基于拉动原理的生产物流数字化系统设计

李焱林，边　缘，全灵慧

（湘潭大学机械工程与力学学院，湖南 湘潭 411105）

摘要：随着智能制造逐步普及，传统生产物流管理方式已不能适应新技术的发展。本设计创新性地把物料拉动理论与新技术结合，提高企业在生产物流管理层面的数字化、智能化、精益化。运用文献研究与案例分析法，对现有生产物流管理方式与核心理论进行剖析，揭示出生产物流数字化系统的功能特点，并提出一种智能水位线预测算法模型，以此为依据设计生产物流数字化系统。把各设备、各系统予以串联，实现全流程数字化交互，达成任务统一调度、设备统一管理、数据集中计算，让物料按时精准地送达工位。顺应数字时代，推动生产物流数字化建设与发展。

关键词：生产物流；精益生产；物料拉动；数字工厂；物流平台

中图分类号：F425；F270.7　　**文献标志码：**A

1　引言

近年来，随着 5G、物联网、云计算和无人搬运等新技术与制造业深度融合，越来越多的制造企业开始着手利用新技术、新装备建设数字工厂推动企业数智化转型升级，从而提高竞争优势[1]，如宁德时代宜宾超级工厂、三一灯塔工厂、亿纬锂能荆门超级工厂等。

数字化工厂是以智能制造为主导的生产方法，充分结合了信息物理系统（Cyber Physical System，CPS）与信息通信技术。系统智能感知自我所需、所缺和下一步去向，实现物料、机器、生产制造、物流和仓储等相互间的智能匹配、协调和控制[2]。智慧物流是智能制造的重要环节，对生产具有保驾护航作用，生产效率高低与否很大程度取决于仓储管理、物流配送的及时性与准确性。其包括采购物流、生产物流、销售物流等[3]。生产物流是指原料入库质检合格后，经出库、投产等环节，以在制品的形态，从一个生产单位流入另一个生产单位，并按规定工艺过程进行加工，借助一定的运输装置，在某个点内流转，又从某个点流出，始终体现着物料实物形态的流转过程[3]。生产物流信息流全链路的合理交互，能让叫料需求响应及时化，达成 JIS 模式[4]，降低机台的待料率；能让仓储管理数字化，提高物料的准确率；能让物料拉动智能化，降低物料缓存的盲目性；能让物流配送透明化，实现系统对设备的管控能力。

物流数字化建设是精益生产[5]的有效运用，精益生产的核心是以最小资源投入——包括人力、设备、资金、材料、时间和空间，创造出尽可能多的价值，为顾客提供更优质服务。生产物流管理进行了数字化建设并不意味着就能达到精益生产的极限。生产物流管理涉及众多系统与操作环节，只有把这些环节的信息交互梳理清楚才能让数据顺畅流转，最终达到精益物流管理的极限。

基于此，文中通过对生产物流数字化系统进行系统框架、功能架构及业务流程的设计，并结合现阶段我国头部制造企业在智能制造建设道路上遇到的瓶颈提出生产物流数字化系统建设与发展路径。

2 平台化系统设计原则探讨

生产物流数字化系统设计需要遵循模块化、低耦合、柔性化、标准化、智能化和可视化等六个层面的原则。该六个原则对系统的平台化应用起到关键性作用，设计原则处理不到位，将会对企业的生产制造形成灾难性后果。

1）模块化。生产物流管理涉及非常多的环节，比如仓储管理、设备管理、设备维护、订单管理和任务管理、任务调度等数十个功能模块。在实际应用过程中，企业并不需要全栈功能，系统需分模块设计与封装，功能模块具备独立应用能力，功能模块之间通过内部 API 接口进行数据传输；企业要求系统绝对稳定，并具备分布式、双机热备、服务器集群部署能力，不能因某个功能异常，而影响整个工厂的生产制造，这种能力要求高度依赖功能模块化设计。

2）低耦合。指上下游系统、功能模块之间不能完全依靠彼此的消息回调而走完后续流程。在系统设计时需考虑手动补偿能力，比如立体库把物料送达出口时，WCS 没有发到位通知。此时系统应具备手动修改库存状态功能，替代 WCS 消息回调，触发 AGV 来取料。如果过于耦合，系统会一直等待 WCS 回调，最终都不会派 AGV 去搬运物料。

