一种铁路货场集装箱多股道装车编组方法研究与实现

王银 青浩波
北京全路通信信号研究设计院集团有限公司，中国·四川 成都 610073

摘要：在郑州国际陆港西场站信息化、数字化、智能化建设过程中，遇到了场站股道长度不足，一列空车送进场需要分钩送到多个股道，在多股道完成同一批集装箱装车后再编组成一列车出场的情况。本文基于此类问题研究一种多股道装车编组方法，旨在提高集装箱周转率和设备利用率，以达到提质增效，节能减排。通过列车进场前分钩设计、自动对位技术、多股道虚拟成一条股道思想、以本站为中心的编组字典维护等技术手段，以及到站成组，超载和超偏载条件满足，特种箱指定装车和设备走行最短等原则自动计算出最优装车方案。本方法已在郑州国际陆港西场站实际使用中取得了良好反响，对现场作业指导效果明显，人工参与度大幅度下降，门吊等设备作业效率大幅度提高，有助于高效、绿色的现代货运体系构建。

关键词：集装箱；多股道装车编组；最优装车

Research and implementation of a multi-track loading method for containers in railway freight yards

Wang Yin, Qing Haobo
Beijing All-Road Communication Signal Research and Design Institute Group Co., Ltd., China Sichuan Chengdu 610073

Abstract: In the process of informatization, digitalization and intelligent construction of Zhengzhou International Dry Port West Station, the length of the stock track of the station is insufficient, and an empty train needs to be sent to multiple stock tracks in a couple, and then a train is organized into a train after the same batch of container loading is completed in multiple tracks. Based on this problem, a multi-track loading and marshalling method is studied, aiming to improve container turnover and equipment utilization, so as to improve quality and efficiency, save energy and reduce emissions. The optimal loading scheme is automatically calculated through the principles of connecting the train before entering the station, automatic alignment technology, multi-strand virtual into a stock track, and the maintenance of the marshalling dictionary centered on the station, as well as the principles of arrival grouping, overload and overload conditions, special box designated loading and equipment running shortest. This method has achieved good response in the actual use of Zhengzhou International Dry Port West Station, with obvious effects on on-site operation guidance, greatly reduced manual participation, and greatly improved the operation efficiency of gantry cranes and other equipment, which is conducive to the construction of an efficient and green modern freight system.

Keywords: Container; Multi-track loading and marshalling; Optimal loading

1 问题背景分析

集装箱多股道共装一列车的问题核心在于解决传统单股道装车效率低、资源调配不灵活的瓶颈问题，其发展主要基于以下关键背景因素：一是传统单股道装车需顺序完成人工接车、对位、前三检、盘箱、装箱、后三检、发车等作业环节，作业流程存在大量无效等待时间，制约整体周转效率；二是随着集装箱货运量持续增长，规模化运输需求的日益扩大不断挑战突破单位时间装运能力上限；三是设备存在大量无用走行距离，造成资源浪费。在国家战略支持多式联运发展，要求经济效益与环保双目标兼顾的背景下，如何提升效率并节能减排就越来越成为重要的研究课题。随着集装箱标准普及，“散改集”趋势推动敞顶箱、顶开门箱等专用箱型应用，降低了货物途损率，也为多股道快速装卸奠定基础。通过多股道并行作业，理论上可实现多个环节同步进行，从而缩短列车滞留时间。多股道共装模式本质是物流系统集成创新的产物，通过空间资源重组（并行股道）、技术升级（电气化设备）、标准化载体（集装箱）和自动装车编组优化方案减少重复人工劳

动，提高设备利用率和作业效率，节能减排，响应了国家降本增效与绿色物流的战略导向，成为现代多式联运枢纽的核心能力之一。

2 多股道装车编组方法实现

2.1 接车分钩设计

多股道共装一列车的第一个问题便是分钩，即如何将一列车分配到多个股道。假设有一列辆数为 C_n 的车，有 M 条股道可供接车，如果分配了 N(N ≤ M) 条股道完成接车，则车辆和股道换长需满足如下条件：

①对 N 条股道中的任一条股道 N_i，记其换长为 L_{Ni}，分配了 C_N 辆车，每辆车换长记作 L_{CNi}，则 $L_{Ni} \geq \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}$，即本股道接车换长总和不得超过本股道换长。

