DOI: 10.3901/JME.2019.09.154

机床制造加工数字化车间信息模型及其应用研究*

王立平^{1,2} 张兆坤^{1,2} 邵珠峰^{1,2} 王 民³

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;

2. 清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室 北京 100084;

3. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 车间/工厂内普遍存在来自不同厂家且功能各异的自动化装备和系统, 其在信息层面表现为分布于不同网络层次的异构数据。异构系统与设备之间的互联互通是实现制造信息化和智能化的基础, 是数字化车间集成的一个核心问题。解决这一问题的关键是建立规范一致的信息模型。针对机床制造加工数字化车间的信息互联互通问题, 在分析数字化车间架构、功能要求与信息流的基础上, 建立了机床制造加工数字化车间的信息模型架构。通过明确数字化车间信息模型的元素定义、建模规则和建模方法, 实现了模型的标准化和一致性。随后, 基于 OPC 统一构架(OPC unified architecture, OPC UA), 建立了该信息模型在 OPC UA 地址空间中的映射规则和基于 OPC UA 服务器/客户端实现信息模型数据存储和交互的方法。最终, 采用 OPC UA 协议将信息模型映射到 OPC UA 地址空间, 选取典型现场应用场景, 完成了信息模型的实例化, 验证了所提出的机床制造加工数字化车间信息模型的实用性。

关键词: 机床制造; 数字化车间; 信息模型; OPC UA; 应用验证

中图分类号: TH166

Research on the Information Model of Digital Machining Workshop for Machine Tools and Its Applications

WANG Liping^{1,2} ZHANG Zhaokun^{1,2} SHAO Zhufeng^{1,2} WANG Min³

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: Automated equipment and systems with different functions and from different manufacturers are widely existed in the workshop/factory. They bring a large number of heterogeneous information distributed at different network levels. The interconnection and interoperability between heterogeneous systems and devices is the basis for the informationization and intelligent manufacturing, and is a core issue in digital workshop integration. The key to solving this problem is to establish a standard and consistent information model. The architecture of the information model of digital machining workshop for machine tools is proposed based on the analysis of its structure, functional model and information flow. By clarifying the element definition, modeling rules and methods, the standardization and consistency of the information model of the digital workshop is achieved. Then, the rules that map the information model in to the OPC UA (Unified architecture) address space is established. The approach for implementing data storage and interaction of the information model based on the OPC UA server/client are also discussed. Finally, the feasibility of mapping the information model to the OPC UA address space is verified. An instantiated information model is established based on an instance of application scenario, and the practicability of the information model is tested.

Key words: machine tools manufacturing; digital workshop; information model; OPC UA; experimental verification

* 国家智能制造专项综合标准化资助项目(2015ZXFB02001, 2016ZXFB02002)。
20180904 收到初稿, 20190113 收到修改稿

0 前言

随着大数据、物联网、云计算等新一代信息技术的推动,全球新一轮工业革命来袭。发达国家纷纷提出了各自国家层面的制造发展战略,力图在新一轮制造业竞争中重塑并保持优势^[1]。为抓住信息技术与制造业深度融合带来的产业变革机遇,实现制造强国的战略目标,我国提出了《中国制造2025》国家战略,确定以“智能制造”为主攻方向,推进制造过程智能化,在重点领域试点建设智能工厂和数字化车间^[2-3]。

信息集成与互联互通是消除信息孤岛、实现工厂/车间数字化和网络化的重要基础和保障^[4-5]。智能工厂/数字化车间集成与互联互通是指不同网络层次的设备、系统之间能够实现网络互联与信息互通,本质上是实现一致性信息/数据的传输与使用,其核心包括两个层次:① 基于网络的搭建和通信协议的支持,将分布于不同物理位置和网络层次、类型各异的系统和设备通过网络连接起来,并且实现数据在不同设备与系统间的可靠传输;② 设备和系统能够一致地解析所传输的信息/数据,包括明确其类型及含义,实现语义的解析。目前我国正在推进基于工业互联网的 OPC UA 协议应用^[6],第一层次的问题基本解决。建立语义一致的信息模型成为目前信息集成和互联互通的关键。信息模型是对物理对象的抽象和组织,需要反映实际物理对象和数据关系。采用信息模型实现对象映射,完成具体物理对象向信息和数据的转换,使得面向数字化和智能化的系统信息集成更加方便和快捷^[7]。

机床作为“工作母机”,是制造业的基石。机床制造加工数字化车间技术是机床制造企业采用数字化、信息化和网络化技术提高机床制造的自动化、柔性化和智能化水平的基础,是机床制造企业改善产品质量和生产效率以及实现大规模个性化定制的重要保证。目前,机床制造企业纷纷推出各自的机床制造加工数字化车间解决方案,努力将机床制造技术由半自动化和自动化模式向信息驱动的网络化集成控制模式方向发展。然而机床制造加工数字化车间的信息种类繁多,内部各硬件设备和软件系统均来自不同设备厂商,存在异构性。在车间内进行信息的集成和应用时需要开发大量不同厂商和装备的异构信息转换接口,导致数字化车间集成和升级成本激增,信息实时性和可靠性下降,信息重用和共享困难等问题,严重阻碍了机床制造加工车间向数字化、网络化和智能化制造的升级。

