

Simulation and Analysis of Auto Guided Vehicle System in an Intelligent Production Workshop

Long Yang¹, Rui Guo¹, Qinmiao Zhu², Li Ma³

¹CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

²Wuhan Digital Design and Manufacturing Innovation Centre Co., Ltd., Wuhan Hubei

³HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi Jiangsu

Email: China_ml@163.com

Received: Oct. 14th, 2019; accepted: Oct. 28th, 2019; published: Nov. 5th, 2019

Abstract

For the establishment of AGV-based material handle system in intelligent production workshops, it is important to determine the number of AGV configurations and the combination of buffer capacity and facility layout. This type of combination problem is an NP-Hard problem, and it is often difficult to find an exact solution. Therefore, this paper proposes a simulation optimization method to obtain a near-optimal solution to the problem. Firstly, the workshop production process and AGV configuration optimization problem are described. Secondly, based on the Plant-Simulation simulation platform, the simulation model of the intelligent production workshop with MHS is established. Finally, through the simulation experiment and the analysis of the simulation results, the MHS is summarized. The optimal configuration scheme can provide decision support for the intelligent workshop equipment configuration and scheduling strategy formulation.

Keywords

AGV, Simulation, Plant Simulation, Intelligent Workshop

面向智能生产车间的自动引导车系统仿真分析

杨 龙¹, 郭 锐¹, 朱钦淼², 马 力³

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

²武汉数字化设计与制造创新中心有限公司, 湖北 武汉

³华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡

Email: China_ml@163.com

收稿日期: 2019年10月14日; 录用日期: 2019年10月28日; 发布日期: 2019年11月5日

摘要

针对智能生产车间基于AGV的物料搬运系统的建立, 确定AGV配置数量以及组合考虑缓存区容量、设施布局等问题至关重要。这类组合问题属于NP-Hard问题, 往往难以求出精确解。因此本文提出了仿真优化的方法以获得问题的近优解。首先, 对车间生产流程及AGV配置优化问题进行了描述; 其次, 基于Plant-Simulation仿真平台建立了具有MHS的智能生产车间的仿真模型; 最后, 通过仿真实验并对仿真结果的分析, 总结了MHS最优配置方案, 可为该智能车间设备配置、调度策略的制定提供决策支持。

关键词

自动导引车, 仿真, Plant Simulation, 智能车间

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前以中高速、优结构、新动力、多挑战为主要特征的新常态下, 发展智能制造不仅是我国产业转型升级的突破口, 也是重塑制造业竞争优势的新引擎, 被理论与实践各界普遍认为代表了制造业的未来方向[1]。智能制造包括智能制造技术与智能制造系统, 它通常具有高度自动化和自适应、自学习的功能。因此, 为推动制造业的智能化进程, 从智能装备、加工技术到资源管理、生产流程, 都受到了国内外学者的关注和研究。特别的, 其关键技术制造资源的优化调度已经成为了当今研究和应用的热点。

生产调度问题通常是指针对一项可分解的工作, 在尽可能满足其约束条件的前提下, 合理地分配其生产地点、生产时间和生产工序, 以达到某些性能指标的最优化[2]。随着传统的车间作业环境、柔性制造系统到复杂的分布式制造系统、面向服务的网络化制造环境[3]的发展, 制造系统变得越来越复杂, 系统的动态性和不确定性更加突出, 使得解决复杂制造环境下的调度问题变得越来越困难。

调度研究的核心内容和重点是调度方法, 归结为4种类型: 基于运筹学的方法、启发式方法、基于仿真的方法和基于人工智能的方法[4]。仿真调度方法是通过对仿真模型的运行来收集数据, 并运用这些数据对实际系统进行性能和状态方面的分析, 从而对系统采用合适的控制调度方法[5]。

用仿真方法研究制造系统, 就应该用仿真语言或者商用的仿真软件建立系统的仿真模型, 这样的仿真模型比起解析方法来能更加全面地反映实际系统的特征, 在此模型之上对不同的系统参数和策略进行仿真实验, 仿真过程所做的就是得到该策略下系统的性能, 从而对不同的策略进行评价; 还可以通过仿真实验改变系统的一些参数来方便地进行系统各参数的灵敏性分析, 并且以此为基础进行系统的优化[6]。

