

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.008

## 面向边缘计算的数字化车间制造数据实时融合方法

杨宏青<sup>1</sup>, 周子颀<sup>2</sup>, 魏乐愚<sup>1</sup>, 黄少华<sup>2</sup>

(1. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对当前数字化车间制造数据冗余性高、传输协议不一致的问题, 提出一种面向边缘计算的车间数据实时融合方法。首先, 围绕边缘计算思想, 建立基于物联网的车间数据实时采集体系架构; 其次, 借鉴证据理论, 以一致性检测和归一化后的数据为基础, 提出互支持度进行证据转换, 并引入改进的证据组合规则获得融合数据, 减少设备端上传的数据量, 减轻传输网络的传输压力; 然后, 以 OPC UA 信息模型为基础, 构建协议转换所需配置的信息层次结构模型, 以可视化配置的形式完成协议转换, 为车间数据提供统一的传输接口; 最后, 以某航天制造车间总线控制台为验证对象, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 边缘计算; 数据融合; OPC UA; 协议转换

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)01-0080-08

## Edge Computing Oriented Real Time Fusion Method of Digital Workshop Manufacturing Data

YANG Hongqing<sup>1</sup>, ZHOU Zijie<sup>2</sup>, WEI Leyu<sup>1</sup>, HUANG Shaohua<sup>2</sup>

(1. Beijing Xinghang Electromechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of strong data redundancy and inconsistent transmission protocol in digital manufacturing shop, an edge computing oriented real-time data fusion method is proposed. Firstly, around the idea of edge computing, the Internet of things based real-time workshop data acquisition architecture is established. Secondly, drawing on evidence theory and based on consistency detection and normalized data, the mutual support degree is proposed for evidence transformation, and the improved evidence combination rule is introduced to obtain fusion data, so as to reduce the amount of data uploaded by the device and reduce the transmission pressure of the transmission network. Then, based on the OPC UA information model, the information hierarchy model of the configuration required for protocol transformation is constructed, and the protocol transformation is completed in the form of visual configuration, providing a unified transmission interface for workshop data. Finally, the bus control console in a certain aerospace manufacturing workshop is used to verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** edge computing; data fusion; OPC UA; protocol conversion

随着制造物联技术的不断发展, 大量不同的感知设备部署于制造车间现场, 为数字化车间的构建提供了海量多源的制造数据, 如何实现数据的有效

融合与设备间的互联互通成为当前亟需解决的问题<sup>[1-2]</sup>。边缘计算将云计算中心的部分计算任务下沉至传输网络边缘设备, 利用网络边缘计算资源并

**基金项目:** 国防基础科研项目(JCKY2019204A004)。

**收稿日期:** 2023-06-26; **修订日期:** 2024-01-28

**通信作者:** 黄少华, 男, 讲师, E-mail: shaohuah@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 杨宏青, 周子颀, 魏乐愚, 等. 面向边缘计算的数字化车间制造数据实时融合方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 80-87. YANG Hongqing, ZHOU Zijie, WEI Leyu, et al. Edge computing oriented real time fusion method of digital workshop manufacturing data[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 80-87.

行完成相关任务,具有实时性强、带宽成本低的优势。因此,开展边缘环境下的数据实时融合方法研究对于减轻车间网络传输压力以及打破各数据采集系统间“信息孤岛”的壁垒具有重要意义。

制造物联网技术所采集的设备运行数据存在冗余性,直接传输至云端会浪费车间网络带宽并提升存储成本。同时,各数据采集系统间缺乏统一的传输协议,阻碍设备之间的互联互通,对上层应用的开发带来了极大的困难。针对上述问题,国内外学者展开了研究。对于设备/装备运行数据融合问题,曹雪蕊等<sup>[3]</sup>从数据层、特征层和决策层进行数据融合,用于实现对小卫星运行异常的检测与识别。Zhang等<sup>[4]</sup>提出一种基于皮尔逊相关系数和信息熵的冲突证据多传感器数据融合新方法,并通过实际案例验证了该方法在处理矛盾证据方面非常有效。刘雪莹等<sup>[5]</sup>建立了一种基于D-S证据理论的多源信息融合方法,并将其应用在电力设备中,评估精度表明该方法能够提升电力运维的精度和快速性。璩晶磊等<sup>[6]</sup>借鉴证据理论,对各个传感器的测量值占比进行计算以得到融合数值。孙雷等<sup>[7]</sup>在基于D-S证据理论基础之上,采用Jousselme距离对信息进行预处理,加入费雪信息对冲突数据进行博弈,最后的仿真结果证实了该方法的有效性。Martins等<sup>[8]</sup>以OPC UA为各种系统之间的高级通信,将各种机器接口结合在一个系统上,最终证明该方法能够为生产管理提供监控和改进整个制造过程所需的信息。熊伟杰等<sup>[9]</sup>在制造车