采用统一的机床制造加工数字化车间信息模型对车间的数据进行梳理和组织,定义统一描述格式

支撑对信息模型的解析,采用标准化集成方案提供统一的信息交互模式,是解决上述问题的关键。当前针对数字化车间信息模型的研究大多针对产品或设备进行建模,面向设备和控制层,主要解决生产要素的管理和设备的监控问题^[8],没有对生产作业流程进行系统考虑,无法体现车间功能。数字化车间信息模型规范标准滞后于数字化车间的发展现状的需求的问题亟待解决。

本文针对机床制造加工数字化车间的信息模型及其应用展开研究。在分析机床制造加工数字化车间的组织架构、功能模型和信息流的基础上,提出一套结构明确,可灵活扩展的机床制造加工数字化车间信息模型架构,并对信息模型中的各类元素和建模规则进行定义,使车间内的所有信息可以基于一个标准协议,采用统一的格式和同一种语言进行描述,实现信息在车间内无障碍的流通和共享。随后,结合 OPC UA 协议,对信息模型的实例化和实现方法进行探讨,并基于 OPC UA 协议和现场应用场景对信息模型的应用实现进行了验证。

1 数字化车间架构与功能

企业和车间的信息建模流程可按“确定领域—分析活动和功能—确定分析对象—找信息流—信息分类—建立模型”的逐层分解法进行^[9]。因此,分析机床制造加工数字化车间的组织架构、功能模型与信息流是建立其信息模型的基础。数字化车间是一个复杂的系统,涉及信息技术、自动化技术、机械制造、物流管理等多个技术领域。在智能制造系统架构^[3,10]中,数字化车间包含设计、生产、物流三个生命周期维度,涵盖设备、单元、车间三个系统层级,其智能功能特征覆盖资源要素、互联互通、融合共享、系统集成、新兴业态,如图1所示。

图1 智能制造系统架构及数字化车间覆盖范围

根据数字化车间的组织结构和层级要求,结合机床制造生产现状及要求,机床制造加工数字化车间应包含车间层、控制层和设备层,其组织架构如图2所示。车间层由数字化车间管理系统及车间数据库服务器组成,主要由生产执行系统(Manufacturing execution system, MES)控制,重点解决车间的生产管理问题。MES包含生产计划管理、工艺规划、设备管理监控、资源管理和质量控制等子功能系统。控制层由各类数据采集与监视控制(Supervisory control and data acquisition, SCADA)系统和控制系统组成,实现对现场设备的控制、监控

和生产过程数据的采集。设备层由数字化加工设备、工业机器人、物流运输设备、立体仓库、数字化检验设备、工装等组成。在车间层之上为企业执行层,由企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)系统、产品生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)系统、供应链管理(Supply chain management, SCM)系统和计算机辅助工艺规划(Computer aided process planning, CAPP)系统等构成,企业执行层与车间层MES系统进行交互,提供生产所需的部分资源数据,调度和监控整个数字化车间的生产运行。

图2 机床制造加工数字化车间组织架构示意图

根据 GB/T 25485-2010《工业自动化系统与集成 制造执行系统功能体系结构》^[1],数字化车间的核心功能范畴应包括生产运行管理、物流运行管理、质量运行管理和维护运行管理。结合机床生产制造需求,机床制造加工数字化车间各功能模块及相互之间的主要信息流如图3所示。

根据机床制造加工数字化车间的物理组织组成、功能模型以及各模块之间的信息流要求,对机床制造加工数字化车间内的物理资产和制造过程数据进行数字化和模型化描述,并按一定关系规则组织起来,形成其车间信息模型。由于机床制造加工数字化车间规模宏大、信息复杂,在对其进行信息建模时,应遵循以下原则和要求。

(1) 信息模型架构应可灵活继承和扩展。由于不同企业数字化车间规模不一,软硬件条件和功能模块存在差异,不同数字化车间信息模型的架构组成存在区别,因此信息模型架构应具有普适性。可采用面向对象的方法进行建模。

图3 机床制造加工数字化车间的功能范畴及信息流示意图

(2) 完整性。数字化车间信息模型应该能够完整地反映车间的整体情况,覆盖设备、控制、车间三个层级和各功能维度,最大限度地提供和表达丰

富的信息，支持MES的调度和决策功能。

(3) 模型应划分为不同子模型，具有引用关联机制。鉴于机床制造加工数字化车间的系统复杂性，一般先建立子模型，通过子模型之间的关系集成形成全局信息模型，简化信息模型复杂程度和建模难度。子模型的划分可按照功能领域或者物理布局进行，建立各模块子模型。

