

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

自动化系统与集成 智能生产线虚拟重构技术 要求

Automation systems and integration –Virtual reconstruction technical requirements
for smart production lines

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前 言III

引 言IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语与定义 1

4 缩略语 3

5 总体架构 3

 5.1 概述 3

 5.2 物理层 4

 5.3 虚拟控制层 4

 5.4 重构功能层 4

6 流程定义 4

7 物理层要求 6

 7.1 数字采集能力要求 6

 7.2 网络要求 6

 7.3 设备可重构要求 6

 7.4 制造单元划分要求 7

8 数据模块要求 7

 8.1 数据内容要求 7

 8.2 数据实时性要求 7

 8.3 数据质量与数据清洗能力要求 8

 8.4 数据安全性要求 8

9 仿真模块要求 8

 9.1 仿真内容要求 8

 9.2 仿真模块建模步骤要求 9

 9.3 仿真模型性能要求 9

 9.4 仿真模型修改要求 10

10 监控模块要求 10

 10.1 异常原因种类与重构功能选择要求 10

 10.2 主动重构种类与重构功能选择要求 10

 10.3 重构结果验证与下达重构指令要求 11

 10.4 生产状态监测与重构效果评估要求 11

 10.5 重构结果反馈与模型学习更新要求 11

11 重构功能层要求 11

 11.1 工艺流程重构模块建模要求 11

 11.2 生产线布局重构模块建模要求 12

 11.3 生产调度重构模块建模要求 12

11.4 物流调度重构模块建模要求	12
11.5 重构算法性能要求	13
11.6 重构模型算法修改要求	13
参 考 文 献	14

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国自动化系统与集成标准化技术委员会（SAC/TC159）归口。

本文件起草单位：清华大学、北京机械工业自动化研究所有限公司、香港大学、北京理工大学、北京航空航天大学、北京电子工程总体研究所、联想（北京）有限公司、华中科技大学、重庆大学、中国科学院自动化研究所、浙江大学、航天科工仿真技术有限责任公司、北京工业大数据创新中心有限公司、东风汽车集团股份有限公司、中国电子技术标准化研究院、北京极智嘉科技股份有限公司、浙江国自机器人技术股份有限公司、苏州海通机器人系统有限公司等。

本文件主要起草人：

引 言

与传统生产线不同，智能生产线的建设需要多方面的技术支持，不仅仅是使用自动化的设备，更需要完成全设备的网络控制，能够进行高精度管理，全设备监控，并且可支持虚拟调试等需求。同时，也需要在生产线设计方法论上进行研究和更新。

针对当前智能生产线设计欠缺虚拟重构特性的应用挑战、生产线规划建设、生产制造中布局及流程不合理、任务分配系统和车间生产线响应速度慢、低价值密度异构数据中有效信息挖掘困难等问题，本文件提出了智能生产线虚拟重构框架、流程及技术要求，系统性地分析智能生产线的构成，明确智能生产线虚拟重构的步骤顺序，提出智能生产线数据采集、实体重构、仿真模型、虚拟重构相关要求，为智能生产线的优化运行提供一定的技术支撑，同时为企业、设计人员在规划智能生产线时提供一定的指导和借鉴。

本文件将智能生产线分为物理层、虚拟控制层和重构功能层，提出了物理层数据采集与传输能力、柔性重构能力、虚拟控制层数据清洗和存储能力、仿真内容和精度能力、重构流程控制及重构结果评估反馈能力、重构功能层生产线及配套虚拟优化能力等方面的相关要求。

自动化系统与集成 智能生产线虚拟重构技术要求

1 范围

本文件规定了智能生产线虚拟重构技术的总体架构、流程定义、物理层要求、虚拟控制层（数据模块、仿真模块、监控模块）要求及重构功能层要求。
本文件适用于智能生产线及其相关系统的规划、设计、实施和应用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。
GB/T 39334.2-2020 机械产品制造过程数字化仿真 第2部分：生产线规划和布局仿真要求
GB/T 37973-2019 信息安全技术 大数据安全管理指南
GB/T xxxxx-xxxx 信息安全技术 电信领域大数据安全防护实现指南

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

智能生产线 smart production line

将自动化技术、信息技术、仿真技术、监测技术、优化技术应用在设备、产品、资源及配套中，用数据、仿真模型和算法对生产过程进行计划、实行、管理、监控与优化的实施单元。

3.2

虚拟生产线 virtual production line

实体生产线在虚拟空间的映射，可准确反映实体生产线的事件。

3.3

生产线重构 production line reconfiguration

将生产线的制造资源进行重新组合，重新确定流程、布局、排产、物流，优化生产的过程。

3.4

虚拟重构 virtual reconfiguration

利用智能生产线提供的数据，对生产线设备、工艺、产品、活动、状态进行仿真，并对生产线流程、布局、排产、物流进行实时优化。

3.5

制造单元 manufacturing unit

承担生产过程中部分工艺环节的设备组合。设备组具有特定的功能，设备间具有一定的联系。

3.6

运输设备 transportation facility

配合生产过程，完成在稀缺资源分配过程中所涉及的物流调配的设备。

3.7

物料 material

产品生产制造过程中使用的原料或部件。

3.8

数字采集 digital acquisition

将传感器植入生产线设备中，实时采集描述设备特定运行状态的数据，并通过网络传入数据库中。

3.9

数据清洗 data cleaning

发现并纠正数据文件中可识别的错误，包括检查数据一致性、处理无效值、填补缺失值、剔除重复值等。

3.10

仿真模型 simulation models

对生产线中各类设备的物理特征和功能特性的数字化表达，以及对设备布局、工艺流程和设备间关系等要素的数字化定义。

3.11

工艺流程 flow process

生产对象由投入到产出，经过一定顺序排列的加工、搬运、检验、停放、储存的过程。

[来源：GB/T 24742-2009，定义2.1]

