文章编号：2097-5899(2025)03-0025-07　**中图分类号**：U291.5+1　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202409300003
引用格式：秦胜，饶智健，傅赟，等. 基于空地一体的铁路口岸集装箱换装模式研究[J]. 铁路物流，2025，43(3)：25-31.
QIN Sheng，RAO Zhijian，FU Yun，et al. Application of Container Reloading Mode at Railway Ports Based on Air-Rail Integration[J]. Railway Logistics，2025，43(3)：25-31.

基于空地一体的铁路口岸集装箱换装模式研究

秦　胜[1]，饶智健[1]，傅　赟[1]，黄　恒[2]，韩　博[3]

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081；2. 中车长江运输设备集团有限公司科技开发分公司，湖北 武汉　430200；3. 满洲里综合保税区开发投资有限公司，内蒙古 呼伦贝尔　021400)

摘　要：当前铁路国际联运口岸用地紧缺、换装作业紧张等问题突出。为有效解决铁路口岸换装场作业能力受限的问题，应用智能控制、高效转运、精准分配的集装箱空地一体化协同运输技术，创新提出集装箱空地一体化协同运输技术在铁路口岸的应用模式，提升口岸间的无缝衔接水平。集装箱空地一体化协同运输技术能够在铁路口岸充分利用立体空间，同时减少换装场的用地投资和建设成本，有效提升换装效率和海关查验效率，对增强铁路国际联运口岸运输组织效率具有重要意义。通过研究集装箱空地一体化协同运输的技术特征和作业流程，提出铁路口岸货物运输组织工作的优化建议和口岸建设的对策，为口岸物流基地建设并应用集装箱空地一体化协同运输技术提供借鉴。

关键词：铁路国际联运；铁路口岸；集装箱；空地一体化；换装模式

随着跨境铁路班列快速发展，我国铁路口岸作业量大幅提升。由于沿线国家铁路轨距不一致，班列必须在铁路口岸进行换装作业，当前各铁路口岸仍然采用传统的换装作业方式，依赖大量的人工辅助作业。此外，我国铁路口岸既有换装设施设备能力逐步趋于饱和，阿拉山口、满洲里、二连浩特等口岸的机械化换装设施设备已经满负荷甚至超负荷运转。传统换装作业流程的复杂以及设施设备运用的紧张，制约了口岸通过能力，影响班列竞争力，同时推高了供应链总成本。针对这些问题，研究提出集装箱空地一体化协同运输技术在铁路口岸的应用模式。首先通过分析传统铁路口岸作业流程，结合协同运输技术，对口岸作业流程进行优化，再结合MZL口岸的实际情况，给出不同应用场景下空地一体化协同运输技术在口岸的实际应用方法，最后提出配套的应用建议，论证铁路口岸应用空地一体化协同运输设备的可行性，为口岸物流基地建设并应用集装箱空地一体化协同运输技术提供参考。

1　铁路口岸作业情况分析

作为国际货物运输的重要枢纽，铁路口岸衔接着两国相同轨距或不同轨距的铁路，是相邻国家间旅客和货物运输的重要铁路交接地，承担着出入境人员和货物的运输组织工作，对于促进国际贸易和区域经济发展具有重要意义[1]。

1.1　主要口岸货运作业量和作业时间分析

选取站场规模较大，需要进行换装作业的铁路口岸，2023年我国主要铁路口岸日均货运作业量如表1所示。

从表1数据可以看出，各大主要口岸的货运作业量均呈现上升趋势。随着中欧班列等国际联运班列开行

收稿日期：2024-09-30
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023X020(JB))；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2330YJ1301)

表1　2023年我国主要铁路口岸日均货运作业量

Tab.1　Average daily freight handling volume of major railway ports in 2023

口岸	交出				接入			
	列数/列	同比增加/列	车数/车	同比增加/车	列数/列	同比增加/列	车数/车	同比增加/车
阿拉山口	11.5	0.2	602	67	13.3	1.5	541	62
霍尔果斯	15.9	1.5	798	84	7.6	0.9	304	25
二连浩特	7.3	0.5	392	50	14.4	3.2	662	145
满洲里	5.4	0.6	340	40	15.9	3.5	843	209
合计	40.1	—	2 132	—	51.2	—	2 350	—