(4) 在机械加工类数字化车间中，生产环节中人员的参与和作用不可忽视，因此除了对车间内设备和物料等资源的信息进行建模外，生产人员信息同样重要，建模时必须予以考虑。

2 机床制造加工数字化车间信息模型

2.1 信息模型的元素与架构

信息模型是一种用来定义信息表示方式的方法。信息模型应明确三个层面的内容：① 定义哪些对象及对象包含的数据；② 如何组织这些对象和数据；③ 如何定义数据格式。

数字化车间由具体功能模块(生产、物流、质量和维护)和实现各功能的生产要素(人员、设备、物料、半成品和产品等)组成。在信息模型中，将数字化车间的各个组成部分定义为组件，其中功能模块定义为功能组件，生产要素定义为资源组件。显然各组件是需要进行建模的对象。除实体组件外，车间运行过程中存在各类生产过程数据，如各类单据，它们也是需要建模的对象。对象包含的数据采用属性进行定义，各组件或对象包含的所有信息数据的集合称为它的属性集。在信息模型中，信息数据具有静态性和动态性之分^[12-13]，静态信息表示在定义之后不发生改变或者变化缓慢的信息数据，在车间中具体主要表现为资产标识、订单数据等，例如物料的编码、加工设备编号等；而动态信息表示随生产过程实时产生、消失或发生变化的数据，一般为设备状态数据、零件生产过程记录数据，如机床状态、零件的加工尺寸、物流信息、开工完工时间等等。根据信息数据的静态性和动态性，将属性分为静态属性和过程属性，静态属性形成静态属性集，过程属性形成过程属性集。各属性集包含若干个信息对象的属性数据，信息对象由属性进行描述，属性由属性元素组成。由此定义数字化车间信息模型的层次结构如图4所示。为保证车间信息模型与数字化装备信息模型的互联互通和模型复用，本章定义的模型建模规则基于制造装备集成信息模型的建模规则^[7]进行定义和扩展。

图4 机床制造加工数字化车间信息模型的层次结构

对图4中各信息模型元素由小到大解释如下。

属性元素：组成属性的基本元素，是属性的基本单元，如属性标识、名称、数据类型等。属性元素的定义示例如表1所示。

表1 属性元素的定义

序号	属性元素	基本建模规则	含义	实例
1	AttributeID	M	属性的标识码	0x2101
2	AttributeName	M	属性名称	AxisSpeed
3	AttributeDes	O	属性描述	C轴的转速值
4	AttributeAccess	M	访问权限	RO
5	AttributeDatatype	M	数据类型	Float
6	AttributeValue	O	数据值	2 400
7	EngineeringUnits	O	工程单位	r/min
8	NativeUnits	O	本地单位	r/min
9	LValue	O	下限值	0
10	HValue	O	上限值	Null
11	SamplingInterval	O	采样间隔/ms	10

属性：描述对象的性质和特征的数据。每个属性都由多个属性元素组成，但并不是每一个属性都包含所有的属性元素。如机床主轴转速是一个属性，该属性及其包含的属性元素的一个实例如表1最右侧列所示。

信息对象：车间域中的一个信息体，描述了或普遍、或真实、或抽象的实体，该实体能够作为整体被概念化。信息对象的实例如机床主轴、某零件的加工工艺路线、某物料的入库单据。信息对象通过其属性来完成其数字化定义和数字化描述。

属性集：一系列属性的集合，属性集可以由子属性集组成，也可以由若干个信息对象的属性共同组成。根据信息的静态性和动态性，属性集分为静态属性集和过程属性集。

组件：一种实体对象或逻辑对象，是上层对象的物理或者逻辑上的一部分，由属性集对其特征进行描述。组件可以嵌套，即组件可以具有自身的子组件，同一对象的所有子组件组成组件集。

建模规则描述在建模时某属性或属性元素被包含的基本要求。以字母 M 表示强制规则，表示在建模时必须包含该属性/属性元素；字母 O 表示可选规则，表示在建模时该属性/属性元素可包含，也可以不存在。

数字化车间信息模型是一个可扩展的树形结

构，允许属性集和组件之间的嵌套。上述定义中，属性集、组件集均是构成车间信息模型描述的抽象的结构化元素，其不是实际某个对象的映射，不包含实际的内容，只用于组织模型的框架和层次。

2.2 机床制造加工数字化车间信息模型

根据机床制造加工数字化车间的功能模型、信息流和上述信息模型元素的定义，提出机床制造加工数字化车间信息模型架构如图 5 所示。将机床制造加工数字化车间信息模型划分为静态属性集、过程属性集和生产运行管理信息模型、物流运行管理信息模型、质量运行管理信息模型和维护运行管理信息模型四个主要的子模型，各子模型包含自身功能模块的静态属性集、过程属性集和实现该功能的资源组件信息模型。

