

# 虚拟仿真在总装车间AGV产线中的应用研究

朱本东 江亮 邹可

(长安汽车有限公司,重庆 400000)

**摘要:**为满足总装车间对自动导引车(AGV)作为输送载体的需求,对AGV设计方案进行优化,以增强AGV输送系统的功能。依据某乘用车总装车间的运营情况,设计AGV输送线路,结合车间输送设计方案、AGV自身特征、线体的运行逻辑及线体业务流程,利用西门子Plant Simulation软件构建AGV输送系统仿真模型,对不同节拍下AGV的数量进行分析。为满足生产节拍,通过设计试验管理器开展试验设计(DOE),优化AGV的线体间缓存AGV的电池容量自动化工作站的充电时间和行走速度。优化后的AGV线路线体输送效率提升了24%,AGV利用率提升了26%。

**关键词:**总装车间 AGV Plant Simulation 虚拟仿真

中图分类号:TH186

文献标志码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240023

## Application Research of Virtual Simulation in AGV Production Line of Assembly Workshop

Zhu Bendong, Jiang Liang, Zou Ke

(Chang'an Automobile Company Limited, Chongqing 400000)

**Abstract:** In order to meet the demand of automated guided vehicle (AGV) as transport carrier in final assembly workshop, the AGV design scheme is optimized to enhance the function of AGV transport system. Based on the operation of a passenger car assembly workshop, the AGV conveying line is designed, and combined with the workshop conveying design scheme, AGV characteristics, the operational logic of the line and the line business process, the AGV conveying system simulation model is constructed by using Siemens Plant Simulation software so as to analyze the number of AGVs at different beats. In order to meet the production cycle time, the design of experiment (DOE) method is carried out through the design of test manager, and the charging time walking speed of the automatic workstation is optimized to cache the battery capacity of the AGV between the lines. After optimization, the conveying efficiency of AGV line is increased by 24%, and the utilization rate of AGV is increased by 26%.

**Key words:** Assembly workshop, AGV, Plant simulation, Virtual simulation

### 1 前言

当前,消费者对汽车产品的个性化、定制化需求更加突出,传统流水线方式的批量化、单(少)品种的生产策略已经不能满足市场需求,因此,按订单生产(Make-to-Order)模式逐渐成为各主机厂的生产模式。以自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)作为载体的柔

性装配线的机运系统采用5G网络在线调度,取消了传统的“固定式”装配线,与自动拣货、备货拉料系统和成套零部件供应(Set Parts Supply)系统配合,大幅提高了作业灵活性。AGV生产线不固定装配工位,根据实际装配需求,调整AGV之间的安全间隙,实现工位节距、工位数量灵活可调,满足不同工时车型的均衡化共线生产需求;通过系统调度,为不同配置车型规划地图,可实

作者简介:朱本东(1981—),男,工程师,学士学位,研究方向为自动化控制。

参考文献引用格式:

朱本东,江亮,邹可.虚拟仿真在总装车间AGV产线中的应用研究[J].汽车工艺与材料,2024(8):55-62.

ZHU B D, JIANG L, ZOU K. Application Research of Virtual Simulation in AGV Production Line of Assembly Workshop[J]. Automobile Technology & Material, 2024(8): 55-62.

现不同的装配路径;因此,可以根据不同的产品、订单量调节装配任务,满足个性化、定制化的需求。

总装车间装配零部件种类多、工艺设备和工具需求各不相同、工艺流程复杂、质量控制严格、各个控制系统互相关联,对AGV的工艺线路、AGV数量、充电桩数量、充电时间及单车的电池容量提出了很高的要求,因此,在进行AGV线体规划时,要综合考虑装配工艺、项目工时、生产节拍、安全需求、零件存储区等。为确定生产线中AGV数量和配置,通过仿真对规划的生产线(工艺线路、AGV数量、AGV的电池参数、充电桩的数量)进行仿真,发现潜在的风险,得出符合实际生产需求的AGV配置方案。

