

基于数字孪生的产线设备实时监控方法与实现

罗锦泽, 孟祥印, 郭学理, 谢鑫鑫, 彭志成

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 为推动国家智能制造发展, 面向生产过程中设备实时监控困难、透明性差、管控效率低、跨学科交叉情况复杂等问题, 融合 MBSE 思想, 提出一种基于数字孪生的产线设备监控方法并实现; 首先, 提出基于数字孪生的监控方法架构; 基于 SysML 建模语言对产线系统和设备进行统一描述建模, 建立结构图和行为图, 形成数据模型; 通过 SysML 模型与 OPC UA 联合, 以位移数据和任务数据双通道驱动的方式进行虚实映射, 并建立异常报警追溯机制; 以仓储系统中核心设备堆垛机为例, 构建其 SysML 模型、数字孪生模型, 并以仓储产线实时缓存数据库 redis 为数据源, 通过 OPC UA 获取并实时更新数据驱动数字孪生模型, 实现其三维可视化监控, 验证了方法的可行性和实时性。

关键词: 智能制造; 数字孪生; 监控; SysML; 数据模型; OPC UA

Real-time Monitoring Method and Implementation of Production Line Equipment Based on Digital Twins

LUO Jinze, MENG Xiangyin, GUO Xueli, XIE Xinxin, PENG Zhicheng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to promote the development of national intelligent manufacturing, facing the difficulties of real-time monitoring, poor transparency, low efficiency of management and control of equipment in the production process, and complex cross-disciplinary situation, a production line equipment monitoring method based on digital twins is proposed by integrating model-based systems engineering (MBSE) ideas. Firstly, a monitoring architecture of the method based on digital twins is proposed; Based on SysML modeling language, the production line system and equipment are uniformly described and modeled, and the structure diagram and behavior diagram are established to form a data model; Through the combination of SysML model and OPC UA, the virtual and real mapping is carried out in the way of dual-channel driving of displacement and task data, and the abnormal alarm tracing mechanism is established; Taking the stacker, the core equipment in the storage system, as an example, its SysML model and digital twin model are constructed, and the real-time cache database redis of the storage production line is used as a data source. The data-driven digital twin model is obtained and updated in real time through the OPC UA to realize its three-dimensional visual monitoring, which verifies the feasibility and timeliness of the method.

Keywords: intelligent manufacturing; digital twins; monitoring; SysML; OPC UA

0 引言

制造业是实体经济的主体, 是国家经济命脉所系。制造业的发达程度表现了一个国家的先进程度。近年来, 物联网^[1]、云计算^[2]、大数据^[3]等技术的发展推动了制造业的变革, 制造模式由自动化生产逐渐向智能制造发展。为支持智能制造的发展, 美国于 2012 年提出先进制造伙伴计划 AMP (advanced manufacturing partnership), 德国于 2013 年提出工业 4.0 概念, 中国国务院于 2015 年正式提出《中国制造 2025》, 旨在推动国家制造业转型, 提升国家硬实力。

数字孪生^[4]是以数字化的方式在数字世界中创造物理

实体的虚拟模型, 并由数据驱动模拟仿真物理实体在现实环境中的行为、状态, 并通过数据分析、虚实交互等方式为物理实体拓展新的功能。数字孪生概念最早由美国密歇根大学的 Grieves 教授在 2003 年提出, 其最早使用可追溯到美国国家航空局的阿波罗项目^[5]。数字孪生在生产制造全生命周期中发挥着重要作用, 许多学者进行了数字孪生技术的探索, 陶飞等^[6]等提出了 L0~L5 六个等级的数字孪生成熟度模型, 庄存波等人提出产品数字孪生体的构建体系^[7], 韩文婷等^[8]对数字孪生在火箭控制系统的运维中的应用作出总数, 并有学者将数字孪生技术应用于车间生产调度^[9]、车间装备智能控制^[10]、故障预测与健康^[11]、车间系统仿真加速^[12]等方面。事实证明, 数字孪生技术提供

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-03-09。

基金项目: 国家重点研发计划重大专项项目(2020YFB1712200); 四川省科技厅重大专项项目(2022ZDZX0002)。

作者简介: 罗锦泽(1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 孟祥印(1979-), 男, 博士研究生, 副教授。

引用格式: 罗锦泽, 孟祥印, 郭学理, 等. 基于数字孪生的产线设备实时监控方法与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 212-220.

了更高效、智能的服务^[13]。

在监控应用中, 目前生产系统的可视化管控主要是以数据统计和状态参数监控为主的二维可视化管控^[14-15], 融合数字孪生技术可以使其管控能力进一步提升, 实现三维可视化管控, 提高监控的真实度和透明度。吴鹏兴等^[16]通过 AutomationML 与 OPC UA 进行数据建模与传输, 建立车间逻辑模型实现了事件驱动的离散制造车间实时监控, 但事件驱动相较于运行数据驱动更侧重于产线整体的把控, 而对设备单元本身的运动有所忽视; 杜莹莹^[17]等提出一种基于数字孪生模型的工业机器人三维可视化监控系统; 张南^[18]等通过研究数字孪生关键技术建立了自主的实时数据驱动的数字孪生监控系统; 张入元等^[19]通过构建复杂产品数据模型和虚实映射方法实现了总装对接的数字孪生监控。

综上所述, 在监控应用中实现数字孪生技术的关键在于模型构建, 包括与实体对应的三维模型、数据模型和行为规则模型, 构建模型的方法多种多样, 有 AutomationML、Petri 网、OWL 等。目前产线设备监控与数字孪生技术在其中的应用仍存在以下问题: 1) 设备监控仍以二维监控为主, 设备实时监控困难、透明化程度和管控效率较低。2) 设备繁多, 标准设备和非标设备混杂, 数字孪生模型库需要不断更新完善。3) 涉及到机械、电气、计算机等多学科交叉融合, 不同专业背景人员交流过程效率低。4) 数字孪生技术在监控中的应用处于初步阶段, 具体实施案例较少。因此, 本文融合 MBSE 思想, 提出一种基于数字孪生的产线设备监控方法, 设计其体系架构并进行相关技术研究并进行实验验证, 验证了方法的可行性。

1 基于数字孪生的监控方法架构

数字孪生模型通过与物理实体设备的数据连接和集成实现虚实数据交互, 从而达到实时映射的目的。本文依据结合生产情况和数字孪生理论建立体系架构, 常规产线都布置有相应产线控制系统, 比如包括产线业务系统 MES (manufacturing execution system 制造执行系统)、WMS (warehouse management system 仓储管理系统)、WCS (warehouse control system) 等进行产线设备相关控制和生产任务下发, 因此将基于数字孪生的产线设备监控方法架构分为物理层、控制层、数据层、虚拟层、服务层。

