

9-18-2020

Review on AGV Scheduling Optimization

Jianlin Fu

1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Hengzhi Zhang

2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

Zhang Jian

1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Liangkui Jiang

2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Review on AGV Scheduling Optimization

Abstract

Abstract: AGV scheduling plays an important role in improving the efficiency and reducing manufacturing cost, but it is also a very complex combinatorial optimization procedure. *AGV scheduling optimization is divided into three types, AGV static scheduling, AGV dynamic scheduling and AGV simultaneous scheduling with other resources scheduling.* Various methods are summarized and listed, including *traditional analysis method, modeling and simulation method, intelligent optimization algorithm and hybrid optimization method, and the advantages and disadvantages of each method are also analyzed.* The deficiencies of AGV scheduling research are pointed out and the research directions for future are presented.

Keywords

AGV, scheduling, dynamic scheduling, simultaneous scheduling, intelligent optimization

Recommended Citation

Fu Jianlin, Zhang Hengzhi, Zhang Jian, Jiang Liangkui. Review on AGV Scheduling Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1664-1675.

自动导引车调度优化研究综述

付建林¹, 张恒志², 张剑¹, 姜良奎²

(1. 西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 制造系统中自动导引车 (Automated Guided Vehicles, AGV) 调度对于提高制造系统效益和降低制造成本具有重要作用, 同时 AGV 调度也是十分复杂的组合优化问题, 将 AGV 调度优化问题分为 3 类: AGV 静态调度、AGV 动态调度、AGV 同时调度 (与其他资源联合调度) 进行了概述, 并对其研究方法进行了分析与总结, 包括传统分析方法、建模与仿真方法、智能优化算法、混合优化方法, 分析了各类方法的优缺点, 指出了当前 AGV 调度优化研究中存在的不足, 并提出了未来的研究方向和建议。

关键词: 自动导引车; 调度; 动态调度; 同时调度; 智能优化

中图分类号: TP391.9 文献标识码: B 文章编号: 1004-731X (2020) 09-1664-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0042

Review on AGV Scheduling Optimization

Fu Jianlin¹, Zhang Hengzhi², Zhang Jian¹, Jiang Liangkui²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: AGV scheduling plays an important role in improving the efficiency and reducing manufacturing cost, but it is also a very complex combinatorial optimization procedure. *AGV scheduling optimization is divided into three types, AGV static scheduling, AGV dynamic scheduling and AGV simultaneous scheduling with other resources scheduling.* Various methods are summarized and listed, including *traditional analysis method, modeling and simulation method, intelligent optimization algorithm and hybrid optimization method, and the advantages and disadvantages of each method are also analyzed.* The deficiencies of AGV scheduling research are pointed out and the research directions for future are presented.

Keywords: AGV; scheduling; dynamic scheduling; simultaneous scheduling; intelligent optimization

引言

在生产制造系统中, 多品种小批量、大规模个性化定制生产模式导致系统物流任务多、流程变化

大、动态性强、实时性高, 而自动导引车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 作为一种集成了多种先进技术的柔性智能物流装备, 其自动化、高柔性、高效率、高可靠性以及并行作业等特点能很好地满足这种物流需求, 因此越来越多的生产车间采用 AGV 进行物料运输, 以多 AGV 组成的 AGVs (Automated Guided Vehicles system) 物流系统正在成为车间物流自动化、柔性化配送的常态, 在提升制造系统效益以及降低成本方面发挥了巨大的作



收稿日期: 2019-01-24 修回日期: 2019-05-30;
基金项目: 山东省重大科技创新工程 (2017CXGC
0608-02);

作者简介: 付建林 (1978-), 男, 四川成都, 博士生, 讲师, 研究方向为生产系统建模仿真、物流优化等; 张恒志 (1981-), 男, 山东青岛, 本科, 研究方向为人机工程、虚拟现实。

<http://www.china-simulation.com>

• 1664 •

用。AGV 调度对于 AGV 能否在车间生产中高效发挥作用至关重要,正逐渐成为生产调度领域的重要热点研究问题之一,国外研究从 20 世纪 80 年代开始兴起^[1-4],国内研究要晚于国外近 30 年,尚未见相关综述性文献。本文系统地查阅了国内外 AGV 调度领域文献,并对其研究问题进行了分类,对其研究方法进行了总结,指出了现有研究存在的不足,并就如何开展后续研究给出了建议。

1 AGV 调度问题定义

制造系统中 AGV 调度问题可描述为:制造系统中存在多个物料运输任务,多个 AGV 小车,在一定的约束条件下,需要将物料运输任务合理分派给各个 AGV 小车并指定执行先后顺序,选择最优运行路径,同时进行动态情况下的实时调度来完成物料运输任务,使整个系统满足一定的性能优化指标。可见,AGV 调度问题主要解决物料运输任务在 AGV 上的分配与指派,路径规划以及运行过程中的执行时序管理,本质上属于多目标多约束的组合优化问题,具有相当的复杂性。

AGV 调度问题的一般数学模型可描述如下:

$$\begin{aligned} \min y = f(x) &= (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T \\ \text{s.t. } g_i(x) &\geq 0, i = 1, 2, \dots, l \\ h_j(x) &= 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $x = (x_1, x_1, \dots, x_n) \in X$ 为 n 维的决策矢量; X 为 n 维的决策空间; $y = (y_1, y_1, \dots, y_k) \in Y$ 为 k 维的目标矢量; Y 为 k 维的目标空间。目标函数 $f(x)$ 定义了 k 个由决策空间向目标空间映射的函数,在实际 AGV 调度中,常采用的目标性能指标一般包括:任务完成时间最短、拖期延迟最小、AGV 利用率最高、物流成本最低等单个目标或者多个优化目标,而 $g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, l$ 定义了 l 个不等式约束, $h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m$ 定义了 m 个等式约束,约束条件一般有:AGV 负载容量限制、AGV 电量有限、AGV 方向限制、运输任务顺序关系、缓冲容量限制等。

