制造企业物流数字化现状及发展路径

文/邱伏生　李志强　代　浩
上海天睿物流咨询有限公司

传统制造工厂以生产为中心，在数字化时代，工厂的任务主要是强调有效交付，业务逻辑变成通过全价值链的物流体系来保证交付，工厂成了“交付中心”，成为“大物流小生产”，制造成为该价值链中的一个业务单元，此时的物流数字化主要是强调全价值链的动态数字化。

制造企业物流数字化发展现状

1. 制造企业物流的重要性

众所周知，制造企业物流包含采购物流、生产物流、成品物流和逆向回收物流。从物流的功能性而言，主要包括包装、搬运、装卸、存储、分拣、配送运输、信息管理等功能环节。图1为制造企业物流的基本结构要素。

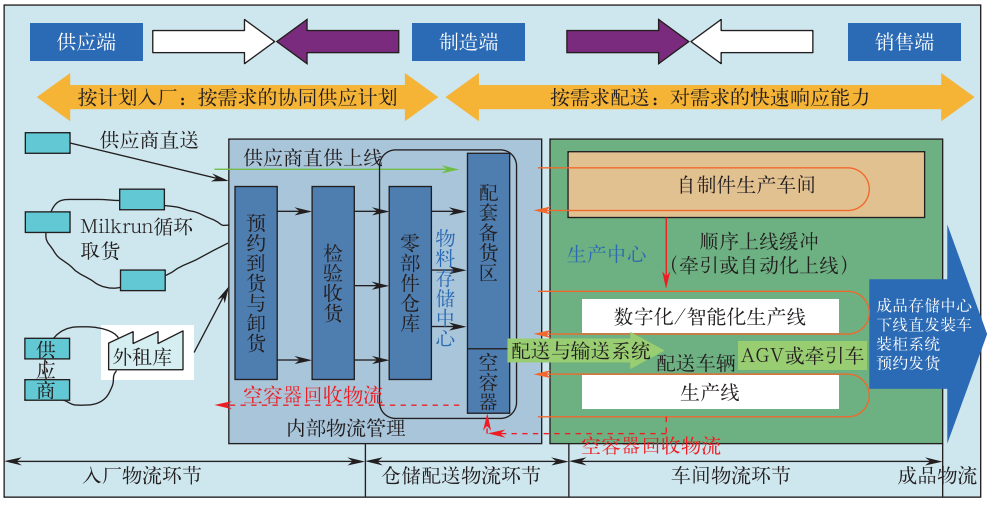

图1　制造企业物流的基本结构要素

图片来源：上海天睿物流咨询有限公司

由以上功能定义看不出物流对于制造企业的重要性，但换一个维度来看就会发现不一样的结论。

（1）从经营的角度而言，物流能力决定制造企业资金流转效率

企业流动资产包含现金、原材料库存、在制品库存、成品库存以及应收账款和应付账款等，这些要素的结论主要会表现在财务报表中，但是其真正的“流动质量”却被隐含在物流体系的运作过程中。对于制造企业而言，“物料都不流动，资金肯定不流动”，而“资金不流动”的企业其经营效

率和效益肯定大受影响，从而反过来影响企业的核心竞争力。制造企业物流管理者越来越深刻地领会到“如果不重视制造物流的管理，就意味着其放弃了流动资产的控制和增值效率管理”。比如，通常而言库存越多现金流越少，企业的资金链压力就越大，竞争能力就越弱；反之竞争能力就越强，而库存的设置取决于不同物料在不同物流阶段的周期设置，以及过程中各种变数的应对与缓冲模式设置。

（2）从生产运营与管理的角度而言，物流能力决定制造企业交付能力

越来越多的制造企业重心从“以生产为中心”转向“以交付为中心”，此时的关键任务就是“实现客户订单准时、准质、准量的交付”，在该交付价值链中，物流具备了“天生的端到端”结构基础和生产条件。如果物流能力不能匹配制造能力，就容易产生“巧妇难为无米之炊”的尴尬，或者“需要的产不出来，产出来的发不出去”的悖论。尤其对于（有策略和愿景的）数字化、智能化企业而言，“没有数字化、智能化的物流能力，智能制造就只能停留在实验室阶段”。

