

解决“最后一公里”的六轴干线电力机车动力包方案设计与分析

王涵 王蕾

中车株洲电力机车有限公司, 中国·湖南 株洲 412001

摘要: 本文基于既有 HXD1C 型六轴交流传动电力机车平台, 提出一种配置动力电池包的系统方案, 旨在解决无弓网区段“最后一公里”的运行瓶颈, 对增强机车动力储备、拓展运行范围及提升环境友好性具有重要工程价值。通过分析典型运行工况下的牵引特性, 完成了动力电池系统的容量配置与机车主电路拓扑结构设计, 并针对动力电池包的机械结构合理性、绝缘与密封性能以及防火安全机制进行了系统评估, 旨在确保动力电池系统选型与结构设计的可靠性, 提高机车在特殊工况下的持续运行能力与综合性能表现。

关键词: HXD1C 电力机车; 最后一公里; 动力电池包; 主电路设计; 安全性分析

Solve the "The Last Mile" of the six-axle trunk electric locomotive Design and analysis of power package schemes

Wang Han, Wang Lei

CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., China Hunan Zhuzhou 412001

Abstract: Configuring a power battery pack based on the existing HXD1C six-axle AC drive electric locomotive is of significant practical importance for addressing the "last mile" problem in sections without catenary power supply. This enhancement provides power reserve, increases power output, and ensures environmental friendliness. Based on the traction characteristics of the locomotive under typical operating conditions, this paper conducts power parameter matching and main circuit scheme design for the power battery pack. Subsequent analysis focuses on the rationality of the mechanical structure, insulation and sealing performance, and fire safety of the power battery pack. This ensures the reliability of the battery selection and structural design, thereby improving the operational capability and performance of the locomotive under special working conditions.

Keywords: HXD1C electric locomotive; The last mile; Power battery pack; Main circuit design; Security analysis

1 概述

1.1 选题背景与意义

随着电力储能技术的不断发展, 在轨道交通装备领域, 解决铁路运输“最后一公里”问题的技术路径日益受到重视。目前, 国内外已在牵引蓄电池作为辅助动力的轨道交通车辆方向开展多项研究, 例如双源制电力调车机车平台已实现初步应用。然而, 在干线货运电力机车领域, 尤其是大功率交流传动平台下的双源制动力方案研究仍相对薄弱。为适应多元化运营场景的迫切需求, 开展面向“最后一公里”运行的交流传动六轴货运电力机车系统设计与分析, 具有明确的工程价值与现实意义。

本研究以 HXD1C 型电力机车为平台基础, 通过集成大容量动力电池包, 构建了一种具备辅助动力功能的 7200kW 级交流传动干线六轴电力机车平台。该方案主要针对对货运站、港口、厂矿等无弓网供电区域的末端运输

需求, 实现“最后一公里”的动力延续。机车在维持与 HXD1C 平台一致的主要性能指标与总体结构基础上, 将供电系统由单一接触网供电拓展为“接触网 + 牵引蓄电池”双模式供电模式。此外, 为适应新增动力系统运行工况, 对车体布局、通风系统与主辅电路等关键系统进行了协同优化与适应性改进, 以保障整车在新的供电模式下的可靠运行^[1]。

1.2 现存问题

本项目方案基于国铁 HXD1C 机车进行设计, 需关注以下几点问题:

(1) 需明确具体变更项点及其引发的其他部件或系统的连锁变化, 重点考虑动力包系统及主电路的优化提升。引入动力包系统供电后, 需对主电路进行调整与优化^[2], 以适应新的供电方式与需求。设计过程中应确保各系统间的协调与协同工作, 以提升整车性能与可靠性。

(2) 需关注参数选取合理性及各系统间接口匹配性问题。参数选取不当可能导致机车性能不稳定甚至故障。因此,在确定参数时,需综合考虑系统整体运行需求,确保部件间的匹配性。同时,系统接口设计的合理性也至关重要,应保证各部件正常协同工作,提升系统整体效率与可靠性。

