基于Plant Simulation的焊装车间物流仿真优化研究

董功杰 段宇 支昕

（北京奔驰汽车有限公司 车身与喷漆规划部，北京 100000）

摘要：随着汽车工业加速向智能化、数字化与柔性化转型，以Plant Simulation为核心的物流仿真技术逐渐成为工厂物料流设计与产能输出优化的核心工具，以某车型焊装车间为例，系统解析了物流仿真技术原理、业务流程、项目前提、模型搭建，重点探讨了整线输出仿真、单因子多级试验、多因子交叉验证等仿真优化场景，综合介绍了物流仿真技术的两大前瞻动态：按序生产、数字孪生与物联网（IoT）数据实时联动。

关键词：物流仿真 物料流设计 产能优化 数字孪生

中图分类号：N945.13 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250209

Research on Optimization of Body Shop Material Flow Simulation Based on Plant Simulation

Dong Gongjie, Duan Yu, Zhi Xin

(Body & Paint planning, Beijing Benz Automotive Co., Beijing 100000)

Abstract: As the automotive industry accelerates its transformation toward intelligence, digitalization, and flexibility, logistics simulation technology centered on Plant Simulation has gradually become a core tool for factory material flow design and production capacity optimization. Taking the welding workshop of a specific vehicle model as an example, this paper systematically analyzes the principles, business processes, project prerequisites, and model construction of logistics simulation technology. It focuses on discussing simulation optimization scenarios such as full-line output simulation, single-factor multi-level experiments, and multi-factor cross-validation. Additionally, it comprehensively introduces 2 forward-looking trends in logistics simulation technology: sequential production for cost reduction and efficiency improvement, and real-time linkage between digital twins and Internet of Things (IoT) data.

Key words: Material flow simulation, Process flow design, Capacity optimization, Digital twin

1 前言

焊装车间作为汽车生产流程的核心环节，具有高度自动化、工艺流程复杂、工装设备繁多、动态波动、随机离散的特点，传统焊装车间的工艺流程设计多依赖经验与静态分析，难以应对生产过程中动态波动、随机设备故障、物料供给延迟、人为组织等问题，不能对产能输出、节拍、物料流控制、硬件投资进行科学论证和充分验证，易出现前期规划硬件过度投资、柔性预留不足、节拍不均衡等系统性缺陷，后期量产阶段演化为产能输出不足、生产线瓶颈频现、利用率不足等问题。因此，如何通过先进仿真技术实现生产工艺流程的精准建模、多级试验、动态优化，成为提升工艺设计合理性、投资决策精益性以及生产控制智能化的重要课题。

近年来，物流仿真技术凭借其对复杂系统的动态模拟与预测能力，成为制造系统仿真和优化的有效工具[1]。清华大学团队将遗传算法（Genetic Algorithm，GA）嵌入Plant Simulation，自动优化生产

作者简介：董功杰（1994—），男，工程师，硕士学位，研究方向为汽车车身规划、轻量化连接、物流仿真、质量体系。

参考文献引用格式：

董功杰，段宇，支昕. 基于Plant Simulation的焊装车间物流仿真优化研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(4)：64-72.

DONG G J, DUAN Y, ZHI X. Research on Optimization of Body Shop Material Flow Simulation Based on Plant Simulation[J]. Automobile Technology & Material, 2026(4): 64-72.

线节拍平衡,浙江大学开发了基于Plant Simulation的人因工程模块,评估工人操作疲劳度对物流效率的影响。美国密歇根大学利用强化学习(Reinforcement Learning,RL)训练Plant Simulation模型,自动生成高鲁棒性布局方案,波音公司通过Plant Simulation模拟复合材料装配线的物流延迟问题,缩短交付周期15%。

Plant Simulation以其模块化建模、可视化分析及多目标优化功能,提供了从布局设计、物料流控制、输出验证、硬件优化、产能提升的全流程解决方案,通过丰富的模拟试验、定量验证、数据分析,为制造系统的设计优化、硬件投资、持续改进提供科学决策依据[2]。

2　焊装车间物流仿真

2.1　Plant simulation仿真原理

Plant simulation平台提供了制造业常见的流程类、离散类作业场景,将复杂制造系统分解为各个子模块,引用相应的通用组件(如装配工位、先进先出缓存等)实现模块中基础元素搭建,再通过标准逻辑块或内置编程语言(Simtalk)定义元素间的行为和交互规则。

