

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022098

基于 OPC 统一架构的木制品加工设备信息 互联互通方法

侯晓鹏¹, 吴智慧^{1,2}, 刘海波³, 郭祎鹏⁴, 安源¹, 李博¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 南京林业大学家居与工业设计学院, 江苏南京 210037;
3. 广州市酷匠信息科技有限公司, 广东广州 510650; 4. 圣象集团有限公司, 广东广州 511480)



摘要: 通过分析木制品加工设备无法实现信息互联互通的原因, 发现完整、有效的共享标准是解决此问题的关键, 由此提出共享标准的基本原则和要求。基于开放平台通信统一架构 (Open Platform Communications unified architecture, OPC UA) 标准, 建立木制品加工设备及其生产线信息模型在 OPC UA 地址空间中的映射规则, 并对信息模型的实例化和实现方法进行探讨, 验证 OPC UA 标准在木制品加工设备信息互联互通中的实用性和有效性。

关键词: 木制品加工设备; 互联互通; 信息模型; 开放平台通信统一架构 (OPC UA)

中图分类号: TS664; TP271 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 06-0095-08

Information Interconnection and Intercommunication Method for Woodworking Equipment Based on Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)

HOU Xiao-peng¹, WU Zhi-hui^{1,2}, LIU Hai-bo³, GUO Yi-peng⁴, AN Yuan¹, LI Bo¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Guangzhou Kujiang Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510650, Guangdong, China; 4. Power Dekor Group Co., Ltd., Guangzhou 511480, Guangdong, China)

Abstract: Based on the analysis of less information interconnection and intercommunication among woodworking machines, it is the key to developing complete and effective sharing standards to solve the problem. The basic principles and requirements of the sharing standards are put forward. Then combined with the Open Platform Communications unified architecture (OPC UA) standard, the mapping rules of the information model of woodworking machines and production line in the OPC UA address space are established. The instantiation and implementation method of the information model are discussed. The practicability and effectiveness of OPC UA standards in information interconnection and intercommunication of woodworking equipment are verified.

Key words: woodworking equipment; interconnection and intercommunication; information model; Open Platform Communications unified architecture (OPC UA)

收稿日期: 2022-05-23; 修改日期: 2022-07-22

基金项目: 科技部“科技助力经济2020”重点专项“基于数字化与信息化融合的木地板智能制造技术集成示范”(SQ2020YFF0426279)。

作者简介: 侯晓鹏 (1981—), 男, 助理研究员。Email: hello168429@sina.com

通讯作者: 吴智慧, 男, 教授。Email: wzh550@sina.com

随着个性化定制和柔性化生产的深入推进^[1-2],不同木制品加工设备以及不同软件系统相互之间的互联互通,实现设备之间、设备与生产管理系统间有效信息共享交互,已成为家居木制品行业“两化融合”与智能制造的关键基础。目前,木制品加工设备控制系统基本采用基于实时以太网的工业控制网络,例如 PROFINET、CANopen、EtherCAT 等现场总线系统,具有统一的传输介质、物理接口和媒体访问控制 (medium access control, MAC) 层,使得网络具有统一性,从而解决了互联问题。但这些设备一般都来自不同的厂商,搭载了不同控制系统,具有不同的总线协议标准,导致即使在基于支持实时以太网的系统中,仍有许多产品或系统存在本质差异,无法相互兼容。同时,现场总线系统无法为自身的功能或其他复杂系统的功能提供语义性的描述,即便有选项也非常有限,通常无法实现直接连接,而需要先进行预处理或利用控制器作为中间层。因此,一个完整、准确、有效的共享标准是实现设备间互联互通和互操作的基础。通过共享标准使设备间的所有信息基于一个标准协议,并通过数据类型、数据内容和数据结构的标准化,建立异构网络语义操作的规范和标准^[3-4]。

OPC 统一架构 (Open Platform Communications unified architecture, OPC UA) 是 OPC 基金会创建的新一代用于工业通讯的数据交互技术标准,独立于制造商和平台。其采用基于语义和面向服务的架构,提供面向对象的信息建模方法,可将一个具体对象所有相关的数值、单位、操作方式、历史等信息以统一的架构与模式进行标准封装。也支持其他组织或供应商在 OPC UA 信息模型基础上为特定领域定义专用的信息模型^[5-6],如此即可实现在不同领域内的设备底层的数据采集、设备互操作等横向信息集成;并可以实现设备与数据采集与监视控制系统 (supervisory control and data acquisition, SCADA)、SCADA 与执行制造系统 (manufacturing execution system, MES)、设备与云端的垂直信息集成^[5-6]。目前,以 OPC UA 标准为代表的标准化信息建模技术在工业装备领域已经有了广泛研究^[7]。

