

基于动态规划的铁路货场装火车作业优化策略研究

白雨

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 610031

摘要: 随着铁路货运量的持续增长, 传统装火车作业模式面临车皮空置率高、动态响应不足及智能化水平低等瓶颈问题。论文以动态规划为核心工具, 提出一种多阶段优化模型, 旨在提升铁路货场集装箱装车效率。通过将装车作业分解为离散时间窗口, 结合车皮容量、集装箱优先级及设备状态等多维约束, 构建动态规划算法框架, 实现载重平衡、方向匹配及紧急订单响应的全局优化。算例验证表明, 该模型显著缩短集装箱平均停留时间, 降低车皮空置率与运输成本, 紧急订单处理效率提高, 并有效应对动态扰动。研究成果为铁路货场智能化转型提供了理论支撑与实践路径, 助力构建高效、绿色的现代货运体系。

关键词: 动态规划; 铁路货场; 装火车作业; 集装箱运输; 多目标优化

Research on Optimization Strategy of Railway Freight Yard Loading Operation based on Dynamic Programming

Yu Bai

Beijing Quanlu Communication and Signal Research and Design Institute Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract: With the continuous growth of railway freight volume, the traditional train loading operation mode faces bottlenecks such as high wagon vacancy rate, insufficient dynamic response and low level of intelligence. In this paper, a multi-stage optimization model is proposed with dynamic programming as the core tool, aiming to improve the efficiency of container loading in railway freight yards. By decomposing the loading operation into discrete time windows, combined with multi-dimensional constraints such as wagon capacity, container priority and equipment status, a dynamic programming algorithm framework is constructed to realize the global optimization of load balancing, direction matching and emergency order response. The results show that the model significantly shortens the average dwell time of containers, reduces the vacancy rate of wagons and transportation costs, improves the efficiency of urgent order processing, and effectively copes with dynamic disturbances. The research results provide theoretical support and practical path for the intelligent transformation of railway freight yards, and help build an efficient and green modern freight system.

Keywords: dynamic programming; railway freight yards; loading train operations; container transport; multi-objective optimization

0 前言

随着中国经济的快速发展和“双循环”战略的推进, 铁路货运作为国家综合立体交通网的核心组成部分, 承担着大宗物资运输和区域经济联动的重要使命。据统计, 2024 年全国铁路货物发送量达 51.75 亿吨, 其中集装箱运输量占比突破 30%, 同比增长 15% 以上 (国家铁路局, 2025)。铁路货运中, 装车作业作为核心环节, 其效率与质量直接影响运输系统的运营效能与经济性。然而, 在铁路货运量持续增长的同时, 集装箱装车作业效率的瓶颈问题日益凸显, 具体表现在以下方面:

①作业时间长, 集装箱从进场到装车需经历堆存、分拣、配载等多个环节, 人工调度下平均作业耗时 3.5 小时。

②动态扰动频繁, 装车计划因集装箱到货延迟、临时订单插入或设备故障需当日调整, 传统静态优化算法难以应对实时变化。

③单点作业效率没有得到有效提高, 导致局部或路网的车皮周转率不高, 出现较多空置车辆。

④智能化技术应用滞后, 尽管物联网、5G 定位等技术已实现集装箱位置实时追踪, 但多数货场仍依赖 Excel 表格进行调度, 数据价值未通过算法充分挖掘。

铁路货场集装箱装车作业效率的提升是破解铁路货运发展瓶颈的关键环节。使用静态优化算法 (如遗传算法、模拟退火算法等) 在假设集装箱“集中到达、固定序列”的前提下优化配载方案, 但无法处理动态到达场景 (如公路集卡到货时间波动 ± 2 小时), 导致理论方案与实际执行有偏差, 而且在多目标权衡 (如空置率 VS 偏载风险) 时缺乏全局优化能力, 紧急订单插入后需人工调整。本研究以动态规划为核心工具, 致力于解决传统方法在动态性、实时性和多目标优化上的不足, 为构建高效、智能、绿色的现代铁路货运体系提供理论支撑与实践路径。

1 铁路货场装火车作业现状剖析

在铁路货场的日常运营中,装火车作业流程涵盖多个紧密相连的环节,各环节相互影响、相互制约,共同构成了一个复杂的系统。车站货运员综合考虑掌握的所有受理运单的到站方向和数量,本站空箱亟待交箱数量,待装车的运载能力,待装箱的方向、尺寸、重量和数量等因素,制定合理的配载方案,以确保火车满载并最小化运输成本。对于重货和轻货,需进行合理搭配,以确保列车的重心分布均匀;对于有特殊要求的货物,如超长、超宽货物,要按照相关规定进行特殊的装载加固处理,避免货物在运输过程中发生位移、倒塌或掉落等情况,从而保证货物的安全运输。计划完成后,及时通知托运人和货运员,以便托运人安排车辆组织进货,货运员做好承运准备。