间中结合物联采集和OPC UA通信技术,并实现了一种数字孪生车间实时数据融合方法。胡飞等<sup>[10]</sup>研究了基于OPC UA的数控机床信息建模及通信方案,结果表明,该方法能够对数控系统进行标准化通信,对机床设备的互联互通具有一定借鉴价值。孙玉成等<sup>[11]</sup>将OPC UA应用于面向数字孪生车间构建的数据融合和高效有序传输,实现了信息模型和虚拟模型统一。

上述数据融合方法取得了良好的融合效果,但其计算复杂度较高,不适合在边缘环境下进行准确的数据融合。另外,车间数据传输协议转换缺少可视化配置手段,开发新的OPC UA服务器需要重新编写代码,过程较为繁琐。因此,本文建立了基于物联网的数字化制造车间数据实时采集框架,提出一种边缘环境下制造车间数据实时融合方法,计算测量数值间的互支持度,并结合改进的证据理论完成测量数据的融合处理,降低设备端数据上传量,在此基础上,构建协议转换所需配置信息的层次结构模型,完成车间设备传输协议的统一,充分利用边缘端的计算资源,实现车间数据的有效融合与互联互通。

## 1 边缘环境下制造车间数据实时采集体系框架

为充分利用车间边缘计算资源,有效去除冗余数据,统一车间数据传输协议,本文提出了一种边缘环境下制造车间数据实时采集体系架构,如图1

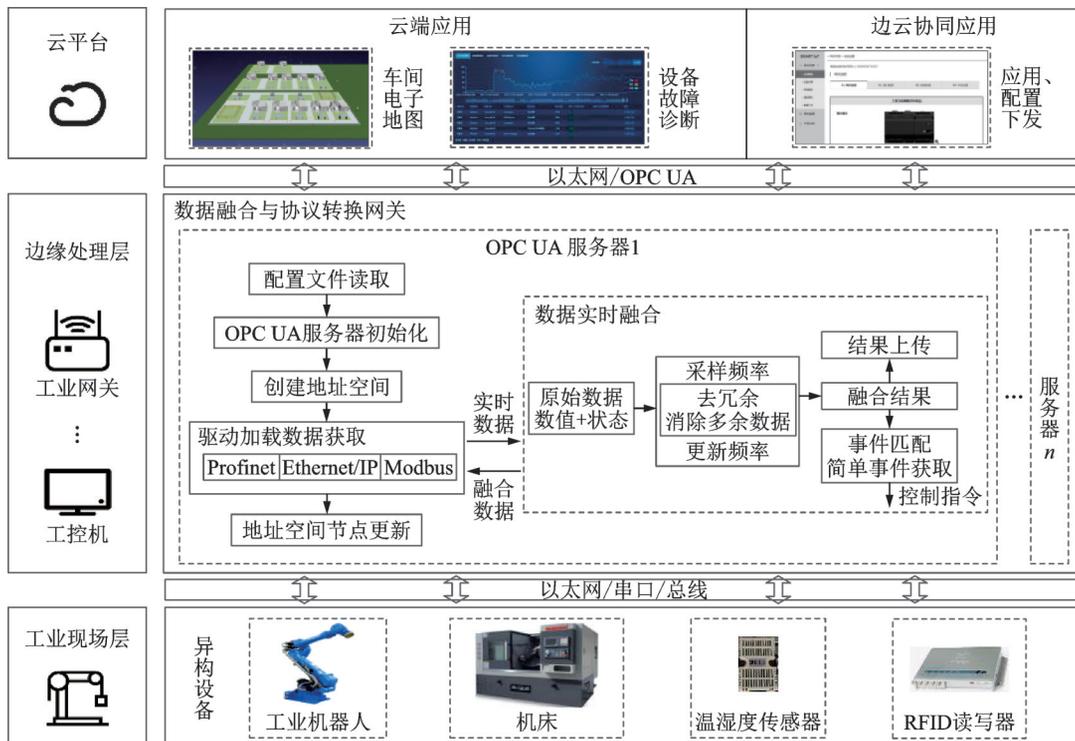


图1 边缘环境下制造车间数据实时采集体系架构

Fig.1 Architecture of real-time collection system for manufacturing workshop data in edge environment