图 5 机床制造加工数字化车间信息模型架构示意图

机床制造加工数字化车间静态属性集定义为数字化车间运行提供支撑的静态基础数据。车间过程属性集定义车间级的过程动态数据，一般为车间各方面的汇总统计数据 and 车间订单跟踪信息等中间数据，用于向 ERP 反馈。车间静态属性集和过程属性集包含的主要信息模型对象如表 2 所示。

各功能组件模型的静态属性集定义与各功能模块实施相关的机床制造加工数字化车间静态属性数据的集合，其中静态属性数据是指在一定时间内不变或者缓变的数据。

各功能组件模型的过程属性集定义各功能执行和实现过程中产生的生产、物流、质量和维护过程

表 2 车间静态属性集和过程属性集包含的信息对象

属性集	信息模型对象	描述
机床制造 加工数字化 车间静态 属性集	车间基础信息	车间的基础定义信息，用于车间的辨识和管理
	生产组织	定义车间内的各部门、工组等信息
	工作日历	定义统一的车间日历模板，制定工作日、休息日等信息
	机床产品订单	MES 系统从 ERP 系统获取的订单信息
机床制造 加工数字化 车间过程 属性集	订单跟踪	MES 根据车间各汇报数据跟踪订单完成情况
	生产统计	产品各类生产数据统计信息
	质量统计	根据质检结果得到的产品质量统计信息
	库存统计	车间内各物料的实时存储状态
	维护统计	设备、工装维护次数、时间等统计数据

数据，此类数据在生产过程中实时采集、随生产过程的产生或发生变化的数据。

各功能组件的静态属性集和过程属性集包含的信息对象如表 3~6 所示。

表 3 生产运行管理静态和过程属性集包含的信息对象

属性集	信息模型对象	描述
生产运行管理静态属性集	机床产品物料清单	机床产品的组成，结构化数据
	产品生产计划	车间针对某产品的生产规划
	零部件生产计划	根据物料清单拆分的零部件加工生产计划
	批次计划	根据主生产计划拆分的零件批次生产加工安排
生产运行管理过程属性集	零件加工工艺	某零件的加工工艺路线图及加工要求，结构化数据
	文档文件	机床产品说明文档，可以是图纸、使用说明等
	数控程序代码	根据零件图纸和工艺编制的机床 NC 代码
	物料请求	生产线需要物料时产生的物料需求单据
生产运行管理过程属性集	加工派工单	MES 根据生产计划分派给现场各生产单元的工作分配单据
	作业实绩信息	设备加工某零件时的实际时间和物料消耗数据
	生产计划跟踪	实时跟踪生产计划的完成程度，据此进行排产调度

表 4 物流运行管理静态和过程属性集包含的信息对象

属性集	信息模型对象	描述
物流运行管理静态属性集	物料基础信息	车间内物料字典数据
物流运行管理过程属性集	物料入库	物料入库请求和结果信息
	物料出库	物料出库请求和结果信息
	物料移库	物料移库请求和结果信息
	物料盘点	物料盘点请求和结果信息
	物料退库	物料退库请求和结果信息
	物料配送	物料配送至生产线现场的反馈信息

表 5 质量运行管理静态和过程属性集包含的信息对象

属性集	信息模型对象	描述
质量运行管理静态属性集	零件质量定义	零件各质量要求项目信息
	质检计划	管理系统根据生产计划制定的质检计划信息
质量运行管理过程属性集	质量派工单	下发给检验人员和设备的检验任务工作指令单
	质检执行	进行质量检验，获得质检数据结果
	质检合格证	给合格品颁发的合格证
	不合格品汇报	不合格品汇报信息
	返工返修单	不合格品返工返修单
	报废件处理	不合格零件报废处理通知和结果单据
	质检计划跟踪	跟踪质检计划完成进度

表 6 维护运行管理静态和过程属性集包含的信息对象

属性集	信息模型对象	描述
维护运行管理静态属性集	设备台账	管理车间内所有设备的基本信息
	工装台账	管理车间内所有工装的基本信息
	设备保养规范	各类设备的保养要求和保养方法
	设备点检规范	各类设备的点检要求和点检方法
维护运行管理过程属性集	设备点检	设备点检指令和点检过程数据记录
	设备保养	设备保养指令和保养过程数据记录
	设备故障	设备故障报警信息和报警数据记录
	设备维修	设备维修指令和维修过程数据记录
	设备绩效	设备工作时间、效率等统计数据
	工装报检	工装故障报修和检验过程数据记录