## 2 总装车间AGV系统分析

### 2.1 总装车间AGV概述

AGV最常见的应用有AGV搬运机器人、AGV小车,主要功用集中在自动物流转运,随着AGV技术的不断发展,AGV在汽车领域越来越广泛地应用在输送主线及分装线(内饰线、完成线、电池pack线、前后桥分装线、仪表线、前端模块线等),以及料仓机器人(Container Transferring Unit, CTU)仓储和自动分拣、物流的无人配送。

### 2.2 AGV产线工艺布局

某汽车总装车间生产线具有生产节奏快、多车型共线生产、装配件数量多的特点,为提高工位平衡率和线体的输送效率,降低人工装配成本,采用AGV替代传统输送设备。其中采用AGV输送的线体有内饰线、完成线、所有的分装辅线及物流配送上线,本文研究的重点是内饰线和完成线,如图1所示。



图1 数字孪生系统(AGV生产线)总体架构

### 2.3 AGV网络架构

AGV通过工厂5G网络和局域网与充电桩、车间的制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)、线边工艺设备、拧紧工具构成网络架构,如图2所示。

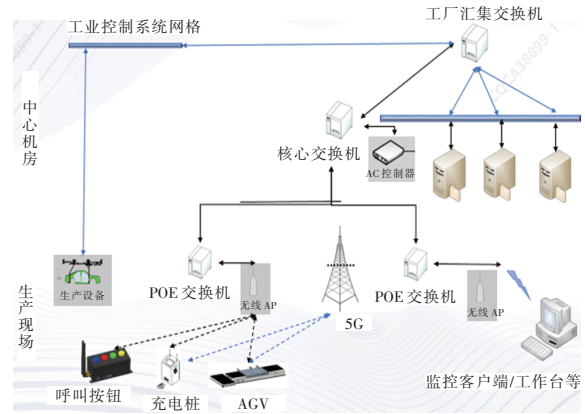


图2 总装车间网络总体架构

### 2.4 AGV运作流程

AGV系统主要由机器人中心管理调度系统(Central Mangement Server, CMS)、机器人控制调度系统(Robot Control System, RCS)、警告管理系统(Warning Mangement System, WMS)、仓储设备控制系统(Warehouse Control System, WCS)、监控客户端组成。运作流程可划分为订单任务获取、进入作业单元、离开作业单元、自动充电,完成流程需要MES、工艺设备、工具的可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)控制系统等协同运行,具体如下:

a. CMS根据设定的订单,给向AGV下发下一工位的指令,同时接收车身车辆识别代号(Vehicle Identification Number, VIN),AGV按照设定路径、速度运行,准备进入作业点。

b. AGV进入自动化工作站,WCS与设备PLC进行信息交互,得到允许后,进入作业点。在交互过程中,如果工艺设备出现故障,AGV自动停止运行。

c. 作业完成后向CMS和MES反馈完成信号,进行信息比对,MES检验作业是否完成,若完成则下发完成信号,AGV按照设定路径、速度移动离开作业点,并反馈离开信号。若未完成,则AGV在工位末设定点等待。

d. 在运行过程中,若遇到车体的跳入、跳出或清线,工艺设备控制系统根据实际需求,下发特定

字符用于标识空车。

MES、工艺设备PLC、AGV控制系统及本体之间的控制关系如图3所示,其中MES与AMS控制系统之间的交互采用rest协议,工艺设备PLC与AMS控制系统采用传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP),自动定位导航(Autonomous Mobile Robot, AMR)控制系统实时控制AGV,可在AGV控制系统中查询AMR实时点位、电量、AGV编号、速度等信息。