对于复杂离散制造系统,AGV 调度具有很大不确定性,受动态事件影响多,同时 AGV 调度还需要考虑与其他资源如工件、机床、工装、刀具、立体仓库、堆垛机等资源的联合同时调度问题,因此,除了静态 AGV 调度问题外,AGV 动态调度以及 AGV 联合同时调度问题的研究也越来越受重视。AGV 调度研究问题分类及特点如表 1 所示。

表 1 AGV 调度问题分类及特点

Tab. 1 Classification and characteristics of AGV scheduling problems

AGV 调度分类	AGV 调度特点	约束与目标
AGV 静态调度	针对系统某一静态时刻,解决 AGV 任务指派与排序、任务执行时序问题	优化目标包括:任务完成时间最短、AGV 利用率最高、AGV 数量最小、拖期延迟最小、物流成本最低等。约束方面:AGV 容量约束、AGV 充电约束、任务顺序约束、AGV 路径方向约束等。
AGV 动态调度	考虑动态扰动情况下(任务变更、设备故障、冲突死锁等)AGV 任务指派排序、执行时序问题	优化目标包括:完工时间最短,AGV 数量最小,搬运时间最短,AGV 最大利用率,AGV 负荷均衡、AGV 最小行走时间等。约束方面:AGV 容量约束、AGV 充电约束、任务顺序约束、AGV 路径方向约束等。
AGV 同时调度 (资源联合调度)	将 AGV 与机床、工件、工装、刀具等各类资源联合同时调度,本质上是更为复杂的 NP 叠加问题,以 AGV 与机床/工件联合同时调度居多	优化目标:完工时间最短、AGV 运行时间、拖期时间最小、拖期延迟惩罚成本、AGV 负荷均衡、最小行走时间和最大利用率、平均工件流/循环时间最小等。相关约束:机床缓冲容量、工件工序约束、AGV 容量约束、AGV 充电约束、AGV 路径方向约束等;一般为多目标优化问题,完工时间 makespan 为常用目标之一。

2 AGV 调度问题的研究方法

关于 AGV 静态调度、AGV 动态调度、AGV 同时调度问题，国内外许多学者都进行了研究，总结其研究方法主要有：传统分析方法、建模与仿真方法、智能优化方法、混合优化方法等。

2.1 传统分析方法

传统的分析方法包括数学精确求解方法、基于调度规则/策略方法、基于排队论等方法。

(1) 数学精确求解方法

将 AGV 调度问题简化为数学规划模型，采用整数规划、混合整数规划和分支界定法等来求解 AGV 调度最优化问题。Toshiyuki 等^[5]将 AGV 分派和无冲突路径规划问题描述为整数规划问题进行求解。马越汇等^[6]采用混合整数规划模型研究自动化集装箱码头在考虑交通拥堵等不确定情况下的 AGV 调度与配置问题。霍凯歌等^[7-8]将自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题描述为混合整数规划模型求解。Meersmans 等^[9]采用分支界定法与定向搜索算法求解自动化集装箱码头不同类型物料处理设备的集成调度问题。Bilge 等^[10]将柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)中 AGV 调度与机器调度二者同时考虑，将调度问题表述为一个非线性混合整数规划问题进行求解。Heger 等^[11-12]采用混合整数线性规划求解阻塞可重入作业车间的 AGV 调度问题。数学精确求解方法对 AGV 调度问题进行统一建模，能够在全局范围获得最优解，但只能解决简单小规模问题，对于复杂多变的 AGV 调度来说，存在求解空间大和计算困难等问题。

(2) 基于调度规则/策略方法

调度规则也称为优先分配规则，是一种基于启发式的规则或策略，指一个或多个优先规则的组合。Egbelu 等^[13]对作业车间中 AGV 调度的一些启发式规则进行了分类，包括最大输出队列、最短/最长旅行时间/距离、最小剩余输出队列空间、最

近/最远 AGV、最长闲置 AGV 等规则，并分析了这些规则对系统作业性能的影响。Jawahar 等^[14]将 AGV 系统的运行与生产过程结合起来进行调度，提出了一种启发式算法，使用最短(长)操作时间、最短(长)运输时间等 AGV 分派规则来处理冲突。Sabuncuoglu 等^[15]针对 FMS 中不同交货期标准，分析了 AGV 调度规则对机床工件调度的影响。Singh 等^[16]对车间高效、均匀的物料分配 AGV 调度问题，采用一种新的调度规则，并对系统的物料分配效率和均匀性进行了仿真性能评估。Kim 等^[17]将 AGV 空载路程以及工件等待时间作为调度属性指标，提出一种多属性指标加权的方法解决调度问题。管贤平等^[18]提出一种能避免死锁、权值可动态调整的多属性任务调度方法。肖海宁等^[19]针对柔性作业车间 AGV 任务调度问题，提出一种在线实时多属性任务调度方法，采用启发式调度规则来避免系统死锁。Ulusoy 等^[20]将 AGV 调度作为 FMS 整体调度的一个组成部分，分为机床调度和 AGV 调度 2 个子问题，采用迭代启发式方法结合滑动时间窗方法进行处理。

调度规则具有较低时间复杂度，易于实现，同时针对系统动态变化具有一定的及时反应能力，在实际中得到了较多应用，但它具有局部短视的局限性，其解的质量一般。

(3) 基于排队论方法

基于排队论方法将 AGV 调度问题表述为排队论模型进行求解。黄一钧^[21]建立排队论模型，以最小总成本为目标，求解 AGV 的最佳数量配置问题。金芳等^[22]针对 AGV 调度建立了 N/M/1 排队模型，采用平均队长和逗留时间作为性能指标建立调度算法。由于排队论模型需要满足其随机规则与定义，另外复杂的排队论模型求解很难，因此实际应用中非常受限。