(3) 针对新增的动力电池,需重点考虑其材料类型、电气原理逻辑、配置参数分析、工作模式及安全性分析等方面。

综上所述,本项目在明确变更顶点及相关系统变化的基础上,需注重参数选取的合理性与系统接口的匹配性,以确保整车设计的安全性及可靠性。通过细致的分析与优化,为解决“最后一公里”难题提供有效的解决方案。

2 动力包方案设计与分析

解决“最后一公里”的六轴干线电力机车方案通过加装动力包以满足“最后一公里”牵引作业需求。机车采用AC25kV接触网与车载动力包作为动力能源,两种供电方式独立工作,具体如下:

(1) AC25kV接触网牵引工况下,主电路原理进行优化升级:牵引变流器由主辅分离优化为主辅一体;主电路优化为带高压箱的双主断方案;采用交-直-交传动结构。

(2) 动力包牵引工况下,机车主电路采用直-交传动结构,动力包组电源直接接入直流中间回路。

2.1 电量需求分析

基于干线重载机车设计理念,机车需满足:在电气化铁路接触网供电模式下,单机牵引5000t,可在最大坡度6‰的坡道上持续运行;在货运站、港口、厂矿等非电气化区域,机车以蓄电池模式在平直道上以30km/h速度牵引5000t,可持续运行1小时。根据目标用户及线路实际运用需求,机车在动力电池供电情况下需满足基本工况。

工况:机车单机完成5000t装煤作业,在平直道以30km/h的速度运行1h,另外估算机车速度从0加速到30km/h,每提升5km/h用时60s,得到所需耗电量数据如表1所示:

根据表1数据,并考虑牵引电机、齿轮传动等效率,折算至动力电池输出端电量为567.02 kWh。此外,动力电池模式下机车辅助系统能耗为140 kWh,故基础工况下总耗电量为707.02 kWh。

考虑到动力电池可用电量(按70%计)及老化衰减(按10%计)等因素,所需动力电池总电量需大于707.02 / (0.7 × 0.9) ≈ 1122.25 kWh。为满足基本工况续航要求并预留裕量,动力电池电量确定为1200 kWh。

基于运行线路的普适性考虑,在设计阶段将动力电池容量按照最大可容纳电量1200 kWh进行配置,以满足既定运营要求。

2.2 牵引特性需求

设计要求规定,在动力包供电模式下,机车最高运营速度为120 km/h,轮周牵引功率为1000 kW,最大电制动功率为500 kW,最大制动力为100 kN。

在动力电池模式下,牵引特性最大牵引力为570 kN,恒功率速度范围为6-120 km/h;制动特性最大制动力为100 kN,恒功率速度范围为18-120 km/h。平直道上,集成“最后一公里”功能的交流传动六轴货运电力机车单机牵引5000t可维持约49 km/h的运行速度。

2.3 主电路方案设计

对关键设备布局与主电路进行了优化设计。顶置设备方面,采用高压箱结构,将空调主机布置于司机室顶盖,并增设动力包冷却系统;机械间内集成有动力包柜与辅助变压器柜,并配置两组独立牵引风机;车下设备则包括新增的斩波电抗器与制动电阻,同时实现了牵引变压器的小型化。主电路采用具备冗余能力的双主断路器结构,牵引

表1 工况耗电量

速度(km/h)	机车基本阻力(kN)	车辆基本阻力(kN)	列车总阻力(kN)	轮周功率(kW)	时间(s)	耗电量(kWh)
0	7.36	171.68	179.03	0.00	/	0.00
5.00	1.82	46.46	48.28	67.06	60.00	0.37
10.00	1.90	48.09	50.00	138.88	60.00	2.31
15.00	2.00	50.04	52.04	216.83	60.00	3.61
20.00	2.12	52.29	54.41	302.27	60.00	5.04
25.00	2.26	54.85	57.11	396.57	60.00	6.61
30.00	2.42	57.71	60.13	501.08	3660.00	501.08
合计						519.03