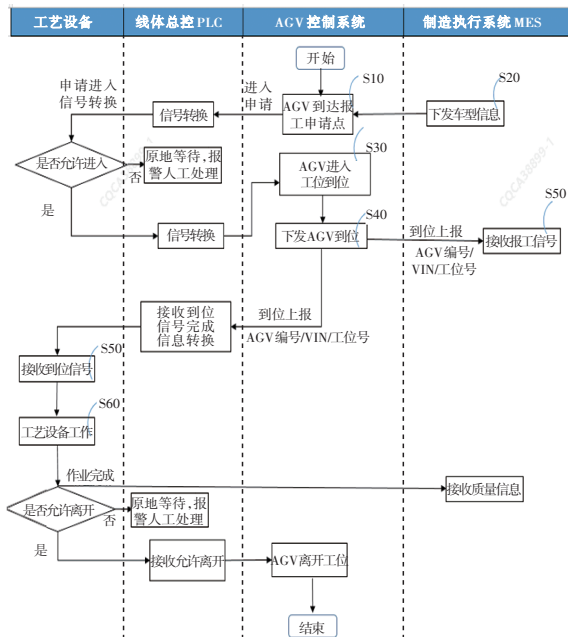


图3 AGV运行流程

### 3 AGV产线仿真设计

#### 3.1 仿真方案制定

##### 3.1.1 仿真目标

仿真范围从白车身由涂装车间进入总装前的缓存区(Painted Body Store, PBS)开始到成品车下线为止,研究的主要目的是对总装车间AGV线体的运行进行全面评估和优化,为总装车间规划方案提供数据支持和决策依据。整个AGV输送线路已经基本规划完成,但对各区域的AGV具体数量、充电桩和AGV选型(电池、充放电速度等)仅有初始方案,需要通过系统仿真进一步优化。为提高分析效率,以AGV内饰装配线为例进行说明,仿真模型的目标有:

a. 基于车间的生产工艺流程,搭建整个生产线的(含分装线、物流运输)仿真模型,按照任务清

单对线体进行动态分析,确认影响节拍提升的瓶颈工位,分析制定措施。

b. 确认不同节拍下AGV的最优数量,分析AGV数量对产能的影响,根据AGV设计方案及单体配置,仿真得出线体达到的最大每小时产量(Jobs Per Hour, JPH)。

c. 采用参数化建模技术,开发通用的AGV仿真平台,根据AGV的目的地、行走路径,利用仿验证AGV个体的电池性能(容量、基本耗电量、充电电流等)在不同节拍、不同工位的行走速度、加速度、线体的充电桩数量条件下的可行性。

d. 根据设定的工艺流程,验证不同节拍下单个电源点的充电时间,涂胶、自动拧紧等静止装配的自动化工作站的停止时间等。

##### 3.1.2 仿真平台选择

本文选用西门子Plant Simulation 16.0版本仿真软件,该款软件为建模、仿真运行和显示提供了图形化与集成化的工作环境,可对工厂生产线生产瓶颈、AGV选型对生产效率的影响等进行分析,得出最优的解决方案。软件可提供各种类型的模块库,针对不同规划方案的实际特点进行分析。

##### 3.1.3 仿真输入数据

仿真模型基于输入的规划数据运行,因此,输入数据的准确性直接决定仿真模型的准确性和可靠度,在开展仿真建模前需根据仿真的目的梳理需要输入数据的清单,按照数据清单收集数据并复核数据准确性,根据仿真目标,需要的仿真基础数据如表1所示。

#### 3.2 AGV系统模型搭建

##### 3.2.1 模型结构设计

总装车间包含多个线体和功能模块,为保证模型的清晰性和高效性,建模时首先需要设计模型结构,遵循清晰、高效和灵活的原则,即结构设计应反映总装车间功能模块之间的关系,保证不同模块间的协调配合,同时满足模型变化和扩展的需求<sup>[2]</sup>。

因此,模型结构按照“车间主模型-单线体模型-模型对象”的方式进行设计,建模时应按照模块化分层式建模,类库中的文件夹通常分为3个层

级,如图 4 所示:

- a. 第 1 层(红色框标注)为总文件夹,以车间名称命名,本次项目分为工艺和物流 2 个文件夹。
- b. 第 2 层(绿色框标注)分为模型(Models)文件夹和对象(ModelObject)文件夹,模型文件夹内创建工厂/车间主体框架及建模者定义的下一层级框架,对象文件夹内创建建模所需的基础对象。
- c. 第 3 层(蓝色框标注)包含次级框架和基础对象,根据实际情况进行分类存放。

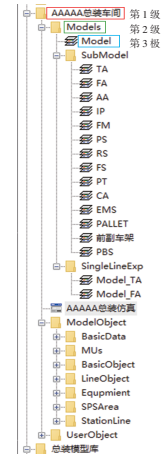


图 4 AGV 产线主模型

表 1 生产系统模型输入数据列表<sup>[1]</sup>

结构数据	类型数据	具体功能数据
技术数据	车间结构数据	车间布局图
		生产方式:连续生产方式(自动化工作站除外)
		工艺流程
		约束:环境、人机工程
	制造数据	作业时间
		制造产能
		工艺逻辑
	物流数据	工序、工位节距、AGV 安全间距
		物流配送路线
		物流设备参数
风险意外数据	工位缓存需求	
	功能失效:通信故障、地码丢失、硬件故障	
	当前可用性	
组织数据	工作时间组织	生产时间、换班时间
	资源分配	输送资源:各个线体的对接要求
工艺设备资源:自动化工作站、工艺设备		
质量资源		
工具资源		
系统负载数据	产品数据	产品资源:不同产品工时
		AGV 外形尺寸
		AGV 性能:速度、加速度
		电池性能:基本耗电量、驱动电量、充电电流、保留电量、电池容量
		设备开动率:可用性、平均维修时间

### 3.2.2 模型类库搭建

模型结构创建完成后,根据生产车间的特性,对建模所用的对象进行分类,创建对应的类库。

Plant Simulation 对象有继承类属性的特性,建模时提取相同逻辑的模块建立一个类,模块的工艺逻辑、物流消耗等功能在类中完成,在对模型进行完善时,只需要对类进行操作,对应的实例对象继承的属性值均会随之改变,这种特性可以提高建模的效率,减少建模工作量。

创建模型类库时先将具有相同逻辑的功能模块划分为一个类,可分为如下类型:

- a. 根据区域属性,在类库中将工艺线分为多个子模块,将工艺模型分为内饰线(TA)、底盘线(CA)、完成线(FA)、车门线(DA)、前端模块线(FM)、仪表线(IP)、发动线(PT)等模块,如图 5 所示。

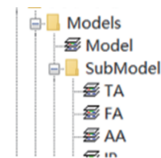


图 5 属性子模块

- b. 按功能属性,可将具有相似功能的生产对象作为一类对象,如各类产线对象,如图 6 所示。

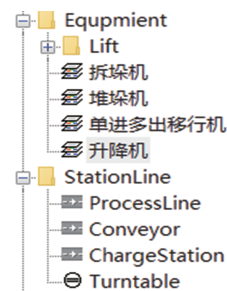


图 6 功能子模块

c. 基础数据:在模型中把基础数据输入单独的Frame中,并进行分类管理,如图7所示。



图7 基础数据列表

### 3.2.3 导入基础数据

根据车间规划方案,计算得出表1中的数据,详细得出各个转接位置、自动化工作站、充电桩处、轴距切换工位、同步化物流小车(Set Patrs System, SPS)上线点等位置的AGV运行速度及停止时间。将各线体的速度导入主模型表格,并设置AGV的基础参数,如图8、图9所示。