2.2 建模与仿真方法

AGV 物流运输事件是生产制造系统中典型的离散事件，因此可用研究离散事件系统建模与仿真

的方法来研究 AGV 调度问题, 包括基于 Agent 方法、基于 Petri 网方法、基于集成仿真软件方法。

(1) 基于 Agent 方法

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)具有分布式人工智能的特点, 利用单个 Agent 的自治、自主和自决策的特点, 通过多个 Agent 的合作来获得群体智能, 可用来解决 AGV 调度优化问题, 一般采用合同网协议或改进的合同网协议作为 Agent 间的协商机制。

桑泽磊^[23]建立了基于 Agent 的车间 AGV 智能调度信息平台 and 物理平台, 采用合同网协议作为 Agent 协商机制, 能够有效地调度 AGV 并对扰动及时做出响应, 具有较好的鲁棒性和柔性。经建峰^[24]采用多智能体 MAS 技术建立了分布式多 AGV 自主控制系统, 建立了多 AGV 自主交流协商机制, 并给出了 AGV 之间的冲突消解策略。李晓萌等^[25]基于多 Agent 提出了基于多级决策和协作学习的方法来建立 AGV 调度系统中每个 AGV 所需要的动态分布式调度策略。Cenk 等^[26]针对含有柔性机床和 AGV 系统的制造系统, 建立多智能体 MAS 系统对柔性机床和 AGV 进行同时在线调度。

基于多智能体 MAS 的方法采用了“分而治之”的思想, 与其他方法相比更能体现系统实时性和动态适应性, 具有较好的鲁棒性和柔性, 具有更好的冲突消解策略, 其主要问题在于如何建立知识库, 通过多个 Agent 的有效协作来获得群体智能, 另外其标准化不够导致很多重复工作。

(2) 基于 Petri 网方法

Petri 网模型作为一种有效的图形化建模和描述工具, 能够较好地表达 AGV 调度系统各类元素的逻辑状态变迁情况。许多学者采用 Petri 网方法研究 AGV 调度问题。任小龙^[27]针对 FMS 中 AGV 与工件的同步调度问题, 建立了 Petri 网模型, 以实现 AGV 分派与路径的优化控制。李国飞^[28]提出二次变迁 Petri 网分解方法, 将复杂的 AVG 调度 Petri 网模型分解为多个独立简单的子网, 为多

个 AGV 求解不同时刻下 Petri 网变迁激活的顺序, 以获得整体最优路径问题。Nishi 等^[29]采用时间 Petri 网分解方法进行 AGV 调度与无冲突路径规划。Petri 网方法能够表述复杂 AGV 调度系统的异步并发状态信息, 具有较好的动态性和实时性。但其本身优化功能较弱, 因此一般结合调度规则、Agent 方法和搜索算法等优化方法使用。如 Giglio 等^[30]将多 Agent 系统与 Petri 网集成在一起对 AGV 进行管理, 将 AGV、路径以及车间中的资源之间的相互关系和行为通过 Petri 网来描述, 而用 Agent 来处理决策行为。Yim 等^[31]针对 FMS 建立基于 Petri 网模型, 将 Petri 网模型与 AGV 分派器集成起来控制 AGV, 采用模拟方法研究不同 AGV 分派规则对 FMS 运行的影响。Olatunde 等^[32]采用时间有色 Petri 网(Timed Coloured Petri Net, TCPN)和混合启发式搜索方法求解机床和 AGV 同时调度问题。

(3) 基于集成仿真软件方法

基于离散事件建模与仿真实理论建立的集成式仿真软件能最真实地模拟系统随时间变化的过程和状态, 可以用来对 AGV 调度过程进行模拟进而寻找解决方法。柯冉绚等^[33]基于 Netlog 软件针对自动化集装箱码头建模并进行仿真模拟获得车道数、岸桥与 AGV 的最佳配比。李军涛等^[34]运用仿真分析对不同调度规则下的交叉环单向循环搬运系统 AGV 搬运效率进行了对比, 得出较优的调度规则。杨武平^[35]针对模具智能车间公共缓存区单 AGV 调度问题, 采用 Plant-Simulation 研究调度策略和工件派工规则的组合策略优化问题。韩晓龙^[36]针对自动化集装箱港口 AGV 的调度策略和数量配置问题采用 em-plant 建立仿真模型进行分析。Mousavi 等^[37-38]针对多目标 AGV 调度问题, 对求解结果采用 Flexsim 仿真软件进行验证。Viharos 等^[39]采用离散事件仿真方法对机器人装配系统中每台工作站的装配工序和 AGV 进行调度控制, 使总的制造时间最短。

集成仿真软件可针对 AGV 调度问题建立最接近真实情况的仿真环境, 并反复进行试验, 但仿真准确性受人员能力和技能的限制, 很难从特定的仿真试验中提取一般性规律, 其本身优化功能较弱, 一般应该结合其他优化方法如基于规则/策略的方法、智能优化算法等使用。

2.3 智能优化算法

智能优化算法能解决其他方法难以求解的复杂组合优化问题, 因而广泛应用于生产调度优化方面, AGV 调度中用到的智能优化方法包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、差分进化算法(Differential Evolution, DE)、蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)等。

(1) 遗传算法

遗传算法模拟生物进化过程与机制来求解问题, 已被证明在生产调度方面十分有效, 在 AGV 调度问题中智能优化算法也以遗传算法应用最多, 其具有较强的全局搜索能力但也有易出现早熟和陷入局部最优解的问题, 一般需要对遗传算法进行改进或结合其他优化方法使用, 如非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)、随机密钥遗传算法(Random Key-based Genetic Algorithm, RKGA)、改进微遗传算法、小生境遗传算法等。

