

引文格式: 陈瑾, 高庆霖, 徐磊, 等. 基于IDEF的车间数字孪生模型构建方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 102-116.

CHEN Jin, GAO Qinglin, XU Lei, et al. Construction method of workshop digital twin model based on IDEF[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 102-116.

基于IDEF的车间数字孪生模型构建方法*

陈瑾¹, 高庆霖¹, 徐磊², 庄存波^{1,3}

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094;

3. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 嘉兴 314000)

[摘要] 车间数字孪生模型的构建过程复杂, 功能模块和数据类型多样, 目前缺乏以顶层设计为导向的系统性和结构化的建模分析方法, 传统单一设计结构的建模方法在构建车间数字孪生模型时易出现内容重复或遗漏, 难以实现车间数字孪生模型系统性的建模要求。基于车间数字孪生模型复杂性和集成化计算机辅助制造定义方法(IDEF)类表达的多样性, 提出了功能建模、信息建模、过程建模和本体建模4个维度的车间数字孪生模型结构化建模分析方法。利用IDEF0, 通过功能分解、功能之间关系的分类来描述车间数字孪生模型功能; 利用IDEF1x描述车间数字孪生模型运行过程中的重要信息, 并定义数据实体间的相互关系; 利用IDEF3, 以车间数字孪生模型运行过程中数据流动过程为核心准确描述车间过程变化和状态转移; 在信息建模和过程建模的基础上, 利用IDEF5获取车间数字孪生模型领域的概念、术语和关系, 通过车间数字孪生模型运行过程本体建模采集事实和获取知识。有效地避免了单一表达形式可能只对复杂系统中某一种特征进行描述而忽略其他重要信息的问题, 为提高车间数字孪生模型建模过程语义一致性、可重用性、结构化和开发自动化奠定了基础。

关键词: 数字孪生; 智能制造; 功能建模; 信息建模; 过程建模; 本体建模

Construction Method of Workshop Digital Twin Model Based on IDEF

CHEN Jin¹, GAO Qinglin¹, XU Lei², ZHUANG Cunbo^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Spacecrafts Co., Ltd., Beijing 100094, China;

3. Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology (Jiaxing), Jiaxing 314000, China)

[ABSTRACT] The construction process of workshop digital twin models is complex, with diverse functional modules and data types. Currently, there is a lack of systematic and structured modeling and analysis methods guided by top-level design. Traditional modeling methods with a single design structure are prone to content duplication or omission when constructing workshop digital twin models, making it difficult to achieve the systematic modeling requirements of workshop digital twin models. Based on the complexity of the workshop digital twin model and the diversity of IDEF method class expressions, a structured modeling and analysis method of the workshop digital twin model from four dimensions of functional modeling, information modeling, process modeling and ontology modeling is proposed. IDEF0 is used to describe the function of the digital twin model on the shop floor through functional decomposition and classification of the relationship between functions; IDEF1x is used to describe important information during the operation of the shop floor digital twin and define the interrelationships between data entities; IDEF3 is used to accurately describe the process changes and state transfers in the workshop with the data flow process during the operation of the workshop digital twin as the core; On the basis of information modeling and process modeling, IDEF5 is used to obtain concepts, terms and

* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1710300); 国家自然科学基金(52005042); 国防基础科研项目(JCKY2020203B016)。

relationships in the field of workshop digital twins, and to collect facts and acquire knowledge through ontology modeling of the operation process of workshop digital twins. This method effectively avoids the problem that a single expression may only describe a certain feature in a complex system and ignore other important information, laying a foundation for improving the semantic consistency, reusability, structure, and automation of the workshop digital twin modeling process.

Keywords: Digital twin; Intelligent manufacturing; Function modeling; Information modeling; Process modeling; Ontology modeling

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.102

数字孪生车间是在新一代信息技术与制造技术的驱动下,由物理车间、虚拟车间、车间服务系统、车间孪生数据组成,集成和融合了物理车间、虚拟车间、车间服务系统全要素、全业务数据的一种车间运行新模式^[1]。车间数字孪生模型是对物理车间生产全要素和工艺全流程在信息世界的数字化映射和表达,构建与物理车间静态场景、逻辑规则、动作行为完全一致的高保真虚拟车间模型是实现数字孪生车间的基础。传统建模仿真方法主要侧重于三维模型的还原度和保真度,数字孪生车间在构建高保真虚拟三维模型的基础之上,还关注车间动态运行过程中的变化关系,真实地复刻物理对象的几何、物理、行为及规则^[2]。

针对物理实体或复杂系统在虚拟空间的建模,陶飞等^[3]提出了“四化四可八用”的数字孪生模型构建准则,以轻量化、精准化、标准化、可视化和可交互、可融合、可重构、可进化为要求,构建可用、通用、速用、易用、联用、合用、活用、好用的数字孪生虚拟模型。李莎莎等^[4]提出了基于 Petri 网对车间运行逻辑模型进行精准匹配和忠实映射。丁凯等^[5]研究了数字孪生模型(孪生在制品、孪生制造设备、孪生制造车间等)在信息世界的虚实映射建模方法和在复杂多维时空域下智能制造过程及数据建模方法。江海凡等^[6]提出了基于逻辑模型、数据模型、可视化模型 3 个维度的车间数字孪生模型构建技术,研究了虚拟车间运行过程各阶段演化机理和车间运行机制。郭东升等^[7]针对制造车间现场与信息空间实时交互困难的问题,提出了以产品、资源、工艺为对象的数字孪生车间,为实现车间虚实交互提供了一种可行的方法。随着数字孪生技术的发展与数字孪生车间的推广应用,对虚拟模型和数据采集的要求升高,周帅昌等^[8]针对虚拟车间复杂模型构建提出了基于半边折叠算法处理的模型轻量化构建方法,针对车间海量多源复杂数据提出了基于改进模糊 C 均值算法的数据处理方法,从模型和数据两方面提高了数字孪生车间建模精确程度。宋思蒙等^[9]针对数字孪生驱动的智能车间模块化生产系统重构提出了 DT-MPS 建模方法,为实现基于数字孪生的车间模块快速重构提供了一种解决途径。

金星等^[10]提出了面向航空企业离散制造的数字孪生车间模型构建技术,从虚拟实体构建、物理实体接入和三维可视化平台 3 个方面设计了数字孪生车间系统架构。刘怀兰等^[11]基于传统离散事件系统仿真机制,提出了基于 VDEVS 的离散制造车间虚拟要素行为模型构建方法,实现了对虚拟车间模型行为更精确的表达。

集成化计算机辅助制造定义方法(ICAM DEFinition method, IDEF)是一种比较经典的系统设计和分析方法,在对复杂系统的结构化分析与描述上具有较强的表达能力与直观性。关于 IDEF 在制造领域中工业软件开发、产品研制、业务过程分析等方面的模型构建,尚文利等^[12]提出了一种结合 IDEF (IDEF0、IDEF1x)与 UML (Unified modeling language)的系统建模方法,并在某车间生产计划与调度系统建模和开发中证明了该方法在可配置性、可扩展性和可重用性上的优越性。伍晓榕等^[13]提出了一种基于 IDEF 与 UML 相结合的系统建模方法,完成了虚拟装配系统从需求分析、功能设计、对象设计直至软件实现的过程。伍晓榕等^[14]利用 IDEF 技术对不同梯层的主要工艺活动进行建模,构建工艺成熟度模型,实现不同产品信息粒度工艺设计活动的分层管理和相互关联。周春柳等^[15]利用 IDEF0 方法将维修业务分解到具体作业上,建立了作业层面的维修数据变更模型。杨帆等^[16]提出基于 IDEF0 的过程建模方法,构建了柔性多层级的评估过程模型,为数字孪生体可信度评估工作提供了有力指导。

车间数字孪生模型是一个能够描述车间“人、机、料、法、环”的复杂系统,具有车间规模大、对象多、功能结构复杂、生产要素众多、数据海量、多源异构等特点。车间数字孪生模型的构建过程复杂,功能模块和数据类型多样,目前因缺乏以顶层设计为导向的系统性和结构化的建模分析方法,导致在构建车间数字孪生模型时易出现内容重复或遗漏,传统的单一设计结构的建模方法难以实现车间数字孪生模型系统性的建模要求。本文提出基于 IDEF 建模分析的车间数字孪生模型构建方法,从系统功能、信息、过程、本体 4 个维度完成车间数字孪生模型从顶层设计到系统实现的建模过程。

1 基于 IDEF 的四维度车间数字孪生建模总体框架

IDEF 是一套针对复杂信息系统进行建模分析和系统设计的综合建模方法。IDEF 方法族群包括 IDEF0 功能建模 (Function modeling)、IDEF1x 信息建模 (Information modeling)、IDEF2 仿真建模设计 (Simulation model design)、IDEF3 过程描述获取方法 (Process description capture)、IDEF4 面向对象的设计 (Object-oriented design)、IDEF5 本体获取描述 (Ontology description capture)、IDEF6 设计原理 (Design rationale capture)、IDEF7 信息系统审定 (Information system auditing)、IDEF8 用户界面建模 (User interface modeling) 等。根据用途可将 IDEF 方法族群分为两类：一类侧重于信息交流,主要有 IDEF0、IDEF1x、IDEF3、IDEF5 等;另一类侧重于系统开发过程中的设计部分,如 IDEF4 等。

车间数字孪生模型具有功能多样、结构复杂、数据多源异构、数据流动和管理复杂,以及实体属性、性质、关系复杂等特点,利用 IDEF0、IDEF1x、IDEF3、IDEF5 分别从功能建模、信息建模、过程建模和本体建模 4 个维度构建车间数字孪生模型,有利于更准确、全面地实现物理车间向虚拟车间的真实映射。基于 IDEF 的四维车间数字孪生模型如图 1 所示。

(1) 功能维度。分析车间数字孪生模型的功能作用,设计虚拟车间结构组成,描述各功能模块间相互关系,进而全面描述车间数字孪生模型的功能、活动、数据流及子模块间的关系。