本文以某智能车间自动导引车系统(Automated Guided Vehicle System, AGVS)的实际应用为背景, 提出一种综合AGV路径、调度规则、交通管理以及电量管理等约束的AGVS仿真模型建立方法, 并基于所建立仿真模型AGVS的参数设置, 调度规则以及车间布局做出仿真评估, 以实现AGVS资源的最佳配置和优化运行。

2. 应用背景

以AGVS在某动车车载雷达智能生产车间的应用为背景, 车间布局如图1所示。

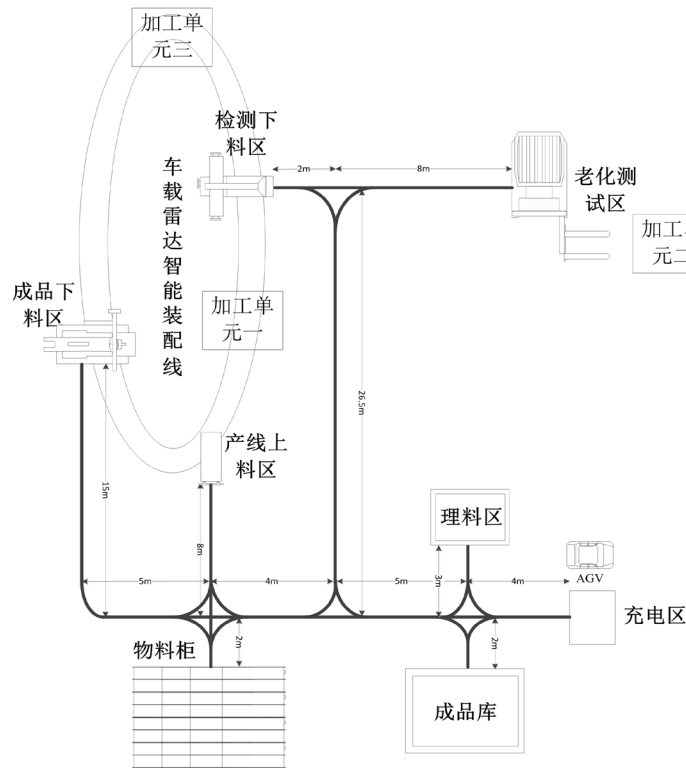


Figure 1. Layout of the vehicular radar smart workshop
图 1. 动车车载雷达智能生产车间布局示意图

目前,该车间只生产一种车载雷达产品。具体生产流程为:1) 根据订单制定生产计划,生产前先将所需全部物料在理料区理料。2) 理料完成后,由 AGV 将物料配送至物料柜。3) 在将所需全部物料配送至物料柜之后,AGV 从物料柜中取出物料送往产线上料区,在完成上料后再将空托盘送回理料区。另外,当一个订单完成后,需要将余料送回理料区。4) 产线上料后系统开始运行,原材料进入产线后需经过 10 余道工序。其中,半成品在完成前道工序后,暂存于检测下料区;当暂存半成品数量满足老化测试批量时,由 AGV 送往老化测试区。完成老化测试后,再由 AGV 运回检测下料区重新上料,继续加工。5) 全部加工获得完成后,成品暂存在成品下料区。当暂存成品数量满足入库批量时,由 AGV 将成品运往成品库。仿真模型中,假定 AGV 运行速度为 0.5 m/s,AGV 蓄电池充电特性为每工作 4 h 需充电 1 h。

3. AGVS 组成及其仿真模型

AGVS 由 AGV、导引路径网络以及 AGVS 控制系统组成,在 Plant Simulation 仿真软件中,AGV 和导引路径可分别用 Transporter 和 Track 等对象来表示。

