doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.038

基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统构建

许继平[1,2]　孔德政[1,2]　王昭洋[1,2]　赵峙尧[1,2]　于重重[1,2]

(1.北京工商大学人工智能学院, 北京 100048;
2.北京工商大学中国轻工业工业互联网与大数据重点实验室, 北京 100048)

摘要:粮食生产供应关乎国家安全稳定,针对目前粮食供应链存在的数据共享水平低、管控智能化程度不高等问题,构建基于工业互联网标识解析技术的粮食供应链数字孪生系统。以大米供应链为典型对象,首先设计涵盖收购、运输、加工、仓储、包装、销售的大米全供应链数字化模型,研究基于标识解析体系的各环节全要素标识编码和数据开放共享,建立实物对象与信息系统之间的数字桥梁;提出包含物理层、网络层和孪生层的数字孪生体系架构,形成基于工业互联网的数据流通共享基础,明确孪生体系架构的关键模型;并详细阐述设备、产线、物料等对象的全要素精准建模过程,构成集几何模型、物理模型、行为模型和规则约束模型为一体的数字孪生模型;最后借助 Unity3D 软件以及 C#编程技术搭建大米供应链数字孪生原型系统,实现对产线的三维可视化监控。实验结果表明,该系统在供应链全要素数据充分共享基础上,通过三维展示、预测控制和智能决策一定程度上提升了大米供应链智能化监管能力,为工业互联网等技术赋能产业数字化转型提供参考。

关键词:大米供应链;工业互联网;标识解析;数字孪生;产业数字化

中图分类号:TP391.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)03-0372-10　　**OSID**:

Construction of Digital Twin System of Rice Supply Chain Based on Industrial Internet

XU Jiping[1,2]　KONG Dezheng[1,2]　WANG Zhaoyang[1,2]　ZHAO Zhiyao[1,2]　YU Chongchong[1,2]

(1. *School of Artificial Intelligence*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*
2. *Key Laboratory of Industrial Internet and Big Data of China National Light Industry*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Food production and supply is related to national security and stability. In view of the low level of data sharing and low level of intelligent management and control in the current food supply chain, a digital twin system of food supply chain based on industrial Internet identity resolution technology was built. Taking the rice supply chain as a typical object, firstly, a digital model of the whole rice supply chain covering purchase, transportation, processing, warehousing, packaging and sales was designed, and all elements of the identification coding and data open sharing based on the identification analysis system were studied, and a digital bridge between the physical object and the information system was established. The digital twin architecture, including physical layer, network layer and twin layer was proposed to form the basis for data circulation and sharing based on industrial Internet, and the key model of the twin architecture was defined. The whole element accurate modeling process of equipment, production line, materials and other objects was described in detail, forming a digital twin model integrating geometric model, physical model, behavior model and rule constraint model. Finally, with the help of Unity3D software and C # programming technology, the rice supply chain digital twin prototype system was built to realize the three-dimensional visual monitoring of the production line. The experimental results showed that, on the basis of full sharing of all factor data of the supply chain, the system improved the intelligent supervision capability of the rice supply chain to a certain extent through three-dimensional display, predictive control and intelligent decision-making, and provided reference for the digital transformation of industrial Internet and other technology enabled industries.

Key words: rice supply chain; industrial Internet; identity resolution; digital twins; industrial digitalization

收稿日期:2022-11-09　修回日期:2022-12-31

基金项目:教育部产学合作协同育人项目(202102341003)、北京工商大学教育改革研究项目(jg2152053)和工信部工业互联网创新发展工程项目(TC200A00L-3、TC210A02N)

作者简介:许继平(1979—),男,副教授,博士,主要从事区块链、工业互联网和智能信息处理研究,E-mail:xujiping@139.com

0　引言

传统的粮食生产加工行业，具有信息化与智能化不足、管控成本较高、安全隐患监测困难等特点[1-3]，并且现有的粮食加工生产线的信息化和智能化程度偏低，难以实现生产线全要素信息的感知、获取及进一步优化[4]。近些年来随着规模化加工业的兴起以及工业 4.0 概念的逐步普及，加工装备行业出现了一些新的变化[5]。伴随互联网和大数据等新一轮信息技术的发展，陆续出现了智能化加工装备，通过生产设备间的信息互联，使生产指挥更及时、准确、高效[6-8]。

数字孪生概念是 2002 年提出的[9]，数字孪生技术是连接物理世界与虚拟孪生世界的桥梁，通过孪生端的三维仿真模型来映射物理空间的真实物体[10]。随着新一代信息技术的发展，加工制造车间向数字化和智能化转型也不断向前推进[11-12]。尤其是近年来数字孪生技术的飞速发展，国内外众多学者对数字孪生进行了大量的研究和实践，并取得了相应的成果[13-23]。

虽然目前数字孪生技术的研究已取得了相应的成果，但在跨区域、跨主体、跨行业、跨平台的多跨应用场景中虚拟世界与物理世界的数据交互还存在着数据难以互联互通的问题[24]。当前，工业互联网标识解析系统已经应用在各个行业[25]，标识解析体系赋予每一个物理对象或虚拟对象唯一的身份编码并承载相关数据信息[26]，通过接入国家工业互联网标识解析体系打通各中小企业平台，实现数据的全面采集、各环节企业间的数据共享[27]。近年来，我国高度重视工业互联网标识解析体系建设，截止 2021 年底，我国工业互联网标识注册数量实现了爆发式增长[28]，标识解析国家顶级节点已在各一线城市陆续完成布署并上线[29]，并且标识解析二级节点将在各省市陆续启动上线，其中覆盖行业包括家电、供应链、食品、建筑材料、航天设备等[30-31]。

本文将工业互联网标识解析体系与数字孪生系统相融合，从数字孪生的角度出发并引入工业互联网标识解析技术，以大米供应链为研究对象，将二者相结合提出一种基于工业互联网标识解析体系的大米供应链数字孪生系统。其次通过标识解析体系对各环节全要素进行标识编码和数据开放共享，建立实物对象与信息系统之间的数字桥梁。最后使用数字孪生建模技术对生产车间进行三维可视化监控，结合大数据分析和人工智能等技术实现对系统和产线的动态优化和维护。

