

DOI:10.13475/j.fzxb.20201007809

环锭纺纱信息物理生产系统建模方法

殷士勇^{1,2}, 鲍劲松², 唐仕喜¹, 杨 芸²

(1. 盐城师范学院 信息工程学院, 江苏 盐城 224002; 2. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要 针对环锭纺纱工艺流程长、纤维形态变化大、生产连续性与离散性混合,生产过程中数据流和控制流的关系多样复杂等问题,深入研究了环锭纺纱信息物理生产系统构架。先根据信息物理系统的“计算、通信、控制”特征,定义了环锭纺纱信息物理生产系统;在此基础上分析了环锭纺纱信息物理生产系统的纤维流、数据流和控制流,提出“纤维流-数据流-控制流”融合的环锭纺纱信息物理生产系统模型。然后,基于模型的系统工程方法,采用 SysML 建模语言建立环锭纺纱信息物理生产系统需求和局部用例模型以及对“纤维流-数据流-控制流”融合建模。研究表明,提出的建模方法能有效建立环锭纺纱信息物理生产系统模型,并对环锭纺纱生产智能化具有一定的借鉴意义。

关键词 环锭纺纱; 信息物理生产系统; 纤维流; 数据流; 控制流; 纺织生产智能化

中图分类号:TS 101.8 文献标志码:A

Modeling method of cyber physical production system for ring spinning

YIN Shiyong^{1,2}, BAO Jinsong², TANG Shixi¹, YANG Yun²

(1. School of Information Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China;
2. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract In light of the problems such as long process flow of ring spinning, large variations in fiber morphology, mixed production continuity and discreteness, and the diverse and complex relationships between data flow and control flow in the production process, the ring spinning cyber physical production system architecture was comprehensively studied. According to the "computation, communication, and control" characteristics of cyber physical systems, the ring spinning cyber physical production system was defined. On this basis, the fiber flow, data flow and control flow of ring spinning cyber physical production were analyzed, leading to the establishment of a ring spinning cyber-physical production system model encompassing "fiber flow-data flow-control flow". Using the model-based system engineering method, the SysML modeling language was used to specify requirements for the partial models and full model for the ring spinning cyber physical production system considering "fiber flow-data flow-control flow". The results show that the proposed modeling method can effectively establish a ring spinning cyber physical production system model, and has certain reference significance for the intelligent production of ring spinning.

Keywords ring spinning; cyber physical production system; fiber flow; data flow; control flow; intelligent textile production

工业 4.0 的核心是信息物理系统 (cyber physical system, CPS)^[1], 而信息物理生产系统 (cyber physical production system, CPPS) 是面向生产制造的物理生产系统和数字生

收稿日期:2020-10-29 修回日期:2020-11-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1304000);工信部智能制造综合标准与新模式应用项目(工信厅装函[2018]265号)

第一作者:殷士勇(1979—),男,副教授,博士。主要研究方向为智能制造与测控、纺纱信息物理生产系统。

通信作者:鲍劲松(1972—),男,教授,博士。主要研究方向为智能制造系统、工业智能、虚拟设计与可视化和人机共融机器人。E-mail:bao@dhu.edu.cn。

产系统的深度融合。在环锭纺纱生产系统(本文以棉纺生产为例说明)中,生产设备的种类复杂且数量多(梳棉机、并条机、粗纱机、细纱机、络筒机等)、工序的连续与离散混合并重(清梳联连续、精梳到并条以及并条到粗纱离散、粗细络联连续等)、纤维流形态变化大(纤维形态从无序到有序,定量化评价复杂,纤维过程动态变化),同时伴随生产过程中数据流、控制流的关联关系多样性,推进环锭纺纱生产的智能化面临巨大挑战。

CPPS 是 CPS 在制造领域的一种具体实现,它既依赖于信息处理、计算机、通信等基础技术的发展,也依赖于制造领域中装备、工艺等技术的突破。CPPS 一方面需要物理世界中各类实体互联互通,采集生产过程中的数据在信息世界形成各类优化的决策指令,另一方面需要通过交互对生产过程的实时监测与控制。关于 CPPS 的架构或建模的研究, Jiang 等^[2]提出一种针对 CPPS 的任务和资源匹配分析方法,并通过原型系统验证了该方法的实现机制和有效性; Tomiyama 等^[3]提出一种用于 CPPS 的弹性架构的设计方法,该系统可以处理离散事件过程中的干扰和故障问题。Rvrabic 等^[4]提出了一种基于代理的生产环境分布式控制方法用于 CPPS,其中代理只能与整个系统的一部分进行交互,并设定通过学习和沟通可以改善代理网络; Siafara 等^[5]提出一种可以智能适应环境和条件快速变化的 CPPS 架构,提高系统稳定性; Engel 等^[6]在 CPPS 的范围内,使用基于知识的辅助系统实现动态服务网络和过程模块的批处理;为在实际工厂中实施 CPPS,以预测金属铸件的质量和操作控制, Lee 等^[7]设计了用于金属铸造产品质量预测和操作控制的 CPPS 体系结构框架,该框架描述了物联网(IoT)、人工智能、仿真、制造执行系统以及高级计划和调度系统之间的协作,利用组件之间的数据流描述了整个系统的运行机制,并通过估计定量效应来验证 CPPS 的有效性; Yao 等^[8]提出了基于 IEC 61499 FB 的 CPPS 的框架和实现方法,用于物理人机交互;曹瑞珉等^[9]提出基于混杂随机时延 Petri 网的服装定制 CPPS 的事件层和物理层建模问题;王勃等^[10]介绍了航空制造业的 CPPS;张建良等^[11]针对钢铁产业结构特点,提出基于互联网+CPPS 模式的钢铁智慧工厂思路。对于高动态、高速度、实时性要求高的、大规模连续性的环锭纺纱 CPPS 而言,当前国内外缺乏定义,也少有系统模型,更少研究建模方法。

