至后依次为制动室、电池舱、司机

室。制动室与司机室为新制,电池舱外壳即车体,造型与车体一致。制动室内安装有总风缸、电动螺杆空压机组、空气干燥器、空气制动阀等。司机室加长后比原车更加宽敞、视野开阔、操纵方便,有良好的瞭望和采光条件,内装饰采用带孔型材并填充防寒

材料,具有良好的隔热、隔声和防寒功能,室内噪音 ≤ 75 db(A),为作业司机提供一个清洁、舒适、安静的工作环境。纯电机车改造后整体布局图如图 1 所示。

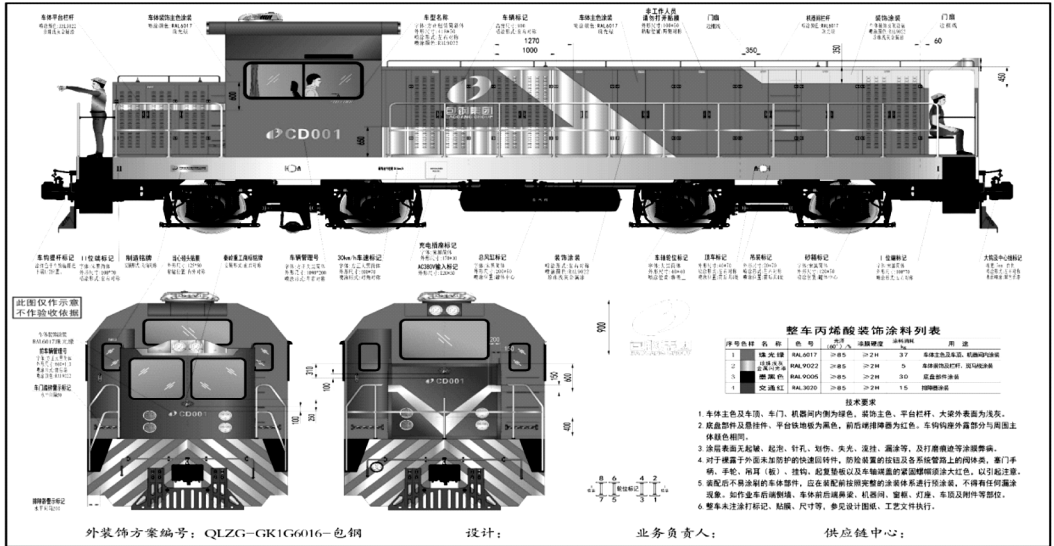


图 1 纯电机车整体布局图

动力电池系统由动力电池组、电池管理系统 BMS、温控系统、消防系统、能量管理监控系统 (EMS)、箱体系统、高压箱 PDU 等组成,其中动力电池组组成方案如图 2 所示。

进行有效地放电,并且充电系统也可以通过 BMS 上传的各种信息进行电池组的状态监测,完成安全有效的充电。

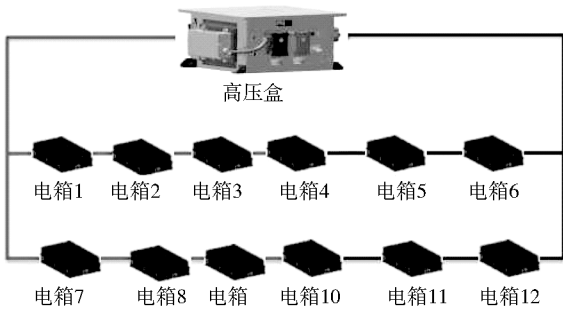


图 2 动力电池组组成方案

3.1 动力电池系统

电池管理系统主要实现电池的电压、电流、温度采集、容量诊断 SOC、电池健康状况预估 SOH、电池组单体均衡维护等功能,同时能将电池的各种状态、报警等信息及时上传给整车控制器,整车控制器通过 BMS 上传的各种信息进而控制逆变器,对电池组

(1) 电池管理系统。电池管理系统 (Battery Management System, 简称 BMS) 是电池系统的核心组成部分,是电池组与外部设备的桥梁,决定着电池的利用率,其性能对锂电池系统使用成本和安全性能至关重要。BMS 实时采集、处理、存储电池组运行过程中的重要信息,并与外部设备进行信息交换,在电池组运行过程中实时告警和保护。BMS 采用多级分布式架构设计,由总控、主控以及从控单元组成:第一级电池电压采集部分(从控);第二级从控的管理部分(主控);第三级 BMS 系统的管理部分(总控)。