数量的增加，持续上升的货运量对铁路口岸作业效率提出了更高要求。为此，铁路口岸需要采取一系列措施来优化作业流程、提升作业自动化水平，确保高效、准确地处理日益增长的货运需求。

铁路口岸站集装箱国际联运班列的接发车、换装作业、海关查验以及票务交接等作业，完成整套流程的时间一般在1～2 d[2]。当货运量较大时，口岸作业能力限制了货物的发运，集装箱货物堆存在口岸堆场内，会进一步延长作业时间。此外，邻国车底数量不足导致无法完成换装作业也会影响作业时间。

1.2　铁路口岸过轨运输模式

铁路口岸的传统过轨运输模式一般有3种，不同国家和地区综合考虑实际轨距差异、货物运输成本等因素，采用不同过轨运输模式，具体如下。

(1)换装模式。通过在口岸站将货物从车辆上全部卸下，再重新装入符合邻国轨距标准的新的车辆中，实现货物换装。这种换装模式流程繁杂，需要对货物进行重复的装卸作业，在影响货物运输时效性的同时也极易造成货物的损坏[3]。

(2)更换转向架或轮对。20世纪90年代开始，通过满洲里、阿拉山口和二连浩特等口岸的铁路货车曾采用更换转向架的方式实现过轨运输[4]。这种换装模式需要配备额外的转向架或轮对，同时也会增加货物运输时间。

(3)修建套轨线路。套轨是将不同轨距的2条线路共线，不同轨距的线路互相嵌套，共用枕木和路基，套轨线路可以根据不同轨距线路组合分为宽准轨套轨和准米轨套轨[5]。以宽准轨套轨为例，通过设置套轨线路引入换装场，宽轨调车机牵引到达重车在宽准轨换装场完成货物换装及海关查验作业，宽轨机车连挂空车返回，准轨空车到达准轨到发场后由准轨调车机牵引至宽准轨换装场完成换装作业，到达本务机车连挂准轨重车发车[6]。

除了上述几种铁路口岸过轨运输模式外，还可以采用可变轨距列车运输货物实现跨轨运输。可变轨距列车在国外应用较早，西班牙、德国、波兰等国在20世纪就已经开始相关车辆装备的研发，但并未大面积投用。该模式下货物无需重新装卸[3]，可有效简化中间作业流程。但可变轮距列车的造价远高于一般货物列车，高昂的成本是目前可变轮距列车未能大面积推广应用的主要原因之一。近年来我国也提出了应用可变轨距列车在铁路口岸间运输大宗货物的方案，但仍处于论证阶段。