3.12

生产线布局 production line layout

生产线布局是指在满足给定的空间或性能约束条件下，将工位、设备、物料缓存、仓储等各类设施合理、优化地布局在特定空间内，从而有效、经济、安全地达到预期目标。

[来源：GB/T 39334.2-2020，定义3.2]

3.13

生产调度 production scheduling

不同的制造任务在特定的时间分配给机器，同时尽量减少制造时间（或其他目标）。

3.14

物流调度 logistics scheduling

在稀缺资源分配过程中所涉及的物流调配。

[来源：GB/T 37393-2019，定义3.7]

4 缩略语

- 下列缩略语适用于本文件。
- AGV：自动导引运输车（Automated Guided Vehicle）
 - BOM：物料清单（Bill of Material）
 - ERP：企业资源计划（Enterprise Resource Planning）
 - HMI：人机接口（Human Machine Interface）
 - I/O：输入/输出（Input/Output）
 - MES：制造执行系统（Manufacturing Execution System）
 - NC：数控加工（Numerical Control）
 - PDA：生产数据采集（Production Data Acquisition）
 - RFID：射频识别（Radio Frequency Identification）
 - TCP/IP：传输控制协议/互联网协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）
 - WLAN：无线局域网（Wireless Local Areas）

5 总体架构

5.1 概述

智能生产线虚拟重构包括物理层、虚拟控制层和重构功能层，总体架构如图1所示。应涵盖产品的生产制造过程，准确反映生产制造过程中的事件，并做出实时优化。

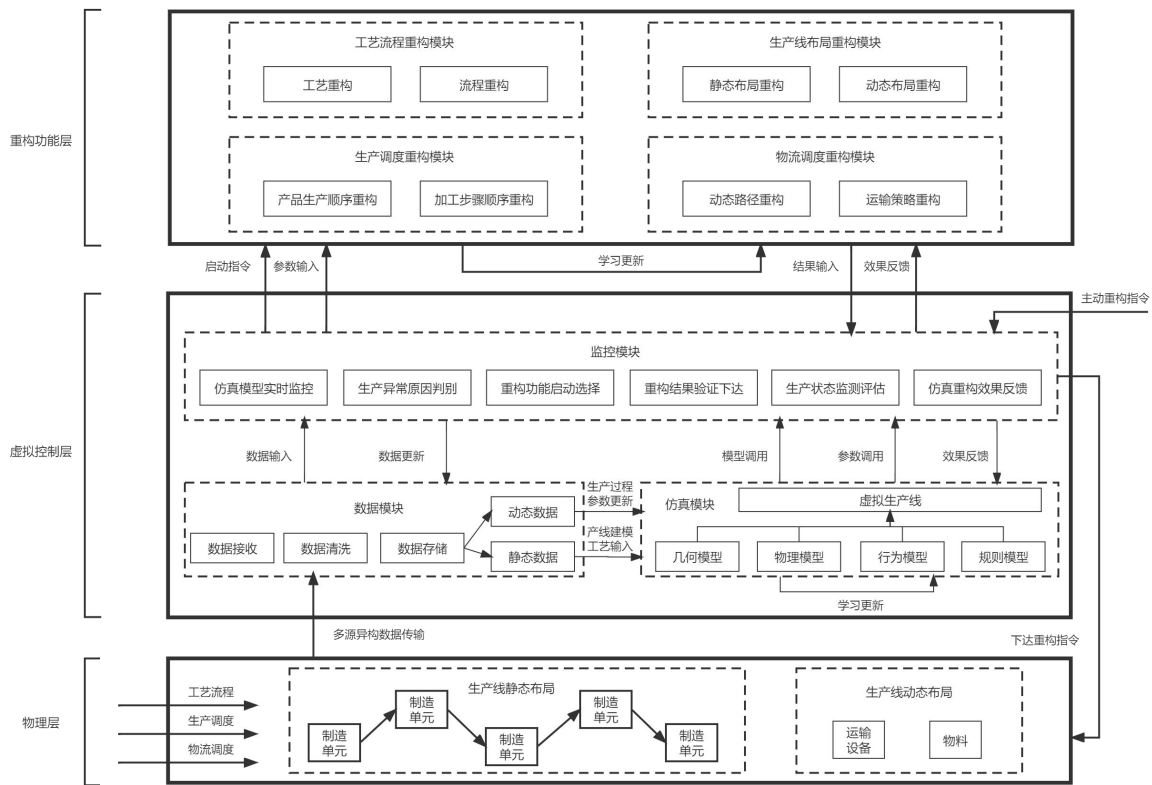


图1 智能生产线虚拟重构总体架构

5.2 物理层

智能生产线的物理层由多种实体组成，如制造单元、物料和运输设备。智能生产线应根据工艺流程、生产调度、物流调度等输入，完成生产任务。

注1：生产线承担了主要的生产任务，由多个制造单元构成；运输设备负责给生产线上每一工位运送生产过程中所必须的物料。不同制造单元具有不同的功能，承担不同的生产任务，多采用数字化设备，可实时采集数据。

