《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》编制说明

1 任务背景

生产产品是工业制造的主要目标。产品行业，包括各种类型的产品生产、销售和服务，涵盖了广泛的领域，如消费品、工业品、科技产品等也成为全球经济中最为重要和快速发展的领域之一。

随着世界各国的市场需求不断增长，和逐渐崛起的新兴市场，该领域行业规模庞大。根据《中国智能制造发展报告（2021）》的数据，截至2020年底，我国智能制造核心产品产业规模已达到1.6万亿元人民币。市场研究机构IDC预测，到2023年，全球智能制造产品市场规模将达到2.4万亿美元。

复杂产品的设计、制造和服务等过程涉及不同领域、学科、系统间的关联和耦合。为了提高复杂产品研发制造、运营维护等过程的效率和质量，提升其主要业务的管控水平和本身的智能化水平，包括实时仿真和预测复杂产品性能、建立复杂产品虚拟空间和物理空间的实时映射与交互关系、基于虚拟空间仿真结果指导和控制复杂产品物理实体、促进设计-制造-服务各阶段主要业务的一体化协同、提升复杂产品自诊断和自决策能力等，亟需采用新一代信息技术和先进数据分析技术对复杂产品的设计、制造和服务等过程进行智能化管控。

本文件提出的复杂产品数字孪生体系架构从设计、制造和服务等生命周期阶段出发，采用数字孪生技术，建立和管理复杂产品设计、制造和服务过程的虚实数据和数字孪生模型，进而实现数字孪生驱动下的复杂产品设计、制造和服务的虚实空间实时映射、业务活动交互

协同，为规划新一代复杂产品或智能化升级复杂产品提供解决方案和思路，形成具有自适应、自决策、自诊断、虚实交互等特征的智能化复杂产品。

当前主流的产品行业，处于数字化设计、数字化生产的基础阶段，比如采用计算机辅助设计(CAD)，制造运行管理系统生产（MES）等。随着工业数字化转型和消费者日益精细、复杂的产品需求，基于数字孪生的复杂产品全流程服务应运而生，采用数字孪生技术，建立和管理复杂产品设计、制造、服务过程的虚实数据和数字孪生模型，指导产品的从设计、制造、服务等生命周期阶段。展现出巨大的潜力减少复杂产品的设计、制造过程难度，并实现集成管理，帮助企业以更低的成本完成复杂产品的全生命周期。

然而，由于缺少标准化的，具备高互操作性且广适配的产品数字孪生架构，数字孪生技术暂未大范围地赋能产品行业。研制《复杂产品数字孪生体系架构》，通过建立产品全生命周期的数据和数字孪生模型，实现虚实空间实时映射、业务活动交互协同，为规划新一代复杂产品和智能化升级提供解决方案和思路，助力数字孪生技术在产品行业中的应用。

2 任务来源

本标准编制任务来源于浙江省自动化学会于2025年2月28日下达的浙自学标委[2025]4号《浙江省自动化学会标准起草任务书》归口单位为浙江省自动化学会标准技术工作委员会，标准名称为《智能

工厂 复杂产品数字孪生体系架构》，起草任务书号:ZJAA2025004。

3 主要起草单位和工作组成员

本标准负责起草单位：浙江大学

本标准参与起草单位：

本标准主要起草人：

4 主要工作过程

4.1 成立标准起草工作组

根据任务要求，浙江大学于 2025 年 2 月成立了标准编制工作起草小组，组织标准编制组织工作。标准编制工作起草小组从 2025 年 2 月份积极组织筹备和征集标准起草单位。经过近 2 个月的征集、评审和筛选，并最终由浙江大学确定了标准起草工作组的成员单位，成立了标准起草工作组；同时，根据本单位多年的标准研制以及企业实践经验，主导起草了《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》(草案)，提交浙江省自动化学会。

4.2 第一次编制讨论及项目立项

2025 年 4 月 21 日，由浙江省自动化学会组织专家组，召开立项会议，对本单位起草的《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》团标进行沟通讨论，从行业发展和建立标准的必要性考虑，最终通过了本单位《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》团标立项，确定了标准的工作内容、工作思路以及后续的主要工作安排。