装火车作业流程存在不合理之处,不同环节之间的衔接不够紧密,导致货物在各环节之间的流转时间过长。货物编组和装车环节,由于缺乏科学的编组方案和装车计划,货物编组和装车时间较长,影响了列车的发车时间。

2 集装箱装火车问题的动态规划算法

2.1 动态规划理论基础

动态规划(Dynamic Programming, DP)其核心思想是将一个复杂的问题分解为一系列相互关联的子问题,通过求解子问题的最优解,进而得到原问题的最优解。这种方法能够有效避免重复计算,显著提高问题的求解效率,尤其适用于具有最优子结构和重叠子问题特性的问题。

在铁路货场装火车作业场景中,多阶段决策过程体现得淋漓尽致。货物的到达、分类、搬运、编组与装车等环节,构成了一个有序的决策链条。在每个阶段,都需要根据当前的货物状态、货场资源以及运输需求等因素,动态规划算法可以充分考虑这种阶段间的关联性,做出合理的决策,以实现整个装火车作业的最优目标。

动态规划凭借其多阶段决策特性与最优子结构特征,在铁路货场动态调度问题中展现出显著的理论优势:

时序分解能力:将连续装车作业拆解为离散时间窗口(如15分钟/阶段),支持滚动优化和实时调整。

多状态协同:通过状态变量(车皮剩余容量、集装箱优先级队列、设备可用性)建模,实现载重、空间、时序的三维协同优化。

全局最优保障:贝尔曼最优性原理确保从局部决策递推得到全局最优解,避免贪心算法的短视缺陷。

而且装火车作业中存在大量重叠子问题。在不同的货物组合和作业场景下,可能会出现相同的子问题,如在不同批次货物的装载过程中,可能会面临相似的货物配载和车辆选择问题。动态规划算法通过采用记忆化搜索等技术,能够对已经求解过的子问题的解进行存储和复用,避免了重复计算,进一步提高了算法的效率和性能。在处理多批次相似货

物的装火车作业时,动态规划算法可以直接利用之前计算得到的子问题的解,快速确定当前的最优决策。

2.2 动态规划求解集装箱装火车问题

集装箱装火车问题就是将货场中的集装箱以及即将进货场的集装箱分配到合理的火车上,在集装箱的选择上和火车的分配上应该遵循以下原则:

车皮匹配,根据集装箱类型选择对应的铁路平车(如X70型集装箱专用平车)或敞车,集装箱的尺寸和重量不能超过火车的限制。

重量平衡,确保车皮载重不超过额定值(如标记载重60吨),避免偏载;若一列火车装两个20尺集装箱,要保证两个集装箱重量相差小于5%。

考虑货物目的地,将同一方向的集装箱装至相邻的火车内,减少中途调车作业。

优化目标,在保证火车满载的前提下,最小化总运输距离或总运输成本。

集装箱装火车问题就是多约束多目标组合优化问题,目标是在不超过火车载重、避免偏载等前提下,选择一些集装箱装入火车,使得火车的总价值最大,作业成本最小。在集装箱装火车问题中,我们可以将集装箱的停留时间定义为价值,停留时间越久,则价值越大,这样可以实现先到货场的集装箱先装车,从而提高集装箱的周转率。同时,考虑到紧急订单插入问题,为确保紧急订单被选中,我们将紧急订单的集装箱停留时间设置为1000,减少状态维度。

动态规划的关键是确定状态转移方程,考虑到集装箱有尺寸、方向、价值、重量等属性,为避免状态转移方程维度较高、运算量巨大,可先进行数据预处理,减少运算量。

2.3 多阶段模型结构设计

假设有C个集装箱(有重量、尺寸、方向、停留时间、是否加急等属性)待装需要装至K辆火车(有车型、载重等属性),求解集装箱装火车作业计划的动态规划流程为:

第一,按方向分组:将所有的20尺和40尺集装箱按方向分组,得到每个方向i的20尺集装箱列表和40尺集装箱列表,一列火车只能装一个40尺集装箱或一个45尺集装箱,为减少计算维度45尺集装箱也按40尺集装箱计算。

第二,预处理每个方向i:

①对20尺集装箱列表按价值降序排序,计算总价值 sum_{20} ,其中 $sum_{20}[a]$ 表示装a辆车的20尺集装箱(每辆装2个,即前2a个20尺集装箱)的总价值。