(2) 信息维度。定义虚拟车间数据结构和语义信息,描述车间数据采集、传输、更新、查询、管理和存储过

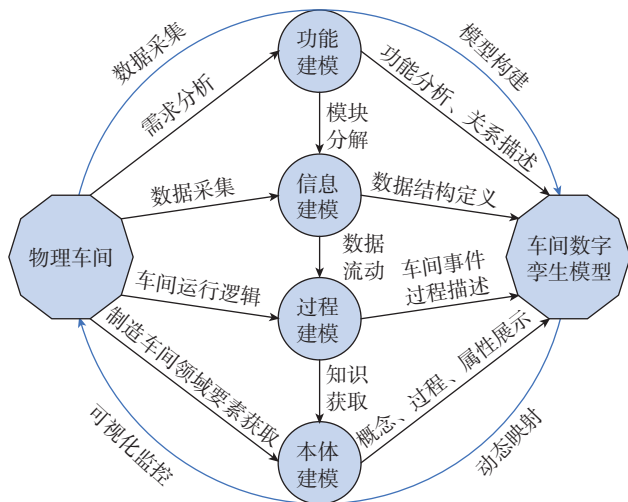


图 1 基于 IDEF 的四维车间数字孪生模型

Fig.1 4D digital twin model of workshop based on IDEF

程,以及车间内部数据间的逻辑关系,进而通过结构化数据模型表达制造车间内的复杂多源数据。

(3) 过程维度。基于车间运行逻辑和信息流动过程,以过程为核心描述车间事件发生的因果关系、状态改变的优先级,进而描述车间实际生产过程的状态变化和行为习惯。

(4) 本体维度。采集数字孪生车间和制造车间领域内的事实和知识,进而实现领域内关键实体、重要过程、属性、关系的获取、展示和存储。

基于 IDEF 的车间数字孪生模型构建过程如图 2 所示。

首先, IDEF0 模块采用严格的、自顶向下的方式逐层分解车间数字孪生模型,利用简单的图形符号和自然语言,以结构化的形式全面地描述系统的功能、活动、数据流及各个子系统之间的关系;接着利用 IDEF1x 模块对车间数字孪生模型数据进行语义建模,通过构建实体间的数据关联模型定义系统信息的管理规则和不同子系统间的逻辑关系;然后利用 IDEF3 模块通过过程流网 (Process flow network, PFN) 和对对象状态转移图 (Object state transition diagram, OSTD) 来描述制造车间运行过程和对象状态及状态变换,进而反映车间在不同时间下产品加工、物料流转、人员流动等生产过程的行为特征;最后,利用 IDEF5 方法以结构化文本语言描述车间数字孪生模型相关领域的对象、对象的性质和对象关系。

2 基于 IDEF 的车间数字孪生建模实现流程

2.1 车间数字孪生模型功能建模

车间数字孪生模型由若干个子系统组成,在构建车间数字孪生模型时首先需要对系统的功能作用、结构组

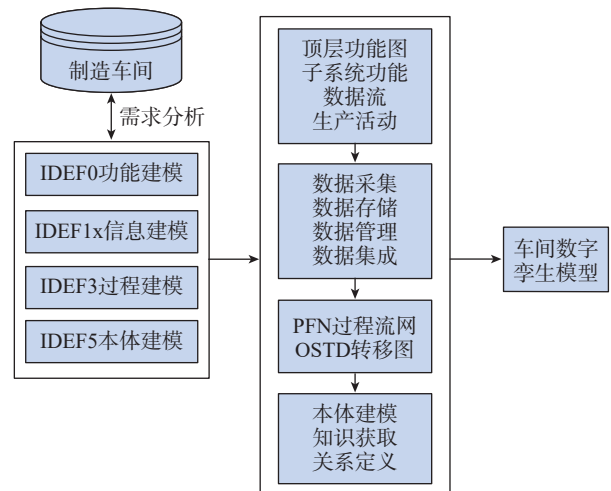


图 2 基于 IDEF 方法的车间数字孪生模型构建流程

Fig.2 Construction process of workshop digital twin model based on IDEF method

成、功能间的相互关系等进行表示,采用逐层分解的方法,严格地从顶层依次向下层对系统进行结构化的分析,得到虚拟车间功能模型。功能建模的设计原理是在顶层对车间数字孪生模型的主要功能进行说明,然后按照实际的流程和结构关系,把顶层功能逐层分解成范围更小、细节更明确的子功能,每一个上层的功能模块都由下层若干个功能模块及其数据来说明。在进行车间数字孪生模型功能建模时,采用图形语言来对系统的需求和功能结构及相互关系进行定义,图形的主要元素包括:用来描述系统功能活动的简单盒子;用来描述数据流(信息流)及各功能模块之间结构关系的箭头;简单的文字说明。对于一个活动过程来说,不仅要表示其中重要的功能活动,还要明确完成这项活动的具体步骤、数据、操作、设施等要素,图3为“构建车间数字孪生模型”的活动及其要素。

图3是由一个盒子和若干个接口箭头组成的,表示车间数字孪生模型的A0图,该图是用来明确系统范围和定义系统内外关系的。A0盒子的内容通常是以动词结构的短语来体现系统的活动特性,盒子是IDEF0功能建模的最基本元件。4个方向的箭头组成了A0活动的ICOM码,分别表示与A0活动相关的输入、控制、输出和机制,箭头的内容可以是抽象数据、具体对象或者其他,需要特别注意的是,在活动图形中的箭头代表约束关系而不是数据流或者过程顺序。对于上层活动模型,通常还需要进行调用,即调用下层更为详细的活动模块来解释当前的功能活动。经过层层调用形成一个具有阶梯结构的系统功能模型,进而更深入地理解系统结构并且明确各功能模块的范围。车间数字孪生模型按功

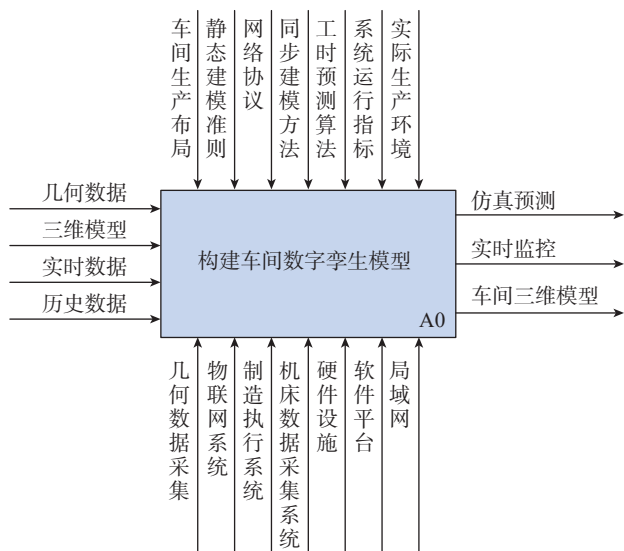


图3 车间数字孪生模型 A0图

Fig.3 A0 diagram of workshop digital twin model

能可分为车间静态建模、车间可视化监控、车间仿真预测3个模块,如图4所示。而车间可视化监控模块可以更详细地分解为车间运行状态监控、设备状态监控、产品状态监控、人物状态监控、生产数据监控模块,如图5所示。类似地,对系统进行详细的功能划分和结构划分,直到能够清晰地展示各个活动及其相关要素。IDEF0功能建模不仅能够清楚地反映每个活动对应的输入、输出、控制和机制,同时能够明确在不同子模块中重复使用的对象和数据,避免在系统构建时的疏漏。

2.2 车间数字孪生模型信息建模

车间数字孪生模型的运行监控、信息展示和仿真预测依赖于数据间的集成和交互,然而制造车间中的数据类型多源、数据属性不同、数据量大且存在数据间的相互交叉。因此,在完成系统功能建模后,需要对车间数字孪生模型进行信息建模,通过抽象化方式定义数据结构和语义信息,建立符合系统需求的数据结构模型,便于车间数字孪生模型的数据传输、更新、查询、管理和存储。

IDEF1信息建模方法(Information modeling)是基于Chen^[17]提出的实体联系模型(Entity-relationship model)和Codd^[18]提出的关系模型(Relational model)发展起来的,IDEF1将数据作为一种系统资源进行管理和存储,通过建立信息模型来描述系统运行过程中的重要数据及其关联关系。IDEF1x是IDEF1改进图形表达和语义增强后的扩展版本,与常规的系统数据库设计方法不同的是,利用IDEF1x对虚拟车间信息建模针对的是车间数据采集、存储和管理,以及车间内部数据之间的逻辑关系问题。IDEF1x模型的元素组成包括实体、实体间的联系、属性/关键字。实体是具有相同属性或相同特征的一类客观存在或者抽象事物的集合,分为独立标识实体和从属标识实体,在IDEF1x图中用盒子表示。联系是实体间的一种逻辑连接,在IDEF1x图中用连线和动词短语表示,联系包括连接联系、分类联系和非确定联系。属性表示实体的某种特征或者性质(产品、设备、人物等),在IDEF1x盒子内的文本就是该实体的属性。

构建虚拟车间信息模型,首先需要对系统进行需求分析,明确构建该系统的目的及目标功能;然后根据功能模型设计构建车间数字孪生模型的方法,在此基础上确定系统在静态建模、可视化监控、仿真预测等模块的设计、构建、运行和管理过程中所需要的信息资源,并将其罗列出;最后通过数据采集、系统集成、数据通信等方式获得原始数据。在信息建模过程中将车间数据需求分析、概念模型设计、车间运行逻辑和系统数据库有机结合,通过简单的图形构造一个结构化、规程化的数据