本文根据 CPS 的通信、计算、控制“3C”特征,给出 CPS 的形式化定义;在此基础上,再形式化定义环锭纺纱 CPPS,提出“纤维流-数据流-控制流”融合的

环锭纺纱 CPPS 模型;并采用基于模型的系统工程方法,提出基于 SysML 的环锭纺纱 CPPS 系统建模。

1 环锭纺纱 CPPS 的定义

美国国家科学基金会定义 CPS 为描述计算资源(或网络资源)和物理资源之间的紧密结合,体现通信、计算和控制的“3C”特征,核心是其与运行和部署的任务环境的各种要素的融合。2017 年美国国家标准局提出了 CPS 的概念模型^[12],它是一个信息空间与物理空间融合的复杂系统,提供状态感知、信息分析与反馈和动态控制等多种服务。

CPS 中虚实融合包含大量的物理对象和与之匹配的信息对象的交互操作,这些信息流和作业流在时序上是对应的关系,实现信息世界与物理世界的彼此依赖、高度集成与实时交互^[13-15]。

CPS 是离散的信息世界与连续的物理世界的融合,因此,将 CPS 定义为

$$S = \{C^1, C^2, C^3\} \quad (1)$$

$$C^i = (P, C, E, D, I, f^i), i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: S 表示 CPS; C^1 表示 CPS 的通信; C^2 表示 CPS 的计算; C^3 表示 CPS 的控制; P 表示 CPS 连续的物理世界中全部实体的集合; C 表示 CPS 离散的信息世界中全体逻辑状态的集合; E 表示物理世界全体实体的关联关系集合; D 表示信息世界中全部信息对象的关联关系集合; I 表示信息世界对物理世界控制的指令集合; $i = 1, 2, 3$; f^1 表示通信节点之间的映射关系; f^2 表示计算数据之间的映射关系; f^3 表示控制指令与被控对象之间的映射关系。

环锭纺纱 CPPS 是用于环锭纺纱生产的信息物理系统,是环锭纺纱智能生产的具体实现。环锭纺纱 CPPS 是 CPS 的子集,参照 CPS 定义,具体定义如下:

$$S' = \{C_1, C_2, C_3\} \subseteq S \quad (3)$$

$$C_i = (P_p, C_c, E_{(p_i, p_j)}, D_{(d_m, d_n)}, I_{(p_p, c_c)}, F^i) \quad (4)$$

式中: S' 表示环锭纺纱 CPPS; C_1 表示物理生产系统到信息系统的双向通信; C_2 表示对物理生产系统的计算; C_3 表示对物理生产系统的控制。其中: $i = 1, 2, 3$; P_p 表示物理生产系统; C_c 表示信息系统; $E_{(p_i, p_j)}$ 表示物理生产系统中 p_i 和 p_j 的关联关系集合; $D_{(d_m, d_n)}$ 表示信息对象 d_m 到 d_n 的转换关系集合; $I_{(p_p, c_c)}$ 表示信息系统对物理生产系统的控制指令集合; F^1 表示通信系统中通信节点之间的映射关系; F^2 表示信息系统中信息对象之间的映射关系; F^3 表示信息系统中控制指令与物理生产系统中被控对象

之间的映射关系。

环锭纺纱 CPPS 的生产系统中,实体 p_i 和 p_j 的复杂关联关系表现在:1)生产要素多,涉及到人、机、料、法、环等各个环节;2)任意2个实体之间的关联关系受到实体模型、环锭纺纱工艺、设备运动学机制等因素的影响,难以表达。各要素之间是通过相互配合完成了环锭纺纱生产,形成以物料形态变化为中心,关联设备、工艺、人员、环境等生产全要素的“纤维流”。所以,环锭纺纱 CPPS 中的 $E_{(p_i, p_j)}$ 本质为“纤维流”中纤维任意2个相邻形态之间的单向转换关系。

在环锭纺纱 CPPS 中,其信息系统的逻辑点对应于环锭纺纱生产系统中物理实体,随着环锭纺纱生产的不断推进,纤维集合体的形态也在不断变化,信息系统中其逻辑状态也在不断变化,形成与纤维流对应的“数据流”,所以,环锭纺纱 CPPS 中的 $D_{(d_m, d_n)}$ 本质是“数据流”中2个逻辑点之间的状态转换。

当数据流汇聚到环锭纺纱信息系统后,需要对其进行处理与分析,形成对环锭纺纱生产过程最优决策的“控制流”。所以,纺纱 CPPS 中的 $I_{(p_p, c_c)}$ 为信息系统对物理生产系统的控制。

因此,环锭纺纱 CPPS 本质上是纤维流、数据流和控制流融合的信息物理生产系统。

2 纺纱 CPPS 纤维流-数据流-控制流

2.1 纤维流

以环锭纺精梳 18.2 tex 棉纱生产为例,连续的清梳联工序是低速生产,其出条速度为 140 m/min;离散的精梳工序和并条工序是中速生产,其速度分别为 425 钳次/min 和 500 m/min;连续的粗细络联工序是高速生产,其中粗纱工序和细纱工序生产的锭速分别为 1 250 r/min 和 16 000 r/min,络筒工序的卷取速度为 1 250 m/min。