1　大米供应链全流程信息模型构建

1.1　大米供应链业务流程及关键信息分析

大米供应链在食品供应链中具有典型性，其特点为生命周期长、环节复杂，各环节涉及到的设备资源和业务数据种类众多。根据大米供应链的实际情况和生产过程中的相关质量和安全指标，将全链分为收购、运输、加工、仓储、包装、销售 6 个环节，如图 1 所示。



图 1　大米供应链流程图

Fig. 1　Flowchart of rice supply chain

大米供应链从收购到销售，中间历经多个环节，各个环节之间的分工各不相同，相互关联、相互作用、相互协调。大米供应链的始端为原粮收购，后期的工作以原粮的加工、仓储和包装等工序为主，其中加工环节是全供应链的核心，供应链后期的关键在于成米的销售和流通。由于供应链周期较长且信息种类繁多，不利于进行良好的监督和管理，对此将供应链按照层级划分。将各主环节分为不同的子环节，每一子环节细化为具体的业务流程和生产要素，形成了大米供应链全流程信息模型，如图 2 所示。

大米供应链以收购为起点，为提升整体的信息安全保障，需要严格把控原粮的各项信息，包括产品名称、规格型号、供应商、生产日期、产地和质保期等多项指标。接下来进入加工阶段，分为原粮仓储、原粮运输、原粮加工、成米运输 4 个子环节。原粮仓储涉及到的内容相对丰富，包括除杂和贮藏等相应工作，需要严格把控决定粮食质量的温湿度、有害气体浓度、粮食存储量等信息；加工环节包括大米剥壳及润洗等过程，使用监测设备对加工工序进行逐层把关，加工好的大米进入粮仓进行仓储，并通过仓储和包装环节设备的联动控制完成大米的打包和运输。销售是大米供应链的末端，该环节包括各商家和零售商对大米进行售卖，在销售时同样需要使用收购环节的信息模板进行成品赋码，销售人员使用扫码枪扫描包装袋二维码获取信息，从而计算大米销售总量。

1.2　大米供应链全流程标识编码设计规范

工业互联网标识解析体系为方便企业快速的接入，编码规则设计采用层次标识方案设计，相对简单、灵活。标识码主要由标识前缀、分隔符、标识后缀组成，前缀为其命名机构，后缀为命名机构下的唯一本地名称，由“/”分隔前缀和后缀。标识前缀根

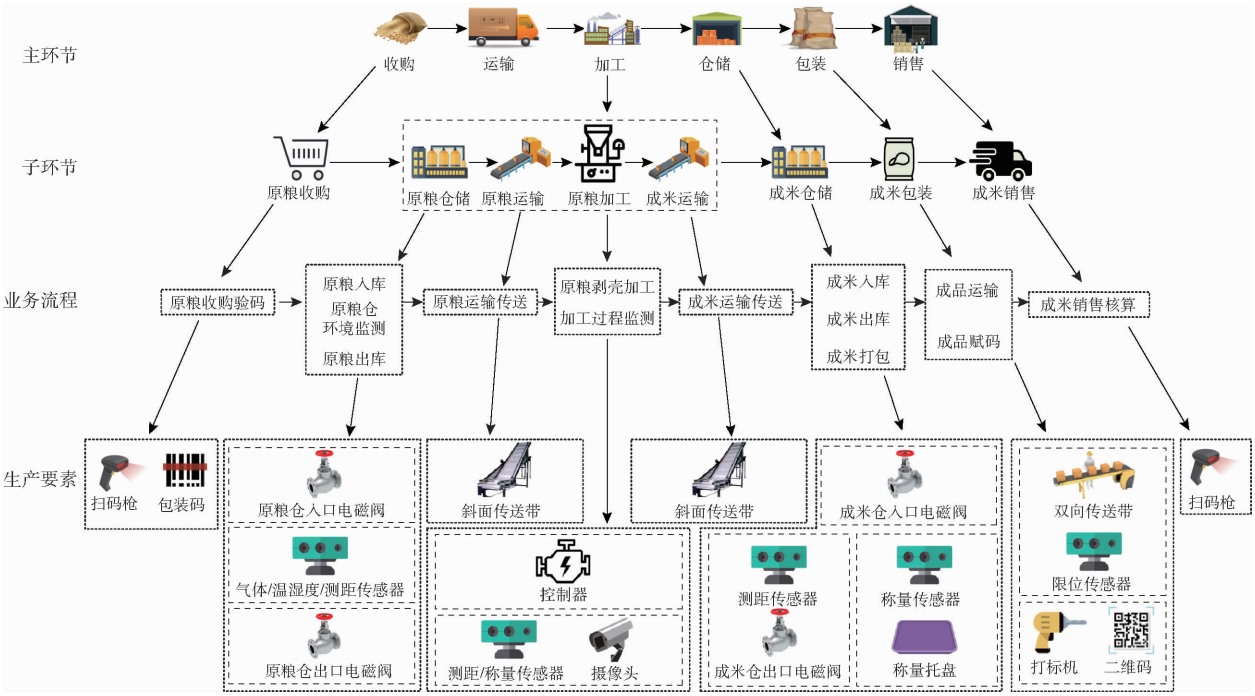


图 2 大米供应链全流程信息模型

Fig. 2 Information model of rice supply chain

据企业自身性质进行赋码,其包括国家代码、二级节点代码、企业代码,中间使用字符“.”作为分隔,用于唯一标识企业主体;标识后缀由命名机构自行定义,规则多样,只需保证在本地命名空间内唯一即可,用于唯一识别标识对象。在标识编码定义原则中,企业如果没有指定相应的标识后缀,则由国家顶级节点随机自动分配,企业也可以根据自身的业务需求自行设计生成后缀。

根据粮食加工行业特点,结合大米供应链加工过程的业务需要,设计的基于大米供应链的工业互联网标识编码规则如图 3 所示,包括国家代码、二级节点代码、企业代码、用户代码、环节代码和对象代码。