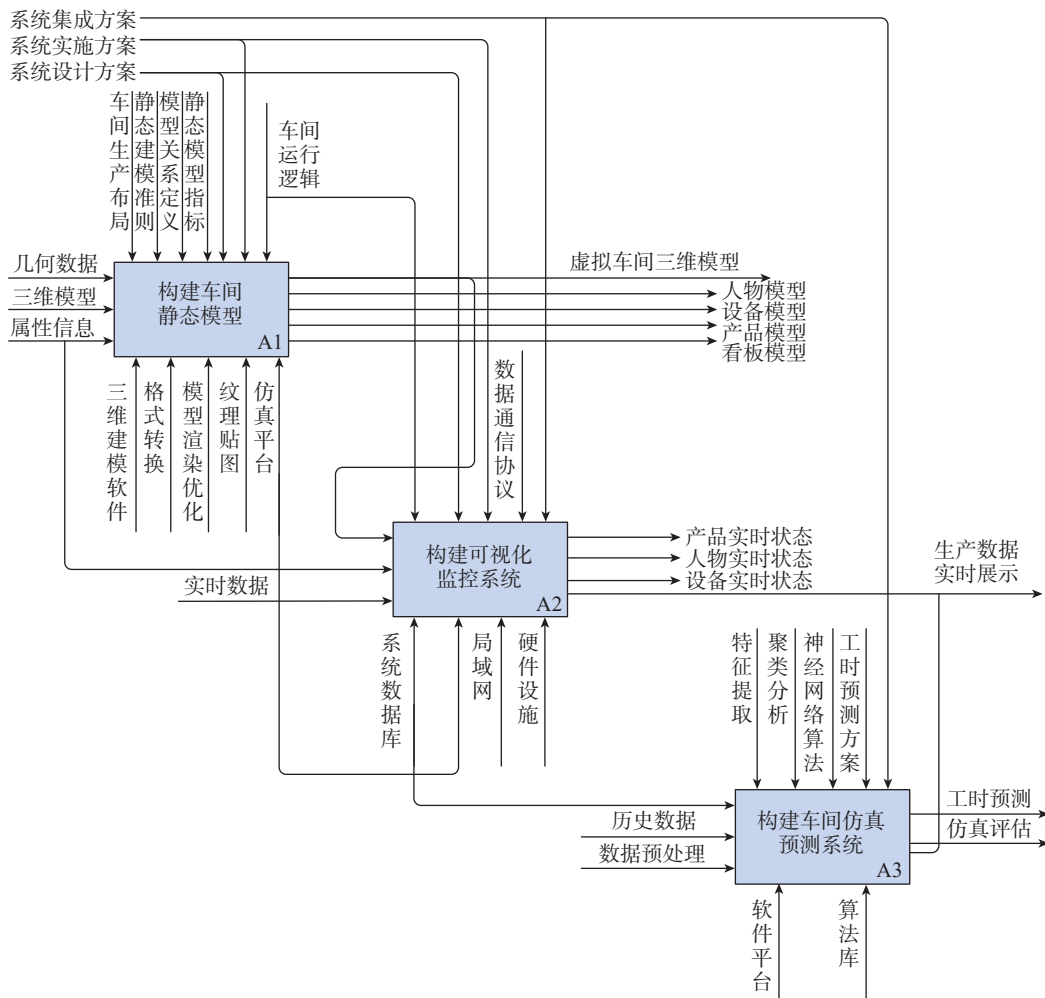


图4 车间数字孪生模型 A0 模块分解图

Fig.4 A0 module decomposition diagram of workshop digital twin model

结构模型来表达制造车间中复杂多源的数据,从而避免在车间数字孪生模型构建过程中数据和物理对象的不完整、不准确、不一致。

基于 IDEF1x 方法的车间数字孪生模型信息建模如图 6 所示。其中每个实体包含一个主关键字和若干次关键字,这些关键字能唯一标识实体每一个实例的属性,实体之间具有一定的连接关系。每个实体通过连接联系、分类联系或非确定联系连接更详细的实体,进而得到更具体的属性描述实例。

通过车间数字孪生模型 IDEF1x 信息建模,构造结构化、规程化的数据结构模型描述复杂多源的数据,构建联系表达车间内部数据之间的逻辑关系,便于车间数字孪生模型数据传输、存储、管理的完整、准确和一致。

2.3 车间数字孪生模型过程建模

对车间数字孪生模型进行了信息建模,明确了构建车间数字孪生模型所需的数据结构并进行了语义定义。为了获得在构建车间数字孪生模型时信息流动过程的

准确描述,采用 IDEF3 方法的 PFN 模型图构建数据在车间数字孪生模型中的流动过程,并采用状态转移图 OSTD 对关键对象的状态转移过程进行描述。IDEF3 通过场景描述和对象描述,以图形化语言将制造车间实际生产过程中事件发生和状态改变的优先级和因果关系记录下来。

PFN 模型图的基本元素包括行为单元 (Units of behavior, UOB)、联接、参照物、交汇点、分解和细化说明。UOB 表示客观过程、功能、事件、操作、活动、场景等在一个业务过程或一个复杂系统中的情况,在 PFN 模型图中用 UOB 盒子表示。将 UOB 盒子用联接箭头按照事件发生的先后顺序连接起来,表示 UOB 中行为之间的先后顺序或约束关系。对于一个复杂的过程,可以将 UOB 进一步分解成活动层次更低、更具体的多层次过程描述,在 IDEF3 中每一个 UOB 的分解都是一个新的过程流图。

数据的获取与交互是车间数字孪生模型稳定运行

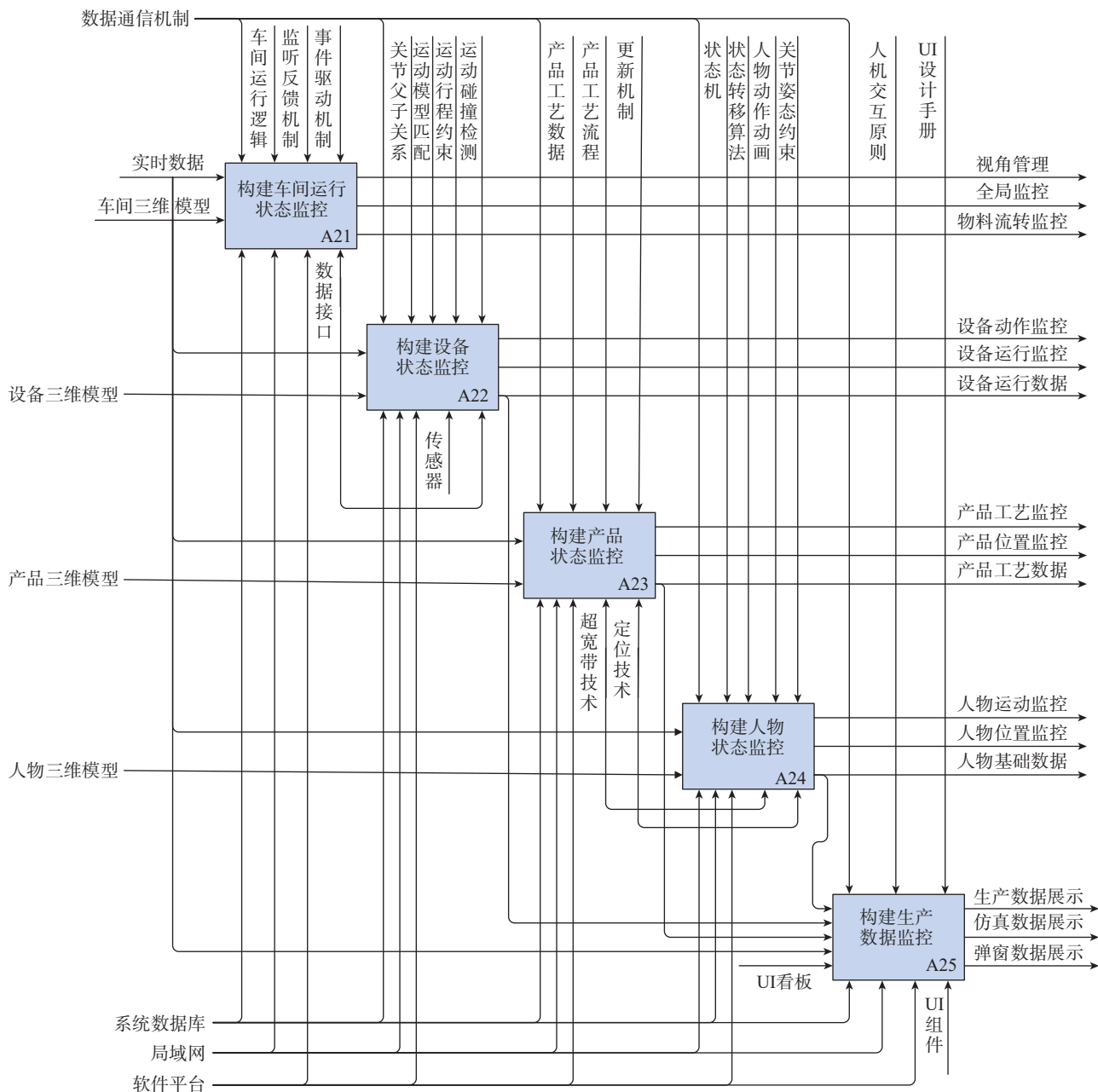


图5 车间可视化监控 A2 模块分解图

Fig.5 A2 module decomposition diagram of workshop visual monitoring

和实时展示的关键。因此,以车间数字孪生模型中数据流动过程作为 PFN 模型图过程建模的核心,通过过程模型表示数据获取、描述、运用和管理等过程在车间数字孪生模型中出现的先后顺序和因果关系。车间数字孪生模型信息过程流网如图 7 所示。

制造车间生产要素复杂且在生产过程中会产生大量的数据,这些数据分别存储在车间不同的信息系统当中。因此,车间数字孪生模型需要与制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES)、企业资源计划 (Enterprise resource planning, ERP)、物联网等系统进行