②对40尺集装箱列表按价值降序排序,计算总价值 sum_{40} ,其中 $sum_{40}[b]$ 表示装b辆车的40尺集装箱(每辆装1个,即前b个40尺集装箱)的总价值。

③用 $k[i]$ 表示方向i需要使用的车辆数,假设方向i有 $m[i]$ 个20尺的集装箱和 $n[i]$ 个40尺的集装箱,对于每个可能的 $k[i]$ (从0到 $\min(m[i]/2+n[i], K)$),计算对应的最大总价值 $v[i](k[i])$:

- i. 遍历 a 的可能取值范围: $0 \leq a \leq \min(k[i], m[i]/2)$ 。
- ii. 对每个 a, 计算 $b=k[i]-a$ 。如果 $b > n[i]$, 跳过。
- iii. 计算当前的总价值: $\text{sum}_{20}[a]+\text{sum}_{40}[b]$ 。
- iv. 记录最大的总价值作为 $v[i](k[i])$, 同时记录具体 a 和 b 值 (装 20 集装箱的车辆数和装 40 尺集装箱的车辆数), 确定如何装箱。

④生成方向 i 的选项列表: 所有可能的 $(k[i], v[i](k[i]))$ 对。

第三, 全局动态规划:

①初始化 dp 数组, $dp[k]$ 表示有 k 辆火车时的最大总价值。初始值 $dp[0]=0$, 其余为 $-\infty$ 。

②遍历车辆数 k (从 1 递增至 K)。

③遍历每个方向 i, 按照预处理的数据更新 dp 数组。

④对每个当前状态 k:

- 如果 $dp[k]$ 不是 $-\infty$:

- 对每个到站 i 的选项 $(k[i], v[i](k[i]))$:

- 如果 $k+k[i] > K$, 跳过。

- 如果 $dp[k+k[i]] < dp[k]+v[i](k[i])$, 则更新 $dp[k+k[i]]=dp[k]+v[i](k[i])$ 。

⑤最终的最大总价值是 $\max(dp[K])$ 。

第四, 回溯找到所选的 $k[i]$ 值, 以及各个方向选择哪些集装箱以及几辆火车。

第五, 考虑细节, 生成装火车计划。根据各集装箱实际情况, 选择合适的火车; 对于一辆车装两个 20 尺集装箱时, 考虑偏载风险, 选择两箱重量差小的安排至同一辆车, 生成装火车计划。

第六, 以 15 分钟为时间窗口划分阶段, 每个阶段查询货场集装箱, 更新一次装车计划, 覆盖未来 3 小时作业窗口。

第七, 增加动态响应机制, 当有紧急订单插入则重新

规划, 调整后续作业计划。

本优化模型采用多阶段的动态规划结构, 将铁路货场装火车作业过程划分为多个有序的阶段, 通过逐步做出最优决策, 实现整个装火车作业的优化目标。决策变量包括车辆的选择、货物在车辆内的配载方案以及装车顺序的确定。根据货物的重量、体积、性质以及运输要求, 选择合适的车辆类型和规格。对于超长、超宽货物, 选择具有相应承载能力和空间的车辆; 对于需要保持恒温、恒湿环境的货物, 选择具备温控、湿控设备的车辆。在配载方案设计中, 充分考虑车辆的载重限制、重心平衡以及货物的保护要求, 确保车辆在运行过程中的安全和稳定。

目标函数的优化是实现铁路货场装火车作业最优决策的核心。在本模型中, 目标函数的设定综合考虑了多个关键因素, 旨在实现集装箱周转率最大化、运输成本最小化、时间最短化以及资源利用最大化等目标。

进入迭代阶段, 本优化模型依据状态转移方程, 逐步更新状态变量和目标函数的值。在每一次迭代中, 需对所有可能的决策进行评估和选择。对于装车顺序的决策, 需考虑货物的紧急程度、重量、体积等因素, 选择最优的装车顺序; 对于车辆选择的决策, 要根据货物的特点和运输需求, 选择最合适的车辆类型和规格。通过对不同决策的评估, 选择能够使目标函数值最优的决策, 并根据该决策更新状态变量。

