



自动化集装箱码头水平运输设备 能源补充方式及应用*

姜桥

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 为分析不同能源介质选择和补充方式对工艺平面布局和工程投资影响, 针对各种自动化水平运输设备和相应能源补充方式进行系统研究。采用对比分析方法, 从能源介质获取便利性、技术成熟度、续航里程、能源补充方式适应场景、工程投资等维度比选优化, 确定自动化集装箱码头水平运输设备能源补充方式最优解。系统分析自动化集装箱码头水平运输设备能源介质选择和补充方式影响因子, 提出能源介质选择及补充方式完整解决方案。研究成果可为自动化集装箱码头建设提供决策依据。

关键词: 自动化水平运输设备; 能源补充; 充换电站; 充电桩; 机会充电

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0015-07

Energy supplement methods and applications for horizontal transportation equipment in automated container terminals

JIANG Qiao

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To analyze the impact of different energy medium selection and supplement methods on process plane layout and engineering investment, this paper conducts a systematic study on various automatic level transportation equipment and corresponding energy supplement methods. The comparative analysis method is adopted to determine the optimal solution of energy supplement from the convenience, technology maturity, driving range, energy supplement mode and energy investment for horizontal transportation equipment of automated container terminal. This paper makes a systematic analysis of the influence factors of energy medium selection and supplementary mode of automatic container terminal, and puts forward a complete solution of energy medium selection and supplementary mode of automatic horizontal transportation equipment. The research results can provide the decision basis for the construction of automated container terminal.

Keywords: automated horizontal transportation equipment; energy supplement; battery swap and charging station; charging pile; opportunity charging

自动化集装箱码头水平运输决定自动化技术路线和技术水平。水平运输设备、能源介质及补充方式对工艺布局、水平运输设备配置、工程投

资和运维保障均有直接影响。夏祯捷^[1]介绍了氢能集卡在集装箱码头的应用情况; 王伟等^[2]介绍自动化集装箱码头纯电动自动导引运输车

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 姜桥(1984—)男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程装卸工艺设计。

(automated guided vehicle, AGV) 的补能方式, 青岛新前湾集装箱码头将循环充电应用在自动化码头^[3]; 陈培等^[4]、郟佩琦等^[5]、杨其飞等^[6]、钱浩然^[7]探讨自动化码头水平运输设备充电方式的选址和调度策略; 张宇欣等^[8]、金祺等^[9]、黄宇超^[10]研究了典型的水平运输换电站布置。以上研究均针对某种具体能源介质补充方式分析, 并未对新建码头的自动化水平运输设备能源介质选择影响因子进行系统论证。

本文介绍自动化码头水平运输设备常用的 3 种能源介质, 对比得出电池储能为最适合自动化集装箱码头的能源介质补充方式。通过对换电方式、充电桩形式、机会充电方式和非接触式充电方式等 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, 确定自动化集装箱码头水平运输设备能源补充方式的影响因子和最优解, 为自动化集装箱码头建设提供决策依据。

1 自动化水平运输设备及能源介质选择

国内自动化码头水平运输设备(图 1)以 AGV 和自动驾驶集卡为主。AGV 在国内自动化集装箱码头中应用案例较多, 如厦门远海、洋山四期和青岛前湾四期、广州南沙四期、钦州大榄坪等自动化集装箱码头。自动驾驶集卡正处于技术快速演进、产业加速布局的发展阶段, 自动驾驶集卡码头案例有深圳妈湾海星、天津五洲国际、南通港吕四、上海外高桥、盐田东港区等自动化集装箱码头。



a) 氢原料电池集卡



b) 纯电AGV

图 1 自动化水平运输设备

Fig. 1 Automated horizontal transportation equipment

AGV 能源介质采用纯电方式, 自动驾驶集卡包括纯电动集卡和氢原料电池集卡两种技术路线。AGV、纯电动集卡和氢原料电池集卡能源介质比选见表 1。

表 1 自动化水平运输设备能源介质比选

Tab. 1 Energy and medium selection for automated horizontal transportation equipment

| 自动化水平运输设备 | 能源介质 | 能源供应 | 续航里程 | 技术成熟度 | 综合经济成本 |
|-----------|-------------|------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| AGV | 电池储能 | 换电站或充电桩, 建设要求低 | 电池容量 120~280 kW·h, 可作业运行 6~8 h | 技术成熟, 广泛应用于自动化集装箱码头 | 单台购置成本 240 万~300 万元, 能耗成本 0.95 元/km |
| 纯电动集卡 | 电池储能 | 换电站或充电桩, 建设要求低 | 电池容 200~350 kW·h, 可作业运行 6~12 h | 技术快速发展中, 有较多自动化集装箱码头案例 | 单台购置成本 150 万~200 万元, 能耗成本 0.95 元/km |
| 氢原料电池集卡 | 35 MPa 气态氢罐 | 配套建设专门加氢站, 建设要求高 | 100 kVA 电池+8 个 50 L 氢气罐, 可作业运行 8 h | 目前主要用于物流园区, 自动化港区未有工程案例 | 单台购置成本 150 万元, 能耗成本 4 元/km |