1.3　口岸换装作业流程

1.3.1　入境换装作业流程

传统货物列车入境流程示意图如图1所示，基本可以分为以下3部分。

(1)邻国装车。进口货物在边境口岸站通过宽轨列车运抵我国边境口岸站。

(2)边检作业。到达我国的进口货物需要在口岸完成边检和海关作业，查验无误后放行。

(3)换装发车。在换装场将运抵的货物从宽轨重车卸下，转移至我国标准轨列车上，编组成列后发出。

1.3.2　出境换装作业流程

传统货物列车出境流程示意图如图2所示，基本可以分为以下3部分。

(1)集装箱出口查验。出口货物运抵我国口岸站，将列车推送至边检场，进行边检作业和海关作业后交接出境。

(2)邻国边检接货。从我国出境的列车到达邻国后在边检场进行边检作业，之后办理货物交接与海关作业，如有问题需遣返。

(3)列车换装发车。货物通过全部检查无误后，先将准轨重车解编，货物卸下落地，之后再将这批货物

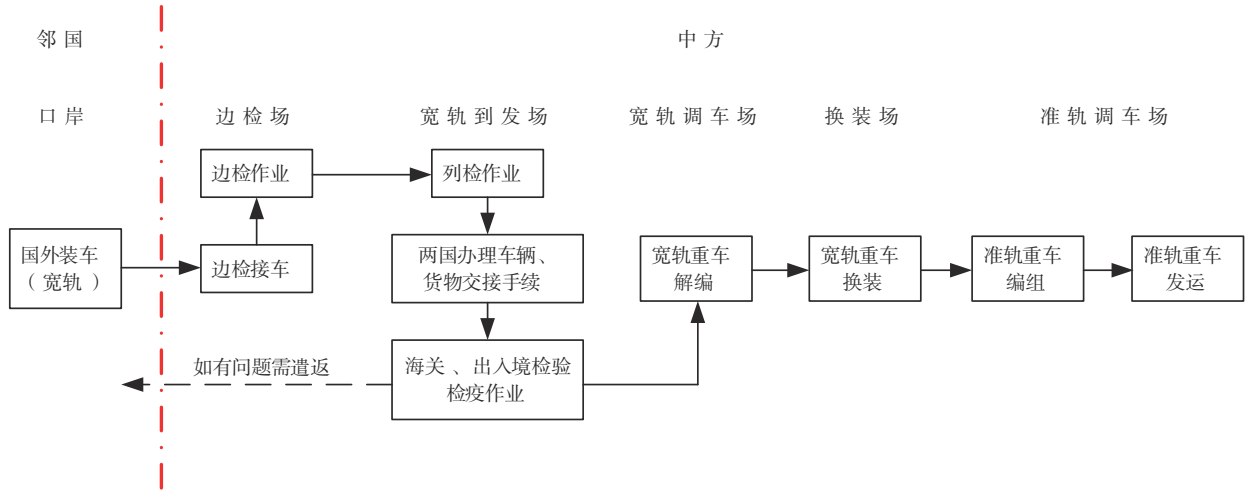


图1　传统货物列车入境流程示意图

Fig.1　Traditional freight train import process

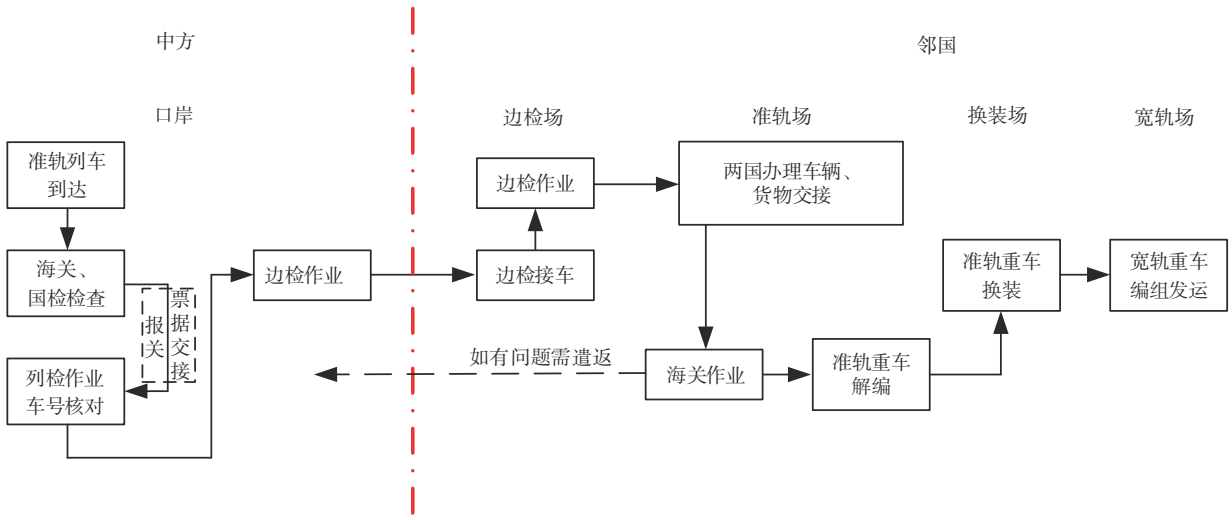


图2　传统货物列车出境流程示意图

Fig.2　Traditional freight train export process

转移至待编宽轨空车中，之后编组发运。

1.4　铁路口岸换装设施设备

铁路口岸站的换装作业设施设备是确保国际联运货物在不同轨距铁路间实现换装的关键，货物换装作业需在口岸站指定监管场地内进行。一般而言，铁路口岸换装站主要由准轨到发场、准轨调车场、宽(窄)轨到发场、宽(窄)轨调车场、换装场等部分组成[7]。此外，口岸站还设置有一定数量的装卸设备，包括龙门吊、轨道式集装箱门式起重机等。需要办理客车换装作业的口岸还设有具备换轮功能的客运设备，如二连浩特口岸配备有国际客车换轮库，办理过境客车换轮作业[8]。