OPC UA 开发规范与接口标准的国家标准 GB/T 33863.1—2017《OPC 统一架构 第1部分:概述和概念》^[8]于2018年2月1日正式实施,该标准规定了 OPC UA 建模的基本架构及信息模型的映射和封装标准。GB/T 38869—2020《基于 OPC UA 的数字化车间互联网络架构》于2021年2月1日开始实施^[9],该标准规定了现场设备与设备之间、设备与可编程控制设备之间、可编程控制设备与 MES、ERP 之间的集成与信息交换的架构与信息模型的基本示例。GB/T 39561.3—2020《数控装备互联互通及互操作第3部分:面向实现的模型映射》^[10]从2021年7月1日开始实施,规定了数控设备互联互通及互操作设备描述模型向 MTConnect、OPC UA 等通信协议信息模型的映射。

国内外特别是一些专业协会针对 OPC UA 在不同领域的互联互通信息标准模型的制定及应用进行了大量研究。2021年10月,欧洲木工机械制造商联合会 (EUMABOIS) 发布了针对木材加工机械的 OPC UA 配套规范 OPC 40550-1: Woodworking Machinery-Vertical Interface, 包含了木材加工机械领域常见的裁板锯、封边机、多排钻、砂光机、数控加工中心、压机等多种设备。利用 OPC UA 的建模规则建立了设备工作状态 (离线、待机、准备好、正在运行及错误等), 操作模式 (自动、半自动、手动、睡眠等), 设备运行状态 (系统紧停、校准、正在加工等)、设备运行参数 (进给速度、运行时间、加工工件数等) 等 OPC UA 类型和实例, 以解决目前数字化趋势下林业机械和木材加工机械间数据信息不兼容的问题^[11]。

综上所述, OPC UA 已是国际上形成共识的、被认定为满足工业 4.0 需求的技术标准, 是一套集信息模型定义、服务与通讯标准为一体的标准化技术框架^[12]。通过 OPC UA 标准在木制品加工设备信息互联互通的应用, 可以使得木制品加工过程中设备与设备、设备与管理系统之间的应用编程接口、通信协议、数据和文件格式得到统一, 进而使信息无障碍流通和共享, 实现异构系统之间的互联互通与互操作, 从而促进整个木制品加工设备的升级换代以及木制品生产企业向数字化、信息化和智能制造方向的发展。

1 基于 OPC UA 标准的木制品加工设备信息模型的实例化与实现方法

基于 OPC UA 标准的木制品加工设备信息互联互通方法实现的关键，在于真实的信息模型中的属性数据和数据结构向 OPC UA 地址空间映射以及 OPC UA 地址空间的建立、管理与维护。结合 GB/T 38869—2020 附录 B.6.2 “数控机床内嵌 OPC UA 服务器的实现示例”中数控机床信息模型的示例^[1]，木制品加工设备信息模型结构如图 1 所示，包含六方面信息。

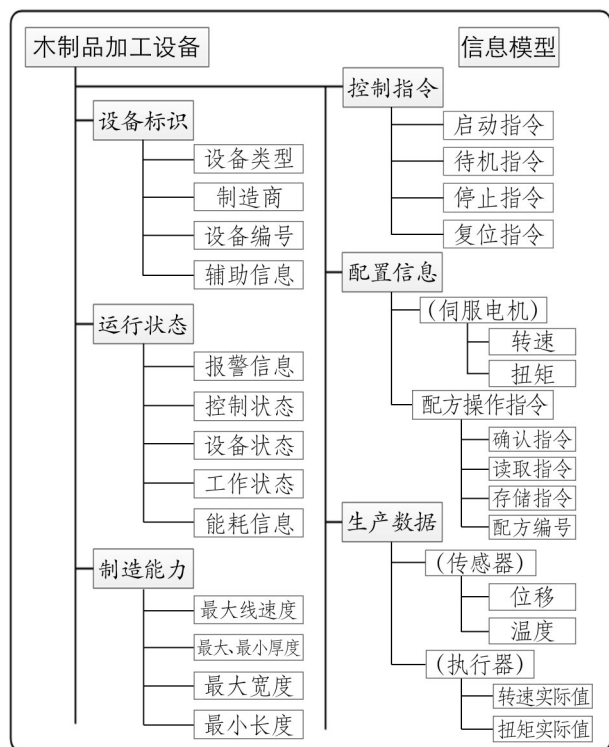


图1 木制品加工设备信息模型

Fig.1 Information model of woodworking equipment

一是运行状态信息。各工艺设备运行过程中的设备状态、工作状态、控制状态等状态信息以及报警信息和能耗信息；

二是设备标识信息。设备类型、制造商、设备编号和辅助信息；

三是控制指令信息。设备运行的启动、停止、待机、复位等常用基本控制指令；

四是制造能力信息。设备运行的最大线速度，可加工工件的最大、最小厚度，最大宽度和最小长度；

五是配置信息。涉及生产工艺及其相关指标的配方数据和编号，以及操作工艺配方的确认写入、读取等指令；

六是生产数据信息。设备中各种类型传感器、执行器的实时数据。

在木制品加工设备信息模型各类信息对象及其属性数据基础上，以木制品表面涂饰加工过程中的双辊涂布机为例，建立基于 OPCUA 标准的信息模型并完成相关测试的流程如下。