仿真过程中的模块时间基于事件驱动,而非固定时间、节拍的累积,仿真基于引擎、逻辑的触发实现工序的运转以及元素属性状态的更新。

该仿真平台支持多种概率分布(正态分布、均匀分布、三角分布等)生成随机事件,以模拟工装设备故障、零件导入导出、质量报警、质量返修等不确定性事件。

平台提供多场景的试验管理器和二次开发算法,自动运行模拟单因子、多因子试验,以寻找最优参数组合。

通过多次仿真试验模拟,充分考虑各种随机事件的可能,避免单一偶然事件对结果产生过大干扰。借助方差分析、假设检验等统计方法,进一步验证和优化仿真数据,提高结论的可信度[3]。

2.2　物流仿真业务流程

以焊装车间为例,根据项目所处时期不同,参考"P(概念)-D(设计)-C(验证)-A(优化)"循环,物流仿真业务一般可分为4个阶段。

2.2.1　概念阶段

概念阶段发生在新项目立项后、招标定标前,基于初步的规划前提、工艺信息、工厂布局、控制概念、输送概念,以整体输出可行性为目标,初步确定工艺分布、控制概念、输送概念、缓存数量,以指导项目招标、定标。

2.2.2　设计阶段

设计阶段发生在详细设计开始后、设备安装(或设计冻结)前,基于生产线各模块详细的工艺设计输出,以稳定的产能输出、精益的设备投资为目标,进行分装与整线仿真模拟,并从控制概念、缓存位置、缓存数量、安全区设计、节拍分配等方面进行试验优化。

2.2.3　验证阶段

验证阶段发生在调试爬坡开始后、批量投产前,提取生产线实际节拍状态导入仿真模型,以验证产能输出、优化线体瓶颈和平衡资源利用率。

2.2.4　优化阶段

该阶段聚焦批量生产阶段,以产能提升、工程改造、新车型集成为输出前提,基于原有仿真模型和当前节拍状态进行仿真试验并设计优化方案。

采用"输入-活动/技术-输出"标准模型,物流仿真业务可解析为表1所示流程。

表1　焊装车间物流仿真业务流程

输入	活动/技术	输出
1.项目前提	1.分线体模型搭建	1.分线体输出结果
2.产品/变种信息	2.整线模型搭建	2.整线输出结果
3.工艺设计	3.控制方案编程	3.输送/缓存数量
4.平面布局	4.单/多因子试验	4.安全区优化方案
5.静态开动率标准	5.缓存/安全区优化	5.spp仿真模型
6.生产线控制概念	6.输送线/返回线模拟	6.开动率计算表
7.输送方案		7.物流仿真报告

3　焊装车间物流仿真模型搭建

3.1　仿真前提

3.1.1　物流仿真环境

焊装车间物流仿真软件和模拟条件如下:

a. 软件：基于西门子 Plant simulation 16.1 平台。

b. 仿真周期：合计49天，统计并分析后42天模拟数据，考虑到铺线等因素，前7天数据不计入分析。

c. 工作时间：每天工作时间为1 440 min。

d. MTTR：设备故障平均修复时间为390 s。

e. 试验器模拟次数：5次，取5次结果的平均值，提升可信度。

3.1.2 焊装车间工艺流程

焊装车间是典型的流程类、流水线式作业，各大汽车主机厂焊装车间的工艺流程较为类似，在加工深度、工艺流向、控制概念上存在细微差别[4]。某焊装车间工艺流程如图1所示。