2. 制造企业物流数字化现状

制造物流是一个横向链接、纵向链接、端到端一体化的动态系统，不同企业的诉求不一样，导致其优先发展和成熟的环节与技术应用也有所不同。来自中国机械工程学会等机构组织的“2023年制造企业供应链发展调研”的数据表明，我国的制造企业物流数字化现状还处于起步阶段。如图2所示，制造物流数字化聚焦落点并不一致，达成的路径也未必相同。14%的企业没有做物流数字化，40%的企业在客户协同与需求管理、供应商协同与采购管理方面的数字化进展相对领先，这同时也说明，企业在供需管理的信息化建设是物流数字化转型的基础。而在制造物流全价值链中的绩效可视、设施设备智能运维、供应链风险预警与处置方面，普遍较为薄弱，仅15%的企业有所作为。

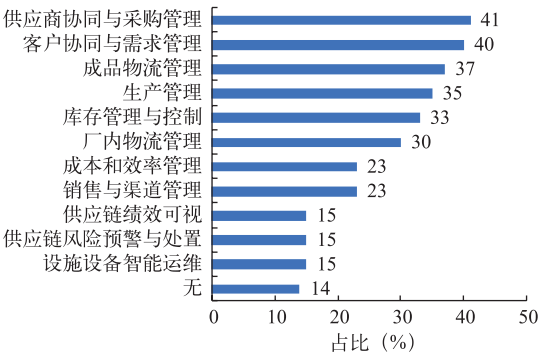

图2 制造企业物流数字化发展情况调研分析

数据来源：中国机械工程学会物流工程分会

制造企业物流数字化过程存在以下误区。

（1）制造物流数字化战略“初心”不明确，错把手段当目标，无法拉通价值链

很多时候，企业为了“上数字化”而上数字化，把“上数字化”当成目标，并没有明确物流数字化到底解决了什么问题？达到了什么目的？由于人们对制造物流的认知水平各异，所以对于制造物流数字化“这件事”的定义和定位不在应有的维度上。在企业要推动制造物流数字化之前，并没有制定制造物流策略和与此相适应的物流数字化策略，也没有形成制造物流数字化的价值导向、组织结构和物流战略绩效。由于没有明确的策略，所以各制造物流要素的价值导向与KPI指标可能相矛盾甚至相悖，容易导致物流数字化的局部优化，形成部门之间、业务模块之间的“内卷”。

（2）数字化产线并未匹配数字化物流

制造企业在产线设计、工艺布局等有多年的累积，数字化基础相对成熟，数字化产能能够将产线的设备、人员、工位布局、关键工序、生产节拍、设备稼动率、制造质量等数据全面呈现与预警。而对于制造物流而言，人们通常是“选择性的遗忘”，毕竟在布局工艺设施和产线时，CAD图样上并没有“物流的表现”，更没有“物流数字化”的表现（通常被称为“固定资产的布局”，而不是“流动资产的布局”）；另一方面，绝大多数企业并没有针对物流作业要素（物料的包装、搬运、存储、分拣、配送、工位“喂料”、空容器回收等）的时间、路径、标准动作等进行联动的作业分解，使得生产物流无法形成完整体系的数字化基础。此时导入物流数字化、智能化技术，往往只是解决点上的问题，并不是一体化的物流数字化和智能化。

（3）把制造物流现状当作数字化未来进行系统固化

很多企业在推进制造物流数字化之前，并没有针对物流策略定位、价值导向、业务逻辑、物流布

局、流程参数化设计等进行系统性、前瞻性的规划设计，只是在物流现状之上添加条码（或RFID）、数据采集器、WMS软件、物流设施等技术，通过软件和硬件提取制造物流运作现状数据，这就给经营者一个“数字化假象”：物流数据都有了，但是这些数据未必是连贯的、科学的和同维度的，这样往往会使得物流运营成为一个“盲盒”，无法量化企业的制造能力、物流能力和交付能力，也无法衡量其优劣。因此，将物流现状直接“翻译”成为未来的管理模式并进行系统固化，容易导致物流数字化、智能化迭代升级走入误区，以后再做优化和升级的难度将更大。