总体上,AGVS 控制系统可以分为 AGVS 中央决策层与 AGV 执行层。其中,中央决策系统主要由交通管理子系统、任务分配以及 AGV 调度子系统等部分组成;AGV 执行层主要由自主路径规划子系统和电源管理子系统组成。AGVS 控制系统的工作流程如图 2 所示。

3.1. 交通管理子系统

当多辆 AGV 运行于同一各路径系统中时,不可避免地会存在相互干涉、冲突的现象。在单向路径网络中,AGV 运行过程中常见的干涉如图 3 所示。

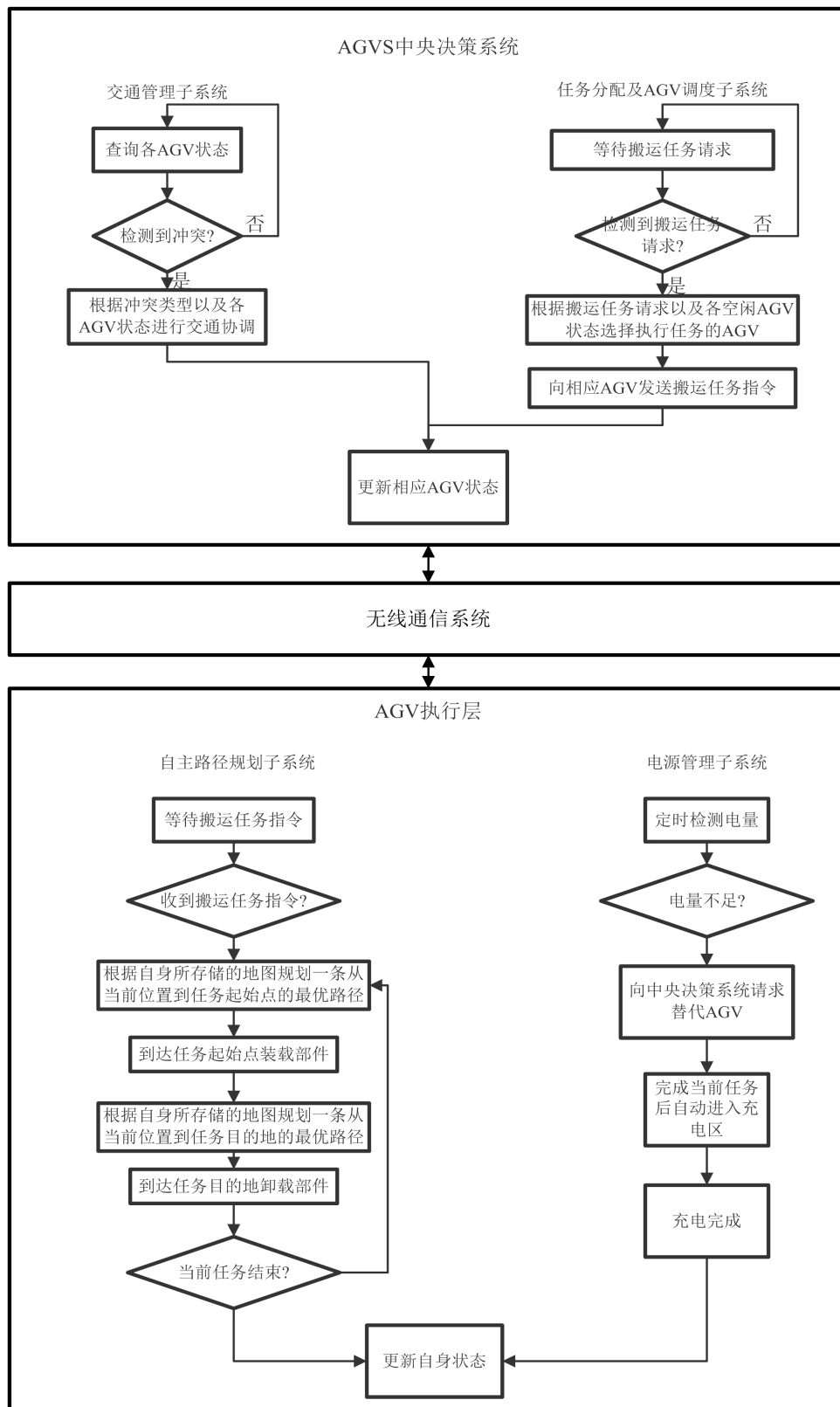


Figure 2. The process of AGVS control system
图 2. AGVS 控制系统工作流程

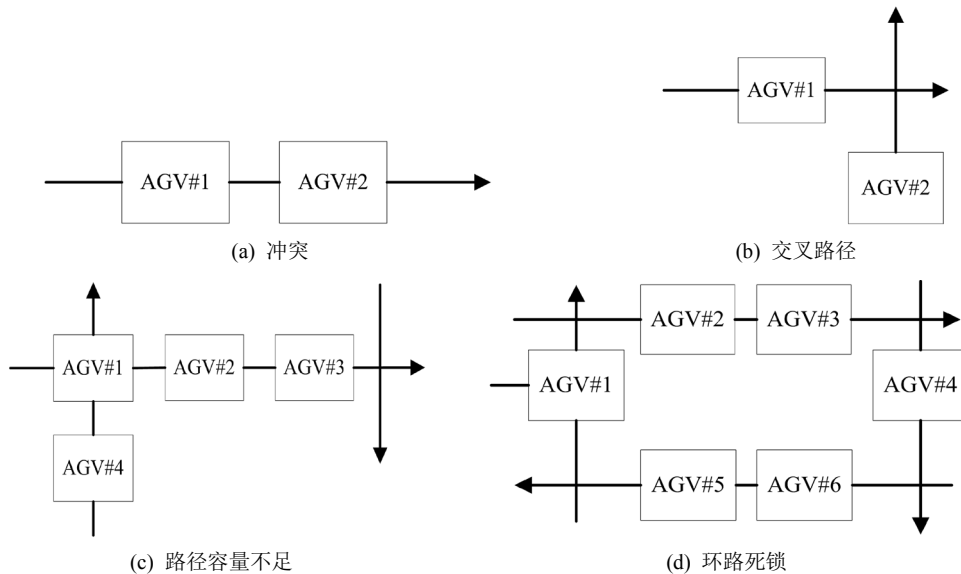


Figure 3. The common interference during AGV operation
图 3. AGV 运行过程中常见的干涉现象

- a) 在 AGV 执行任务过程中，经过某一路段时，在同一时间段两台 AGV 相向而行。
- b) 在 AGV 执行任务过程中，在同一时间段两台 AGV 通过同一交叉路口。
- c) 在 AGV 执行任务过程中，某台 AGV 在驶向目标任务点的路线上，已存在一辆或多辆 AGV，已达到该路段可容纳 AGV 上限。
