ICS 35.240.50
CCS J 07

中华人民共和国国家标准

GB/T 41723—2022

自动化系统与集成　复杂产品数字孪生体系架构

Automation systems and integration—Digital twin architecture of complex product

2022-10-12 发布　　2023-05-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

资料整理
火龙果科技 荐

目　　次

前言 …… Ⅰ
引言 …… Ⅱ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　缩略语 …… 2
5　DTA-CP 体系架构 …… 3
5.1　概述 …… 3
5.2　物理空间层 …… 3
5.3　虚实数据管理层 …… 3
5.4　数字孪生模型层 …… 4
5.5　业务交互层 …… 4
5.6　应用与决策层 …… 4
6　DTA-CP 主要模块的逻辑架构和功能 …… 4
6.1　虚实数据管理逻辑架构和功能 …… 4
6.2　数字孪生模型逻辑架构和功能 …… 6
6.3　物理-虚拟空间同步映射逻辑架构和功能 …… 8
6.4　设计-制造-服务协同逻辑架构和功能 …… 9
参考文献 …… 14

资料整理
火龙果科技 荐

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/TC 159)归口。

本文件起草单位：西北工业大学、北京航空航天大学、北京机械工业自动化研究所有限公司、中国航发商用航空发动机有限责任公司、清华大学、中国航空综合技术研究所、中车信息技术有限公司、中船重工信息科技有限公司、中国第一汽车集团有限公司、航天科工仿真技术有限责任公司、西安邮电大学、重庆大学、安世亚太科技股份有限公司、江苏长江智能制造研究院有限责任公司、青岛海尔工业智能研究院有限公司、东华大学、中车唐山机车车辆有限公司、中机研标准技术研究院(北京)有限公司、中国电子技术标准化研究院、国家工业信息安全发展研究中心、同济大学、深圳华龙讯达信息技术股份有限公司、金航数码科技有限责任公司、剑维软件技术(上海)有限公司、聊城大学、金蝶软件(中国)有限公司、建筑材料工业信息中心、北自所(北京)科技发展股份有限公司、罗克韦尔自动化(中国)有限公司。

本文件主要起草人：张映锋、任磊、尹作重、黄彬彬、赵曦滨、黄博、任杉、王海丹、吴灿辉、赵永宣、张霖、张宝岭、臧大昕、吴清财、朱学武、李孝斌、段海波、刘玉明、张洁、任涛林、刘新、韩立新、刘义、周亚勤、赖李媛君、蔡卫华、江沛、武斌、潘康华、李根梓、李君、胡琳、文莎、孙群、孙发亮、何宏宏、刘敏、董磊、戴宝纯、韩冬阳、孙承武、陈曦、徐慧、任建勋、吴洪文、张亚杰、李岩、陈超。

资料整理
火龙果科技 荐

引　言

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。

资料整理
火龙果科技 荐

自动化系统与集成　复杂产品
数字孪生体系架构

1　范围

本文件规定了复杂产品数字孪生体系架构，并具体规定了复杂产品在设计、制造和服务过程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。

2　规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3　术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

复杂产品　complex products

客户需求复杂、产品构成复杂、产品技术复杂、制造流程复杂、生产管理复杂的一类产品。

[来源：GB/T 36457—2018，3.1]

3.2

数字孪生　digital twin

由物理资产、虚拟镜像和用户界面组成的混合模型。

[来源：ISO/TR 24464：2020，3.1.4]

3.3

复杂产品数字孪生　complex product digital twin

集成了多学科、多物理场、多尺度、多概率的数字化模型集合，可以充分利用逼真物理模型、传感器、运行历史等数据，在虚拟空间中完成对物理实体的实时映射，反映复杂产品物理实体设计、制造和服务过程的物理活动，并与其产生虚实交互效应。

3.4

大数据　big data

复杂产品在设计、制造和服务过程产生的海量、多源、异构实时/非实时数据，具有数据量大、数据种类繁多、数据产生速度快、数据变化更新速度快的特性，可采用可扩展技术进行存储、处理、管理和分析。

[来源：ISO/IEC 20546：2019，3.1.2，有修改]

3.5

基于模型的定义　model based definition

由精确几何实体、相关 3D 几何、3D 标注及属性构成的数据集定义的完整的产品定义。

[来源：GB/T 36252—2018，3.1.3]

资料整理
火龙果科技 荐

3.6

同步　synchronization

复杂产品数字孪生模型与其物理实体之间的实时耦合，表现为数字孪生模型以适当的速率更新至物理实体的状态。

3.7

仿真　simulation

基于模型的活动，即利用模型来复现实际系统中发生的某些本质过程，并通过对系统模型的实验来研究、分析、改进实际中存在或设计中的系统。

3.8

校核　verification

评估模型、仿真及其相关数据对开发人员的概念描述和规范的表征程度的过程。

3.9

验证　validation

从预期使用用途角度，评估模型、仿真及其相关数据表征真实世界的准确程度的过程。

3.10

确认　accreditation

对模型、仿真及其相关数据的官方认可，表明其适用于特定的目的。

4　缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AR：增强现实（Augmented Reality）