idmg	idmg	idmg	idmg
区域	对象	属性	值
3	操作台	操作台	运行速度m/s
4	内物线	内物一上段	0.7
5	内物线	内物一中间	0.7
6	内物线	内物一中间	0.073333
7	内物线	内物一中间	0.6
8	内物线	内物一中间	0.7
9	内物线	内物一中间	0.073333
10	内物线	内物一中间	0.7
11	内物线	内物一下段	0.7
12	充电桩	充电桩	0.073333
13	加速段	加速段	0.6
14	加速段	加速段	0.6
15	内物一上段	内物一上段	0.7
16	内物一上段	内物一上段	0.33
17	内物一上段	内物一上段	0.6
18	内物一上段	内物一上段	0.2
19	内物一上段	内物一上段	0.33
20	内物一上段	内物一上段	0.6
21	内物一上段	内物一上段	0.073333
22	内物一上段	内物一上段	0.6
23	内物一上段	内物一上段	0.6
24	BMS	BMS	0.44
25	BMS	BMS	0.4
26	BMS	BMS	0.073333
27	BMS	BMS	0.4
28	BMS	BMS	0.4
29	BMS	BMS	0.4
30	排盘线	排盘线	0.6

图8 AGV基础参数

图9 AGV电量参数设置

## 3.3 搭建模型

### 3.3.1 导入AGV线体布局图

利用仿真软件Plant Simulation进行建模,将车间CAD图按照1:1的比例导入软件中,根据平面布局图搭建AGV运行路径,标注出线体转接点、充电桩、SPS小车的上下点、自动化工作站等对应关键位置点。

### 3.3.2 物理模型搭建

从类库中拖放合适的类别到模型中,按生产线实际

情况对模型进行布局设置,按照工艺流程对模型中的各个实体建立关系连线并进行相关的参数设置。

### 3.3.3 逻辑模型搭建

仿真模型逻辑是整个模型的核心,逻辑可以分为规则和参数,并遵循规划的实际方案:

a. 规则是物流规划方案中车间实体的运行方案,决定车间各实体的行为和交互方式,如车体的传送方向、工位对车体的处理方式等。

b. 数据是模型运行中存储和处理信息的方式,包含静态数据、动态数据和事件数据等。

数据和规则的相互作用决定模型的运行方式和结果。数据和规则通过Sim-Talk语言编写程序对模型进行控制,图10所示为AGV充电和运行速度控制函数。

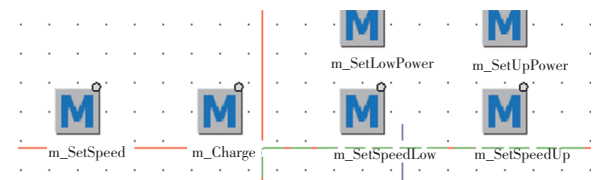


图10 AGV速度控制参数

### 3.3.4 UI交互界面

Plant Simulation软件的Dialog支持二次开发,根据用户的需求,开发用户界面(User Interface, UI)操作界面,开发遵循易用性和完整性的原则,通过UI实现对仿真模型的参数修改、仿真结果的优化和输出等<sup>[3]</sup>。本平台的UI支持直接导入本地Excel数据和从车间MES数据库导入物料清单(Bill Of Material, BOM)、工艺数据。