- d) 该种冲突属于上述冲突类型的特殊情况，触发该种冲突时，对其进行减速、制动、等待、转向等措施均会引发其他冲突，因此需提前规避。

为避免 AGV 之间发生碰撞和冲突，需要在实际系统中可能出现干涉的区域设置传感器。通过传感器，由 AGVS 中央决策系统进行判断是否将发生碰撞，如将发生碰撞应立即停车并接受交通管理子系统的协调。

在 Plant Simulation 仿真软件中，传感器对应于 Track 对象中的 sensor 对象。AGV 经过此对象时会触发相应的传感器事件(Method 对象)，交通管理子系统涉及的各种控制算法均可以通过 Method 对象中的 SimTalk 仿真语言实现。

3.2. 任务分配与 AGV 调度子系统

当系统中有多个待搬运任务或 AGV 空闲时，任务分配与 AGV 调度子系统将会负责给 AGV 分配搬运任务，具体流程如图 2 所示。

在本研究中，优先采用先到先服务(First In First Out, FIFO)策略。在 Plant Simulation 中，可以通过 Table 对象记录新的待完成搬运任务及其发布时刻。当系统中存在空闲的 AGV 时，立即取出任务记录、执行 Table 对象中最先被记录的搬运任务。另外，仿真模型中对任务设置优先级，当系统中存在多个任务待完成时，中央决策系统先根据其优先级完成任务排序，再给 AGV 分配任务。