3）柔性化。系统通过配置方式，能生成各种配送方案，满足企业生产过程中各种不确定的使用场景。柔性化是决定系统适应性、客制成本、稳定性和客户满意度的关键因素 [6]。

4）标准化。系统内部形成标准指令，通过它组织系统内部业务流程。系统给所对接的硬件 / 软件输出标准接口，通过标准接口的转换，即可实现外部硬件与系统的即插即用，减少企业对下游供应商的依赖，降低设备 / 系统的联调时长 [7]。

5）智能化。采集硬件设备数据，并对数据进行清洗、分析与模型构建，实现系统自主决策，比如机台叫料预测、任务优先级计算、物料水位线分析等。智能化是数字工厂的核心能力。

6）可视化。实现任务状态实时更新、设备状态实时监控、异常及时反馈，为管理者提供全面、有效且直观的动态信息。数字工厂又名黑灯工厂，过程全自动化、无人化，但不意味着管理者可对它放任不管。可视化看板是管理员连通系统的重要桥梁。

3 设计分析

3.1 物料拉动原理

生产过程中备料方式有推动与拉动两种模式。推动式备料是仓管员收到计划员下达的生产计划后根据产品 BOM 单进行物料出库，仓管员不管生产线什么时候需要物料，他们都会按 BOM 单把物料定时定量发往生产线，如图 1 所示。拉动式备料是根据物料消耗量发起拉动信号，仓储管员根据需求信号对生产现场进行物料补给的精益物流控制方法 [8]。在生产过程中一般有多级拉动，比如锂电生产过程中有三级拉动，如图 2 所示。 物料拉动原理主要解决生产过程中何地、何时、需要何物等问题。

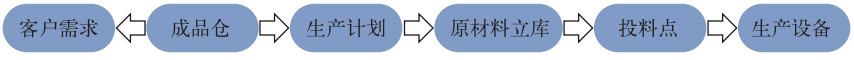

图 1 仓库员投放物料生产线

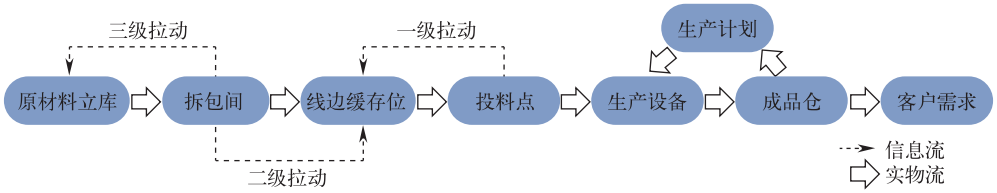

图 2 锂电生产三级拉动

生产物流数字化系统设计目的是提高企业在生产物流管理层面的数字化、智能化、精益化。拉动式备料原理具有降低物料库存水平、生产与物流高度协同、全链路信息流打通等特性。物料拉动原理可作为生产物流数

字化系统设计的理论支撑。物料拉动方式有安灯、看板、生产和空箱拉动等多种方式，无人工厂中非必要环节都已去人化，因此物料拉动方式采用智能预测拉动方式为最佳。

3.2 生产物流管理现有系统分析

生产物流通常需打通订单计划、日生产计划、仓储管理、质量管理、物料拣选、物料配送等信息化系统，并配套建设智能立库、输送线、AGV、提升机、智能料架和 PDA 等设备。与之对应的生产物流管理系统有 ERP、MES、WMS、LES、WCS 和 RCS。

ERP 是企业资源计划管理系统，对物料、资金、人力和信息资源集成一体化的管理系统，侧重于生产中物料管理决策 [9]。MES 是生产执行系统，以生产设备为对象，根据物料库存、工艺路线、人力资源和设备效率进行排程，控制设备有效运转，侧重于生产执行 [10]。WMS 是仓库管理系统，主要功能有入库管理、出库管理、库存管理、货位管理和单据管理等，侧重于仓库内物料保管。WCS 侧重于立体库出入库任务管理，RCS 侧重于 AGV 车辆调度。LES 是物流执行系统，以物料拉动为核心，统筹考虑物料在不同仓储单元的交互，实现物料从入库、库内管理、出库、拉动转移到最终工位的物流管理系统，侧重于从供应商到生产到客户的全流程管理，如图 3 所示。