数据集成,对“数据集成”过程进一步分解得到更具体的数据集成过程,如图 8 所示。构建物理车间与车间数字孪生模型之间的数据通信,基于物联网、MES 等系统实时采集物理车间制造过程产生的数据,并对物理车间正在发生的事件做出动态映射和实时反馈。通过与信息系统的数据传输和实时交互,对系统数据库进行数据更新与推送展示,从而获得车间生产要素信息、生产计划信息、生产过程实时数据,进而在虚拟空间中对产品加工状态、人物运行状态、设备动作状态的三维可视化监控。

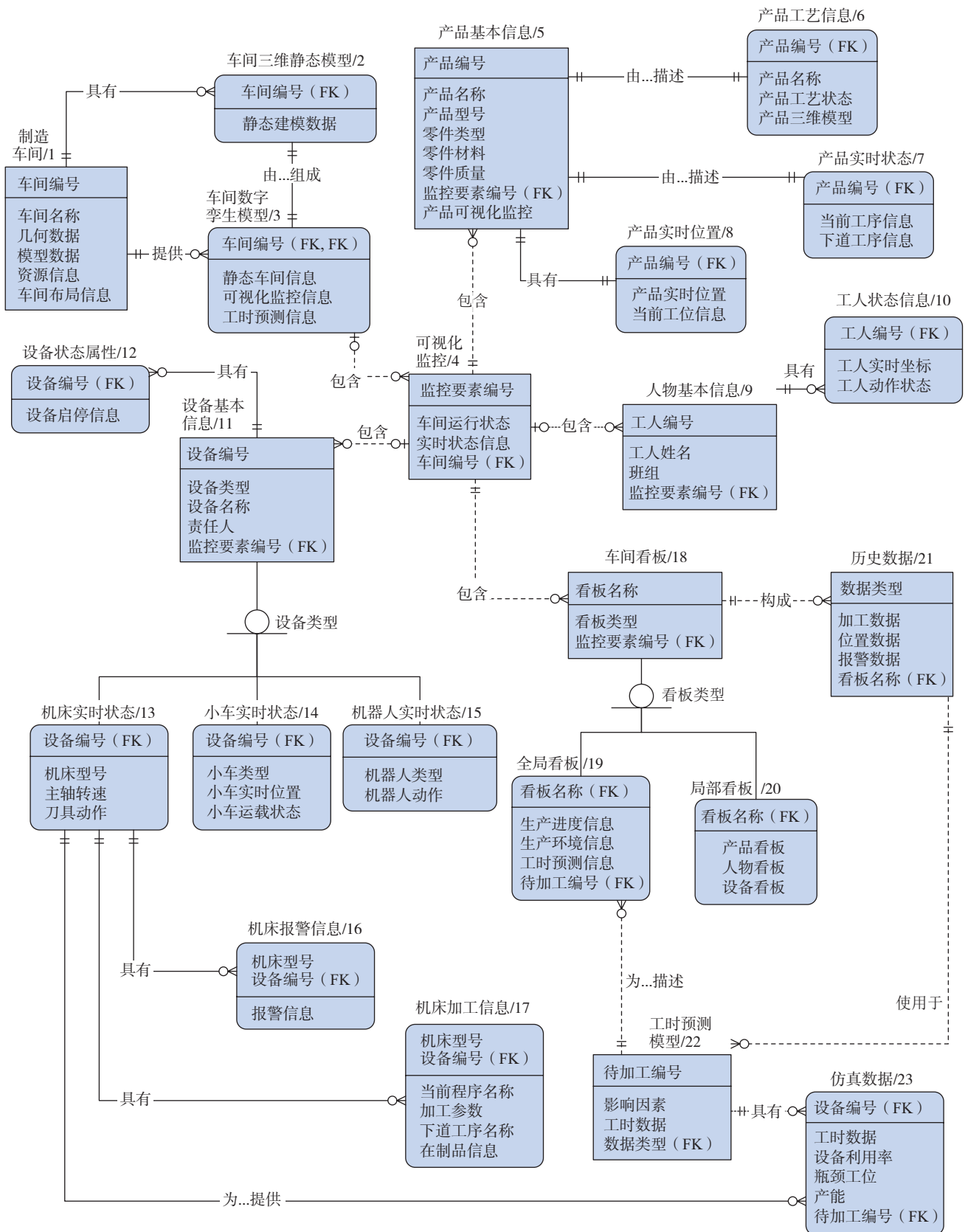


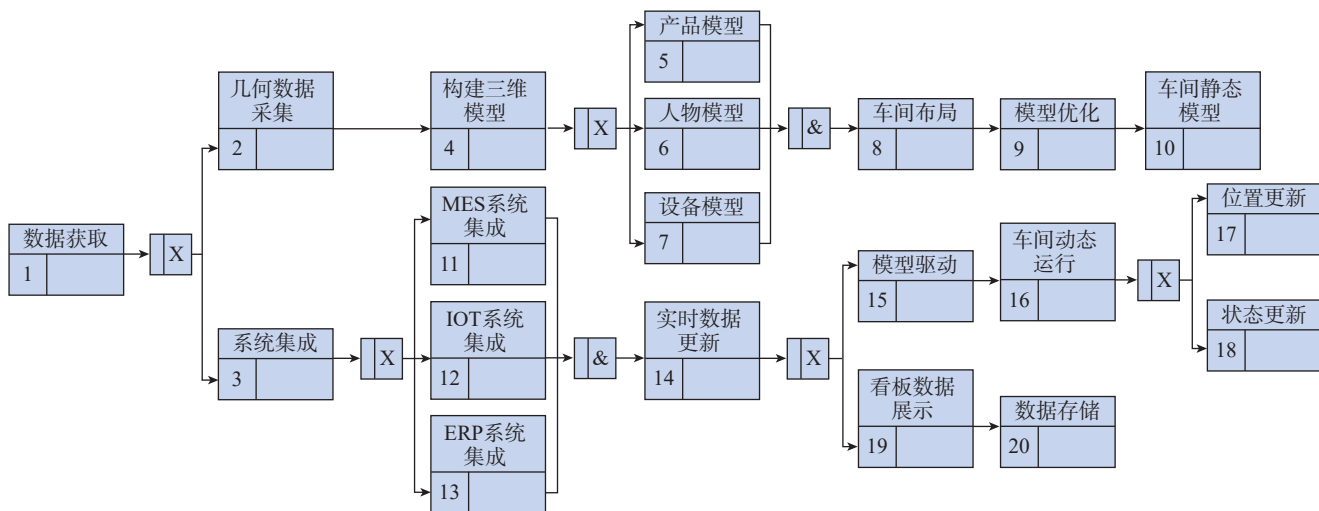
图 6 车间数字孪生模型 IDEF1x 信息建模

Fig.6 IDEF1x information modeling of workshop digital twin model

状态转移图以对象为核心,是对 PFN 中关键对象在参与过程时状态变换的详细描述。以产品为例,图 9 为产品在车间数字孪生模型中的状态转移过程。

在图 9 中,圆圈表示产品在车间数字孪生模型中的某一种状态,箭头所指方向表示状态转移的方向;方盒

是实现产品状态变换的参照物,方盒的内容表示产品在发生状态转移时所必须要满足的条件和约束。产品状态转移图描述了产品从物理车间实体到虚拟车间三维模型构建,再到实时数据驱动的产品位置更新和状态更新的可视化监控过程。



注: [X] 一异或; [&] 一与。

图 7 车间数字孪生模型信息过程流网

Fig.7 Information process flow network of workshop digital twin model

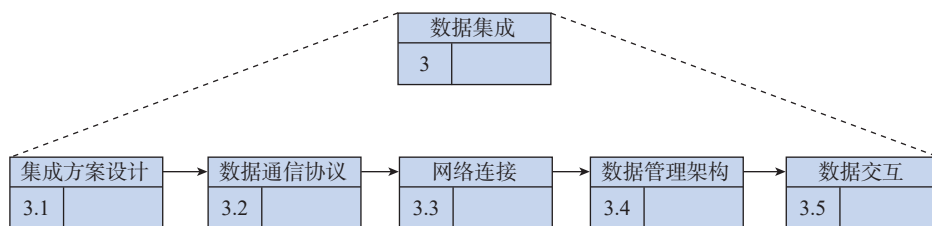


图 8 数据集成 UOB 分解

Fig.8 UOB decomposition of data integration

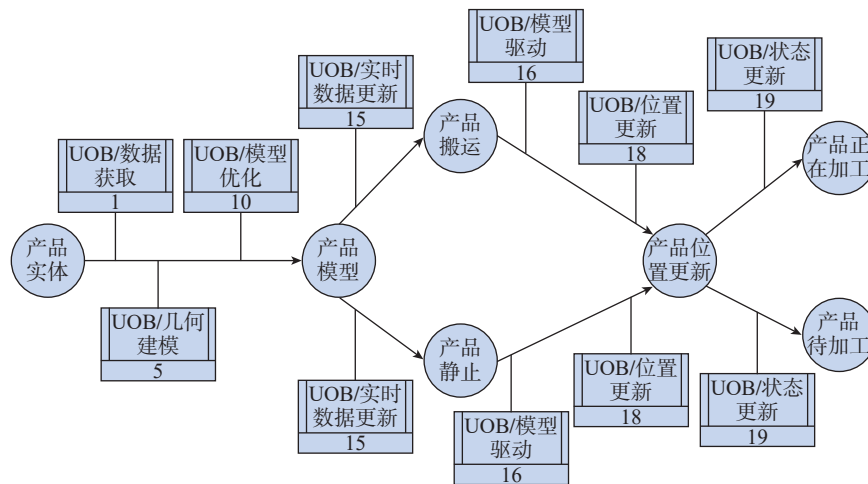


图 9 产品状态转移图

Fig.9 Diagram of product status transition

2.4 车间数字孪生模型本体建模

车间数字孪生模型的构建是一个并行的过程,具有任务协作、模块集成、系统交互和知识密集等特点。然而传统的建模方法在集成过程中自动化程度低,模块可移植性不高,且很难保证语义的一致性,因此将语义本体引入车间数字孪生模型运行过程的描述中,通过 IDEF5 图形化本体获取方法构造车间数字孪生模型的概念模型,为车间数字孪生模型本体的开发提供一种交互的、共享的、结构化的和具有一致性的概念框架。同时,本体的获取能够增强子模块的“可重用性”。在工程领域中,往往会花费大量的人力和物力去构造已经存在的信息和内容,例如,在车间数字孪生模型构建过程中,驱动小车运行的程序与驱动人物运行的程序存在相似的子程序,在系统开发时往往会浪费时间和精力去编写这些相似的子程序,而本体的获取能够很大程度上避免这种情况的发生。