各功能组件信息模型的资源组件集：定义构成机床制造加工数字化车间的设备、工装、人员等的信息模型。资源组件模型是功能组件信息模型的子模型，通常为真实物理组成对象或功能单元。各资源组件包含自身的静态属性集和过程属性集。各功能子模型包含的主要的组件模型如表 7 所示。

表 7 各功能子模型包含的主要组件模型

功能领域	包含的组件模型
生产运行管理	数控机床信息模型、机器人信息模型、刀具信息模型、工装信息模型、生产人员信息模型
物流运行管理	仓库信息模型、物流设备信息模型、库管员信息模型
质量运行管理	质检设备信息模型、质检工具信息模型、质检员信息模型
维护运行管理	维护工具信息模型、维护备件信息模型、维护人员信息模型

各属性集及其信息对象包含的属性数据明细篇幅较长，本文不再一一赘述，具体可参考《数字化车间机床制造信息模型》征求意见稿^[14]。

2.3 信息模型的实例化与实现

上节定义的机床制造加工数字化车间信息模型仅为抽象的框架，在对实际的数字化车间进行建模和基于信息模型进行车间管理功能开发时，需要基于车间实际的功能和装备，按照其所属类别和语义对框架中的各类信息模型元素进行填充，形成具有实际意义的信息模型对象，该过程称为信息模型的实例化。信息模型具体实现时，需要基于具体的描述方法和通信机制，实现对实例化信息模型的组织和存储。本文提供一种基于 OPC UA 协议的信息模型实现方案。

OPC UA 是 OPC 基金会为解决传统 OPC 技术在安全性、跨平台性、建模能力和系统互操作性等方面的不足而发布的新一代信息集成规范。OPC UA 的两大基础组件是传输机制和信息模型。

OPC UA 采用了集成地址空间，增加对象语义识别功能，实现了对信息模型的支持，并为特定领

域的应用开发提供了丰富和可扩展的信息层次结构,实现了信息模型的互操作^[15-16],其他组织可在 OPC UA 信息模型基础上构造他们的模型,通过 OPC UA 公开特定的信息。除信息建模外,OPC UA 还可用作数据传输的统一通信协议,为独立于平台的通讯和信息技术创造了基础。OPC UA 既继承了传统 OPC 的优点,还解决了分布式系统之间数据交换和数据建模两个需求^[17]。OPC UA 具有可升级性、网络兼容性、独立于平台 and 安全性等特点,可广泛应用于控制系统、MES 以及 ERP。

OPC UA 采用客户端/服务器模式实现信息交互功能。图 6 给出了 OPC UA 客户端与服务器之间相互交互的软件功能层次模型。

图 6 OPC UA 服务器和客户端应用程序架构

(1) OPC UA 服务器/客户端应用程序: 实现作为客户端/服务器的设备或系统的程序或代码,客户端使用 API (Application programming interface, 应用程序编程接口)发送和接收消息。

(2) OPC UA 服务器/客户端 API: 用于分离客户端/服务器应用代码与 OPC UA 通信栈的内部接口,实现如管理连接(会话)和处理服务报文等功能。

(3) OPC UA 通信栈: 实现 OPC UA 通信通道,包括消息编码、安全机制和报文传输。

(4) 真实对象: OPC UA 服务器应用可访问的,或 OPC UA 服务器内部维护的物理或软件对象,例如物理设备和传感器。

(5) OPC UA 地址空间: 客户端使用 OPC UA 服务可以访问的服务器内节点集,节点用于表示实际对象、对象定义和对象间的引用。

OPC UA 地址空间模型称为元模型,地址空间中包括节点和引用,OPC UA 信息模型是基于元模

型建立的。服务器通过 OPC UA 建模规则^[18],由地址空间的节点和节点间引用建立复杂的信息模型^[19]。地址空间模型、信息模型和数据之间的关系如图 7 所示。节点间相互引用并以层次结构进行组织,将地址空间组织成一个相互联系的网状结构。但为了提高服务器和客户端之间的互操作性,一般建议将服务器地址空间的节点以层次结构组织,即类似于 Windows 的文件夹结构^[20]。

图 7 OPC UA 地址空间、信息模型和数据实例

OPC UA 信息模型实现的关键在于服务器的开发,大部分工作量在于地址空间的建立、管理与维护^[21],完成实际建模对象向地址空间节点的映射。真实的信息建模对象向 OPC UA 地址空间映射时,需要实现信息模型中属性数据的映射和数据结构的映射,结合 OPC UA 协议,规定映射规则如下。

(1) 数据结构是为了组织结构关系,并不是实际的数据,这一类的结构信息都可以使用 OPC UA 中的 FolderType 对象类型来表示,如图 8 所示。信息模型与组件之间,组件与属性集之间,属性集与信息对象之间的关系使用 HasComponent 引用表示。