所示。该体系架构包括工业现场层、边缘处理层以及云平台3部分。工业现场层主要是由各类工业设备组成。边缘处理层是核心,主要功能包括数据实时融合与协议转换,经过实时融合后的数据进行协议转换。其中,数据实时融合功能主要对工业现场层采集到的数据进行预处理,去除原始数据中的冗余信息,实现数据质量的提升与体量的下降。此外,系统采样频率的选择会直接影响到数据的相互支撑和异常值的判断与处理,在研究数据之间相互支撑及异常值的筛选问题时,需要充分考虑系统采样频率对数据质量和系统性能的影响。选择合适的采样频率,结合适当的数据处理算法,能够更好地实现对数据的相互支撑关系的理解和异常值的有效筛选。协议转换主要针对车间各设备的私有协议,在边缘计算资源上为每一类设备配置一个协议转换器,通过所提出的配置信息层次结构模型完成私有协议到OPC UA协议的转换,为云端应用提供统一数据接口和语义信息。云端由诸如车间电子地图、设备故障诊断以及边云协同等系统模块组成,一方面利用采集的数据完成车间实时监控;另一方面构建基于KubeEdge的云边协同环境完成相关应用和配置文件的下发。

## 2 数字化车间设备运行数据实时融合

在设备运行数据的采集过程中,若采样频率过低,则无法实现设备运行状态的实时监控;若采样频率过高,则采集到的设备运行数据之间冗余性较强。在数据采集过程中,主张使用异步处理的方式进行数据采集,这样就允许不同设备的采样频率区间不同。本节针对OPC UA节点数据更新周期内采集到的设备运行数据进行融合处理,提升测量数据精度并减少数据体量。

### 2.1 测量数据预处理

#### 2.1.1 一致性检测

受到车间现场的突发干扰以及传感器自身故障的影响,测量数据容易产生误差。因此,需要将影响数据一致性的误差数据提前剔除。

假设某个待采集数据项在某段时间间隔内获取到 $P$ 个测量值,测量值从小到大排列可得数据列 $M_i(i=1,2,\dots,p)$ ,则称 $M_1$ 为测量列下极限, $M_p$ 为测量列上极限,数据列的中位数 $C_m$ 的计算公式为

$$C_m = \begin{cases} \frac{M_{0.5p} + M_{0.5p+1}}{2} & p \text{ 为偶数} \\ M_{0.5p+1} & p \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (1)$$

数据列的上分布数 $C_U$ 为区间 $[C_m, C_p]$ 的中位

数,下分布数 $C_L$ 为区间 $[C_1, C_m]$ 的中位数,分布数离散度 $C_d$ 的计算公式为

$$C_d = C_U - C_L \quad (2)$$

式中: $C_U$ 为数据列的上分布数 $C_U$ 的实际取值; $C_L$ 为下分布数 $C_L$ 的实际取值。

**定义1** 无效数据的判别依据。将 $M_i$ 中与中位数 $C_m$ 的距离大于 $C_d$ 的数据判别为误差数据,判别依据为

$$|M_i - C_m| > \beta C_d \quad (3)$$

式中 $\beta$ 为常数,可以根据实际需求而定,通常取1.0、2.0等值。

#### 2.1.2 归一化处理

由于不同待采集数据项的数值的大小差异较大,为了消除数值之间量纲的影响,需要对数据进行归一化处理,将待处理的数据限定一定的范围内。

假设经过一致性检验的数据列为 $q_i(i=1,2,\dots,m)$ ,数据列中的最大值为 $q_{\max}$ ,最小值为 $q_{\min}$ ,数据列归一化处理的计算公式为

$$q_i = \frac{q_i - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \quad (4)$$

### 2.2 基于测量数值间互支持度的概率分配

#### 2.2.1 测量数值间互支持度定义

经过数据一致性检验以及归一化处理后,假设第 $i$ 个传感器的测量数据为 $D_i(i=1,2,\dots,m)$ 。采用证据理论,将测量数据 $D_i$ 作为识别框架 $\Theta$ 的识别目标。

**定义2** 测量值与识别目标的相似度。对于识别框架 $\Theta$ 中的识别目标 $D_i$ ,第 $j$ 个传感器的测量值与该识别目标的相似度为 $s_{ij}$ ,计算公式为

$$s_{ij} = e^{-(D_i - D_j)^2} \quad (5)$$

式中: $D_i$ 和 $D_j$ 分别为第 $i$ 个与第 $j$ 个传感器的测量数值。 $s_{ij}$ 的数值越接近1,说明第 $j$ 个传感器的测量数值越接近识别目标,即两者的相似度比较高。由 $s_{ij}$ 可以得到一个相似度矩阵 $S$ 表示各传感器数值对于各识别目标的相似程度为

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

若两个传感器数值对于同一识别目标的相似度都较高,则说明两个传感器数值相互支持。因此可以通过各传感器数值对各识别目标的相似度向量的距离来衡量传感器数值间的互支持度。设向量 $v_i(i=1,2,\dots,m)$ 为 $S$ 的第 $i$ 行,即 $v_i$ 为第 $i$ 个传感器数值对于所有识别目标的相似度向量。