牵伸和加捻使得棉花纤维分布从杂乱无序到沿纵向有序排列,物料形态也从棉包—棉块—棉条—粗纱—细纱不断由粗变细,从而形成环锭纺纱生产的“纤维流”。在纤维流动过程中,纤维的主要变化体现在纤维排列、纤维形态、纤维属性以及纤维中的异纤情况等。

纤维之所以形成流态,是工艺、设备、环境等因素共同作用于纤维的结果。纤维流的模型可以描述如下:

$$P' = \{P'_0, P'_1, \dots, P'_i, \dots, P'_n\}, i \in [0, n-1] \quad (5)$$

$$P'_i \mapsto P'_{i+1} \quad (6)$$

$$\mapsto \text{Pro} \infty \text{Dev} \infty \text{Env} \quad (7)$$

式(5)表示从棉包到纱包过程中纤维的全部形态。式中: P' 表示纤维流; P'_i 表示纤维流的某一个形态,共有 n 个形态。式(6)表示纤维从一个形态转变成另一个形态,没有中间形态,保证形态变化的连续性,其中 \mapsto 表示纤维形态转变。式(7)表示从纤维形态转变过程中,工艺、生产设备和环境的关联关系。式中:Pro 表示工艺;Dev 表示设备;Env 表示环境。

2.2 数据流

纤维的流动产生大量的实时数据,如纤维的质量数据、工艺数据、设备数据、环境数据等。环锭纺纱 CPPS 中纤维不同形态下的多源数据,按其结构化程度可以分为:结构化数据、半结构化数据和非结构化数据。常见的结构化数据有工艺数据、环境数据、物料数据等;半结构化数据有设备的运行日志数据、通过传感器采集的 JSON 格式的数据等;非结构化数据有异纤的照片、生产监控的各种视频数据等。

一种纤维形态下的数据,转化成另一种形态下的数据,其转化语义有以下几种情况。

定义 1(结构化数据的过滤转换 \odot):结构化数据 sdw 经过 \odot 转换后成为结构化数据 sdv 。

$$[\odot] = \{ \text{sdv} = \odot(\text{sdw}) \wedge \{ (\text{sdw}_{i-1}, \text{sdw}_i, \dots, \text{sdw}_j) \subset \text{sdw} \wedge (\text{sdw}_{i-1}, \text{sdw}_i, \dots, \text{sdw}_j)! \subset \text{sdv} \} \quad (8)$$

式中: $\text{sdw}_k (k \in [i-1, j])$ 为数据 sdw 的一个数据元。

定义 2:(结构化数据的合并转换 \oplus):结构化数据 $\text{sdw}_{1,2}$ 和 $\text{sdw}_{1,2}$ 经过 \oplus 变换后成为结构化数据 sdv 。

$$[\oplus] = \{ \text{sdv} = \oplus(\text{sdw}_1, \text{sdw}_2) \wedge ((\text{sdw}_1 \cdot A = \text{sdw}_2 \cdot A) \} \quad (9)$$

式中: $\text{sdw}_1 \cdot A = \text{sdw}_2 \cdot A$ 表示2个结构化数据有共同的字段 A 。

定义 3 (结构化数据的分离转换 \ominus):结构化数据 sdw 经过 \ominus 变换后成为结构化数据 sdv_1 和 sdv_2 。

$$[\ominus] = \{ (\text{sdv}_1, \text{sdv}_2) = \ominus(\text{sdw}) (\text{sdv}_1 \wedge \text{sdv}_2 = \text{null}) \wedge (\text{sdv}_1 \cdot A = \text{sdw} \cdot A) \wedge (\text{sdv}_2 \cdot B = \text{sdw} \cdot B) \} \quad (10)$$

定义 4 (半结构化数据的提取转换 \circ):半结构化数据 ssdw 经过 \circ 转换后成结构化数据 sdv 和半结构化数据 ssdt 。

$$[\circ] = \{ (\text{sdv}, \text{ssdt}) = \circ(\text{ssdw}) = \wedge ((\text{sdv} \wedge \text{ssdt} = \text{null}) \vee (\text{ssdt} = \text{null})) \} \quad (11)$$

定义 4 说明一个半结构化数据可以提取成结构化数据或者结构化数据和半结构化数据。

定义 5 (非结构化数据的提取转换 \otimes): 非结构化数据 $nsdw$ 经过 \otimes 转换后成结构化数据 sdu 、半结构化数据 $ssdv$ 和非结构化数据 $nsdt$ 。

$$[\otimes] = \{ (sdu, ssdv, nsdt) \otimes (nsdw) \wedge ((sdu \wedge ssdv \wedge nsdt = \text{null} \vee ((ssdv = \text{null}) \vee (nsdt = \text{null})))) \} \quad (12)$$

数据流从产生到应用,大致分为 3 个阶段:

1) 数据产生于生产现场。在生产现场,通过部署的智能传感器,采集大量的实时数据。

2) 数据流动于边缘端。在边缘端,数据的流动主要体现在对数据流的预处理。通过传感器采集实时数据,包括:结构化数据、半结构化数据和非结构化数据。根据数据转换语义,半结构化数据和非结构化数据通过提取转换后的结构化数据分别映射到纤维标记信息表、设备标记信息表、工艺标记信息表和环境标记信息表中。结构化数据经过滤和分离转换后分别映射到与纤维质量相关的纤维基本表、与设备相关的设备基本信息表、与工艺相关的工艺基本信息表以及与环境相关的环境基本信息表。纤维基本信息表和纤维标记信息表经合并转换后映射到纤维特征有效信息表中;设备基本信息表和纤维标记信息表经合并转换后映射到设备有效信息表中;工艺基本信息表与工艺标记信息表经合并转换后映射到工艺有效信息表中;环境基本信息表与环境标记信息表经合并转换后映射到环境有效信息表中。