朱琳等^[40]以搬运时间最短为目标建立数学模型, 提出了一种改进的遗传算法进行 AGV 任务分配和任务排序优化。刘旭^[41]采用改进的遗传算法求解混流作业车间中物料配送多 AGV 多任务的调度问题。汪先超^[42]采用改进微遗传算法在综合考虑运行时间、停车次数、转弯次数的情况下解决多 AGV 系统的静态车间调度问题, 并提出方案分别求解车间无故障、车间路段故障、车间节点故障三种车间实时调度问题。Lin 等^[43]采用 RKGA 算法解决 FMS 中 AGV 分派调度问题。

由于遗传算法在求解 AGV 调度问题上的有效

性, 一些学者利用它来解决更复杂的 AGV 联合同时调度问题, Ulusoy 等^[44]采用基于时间窗和遗传算法相结合的方法解决柔性制造系统中机床和 AGV 的同时调度问题。Reddy 等^[45]采用 NSGA-II 进化算法求解 FMS 中多目标调度问题, 以完工时间最小, 平均工件流时间最小, 拖期时间最小为优化目标, 同时考虑机床和 AGV 车辆的调度问题。Jerald 等^[46]使用改进遗传算法对工件与 AGV 同步调度问题进行了研究, 案例包含 16 台机器和 43 个工件, 达到了机床空闲时间最少、最小化惩罚成本、机床设备利用率最大的效果。Abdelmaguid 等^[47]以最小化完工时间为目标, 将启发式编码方案与遗传算法相结合, 同时调度机床和 AGV 小车。Chaudhry 等^[48]使用遗传算法在 FMS 系统中同时调度机床和 AGV 小车。李岩^[49]采用了自适应的交叉、变异策略和灵活的群体控制策略, 运用遗传算法同时调度机床和 AGV, 对几个调度实例进行了计算。柳赛男等^[50]针对柔性作业车间, 机床和 AGV 同时调度问题, 提出了一种基于遗传算法的机床/AGV 小车调度的智能搜索调度算法。肖海宁^[51]研究了柔性作业车间内机床和 AGV 的同时调度问题, 设计了在线调度算法, 将问题分成机床选择和 AGV 调度两个子问题, 并分别使用小生境遗传算法和启发式调度算法求解模型。Yang 等^[52]采用基于避塞规则的双层遗传算法(Congestion Prevention Rule-based Bi-level Genetic Algorithm, CPR-BGA)解决集装箱码头 AGV 与堆场吊机、岸边吊机的同时集成调度问题。其他利用遗传算法解决 AGV 调度问题的有冯辉宗^[53]、霍凯歌等^[7-8]、Jin 等^[54]、魏昆^[55]等。

(2) 粒子群算法

粒子群算法是基于群体搜索的算法, 具有很强的全局搜索能力, 焦福明^[56]将多 AGV 问题归结为以最短时间完成全部任务为目标的占用式多车辆路径规划问题, 运用粒子群算法求解 AGV 调度问题。边培莹^[57]采用粒子群算法解决 FMS 中的 AGV 调度问题。郝一名^[58]采用粒子群优化算法, 结合

在线检测及路径协调策略实现了对多 AGV 任务均衡分配及路径优化。

粒子群算法设定参数少, 算法简洁易实现, 收敛速度比较快但有时由于种群在搜索空间中多样性的丢失而易陷入局部最优, 需要进行改进, 也可考虑增加种群多样性, 提高算法跳出局部最优值能力。罗键等^[59]针对自动仓储系统的物品出入库作业效率, 建立 AGV 调度数学模型, 并提出一种改进量子微粒群算法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)来求解模型。Zhang 等^[60]提出了一种基于主粒子和嵌套粒子特性的改进粒子群优化算法求解机器人和 AGV 同时调度问题, 比一般粒子群算法和遗传算法在收敛性和效率上更有优势。Lin 等^[61]采用随机密钥混合粒子群算法(Random Key-based Hybrid Particle Swarm Optimization, RKHPSO)解决 FMS 中工件与 AGV 联合调度问题, 采用交叉变异运算来避免早熟收敛, 保持种群多样性。

(3) 差分进化算法

差分进化算法是一种基于群体差异的进化计算方法, 与遗传算法不同, 它使用一个特殊的差分操作代替经典的交叉或变异操作产生子代, 具有结构简单、容易实现、收敛快速、鲁棒性强等特点, 与其他优化算法在高维复杂问题上往往会早熟收敛和收敛性能差相比, 对高维问题收敛速度快而且结果较精确。杨锋英等^[62]把静态 AGV 作业调度当作带约束的多重 TSP 问题, 提出了一种改进的差分演化算法, 设计了新的 2 段编码方法, 对多个 DE 算子进行了改造。Satish 等^[63]针对同时调度机床和物料运输系统, 将机床选择启发方法和小车指派启发方法整合在差分进化算法中, 为任务指定适合的机床和小车, 使完工时间最小及循环时间最小。Gnanavel 等^[64]针对 FMS 中同时进行机床调度和 AGV 调度问题, 以最小化完工时间为目标, 采用一种新的元启发式差分算法进行求解。

(4) 蚁群算法

蚁群算法是基于群智能的算法, 具有很强的鲁

棒性和搜索较好解的能力, 易于并行实现, 但同时有收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点, 可与其他启发式算法相结合, 以改善算法性能。张磊^[65]在分析 AGV 任务调度方式、调度指标、调度冲突基础上, 提出了一种多层编码遗传和蚁群算法融合的混合算法, 可有效缩短任务完成时间。Saidi-Mehrabad 等^[66]将车间作业调度问题(Job Shop Scheduling Problem, JSSP)和无冲突 AGV 路径(Conflict-Free Routing Problem, CFRP)问题联合考虑, 以最小化完工时间 makespan 为目标, 采用两阶段蚁群算法进行求解。