**定义 3** 两个传感器间的互支持度。向量的欧式距离  $d_{ij}$  表示第  $i$  个传感器数值与第  $j$  个传感器数值之间的互支持度,计算公式为

$$d_{ij} = |v_i - v_j| = \sqrt{\sum_{n=1}^m (s_{in} - s_{jn})^2} \quad (7)$$

$d_{ij}$  越大,则第  $i$  个传感器与第  $j$  个传感器的互支持度越低;反之,两者的互支持度越高。

**定义 4** 传感器与其他所有传感器的互支持度。向量的欧式距离的均方根平均值  $a_i$  表示第  $i$  个传感器与其他所有传感器的互支持度,  $a_i$  越小,表明传感器间差异性越小,互支持度越高。其计算公式为

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m d_{ij}^2} \quad (8)$$

### 2.2.2 概率分配计算

互支持度越高的传感器数值获取越高的概率分配数值,由此获得一组互支持度系数,记为

$$\omega_{ij} = \frac{D_i}{D_j} \quad (9)$$

通过互支持度系数对各识别目标的相似度矩阵进行归一化加权修正即可得到概率分配计算公式,记为

$$\begin{cases} m_i(D_j) = \omega_{ij} s_{ij} / \sum_{l=1}^m \omega_{il} s_{il} \\ \sum_{j=1}^m m_i(D_j) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $m_i(D_j)$  表示  $D_j$  的第  $i$  个证据的概率分配值,并且  $D_j$  所有概率分配值之和为 1。

### 2.3 基于改进证据组合的测量数值融合

设  $M_1$  和  $M_2$  为两个概率分配函数,应用传统的 Dempster-Shafer (D-S) 证据理论可完成证据组合,计算公式为

$$\begin{cases} M(\phi) = 0 \\ M(A) = K^{-1} \sum_{x \cap y = \phi} M_1(x) M_2(y) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $K = 1 - \sum_{x \cap y = \phi} M_1(x) M_2(y)$  为冲突系数,反映证据的冲突程度。

本节给出的概率分配公式极易生成高冲突证据,为解决高冲突证据在证据组合中产生的影响,可将支持证据冲突的概率按照概率分配的平均值所占的比例进行分配,改进后的证据组合计算公式为

$$m(D_i) = \prod_{l=1}^m m_l(D_i) + f \bar{m}_l(D_i) \quad (12)$$

式中  $f$  为冲突因子,计算公式为

$$f = 1 - \sum_{i=1}^m \prod_{l=1}^m m_l(D_i) \quad (13)$$

式中  $\bar{m}_l(D_i)$  为  $D_i$  所有证据的概率分配平均值,其计算公式为

$$\bar{m}_l(D_i) = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m m_l(D_i) \quad (14)$$

在获得  $m(D_i)$  的基础上,对传感器数据进行融合,融合结果的计算公式为

$$D = \sum_{i=1}^m D_i m(D_i) \quad (15)$$

## 3 基于 OPC UA 的数字化车间制造数据传输

设备间的互联互通有助于不同系统的紧密集成,而在实际车间中,不同类型的设备往往会使用不同厂商的产品,具有不同的传输协议,从而在不同设备间形成“信息孤岛”。为解决上述问题,本节提出协议转换所需配置信息的层级结构模型,完成配置信息与信息模型的映射,实现传输协议和语义的统一。

### 3.1 基于 OPC UA 的车间设备信息建模

制造车间设备众多,为进一步分析协议转换所需配置信息与设备信息模型之间的映射关系,应当首先分析 OPC UA 信息建模的流程。

OPC UA 信息建模使用面向对象技术由地址空间展示物体逻辑、物理层次上的组成,OPC UA 客户端通过地址空间来访问服务器提供的数据和信息<sup>[12]</sup>。其中,地址空间是由节点以及节点之间的引用构成的一种网状结构。节点是地址空间中最基础的概念,OPC UA 中共存在 8 种节点类型,即对象、对象类型、变量、变量类型、数据类型、应用类型、方法和视图。

综上所述,基于 OPC UA 的车间设备信息建模在软件实现层面上就是根据设备的物理、逻辑组成完成地址空间中对象、变量节点生成与挂载。

### 3.2 基于 OPC UA 的协议转换方法

为实现车间设备私有协议到 OPC UA 协议的转换,提出一种可视化配置的车间设备协议转换方法,该方法具有直观的图形用户界面,用户无需深入了解复杂的协议细节,降低了技术门槛,同时,提供了实时反馈和调试功能,降低了人为错误的可能性,提高了系统的可靠性。该方法流程如图 2 所示。