1) 物理层: 物理层为底层硬件设施, 包括生产设备、物流设备、计算设备、检测设备等, 是整个体系架构中的基础和主要数据来源。

2) 控制层: 控制层为产线的直接生产控制系统, 包括 MES 系统控制任务下发、WCS 系统控制仓储相关设备等, 用于接收上层反馈指令, 并转化为控制指令直接控制设备。控制层也具备自己的数据库, 并直接通过总线、工业以太网等方式与物理层相连。

3) 数据层: 数据层为各层级间的连接通道, 上连数据服务层, 下连物理层, 通过 OPC UA 实现统一的信息模型进行数据传输, 在数据层搭建之前通过对整个产线系统的 SysML 建模统一描述完成产线与设备数据需求、数据源的

确立, 建立产线与设备数据模型和数学模型作为其后台数据存储、数据驱动的基础, 并以 SysML 模型导出的中间文件 XML 生成相应的 OPC UA 信息节点。其数据值通过 API 从控制层或物理层抽取。

4) 虚拟层: 虚拟层为实体设备在虚拟世界中的呈现, 包括几何模型、数据属性、行为属性等, 虚拟层中的数据属性与行为属性与通过 SysML 构建的数据模型和行为模型一一对应, 并通过相应逻辑模型建立动作脚本或数据点绑定进行任务驱动和数据直接驱动。

5) 服务层: 服务层为最上层的应用服务, 进行数据统计分析、WEB 前端呈现等服务。

监控方法架构如图 1 所示。

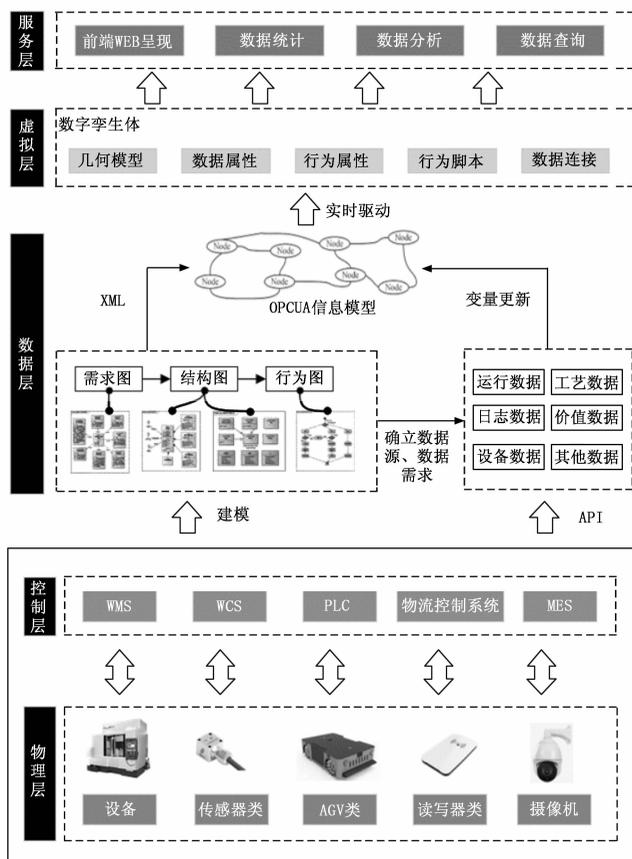


图 1 监控方法整体架构

2 产线与设备模型构建方法

2.1 MBSE 与 SysML 概述

MBSE 于 2007 年由国际系统工程协会提出其定义, 其是以模型驱动系统开发流程, 利用模型表达系统全生命周期中需求、设计、分析、验证和确认等过程。MBSE 方法是目前航天、军工领域对于复杂大系统开发最常用的方法^[20]。MBSE 具备完整的模型体系, 其建模核心要素在于三点: 方法、语言和工具。其中方法为 MBSE 模型构建的理论指导, 语言为 MBSE 模型构建的规范, 工具则是进行模型构建所使用的软件。相较于传统基于文档的设计方法, MBSE 的需求设计一致性、需求可追溯性和设计信息可重

复用性都有明显的优势^[21]。

SysML 语言是 MBSE (Model-Based systems engineering 基于模型的系统工程) 中的建模语言, 是基于 UML 语言衍变而成的更适用于系统工程的语言, 使用标准化的方式进行图形化模型的构建, 不仅适用于复杂系统的建模设计, 并且适合解决跨学科系统开发问题, 提高不同学科的专业人员之间的沟通效率。SysML 定义了九种基本图集, 包括需求图、内部模块图、参数图、模块定义图、活动图、用例图、序列图、状态机图、包图, 这九种基本图集可分为三大类: 结构图、需求图和行为图, SysML 图集关系如图 2 所示。

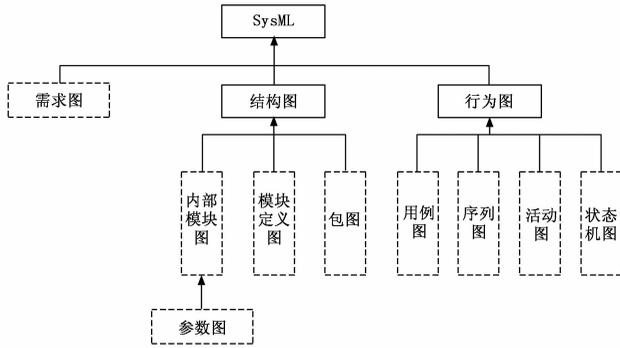


图 2 SysML 图集关系

2.2 基于 SysML 的产线设备数据模型和行为模型构建方法

通过 SysML 语言构建产线设备数据模型和行为模型, 描述产线与设备结构关系、数据属性和行为特征, 形成产线结构图、设备结构图、产线活动图、设备活动图和参数图。模型中的值属性定义可分为静态属性和动态属性两大类。

1) 结构图与参数图:

其中产线结构图为设备结构图的主体集合, 参数图为设备结构图的内部模块图, 用于定义其内值属性和对应物理量、单位。设备结构图为设备数据模型的主体, 通过将设备结构图视作五部分进行描述: 外部相关系统与设备、子系统、主体属性、行为属性和任务属性。设备可形式化表征为如下:

$$E_{q,i} = EB + EX + ET_i + ES_i + EP_i \quad (1)$$

$$EB = \{E_o, E_{Auto}, E_{Fal}, E_{Rt}, E_{Rst}\} \quad (2)$$

$$ET_i = \{ETid, E_{Tn}, E_{TT}, E_{Tp}\} \quad (3)$$

$$EX = \{Min_i, Mout_i\} \quad (4)$$

$$ES_i = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}, n \in R \quad (5)$$