氢燃料电池集卡从能源介质获取便利性、技术成熟度、续航里程和综合经济成本方面均存在

较大劣势。自动化集装箱港区 AGV 和自动驾驶集卡均采用电池储能方式作为能源介质。

2 能源介质补充方式

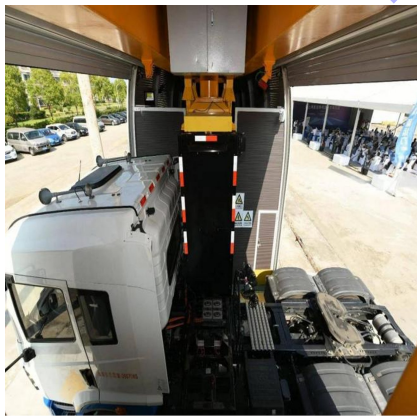
2.1 换电式

洋山四期、小洋山北侧、罗泾和宁波梅东等自动化码头均采用充换电站方式为水平运输设备补能，应用效果良好。

换电式模式需在码头建设全自动运行充换电站。根据水平运输设备电池放置方式不同分为侧面掏取式和吊装式换电站，见图2。



a) 侧面掏取式换电站（洋山四期）



b) 吊装式换电站（宁波梅山）

图2 换电站

Fig. 2 Battery swap stations

2.2 充电桩式

充电桩式通过在水平运输设备运行区设置充电桩对整车进行充电，通常充电桩分散式布置在场内，该模式无需备用电池，适用灵活、投资少。桩充式风险较换电站大幅降低，当个别充电桩出现故障时，对码头的运营影响极小。由于充电需额外占用设备时间，水平运输设备利用率降低，

需增配自动化水平运输设备。充电桩如图3所示。



a) AGV充电桩（天津北疆C段码头）



b) 无人集卡充电桩（宁波码头）

图3 充电桩

Fig. 3 Charging stations

2.3 机会充电方式

机会充电方式利用水平运输设备与轨道吊交接过程充电。充电系统包括一套取电小车受电器系统、滑触线集电器系统和其他辅助系统。AGV与支架交互时间单次充电量可满足单次最长路径循环耗能，实现即充即用24h循环补电。与换电式和充电桩式补能方式相比，无需备用电池，自带电池容量减小，AGV轻量化运行。

机会充电方式仅适用于堆场设置海陆侧端部交接方式自动化集装箱码头。“端部交接”模式与目前自动化集装箱码头“侧面接卸”模式发展趋势不一致，限制条件较多，目前仅青岛前湾码头有工程案例，其海侧端部交接区AGV机会充电方式见图4。



图 4 AGV 机会充电方式
Fig. 4 AGV opportunity charging mode

2.4 非接触式充电方式

非接触式充电装置无需电缆连接水平运输车辆和供电系统，通过电磁感应直接对车辆进行充电。传输电力通过送电线圈和接收线圈之间磁感应进行。在车辆行走路线上安装送电线圈，与车辆上的接收部分配套使用，实现车辆的非停车充电。目前非接触式充电模式最大充电功率 30 kW，难以满足自动化集装箱码头重载运输需求(通常 ≥ 120 kW)，仅适合物流仓库小型包裹运输。

综上所述，自动化集装箱码头水平运输设备合适的能源介质为电池储能，合适的能源补充方式主要有换电式和充电桩式。

3 能源补充方式影响因子及适用场景

3.1 换电站模式

3.1.1 换电站规模

全自动运行充换电站由电池更换工位、换电机器人、电池架、备用电池、电池维护区、变压器辅助设备以及电池管理系统组成。

自动化水平运输设备单车小时运行循环数按下式计算：

$$N = \frac{10\,000Q}{360 \times 24ak\eta} \quad (1)$$

式中：N 为单车小时循环次数；Q 为码头年吞吐量；a 为水平设备数量；k 为平均每次载运标箱数；η 为车辆综合利用率。

计算得单车小时循环数量为 7 mov/h。自动驾驶集卡单块电池容量约 200 kVA，单循环行驶里程平均 2.5 km。车辆满电利用时间 t = 6 h。单块电池充满时间约 2 h。充电站备用电池数量 44 块。换电站总容量 8 800 kVA。