变流器则采用主辅一体化集成设计，有效提升了系统的可靠性与空间利用率。

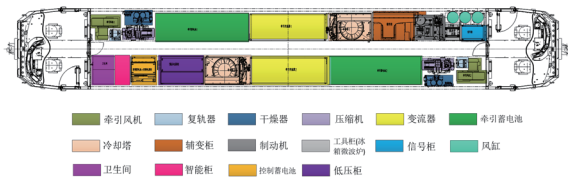


图1 机械间设备布置图

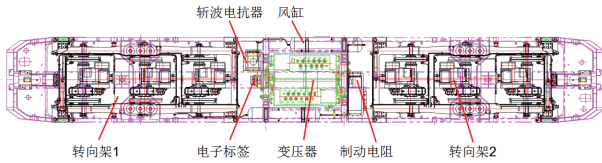


图2 车下设备布置图

由图 1、图 2 可知，本项目新增两柜动力电池，控制电源柜与控制蓄电池柜采用集成设计，新增智能柜，并对各设备安装位置进行适应性调整^[3]。

本项目主电路设计方案新增动力包、线路电抗器及制动电阻等器件。接触网与动力电池两种供电方式确保机车运行过程中的能量供给。

主电路主要由网侧电路、主变压器、牵引变流器和牵引电机组成。在升弓模式下，机车主变压器原边通过受电弓、主断路器得电。主变压器次边 6 个独立的牵引绕组分别向 2 台牵引变流器的 6 个四象限变流器供电。每台牵引变流器的 3 个四象限变流器并联后向 3 个电压型 PWM 逆变器供电，每个逆变器由相应牵引控制单元（TCU）独立控制，驱动 3 台牵引电机，实现转向架轴控，保证机车正常运行。

在无弓网工况下，动力包通过牵引变流器内的双向 DC/DC 模块、中间直流回路及逆变器模块输出电能，为牵引电机及辅助变压器供电，满足“最后一公里”的供电需求。另外本项目增加了线路电抗器，与动力包的斩波充电机配合使用。斩波充电机采用柔性开关技术，可根据电池电压传感器反馈自动调整充电参数。线路电抗器用于抑制电力系统谐波、提升系统稳定性、保护设备免受负载波动引起的过电流和过电压冲击。车底设备中增设制动电阻，用于消耗动力包模式下电制动产生的再生能量^[4]。

上述器件的增设，保障了动力包在无弓网工况下为机车供电的安全性与可靠性，更好地满足了机车“最后一公里”的牵引需求。

2.4 动力包方案

2.4.1 动力电池类型选择

当前轨道交通领域应用的动力电池主要有铅酸蓄电池、锂电池等。铅酸蓄电池能量与功率密度较低，体积和重量较大，常用于机车控制回路。锂电池中，磷酸铁锂电池与钛酸锂电池具有较高的能量效率与突出的循环寿命指标。主要性能参数对比如表 2 所示。

如表 2 所示，铅酸电池存在比能量低、循环寿命短及维护频繁等局限性。与之相比，磷酸铁锂电池具有较高的能量密度、良好的稳定性及较长的循环寿命^[5]，更契合本项目的动力电池性能需求。此外，在性能与钛酸锂电池相当的前提下，磷酸铁锂电池成本更低，有助于降低项目整体成本。综上，本项目选用磷酸铁锂电池作为动力电池方案。

2.4.2 动力电池包装装置设计

本项目配置两个动力包柜，总电量为 1200 kWh。在无弓网工况下，两个动力包柜的电池同时供电，两个辅助变压器并联输出恒频恒压电源为辅助负载供电。若两箱动力电池电量差异显著，辅助逆变器可进入冗余模式，由大容量动力包为所有负载供电。

