 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i6.10786

Design of an AGV Mixed Task Scheduling System for Tobacco Flavor Kitchen Based on Dynamic Auction Mechanism

Wanchuan Zhang Chengshun Sun Jia Liang

Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd. Qujing Cigarette Factory, Qujing, Yunnan, 655001, China

Abstract

In the tobacco industry's spice kitchen, the complexity of AGV scheduling arises from various types of mixing ports, multiple application points, multiple moving tank resources, and the mismatch between batch production rhythm and the scheduling. This paper takes an actual spice kitchen project as the research object and proposes a hybrid task scheduling algorithm based on a dynamic auction mechanism. This algorithm comprehensively considers multiple types of tasks such as empty tank delivery, full tank transfer, temporary material utilization, cleaning reflux, and charging maintenance, and aims to minimize the total task delay and equipment idle rate. By constructing a two-way auction model of tasks, vehicles, and resources, and introducing task urgency and path cost as the weight of the bidding value, the distributed collaborative scheduling of multiple AGVs is achieved. Simulation results show that compared with traditional FCFS and distributed fixed area scheduling algorithms, this algorithm significantly improves the average task waiting time, AGV utilization rate, and system robustness, meeting the production rhythm requirements.

Keywords

AGV scheduling; dynamic auction; mixed tasks

基于动态拍卖机制的烟草香料厨房 AGV 混合任务调度系统设计

张万全 孙成顺 梁嘉

红云红河烟草（集团）有限责任公司曲靖卷烟厂，中国 · 云南 曲靖 655001

摘 要

针对烟草行业香料厨房中多类型配制口、多施加点、多移动罐资源以及批次生产节奏不匹配导致的AGV调度复杂性，本文以某实际香料厨房项目为研究对象，提出了一种基于动态拍卖机制的混合任务调度算法。该算法综合考虑了空罐配送、满罐转运、暂存料利用、清洗回流及充电维护等多类任务，并以最小化任务总延迟与设备空驶率为目标。通过构建任务-车辆-资源的双向拍卖模型，引入任务紧迫度与路径代价作为竞拍值权重，实现了多AGV的分布式协同调度。仿真结果表明，该算法相较于传统FCFS与分布式固定区域调度算法，在任务平均等待时间、AGV利用率及系统鲁棒性方面均有显著提升，满足了生产节拍要求。

关键词

AGV调度；动态拍卖；混合任务

1 引言

在烟草制丝生产过程中，香料厨房负责为叶片、梗丝、叶丝等物料配制糖料、香精，并通过移动罐转运至生产线各施加点。随着多品种、小批量生产模式的普及，人工转运已难以满足精度与时效要求。自动导引运输车（AGV）因其柔性高、路径可控等优势成为主流选择。然而，传统传统的集中式调度或分布式固定区域调度的 AGV 系统在应对多品类、多批次、多工艺节点且存在交班料暂存的复杂异步生产节奏时，常出现响应迟滞、资源利用不均等问题。动态拍卖算法作为一种市场机制驱动的分布式调度方法，能够实时响应任务生成与 AGV 状态变化，特别适用于本场景中的混合任务（配送、暂存、清洗、充电）协同调度。本文在建立香料厨房 AGV 调度的数学模型基础上，设计了一套基于动态拍卖的混合任务调度算法，包括拍卖启动条件、竞拍计算、胜拍决策与冲突消解等，可实现多 AGV 在复杂约束下的高效、柔性、协同作业。

2 香料厨房 AGV 调度问题建模

2.1 系统物理布局与资源约束

香料厨房内设有：

配制 / 灌装口：15 个叶片糖料配制口、2 个生物质糖

【作者简介】张万全（1971–），男，中国云南曲靖人，硕士，工程师，从事烟草设备及电气控制研究。

料配制口、2 个梗丝糖料配制口、3 个香精罐装口。

施加点：4 个叶片糖料点（每批次需 2 移动罐）、1 个生梗丝糖料点（1 罐）、2 个叶丝香精点（1 罐 / 点）、1 个熟梗丝香精点（1 罐）。

移动罐资源：18 个糖料罐、12 个香精罐、6 个梗糖料罐，均需按编号定位存放。

距离参数：空罐到灌装点 6m；到叶片施加点 70m；到梗丝施加点 100m；到香精施加点 120m。

生产节拍：叶片 / 叶丝为 1.5h/ 批；生 / 熟梗丝为 1h/ 批。

清洗时间：一个清洗点，300 秒 / 罐。

AGV 参数：4 台，速度 0.8m/s；2 个厨房内暂停位；2 个车间内充电位（距暂停位 50m）。

2.2 任务类型定义

系统中共有 6 类任务，每类任务包含子步骤：

任务类型	起点	终点	触发条件	所需罐状态
T1 空罐配送	存储点 / 清洗点	配制口 / 灌装口	配制 / 灌装口空闲且罐可用	空罐、已清洗
T2 满罐转运	配制 / 灌装口	施加点 / 交班暂存点	配制 / 灌装完成	满罐
T3 交班料利用	交班暂存点	施加点	班次开始	满罐（上一班）
T4 空罐回送	施加点	清洗点	施加完成倒空	空罐
T5 清洗后归位	清洗点	存储点	清洗完成	空罐、干净
T6 充电 / 暂停	当前位置	充电位 / 暂停位	电量 <20% 或空闲超时	无罐