按照上述步骤和原则搭建装配车间模型,如图11所示。

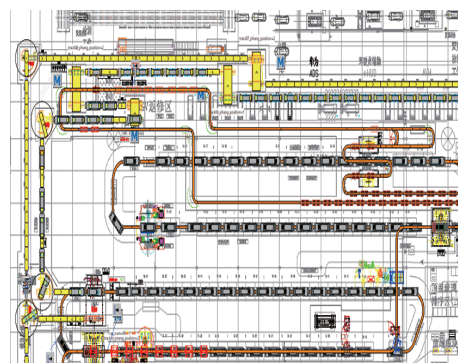


图11 总装车间AGV产线2D模型

## 3.4 仿真试验设计

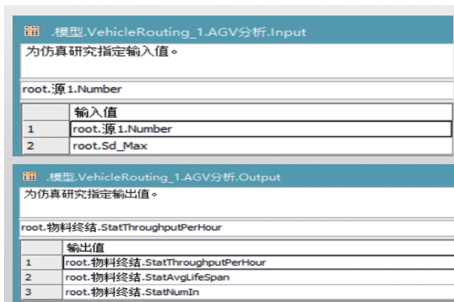
模型创建完成后,需要进行仿真试验来分析

并优化最初制定的仿真目标。在研究过程中,采用试验设计(Design Of Experiment, DOE)工具,找出影响试验结果的可能因子,通过改变输入因子变量,研究对输出结果的影响,从而找出最佳的投资方案。本文以内饰线为例,利用 Plant Simulation 提供的试验管理器,分析线体的瓶颈工位、AGV 数量及电池选型对节拍的影响,并比较不同方案下的仿真运行结果。

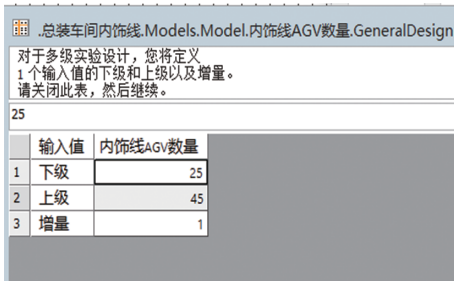
线体 AGV 投入数量和电池电量直接影响生产线的生产能力、运行效率和投入成本。因此,为模型设置 AGV 数量、电池电量后进行分析。修改生产节拍、AGV 参数(速度、加速度、充电电流)等后运行模型得到结果,同时查看自动参数被更改后对模型产生的影响。

### 3.4.1 AGV 数量与生产节拍试验设计

模型中初始 AGV 数量为 36 台,运行模型可知车间产能不满足规划的要求。为该模型设计一个试验管理器,仿真时间为 24 h,以分析模型的最大承载车辆(假设电池满足使用要求),使系统运输效率达到最高。试验管理器的输出值(每小时吞吐量、货物平均寿命、产量)、输入值(发车数量)和试验设计增量如图 12 所示。



(a)输出值与输入值



(b)试验设计增量

图 12 AGV 数量分析模型输入、输出及增量

### 3.4.2 AGV 电池选型与节拍试验设计

参照 AGV 数量仿真,建立 AGV 电池仿真模

型,通过多个仿真试验确定最佳的充电电流。根据输出产能与 AGV 电流的关系确定最佳的充电电流。

首先定义一个输入值、输出值,如图 13 所示。

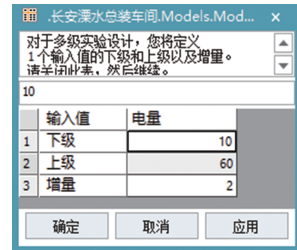


图 13 AGV 电池电流试验设计增量

设定连续仿真时间为 24 h,试验次数为 26 次,每个试验的观察次数改为 3 次,单次试验取 3 次观察值的平均值作为目标观察值的输出结果。

## 4 仿真数据分析

模型设计完成后将车间信息管理系统中的生产节拍、装配明细加载到模型中,仿真结果能直观展示影响节拍提升的瓶颈工位、不同生产节拍最优 AGV 的数量、AGV 的电池使用情况。通过分析仿真结果,确认影响节拍提升的瓶颈工位,制定优化措施并通过仿真计算得出科学且贴近现实情况的 AGV 产线配置方案。