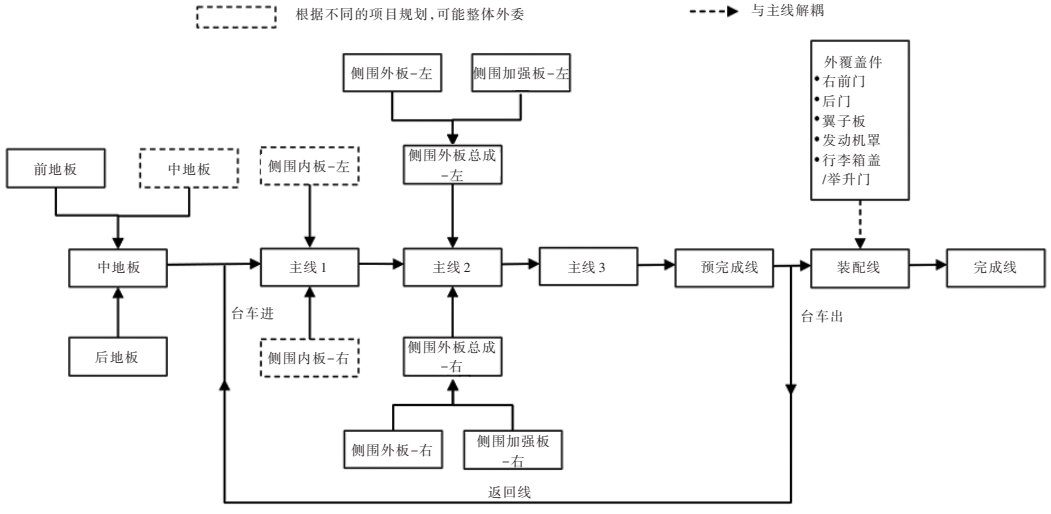


图1 某项目焊装车间工艺流程

3.1.3 新车型项目规划前提

新车型项目的车型变种、节拍要求、推动因子等规划前提是影响线体设计、物流仿真的关键因素。

a. 规划节拍：A项目规划为30 JPH。

b. 车型变种：A项目为新建工厂项目，规划为1+X双车型（A+X），一期为A车型，设计时需充分考虑第二车型工艺预留。应当注意的是，地板、侧围等总成级别涉及混动、7座、高低配、充电口、左右舵等变种类型，最终影响相应的变种控制逻辑、缓存设计，同时也是物流仿真的重点和难点。

c. 推动因子：指目标区域相较于整体车间在输出能力上的推动系数或超出比例。焊装车间多采用推动式生产，分装推动主线，后序推动前序。目前，本文中的项目采用2种推动因子，一是主线3%（如地板主线），分装5%（如侧围外板总成），二是前序主线1%/分装3%，中序主线2%/分装4%，后序主线3%/分装5%。相较于第1种推动因子设定，第2种方案产能输出更稳健，硬件投资更低。

以A项目为例，规划产能为30 JPH，考虑到推动因子，各子模块的节拍计算如表2所示。净节拍数值作为工艺设计时工位的节拍上限，毛节拍作为物流仿真模拟的工位节拍时间，考虑到实际生产过程中焊接工艺会有周期性换帽修磨损耗，折合后净节拍比毛节拍低2 s。

表2 各区域目标节拍核算表

	区域	推动因子/%	目标输出/s	毛节拍/s	净节拍/s	区域输出/s
后序	地板主线	3	30.9	99	97	31.2
	前端	5	31.5	97	95	
	后端	5	31.5	97	95	
	中地板	5	31.5	97	95	
中序	主线1	2	30.6	100	98	30.9
	主线2	2	30.6	100	98	
	主线3	2	30.6	100	98	
	侧围内板	4	31.2	98	96	
	侧围外板	4	31.2	98	96	
	侧围加强板	4	31.2	98	96	
前序	装配线	1	30.3	101	101	30.3
	外覆盖件	6（含备件）	31.8	96	94	

3.1.4　开动率核算

焊装车间设备整体效率（Overall Equipment Effectiveness，OEE）设定为85%，设计阶段要求单独安全区域内技术开动率（设备开动率累积）不低于90%，基于项目/规划前提不同，有以下2种特殊情况：

a. 利旧项目考虑到设备状态，OEE设定为80%。

b. 项目投产后考虑到工艺、设备、质量趋于稳定，组织、人员、技能趋于熟练，设定OEE目标为90%。

仿真模型中各工位的静态开动率需根据工装设备类型、数量，基于静态开动率标准（表3）进行累积计算。

表3　工装设备静态开动率标准表（示例）

序号	设备类型	设备/工装	静态开动率/%	备注
1	机器人及附属	机器人	99.95	
		7轴	99.85	
2	工具端设备	自动螺柱焊	99.00	机器人，旋转双头
		自动螺柱焊	99.20	固定，旋转双头
		涂胶系统	99.00	机器人，单组份
		涂胶系统	99.60	固定，单组份
3	抓手	Best-fit抓手	99.80	
		搬运抓手	99.70	11~20个夹头
4	工装	定位工装	99.70	11~20个夹头
		补焊工装	99.90	1~10个夹头
5	输送机构	横向移栽机	99.80	
		滚床	99.83	

3.2　模型搭建

3.2.1　单工位模型搭建

单个加工工位有Single station和Assembly station 2种类型，Assembly station工位用于将2种及以上零件进行装配加工，二者均需要配置参数，如图2所示。