3) 数据应用云中心。纤维有效信息表、设备有效信息表、工艺有效信息表和环境有效信息表经合并转换后进入云中心的信息系统后应用于各个应用程序中,如:生产看板系统、设备运行监控和运行参数调整等,成为决策控制的基础。

2.3 控制流

纤维形态的变化带来了数据流动,为使纤维形态朝着优质的方向变化,即新形态下纤维具有更好的质量品质,需对引发纤维形态变化的各因素进行控制。

环锭纺纱生产过程中,纤维形态的变化较多,引发纤维形态变化的因素也很多,如:从生条到精梳条转换中,牵伸分配的调节;从精梳条到熟条的转换中,出条速度的控制;从熟条到粗纱,粗纱到细纱转换中的捻度与锭速的调节;络纱的张力控制等等,因此,在纤维的流动过程中,被控制的对象很多,且对每个对象的控制是根据纤维形态变化实时进行的,即随着纺纱生产的实时推进,调控也应实时进行,于是便形成了从信息系统到生产系统的“控制流”。

控制信息是由生产状态超越阈值事件触发形成,从环锭纺纱信息系统沿路径传输到被控制对象,其过程可以形式化地描述为

$$C_c \ggg p_i = (\text{Event}_j, \text{IS}, p_i, \text{send}, \text{ControlInfo}_j, \text{path}) \quad (13)$$

控制信息在传输过程中,某节点 N_k 向节点 N_{k+1} 转发控制信息 ControlInfo_j 的过程可以描述为

$$N_k \ggg N_{k+1} = (N_k, N_{k+1}, \text{send}, \text{ControlInfo}_j, \text{path1}, \text{path2}) \quad (14)$$

式中: \ggg 表示发送或转发; $\text{path1}, \text{path2}$ 分别表示 N_k 到 N_{k+1} 控制信息经过的路径、信息系统到 N_k 控制信息经过的路径。 $\text{path1}, \text{path2}$ 可以为空值,表示不考虑发送路径以及到达前的路径。

节点 N_{k+1} 接收节点 N_k 发送的控制信息 ControlInfo_j 的过程可以描述为

$$N_{k+1} \lll N_k = (N_{k+1}, N_k, \text{receive}, \text{ControlInfo}_j, \text{path}) \quad (15)$$

式中: \lll 表示接收转发信息; path 是从 N_k 到 N_{k+1} 的路径。 N_k 可以为空值,表示未知节点发送的广播信息; path 可以为空值,表示不考虑接收的路径。

当且仅当接收和发送路径都是正确的,才能执行控制指令的发送、转发和接收,即必须遵循以下规则:

规则 1: $\forall N_a \in N, \forall N_b \in N$, 当且仅当以下 2 个条件同时成立时,才能形成从 N_a 到 N_b 的流,其中 N 表示所有节点的集合:1) 允许 N_a 向 N_b 发送指令;2) 允许 N_b 接收 N_a 发送的指令。

规则 2: $\forall N_a \in N, \forall N_b \in N, \forall N_c \in N$, 当且仅当以下 6 个条件同时成立,才能形成从 N_a 经过 N_c 到 N_b 的流:1) 允许 N_a 向 N_c 转发指令;2) 允许 N_c 接收 N_a 转发的指令;3) 允许 N_c 向 N_b 转发指令;4) 允许 N_c 接收 N_b 转发的指令;5) 允许 N_a 向 N_b 发送指令;6) 允许 N_b 接收 N_a 发送的指令。

2.4 纤维流-数据流-控制流融合

环锭纺纱信息物理生产系统是由环锭纺纱物理生产系统、信息系统以及它们的交互组成。包括:环锭纺纱物理生产系统中的“纤维流”、信息系统中的“数据流”以及信息系统与环锭纺纱物理生产系统交互的“控制流”。

纤维流:在工艺、设备和环境等因素共同作用下,纤维形态不断发生变换的过程。

数据流:纤维在流动过程中,产生与工艺、设备和环境等相关的实时数据。实时数据通过不断的过滤、提取和合并等转换而形成的数据流。

控制流:为使纤维朝着具有更好质量的形态变化,对引起变化的关键因素进行实时控制而形成的

控制流。

环锭纺纱信息物理生产系统中的纤维流、数据流和控制流不是相互独立而是深度融合的,如图 1 所示。具体融合过程为:环锭纺纱 CPPS 的生产系统中,在一定的生产环境下,随着生产的推进,纤维在设备间流动过程中,在环锭纺纱工艺、设备与环境等因素共同作用下,其形态不断发生变化形成了纤维流。借助于现场总线、智能传感器和工业互联网,伴随着纤维的流动产生的与设备、工艺、环境以及纤

维质量相关的大量实时数据不断汇聚形成了数据流,并应用于不同的管控系统,如全流程质量管控管理,最优工艺、设备维护与保养、能耗调控、车间最优运营等。为使纤维形态朝着具有更好质量的方向变化,各个管控系统发出指令对引起纤维形态变化的主要因素进行实时监测与控制,形成从信息系统到执行器的“控制流”,如:配棉信息的下发、异纤的剔除处理、粗纱锭速的调整、细纱张力的调节、AGV 路径的规划等。