ERP、MES、WMS 三个平台级系统分别侧重于统筹、生产、仓库，都不能实现对生产物流的有效管理 [11]。WCS、RCS 侧重于设备调度，跟物流管理无直接关系。LES 核心是物料拉动，侧重于物料管理。随着新技术的不断发展，如智能立库、AGV、输送线、电梯、提升机、亮灯货位、堆高叉车、拆码垛机、RFID 和视觉摄像头等，为达到降本增效目的，企业大量建设自动化项目，物流配送又成了企业的管理瓶颈：①系统决策与管理离散；②系统繁杂学习成本高；③ ERP/MES 在物流管理层的开发压力陡增；④项目越多资源投入越浪费；⑤业务柔性化变更频繁，设备联动越来越紧密。LES 虽然解决了物料拉动层面的核心需求，但是在物流配送管理层面无能为力。生产物流的精益化管理需要从物料拉动与物流配送两个层面同步建设 [12]，基于物料拉动原理的生产物流数字化系统具备合理性与现实应用价值。

3.3 用户需求分析

通过实地考察、项目对接、技术探讨等方式，对宁德时代、亿纬锂能、晶科储能、吉利汽车、联合电子和富士康等中国头部制造企业进行了深度调研分析，他们的共性需求如下。

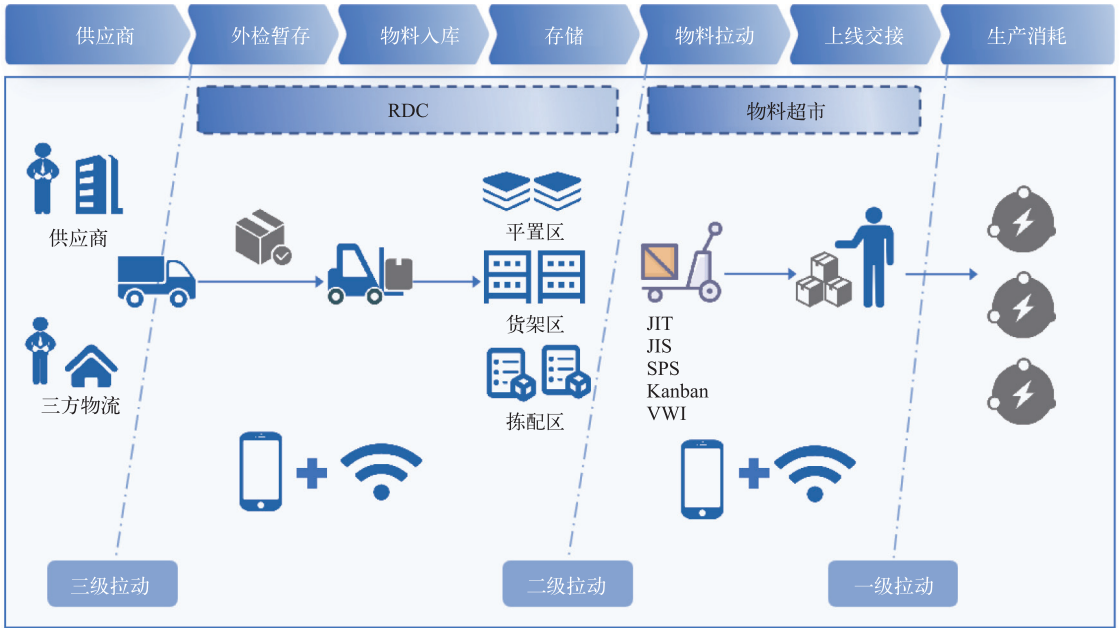

图 3 LES 物流执行系统

1）信息流全链路流通聚合管理，把已建设的自动化项目汇总到集成平台，让信息流在各个项目之间流通，消灭消息孤岛 [13]。

2）物流自动化转向智能化、精益化、柔性化，自动

化虽然得到了大幅提升，但精益化、智能化、柔性化才是他们的终极追求目标。

3）系统与设备即插即用降低交付周期，物流平台像一个 HUB 平台，能让硬件设备即插即用，降低企业对供应商的依赖。

4）设备全局智能调度高效执行任务，所有智能设备以物料及时送达为目的，接受数字大脑统一指挥相互配合。

5）按标准集中接收需求降低上层系统定制压力，避免 ERP、MES 直接与具体项目对接，减少标准系统在物流管理上功能外沿。

6）物料拉动与物流配送一体化管理，在满足现有拉动模式的物料管理情况下，重点突破物流管理的瓶颈。

4 生产物流数字化系统设计

4.1 系统框架设计

生产物流数字化系统按分层理念进行设计，整个系统由决策层、应用层、数据中台，执行系统层和设备层构成，如图 4 所示。

图 4 系统框架图

决策层负责制定生产计划 / 生产工单 / 工艺路线、汇报物料投产 / 产后报工 / 生产设备状态（MES），下发仓库物料搬运订单（WMS）。决策层的数据通过数据中台进行交互、存储、管理、分析和应用。数据中台的数据除来自上位系统外，还包含执行系统的动态数据与设备本体感知上报的实时动态数据。数据中台负责对数据全生命周期进行管理，包括数据采集、数据清洗、数据整理、数据计算和数据清理等，对处理完的数据上升到应用层实现业务逻辑。应用层负责订单与任务生成，调用数据中台任务优先级算法生成任务队列，再下发给执行系统。订单对应物料拉动执行何时、何地、取何物，任务对应物流配送执行什么设备、怎么配送。执行系统按指令与规则分配其管辖范围内的设备执行任务。设备层听候执行系统动作指令，按要求完成对应动作，并实时汇报状态数据。

总而言之，决策层提供决策数据，数据层负责数据计算，应用层负责业务逻辑处理，执行层管理对应设备，设备层执行对应动作。通过上述 5 层系统架构，从源头掌握决策与执行数据，以生产物料管理为目标，将各离散项目有效衔接和汇聚。