(2) 温控系统。为了满足机车使用环境的变化要求,并且考虑到盐雾、灰尘等影响,动力电池系统采用液冷机组控制电池系统温度。液冷机组内部配备加热设备,冬季机车不运行时,可以通过冷却液加热电池。

(3) 消防系统。动力电池系统采用三级消防安全报警和灭火系统设计,可有效地控制事故损失,防

止火灾蔓延。

每个独立电池仓安装有极早期烟雾探测设备和烟感、温感等火灾报警系统。烟感、温感作为火灾发生时的报警设备,所有报警信号通过干接点连接到消防系统主机,在火灾发生时第一时间通知机车驾驶人员,及早发现隐患,并且声光报警器发出火灾信号,提醒现场人员注意。

在电池仓内设置有高压水雾喷头。喷头处供水压力 1.0 bar,喷头喷水强度实现向内全覆盖。仓内消防设施连接至车载消防水箱,利用消防泵增压,火灾发生后,消防泵启动,对相应的电池仓持续喷水降温,迅速控制电池着火的影响和损失方位,以确保其他仓内设备的安全。

(4)能量管理监控系统(EMS)。能量管理监控系统用于整套电池系统的能量控制与数据监管,包括温控系统及消防系统的关键信息,可以实时显示系统的运行状态和参数,记录系统报警和故障,便于用户实时监控系统的运行。该能量管理系统采用 PLC 为核心控制器,通讯延时短,响应速度快,系统运行可靠。

(5)箱体。集装箱箱体作为整车车体外表面一

部分,采用 2.5 mm 耐候钢,喷涂 C4 标准三层防腐防锈防盐雾聚氨酯材料。集装箱箱体具有保温防火设计,集装箱外壳结构、隔热保温材料、内外部装饰材料等全部为阻燃材料,箱体外观平滑整齐,箱体面漆与整车面漆一致。

(6)高压配电箱 PDU。高压配电箱 PDU 是机车动力电源的控制部件,具有电力分配、电流测量、短路保护、充放电控制、预充电、手动急停和绝缘检测端口等功能。

3.2 牵引变流系统

牵引变流器是驱动系统的控制中心,它主要起到调节电机运行状态,使其满足机车不同运行要求。具体来说就是牵引变流器从整车控制器 VCU 获得整车需求(挡位、加速、制动等指令),从动力电池获得电能,经自身逆变器调制,获得驱动电机所需电能,从而使电机的转速和转矩满足整车的启动、加速、制动、减速、爬坡、能量回收等要求。

