



智能转运设备(AIV)充换电方案研究

秦涛¹, 卫立星², 杨嘉祎¹, 林结庆², 徐漪凡²

(1. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 智能转运设备 AIV(autonomous intelligent vehicle)作为大型全自动化集装箱码头的核心水平运输设备,其动力能源供给方式直接影响港区营运作业效率、运营成本和装卸工艺系统的可靠性。针对上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程电力驱动 AIV 能源介质补充方式的选择,对电力驱动 AIV 的充电及换电两种能源介质补充方式进行综合分析比选,确定采用智能换电机更换电池方式为 AIV 转运设备提供补能;针对智能换电机平面位置的确定及其设备布置方案的选择,结合该工程年吞吐能力、土地利用及车流组织等多种因素进行论述,得到一种适用于该工程的智能换电机布置模式。作为大型全自动化集装箱码头,该工程水平运输设备 AIV 主要补能方式的应用以及智能换电机系统的布置方案可为类似港口工程建设提供决策依据。

关键词: 智能转运设备; 能源供给方式; 智能换电机

中图分类号: U691.6+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0151-08

Charging and battery swap solutions for autonomous intelligent vehicles

QIN Tao¹, WEI Lixing², YANG Jiayi¹, LIN Jieqing², XU Yifan²

(1. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: AIV (autonomous intelligent vehicle) as the core horizontal transport equipment in large-scale fully automated container terminals, directly affects the operational efficiency, operating costs, and reliability of loading and unloading process system in the port area through its power and energy supply mode. To the selection of energy medium supplementation methods for electrically driven AIVs in the phase I of the container terminal renovation project in the Luojing port area of Shanghai Port, a comprehensive analysis and comparison of the two energy medium supplementation methods of charging and battery swapping for electrically driven AIVs are conducted. It is determined that the intelligent battery-swapping system would be adopted to provide energy supplementation for the AIV transfer equipment. Regarding the determination of battery swap station locations and layout configurations, multiple factors are thoroughly evaluated, including: annual throughput capacity, land utilization efficiency and traffic flow organization. The analysis obtains a layout mode of the intelligent battery swap station suitable for this project. As a large fully automated container terminal, the application of the main energy replenishment method for the horizontal transportation equipment AIV and the layout scheme of the intelligent battery swap system in this project can provide decision-making basis for the construction of similar port projects.

Keywords: autonomous intelligent vehicle; energy supply mode; intelligent battery swap system

上海港罗泾港区集装箱码头改造工程为功能调整型改造项目,按全自动化集装箱港区模式设

计,采用“自动化单小车集装箱装卸桥+智能转运车(autonomous intelligent vehicle, AIV)+自动化轨

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 秦涛(1983—),男,高级工程师,研究方向为港口智能化。

道式集装箱龙门起重机 (automated rail mounted gantry, ARMG) ” 的装卸工艺方案^[1]。智能转运设备 AIV 作为全自动化集装箱港区的核心水平运输设备,其能源供给方式直接影响港区营运作业效率、运营成本和装卸工艺系统可靠性。

上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程智能转运设备 AIV 采用纯电方式,以电池作为能源介质储能方式。目前电池储能的能源介质补充方式有换电、充电桩、机会充电和非接触式充电等。王伟等^[2]对自动化集装箱码头纯电动 AGV 换电式、桩充式和非接触式充电等传统补能方式进行分析对比,提出一种设备不停车循环充电能源补充方式,青岛新前湾集装箱码头有限责任公司^[3]在自动化码头将充分应用循环充电技术;陈培等^[4]、郅佩琦等^[5]、杨其飞等^[6]研究了自动化集装箱码头水平运输设备充电过程中的调度策略及其补能设施的选址;张宇欣等^[7]、金祺等^[8]、黄宇超^[9]探讨了自动化码头 AGV 换电站系统及布置。姜桥^[10]对上述 4 种典型能源介质补充方式进行研究,从优缺点、适应场景、工程投资等维度综合比选,确定适合自动化集装箱码头水平运输设备电池储能能源补充方式主要有换电式和充电桩式。规模