1) 建立 OPC UA 模型。

将所获取的双辊涂布机属性数据填充到设备信息模型相应节点，根据 OPCUA 标准的地址空间与层次结构、数据类型及语法，确立设备信息模型和相关元素与 OPC UA 地址空间的映射关系。

利用 OPC UA 元模型建立起的双辊涂布机设备对象类型图形表示如图 2 所示，该对象类型派生自 BaseObjectType，定义了双辊涂布机的通用特征，包括控制指令、设备标识数据、制造能力数据、运行状态信息、生产数据和配方数据。

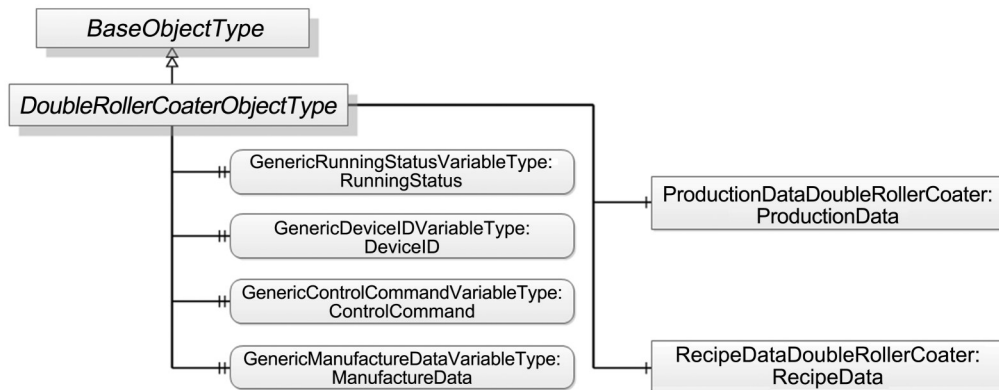


图2 双辊涂布机设备对象类型的 OPC UA 图形表示

Fig.2 OPC UA graph expression of double roller coating machine

利用 OPC UA 元模型建立的双辊涂布机生产数据信息对象类型图形表示如图 3 所示。该对象类型派生自 ProductionDataRollerCoater，描述了双辊涂

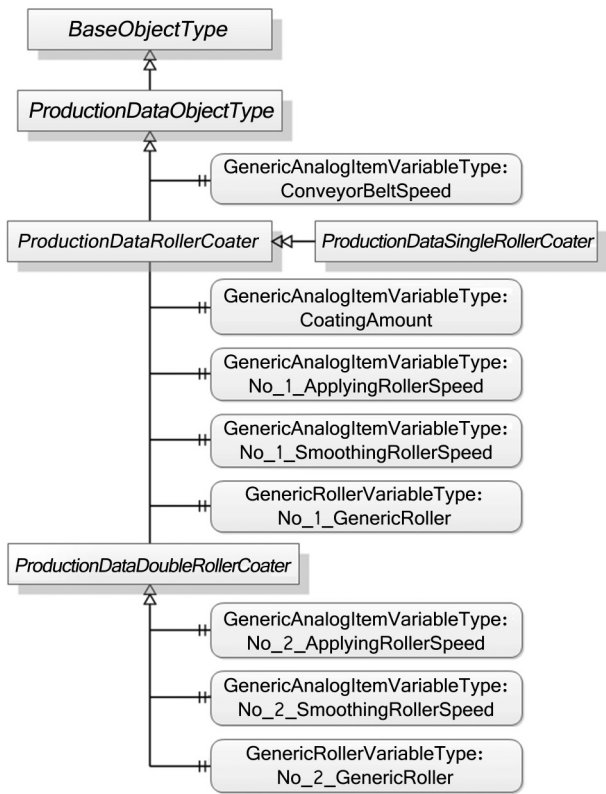


图 3 生产数据信息对象类型的 OPC UA 图形表示
Fig.3 OPC UA graph expression of production data

布机生产数据组件的通用特征，包括传送带速度、均布轮与涂布轮速度、高度、涂布量以及油漆温度实时数值。

2) 生成信息模型接口文件。

通过 OPC UA 的建模工具完成信息模型的实例化，生成信息模型标准接口文件，在 OPC UA 标准中该接口文件以可扩展标记语言（extensible markup language，XML）形式存储。

