DOI: 10.3901/JME.2020.18.254

智能起重机货物装卸顺序优化与自动生成技术

李国杰¹ 丁晓红²

(1. 苏州大学应用技术学院 苏州 215325;
2. 上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

摘要: 起重机货物装载和卸载顺序优化和自动生成技术是实现起重机自动化、智能化作业,提升起重机作业效率的关键技术。建立起起重机搬运作业分析模型,定义起重机搬运作业环境和货物状态,进一步构建起重机搬运货物三维位置信息数据库;通过将起重机装载和卸载顺序问题定式化,并根据起重机实际作业要求,限定最短搬运距离计算中搜索对象货物的数量,提出新的搜索和优化计算方法,由此建立一种有效的起重机卸载顺序生成规则、装载顺序优化及起重机装、卸作业顺序自动生成方法。通过起重机仿真分析平台对装载、卸载顺序优化和自动生成技术进行了验证。研究结果表明,提出的方法可以快速、自动生成起重机货物装卸顺序指令,实现起重机大批量货物的连续自动搬运作业,为起重机智能化装卸作业提供了关键技术支撑。

关键词: 起重机; 货物装卸; 位置信息; 搬运顺序

中图分类号: TH21

Sequence Optimization of Loading/Unloading and Its Automatic Generation Technique for Smart Crane

LI Guojie¹ DING Xiaohong²

(1. Applied Technology College, Soochow University, Suzhou 215325;
2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: Sequence optimization of loading/unloading is a key technique for crane to realize the automatic and smart operation, and improve the operation efficiency. The analysis model of conveyance operation of crane is constructed, and the operation environment and cargo states are defined. Furthermore the cargo position information database is built. The problem of loading and unloading sequence of crane is formulated, and a new search and optimization method is suggested by limiting the number of searching objects in the calculation of the minimum conveyance distance according to the practical operation of crane. Consequently, an effective generation rule, optimization method, and automatic generation technique of loading/unloading sequence for crane are proposed. The effectiveness of the suggested method is validated by numerical simulation. The results show that the suggested method can automatically and rapidly generate the cargo handling sequence, thus the effective and continuous conveyance of large scale cargo can be realized. The suggested method provides technique support for crane to achieve smart operation.

Key words: crane; cargo handling; position information; conveyance sequence

0 前言

随着我国智能制造战略的实施和企业转型升级的深入推进,机械行业对智能装备的需求呈快速增长趋势。起重机是重要物流设备,其自动化、智能化水平直接关系到工厂智能化和智慧港口等智能化

升级的顺利实施,因此,智能起重机的研究与开发越来越受到行业关注,并将成为起重机械领域未来重要的研究方向之一。

岸桥和场桥是集装箱港口关键起重设备,传统港口在进行集装箱装卸作业时,会根据船东提供的集装箱箱位图和卸载及装载要求,在对集装箱装卸设备与装卸系统进行集成调度优化基础上,人工或借助辅助软件编制对象船舶或特定装卸业务的装卸作业计划和搬运顺序指令,起重机司机根据搬运

作业计划和搬运顺序指令进行计划数量集装箱的搬运作业。目前, 全球最大集装箱船的载箱量为 23 756 标准箱, 大型枢纽港通常会同时接卸多艘集装箱船舶, 由于需要处理的集装箱数量和位置信息量庞大, 通过传统方法进行集装箱位置信息处理和装卸作业顺序指令编制, 存在效率低, 误差率高等问题。

起重机搬运货物位置信息数据库构建、起重机搬运顺序优化与自动生成技术是支撑起重机自动化、智能化连续装卸作业的关键技术, 也是彻底解决传统集装箱港口效率低、误差率高等问题, 提升港口整体运营效率的关键。

近年来, 以提升港口装卸作业效率为目标, 国内外学者在集装箱装卸设备与装卸系统集成调度优化等方面已经开展了系列研究并取得了一定的研究成果^[1-8]; 张文霞^[9]以改善集装箱船舶的配载管理从而提升船舶物流效率为目标, 在研究了现代船舶港口集装箱装卸模型的基础上, 开展了基于遗传算法的港口集装箱装卸顺序问题研究, 提出了比较合理的集装箱放置规划, 减少船舶停港时的倒箱作业并提高航运物流效率; 张维英等^[10]以港口场桥取箱作业时倒箱数量最少为目标, 建立取箱作业的优化模型, 研究了倒箱最小的装船顺序, 提高了装卸作业的效率。然而以实现起重机自动化、智能化作业为目标, 针对起重机搬运货物位置信息数据库构建、起重机装、卸作业顺序优化与自动生成等方面的研究工作尚未实质性开展, 相关研究报导也比较少。