4.2 物料拉动业务流程设计

以生产工位为拉动源头，利用生产物流数字化系统

及时把物料需求反馈到线边仓、缓存超市、原料仓等环节，对该物料逐级拉动，并精准送到生产工位，将生产物流精益管理效能做到极限，具体的业务流程设计如图 5 所示。

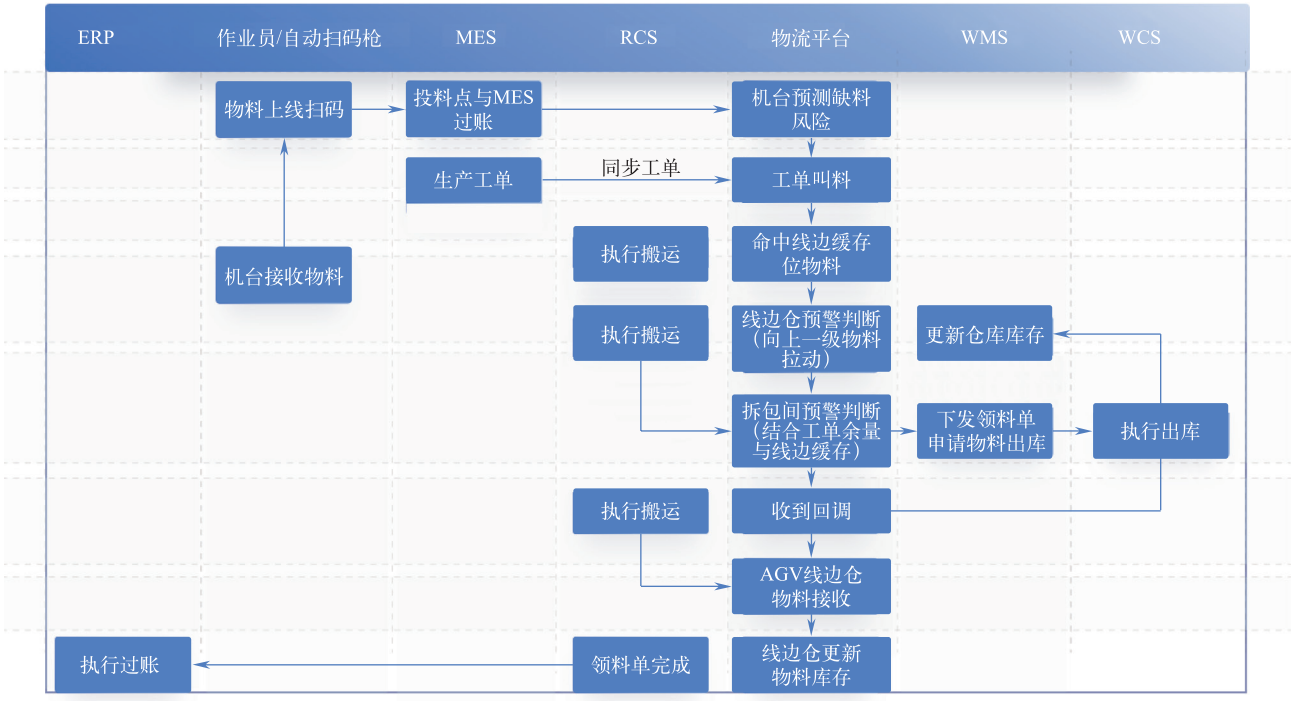

图 5　业务流程图

第一步，机台接收物料后，生产员 / 自动扫码枪在 MES 对物料进行过账，该物料投入使用并销账。系统预测机台缺料风险时，发起工单叫料。系统命中线边物料，对任务按优先级调度设备执行搬运任务，正确地把物料送达生产机台，实现生产机台向线边缓存位进行一级自动拉动补料。

第二步，当线边缓存位库存量低于最低水位线时，系统自动向拆包间发起补料需求，并调动设备执行搬运任务，实现线边缓存区向拆包间进行二级自动拉动补料。

第三步，当拆包间库物料库存低于水位线时，自动生成领料单据。通过系统自动下发给 WMS。

第四步，WMS 根据领料单据，拆分成具体出库任务下发给 WCS，物料到达出口时，通知系统由其调度 AGV 执行搬运。

第五步，当领料单执行完毕后由系统向 ERP 执行过账。

4.3　物料拉动智能水位线算法模型

较高的线边库存能降低机台的待料率，但库存物料会占用大量生产区。过少的线边库存会造成机台待料，拉低生产效率。在太多和太少的缓存之间找到适当的平衡点至关重要，也是智能工厂前期布局规划的关键依据。

（1）物料拉动智能水位线算法模型设计　实际生产中一次物料拉动存在三个节点，上级仓库、本级缓存区、下级需求区。本级缓存区低于安全库存发起叫料时，上级仓库执行送料；下级有需求时，从本级缓存区执行送料。算法模型的目的就是求取本级缓存区的库存水位线即安全库存，当低于水位线时，向上级发起叫料。本级缓存区库存水位线受上级来料设备运送节拍和下级需求节拍两个因素影响。企业一般会通过增加缓存位减少设备运力的方式，降低硬件投入成本。产生安全库存的根本原因是上级运力跟不上下级需求节拍，利用缓存库存弥补上级运力不足。造成上级运力不足的原因有距离远配送时间长、搬运设备数量少、拆包组盘耗时和设备故障等。