基于 OPC UA 标准的双辊涂布机设备对象类型和生产数据信息对象类型在 Siemens SiOME（版本号 V2.2.0）软件中的实例化结果如图 4 和图 5 所示，通过建模工具，可以将实例化的信息模型导出为标准的 XML 格式接口文件，如图 6 所示（导出 XML 文件的截图）。

3) 在 PLC 中实现 OPC UA 服务器。

PLC 或 DCS 等可编程控制设备或控制器可作为 OPC UA 服务器，通过加载 XML 描述文件完成信息模型在 OPC UA 服务器中的一个或多个命名空间的映射。例如西门子 S7-1200 系列 PLC 中（硬件系统版本在 V4.4 及以上）实现了内嵌 OPC UA 服务器，并可在 TIA Portal V16 开发软件中通过导入 XML 格式的接口文件完成基于 OPC UA 标准的信息模型描述文件的加载，如图 7 所示。

ReferenceType	NodeClass	Name	TypeDefinition	ModellingRule
HasProperty	Variable	ControlCommand	1:GenericControlCommandVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	DeviceID	1:GenericDeviceIDVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	ManufactureData	1:GenericManufactureDataVariableType	Mandatory
HasComponent	Object	ProductionData	1:ProductionDataDoubleRollerCoater	Mandatory
HasComponent	Object	RecipeData	1:RecipeDataDoubleRollerCoater	Mandatory
HasProperty	Variable	RunningStatus	1:GenericRunningStatusVariableType	Mandatory

图 4 双辊涂布机设备对象类型在 SiOME 中的实现

Fig.4 Realization of double roller coating machine in SiOME

ReferenceType	NodeClass	Name	TypeDefinition	ModellingRule
HasProperty	Variable	CoatingAmount	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	ConveyorBeltSpeed	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_1_ApplyingRollerSpeed	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_1_GenericRoller	1:GenericRollerVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_1_SmoothingRollerSpeed	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_2_ApplyingRollerSpeed	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_2_GenericRollerSpeed	1:GenericRollerVariableType	Mandatory
HasProperty	Variable	No_2_SmoothingRollerSpeed	1:GenericAnalogItemVariableType	Mandatory

图 5 生产数据信息对象类型在 SiOME 中的实现

Fig.5 Realization of production data in SiOME

```
<UAObject NodeId="ns=1;i=5001" BrowseName="1:DoubleRollerCoaterInstance" ParentNodeId="i=85">
  <DisplayName>DoubleRollerCoaterInstance</DisplayName>
  <References>
    <Reference ReferenceType="Organizes" IsForward="false">i=85</Reference>
    <Reference ReferenceType="HasTypeDefinition">ns=1;i=1000</Reference>
  </References>
</UAObject>
<UAVariable NodeId="ns=1;i=6008" BrowseName="1:ControlCommand" ParentNodeId="ns=1;i=5001" UserAccessLevel="3" AccessLevel="3">
  <DisplayName>ControlCommand</DisplayName>
  <References>
    <Reference ReferenceType="HasProperty" IsForward="false">ns=1;i=5001</Reference>
    <Reference ReferenceType="HasTypeDefinition">ns=1;i=2006</Reference>
  </References>
</UAVariable>
<UAVariable NodeId="ns=1;i=6009" BrowseName="1:DeviceID" ParentNodeId="ns=1;i=5001" UserAccessLevel="3" AccessLevel="3">
  <DisplayName>DeviceID</DisplayName>
  <References>
    <Reference ReferenceType="HasProperty" IsForward="false">ns=1;i=5001</Reference>
    <Reference ReferenceType="HasTypeDefinition">ns=1;i=2004</Reference>
  </References>
</UAVariable>
```

图6 XML 格式的模型接口文件
Fig.6 Model Interface File in XML Format

导出接口

一致性检查

更新接口

导入伙伴规范

OPC UA 服务器接口			
	Browse name	节点类型	本地数据
1	DoubleRollerCoaterInstance	Object	
2	ProductionData	Object	
3	ConveyorBeltSpeed		
4	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_ConveyorBeltSpeed"
5	CoatingAmount		
6	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_CoatingAmount"
7	No_1_ApplyingRollerSpeed		
8	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_1_ApplyingRollerSpeed"
9	No_1_GenericRoller		
10	HeightValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_1_HeightValue"
11	TemperatureValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_1_TemperatureValue"
12	No_1_SmoothingtRollerSpeed		
13	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_1_SmoothingRollerSpeed"
14	No_2_ApplyingRollerSpeed		
15	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_2_ApplyingRollerSpeed"
16	No_2_GenericRoller		
17	HeightValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_2_HeightValue"
18	TemperatureValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_2_TemperatureValue"
19	No_2_SmoothingRollerSpeed		
20	AnalogItemValue	LREAL	"machine_x001_DATA".DATA_No_2_SmoothingRollerSpeed"