任务优先级的设置规则如下：为维持产线正常运行、保证产线较高利用率，将产线上料任务定为最高优先级；检测下料任务与老化上料任务及成品入库任务具有次高优先级；当物料柜中有余料时，物料柜上料任务具有最低优先级，当物料柜中余料不足产线上料需求时，将物料柜上料任务调至最高优先级。

3.3. 自主路径规划子系统

本项目中的 AGVS 均运行于双向路径网络。根据 AGV 当前位置及其目的地，可以确定 AGV 在各条

路径段上的行驶方向，并且在该路径段上 AGV 的行驶方向不发生改变。各 Track 均存有路径网络，当 AGV 经过 Track 中的 sensor 对象时，读取该 AGV 当前所执行的任务信息，通过 Dijkstra 算法规划一条从当前位置到目标节点的最短有向路径，具体流程如图 2 所示。

4. 仿真模型的应用

根据车载雷达智能车间生产实际，随机生成多份订单待完成；AGVS 中央系统获得订单后，将待加工原材料储存于理料区，并开始发布任务。AGV 每次可载原材料 12 套，AGV 运行速度为 0.5 m/s，原材料取料及上料时间均为 50 s，空托盘卸载时间为 30 s，半成品托盘取料及上料时间均为 60 s，成品托盘装卸时间为 60 s。

为简化模型，设该生产车间共有三个加工单元，其中加工单元 1 与加工单元 3 生产节拍均为 48 s，加工单元 2 完成老化测试，节拍为 30 min。产线上料阈值设置为 4 套，即当线边暂存区库存低于 4 套时，发布产线上料任务。老化测试批量为 100 套，成品入库批量为 150 套。

4.1. 基于 AGV 配置数量的仿真

AGV 成本昂贵，AGV 数量过多，不仅会造成资源浪费，也容易引起 AGV 之间的干涉和冲突，造成堵塞，增加调度的难度。反之，若 AGV 数量不足，将无法满足生产需求，造成设备等待和停机，影响车间的经济效益。

为此，本项目首先基于系统仿真模型和上述的参数设置，评估保证生产车间满负荷运行、稳定运行所需要的 AGV 数量，在此基础上制定 AGV 调度策略。仿真时，将系统中所需 AGV 数量作为可变参数，逐渐增加模型中的 AGV 数量。在每一种 AGV 数量下，运行仿真模型 48 h，记录 AGV 执行运输任务的时间和各工位利用率等性能指标。

方案 1：一辆 AGV，先将全部物料配送至物料柜后再进行产线上料。

方案 2：两辆 AGV，先将全部物料配送至物料柜后再进行产线上料。

方案 3：三辆 AGV，先将全部物料配送至物料柜后再进行产线上料。

方案 4：一辆 AGV，同时进行物料柜上料与产线上料。

方案 5：两辆 AGV，同时进行物料柜上料与产线上料。

方案 6：三辆 AGV，同时进行物料柜上料与产线上料。

方案 7：两辆 AGV，交替运行，同时进行物料柜上料与产线上料。

Table 1. Data of simulation

表 1. 仿真数据

方案	各任务耗时/%						各工位利用率/%			产量/套	
	物料柜送料	产线送料	检测下料	老化上料	成品入库	充电	空闲	加工单元 1	加工单元 2		加工单元 3
1	21.78	28.86	2.68	2.35	1.17	18.88	24.28	54.74	19.79	50.42	1691
2	13.89	16.15	1.81	1.43	0.71	18.86	47.15	61.69	23.96	60.94	2194
3	10.27	12.28	1.28	1.08	0.52	18.85	55.72	70.45	27.08	66.50	2244
4	18.63	37.58	3.54	2.82	1.45	18.88	18.63	65.12	25.00	61.26	2194
5	13.04	20.78	2.03	1.67	0.83	18.87	42.73	73.91	28.12	69.60	2494
6	11.60	14.25	1.42	1.18	0.60	18.87	52.07	74.27	30.20	72.38	2544
7	14.13	31.42	3.59	2.44	1.22	18.82	28.38	82.93	31.25	78.92	2782