注2：制造单元的位置相对稳定，可更改程度低，生产开始后不再改变布局，构成生产线静态布局；物料和运输设备位置可更改程度高，可根据生产过程需要实时调整，构成生产线动态布局。

5.3 虚拟控制层

智能生产线的虚拟控制层由数据模块、仿真模块和监控模块组成。

数据模块负责接收并清洗物理层采集到的多源异构数据、并进行存储。

注：数据是虚拟重构层的底层资源，是进行虚拟重构过程的基础。数据分为静态数据和动态数据，静态数据稳定性高，基本不随时间发生改变；动态数据时刻变化，具有时效性。

仿真模块包含生产线的多种仿真模型，分别为几何模型、物理模型、行为模型、规则模型。仿真模型应能描述生产线、物料和运输设备的结构和功能。仿真模型应能实时利用数据模块新处理的数据，更新模型的状态。四种仿真模型的组合，形成虚拟生产线。仿真模型应具备自学习功能，可根据实际仿真精度对仿真模型做出调整。

监控模块应对虚拟重构过程做出管理，实时响应生产过程中的异常。监控模块实时调用虚拟生产线仿真模型，判断生产过程是否出现了异常，找到生产异常发生的原因，并下令启动全部或部分重构功能，提取功能模块所需的参数并输入至重构功能层。之后接收重构功能层给出的结果，利用仿真模块的仿真模型对结果进行虚拟验证，通过后对物理层下达相应的重构指令。物理层进行实体重构，继续生产过程。重构完成后，监控模块负责继续监测生产状态，分析实时生产数据，检查仿真模型是否准确，评估重构效果是否达到预期，将结果反馈给仿真模块和重构层，供其学习更新使用。

5.4 重构功能层

智能生产线的重构功能层是实现智能生产线实体虚拟重构的主体部分。重构功能层主要包括产品工艺流程重构模块、生产线布局重构模块、生产调度重构模块、物流调度重构模块，通过内置模型和算法计算得到的结果，对生产过程做出实时优化。四类功能的算法应具备自学习功能，根据实际重构效果调整重构策略。