等级高、水平运输设备数量多的码头建议使用换电模式。上述研究中换电设施均基于钢混结构的换电站,土建投资较大;智能换电机采用钢结构外立面及集装箱式结构,可确保整体设施的防护等级,并且在布置的灵活性、占地面积少、消防安全性能高等方面有较大优势,总体性价比更高。该工程水平运输设备电池换电采用智能换电机。

综上,针对该工程电力驱动 AIV 能源介质补充方式的选择,对充电及换电两种能源介质补充方式进行综合分析比选,并且对智能换电机平面位置的确定及其设备布置方案的选择,结合该工程年吞吐能力、土地利用及车流组织等多种因素进行论述,得到适用于该工程的智能换电机布置模式,可为同类型港口工程建设提供决策依据。

1 智能转运设备 AIV 供能方式的确定

上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程结合工程特点对 AIV 的充电及换电方案进行综合分析,从布置方式、补能方式、建设成本及对生产的影响等方面进行比较,见表 1。

表 1 充电及换电方案比较
Tab. 1 Comparison of charging and battery swap solutions

方案	布置方式	补能方式	建设成本	其他
智能换电机	集中布置,可实现电池的集中管理和监控,监测电池性能和状态;减少车辆聚集数量,提高土地利用率	快速完成电池更换 (约 150 s), 高效补能,提高集装箱转运设备利用率	设钢结构外壳,集中配置变配电、智能充电及换电仓、站控系统及仓内消防、暖通系统等,建设成本较高	可通过更换电池快速解决因电池故障导致的车辆停机
充电桩	分组、多点布置,便于 AIV 就近调度充电;需提供更多停车位,降低了土地利用率	充电需 1 h, 充电时转运设备停止作业	每组配置变配电设施及充电桩等,电缆数量较多,总体建设成本相对较低	桩数量多,便于 AIV 批量同时进行补能,但可能影响生产调度,需增配集装箱转运设备数量