工位物料需求是整个物料拉动源头，单工位生产节拍比较恒定，所有工位节拍也恒定，工位物料需求表见表 1。上级配送过程中所用设备如 AGV、提升机、输送线和移栽机等配送时间相对恒定，如异常完全无法运行时，将由人工配送，其配送节拍也恒定。由此可见上级

配送与下级需求全都恒定，本系统的物料拉动智能水位线算法模型可以使用标准差方法。

表 1　工位物料需求表

工位编号	物料编码	需求数量	当前叫料时间	下次叫料时间
A0001	SN000121CV	1	2023/4/17 12:30	2023/4/17 13:00
A0002	SN000121CV	1	2023/4/17 12:45	2023/4/17 13:15
A0003	SN000122CV	1	2023/4/17 12:40	2023/4/17 13:10
A0004	SN000122CV	1	2023/4/17 12:50	2023/4/17 13:20
……	……	……	……	……

标准差代表了需求与供应的波动程度。根据所选择的服务水平（通常以百分比表示），将标准差乘以相应的安全系数，可得到安全库存的数量。公式如图 6 所示。

线边缓存区并非缓存越多越好，还需计算缓存库存上限，达到上限时停止继续拉动，库存上限以人工搬运节拍为依据，人工配送最可靠也是最后一道防线。公式如 7 所示。

图 6　安全库存计算公式

图 7　最高库存计算公式

本算法核心点是实时动态计算机器人来料节拍，因移动机器人受到避障、交管、充电和故障等因素影响，在单位时间内配送节拍会发生变化。除考虑动态节拍外还需实时关注工单余料需求，当在途物料≥余料需求时，应停止自动拉动。