（4）高估了物流软件的作用

人们通常以为物流数字化就是上一套物流软件。且不说软件的质量和合理程度，即使是成熟的软件也无法面对所有多样、复杂、动态的制造物流场景。实际上，不同企业和不同产品，物流的人、机、料、法、环、测等方面的应用需求也不同，制造物流需要基于未来进行“以终为始”的梳理、规划与优化之后，才思考数字化需要解决的关键作业场景需求，再思考物流数字化的平台（而不仅仅是软件），才可能达成制造物流数字化的目标。

制造企业物流数字化发展要点

1. 通过企业数字化策略推动制造物流数字化框架构建，细化达成方略

图3为某制造企业的“物流发展战略屋”，该企业强调“打造全程可视、敏捷交付、高端质感的数字化物流运营中心”，为此强调四大战略支撑：计划引领、数智驱动、高效运营和极致交付，并往下分别细分为绿色、安全、品质、精益、智能、敏捷、透明和人才等要素配置。基于“以交付为中心”的全价值链核心要素（订单、人、机、料、法、环、测），梳理制造物流信息的全面可视化、实时化，通过制造物流数据驱动业务执行层的数字化、智能化控制，辅助管理层的实时、快速决策。

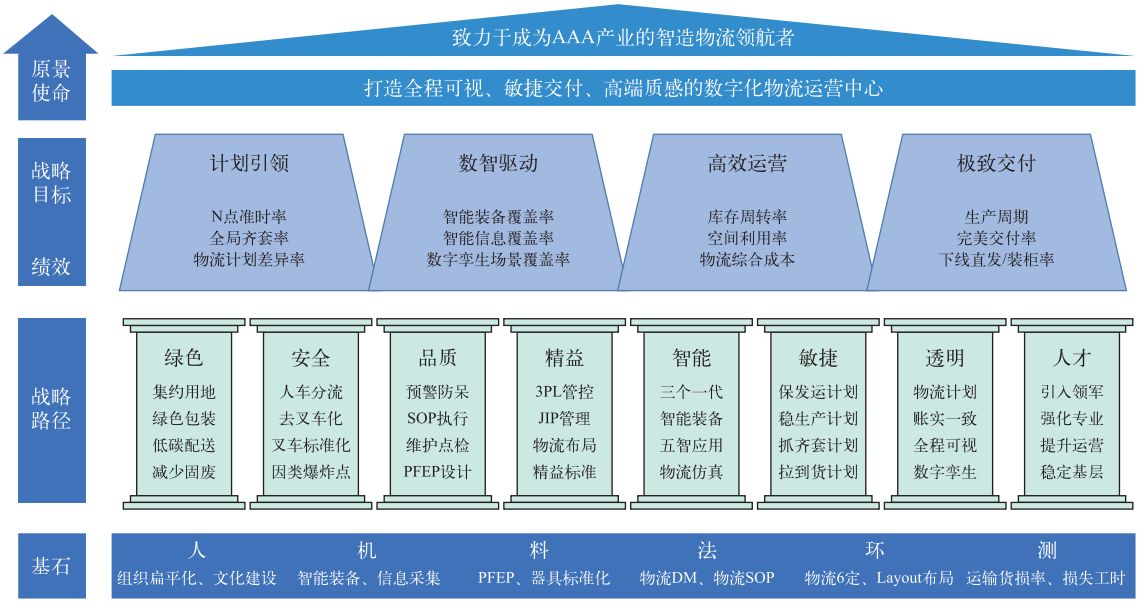

图3 某企业数字化工业园的战略屋

图片来源：上海天睿物流咨询有限公司

在物流发展战略的基础上，企业应梳理出物流数字化的场景和路线图。如图4所示，根据企业在价值链的关键场景，以功能地图展示物流数字化建设蓝图，以业务的全面数字化和KPI的IE化为目标，以计划、工艺、模具、物流、成品、品质和设备等作为抓手逐步推进。

2. 重塑制造物流业务逻辑，打造“交付中心”的物流能力

传统制造工厂以生产为中心，此时，数字化的关键指标有生产计划达成率、人均产出率、OEEE和设备利用率等，物流数字化也就相应地解决搬运方式和距离、存储方式与盘点、配送路径与设备利