工业机器人和汽车等行业以实现自动化和智能化为目标, 开展了大量研究。贾庆轩等^[11]利用 A* 算法在空间机械臂的自由工作空间进行无碰撞路径搜索, 实现了空间机械臂的避障路径规划; 史也等^[12]提出一种可使基座姿态和机械臂末端位姿同时到达期望状态的路径规划方法, 通过仿真试验对该规划方法进行了验证; 汪首坤等^[13]结合遗传算法全局搜索能力强和粒子群算法局部搜索能力强的特点, 提出了一种基于混合群智能优化的机器人立体视觉三步标定方法, 满足机器人精密视觉操作的需求; 季旭全等^[14]以实现装配过程的智能化与精准化为目标, 提出一种基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法, 实现装配过程的可视化和自动化; 李运华等^[15-17]分别就多轴驱动车辆的路径跟踪控制, 智能网联汽车路径跟踪控制器设计和混合动力汽车动力总成多智能体集成控制策略等开展了研究。此外, 张永祥等^[18]为了自动剔除虚假模态, 避

免人为参与模态模型定阶及模态拾取, 提出了一种新型的随机子空间法运行模态参数自动识别方法; 马江涛等^[19]提出一种基于局部二次学习概率路径图算法的分支管路自动布局方法, 利用 DIJKSTRA 算法搜索出各分支管路的最短路径, 通过路径优化自动获得分支管路的布局。这些研究成果均具有一定的参考和借鉴价值。

本研究以实现起重机自动化、智能化连续装卸作业为目标, 以港口集装箱起重机为例, 在学习熟练司机操作方法和卸载技巧基础上, 提出了一种全新的货物三维位置信息数据库构建、货物装卸顺序优化与自动生成技术, 通过构建货物三维位置信息库, 系统可以快速调用数据库内货物的位置数据, 进而准确进行搬运顺序优化和定式化分析计算, 同时将优化计算结果数据直接转化为起重机控制系统能自动识别的数据结构, 实现起重机自动化作业并充分发挥起重机有效作业能力, 提升作业效率和作业安全性。

1 起重机作业环境和货物状态定义

在集装箱港口和集装箱堆场, 起重机搬运作业环境与集装箱堆放状态随装卸作业工艺的不同而有所区别。图 1 显示的是集装箱堆放和倒箱作业状态相对规则, 集卡位置相对固定的作业场地。图 2 显示的是集装箱堆放状态不规则的装卸作业场地。

图 1 货物堆放和卸货状态规则的作业场地

图 2 货物堆放状态不规则的装卸作业场地

起重机装卸作业顺序研究是相对抽象的研究内容,为了对不同作业环境和货物堆放状态下的起重机货物搬运作业顺序进行优化分析和计算,为自动化作业起重机进行批量货物连续搬运作业提供有效搬运顺序控制指令,需要将本抽象性研究问题转化为可以分析和计算的定式化研究内容,为此,将起重机搬运作业环境和货物状态作如下定义。

首先,为了减少仿真试验驱动模型数量,提升仿真驱动速度和仿真分析效率,在确保起重机三维作业原理、功能和作业状态清晰前提下,最大可能简化了起重机的外形结构和搬运作业环境,简化后的起重机搬运作业分析和仿真模型如图3所示。

图3 起重机搬运作业分析和仿真模型

建立起重机搬运作业三维空间坐标系, X 、 Y 、 Z 方向分别与起重机小车运行、大车运行和垂直升降三大机构的作业方向对应,见图3。在构建的起重机三维空间坐标系中,货物的初始位置状态信息和卸载位置信息均用三维空间坐标系中的坐标值表示,定义货物的三维位置坐标为货物的几何中心位置坐标,货物等搬运对象物只能在定义的三维空间内被搬运。

将货物三维位置信息定式化,定义货物数量为 m 件,初始堆放位置用式 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 表示,定义计划搬运货物数量为 n 件,计划搬运货物卸载位置用式 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 表示,并规定 $n \leq m$ 。

将起重机的一个完整搬运作业过程划分为两个关联作业区域来考虑,一个区域是起重机将货物从初始放置位置搬运到目的卸载位置的作业区域,另一个区域是起重机从卸载位置返回到下一个装载位置的作业区域,一个作业区域定义为起重机的一条作业路径,如图4所示。定义起重机的搬运作业距离近视为初始装载位置到目的卸载位置之间的三维直线距离,所有货物的初始堆放状态和卸载状态信息均用起重机搬运作业三维空间坐标系中的位置坐