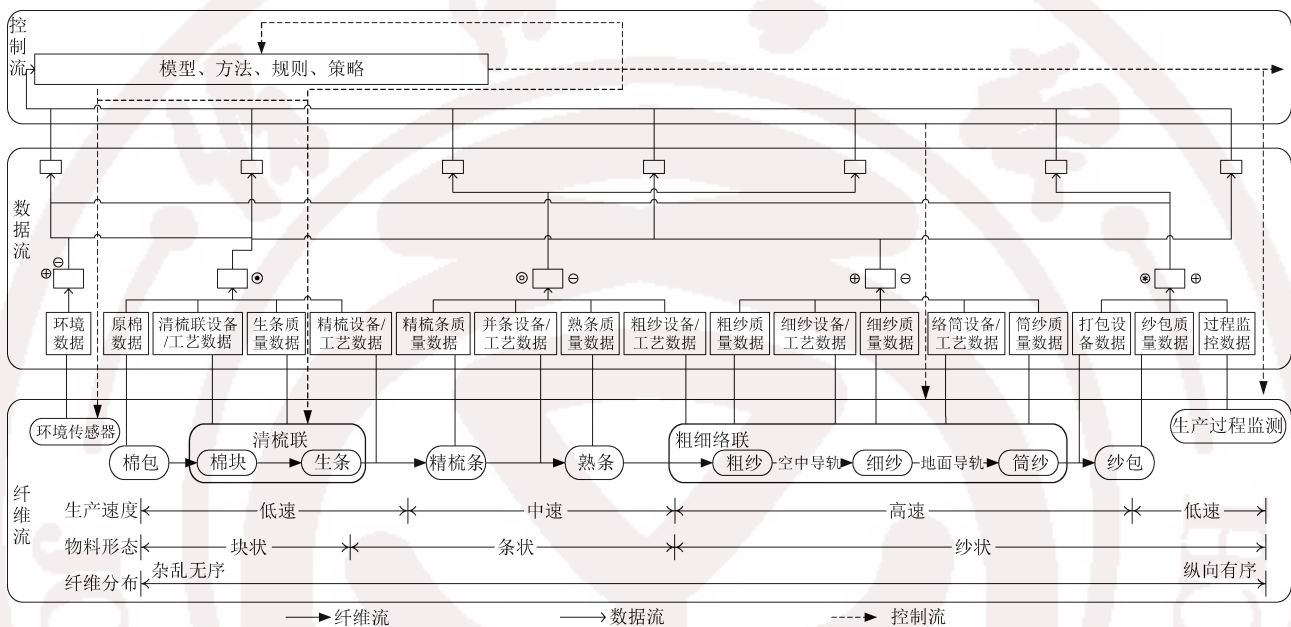


图 1 纤维流-信息流-控制流融合

Fig.1 Integration of fiber flow-information flow-control flow

3 环锭纺纱信息物理生产系统建模

基于模型的系统工程 (model based system engineering, MBSE) 方法是一种采用模型描述设计的系统工程方法,不但可以无歧义地表达知识,还具有利于交流和易于复用等特点^[16-17]。SysML 是国际系统工程学会和对象管理组织支持 MBSE 方法而联合设计开发的系统建模语言^[18-19]。

本文采用 MBSE 的方法,结合 SysML 建模语言从系统的角度构建环锭纺纱信息物理生产系统的模型。由于环锭纺纱信息物理生产系统是一个非常复杂的系统,系统元素之间交叉关联关系复杂多样,受篇幅限制,本文仅对其中具有代表性的环锭纺纱信息物理生产系统需求和局部用例建模以及对“纤维流-数据流-控制流”融合建模。

3.1 系统需求与用例建模

系统需求分析设计人员要深入调查客户需求,明确客户对系统的要求,具体表现在功能性和可靠

性方面,最后才能将客户需求形成完整的可操作的需求定义。

3.1.1 系统需求建模

系统需求模型中要明确系统的组成部分以及每部分具有的明确功能属性。环锭纺纱物理生产系统的建模就是明确对物理生产系统、通信系统和信息系统的功能性需求、非功能性需求以及约束关系等。环锭纺纱 CPPS 的系统需求模型包括:

1) 环锭纺纱物理生产系统。环锭纺纱生产系统是指为了满足环锭纺纱生产而必须具备的包括人员、设备、物料、工艺和环境等基本要素的系统。同时对纱线质量、生产成本等因素有一定的要求。

2) 通信系统。通信系统是指借助于现场总线、无线通信和工业互联网等技术组件的通信网络,具备一定的可靠性和安全性。

3) 环锭纺纱信息系统。环锭纺纱信息系统是与物理生产系统对应的信息化的生产系统,是通过物理生产过程中的数据的处理与分析,构建物理生产系统的信息化模型,具有迭代优化与自主决策

等能力。

4) 系统交互。物理生产系统与信息系统的交互体现在物理生产过程中产生的大量实时数据流通过通信系统传输到信息系统中,通过对数据的分析与处理,建立物理生产系统的各种信息模型并形成各类由信息系统对物理生产系统控制流,实现对物理生产系统各要素的闭环控制,并形成迭代交互。

3.1.2 用例模型

用例是一种黑盒视图,通过用例和参与者构建系统对外提供的服务模型或者系统本身具有的行为

模型。

环锭纺纱 CPPS 的物理生产系统的局部用例模型如图 2 所示。环锭纺纱物理生产系统主要有清梳联、精梳、并条、粗纱、细纱和络筒等主要生产工序,并且每个生产工序都涉及上料、工艺设计、设备维护与保养、质量检测和环境调控等辅助环节。每个生产工序都会有相应的人员参与,如:挡车工要完成上料的基本操作;工艺员负责整个生产的工艺设计和质量检测;机修工负责生产设备的维护与保养;空调工负责生产环境调控。