专家组还对《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》(草案) 提出了修改意见。

1. 制订《智能工厂 复杂产品数字孪生体系架构》团体标准编制说明。会后，工作组严格按照要求制定编制说明。

2.修正标准文档内容及格式。会后，工作组对标准的文档内容及格式进行了调整：使用最新的浙江省自动化学会团体标准模板。

3.根据现有草案及资料，结合各起草单位，尽可能多地收集相关组织、单位的意见，开展本标准的完善工作；要继续进行更为广泛和深入的市场调查，对市场情况有非常全面和科学的认知，才能够确保以后做出来的标准符合大部分同行的制造水平；目前标准的内容还比较单薄，需后续对相关数据进一步整理扩充。

4.3 第二次工作组会议

为了提高沟通效率，工作组讨论会主要以线上交流的方式进行。在2025年4月22日至2025年5月7日两周内，工作组成员对编制讨论的内容进行了详细的校对评审，并对标准草案进行了深入的研讨，尤其对标准的条款及内容等进行分析研判，形成了基本共识。

5 标准编制原则和主要内容

5.1 标准编制原则

本标准的制定工作遵循“统一性、协调性、适用性、一致性、规范性”的原则，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则，本文件按照GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第一部分：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专利的责任。

本文件由浙江省自动化学会提出并归口。

本标准不对新技术设定约束，仅对新技术的应用进行了描述。

5.2 标准主要内容

本文件规定了复杂产品数字孪生体系架构，主要包括物理空间层、虚实数据管理层、数字孪生模型层、业务交互层和应用决策层。

本文件还具体规定了复杂产品在设计、制造和服务主要阶段的虚实数据管理模块、数字孪生模型模块、物理-虚拟空间同步映射模块、设计-制造-服务协同模块的逻辑架构与主要功能。

本文件适用于复杂产品设计、制造和服务过程的数字孪生体系顶层规划与智能化升级。

5.2.1 范围

本标准规定了复杂产品数字孪生系统的体系架构和外部系统的关联关系，并详细规定了复杂产品数字孪生系统内部生产与服务数字孪生模块、数据集成与增值模块、虚实交互融合模块、生产与服务协同联动模块的架构、组成与功能要求。

本标准适用于复杂产品生产与服务过程的智能管理。

5.2.2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

5.2.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

5.2.3.1 数字孪生

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。

5.2.3.2 大数据

复杂产品在产品生命周期各阶段产生的海量、多源、异构数据，具有数据量大、数据种类繁多、数据产生与更新速度快的特性。

5.2.3.3 基于模型的定义

一个用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体，详细规定了三维实体模型中产品尺寸、公差的标注规则和工艺信息的表达方法。

5.2.3.4 利益主体

复杂产品生产和维护服务过程中涉及、在经济利益上具有一致性的行为主体及其构成的集合。

5.2.3.5 物理空间

复杂产品物理实体的运行及其相关操作所处的真实空间。

5.2.3.6 虚拟空间

复杂产品的数字孪生模型进行多维度、多层次仿真模拟运行的计算机操作环境。

5.2.3.7 物理活动

复杂产品的物理实体经历生产制造、运行维护的一系列产生于物

理世界的活动。

5.2.4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DTF-CP：复杂产品数字孪生体系架构（Digital Twin Framework of Complex Product）

PMI：产品制造信息（Product Manufacturing Information）

BOM：物料清单（Bill of Material）

CAE：计算机辅助工程（Computer Aided Engineering）

DDBS：分布式数据库系统（Distributed Data Base System）

XML：可扩展标记语言（Extensible Markup Language）

HDFS：Hadoop分布式文件系统（Hadoop Distributed File System）

NoSQL：非关系型数据库（Not only Structured Query Language）

PDTM：产品数字孪生模型（Product Digital Twin Model）

MBD：基于模型的定义（Model Based Definition）

PDM：产品数据管理（Product Data Management）

ERP：企业资源计划（Enterprise Resource Planning）

MES：制造执行系统（Manufacturing Execution System）

PLM：产品生命周期管理（Product Lifecycle Management）

FEA：有限元分析（Finite Element Analysis）

VR：虚拟现实（Virtual Reality）

AR：增强现实（Augmented Reality）

RFID：射频识别（Radio Frequency Identification）

5.2.5 DTF-CP 体系架构

5.2.5.1 概述

DTF-CP体系架构需要从功能及业务实施角度对DTF-CP的组成成分进行配置，并形成DTF-CP内部有效运行的实施主体的结构以及外部产品生产与服务主体间的逻辑关系。DTF-CP体系架构的基本组成包括生产与服务数字孪生模型、虚实业务数据集成与增值、物理虚拟空间交互融合和生产与服务协同联动四部分。