CAD：计算机辅助设计（Computer Aided Design）

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

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

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

FEA：有限元分析（Finite Element Analysis）

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

MBD：基于模型的定义（Model Based Definition）

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

MR：混合现实（Mixed Reality）

MRO：维护维修大修（Maintenance，Repair and Overhaul）

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

PDM：产品数据管理（Product Data Management）

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

RFID：射频识别（Radio Frequency Identification）

VR：虚拟现实（Virtual Reality）

VV&A：校核、验证与确认（Verification，Validation and Accreditation）

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

XR：扩展现实（Extended Reality）

3D：三维（3-dimensional）

资料整理
火龙果科技 荐

5 DTA-CP 体系架构

5.1 概述

DTA-CP 体系架构从功能及业务实施角度，包括物理空间层、虚实数据管理层、数字孪生模型层、业务交互层和应用与决策层，如图 1 所示。本文件从数据、模型和业务交互角度阐述支撑 DTA-CP 实施的主要模块功能及主要模块间交互协作的逻辑关系，并简要概述数据、模型和业务与物理空间层、面向行业应用框架的应用与决策层之间的逻辑关系。

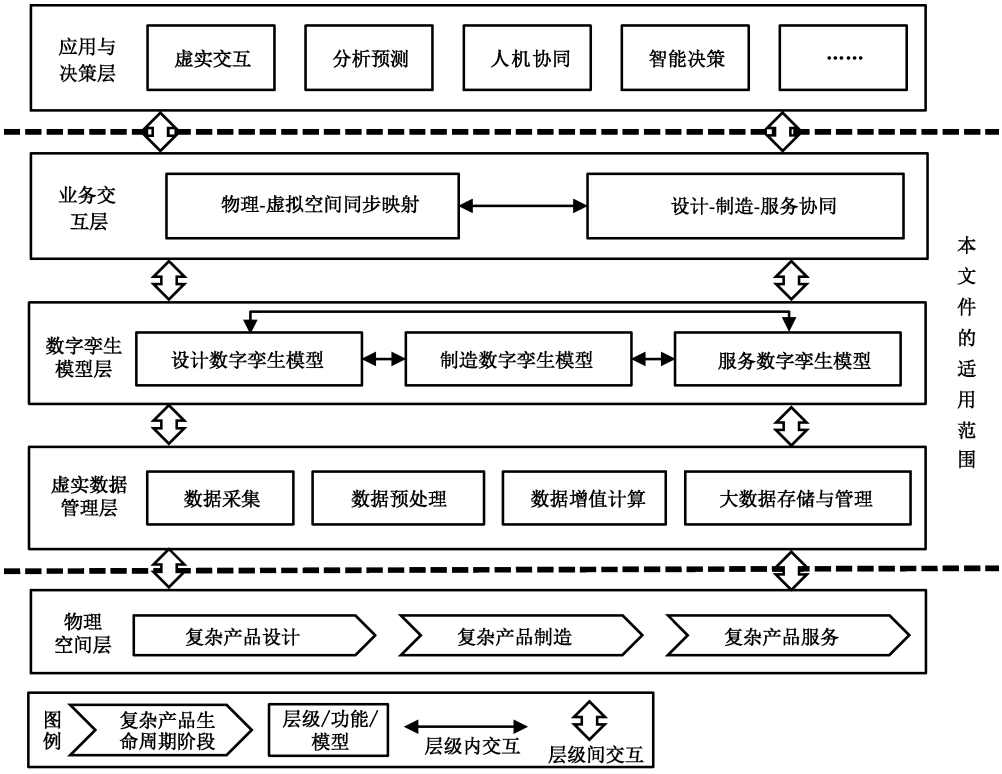


图 1 DTA-CP 体系架构

5.2 物理空间层

物理空间层是复杂产品在设计、制造、服务过程中所处的物理世界，在复杂产品开展各种业务活动时，产生多源、异构的业务过程数据，与复杂产品虚拟空间形成实时映射和交互，执行或开展复杂产品的各项物理活动等。

5.3 虚实数据管理层

虚实数据管理层从物理空间层获取设计、制造和服务过程的多源异构数据，如产品设计、加工质量、装配信息、运行参数、环境工况、维修信息等，从数字孪生模型层获取仿真、分析预测、验证等结果信息，比如复杂产品性能、行为状态仿真结果等，通过数据预处理过程对数据进行清洗、集成、融合等操作，采取合适的大数据存储与管理方式对数据进行统一管理，并采用先进算法及仿真模拟模型从处理过的数据中挖掘出设计、制造和服务增值信息，支撑复杂产品设计、制造和服务过程的各项业务活动。

资料整理 火龙果科技 荐

5.4 数字孪生模型层

在获取复杂产品设计、制造和服务过程数据的基础上，依托三维建模软件、仿真软件、人工智能算法等手段，结合复杂产品设计、制造和服务过程外部实体模型，建立复杂产品设计数字孪生模型、制造数字孪生模型和服务数字孪生模型，直接与物理空间层进行虚实交互，如根据物理空间实时状态在虚拟空间开展同步仿真、仿真结果传递至物理空间，为物理空间的各项活动提供仿真、验证、优化和指导。复杂产品数字孪生模型应从设计过程开始建立，对制造、服务等过程提前开展验证，并逐步迭代和完善形成设计、制造、服务数字孪生模型。