标表示,并且所有货物的三维位置信息已获取。

图4 起重机装卸作业路径定义

2 货物位置数据库构建和问题定式化

起重机货物位置信息数据库的构建是起重机货物装卸作业顺序优化和自动生成问题定式化研究的基础,本文提出了一种货物三维位置信息数据库的智能构建方法,该方法可以将批量货物的位置信息数据按照设定的规则自动导入数据库,构建的数据库结构和数据存储方式便于系统快速调用数据库内货物的位置数据,准确进行搬运顺序优化等定式化计算分析,并能将分析优化计算结果存储在指定位置,为后续路径规划和自动控制作业提供准确的数据和指令输入,大幅度减少系统分析计算工作量,并实现数据流的顺畅传输。

下面将根据起重机搬运作业环境与货物堆放状态不同分货物堆放状态不规则和规则两种情况进行货物三维位置信息数据库构建。

货物初始堆放状态为不规则情况下,货物三维位置坐标信息按照数据导入规则和式(1)所示的数据库结构导入数据库。

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p_1} & \dots & x_{p_i} & \dots & x_{p_m} \\ y_{p_1} & \dots & y_{p_i} & \dots & y_{p_m} \\ z_{p_1} & \dots & z_{p_i} & \dots & z_{p_m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, X_p 、 Y_p 、 Z_p 分别是 m 件货物在 X 、 Y 、 Z 方向的位置坐标数据库矩阵,第1行至第3行的数据分别为 m 件货物 X 、 Y 、 Z 方向的位置坐标。

货物初始状态为规则的情况下,定义离坐标原点最近的货物位置坐标为 $(x_{p_1}, y_{p_1}, z_{p_1})$,定义货物与三维空间坐标系中 X 、 Y 、 Z 方向相对应的列、行、层数分别为 λ_p 、 τ_p 、 ε_p ,定义货物 X 、 Y 、 Z 方向的间隔距离分别为 ζ_{p_x} 、 ζ_{p_y} 、 ζ_{p_z} ,在以上定义基础上,货物三维位置坐标信息按照以下数据导入规则和式(2)所示的数据库结构导入数据库。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_p \\ \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Z}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{pp} & \cdots & \mathbf{X}_{pp} & \cdots & \mathbf{X}_{pp} & \cdots & \mathbf{X}_{pp} \\ y_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & y_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & y_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & y_{p_1}^{\lambda_p} \\ z_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & z_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & z_{p_1}^{\lambda_p} & \cdots & z_{p_1}^{\lambda_p} \end{pmatrix} \quad (2)$$

在式(2)所示的数据库中

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{pp} &= (x_{p_1} x_{p_1} + \zeta_{p_x} \cdots x_{p_1} + \zeta_{p_x} (\lambda_p - 1)) \\ y_{p_{\tau p}} &= y_{p_1} + \zeta_{p_y} (\tau_p - 1) \\ z_{p_{\varepsilon p}} &= z_{p_1} + \zeta_{p_z} (\varepsilon_p - 1) \end{aligned}$$

记号 $y_{p_1}^{\lambda_p}$ 是 λ_p 个 y_{p_1} 构成的矩阵, 见下式。

$$y_{p_1}^{\lambda_p} = \underbrace{[y_{p_1} \cdots y_{p_1}]}_{\lambda_p}$$

货物三维位置坐标信息数据导入规则有两个基本要求, 其一是设定的规则和数据结构有利于后续搬运顺序优化等分析计算时快速便捷地调用和存储数据, 其二是数据库的结构与货物实际堆放状态相对应, 确保货物的相对位置关系清晰, 便于系统准确判断货物空间位置关系。

无论货物初始堆放状态是否为规则状态, 货物三维位置坐标信息导入规则均建立在以上两个基本要求基础上, 具体导入规则如下。

数据导入规则 1: 货物初始状态为单层情况下, 按照离三维空间坐标原点由近到远的顺序先导入 X 方向第一行货物的位置坐标信息, 再依次沿 Y 方向导入 X 方向第二行货物的位置坐标信息, 依次类推将全部单层货物位置坐标信息全部自动导入数据库, 单层货物三维位置数据导入规则示意图见图 5。

图 5 单层货物三维位置数据导入规则示意图

数据导入规则 2: 货物初始状态为多层情况下, 按照先下后上的顺序, 先从最下层货物的位置信息开始导入, 依次完成从最下层到最上层数据的数据库导入, 也就是说, 在式(1)和式(2)所示的数据库结构中, 放置在下层的货物, 其三维位置坐标位于数据库结构左侧, 放置在上层的货物, 其三维位置坐