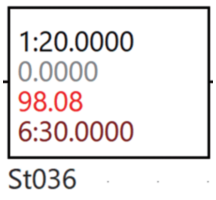


图2　单个工位标准模块

a. 工位节拍：该工位的设计节拍，取自3.1.3节表2中的毛节拍数值。

b. 静态开动率：基于静态开动率标准和工位对应的工装设备核算得出，如St036工位为98.08%。

c. 平均修复时间（Mean Time to Repair，MTTR）：取值为390 s。

需要注意的是，不同车型、不同变种在同一工位的工艺数量、设备可能不同，需通过内置的Table工具录入实际信息以提升仿真准确性。

3.2.2　缓存与输送

焊装车间涵盖多样化的缓存输送样式，包含产线内部传输、跨产线传输、二层输送。一方面用于实现总成部件在生产线间的定向流转，另一方面借助缓存机制实现产线间的解耦，有效降低、缩小、抵消因随机故障带来的生产中断。根据建模方法及功能特性的差异，主流缓存输送系统可归纳为以下3种：

a. 先进先出（First In, First Out，FIFO）缓存是主流的缓存输送类型，常见的有固定缓存、Shuttle往复式输送机构，APC积放式装配线等。

b. 调序Sequence缓存，用于实现总成的自动排序、匹配和调取，常见类型有旋转Buffer、横移库、固定缓存+机器人移动抓取。

c. 二层输送缓存，常通过高速滚床和台车的组合实现。开始端实现地板总成和台车的组合，中间部分是常规FIFO缓存，结束端实现白车身和台车的分离。

3.2.3　物料流控制

生产线中的总成零件并非单一、固定的物料流向，存在各种复杂的变种匹配、生产控制、比例控制等，典型的物料流控制类型如下：

a. Kanban控制是主流的控制概念，常用于多种车型或多种变种生产环境下分总成与总成的变种匹配，如前端、后端、中地板和地板总成的匹配，以及侧围内板、侧围外板和车身骨架的匹配，如图3所示。

b. Trigger控制是一种可跨生产区域，远距离变种和生产序号精确匹配的控制方式。如在地板总成末端读取地板的变种类型和生产序号，通

过数字化系统触发侧围内板总成线首工位对应变种和对应生产序号总成的生产，实现主线 1 侧围内板总成和地板总成的精准匹配。相较于 Kanban 控制系统，该控制方式需跨生产线信息交互系统支持，但能够有效降低缓存数量和空间占用。

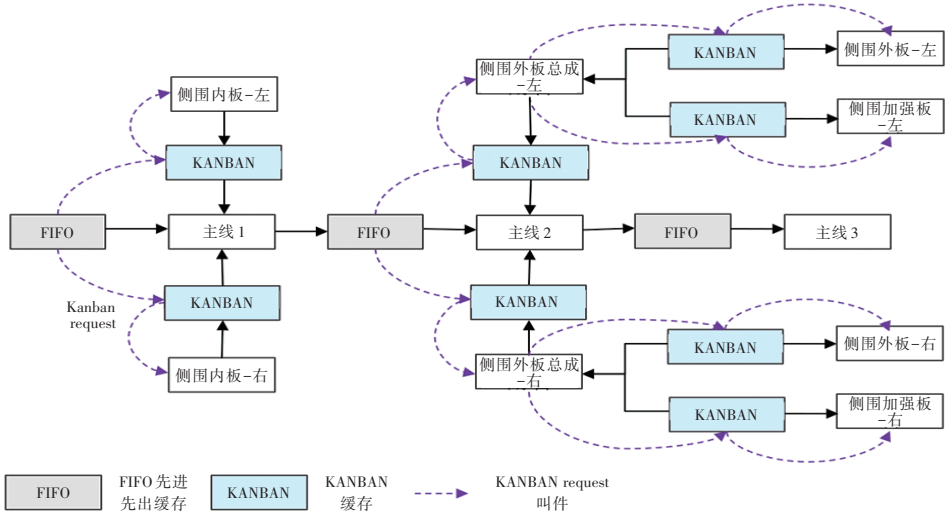


图 3 侧围内外板总成与车身骨架匹配控制

3.2.4 Simtalk 编程

Simtalk 是 Plant simulation 平台内置的面向对象的脚本语言，用于控制仿真逻辑、自定义行为、数据处理和模型交互。

实际生产过程中存在随机事件，一定程度上影响产能，如质量抽检、缺陷返修、在线测量、报废等。仿真模拟需对随机事件进行合理设计搭建，最大程度贴近真实生产场景。

以完成线为例，完成线分为红线（一次装配不合格，需调整）、绿线（一次装配合格，不调整），一次装配合格率随着质量状态会发生变化，对应在仿真模型中需引入 Simtalk 语言进行快速编程控制，图 4 所示为基于 Simtalk 语言实现红绿线比例分流控制的代码段。

```
is
do
    if @.isNameUnique("Finish_status") then
        @.erzeugeAttr("Finish_status","string");
    end;
    if z_gleich(1,0,100) <= Red_portion then
        -- Rotband
        @.Finish_status := "red";
    else
        -- Grünband
        @.Finish_status := "green";
    end;
end;
```