(5) 其他优化算法

除上述优化算法外, 还有其他优化方法: Li 等^[67]提出一种改进的和声搜索算法(Improved Harmony Search-based Material Transfer Scheduling Algorithm, IHSMTSA)解决制造系统中 AGV 调度问题。Xue 等^[68]通过定义状态特征、动作空间和奖励函数将流水作业多 AGV 调度问题定义为马尔可夫问题, 提出一种新的基于强化学习的调度方法, 可从以往经验中学习到最优或近似最优解, 在动态环境下的性能优于多智能体调度方法。Murugesan 等^[69]采用人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)方法对生产车间中 AGV 的提前和延迟情况进行最小化求解, 以尽量缩短完工时间。

2.4 混合优化方法

以上各类方法各自有其优缺点, 根据其特点将各类方法混合可以使其优点互为补充, 避免单一方法的缺陷, 因此混合优化方法有时能取得更好的效果, 尤其是混合智能优化算法。

张磊^[65]采用一种多层编码遗传和蚁群算法融合的混合算法解决轮式机器人任务调度问题。袁颖河^[70]借助于模糊理论, 提出了具有较强的自学习能力和避碰能力的模糊动态规划算法(Fuzzy Dynamic Programming, FDP), 结合人工智能提出了有效而合理的多任务多 AGV 调度策略。Mousavi 等^[37-38]针对多目标 AGV 调度问题, 以完工时间

makespan 和 AGV 数量最小为目标,同时考虑 AGV 充电情况,采用混合遗传和粒子群算法(hybrid GA-PSO)求解,与 GA、PSO 相比混合算法更优。于璐^[71]将模拟退火算法的 Metropolis 接受准则引入到遗传算法中,采用混合遗传算法来求解同时调度 AGV 和工件问题。Umar 等^[72]采用混合遗传算法将工件调度和 AGV 分派、调度、无冲突路径规划问题联合考虑,以完工时间 makespan、AGV 运

行时间、任务拖期延迟惩罚成本为多目标,算法中使用了模糊专家系统控制遗传算子。Udhayakumar 等^[73]考虑 FMS 制造环境中 AGV 多目标任务调度问题,以 AGV 负荷均衡、最小行走时间和最大利用率为多目标,采用遗传算法和蚁群算法的混合算法求解。

本文对制造系统中 AGV 调度问题研究方法总结如表 2 所示。

表 2 AGV 调度问题研究方法分类及特点
Tab. 2 Classification and characteristics of AGV scheduling research methods

方法分类	优化方法内容	特点(优点与缺点)	相关文献
传统 分析 方法	精确求解方法(整数规划、混合整数规划、分支界定法等)	能够精确求解,但只能针对小规模问题	[5-9], [10-12]
	调度规则/策略(启发式调度/分派规则、多属性指标加权方法等)	具有较低时间复杂度,易于实现,可对动态变化做出反应,可与其他方法结合使用	[13-20]
	排队论方法(基于排队论求解问题)	调度模型需服从排队理论的定义规则,导致应用受限	[21-22]
建模 仿真 方法	Petri 网(TCPN 等)	能够较好地表达动态性,实时性,可与其他方法结合使用	[27-32]
	基于多智能体 MultiAgent 方法	分布式群体智能方法,较好的鲁棒性和柔性,常与其他方法结合使用,没有统一实施标准,尚需进一步完善	[23-25], [30]
	基于集成仿真软件(离散事件建模仿真理论)	能最真实地表达系统的各方面,但本身无优化能力,须与优化理论方法集成使用	[33-39]
智能 优化 方法	遗传算法及其改进算法(NSGA-II, RKGA, 小生境遗传算法等)	具有较好的全局搜索功能,使用最多,一般需要对遗传算法进行改进或结合其他优化方法使用	[7-8], [40-55]
	粒子群算法(QPSO, RKHPSO 等)	具有较强全局搜索能力,算法简洁易实现,收敛较快,有时由于种群多样性的丢失而易陷入局部最优	[56-61]
	蚁群算法	基于群智能的算法,有很强的鲁棒性和搜索较好解的能力,易于并行实现,但同时有收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点	[65-66]
	差分进化算法	对高维问题收敛速度快而且结果较精确	[62-64]
混合 优化 方法	不同方法结合使用(整数规划与遗传算法结合、Agent 与优化算法结合、粒子群与遗传算法混合等)	将各类方法依据特点进行混合,使其优点互为补充,避免单一方法的缺陷	[37-38], [65], [70-73]

3 结论

AGV 调度问题的研究仍然存在不足之处,在 AGV 调度问题模型描述方面:

(1) AGV 调度模型约束设定不能完全反映实际情况,需要纳入更多约束条件和影响因素。

(2) AGV 调度方法的柔性 with 适应性还不能充分满足调度问题的复杂性和动态变化情况。

(3) AGV 与其他资源的联合同时调度问题主要考虑传统 JSP、FJSP 调度与 AGV 联合调度,实际应用中需要考虑更多资源类型的联合调度。

(4) 随问题规模变大, 其解空间会呈指数级增长, 智能优化算法的时间和空间效率已呈现瓶颈难以突破。

在工业 4.0 与智能制造背景下, 随着物联网、数字孪生、大数据、云制造、人工智能等技术逐渐融入制造系统, AGV 调度问题正逐渐向多资源、智能化和集成化转变, 关于未来的研究方向, 以下几点值得关注:

(1) 组合式优化方法的应用

单一的优化方法有时不能很好地求解问题, 因此将两种或以上优化方法相结合来进行研究是行之有效的方法, 包括精确方法与智能优化方法的组合, 建模方法与智能优化方法的组合, 不同智能优化方法的组合等, 需要进一步探索研究效率更高, 适应性更强的组合式优化方法。