标位于数据库右侧, 多层货物数据导入顺序和导入规则如图 6 所示, 每层货物位置信息的导入规则同规则 1, 货物的三维空间位置信息通过货物三维坐标值进行判定。

图 6 多层货物数据导入顺序和导入规则示意图

在起重机三维作业空间坐标系内, 系统通过比较货物三维坐标 X 、 Y 、 Z 的值, 可以自动并准确地识别堆放货物的空间位置状态, 比如两个货物的 X 、 Y 位置坐标值相同, 但 Z 值不同, 则 Z 值较大的货物一定放置在 Z 值较小的货物上方, 而且可以通过 Z 坐标的数量判断堆放的层数, 以及根据货物 Z 坐标值的对比准确判断某件货物在第几层, 上面有几件货物等信息, 根据这些基本的逻辑关系和数据导入规则, 系统可以将获取的比较杂乱的货物三维位置坐标信息数据进行快速处理并自动导入数据库。

简单以货物初始堆放状态为 2 行 2 列 2 层为例, 根据本货物三维位置信息导入规则和数据库结构, 货物三维位置信息数据库如式(3)所示

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_p \\ \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Z}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p_1} & x_{p_2} & x_{p_1} & x_{p_2} & x_{p_1} & x_{p_2} & x_{p_1} & x_{p_2} \\ y_{p_1} & y_{p_1} & y_{p_2} & y_{p_2} & y_{p_1} & y_{p_1} & y_{p_2} & y_{p_2} \\ z_{p_1} & z_{p_1} & z_{p_1} & z_{p_1} & z_{p_2} & z_{p_2} & z_{p_2} & z_{p_2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

货物卸载数据库构建与起重机特殊的作业方式、起重机搬运作业场地环境条件、货物分类堆放要求等有直接的关系, 货物卸载位置信息数据库根据货物卸载顺序规则构建, 将在第 3 节详细讨论, 这里不再赘述。

起重机从 m 件货物中搬运 n 件货物到指定卸载位置的装卸作业过程中, 货物装载和卸载作业顺序分别用式(4)和式(5)表示

$$N_S = \{K_{p_1}, K_{p_2}, \dots, K_{p_n}\} \quad (4)$$

$$N_U = \{K_{u_1}, K_{u_2}, \dots, K_{u_n}\} \quad (5)$$

式中, N_S 和 N_U 分别为货物装载和卸载顺序矩阵, K_{p_1} 和 K_{u_1} 分别为第一件搬运货物的初始位置坐标及卸载位置坐标, 起重机完成 n 件货物搬运的路径用式(6)表示

$$C_R = \{K_{p_1}, K_{u_1}, K_{p_2}, K_{u_2}, \dots, K_{p_n}, K_{u_n}\} \quad (6)$$

在此基础上, 起重机完成 n 件货物搬运作业的总搬运作业距离可以用式(7)定式化表示

$$D_T = \sum_{i=1}^n d(K_{P_i}, K_{u_i}) + \sum_{i=1}^{n-1} d(K_{u_i}, K_{P_{i+1}}) \quad (7)$$

将上式作为优化目标函数, 通过优化总搬运路径的搬运作业距离, 可以获取与最短路径对应的搬运顺序结果。

3 卸载顺序规则及装载顺序求解方法

起重机在进行一定数量货物的连续装卸作业时, 为了得到起重机最短的搬运作业路径并最终获得装卸作业顺序序列指令, 需要对所有理论可选择路径的搬运距离进行计算、分析和比较, 根据计算、比较结果选择并存储搬运距离最短的装载位置或卸载位置, 依次类推, 最终完成全部货物的装载和卸载位置的计算。

起重机理论可选择路径数量随着装卸货物数量的增大而爆发性地增长, 以起重机从 m 件货物中搬运 n 件货物到指定目的卸载地点的搬运作业为例, 起重机从装载点 P_1 装载第一件货物进行搬运作业时, 由于此时所有 n 个卸载位置均为空置位, 如果没有设定任何优化约束条件, 此时, 起重机可以有 n 条理论搬运路径可以选择, 如图 7 所示, 也就是说起重机完成第一件货物的搬运作业, 可以通过 n 个不同的作业路径实现。

图 7 货物装载和卸载顺序的理论搜索方法

起重机完成第一件货物的搬运和卸载作业后, 返回货物装载位置准备进行第二件货物的搬运作业时, 除了已搬运掉的第一件货物 P_1 外, 起重机搬运作业对象物有 $(m-1)$ 件可以被选择, 也就是说, 起重机可以有 $(m-1)$ 条不同的路径返回到装载位置点。起重机完成将 m 件货物中的 n 件货物搬运到卸载位置的全部作业, 理论上总路径数量有 $\sum_{i=1}^n i + \sum_{i=1}^{n-1} (m-i)$ 条。