本体是形成物理世界客观现象的根本实体,一般来说,本体按照应用范围可以分为 3 个层次。第 1 层是领域本体,表示该领域中通用性最高的信息。例如,对于制造车间的一个领域本体,需要包括产品、设备、工艺文件、工具等制造车间领域所需要的通用信息。第 2 层是实践本体,表示领域中相似工作场景的共同特点,是对领域本体的拓展。例如,开发制造车间中的一条复杂产品结构件数控加工生产线,需要构造一个表征这条生产线特征的实践本体。第 3 层是专门工作场景本体,表示某一个特定的工作场景中相关的所有对象种类、性质和关系信息。例如,针对某航天企业的数控加工车间,可以在制造车间领域本体和生产线实践本体的基础上创建一个详细描述该企业设施的主体。

IDEF5 模型中的本体是描述领域内关键实体、重要过程、属性及其相互关系的一种领域建模的通用语言。IDEF5 利用直观的图形表达、规范化的过程和结构化的结果对实体进行更深层次的描述,进而为领域内知识的获取、展示和存储提供媒介。IDEF5 是以图表语言形式为各类图形构造提供可视化支持,以细化说明语言形式为完整描述逻辑提供结构化文本,二者相互支撑共同作用实现本体的构造。

IDEF5 以种类划分及种类基本性质作为抓取事物本质特征的方法,进而获取本体知识。种类是将具有相同性质的一类事物进行划分和归类,对于一个种类来说,有且仅有该种类内的成员具有某一种共同的特性。IDEF5 方法中的种类与 IDEF1x 方法中的实体类似,但种类具有更深层次的事物特性和逻辑关系。事物的性质可分为本质的、附属的、限定性的和非限定性的,如表 1 所示。可以看出,数控机床是一种由数控程序控制的

表 1 事物的性质

Table 1 Properties of things

| 性质 | 限定性的 | 非限定性的 |
|-----|----------------------------|--------------------------|
| 本质的 | 种类: 数控机床 性质: 由数控程序控制的机床 | 种类: 在制品 性质: 正在加工的产品 |
| 附属的 | 种类: 数控机床 性质: 有可识别的序列号 | 种类: 复杂产品结构件 性质: 铝合金材质 |

机床,凡是由数控程序控制的机床都是数控机床,因此这一性质就是数控机床本质的性质;每一个数控机床都有可识别的序列号,但是拥有序列号的设备都可以是数控机床,因此这一性质是数控机床附属的性质。通过判断一台机床是否由数控程序控制来辨别该物体是否属于数控机床这一种类,作为判断的性质就是数控机床的限定性的性质,因此由数控程序控制的机床是数控机床本质的、限定性的性质。而对于复杂产品结构件而言,其材质可以是铝合金、镁合金、复合材料等,因此材质对于复杂产品结构件而言是一定会有但不能确定的性质,是复杂产品结构件附属的性质。在构建本体时,需要特别注意性质和属性的区分,性质是种类中所有个体所共同具有的直观的、抽象的事物特征,而属性是某一对象经过映射后具有唯一值的特征。例如,材质是复杂产品结构件的性质,而对于某一铝合金复杂产品结构件而言,铝合金材质是其属性。

车间数字孪生模型运行过程本体构建流程如下:
(1) 通过信息采集、数据集成等方式获得车间数字孪生模型运行过程相关信息、概念与知识的原始数据;
(2) 根据已获得的原始数据对车间数字孪生模型运行过程中涉及的概念、关系和活动进行分析,提取运行过程语义信息并明确概念间的层次关系以及活动间的逻辑关系;
(3) 通过图表语言和结构化语义建立车间数字孪生模型运行过程的本体模型,即采用 IDEF5 方法抽取车间数字孪生模型运行过程本体模型的关键概念和属性,构建运行过程本体的核心模型;
(4) 修改和完善车间数字孪生模型运行过程的本体模型并进行保存。得到如图 10 所示的车间数字孪生模型运行过程本体模型,对存在的关系进行统一定义: 组成关系 (Party-of)、驱动关系 (Driven-of)、集成关系 (Integration-of)、子类关系 (subClass-of)、活动关系 (Activity-of)、顺序关系 (Sequential-of) 等。

3 应用验证

根据提出的基于 IDEF 的四维车间数字孪生模型构建方法,以某精密制造车间为应用对象,利用 Microsoft Visual Studio 2017 软件,并结合 Unity 2017.3.0f3 软件,

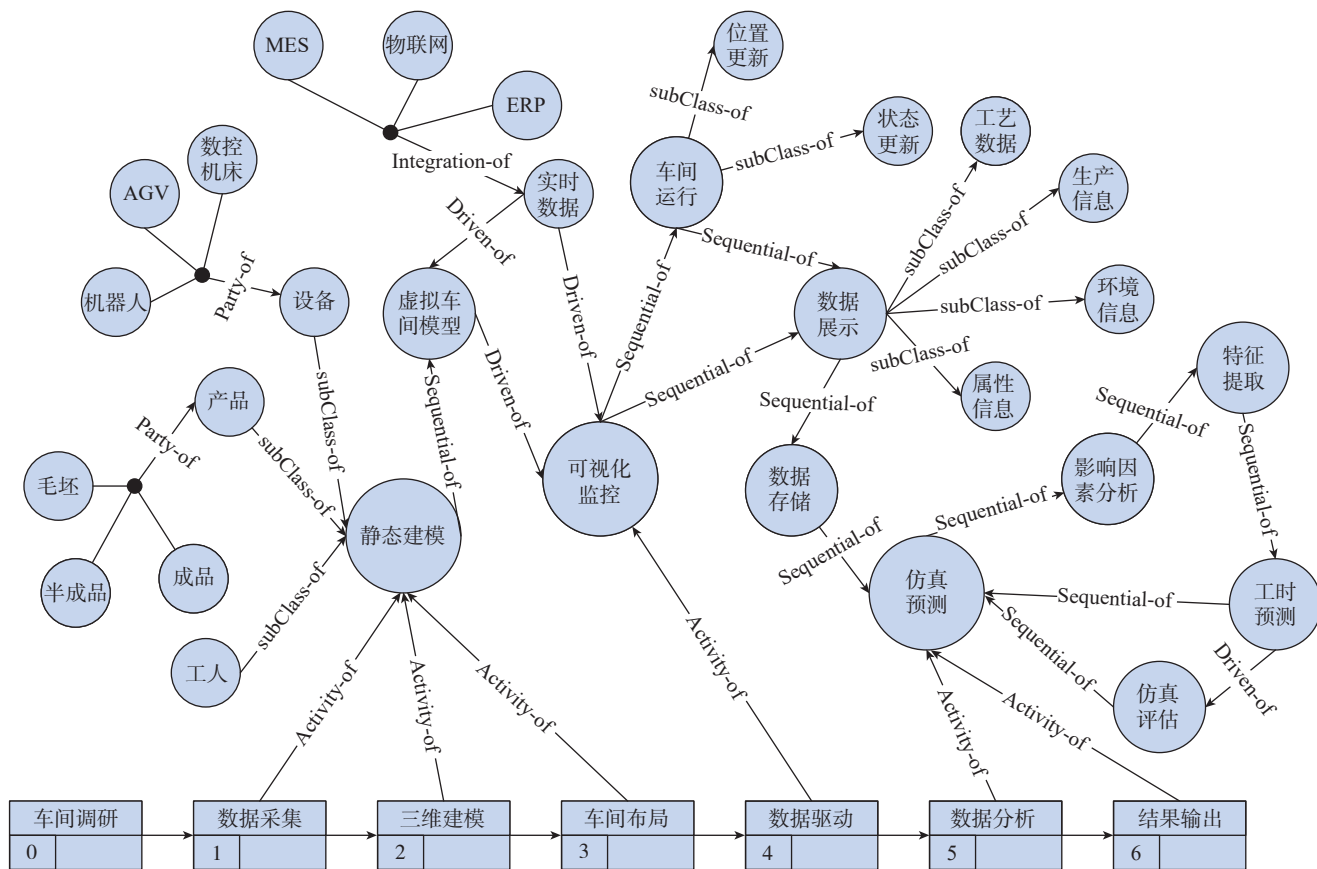


图 10 车间数字孪生模型运行过程本体模型
Fig.10 Ontology model of operation process of workshop digital twin model

开发了精密制造车间数字孪生平台。

精密制造车间数字孪生平台由 3 个子系统组成,分别是虚拟车间三维静态模型子系统、虚拟车间三维可视化监控子系统、车间运行状态仿真预测子系统,通过子系统间的集成与数据交互,实现车间实时可视化监控和车间运行状态仿真预测。提出的基于 IDEF 的车间数字孪生模型构建方法从功能建模、信息建模、过程建模和本体建模 4 个维度分析精密制造车间数字孪生模型的系统结构。精密制造车间数字孪生平台结构如图 11 所示,其中虚拟车间三维可视化监控子系统是车间运行状态和生产过程数据动态实时展示的主要平台;虚拟车间三维静态模型子系统分层次构建车间全要素三维模型,为车间实时可视化监控提供模型支持;构建车间运行状态仿真预测子系统实现对数控加工工序、工时预测和对车间运行状态动态仿真,并将结果通过数据传输的方式反馈给可视化监控平台进行数据展示。

