

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.004

## 智能工厂物流规划技术

刘后伦<sup>1</sup>, 何正红<sup>1</sup>, 李宝林<sup>1</sup>, 魏俊<sup>1</sup>, 汪涵<sup>1</sup>, 王炜<sup>2</sup>, 殷乾阳<sup>2</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 重庆嘉陵特种装备有限公司技术中心, 重庆 400032)

**摘要:** 为提高企业的服务能力和市场应变能力, 对智能工厂物流规划技术进行研究。通过深入调研, 按照精益物流体系进行智能物流规划技术研究, 并对方案进行验证。结果表明: 该方案能提高生产效率, 缩短制造周期, 降低库存和制造成本。

**关键词:** 精益物流; 物流系统价值模型; 生产波动模型; 生产线布局 INLP 模型; 在制品缓存分配模型; 生产调度矩阵

中图分类号: T-19 文献标志码: A

## Logistics Planning Technology of Intelligent Factory

Liu Houlun<sup>1</sup>, He Zhenghong<sup>1</sup>, Li Baolin<sup>1</sup>, Wei Jun<sup>1</sup>, Wang Han<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>2</sup>, Yin Qianyang<sup>2</sup>

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd.  
of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. Technology Center of Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China)

**Abstract:** In order to improve the service ability and market adaptability of enterprises, the logistics planning technology of intelligent factory is studied. Through in-depth research, according to the lean logistics system, the intelligent logistics planning technology is studied, and the scheme is verified. The results show that the scheme can improve the production efficiency, shorten the manufacturing cycle, and reduce the inventory and manufacturing costs.

**Keywords:** lean logistics; logistics system value model; production fluctuation model; production line layout INLP model; WIP cache allocation model; production scheduling matrix

### 0 引言

随着制造业市场竞争日渐加剧, 带来不断创新生产制造模式的迫切要求。数字化、网络化、信息化、自动化等技术迅猛进步, 共同催生了具有“高柔性、快响应、优质高效”特点的智能制造<sup>[1]</sup>。在智能制造的社会环境下, 全面地开展自动化、数字化、智能化系统建设, 可以提升企业创新能力、生产效率、产品质量, 降低产品成本, 缩短交期。为解决工厂生产过程中存在物料器具品种规格多、人工上下料、人工转运、人工存储, 导致生产现场物料存放乱、物流效率低、安全隐患多、人员劳动强度高、制造周期长的问题, 笔者对智能工厂物流规划技术进行研究, 为生产企业实现生产自动化、数字化、智能化车间<sup>[2]</sup>奠定坚实的基础。

### 1 规划原则

按照智能制造框架, 在保障安全生产的基础上, 运用精益生产的工具方法进行总体规划, 逐步实现自动化、信息化、数字化、智能化和智慧化的智能

物流<sup>[3-4]</sup>, 从而达到多品种、多型号产品生产的快速组织与实施、高效自动化流转和精益管理的目的, 规划过程遵循以下原则:

- 1) 依据生产纲领, 遵循总体规划分步实施原则;
- 2) 基于信息流驱动实物流, 批次先进先出原则;
- 3) 技术先进、安全可靠、经济实用、节能环保原则;
- 4) 基于生产少人化、无人化原则。

### 2 规划思路

通过现场调研、需求梳理、现状问题要因分析和数据分析, 基于公司发展战略, 结合公司价值导向、行业内外标杆示范实践、智能工厂建设目标、智能物流建设需求、产品及工艺特征、基础条件和资源配置要求等, 参照《智能制造能力成熟度模型》(GB/T 39116-2020)、《智能制造能力成熟度评估方法》(GB/T 39117-2020), 运用《战略与绩效管理平衡记分卡》KPI 分解、精益生产等工具、方法, 同