DTF-CP的体系架构如图1所示，根据DTF-CP实施过程与复杂产品生产与服务过程的管控逻辑将其分为内部架构和外部架构。

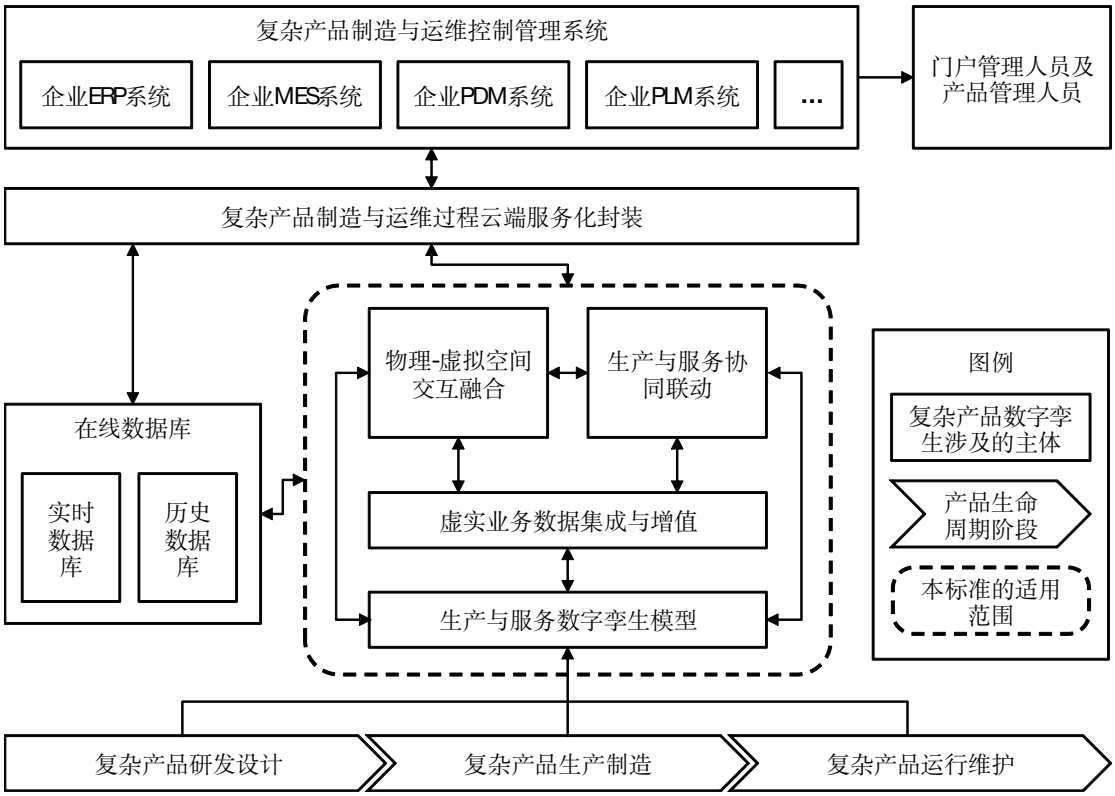


图1 DTF-CP体系架构

5.2.5.2 DTF-CP 内部架构

DTF-CP内部架构表示支撑DTF-CP有效实施的各主体模块功能及主体间交互协作的逻辑关系。在复杂产品管理过程中，需按需配置DTF-CP主体的功能模块，各主体模块具体功能可表示如下：

——生产与服务数字孪生模型是指在获取复杂产品生命周期（设计-制造-运维）业务数据的基础上，依托三维建模软件、仿真软件、智能算法等手段构建复杂产品制造-运维数字孪生模型，为复杂产品生产与服务过程的物理活动提供同步映射与仿真分析。