图7 在 S7-1200 PLC 中实现 OPC UA 服务器
Fig.7 Realization of OPC UA server in S7-1200 PLC

4) 访问 OPC UA 服务器中数据。

木制品生产制造企业的各软件系统可作为 OPC UA 客户端通过特定接口访问 S7-1200 OPC UA 服务器，OPC UA 客户端通过服务器接口的 URL 地址（TCP 协议的服务器地址为：opc.tcp://192.168.1.3:4840）连接服务器，访问双辊涂布机设备对象信息模型和模型中数据。利用 UaExpert（版本号 V1.5.1）连接 S7-1200 OPC UA 服务器，浏览到的信息模型中各节点如图 8 所示，读取的生产数据信息如图 9 所示。

2 OPC UA 标准在木制品加工生产线的应用

OPC UA 标准在木制品加工生产线中的应用首先应根据生产线所包含的各单机设备的类型，建立起各单机设备的设备信息模型以及所包含的信息对象及其属性数据。

图 10 为一条典型木制品表面涂饰生产线，可根据图 1 所示的木制品加工设备信息模型，对木制品表面涂饰单机设备所应包含的信息元素进行约定。将单机设备所包含的信息分别按照设备标识、控制指令、运行状态、制造能力、配方指令、生产数据等类别进行提取和分类，并将这些信息定

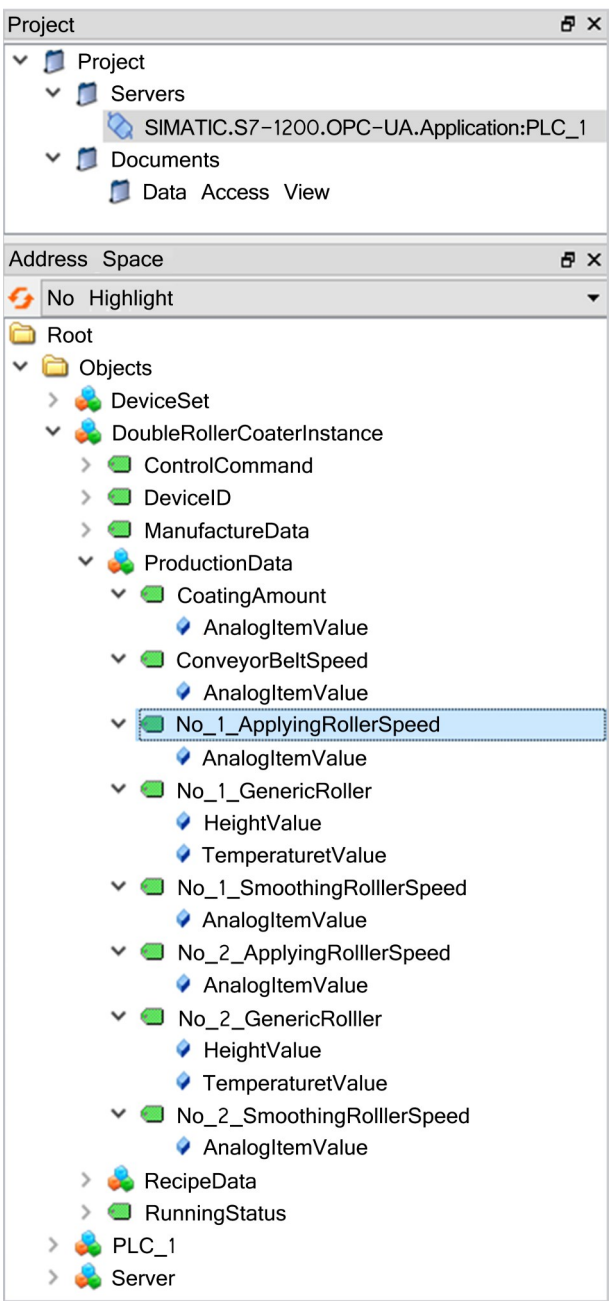


图8 浏览 OPC UA 服务器中的模型节点
Fig.8 Browse model nodes in OPC UA server

义为 OPC UA 模型中的公用变量类型；将各单机设备定义为对象类型，对象类型所包含的变量继承或派生自这些公用变量。

1) 定义 OPC UA 模型中的公用变量类型。

公用变量类型派生自 `BaseDataVariableType`，单机设备对象模型中的变量可以派生或继承自这些变量类型来完成实例化。利用 OPC UA 元模型建立的设备标识变量类型和控制指令变量类型如图 11 所示。