(2) 属性数据是为了表示实际的物理对象的特征信息,与 OPC UA 映射的时候遵循如下原则:两个值的状态量采用 TwoDiscreteStateType 来表示,多个状态值采用 MultiStateType 来表示,模拟量采用 AnalogItemType 类型表示,其他数据统一使用 DataItemType 表示。

图 8 信息模型结构向 OPC UA 地址空间的映射

在已获取机床制造加工数字化车间内各类信息对象及其属性数据基础上, 基于 OPC UA 实现该车间的信息模型并与其他系统集成的流程如下。

(1) 采用上述的信息模型建模规则和方法构建信息模型框架, 将所获取的属性数据填充到信息模型相应节点, 完成信息模型的实例化, 获得信息模型描述文件。

(2) 解析信息模型描述文件, 并按规定的规则向 OPC UA 地址空间映射, 建立地址空间并实现 OPC UA 服务器的功能。

(3) MES 系统、云平台等软件系统作为 OPC UA 客户端通过特定接口访问 OPC UA 服务器, 获取信息模型及各类属性数据, 在获取的属性数据基础上进行各项功能开发。

可扩展标记语言(Extensible markup language, XML)由于具有良好的格式和扩展性、与软硬件平台的无关性及面向对象等优点, 成为目前广泛应用的中性数据描述语言。因此推荐采用 XML 语言对信息模型描述文件进行描述。

3 基于 OPC UA 的信息模型架构验证

为验证信息模型架构和基于 OPC UA 的信息模型实现方案的可行性, 基于 OPC UA 协议对信息模型架构和信息模型向 OPC UA 地址空间映射规则的正确性进行验证, 具体为实现信息模型架构和相应信息对象及其属性数据在地址空间中的表达。本部分的验证利用机械工业仪器仪表综合技术经济研究所开发的信息模型编辑器和信息模型加载器软件平台进行。信息模型编辑器实现信息模型各类建模规则的定义和对信息模型的编辑, 并生成 XML 描述文件。信息模型加载器完成描述文件向 OPC UA 服务器地址空间的映射, 并运行 OPC UA 服务器。利用 OPC UA 客户端读取服务器地址空间, 获取信息模型的全部内容, 实现机床制造加工数字化车间信

息模型的加载和浏览, 客户端采用 UA Expert 1.4.4 版。验证场景和流程如图 9 所示。

图 9 基于 OPC UA 的信息模型架构验证场景和流程

通过信息模型编辑器建立机床制造加工数字化车间信息模型并生成的数字化车间信息模型 XML 描述文件, 如图 10 所示。

图 10 信息模型编辑器对信息模型架构进行编辑的结果

使用信息模型加载器读取数字化车间信息模型 XML 描述文件, 按照预定的映射规则对模型文件进行解析和映射, 将信息模型结构数据和属性数据映射到 OPC UA 地址空间模型, 并启动 OPC UA 服务器, 结果如图 11 所示。

图 11 将信息模型写入地址空间, 启动 OPC UA 服务器

OPC UA 客户端通过服务器的入口 URL 地址访问服务器, 读取机床制造加工数字化车间信息模型, 结果如图 12 和图 13 所示。

图 12 OPC UA 客户端访问服务器获取信息模型

图 13 OPC UA 客户端获取机床“制造商”属性信息

经验证, 按所定义的信息模型架构、建模方法建立的数字化车间信息模型可以根据映射规则实现在 OPC UA 地址空间模型的映射, 并且通过 OPC UA 客户端访问服务器地址空间, 可以顺利获取机床制造加工数字化车间信息模型的结构和其中任意对象及其属性元素值。验证了信息模型结合 OPC UA 协议实现信息的互联互通的可行性。

4 基于数据映射的信息模型现场应用

选择北京北一机床股份有限公司“北一大隈数

字化车间”现场对机床制造加工数字化车间信息模型进行了建模和现场应用试验。

数字化车间现场环境如图 14 所示。用于验证的机床制造加工数字化车间配备有 13 台数控机床和加工中心、1 条柔性生产线、1 套立体仓库(配有 KITO 立体天车作为自动物料取送机器人)和计量检测室(配有三坐标测量机等数字化质检设备)。北一机床根据机床制造加工数字化车间生产现场实际使用要求, 开发了“机床企业数字化车间管理系统”, 如图 15 所示。管理系统覆盖机床加工数字化车间的生产运行、物流运行、质量运行和维护运行各功能领域, 采用 Web Service 为生产现场各部门、各终端提供电子派单、查询、汇报等服务。选择车间内的 13 台数控机床和加工中心作为现场生产运行管理模块, 立体仓库和 KITO 立体天车作为物流运行管理模块, 三坐标测量机作为质量运行管理模块。通过现场的“机床企业数字化车间管理系统”采集和管理车间内各项数据, 其后台采用 Oracle 关系数据库支持。