其中: E_q 代表设备, 以设备编号作为唯一标识, E_B 指设备主体属性的集合, 包括设备静态属性 E_o , 设备运行模式 E_{Auto} , 设备故障代码 E_{Fal} , 设备运行时间 E_{Rt} 和设备运行状态 E_{Rst} 。其中设备静态属性 E_o 为一系列属性的集合, 包括设备型号、生产厂商、大小、设备类型等。

其中 ET_i 为代表其任务属性, 为其加工任务的集合, 包括任务编号 $ETid$, 任务数据 E_{Tn} , 任务时间约束 E_{TT} 和任务优先级 E_{Tp} 。其中任务数据为具体加工任

务中设备所需要的关键信息, 例如仓储中堆垛机所需执行的任务名称、搬运物料时的起始位置和目的位置等。

其中代表与设备相关的外部系统, 由物料输入 Min_i , 物料输出 $Mout_i$ 组成, 此二者可为人或设备或系统的集合, 以其 ID 作为标识。

其中: ES_i 代表设备子机构/系统的集合, 其中每个机构/系统都有对应的值属性 V 体现其具体运动特征或属性特征。

2) 行为图:

行为图代表产线和设备的行为特征, 表达了产线接收到生产任务时其内部各设备的运行流程关系, 以及设备接收到其对应任务时, 其内部各子系统的运行逻辑关系。将生产过程视作一个任务, 每个任务由若干工艺组成, 交由若干设备并行或串行进行; 每个工艺由若干工序组成, 每道工序由若干设备行为组成, 监控的最小颗粒度为设备的行为, 每个设备行为对应了若干的值属性数据, 这些数据表征并驱动了设备的行为, 其行为可形式化描述如下:

$$EP_i = \{Beh_1, Beh_2, \dots, Beh_n\} Beh \stackrel{1:1}{\Leftrightarrow} E, n \in R \quad (6)$$

其中 E_p 代表工序集, 即设备所能完成的工序, 每个工序对应若干个设备动作 Beh , 其中 $\stackrel{1:1}{\Leftrightarrow}$ 代表动作 Beh 与设备子机构/系统集合 E_i 一一对应, 最多 n 个子机构/系统则最多有 n 个动作, 工序由设备接收的任务分解而成。

由此, 可得整个设备的数据模型如图 3 所示。

3 双通道驱动的虚实映射方法

3.1 位移数据驱动的虚实映射

虚拟世界中的三维模型通过以坐标系为基准进行平移或旋转运动, 复杂动作由平移或旋转运动组合而成。坐标系包括世界坐标系和基坐标系, 虚拟世界中的每个运动特征都具备其基坐标系, 其运动参照基坐标系进行, 基坐标系有固定和随动两种设定方式。

三维模型的运动过程中, 其坐标向量的齐次坐标可表示为 $A = [x, y, z, 1]$, 位移矩阵 M 为一个四阶矩阵, 以 x_i, y_i, z_i 作为虚拟世界中三维模型运动后的坐标, $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$ 作为虚拟世界中三维模型运动前的坐标, 坐标变

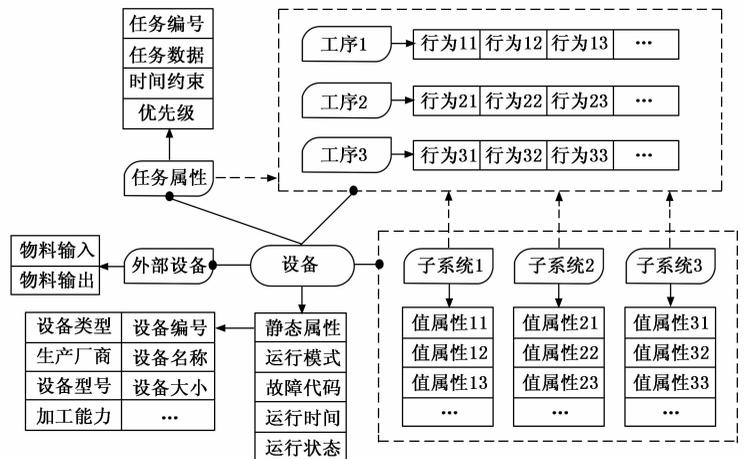


图 3 设备数据模型

化可表达为如下:

1) 平移变换 T :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta_x & \Delta_y & \Delta_z & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 代表坐标相对位移值。

2) 绕 x 轴旋转 R_x :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: θ 代表相对旋转角度。

3) 绕 y 轴旋转 R_y :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: θ 代表相对旋转角度。

4) 绕 z 轴旋转 R_z :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: θ 代表相对旋转角度。

根据虚拟世界中的三维模型变换公式可得知, 其中的模型底层由平移量和旋转角度驱动, 位移量和旋转角度的值可间接由速度、角速度与时间的转换来实现。坐标向量的变换过程是一个相对变换过程, 在虚拟世界中对每个运动特征都得确立对应的基坐标系, 同时定义行为层级关系可建立模型特征坐标点间关系, 产生随动效果。

本文以 OPC UA 作为虚拟层中的数字孪生体和物理实体中的交互通道, 由设备结构图形成的 XML 文档在 OPC UA 服务器中形成相应信息模型和变量节点, 并以设备结构图和行为图作为指导进行虚拟层三维模型的构建、确定数

据源、数据属性和行为属性。虚拟层作为 OPC UA 客户端, 连接服务器并将其数据属性与服务器中变量节点绑定, 通过循环读取服务器数据的方式进行。

3.2 任务数据驱动的虚实映射

对于车间而言, 存在部分设备不支持联网和数据采集, 对于此类设备的运行数据仅有设备启停以及车间控制系统内对其的任务安排, 其任务状态完成与否由人工上报的方式进行数据反馈。因此, 除数据直接驱动虚拟模型运行外, 还将以外部任务的下发为信号作为虚拟模型的输入触发虚拟模型行为脚本的方式进行驱动。设备所接受的任务序列如式 (3), 以“优先级-任务编号”的逻辑进行任务序列的排序, 任务可分解为设备的工序组, 以任务数据和任务时间约束作为行为脚本中的关键信息。

