

面向智能制造车间的 AGV 系统调度算法设计

文 | 1 中国电子科技集团公司第三十八研究所 2 东南大学机械工程学院 张祥祥¹ 杨智飞² 胡祥涛¹ 苏春²

一、引言

物流系统的效率及其作业质量关系到智能制造车间的生产成本和经济效益。利用智能化导航装置和自动化的装卸机构,自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)可以实现物品搬运和装卸过程的自动化。目前,AGV在自动化仓储、物流搬运系统以及智能制造系统等领域得到广泛应用。

为满足智能化生产车间的作业需求,近年来由多辆 AGV 构成的集群式 AGV 系统(以下简称 AGVs)成为 AGV 研究和工程应用的热点领域,主要包括:

◎ 多调度任务的协调机制研究。研究提高 AGVs 响应和工作效率的有效方法,保证物料的高效流动和准时化(Just In Time, JIT)供应。

◎ AGVs 无冲突运行机理研究。根据生产需求,制定调度策略和路径规划,实现 AGVs 的无冲突高效运行,避免碰撞和死锁等现象。

◎ AGVs 再调度问题研究。当系统发生突发情况、设备发生故障、接收紧急订单或插单生产时,需要结束原先的计划和任务,快速、重新完成 AGVs 调度策略的制定及其路径规划。

上述问题相互作用、相互影响,极大地增加了问题求解的难度。

目前,在静态路径规划和预先的任务分配领域,通常以时间最少、路径最短或能耗最低等为目标,采用整数规划、动态规划以及启发式算法等方法,得到 AGV 调度问题的最优解。但是,随着研究规模的扩大和约束条件的增加,已有算法的适应性降低。Rashidi 等针对集装箱码头 AGV 调度问题,建立最小费用流模型,采用扩展标准网络单纯形法求解模型。NiShi 等针对制造系统中 AGVs 调度和无碰撞问题,以总体任务权重最小化为目标,建立 AGVs 调度模型,提出一种两级分解算法。Reddy 等利用进化算法解决柔性制造环境下多目标调度问题,同时考虑机器人和车辆调度,以最小化完工时间、平均流时间以及平均延期时间为优化目标。Mohammed 等提出同时考虑无冲突路径和作业车间调度问题的两阶段蚁群算法,以最小完成时间为目标,通过仿真验证 ACA 算法的有效性。雷定猷等分析多机多请求的 AGVs 调度问题,以最小化总路径长度为目标,考虑不同任务优先级,提出基于混合遗传算法的调度模型。

早期的路径规划问题要求 AGV 沿固定路径运动,实现难度较低,但是对环境的适应能力差。随着智能制造的兴起,对 AGV 智能化提出了更高要求,智能制造车间中 AGV 的路径规划和任务调度紧密结合,需要精确控制 AGV 的行驶时间、等待时间和停靠位置等。常用的路径规划方法包括

运筹学方法、启发式算法等。Savelsbergh 等利用分支定界法实现实现车辆路径的动态规划。Gans 等将无冲突路径规划问题定义为一个经典的集合覆盖问题,以路径堵塞程度作为评价指标。将时间窗算法应用于 AGV 路径规划问题中,以提高路径利用率、避免 AGV 之间的冲突。

综上所述,至今尚未形成 AGVs 调度的有效方法体系,理论研究与工程应用之间还存在着较大差距。本文结合某汽车倒车雷达装配生产线智能调度项目,以智能生产车间 AGV 调度系统设计为目标,在分析该制造系统结构组成和工作原理的基础上,提出改进遗传算法,并将 Dijkstra 算法、时间窗算法等启发式算法嵌入到遗传算法中,实现 AGV 无冲突运行和 AGV 最大配送时间的最小化。

二、智能生产车间和 AGV 运行环境

1、智能生产车间结构组成与功能

某车载雷达生产车间总体布局如图 1 所示。该车间为无人化智能生产车间,其配送模式选自动化物流系统。因此,物料的高效流动可以有效提高生产系统的效率。对于 AGV 调度系统,如何为 AGV 分配运输任务,并为其安排好执行装卸操作的具体顺序和路径,是本文的研究重点。