图 4 通过生成随机数实现百分比分流控制程序

随着各区域工艺设计、整线控制概念逐步确定，A 项目焊装车间仿真模型如图 5 所示。

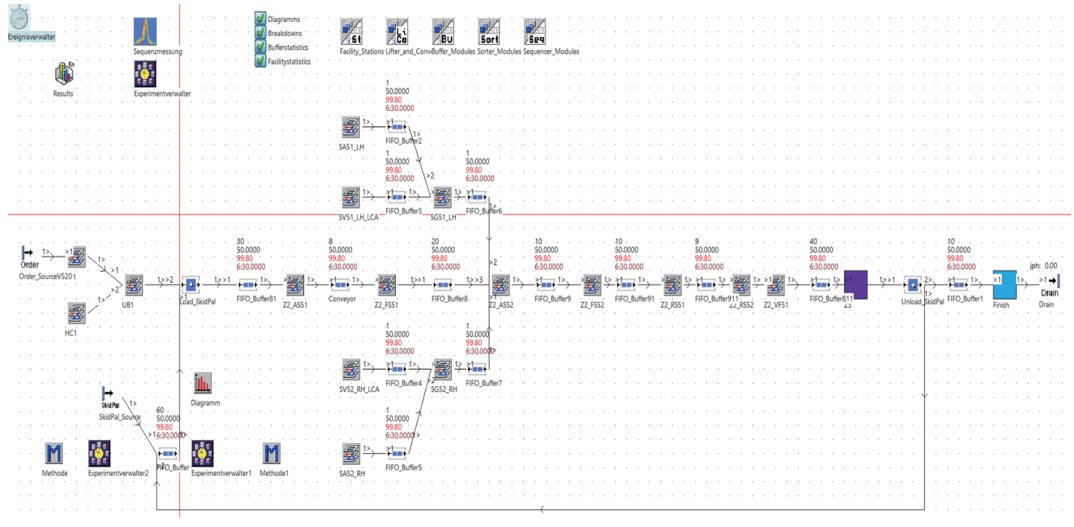


图 5 A 项目焊装车间整体物流仿真模型

4　多场景仿真试验与优化

4.1　整线产能输出仿真优化

新车型项目进行物流仿真时,通常先分区域进行仿真验证和优化,在分区域达成目标节拍后,再将各区域串接进行模拟验证,最后对具体输送类、缓存类、控制类问题进行单独试验器分析。

4.1.1　分装区域产能输出仿真和缓存分析

以A项目侧围及主线区域为例,经过多轮试验优化,最终节拍输出如表4所示,整体输出为31.13 JPH,满足设计节拍要求。

表4　A项目侧围及主线区域仿真模拟结果　JPH

区域	目标节拍	仿真节拍
主线1	30.6	32.95
主线2	30.6	31.46
主线3	30.6	34.23
侧围内板总成-左	31.2	32.85
侧围内板总成-右	31.2	32.85
侧围外板-左	31.2	34.5
侧围外板-右	31.2	34.5
侧围加强板-左	31.2	33.21
侧围加强板-右	31.2	33.21
预完成线	30.6	39.95
整体(侧围+主线)	30.9	31.13

线内、线间缓存数量是影响最终输出的重要因素,结合仿真试验、多轮优化,获得表5所示结果。基于精益投资、占地面积优化等前提,每组缓存的具体数量均可通过单因子试验模拟分析、确定。同时,通过Diagram图表管理器来查看每组缓存的占用情况,如图6所示,主线1-主线2缓存占用分布均匀,20个缓存被全部占用的概率小于10%,缓存不足的风险很低。

表5　A项目侧围及主线区域缓存数量仿真结果

缓存位置	缓存数量	备注
主线1→主线2	20	无调序功能
主线2→主线3	10	无调序功能
主线2→预完成线	10	无调序功能
侧围内板总成→主线2	18+18	Kanban缓存
侧围内板→侧围内板总成	10+10	Kanban缓存
侧围加强板→侧围内板总成	10+10	Kanban缓存