图 14 机床制造加工数字化车间现场环境

图 15 机床企业数字化车间管理系统

为不影响现场生产, 采用数据映射的方法进行信息模型的现场应用试验。机床制造加工数字化车间现场应用试验场景及布局如图 16 所示。机床生产现场的各类数据均通过数据网络进行采集并存储于 Oracle 数据库服务器。在数字化车间信息模型验证系统中建立 OPC UA 服务器。结合北一机床数字化

车间实际情况建立其信息模型，将 Oracle 数据库中数字化车间的各项数据向 OPC UA 服务器信息模型地址空间映射，填充该信息模型完成实例化。在 OPC UA 客户端基础上开发“机床制造加工数字化车间信息管理系统”(后文统一称“车间信息管理系统”)，读取 OPC UA 服务器中的信息数据，根据使用要求可视化地显示信息模型内容。车间信息管理系统实现数字化车间生产资源和生产过程数据的集成和管理。

图 16 现场应用试验场景及布局图

应用试验过程中，基于机床企业数字化车间管理系统，选取某机床产品中的一个典型零件，跟踪其在生产现场从订单下发、生产计划、生产调度、物料出入库、加工工艺、加工执行和汇报、质量检验、成品入库等全生命周期工作流程，通过 Web Service 连接后台数据服务器，查看相应数据表的更新和变化，验证信息模型的信息组织的同步更新。具体流程如图 17 所示。根据以上机床产品上某零件加工的一个典型流程的步骤和方法完成生产运行管理、物流运行管理、质量运行管理信息模型的应用验证。

车间基础数据和维护管理信息的应用验证采用现场查验的方式进行。以“管理员”身份登录“车间信息管理系统”，查看设备管理、刀具管理、工装管理等相关界面，查看数控机床状态等数据和各类统计信息，验证维护管理功能与基础数据表符合现场应用要求。

机床制造加工数字化车间信息管理系统应用验证结果界面如图 18 所示。根据现场应用试验结果，

车间信息管理系统可实现对各静态数据的写入和定义，通过数据映射方法，可实现对零件加工制造过程中生产运行管理过程数据、物流运行管理过程数据和质量运行管理过程数据的实时采集和更新，从信息管理系统获取的现场数据结果与现场正常运行得到机床企业数字化车间管理系统的结果完全一致。与原有的“机床企业数字化车间管理系统”不同的是，车间信息管理系统后台的所有信息数据均来源于地址空间信息模型，按照本文所提出的信息模型架构和建模规则进行组织，信息结构规范公开。通过现场应用试验，验证了所提出的信息模型的完整性，可实现全部信息的组织管理。与关系数据库相比，信息模型可完全实现与关系数据库对等的功能，然而其规范化、层次结构化的架构便于新装备的集成、车间的扩展以及与企业级的信息交互。后期可在现有信息模型、互联互通架构和软件系统的基础上，基于获取的各类数据进一步开展各类管理功能和智能功能的开发，推进数字化车间向网络化和智能化制造的升级。

图 17 现场应用试验流程图

图 18 机床制造加工数字化车间信息模型现场验证结果

5 结论

(1) 通过分析机床制造加工数字化车间的组织架构、功能模型与信息流,明确机床制造加工数字化车间信息模型的要求和建模策略。将数字化车间信息模型按功能领域划分为生产、物流、质量和维护四个子模型进行建模。提出按静态属性集、过程属性集、信息对象、属性和属性元素组织信息模型架构的方案,对机床制造加工数字化车间信息进行层次化、结构化规划,构造层次化、模块化的信息模型体系,并对机床制造加工数字化车间各功能领域的信息模型进行了分析和建模。通过 OPC UA 服务器和客户端对信息模型在 OPC UA 地址空间的映射和可实现性进行了验证,验证结果表明该信息模型框架在 OPC UA 地址空间的映射是可行的。

(2) 基于北一机床现场条件,采用数据映射的方法,完成了数字化车间信息模型的实例化,证明了信息模型的实用性。

本文所定义的信息模型具有适用性强、可行性和可操作性高的优点,对指导机加行业数字化车间信息模型的建模、数字化车间信息化和信息集成的建设具有重要参考意义。本文所建立的机床制造加工数字化车间信息模型可以灵活地拓展应用于其他机械加工和离散制造数字化车间的实现。