以起重机从 2 万件货物中连续搬运 1 万件货物为例, 计算得到的起重机理论总路径数量超过 1.5 亿条, 而根据第 2 节起重机搬运作业环境和货物状态的定义, 起重机完成 1 件货物的搬运作业, 其路径数为 2 条, 因此, 起重机完成 1 万件计划数量货物的搬运作业, 实际作业路径数量只有 2 万条。从 1.5 亿条起重机理论可选择路径中优化出 2 万条起重机实际可执行的路径, 并自动获得与作业路径相对应的装卸作业顺序, 需要庞大的计算量。随着起重机连续搬运货物数量的增加, 起重机理论路径数量会快速增多, 计算工作量也会进一步增大, 为此必须大幅度缩小起重机搬运作业时搬运货物的搜索范围。

此外, 起重机在进行货物的卸载作业时, 有基本的操作工艺要求, 以图 8 所示的卸载作业为例, 批量货物初始堆放位置位于接近空间三维坐标原点的位置区域, 起重机从该批货物中搬运 6 件货物到指定的目的卸载区域, 6 件货物的卸载位置状态如图 8 所示。按照图 8 所示的卸载位置和卸载状态, 起重机搬运图 8 所示的第一件货物到卸载区准备卸载时, 理论最短路径卸货位置应该是图 8 所示的 6 号位, 但实际上在 1~5 号卸货位货物尚未到位前, 货物无法在 6 号位卸载。因此, 需要结合起重机实际装卸作业工艺和搬运作业流程要求修正理论搜索方法, 最终获得起重机在实际搬运作业中可执行的装卸作业顺序指令。

图 8 起重机卸载作业工艺和搬运作业流程

3.1 货物卸载顺序规则和卸载位置数据库构建

起重机根据搬运作业工艺和作业计划要求进行批量货物连续装卸作业时, 会得到明确的货物卸载指令, 该卸载指令根据货物种类和搬运工艺不同一般分为指定卸载货位和指定卸载区域两种。指定卸载货位就是给出每件货物的卸载位置, 在货物大小和规格不同情况下常采用指定货位的方式, 司机或自动化作业起重机按照该卸载指令将每件货物搬运并卸载到指定货位。指定卸载区域就是给定一个卸

载区域, 司机根据经验安排卸载顺序并连续将计划数量的货物搬运并卸载到给定卸载区域。

在接受到上述第二种卸载作业指令情况下, 司机通常遵循一定的基本规则进行货物的搬运和卸载作业, 如图 9 所示。货物的卸载状态为多层时, 先将货物卸载在最下一层, 随后一层一层依次卸载。货物的卸载状态只有一层的情况下, 首先将货物卸载在离货物初始位置最远的卸载位置, 随后依次从远到近的卸货顺序完成其他货物的搬运作业。也就是说, 司机在货物装卸作业时遵从先卸载的货物不会影响后续装卸作业的基本原则。

图 9 货物的搬运和卸载作业

智能起重机作业需要根据指定的货物卸载指令自动获得货物连续卸载顺序指令。在指定卸载货位指令情况下, 由于每件货物以及该货物的卸货位置均被指定, 货物卸载指令可以直接转化为连续卸载顺序指令, 系统顺序执行该指令可以实现计划数量货物的连续搬运作业。在指定卸载区域情况下, 要自动获得货物连续卸载顺序指令, 必须制定并给定不同卸载区域的卸载规则, 这些卸载规则需要具备三个基本条件, 其一是规则的实用性, 根据该规则获得的卸载顺序指令可完全实用化; 其二是规则的完整性, 能基本覆盖不同的卸货区域; 其三是便于自动识别, 系统可以根据规则自动生成卸载顺序指令。为此, 本研究提出了起重机货物卸载顺序规则及自动生成方法, 该规则和方法建立在熟练司机经验的卸载顺序判断和卸载作业基础上, 定义并构建了以货物初始堆积状态为中心的 8 个卸载区域, 如图 10 所示, 全面覆盖了不同的卸货区域, 各卸货区域货物卸载顺序规则说明如下。

卸载区域为图 10 所示的 1~3 和 6~8 卸货区域时, 卸载顺序从离货物的初始堆放位置最远的卸货位置开始, 按照图 10 所示的先序号 1 而后序号 2 的顺序完成货物卸载。首先卸载到第 1 层 τ_u 行(第 6、7、8 区域为第 1 行)的 λ_u 个卸货位, 其次卸载到第 1 层 τ_u-1 行(第 6、7、8 区域为第 2 行)的 λ_u 个卸货位,