收稿日期: 2024-12-09; 修回日期: 2025-01-10

第一作者: 刘后伦(1970—), 男, 四川人。

时运用数字孪生和仿真优化分析工具<sup>[5]</sup>，建立从原材料入库到成品出库的智能物流系统，分阶段逐步实现项目总体规划目标。

总体规划思路：确定物流策略—搭建精益物流体系—构建物流系统规划模型—设计物流系统方案—物流系统方案优化—物流系统方案验证—方案实施。

### 3 规划流程

#### 3.1 确定物流策略

物流策略如图 1 所示。通过智能物流提高生产效率、缩短制造周期、降低成品成本，以增加利润。

$$\text{成本} = \text{售价} - \text{利润}$$

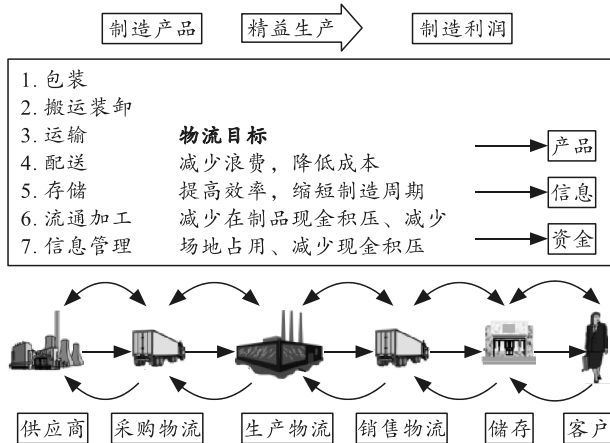


图 1 物流策略

企业运营的本质是在产品质量和交期都满足客户需求的前提下，通过扩大产品销量和降低产品成本，在开源和节流 2 方面来提高企业利润。企业生产管理的本质是在保障产品质量的基础上，通过提高生产效率和减少浪费，在节流上降低产品成本，提高产品的利润。

物流是供应链的一部分，以仓储为中心，通过包装、装卸、转运、仓储和配送等方式，实现原材料、半成品、成品及相关信息由供应商、制造商、客户所进行的计划、实施和管理，满足客户需要，促进生产与市场保持同步。

本文中的物流规划主要涉及工厂内部物流的制造业生产物流，服务于制造商的生产，对工厂内部的原材料、半成品、成品及零部件等进行存储和转运，侧重于物流与生产的对接，不涉及采购物流和销售物流。

智能物流系统追求的目标是采用精益生产的物流方式，以最低的产品成本，在正确的时间将正确的产品交付到正确的地点。

#### 3.2 搭建精益物流体系

精益物流体系<sup>[6]</sup>如图 2 所示。

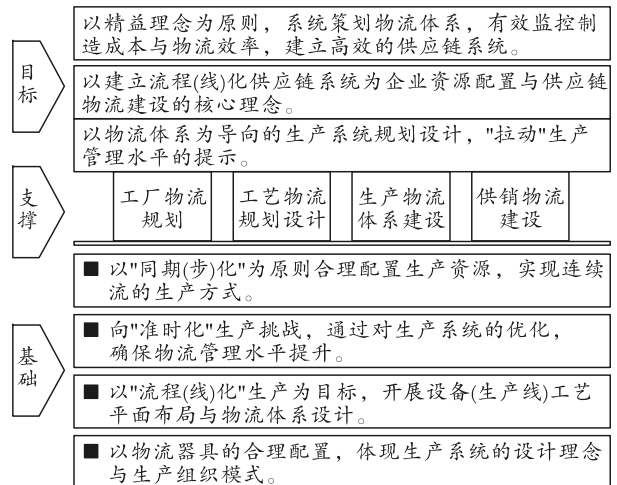


图 2 精益物流体系

以连续流、准时化、工序平衡为基础，先进的生产物流调度、合理的物流路线、匹配合适的资源配置为支撑，实现以信息流驱动实物流的精益拉动生产为目标。

通过推行精益物流，由信息流驱动实物流，打通各生产环节，运用准时化(JIT)、一个流生产和工序能力平衡，减少在制品缓存量，缩短制造周期，压缩库存量和库存时间，减少现金积压；同时通过智能物流推动设备加工自动化，通过提高设备稼动率提高设备日产能，通过班次调整对产能匹配，逐步实现各工序周产能平衡、日产能平衡、班产能平衡，从而减少固定资产投资和场地占用费用。