3.3 双通道驱动下的异常报警模式

任务驱动与数据直接驱动的双通道虚实映射方式可相互结合构成设备行为模式, 通过逻辑组合的方式进行异常报警和追溯。每个任务对应一种设备行为模式, 可形式化描述为一个 $m \times n$ 的状态矩阵 BM 如下:

$$BM = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, 行代表该任务下设备的工序 EP 执行与顺序, 列代表设备的所有行为 Beh , r_{ij} 代表工序 EP_i 中的行为 Beh_j , 其值反应了行为顺利发生的次数, 初始值为 0, 由此定义设备任务标准行为模式。根据设备虚实映射运行时的 BM 矩阵中 r_{ij} 的值根据实时数据而定, 工序由有序发生的动作事件经由并行或串行的方式组合, 有序的特性决定了当任务执行到工序 EP_i 行为 Beh_j 时其状态矩阵 $BM_{i,j}$ 的值唯一。当发生运动超限、运动未到位等报警情况时, 将实时 $BM_{i,j}$ 运行矩阵与定义中的标准任务模式矩阵 BM 对比可迅速定位设备执行过程中哪道工序的哪个行为的执行过程发生异常。以一个分解为三工序的任务, 交由存在 4 种行为, 也可理解为四自由度的设备进行加工为例, 报警异常追溯过程如图 4 所示。

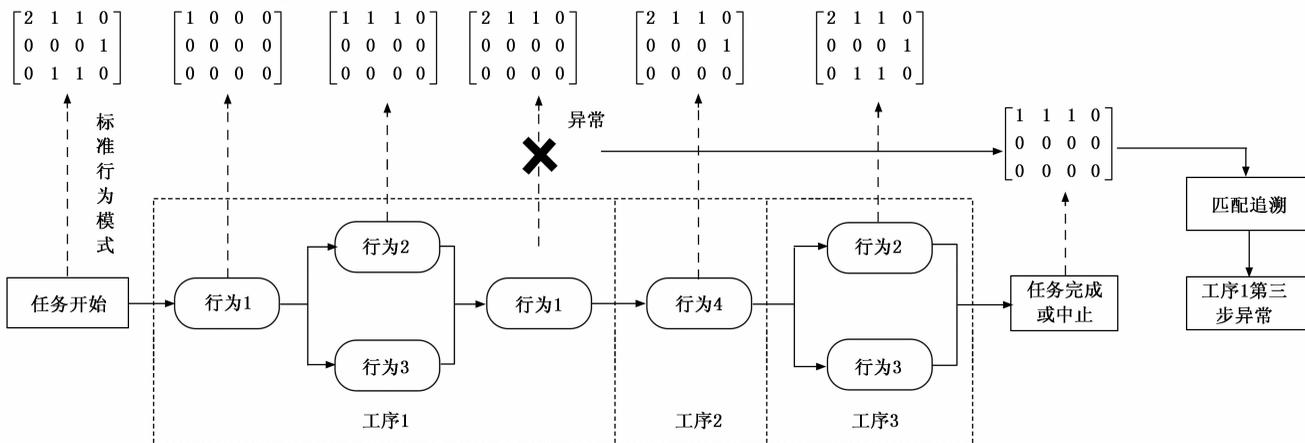


图 4 报警异常追溯

4 基于数字孪生的监控方法实现

本文以仓储系统核心设备堆垛机为例，以仓储系统作为产线系统，进行产线和设备建模，并在 Solidworks 中建立三维模型，导入 MIOT.VC 中建立相应虚拟模型，定义行为特征和数据驱动方式，通过 OPC UA 传输数据实现堆垛机的数字孪生监控。堆垛机主要可分为桥式堆垛机和巷道式堆垛机，本文所采用的堆垛机对象为单立柱巷道式堆垛机，实验室所用堆垛机如图 5 所示。



图 5 单立柱式堆垛机

4.1 仓储系统和堆垛机 SysML 模型

1) 结构图:

根据监控应用需求和智能仓储产线实际情况，建立了

仓储系统软硬件结构图以及其中关键设备堆垛机结构图。智能仓储产线相关软件设施有 MES、WMS/WCS、数据库 MySQL、实时数据缓存 redis、PLC 软件、前端 web 应用和三维仿真软件 MIOT.VC，由此确立了监控应用的数据来源于实时数据缓存 redis。智能仓储系统相关硬件设施有 AGV、入库台、堆垛机、货架、出库台和服务器。仓储系统结构图如图 6 所示。

对堆垛机进行结构特征分析，堆垛机的任务属性来自仓储管理和控制系统 WMS/WCS，堆垛机前后连接的其他设备为入库台、出库台和库位，其中与入库台和出库台都为单向的物料输入、输出关系，与库位为物料输入输出的双向关系。其主要包括一个电气控制系统和三大运动机构：水平行走机构、载货台抬升机构和货叉伸缩机构，分别对应于 X、Y、Z 轴的移动，每个运动机构所能完成的行为动作为平移，对每个运动过程的实时监测数据包括坐标、速度和加速度。同时，对堆垛机设备整体的监测包括运行时间、运行模式、运行状态、故障代码和任务完成状态。设备结构图如图 7 所示。

其中，将对应值属性分为 int, float, string, Boolean 四种数据类型，位移、运行时间、速度和加速度属性都为 float 类型，并定义速度单位 mm/s，位移单位 mm，加速度单位 mm/s²，时间单位 s。值类型定义如图 8 所示。

2) 行为图:

根据智能仓储产线运行流程构建系统活动图，仓储系统由 MES 开始下发任务，至 WMS/WCS 系统解析任务，任务

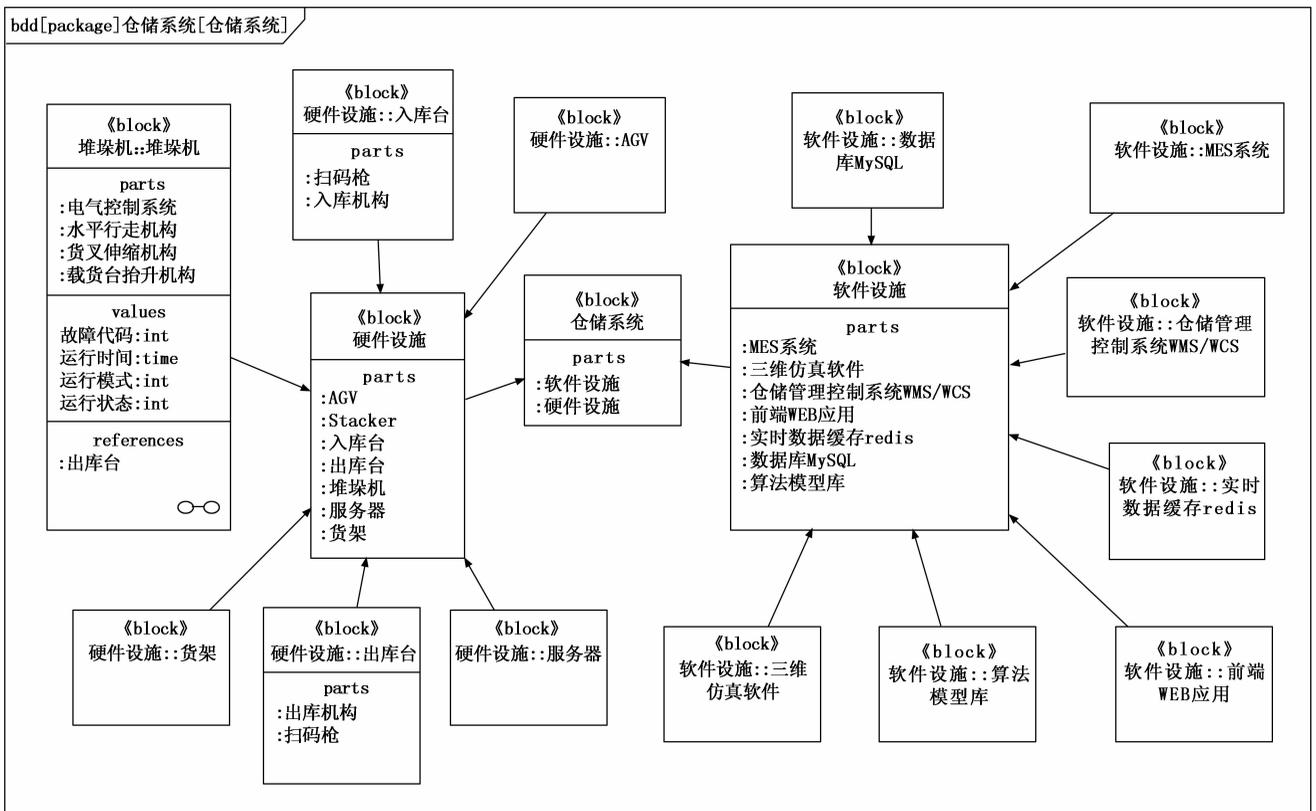


图 6 仓储产线结构图

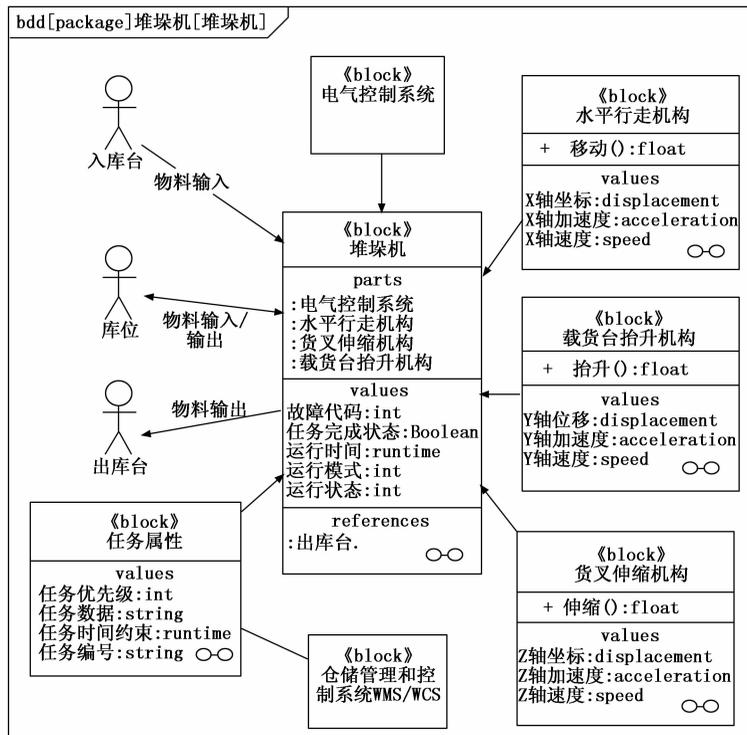


图 7 堆垛机结构图

可分为入库、出库和转运, 任务为串行模式, 仅当前任务执行完才能执行下一任务。产线任务活动图如图 9 所示。

堆垛机所能完成的工序为分为: 移动至目的地、货叉定位、存/取货、货叉复位 4 种, 其所能完成接受的任务都可以由这 4 种工序组合而成。堆垛机的行为可分为三轴运动: X 水平轴移动、Y 轴升降移动和 Z 轴伸缩移动。堆垛机运行活动图可以反应其工序和行为之间的串行、并行和依赖关系, 移动至目的地的工序由 X 轴移动和 Y 轴移动的并行运动完成, 货叉定位工序由 Z 轴移动完成, 存/取货工序由 Y 轴移动完成, 货叉复位由 Z 轴移动完成, 由此建立的堆垛机活动图如图 10 所示。

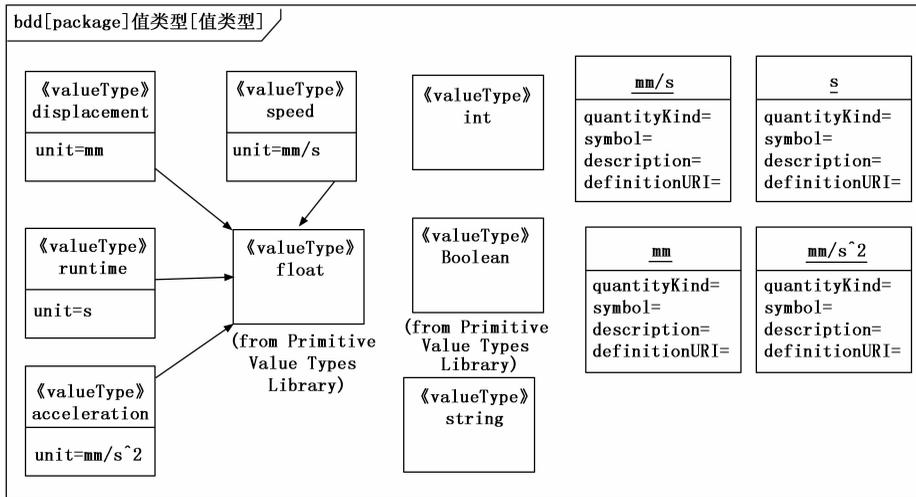


图 8 值类型定义图

4.2 数字孪生模型构建

受益于数字孪生技术的发展, 各大企业都在进行数字孪生软件的研究开发, 目前能用于数字孪生仿真运行的软件主要有 PD/PS、Unity 3D、VC、DPE/DPM 等, 本文基于 VC (visual components) 软件进行仓储系统的数字孪生模型构建: 在 Solidworks 软件中建立等比例模型, 将装配体格式文件 SLDASM 导入 VC 软件中, 由于设备中零部件众多, 而其中运动部件较少, 模型导入时若将全部特征导入会极大增加孪生体模型构建时的电脑资源占用和工作量, 因此导入时优化特征将整个装备体视作整体; 导入后切割出运动特征为独立特征; 根据各特征运动特性, 对其特征坐标系进行标定, 选择其运动基准; 抽取各特征, 为其赋予运动并建立层级关系, 对于堆垛机而言, 抽取其主体、载货台和货叉三部分, 其水平行走运动为主体运动, 载货台抬升运动依附于水平行走运动, 货叉伸缩运动依附于载货台抬升运动, 并为这 3 个自由度的运动赋予平移特征 $J1, J2, J3$; 为堆垛机的三自由度运动建立 3 个伺服控制器用于控制; 连接 OPC UA 服务器, 分别将 X 轴位移、Y 轴位移、Z 轴位移 3 个数据点与 $J1, J2, J3$ 绑定, 以实现实时数据的驱动。模型构建流程如图 11 所示。