以此类推完成第 1 层卸货位卸载。最后采用与第 1 层相同的卸载规则完成第 2 层到第 ε_u 层卸货位的全部货物的卸载作业。

图 10 卸载区域定义和各区域卸载顺序规则

卸载区域为图 10 所示的第 4 或第 5 区域时, 卸货顺序从离货物的初始堆放位置最远的卸货位置开始, 按照图 10 所示的先序号 1 而后序号 2 的顺序完成货物卸载。首先卸载到第 1 层第 1 列(第 5 区域为 λ_u 列)的 τ_u 个卸货位, 其次卸载到第 1 层第 2 列(第 5 区域为第 λ_u-1 列)的 τ_u 个卸货位, 以此类推完成第 1 层卸货位卸载。最后采用与第 1 层相同的卸载规则完成第 2 层到第 ε_u 层卸货位的全部货物的卸载作业。

构建货物卸载位置信息数据库是实现货物卸载顺序指令自动生成的关键, 该数据库结构主要依据上述卸载顺序规则构建。

以图 10 所示的第 1 卸载区域为例, 其卸载位置信息数据库结构如式(8)所示

$$\begin{pmatrix} X_{uc} \\ Y_{uc} \\ Z_{uc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{u1} & \cdots & X_{u\tau_u} & \cdots & X_{u\tau_u} & \cdots & X_{u\tau_u} \\ y_{u_{\tau_u}} & \cdots & y_{u_1} & \cdots & y_{u_{\tau_u}} & \cdots & y_{u_1} \\ z_{u_1} & \cdots & z_{u_1} & \cdots & z_{u_{\tau_u}} & \cdots & z_{u_{\tau_u}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, X_{uc} 、 Y_{uc} 、 Z_{uc} 分别是货物在 X、Y、Z 方向的卸载位置坐标数据库矩阵, $X_{u1} = [x_{u1} \ x_{u1} + \zeta_{ux} \ \cdots \ x_{u1} + \zeta_{ux}(\lambda_u - 1)]$, $y_{u_{\tau_u}} = y_{u1} + \zeta_{uy}(\tau_u - 1)$, $z_{u_{\tau_u}} = z_{u1} + \zeta_{uz}(\varepsilon_u - 1)$, (x_{u1}, y_{u1}, z_{u1}) 为从三维坐标原点起最近的货物卸载位置坐标, λ_u 、 τ_u 、 ε_u 分别为货物卸载位置的列、行、层数, ζ_{ux} 、 ζ_{uy} 、 ζ_{uz} 分别为货物卸货位置的列、行、层间隔距离, $\lambda_u \tau_u \varepsilon_u = n$ 。

式(8)所示的数据库有 n 列数据, 第 1 列到第 n 列每 1 列的 3 行数据分别是根据规则获得的卸货顺序中第 1 号卸货位到第 n 号卸货位的三维位置坐标。

积状态为多层情况下, 货物装载顺序搜索范围被限制在放置于最上层的货物, 在第 3 节中所构建的货物位置信息数据库其数据结构可以根据货物 Z 坐标值的大小自动筛选出放置于最上层的货物, 并且根据数据库中货物 Z 值的比较可以自动识别货物的堆积状态为单层或多层, 有效实现起重机货物装卸顺序优化和自动生成。起重机货物装卸顺序搜索和自动生成方法和流程框图见图 14。

图 13 货物搬运顺序搜寻范围限定条件

图 14 起重机装载顺序搜索和自动生成框图

式(10)所示数据库所包含的数据结构和信息将被自动导入本研究开发完成的起重机三维数字化仿真分析平台, 该仿真分析平台可以对起重机作业环境, 起重机起升高度、大小车运行距离、各机构运行速度等起重机主要性能参数, 货物初始堆积状态, 货物数量、货物卸载区域及货物卸载状态进行设定

并开展起重机搬运作业仿真分析试验研究。起重机货物装卸顺序优化和自动生成技术是构成起重机智能控制系统中任务规划子系统的核心模块, 在实际应用中任务规划子系统具有预测、完善与修正补偿功能, 结合起重机控制系统中监控模块的作业误差分析等功能, 可以实现智能起重机大批量货物的连续高效搬运作业。

4 搬运作业仿真和货物装卸顺序验证

采用本文提出的起重机货物装卸顺序优化和自动生成技术, 在起重机三维仿真分析平台上进行了仿真试验。为了充分验证本方法的有效性, 本仿真试验在起重机主要性能参数设定中将常规起重机产品通用技术参数进行了适当增减和调整。

本试验完成了三种有代表性的货物初始堆积状态和不同卸载区域的起重机搬运作业仿真和搬运顺序验证。起重机三种搬运作业状态分别为货物初始堆积状态规则, 起重机卸载区域为图 10 所示的第 6 卸载区域; 货物初始堆积状态为不规则, 起重机卸载区域为图 10 所示的第 3 卸载区域; 货物初始堆积状态为不规则, 起重机进行定点卸载并且卸载区域为图 10 所示的第 3 卸载区域。