首先,初始化 OPC UA 服务器,指定服务器名称、端口号、公共秘钥等;其次,构建配置信息层次

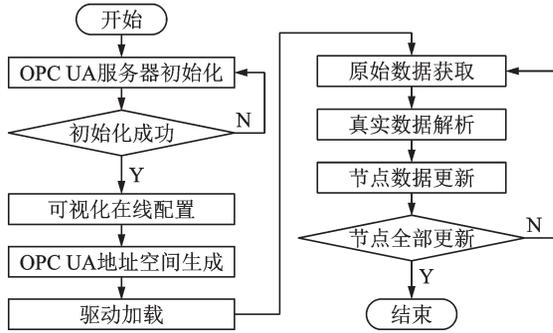


图2 协议转换方法流程

Fig.2 Flowchart of protocol conversion method

结构模型完成配置信息的输入;然后,通过配置信息生成 OPC UA 服务器地址空间节点,形成 OPC UA 地址空间层次结构;最后,以定时循环的形式实现设备原始数据的获取、解析以及节点数值的更新。

### (1) 配置信息层次结构模型

信息建模是 OPC UA 除数据传输之外提供的另一个重要功能,为实现协议转换过程中设备信息模型的构建,结合 OPC UA 信息模型规范,提出配置信息的层次结构模型,形式化描述为

$$Eq = \{Ob_i, Sd_i, Pr_i, Me_i\} \quad (16)$$

式中: $i$  为人为定义的标号; $Eq$  表示车间中的某设备所需的配置信息; $Ob_i$  表示该设备中包括的不同部件对象的集合,例如工业机器人包括机械臂和机械手对象; $Sd_i$  表示静态数据的集合,包括设备的编号、信号、工程单位等; $Pr_i$  表示数据采集的协议组集合,包括 Profinet、ModBus 等; $Me_i$  表示设备控制方法的集合,例如描述机器人、PLC 等设备的控制方法。

$Ob_i$ 、 $Pr_i$ 、 $Me_i$  的形式化描述为

$$Ob_i = \{Sd_i, Pr_i, Me_i\} \quad (17)$$

$$Pr_i = \{Dd_i\} \quad (18)$$

$$Me_i = \{Pg_i\} \quad (19)$$

式中: $Dd_i$  表示需要使用设备驱动获取的动态数据的集合,例如机床主轴转速、扭矩等; $Pg_i$  表示控制程序的集合。下面以上节所构建的工业机器人的 OPC UA 信息模型为例说明本章提出的配置信息层次结构模型。

由图3可知,工业机器人  $Ob_i$  集合包括机械手和机械臂; $Sd_i$  静态集合包括编号、型号以及所处位置; $Me_i$  集合包括控制方法。机械手对象  $Pr_i$  集合包括 Profinet 协议组且该协议组  $Dd_i$  集合包括转速、扭矩、角度和精度数据项;机械臂对  $Pr_i$  集合包括 ModBus 协议组且该协议组  $Dd_i$  集合包括标号、转速、负载、坐标以及角度数据项。在填写配置信息

时, $Ob_i$ 、 $Sd_i$  以及  $Me_i$  集合直接以键值对的形式输入; $Pr_i$  集合需要填写加载私有协议驱动所必须的信息,如 IP、端口号等; $Dd_i$  集合需要填写设备驱动获取原始数据必须的信息,如起始地址、数据长度、数据名和数据类型等。

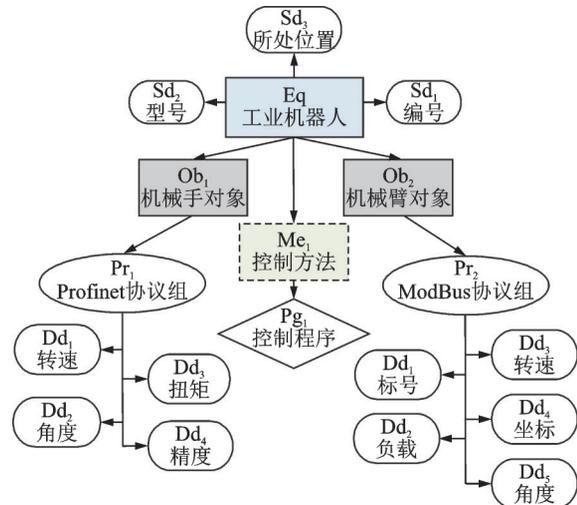


图3 工业机器人配置信息层次结构模型

Fig.3 Hierarchical model of configuration information for industrial robots

最后,使用 XML 保存相关配置信息,工业机器人 XML 文件的部分内容如下所示

```
<content name="Industrial robot" id="0001">
  <staticdata id="1" name="所处位置">工位 1</staticdata>
  ...
  <object id="1" name="机械手对象">
    <protocol name="Profinet">
      <dynamicdata name="转速">
        <initaddress>7</initaddress>
        ...
      </dynamicdata>
      ...
    </protocol>
  </object>
  <method id="1">数控</method>
</content>
```