（2）物料拉动智能水位线算法模型验证　现阶段通用的库存算法是时间序列预测模型，即根据机台叫料历史数据预测未来一段时间的机台叫料量。通过实验数据计算并使用一致的评价指标，对比时间序列预测模型及本算法，验证所提出系统的有效性和优越性，证明了通过本算法进行动态智能调整，能够进一步缩小机台叫料量与实际用量真实值之间的误差，因而对生产效率及物料管理过程产生了积极影响。

实验收集了 321 台机台的叫料量，包括从 2024 年 4 月 1 日—6 月 1 日超过 2 600 条数据记录，选取其中有效数据 720 组。训练集 : 测试集 : 验证集的比例为 7 : 2 : 1。

平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE），通过计算单个样本预测值与真实值之差的绝对值得出，具体计算公式

$$MAE(y_i, y_i') = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(|y_i - y_i'|)$$

式中，m 为样本数量，y_i 为真实值，y_i' 为模型的预测值。

均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE），通过计算单个样本的预测值与真实值之差的平方再取平均值得出均方误差，再将均方误差进行开方得出，具体公式为

$$RMSE(y_i, y_i') = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(|y_i - y_i'|)^2}$$

式中，j_i 为预测值，j_i' 为实际值，m 为样本数量，$RMSE$ 越小，模型预测精度越高。

通过比较时间序列预测模型和本算法的 MAE 与 $RMSE$ 的差别，两组数据的 MAE 和 $RMSE$ 最终分别下降 26.6% 和 28.5%，见表 2。可见物料拉动智能水位线算法模型有效降低了叫料量与实际用料量的误差，可为生产物流管理精益生产提供更加合理的物料拉动算法支持与参考。

表 2　模型验证误差量化表格

	MAE_1	MAE_2	$RMSE_1$	$RMSE_2$
96	79.4%	43.7%	98.2%	59.0%
192	78.8%	46.4%	97.8%	63.1%
336	79.8%	53.4%	99.4%	71.4%
720	82.2%	55.6%	101.8%	73.3%

注：MAE_1 为时间序列预测模型 MAE 值，MAE_2 为本算法 MAE 值，$RMSE_1$ 为时间序列预测模型 $RMSE$ 值，$RMSE_2$ 为本算法 $RMSE_2$ 值。

4.4　系统功能模块设计

生产物流数字化系统是生产过程中物料拉动与物流配送一体化管理平台。自主生成或集中接收生产侧上下

料需求，对物料逐级拉动，利用算法协调资源分解任务，给各智能设备下发指令驱动其执行任务，按时把物料送达工位的智能化物流平台。基于该定义，系统功能模块设计如图 8 所示。

图 8 系统功能模块设计

仓储管理模块：由其根据水位线向上级仓库发起领料需求。系统必须对缓存仓进行全面管理，应具备库存、库位、容器、库区、单据、打印、物料需求和水位线等管理功能[14]；必须要知晓缓存仓物料批次、库位库存情况，利用拉动模式向上级仓发起领料；必须对物料从原料仓转入生产时，及时向 ERP 系统进行平账。只有拉通各环节物料管理，才能为物料智能拉动、精准配送保驾护航。

物流管理模块：叫料需求都汇集到系统，由其调度设备执行配送任务。为让搬运具备高度柔性化，系统对流程应具备配置能力，通过无代码配置适应各场景。流程是由各种指令并行或串行组合，通过入参输入、出参回调相互作用而形成的任务过程。为提升管理效率、操作体验，所有搬运任务都应该被透明化呈现，方便管理者及时知晓任务状态。因此系统需具备任务状态、任务日志、人工干预、任务进度等相关功能。平台统一调度所有设备，必然存在任务抢占资源情况，其需根据任务优先级、最短完成时间、资源占用最少和时间先后等规则进行资源合理分配，防止移动设备拥堵、物料碰撞等。

生产协同模块：生产管理都是为提升生产效率与精益化管理水平。物流与生产直接打通是一种提升工厂运转效率的有效创新方法[15]。系统需要获取所有生产工单与日生产计划，对计划进行物料拆解计算物料需求，向 WMS 输出领料单。物流平台与生产设备直接打通，获取生产设备数据自主预测机台叫料节点，提前为生产工位准备物料，做到料销准时补料。

设备管理模块：形成标准化接口，让设备即插即用，提高工厂对设备的自主管理能力。实时获取设备状态，让异常及时暴露，提高工厂对设备的运维能力。

数据分析模块：通过历史数据回溯，分析设备调度算法瓶颈；对设备运行速度预测和故障预测，提前进行优化调度计算；通过构建自适应学习功能，在故障或异常发生后，实现高效和快速容错优化调度。