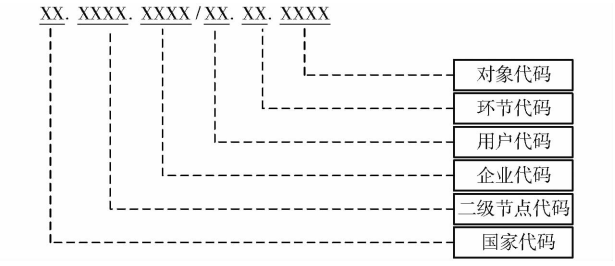


图 3 标识编码设计规则

Fig. 3 Identification code design rules

标识后缀根据需求自行设计,用户代码从“0”开始依次累加,每个用户使用一套标识编码,通过自身代码进行区分。环节代码用于区分供应链的各个环节,分别为原粮收购-00、原粮仓储-01、原粮运输-02、原粮加工-03、成米运输-04、成米仓储-05、成米包装-06、成米销售-07。考虑到孪生系统的实时监测和优化控制需要,对象代码根据供应链中的数据分类进行设计,分为设备代码、状态数据代码和控制数据代码。基于工业互联网标识解析体系的大米供应链标识编码方案如表 1 所示,以原粮收购、原粮仓储和原粮运输 3 个环节为例。

2 大米供应链数字孪生系统框架

在数字孪生系统中引入工业互联网标识解析技术,提出了一种大米供应链数字孪生系统架构,如图 4 所示,包括物理层、网络层和孪生层 3 个层级。

2.1 物理层

物理空间是数字孪生系统中孪生层的映射基础,同时也是供应链各环节生产任务的执行载体。作为孪生系统映射的基础,物理层主要提供了大米供应链中所需的物料、生产设备、流水产线、生产环境及操作人员等全部生产要素,并在现场控制系统的驱动下进行数据的传输和采集,从而实现生产要素数据的流通。首先在原粮收购和成米销售环节中产生的业务信息通过扫码枪和打标机连接物联设备上传至购售台账,在台账中可查询每袋原粮和成米的信息以及阶段性的收购总量和销售总量。其次,设备信息录入模块根据录入模板阶段更新设备的状态信息,并对产线中的设备信息进行备案。在产线运转过程中,现场控制器通过 485 总线等通信方式采集设备数据并实施闭环控制,传感器实时采集的环境和设备数据同样通过总线传送至现场控制台,从而监测产线环境状态及设备运行状态。在系统运

表 1　大米供应链标识编码设计方案

Tab. 1　Design scheme of rice supply chain identification code

环节	环节代码	设备	状态数据	控制数据	对象代码
原粮收购	00	扫码枪			1000
			原粮收购总量		2000
		原粮包装条形码			4000 +
原粮仓储	01	原粮粮仓			1000
		原粮仓入口电磁阀			1001
		温度传感器			1002
		湿度传感器			1003
		二氧化碳传感器			1004
		激光测距传感器 1			1005
		激光测距传感器 2			1006
		原粮仓出口电磁阀			1007
			原粮仓入口电磁阀开度		2000
			原粮仓温度		2001
			原粮仓湿度		2002
			原粮仓二氧化碳浓度		2003
			激光测距传感器 1 数据		2004
			激光测距传感器 2 数据		2005
			原粮仓出口电磁阀开度		2006
				原粮仓入口电磁阀开度	3000
				原粮仓出口电磁阀开度	3001
原粮运输	02	原粮运输传送带			1000
			原粮运输传送带速度		2000
				原粮运输传送带速度	3000

行过程中，各模块的协同运转将数据在物理层和网络层中进行双向传递和交互，为促进数字孪生系统在物理空间和虚拟空间的信息传递与融合奠定基础。

2.2　网络层

网络层是将物理层采集到的各种数据信息传输至孪生层中的媒介，常见的数据传输方式有现场总线、工业以太网等通信方式。而作为新一代信息通信技术的工业互联网标识解析体系，具有较高的兼容性、稳定性、高并发性和可用性，其通过赋予对象标识来实现多跨领域中信息的流通与共享。

工业互联网标识解析体系由国际根节点、国家顶级节点、二级节点、企业节点和递归节点等要素构成，如图 5 所示。而二级节点是工业互联网标识解析的关键环节，直接面向行业和企业提供服务，向上对接国家顶级节点，向下对接企业节点及应用系统，并依据统一的接口开发规范和安全访问机制，面向特定的企业提供标识注册、标识解析服务和标识数据服务等。因此采用工业互联网标识解析二级节点数据平台来实现数字孪生系统中物理层和孪生层之间的数据传输，从而提高数据传输的可靠性和安全性。

根据数据在网络层中流向的不同，将数字孪生系统中的流通数据分为状态数据和控制数据。其中状态数据由网络层流向孪生层，企业通过外部接口对标识进行查询，从而解析出标识编码下对应的状态数据信息，实现物理世界的数字化映射；而控制数据由孪生层流向网络层，与标识查询相反，控制数据以更新的方式替换标识编码下的历史数据，进而将数据存储在标识解析平台，实现对物理对象的远程优化控制。标识编码根据模板中设置的数据规模，每一标识编码下可对应大量的数据，平台具备海量的标识和数据的存储及计算能力，且支持对标识和数据的融合和清洗，将同一环节下的标识编码进行分类整合，并剔除信息成分缺失的标识，保证了平台中标识数据的完整性。

2.3　孪生层

孪生层是各类数据驱动的生产任务仿真分析、任务执行状态预测和优化的载体，通过对数据的动态挖掘和实时分析等手段实现数据与模型的自动关联和调整，达到对物理空间的精准映射。孪生层的核心环节为综合管控系统，其具有高度灵活的可配置性，系统启用前可通过系统配置模块调用接口进行标识的注册和注销以及身份验证，访问权限通过后可对管控系统进行操作使用。通过状态监测模块获取的实时数据和高保真的孪生模型实现对生产线运行状态的实时感知与监测，进而实现异构模型的融合与可视化展示。业务信息模块根据产线和状态监测模块中产生的实时数据进行优化、诊断和决策，物理层将孪生层中的生产任务仿真、验证与优化的数据通过决策控制模块不断反馈至实物产线中，并实时调整参数以满足实际生产需求，以降低供应链发生风险的概率。