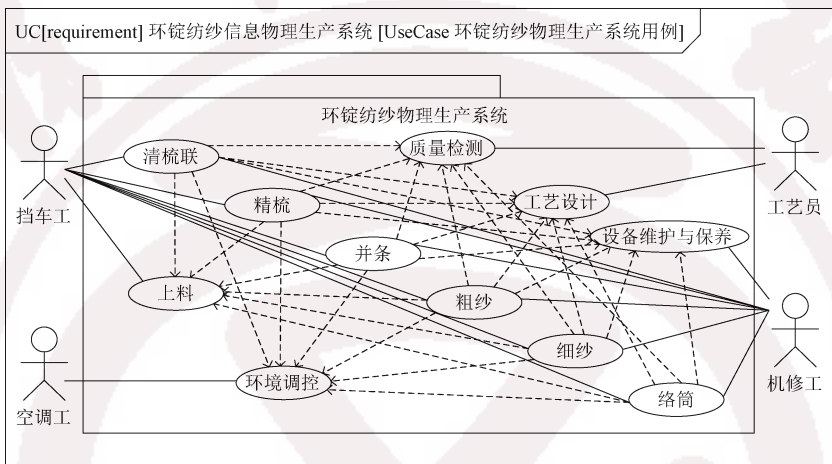


图 2 环锭纺纱物理生产系统局部用例模型

Fig.2 Use case model of ring spinning physical production system

3.2 纤维流-数据流-控制流融合建模

环锭纺纱 CPPS 的“纤维流-数据流-控制流”融合模型包括:环锭纺纱物理生产系统、通信系统和环锭纺纱信息系统,如图 3 所示。同时,环锭纺纱 CPPS 包含了 3 条流:物理生产系统的纤维流,从物理生产系统到信息系统的信息流,从信息系统到物理生产系统的控制流;还体现 CPS 和 CPPS 通信、计算与控制的 3C 特征。

环锭纺纱物理生产系统在满足基本生产条件下组织生产,并对各个生产工序的产品进行质量检测以及数据采集。纤维在抓棉、清梳联、精梳、并条、粗纱、细纱和络筒(粗纱、细纱和络筒)和打包码垛等工序之间流动,形成纤维流。伴随着纤维的流动,通过现场总线、传感器和智能感知设备,大量的制造数据被采集,并且通过通信系统形成从物理生产系统到信息系统的信息流,数据在流动中经过提取、过滤、合并和分离等操作后汇聚到信息系统。信息系统具有一定的稳定性和可维护性,在信息系统中进一步对数据处理,包括:数据集成、数据分析、知识融合和迭代优化,建立与物理生产系统对应的各种模型,形成对物理生产系统各要素实时控制策略。

3.2.1 纤维流的活动模型

活动图是一种动态的行为图,通过行为表示对象(事件、能量或者数据)的流动,关注行为执行过程中对象的变化,可以描述复杂的控制逻辑。虽然描述对象变化略显模糊,但它是唯一说明系统连续行为的图。纤维的流动中,从粗纱变换成细纱这一过程非常重要,它直接决定了纱线的产量和品质。纤维从粗纱变换成细纱的活动图如图 4 所示。

从输送粗纱开始,判断细纱工艺是否变换,如不变换工艺,则再判断环境是否适合生产需求,如果环境不合适,则调节至适合的生产环境;如果变换工艺,则进一步判断钢丝圈和皮圈、细纱机轮盘、细纱罗拉等是否要更换或调节,如果要更换或调节,则在落纱后停机更换或调节,再开机后将细纱接头;如果不要更换也不要调节或生产环境适合生产,则要不断监测是否有细纱断头,如有断头,则接头,直到细纱生产结束。

综上所述,纤维从粗纱状态变化到细纱状态过程中,涉及到细纱环境、细纱工艺和细纱机的关联。从生产全生命周期来看,在环境、工艺和设备等因素共同作用下,纤维形态不断连续变化,形成了纤

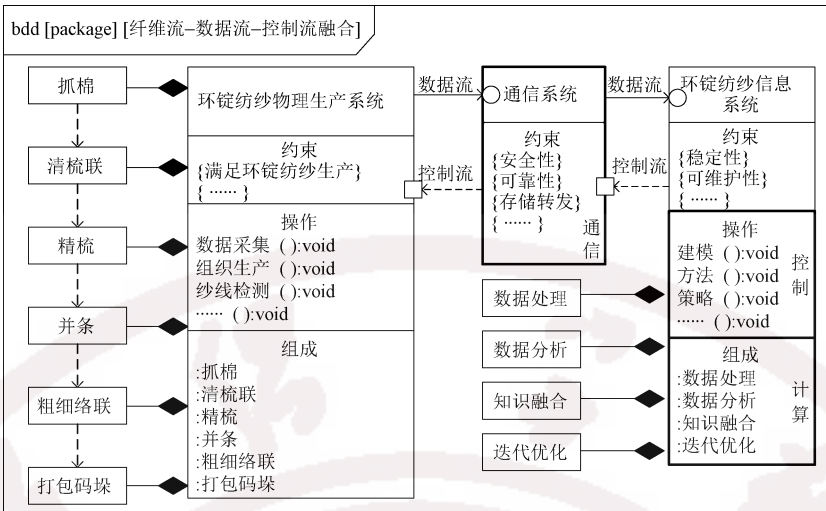


图 3 环锭纺纱 CPPS 的纤维流-数据流-控制流融合模型

Fig.3 Integration model of "fiber flow-data flow-control flow" for ring spinning CPPS