2　空地一体化协同运输技术的应用

当前空地一体化协同运输技术应用于港口码头的集装箱堆场和大宗散货堆场，集装箱空地一体化协同运输技术采用吊装原理利用空轨把集装箱悬吊于空中，大宗散堆装货物则是利用空中皮带廊道将大宗散货通过空中皮带机输送。空地一体化协同运输作业不会与地面设施作业产生冲突干扰，具有占地面积小、适应性强的优点。

2.1　空地一体化协同运输技术原理

集装箱空地一体化协同运输技术是根据2019年9月中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》关于“货物多式联运高效经济”的相关要求，以打造全新的

立体货运交通运输体系为目标而创新提出的一项新技术。该技术通过空中轨道运输的方式，创新低空运输与公路、铁路等传统地面交通运输协同发展，研发实施了一种新型集疏运系统。空地一体化集疏运系统如图3所示。



图3　空地一体化集疏运系统

Fig.3　Air-rail integration collection and distribution system

空地一体化集疏运系统采用悬挂式单轨技术，集运动车转向架位于下开口的半封闭轨道梁内部，走行轮与箱型轨道梁的内侧底面相接触，承受着车辆的垂向载荷并传递牵引力和制动力；导向轮与轨道梁的侧面接触，在运行过程中起到导向和稳定走行部的作用；车架通过悬吊装置与转向架相连，悬挂在轨道梁下方行走。

空地一体化集疏运系统由动车、轨道、供电、运行控制、信息和站点装卸等六大模块构成[9]。通过信息模块获取需要运输的集装箱信息以及地面运输设备信息，之后制定合理的集装箱货物运输计划并发送给运行控制模块，运行控制模块根据货物运单信息控制地面货车在轨运行，并在指定装卸站点停靠，最后与地面装卸设备共同配合完成集装箱的转运与装卸。该系统无人驾驶、远程控制、智能运营，电力驱动为集装箱及各种运载单元提供了一种高效转运、精准分配的系统解决方案。采用空地一体化技术，可减少口岸场站间平面流线交叉，实现宽轨、准轨纵向换装，提高换装效率。空地一体化集疏运系统信息平台系统示意图如图4所示。

2.2　空地一体化换装作业流程

按照既有货物列车出入境作业流程，无论是入境还是出境，都需要在口岸站先将集装箱取出，落地堆放在集装箱堆场内，待完成边检作业和海关查验后，再将集装箱装回列车后编组发运，整体流程较为繁琐、耗时较长。此外，由于大部分换装线路不具备发车条件，换装取送车走行距离长且存在折角运输；机车出入段作业与调车作业进路产生平面交叉互相干扰。口岸站内铁路场站作业区域占地面积大，线路严重切割口岸用地，对进出口岸接驳运输的公路货车运行产生影响。这些问题都会降低口岸站作业效率，同时也会造成安全隐患。

采用空地一体化协同运输模式，空地一体化作业流程示意图如图5所示。通过将海关作业前置，海关可根据列车到达时间提前安排查验人员作业，集装箱完成查验后利用空地一体化集疏运系统抵达对方海关查验区。采用智能门吊、集卡运输等先进技术，可以实现装卸机械远程监控及操作，换装区实现无人化作业，有效避免当前口岸换装可能存在的人员缺口问题。同时，空地一体的立体换装模式可以节省陆地面积，减少场区间平面流线交叉，实现宽轨与准轨货物列车间的纵向换装，提升换装效率。