动力电池系统单柜包含两个电池支路子系统，单个电池支路子系统电气原理图如图 3 所示。每个动力电池支路由 12 个电池包串联构成，一个电池包内含 4 个模组。电池系统采用高压熔断器实现过载保护及电池箱间内短路保护，电流传感器用于检测电池组充放电电流，为电池管理系统（BMS）提供实时电流信息。电池系统的层级结构可类比为：电芯组成模组，模组与 BMS 从控部分构成电池包，BMS 主控单元则进行整体管理。

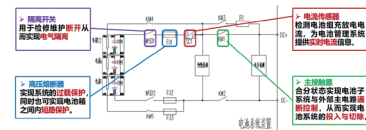


图3 单个电池支路子系统电气原理图

表2 两者主要性能指标

种类	能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	能量效率(%)	循环寿命/次	安全性能	价格
铅酸电池	35~50	80%	400~600	很好	低
钛酸锂电池	80	>90%	>10000	很好	高
磷酸铁锂电池	80~120	>90%	4000~6000	很好	低

动力电池具体组成结构如图 4 所示。

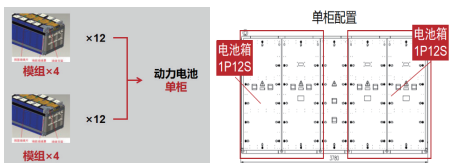


图4 动力电池单柜组成结构

根据系统需求与工况评估, 选用 228Ah 系统方案, 其配置容量超过 1200 kWh, 能满足技术条件要求, 且可靠性高、寿命长。依据动力电池总体技术要求, 系统参数如表 3 所示。

3 动力包安全性分析

动力电池系统的安全性至关重要, 因此系统中设置了多重保护与监测电路, 典型包括:

BMS: 电池管理系统, 保证动力电池不被滥用, 延长使用寿命。

BMU: 电池管理单元, 监控运行过程, 异常情况下切断电池支路主回路。

BSU: 电池监控单元, 采集电芯单体电压与电池箱温度信息, 执行均衡控制。

BMS 三级架构安全性冗余设计及动力电池系统通讯架构原理图分别如图 5、图 6 所示。

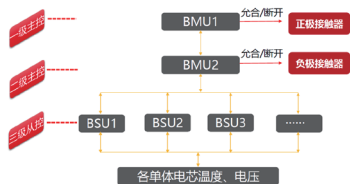


图5 BMS三级2安全性冗余设计

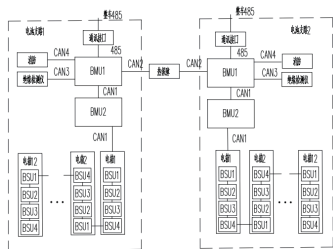


图6 动力电池系统通讯架构原理图

正负极接触器由不同的电池管理单元控制, 此设计可防止因单个接触器粘连或单主控失效导致主电路无法及时断开, 增强了系统安全性。

3.1 结构安全性设计

动力包设计需综合考虑电压平台与总能量需求, 确定机械尺寸与电气参数, 并满足 IP 防护等级、电连接及安全设计要求。结构强度设计依据《GB/T 21563-2018 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验》。螺栓连接设计遵循《DIN 25201:2004-04 铁路车辆及其组件的设计准则 - 螺栓连接》与《GB/T 3098.13-1996 紧固件机械性能螺栓与螺钉的扭矩试验和破坏扭矩公称直径 1~10mm》。电池箱体防护等级达到 IP54^[6]。

机车运行中, 机械间设备会受到来自轨道的激励及加减速冲击。可靠的机械结构设计、良好的绝缘与密封性能可为动力包内部的电芯、模组、电器元件及传感器提供保护, 确保其正常工作。

动力包机械结构设计需满足以下要求:

动力包与安装框架间的固定结构必须牢固, 防止松动或脱落。

动力包外部刚度与强度需符合国家标准, 确保在碰撞挤压下变形量处于安全范围内, 避免外壳破裂。

此外, 动力电池设计需考虑绝缘与密闭性要求, 防止液体侵入导致短路。设计时可在电池箱体内壁涂抹绝缘漆以提高绝缘强度^[7], 并在电池包与整车插接件处采取密封措施。动力电池单体需通过严格的安全性试验, 包括过充/过放、短路、跌落、加热、挤压、海水浸泡、温度循环、针刺等。

3.2 充放电控制安全性设计

系统充放电控制策略包含安全设计, 正常使用中避免电池系统出现过充、过放等电滥用行为。SOC 通常在 20% 至 90% 范围内, 既保证系统能吸收制动能量, 又满足最低可用电量需求。所有充放电工况均严格限制在 BMS 允许的电流、电压范围内, 确保电池系统安全。

表3 动力电池系统参数

序号	类别	项点	备注
1	电芯类型	磷酸铁锂电池	
2	额定电压	1391.04V	
3	电压范围	1373V-1493V	SOC20%~90%
4	额定电量	1268kWh	
5	输出功率	900kW (持续), 1250kW (30min), 1800kW (5min)	1800kW运用时间具体取决于电池SOC、温度以及环境温度
6	输入功率	1200kW (持续)	

3.3 消防灭火安全性要求

每个电池单柜配备一套自动灭火系统,由消防灭火剂罐、火情探测器、火灾防控控制器、驱动阀及消防管路等组成。该系统能实现电池包内部早期火灾感知、智能判断与初期火灾抑制,具备热失控早期预警、自动灭火及手动启动灭火功能,保障每个电池包的消防安全^[8]。

采用集中式主动灭火装置。一旦某个电池包发生热失控,灭火剂通过管道喷入相应电池包或高压箱,确保及时扑灭明火且防止复燃,满足电池防火安全要求。

4 结语

本文提出在电气系统中增设动力电池包,以解决机车在非电气化线路的“最后一公里”的运行需求。主要研究内容如下:

(1) 阐述了课题的选题背景与现实意义,介绍了机车在解决货运站、厂矿等非电气化区域“最后一公里”作业问题上的实际需求,论证了加装动力电池方案的必要性与技术适应性。

(2) 基于动力电池包的整体设计需求与典型运用工况,制定了总体设计方案。通过动力电池牵引工况下的电量需求分析、牵引特性分析及机车主电路方案设计,验证了该方案满足“最后一公里”作业工况要求的合理性。同时明确了动力电池选型及关键加装设备配置,为安全性分析研究奠定了基础。

(3) 围绕动力电池选型与设备方案,开展了结构安全

性、充放电控制策略及消防灭火系统的设计分析,综合考虑了机械结构、绝缘密封性及散热性能等因素,确保了动力电池设计方案具有较高的安全性与运行可靠性。

本文所提方案为扩展电力机车运行范围、提升运营灵活性提供了可行的技术路径。

参考文献:

[1] 陈奎,康明明,王秀玲等.双源制机车电气系统设计[J].内燃机与配件,2023.

[2] 马晓宁.双源制调车电力机车电气系统[J].铁道机车车辆,2013.

[3] 乔显华,陈新溅,李宁.长沙地铁2号线蓄电池电力工程车电气系统[J].机车电传动,2015.

[4] 贾建坤.一种混合动力调车机车电气系统设计[J].中国科技信息,2023.

[5] 雷欣.辅助动力包电力机车辅助电气控制系统设计与实现[D].湘潭大学,2021.

[6] 袁杰,付尧,刘昊等.内燃动力包火灾防控系统的研究与开发[J].铁道机车与动车,2022.

[7] 李彤.双源制地铁工程车电池管理系统设计[D].北京交通大学,2019.

[8] 高首聪,刘可安,李鹏.HX_D1C型电力机车电传动系统设计及运用[J].机车电传动,2012.

作者简介:王涵,女,硕士,研究方向:从事电力机车电气设计工作。