——虚实业务数据集成与增值是指获取多源、异构产品物理数据和仿真模拟数据后，通过数据降维、数据转换等方式集成数据，采用兼容性接口实现数据在复杂产品各利益主体间的高效使用，采用先进算法及仿真模拟模型从清洗过的数据中挖掘出增值知识，指导复杂产品制造和运维。

——物理-虚拟空间交互融合是指在复杂产品生产和运维服务阶段，复杂产品物理活动数据传输至虚拟空间以支撑数字孪生模型的仿真模拟活动，虚拟空间的实时仿真结果反馈至物理空间以指导、控制复杂产品的制造及运维活动，实现虚实交互、以虚控实的复杂产品管理。

——生产与服务协同联动是指在复杂产品制造和运维数据链贯通的基础上，对制造和运维过程的业务进行集成，并建立复杂产品业务内部与跨阶段业务间的实时传递、交互、反馈的控制逻辑，实现复杂产品制造-运维阶段业务的双反馈协同管理。

5.2.5.3 DTF-CP 外部架构

DTF-CP外部架构表示DTF-CP实施的主体模块与传统的复杂产品制造-运维业务主体间交互协作的逻辑关系，可表示如下：

——DTF-CP 从复杂产品生命周期（设计-制造-运维）中获取设计数据、制造过程数据、质量数据、运行参数数据以及故障数据等。

——DTF-CP 的仿真、分析、管理数据会实时存储于在线数据库，并按需从在线数据库中获取实时或历史数据支撑 DTF-CP 业务执行过程。

——在 DTF-CP 实现的“虚实交互、以虚控实”、制造-运维业务协同联动的基础上，将复杂产品制造与运维业务进行云端服务化封装，实时接入复杂产品多元化的控制管理系统，通过可视化人机交互界面以及智能终端，实现门户管理人员及产品管理人员对复杂产品的智能化管理过程。

5.2.6 DTF-CP 的主体模块架构和功能

5.2.6.1 复杂产品生产与服务数字孪生模型体系架构和功能

5.2.6.1.1 概述

复杂产品生产与服务数字孪生模型的体系架构如图2所示。

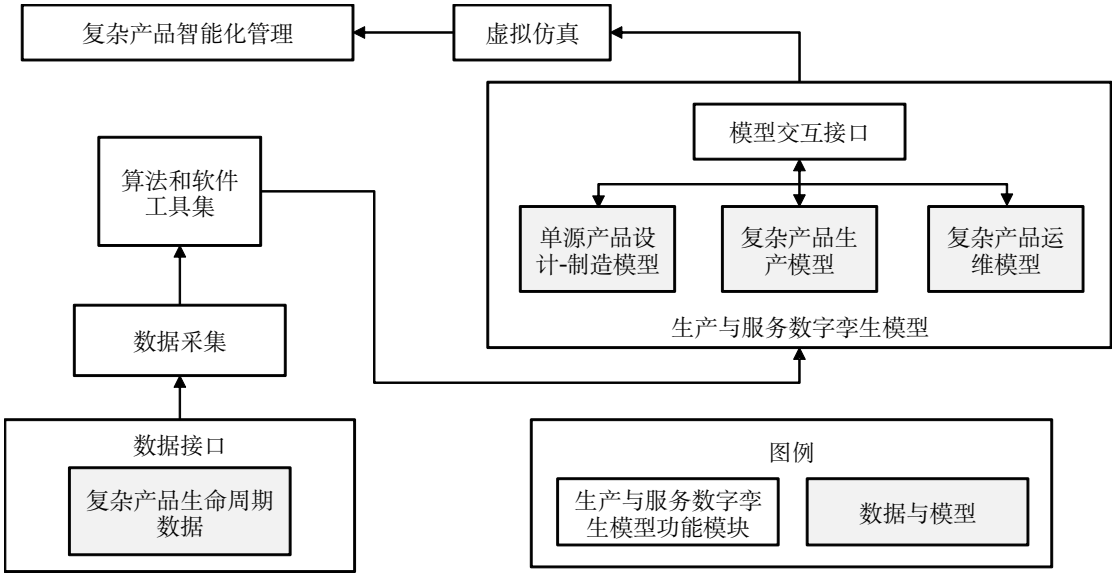


图 2 复杂产品生产与服务数字孪生模型的体系架构

复杂产品生产与服务数字孪生模型应具备6.1.2～6.1.7的功能。

5.2.6.1.2 算法和软件工具集

一系列人工智能算法、以及CAE、FEA等软件，可以用来构建多物理量、多尺度的复杂产品生产与服务数字孪生模型。

5.2.6.1.3 单源产品设计-制造模型

利用MBD技术，构建全三维标注的单源产品设计模型，包括三维设计模型、PMI标注、关联属性、BOM、加工和装配工艺信息等，贯穿于产品设计-制造的全过程，并采用模型轻量化技术实现产品数据的高效传递与可视化。