4.3 数据采集传输与监控实现

仓储货架大小为 550 mm * 600 mm * 400 mm, 仓储分为两排, 编号顺序为 Z-X-Y (Z 排 X 列 Y 行), 合计 94 个库位。

通过基于 TCP/IP 协议的通信连接从 redis 实时缓存库中获取堆垛机运行数据作为数字孪生监控的驱动。OPC UA 服务器通过 open62541 开源库构建, 基于 C++ 语言开发。首先创建一个 UA_Server (服务器类) 对象并进行初始化设置, 解析 XML 文件并形成相应头文件和源文件, 形成对象类, 通过调用相应函数生成堆垛机对象节点, 每个对象节点中包含变量节点 POSX (X 轴位移)、POSY (Y 轴位

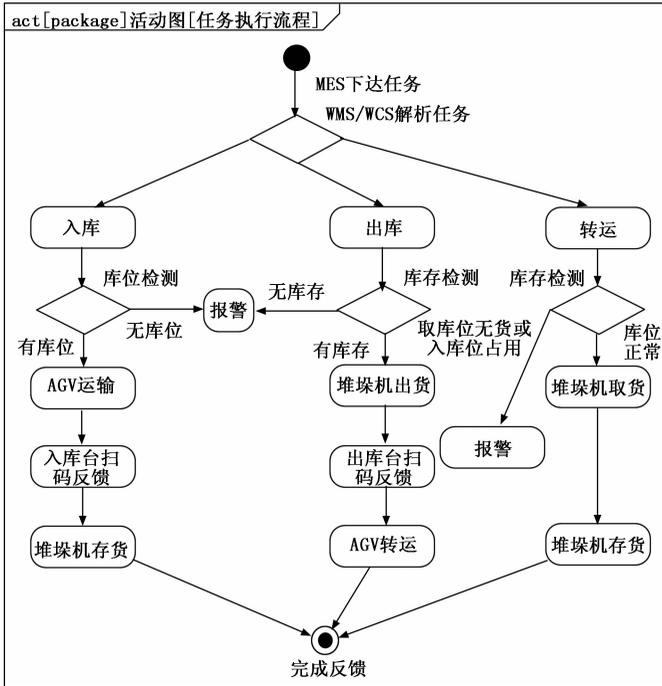


图 9 产线任务活动图

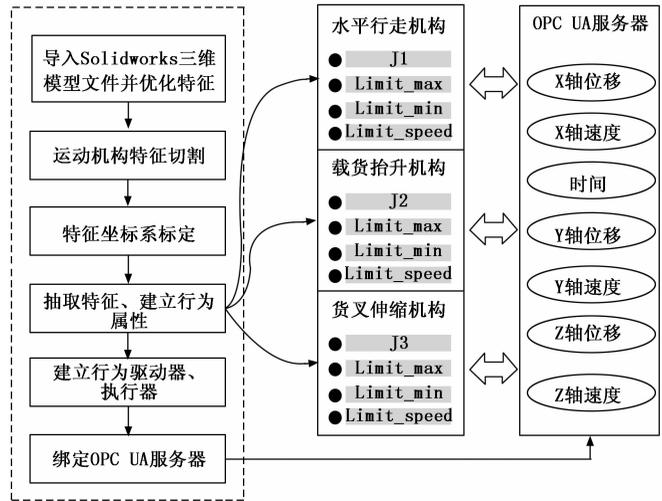


图 11 模型构建流程

的变量节点的数据更新。OPC UA 客户端为 VC 软件，通过网络下 OPC UA 服务器搜寻功能连接服务器，并绑定数据点，数据读取时间间隔为 50 ms，循环读取。程序流程如图 12 所示。