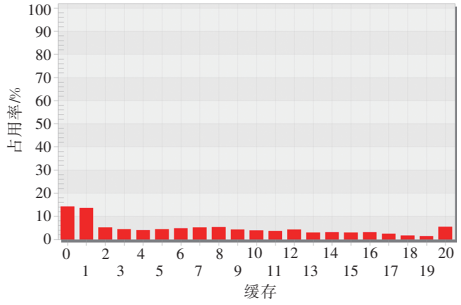


图6　FIFO缓存占用率分布

4.1.2　整线产能输出仿真和分析

在各区域详细设计、仿真模拟达标的基础上,针对焊装车间整线进行仿真模拟,同步将控制概念、缓存设计、随机事件均考虑在模型内,试验模拟结果如图7所示,输出节拍均值为30.32 JPH,满足规划节拍(30 JPH)要求。

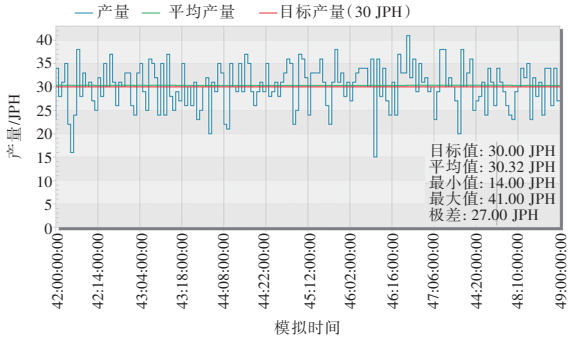


图7　A项目焊装车间整线输出分布

单车加工时间(Lead time)指从首工位开始至末工位结束所需要的时间,体现在仿真模型中即为零件离开输入源(Order source)到达输出(Drain)的时间。以A项目装焊车间整线仿真数据为例,Lead time加工时间平均值为385 min,最短时间为273 min,最长时间为519 min,如图8所示。

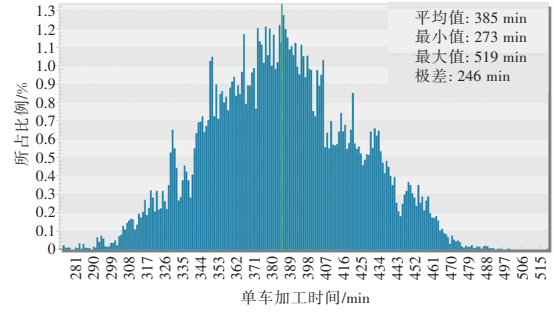


图8　单车加工时间分布

在制品数量(Work in Process)指整个车间生产线内在制品数量总数,体现在仿真模型中为零件(Part)离开Order source到达Drain过程中的总数。以A项目装焊车间整线仿真数据为例,在制品数

量平均值为195个，最低为151个，最多为238个，如图9所示。

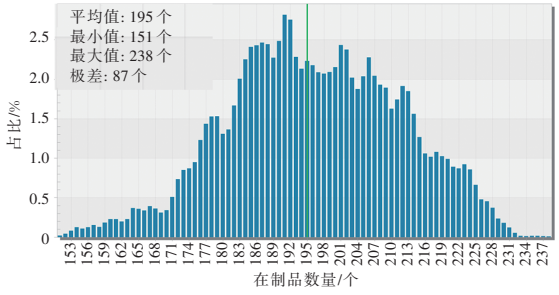


图9 在制品数量分布

4.1.3 产能输出提升优化路径

整线仿真模拟是循序渐进、持续更新的过程，一方面工艺详细设计在逐步清晰，另一方面节拍优化方案逐步体现。在具体区域、整线仿真过程中，如遇到输出不达标的情况，可考虑以下优化举措：

a. 工艺平衡：区域内、区域间工艺点调整、平衡，以降低瓶颈工位的节拍时间。

b. 安全区优化：要求安全区域内静态开动率累积不低于90%，可拆分部分静态开动率较低的安全区。

c. 缓存优化：在厂房空间、工艺设计可行的前提下，通过仿真试验优化缓存的位置或数量，此举措虽能显著提升产能输出，但会增加投资和占地面积。

d. 提升设计节拍：在以上举措实施后仍无法达成目标节拍的情况下，可考虑提升部分区域的设计节拍（降低局部区域的设计时间（Cycle time））。

4.2 单因子试验仿真模拟

生产线间及生产线内的缓存是实现生产线间解耦、降低停机影响范围、提升生产线柔性的重要单元[5]，其中，输送系统的定位台车数量和返回线滚床数量是影响产能输出的重要因素。