5.5 业务交互层

业务交互层建立物理-虚拟空间同步映射和设计-制造-服务协同等主要模块，将复杂产品物理空间数据传输至虚拟空间以支撑数字孪生模型的实时映射、仿真和验证，基于虚拟空间的仿真结果指导、控制和优化复杂产品的物理活动，实现复杂产品虚实交互和以虚控实的智能管理；在复杂产品设计、制造和服务过程数据采集与管理的基础上，贯通复杂产品设计、制造和服务阶段业务，建立阶段内和跨阶段业务活动实时传递、交互和反馈的控制逻辑，实现复杂产品设计-制造-服务一体化协同管理。复杂产品宜以数字孪生模型为基础，协同规划、验证和实施设计、制造、服务过程的业务活动。

5.6 应用与决策层

DTA-CP 的数据采集与管理、数字孪生模型和业务交互层进行服务化封装后，会形成应用与决策层的各类控制和决策软件/平台进行集成和交互，实现虚实交互、分析预测、人机协同、智能决策等应用。

6 DTA-CP 主要模块的逻辑架构和功能

6.1 虚实数据管理逻辑架构和功能

6.1.1 概述

虚实数据管理逻辑架构如图 2 所示，应具备但不限于 6.1.2～6.1.5 的功能。

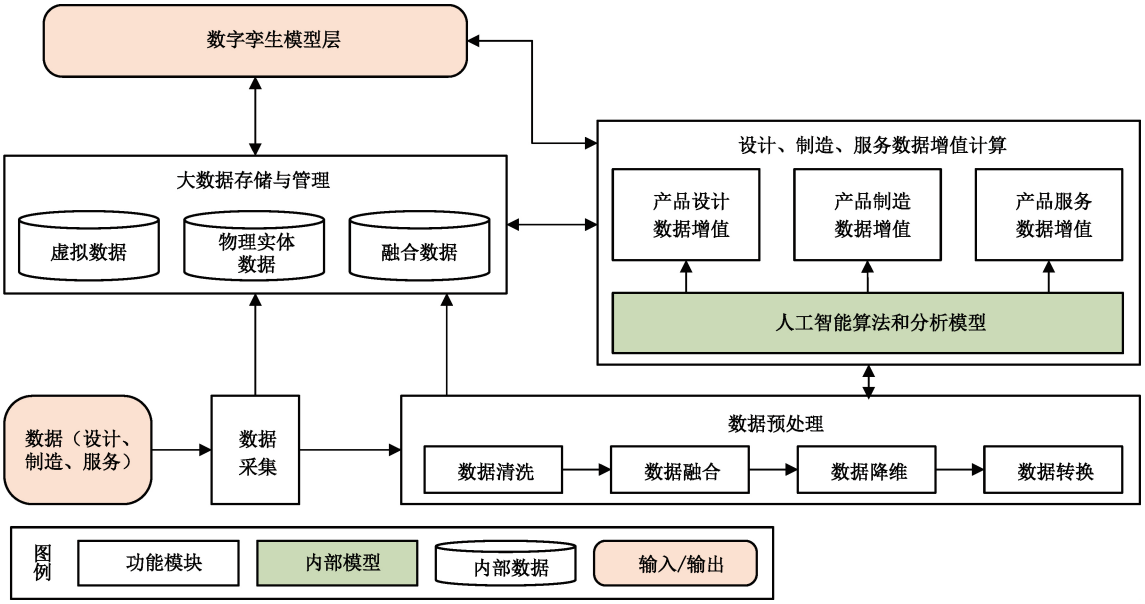


图 2 虚实数据管理逻辑架构

资料整理 火龙果科技 荐

6.1.2 数据采集

可通过复杂产品设计、制造和服务过程的软件、系统以及基于物联网的智能传感器采集数据，如CAD、PDM、MES、MRO、振动传感器等采集产品在设计、制造和服务过程中的稳态数据和瞬态数据，为产品数字孪生模型的建立、实施和应用提供完整的原始数据支撑。从复杂产品数字孪生模型中获取其实时模拟、预测、验证等仿真和分析数据，支撑虚实数据的综合分析和数据增值。

6.1.3 数据预处理

6.1.3.1 概述

在数据分析之前，通过数据清洗、数据融合、数据降维及数据转换操作，确保数据的高质量、可用性和可靠性。

6.1.3.2 数据清洗

可采用逻辑清洗、冗余清洗、异常值清洗和缺失值清洗等方法，去除数据集合中的冗余和错误，识别或删除离群点并填补缺失的数据项，确保数据的准确性和有用性。

6.1.3.3 数据融合

可采用统一建模、中间件和数据仓库等技术或方法将分散在多个数据源中的数据整合起来并进行统一存储，减少数据不必要的存储空间，提升分散数据之间的关联性。

6.1.3.4 数据降维

可采用相关性分析、因子分析、主成分分析及独立成分分析等方法，提取原始数据中的关键和重要特征，将原高维空间中的数据点映射到低维度的空间中，且保持原数据的特征。

6.1.3.5 数据转换

根据产品设计、制造和服务各阶段间业务交互的需求，可采用属性构造、数据概化、数据规范化和数据离散化等方法，将原始数据转换为不同阶段业务系统能够理解和识别的格式，提升数据分析的效率。