②对 N 条股道中的任一条股道 N_i，记其接车总换长和为 $L_{CN} = \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}$，分配 C_n 辆车，每辆换长记作 L_{Ci}，则有 $\sum_{i=1}^{n} L_{Ci} = \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}$，即 N 条股道分配车总换长等于整列车总换长。

由于集装箱装卸火车作业设备一般是龙门吊，其纵向跨度有距离限制，而股道线束的位置必须约束在其纵向跨度内才能满足其作业范围，故实际因门吊工作范围限制，同一门吊纵向工作范围内股道一般不会超过两条。因电缆铺设或者自身工作范围限制，一条股道上可能有多台龙门吊。考虑到设备故障率，门吊工作范围肯定会有横向交叉覆盖以保证一台设备故障时另一台设备能独立完成所有装卸作业。出于安全设计，两台门吊横向覆盖的重叠工作区域必然有至少一处减速区，故门吊跨减速区作业必经历先减速再加速，这一过程很耗时，故在分钩时应考虑后续尽量避免门吊跨减速区域作业。再就是多股道时，必然分主辅，能少用股道就尽量少用股道，以节省前期分钩送车和后续合钩取车作业次数。三是根据待装箱有无特种箱以及其在堆场上位置分布，结合待接列车车辆信息，考虑装特种箱的特种车，尽量做到纵向平铺以覆盖尽可能多的集装箱贝位。故在满足上述①②换长条件的情况下，还需考虑以上三个原则优化分钩设计以实现动态平衡，以同一门吊下两股道为例：

假设股道 N_i, N_{i+1} 两股道组成的线束上有门吊 G1 和 G2，股道长度皆为 L，则一般按均分设计，G1 与 G2 的减速区应位于 L/2 附近，在 $L \leq \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}$ 时必然分钩，此时条件①约束成条件③ $L/2 \geq \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}$，条件②保持不变。再考虑节省分钩数原则，有约束 $\lim_{N=1}^{n}(L/2 - \sum_{i=1}^{N} L_{CNi}) = 0^{+}$，即尽量往一个股道多配车辆，使股道车辆总换长尽量逼近但不超过 L/2。现场作业统计表明，一次分钩送车平均耗时大于龙门吊一次跨减速区平均耗时，小于门吊 5 次跨减速区平均耗时之和。一次分钩送车必然对应后续一次合钩取车，二者耗时接近。这意味着门吊跨减速区作业不超过 10 次时，改变条件③可获得理论上更佳平均时效。此时条件③变成④ $\begin{Bmatrix} N \geq 10 \\ L/2 + \sum_{i=N-10+1}^{N} L_{CNi} \geq \sum_{i=1}^{N} L_{CNi} \\ \lim_{N=1}^{n}(L/2 - \sum_{i=1}^{N-10+2} L_{CNi}) = 0^{+} \end{Bmatrix}$。最后考虑特种箱，一般情况下一列车特种箱数不会多，根据大量现场作业试验数据分析，特种箱数 *ConSpecs* 不超过堆场总贝位 *BayMax* 的[1/10](向上取整) 个时，优先考虑根据特种箱分配指定车辆在统计上并不能获得最大概率的最优装车方案，当 *ConSpecs* > [*BayMax/10*] 时，以 *J* 个特种箱[Con_1,...Car_j]，*K* 个特种车[Car_1,...Car_j] 为例说明：记第 J_i 个特种箱信息为 $\text{ContainerInfo}_j(ConNo,row,bay,sonSize,staArr,weghLoad,goodsNa)$，维度分别表示集装箱箱号、所在箱位行、列、集装箱尺寸、到站、集装箱载重、货物品名。记第 K_i 个特种车信息为 $\text{CarInfo}_j(carco,noArr,len,carType,weghLoad,aimPos)$，维度信息分别指代车号、到达顺位号、换长、车种、车辆载重、对位。一般情况下堆场长度与股道长度等同，可知 $\text{ContainerInfoj.}bay \neq [BayMax/2]$ 时，若一个门吊完成特种箱作业则必然跨减速区，不符合原则一，此时考虑两门吊共同作业或者分钩。由于原则一限制了每个股道车辆对位尽量不跨过减速区，故分布在减速区某侧的特种箱数大于等于 10 时且无法分配对应特种车在同一股道时，即满足条件⑤

$$\begin{Bmatrix} N \geq 10 \\ ConSpecs(where\ ContainerInfo_j.bay \neq [BayMax/2]) \text{数目} > 10 \\ L_{Ni} < \sum_{i=1}^{N} L_{CNi} \end{Bmatrix}$$