### (2) 地址空间构建

配置信息层次结构模型包含设备的静态描述信息、驱动加载信息以及数据项之间的层次信息,可用于 OPC UA 地址空间的创建。配置信息结构模型中的  $Eq_i$  和  $Ob_i$  集合对应 OPC UA 地址空间中的 ObjectNode 节点, $Sd_i$ 、 $Dd_i$  和  $Me_i$  集合内容对应 VariableNode 节点,层次信息对应节点间的层级关系。因此,解析上述信息即可生成对应节点以及引用,完成 OPCUA 地址空间的创建。

### 4 方法实现与验证

为了验证本文提出方法的有效性,本文分别进行了设备运行数据实时融合及边缘环境下数据融合与多协议转换网关方法验证。设计验证的思路如图 4 所示。设备运行数据实时融合主要采用参考文献[6]中的数据验证,并分别从算法角度对比分析了方法的时效性和准确性;边缘环境下数据融合与多协议转换网关实验则通过某航天制造车间总线控制台为验证对象,构建协议转换所需配置的信息层次结构模型,以可视化配置的形式完成协议转换,为车间数据提供统一的传输接口,验证了所提方法的有效性。

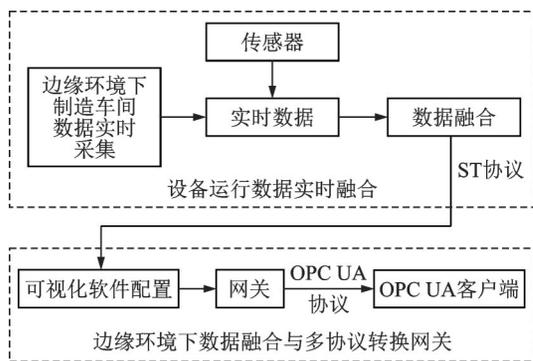


图 4 设计验证思路图  
Fig.4 Design verification

#### 4.1 设备运行数据实时融合

为验证所提出的数字化车间设备运行数据实时融合方法的有效性,使用文献[7]中某抽检样品的金属化涂层厚度数据进行实验对比。本次样品的参考厚度为 65.57 μm,其中 8 个测量数据如表 1 所示。

表 1 某次测量的 8 个金属化涂层厚度数据

Table 1 Thickness data of eight metallized coatings measured in a certain measurement μm

编号	测量值	编号	测量值
1	65.41	5	66.45
2	65.76	6	65.73
3	65.31	7	65.81
4	65.35	8	65.51

首先,对数据的一致性进行检测。经过计算可知,四分位数离散度  $D_d$  数值为 0.35,选取式(3)中  $\beta$  值为 1.0,计算后可知 5 号测量值为影响数据一致性的误差值,应提前剔除。其次,对剩余 7 个测量值进行归一化,计算后的数据列为  $q=[0.2,0.9,0,0.08,0.84,1,0.4]$ 。接着将归一化操作后的测量值作为证据理论中的识别框架,由式(5)可以得到各传感器数值对于识别目标的相似度矩阵  $S$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.6125 & \dots & 0.7788 \\ 0.6125 & 1 & \dots & 0.9394 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.9608 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

用  $A$  表示  $a_i$  组成的向量,由式(7)和式(8)计算可得  $A=[0.140\ 3,0.126\ 1,0.0973,0.106\ 2,0.103\ 3,0.188\ 6,0.170\ 8]$ 。由式(9)可得 1 组基于 1 号数值的互支持度系数  $\{w_i\}=\{1,0.899\ 6,0.693\ 4,0.757\ 3,0.736\ 0,1.344\ 7,1.217\ 4\}$ ,通过式(10)计算可得每个传感器测量值的概率分配数值,生成的证据  $e_i$  以及最后的组合证据  $E$  如表 2 所示。最后通过式(12~15)计算可得本次数据融合的最终结果  $D=65.569\ 3\ \mu\text{m}$ 。经过测试,本算法的运行时间小于 1 ms,能够满足边缘环境下制造车间数据实时融合的要求时间。