(1) 虚拟车间三维静态模型。虚拟车间三维静态模型是在明确系统可视化监控需求的基础上,充分调研车间实际现场资源生产情况,利用商业建模软件对产品、人物、机床、小车和车间等生产要素进行三维建模。

图 12 为从功能建模、信息建模、过程建模和本体建模 4 个维度分析的精密制造车间的虚拟车间三维静态模型子系统。

精密制造车间的物理实体对象包括数控机床、上下料机器人、AGV 小车、工人、产品等。静态建模类基于数据采集、建模技术和车间布局活动构建包含产品、设备、工人等要素的虚拟车间静态三维模型,为可视化监控类提供平台和基础。静态建模类是二元关系 <subClass-of> 和 <Activity-of> 的值域,是二元关系 <Sequential-of> 的自变量,<subClass-of> 约束静态建模类的子类为设备类、产品类、工人类,<Activity-of> 约束静态建模的活动内容,<Sequential-of> 约束活动的顺序。设备类、产品类是二元关系 <Party-of> 的值域,约束其组成部分。通过 UOB 的分解可以将车间静态建模这一过程细化为几何数据采集、三维模型构建、产品建模、人物建模、设备建模、布局规划和渲染贴图 7 个子过程。精密制造车间用于构建车间静态三维模型的静态数据包括车间几何数据、模型数据、布局信息、资源数据以及产品、设备、人物等基本信息。通过采集车间物理实体的几何参数、属性信息,利用 3ds Max 三维建模软件,采

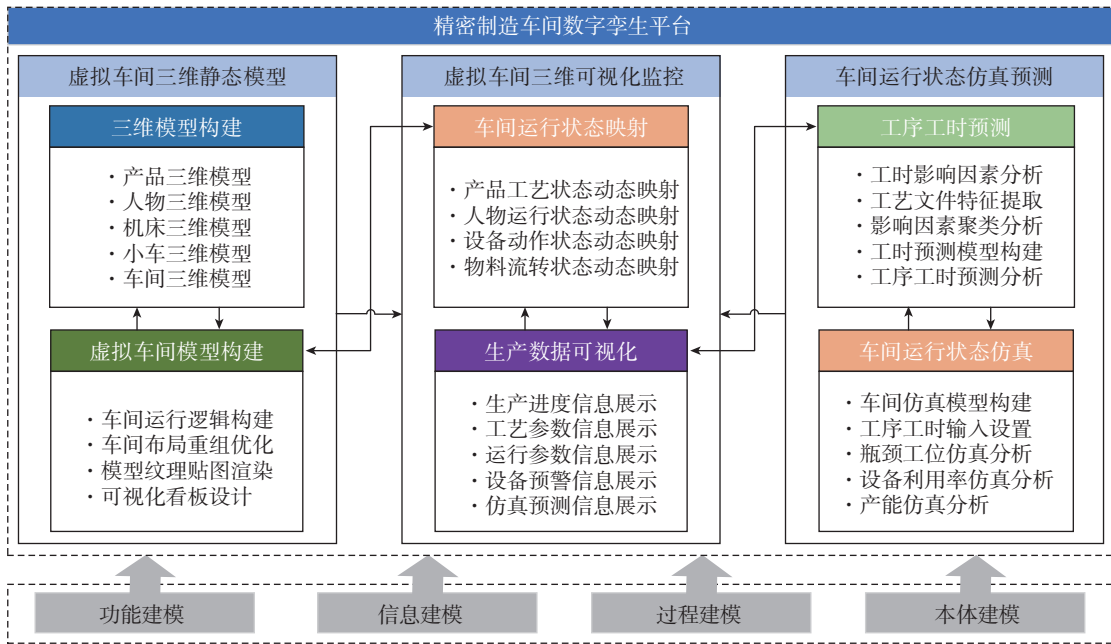


图 11 精密制造车间数字孪生平台结构图

Fig.11 Structure diagram of digital twin platform in precision manufacturing workshop

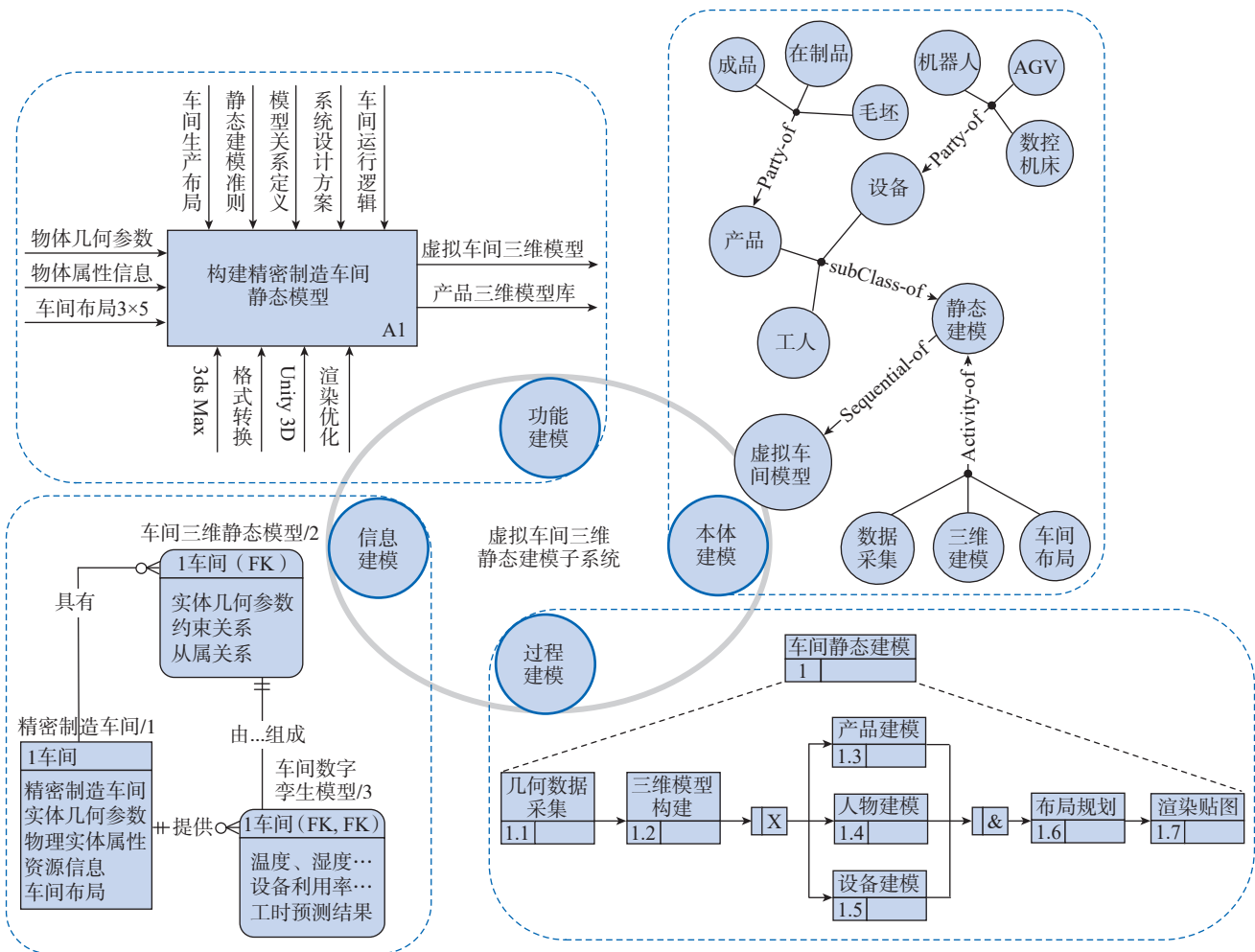


图 12 虚拟车间三维静态子系统

Fig.12 3D static model subsystem of virtual workshop

用特定的静态建模方法等对物理实体进行分析和建模。对于产品、人物、设备模型的构建,需要将实体分解为组件单元,按照各组件单元实际尺寸进行三维建模,基于局部坐标系进行模型装配,通过约束条件进行位置方向约束,并定义各关节的父子关系。为了使虚拟车间模型与实际物理车间模型尽可能相似,根据车间实际布局情况对虚拟车间设备层、工位层、车间层的模型进行重组和布局,并利用 Unity 3D 对三维模型进行纹理贴图、灯光配置和渲染优化。此外还要构建产品的三维模型库,将同一产品不同阶段的模型进行存储和管理,以便后续在产品工艺状态动态映射中进行产品模型的替换。最后完成整个精密制造车间的静态建模,得到虚拟车间三维静态模型,如图 13 所示。

(2) 虚拟车间三维可视化监控。虚拟车间三维可视化监控是数字孪生车间动态实时监控与预测系统的主要展示平台,在车间三维静态模型的基础上,构建数字孪生车间全局数据交互管理架构实现实时数据的通信与传输,通过同步建模方法以实时数据驱动虚拟车间三维模型动态运行,实现产品、设备、人物、物料流转的动态实时映射。此外,以可视化看板的形式精确展示车间生产进度信息、产品工艺参数、设备运行参数等生产过程数据。

图 14 为从功能建模、信息建模、过程建模和本体建模 4 个维度分析的精密制造车间的虚拟车间三维可视化监控系统。可视化监控类基于虚拟车间三维模型以实时数据驱动车间动态运行,对车间生产数据进行可视化展示并将历史数据通过数据库的形式提供给工时预测类。可视化监控类是二元关系 <Driven-of> 和 <Activity-of> 的值域,是二元关系 <Sequential-of> 的自变量,<Driven-of> 约束其驱动关系。实时数据类是二元关系 <Integration-of> 的值域,约束数据集成关系。<subClass-of> 约束车间运行类的子类为状态更新类和位置更新类,约束数据展示类可展示的信息为工艺数据、生产信息、环境信息、属性信息。通过 UOB 的分解



