

## 基于数字孪生的柔性制造系统模糊建模

郭亮

山西大学, 太原 030006, 中国

**摘要:** 基于数字孪生的模糊决策机制为实现优化流程提供了巨大的机遇, 尤其是在大数据和新商业模式超乎想象的柔性生产环境中。技术的发展带来了数据量的不断增长和大数据分析技术的发展。例如, 物联网 (IoT)、5G、数字孪生和云计算技术。数字孪生涵盖了在虚拟环境中监控和指导生产过程的过程, 以应对日益增长的数据量以及快速准确地响应客户服务的能力。数字孪生能够实时分析生产环境中的内部和外部变化, 从而优化生产流程、降低成本并提高运营效率。它支持生产系统环境的持续学习和系统的自我优化。它包括基于数字孪生的集成智能生产模型以及对柔性生产环境中模糊决策方法的评估。

**关键词:** 大数据分析 (BDA); 智能生产; 数字孪生; 模糊决策; 柔性生产环境; 物联网系统

## Digital Twin Based Flexible Manufacturing System Modelling with Fuzzy Approach

Liang Guo

Shanxi University, Taiyuan 030006, China

**Abstract:** The digital twin-based fuzzy decision mechanism provides great opportunities for the realization of the optimization process, especially in the flexible production environment, with big data and new business modes beyond expectations. Developing technology has brought with it the increasing amount of data and the development of big data analysis techniques. We can give Internet of Things (IoT), 5G, digital twin and cloud computing technologies as examples. Digital twin covers the process of monitoring and directing the production processes in the virtual environment in line with the increasing amount of data and the ability to respond quickly and accurately to customer services. The digital twin provides the internal and external changes in the production environment allow instant analysis of data. In this approach, it is aimed to optimize the production process, reduce costs and increase operational efficiency. It provides continuous learning in the production system environment and self-optimization of the system. It includes a digital twin-based integrated smart production model and the evaluation of the fuzzy approach in decision-making in a flexible production environment.

**Keywords:** Big Data Analytics (BDA); Intelligent production; Digital twin; Fuzzy decision making; Flexible production environment; IoT system

客户行为和需求, 以及生产过程中所有参数值的收集和分析, 带来了大数据的概念。借助数字孪生, 可以分析数据的即时变化, 并根据客户需求指导生产。在提出的智能生产流程中, 数据通过传感器即时获取, 并在监控和评估数据的过程中使用模糊数字。同时, 通过这种方法, 可以在生产过程中出现任何故障、故障和停止时立即进行干预。为此, 开发了一个用于港口灵活性的决策支持系统 (DSS), 该系统利用其数字匹配功能, 推进了用于 KDS 灵活高效预测流程的仿真优化。

一些研究人员开始关注数字孪生及其应用。例如, Li 等人专注于物理资源的数字化, 并通过协作结构提高生产效率 [1]。Jens 等人将数字孪生与区块链架构相结合进行分析, 并进行了性能分析 [2]。Zhou 等人研究了数字孪生系统中决策支持系统的灵活结构 [3]。Vikkalonga 等人 [4] 指出, 数字孪生结构在决策过程中具有重要意义。Flora 等人 [5] 也强调了数字孪生结构在其生产系统中的重要性, 并特别强调了提高生产质量的重要性。他们详细研究了系统模型结构, 定义了构成系统的操作约束和变量, 并利用数字孪生揭示了有效参数 [6]。基于这种建模结构, 还定义了交互参数和柔性参数。本文提出了一种新方法, 利用数字孪生方法中的模糊决策机制来解决柔性生产系统 (FMS) 环境中的任务分配问题, 该方法能够在动态系统结构中做出最优决策 [7]。这项研究可以进一步促进其他传统行业中基于数字孪生的决策支持的发展 [8]。

### 一、柔性制造系统的大数据分析框架

通过在虚拟环境中测试新的设计或生产方案, 并测试可能遇到的情况, 可以降低成本。借助数字孪生, 可以测试虚拟生产环境、产品设计或制造策略中的任何变更。这一概念还涵盖了物理环境和随机环境结构的变化。通过这种结构, 可以即时跟踪生产计划和生产情况监控流程。通过这种结构, 还可以分析系统后期可能出现的运行不确定性情况。

仿真模型很难创建复杂的数学模型并定义实验环境和仿真参数, 而在基于数据且具备数字孪生的流程环境中, 数据分析则更加容易。借助大数据分析, 通过定义决策情境中数据之间的关系, 可以获得更有效的结果。数据收集和初步分析过程与数字孪生一起进行。

通过传感器健康地获取生产数据

对影响生产性能的参数进行相关性分析, 确定系统中可能的变化

利用统计和机器学习方法 (例如估计、误差检测和分类) 确定系统性能因素, 并将其应用于决策过程中使用的规则结构。

根据确定的目标参数, 应用决策方法来提高系统性能。

通过研究产品设计、构成产品的变量、生产过程结构以及系统中的各种工艺步骤, 可以高效地设计新产品以及生产过程中的计划和调度活动。该过程结构也采用了“相关性+估计+校正”的方法。