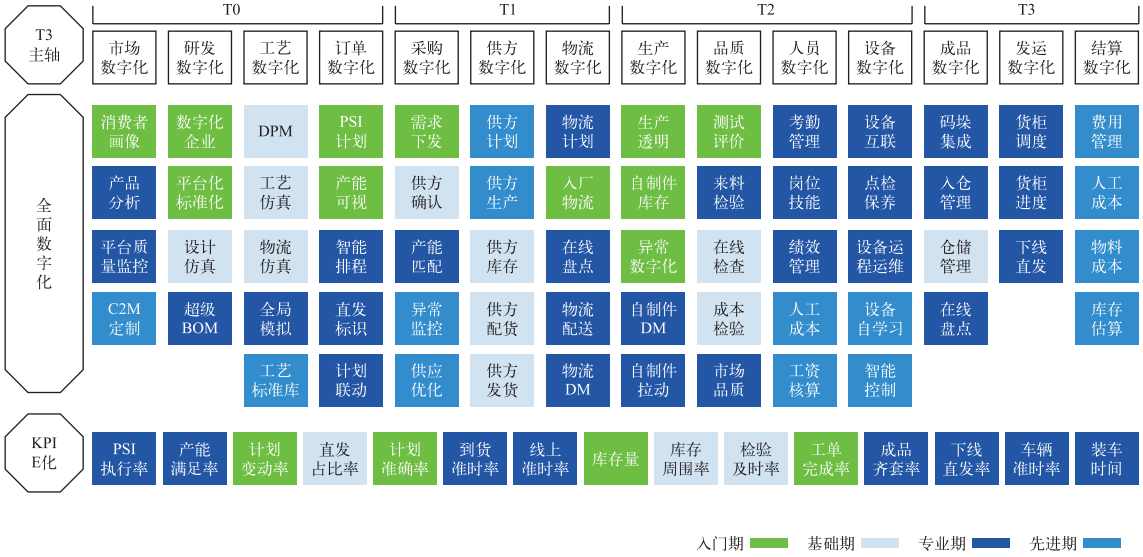

图4 某企业物流数字化推进路线图

图片来源：上海天睿物流咨询有限公司

用、人员减员等问题。

在数字化时代，工厂的任务主要是强调有效交付，业务逻辑变成通过全价值链的物流体系来保证交付，工厂成了“交付中心”，成为“大物流小生产”，制造成为该价值链中的一个业务单元，此时的物流数字化主要是强调全价值链的动态数字化。数字化的关键指标也相应地变为了强调ITO（库存周转率）、OTD（订单交付周期）、交付准时率、订单满足率和ECR客户响应等，物流数字化解决可流通性、物流价值链断点、流转效率、交付能力、对客户的承诺及其订单信息采集、内外部资源对接等问题。

物流业务逻辑的打通是物流数字化运营的首要任务。在物理上，借助物流单元化技术、存储技术、拣选与搬运技术等，尽可能减少物流过程断点、实物停顿等，实现端到端的连续流。在信息上，借助物流数字化平台实现实时的数据采集、信息和实体的双向通信、物流计划与作业的差异管控等功能，强调以物流计划为核心，保证发运计划、稳定生产作业计划、狠抓物料齐套计划、拉动供应商到货计划，实现物流的一体化运作和管理，从而最终实现物流过程的自感知、自决策、自调试。

只有在此基础上进行物流数字化，方能赋能工厂运营。工厂运营必须将物流数字化逻辑纳入整个工厂的运营管理逻辑中，强调物流与产品、市场、研发、需求、采购、生产、销售等业务流程之间的数字化打通和运营协同。

3. 应用“物流IE”梳理制造物流流程，量化相关参数和指标，形成数字化基础

在制造过程中，生产和物流作业是由加工、装配、检验、物流等作业的人和设备组成的，所有的物料流动都是由一系列动作组成的，这些动作的速度、数量、有效性等直接影响物流效率和安定生产。应用IE（工业工程）的动作分解法，将生产物流过程中的每一个动作细分、梳理、优化，对该动作进行时间、速度、数量、标准等的赋值（就像生产工艺IE化一样），以量化相关的物流作业场景，从而构成物流数字化的基础，典型场景如下。