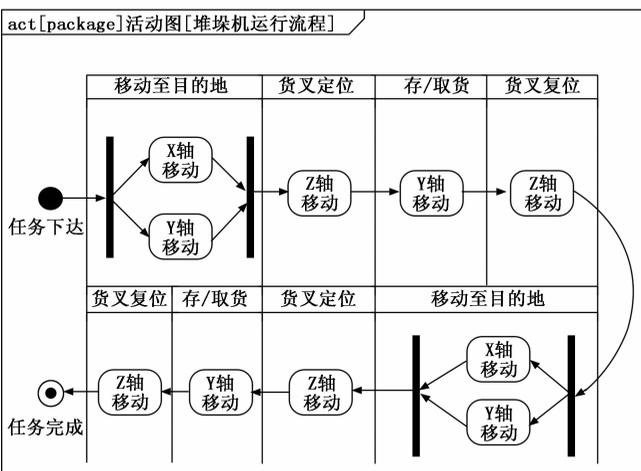


图 10 堆垛机运行活动图

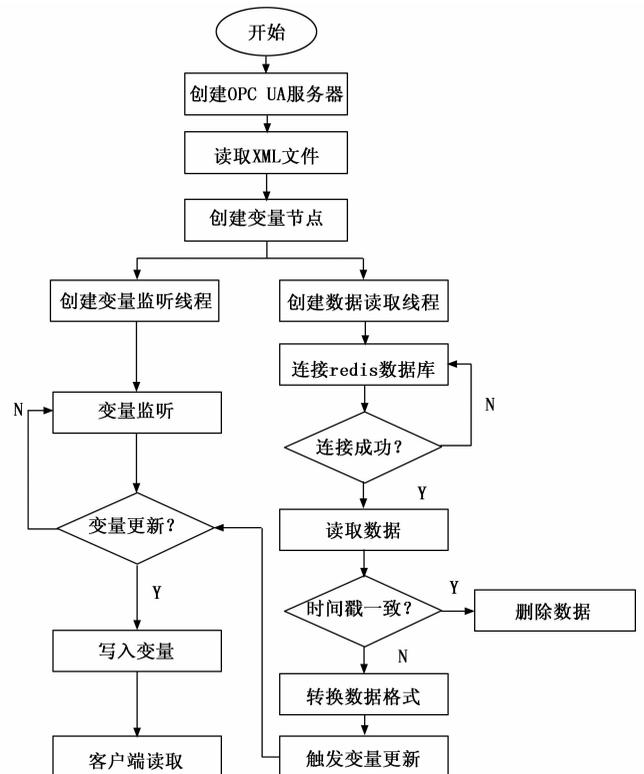


图 12 程序流程

移)、POSZ (Z 轴位移)、VX (X 轴速度)、VY (Y 轴速度)、VZ (Z 轴速度) 等，对变量节点创建相应全局变量以进行数据更新，为防止后续两个线程对全局变量的读写冲突问题，将变量进行原子化，即当某一线程读或写变量时，对变量上锁使得其他线程无法访问变量，完成操作后解锁变量。创建两个线程，其一为数据读取线程 datathread，通过 redisConnect 函数连接 redis 进行一定频率的数据读取，其中为了保证不缺失数据，数据读取频率必须高于 redis 数据更新频率，因此必定会采集到时间戳一致的数据，对此类数据进行剔除，并将获得的数据进行格式转换，转换为 UA 数据类型写入全局变量；另一线程为堆垛机变量节点更新线程 ddjupdata，通过监听全局变量并调用 open62541 相应函数将全局变量中的值写入变量节点，实现 OPC UA 中

本文实验对堆垛机下达转运任务，从库位 1-5-3 中取货并存储至库位 1-2-1。Redis 中更新数据频率为 0.2 s，为保证数据采集完整，设置从 redis 中数据获取频率为 0.1 s，并在获取后剔除时间戳一致的重叠数据。所获取部分数据如表 1 所示，其中工作状态 3 代表放货中，报警状态 0 代表正常运行无错误。

表 1 堆垛机运行数据

X 速度	Y 速度	Z 速度	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	工作状态	报警状态
0	0	0	4102	895	0	3	0
0	0	0	4102	895	0	3	0
0	0	0	4102	895	0	3	0
0	0	0	4102	895	0	3	0
-9.155272	-2.059935	0	4102	895	0	3	0
-70.15228	-119.8196	0	4092.8	885.8	0	3	0
-132.9803	-210.228	0	4092.8	875.2	0	3	0
-196.2662	-316.7724	0	4082.7	875.2	0	3	0
-260.4675	-415.5349	0	4066.6	859.7	0	3	0
-335.1974	-414.2761	0	4025.5	827	0	3	0
-394.9356	-411.0717	0	4025.5	809.4	0	3	0
-460.5102	-417.5949	0	3997	792.7	0	3	0
-527.3437	-429.7256	0	3964.1	792.7	0	3	0
-588.684	-418.1671	0	3928.9	776.4	0	3	0
-637.5503	-420.227	0	3847.9	741.8	0	3	0
-629.9972	-417.8238	0	3806.7	725.8	0	3	0
-629.1961	-411.5295	0	3806.7	725.8	0	3	0
-631.3705	-413.475	0	3766.2	708.4	0	3	0
-640.8691	-416.2216	0	3682.1	674.5	0	3	0
-630.5694	-425.148	0	3682.1	657.2	0	3	0

表 1 中数据为整个任务流程中的部分运行数据, 为堆垛机自库位 1-5-3 取货完成后进行向库位 1-2-1 移动存货的过程。在此过程中堆垛机进行 X、Y 轴的并行运动, Z 轴在原地不动, 其中 X、Y 均负方向位移, 其中坐标数据和速度数据均为伺服电机编码器反馈而来的数据计算而得, 而非传感器直接获取。由表中数据可以发现速度数据在运行过程中并未出现重复数据, 而位移数据在存在速度的情况下依旧出现重复数据, 并且存在 X 轴位移数据重复时 Y 轴位移未重复, Y 轴位移数据重复时 X 轴位移数据未重复的情况, 因此应为控制程序运行时位移转换存在一定问题, 导致 redis 自 PLC 中采集而得的数据不准确, 对此情况可考虑以下两种方式进行校正: 1) 加装位移传感器进行一定频率的位移数据测量, 并于计算而得的位移值进行融合得到精确的位移值; 2) 面对自 redis 中取得的重复的位移数据, 考虑 redis 数据更新时间 0.2 s 并且速度数据并不重复, 通过位移对应的速度数据进行计算来替换重复值。由于在三维孪生软件中已进行坐标标定, 且数据间单位一致, 因此无需对数据进行额外的算式转换, 直接可用于孪生体模型驱动。

数字孪生监控情况如图 13 所示。

5 结束语

面对生产过程中设备实时监控困难、透明性差、管控效率低, 数字孪生模型库构建复杂, 数字孪生应用于机械设备监控时跨学科、跨背景交互等问题, 提出有一种基于数字孪生的产线设备监控方法。融合 MBSE 思想, 基于 SysML 语言对产线和设备进行统一的描述建模并形成数据模型, 助力数字孪生模型库的构建, 确定监控数据需求和

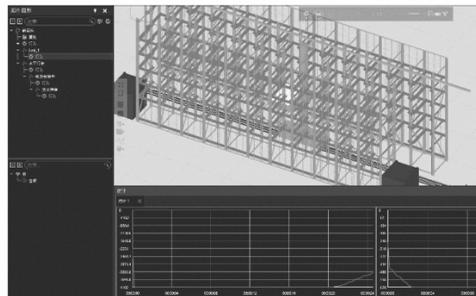


图 13 实时孪生运行

数据来源并进行设备 OPC UA 模型的构建; 以位移数据和任务数据双通道驱动的方式进行数字孪生体与物理实体的虚实映射, 并建立异常报警追溯模式, 最终以仓储系统及其核心设备堆垛机为例进行方法验证并实现其三维可视化监控, 有效提高监控的透明度和管控效率, 为数字孪生技术在监控中的使用做出探索, SysML 语言描述设备资源并进行 OPC UA 信息模型的转换面对大量设备或复杂系统时具备优势, 并且图形化的表述方式提高了跨专业人员的交流效率。但本文尚未将设备状态预测、寿命估计等运维技术融入实现, 且数字孪生技术在监控方面的进一步应用还需跨学科、跨领域的融合, 包括机械、计算机、通信等学科, 需要广大学者的共同研究探索, 后续研究将融合设备故障诊断与预测, 通过云边协同的模式, 利用云端资源近乎无限的优势存储海量设备运行数据, 进行数据挖掘训练故障诊断模型, 并将模型下发至边缘进行实时运行数据的计算诊断, 进行边缘侧数字孪生监控的预警。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HAO Y, HELO P. Manufacturing industry in cloud computing ERA: Case study [C] // Singapore, Singapore: IEEE Computer Society, 2017, 2068-2072.
- [3] AL-GUMAEI K, SCHUBA K, FRIESEN A, et al. A Survey of Internet of Things and Big Data integrated Solutions for Industrie 4.0 [C] // Torino, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2018, 1417-1424.
- [4] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [J]. White paper, 2014: 1-7.
- [5] ROSEN R, von WICHERT G, LO G, et al. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing [J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48 (3): 567-572.
- [6] 陶 飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (5): 1267-1281.
- [7] 庄存波, 刘检华, 熊 辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (4): 753-768.
- [8] 韩文婷, 程 龙, 韩文婧, 等. 数字孪生驱动的火箭控制系统故障诊断研究综述 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (10): 1-6.
- [9] 刘志峰, 陈 伟, 杨聪彬, 等. 基于数字孪生的零件智能制造