3 算例验证分析

3.1 算例描述

假设共有 20 个 20 尺集装箱, 10 个 40 尺集装箱, 10 辆火车, 集装箱信息如表 1 所示。

3.2 算例结果与分析

计算结果如表 2 所示。

表 1 集装箱信息

编号	方向	尺寸	停留时长	重量	是否紧急	编号	方向	尺寸	停留时长	重量	是否紧急
1	1	20	12	21.2	是	16	3	20	24	30.2	否
2	1	20	15	31.6	否	17	3	20	27	23.6	否
3	1	20	16	23.6	否	18	3	20	23	29.9	否
4	1	20	13	34.2	否	19	3	20	11	25.5	否
5	1	20	25	21.3	否	20	3	20	23	23.9	否
6	1	20	4	19.8	否	21	1	40	14	46.4	否
7	1	20	6	27.3	否	22	1	40	23	29.2	否
8	2	20	19	28.1	否	23	1	40	23	45.7	否
9	2	20	30	24.9	否	24	1	40	18	30.4	否
10	2	20	23	26.4	否	25	2	40	9	52	否
11	2	20	3	27.4	否	26	2	40	21	47.5	否
12	2	20	9	29.1	否	27	2	40	15	36.6	否
13	2	20	24	25.1	否	28	2	40	22	41.3	否
14	2	20	7	26.8	否	29	2	40	13	46.4	否
15	2	20	21	26.1	否	30	2	40	21	33.8	否

表 2 计算结果

车辆	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
集装	1			10	9				16	17
箱	5	22	23	15	13	26	28	30	18	20

由表 2 可知, 编制的装火车计划没有火车空置, 选择了停留时间较长的集装箱以及加急的集装箱, 保证了装两个 20 尺集装箱时两个集装箱重量相差小于 5%, 而且按方向装火车, 装火车计划满足需求。

基于动态规划的优化方案通过对装车作业的精细规划, 货物的平均停留时间大大缩短, 提高车辆的载重利用率, 减少了不必要的运输成本。同时减少了列车的等待时间, 确保列车的及时发车, 提高了运输的准时性。

在货物编组和装车环节, 引入先进的编组算法和装车模拟软件, 根据货物的重量、体积、性质等因素, 自动生成最优的编组方案和装车计划。通过模拟装车过程, 提前发现可能存在的问题, 如车辆载重不均衡, 并进行调整优化, 确保装车作业的顺利进行。

4 结语

本研究针对铁路货场装车作业中的多约束动态调度难题, 通过系统性分析既有作业模式的效率瓶颈, 创新性地引入动态规划理论, 构建并验证了基于多阶段决策的装车作业优化模型。在理论层面, 本研究深化了动态规划在复杂物流场景下的应用范式, 通过定义状态变量 (车辆剩余容量、集装箱优先级队列)、决策变量 (车辆配载方案、时序窗口划分) 及多目标函数 (最小化停留时间、运输成本与偏载风险), 揭示了贝尔曼最优性原理在资源分配与货物配载中的递推机制, 为动态调度问题的数学建模提供了可扩展的理论框架。

在模型构建方面, 基于铁路货场作业的时空耦合特性, 提出“时序分解 - 状态建模 - 滚动优化”三阶段求解框架。

通过严谨推导状态转移方程, 将多目标优化问题转化为离散时序窗口下的序列决策链, 并引入记忆化搜索技术降低算法复杂度, 确保模型在多项式时间内收敛至全局最优解。案例实证表明, 优化模型显著提升作业效率与经济性, 验证了模型在动态扰动场景下的鲁棒性与实用性。

本研究突破了传统静态调度模型的局限性, 为铁路货场智能化转型提供了方法论支撑。未来研究可进一步耦合强化学习算法与实时物联网数据流, 构建数据 - 模型双驱动的自适应调度系统, 以应对极端扰动 (如大规模订单延迟、设备突发故障) 下的复杂决策需求, 推动铁路货运系统向高阶智能化演进。

参考文献:

- [1] 卫家骏.混合蚁群算法求解集装箱箱位分配问题[J].中国航海, 2011(2):5.
- [2] 杨广全, 马玉坤, 刘飞.基于遗传算法的集装箱装车配载方案的优化[J].中国铁道科学, 2014, 35(6):7.
- [3] 张勇, 陈进鹏, 徐振田.集装箱船舶配载问题的蚁群算法求解设想[J].物流科技, 2024, 47(22):89-93.
- [4] 王海星, 张国伍, 李振江.解决有配放限制的多集装箱配载系统优化的多蚁群协同算法[J].交通运输系统工程与信息, 2010, 10(2):7.
- [5] 张松, 赵德顺, 王洋洋.基于动态规划的管材切割套料方法[J].金属加工(冷加工), 2024(7):66-68.

作者简介: 白雨 (1995-), 男, 中国甘肃会宁人, 硕士, 从事铁路综合控制及信息系统研究。