6.1.4 设计、制造和服务数据增值计算

6.1.4.1 概述

从复杂产品的设计、制造和服务过程虚实数据中分析挖掘出可用于指导产品设计优化、制造过程优化和运维服务优化等的有价值信息，可采用深度学习、迁移学习、强化学习、贝叶斯网络及关联规则挖掘等人工智能算法模型和大数据分析算法模型。

6.1.4.2 人工智能算法和分析模型

在数据预处理的基础上，面向设计、制造和服务等各阶段不同的应用场景，从数据存储与管理系统中抽取历史或实时虚实数据以建立相应的分析模型，进而利用智能算法对模型进行求解，为各阶段的业务交互和应用决策提供信息或知识。

6.1.4.3 产品设计数据增值

面向设计阶段的应用需求和应用场景，可基于人工智能算法和分析模型，对与复杂产品设计相关的数据（如市场需求、功能需求和设计指标等）以及复杂产品生命周期后端运维服务过程数字孪生模型产生的数据（如寿命仿真数据、故障演化数据等）进行融合和深度分析挖掘，提取数据中有价值的信息与知

资料整理 火龙果科技 荐

识，为设计阶段业务（如用户需求识别、产品概念设计和功能结构设计等）的决策和优化提供增值服务。

6.1.4.4 产品制造数据增值

面向制造阶段的应用需求和应用场景，可基于人工智能算法和分析模型，对与复杂产品制造相关的数据（如产品加工参数、加工状态数据和装配数据等）以及制造过程中数字孪生模型产生的数据（如实时仿真数据、质量预测数据等）进行融合和深度分析挖掘，提取数据中有价值的信息与知识，为制造阶段业务（如加工参数优化、产品质量检测与分析和产品装配过程控制等）的决策和优化提供增值服务。

6.1.4.5 产品服务数据增值

面向服务阶段的应用需求和应用场景，可基于人工智能算法和分析模型，对与复杂产品运维服务相关的数据（如产品运行状态、使用环境、故障特征和维修记录等）以及运维服务过程中数字孪生模型产生的数据（如故障预测数据、虚拟维修数据等）进行融合和深度分析挖掘，提取数据中有价值的信息与知识，为运维服务阶段业务（如远程在线诊断、零部件寿命预测、预防性维修和备件备品预测等）的决策和优化提供增值服务。

6.1.5 大数据存储与管理

对设计、制造和服务等过程中所产生虚拟数据、物理实体数据和融合数据，根据数据的特征采取不同的数据处理、存储和管理方式，提升数据查询、数据分析的效率，并确保数据的复用性，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。

6.2 数字孪生模型逻辑架构和功能

6.2.1 概述

数字孪生模型的逻辑架构如图 3 所示，应具备但不限于 6.2.2～6.2.4 的功能。

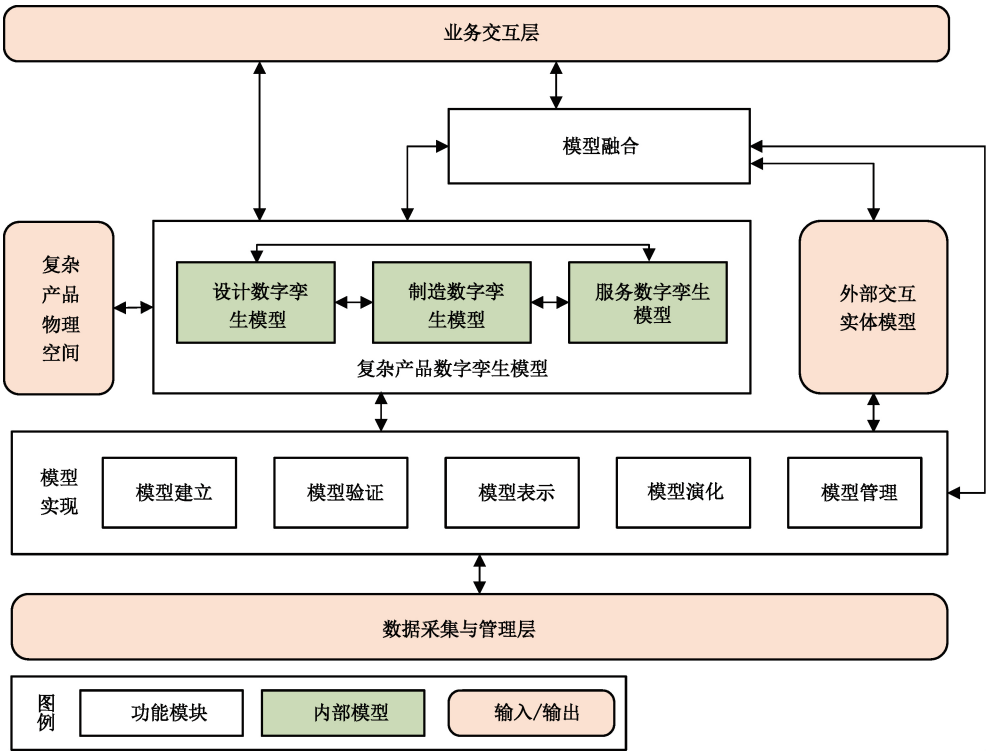


图 3 数字孪生模型逻辑架构

资料整理 火龙果科技 荐

6.2.2 模型实现

6.2.2.1 概述

通过模型建立、模型验证、模型表示、模型演化和模型管理过程，在计算机环境中建立可信地、高保真地描述复杂产品物理特性、功能和性能以及其与外部实体耦合、集成的模型，并对模型使用和维护进行管控。