参 考 文 献

- [1] 隋少春,牟文平,龚清洪,等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. 航空制造技术, 2017, 526(7): 46-50.
SUI Shaochun, MOU Wenping, GONG Qinghong, et al. Digital workshop and intelligent manufacturing practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 526(7): 46-50.
- [2] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] 工业和信息化部,国家标准化管理委员会. 国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Ministry of Industry and Information Technology, Standardization Administration of People's Republic of China. Guide for the construction of national intelligent manufacturing standard system (2018 Edition) [S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [4] 张兆坤,邵珠峰,王立平,等. 数字化车间信息模型及其建模与标准化[J]. 清华大学学报, 2017, 57(2): 128-133.
ZHANG Zhaokun, SHAO Zhufeng, WANG Liping, et al. Digital workshop information model and its standardization[J]. Journal of Tsinghua University, 2017, 57(2): 128-133.
- [5] 郑力,江平宇,乔立红,等. 制造系统研究的挑战和前沿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 124-136.
ZHENG Li, JIANG Pingyu, QIAO Lihong, et al. Challenges and frontiers of manufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 124-136.
- [6] 中国工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Alliance of Industrial Internet. Industrial internet architecture[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [7] 王麟琨,赵艳领,闫晓风. 数字化车间制造装备信息集成通用解决方案研究[J]. 中国仪器仪表, 2017(3): 21-25.
WANG Linkun, ZHAO Yanling, YAN Xiaofeng. The research on general solution for information integration of manufacturing equipments in digital workshop[J]. China Instrumentation, 2017(3): 21-25.
- [8] LI P, HU T, ZHANG C. A unified communication framework for intelligent integrated CNC on the shop floor[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1): 840-847.
- [9] 李文艳,乔立红. 建立企业通用信息模型的方法研究[J]. 航空标准化与质量, 2007(5): 34-39.
LI Wenyan, QIAO Lihong. Research on the method of establishing the enterprise common information model [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2007(5): 34-39.
- [10] 李清,唐骞璘,陈耀棠,等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 539-549.
LI Qing, TANG Qianlin, CHEN Yaotang, et al. Smart manufacturing standardization: Reference model and standards framework [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(3): 539-549.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25485-2010 工业自动化系统与集成 制造执行系统功能体系结构 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of people's Republic of China, Standardization Administration of People's Republic of China. GB/T 25485-2010 Industrial automation systems and integration—Functional architecture of manufacturing execution system[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.

- [12] 涂凡, 黄海松, 姚立国. 面向离散车间制造信息本体建模的研究[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 263-266.
TU Fan, HUANG Haisong, YAO Ligu. Research on ontology modeling of manufacturing information for discrete workshop[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 263-266.
- [13] 聂志, 冷晟, 叶文华, 等. 基于物联网技术的数字化车间制造数据采集与管理[J]. 机械制造与自动化, 2015(4): 98-101.
NIE Zhi, LENG Sheng, YE Wenhua, et al. Development of data collection and management in numerical workshop based on internet of things[J]. Machine Building & Automation, 2015(4): 98-101.
- [14] 国家机床质量监督检验中心. 《数字化车间机床制造信息模型》征求意见稿[EB/OL]. [2018-08-20]. <http://www.jcsjc.com/Auploads/uploads/soft/tc22/2018-1-17/001.pdf>
China National Machine Tools Quality Supervision Testing Center. Digital workshop—Machine tools manufacturing—Information model [EB/OL]. [2018-08-20]. <http://www.jcsjc.com/Auploads/uploads/soft/tc22/2018-1-17/001.pdf>
- [15] PAUKER F, FRÜHWIRTH T, KITTL B, et al. A systematic approach to OPC UA information model design[C]// CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2016.
- [16] GRAUBE M, HENSEL S, IATROU C, et al. Information models in OPC UA and their advantages and disadvantages[C]// IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2018: 1-8.
- [17] MAHNKE W, LEITNER S H, DAMM M. OPC Unified Architecture [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 33863.5-2017 OPC 统一架构 第 5 部分: 信息模型[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China, Standardization Administration of People's Republic of China. GB/T 33863.5-2017 OPC unified architecture—Part 5: Information model[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [19] 王民, 曹鹏军, 宋铠钰, 等. 基于 OPC UA 的数控机床制造数字化车间信息交互模型[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(7): 1040-1046.
WANG Min, CAO Pengjun, SONG Kaiyu, et al. Information interaction model of digital workshop based on OPC UA for CNC machine tools manufacturing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(7): 1040-1046.
- [20] 陆会明, 阎志峰. OPC UA 服务器地址空间关键技术研究及开发[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(7): 109-113.
LU Huiming, YAN Zhifeng. Research and development of key technology for address space of OPC UA server[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7): 109-113.
- [21] 刘丹, 赵艳领, 谢素芬. 基于 OPC UA 的数字化车间互连网络架构及 OPC UA 开发实现[J]. 中国仪器仪表, 2017(10): 39-44.
LIU Dan, ZHAO Yanling, XIE Sufen. OPC UA—based interconnected network architecture in digital plant and implementation of OPC UA[J]. China Instrumentation, 2017(10): 39-44.

作者简介: 王立平, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进制造装备及其控制。
E-mail: lpwang@mail.tsinghua.edu.cn
邵珠峰(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为智能制造和并联机器人。
E-mail: shaozf@mail.tsinghua.edu.cn