3　大米供应链数字孪生模型构建

在大米供应链数字孪生系统中，需要真实、全面、综合地反映物理空间的状态行为，因此数字孪生模型的构建是尤为关键的一步。孪生模型是物理空间实体设备生产状态的映射，为供应链仿真分析及

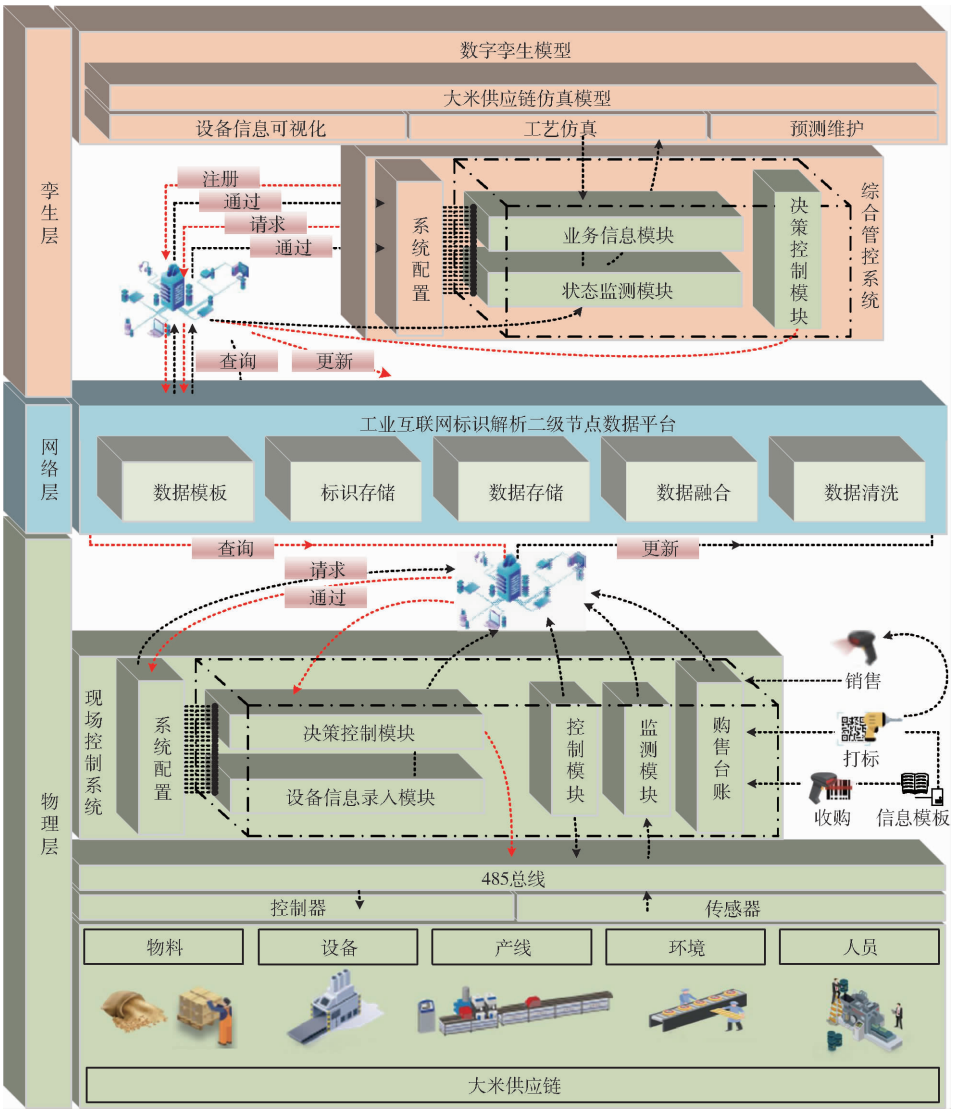


图 4 大米供应链数字孪生系统框架

Fig. 4 Digital twin system framework of rice supply chain

运行状态监测和优化控制奠定了基础。对此构建高保真的虚拟孪生模型,实现虚实空间的同步映射和数据的同步传输。

大米供应链是将稻谷经过运输、加工到包装等工序,最后完成销售的一系列过程,各环节涉及到的物理对象包括粮仓、原粮、成米、运输传送带、碾米机、警报器、二维码、人物模型以及场地布局背景等。为了实现大米供应链数字孪生模型对物理空间的实时映射,需要在几何模型的基础上融入物理模型、行为模型和规则约束模型等,从几何、物理、行为、规则、约束等维度,形成覆盖关键设备形状、尺寸、位置、运行状态、物理参数等多科学、多物理量和概率化的数字孪生仿真模型,进而从多维度对大米供应链进行描述。

几何模型包括大米供应链设备的形状、尺寸、位置以及各零部件的“父子”关系等,通过 3Dmax 和犀牛等软件对物理对象进行建模,保证孪生模型与物理实体对象拥有良好的时空一致性。

物理模型是在几何模型的基础上增添了设备的物理属性,将构建的几何模型导入 Unity3D 中,Unity3D 具有强大的物理引擎,可高效、逼真地模拟刚体碰撞、外观渲染、粒子流体和重力等物理效果,此外设备的运行速度、电机转速、电流和温度等数据指标,也可通过相应的手段技术来记录和观察。

行为模型则通过响应大米供应链产线中物理对象的动作状态、驱动和扰动因素,采用相应的控制指令和 C#编程语言设置相应的规则、响应对孪生模型进行驱动和控制,其包括供应链产线中的生产行为和故障行为等。

规则约束模型使孪生模型具备关联、决策、故障诊断和预测维护的能力。使用算法模型不断发掘新的演化规则,从而对物理空间进行决策控制,进而对数字孪生系统起到预测性维护的作用。