6.2.2.2 模型建立

通过建模软件、仿真分析软件或智能算法等手段，描述复杂产品功能、性能、状态行为和故障等模型建立的过程，用来表征复杂产品一个或多个属性特征、层级维度和行为状态等，模型建立过程应形成三维模型、程序、算法和文档等载体，但不限于上述模型载体。

6.2.2.3 模型验证

对模型的建立过程、建模机理、误差、敏感性和不确定度等方面开展分析，并对模型与真实物理实体描述的保真度、置信度、精确性以及仿真时间消耗等方面进行评估和评价，以衡量模型的性能、可用性、易用性、可维护性和可迁移性等，例如可采用 VV&A 方法来验证模型。

6.2.2.4 模型表示

通过显示设备、人机交互设备等将存在计算机中的模型以人类可以理解的方式直观、可视化地呈现给用户的过程，允许根据实际需求对模型的转换、渲染、轻量化表示等操作。

6.2.2.5 模型演化

模型在使用过程中其参数或结构发生了改变，形成了新版本的模型，包括但不限于根据实时数据优化参数、基于实际需求重构模型、对模型进行派生或衍生以适应新用途或新系统等情况。

6.2.2.6 模型管理

对模型建立完成后的使用与维护过程进行管理和控制，应包括模型的评审、模型的发放与传输、模型间信息交互与集成、模型接口的连接与通信和模型存储管理（包括模型库的管理）等活动。

6.2.3 复杂产品数字孪生模型

6.2.3.1 概述

通过 CAD、CAE、FEA 以及人工智能算法等工具和方法，建立反映复杂产品本体的结构、功能、性能、属性特性以及其与外部交互实体发生效应产生的多物理量、多学科和多尺度耦合集成的数字化模型集合，涉及复杂产品设计、制造和服务等主要生命周期阶段，应包括设计数字孪生模型、制造数字孪生模型和服务数字孪生模型等。

注：本文件聚焦于复杂产品本体模型及与本体发生耦合效应的模型的描述，允许根据实际应用需求扩充其内涵，将外部交互实体模型纳入整体考虑范畴。由于外部交互实体与复杂产品本体发生效应时，会对复杂产品的性能、状态、行为等产生影响，该活动过程产生的集成与耦合模型根据其所属生命周期阶段和类型特征划分到具体的复杂产品数字孪生模型中，但单独的外部交互实体模型不属于复杂产品的数字孪生模型。外部交互实体模型是指复杂产品在设计、制造和服务等生命周期阶段中与复杂产品本体发生交互效应、协同执行任务的人、设备、环境工况等外部实体的数字化模型。

资料整理 火龙果科技 荐

6.2.3.2 设计数字孪生模型

在产品设计阶段产生的描述复杂产品结构、功能、性能的数字化模型集合，应包括通过设计 MBD 模型及轻量化模型、多学科（如热力学、电磁学、运动学等）和多专业（如强度、可靠性、安全性等）耦合仿真分析模型等。

6.2.3.3 制造数字孪生模型

面向复杂产品制造和装配过程活动仿真的数字化模型集合，应包括零部件、子系统、系统和整个产品等层级的三维工艺 MBD 模型（包含 PMI 信息）、工艺仿真模型等。

注：本文件在制造过程聚焦于直接影响复杂产品成品质量、对零部件形状产生效应或与零部件连接相关的活动，对于能耗监控与仿真、产线仿真布局、物流仿真等偏向于车间或工厂端智能化升级的过程，不纳入本文件考虑范畴。

6.2.3.4 服务数字孪生模型

在设计、制造数字孪生模型基础上，建立的面向复杂产品运行和维护服务的监控、诊断、预测、维修等过程的数字化模型集合，应包括虚拟操作模型、性能监控模型、故障诊断模型、分析预测模型、虚拟维护模型等。

6.2.4 模型融合

通过模型耦合、集成、协同等方法，建立复杂产品本体与外部模型的耦合仿真过程，仿真模拟复杂产品实际的制造、运营、维护中与外部的人、设备、环境等产生的协作与交互，该过程可形成复杂产品内部、外部发生交互效应的派生模型，应将其作为复杂产品数字孪生模型的组成成分。