表 2 概率分配值与组合证据  $E$

Table 2 Probability allocation values and combination evidence  $E$

证据	概率分配值						
	$m(D_1)$	$m(D_2)$	$m(D_3)$	$m(D_4)$	$m(D_5)$	$m(D_6)$	$m(D_7)$
$e_1$	0.187 6	0.103 3	0.125 0	0.140 0	0.091 7	0.133 0	0.219 4
$e_2$	0.117 4	0.172 3	0.059 1	0.074 0	0.140 5	0.255 0	0.181 6
$e_3$	0.204 3	0.085 1	0.147 5	0.160 0	0.773 1	0.105 2	0.220 6
$e_4$	0.198 0	0.092 2	0.138 4	0.152 0	0.083 0	0.115 8	0.220 7
$e_5$	0.123 5	0.166 6	0.063 7	0.079 0	0.136 9	0.243 7	0.186 6
$e_6$	0.107 4	0.181 4	0.052 0	0.066 2	0.146 2	0.273 9	0.173 0
$e_7$	0.168 6	0.122 9	0.103 7	0.120 0	0.106 5	0.164 6	0.213 7
$E$	0.158 1	0.132 0	0.098 5	0.113 0	0.111 7	0.184 5	0.202 2

为进一步验证融合数据的准确度,表 3 列出了各类融合方法的对比结果。从表中可以看出,本文所提方法在绝对误差和相对误差上具有明显优势,能够有效降低测量误差,使得融合后的车间数据具有更高精度,证明了所提方法的有效性。

表 3 各类算法结果对比

Table 3 Comparison of results of different algorithms

对比项	融合算法		
	本文算法	算术平均	文献[7]算法
最终结果/μm	65.569 3	65.666 3	65.564 5
绝对误差/μm	0.000 70	0.009 63	0.005 50
相对误差/%	0.001 06	0.146 90	0.008 40

#### 4.2 边缘环境下数据融合与多协议转换网关

以某航天车间总线控制台(图 5)为验证对象,开发一个包含数据融合和协议转换的应用软件,证明所提数据融合和协议转换方法在边缘环境下的可行性。

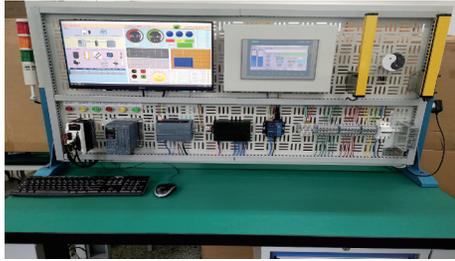


图5 总线实验台

Fig.5 Bus test bench

整个总线实验台包括工控机、PLC、电机和温度传感器等,平台各设备之间通过不同的协议进行通讯,如MODBUS-TCP、西门子S7等。将总线实验台上的电机以及温度传感器作为车间中待采集的各类生产过程数据,工控机作为边缘计算资源进行实验。

在工控机上运行协议转换器,根据配置信息层次结构模型,完成两个对象的配置信息的填写,具体所需的信息如图6所示。



图6 配置信息

Fig.6 Configuration information

通过配置信息的填写展示 OPC UA 服务器的地址空间,点击“监控”按钮,填写采样频率与更新频率,点击“确定”按钮,即可实现测量数值的实时融合与协议转换后的地址空间节点数值实时更新,如图7、8所示。



图7 频率设置

Fig.7 Frequency setting

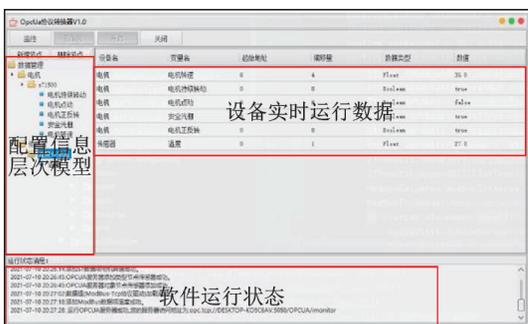


图8 OPC UA 协议转换器

Fig.8 OPC UA protocol converter

为了验证 OPC UA 的协议转换的正确性,借助 OPC UA 客户端软件连接协议转换器所生成的 OPC UA 服务器,如图9所示。从图中可以看出, OPC UA 服务器中所挂载的对象、变量节点的层次结构与图8中设置的配置信息层级结构一一对应,且节点数值随着所设置的更新频率及时刷新,证明了所提出的 OPC UA 协议转换方法能够实现多传输协议的统一转换。在实际应用过程中,将实时数据输入 OPC UA 协议转换器,降低了数据传输量,为上层数据应用提供了统一的数据传输接口,提高了制造车间数据传输效率和制造车间的实时监控水平。