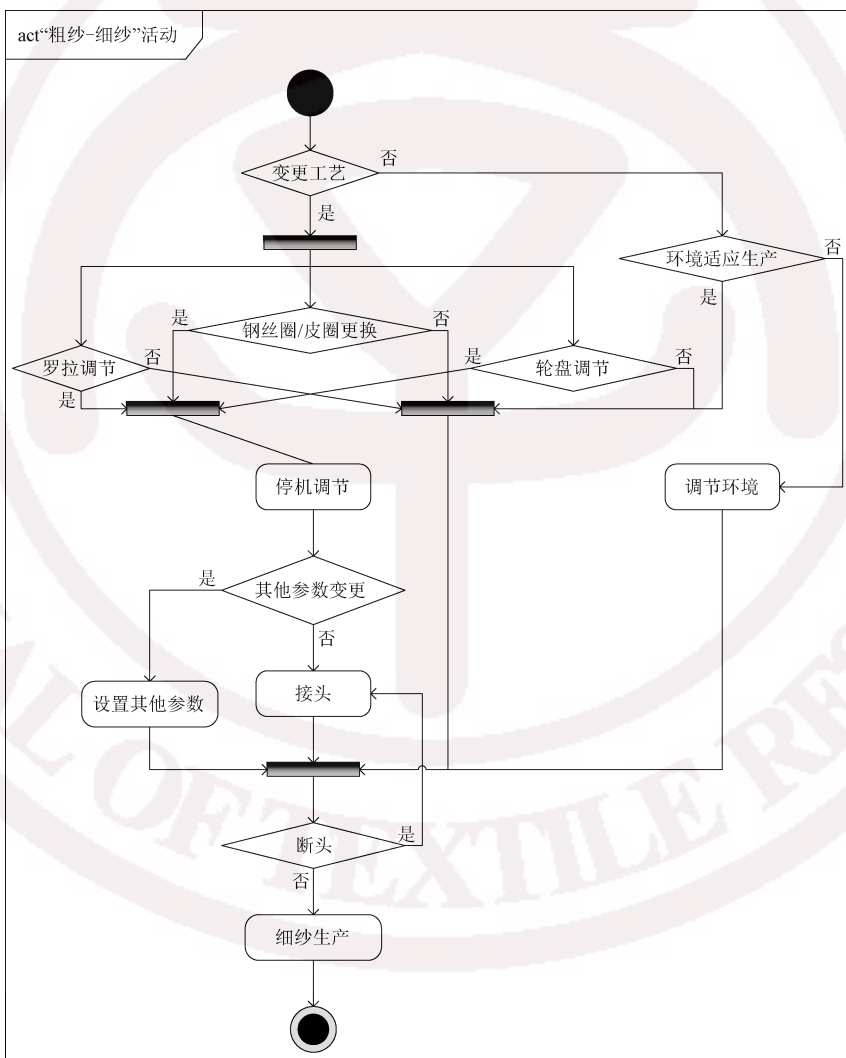


图 4 纤维从粗纱到细纱的活动模型

Fig.4 Activity model of fiber from roving to spinning

维流。

3.2.2 数据的状态机模型

状态机图是一种精确描述实体对象时间序列内

发生的行为或事件的图,它能更好地表达实体与其他实体或场景之间的交互过程。

环锭纺纱 CPPS 中数据流的状态转换是伴随着

纤维形态的变化而发生的,图 5 示出纤维从熟条状态变成粗纱状态过程中数据流的状态机模型。

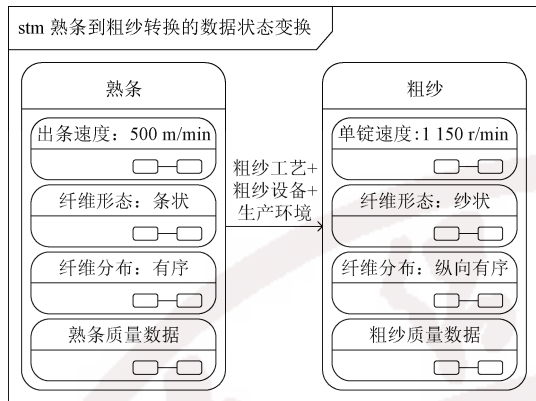


图 5 熟条到粗纱转换的数据流的状态机模型

Fig.5 State machine model of data flow for conversion from sliver to roving

首先,纤维从熟条到粗纱的状态变换的触发事件是粗纱工艺、粗纱机设备以及粗纱生产环境。其次,纤维在熟条和粗纱 2 种形态下的数据主要与纤维生产速度、纤维形态、纤维分布以及纤维质量相关,如:质量不匀率、条干 CV 值等。最后,纤维从熟条到粗纱的状态变换中,部分数据名称和类型都未变化,但值已经改变,如纤维形态的值从条状变成了纱状、纤维分布的值从有序变成了沿纵向有序等;部分数据类型未变但名称已经改变,如出条速度变成单锭速度,二者都是描述纤维生产速度;部分数据名称和类型都发生改变,如因在粗纱工艺中增加捻度,使得粗纱纤维除了和熟条纤维具有形同的质量不匀率和条干 CV 值外,还具有捻度和粗纱伸长率等。

3.2.3 控制流的序列模型

序列图是一种行为图,是对行为的精确说明,说明随着时间推移而发生的行为和事件序列,它能精确地指定实体之间的交互或某场景内交互。

环锭纺纱 CPPS 控制流的序列模型如图 6 所示。其中,控制指令从环锭纺纱的信息系统中发出,经过通信系统传输后到环锭纺纱物理生产系统中的被控对象。被控对象经过相关操作后,纤维流的状态也相应地发生了变化,一旦纤维状态变化,则会产生新的数据。被采集的新数据传输到信息系统,与历史数据集成,再经过分析、知识融合和迭代优化后形成优化的控制指令。优化的控制指令再次传输并作用到物理生产。随着时间推移,控制流不断被优化,生产过程也不断优化,生产的效率和产品的质量也会相应提高。