6.3 物理-虚拟空间同步映射逻辑架构和功能

6.3.1 概述

物理-虚拟空间同步映射逻辑架构如图 4 所示，应具备但不限于 6.3.2～6.3.6 的功能。

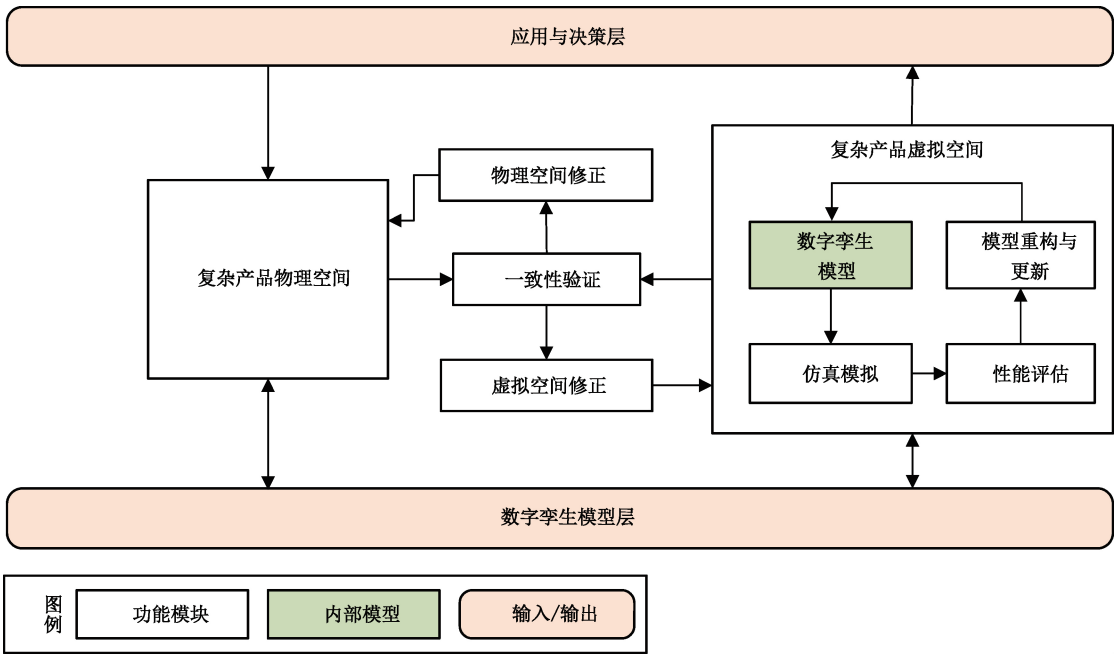


图 4 物理-虚拟空间同步映射逻辑架构

资料整理 火龙果科技 荐

6.3.2 复杂产品物理空间

复杂产品物理实体试验、制造和运营维护服务等过程开展操作或执行任务所处的真实空间，可执行制造、装配、操作及使用、运行、监控和检修等复杂产品生命周期管理任务或活动，例如监控复杂产品物理空间活动时，在复杂产品本体、周围环境和工况中配置适当的传感器，以采集复杂产品的加工、装配、使用、检修和大修等过程的实时数据；通过物联网技术上传至软件系统或数据库中，分析复杂产品物理空间活动的状态，并在出现异常状态时，发布告警信息。

6.3.3 复杂产品虚拟空间

6.3.3.1 概述

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，可执行数字孪生模型的仿真、验证、评估、迭代与更新等任务或活动，应包括但不限于下述主要的业务功能。

6.3.3.2 仿真模拟

根据复杂产品实时数据、历史数据以及复杂产品设计、制造和服务阶段的业务需求，在数字孪生模型中仿真模拟复杂产品零部件、子系统、系统和整个产品等不同层级的功能与性能、制造过程、运行状态、健康与故障诊断和维修等物理活动过程，并通过人机交互平台、便携式智能终端等方式输出仿真结果。

6.3.3.3 性能评估

评估数字孪生模型的有效性，包括仿真精确性、分析预测准确性、模型故障发生率、时间消耗等。

6.3.3.4 模型重构与更新

根据复杂产品设计、制造和服务阶段的需求变更，对相关数字孪生模型进行重组和更新；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，并集成至数字孪生模型中。

6.3.4 一致性验证

将复杂产品物理实体(如零部件、子系统、系统和整个产品等)制造、服务性能及状态与虚拟空间的仿真模拟结果进行比较、评估和分析，以检验复杂产品物理-虚拟空间状态的一致性。在出现不一致时，综合评判其产生原因，及时修正相应的复杂产品物理活动或者数字孪生模型。