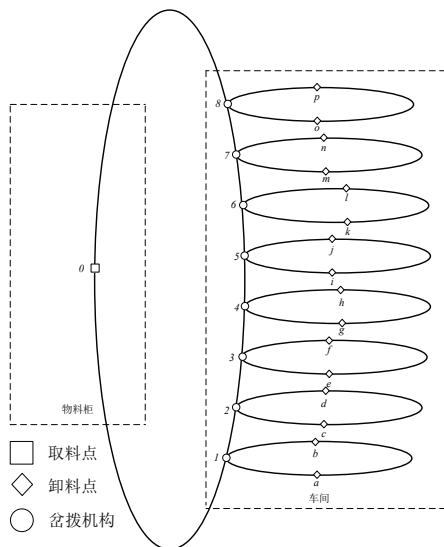


图 1 AGV 运行环境布局简图

AGV 运行区域包括物料柜区域和生产车间。生产车间内包括 a、b、...、p 共 16 条产线。AGV 运行轨道由 9 条环线组成,包括一条的主轨道以及 8 条运行于产线上方的子轨道。主轨道用于往返于物料柜与生产车间,AGV 可通过主

轨道前往物料柜取料或完成取料后前往车间上料,当 AGV 到达上料任务指定位置时,可通过岔拨机构从主轨道转移到该任务对应产线上方的子轨道,当到达任务目的地时,下降至产线旁进行卸料。完成任务后,AGV 返回主轨道在轨道上合适位置等待下个任务。主轨道上包含一个上料点 0,用于 AGV 下降至物料柜完成取料,每条子轨道上含有两个卸料点,每个卸料点对应一条产线。

2、AGV 调度优化模型

AGV 调度的目标对运输任务和不同 AGV 小车进行排序,确定合理的任务分配方案,实现运输任务和车辆之间的最佳匹配,提升系统整体效率、降低运行成本。本研究中,AGV 调度的任务如下:在物流运输系统中,有 n 辆 AGV、 m 个待执行任务、若干个工作站点和物料仓库站点,通过合理地分配运输任务、AGV 数量及其工作任务,在运行路径、运行时间和车辆性能受限的条件下,满足指定的调度指标和车间生产需求。

对于 $n \times m$ 的车辆调度问题中,本算法以最大配送时间的最小化作为优化目标,目标函数可以表示为:

$$\min f(T) = \min \{ \max(x_{i,j,k} T_{i,k}) \};$$

$$x_{i,j,k} = \begin{cases} 0 & i = 1, 2, \dots, n; j, k = 1, 2, \dots, m; \\ 1 & \end{cases}$$

式中 $x_{i,j,k}$ 为 0-1 变量,当第 i 辆 AGV 的第 j 个任务编号为 k 时值为 1,否则为 0; $T_{i,j}$ 表示第 i 辆 AGV 执行第 j 号任务所需时间。

约束条件如下:

(1) 每辆 AGV 的同一时间只执行一个任务:

$$\sum_{i=1}^I x_{ijk} = 1, \forall j, k$$

(2) 每个任务有且只有一辆 AGV 来完成:

$$\sum_{j=1}^J x_{ijk} = 1, \forall i, k$$

(3) 全部任务均需被完成:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} = J$$

3、路径规划

任务分配是 AGV 调度算法的核心,其作用在于确定分配方案,实现运输任务和车辆之间的最佳匹配。此外,在任

务调度的基础上完成路径规划,为每一辆 AGV 分配一条无冲突路径,以提升系统运作效率。多辆 AGV (AGVs) 路径规划是 AGV 调度算法另一个研究重点,其目的是在保证系统无冲突运行的情况下,为每辆 AGV 规划出一条无碰撞且性能指标最优的路径。

为提高货物运送效率,AGV 占用公用道路不可避免。因此,研究避碰问题具有重要意义。本文中,AGV 运行轨道均为单道单向轨道,并且当前序 AGV 在取料点、卸料点或岔道位置执行动作时,后序 AGV 需要等待其完成操作。因此,根据地图建模和 AGV 执行任务的状况,AGVs 中存在的冲突主要包括两种类型,即路口冲突和赶超冲突,如图 2 所示。