2) 定义 OPC UA 模型中的设备对象类型。

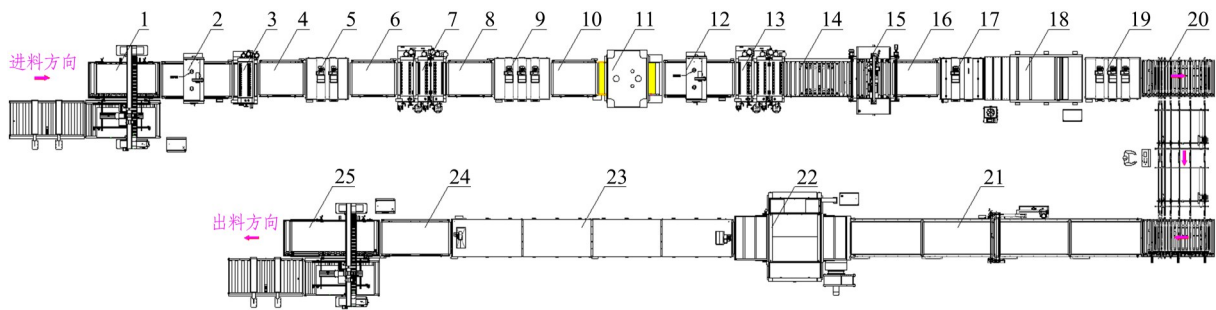
单机设备对象类型派生自 `BaseObjectType`，定义了单机设备的通用特征，包括了控制指令、设备标识数据、制造能力数据、运行状态信息、生产数据和配方数据，用于木制品表面涂饰生产线信息模型中各单机设备的实例化。例如利用 OPC UA 元模型建立起的双辊涂布机设备对象类型见图 2。

在定义单机设备对象类型后，可根据双辊涂布机的实现方法与过程，生成信息模型接口的 XML 格式文件，加载到木制品表面涂饰生产线的各单机设备中，实现信息模型在 OPC UA 服务器中的映射，从而完成 OPC UA 标准在木制品表面涂饰生产线上的应用实现。

从上述基于 OPCUA 标准的木制品表面涂饰各功能单机设备和生产线的信息建模与相关测试过程可以发现：① OPC UA 标准使用 TCP 协议作为通信协议，可以利用木制品加工设备控制系统现有的工业以太网架构和形式，在实现信息互联时无需增加额外的网络硬件开销。② OPC UA 标准中对建模的语法、变量类型、对象类型以及信息模型的封装以及图形表示方法等做出了明确的定义，这就使得木制品加工设备向 OPC UA 信息模型地址空间的映射具有了基本准则和约束，从而保

#	Server	Node Id	Display Name	Value	Datatype
1	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16115	AnalogItemValue	12.5	Double
2	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16114	AnalogItemValue	6	Double
3	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16117	AnalogItemValue	1	Double
4	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16152	HeightValue	77.34	Double
5	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16158	TemperatureValue	163.3	Double
6	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16163	AnalogItemValue	3	Double
7	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16164	AnalogItemValue	3	Double
8	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16165	HeightValue	70	Double
9	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16166	TemperatureValue	79.9	Double
10	SIMATIC.S7-1200.OPC-UA.Application:PLC 1	NS4INumeric16167	AnalogItemValue	10	Double

图9 访问 OPC UA 服务器中的数据信息
Fig.9 Access data information in OPC UA server



1 上料机;2 粉尘清除机;3 单辊涂布机;4 皮带输送机;5 UV 干燥机;6 皮带输送机;7 双辊涂布机;8 皮带输送机;9 UV 干燥机;10 皮带输送机;11 砂光机;12 粉尘清除机;13 双辊涂布机;14 对中机;15 膜压机;16 皮带输送机;17 UV 干燥机;18 准分子灯干燥机;19 UV 干燥机;20 平移机;21 淋幕机;22 喷漆机;23 红外线流平机;24 皮带输送机;25 下料机。