图 13 虚拟车间三维静态模型

Fig.13 3D static model of virtual workshop

可以将车间三维可视化建模这一过程细化为系统集成、实时数据更新、看板数据展示、数据存储、模型驱动、车间动态运行、位置更新、状态更新 8 个子过程。在获得虚拟车间三维模型的基础上,基于数据传输方式与其他信息系统进行数据通信与交互,获得制造车间实时数据。产品实时数据包括产品的工艺信息、位置信息和状态信息,分别表示产品的加工状态、实时位置和工序状态。人物的实时数据是指人物的位置信息和动作状态信息,表示某个工人在某个位置的操作。设备实时数据按照类型的不同,可以分为机床、小车和机器人,分别表示不同设备的实时状态。对于机床而言,还包括用于对机床健康状态实时监控的设备报警信息,以及用于表示机床当前工序内容的加工信息。看板数据是对车间生产要素信息的精确展示,根据类型,看板可分为涵盖车间全部内容的全局看板和针对某一对象的局部看板。然后以实时数据驱动车间三维模型动态映射,实现车间运行状态可视化监控,如图 15 所示。

(3) 车间运行状态仿真预测。车间运行状态仿真预测包括工时预测和仿真评估。工时预测是通过分析数控加工工时影响因素,构建工序工时神经网络预测模型,利用特征聚类和遗传算法优化算法提高工时预测的效率和准确度。车间运作状态仿真是在工时预测的基础上对车间产能、瓶颈工位、设备利用率等性能指标进行评估,以输出的工时结果作为仿真的参数设置,以提高仿真的准确度。

图 16 为从功能建模、信息建模、过程建模和本体建模 4 个维度分析的精密制造车间的车间运行状态仿真预测子系统。仿真预测类首先通过历史数据分析和处理,提取工时影响因素,建立工时预测算法,并将预测结果反馈给可视化监控类进行数据展示,同时工时预测数据作为参数驱动车间仿真系统进行仿真评估。通过 UOB 的分解可以将车间仿真预测建模这一过程细化为历史数据采集、工时预测建模、仿真评估、看板数据展示、数据存储 5 个子过程。车间历史数据主要用于工时预测模型中工时影响因素的特征提取和预测算法的学习训练,基于加工历史数据对工时影响因素进行量化分析,构建工时预测模型实现产品加工工时预测,在此基础上构建车间仿真模型并以工时预测结果数据作为输入参数,对车间运行状态重要指标进行量化和评估,最后通过车间全局看板展示工时预测信息和仿真评估信息,如图 17 所示。