5 生产物流数字化系统的实现路径

对生产物流数字化系统具体落地设计时，可从以下几方面重点着手。

1）全面的生产与物流协同。物料拉动完全依赖于生产工单、生产计划、生产工艺，生产的要求将决定什么工位上什么时候需要什么物料。通过系统层面的无缝对接才能达成物料无感配送；换产时能对工位所需物料进行准确切换；对在途物料进行工单再匹配，减少超发料重复回库频次。

2）智能的物料拉动模型。安全库存是机台生产的基本保障，系统能够利用深度学习机制根据提产爬坡、降产休假、故障预测和实时配送节拍等可变因素调整物料拉动模型，确保最小的库存满足最大的产能，物料及时送达生产工位。

3）完备的接口与流程配置平台。制开发是企业最头痛的问题，研发成本高、实施周期长、稳定性差。系统可通过无代码配置方式实现与外部系统 / 硬件设备即插即用对接，当企业物流配送流程发生变化时，系统调整参数即可柔性化变更。

4）智能的任务全局调度模型。根据工位投产时间、工位完工时间、物料送达时间、物料送达松弛时间和物料运输所需硬件设备，对任务池中所有任务进行优先级计算，并放入任务执行队列，然后根据任务优先级有序调度所有的硬件设备如图 9 所示。

5）合理的状态反馈机制。生产物流数字化系统打造的是无人化、全自动、智能化的管理模式。任务状态需通过看板、短信、电话和企业微信等多渠道告知对应管理员，以便对系统的运行状态予以监管。