（1）入场物流

管理和监控供应商到货的实时进度，规避供应商流程偏差风险，从而支持安定生产。为此，针对具体的采购物料要有供应商计划-执行的在线详细记录，如生产开始时间、生产结束时间、入库时间、装车发运时间、库存数量、在途数量等数据，还需要细化供应商到货的能力信息、采购订单进度、关键物料备货信息、采购过程异常信息等相关数据。

（2）入库接收

通过先期预约，供应商到货车辆通过车牌识别获得通行；相关订单和物料信息通过物流信息平台分配作业，调度和驱动卸货、入库等作业资源，实现收货、检验和存储等多个环节精确的时间、数量的实时可视，从而实现监控计划和实际作业之间的

差异预警和管理。

（3）物料存储

根据物料的PFEP（针对每个物料进行规划）的分类，需要对每个物料设定ID号作为基础数据。当物料进入仓储系统时，基础数据包括包装数据、订单数据、生产需求数据、库存数据、重量数据和出货时区等，都成为底层的关键数据，并且需要实时更新和体现。

（4）产线配送

根据物料所在的具体工位作业场景，细分到每一个物料、每一个工位和每一个平方米，以及物料包装、物料消耗节拍、总装自动化程度等要素，根据配送到工位的物流技术及设施方式来设定其配送节拍、效率和时间。

制造物流各个环节的运作信息需要集成化并进行清洗、分析、判断和决策，形成“驾驶舱”的模式。通过对各个关键环节的场景量化设计和KPI算法，即可将物流不同层级的绩效、各环节的数据和运营状态等显示出来，形成管理者和决策者需要的作业绩效数据。

4. 生产-物流动线设计，拉通制造价值链的数字化联动效应

生产企业物流强调生产制造工艺和物流工艺之间的动态连接与数字化联通，以保证生产交付的有效性。对于离散制造型企业而言，通常会涉及自制件（比如注塑、钣金冲压、机加工等）和总装等工序，不同的生产-物流的动线设计会使得上下道工艺的对接能力、产能协同能力、交付周期、在制品库存等存在很大的差异，其物流数字化的逻辑也就不一样。

在生产-物流动线设计中，通常会有两种布局方式：设备成组法和产品工艺法。设备成组法的优点是机器设备和人员的效率高；缺点是容易导致在制品库存过高。产品工艺法的优点是生产工序按照价值链一体化开展，拉通价值链达到系统最优，强调制造和物流过程无断点、生产和物流效率高、中间库存低；缺点是可能会损失某个工序的部分产能。“以交付为中心”的数字化工厂通常会采用产品工艺法布局，以拉通制造价值链的数字化联动效应。

图5为某数字化工厂钣金冲压的一个零部件，由于采用了产品工艺法布局，将冲压和总装进行并线设计（俗称“硬连接”），在制品库存由原来的5 000件降为连续输送链上的100件。其同行企业采用设备成组法的“独立钣金车间”模式，建了一座超过1 000个货位的自动化立体库来存放和管理这些库存，花费巨大的投资和物流成本的同时，还在物流数字化的逻辑中增加了一个并不增值的模块。

图5 某企业通过产品工艺法布局降低了在制品库存

5. 重点分析和解决工位物流数字化的拉动效应

无论是传统工厂、精益工厂、数字化工厂还是智能化工厂，工位物流的数字化拉动都应重点关注。制造物流主要是为生产服务，加工或装配的作业过程会涉及很多作业要素数据，比如生产节拍、物料节拍、设备能力、人员动作、物料上线方式、物料配送节拍、物料配送单元、物料包装、人员（或机器人）抓取物料的方便性和有效增值时间等，如图6所示。

在传统的制造过程中，工艺参数主要统计作业人员的有效装配时间，但是辅助时间（比如拿取物料和整理包装容器的时间）并未统计，而这个时间通常存在很大的差异和不确定性。一个包装单元的物料从仓库配送到工位，涉及物料单元包装方式、BOM数据、包装单元可持续使用时间、配送距离、配送周期和配送方式等数据，这些数据通常被割裂为不同的归属。因此，工位物流的全方位数字化协同是各个软件的“缝隙”，导致MES、WMS、APS、各类硬件调度和控制系统之间相互不联通、不同步和不协同，无法实现真正的智能制造-智能物流的协同。