牵引变流器主要由控制模块、驱动模块、功率模块和传感器等组成。壳体防护等级 IP68。具有动力性强、可靠性高、高效节能、电耗低、安全性好等优势,如图 3 所示。

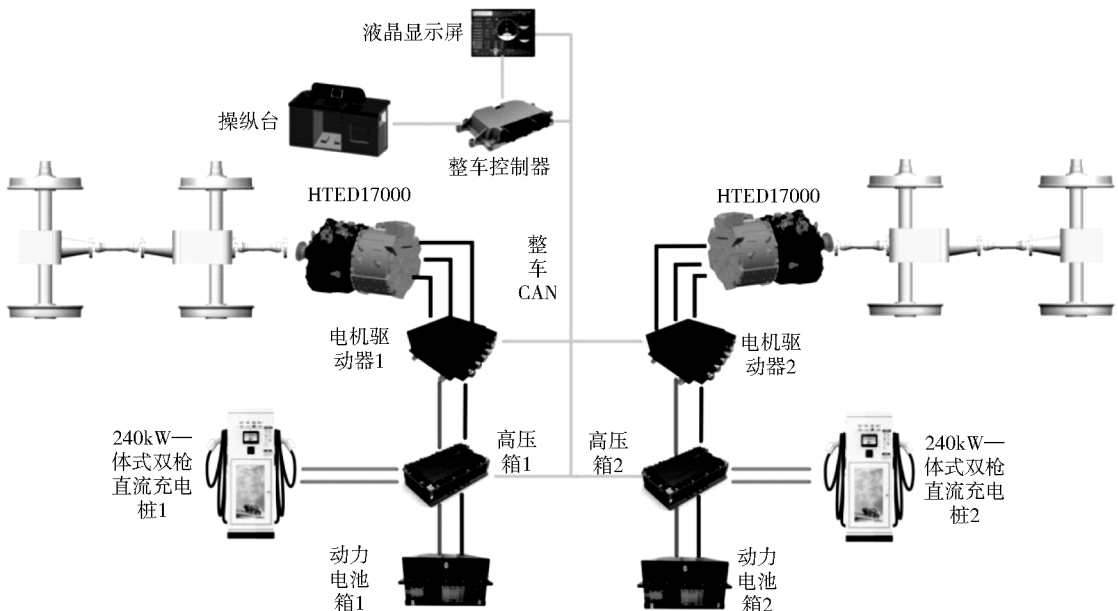


图 3 牵引传动系统

牵引电机采用成熟可靠且具有大量运用经验的全封闭水冷永磁同步电机,并借鉴多年来中车永济电机公司在牵引电机研制、高速动车组以及城轨车

辆的运营经验,不断改进和优化设计,提高了其可靠性。

能量回馈制动是纯电动机车的特有技术,主要

目标是提高车辆的能量经济性。机车减速或制动时,可将车辆在制动或惯性滑行中的动能转化成电能,再储存到电池中,可有效提高行车安全并减少制动闸瓦磨损,延长续航里程,节约能源消耗。实践证明,采用能量回馈系统可使轨道机车续航里程增加10~15%。

3.3 传动系统

电动机车牵引传动系统采用先进的直-交永磁同步牵引系统,以磷酸铁锂电池组为动力,采用国际先进的水冷IGBT变流器、矢量控制技术、电池管理系统、永磁同步电机、能量回馈制动技术等,并具有先进的故障诊断和记录功能。

永磁同步牵引系统具有起动牵引力大、动力响应快、传动效率高、运转平稳、启动过程平滑、恒速范围广等优点,特别适合于频繁启停、运行速度低的使用工况,经济性好、节能效果显著。通过4G公网和云平台可在远程电脑端或手机端实时显示机车行驶状态数据和各项监测数据,及时发出故障预警,保障机车安全运行,提高了机车的智能化、网联化、信息化水平。

机车下部为两个二轴转向架,每个轮对为牵引电机独立驱动,即轴式 B_0-B_0 。牵引电机与车轴齿轮箱为一体化结构,通过弹性悬挂装置吊装在转向架构架上。转向架中心销牵引机构、旁承、轴箱、一系悬挂装置、基础制动装置和附件等保持不变。改造后的机车以电制动为主、空气制动为辅,提高了机车制动性能并减少了闸瓦磨损。

电动机车具有独特的能量回馈制动功能,在机车制动时,将动能转化成电能并储存到动力电池中,起到馈电制动的的作用,提高行车安全,减少闸瓦磨损,延长续航里程。机车改造后总功率大于1 000 kW,牵引力比原车提高20%,最高运行速度达30 km/h。

3.4 无线遥控系统

内燃机车铁路运输遥控自动控制系统为两套独立系统,一控一备。第一套采用无线遥控控制模式,第二套采用操纵台控制模式,主要由车载控制主机、无线遥控器、电子制动器、天线组成。软件采用模块化结构设计方法,实现了对机车运行特别是恒速运行的专家式控制。系统通过转换开关实现无线遥控、原有司机操作台操作两种操作方式。机车制动系统的电子制动器和原机车JZ-7空气制动机相并联,两个装置都能独立地完成机车制动或缓解,科学合理地对机车采取遥控人为分级制动控制。

3.5 水冷循环系统

机车采用水冷循环散热系统,主要包含动力电池、牵引电机、电机驱动器的冷却散热。

动力电池共40组电箱,采用“十串四并”的水路连接方式,由于电池组内部管程较长且弯路较多,主路采用大功率无刷磁力泵,加快循环速度,快速均衡电池内各模组温度,减少首末箱温差,延长电池组寿命。

牵引电机及电机驱动器散热系统采用四套独立支路,每个支路单独安装一个泵,保证了各支路间相互不受干扰。可避免某一支路因堵塞引起循环速度受阻、热量无法及时带出,导致电机或驱动器高温的故障。同时,每一个单独水泵的运行状态可控,运行电流实时监测,管路堵塞等现象发生时可提前报警,避免造成其他更大损失,安全可靠、稳定性更高。