(1) 使用相关性分析评估变量之间的关系。

(2) 在估计过程中, 利用机器学习技术分析内部和外部因素参数, 并分析产品生产时间和产品销量等参数。

(3) 重新排列现有参数和阈值, 以改善系统性能并优化控制变量。

### 二、模糊方法在建议系统中的应用

该系统依赖于从外部环境或功能中感知信息的输入。知识结构的主要组成部分是[定义、特征和特征之间的关系。通用规则集是利用先前的知识结构创建的。它从系统知识库中检索和学习信息, 并根据这些信息设置一组规则。系统拥有的知识越多, 规则库就越丰富。

任务库在系统协调中发挥着重要作用。它涉及解决接收到的任务、解决问题以及通过将定义的任务与相关规则库进行比较来更新活动。代理能够高效地获取相关的数据库和要执行的功能。在任务实现过程中, 还会对

基础设施进行审查。

根据不同的标准对各种功能方案进行审查，并在最终决策过程中对获得的值进行评估。当系统接收到输入时，评估过程将从模糊多重评估标准矩阵开始。决策模块与用户界面相连，决策模块评估从用户接收到的数据和信息以及系统在用户界面中的性能。

在模糊决策模型中对数字孪生结构进行建模的过程中，变量、约束和层被建模为三元组  $\{X, L, C\}$ 。每层中的变量  $X$  和模糊结构

$= (1, 2, \dots, n)$  被表示为每层  $L_i \in L = \{L_1, L_2, \dots, L_r\}$ ；以及这些层中的参数和层的规则结构。在该符号格式中， $X$  表示变量， $L$  表示数字孪生的层， $C$  表示变量和事件状态的约束  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 。在本节中，每个参数都用彼此之间的笛卡尔积来表示。约束  $C_i$  是关于  $i = (i_1, i_2, \dots, i_k)$  的  $k$  元关系，即  $C_i(i_1, i_2, \dots, i_k)$ ，是笛卡尔积  $L_1 \times L_2 \times \dots \times L_{i_k}$  的子集，其中，每个  $L_{i_j} \in D$ 。每个参数或变量的隶属函数值  $\mu_{ci} \in [0, 1]$  取值范围为 0 到 1，并用预先确定的语言值表示。为了使系统变量能够在规则结构中表达，它们的值必须等于或大于指定的  $\mu_{ci}$  阈值。我们确定的阈值为 0.5。该模型可以用作一个网络，其中约束  $C_i$  是通过共享变量  $X_{ij}$  互连的节点。在模糊决策过程中，比较过程是通过考虑标准值和目标来进行的。当现有值与目标之间的关系建立后，规则就会出现，决策机制就会开始发挥作用。决策结构定义了各层的任务分配和目标。价值观、准则和目标取决于阈值，并据此做出决策。

### 三、面向数字孪生的柔性制造系统决策支持系统

“数字孪生”是资产或物理对象、产品、流程、服务或系统的动态虚拟数字表示。它以数字方式建模并显示现实世界对应物的状态、属性、状况和特性。“数字孪生”利用来自多个来源的数据，不断学习和更新自身，以表示资产或对象、产品、流程、服务或系统的当前状态或运行状况。最终用户和决策者能够获得深入的理解，并运用这些理解来提升他们的知识和认知，或优化建模实体及其与之交互的更大系统的性能。

数字孪生充当物理世界和信息世界之间的桥梁和纽带，能够提供更实时、更高效、更智能的服务。数字孪生也是物联网驱动的一项高级应用。它由五层组成，具有数字孪生模型的可追溯性和动态性，并采用数学表示。

数字孪生 =  $\{PL$ （物理层）、 $WML$ （虚拟模型层）、 $S_s$ （面向  $WT$  的  $PL$  服务）、 $DL$ （ $WT$  数据）、 $CN$ （连接） $\}$

在数字孪生建模过程中，需要考虑五个维度：构成系统的物理组件； $FL$ （虚拟组件），即从构成物理组件的几何模型或物理模型中获得的行为模型。该模型通过从传感器获取必要的数据来生成系统的行为模式。这些行为模式也构成了我们的规则库。

(1) 物理层 ( $PL$ ): 物理层包含传感器、检测设备和数据协议，用于监控生产活动。物理层包含工件、设备、工具、测量仪器和操作员等数据源，这些数据源可能包含静态和动态信息。它涵盖了系统的所有元素。

(2) 虚拟模型层 ( $VML$ ): 指反映系统可追溯性和动态结构的虚拟层。它是对物理状态和过程的现实动态结构进行多时间尺度建模的过程。它包括虚拟几何模型、物理模型、行为模型和规则模型。本文将研究三维结构中的组件和行为模式。