6 流程定义

智能生产线虚拟重构的流程如图2所示。流程分为以下四个阶段：

a) 数据采集与仿真（A）阶段

A1 智能生产线物理层将多源异构数据传输到虚拟控制层中。

A2 虚拟控制层的数据模块接收数据，对数据进行清洗和存储。

A3 仿真模块实时根据数据变化修改仿真模型。

b) 重构判断与实行（R）阶段

R1.1 监控模块利用实时仿真模型，实时发现生产过程中的异常（设备损坏、在制品堆积、负载不均衡等）。

R1.2 监控模块也可以提前接收来及外部的生产线变化信息（新产品上线、紧急插单、设备维护、设备维修完成等），接受主动开启重构功能的指令。

R2 监控模块判断是否启用全部或部分功能，是否对生产线进行虚拟重构优化。

R3 重构功能层根据指令，启动相应的功能模块。若全部重构，R3共包含四个步骤：

R3.1 工艺流程重构模块确定生产过程包含的工艺种类及工艺顺序，也可对工艺本身进行更新和优化。

R3.2 生产线布局重构模块对智能生产线进行重新布局，确定智能生产线所包含的制造单元及单元的位置，并确定物料和运输设备的位置。

R3.3 生产调度重构模块使用生产调度算法进行排产，确定产品生产顺序和加工步骤顺序，以实现生产过程的既定目标。

R3.4 物流调度模块利用物流调度算法，确定线边库存、AGV运行路径、AGV调度计划等物流管理策略。

若只启用部分功能，则仅执行相关步骤即可。

c) 结果验证与下达（V）阶段

V1 监控模块将根据计算结果，利用仿真模型进行虚拟测试。

V2 通过测试后，监控模块对智能生产线各部分下达新的生产指令，并对数据模块中相应的数据进行更新。如未通过则重新调整。

V3 物理层执行指令，完成调整。

d) 效果监控与反馈（S）阶段

S1 执行层采集调整后智能生产线的各类数据并上传。

S2 数据模块继续接收并处理来自智能生产线的各类数据。

S3 监控模块监控生产过程的状态及变化。

S4 对上一轮重构效果进行评估，对结果进行反馈。

S5 仿真模块和重构功能层学习反馈结果，做出相应调整。

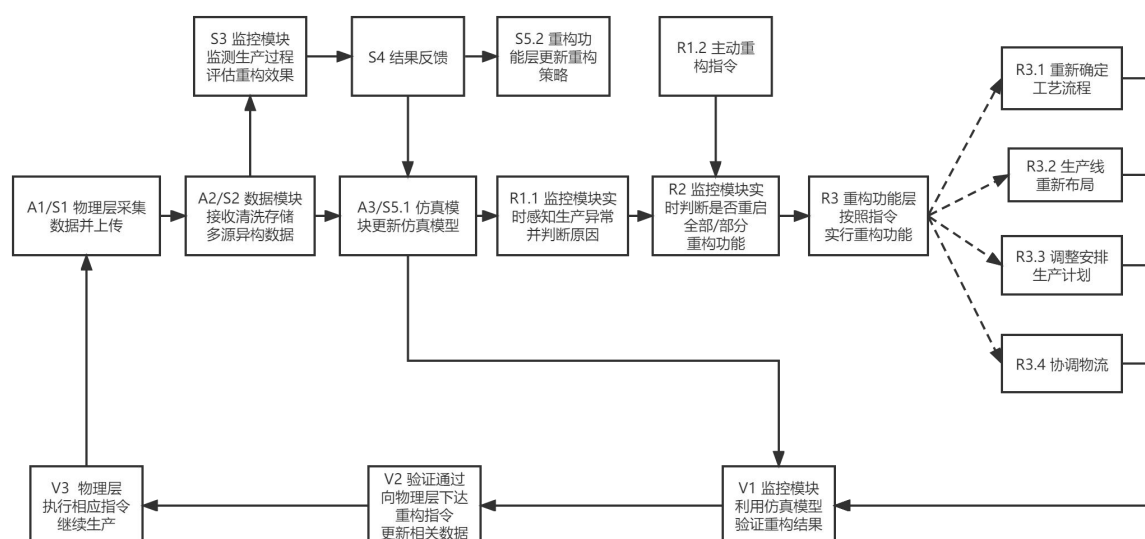


图2 智能生产线虚拟重构的流程定义

实体生产线的重构，可仅根据重构指令，实现虚拟重构给出的工艺流程、生产线布局、生产调度和物流调度策略，完成相应的操作。

注1：智能生产线的虚拟部分体现在生产线虚拟仿真和重构结果虚拟运行；智能生产线的重构部分体现在实时、快速规划工艺流程、生产线布局、生产调度和物流调度。智能生产线虚拟重构，集合了运筹优化和仿真优化的优点，既利用运筹模型为优化提供方向、又利用仿真模型快速验证结果。同时克服了运筹优化结果难验证、仿真优化过程盲目尝试的缺点。

注2：与传统生产线规划或重构方法相比，智能生产线虚拟重构的优势在于：实时采集、分析数据并建模，形成虚拟生产线，使重构结果与生产线的实时状态更匹配；通过虚拟测试，可尝试多种重构方案，提高重构的优化水平；降低验证方案可行性或最优性的成本，并且降低重构后对生产过程带来不良影响的风险；可对重构效果进行评估，反馈给仿真模块和功能模块，对仿真模型和重构算法进行训练，快速提升优化水平。

7 物理层要求

7.1 数据采集能力要求

对智能生产线虚拟重构的物理层而言，每一制造单元设备、物料和运输设备均需进行数据采集，以方便虚拟控制层进行监控、分析、指挥等操作。

物理层数字采集能力应符合以下具体要求：

- a) 每一制造单元设备和运输设备应具备通信功能，能够与虚拟控制层连接，能够向数据模块提供生产过程的数据信息，包括加工状态、设备状态、位置信息、生产信息、物流信息、仓储信息、故障信息等。同时能够接受虚拟控制层下达的任务指令，包括为了完成生产过程所设置的参数数值和操作指示；
- b) 每一设备应具备和其他设备交流信息的能力，实现全生产线信息互通；
- c) 每一设备应具备一定的交互能力与可视化能力，方便工作人员对设备进行必要的处理，直观且快速地了解生产状态；
- d) 除设备外，制造单元之间应添加一定的数采装置，采集生产过程相关信息，如生产节拍等；
- e) 物料需具备一定的识别性，可通过加装RFID设备等实现，并应具备自动写入或更新数据的能力；
- f) 在进行数据采集能力设计时，需事先确定每一设备数据采集的范围和类型；
- g) 确定每项数据的标准格式，并按照规定格式进行采集，或对采集的非标数据进行标准化转换。

7.2 网络要求

网络部署应能够实现工厂全覆盖，使物理层与数据模块之间、物理层与监控模块之间、物理层内部全面互联，实现无缝的信息传输，应符合以下具体要求：

- a) 提供但不限于专用网络、物联网、传感网络、以太网、智能网关等工业现场通信网络集成功能，支持国标所列的网络标准，提供标准的协议转换模块，支持标准统一的通讯传输协议；
- b) 可传达对设备进行数据采集、数据传输、数据管理的指令，并下达重构指令；
- c) 保证数据传输的实时性、准确性和稳定性；
- d) 支持远程访问、提取、分析与诊断。

7.3 设备可重构要求

智能生产线在建造过程中，应考虑增加设备的柔性，符合以下具体要求：

- a) 设备布局可重构——每一制造单元设备和运输设备应尽可能可以改变摆放位置，实现多种布局；

- b) 设备功能可重构——每一制造单元设备和运输设备应尽可能拥有多种功能，可以是机器本身已经具备多种功能，也可以是通过改造等方式，让设备可以改变成多种形态，实现不同的功能；
- c) 模具快速可重构——每一制造单元的设备应具有快速换模的能力，以快速响应智能生产线生产产品种类的变化；
- d) 运行路线可重构——每一运输设备应可以按照多种路线运行，如AGV可以按照不同的路线行驶。