4 纯电机车的实际运用

4.1 前期准备

(1)作业区的选择。机车在遥控作业时遥控器与机车之间有规定的操纵距离要求,并且在必要时乘务员还需要进行搭乘作业,考虑到这两个因素,最终选择在炼铁站4[#]、6[#]高炉作业区。4[#]、6[#]高炉作业区主要负责运用鱼雷罐完成炼铁厂4[#]、6[#]高炉的铁水拉运工作,并且只有鱼雷罐车设置有适合遥控操作司机的搭乘平台^[5]。

(2)人员配置。从各班组选拔优秀乘务员经过理论及实际操作培训,考试合格后方可上岗。为安全考虑,前期每台纯电机车每班仍配备2名乘务员,待机车运用成熟且增加纯电机车投入使用后,计划一台机车配备1名乘务员,可大大缓解人员压力。

(3)相关规程、标准的制定。编制纯电机车的操作规程、技术规程、安全规程、充电管理办法以及地面充电操作、司机室操作、遥控器操作等操作指导书,为纯电机车的稳定运行及管理提供了基础保障。同时,编制机车的耗能登记表,以便跟踪机车的能耗情况。

4.2 调试运用

纯电机车CD001、CD002、CD01001先后于2023年6月份开始入厂验收后进入试用阶段。运输部结合实际作业性质、作业特点、现场操纵、日常维检等方面,持续对机车进行跟踪,观察机车的运用状态、统计相关数据、分析故障原因。经过近一年多的跟踪,多次从机车结构设计、运用性能及故障等方面与改造厂家协商并进行改进、调试、排查,最终达到预

期效果,陆续正式投入运用,实际运用效果见图 4。



图 4 纯电机车实际运用效果图

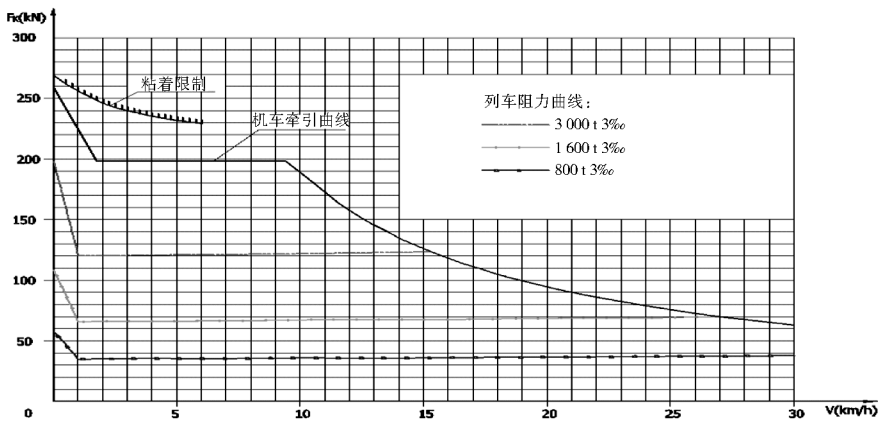


图 5 纯电机车牵引特性曲线

4.3.2 快速充电

纯电机车配置 480 kW/600 V 充电桩。该充电桩采用分体落地式设计,由整流柜和直流终端组成,集功率变换、充电控制、人机交互控制、通讯、计费计量等功能,具有对位精度高等优点。

整流柜与充电桩外观简洁大方。充电终端具有液冷系统,通过循环绝缘油回路将充电铜缆包裹,绝缘油回路直达充电端子,使铜电缆及充电端子得到实时冷却,并保持在一定的温度范围内,实现超大功率迅速充电的效果。

4.3.3 节省成本费用

4.3.3.1 耗能费用降低

纯电机车自 2023 年 9 月投入使用以来,节能效果明显,截至 2024 年 6 月底,纯电机车耗能情况见表 1,同等作业性质的内燃机车耗能情况见表 2。比较可见,每台纯电机车运用 10 个月耗能费用较内燃机车低 55.92 万元,预计 1 年可节省耗能费用 67.1 万元。