时，根据前述可知必然在满足条件④对应车辆顺位号处分钩。由于一辆车可以装 2 个 40 尺以下的箱子或者装一个 40 尺及以上的箱子，故不考虑载重和超偏载时也可根据以下公式计算车辆脚标：$Index = [\frac{conSeize \leq 40\text{的箱数}}{2}] + conSize \geq 40$ 的箱数，其中箱数为减速区某侧特种箱数。

综上，接车分钩总体设计原则优先顺序为：

P1. 能一个股道接车时，先送一部分到减速区一侧，根据集装箱场上分布位置摘钩后再拉剩余部分到减速区另一侧，隔离出减速区。

P2. 须多股道接车时，无特种箱，剩余待分配车辆数不超过 10，按条件③②分配股道车辆，剩余待分配车辆数大于 10，按④②分配。

P3. 多股道接车时，有特种箱，按⑤④②分配。

2.2 自动对位

根据股道线束两侧激光传感器以及分钩信息，自动推算列车对位信息，用于计划编制和设备走行距离计算。假设某一分钩车辆集合为[Car_1,...Car_j]，任一车辆信息 CarInfo$_j$(carco,noArr,len,carType,weghLoad,aimPos)。当传感设备沿线分布足够多时根据传感器定位数据理论上能知道每个车的位置信息，实际出于成本考虑，只需在线束两端以及门吊减速区两端装传感器即可，如此可获得分钩车辆两端至少一辆车 (Car_1 或 Car_j) 的实际地理位置坐标 *PosCar(x,y)*，而后根据车辆换长即可获取每个车辆的 *x* 位置，以 Car_1 坐标为例推算本钩其他车辆坐标 $CarInfo_j.aimPos$：

$$Car_j.x = PosCar.x + (\sum_{i=1}^{j-1} CarInfo_j.len) \times 标准换长 = Car_{j-2}.x + CarInfo_{j-1}.len \times 标准换长。$$

由于同一钩车辆都在一条股道，传感设备基本布置在线束附近，故 $Car_j \cdot y \approx PosCar \cdot y$。

有了车辆坐标后，就可以根据采集制作的货场基础数据换算出所在股道上对应的虚拟箱 $CaiInfo_j.aimPos$ 位，从而建立车辆位置和集装箱位置映照关系，作为后续装车计划计算设备走行的基础数据。

2.3 装车设计

①到站成组：同一到站的集装箱应紧邻装车，避免插花以减少中途调车作业。

②车型匹配：如 X70 型集装箱专用平车或敞车才能装集装箱，集装箱的尺寸不可超限，否者按特种集装箱指定装车。

③重量平衡：某辆车载重不能超过额定值，整列载重也不可超过额定值，不可偏载；

④优化目标：在满足上述条件的情况下，最小化作业总成本。

作业总成本可定义为从接车分钩到装车完成后检查发车全套作业流程所需的总时间。通过分钩多股道，可实现设备平行作业：比如门吊 1 在减速区左侧作业，门吊 2 在减速区右侧作业；可实现流程平行开展：比如第一分钩送进股道后即可开始前三检作业，某车装箱完毕后即可实现加固作业等。除此之外，分钩设计还影响后续装车计划设备走行距离：在门吊抓箱卸箱效率基本固定的前提下，影响门吊一次装箱作业时长的主要因素就是上一次计划结束后，门吊从当前位置到下一次计划开始位置的走行距离与下一计划开始位置到下一次计划结束位置即火车车辆的走行距离之和。记为 $dist_{onePlan}$=*dist(prePlanEndPos,curPlanStartPos)+dist(curPlanStartPos,curPlanEndPos)*。