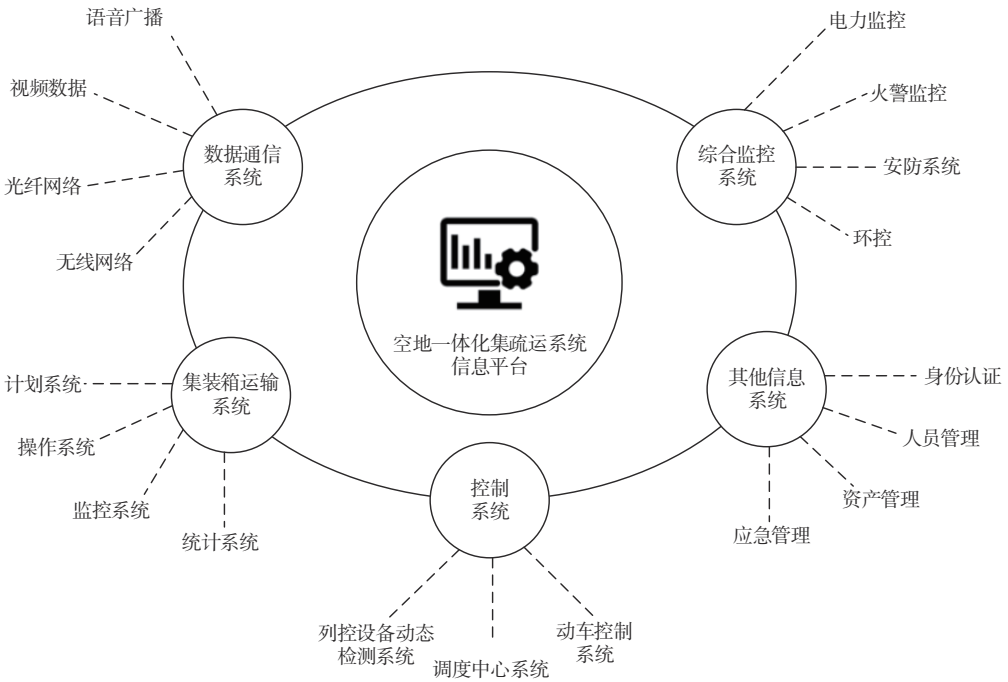


图4　空地一体化集疏运系统信息平台系统示意图

Fig.4　Information platform system of air-rail integration collection and distribution system

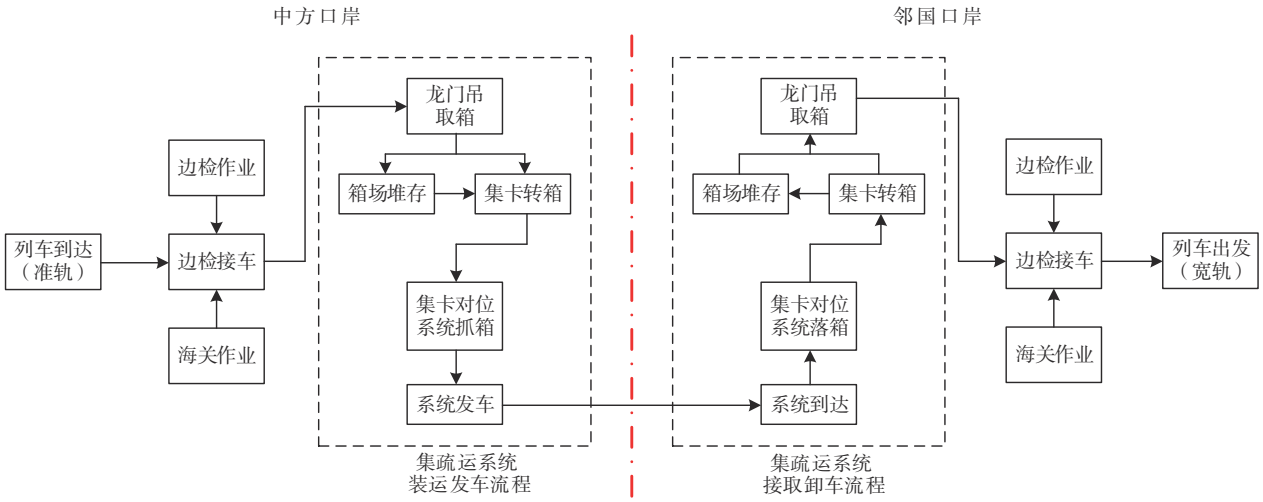


图5　空地一体化作业流程示意图

Fig.5　Air-rail integration operation process

2.3　采用空地一体化设备与增建跨境铁路对比

2.3.1　技术可行性对比分析

技术可行性主要考察的是工程项目在现有技术条件下的实施可能性。从当前我国建设跨境铁路的经验来看，技术可行性主要从施工条件分析、技术方案评估、专业人员配置等方面进行评价。根据两国间达成的合作协议，结合国内既有国境站不同接轨方式，设计单位提出不同的跨境铁路修建方案并进行比选，但这一过程往往需要海关、边检及地方、国家的多部门联合审批，建设周期相对较长。