#### 3.3 构建物流系统规划模型

物流系统规划模型主要包括物流规划总体模型和物流系统价值模型 2 部分，分别从不同方向降低产品成本，综合提高产品利润。

##### 3.3.1 构建物流系统总体规划模型

物流规划总体模型如图 3 所示。通过分析物流规划模型中各要素的相关性、输入因素对相关输出结果的因果链、增强回路、调节回路、滞后效应的关系及影响，同时分析生产物流涉及各相关要素对物流效率、物流(含库存)成本、制造周期的直接影响，以及对资源配置、制造成本、交期的间接影响，设计出满足质量和交期条件下，成本最低的物流规划方案。

##### 3.3.2 构建物流系统价值模型

物流系统价值模型如图 4 所示。

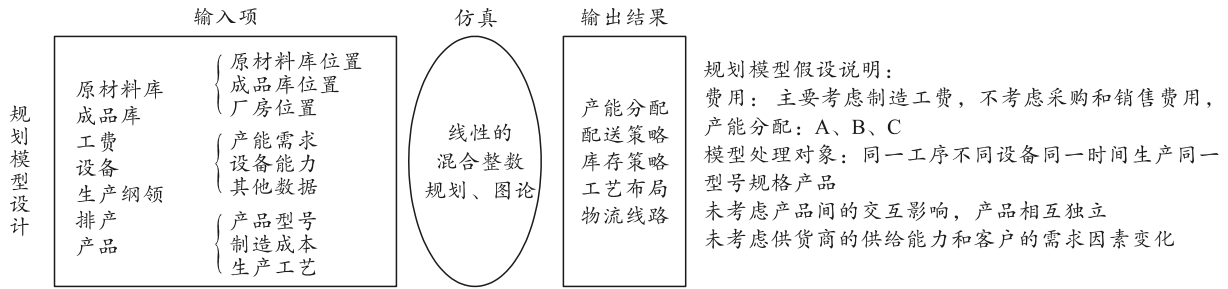


图 3 物流规划总体模型

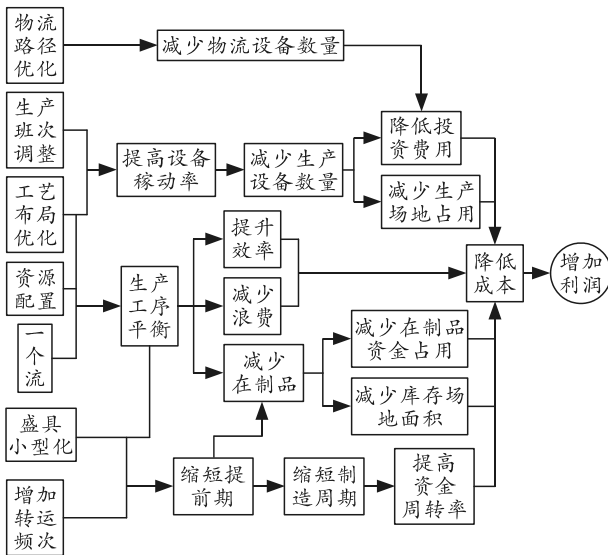


图 4 物流系统价值模型

通过盛具小型化和增加转运频次缩短工序生产提前期，减少在制品缓存量；并对资源配置、工艺布局进行优化以及连续流的应用实现生产工序产能平衡；同时对物流路径、生产班次调整及物流调度予以优化，提升生产效率，减少在制品库存时间，综合降低产品成本，最终实现提高产品利润的目的。

### 3.4 设计物流系统方案

根据精益生产管理的系统性思想：资源+资源配置≠系统能力，对各个物流资源建立模型，并搭建生产能力波动分析及评估模型，对物流系统进行优化，然后予以评估，确定运营成本最低的物流系统方案。

#### 3.4.1 设计物流系统模型

对静态的产线布局、物流路径、库位布置，通过合理的资源配置，匹配以动态的生产调度、库存管理、物流调度，在满足制造周期的前提下，以最低的运营成本实现物料在信息的驱动下进行自动流转，保障生产的稳定运行，其物流系统模型如图 5 所示。