考虑充电桩对单台集装箱转运设备补能时间相对较长,且在港口运营高峰时会发生同一时间段内多台设备集中充电的情况,对系统调度要求较高;结合智能换电系统可高效完成电

池更换、集装箱转运设备利用率高、对港区作业效率影响较小且系统可靠性较高等优点,该工程智能转运设备 AIV 电池储能的补能采用智能换电方式。

2 智能换电机方案

换电时, AIV 进出换电仓可采用中部贯通式

和端部垂直式两种车流组织模式。中部贯通式见图 1, 端部垂直式见图 2。

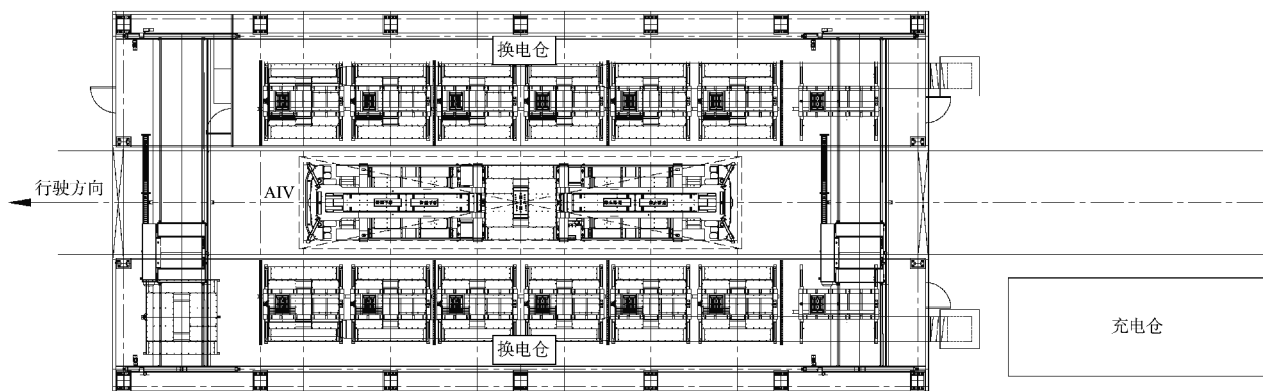


图 1 AIV 中部贯通进出方式
Fig. 1 AIV center-passage method

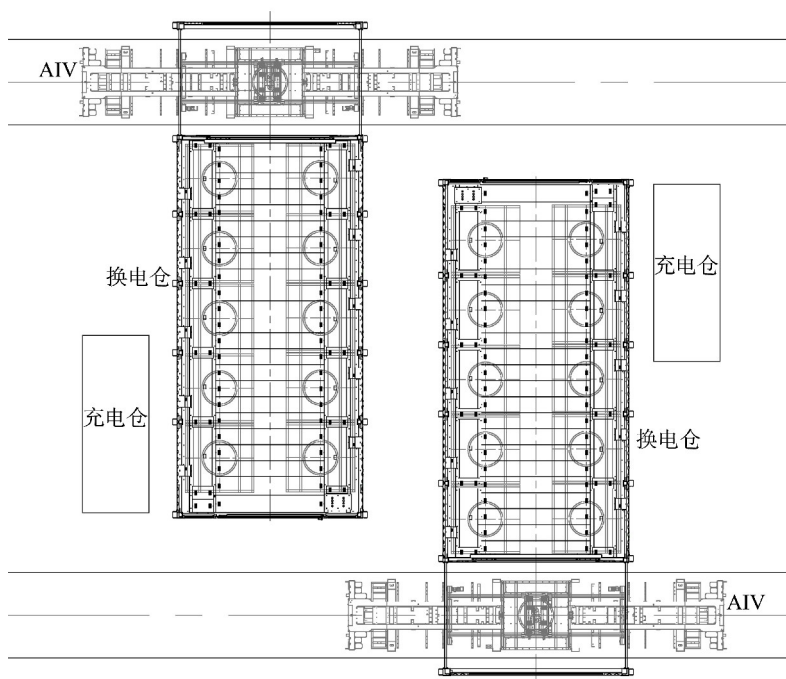


图 2 AIV 端部垂直进出方式
Fig. 2 AIV vertical access method at the end

工程共配置 2 套智能换电机。总平面结合港区整体车流组织, 将其成组布置在横一路北侧和纵二路东侧位置, 为港区智能转运设备 AIV 提供自动换电服务。对智能换电机系统布置模式进行比选: 相比端部垂直式, 中部贯通式在垂直车流

方向上的宽度占用较少, 有利于土地利用, 且中部贯通式模式更便于双智能柔性吊装换电机器人同时进行车辆电池及满电电池的吊取, 确定采用 AIV 贯通式进出车流组织模式, 智能换电机平面位置见图 3。