### 4.1 分析影响节拍提升的瓶颈工位

如图 14 所示,随着 AGV 数量的增加,产能逐步提升,当 AGV 数量为 38 台时,系统产能最高,为 33.6 JPH,AGV 数量继续增加产能反而降低。

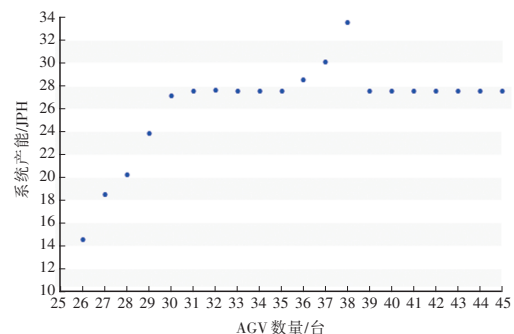


图 14 AGV 数量与生产节拍关系

该生产线设计节拍为 40 JPH,数据落差较大,原因是此系统的自动化工作站、线体转接工位和 SPS 小车上下点等位置通行时间长,车辆易堆积,产生瓶颈工位。

利用瓶颈分析器,得出自动化工作站、线体转接工位和SPS小车上下线点等位置的统计信息,输出不同工位的利用率,发现自动化工作站、物料小车上线点的利用率最高,且该工位前的工位存在堵塞,后工位存在等待,所以确定该工位为内饰线的瓶颈工位,如图15中红色框图所示<sup>[4]</sup>。

已按照工作时间、故障时间与暂停时间之和排序

object	real 2	real 3	real 4	real 5
1 资源	工作中	已设置	等待中	已堵塞
2 玻璃自动装配	4.35	0.00	70.73	24.92
3 SPS小车上线点	12.79	0.00	69.84	17.36
4 root.轨道11	12.07	0.00	70.72	17.21
5 root.进车工位	1.66	0.00	85.23	10.09
6 root.充电4	1.74	0.00	88.50	9.76
7 root.充电工位6	1.74	0.00	92.36	5.89
8 root.充电工位5	1.93	0.00	92.65	5.42
9 root.轨道3	9.50	0.00	85.59	3.91
10 root.轨道2	6.45	0.00	88.08	3.47
11 root.合流	1.93	0.00	96.32	1.75
12 root.轨道12	1.86	0.00	96.53	1.61
13 root.轨道8	3.17	0.00	95.53	1.30
14 root.轨道10	1.01	0.00	97.91	1.08
15 root.轨道9	1.79	0.00	97.28	0.93
16 root.物料堆垛	0.00	0.00	100.00	0.00
17 root.充电工位2	0.13	0.00	99.87	0.00
18 root.切割工位	0.44	0.00	99.56	0.00
19 root.充电工位7	0.56	0.00	99.44	0.00
20 root.轨道4	1.01	0.00	98.99	0.00
21 root.充电工位3	1.53	0.00	98.47	0.00
22 root.自动化工位	1.99	0.00	98.01	0.00
23 root.轨道13	2.06	0.00	97.94	0.00
24 root.充电工位2	4.89	0.00	95.11	0.00
25 root.轨道14	11.61	0.00	85.39	0.00
26 root.轨道7	20.86	0.00	79.14	0.00
27 root.接车工位	75.70	0.00	24.30	0.00
28 root.轨道5	81.23	0.00	18.77	0.00
29 root.轨道	86.70	0.00	13.30	0.00

图15 AGV内饰线瓶颈工位

结合生产实际情况分析,制定以下措施以提高产线的节拍:

- a. 优化自动化工作站点位间移动时间,各个关键点位间的移动时间可降低约20 s。其中,对接点减速距离由1 m调整为0.5 m,离开充电点开始加速距离由1 m调整为0.2 m;优化AGV与产线、工艺设备的信息交互方式,由静止状态交互调整为移动交互,减少数据交互等待时间。
- b. 自动化工作站前增加一个缓存,减少10 s等待时间,同时挤胶工位等待车辆不进入,避免玻璃提前挤胶,规避质量风险。
- c. 优化SPS小车上下线速度,在SPS小车上下线工位增加工艺速度(速度为100 mm/s),弥补静止对接的时间,实现AGV举升台移动中升降,减少相互等待。

将改进后的参数更新至仿真模型中,通过对改善前、后的输出数据可知,内饰线的瓶颈工位已消除,内饰线的运行节拍平顺。

#### 4.2 AGV投入台数分析

首先对新的模型进行AGV数量分析,得到图16,由图16可知,当AGV数量为40台时,系统产能最高,为39.918 JPH,综合考虑生产的实际情况和成本,在现有36台AGV的基础上新增6台(40台线体运行,2台备用)。