4.3 运用效果

4.3.1 性能增强

纯电机车以永磁牵引系统代替液力传动装置,针对包钢铁路运输的主要特点和现有机车的使用情况,通过电动化升级改造提高机车牵引性能。整车搭载大容量磷酸铁锂电池,安全性高、充电速度快、循环寿命长、绿色环保、续驶里程长。机车采用的交流电机可靠性远高于柴油机,提高了传动效率,降低了机车故障率。无线遥控操作有利于加快鱼雷罐与高炉“流嘴”的对准,提高了生产效率。性能特性如图 5 所示。

表 1 纯电混合动力机车能耗统计

(2023 年 9 月—2024 年 6 月)

车号	用电量 /kWh	电价 /(元·kWh ⁻¹)	电费 /元
CD01001	181 242	0.42	76 121.64
CD002	179 864	0.42	75 542.88

表 2 同作业区 GK₁ 型内燃机车能耗统计

(2023 年 9 月—2024 年 6 月)

车号	用油量 /m ³	柴油密度 /(t·m ⁻³)	油价 /(元·t ⁻¹)	燃油费 /元
0064	94.893	0.84	7 970	635 289.66

4.3.3.2 维护成本降低

GK 型内燃机车每三个月小辅修 1 次,检修成本约 3 万元/次;每三年轮修 1 次,检修成本约 150 万元/次;每九年大修 1 次,检修成本约 350 万元/次。1 台 GK 型内燃机车在一个大修期内

需要花费检修成本约758万元。

新能源纯电机车每三个月小辅修1次,检修成本约3000元/次;每三年轮修1次,检修成本约10万元/次;每九年大修1次,检修成本约350万元/次。1台新能源纯电机车在一个大修期内需要花费检修成本约380.8万元。

1台新能源纯电机车在一个大修期内比1台GK型内燃机车检修成本降低377.2万元,平均每年节省成本41.9万元。

综上所述,每改造1台GK型内燃机车成为新能源纯电机车,每年可节省成本费用109万元。

4.3.4 人力投入减少

一台内燃机车的运用需要配备8名司机和4名调车员(每班2名司机,一人瞭望一人操纵,1名调车员领车),遥控纯电机车运用成熟后,一台机车每班只需配备2名司机即可完成瞭望、操纵和调车任务,这样每台遥控纯电机车可减少4人。

4.3.5 故障率降低

厂内老旧内燃机车以大功率柴油机为动力,通过液力传动箱输送动力给转向架,大功率柴油机在频繁启动加速的工况下,故障率较高,约占内燃机车故障率的60%以上,从而导致内燃机车的大中修周期短,维护成本非常高。纯电机车本身结构简单,由电池组、变频器、变频电机及车体组成,均为国家通用设备,备品配件渠道广泛,价格低廉,维修量小、难度低,故障率很低。

4.3.6 污染排放减少

纯电机车运用后实现机车运行CO₂尾气零排放。根据BP中国碳排放计算器提供的资料:每kg柴油燃烧产生的CO₂的排放因子是74100kg/TJ;

柴油的净热值是43TJ/Gg;故单位质量柴油完全燃烧排放的CO₂质量是 $74.1 \times 43 / 1000 = 3.1863$ kg,即1kg柴油排放CO₂3.1863kg。

每改造一台机车每年减少碳排放量为 $2032010 \times 0.84 \times 3.1863 = 5438658.51$ kg,即5438.66t。

同时,噪音也大大降低,经测算噪音降至75dB以下,实现了包钢绿色、低碳、环保的运输目标。

5 结束语

包钢是我国西北地区最大的钢铁企业,自2022年以来先后投入运行油电混动机车和纯电动机车。纯电机车动力技术逐步成熟,机车设计、制造规模化,运行可靠、安全,特别是比传统的老旧内燃机车更加环保和节能,在钢铁冶金、矿产、电力、煤炭、港口等企业铁路运输运用前景将更加广阔。

参 考 文 献

- [1] 车张航. 油电混合动力列车容量配置及能量管理策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [2] 张春来. 混合动力机车运营经济性研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2020, 35(5): 35-37.
- [3] 莫荣佳. 燃料电池混合动力机车能量管理策略研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2023.
- [4] 钱曦, 毛雄杰. 新能源机车在钢铁企业运用的探讨[J]. 铁道机车与动车, 2021, 53(2): 46-48.
- [5] 赵献, 付金贵, 韩淑娟. 遥控油电混动机车的研究和应用[J]. 包钢科技, 2023, 49(2): 73-76.