数字孪生模型通过 4 种模型的融合,使构建的

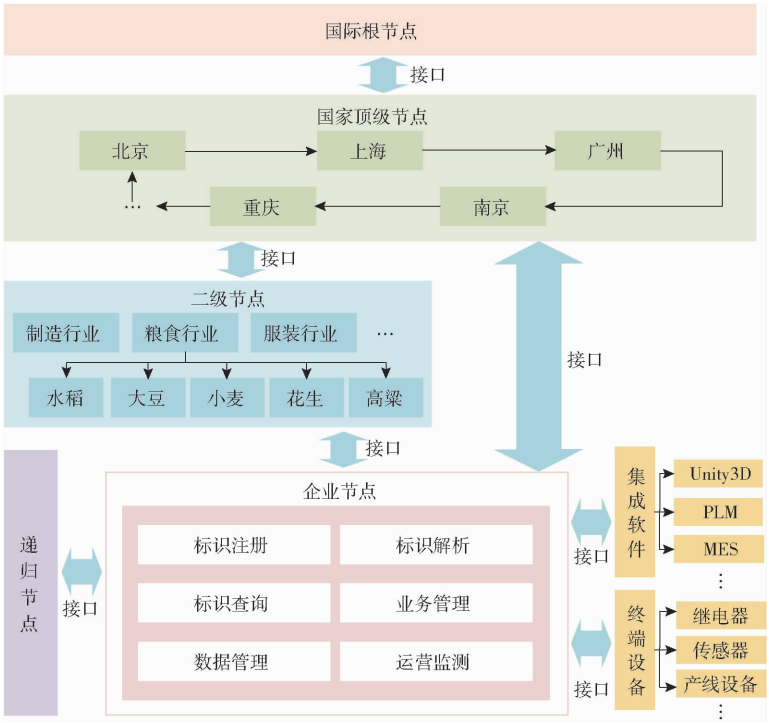


图 5　粮食行业工业互联网标识体系架构

Fig. 5　Industrial Internet identification system architecture of grain industry

虚拟模型可对物理实体进行实时可视化监测、决策控制和预测性维护等，并以三维的形式进行工艺作业仿真。

根据大米供应链所涉及的内容，将大米供应链数字孪生模型具体细化为

$$D = D_1 \cup D_2 \cup D_3 \cup D_4 \tag{1}$$

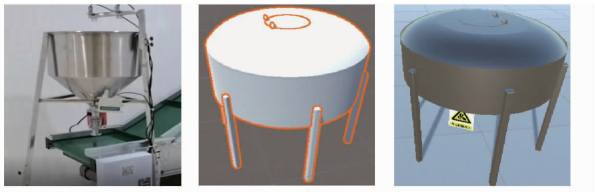
式中　D_1——设备数字孪生模型

D_2——产品数字孪生模型

D_3——人员数字孪生模型

D_4——环境数字孪生模型

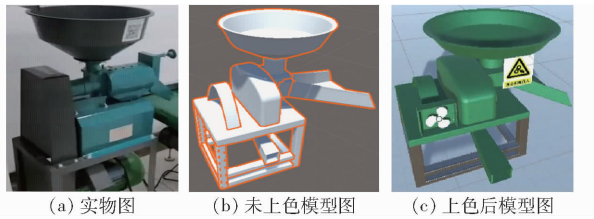
针对大米供应链生产线中涉及的核心设备资源，参照实际大米供应链全过程进行模拟化设计，采用圆筒、传送带、小型碾米机等搭建了大米供应链实物仿真模型，并对其采用 3Dmax 和犀牛软件等建模工具进行几何建模，如图 6 ~ 9 所示。在设备模型中，碾米机为加工设备、传送带为运输设备、粮仓为存储产品和物料的设备，为完成孪生模型对物理实体的真实映射，模型首先需确保在设备的形状、位置、尺寸和部件的“父子”关系等要素，与物理实体拥有良好的时空一致性，并且通过渲染器和碰撞器等引擎使其在视觉和效果上与物理实体保持一致。



(a) 实物图　(b) 未上色模型图　(c) 上色后模型图

图 6　粮仓模型

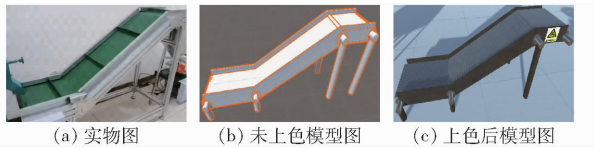
Fig. 6　Granary modeling



(a) 实物图　(b) 未上色模型图　(c) 上色后模型图

图 7　碾米机模型

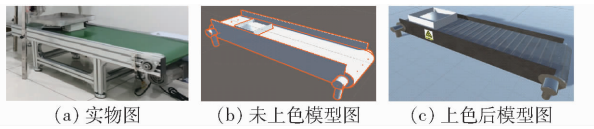
Fig. 7　Rice milling machine modeling



(a) 实物图　(b) 未上色模型图　(c) 上色后模型图

图 8　粮食运输传送带模型

Fig. 8　Modeling of conveyor belt for grain transportation



(a) 实物图　(b) 未上色模型图　(c) 上色后模型图

图 9　成品运输传送带模型

Fig. 9　Modeling of finished product transport belt

同时，孪生模型需要通过控制指令和程序驱动完成其生产行为，需定义相关的虚拟服务。因此，设备数字孪生模型的行为准则定义为

$$D_1 = \{S_1, V_1\} \tag{2}$$

其中，S_1 为设备行为模型，数字空间要根据实体设

备建立对应功能的孪生模型,不仅要在几何、外观和物理结构上保持一致,同时要在行为上达到同步映射。V_1 为驱动服务,行为模型的有机连接与运行需要各种驱动服务的支撑,在 Unity3D 中则使用 C#编程语言以及控制协议对其进行控制,此外包括设备功能的实现、信号的处理、模型的行为、运行规则的约束等均可通过驱动服务来实现。