7.4 制造单元划分要求

物理层在划分制造单元时，可遵循多种规则。可按照工艺划分，每一制造单元能够完成一定种类的工艺步骤；也可按照位置划分，将布局关系相近的设备划分在一个单元。

物理层的不同单元连接时，接口设计应符合以下具体要求：

- a) 不同制造单元应能够自由连接，以满足不同种类产品的生产需要；
- b) 明确每一制造单元的输入与输出，包括设备、功能和位置；
- c) 保证物料位置与制造单元之间运输的流畅性；
- d) 保证在制品在不同制造单元间运输的流畅性。

8 数据模块要求

8.1 数据内容要求

智能生产线数据是虚拟重构层的底层资源，包括静态数据和动态数据，所采集的数据内容应能够满足其他模块的使用需求。

智能生产线静态数据内容应包括但不限于下列内容：

- a) 完善且详实的设备档案信息数据，包括设备编号、功能描述、2D/3D 模型、参数描述等；
- b) 全面的工艺信息数据，包括工艺内容、实现设备、用时信息、成本信息等；
- c) 全部产品的详细信息数据，包括产品所需物料、所需工艺、加工设备、生产用时等；
- d) 布局信息数据，包括设备和物料可以放置的位置。

智能生产线动态数据内容应包括但不限于下列内容：

- e) 用于描述设备运行状态的信息数据；
- f) 用于描述设备正在进行的操作步骤的信息数据；
- g) 库存信息数据，包括剩余物料数量、线边库存数量、在制品堆积数量等；
- h) 设备完成每一工艺步骤或运输步骤的实际用时信息数据；
- i) 其他可用于生产过程性质描述的信息数据。

8.2 数据实时性要求

智能生产线物理层部分采集产线数据后，应利用网络实时传输，与数据模块进行对接。由于智能生产线虚拟重构具有动态性、实时性，所以对于数据的实时性要求较高，应符合以下具体要求：

- a) 设备数据采集时延不大于10ms；
- b) 动态数据感知时间不大于20ms；
- c) 虚实同步交互相应不大于25ms；
- d) 明确传输数据的内容，避免数据间发生信息重复；
- e) 传输前适当压缩并清洗数据，剔除重复数据，减少传输数据规模；
- f) 数据传输时需使用成熟、稳定的网络协议；

- g) 设计数据传输系统时，可采用冗余设计，采用冗余网关和冗余路由器，防止传输时发生冲突，影响实时性；
- h) 动态数据采用实时数据库和历史数据库相结合的方式进行数据存储。实时数据库主要存储近期生产过程控制与检测相关的数据，方便其他模块分析使用。历史数据库应存储需较长时间储存的数据。

8.3 数据质量与数据清洗能力要求

仿真模块对数据质量的要求很高。智能生产线数字采集具有数据规模大、数据结构杂的特点，容易出现重复、不完整、丢失、格式不一致和过时的问题。数据质量管理应符合以下具体要求：

- a) 实时数据清洗——基于小波变换、统计学、预设规则等方法对实时生产数据进行清洗，滤除丢弃低质不稳、超出边界数据、冗余数据；
- b) 降维、提取特征——基于统计学、傅里叶变换等方法，进行数据特征提取及特征选择；
- c) 多源异构数据融合——能够支持不同来源的结构数据之间的转换，整合成时序数据，使数据符合虚拟重构层其他模块的使用标准；
- d) 缺失数据填补——发生数据漏采、数据丢失时，应使用统计方法、机器学习方法、组合优化方法对缺失数据进行预测，填补数据，保证数据完整性；
- e) 数据实时纠错——自动监测数据错误，并用统计方法进行定位和纠错。
- f) 动态评估优化——利用聚类分析等统计方法及规则约束的协变量置信评估方法对处理后的数据进行一致性验证、可靠性评估和优化，以确保数据的准确性。

8.4 数据安全性要求

对于智能生产线，数据在采集、传输、存储、使用、共享过程中需要注意安全问题，以免泄露并对生产造成不良影响，应符合以下具体要求：

- a) 采集安全性——明确数字采集设备的IP地址、端口号、采集内容等，采集过程应进行数据源验证，避免外部数据混入；
- b) 传输安全性——对传输网络的关键节点进行冗余处理，尽量采用单向传输方式，对数据端口进行加密，使用安全协议传输，对传输的数据进行完整性检查；
- c) 清洗安全性——制定数据清洗原则，保留原始数据包含的重要信息，避免过度清洗；
- d) 存储安全性——对数据进行分级，不同级别采用不同的管理策略，可使用分布式存储等新型存储技术，并明确管理人员责任，数据库应具备安全防范策略，设置访问权限，支持数据库的更新升级，具有入侵应对措施，具备数据容灾备份和恢复能力。
- e) 使用安全性——明确使用权限，确保使用环境安全，记录数据使用情况信息，对数据添加水印，禁止私自收集、篡改数据；
- f) 共享安全性——明确共享数据的内容边界，对数据进行脱敏处理，适当控制数据导出权限。