图7是某企业通过优化产线设备排布、机器人对接、物流配送到工位方式等，使得物流系统和生产

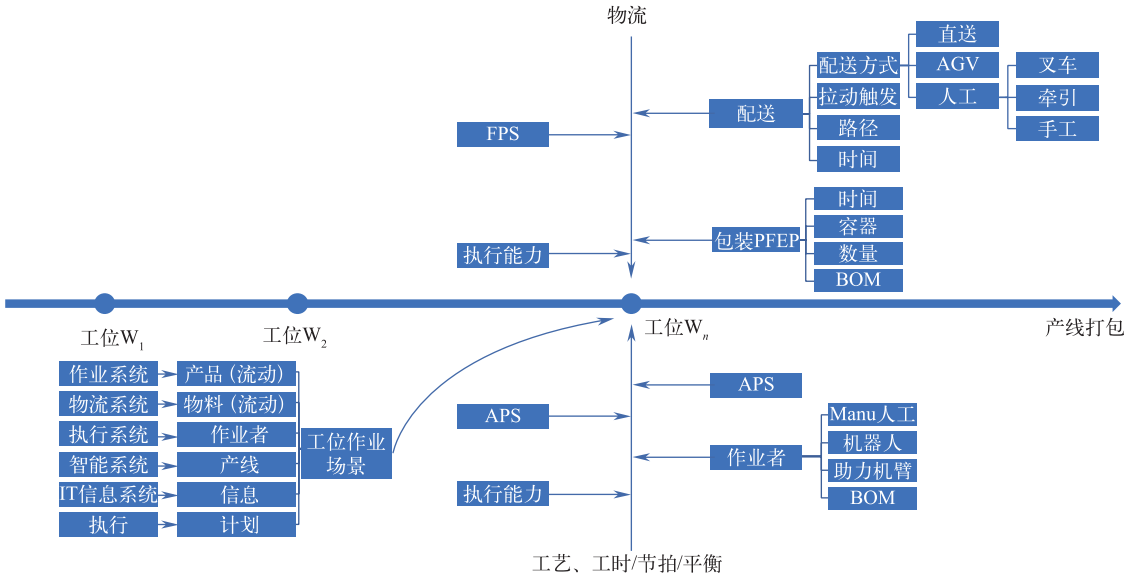

图6 工位物流涉及多种要素的数据联动

图片来源：上海天睿物流咨询有限公司

作业系统之间能够实时对应，真正做到“满箱换空箱”的数字化控制模式。在传统企业，该场景通常是在生产线边设立“线边库”，通过“水蜘蛛”进行物料协同，为此增加了物流断点、库存和空间浪费，使得物流管理和数字化更加复杂。

图7 某企业的工位物流数字化联动优化产线资源

制造企业物流数字化创新技术

1. 数字孪生技术支撑物流数字化

制造物流体系不断向数字化、智能化升级，一定会要求信息与物理实物也实现同步的融合和升级，数字孪生是数字化工厂的一个重要工具或者必要的先期验证、仿真、预警过程。建立与制造流程对应的物流数字孪生模型，该模型具备所有物流过程细节，可在虚拟世界中对现实物流过程进行验证和修正。尤其在数字化工厂先期规划时，对逻辑梳理和参数设定合理性验证、标准动态运营过程有效性验证和面对多影响因素的抗风险能力验证三个层次的数字孪生，更是制造物流建设与运营升级的重点。

为了保证物流过程的所有流程都准确无误，在数字孪生模型中对不同的生产和物流策略进行模拟仿真和评估，快速制定物流系统对于总装工位装配物料的配送模式，并且通过调度算法实现数据和物理之间的映射，进一步优化实现物流资源利用率的最大化，实现效率和盈利能力的最大化。

2. 导入物流自动化智能化技术，赋能数字化生产

物流技术包括物流硬技术和物流软技术两方面。物流硬技术是指物料活动过程中涉及的各种包装单元技术、搬运技术、自动装卸货技术、存储技术、拣选技术和码垛技术等，比如货架、堆垛机、穿梭车、机器人（机械手）和AGV/AMR等。物流软技术是指组成高效率的物流系统应用的物流软件、自动识别技术、多维监控及可视化技术、物流仿真技术等。