由表 1 中的数据，可以得出以下结论：

1) 方案 1 至方案 3 区别在于：AGV 配置数量不同。均采用将全部物料配送至物料柜后再开始上料规则。当 AGV 数量为 1 时，产线内各工位利用率及产出仍可提高，设备的加工能力并未得到充分利用。此时 AGV 数量不能满足生产任务需求，AGV 数量是产能的制约因素。当 AGV 数量大于 1 时，AGV 空闲率显著上升，且当 AGV 数量由 1 辆增加至 2 辆时，工位利用率及产出并未获得较大提高，说明此时 AGV 配置数量已能满足当前任务需求。此时，制约系统产能进一步提升可能的原因包括：生产前需将全部物料配送至物料柜，准备时间过长；AGV 充电时无法完成上料任务。为此提出方案 4 至方案 6。

2) 方案 2 与方案 5 区别在于：方案 5 采用同时进行物料柜上料与产线上料，即当物料柜有库存物料时开始向产线上料，产线上料任务优先级高于物料柜上料任务。从仿真结果可知：方案 5 与方案 2 相比，加工单元 1 利用率提升 12.22%，加工单元 2 利用率提升 4.16%，加工单元 3 利用率提升 8.66%，产能提高 300 套。此方案改善了方案 1 至方案 3 生产前准备时间过长导致产出无法提升的制约。然而，方案 5 中 AGV 平均空闲率为 42.73%，且 AGV 同时充电时无法完成任务产线停滞问题仍未解决，为此提出方案 7。

3) 方案 7 与方案 5 区别在于：方案 7 配置 2 辆 AGV，当任务数量过多时 2 辆 AGV 同时运行；当 1 辆 AGV 足以满足任务需求时，2 辆 AGV 交替运行避免出现同时充电现象发生。

与方案 5 相比，方案 7 中加工单元 1 利用率提升了 9.02%，加工单元 2 利用率提升 3.13%，加工单元 3 利用率提升 9.32%，产能提高 288 套。但是，AGV 空闲率达 28.38%，AGV 运力没有充分利用。

基于上述研究，可以得出以下结论：在现有参数下，两辆 AGV 可以为车间提供有效服务，加工单元有较高的利用率，但 AGV 的空闲率比较高、仍有待进一步改善。

为此，在上述仿真方案的基础上，进一步开展 AGV 参数优化仿真。

4.2. 基于 AGV 参数的仿真

本仿真实验通过改变 AGVS 中 AGV 的参数以及调度规则，以评估 AGVS 的最大服务能力。仿真模型的加工任务、加工单元性能和其它参数均与上节相同，AGV 配置数量和运行策略与上节中方案 7 相同。

为评估 AGV 最大服务能力，改变以下模型参数：1) AGV 运行速度；2) 产线上料阈值。在此基础上，评估 AGVS 的最大服务能力。

AGV 运行速度与车间主要性能指标之间关系如表 2 所示。

Table 2. The relationship between AGV running speed and workshop KPI
表 2. AGV 运行速度与车间主要性能指标之间关系

AGV 速度 (m/s)	各任务耗时/%							各工位利用率/%			产量/套
	物料柜送料	产线送料	检测下料	老化上料	成品入库	充电	空闲	加工单元 1	加工单元 2	加工单元 3	
0.5	14.13	31.42	3.59	2.44	1.22	18.82	28.38	82.93	31.25	78.92	2782
0.75	15.43	28.27	3.28	2.42	0.98	18.83	30.79	83.43	31.77	79.48	2802
1	15.37	27.63	2.87	2.31	0.70	18.85	32.27	85.04	32.29	81.06	2823