人员数字孪生模型主要体现在动作和空间位置两方面,通过三维结构模型映射人体结构,利用定位/动作数据接口获取物理空间的实体空间定位和关节动作数据,利用活动监控服务驱动数字模型的动作及位置更新。因此,人员数字孪生模型定义为

$$D_2 = \{S_2, L, V_2\} \tag{3}$$

式中 S_2——人员行为模型

L——定位/动作数据接口

V_2——活动监测服务

对于原粮和成米,在不同的加工阶段对应着不同的几何和外观形态,不同环节会根据其工艺数据驱动产品几何状态的演变。因此,产品数字孪生模型定义为

$$D_3 = \{S_3, V_3\} \tag{4}$$

式中 S_3——产品三维状态模型

V_3——演变驱动服务

供应链数字孪生系统的生产环境模型为

$$D_4 = \{C, S_4, V_4\} \tag{5}$$

式中 C——环境规则约束模型

S_4——环境状态模型

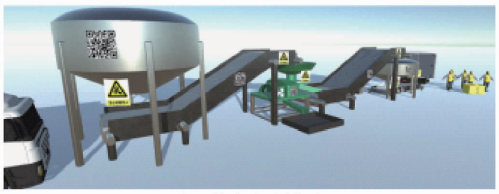
V_4——环境监测服务

孪生层通过传感器进行环境数据的获取,在孪生层解析后以量化的形式进行显示,并结合数据采用算法模型等技术对系统进行研究,实现数字孪生生产线运行过程的智能决策和优化。

通过上述分类及准则,根据搭建的大米供应链实物仿真模型,对设备资源、生产环境以及稻谷生命周期进行建模,构建的大米供应链数字孪生模型如图 10 所示。



(a) 实物仿真模型



(b) 数字孪生模型

图 10 大米供应链数字孪生模型

Fig. 10 Digital twin model of rice supply chain

4 大米供应链三维可视化系统设计与实现

在大米供应链数字孪生模型搭建过程中,已具备完善的工业互联网标识解析体系,且涉及到完善的工业互联网标识编码规则以及成熟的云基础服务和云计算平台。在此基础上使用 Unity3D、标识解析数据平台、通信接口、C#脚本、UGUI 界面、XChart - 3.1.0 等共同搭建了大米供应链三维可视化平台,对物理层中供应链数据进行实时感知、优化控制和诊断决策,从而构成了大米供应链数字孪生系统。

综合管控系统是三维可视化平台的核心,主要以 UI 界面的形式呈现,图 11 为可视化监控平台主界面,共分为系统配置、状态监测、业务信息、决策控制和退出系统 5 个模块,均采用 UI 按钮进行驱动,其具有系统配置、数据查询、统计分析、决策控制、风险预警等功能。

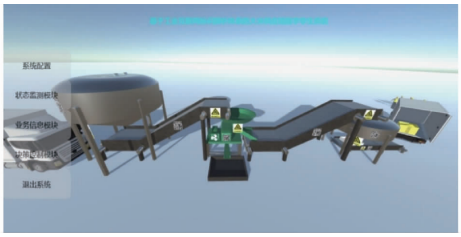


图 11 大米供应链三维可视化平台主界面

Fig. 11 Main interface of rice supply chain 3D visualization platform

标识解析系统配置模块是使用综合管控系统的第一步,包括标识注册、标识注销、身份认证和密码认证 4 个功能,配置流程如图 12 所示。在系统配置未完成验证之前,其他功能均不可操作和使用。

状态监测模块在于对供应链产线运行状态进行实时感知监测,图 13 为状态监测模块可视化 UI 界面,当监测模块开始运行时,系统会查询解析生产现场的实时数据并显示在监测模块的界面中,实现数据可视化效果。通过构建消息中心,将原粮运输传送带速度、碾米机启停状态、成米运输传送带速度等状态数据实时传送至供应链孪生模型端从而控制生产行为运转,使其与实际生产线保持同步映射关系,达到数据和模型双重可视化的效果,从而实时监测设备的运转情况。