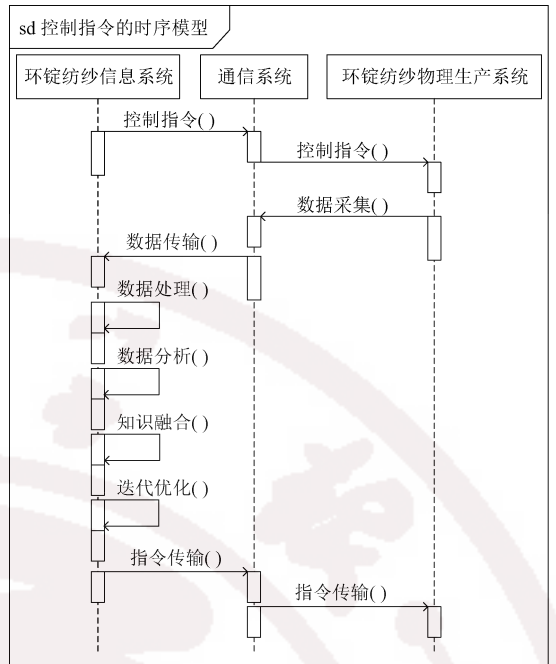


图 6 控制流的序列模型

Fig.6 Sequence model of control flow

4 结束语

本文提出纤维流-数据流-控制流融合的环锭纺纱信息物理生产系统(CPPS)模型,并采用 SysML 建模语言对其进行建模。首先,给出信息物理系统(CPS)的形式化定义;其次再结合环锭纺纱生产,提出环锭纺纱 CPPS 的形式化定义;然后提出基于纤维流-数据流-控制流融合的环锭纺纱 CPPS 模型;最后,通过 SysML 建模语言建立环锭纺纱 CPPS 的系统模型。所提模型有提高环锭纺纱生产智能化管控水平的前景。

FZXB

参考文献:

[1] MOSTERMAN P J, ZANDER J. Industry 4.0 as a cyber-physical system study [J]. Software & Systems Modeling, 2016, 15(1):17-29.

[2] JIANG Z Q, JIN Y, LI Q, et al. Method of tasks and resources matching and analysis for cyber-physical production system [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5):1-9.

[3] TOMIYAMA T, MOYEN F. Resilient architecture for cyber-physical production systems [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67: 161-164.

[4] RVRABIC R, KOZJEK D, MALUS A, et al. Distributed control with rationally bounded agents in cyber-physical production systems [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2018, 67:507-510.

[5] SIAFARA L C, KHOLERDI H, BRATUKHIN A, et al.

- SAMBA: an architecture for adaptive cognitive control of distributed cyber-physical production systems based on its self-awareness [J]. *Elektrotechnik & Information Technik*, 2018, 135(3):270-277.
- [6] ENGEL G, GREINER T, SEIFERT S. Ontology-assisted engineering of cyber-physical production systems in the field of process technology [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(6): 2792-2802.
- [7] LEE J H, NOH S D, KIM H, et al. Implementation of cyber-physical production systems for quality prediction and operation control in metal casting [J]. *Sensors*, 2018, 18(5):1428.
- [8] YAO B T, ZHOU Z D, WANG L H, et al. A function block based cyber-physical production system for physical human-robot interaction [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48:12-23.
- [9] 曹瑞珉, 白国力, 郝丽娜, 等. 基于混杂随机时延 Petri 网的服装定制 CPPS 建模和分析 [J]. *信息与控制*, 2018, 47(1):90-96.
CAO Ruimin, BAI Guoli, HAO Lina, et al. Modelling and analysis of hybrid stochastic timed petri net based custom-tailor cyber-physical production system [J]. *Information and Control*, 2018, 47(1):90-96.
- [10] 王勃, 杜宝瑞, 王金海. CPPS 及在航空领域的应用 [J]. *航空制造技术*, 2016, 42(13):67-72.
WANG Bo, DU Baorui, WANG Jinhai. CPPS and its applications in aviation industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technolog*, 2016, 42(13):67-72.
- [11] 张建良, 周芸, 徐润生, 等. 智慧钢铁工厂的互联网+CPPS 模式 [J]. *钢铁*, 2016, 51(4):1-7.
ZHANG Jianliang, ZHOU Yun, XU Runsheng, et al. Model of internet+CPPS for smart steel factory [J]. *Iron and Steel*, 2016, 51(4):1-7.
- [12] Cyber Physical Systems PWG. Framework for cyber-physical systems [EB/OL]. [2020-04-20]. <https://www.nist.gov/publications/framework-cyber-physical-systems-volume-1-overview>.
- [13] LIU Y, PENG Y, WANG B L, et al. Review on cyber-physical systems [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(1):27-40.
- [14] LIU Y, XU X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: a comparative analysis [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(3):034701.
- [15] LEE E A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models [J]. *Sensors-Basel*, 2015, 15(3):4837-4869.
- [16] MADNI A M, SIEVERS M. Model-based systems engineering: motivation, current status, and research opportunities [J]. *Systems Engineering*, 2018, 21(3): 172-190.
- [17] CAMERON B, ADSIT D M. Model-based systems engineering uptake in engineering practice [J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, 67(1): 152-162.
- [18] WANG W T, NIU N, ALENAZI M, et al. In-place traceability for automated production systems: a survey of ple and sysml tools [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3155-3162.
- [19] ZHU S F, TANG J, GAUTHIER J M, et al. A formal approach using SysML for capturing functional requirements in avionics domain [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(12): 2717-2726.