机平均每天充换电能力不小于 220 次, 换电仓内布置 1 条换电作业车道, 换电时 AIV 采用贯通式车流组织模式, 车辆采用东进西出的贯穿

路径。AIV 智能转运设备换电时所更换电池包电量应为满电状态。2 套智能换电机设备平面布置见图 5。

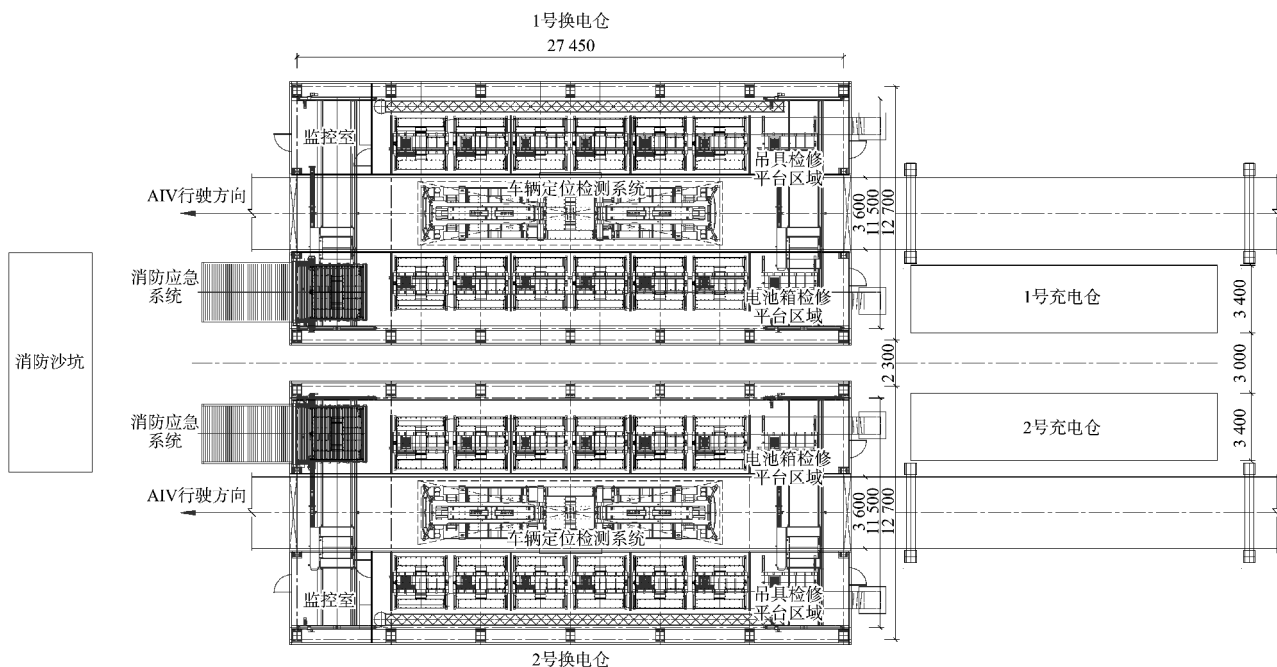


图 5 智能换电机设备平面布置 (单位: mm)

Fig. 5 Layout plan of intelligent battery swap station equipment (unit: mm)

4 智能换电机系统

4.1 系统组成

每套智能换电机系统配置 1 套充电仓和 1 套换电仓。

充电仓除壳体系统外, 主要配有高压进线柜、高压出线柜、高压 PT 柜、干式变压器、低压进线柜、低压馈线柜、低压 SVG 柜、控制柜、工具柜、智能充电机及消防系统等。12 台高功率直流充电机可对电池进行快速充电, 单台充电机充电电流最大为 400 A, 可实现电池持续充电。

换电仓除壳体系统外, 主要配有双智能柔性吊装换电机器人、智能换电吊具、充电底托、检测系统、车辆定位系统、视频监控系统、站级监控系统、照明系统、通信信息系统、消防系统、冷风系统等辅助设施系统及限高检测系统等。

智能换电机系统主要性能如下:

1) 换电仓采用钢结构外立面, 充电仓采用集装箱式结构。

2) 每座充电仓集成一组 10 kV 高压开关柜、

2 套 2 000 kVA 降压变压器、2 套低压柜及 12 套充电机。

3) 换电仓和充电仓均采用防水结构, 防止雨水和积水进入充/换电仓内部, 符合 IP44 等级标准。

4) 换电仓采用双智能柔性吊装换电机器人, 对电池箱进行吊装取放, 实现 AIV 智能换电服务。

5) 配电及充电系统内集成的 12 台 360 kW 充电机, 服务储电量 350 kW·h 的电池箱, 每组充电机的输入和输出连接电缆满足充电机 360 kW 功率需求。

6) 换电仓每次换电时间不高于 150 s (从开始执行换电到换电结束的时间)。

7) 换电仓采用双换电机器人模式。正常运行模式下, 其中任意一台换电机器人担任吊取车辆乏电电池工作, 另一台换电机器人担任放置满电电池工作, 在任意换电机器人发生故障时, 可自动或手动将其移动至智能换电机换电仓端部, 另一换电机器人可以继续实现整个换电功能。