图 14 为业务信息模块和决策控制模块 UI 界面,业务信息模块可将系统运行时间、标识注册和解

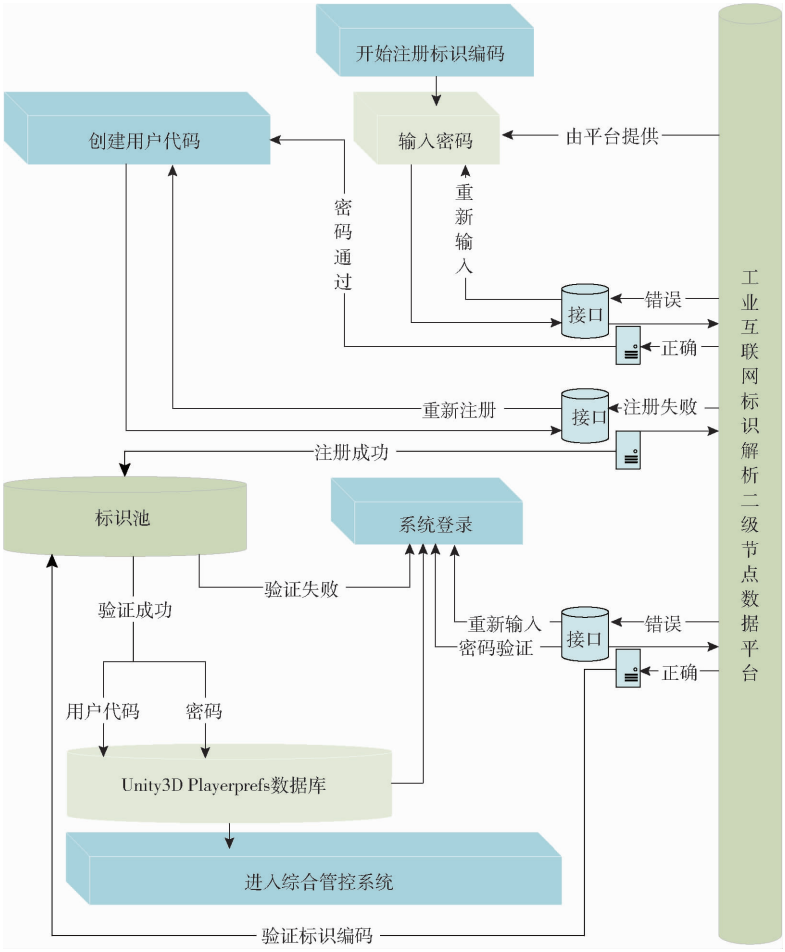


图 12　标识解析系统配置流程图

Fig. 12　Flowchart of identification analysis system configuration

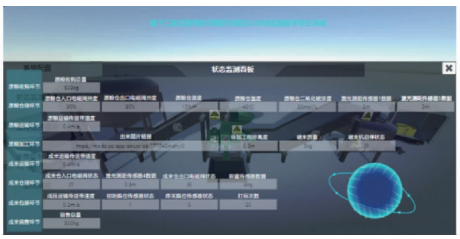


图 13　状态监测模块界面

Fig. 13　Status monitoring module interface



图 14　业务信息、决策控制模块界面

Fig. 14　Interface of business information and decision-making control module

析次数等业务数据实时显示在界面中。在大米供应链产线运转过程中，经常受到多元动态扰动事件的干扰，最常见的扰动事件为机器故障和环境数据超标等，对此联合状态监测模块动态监测实物产线中的故障和环境数据，当超出额定上限时平台会作出警报响应，并分别记录警报次数和危险数据。如图 15 所示，运用大数据分析比对预测结果对供应链的影响，提前制定应对策略，借助决策控制模块手动输入决策控制数据上传至标识解析平台，从而降低或消除扰动事件对供应链带来的危害。



图 15　系统统计分析界面

Fig. 15　System statistics analysis interface

在系统性能方面，需要具有强大的业务处理能力、灵敏的响应时间以及良好的性能指标等，如表 2 所示，标识解析体系在对业务数据的处理和性能上有较高的要求。对此采用多线程调用、网络自动切换和并行编程等技术来提升数字孪生系统的响应时

间和吞吐量等性能指标。

表 2 标识解析体系性能指标

Tab. 2 Identification and analysis system performance indicators

类别	参数	数值
系统处理能力	TPS(吞吐量)/(笔·s^{-1})	>20 000
系统响应时间	时间/s	0.1 ~ 0.3
稳定性	TPS 为 20 000 笔/s 时系统稳定运行时长/h	>10
失败率	查询失败率/%	<5
CPU	各类系统主机 CPU 资源占用率/%	<80
内存	各类系统主机内存占用率/%	<80

在系统测试中,以 Unity3D 中综合管控系统查询解析标识数据为测试场景,在网络最佳状态时向标识解析数据平台发起查询请求。设置用户代码为 0 ~ 99 共 100 套标识,每套标识码下为 60 个标识编码,并预设响应时间为 0.2 s。按照并发梯度的方法,逐步提升并发用户数的压力,每组梯队运行 15 ~ 20 min,观察收集各测试组在完成查询解析后的各项数据,得到梯度变化曲线图,如图 16 所示。

如图 16 所示,在并发用户数达到 70 前,系统实际 TPS 和实际平均响应时间达到预期值,并且部分范围内的 TPS 已达到 20 000 笔/s 以上;当并发用户数超出 70 后,系统实际 TPS 和响应时间无法达到预期,但系统 TPS 均达到 20 000 笔/s 以上,实际响应时间在预设范围内。通过实验数据表明,系统具有灵敏的响应时间和较高的吞吐量,在性能方面均达到预期标准,进而实现了数据的实时可视化效果、对物理对象的精准映射、对决策指令的及时响应和强大的数据处理等功能,较大程度上提高了系统的鲁棒性能。

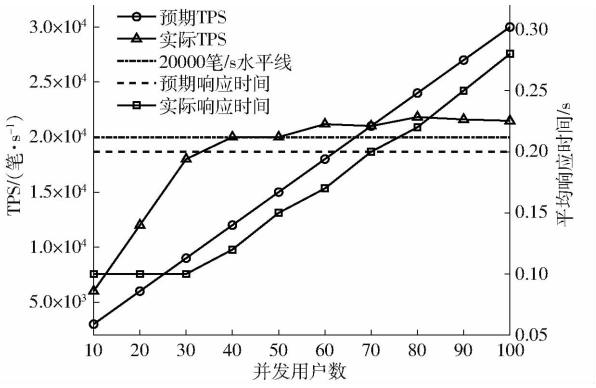


图 16 系统查询解析处理能力梯度变化曲线

Fig. 16 Gradient change curves of system query and analysis processing capacity

5 结束语

本文将工业互联网标识解析和数字孪生技术与大米供应链相结合,设计了基于标识解析体系的各环节全要素标识编码并构建三维可视化原型系统来实现大米供应链产线的可视化监控,实现了对大米供应链全流程的动态监控以及数据共享,使得孪生系统在交互过程中更具透明化。本系统不仅可以对产线当前的工作状态进行动态监测,还融入了算法模型对历史数据进行分析,对系统进行优化、预测性维护和全生命周期管理,提高了大米供应链产线数字化、智能化水平,为产线的安全可靠运行提供了保障。

参 考 文 献

[1] 张新,彭祥贞,许继平,等. 基于区块链智能合约的稻米供应链动态监管模型[J]. 农业机械学报,2022,53(1):370 - 382.
ZHANG Xin, PENG Xiangzhen, XU Jiping, et al. Dynamic supervision model of rice supply chain based on blockchain smart contract[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(1): 370 - 382. (in Chinese)

[2] 赵卿宇,郭辉,陈博睿,等. 大米储藏过程品质变化及其动力学[J]. 食品科学,2020,41(21):204 - 212.
ZHAO Qingyu, GUO Hui, CHEN Borui, et al. Quality change and dynamics of rice during storage[J]. Food Science, 2020, 41(21): 204 - 212. (in Chinese)

[3] 张玉荣,周显青. 典型储粮环境下储藏大米糊化特性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):125 - 130.
ZHANG Yurong, ZHOU Xianqing. Gelatinization characteristics of rice stored in typical grain storage environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 125 - 130. (in Chinese)

[4] 李晋航,高铭泽,吴文亮,等. 电力装备制造业工业互联网标识解析体系应用发展研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(12):179 - 187.
LI Jinhang, GAO Mingze, WU Wenliang, et al. Research on the application and development of industrial Internet identification analysis system in power equipment manufacturing[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(12): 179 - 187. (in Chinese)

[5] 杨世春,李强伟,周思达,等. 面向智能化管理的数字孪生电池构建方法[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(9):1734 - 1744.
YANG Shichun, LI Qiangwei, ZHOU Sida, et al. Digital twin battery construction method for intelligent management[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022,48(9): 1734 - 1744. (in Chinese)