(2) 基于分布式的 AGV 调度

目前 AGV 调度方法大都是集中式调度模式, 随着 AGV 调度问题规模变大, 复杂度增加而出现算法瓶颈问题难以解决, 而分布式的调度方法一方面将调度计算负荷进行了合理下发分配, 另一方面也能发挥各子部分的自主决策调度功能, 能够克服集中式调度方法的缺陷^[74], 基于 Agent 的调度是实现分布式调度的方式之一, 但目前还存在 Agent 模型不能统一标准, 分布式智能不能有效获取的问题, 需要进一步的深入研究。

(3) 面向智能仿真的 AGV 调度

目前 AGV 调度的建模仿真方法主要基于离散事件建模与仿真理论, 未来的仿真系统需要采用数字孪生方式构建, 利用物联网技术采集 AGV 调度实时数据, 建立 AGV 调度知识库和专家系统, 利用大数据进行调度知识挖掘, 结合当前人工智能方法形成智能决策库, 基于数字孪生建立新一代的虚实结合、实时仿真、智能决策的 AGV 调度智能仿真集成环境, 以解决多资源融合的、高度集成的、动态实时性更强的复杂 AGV 调度问题, 这也是未来非常值得关注和期待的方向。

参考文献:

- [1] Vis I F. A Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems [J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2006, 170(3): 677-709.
- [2] Qiu L, Hsu W J, Huang S Y, et al. Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey [J]. *International Journal of Production Research* (S0020-7543), 2002, 40(3): 745-760.
- [3] Le-Anh T, De Koster M B M. A review of design and control of automated guided vehicle Systems [J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2006, 171(1): 1-23.
- [4] Fazlollahtabar H, Saidi-Mehrabad M. Methodologies to Optimize Automated Guided Vehicle Scheduling and Routing Problems: A Review Study [J]. *J Intell Robot Syst* (S0921-0296), 2015, 77: 525-545.
- [5] Miyamoto T, Inoue K. Local and random searches for dispatch and conflict free routing problem of capacitated AGV systems[J]. *Computers & Industrial Engineering* (S0360-8352), 2016, 91: 1-9.
- [6] 马越汇, 胡志华. 不确定环境下自动化集装箱码头 AGV 调度与配置问题[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(2): 589-597.
Ma Yuehui, Hu Zhihua. The dispatching and scheduling problems of AGVs at automated container terminals under uncertainty conditions[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(2): 589-597.
- [7] 霍凯歌, 胡志华. 基于遗传算法的自动化集装箱码头多载 AGV 调度[J]. *上海海事大学学报*, 2016, 37(3): 7-33.
Huo Kaige, Hu Zhihua. Multi-load AGV scheduling in automated container terminals based on genetic algorithm[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2016, 37(3): 7-33.
- [8] 霍凯歌, 张亚琦, 胡志华. 自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究[J]. *大连理工大学学报*, 2016, 56(3): 244-251.
Huo Kaige, Zhang Yaqi, Hu Zhihua. Research on scheduling problem of multi-load AGV at automated container terminal[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 56(3): 244-251.
- [9] Meersmans P J M, Wagelmans A. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[C]. *ERIM Report Series Research in Management*. Rotterdam, The Netherlands:

- Erasmus Research Institute of Management(ERIM), 2001.
- [10] Bilge Ü, Ulusoy G. A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS[J]. *Operations Research (S0030-364X)*, 1995, 43: 1058-1070.
- [11] Heger J, Thomas V. Optimal Scheduling for Automated Guided Vehicles (AGV) in Blocking Job-Shops[C]. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS). Hamburg, Germany: Springer, Cham, 2017: 151-158.
- [12] Heger J, Voss T. Optimal Scheduling of AGVs in a Reentrant Blocking Job-shop[C]. *Procedia CIRP*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, 67(1): 41-45.
- [13] Egbelu P J, Jose M A. Tanchoco Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules[J]. *International Journal of Production Research (S0020-7543)*, 1984, 22(3): 359-374.
- [14] Jawahar N, Aravindan P, Ponnambalam S G, et al. AGV Schedule integrated with production in flexible manufacturing systems[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol (S0268-3768)*, 1998, 14: 428-440.
- [15] Sabuncuoglu I. Experimental investigation of an FMS due-date scheduling problem: evaluation of machine and AGV scheduling rules[J]. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (S1936-6582)*, 1993, 5: 301-323.
- [16] Namita S, Sargadharan P V, Pal P K. AGV Scheduling for Automated Material Distribution: A Case Study[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing (S0956-5515)*, 2011, 22(2): 219-228.
- [17] Kim B K, Oh S J. Development of dispatching rules for automate guided vehicle systems [J]. *Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125)*, 1998, 17(2): 137-143.
- [18] 管贤平, 戴先中. 自动导引车系统避免死锁的多属性任务调度方法[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(19): 2337-2342.
Guan Xianping, Dai Xianzhong. Multi-attribute Dispatching Method with Deadlock Avoidance for AGV Systems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(19): 2337-2342.
- [19] 肖海宁, 楼佩煌, 满增光, 等. 自动导引车系统实时多属性任务调度方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(10): 2224-2230.
Xiao Haining, Lou Peihuang, Man Zengguang, et al. Real-time multi-attribute dispatching method for automatic guided vehicle system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(10): 2224-2230.
- [20] Ulusoy G, Bilge U. Simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. *INT. J. PROD. RES. (S0020-7543)*, 1993, 31(12): 2857-2873.
- [21] 黄一钧. 车身车间 AGV 物料搬运系统小车数量配置规划[J]. *工业工程与管理*, 2015, 20(4): 156-162.
Huang Yijun. Planning on the Number of Vehicle Requirement for Body Shop AGV Material Handling System[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2015, 20(4): 156-162.
- [22] 金芳, 方凯, 王京林. 基于排队论的 AGV 调度研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(增 1): 844-846.
Jin Fang, Fang Kai, Wang Jinglin. Research on AGV's Scheduling Based on Queuing Theory[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(S1): 844-846.
- [23] 桑泽磊. 基于 Agent 的车间 AGV 智能调度技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Sang Zelei. Research on Intelligent Scheduling of AGV Based on Agent in Floor Shop[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [24] 经建峰. 基于智能体的多 AGV 自主控制系统研发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Jing Jianfeng. Study and Development of Autonomous Control Multi-AGV System Based on Agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [25] 李晓萌, 杨煜普, 许晓鸣. 基于多级决策的多智能体自动导航车调度系统[J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(8): 1146-1149.
Li Xiaomeng, Yang Yupu, Xu Xiaoming. Multi-agent AGV Dispatching System Using Multilevel Decision Methods[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, 36(8): 1146-1149.
- [26] Cenk S, Melek D, Rizvan E, et al. A multi-agent based approach to dynamic scheduling with flexible processing capabilities[J]. *J Intell Manuf (S0956-5515)*, 2017, 28: 1827-1845.
- [27] 任小龙. 基于 Petri 网的 FMS 调度问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
Ren Xiaolong. Study on Scheduling Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets[D]. Xi'an: XiDian University, 2010.
- [28] 李国飞. 叉车式 AGV 运动控制与调度方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Li Guofei. Research on Motion control and Scheduling method of Forklift AGV[D]. Harbin: Harbin Institute of