8) 换电仓进出口处配置自动门, 同时为充电

系统设计进出风通道，配置强制冷风设施。

9) 充电仓和换电仓配有完善的辅助设施，包括防雷接地系统、消防系统、照明系统和辅助标识等。

4.2 主要设备和系统

4.2.1 智能充电机

1) 充电机充电系统采用模块化设计，由多模块并联而成，支持模块的热插拔，具有自动充电、电量计量、告警等操作。

2) 在充电过程中，充电机依据转运设备电池管理系统提供的数据动态调整充电参数，执行相应动作，完成充电过程。

3) 充电机具备连接确认功能、对充电接口输出电能进行计量的功能、在站级监控配备输入和显示功能、充电机状态指示功能和掉电保存功能，配置有急停装置及具备防止误操作的防护措施。

4) 充电机输出回路与转运设备电池箱输入回路隔离控制，保护充电时设备和人员的安全。

5) 充电机具备电源输入侧的过压、欠压保护，输出过压保护，短路电流保护，过温保护，开门保护，防止反接功能，防逆流功能，直流接触器触点粘连检测和雷电防护等功能。

6) 充电机具备对充电接口的温度检测功能，当温度异常时及时终止充电作业。

4.2.2 一体化电池包

智能转运设备 AIV 电池包采用卧式结构，放置于 AIV 车体中部。电池包卧式结构的应用，相比背包式电池包而言，可降低整体设备重心，增

强了 AIV 整体设备的稳定性。

1) AIV 设备的动力电池容量 350 kW·h，为磷酸铁锂充换一体式电池包。

2) 对一体化电池包进行全寿命管理，可充放电约 2 700 次。

4.2.3 智能换电机器人

智能换电机器人集成在换电仓内，每座换电仓配置 2 台。

1) 智能换电机器人采用桁架式结构，换电机器人行走在桁架上，全自动运行。

2) 智能换电机器人配置维修通道，保证所有机械电气零部件的正常维护与检修。

3) 换电机器人可在 X、Y、Z 方向进行移动，通过系统精确定位完成对电池的更换工作。

4) 换电机器人具有紧急制动、断电保持、提升电机损坏保持、急停按钮、安全防护、XYZ 电机过载保护及声光报警等功能。

5) 换电机器人控制器自带 10 英寸的触摸屏，可在触摸屏上手动操作设备；换电机器人与站控系统通信，满足工业通信要求。

6) 吊具系统具有有效的卡爪状态判断及可靠的落座自动闭锁检测；吊具系统有防错、防呆、过载保护等功能，在抓取状态时具备相应的锁止功能来保证卡爪不会异常松脱。

电池箱与换电机器人夹具通过斜面导入后经过电动推杆驱动吊钩转 90°实现，无需在电池箱上增加定位检测装置。智能吊具方案见图 6。

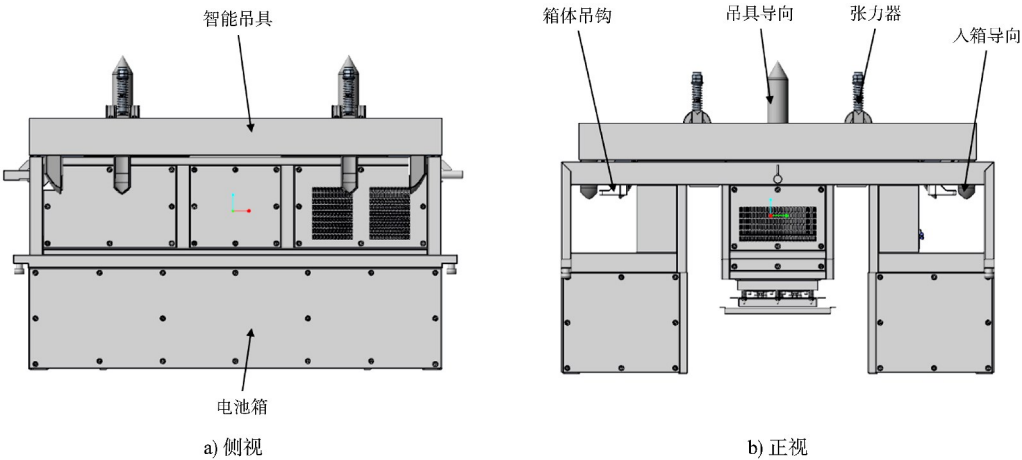


图 6 智能吊具
Fig. 6 Intelligent spreader

4.2.4 充电底托

一体式电池包充电底托包括电池连接器、电池箱定位及导向、电池箱辅助支撑点和气溶胶灭火装置等。

充电底托具有对电池包 Z 方向的导正能力; 充电底托上的连接器具备浮动机构, 能够吸收电池包换电过程中换电机构运行时产生的偏差; 充电底托配有传感器可对电池包有无进行检测。