其他要求应符合GB/T 37973-2019和GB/T xxxxx-xxxx（信息安全技术电信领域大数据安全防护实现指南-征求意见稿）第7章中的条款。

9 仿真模块要求

9.1 仿真内容要求

仿真模块包含几何模型、物理模型、行为模型和规则模型。应符合以下具体要求：

- a) 几何模型——主要描述设备物料的几何尺寸、位置、角度等几何空间信息，如设备2D模型、3D模型、物料尺寸等；
- b) 物理模型——主要描述重量、密度、动力学、运动学特征，如物料重量、设备电流信息、设备转速信息等；
- c) 行为模型——主要描述物料、设备部件、制造单元间加工、运输、装配等行为，如操作步骤用时，在制品运输时间，生产节拍等；
- d) 规则模型——主要描述物料、部件、设备、生产线间逻辑关系，如设备间耦联顺序规则、制造单元移动范围、运输设备运行路线等。

四种模型建立完成后，联合形成完整的虚拟生产线模型，实时映射实体生产线。

9.2 仿真模块建模步骤要求

仿真模块应具备整条生产线的虚拟仿真模型。应按照GB/T 39334.2-2020第6章中的条款进行建模。在此基础上，还应符合以下要求：

- a) 需对每一制造设备进行建模，完成每一设备的几何模型、物理模型、行为模型。共分为四步：
 - 1) 明确生产线内部要建模的机器和部件。所选取的机器和部件，应对生产系统的功能实现至关重要，且需要受到持续的关注。每个模型所对应的机器和部件都应参与生产过程的主要步骤，这些步骤将受到机器特性、布局、排产等方面的影响，因此模型可以用于虚拟重构层的生产优化当中。这样将避免对非关键子系统的建模，从而降低了生产线数字模型的复杂度。
 - 2) 确定每一机器模型的复杂度。在建模层面，采用黑盒（不了解内部操作）、灰盒（用理论数据完成模型）或白盒（完全描述组件）的方法。建模级别由模型参数化的可用数据确定。理想情况下，所有机器都将被建模为白盒，但在现实情况中，由于缺少数据，一些组件被建模为灰盒，而另一些组件被建模为黑盒。需要注意的是，由于白盒建模需要更多的时间，并且增加了模型参数的数量，对于非关键的机器，即使掌握全部数据，也可使用灰盒和黑盒的级别进行建模。对于关键工位的关键机器，则需使用白盒级别进行建模。
 - 3) 明确定义和指定仿真需要收集的数据。随着数据收集维度的增加，模型仿真的计算时间也随之增加，因此，这一步非常重要。定义生产过程需要采集的数据，将其分类为“真实传感器直接可用”类别；之后识别无法直接采集得到的所需数据，将其分类为“通过其他方法进行估计”类别，明确这类数据的定义。随后调用或估计相应的数据，并输入到制造单元仿真模型中。
 - 4) 在数据选择完毕后，需要定义将要更新的建模参数，以便根据实际生产数据的情况调整模型相应的状态。这些参数将是可编辑的，并将与实时仿真调整相关联。
- b) 描述设备间的逻辑关系，完成规则模型，并建立完整生产线模型。在不同模型间加入生产过程的条件与约束，使同一制造单元中的设备联系起来，建立完整的数字生产线模型，使模型与实际生产线生产过程相匹配。生产线仿真模型应清晰体现出每一单元的结构，描述每一单元内所包含的设备种类及数量，包含设备模型、参数描述等；应能描述单元所具备的功能信息，同时也应提供其他有助于做出生产决策的信息，如使用成本等；应清晰展示单元内设备的状态信息，比如设备是否损坏；应能展示其活动范围，方便布局重构。
- c) 对物料和运输设备进行建模。对物料的几何、物理状态做出建模；对运输设备的几何、物理、行为状态做出建模。

9.3 仿真模型性能要求

智能生产线虚拟仿真模型应具备一定的性能,符合仿真建模基本原则的同时,满足一定的参数要求,以支持其他部分的运转。应符合以下要求:

- a) 模型的假设应准确,不违背客观规律;
- b) 模型分级应准确,不同级别的模型,建模复杂度应满足功能模块的需求;
- c) 模型对生产线设备、设备间关系的描述应准确,能够正确刻画生产过程中的各项活动;
- d) 模型使用的参数应准确,否则将影响功能模块的重构效果;
- e) 模型对物理实体和生产过程属性覆盖率应尽可能的高,具体根据实际应用需求确定,一般不低于95%;
- f) 生产线孪生仿真粒子数不低于100万个;
- g) 显示帧率不低于40fps;
- h) 生产线模型仿真精度应与属性覆盖率相匹配,一般不低于95%;
- i) 具备TB级产线仿真大数据计算处理能力;
- j) 支持智能生产线在线实时虚拟功能,实时运行同步时间不大于0.5s;
- k) 支持包含千万图元、百兆纹理的虚拟产线场景实时仿真。

9.4 仿真模型修改要求

如果在实际生产过程中,发现实际情况和虚拟重构设想的结果出入较大,应考虑修改仿真模型,改善重构效果。可从以下几个方面考虑修改:

- a) 修改建立模型的假设条件,重新选择仿真使用的数据;
- b) 提高或降低模型复杂度级别;
- c) 重新确定模型使用的参数及数值;
- d) 检查数据的准确性,如生产操作步骤用时,运输用时,库存水平等。

10 监控模块要求

10.1 异常原因种类与重构功能选择要求

生产过程发生异常时,生产线实时采集的数据会发生相应的波动,导致仿真模型参数发生改变,监控模块根据参数值判断异常的原因。主要异常原因种类包括:

- a) 设备损坏,体现在仿真物理模型中描述设备状态的参数发生变化,如设备电流、设备转速等,重构时应将该设备剔除出生产线。主要使用生产计划重构功能进行重构,在不使用该机器的情况下重新安排生产计划。其他功能视情况辅助使用;
- b) 在制品堆积,体现在在制品几何模型中描述位置的参数大量重复,大量在制品集中在一点。这说明生产过程中存在瓶颈,应首先对工艺流程进行重构,避免在制品堆积的问题;调整生产计划,使顺序靠前加工步骤的上机时间延后,缓解堆积情况。
- c) 负载不均衡,体现在不同制造单元行为模型中描述空闲时间、生产节拍的数据差异较大。应首先对生产线布局重构,调整静态布局;调整生产调度,对负载较重的制造单元,应调整相应的参数,给予其更多的加工时间。
- d) 线边库存水平高,体现在物料几何模型中描述位置的信息。应使用物流调度重构,调整物料运输间隔,降低单次运输数量。
- e) 工艺不达标,体现在设备物理模型、行为模型相关信息和在制品几何模型、物理模型中有关产品质量的信息。应使用工艺重构,改变工艺实施的过程,提升产品质量。

10.2 主动重构种类与重构功能选择要求

生产过程中，外部会随机输入事件，此时需要智能生产线主动重构，响应随机事件。主要主动重构种类包括：

- a) 新产品上线，主要使用工艺流程重构功能和生产线布局重构功能，保证新产品的正常生产；
- b) 接受新订单/紧急插单，主要使用生产计划重构功能和物流重构功能，按时完成生产任务；
- c) 设备维护/设备维修完成，主要使用生产线布局重构、生产计划重构和物流调度重构，在条件中减去或增加相应的设备。

10.3 重构结果验证与下达重构指令要求

重构功能层的各模块进行重构后，将结果输入给监控模块。监控模块利用仿真模型，对结果可行性、优化性进行验证。将仿真模型参数按照工艺流程重构和生产线重构结果进行修改，将生产计划、物流调度输入到仿真模型中并运行。如能正常运行，则说明结果具有可行性。计算重构目标的函数值，和重构前函数值相比较，判断优化性。

通过后，将结果输入到物理层中。物理层接到指令后，明确工艺流程，即包含的工艺步骤及顺序；重新安排制造单元及内部设备、物料和运输设备的位置，构成新布局；设备按照新生产计划进行生产；物流按照新调度策略配合生产过程。

10.4 生产状态监测与重构效果评估要求

实体重构完成，正式进入生产后，监控模块要继续对生产状态进行监测，对重构效果进行评估。评估内容主要为可行性评估和准确性评估，应符合以下具体要求：

- a) 提取产品质量信息，检查是否能生产出合格的产品；
- b) 提取每一产品每一加工步骤的开始时间、结束时间、加工时长信息，检查是否与生产计划中预计的一致；
- c) 提取制造单元间在制品库存信息，检查是否由于发生在制品堆积情况；
- d) 提取设备负载信息，检查负载是否均衡；
- e) 提取线边库存信息，检查物料是否短缺或过剩；
- f) 提取物料损耗信息，检查是否有所下降；
- g) 提取产品生产完成时间信息，检查是否按期交货，并缩短总制造时间；
- h) 提取生产成本信息，检查是否有所下降。

10.5 重构结果反馈与模型学习更新要求

在进行实际重构评估之后，监控模块需将结果反馈给仿真模块和重构功能层。仿真模块和重构功能层根据结果进行学习，调整模型。

模型学习更新的过程应自动化、常态化。除在实际生产过程中得到重构效果反馈，也可以在虚拟重构层中对模型进行训练。更改模型的参数值，或使用新方法，利用之前重构时使用的数据，计算得到新的重构结果。监控模块利用仿真模型进行虚拟运行，将多种重构结果进行比较，反馈给模型，使模型自主学习。

11 重构功能层要求

11.1 工艺流程重构模块建模要求

工艺流程重构模块分为工艺重构和流程重构。工艺重构是指针对工艺本身进行修改和更新。在制造过程中，若因工艺不达标，影响了产品质量、物料利用率、订单完成时间等指标，则需进行工艺重构。

流程重构是指确定生产过程中需要执行的工艺,并确定工艺间是否有先后要求,给出工艺间的排序规则。在制造过程中,若因流程不合理,出现了产品无法正常生产或在制品堆积等情形,则需进行流程重构。工艺流程重构模块设计应符合以下具体要求:

- a) 数据要求——各项工艺的参数及指标;各项工艺用时;工艺顺序限制;工艺实施过程相关数据。
- b) 目标要求——工艺重构方面,确定新工艺的实施过程;流程重构方面,确定生产过程所包含的工艺种类及顺序;新工艺流程应能生产出功能完整,质量过关的产品,装配过程具有可操作性和稳定性,避免在制品库存堆积;目标函数应和产品质量、装配时间、库存水平有关。
- c) 限制条件要求——主要和工艺顺序限制有关。