图 5 物流系统模型

#### 3.4.2 搭建生产波动分析评估模型架构

以产品的种类、数量信息为基础，对各类生产资源(生产线、设备、人员、设施、库位、物流工具等)进行建模，得到生产布局(生产线设备布局、在制品和成品仓储布局)和物流路径优化模型；同时以精益生产管理为基础，对组织形式(生产调度、班次、排产)进行建模，得到生产波动模型；综合分析各个模型确定最优方案，其生产波动分析评估模型架构模型如图 6 所示。

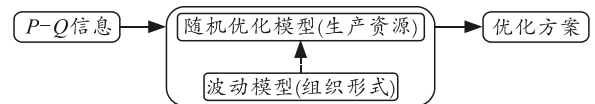


图 6 生产波动分析及评估模型架构

#### 3.4.3 建立产线布局模型

综合考虑各产品的工艺特性、工艺流程、工艺条件和工艺环境要求等，利用我们长期研究生产线结构与物流堵塞的关系、波动与缓存的关系、分汇流调度算法以及制造成本与动态 P-Q 关系的积累经验，对生产线设备布局进行建模分析，构建出动态随机整数规划数学模型，对所需生产线设备布局进行优化，其生产线设备布局 INLP 模型如图 7 所示。

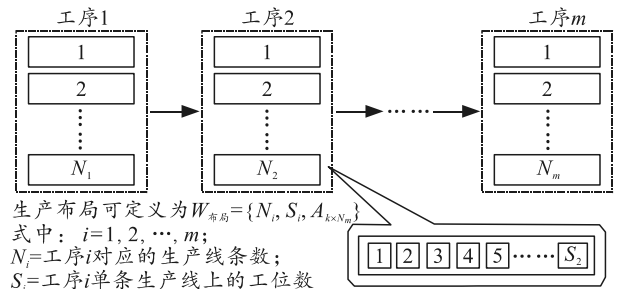


图 7 生产线设备布局 INLP 模型

### 3.4.4 设计在制品缓存分配模型

设计最优缓存分配模型，如图 8 所示。



图 8 生产线缓存分配模型-机构单元  $T(i)$

图 8 指导每条生产线上缓存的分配和生产线布局模型结合，形成相应的生产线布局设计结构，配合资源配置的优化及对生产波动的影响，有效降低在制品库存量。缓存分配技术可以有效减少实际生产效率与理论计算生产效率的差异。

### 3.4.5 构建生产调度矩阵模型

通过对产品的  $P-Q$  分析构建生产调度矩阵模型如图 9 所示。

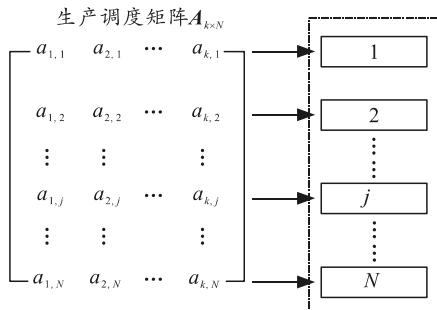


图 9 生产调度矩阵

由图 9 可得到某计划期内所有生产计划产品的上线排列顺序及生产数量，用矩阵  $A$  表示。 $k$  为产品各类,  $A_{k,i}$  为第  $k$  种产品在第  $i$  工序第  $j(j=1, 2, \dots, N)$  条生产线的计划生产量。 $A$  的每行对应装配段(第一段)的一条线，该行第  $k$  个元素的值，即型号  $k$  的排产数量。由于这是直接与调度相关的工序， $A$  矩阵中只考虑装配段第一段。

### 3.5 物流系统方案优化

运用生产波动分析评价模型对物流系统模型、生产调度模型、在制品缓存分配模型进行综合分析，通过资源优化配置得到成本最低的物流系统方案。

通过运用布局结构形成技术<sup>[7]</sup>、生产调度技术、在制品缓存分配技术和生产波动分析技术，应用伺服技术、PLC 控制技术、传感器技术、总线控制技术，导入智能加工、智能装配、智能检测、智能监控与智能包装，协调结构化要素和非结构化要素，实现资源优化配置，推动制造模式从粗放型向集约型转变，实现满足质量和交期的前提下，运营成本最低的目标，如图 10 所示。