图 15 是货物初始堆积状态规则, 卸载区域为图 10 所示的第 6 区的作业场地, 货物初始堆积状态为 5 行 5 列 5 层, 共计 125 件, 离三维坐标原点最近的货物三维位置坐标为 (19 m, 24 m, 1.5 m)。根据设定的作业计划, 起重机将从 125 件货物中搬运 90 件货物到如图所示的卸载区域, 货物的卸货堆积状态要求为 5 列 3 行 6 层, 离三维坐标原点最近的卸货点位置坐标为 (6 m, 4 m, 1.5 m)。起重机搬运作业仿真和验证分析结果见图 16 和图 17。

图 15 货物状态规则卸载区域为 6 区的作业场地

图 16 显示起重机连续、自动完成 90 件货物搬运作业的全过程结果, 起重机完成 90 件货物搬运作业的全部搬运顺序及路径数见图 16 和图 17, 实线

显示起重机装载货物从初始堆积位置搬运到卸载位置并完成卸货的作业路径, 虚线显示起重机完成卸货返回到装载位置的装卸作业的路径, No.1 所示的是起重机搬运第一件货物时的作业路径。

图 16 货物状态规则卸载区域为 6 区的仿真结果 1

图 17 货物状态规则卸载区域为 6 区的仿真结果 2

图 18 显示的是货物的初始堆积状态不规则、卸载区域为图 10 所示的第 3 卸载区域的起重机搬运作业现场。36 件货物不规则地放置在图 18 所示的初始货物堆放区, 根据设定的作业计划, 起重机将连续、自动将这 36 件货物搬运到图 18 所示的卸货区域, 离三维坐标原点最近的卸货点位置坐标为(24 m, 29 m, 1.5 m), 36 件货物的卸货状态为 3 行 3 列 4 层。起重机完成 36 件货物搬运作业的全部搬运顺序、搬运路径数以及试验结果如图 19 所示。

图 18 货物状态不规则卸载区域为 3 区的作业场合

图 19 货物状态不规则卸载区域为 3 区的仿真结果

图 3 所示的是货物初始堆积状态为不规则, 起重机进行定点卸载, 卸载区域为图 10 所示的第 3 卸载区域的起重机搬运作业现场, 货物总数量为 130 件, 初始堆积状态如图 3 所示, 货物卸载位置坐标为(27 m, 32 m, 5.5 m), 根据设定的作业计划, 起重机将连续完成 130 件货物的搬运作业, 起重机进行定点搬运作业的仿真试验结果如图 20 所示。

图 20 起重机进行定点卸载作业的仿真结果

通过三种有代表性的工程作业案例的仿真试验和对比分析, 本文提出的起重机货物装卸顺序优化和自动生成技术的有效性得到了验证。同时比较货物初始堆积状态为不规则和规则两种场合的仿真分析结果后发现, 货物初始堆积为不规则状态下, 起重机搬运作业现场复杂, 为了避免搬运作业过程中搬运货物与其他货物不发生干涉和碰撞等问题, 与初始堆放状态为规则的工程作业案例相比较, 数据库构建、搜索求解和装卸顺序自动生成难度大。通过不同工程作业案例的仿真试验也进一步验证了本研究在起重机不同作业环境下的适用性。

5 结论

本文以实现起重机自动化、智能化作业为目标, 提出了起重机装卸作业过程中货物装载和卸载顺序优化和自动生成技术, 通过起重机多工况和多作业条件的装卸作业仿真试验, 验证了提出方法的有效性。

提出的起重机装卸作业过程中货物装载和卸载顺序生成规则、求解方法和操作指令自动生成技术充分考虑了起重机实际操作经验和规律, 因此具有实用价值, 此外本方法根据起重机实际作业要求, 限定了最短距离计算中搜索对象货物的数量, 提出了新的搜索和优化计算方法, 大幅度减少了系统计算次数和计算时间, 确保了系统更顺畅运行。

除了港口集装箱起重机外, 本研究提出的货物三维位置信息数据库构建、起重机货物装卸顺序优化和自动生成技术也适用于自动化立体仓库中巷道堆垛起重机等具有自动化、智能化作业基础的起重机产品。