4.2.5 车辆引导定位系统

车辆引导定位系统包括车辆定位系统和车辆引导标识物。该系统具备车辆位置检测功能, 能够引导调整车辆姿态。

车辆定位系统由激光传感器和伺服滑台组成, 通过检测电池箱从而获得车辆位置; 车辆引导标识物为 AIV 车载传感器可识别的引导识别物, 通过车载传感器判定停车位置, 引导 AIV 智能小车自动停车到换电位置。

车辆定位过程: AIV 进入换电仓, 识别车辆引导标识物, 并准确引导 AIV 自动停车到换电位置; 车辆定位系统会进行高精度定位确保乏电电池的实际停止位置, 并输出 X 方向、Y 方向、倾斜角等偏差给站控系统; 智能换电机人根据接收到的偏差值进行自动补偿定位实现电池的顺利吊装。

4.2.6 给排水、消防系统

智能换电机运行所需给水接自港区生产生活水管网, 满足集成冷风系统用水; 智能换电机区域地面排水通过截水沟和雨水口收集后排入港区雨水管网, 顶棚排水经雨落收集后汇入港区雨水管网。

智能换电机消防火灾自动报警系统, 布置在充电仓监控室内, 充电仓和换电仓共用该系统。系统配有烟感探测器、温感探测器、手动报警系统、声光报警器、报警联动控制器、应急照明系统等; 仓内配置灭火器箱, 充电机和充电底托配置气溶胶灭火装置, 换电仓内部配置水喷淋系统, 同时仓外设置消防水/沙坑等。

消防应急系统是当换电仓电池箱出现故障时, 可将故障电池箱输送到换电仓外部的系统, 能够隔绝故障电池对换电仓的影响。应急消防方案如下:

1) 换电仓内感烟、感温探测器报警, 报警信号传至消防报警控制器, 控制器指示声光报警器报警; 或者现场人员观察到有异常情况发生, 按下手动报警按钮, 实现声光报警, 警示及提醒人员尽快撤离。

2) 电池过热情况下, 电池管理系统(battery management system, BMS)将信号反馈给站控系统, 站控系统指令充电机直流断电, 工作人员按下手动报警按钮, 传送信号至消防报警控制器, 控制器指示声光报警器报警, 警示车辆禁止驶入; 若车道上有车辆正在换电, 待换电完成后, 车辆立即驶离, 同时智能换电机打开消防专用通道。

3) 充电底托设有防火隔板, 当充电位故障电池明火或温度 $\geq 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气溶胶灭火装置自动启动。

4) 智能机器人依据站控定位信息, 抓取热失控电池, 放置到消防专用通道辊道处; 辊道驱动热失控电池包到滑道上, 沿滑道滑入消防水/沙坑, 坑内喷淋可手动/自动启动, 对故障电池进行持续降温、灭火。

5) 必要时换电仓断电, 启动仓内水喷淋系统灭火。

4.2.7 站级监控系统

站控系统含站控主机和工作站, 接入换电机人、充电机、车载控制器、环境监测等设备实时数据, 具备换电监控、充电监控、历史查询、数据统计等功能, 实现充换电全过程逻辑控制及运行监视。基于站控功能扩展和安全运行的需求, 系统架构采用服务器-客户端模式。