2.3 优化目标与约束条件

目标函数（最小化加权和）：

$$\min \sum_{i=1}^{N} (w_1 \cdot D_i + w_2 \cdot W_i + w_3 \cdot U_i)$$

其中 D_i 为任务 i 的延迟时间（相对于生产计划要求的送达时间），W_i 为 AGV 空驶距离，U_i 为罐闲置率惩罚。权重 w_1=0.6, w_2=0.3, w_3=0.1。

系统运行需遵循严格的物理约束：各配制点与灌装点均为独占式作业，同一时刻仅能容纳单个移动罐；施加点工艺需求呈差异化，叶片线需双罐供应，其余点位为单罐供应；受载具限制，单台 AGV 单次仅可转运一罐物料；清洗站为串行单工位，无法并行作业；车间配备的 2 个充电位仅作能源补给之用， AGV 不能将其作为临时停靠点，以避免阻塞交通流。

3 基于动态拍卖混合任务的 AGV 转运调度算法设计

3.1 算法设计思路

本算法设计思路模拟拍卖市场中的拍卖过程。香料厨房管理系统分配糖香料及空罐等转运任务（包含起点、终点、期望完成时间、优先级）视为拍卖品；调度任务管理相当于拍卖师，每当有新的转运任务启动新一轮拍卖；所有空闲或即将完成当前任务的 AGV 小车视为竞拍人员；AGV 完成该任务的延迟时间、所需路径长度及各转运任务优先级的加权和作为竞拍值。

3.2 竞拍值计算模型

AGV j 对任务 k 的竞拍值 计算公式为：

$$B_{j,k}=\alpha \cdot \frac{T_{j,k}^{tral}}{T_{\max}^{tral}}+\beta \cdot \frac{T_{k}^{urgen}}{T_{\max}^{urgen}}+\gamma \cdot C_{j,k}^{conflict}$$

式中：

$T_{j,k}^{tral}$：行驶时间代价，即 AGV 从当前位置出发，经取货点抵达任务终点的总行程耗时（距离与速度之比）；

T_{k}^{urgen}：任务紧迫度，依据“（当前时间 - 生成时间）/（最晚开始时间 - 生成时间）”的比值动态演化，一旦比值突破 1（即任务超时），系统将激活惩罚机制；$C_{j,k}^{conflict}$：冲突规避因子，当目标点位（如灌装口）已被其他 AGV 预约占用时，该因子置 1，否则为 0，以此强制避开时空冲突。

α，β，γ：权重系数，分别取 0.4, 0.5, 0.1。可通过实际转运情况调整优化。例如，在从香料厨房到车间走廊为防拥堵，可增大 α，在每班次接班高峰期为保证时效，可增大 β。

$T_{\max}^{tral}$ 取所有 AGV 到该任务的最大可能时间（如最大距离 200m/0.8=250s）。$T_{\max}^{urgen}$ 取任务最大允许延迟（如批次间隔 10min 内）。

3.3 拍卖流程与冲突消解

第一步，任务发布：当生产计划触发任务（如“梗糖料配制完成”），或存储点、清洗点状态发生变化，调度任务管理器生成任务条目，并计算紧迫度，若紧迫度 >0.8 则进入全局紧急拍卖，否则进入常规拍卖；第二步，竞拍值收集：向符合条件的 AGV 广播任务信息，AGV 根据自身状态（位置、电量、当前任务剩余时间）计算竞拍值，在 2 秒内返回；第三步，胜拍决策：选择竞拍值最小的 AGV 中标。若多个任务同时拍卖，采用并行拍卖顺序优化：按任务紧迫度降序依次确定竞拍者，已拍到标的 AGV 不再参与后续任务拍卖，避免资源过载；第四步，任务执行与反馈：AGV 执行任务，实时上报位置与预计完成时间。若执行中发生阻塞（如清洗点满），则触发重拍卖。

冲突消解，交叉路径冲突：几辆 AGV 运行路径交叉时，让优先让高紧迫任务 AGV 通过；任务冲突：（如 1 号 AGV 等 2 号 AGV 释放糖料灌装位）：设置超时检测（60 秒），超时后 1 号 AGV 临时避让至暂停位。

3.4 任务优先级动态控制策略

由于叶片 / 叶丝每批次生产时间 1.5h，梗丝生产 1h，

需确保梗丝糖香料任务不被叶片糖香料任务阻塞。引入优先级动态提升因子：

$$P_k(t)=P_k^0+\lambda\cdot\frac{t-t_{gen}}{T_{batch}}$$

其中P_k^0为初始优先级（梗丝类任务 > 叶片类），λ 为增长系数（0.1/min），T_{batch}为对应批次间隔。设定更新一次优先级的时间，如 4 分钟，并重新计算紧迫度，触发必要时的重新进行拍卖。