3.1.2 换电站布置

3.1.2.1 侧面掏取式换电站

AGV 电池布置在车架下方，电池需从侧面掏取，图 5 为典型 AGV 侧面掏取式换电站布置。侧面掏取式换电站由换电区和配电区组成。换电区包括 1 台侧面掏取式换电机器人、1 台检修行车、1 个 AGV 换电工位、电池架(4 个框架位，可供 20 块备用电池充电)、电池维护区、监控室组成。配电区主要包括变压器室、低压配电室、无功补偿室等。

换电流程：AGV 进入指定换电工位停车。换电机器人从 AGV 机身侧面取出电池，放入电池架指定工位进行充电，并从电池架取出满电电池装回 AGV。换电完成后 AGV 从换电站单侧驶离，单次换电耗时约 5 min。

考虑系统安全，码头一般建设 2 个或以上换电站互为备用。换电站应布置在 AGV 作业区，以码头前方作业区或陆侧堆场第 1 条箱区为宜。

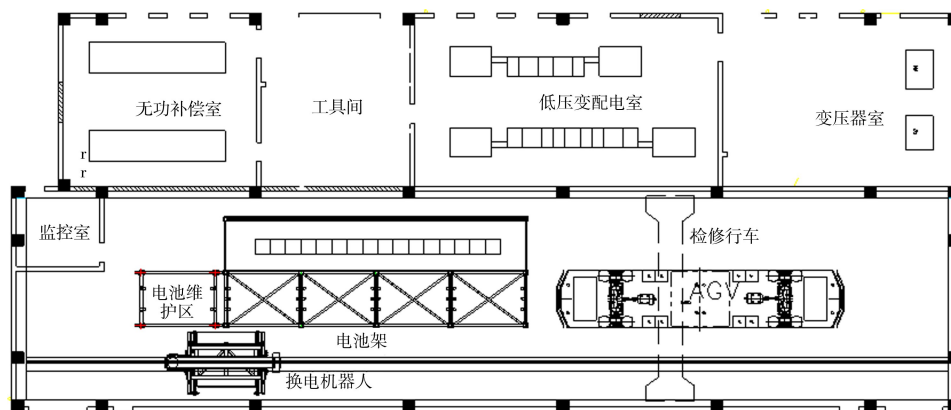


图 5 典型侧面掏取式换电站布置
Fig. 5 Typical layout of side-pick-up battery swap station

3.1.2.2 吊装式换电站

自动驾驶集卡和新一代智能导引车(intelligent guided vehicle, IGV)的电池布置在驾驶室后方和车架上方,可通过吊车吊装电池。图6为典型吊装式换电站布置(深圳盐田东作业区)。吊装式换电站由换电区和配电区组成。换电区包括1台吊装行车(兼做检修行车)、1个集卡(AGV)换电通道、备用

电池布置区(不可叠放,共布置28个电池工位)、监控室。配电区主要包括变压器室、低压配电室等。

换电流程:IGV进入指定换电工位停车。吊装行车从集卡机上方取出电池,放入备用电池区指定工位进行充电,并从备用电池区取出满电电池装回IGV。换电完成后IGV从换电站另一侧驶离,单次换电耗时约5 min。