4.2.1 输送系统台车仿真

以A项目输送系统的定位台车仿真模拟为例，搭建单因子模拟试验如下：

自变量x为系统中定位台车数量，假设最低值为10套，最高值为300套，以20套为增量，设计15组模拟试验。

因变量y为焊装车间整线输出能力，单位为JPH。

通过试验器模拟仿真获得结果如表6所示，当系统中台车数量为130套时，输出达到峰值30.32 JPH，考虑到正常生产过程中故障维修、备件、送检、测量等占用需求（约合计15%），建议本项目购买150套定位台车。该模拟结果将作为最终项目投资决策的唯一依据，仿真模拟既能保障稳健的系统输出，又能提升硬件投资的精益性。

表6 A项目输送系统定位台车数量模拟仿真结果

试验序号	定位台车数量/套	输出/JPH	目标/JPH
Exp 01	10	6.490 079	30
Exp 02	30	18.212 3	30
Exp 03	50	26.147 82	30
Exp 04	70	29.208 33	30
Exp 05	90	30.034 72	30
Exp 06	110	30.271 83	30
Exp 07	130	30.322 42	30
Exp 08	150	30.322 42	30
Exp 09	170	30.321 43	30
Exp 10	190	30.178 57	30
Exp 11	210	29.591 27	30
Exp 12	230	26.620 04	30
Exp 13	250	0	30
Exp 14	270	0	30
Exp 15	290	0	30

4.2.2 返回线滚床数量仿真模拟

以A项目返回线滚床数量模拟为例，搭建单因子模拟试验如下（前提是定位台车数量充足）：

自变量x为系统中返回线滚床数量，假设最低值为10套，最高值为150套，以10套为增量，设计15组模拟试验。

因变量y为焊装车间整线输出能力，单位为JPH。

通过试验器模拟仿真获得的结果如表7所示，当滚床数量超过60套时，系统输出稳健，峰值为30.32 JPH。实际进行生产线工艺设计时，可依据该试验结果进一步指导二层输送路线设计和滚床数量决策：

a. 在空间不受限且返回线滚床数量大于60个工作位的前提下，尽量通过工艺设计缩短返回线路径以降低硬件投资。

b. 在空间受限且返回线滚床数量小于60个工

作位的前提下,需考虑采取延长返回线路径(比如增加横移、旋转)、建立滚床堆垛系统等手段,以保证整线的稳健输出。

表7　A项目二层输送滚床数量模拟仿真结果

试验序号	滚床数量/套	输出/JPH	目标/JPH
Exp 01	10	28.675 60	30
Exp 02	20	29.575 40	30
Exp 03	30	29.982 14	30
Exp 04	40	30.172 62	30
Exp 05	50	30.291 67	30
Exp 06	60	30.323 41	30
Exp 07	70	30.322 42	30
Exp 08	80	30.322 42	30
Exp 09	90	30.322 42	30
Exp 10	100	30.322 42	30
Exp 11	110	30.322 42	30
Exp 12	120	30.322 42	30
Exp 13	130	30.322 42	30
Exp 14	140	30.322 42	30
Exp 15	150	30.322 42	30

4.3　双因子交叉试验仿真模拟

在生产系统仿真模拟过程中,会出现多种因子交互作用对系统性能产生重要影响的场景。传统的单因素分析方法难以全面反映复杂物流系统的动态特性,而双因子交叉试验仿真模拟能够有效评估不同因素的主效应及其交互作用,从而为决策提供科学依据。

以B项目焊装车间生产为例,该车间未来将实现F平台(规划产能占比15%)和M平台2种车型(规划产能占比85%)共线柔性生产,实现总产能33 JPH输出,但是2种平台的高精度定位台车不能共用,需单独设计和采购,2种类型的台车数量则是会影响系统输出且会产生交互作用的因子。以B项目焊装车间输出为研究对象,采用仿真建模方法,以焊装车间整体输出y、F平台输出y_f、M平台输出y_m为因变量,以F平台精定位台车数量x_a和M平台精定位台车数量x_b为双因子,进行8×11组交叉试验模拟。

自变量(双因子)x为:x_a为10~80台,步增为10台;x_b为80~200台,步增为10台。

目标为因变量总输出y≥33 JPH、y_f≥4.9 JPH、y_m≥28.1 JPH。

为减少随机误差,每组仿真试验重复3次取平均值,得出共88组含x_a、x_b、y、y_f、y_m的试验数据。借助Matlab进一步可视化数据处理,得出图10所示的双因子自变量、三因变量三维图表。