图 10 典型木制品表面涂饰生产线

Fig.10 Typical surface finishing line of wood products

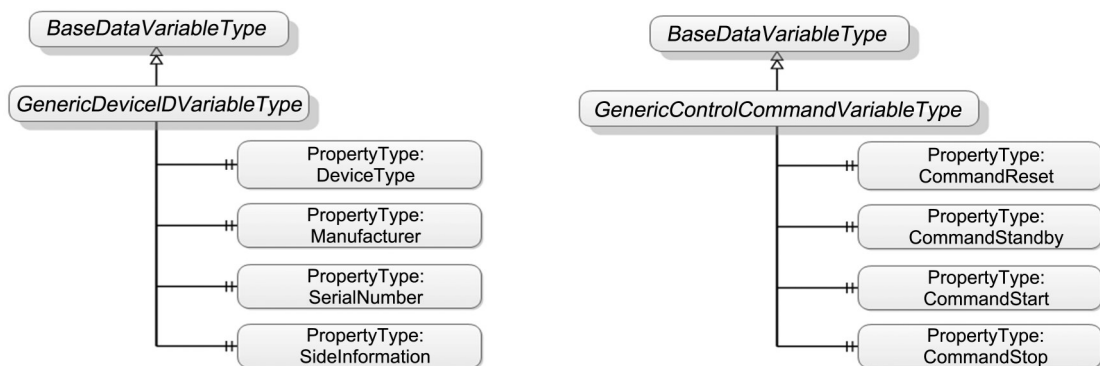


图 11 设备标识变量类型与控制指令变量类型的 OPC UA 图形表示

Fig.11 OPC UA graph expression of Device ID Variable Type And Control Command Variable Type

障了模型架构的一致性，并且 OPC UA 标准也支持利用标准中数据类型、数据结构、对象类型的定义和组合描述更为复杂的设备属性。③ 采用 XML 文件的格式来存储信息模型接口文件，由于 XML 文件的可扩展、跨平台等特征，使得信息模型的接口文件可以在不同的信息化系统、操作系统以及 PLC 或 DCS 之间进行数据交换与共享。④ OPC UA 服务器可以将信息模型中所包含的数据信息类型、实时数值、类型描述等语义信息以及所包含的对象节点和节点间的相互关系呈现出来，使得数据和模型信息具有很强的可视性。

由此可见，OPC UA 标准即可利用现有木制品加工设备的工业以太网，又重点解决了木制品加工设备信息互联互通中数据编程接口协议、数据和文件格式不统一的问题，实现了信息模型的有效性和一致性，利用 OPC UA 标准构建木制品加工设备信息模型并实现信息互联互通是可行的。

3 结语

OPC UA 标准在设备制造业信息互联互通中的应用处于快速发展期，其传输介质可以与木制品加工设备现有的工业以太网兼容，并采用统一的数据通信协议，很好地解决木制品加工设备信息互联问题；OPC UA 标准提供面向对象的信息建模方法和基本架构，能够满足面向智能制造的木制品加工设备信息建模的基本原则和需求，使得数据和信息模型具有了一致性，重点解决木制品加工设备信息互通问题。同时，在木制品加工设备信息互联互通的具体应用实践中，无论是从信息模型的建模工具到服务器与客户端的程序开发，还是从模型接口文件的标准化到接口文件在 IT 端的应用以实现 OT 与 IT 的快速融合，基于 OPC UA 标准的信息互联互通方法都提供了系统的且比较完备的解决方案，从而验证了 OPC UA 标准在木制品加工设备信息互联互通中的实用性和有效性。

目前, OPC UA 标准在木制品加工行业中的应用主要集中在对设备及生产线进行建模, 而缺乏对整个加工数字化车间系统的、通用的信息模型的研究, 使得数字化车间信息模型规范滞后于数字化车间的发展。因此, 在木制品加工行业智能制造的推进过程中, 可考虑开展基于 OPC UA 标准的数字化车间信息模型的研究, 以推动木制品加工数字化车间信息化与智能化水平提升。

参考文献:

- [1] 吴智慧. 工业4.0时代中国家居产业的新思维与新模式[J]. 木材工业, 2017, 31(2): 5-9.
WU Z H. New thinking and new models of the Chinese home furnishings industry in the industry 4.0 era[J]. China Wood Industry, 2017, 31(2): 5-9.
- [2] 熊先青, 刘慧, 朱卿卿, 等. 定制家居产业链协同发展的思考[J]. 木材工业, 2018, 32(2): 18-22, 27.
XIONG X Q, LIU H, ZHU Q Q, et al. Development of the customized home furnishing industry chain[J]. China Wood Industry, 2018, 32(2): 18-22, 27.
- [3] 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(自然科学版), 2017, 57(2): 128-133, 140.
ZHANG Z K, SHAO Z F, WANG L P, et al. Digital workshop information model and its standardization[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(2): 128-133, 140.
- [4] 王立平, 张兆坤, 邵珠峰, 等. 机床制造加工数字化车间信息模型及其应用研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 154-165.
WANG L P, ZHANG Z K, SHAO Z F, et al. Research on the information model of digital machining workshop for machine tools and its applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 154-165.
- [5] 刘丹, 赵艳领, 谢素芬. 基于 OPC UA 的数字化车间互联网络架构及 OPC UA 开发实现[J]. 中国仪器仪表, 2017(10): 39-44.
LIU D, ZHAO Y L, XIE S F. OPC UA-based interconnected network architecture in digital plant and implementation of OPC UA[J]. China Instrumentation, 2017(10): 39-44.
- [6] 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 M, CAO P J, SONG K Y, 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.
- [7] 夏琴香, 张少波, 程秀全, 等. 面向模具装备制造业数字化车间互联互通技术的研究现状[J]. 模具工业, 2020, 46(12): 17-21, 28.
XIA Q X, ZHANG S B, CHENG X Q, et al. Research status of interconnection technology of digital workshop for mould equipment manufacturing industry[J]. Die & Mould Industry, 2020, 46(12): 17-21, 28.
- [8] GB/T 33863.1—2017, OPC 统一架构 第1部分: 概述和概念[S].
- [9] GB/T 38869—2020, 基于 OPC UA 的数字化车间互联网络架构[S].
- [10] GB/T 39561.3—2020, 数控装备互联互通及互操作 第3部分: 面向实现的模型映射[S].
- [11] 王翠. 数字化成为全球热潮[J]. 新自动化与驱动, 2018, (12): 33.
- [12] 孙勇, 黄达力, 王麟琨, 等. 基于 OPC UA 的典型塑性成形机床设备模型的研究与应用[J]. 锻压技术, 2020, 45(6): 122-129.
SUN Y, HUANG D L, WANG L K, et al. Research and application on typical plastic forming machine equipment model based on OPC UA [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(6): 122-129.

(本文编校 向琴)

(上接第60页)

- [14] HE S M, CHEN C J, KUANG Y D, et al. Nature-inspired salt resistant bimodal porous solar evaporator for efficient and stable water desalination[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(5): 1558-1567.
- [15] WANG Z X, HAN X S, ZHOU Z J, et al. Lightweight and elastic wood-derived composites for pressure sensing and electromagnetic interference shielding[J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 108931.
- [16] 杨鸿, 赵鹏伟, 牟洪波, 等. 脱木质素木材衍生功能材料研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(3): 50-55.
YANG H, ZHAO P W, MU H B, et al. Research progress in functional materials derived from delignified wood[J]. World Forestry Research, 2022, 35(3): 50-55.
- [17] 李利芬, 吴志刚, 梁坚坤, 等. 低共熔溶剂在木质纤维类生物质研究中的应用[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4): 20-28.
LI L F, WU Z G, LIANG J K, et al. Application of deep eutectic solvents in lignocellulosic biomass processing[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(4): 20-28.
- [18] ZHAI Q L, LONG F, JIANG X, et al. Facile and rapid fractionation of bamboo wood with a p-toluenesulfonic acid-based three-constituent deep eutectic solvent[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 158: 113018.
- [19] YANG R, CAO Q H, LIANG Y Y, et al. High capacity oil absorbent wood prepared through eco-friendly deep eutectic solvent delignification[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 401: 126150.
- [20] Francisco M, van den Bruinhorst A, Kroon M C. New natural and renewable low transition temperature mixtures (LTTMs): screening as solvents for lignocellulosic biomass processing[J]. Green Chemistry, 2012, 14(8): 2153.
- [21] WU Y, YANG L C, ZHOU J C, et al. Softened wood treated by deep eutectic solvents[J]. ACS Omega, 2020, 5(35): 22163-22170.
- [22] XIA Q Q, CHEN C J, YAO Y G, et al. A strong, biodegradable and recyclable lignocellulosic bioplastic[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(7): 627-635.
- [23] 黄文睿, 唐超凡, 陶雨峰, 等. 绿色低共熔溶剂提取野菊花中黄酮类化合物[J]. 精细化工, 2022, 39(3): 569-576.
HUANG W R, TANG C F, TAO Y F, et al. Extraction of flavonoids from *Chrysanthemum indicum* L. by green deep eutectic solvents[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(3): 569-576.
- [24] 江涛, 周志芳, 王清文. 高强度微波辐射对落叶松木材渗透性的影响[J]. 林业科学, 2006(11): 87-92.
JIANG T, ZHOU Z F, WANG Q W. Effects of Intensive Microwave Irradiation on the Permeability of Larch Wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006(11): 87-92.
- [25] 何盛, 林兰英, 傅峰, 等. 六种木材的微波处理实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(4): 90-96.
HE S, LIN L Y, FU F, et al. Experimental Study of Six Species of Wood Treated by Microwave[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(4): 90-96.

(本文编校 张鹏、向琴)