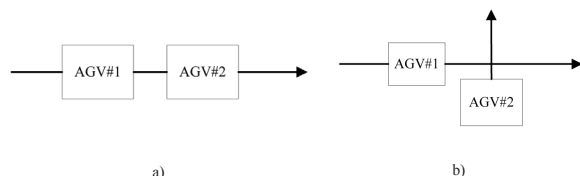


图 2 AGV 冲突类型

a) 赶超冲突 b) 路口冲突

解决上述冲突的常用方法包括:

◎ 路径铺设法:通过设置主副车道和若干规则避碰,算法简单稳定,但不具备通用型。

◎ 交通规则法:根据系统需求确定 AGV 任务优先级,以尽可能全面的规则指导 AGV 运动。例如:等待策略可以很好地解决路口冲突问题。

◎ 单向图方法:为拓扑中所有路段规定运行方向,其效率取决于路径规划是否合理,搜索出优化路径可能存在转弯频繁等现象。

◎ 重新规划路径法:若所设置的冲突路段不可用,则从 AGV 当前位置的下一节点重新规划路径以避免冲突。

◎ 预测式避碰:AGV 规划好最优路径,预测 AGV 之间路径是否会发生冲突,通过合适的冲突检测和冲突消除方法,完成系统运行优化。

Rajotia 等提出一种半动态时间窗约束的路径规划策略,使用保留时间窗和自由时间窗来管理车辆的运动,并采用 Dijkstra 算法为 AGV 找到最短路径。基于时间窗的方法可以有效避免 AGV 因竞争同一任务而引起的并发操作,广泛应用于 AGV 冲突的规避问题。

本文采用改进型遗传算法实现 AGV 调度系统任务分

配,设计满足约束条件的编码规则和符合优化目标的适应度评价函数,利用遗传算法优胜劣汰的特性,决定最优调度方案。采用与 Dijkstra 算法相结合的时间窗算法完成 AGVs 路径规划,为每辆 AGV 规划提供最优路径,同时保证系统的无冲突运行。

三、改进遗传算法设计

分析系统模型特征和 AGVs 调度的功能需求,可以将上述问题转换为多个子系统独立的优化问题,并在此基础上完成系统级综合协调。首先,将 AGV 调度任务分解为任务调度和路径规划两个功能子系统;采用两阶段控制策略,即离线生成路径库、基于时间窗算法完成在线路径规划,以实现避碰。两阶段调度的求解框架如图 3 所示。

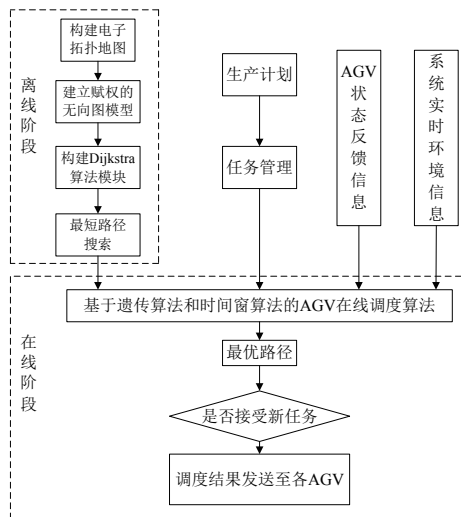


图 3 两阶段调度系统求解框架

离线阶段生成路径库,利用图论中单 AGV 路径规划方法,采用 Dijkstra 算法求取最短路径,并基于 Dijkstra 算法提出生成包含最短路径和次短路径的最短路径库,有效避免随机生成解质量不高的现象。在线阶段的规划路径考虑交通规则法、预测式避碰方法控制系统中各节点、AGV 通过时间等因素,基于运行时间、停车次数、等待时间等约束条件,利用遗传算法优化路径选择方案,解决 AGVs 的静态车间调度问题。