整个物流技术的发展历程大致可以分为人工阶段、机械化阶段、自动化阶段、集成化阶段和智能化阶段。在制造工厂物流技术的规划、运用与实施过程中，需要考虑不同生产模式、不同应用场景、

不同物料种类运用条件等要素，可能会选取不同发展阶段的物流技术及其相应的数字化模式来赋能制造。另一方面，物流技术发展也呈现柔性化、高效化、信息化、系统化、集成化和绿色化的特点，越往“高层级”发展，数字化赋能物流技术越是明显。RFID、大数据、云计算、云网络、区块链、AR/VR等技术在制造物流系统中将得到广泛应用。物流技术在不同的制造物流环节的应用场景如图8所示。

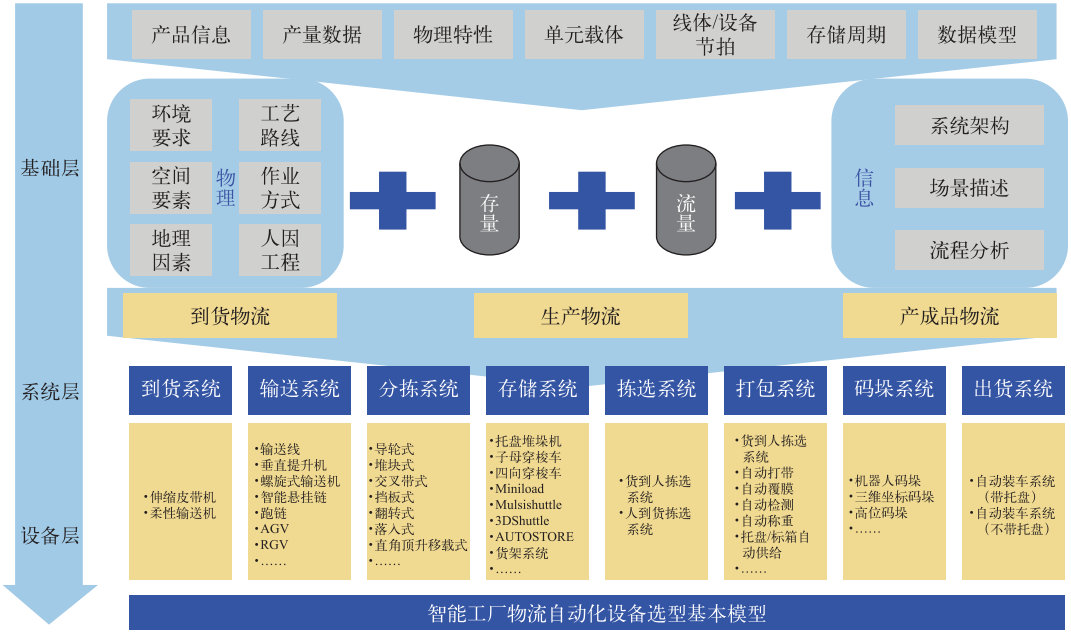

图8　物流技术应用场景

3. 5G技术赋能物流数字化

利用5G低时延特性、5G高速率、高带宽特性，5G技术可以赋能数字化交通、数字化园区、智能配送、智能安防等环节与领域，基于物联网实现车、路、人的完美协同，提升物流效率和人员、车辆、运输等管理能力，保障无人车、AGV甚至无人机安全驾驶和飞行，以实现智能配送和高清视频监控，以提供多重安防保障（包含消防安全）。5G技术的应用帮助企业实现从“被动型传统管理”到“主动型智能管理”的转型，促进工厂向“高智能、快决策、一体化”的方向迭代升级。

通过5G技术的赋能，可以促使工厂在人、机、料、法、环、测各项资源上都具备数字化、智能化元素。物流人员需要从简单重复的工作中释放出来，去研究整个智能工厂的底层运作规则和各个场景的作业算法；物流设备要能够联动，实时响应生产的需求；物料需要能够通过5G作业环境平台“说话”，能够匹配柔性动态组合的生产单元；工厂的法则需要去中心化，需要根据环境感知物料、设备、人员的实际情况，动态排布设定计划和规则；环境要具有高度的AI感知能力和实时传递能力，实时采集各个节点的数据和监控各个点的差异，通过设定的算法实现自反馈、自补偿。