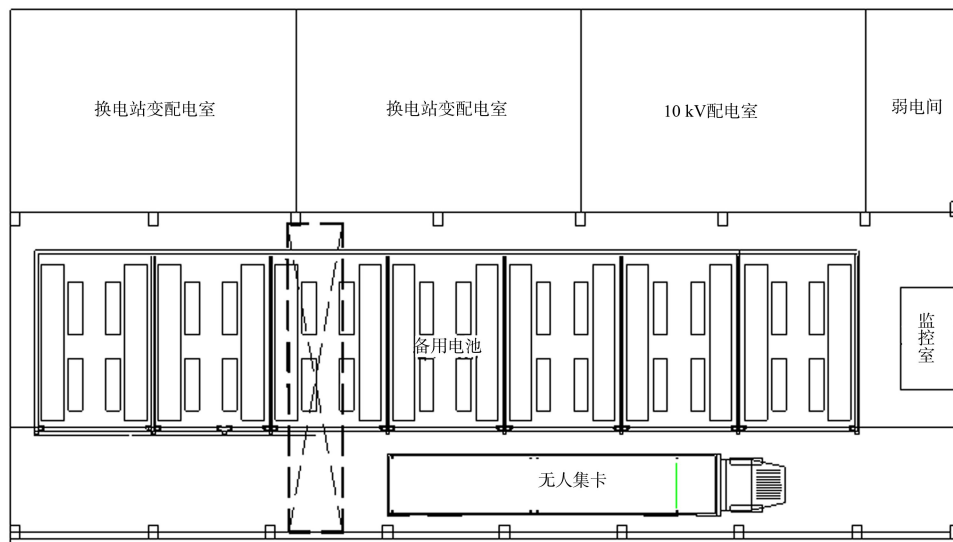


图6 典型吊装式换电站布置

Fig. 6 Typical layout of a lifting-type battery swap station

3.1.3 换电站工程投资

换电站工程投资主要包括备用电池、换电机器人、检修行车、配电房、换电房建安费用及消防系统、暖通系统、换电站管理系统等专项费用。其中备用电池费用占比最大,可按照1 500元/(kW·h)估算。

3.2 充电桩方式

3.2.1 充电桩数量

充电桩方式通过在自动化水平运输设备运行区设置相对集中的充电桩,解决水平运输设备能源介质补充问题。

充电流程:水平运输设备系统电量 $\leq 20\%$ 时,根据系统指令自动进入临近空闲充电桩进行充电,设备电量达80%即可返场作业。

充电桩数量 n 为:

$$n = \frac{1}{Q_1 \cdot (80\% - 20\%) / (1.9Nm)} \cdot a \quad (2)$$

式中: Q_1 为水平运输设备电池包容量; N 为单车小时循环次数; m 为水平运输设备单循环运输里程; a 为水平运输设备数量。

3.2.2 典型充电桩工艺布置

自动化集装箱码头水平运输设备采用最优路径策略。充电桩布置应结合水平运输设备行驶路由,在码头前方作业区或自动化堆场端部采取相对集中方式布置。图7为典型充电桩布置(广州南沙四期),充电桩5个1组,布置在轨道吊跨内端部区域。水平运输设备转弯进入充电位,充电完成后驶离充电区直接进入自动化作业区。

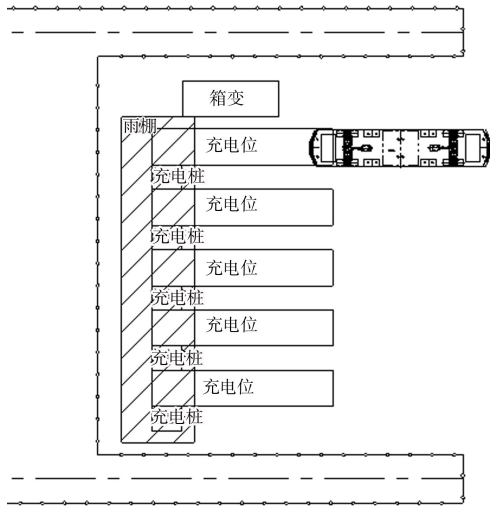


图7 充电桩布置

Fig. 7 Charging pile layout

3.2.3 充电桩模式工程投资

充电桩投资主要包括超配水平运输设备、充

电桩、箱变及相应进线电缆投资。其中超配水平运输设备投资占比最大，其超配数量应根据仿真确定，一般可取10%。

3.3 能源补充方式比选

自动化集装箱码头能源补充方式影响因子包括：水平运输设备配置数量、作业单循环里程、自动化码头场地大小、工程投资、系统可靠性要求和运维便利性等。

自动化集装箱码头初期基本采用换电站模式，换电设施相对集中便于管理，水平运输设备采用大容量电池包。近年来随着大电流充放电功率型电池技术发展，电池充电时间由2h降至约1h(从20%~80%电量)。水平运输设备在桩充电时间大幅下降，桩充式充电方式投资省、维护简单的优势将更为凸显。集中能源介质补充方式比选见表2。