5.2.6.1.4 复杂产品生产模型

根据产品车间生产过程的需求，建立的复杂产品在生产阶段所经历的物理活动的仿真模型，比如虚拟生产线、零部件加工仿真模型等。

5.2.6.1.5 复杂产品运维模型

利用CAE、FEA等软件和先进算法模型，构建的能反映物理实体对象运行和维护过程中的几何、物理、行为、规则及约束的多维动态模型，包括结构动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳损伤模型、材料状态演化模型、产品故障和寿命预测分析模型等。

5.2.6.1.6 模型交互接口

不同生命周期阶段以及同一生命周期阶段不同类型的数字孪生模型之间进行数据传输、交互以及数据格式转换的通讯协议、接口。

5.2.6.1.7 虚拟仿真

通过虚拟空间的PDTM，仿真模拟复杂产品生产加工过程、车间物料运输、产品运行及维护阶段的多层次、多粒度物理活动。

5.2.6.2 复杂产品虚实业务数据集成与增值体系架构和功能

5.2.6.2.1 概述

复杂产品虚实业务数据集成与增值的体系架构如图3所示。

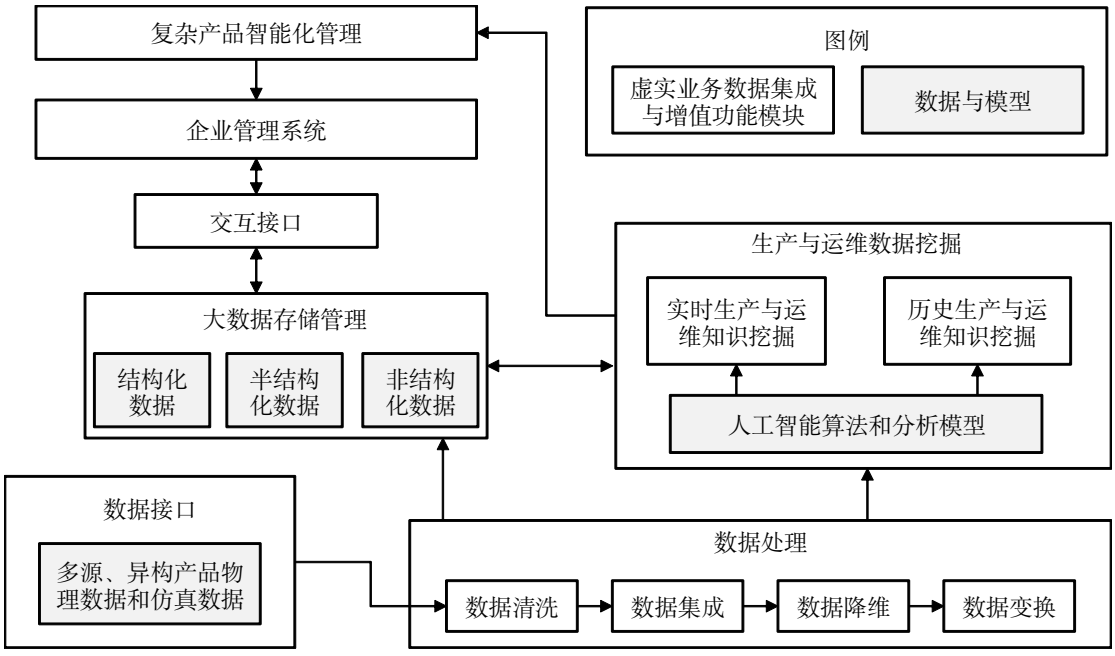


图3 复杂产品虚实业务数据集成与增值的体系架构

复杂产品虚实业务数据集成与增值应具备6.2.2～6.2.7的功能。

5.2.6.2.2 数据清洗

去除数据集合中冗余、错误、缺失的数据项，确保数据的准确性和有用性，可采用逻辑清洗、冗余清洗和缺失值清洗等方法。

5.2.6.2.3 数据集成

融合和集成分散、异构的数据集，减少数据不必要的存储空间，提高分散数据之间的业务与逻辑关联性，可采用统一建模、中间件和数据仓库等技术或方法。

5.2.6.2.4 数据降维

提取数据集中关键、重要特征的组成成分，减少无关或弱相关因素对数据分析的影响，可采用主成分分析、反向特征消除和组合决策树等方法。

5.2.6.2.5 数据变换

根据复杂产品生产与运维业务对数据类型、格式等的需求，进行数据变换，使得后续数据分析效率更高以及更容易发现数据中隐藏的增值信息，可采用属性构造、数据规范化、数据离散化等方法。

5.2.6.2.6 大数据存储与管理

根据数据特征，采用不同类型的数据存储方式存储和管理复杂产品生产与服务过程中产生的异构大数据，可采用DDBS等存储结构化数据，采用XML等存储半结构化数据，采用HDFS、NoSQL等存储非结构化数据。

5.2.6.2.7 生产与运维数据挖掘

抽取复杂产品的生产和运维数据，进而分析挖掘出可用于指导产品制造和运维服务的有价值知识，可采用深度学习、贝叶斯网络、关联规则挖掘等一系列人工智能算法与分析模型。

5.2.6.3 复杂产品物理-虚拟空间交互融合体系架构和功能

5.2.6.3.1 概述

复杂产品物理-虚拟空间交互融合的体系架构如图4所示。

复杂产品物理-虚拟空间交互融合应具备6.3.2～6.3.7的功能。

5.2.6.3.2 虚拟仿真与模拟

根据复杂产品实时、历史数据以及复杂产品生产与运维阶段服务需求，在PDTM中对复杂产品的生产制造过程、实时运行活动、健康及退化状态等物理活动过程进行仿真模拟，将其仿真过程通过人机交互平台、便携式智能终端等方式呈现给管理人员。