4 结论

车间数字孪生模型构建是在信息世界对物理车间从功能、信息、过程、本体 4 个方面进行建模,描述制造

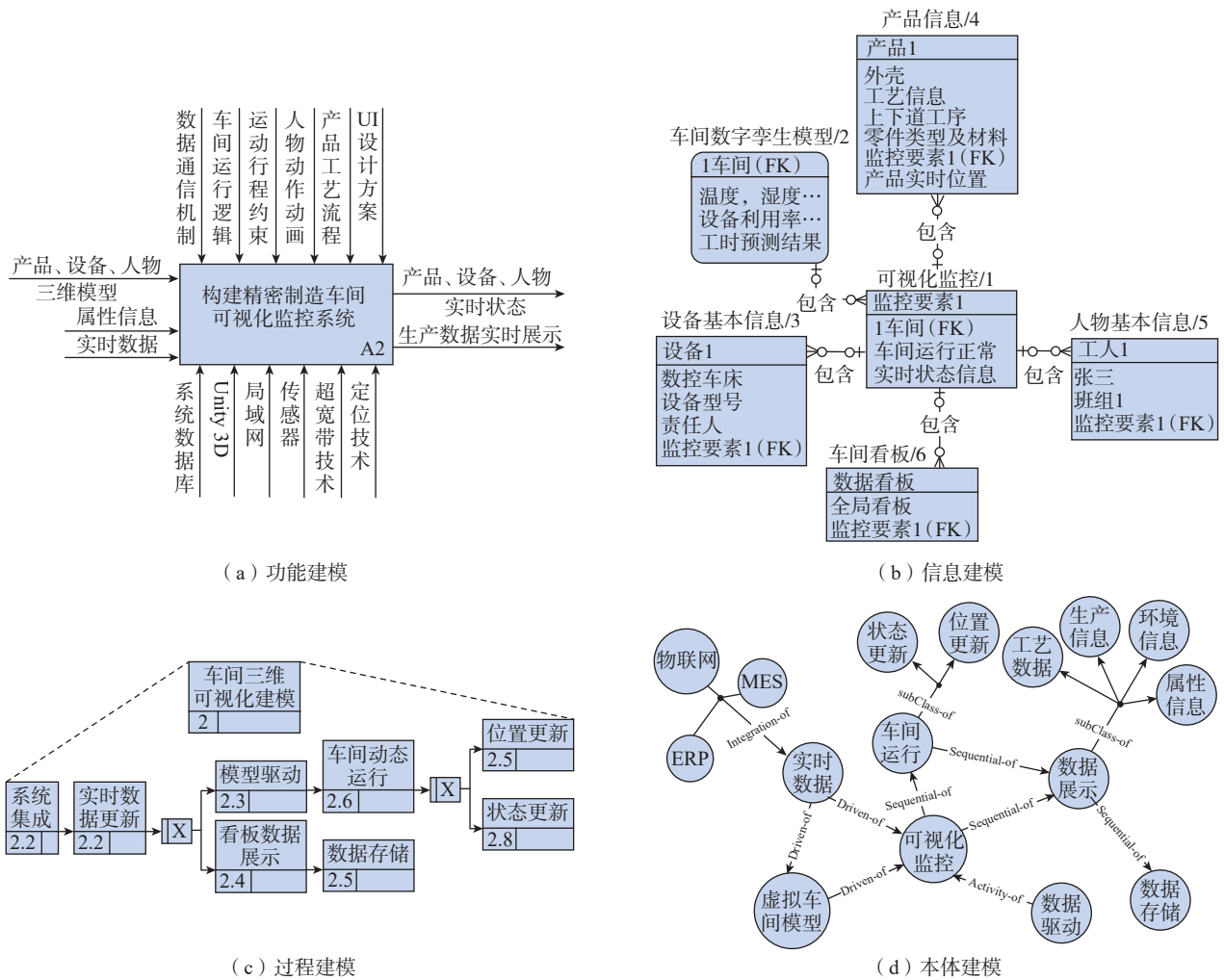


图 14 虚拟车间三维可视化监控子系统
Fig.14 3D visual monitoring subsystem of virtual workshop

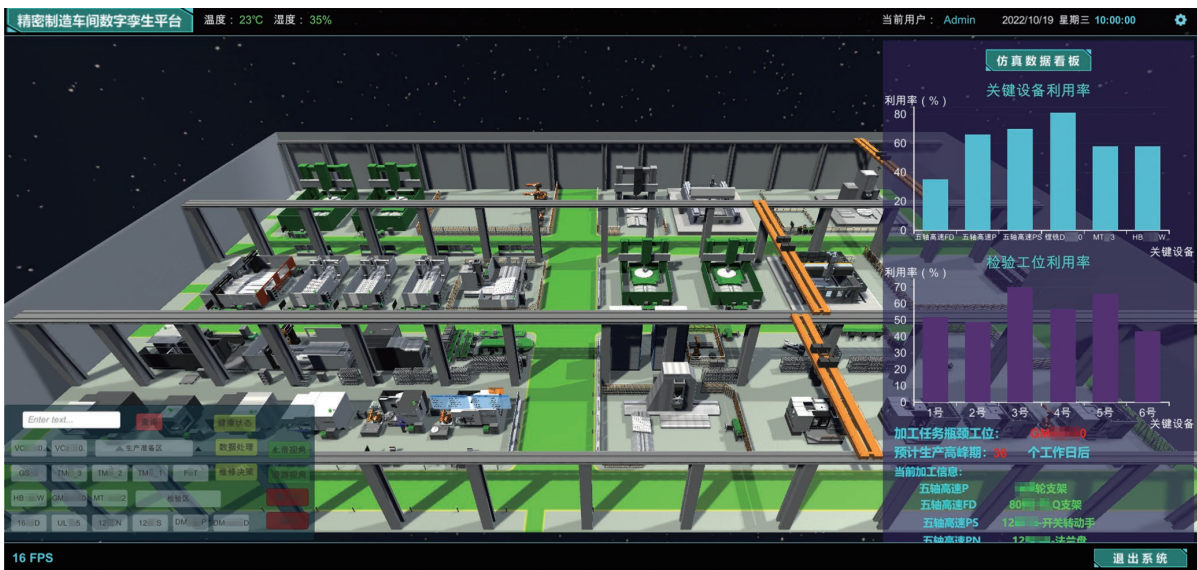


图 15 车间全局三维可视化监控
Fig.15 Global 3D visual monitoring of workshop

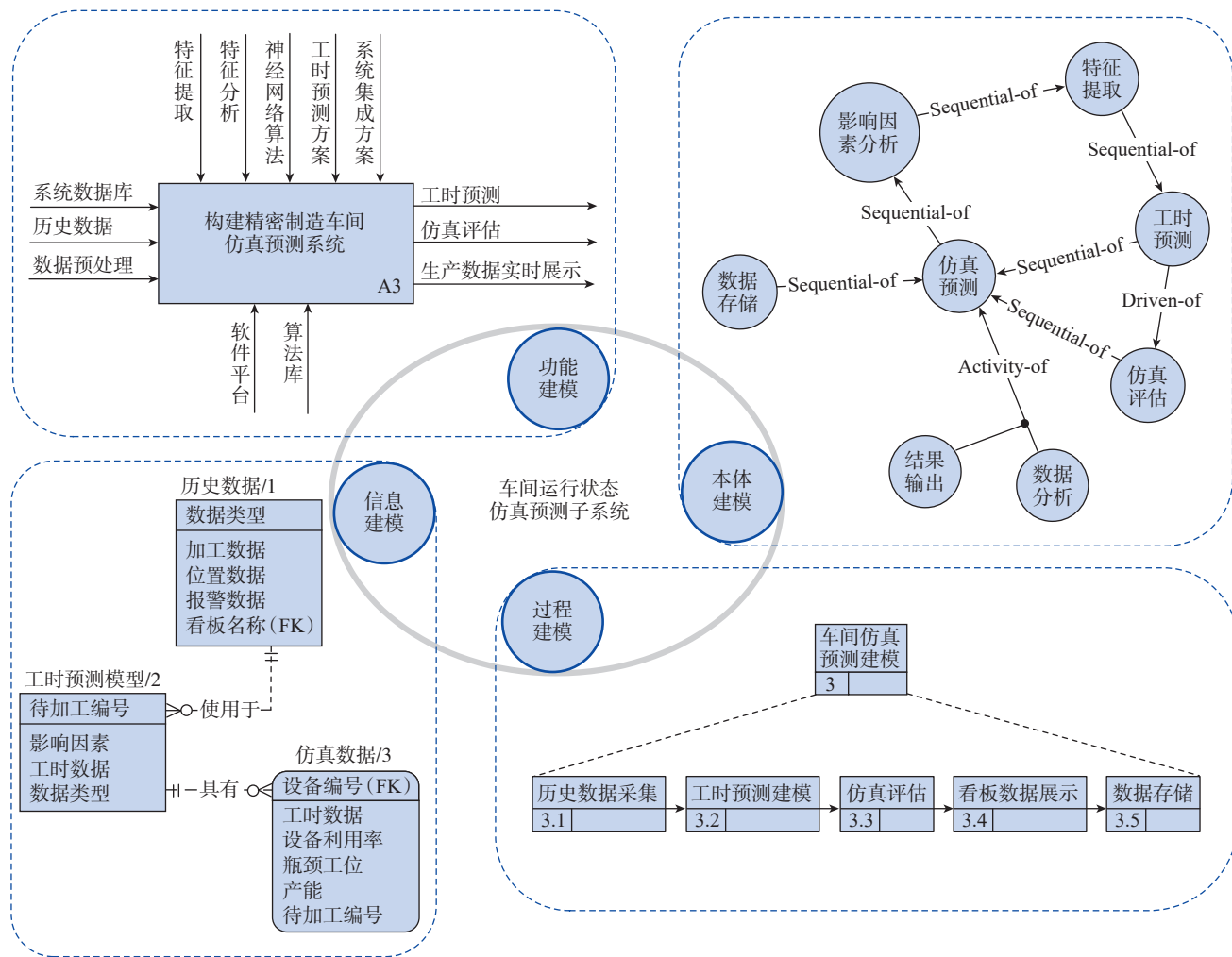


图 16 车间运行状态仿真预测子系统

Fig.16 Simulation and prediction subsystem for workshop operation status

车间的几何模型、运行逻辑、动作状态、仿真预测,进而实现对物理车间行为、状态和性能的模拟和仿真。建立一种基于 IDEF 的四维度加工车间数字孪生模型,提出从功能模型、信息模型、过程模型和本体模型 4 个维度构建车间数字孪生模型,建立了加工车间的四维度数字孪生模型,提高了数字孪生车间建模语义一致性、可重用性、结构化和开发的自动化程度。

(1) 利用 IDEF0,通过功能分解、功能之间关系的分类对车间数字孪生模型功能进行分析与描述,将车间数字孪生模型按功能分为车间静态建模、车间可视化监控、车间仿真预测 3 个模块。

(2) 利用 IDEF1x 描述了车间数字孪生模型运行过程中的重要信息,结合车间数据需求分析、概念模型设计、车间运行逻辑和系统数据库分析对制造车间的复杂数据进行结构化与规程化建模表达。

(3) 利用 IDEF3,以车间数字孪生模型运行过程中

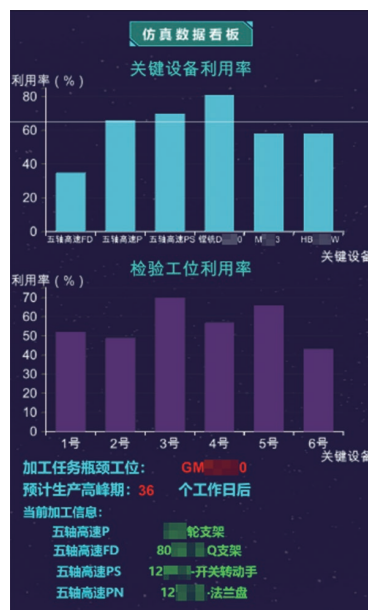


图 17 车间运行状态仿真预测看板

Fig.17 Simulation and prediction panel for workshop operation status

数据流动过程为核心准确描述了车间过程变化和状态转移。在信息建模和过程建模的基础上,用图形化语言将制造车间实际生产过程中事件发生和状态改变的优先级和因果关系进行了描述与记录。

(4) 利用 IDEF5 获取车间数字孪生模型运行过程本体模型的概念、术语和关系,通过车间数字孪生模型运行过程本体建模采集事实和获取知识,构建了运行过程本体的核心模型。

参考文献

[1] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(1):1-9.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.

[2] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.

[3] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生模型构建理论及应用[J].计算机集成制造系统,2021,27(1):1-15.

TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.

[4] 李莎莎,舒亮,吴桂初,等.基于逻辑Petri网模型的断路器数字孪生车间系统[J].计算机集成制造系统,2022,28(2):455-465.

LI Shasha, SHU Liang, WU Guichu, et al. Digital twin workshop system of circuit breaker based on logic Petri net[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(2): 455-465.

[5] 丁凯,张旭东,周光辉,等.基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1491-1504.

DING Kai, ZHANG Xudong, ZHOU Guanghui, et al. Digital twin-based multi-dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1491-1504.

[6] 江海凡,丁国富,张剑.数字孪生车间演化机理及运行机制[J].中国机械工程,2020,31(7):824-832,841.

JIANG Haifan, DING Guofu, ZHANG Jian. Evolution and operation mechanism of digital twin shopfloors[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 824-832, 841.

[7] 郭东升,鲍劲松,史恭威,等.基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究[J].东华大学学报(自然科学版),2018,44(4):578-585,607.

GUO Dongsheng, BAO Jinsong, SHI Gongwei, et al. Research on modeling of aerospace structural parts manufacturing workshop based on digital twin[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018, 44(4): 578-585, 607.

[8] 周帅昌,刘丽兰,高增桂.数字孪生车间的模型与数据采集优化[J].工业控制计算机,2021,34(12):14-16.

ZHOU Shuaichang, LIU Lilan, GAO Zenggui. Optimization of model and data acquisition of digital twin workshop[J]. Industrial Control

Computer, 2021, 34(12): 14-16.

[9] 宋思蒙,蒋增强,马靖,等.基于数字孪生的模块化生产系统运行机制及重构方法[J].计算机集成制造系统,2021,27(2):510-520.

SONG Simeng, JIANG Zengqiang, MA Jing, et al. Operation mechanism and reconstruction method of modular production system based on digital twinning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 510-520.

[10] 金星,方柏鑫,周丽娟.面向航空制造的数字孪生车间构建[J].自动化应用,2021(8):77-79.

JIN Xing, FANG Baixin, ZHOU Lijuan. Construction of digital twin workshop for aviation manufacturing[J]. Automation Application, 2021(8): 77-79.

[11] 刘怀兰,岳鹏,閻辰皓,等.基于VDEVS的离散制造车间虚拟实体行为模型描述方法[J].计算机集成制造系统,2021,27(10):2950-2960.

LIU Huailan, YUE Peng, GE Chenhao, et al. Discrete manufacturing workshop virtual entity behavioral model description method based on VDEVS[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2950-2960.

[12] 尚文利,王成恩,张士杰,等.基于IDEF与UML的系统建模方法[J].计算机集成制造系统,2004,10(3):252-258,275.

SHANG Wenli, WANG Cheng'en, ZHANG Shijie, et al. IDEF & UML based system modeling method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(3): 252-258, 275.

[13] 伍晓榕,张树有,裴乐森,等.基于IDEF的分层递阶工艺成熟度建模技术及应用[J].计算机集成制造系统,2013,19(8):2007-2017.

WU Xiaorong, ZHANG Shuyou, QIU Lemiao, et al. Technology and application of hierarchical process maturity modeling based on IDEF[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(8): 2007-2017.

[14] 夏平均,姚英学.基于IDEF和UML的虚拟装配系统建模[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(9):1391-1396.

XIA Pingjun, YAO Yingxue. Virtual assembly system modeling based on IDEF and UML[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(9): 1391-1396.

[15] 周春柳,刘晓冰,潘瑞林,等.复杂产品维修构型变更管控方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(9):2836-2851.

ZHOU Chunliu, LIU Xiaobing, PAN Ruilin, et al. Management and control method of complex product maintenance configuration change[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(9): 2836-2851.

[16] 杨帆,马萍,李伟,等.数字孪生体可信度评估过程及指标研究[J].系统仿真学报,2023,35(2):350-358.

YANG Fan, MA Ping, LI Wei, et al. Research on credibility evaluation process and index of digital twins[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 350-358.

[17] CHEN P P. The entity-relationship model—Toward a unified view of data[J]. ACM Transactions on Database Systems, 1976, 1(1): 9-36.

[18] CODD E F. A relational model of data for large shared data banks[J]. Communications of the ACM, 1970, 13(6): 377-387.

通讯作者:庄存波,副研究员,硕士生导师,博士,研究方向为数字孪生技术、装配MES、生产调度。

(责编 晓月)