表2 能源补充方式比选及适用场景

Tab. 2 Comparison of energy supplement methods and applicable scenarios

| 能源介质补充方式 | 优势 | 劣势 | 适用场景 | 典型应用案例 |
|----------|---|---------------------------------------|--------------------------|---|
| 换电站 | 设备换电时间短,水平运输设备利用率高 | 需要备用电池数量多,电池容量大,投资大,换电设备损坏影响大,系统可靠性稍差 | 码头建设规模大,自动化水平运输设备数量多 | 洋山四期:AGV配置130台,码头前沿设置一大一小2个换电站。大换电站备用电池44块,小换电站备用电池16块,采用换电机器人侧面掏取方式换电 |
| 充电桩 | 无需备用电池组,设备电池容量小,充电桩投资小,灵活性好,单个桩头损坏对系统影响较小 | 充电时间较长,需要超配水平运输车辆 | 码头规模相对较小,自动化水平运输设备数量少 | 广州南沙四期:IGV配置120台,堆场分散布置7个换电点,每处点位4~5个充电桩。IGV电池包容量240kW·h,充电桩头300kW |
| 机会充电方式 | 设备不停车补充能源,24h全天候不间断运行 | 需大范围建设滑触线取电设备,设备投资较高,维护保养复杂 | 适用于采用端部交接模式的集装箱码头,适用场景受限 | 青岛前湾:堆场采用端部接卸方式。AGV电池容量90kW。AGV利用对举升支架作业空挡充电滑触线,单次充电约5min,最大补能5.7kW·h,可以满足单程最大作业循环耗电量 |
| 非接触式充电方式 | 实现车辆的非停车充电,减少动力系统电池容量 | 送电距离较短,充电功率小,使用成本高 | 难以满足重载运输需求,集装箱码头暂无工程案例 | 码头暂未有工程案例 |

自动化集装箱码头能源介质补充方式应结合影响因子综合确定。规模等级高水平运输设备数量多的码头建议考虑换电站模式。水平运输设备较少使用频次低的码头可采用充电桩模式，节省工程投资。

4 结论

1) 自动化集装箱码头水平运输设备能源介质应选择电池储能。

2) 适合自动化集装箱码头水平运输设备的能源介质补充方式主要包括换电式、充电桩式和机

会充电式。换电站和充电桩式适应范围广, 机会充电模式仅适用端部交接模式的自动化码头。

3) 能源介质补充方式影响因子包括水平运输设备配置数量、单循环路程、自动化码头场地大小、工程投资、系统可靠性要求和运维便利性等。换电式和充电桩式有各自的适用场景, 应综合权衡比选决策。

参考文献:

- [1] 夏祯捷. 集装箱码头绿色新能源内集卡技术应用方案比选和实施[J]. 港口科技, 2022(7): 9-14.
XIA Z J. Comparison and implementation of green new energy internal container truck technology application solutions for container terminals [J]. Port science & technology, 2022(7): 9-14.
- [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[J]. 交通节能与环保, 2020, 16(3): 1-4.
Qingdao Xin Qianwan Container Terminal Co., Ltd. Container terminal automatic guided vehicle(AGV) power system and distributed shallow charge shallow discharge cycle charging technology [J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2022, 16(3): 1-4.
- [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.
- [5] 鄢佩琦, 陈传军, 陈佳梁, 等. 基于区域繁忙度的 AGV 充电桩选址研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(8): 214-220.
QIE P Q, CHEN C J, CHEN J L, et al. Research on AGV charging pile location based on region busyess [J]. Manufacturing automation, 2023, 45(8): 214-220.
- [6] 杨其飞, 兰培真. 考虑充电过程的自动化码头 AGV 调度[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2023, 28(2): 142-149.
YANG Q F, LAN P Z. Research on AGV scheduling of automated terminals considering charging process [J]. Journal of Jimei University (natural science), 2023, 28(2): 142-149.
- [7] 钱浩然. 考虑换电与无冲突的多目标港口 AGV 调度优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
QIAN H R. Research on multi-objective AGV routing optimization considering battery recharge and conflict-free constraints[D]. ShangHai: Donghua Universit, 2023.
- [8] 张宇欣, 朱忠烈. 洋山四期自动化码头 AGV 自动换电站系统[J]. 起重运输机械, 2018(2): 102-106.
ZHANG Y X, ZHU Z L. Yangshan Phase IV automated terminal AGV automatic swap station system[J]. Hoisting and conveying machinery, 2018(2): 102-106.
- [9] 金祺, 罗勋杰, 陈迪茂. 超大型全自动集装箱码头 AGV 电池更换站的布置模式[J]. 水运工程, 2016(9): 66-70.
JIN Q, LUO X J, CHEN D M. Layout pattern of AGV battery exchange station in ultra-large type automatic container terminal [J]. Port & waterway engineering, 2016(9): 66-70.
- [10] 黄宇超. 自动化码头 AGV 换电站布局设计[J]. 港口装卸, 2021(4): 61-65.
HUANG Y C. Layout Design for battery swapping station of AGV of automated terminal [J]. Port operation, 2021(4): 61-65.

(本文编辑 赵娟)