由于门吊大车只能沿股道水平移动，门吊小车只能垂直于股道移动，门吊在执行一次装箱计划时行走的总距离为大车、小车移动之和，故走行距离等效于上次计划结束位置车辆所在虚拟箱位行列坐标 *prePlanEndPos(rowPreeCar,bayPreCar)*，本次计划起始箱位 *curPlanStartPos(rowCurCon,bayCurCon)*，本次计划结束位置车辆所在虚拟箱位 *curPlanEndPos(rowCurCar,bayCurCar)* 三者坐标分量差的绝对值之和：

deltax=Math.Abs(curPlanStartPos.rowCurCon-prePlanEndPos.rowPreCar)

deltaY=Math.Abs(curPlanStartPos.rowCurCon-prePlanEndPos.bayPreCar)

dist(prePlanEndPos,curPlanStartPos,curPlanEndPos)

同理可求 *dist(curPlanStartPos,curPlanEndPos)*。由于门吊装车作业前需由初始位置 *InitPos(row,bay)* 移动到第一条计划开始位置 *firstPlanStartPos*，作业完毕后一定由最后一条计划结束位置 *lastPlanEndPos* 会回到初始待机位置，故一整列装车计划的总走行距离可由下式计算：

$TotalDist = \sum_{i=1}^{N} dist_{onePlan}$+*dist* (*InitPos,fisrtPlanstartPos*) +*dist* (*lastPlanEndPos,InitPos*)，当装箱数够多时，到初始位置的走行可忽略不计，此时 $TotalDist \approx \sum_{i=1}^{N} dist_{onePlan}$。

故追求全局最优等效于求最小化 *TotalDist* 时的装车方案。

2.4 多股道装车编组方法

接车分钩设计和自动对位后，有了生成装车编组计划的基础数据，可按下述实现多股道装车编组方法：

①到站成组：场站以自己为零点，以各车站到本场站距离由远及近排列，维护编组信息表。筛选出待装箱所有到站信息，对比编组信息表排序即为到站成组的先后顺序。比如本次 *J* 个待装箱共三个到站，按照编组信息表排序为 [万象，琅勃拉邦，孟赛]。

②分钩组合与车型匹配：假设一列车共 *K* 辆，调机后第一辆车为 Car_1，按分钩设计有 2 钩，先送往股道 2 车辆集合[Car_{j+1},...Car_k]，再送往股道 1 车辆集合[Car_1,Car_j]。此时需考虑装车后合钩顺序是先拉股道 1 再拉股道 2，还是先拉股道 2 再拉股道 1。前者合钩后车辆集合为[Car_1,...Car_j,...Car_{j+1},...Car_k]，顺位保持不变；后者合钩后车辆顺位将变为[Car_{j+1},...Car_k,...Car_1,...Car_j]。这两种情况须分别按[万象，琅勃拉邦，孟赛] 的编组顺序装箱并比较各自的 *TotalDist* 以抉择合钩顺序，这就是多股道虚拟成单股道处理的核心思路。如果待装箱有超宽、超重等特种集装箱，则先找出对应的特种车辆，将特种箱与特种车优先指定装车。同理

分钩设计为 w 钩的亦作类似处理。

③重量平衡：只需保证每个车装箱时判断本次落箱车辆是否超载，超载则换箱；如果同一车装两个箱子，在落第二个箱子时判断重量差是否超百分比，超过则换箱；每次落箱后传感器检测是否超偏载，是则通知门吊纠正位置。

④优化目标：假设到站为万象的集装箱个数为 J_1，到琅勃拉邦的集装箱个数 J_2，到孟赛的集装箱个数为 J_3，$\sum_{i=1}^{3} J_i = J$。按[$Car_1,...Car_j,Car_{j+1},...Car_k$] 合钩，装车计划生成步骤为：step1: 按万象，琅勃拉邦，孟赛顺序处理到站，同一到站又按先特种箱后非特种箱处理。从待装箱集合 J 中选出所有到站为万象的特种集装箱集合 J_{T1}，将 J_{T1} 按 ContainerInfo.*bay* 升序排列，与车辆集合[$Car_1,...Car_j,Car_{j+1},...Car_k$] 顺位信息对应。Step2: 计算装完 J_{T1} 需要多少个车：遍历 J_{T1}，按合钩后车辆集合角标遍历，找到车型匹配的非满装满载可用车指定装车，如果车上已有一个 20 尺，本次又装一个 20 尺，则进一步检查误差。如果该车已装一个 40 或 45 英尺，或者已装 2 个 20 英尺，则置该车满装不可用标记，如果该车满载，则置满载不可用标记，如果该车车型不能装集装箱，则直接置不可用标记并进入下一次车辆查找。同理处理其他两个到站的种集装箱集合。Step3: 根据 $CarsNumNeed = [\frac{conSeize \le 40的箱数}{2}] + conSize \ge 40$ 的箱数找出所有到站为万象的非特种集装箱集合 J_{NT1}，遍历车辆集合，找到第一个可用车脚标 $index_{firstCapable}$，则在区间 [$index_{firstCapable}$, $index_{firstCapable}$+*carsNumNeed*-1] 内车辆依次分配给 J_{NT1} 即可。同理处理其他两个到站的非特种箱集合。