5.2.6.3.3 性能评估

评估PDTM的有效性，包括分析预测准确性、模型故障发生率、时间消耗等。

5.2.6.3.4 模型重构与更新

根据复杂产品生产和运维阶段的需求变更，对部分PDTM进行重组和更新；根据复杂产品新需求的产生，在虚拟空间建立新的复杂产品仿真、分析模型，并集成至PDTM中。

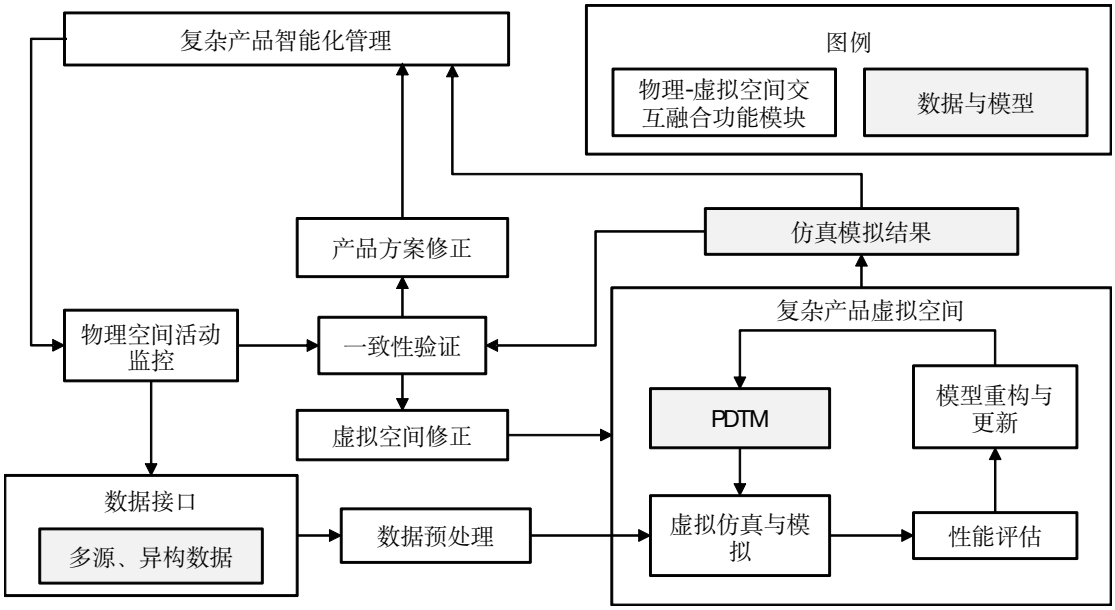


图4 复杂产品物理-虚拟空间交互融合的体系架构

5.2.6.3.5 一致性验证

将复杂产品的实际生产、运维状态与虚拟空间的仿真模拟结果进行对比、评估和分析，以检验复杂产品虚-实空间状态的一致性。在出现不一致时，综合评判其产生原因，及时修正相应的产品方案或者数字孪生模型。