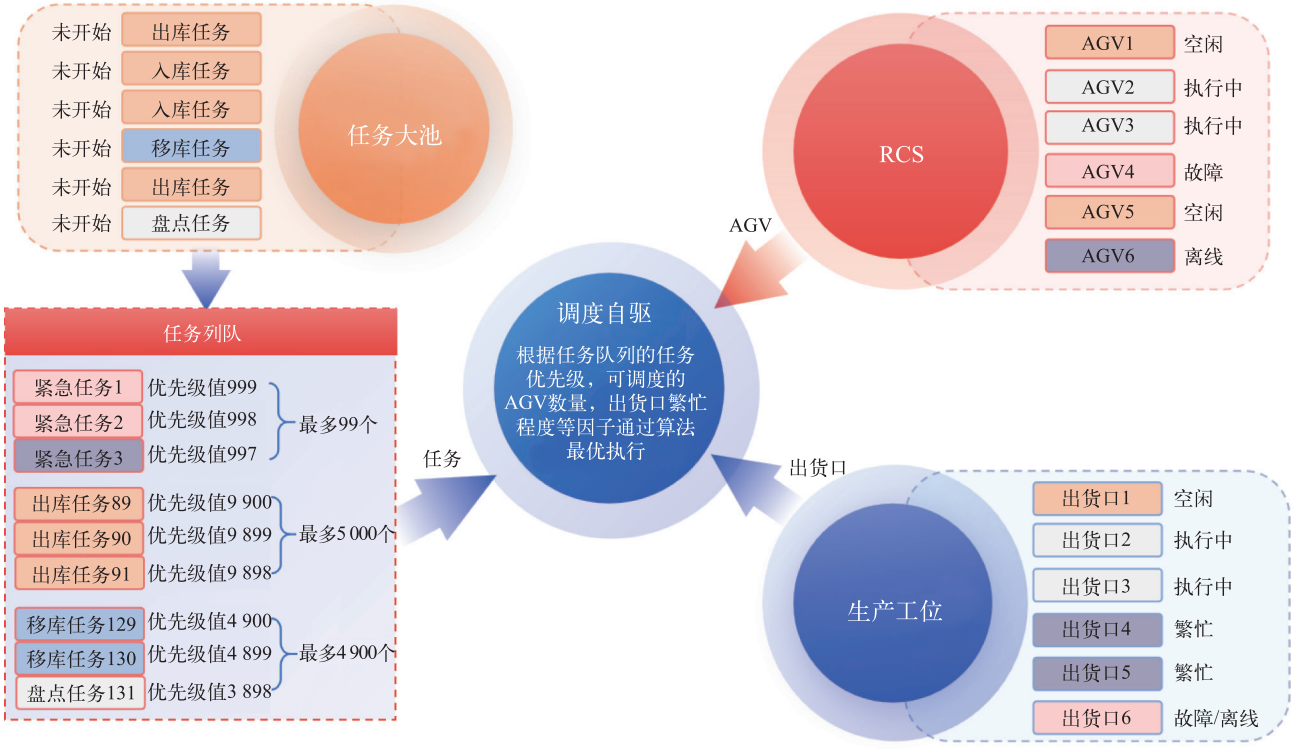

图 9　智能任务调度模型

6　结束语

未来，全厂数字化是智能工厂的基本要求，生产过程中 WMS、ERP、MES、RCS 和 WCS 等系统通过生产物流数字化系统紧密相连，从原材料出库到物流配送到现场管理构成实时互联互通的信息交换。将 ERP 系统的总账管理、MES 的生产管理、WMS 的实物管理有机地结合，将各系统的管理优势落地，实现企业信息化、数字化战略的目标。

智能仓储物流在智慧工厂、数字化工厂中扮演着越来越重要的角色，而物料拉动智能水位线算法模型能够

优化仓储物流供应链的运作效率和响应速度。因而本文从此入手，探讨了智能制造背景下，数字仓储设计中的实时数据采集与分析、智能制造与自动化技术、供应链协同与集成，以及定制化生产和灵活性等方面的最新进展。叙述了当前常规投入使用的生产物流数字化系统设计原则、生产物流管理方式，并分析了潜在的用户痛点，总结了用户的共性需求。提出实现库存水平精准控制和库存成本降低的方案。

基于上述研究现状与发展趋势，本文提出的物料拉动智能水位线算法模型优化下的基于拉动原理的生产物流数字化系统在提高生产效率、优化供应链管理、实现定制化生产等方面具有巨大的潜力。并进行了更加具体的实现路径论证及数据验证，以期为企业提供新的算法支持与参考。期望通过应用本算法有效提高生产计划的准确性和灵活性，降低生产成本，实现供应链各环节叫料的实时监控和调整。

参考文献

[1] 王玉．智能工厂与智能物流系统规划建设要点与建议 [J]．物流技术与应用，2023，28 (9)：114-116．

[2] 陈俊梅，石宇强．智能生产物流系统模型及平台研究 [J]．制造业自动化，2015，37 (19)：47-50．

[3] 柳少华，张士军，张克典，等．企业生产物流信息系统研究 [J]．青岛远洋船员职业学院学报，2015，36 (3)：29-32．

[4] 黄雨，薄娜．浅谈 JIS 模式在汽车制造行业的应用 [J]．时代汽车，2022 (16)：4-6．

[5] 杨旋．精益物流背景下仓储物流成本控制对策研究 [J]．中国集体经济，2023 (31)：93-96．

[6] 江宏．基于长久合作伙伴关系，做好物流机器人项目——访一汽工程与生产物流部物流技术首席杨成延 [J]．物流技术与应用，2023，28 (S2)：52-54．

[7] 阳如坤．动力电池数字化车间蓝图 [J]．汽车工艺师，2021 (8)：55-64．

[8] 潘军荣．看板拉动与生产拉动系统对比研究 [J]．物流工程与管理，2016，38 (9)：90-91，69．

[9] 卢浩博，邢勇．ERP 系统在企业物流管理中的应用研究 [J]．中国储运，2023 (6)：74-75．

[10] 边疆．制造执行系统 MES——生产制造企业信息化的关键 [J]．电子元器件与信息技术，2022，6 (6)：126-129．

[11] 马正元，鄢德利，张正文．基于 ERP 和 MES 相集成的物流信息系统研究 [J]．沈阳工业大学学报，2006 (5)：578-581．

[12] 韩军烈，张志栋．基于精益管理的 SD 公司生产物流优化研究 [J]．商场现代化，2021 (18)：25-27．

[13] 郭瑞，刘振国，陈翊，等．基于数字孪生的锂电池智能制造信息系统研究 [J]．今日制造与升级，2023 (8)：84-88．

[14] 张志伟．锂电材料行业数字化车间建设通用要求 [J]．中国标准化，2022 (13)：126-130．

[15] 杨军，李中学，胡礼兵．物流信息系统协同研究 [J]．中国储运，2009 (2)：114-115．

收稿日期：2024-05-24