- Technology, 2015.
- [29] Nishi T, Tanaka Y. Petri Net Decomposition Approach for Dispatching and Conflict-Free routing of Bidirectional Automated Guided Vehicle Systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans (S2168-2216), 2012, 42(5): 1230-1243.
- [30] Giglio D, Paolucci M. Agent-based Petri net models for AGV management in manufacturing systems[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2001: 2457-2462.
- [31] Yim D S, Linn R J. Push and pull rules for dispatching automated guided vehicles in a flexible manufacturing system[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 1993, 31: 43-57.
- [32] Baruwa O T, Piera M A. A coloured Petri net based hybrid heuristic search approach to simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 2016, 54(16): 4773-4792.
- [33] 柯冉绚, 任亚东. 集装箱码头 AGV 调度优化[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2016, 21(1): 35-41.
Ke Ranxuan, Ren Yadong. Study on Optimizing AGV Control in Container Terminals[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2016, 21(1): 35-41.
- [34] 李军涛, 夏琨, 木漱洋. 交叉环单向循环搬运系统调度问题的仿真优化研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1561-1574.
Li Juntao, Xia Kun, Kise Hiroshi. Scheduling Problem of Unidirectional Material Handling System with Short-cut[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1561-1574.
- [35] 杨武平. 模具智能车间公共缓存区单 AGV 调度策略与仿真[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
Yang Wuping. Intelligent die shop public buffer zone single AGV scheduling and simulation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [36] 韩晓龙, 樊加伟. 自动化港口 AGV 调度配置仿真分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 151-154.
Han Xiaolong, Fan Jiawei. Analysis of AGV Dispatching and Configuration Simulation of Automated Container Terminals[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2016, 35(5): 151-154.
- [37] Mousavi M, Yap H J, Musa S N, et al. Multi-objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. PLoS ONE (S1932-6203), 2017, 12(3): 1-24.
- [38] Mousavi M, Yap H J. A fuzzy hybrid GA-PSO algorithm for multi-objective AGV scheduling in FMS[J]. Int J simul model (S1726-4529), 2017, 16(1): 58-71.
- [39] Viharos A B, István N. Simulation and Scheduling of AGV Based Robotic Assembly Systems[C]. IFAC-Papers On Line. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, 51(11): 1415-1420.
- [40] 朱琳, 范秀敏. 柔性生产系统配料区多自动导航小车调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1168-1175.
Zhu Lin, Fan Xiumin. Scheduling optimization for multi-AGVs in batching area of flexible production system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1168-1175.
- [41] 刘旭. 基于 AGV 平台的多品种混流装配智能调度与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Liu Xu. Research on Intelligent Dispatching and Control for Mixed Mode Assembly Based on AGV Platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [42] 汪先超. 多 AGV 系统的组合导航控制与调度方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Wang Xianchao, Integrated Navigation Control and Research on Scheduling Method for Multi-AGVs system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [43] Lin L, Gen M. A random key-based genetic algorithm for AGV dispatching in FMS[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management (S1741-5195), 2009, 16: 58-75.
- [44] Ulusoy G, Bilge U. A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. Computers and Operations Research (S0305-0548), 1997, 24: 335-351.
- [45] Reddy B S P, Rao C S P. A hybrid multi-objective GA for simultaneous scheduling of machines and AGVs in FMS[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol (S0268-3768), 2006, 31(5/6): 602-613
- [46] Jerald J, Asokan P, Saravanan R, et al. Simultaneous scheduling of parts and automated guided vehicles in an FMS environment using adaptive genetic algorithm[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol (S0268-3768), 2006, 29: 584-589.
- [47] Abdelmaguid T F, Nassef A O, Kamal B A, et al. A hybrid GA/heuristic approach to the simultaneous

- scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. *International Journal of Production Research* (S0020-7543), 2004, 42: 267-281.
- [48] Chaudhry I A, Mahmood S, Shami M. Simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible manufacturing systems using genetic algorithms[J]. *Journal of South University of Technology* (S2095-2899). 2011, 18(5): 1473-1486.
- [49] 李岩. 柔性加工环境中机器和 AGV 的集成调度[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(4): 447-451.
Li Yan. Integrated Scheduling of Machines and AGVs in Flexible Manufacturing Environment[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(4): 447-451.
- [50] 柳赛男, 柯映林. 一种解决有 AGV 小车约束的车间智能调度问题的算法[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(15): 1810-1813.
Liu Sainan, Ke Yinglin. An Algorithm for Job Shop Scheduling in Dual Resource Constrained with AGV[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(15): 1810-1813.
- [51] 肖海宁, 楼佩煌, 严伟国, 等. 柔性作业车间中机床与自动导引车在线调度方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 280-286
Xiao Haining, Lou Peihuang, Yan Weiguo, et al. On-line Scheduling Method for Simultaneous Scheduling of Machines and Automated Guided Vehicles in Flexible Job Shop[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 280-286.
- [52] Yang Y S, Zhong M S, Dessouky Y, et al. An Integrated Scheduling Method for AGV Routing in Automated Container Terminals[J]. *Computers & Industrial Engineering* (S0360-8352), 2018, 126: 482-493.
- [53] 冯辉宗, 陈勇, 刘飞, 等. 基于遗传算法的配送车辆优化调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(增 1): 81-84.
Feng Huizong, Chen Yong, Liu Fei, et al. Optimized scheduling of distribution vehicles based on genetic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(S1): 81-84.
- [54] Jin J, Zhang X H. Multi AGV scheduling problem in automated container terminal[J]. *Journal of Marine Science and Technology-Taiwan* (S1023-2796), 2016, 24(1): 32-38.
- [55] 魏昆. 柔性制造系统 AGV 动态调度模型与算法[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2014.
Wei Kun. The Dynamic Scheduling Model and Algorithm of AGV in Flexible Manufacturing System[D]. Shenyang: Shenyang University, 2014.
- [56] 焦福明. 自动化仓储系统 AGV 调度研究与实现[D]. 济南: 山东大学硕士学位论文, 2013.
Jiao Fuming. Study and Realization of AGV Scheduling in Automatic Storage & Retrieval System[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [57] 边培莹, 李德信, 包宝军, 等. 粒子群算法在生产物流调度中的应用研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(17): 220-223.
Bian Peiying, Li Dexin, Bao Baojun, et al. Application research of particle swarm optimization in production logistics scheduling[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(17): 220-223.
- [58] 郝一名. AGV 系统作业调度策略研究[D]. 济南: 山东大学硕士学位论文, 2016.
Hao Yiming. Research of Strategy on Automated Guided Vehicle System Task Scheduling[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [59] 罗键, 吴长庆, 李波, 等. 基于改进量子微粒群的轨道导引小车系统建模与优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(2): 321-328.
Luo Jian, Wu Changqing, Li Bo, et al. Modeling and optimization of RGV system based on improved QPSO[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(2): 321-328.
- [60] Zhang F Q, Li J J. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Integrated Scheduling Model in AGV-Served Manufacturing Systems[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* (S0219-6867), 2018, 17(3): 375-390.
- [61] Lin L, Liang Y, Gen M, et al. A hybrid evolutionary algorithm for FMS optimization with AGV dispatching[C]. *CIE42 Proceedings*. Cape Town, South Africa: SAIIE, 2012.
- [62] 杨锋英, 刘会超. AGV 作业调度模型及改进的 DE 算法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(9): 225-230.
Yang Fengying, Liu Huichao. Research on AGV job scheduling model and improved differential evolution algorithm. *Computer Engineering and Applications* [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(9): 225-230.
- [63] Satish K M V, Janardhana R, Rao C S P. Simultaneous scheduling of machines and vehicles in an FMS environment with alternative routing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (S0268-3768), 2011, 53: 339-351.
- [64] Gnanavel Babu A, Jerald J, Noorul Haq A, et al. Scheduling of machines and automated guided vehicles

- in FMS using differential evolution[J]. *International Journal of Production Research* (S0020-7543), 2010, 48(16): 4683-4699.
- [65] 张磊. 轮式机器人路径规划及任务调度算法研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Zhang Lei. *Research and Design in Algorithm of Path Planning and Task Scheduling for Wheeled Robot*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016
- [66] Saidi-Mehrabad M, Dehnavi-Arani S, Evazabadian F, et al. An Ant Colony Algorithm (ACA) for solving the new integrated model of job shop scheduling and conflict-free routing of AGVs[J]. *Computers & Industrial Engineering* (S0360-8352), 2015, 86: 2-13.
- [67] Li G M, Bing Z, Wei L, et al. A New AGV Scheduling Algorithm Based on Harmony Search for Material Transfer in a Real-World Manufacturing System[J]. *Advances in Mechanical Engineering* (S1687-8140), 2018, 10(3): 1-13.
- [68] Xue T F, Peng Z, Yu H B. A Reinforcement Learning Method for Multi-AGV Scheduling in Manufacturing[C]. 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2018: 1557-1561.
- [69] Murugesan R. Optimization Algorithm for Minimizing the Earliness/Tardiness of Automated Guided Vehicles Using Artificial Immune System[J]. *International Journal of Applied Engineering Research* (S0973-4562), 2017, 12(22): 11913-11919.
- [70] 袁颖河, 吴智铭. FMS_AGV 传输系统自学习调度方法[J]. *上海交通大学学报*, 1998, 32(6): 83-87.
- Yuan Yinghe, Wu Zhiming. *Algorithm of Self-Learning Scheduling in FMS-AGV Transportation System*[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1998, 32(6): 83-87.
- [71] 于璐. 基于混合遗传算法的柔性制造系统调度研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- Yu Lu. *Research on Scheduling for Flexible Manufacturing System Based on Hybrid Genetic Algorithm*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [72] Umar A U, Ariffin M K A. Hybrid multi-objective genetic algorithms for integrated dynamic scheduling and routing of jobs and automated-guided vehicle (AGV) in flexible manufacturing systems (FMS) environment[J]. *Int J Adv Manuf Technol* (S0268-3768), 2015(81): 2123-2141.
- [73] Udhayakumar P, Kumanan S. Task Scheduling of AGV in FMS using Non-traditional Optimization Techniques[J]. *International Journal of Simulation Modeling* (S1726-4529), 2010, 9(1): 28-39.
- [74] Zhang J, Ding G F, Zou Y S, et al. Review of Job Shop Scheduling Research and its New Perspectives Under Industry 4.0[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing* (S0956-5515), 2017: 1-22.