车间调度云平台 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 1444 - 1453.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 成克强, 林家全, 杨东裕, 等. 基于数字孪生的智能车间系统仿真加速测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 39 - 44.

[13] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing [J]. Ieee Access, 2017, 5: 20418 - 20427.

[14] 庄存波, 刘检华, 熊 辉, 等. 复杂产品装配现场动态实时可视化监控系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (6): 1264 - 1276.

[15] 康 晋. 基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统设

计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 119 - 1242.

(上接第 203 页)

4 结束语

本文针对泥浆管道输送系统非线性、大时滞的特点, 将 BP 神经网络 PID 应用于疏浚管道泥浆流速控制中。在建立以变频器频率信号 u 为输入、泥浆流速 v 为输出的泥浆管道输送系统仿真模型基础上, 对泥浆流速跟踪控制所采用的 BP 神经网络 PID 控制器进行设计, 并利用 MATLAB 仿真了控制器的控制效果, 将结果和常规 PID、单神经元 PID 控制器的控制结果进行对比, 发现 BP-PID 控制器的超调量仅为 3.8%, 响应时间为 11 s, 各项性能指标均优于其他两种控制器; 最后通过 ~10% 到 ~30% 泥浆体积浓度范围的实验台浓度增减变化实验对流速寻优方法和控制方法进行验证。结果显示, 在较宽的浓度变化范围内, 本文所提出的寻优方法能够在管道平均浓度发生增减变化时, 均能实现较好的流速寻优, BP 神经网络 PID 控制器也能够快速稳定地对最优流速进行持续跟踪, 较好地实现了浓度变化时的泥浆流速跟踪控制, 验证了控制方法的有效性, 为实际挖泥船的管道泥浆流速自动化提供了有益参考。

参考文献:

[1] 倪福生. 国内外疏浚设备发展综述 [J]. 河海大学常州分校学报, 2004 (1): 1 - 9.

[2] 魏 义, 魏长赞, 袁 斌. 绞吸疏浚船泥砂管道输送流速稳定控制研究 [J]. 南京理工大学学报, 2021, 45 (3): 332 - 337.

[3] 闭治跃. 挖泥船泥浆管道输送系统效率优化与控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[4] 李志强. 绞吸式挖泥船的疏浚优化 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2011.

[5] 高礼科, 倪福生, 蒋 爽. 基于模糊 PID 控制器的旋流泵调速控制 [J]. 自动化与仪表, 2020, 35 (12): 72 - 76.

[6] 潘成广, 高 岚, 朱师伦. 绞吸式挖泥船泥浆管道输送系统 MFAFC 研究 [J]. 船舶工程, 2020, 42 (6): 82 - 90.

[16] 吴鹏兴, 郭 宇, 黄少华, 等. 基于数字孪生的离散制造车间可视化实时监控方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (6): 1605 - 1616.

[17] 杜莹莹, 罗 映, 彭义兵, 等. 基于数字孪生的工业机器人三维可视化监控 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (6): 2130 - 2138.

[18] 张 南, 张 顺, 刘利勋, 等. 基于数字孪生的车间生产过程监控方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, 581 (7): 156 - 159.

[19] 张入元, 武殿梁, 黄顺舟. 基于数字孪生的总装对接在线监控技术 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 573 (11): 109 - 113.

[20] 夏稻凌. 基于 MBSE 的民机航电状态监控系统设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

[21] 何 旭, 张海柱, 丁国富, 等. 基于 MBSE 的高速列车转向架系统设计建模方法 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38 (4): 179 - 185.

[7] H LIANG, SANG Z K, WU Y Z, et al. High Precision Temperature Control Performance of a PID Neural Network - Controlled Heater Under Complex Outdoor Conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195 (1): 117234.

[8] 侯媛彬, 汪 梅, 王立琦. 系统辨识及其 MATLAB 仿真 [M]. 科学出版社, 2004.

[9] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[10] 李 航, 杜 璠, 胡晓兵, 等. 改进的 BP 神经网络 PID 控制器在气体浓度控制中的研究 [J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2020, 57 (6): 1103 - 1109.

[11] XING B Y, YU L Y, ZHOU Z K. Composite single neural PID controller based on fuzzy self-tuning gain and RBF network identification [C] // 中国控制与决策会议, 2014: 606 - 611.

[12] 李 楠. 基于改进 PSO 的起重机双马达同步模糊 PID 控制研究 [J]. 机电工程, 2022, 39 (5): 700 - 704.

[13] 张 鹏, 贾洪平, 王云财, 等. 模糊-PI 无刷直流电机矢量控制系统实现 [J]. 机电工程, 2016, 33 (2): 202 - 206.

[14] 赵 岩, 周秦源, 邵念锋, 等. 基于 RBF 神经网络模糊 PID 控制的电液伺服系统 [J]. 机电工程, 2022, 39 (2): 244 - 249.

[15] 丁荣乐, 侯 旋, 孙文建. 考虑变有效载荷的机械臂自适应 PID 控制 [J]. 机电工程, 2022, 39 (3): 291 - 299.

[16] 姚 乐, 管业鹏, 金 星. 基于改进单神经元的四旋翼 PID 控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 68 - 70.

[17] 俞志勇, 李 青, 王燕杰, 等. 基于 PID 的流量调节阀的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 118 - 121.

[18] 蒋 爽, 邓 岚, 倪福生, 等. 基于 BPPID 的疏浚管道稳定流速控制 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 135 - 140, 147.

[19] 孙 伟, 张明伟, 李 停, 等. 基于蚁群算法自整定 PID 的风电系统最大风能追踪研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 110 - 112.

[20] 陈健健, 曹贯中. 基于神经网络模型计算感潮河段断面平均流速 [J]. 水利信息化, 2018 (6): 49 - 52.