5.2.6.3.6 虚拟空间修正

在虚拟空间中PDTM的仿真结果无法真实反映复杂产品物理活动时，修正和更新PDTM使其能够实时同步映射复杂产品的物理活动。

5.2.6.3.7 产品方案修正

在复杂产品物理活动结果不能达到产品方案的执行预期效果时，评估方案后续有效性及复杂产品实时状态，及时调整、修复产品方案以提高复杂产品物理活动的性能。

5.2.6.4 复杂产品生产与服务协同联动体系架构和功能

5.2.6.4.1 概述

复杂产品生产与服务协同联动的体系架构如图5所示。

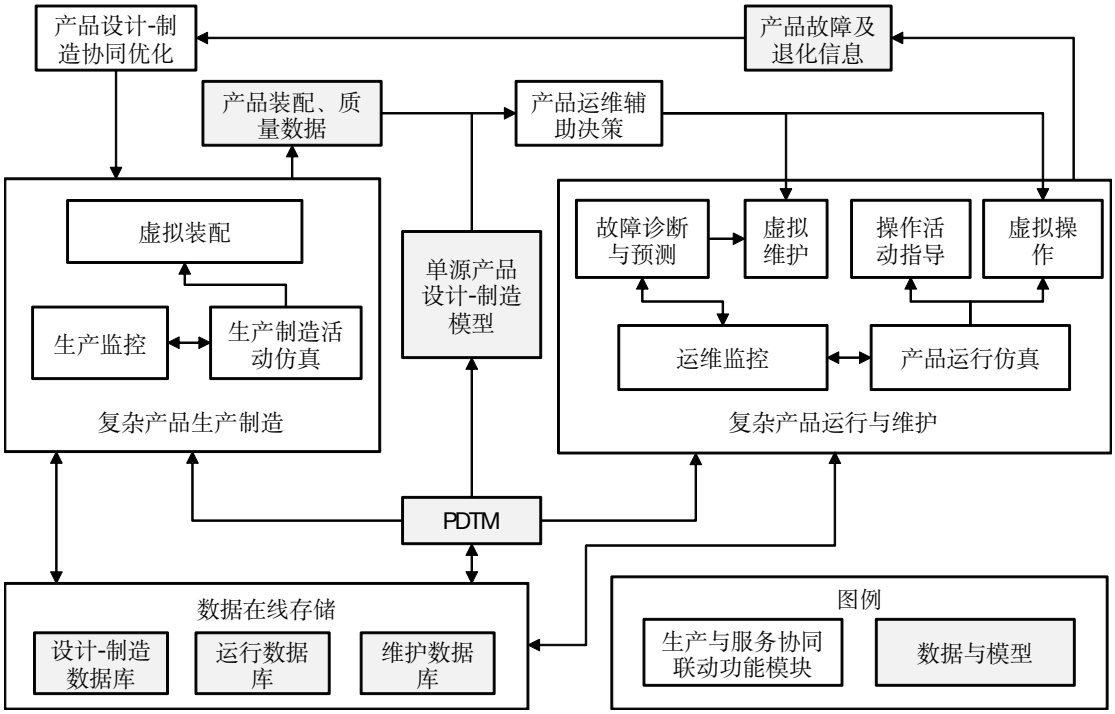


图 5 复杂产品生产与服务协同联动的体系架构

复杂产品生产与服务协同联动应具备6.4.2～6.4.13的功能。

5.2.6.4.2 数据在线存储

通过大数据存储管理，将复杂产品制造与运维阶段产生的实时大数据存储在设计-制造数据库、运行数据库和维护数据库中。

5.2.6.4.3 生产监控

通过RFID设备、传感器、工业相机、质量检测装置等智能设备或仪器获取复杂产品制造过程中零部件加工、在制品质量等生产数据，并实时监控复杂产品在生产过程中的异常。

5.2.6.4.4 生产制造活动仿真

在虚拟生产线中，对复杂产品的零部件加工、在制品运输等过程及车间能耗、物流堵塞等参数进行仿真和预测，以及时发现产品制造

过程中出现的异常，进而仿真模拟异常消解过程，将结果反馈给物理生产线执行生产优化过程。

5.2.6.4.5 虚拟装配

根据复杂产品单源设计模型，借助AR、VR等可视化设备，通过对装配顺序、方式、路径等装配工艺的仿真模拟过程，模拟复杂产品的实际装配活动。

5.2.6.4.6 运维监控

通过传感器、自身控制系统，监控产品运维过程中的产品输出、嵌入/外挂传感器数据、环境数据，分析其运维的状态，及时发现复杂产品在运维过程中的异常，并进行故障、异常报警。

5.2.6.4.7 产品运行仿真

在虚拟空间中，PDTM对复杂产品的动力学、热力学、机构运动等过程进行仿真和模拟，以实时映射复杂产品运行过程的物理活动，并评估和分析其物理活动的状态。

5.2.6.4.8 操作活动指导

在复杂产品使用过程中，根据产品运行任务、运行状态等信息，匹配相应的产品操作方法、产品运行参数，实时推送给复杂产品实体或产品操作人员以指导产品的运行活动。

5.2.6.4.9 虚拟操作

在产品运行操作时，依托PDTM，采用VR、AR等设备，在线模拟复杂产品的操作过程。