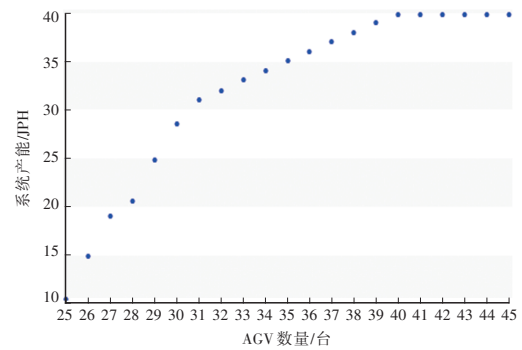


图16 AGV数量与生产节拍关系

#### 4.3 AGV电池充电电流分析

在进行AGV设计时,需要选择合适的电池容量和充电电流,通过运行试验管理器得到AGV数量与生产节拍的关系,如图17所示。

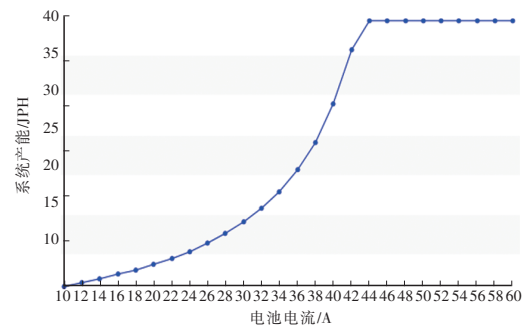


图17 AGV电池电流与生产节拍关系

由图17可知,当电池电流为46 A时,节拍为39.6 JPH,满足设计目标。考虑到现场的使用效率和极端天气,充电电流需达到69 A(48/0.7=69 A,充电效率为0.7),为满足规划要求,需要更换AGV电池(现方案电池电流为50 A)。

根据仿真结果,更换AGV电池增大AGV的电池容量(由50 A·h变为100 A·h),同时更换充电桩提升充电电流(由50 A提升至100 A),单个充电桩的充电时间可降低20 s,满足现场的使用要求。

### 5 结束语

以某工厂的总装车间生产系统的AGV输送线为研究对象,建立AGV输送系统仿真模型和AGV输送系统的评价指标,并通过优化措施使得AGV生产线满足设计节拍,主要成果如下:

- a. 搭建生产线2D仿真模型,按照任务清单对不同节拍下的AGV运行速度、电池选型、充电时间进行分析,确认影响节拍提升的瓶颈工位,制定优化措施满足规划要求。

b. 对消除瓶颈工位后的 AGV 输送线路进行建模分析,根据任务清单及 AGV 单体配置,得出内饰线线体的最大产能和最优的 AGV 投放数量。

c. 利用 Plant Simulation 软件构建 AGV 输送系统仿真模型功能模块,按需调整生产节拍、运行速度、停留时间等参数,通过试验管理器对 AGV 的基础数据 (BatCapacity、BatDriveCons、BatBasicCons、BatChargeCurrent) 的运营性能进行评估,验证可行性。

d. 根据设定的工艺流程,采用 DOE 优化产线的 AGV 数量和电池选型,验证不同节拍下自动化

工作站、充电点等重点工序的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 于佳乔,张孜毅,李岩. 基于 Plant Simulation 的车间调度优化仿真[J]. 长春工业大学学报, 2021, 42(3): 53-58.
- [2] 郭家兴,袁逸萍,王波,等. 基于 Plant Simulation 的装配车间仿真优化研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(1): 129-130.
- [3] 宋文,索鸣阳,杨杏梅,等. 基于 Plant Simulation 的航空用柔性制造系统仿真优化[J]. 机电工程技术, 2023, 52(2): 273-277.
- [4] 李世荣. 数字化工厂实践指南 Plant Simulation 系统仿真与建模手册[M]. 北京: 北械工业出版社, 2021.