1、任务调度

当用户完成向系统中输入生产计划后,首先基于生产能力和物料供应能力,考虑生产现场的信息反馈,将生产

计划动态地分解成滚动作业计划。在生产计划分解的基础上,输出短期需 AGV 执行的任务,并将其传递给任务调度模块。本任务调度模块采用改进型遗传算法实现 AGV 任务分配以及 AGV 运行路径的组合优化。任务调度模块流程如图 4 所示。

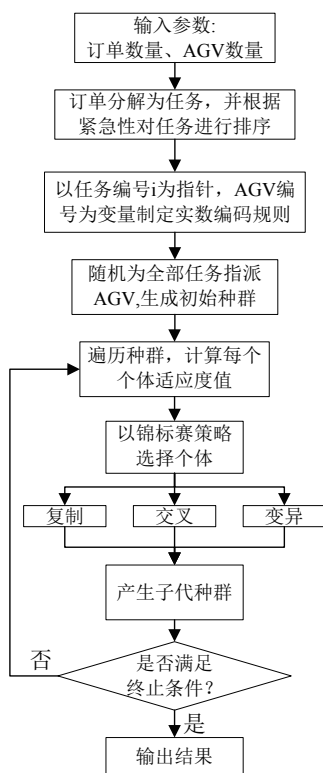


图 4 任务调度模块流程图

(1) 基因编码。

在设计遗传算法编码时,需要考虑基因的完备性、健全性和非冗余性。多 AGV 调度系统中基因为 AGV 编号信息。因此,本算法采用实数编码方式,以便于解码操作和基因操作。编码长度由任务数量 M 决定,染色体生产中每条染色体长度均为 M 。初始化时在染色体每个基因位上设置为 $[1, N]$ (N 为 AGV 数量) 的随机数,代表 AGV 编号。

(2) 种群初始化。

种群规模过小,可能会导致所包含的信息不充分,容易使算法产生局部收敛;种群规模过大,计算量过大,降低算法的效率。本算法设置初始种群为 100 个个体。

(3) 适应度函数设计。

对于给定的调度方案,采用 Dijkstra 算法离线计算每辆 AGV 完成任务所需遍历的节点,得到 AGV 的运行路径。

采用 AGV 时间窗、节点时间窗和路段时间窗多时间窗的概念,计算多 AGVs 在给定路径下完成调度任务需要的运行时间。

2、路径规划

AGVs 发生碰撞的原因有两种,即节点冲突和路段冲突。冲突的表现形式包括相向冲突和追及冲突。本研究 AGV 速度为定值,因此系统仅存在相向冲突。此外,为保证 AGV 正常运行,本文通过设定时间窗保证 AGV 之间有一定的安全距离,通过预测 AGV 行驶的位置和交通规则避免发生节点冲突和路段冲突。具体流程如图 5 所示。

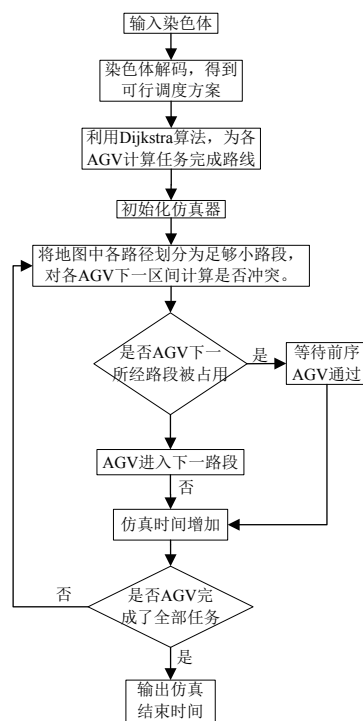


图 5 路径规划模块工作流程

路径规划的核心内容包括:

(1) 利用 Dijkstra 算法生成 AGV 运行状态时间窗,即无节点和路段阻碍情况下 AGV 调度方案中节点、路段的时间窗,包括占用节点、路段 AGV 编号、起始时间和结束时间和时间窗长度等信息。