传统生产系统是在工艺的数字化基础上，MES

直接对应系统的控制能力，没有从生产系统的布局规划、线体建设、信息控制等环节进行系统整体考量，导致资源利用率低、信息共享程度低、生产效率低和生产成本高等问题，这对于工艺流程中有人工干预的生产系统，数字化建模难以深入，MES 系统无法深入控制层，对生产的直接贡献少。

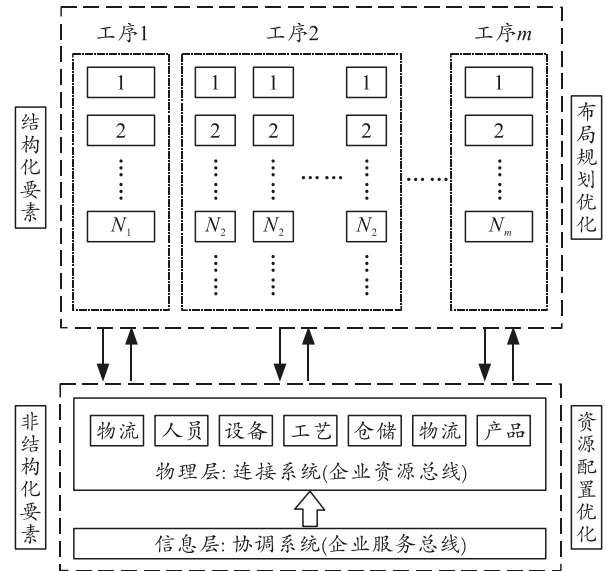


图 10 布局优化与资源匹配

运用数学建模理论方式对生产线进行科学布局设计，构建集生产线布局设计模型、缓存分配模型、基于序贯均匀实验设计的生产调度模型、基于贝叶斯理论的生产波动评价模型于一体的生产布局优化设计方法体系，分析物流布局、资源配置、在制品缓存对生产波动的影响，并采用分治架构，通过序参量实时控制，集生产线布局优化设计方法、智能装备开发技术、生产系统资源重构技术于一体的混联离散型生产系统，实现工控层与业务层的信息高效交互，促进底层控制快速响应上层业务变化，解决多品种小批量订单模式下离散性制造企业高成本、低效率的问题，让企业资源高效利用，极大地提升企业核心竞争力。

## 4 物流系统方案验证

在物流系统方案得到确定并完成优化以后，需要对物流系统方案进行验证分析，进一步确保物流系统方案能够符合预期的要求，可以从制造周期、在制品库存量以及制造成本等对产品利润影响较大的 3 方面进行验证。

### 4.1 制造周期验证物流系统方案

产品交付周期模型如图 11 所示。

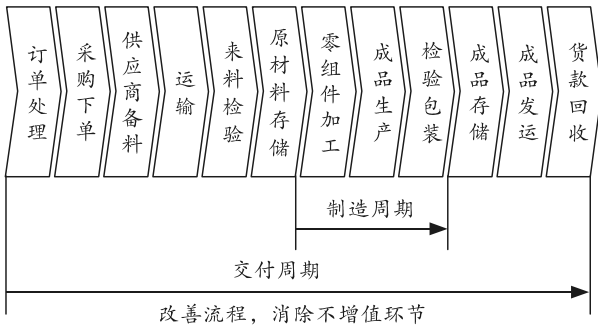


图 11 交付周期模型

再通过盛具小型化减少单次转运量、增加转运批次，缩短各工序单次转运量生产周期和各工序批次生产周期；同时通过物流路径优化和物流调度优化，缩短批次转运时间；并对工序产能进行平衡以缩短各工序在制品缓存时间，最终实现缩短提前期和缩短制造周期，从而缩短交付周期，保障准时交货。

$$OTD \text{ 交货周期} = \text{采购周期} + \text{制造周期} + \text{供货运输时间}; \quad (1)$$

$$\text{制造周期} = T + LT = T + \sum_{i=1}^n (t_i + t_j + t_k). \quad (2)$$

式中： $T$ 为工序批次生产周期； $t_i$ 为各工序单次转运量生产周期； $t_j$ 为各工序在制品缓存时间； $t_k$ 为批次转运时间。

某工厂某产品的当前制造周期如表 1 所示，经过物流规划后的制造周期如表 2 所示。

表 1 当前制造周期(24 d)