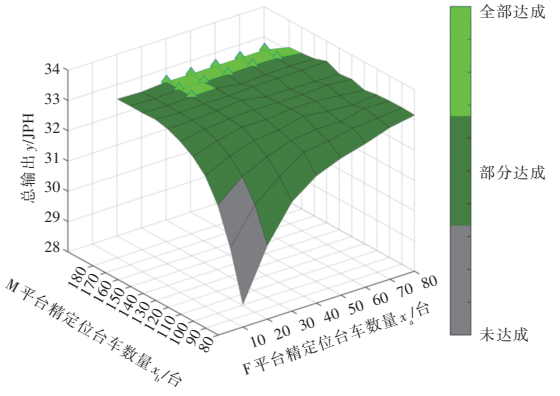


图10　B项目双因子交叉试验结果三维分析图

由图10可知,亮绿色区域同时满足y、y_f、y_m输出约束条件,对应的自变量组合(x_a,x_b)见凸起三角组合,共11组,分别为(30,160)、(30,170)、(30,180)、(40,170)、(40,180)、(50,170)、(50,180)、(60,170)、(60,180)、(70,170)、(70,180)。

基于以上仿真数据,通过添加不同的约束条件,可仿真模拟不同生产配比下最精益的自变量配比组合,从而精确指导实际的硬件投资或工程改造决策,2种常见场景如下:

a. 项目初始以整体投资最精益为前提,在满足输出约束下的精定位台车总数最低组合为(30,160),合计190套,其中F平台30套,M平台160套。

b. 项目后期F平台车型逐渐退市,M平台车型逐步上量,生产计划从15%:75%调整至5%:95%,F平台车型调整为输出1.65 JPH,M平台输出调整为31.35 JPH,通过模拟数据可得精定位台车最低组合为(10,170),在此背景下可将10套F平台精定位台车改造为M平台,既能保证达到产能输出要求,又能最小化硬件投资。

5　结束语

在制造业竞争日益激烈的背景下,按序生产(Sequential Production)成为企业优化流程、提升效率的重要策略。科学规划生产顺序能够减少设备

空转、降低切换成本，同时避免物料堆积和库存浪费。梅赛德斯奔驰集团开发并落地全新生产控制（Production Flow Management，PFM）系统，通过多个数字化系统的配合，同步将生产顺序发布至整车制造工艺、零部件供应商、物流缓存等环节，通过先进的生产控制系统，基于内部多个环节的调序功能以克服生产过程中的波动、扰动，实现生产顺序的精准控制。以焊装车间按序生产为例，物流仿真模拟将在PFM控制概念设计、调序缓存数量模拟、实时序号匹配、trigger触发系统设计、物流配送量规划等关键设计上发挥重要作用。

汽车行业正加速数字孪生（Digital Twin）与Plant Simulation技术的结合，实现物料流的高效仿真与动态优化。2024年，德国弗劳恩霍夫研究所（Fraunhofer）将Plant Simulation与物联网（Internet of Things，IoT）实时数据联动，实现生产线“预测性仿真”。数字孪生通过实时映射物理工厂的设备和物流数据，结合Plant Simulation的离散事件仿真能力，在虚拟环境中精准预测生产瓶颈、优化物流路径、潜在风险处理等，这种虚实结合的模式，不仅缩短了传统试错周期，更将生产制造系统的管理效率大大提升。

总体而言，在智能制造与降本增效的双重战略目标驱动下，汽车行业正加速推进生产模式的数字化转型。Plant Simulation凭借其在复杂系统建模、离散事件动态仿真与预测分析方面的卓越能力，将在未来生产模式创新、数字孪生技术应用、大数据驱动优化以及人工智能辅助决策等领域发挥更加关键的作用。

参考文献：

[1] 艾巍, 李传州, 朴永灿. 红旗繁荣工厂焊装车间物流系统仿真分析[J]. 汽车工艺与材料, 2021(9): 28-32.

[2] 方赫, 陆振东, 宿彪, 等. 基于Plant Simulation的冲压车间仿真优化[J]. 锻压技术, 45(12): 85-89.

[3] 武文杰. 白车身混流焊装线物流仿真和投产序列研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

[4] 张俊文. 基于Plant Simulation A公司焊装混流产线优化和排产研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

[5] 黄国安. 基于Plant Simulation的汽车混流装配线仿真研究与优化[D]. 济南: 山东大学, 2012.

AT&M