在美的的灯塔工厂——微波炉工厂，通过使用5G技术，注塑零部件物料实现自动化下线、暂存、分拣、作业MO票齐套、物料智能化搬运配送到工位等无断点流程。在该无人仓内，可以看到各类智能设备的云调度，实现5G网络环境下智能搬运设备的系统调度、视觉导航、视频处理等，极大地增加物料搬运设备的部署周期和调度灵活性，提升物流对制造作业的柔性响应与降本增效。

新型制造企业物流数字化发展方向及路径

新型制造企业物流数字化发展方向是必然趋势，但是并没有固定的模式，每个企业有其自己的路径选择。物流数字化发展是智能制造达成必须要经历的过程，但不是目的，服务客户、创造价值才是目的。同时，制造企业物流数字化是一个持续迭

代升级的过程，并不是某个时间的静止状态，不能一蹴而就。

企业定义“制造物流数字化”时，由于企业商业模式、制造模式、交付模式、产品特性等的基础条件差异，决定了企业“物流数字化”范围和颗粒度是相对的，而非全价值链所有环节的考虑。实际上，目前难以准确的定义一个绝对意义的“制造企业物流数字化”。有条件的企业会率先推动物流数字化、智能化的迭代升级，从而达到数字化物流技术应用甚至商业模式转型升级的试错意义。企业也可以选取某条产线、某个车间、某个工厂作为内部的标杆逐步升级，不断优化数字化物流技术的应用场景，从而不断接近数字化工厂的水平，升级过程可以遵循精益化、模块化、自动化、数字化和智能化的基本规律。图9是某企业的制造物流数字化发展路径。

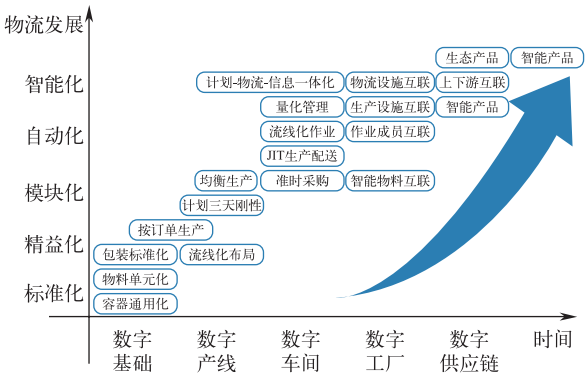

图9　某企业的物流数字化发展路径

制造企业物流数字化发展面临的问题和挑战

1）对于制造物流的数字化的认知能力。思维模式往往约束了团队的变革能力，很多时候，没有见过就无法创新，见识约束想象力。甚至沉浸在过去的成就中不肯改变，不接受新的事物，以传统的思维去思考和规划未来的物流数字化。

2）多项软硬技术融合能力的驾驭能力。如何系统化地将物流技术、大数据技术、工业互联网技术、人工智能、数字孪生技术和5G技术等融合协同起来是一项挑战，涉及多个学科。

3）供应链计划协同能力。比如需求-产能-供应能力的平衡；远期、中期、短期计划的平衡；要货计划、生产计划、采购计划、库存计划、发货计划和物流计划的协同等。

4）综合型人才梯队的培养与同步发展。比如数字化人才、智能化人才、物流工程人才、价值链人才、计划与物流协同人才、项目管理人才等迫切需要培养。

5）供应商综合能力配套。比如价值链上不同业务主体的价值认同能力、产能与生产计划能力、准时交付能力、品质能力、物流均衡性能力等，都可能成为制造物流数字化的结构性短板。

参考文献

[1] 陈明 梁乃明．智能制造之路[M]．北京：机械工业出版社，2018．
[2] 邱伏生．智能供应链[M]．北京：机械工业出版社，2019．
[3] 顾建党，俞文勤，李祖滨．数商：工业数字化转型之道[M]．北京：机械工业出版社，2020．
[4] 邱伏生．智能工厂物流构建-规划、运营与转型升级[M]．北京：机械工业出版社，2021．
[5] 陆大明．中国物料搬运装备产业发展研究报告[M]．北京：机械工业出版社，2023．