⑤计划排序分配与设备走行计算：按上述步骤处理完所有到站后，对生成的箱车对应关系（即装车计划）按车辆集合的对位信息排序，按门吊不过减速区原则分配计划，并计算 *TotalDist*，比较给出最优装车方案。

3 算例验证分析

以 2.4 章节 6 个待装箱三个到站[万象，琅勃拉邦，孟赛]，5 辆车分两钩送股道 Z1、Z2 为例，先拉 Z1 再拉 Z2 结果（如下表）：

4 结语

集装箱装火车是典型的多目标多约束组合优化问题，在满足所给定的条件目标同时，追求作业总成本最小。本文针对多股道同装一列车进行分钩设计，以达到设备平行作业和流程平行展开以降低全流程时耗。并在分钩设计基础上进一步按装车原则计算可能的装车方案，通过分析引入等效总成本概念和最小化 *TotalDist* 作为量化指标，通过多股道虚拟成单股道处理后求出概率上的最优装车方案以指导现场作业，实际运用证明本方案指导装车作业能达到提质增效，节能减排的目的。未来研究中，AI 大模型求解最优分钩设计和动态规划求解装车方案所有排序下的 *TotalDist* 以达到理论上的最优将是进一步研究方向。

箱号	箱型	箱位	到站	车号	累计总走行
TBJU7687785	40	BT-32	万象	5464351(Z1)	32(门吊1)
TBJU7250100	40	BT-36	万象	5733924(Z1)	46(门吊1)
TBJU7348056	20	BT-42	琅勃拉邦	5728828(Z1)	63(门吊1)
TBJU7525275	20	BT-42	琅勃拉邦	5728828(Z1))	78(门吊1)
TBJU7287217	40	BT-62	琅勃拉邦	5734207(Z2)	8(门吊2)
TBJU7409779	40	BT-64	孟赛	5721131(Z2)	26(门吊2)

箱位 BT-42 到 BT-62 跨越了门吊减速区，故按分配给两个门吊平行作业。此时 *TotalDist* 为 78+26=104。如果先拉 Z2 再拉 Z1：

箱号	箱型	箱位	到站	车号	累计总走行
TBJU7687785	40	BT-32	万象	5734207(Z2)	108(门吊1)
TBJU7250100	40	BT-36	万象	5721131(Z2)	137(门吊1)
TBJU7348056	20	BT-42	琅勃拉邦	5464351(Z1)	152(门吊1)
TBJU7525275	20	BT-42	琅勃拉邦	5464351(Z1)	170(门吊1)
TBJU7287217	40	BT-62	琅勃拉邦	5733924(Z1)	78(门吊2)
TBJU7409779	40	BT-64	孟赛	5728828(Z1)	167(门吊2)

此时走行距离明显大幅增加，比较之下应先拉 Z1 再拉 Z2 的对应的方案较优。

参考文献：

[1] 张立新，王建军，李国强. 铁路多股道协同装卸作业优化模型[J]. 铁道学报，2023,45(8):1-9.

[2] 中国铁道科学研究院. 铁路货运站多股道同步作业技术规范 : TB/T 3568-2021[S]. 北京 : 中国铁道出版社 , 2021.

[3] Thomas K, Müller R. Synchronized Loading Operations in Multi-track Rail Yards[J]. Transportation Research Part C, 2024, 118: 102-115.