空地一体化协同运输技术应用北斗定位、5G通讯、无人驾驶、主动防摇纠偏等前沿技术，实现了全自动、高智能运行。近年来，随着对外贸易的蓬勃发展，跨境班列成为我国与邻国间货物运输的重要方式。但国家间铁路轨距差异成为限制货运量进一步增长的瓶颈，若将空地一体化集疏运系统应用于两国间，可以有效解决轨距差异带来的困境，缓解因基础设施配置造成的不利局面，大幅提升口岸作业效率。

2.3.2　经济可行性对比分析

经济可行性主要考察的是工程项目在经济上的合理性和可行性。对于增建跨境铁路而言，一方面需要评估铁路建设投资，即用于土建工程、设备购置及人员劳务等方面的支出；另一方面需要估算投资收益，包括直接收益(运输货物收入)和间接收益(带动周边地区发展与促进两国间经贸往来)。

空地一体化协同运输技术全程采用电力驱动，可以大幅降低污染物的排放，碳排放可减少90%以上。此外，应用空地一体化集疏运系统进行立体化运输，可以有效减少设施设备的占地面积，从而可以有效规避铁路接轨存在的投资收益、转运效率等问题。根据青岛港前湾港区投入应用的集疏运系统测算，其建设成本比修建铁路专用线节省50%以上，运输成本为公路运输的1/3左右[10]。

3　典型场景模拟

以MZL口岸为例，研究空地一体化协同运输技术在铁路口岸的应用前景。

3.1　口岸发展现状

MZL口岸是目前我国最大的陆路口岸，具有明显的区位优势和资源优势。经过多年发展，口岸过境运输能力负荷大、作业效率挖潜空间有限，主要瓶颈体现在以下方面。

(1)运输组织方面。位于口岸西部的地面换装作业区存在平面交叉以及折角运输的情况，导致作业冲突影响场站换装作业效率。此外，由于宽轨和准轨列车难以同时在口岸配齐数量，导致换装货物不能及时取送。

(2)场站设备方面。一是装卸作业区规模有限，口岸站内可用于地面作业的部分已趋于饱和。二是口岸现有货物装卸设备使用时间久、老化程度高，加上长时间连续运转，造成设备磨损，影响货物装卸效率。

(3)作业条件方面。当前口岸装卸作业还需要人工配合，但人员配置数量还存在一定缺口，对于作业效率会产生影响。

3.2　空地一体化协同运输技术应用场景分析

3.2.1　换装场区与加工产业园间

目前，MZL站的货物列车作业以通过为主。随着当地产业布局的完善，越来越多来自境外的货物到达口岸站后，需经过再次加工后以更高附加值产品再经铁路发送至国内其他城市。因此，可以修建空地一体化集疏运系统运行线路连接换装场与企业所在的物流基地，既方便企业进行深加工，又避免了铁路和公路间的平面交叉，同时可避免企业专用线无序扩张，从而精简既有换装线，使得换装场使用效率提高。

3.2.2　宽轨集装箱场与准轨集装箱场间

考虑换装场需要对换装货物进行“一关三检”，由于“一关三检”涉及方面众多，若在同一场地进行，存在相互干扰，且换装场地建成后不易扩建。因此，对于集装箱货物换装，可通过在宽轨集装箱场与准轨集装箱场之间修建空地一体化集疏运系统实现，同时将海关查验流程嵌入集疏运作业流程，实现海关监管一体化，从而提高查验效率，节省通关时间。空地一体化集疏运系统线路布置示意图如图6所示。