(2) 通过生成节点时间窗,防止 AGV 在节点时间窗产生重叠的方式避免节点冲突的发生,包括相向冲突和交叉节点冲突。在节点时间线上标注每个 AGV 在该节点上占用的时间窗,并对节点上各 AGV 的时间窗按时间线进行排序。

(3) 本算法设定 AGV 为匀速来避免发生追及冲突；通过生成路段时间窗，防止 AGV 在路段时间窗产生重叠的方式避免路段相向冲突的发生。

四、案例分析

基于图 1 所示的智能生产车间，配送任务如表所列。其中，终点表示该任务由 AGV 配送原材料至对应编号的产线加工；产线生产节拍为 30min；原材料由三辆 AGV 完成配送，AGV 每次运载的各类产品原材料数量均为 5 套；AGV 运行速度为 0.5m/s，AGV 上料、卸料耗时 10s；每辆 AGV 起始站点均为 0 号站点。

表 配送任务表

任务编号	起点	终点	配送次数	任务编号	起点	终点	配送次数
1	0	a	3	9	0	i	2
2	0	b	1	10	0	j	3
3	0	c	2	11	0	k	1
4	0	d	2	12	0	l	2
5	0	e	3	13	0	m	3
6	0	f	1	14	0	n	1
7	0	g	3	15	0	o	2
8	0	h	1	16	0	p	3

调度优化结果的甘特图如图 6 所示。

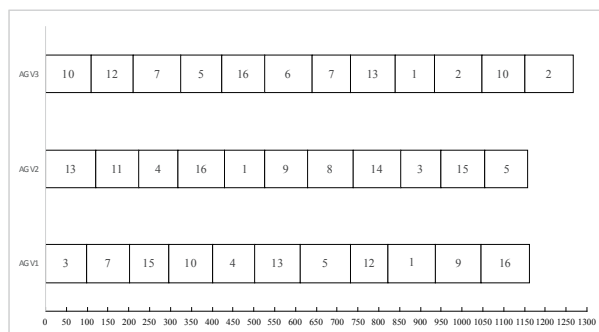


图 6 AGV 调度的甘特图

由图 6 可知，各 AGV 完成相应任务的耗时相近。这是由于本研究中的车间布局为距离相近的环线，并且假设总路径长度和装卸时间相同，在 AGV 无冲突运行的理想状态下 AGV 完成各任务耗时应相等。因此，本文所设计的调度方

案可以将系统中多 AGV 冲突的影响降低至最小，实现 AGV 平准化配送。

图 7 所示调度算法最优解收敛图。由图 7 可知，利用遗传算法可以实现调度方案的优化。与初始的随机分配方案相比，最终的优化调度方案可以节省配送时间约 24.35%。此外，本算法最优值出现在 80 代左右，获得最优解的计算时间约为 48s，收敛速度较快，能够满足生产实际对 AGVs 的调度要求。

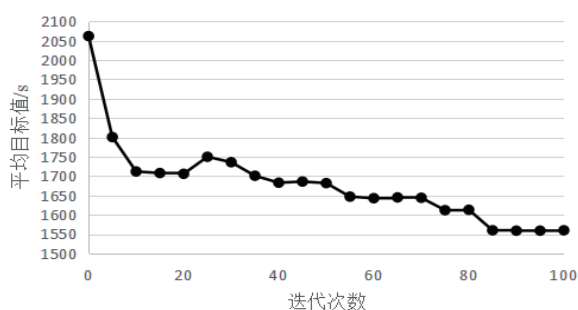


图 7 最优解收敛图

五、结论

遗传算法具有隐含并行性、全局搜索能力和较强的鲁棒性，对问题的依赖性小，适合作为 AGVs 调度算法的主体。本文将多 AGV 调度系统分解为三个功能子系统，将遗传算法的全局搜索能力与时间窗算法的预测规避冲突能力有机结合，构造出改进遗传算法，并应用于汽车倒车雷达智能生产车间 AGVs 的调度问题中，获得了较优的调度方案，验证了算法的有效性。后续将进一步完善调度模型，丰富订单信息，考虑插单生产和 AGV 充电过程等因素对生产的影响，以便更加准确地反映此类系统对 AGV 的工程需求。