序号	批次周转量 生产时间/h	批次周转 装载量	库存 量/pcs	库存时 间/d	生产 班次
1	5.6	1 桶	160 000	1.0	2
2	0.8	1 桶	160 000	1.0	1
3	3.3	1 桶	240 000	1.5	1
4	4.1	1 桶	240 000	1.5	3
5	0.8	1 桶	160 000	1.0	1
6	1.4	1 桶	160 000	1.0	1
7	0.8	1 桶	160 000	1.0	1
8	0.8	1 桶	160 000	1.0	1
9	0.3	4 箱	160 000	1.0	2
10	0.4	8 箱	160 000	1.0	1
11	0.3	8 箱	160 000	1.0	1
12	0.1	2 箱	160 000	1.0	1
13	0.2	10 箱	160 000	1.0	1
14	0.5	1 车	160 000	1.0	1
15	0.2	1 托		2.0	1
16	0.2	1 托		1.0	1
17	0.5	1 车		0.5	1
18	20.3			21.5	

表 2 规划方案制造周期(11 d)

序号	批次周转量 生产时间/h	批次周转 装载量	库存 量/pcs	库存时 间/d	生产 班次
1	0.2	4 箱	83 200	0.5	2
2	0.3	1 桶	64 000	0.4	1
3	1.3	1 桶	240 000	1.5	1
4	1.6	1 桶	210 000	1.3	3
5	0.1	4 箱	12 000	0.1	1
6	0.2	4 箱	21 600	0.1	1
7	0.4	1 桶	31 600	0.2	1
8	0.1	4 箱	64 000	0.4	1
9	0.2	4 箱	32 000	0.2	2
10	0.3	1 桶	40 000	0.3	1
11	0.1	4 箱	7 600	0.0	1
12	0.1	4 箱	0	0.0	1
13	0.1	4 箱	160 000	1.0	1
14	4.0	1 车		0.5	1
15	0.1	4 箱		0.5	1
16	0.8	1 托		1.0	1
17	4.0	1 车		0.5	1
18	3.2			11.5	

通过制造周期对比分析可知：工作制按 8 h/班、5 d/周，日产量需求按 160 kpcs，当前班次、转运盛具、生产设备数量、存储量按现有状态保持不变，规划方案转运盛具小型化，存储量减少，根据现有产能排产，班次不变。通过物流仿真分析验证，此产品规划方案的制造周期 11 d，相比当前实际的制造周期 24 d 缩短约 54%，能够满足规划方案的生产运行，从制造周期缩短情况验证物流规划方案可行。

#### 4.2 在制品库存量验证物流系统方案

依据经济批量模型如图 12 所示。

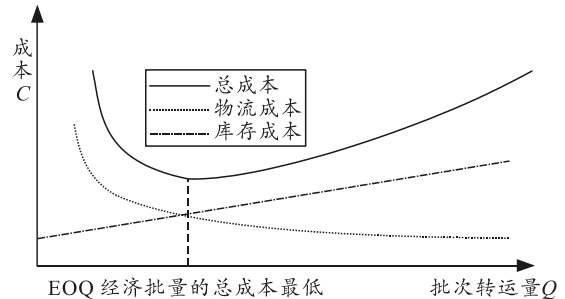


图 12 经济批量模型

对在制品库存与生产物流成本平衡分析，通过控制批次转运量、转运频次和在制品缓存量，从而控制在制品库存成本，使库存成本与物流成本平衡后的综合成本最低。

对物料盛具进行规范化管理，并予以标准化、小型化、编码数字化，结合标准托盘、机器人码垛、厢式货车装卸、AGV 的选型等，确定合适的周转箱、料桶、托盘的规格，以实现安全的自动上下料、自