参 考 文 献

- [1] CHEN L, BOSTEL N, DEJAX P, et al. A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 181(1): 40-58.
- [2] UNSAL O, OGUZ C. Constraint programming approach to quay crane scheduling problem[J]. *Transportation Research Part E*, 2013, 59: 108-122.
- [3] CHEN J H, LI D H, GOH M. An effective mathematical formulation for the unidirectional cluster-based quay crane scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 232(1): 198-208.
- [4] 梁承姬, 沈佳杰. 考虑装卸顺序的岸桥与集卡协调调度问题研究[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(12): 3591-3595.
LIANG Chengji, SHEN Jiajie. Study on problem of quay cranes and container trucks scheduling with consideration of handling order[J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(12): 3591-3595.
- [5] 秦天保, 葛浩, 沙梅. 约束规划求解集装箱装卸系统集成调度问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(8): 2127-2136.
QIN Tianbao, GE Hao, SHA Mei. Constraint programming for the integrated scheduling problem of container handling systems in container terminals[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2015, 35(8): 2127-2136.
- [6] 张睿, 靳志宏, 邢曦文, 等. 同贝同步模式下的集装箱装卸作业调度优化[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(6): 833-844.
ZHANG Rui, JIN Zhihong, XING Xiwen, et al. Optimization of container scheduling on integrated loading and unloading operations in same ship-bay[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(6): 833-844.
- [7] 梁亮, 陆志强. 集装箱码头装卸系统集成调度的建模与优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(3): 476-483.
LIANG Liang, LU Zhiqiang. Modeling and optimization of the integrated scheduling problem of container handling system[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2010, 30(3): 476-483.
- [8] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集成调度模型与混合优化算法[J]. *系统工程学报*, 2010, 25(2): 264-270.
ZENG Qingcheng, YANG Zhongzhen. Integrating scheduling model and hybrid optimization algorithm for container terminals[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(2): 264-270.
- [9] 张文霞. 遗传算法在港口集装箱装卸顺序中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(1A): 144-146.
ZHANG Wenxia. Genetic algorithm in the application of the port container loading and unloading of the order[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(1A): 144-146.
- [10] 张维英, 林焰, 纪卓尚, 等. 出口集装箱堆场取箱作业优化模型研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 30(2): 314-317.
ZHANG Weiying, LIN Yan, JI Zhuoshang, et al. Optimization model of containers loading operation in export containers terminal[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 30(2): 314-317.
- [11] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 109-115.
JIA Qingxuan, CHEN Gang, SUN Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13): 109-115.
- [12] 史也, 梁斌, 王学谦, 等. 基于量子粒子群优化算法的空间机器人非完整笛卡尔路径规划[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(23): 65-73.
SHI Ye, LIANG Bin, WANG Xueqian, et al. Cartesian non-holonomic path planning of space robot based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(23): 65-73.
- [13] 汪首坤, 郭俊杰, 王军政, 等. 基于混合群智能优化的机器人立体视觉标定[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(1): 57-63.
WANG Shoukun, GUO Junjie, WANG Junzheng, et al.

- Robot stereo vision calibration based on hybrid swarm intelligent optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 57-63.
- [14] 季旭全, 王君臣, 赵江地, 等. 基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 63-72.
- JI Xuquan, WANG Junchen, ZHAO Jiangdi, et al. Intemgent robotic assembly method of spaceborne equipment based on visual guidance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 63-72.
- [15] 李运华, 何刘宇, 杨丽曼. 非完整约束多轴驱动车辆的路径跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 33-41.
- LI Yunhua, HE Liuyu, YANG Liman. Path-following control of nonholonomic constraint multi-axle drive vbhicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 33-41.
- [16] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 136-144.
- WANG Yi, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Design of intelligent and connected vehicle path tracking controller based on model predictive control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 136-144.
- [17] 牛礼民, 杨洪源, 周亚洲, 等. 混合动力汽车动力总成多智能体集成控制策略[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 168-188.
- NIU Limin, YANG Hongyuan, ZHOU Yazhou, et al. Hybrid electric vehicle integrated control strategy based on multi-agent[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 168-188.
- [18] 张永祥, 刘心, 褚志刚, 等. 基于随机子空间法的模态参数自动提取[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 187-194.
- ZHANG Yongxiang, LIU Xin, CHU Zhigang, et al. Autonomous modal parameter extraction based on stochastic subspace identification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 187-194.
- [19] 马江涛, 刘检华, 徐联杰, 等. 基于 LTL-PRM 算法的分支管路自动布局方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 160-170.
- MA Jiangtao, LIU Jianhua, XU Lianjie, et al. Method of automatic branch-pipe routing based LTL-PRM algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 160-170.

作者简介: 李国杰, 男, 1963 年出生, 教授。主要研究方向为起重运输机械及智能化。

E-mail: ligjsh021@126.com

丁晓红, 女, 1965 年出生, 教授。主要研究方向为机械优化设计。

E-mail: dingxhsh021@126.com