6.3.5 物理空间修正

在复杂产品物理活动性能不能达到预期执行效果时，评估产品物理活动有效性及复杂产品实时状态，及时调整、优化产品物理空间活动以提高复杂产品性能。

6.3.6 虚拟空间修正

当复杂产品虚拟空间中的数字孪生模型无法高保真地、同步地仿真模拟复杂产品物理活动时，修正和更新数字孪生模型使其能够实时同步映射复杂产品的物理活动。

6.4 设计-制造-服务协同逻辑架构和功能

6.4.1 概述

设计-制造-服务协同逻辑架构如图 5 所示，本文件给出了 6.4.2～6.4.5 的功能，企业可根据自身实际需求对功能进行剪裁和补充。

资料整理
火龙果科技 荐

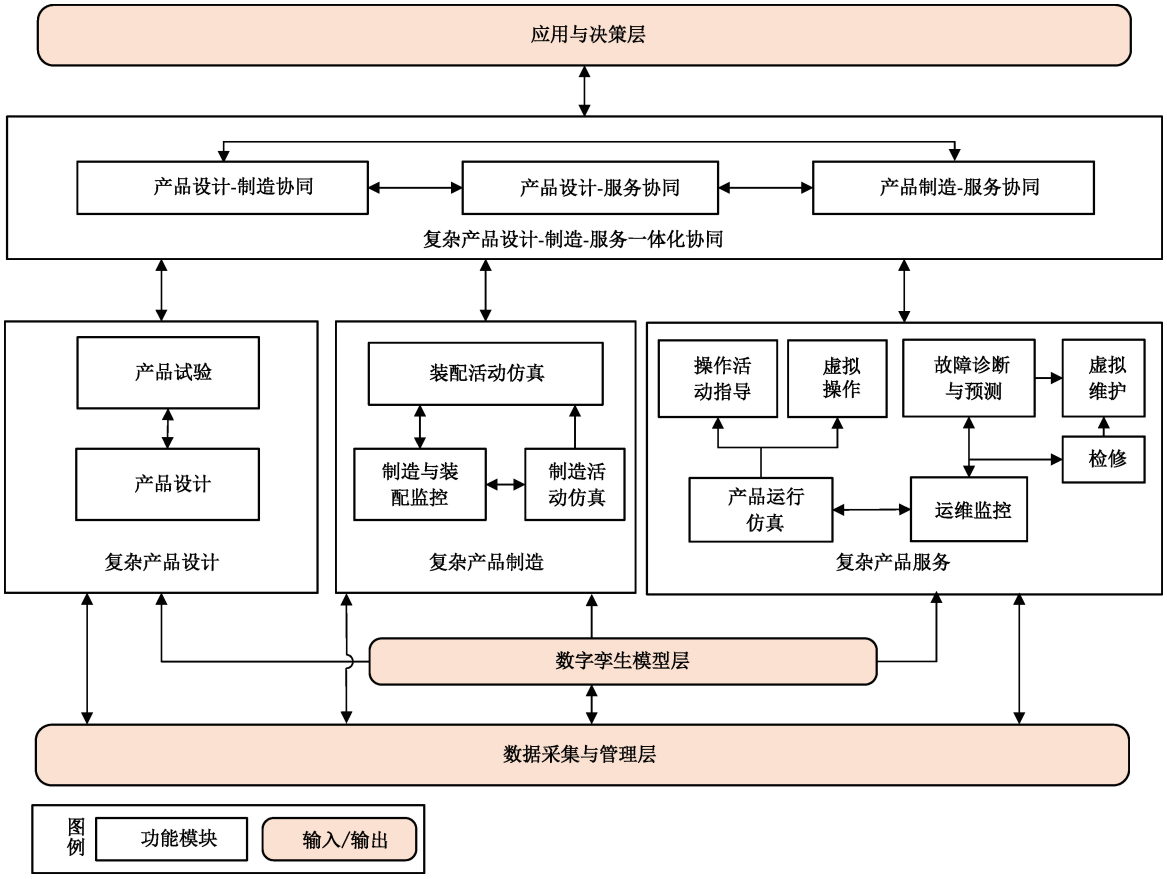


图 5　设计-制造-服务协同逻辑架构

6.4.2　复杂产品设计

6.4.2.1　概述

协同开展复杂产品设计过程，建立多学科、多系统、多层次、集成化和数字化的复杂产品模型，并通过虚拟和物理试验验证和确认复杂产品结构、功能和性能等，以改进复杂产品设计结果，应包括但不限于下述复杂产品设计过程主要的业务功能。

注：允许根据复杂产品的实际研发需求和阶段划分将试验放入制造阶段中，或形成独立的试验阶段。

6.4.2.2　产品设计

从零件、部件、子系统和系统等维度对复杂产品的机械结构、几何空间布局、零部件连接及装配方式等进行设计，建立复杂产品的全三维 MBD 模型，应包括但不限于表征零部件几何结构、空间布局及装配关系等的设计模型、标注和属性的集合，同时开展复杂产品部件、子系统、系统和整个复杂产品的单学科和多学科（电磁、气动、电气、强度和传热等）分析，以及复杂产品控制、管理、监控等软件和系统的设计开发。

6.4.2.3　产品试验

通过虚拟试验、半物理仿真试验和物理试验等多种试验方式结合的方式，验证和确认设计结果对功能、性能要求的满足程度，指导产品设计优化。宜尽可能采用虚拟试验或半物理仿真试验提前识别和发现复杂产品设计缺陷，优化前期设计结果，并通过物理试验一次确认复杂产品设计结果。

资料整理
火龙果科技 荐

6.4.3 复杂产品制造

6.4.3.1 概述

在多源传感器采集的实时数据和数字孪生模型的仿真模拟基础上，实时的远程监控复杂产品物理实体加工和装配过程，同步映射其加工、装配过程物理活动，分析、诊断和仿真验证加工和装配异常，应包括但不限于下述复杂产品制造过程主要的业务功能。

6.4.3.2 制造与装配监控

通过 RFID 设备、传感器、工业相机和质量检测装置等智能设备或仪器获取复杂产品加工、装配过程中零部件加工、在制品质量和装配质量等生产数据，并实时监控复杂产品加工、装配过程的异常。

6.4.3.3 制造活动仿真

根据复杂产品制造数字孪生模型，对复杂产品的工艺、加工过程进行仿真模拟，以验证加工过程的正确性和可行性。在实际的零部件加工过程中，根据采集的数据，实时映射复杂产品加工过程，并在出现零部件加工异常、加工质量问题时，仿真验证修复异常、提升零部件质量的方法或措施。

6.4.3.4 装配活动仿真

根据复杂产品设计和制造数字孪生模型，在虚拟空间开展装配顺序、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，开展虚拟装配，形成优化的可视化装配指导（如装配工时、装配顺序和路径、装配动作姿态等）或工作指令，通过显示屏/幕、VR/AR/MR（或 XR）等可视化设备及人机交互设备指导装配人员开展装配活动，或控制装配设备实现自动化装配，还应在虚拟空间中为用户提供复杂产品的装配培训。