动存储与自动转运。

综合考虑搬运工具的规格、转运配送频次、上下料的方便性和安全性、生产质量管控的经济性、盛具的可获取性等因素，经现场验证评估后确定盛具类型。

针对此产品，按照物料齐套配送原则，依据产能平衡分析的各工序的排配日产能和工序 UPH，分别对零部件和成品组装的在制品库存量及库位需求分析。

当下工序快于本工序时，下工序的在制品缓存量：

$$\text{下工序缓存量} = \text{本工序UPH} \times \left( \frac{\text{本工序日产能}}{\text{本工序UPH}} - \frac{\text{下工序日产能}}{\text{下工序UPH}} + \frac{\text{本工序提前期}}{60} \right) \quad (3)$$

当下工序慢于本工序时，下工序的在制品缓存量：

$$\text{下工序缓存量} = \text{下工序UPH} \times \left( \frac{\text{本工序日产能}}{\text{本工序UPH}} - \frac{\text{下工序日产能}}{\text{下工序UPH}} + \frac{\text{本工序提前期}}{60} \right) \quad (4)$$

式中本工序的准备时间(含换型时间)、单次转运量的生产时间及单次转运量的转运时间即为下工序的提前期。

依据计算及仿真分析验证，在制品数量大大降低，缓存库的库存量也得到有效控制，完全能够满足规划方案的生产运行，从而验证此物流规划方案可行。

### 4.3 制造成本验证物流系统方案

以建设投资(固定设备折旧成本、新增场地成本、物流设备折旧成本)、人工成本、在制品存储成本、能耗成本、管理成本、和资金占用成本等，构建总投入函数  $C(N_i, S_i, A)$ ，总产出函数  $M(N_i, S_i, A)$ ，并以生产线平衡、产能需求数量、设备折旧时间等为约束条件，以投入产出比最小为目标，构建物流系统模型。

总目标函数：

$$\min \frac{C(N_i, S_i, A)}{M(N_i, S_i, A)}; \quad (5)$$

产出函数：

$$M_T = \sum_{k=1}^K Q_k M_k \quad (6)$$

式中： $M_T$ 为产品销售总收入； $M_K$ 为商品  $k$  的售价； $Q_K$ 为商品  $k$  的销量。

投入函数：

$$C(N_i, S_i, A) = C_H + C_L + C_D + C_E + C_S + C_R + C_G + C_Z \quad (7)$$

根据物流投资预算，对此产品进行单件制造成本分析，包含投资借贷还息的财务成本、库存管理成本及库位占用分摊、人工成本、生产设备及物流设备分摊及能耗成本，假设物料成本和管理成本不变的情况下，对现有生产效率下的单件制造成本与规划方案生产效率下的单件制造成本进行对比分析。按照 10 年期贷款分期还贷，10 年期内产品制造成本略微有所降低，但 10 年后产品制造成本将降低约 25% 以上，完全能够满足规划方案的预期目标，从而验证此物流规划方案可行。

## 5 结束语

该物流规划技术已经在某智能工厂得到实际应用，应用结果表明：针对离散型生产企业的智能物流规划技术在智能工厂的研究与应用，在生产效率、制造周期、制造成本、库存场地占用及库存资金占用等方面都有明显改善。后续还需在仿真分析、大数据分析、数字孪生等方面深入研究，并将其拓展应用到更多生产企业，为智能工厂的转型升级作出更大贡献。

## 参考文献：

- [1] 葛英飞. 智能制造技术基础[M]. 北京：机械工业出版社，2019：162-222.
- [2] 朱海平. 数字化与智能化车间[M]. 北京：清华大学出版社，2021：1-157.
- [3] 乐静，刘治红. 基于精益生产管理的炮厂 MES 系统[J]. 兵工自动化，2013(2)：19-23.
- [4] 邱枫，黄利红，孙科星，等. 机加车间智能管控技术[J]. 兵工自动化，2023，42(5)：14-19.
- [5] 徐曼菲，吴跃，邱枫. 面向军工行业数字化生产线建模仿真与优化技术[J]. 兵工自动化，2019，38(2)：35-40.
- [6] 霍艳芳，齐二石. 智慧物流与智慧供应链[M]. 北京：清华大学出版社，2020：20-53.
- [7] 萨日娜. 智能制造产品布局设计理论与方法[M]. 北京：化学工业出版社，2021：28-134.