5.2.6.4.10 故障诊断与预测

根据复杂产品的运行状态、故障数据，采用人工智能算法、仿真分析模型等方法，分析和预测复杂产品的故障、剩余寿命、零部件退化状态等信息。

5.2.6.4.11 虚拟维护

在虚拟空间中，仿真模拟产品的维护方案、措施，并进行方案、措施的迭代优化，进而反馈给复杂产品的实际维护过程。

5.2.6.4.12 产品运维辅助决策

在复杂产品运维阶段，根据设计指标、制造质量及性能数据、装配数据等，辅助判断复杂产品的健康及退化状态，并提供指导产品维修拆解的设计-制造BOM及逆向装配方法，优化复杂产品运维的智能决策过程。

5.2.6.4.13 产品设计-制造协同优化

根据复杂产品故障及退化信息，反馈至产品设计-制造过程，迭代优化单源产品设计-制造模型，并改进复杂产品制造工艺、装配工艺等，进而协同优化复杂产品生命周期前端的物理活动。

6 主要验证试验情况和分析

按照本标准条款要求，对制造企业现有的复杂产品数字孪生体系架构实施了相关重要的试验项目并进行验证，全面验证标准编写条款的适用性和可行性，验证结果来看，满足标准编写要求。

7 预期达到的社会效益、对产业发展的作用

标准制定后，现有制造企业的复杂产品数字孪生体系按此标准要求，将促进产业集约性和规模化发展，该标准以填补国标及行标空白

为目的，促进行业发展。

该标准可有效推进产学研一体化产业技术革新，催生新型产品、技术的更新，将研究成果转化为适应市场需求的产品，开发出“含金量”更高，市场适应性更强的产品，实现持续发展。

8 采用国际标准和国外先进标准情况

未直接采用国际标准或国外先进标准。

9 在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准属于地方团体标准。

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准没有冲突或矛盾。

10 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准制定过程中无重大分歧。

11 重大分标准实施日期

待定。

12 标准性质的建议说明

无。

13 贯彻标准的要求和措施建议

本标准目前正在制定阶段，新标准发布后，使用单位须对标准进行宣贯，并按新标准的实施日期执行。

14 废止现行相关标准的建议

无。

15 废止现行相关标准的建议

无。