(3) 通信层 ( $CL$ ): 该层用于数据传输和分离，包括有线和无线网络。

(4) 数据层 ( $DL$ ): 该层用于存储数据并用于创建信息和规则。定义构成虚拟层的组件所使用的数据库系统、零件类型、生产中使用的机器类型，并定义它们之间的关系。

(5) 服务层 ( $SL$ ): 该层涵盖数据预处理、生产方法应用、过程质量支持、收集数据的监控和分析以及生产规则的发布。本节介绍了物理层和虚拟层之间的连接结构。服务系统、生产过程中运行机器的技术特性、电力

使用状态、确定虚拟级别所需的电力组件（时间、成本、可靠性）、在制品、空载和损坏替代状态的定义。

#### 四、案例研究

基于所提出的柔性制造系统结构，旨在通过研究零件-机床-工具之间的关系来确定合适的任务分配。具体而言，旨在基于系统组件之间的模糊关系及其相互关系，在数字孪生环境中执行任务分配过程。结合所获得的数据，对不确定、不完整情况和当前情况进行了评估，并揭示了系统决策结构。

影响决策机制的组件、彼此之间的假设知识状态及其关系如下所示。本研究仅介绍了系统内可能发生的操作活动及其相关规则，但未提供详细信息。该系统尝试运用模糊逻辑来解答上表中的问题。以下将基于该系统详细阐述决策过程中需要考虑的标准。模糊计算将采用分层应用。在应用过程中，系统决策机制将分别考虑机器流程、流程部件 A 和部件 C 的到期日关系。对列出的订单进行排序和分组。分组时也应注明金额。

在这种系统结构下，系统的工作方式由任务库和知识库中的一些规则和数据支持。有必要使用这些数据，在主决策架构中执行某些主任务和处理步骤。在这里，系统将自动智能地确保系统快速适应决策机制，同时考虑到不断变化的操作规则。在这里，必须解决诸如明确定义操作步骤以及系统对可能的情况替代方案进行适当评估等问题。决策机制将在评估零件选择规则时考虑以下情况。PA\_X 表示系统输入值区间；PA\_Y 确定系统输出值区间；P 表示系统所面临情况的概率值。

所提方法是一个即时、动态、多功能、多源资源共享的系统模型示例。接收、存储和分类数据为物联网环境中的异构应用提供了机会。这种结构实现了物理环境和计算机环境的集成。

#### 五、结论

该系统能够以更低的成本适应不断变化的生产条件，制定更有效的生产策略，并在柔性制造系统中构建更高效、更灵活的决策结构。通过该结构，可以更好地理解和建模动态结构。在不断变化的条件下，可以做出短期的正确决策。利用所提出的决策支持系统，可以通过考虑不同的目标函数和系统行为模型，开发一个决策支持模型，以确定最合适的策略。该系统可执行自适应参数控制和过程优化。

该系统中的流程简明地包含以下活动：

- 感知活动的实现
- 通过数字孪生进行感知，然后将知识转化为规则。
- 提问和决策

系统概括了执行任务的活动：启动任务、跟踪任务和完成任务的流程。总而言之，这种建模确保通过使复杂的结构易于理解来构建决策流程。当架构结构被激活时，系统将变得更加实用、易于理解、快速运行，并能够高效地进行部署。这种建模结构可以轻松地适应各种系统情况。

#### 参考文献

- [1] Li M, Li Z, Huang X, et al. Blockchain-based digital twin sharing platform for reconfigurable socialized manufacturing resource integration. *International Journal of Production Economics*, 2021, 240: 108223
- [2] Jens J, Hunhevicz JJ, Motie M, et al. Digital building twins and blockchain for performance-based (smart) contracts. *Automation in Construction*, 2022, 133: 103981
- [3] Zhou C, Xu J, Miller-Hooks E, et al. Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port. *Decision Support Systems*, 2021, 143: 113496.
- [4] Villalonga A, Negri E, Biscardo G, et al. A decisionmaking framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins. *Annual Reviews in Control*, 2021, 51: 357–373.
- [5] Florea A, Lobov A, Lanz M. Emotions-aware Digital Twins For Manufacturing, *Procedia Manufacturing*. 30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021), 2020: 15-18.
- [6] 刘建军, 曹晓燕, 周红, 等. 一种基于数字孪生驱动的工艺质量可追溯性和动态控制方法. *高级工程信息学*, 2021(50): 101395.

- [7] 范燕, 杨建, 陈建, 等. 柔性制造系统的数字孪生可视化架构, 制造系统杂志, 2021(60): 176-201.
- [8] Tao F, Zhang M, Nee AYC. Chapter 7 - Digital Twin-Driven Prognostics and Health Management. Academic Press, 2019: 141-167.