站控系统可实现智能换电机系统内通信和智能换电机系统与智能转运设备 AIV 交互、与港区车辆调度平台交互以及与智能换电机运行管理平台交互。

4.3 换电流程及模式

4.3.1 全自动换电操作流程

智能换电机采用全自动运行, 整个换电过程只需一键即可完成。此流程为全自动换电操作流程, 智能换电机站控系统 with 集装箱智能转运车调

度平台通过实时数据交互,实现无人车停车到位检测、换电自动启动及换电流程控制。自动换电前确保设备已经回到原点处于待命状态,触摸屏设置为“远程模式、自动状态”,站控系统处于“自动换电”模式。

具体流程为:1) AIV 调度系统调度车辆进站换电;2) 车辆根据调度指令和路径进入电站,通知 SVC 连接换电站,同时车机自动连接站控系统;3) 车辆按照预先设定的停车位置停车,通知 SVC 检测车辆位置,然后发送启动换电命令给车机,车机通知站控系统启动换电;4) 站控系统检测停车位置是否满足要求,如不满足,回复车机车辆位置偏差数据,待收到车辆重新调整后再次发出的启动指令后重新检测;5) TBOX(车载控制器,telematics-BOX)获取车辆的车速,档位和手刹状态是否满足换电,确认换电时车辆安全;6) 车辆满足换电状态,TBOX 获取电池和车辆相关数据上传云端进行鉴权管理和业务结算;7) 各项条件满足后,下高压,站控系统启动换电,并通知车机换电启动成功;8) 站控系统下发指令通知车机解锁;9) 站控系统通知换电机器人开始调换电池;10) 换电完成后,下发上锁指令,上高压,并通知车机换电完成。

4.3.2 智能换电机特殊模式

具备检修模式:切换至检修模式后,智能换电机无法进行手动、半自动、全自动换电。

具备消防应急模式:站控系统对站内电池进行 24 h 监控,并设置预警功能,当触发热失控预警信号后,站控系统可自动将故障电池吊至消防应急系统通道处。

5 结语

1) 上海港罗泾港区集装箱码头改造工程规模等级较高、智能转运设备数量较多,智能换电机具有可高效完成电池更换、提高集装箱转运设备利用率、对港区作业效率影响较小且系统可靠性较高等优点,该工程智能转运设备 AIV 电池储能的补能采用智能换电方式。

2) 考虑港区整体车流组织及对横一路北侧和纵二路东侧位置土地的利用等因素,结合智能换电机系统两种布置模式优缺点,确定采用 AIV 贯通式进出车流组织模式布置。

3) 智能换电系统从智能转运设备可靠性、准确性、稳定性出发,实现了对无人驾驶自主导航运输设备 AIV 利用的进一步提升。

4) 港口智能转运设备可将智能换电作为主要能源介质补充方式,远期时适当分组、多点布置充电桩作为补充,结合不同工况及两者优势,为智能转运设备 AIV 提供更高补能支持保障。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [2] 王伟, 孙秀良, 徐哲, 等. 一种自动化集装箱码头纯电动 AGV 充电方式[J]. 港口装卸, 2019(2): 1-2.
WANG W, SUN X L, XU Z, et al. Charging mode of pure electric AGV in automated container terminal [J]. Port operation, 2019(2): 1-2.
- [3] 青岛新前湾集装箱码头有限责任公司. 集装箱码头自动导引车(AGV)动力系统及分布式浅充浅放循环充电技术研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(S1): 21-24.
Qingdao Xinqianwan Container Terminal Co., Ltd. Container terminal automatic guided vehicle (AGV) power system and distributed shallow charge and shallow discharge cyclic charging technology [J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2022, 18 (S1): 21-24.
- [4] 陈培, 周昆, 张煜, 等. 考虑车辆运动学特征的无人集卡充电策略及充电桩分配研究[J]. 起重运输机械, 2022(10): 52-57.
CHEN P, ZHOU K, ZHANG Y, et al. Research on unmanned truck charging strategy and charging pile allocation considering vehicle kinematic characteristics [J]. Hoisting and conveying machinery, 2022(10): 52-57.