由表 2 可以看出，提高 AGV 运行速度可以提高 AGVS 服务能力。当 AGV 速度由 0.5 m/s 提升到 1 m/s 时，各加工单元利用率分别提高了 2.11%、1.04%、2.14%，产出提高了 41 套，提升并不显著，这是由于该 AGVS 路径网络较为简单，各节点间距离较短，路径柔性较低，提升 AGV 运行速度不能发挥应有的作用。

表 3 为在保持 AGV 运行速度不变，即 AGV 运行速度为 0.5m/s，各节点装卸时间不变的条件下，通过改变产线上料阈值，车间主要性能指标的变化。

Table 3. The relationship between production Line's feeding material threshold and workshop KPI
表 3. 产线上料阈值与车间主要性能指标之间关系

产线上料 阈值/套	各任务耗时/%							各工位利用率/%			产出/套
	物料柜送料	产线送料	检测下料	老化上料	成品入库	充电	空闲	加工单元 1	加工单元 2	加工单元 3	
2	13.44	27.59	3.12	2.23	1.24	18.85	33.34	77.28	29.79	74.44	2644
3	13.39	31.35	3.36	2.72	1.29	18.87	29.02	80.60	30.56	77.28	2704
4	14.13	31.42	3.59	2.44	1.22	18.82	28.38	82.93	31.25	78.92	2782
5	16.44	30.33	3.12	2.59	1.28	18.91	27.33	84.31	32.29	80.22	2828
6	17.34	29.19	3.21	2.48	1.40	18.88	27.50	84.28	32.29	80.11	2824
7	17.51	29.15	3.36	2.72	1.40	18.90	26.97	84.82	32.29	80.80	2849
8	16.55	30.26	3.35	2.48	1.46	18.91	26.99	85.06	32.29	80.92	2854

由表 3 可知：当阈值由 2 设置为 5 时，各加工单元利用率可获得较大提升，分别为 7.03%，2.50%，5.78%，产出提高了 184 套；当继续增加阈值时，设备利用率并未获得显著提升，并且更高的阈值将会导致线边暂存区容量增大。

4.3. 仿真结果验证

在某动车车载雷达智能制造车间物流输送系统建设时，充分参考了前述不同仿真参数配置组合下的仿真模型输出分析结论。在当前生产任务负荷水平下，选用了两台 AGV 进行物料配送的方案，经过 3 个月的试运行，物料配送准时率满足业务部门要求，达到了系统应用设计目标。

5. 结论与展望

本文以 Plant Simulation 仿真软件为工具，以某动车车载雷达智能制造车间为研究对象，建立了系统仿真模型并完成一系列仿真实验，得到系统在各种参数配置和调度策略下系统的性能指标，详细分析了 AGV 数量、参数设置等与加工设备利用率、系统产能之间的对应关系。在此基础上得出结论：1) 两辆 AGV 可以为车间提供有效服务；2) AGV 最佳运行速度为 0.5 m/s；3) 产线上料阈值应为 5 套。在确定合理设计参数（如配置数量、运行速度）的基础上，应着重研究调度策略的合理性，以提高 AGV 的服务能力。后续的仿真研究可考虑将人工智能技术引入资源调度问题中，制定自适应性算法，使得调度系统能随时应变实际系统所发生的情况，以提高制造系统的运行效率。

基金项目

《高速动车组关键零部件智能制造新模式应用》项目。

参考文献

- [1] 吕铁, 韩娜. 智能制造: 全球趋势与中国战略[J]. 人民论坛-学术前沿, 2015(11): 6-17.
- [2] McKay, K.N. and Wiers, V.C.S. (1999) Unifying the Theory and Practice of Production Scheduling. *Journal of Manufacturing System*, **18**, 241-255.
- [3] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 449-457.
- [4] 余建军, 张定超, 周铭新. 生产调度研究综述[J]. 机械设计与制造工程, 2009, 38(17): 13-17.
- [5] 熊锐, 吴澄. 车间生产调度问题的技术现状和发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(10): 55-60.
- [6] 王煜, 蔡临宁, 岳秀江. 物流系统的仿真研究综述[J]. 制造业自动化, 2004, 26(9): 5-8.