[6] 赖李媛君,张霖,任磊,等. 工业互联网智能调度建模与方法研究综述[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(7):1966 - 1980.
LAI Liyuanjun, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Overview of research on intelligent scheduling modeling and methods for industrial Internet[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2022,28(7): 1966 - 1980. (in Chinese)

[7] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(1):1 - 18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer

Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1 – 18. (in Chinese)
[8] STARK R, FRESEMANN C, LINDOW K. Development and operation of digital twins for technical systems and services[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 129 – 132.
[9] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, Cham, 2017: 85 – 113.
[10] 李震邦.数字孪生技术与智能船舶发展[J].船舶工程,2022,44(增刊 1):543 – 547.
LI Zhenbang. Digital twin technology and the development of intelligent ships[J]. Ship Engineering, 2022,44(Supp. 1): 543 – 547. (in Chinese)
[11] 陶飞,张辰源,张贺,等.未来装备探索:数字孪生装备[J].计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 1 – 16.
TAO Fei, ZHANG Chenyuan, ZHANG He, et al. Future equipment exploration: digital twin equipment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022,28(1):1 – 16. (in Chinese)
[12] 周尔民,程度钧,马畅,等.基于数字孪生的车间调度扰动事件预测[J].制造业自动化,2022,44(9):77 – 82.
ZHOU Ermin, CHENG Dujun, MA Chang, et al. Prediction of workshop scheduling disturbance events based on digital twins [J]. Manufacturing Automation, 2022,44(9): 77 – 82. (in Chinese)
[13] 魏永合,李翔宇.基于数字孪生的齿轮箱故障诊断技术研究[J].组合机床与自动化加工技术,2022(8):140 – 143.
WEI Yonghe, LI Xiangyu. Research on gearbox fault diagnosis technology based on digital twins[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2022(8): 140 – 143. (in Chinese)
[14] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2012, 32(12): 1 – 38.
[15] 刘大同,郭凯,王本宽,等.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):1 – 10.
LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Overview and prospect of digital twin technology[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39(11): 1 – 10. (in Chinese)
[16] LEI Z, ZHOU H, HU W, et al. Toward a web-based digital twin thermal power plant[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(3): 1716 – 1725.
[17] WU C, ZHOU Y, PESSOA M V P, et al. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 79 – 93.
[18] 张宇琳,尚可,张飞舟.基于数字孪生技术的异质交通流安全性研究[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(5):888 – 896.
ZHANG Yulin, SHANG Ke, ZHANG Feizhou. Research on heterogeneous traffic flow safety based on digital twin technology [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2022,58(5): 888 – 896. (in Chinese)
[19] ANGANE M, SWIFT S, HUANG K, et al. Essential oils and their major components: an updated review on antimicrobial activities, mechanism of action and their potential application in the food industry[J]. Foods, 2022, 11(3): 464.
[20] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等.数字孪生及其在航空航天中的应用[J].航空学报,2020,41(9):6 – 17.
MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its application in aerospace[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2020, 41(9): 6 – 17. (in Chinese)
[21] 段明皞,张南,耿华,等.基于数字孪生的装配车间实时监控系统开发[J].制造业自动化,2021,43(12):110 – 112.
DUAN Minghao, ZHANG Nan, GENG Hua, et al. Development of real-time monitoring system for assembly workshop based on digital twins[J]. Manufacturing Automation, 2021,43(12): 110 – 112. (in Chinese)
[22] 任语铮,谢人超,曾诗,等.工业互联网标识解析体系综述[J].通信学报,2019,40(11):138 – 155.
REN Yuzheng, XIE Renchao, ZENG Shi, et al. Overview of industrial Internet identity analysis system[J]. Journal of Communications, 2019, 40(11): 138 – 155. (in Chinese)
[23] MATTILA J, ALA-LAURINAHO R, AUTIOSALO J, et al. Using digital twin documents to control a smart factory: simulation approach with ROS, Gazebo, and Twinbase[J]. Machines, 2022, 10(4): 225.
[24] MENON K, KARKKAINEN H, WUEST T, et al. Industrial Internet platforms: a conceptual evaluation from a product lifecycle management perspective[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(5): 1390 – 1401.
[25] CHU Y, PAN L, LENG K, et al. Research on key technologies of service quality optimizationfor industrial IoT 5G network for intelligent manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3): 1071 – 1080.
[26] 孟祥曦,张凌,郭皓明,等.一种面向工业互联网的云存储方法[J].北京航空航天大学学报,2019,45(1):130 – 140.
MENG Xiangxi, ZHANG Ling, GUO Haoming, et al. A cloud storage method for industrial Internet[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 130 – 140. (in Chinese)
[27] 余果,王冲华,陈雪鸿,等.认证视角下的工业互联网标识解析安全[J].信息网络安全,2020,20(9):77 – 81.
YU Guo, WANG Chonghua, CHEN Xuehong, et al. Industrial Internet identity resolution security from the perspective of authentication[J]. Information Network Security, 2020, 20(9): 77 – 81. (in Chinese)
[28] 刘辉.基于工业互联网平台的专用设备制造业标识解析二级节点建设的研究[J].煤炭技术,2021,40(7):170 – 173.
LIU Hui. Research on the construction of secondary nodes for the identification analysis of special equipment manufacturing industry based on the industrial Internet platform[J]. Coal Technology, 2021,40(7): 170 – 173. (in Chinese)
[29] CROATTI A, GABELLINI M, MONTAGNA S, et al. On the integration of agents and digital twins in healthcare[J]. Journal of Medical Systems, 2020, 44(9): 1 – 8.
[30] DOU K, LI J, ZHOU Y. Research on design and monitoring of a development index of an industrial Internet platform based on a fixed-base index method[J]. Electronics, 2022, 11(2): 274.
[31] 周鑫,周云成,金树军,等.煤炭工业互联网标识解析二级节点系统架构研究[J].煤矿安全,2022,53(3):140 – 145.
ZHOU Xin, ZHOU Yuncheng, JIN Shujun, et al. Research on the architecture of the two-level node system for Internet identity resolution in the coal industry[J]. Coal Mine Safety, 2022,53(3): 140 – 145. (in Chinese)