3.3　应用建议

3.3.1　运输组织优化建议

(1)提高集装箱货物比例，对于适箱货物(如矿粉、粮食等)应尽量“散改集”，加快换装效率。

(2)宽轨、准轨编组辆数及牵引质量尽量协调一致，避免出现换装货物二次倒装。

(3)宽轨、准轨调度指挥系统实现信息交互，尽量提高宽轨、准轨列车同时到达的比例。

3.3.2　口岸建设对策建议

(1)深入研究集装箱空地一体化协同运输的技术特征，包括其结构设计、智能控制算法、安全保障机制等，为系统设计与实施提供坚实的技术支撑。

(2)优化空地一体化协同运输技术换装作业流程，明确各环节职责与协作机制，确保系统高效、稳定运行。

(3)加强政策引导与资金支持，鼓励铁路口岸、与口岸临近的物流基地或产业园采用集装箱空地一体化协同运输技术，推动其在更广泛范围内的应用与推广。

(4)加强国际合作与交流，借鉴国际先进经验，不断提升我国铁路国际联运口岸的运输组织效率和国际竞争力。

4　结束语

铁路国际联运口岸用地紧张、换装场作业能力受限等现实问题直接制约了口岸作业效率，集装箱空地一体化协同运输技术充分利用立体空间，接轨工程投资相对较小，对既有运营的干扰较少，结合智能控制、高效转运与精准分配等先进技术，在不增加地面用地负担的前提下，有效缓解换装场作业能力受限的问题。未来，需要对空地一体化协同运输技术进行更深入的研究，面向

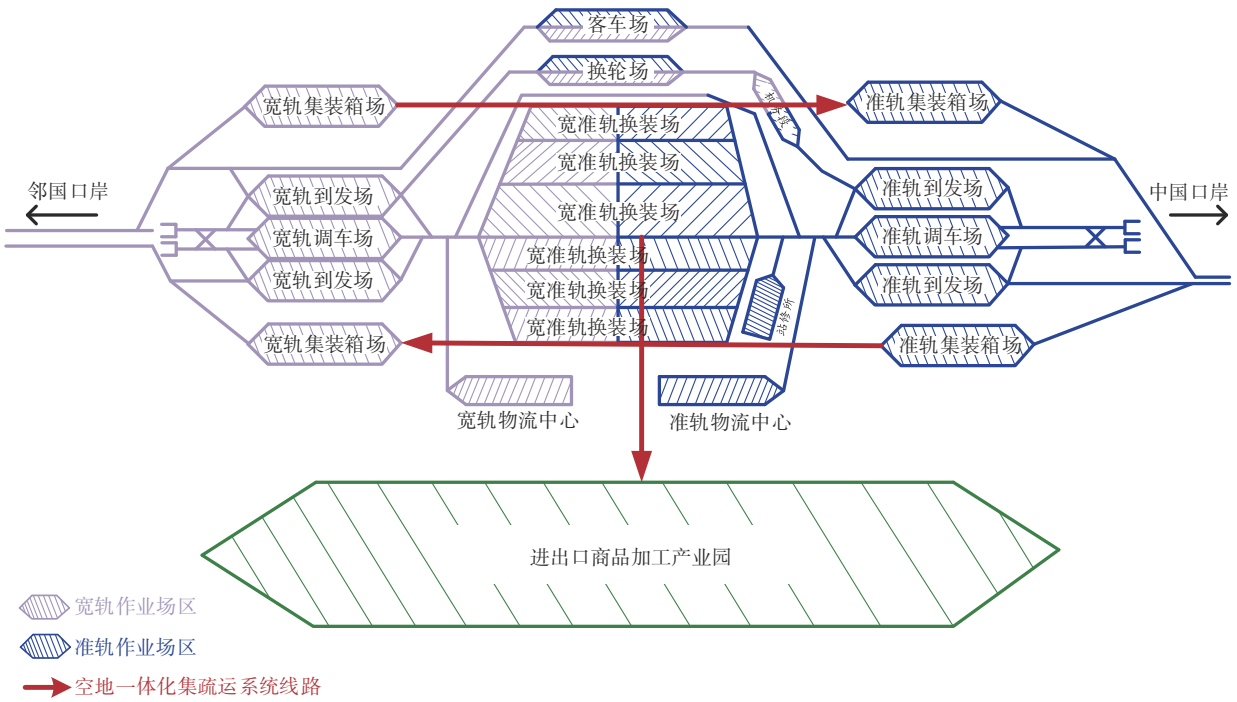


图6　空地一体化集疏运系统线路布置示意图

Fig.6　Route layout of air-rail integration collection and distribution system

不同口岸的货运需求和设施条件，提升空地一体化协同运输技术在更多应用场景下的服务适配性。

参考文献：

[1] 郭思南. 铁路口岸站集装箱换装场设计与仿真[D]. 北京：北京交通大学，2021.