11.2 生产线布局重构模块建模要求

生产线布局重构模块分为静态布局重构和动态布局重构。静态布局重构是指重新确定生产线所包含的制造单元,并重新安排对制造单元的位置和相关关系,以能够完成事先预定的工艺和流程。动态布局重构是指根据静态布局和生产调度,安排每一时刻物料、运输设备、线边库等高活动度生产资源的位置。当出现制造产品种类更改或设备损坏等情况时,需进行生产线布局重构。生产线布局重构模块设计建模应符合以下具体要求:

- a) 数据要求——建模时,需使用以下数据:工艺流程、各制造单元可完成的工艺等有关功能的静态数据;各制造单元可放置的位置、线边库可放置的位置、运输设备可放置的位置、物料可放置的位置等有关位置的静态数据;制造单元移动成本、运行成本等有关成本的静态数据;生产调度策略等有关生产过程的动态数据。
- b) 目标要求——新布局应能保证设备的正常运行,所选择的制造单元应能够完成全部预定的工艺步骤,制造单元排布位置合理,并能够有序链接,保证物流通畅,布局应能够提升生产效率,降低生产成本,保证生产安全。模型中,可将生产效率、生产成本等目标进行量化,写出相应的目标函数。
- c) 限制条件要求——根据所获得的数据,写出相应的限制条件。主要限制条件为:有关制造单元移动范围的限制;有关制造单元是否选用的限制;有关物料、运输设备、线边库等高度动态资源的移动范围的限制。

11.3 生产调度重构模块建模要求

生产调度重构模块分为产品生产顺序重构和加工步骤顺序重构。产品生产顺序重构是指将待生产的产品按照新的顺序进行生产,使其符合生产条件限制并满足生产需求。在流水车间中,由于工艺之间不可调换顺序,产品生产顺序在很大程度上决定了生产调度的策略。加工步骤顺序重构是指重新确定每一产品的工艺顺序,并将每一加工步骤分配到不同的加工设备上,往往见于开放车间。生产调度重构模块建模应符合以下具体要求:

- a) 数据要求——建模时,需使用以下数据:车间所属类型、设备数、待生产产品种类及数量、加工时间、产品释放时间、交货时间、准备时间、产品间生产顺序限制、成本等数据。
- b) 目标要求——确定产品的生产顺序及加工步骤的操作顺序,给出的新生产计划应能按时交货,足量交货,降低生产成本,减少生产时间,保证平稳生产;目标函数可分为最小完成时间、最小延迟、最小成本等。
- c) 限制条件要求——所需数据主要和限制条件有关。主要限制条件为:设备加工限制,不可同时进行不同工作;产品加工限制,不可同时被不同设备加工;交货期限限制等。

11.4 物流调度重构模块建模要求

物流调度重构模块分为动态路径重构和运输策略重构。动态路径重构是指根据新布局，重新规划运输设备可以运行的路径，使运输设备可以快速完成运输任务。运输策略重构是指根据新生产调度，重新规划线边库存水平、补货策略、运输设备调度策略，保证生产过程正产进行。物流调度模块建模应符合以下具体要求：

- a) 数据要求——建模时，需使用以下数据：静态布局和动态布局数据；生产调度数据；运输设备负载能力、运输速度、装载时间等数据；物料种类、几何尺寸、重量、数量等相关信息；产品BOM等。
- b) 目标要求——确定运输设备运行路线，制定物流策略，新方案应能满足生产需求，维持低线边库存水平，减少物流成本和时间。可将最大库存水平、物流成本、物流时间进行量化，作为模型的目标函数。
- c) 限制条件要求——送达时间限制、不可缺货限制、运输设备运载能力限制、空间限制等。

11.5 重构算法性能要求

每一部分完成建模后，求解过程都需要利用算法进行求解。算法性能应符合以下具体要求：

- a) 算法耗时需在可接受的范围内，能够在不影响生产线正常运行的情况下给出重构结果；
- b) 算法复杂度应避免呈指数级增长；
- c) 算法应具有鲁棒性，在各种情况下均能给出较好的结果；
- d) 算法给出的结果应能够满足生产过程条件的限制，具备可操作性；
- e) 算法给出的结果应是理论最优或近似最优的；
- f) 算法给出的结果应具有实用性，应用于实际生产后，不能与算法结果有较大的出入。
- g) 算法应具备自我更新的能力，能够根据实际生产后重构的效果，更新建模假设和条件，提高寻找最优解或近似最优解的能力。
- h) 算法具备可解释性。

11.6 重构模型算法修改要求

如果在实际生产过程中，发现实际情况和虚拟重构设想的结果出入较大，应考虑修改重构模型和算法，改善重构效果。可从以下几个方面考虑修改：

- a) 更改算法模型假设，使其跟贴近实际情况；
- b) 增加限制条件；
- c) 检查参数取值是否正确；
- d) 更改算法所使用的方法；
- e) 根据生产情况的不同，做出一定的分类，不同条件下使用不同的算法；
- f) 将不同模块的内置算法进行融合，形成联合问题进行求解。

参 考 文 献

- [1]GB/T 37393-2019 数字化车间 通用技术要求
 - [2]GB/T 38554-2020 云制造仿真服务通用要求
 - [3]GB/T 39334.1-2020 机械产品制造过程数字化仿真 第1部分：通用要求
 - [4]GB/T 39334.5-2020 机械产品制造过程数字化仿真 第5部分：典型工艺仿真要求
 - [5]GB/T 24742-2009 技术产品文件 工艺流程图表用图形符号的表示法
-