3.5 交班场景下的调度策略

系统于每班次开机时，依据全局路径规划一次性生成覆盖交班暂存点至施加点的T3类任务集，并启用批量拍卖下发。该策略允许单台AGV在一次竞拍中承接最多两个相邻任务，通过任务层面的捆绑压缩空驶行程，缓解设备往返频次。

当班次剩余时间不足 1 小时，新配制完成的满罐糖料不再直送工位，转而优先存入交班暂存点。拍卖模型同步引入权重系数 w_{shift}=0.3 ，强制抬升此类任务的竞拍优先级，确保物料平滑过渡至下一班次。

4 系统架构与实现

4.1 软硬件构成

系统采用分层架构，硬件配置与功能如下，AGV 设备：部署 4 台激光导航 AGV，额定载荷 1000 kg，单机续航约 6 小时，满充周期为 1 小时；调度服务器：基于 Windows Server 构建拍卖调度内核，通过 OPC 协议与 MES 系统实现实时数据握手；现场终端：在配制口、施加点及清洗站布设 RFID 读写节点，负责罐体身份识别与状态实时映射；任务数据库：采用 SQL Server 存储任务日志、AGV 运行状态及罐体位姿编码，支撑调度决策。

4.2 任务触发与状态建模

调度系统以车间 MES 下发的批次进度（如“叶片批次 #2026042006 剩余 30 分钟”）为驱动源，每 10 秒刷新一次任务队列，具体分为三类触发逻辑：预触发：预估施加点需求前 40 分钟生成空罐配送任务；即时触发：接收配制口“灌装完成”信号后，即刻生成满罐运输任务； 周期触发：每 2 小时依据电量预测模型，插入充电任务。

移动罐与 AGV 均抽象为有限状态机，涵盖空闲、运行、待清洗、充电及故障等状态。任一状态发生跃迁，即作为事件源驱动拍卖模型重算最优分配方案。

5 仿真验证与性能评估

5.1 仿真环境构建

基于 Plant Simulation 搭建虚拟车间，参数全量复现工厂实景：运输距离 6–120 m，AGV 速度 0.8 m/s；叶片 / 叶丝与梗丝批次并行，节拍分别为 90 min 与 60 min；配制时长介于 20–35 min/ 罐；清洗站设为单工位，单次作业 300 s；初始状态下，4 台 AGV 分布于厨房暂停区、存储区及充电桩（电量 80%）。

选取三种策略对照：1）FCFS（集中式先到先服务）；2）FZA（固定区域分布式调度）；3）动态拍卖（本文方法）。

仿真跨度覆盖完整 6 小时班次及一次交班过程。

5.2 评价指标

平均等待时长：任务生成至 AGV 响应的时差；生产延误率：施加点超时（>5 min）批次占比；AGV 利用率：有效运输时长与可用时长的比值；空驶率：空载里程在总里程中的占比。

5.3 结果分析

算法	平均等待时间 (s)	生产延误率	AGV 利用率	空驶率
FCFS	187	22.50%	68%	41%
FZA	112	9.20%	74%	33%
动态拍卖（本文）	78	3.10%	81%	27%

数据表明，相较 FZA，动态拍卖将等待时间压缩了 30%。这主要得益于紧急任务的优先级提升插队机制与交班批量处理。延误率降至 3.1%，空驶率优化至 27%。其核心机理在于，拍卖机制引导 AGV 在返程中主动抓取“清洗归位”任务，显著削减了无效里程。

5.4 鲁棒性测试

模拟单台 AGV 突发故障，系统随即收缩其余 3 台设备的拍卖作用域（半径缩减 20%），优先保高优任务。实测显示生产线节拍未受扰动，验证了算法的容错能力。

5.5 交班专项分析

进入班次尾声 1 小时，系统切换至 “暂存料优先” 模式。仿真中 8 个暂存罐（叶片 4、梗丝 1、香精 3）在下一班次开工 15 分钟内全部清空，首批量产无缝衔接。反观无拍卖机制的传统模式，交班物料平均滞留 25 分钟，供料断档风险显著。

6 结论与展望

针对烟草制丝车间香料厨房多点配制、多施加站及多罐协同的复杂作业环境，本文提出一种基于动态拍卖机制的 AGV 调度方法。通过构建任务与 AGV 的双向竞拍模型，并融合紧迫度与冲突成本因子，实现了混合任务的实时调度优化。仿真结果表明，该方法在缩短任务等待时间、降低生产延误率及增强系统鲁棒性方面均表现出显著优势。

后续研究可引入强化学习框架，对拍卖权重系数（α、β、γ）进行自适应整定，以增强系统在季节性生产波动及多品种切换场景下的适应能力。

参考文献

[1] 殷学勤. 基于 AGV 的液压泵装配车间物料配送系统设计与开发[D]. 南京:南京理工大学,2022.

[2] 马立坤 ,龚艳茹 ,冯爱兰等. 面向智能制造车间的 AGV 物流调度管理系统的设计[J]. 物流科技, 2025, 17-0060-03: 60-62.

[3] 烟草行业物流标准 YC/T 554-2021. 制丝线移动罐自动导引车调度规范.