[2] 雷　异. 基于需求分类的中欧班列多式联运运输方案研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.

[3] 孙梅玉，曹　玥，李明高，等. 铁路变轨距列车发展现状及应用前景研究[J]. 运输经理世界，2023(30)：152-154.

[4] 徐世锋，穆凤军，刘新强. 铁路货车过轨技术研究现状及发展趋势[J]. 铁道车辆，2024，62(2)：1-6.
XU Shifeng，MU Fengjun，LIU Xinqiang. Research Status and Development Trend of Freight Car Passing Different Gauge Railway Technology[J]. Rolling Stock，2024，62(2)：1-6.

[5] 周晓林. 套轨线路在国际铁路建设中的应用[J]. 铁道勘察，2006，32(3)：74-75，83.
ZHOU Xiaolin. Application of the Gauntleted Track Lines in the International Railway Construction[J]. Railway Investigation and Surveying，2006，32(3)：74-75，83.

[6] 张俊龙. 新建中蒙跨境铁路引入甘泉铁路甘其毛都口岸站接轨方案研究[J]. 铁道货运，2023，41(4)：28-37.
ZHANG Junlong. Study on Connection Schemes of Introducing Newly Built China-Mongolia Cross-Border Railway into Ganqimaodu Port Station of Ganqimaodu-Wanshuiquan Railway[J]. Railway Freight Transport，2023，41(4)：28-37.

[7] 朱婷婷. 国际铁路联运的换装、通关模式及特许经营的研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.

[8] 王志明. 二连浩特铁路口岸站货运组织管理优化研究[J]. 铁道货运，2021，39(11)：1-6.
WANG Zhiming. Study on Optimization of Freight Transportation Organization and Management of Erenhot Railway Port Station[J]. Railway Freight Transport，2021，39(11)：1-6.

[9] 殷　健，李永翠，耿卫宁，等. 智能空轨集疏运系统设计[J]. 水运工程，2021(8)：74-79.
YIN Jian，LI Yongcui，GENG Weining，et al. Design of Intelligent Air-Rail Collecting and Distributing System[J]. Port & Waterway Engineering，2021(8)：74-79.

[10] 孙梅玉，李明高，高　晴，等. 空轨系统在铁路多式联运集疏运中的应用前景探讨[J]. 铁道货运，2023，41(12)：19-25.
SUN Meiyu，LI Minggao，GAO Qing，et al. Discussion on the Application Prospects of Air-Rail System in Railway Multimodal Transport and Hub Operations[J]. Railway Freight Transport，2023，41(12)：19-25.

（责任编辑：金　颖）

Application of Container Reloading Mode at Railway Ports Based on Air-Rail Integration

QIN Sheng[1]，RAO Zhijian[1]，FU Yun[1]，HUANG Heng[2]，HAN Bo[3]

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. Science and Technology Development Branch, CRRC Changjiang Transport Equipment Group Co., Ltd., Wuhan 430200, Hubei, China; 3. Manzhouli Comprehensive Bonded Zone Development and Investment Co., Ltd., Hulunbuir 021400, Inner Mongolia, China)

Abstract: Currently, there are notable issues such as the scarcity of land for international railway combined transport ports and the pressure of reloading operations. To effectively address the problem of the limited operational capacity of the railway port reloading yard, the container air-rail integration co-transport technology featuring intelligent control, efficient transfer, and accurate distribution was employed, and an innovative application mode of container air-rail integration co-transport technology for railway ports was proposed to enhance the seamless connection level between ports. Container air-rail integration co-transport technology can fully utilize the three-dimensional space in railway ports while reducing the land investment and construction costs of the reloading yard, effectively improving the efficiency of reloading and customs inspection, and it is highly significant for enhancing the efficiency of the transportation organization of railway international combined transport ports. By studying the technical characteristics and the operation process of the container air-rail integration co-transport, the optimization suggestions for railway port cargo transportation organization and countermeasures for port construction were put forward, providing references for the future construction and application of the container air-rail integration co-transport technology at port logistics bases.

Keywords: Railway International Combined Transport; Railway Port; Container; Air-Rail Integration; Reloading Mode