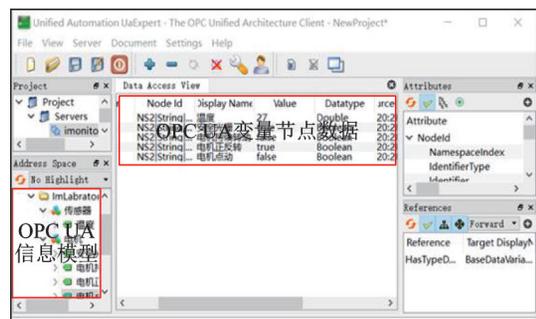


图9 OPC UA 客户端

Fig.9 OPC UA client

### 5 结 论

本文提出一种边缘环境下数字化车间制造数据实时融合和协议转换方法,主要贡献如下:基于边缘计算的思想,构建了制造车间数据实时采集体系架构。针对车间设备运行数据,基于数值间互支持度和证据理论完成数据实时融合,有融合精度高、计算便利的优点。本文提出了一种适合边缘环境的协议转换方法,实现车间数据传输协议的统一。通过实例应用验证了上述方法在边缘环境下的可用性。后续研究可以考虑通过可配置的方式完成 OPC UA 地址空间中方法节点的生成。此外,边缘环境下数据传输过程中的安全性问题也是亟需解决的一大难题。

### 参考文献:

[1] 周济. 工业强基推进产业基础高级化为制造强国奠定坚实基础[J]. 中国工业和信息化, 2022(8): 26-31.  
 ZHOU Ji. Strengthening the industrial foundation, advancing the advanced development of industrial foundations, and laying a solid foundation for building a strong manufacturing country[J]. China Industry and Information Technology, 2022(8): 26-31.

[2] 黄少华, 郭宇, 查珊珊, 等. 离散车间制造物联网及其关键技术研究与应用综述[J]. 计算机集成制造系

- 统, 2019, 25(2): 284-302.
- HUANG Shaohua, GUO Yu, ZHA Shanshan, et al. Review on internet-of-manufacturing-things and key technologies for discrete workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(2): 284-302.
- [3] 曹雪蕊, 张学艺, 彭开香, 等. 基于数字孪生的小卫星健康预测技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S1): 35-42.
- CAO Xuerui, ZHANG Xueyi, PENG Kaixiang, et al. Small satellite health prediction based on digital twin[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S1): 35-42.
- [4] ZHANG Y, XIONG A, XIAO Y, et al. A new combination method based on Pearson coefficient and information entropy for multi-sensor data fusion[J]. Information and Software Technology, 2023, 161: 107248.
- [5] 刘雪莹, 江相伟, 吴一庆, 等. 电力设备多源信息融合的健康状态监测技术分析与研究[J]. 仪表技术, 2024(1): 57-60.
- LIU Xueying, JIANG Xiangwei, WU Yiqing, et al. Analysis and research on health monitoring technology for multi-source information fusion of power equipment [J]. Instrumentation Technology, 2024(1): 57-60.
- [6] 璩晶磊, 李少波, 张成龙. 基于模糊证据理论的多传感器数据融合算法[J]. 仪表技术与传感器, 2017, 10: 118-122.
- QU Jinglei, LI Shaobo, ZHANG Chenglong. Multi-sensor data fusion algorithm based on fuzzy evidence theory[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017, 10: 118-122.
- [7] 孙雷, 吴庆宪, 王玉惠, 等. 基于改进 D-S 证据理论的多源空战信息博弈融合方法[J]. 信息与控制, 2022, 51(5): 566-572.
- SUN Lei, WU Qingxian, WANG Yuhui, et al. Air combat information game fusion method based on improved D-S evidence theory[J]. Information and Control, 2022, 51(5): 566-572.
- [8] MARTINS A, LUCAS J, COSTELHA H, et al. CNC machines integration in smart factories using OPC UA[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 34: 100482.
- [9] 熊伟杰, 郭宇, 黄少华, 等. 基于 OPC UA 的数字孪生车间实时数据融合与建模研究[J]. 机械设计与制造, 2022(7): 143-148.
- XIONG Weijie, GUO Yu, HUANG Shaohua, et al. Research on real-time data fusion and modeling of digital twin workshop based on OPC UA[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(7): 143-148.
- [10] 胡飞, 胥云, 廖映华, 等. 基于 OPC UA 的数控机床信息建模与通信研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(20): 53-58.
- HU Fei, XU Yun, LIAO Yinghua, et al. Research on information modeling and communication of CNC machine tool based on OPC UA[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(20): 53-58.
- [11] 孙玉成, 宋家焯, 王健, 等. 面向生产过程的智能车间数字孪生建模及应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 481-488.
- SUN Yucheng, SONG Jiaye, WANG Jian, et al. Modeling and application of digital twin for production process in intelligent workshop[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 481-488.
- [12] 张韬, 刘康, 廖映华. 基于 EtherCAT 协议的 FMS 多设备实时数据采集技术[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 112-116.
- ZHANG Tao, LIU Kang, LIAO Yinghua. Multi devices real-time data acquisition technology of FMS based on EtherCAT protocol[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(1): 112-116.

(编辑:孙静)