6.4.4 复杂产品服务

6.4.4.1 概述

监控复杂产品运行和维护过程，分析、诊断和预测其性能和故障等，并实时映射、仿真指导、控制复杂产品运行和维护活动，提供虚拟操作和虚拟培训以优化复杂产品的运行和维护管理，应包括但不限于下述复杂产品服务过程主要的业务功能。

6.4.4.2 产品运行仿真

数字孪生模型对复杂产品的动力学、运动学、热力学等过程、关键性能以及与外部环境产生交互效应的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、分析和显示其物理活动的状态。在需要优化复杂产品运行参数时，应能够根据提供的参数方案及产品实际环境工况信息，仿真复杂产品的运行状态和性能，以验证和评估参数方案的效果。

6.4.4.3 操作活动指导

根据复杂产品执行的任务、运行状态与性能等信息，搜索匹配相应的产品操作方法、产品运行参数方案，并将其转化为控制指令实时推送给复杂产品实体来执行任务，或者通过可视化设备及人机交互设备将仿真操作过程及操作方法传递给操作人员来指导产品操作。

6.4.4.4 虚拟操作

基于数字孪生模型，采用显示屏/幕、VR/AR/MR（或 XR）等可视化设备及人机交互设备，在线模

资料整理
火龙果科技 荐

拟复杂产品的操作过程，并可将虚拟操作指令发送至复杂产品物理实体以控制其实际运行，在虚拟空间中还应为用户提供复杂产品的虚拟使用及操作培训。

6.4.4.5 运维监控

通过传感器、自身控制系统等获取产品运行及维护维服务过程中的复杂产品输出数据、嵌入/外挂传感器数据、环境工况数据，采用智能监控系统与人工智能算法模型分析复杂产品实时数据，评估其运行及维护的行为状态、性能，及时发现复杂产品异常（如性能衰退、故障等），发布异常告警，指导开展复杂产品运行参数优化和维修服务。

6.4.4.6 故障诊断与预测

根据运维监控过程采集的实时数据（如运行参数、异常信息等），采用人工智能算法、仿真分析模型等方法，分析、诊断和预测复杂产品的故障、剩余寿命、零部件性能衰退等信息。

6.4.4.7 检修

根据复杂产品的实时性能以及运行使用周期等信息，结合数字孪生模型对产品未来状态的评估，采取合适的检修策略（如定期检修、视情检修等）对复杂产品开展故障检修和维保工作。

6.4.4.8 虚拟维护

根据故障诊断与预测、检修结果等信息，在虚拟空间仿真模拟、优化维修方案和措施，并将优化的方案和措施转化为可视化维修指导（如维修工时、维修顺序和维修动作姿态等），通过显示屏/幕、VR/AR/MR（或 XR）等可视化设备及人机交互设备发送给维修人员，以指导复杂产品维修过程，在虚拟空间中还应为用户提供复杂产品的维修操作培训。

6.4.5 复杂产品设计-制造-服务一体化协同

6.4.5.1 概述

在设计-制造、设计-服务、制造-服务阶段间协同的基础上，打通复杂产品设计、制造和服务各阶段的数据链和业务链，形成一体化（或模型处于分布式分布，但有着密切的接口和数据联系）的生命周期模型闭环管理，进而建立设计结果单源性地传递至制造与服务阶段、制造与服务阶段提前参与设计活动、制造与服务增值信息反馈并优化设计活动、制造-服务协同保证设计指标及性能要求的一体化协同的业务交互模式。

6.4.5.2 产品设计-制造协同优化

在设计活动中提前引入工艺设计、装配分析等制造阶段活动，协同开展产品及工艺设计，进行可制造性分析，并基于建立的仿真模型（如工艺仿真模型、虚拟试验模型等）在设计阶段迭代、优化设计结果，宜尽可能保证产品试验、制造过程的成功率和质量，并根据试验、制造、装配和测量检验信息指导复杂产品的设计优化。

6.4.5.3 产品设计-服务协同优化

在设计活动中提前引入运行环境工况、维修规划（如维修计划、维修仿真等）等服务阶段数据和业务，协同开展运维过程（包括稳态运行环境、瞬态运行环境、产品检修、大修等）的仿真活动，提前验证复杂产品的可用性、易维护性、可维修性等属性特征，保证产品的设计质量。宜根据产品制造、装配过程中的质量、性能数据以及设计、制造数字孪生模型，优化复杂产品的维修策略和方案、支撑复杂产品的运维

资料整理 火龙果科技 荐

过程分析和预测。在复杂产品服役后，宜根据运营、故障、健康状态和维修等信息反馈优化产品设计或工艺设计的协同开展过程。

6.4.5.4 产品制造-服务协同优化

根据产品设计指标/参数等信息，协同开发和优化复杂产品的制造和运维服务业务活动，即在保证产品设计要求能够稳定满足的前提下，在加工、装配过程中宜考虑复杂产品的易维修性（尤其是损耗或易出现故障的部件）等，并根据实际的维修状态信息优化和改进工艺和装配活动（如加工工艺选取、装配顺序和装配工艺选取等）。

资料整理
火龙果科技 荐

参 考 文 献

[1] GB/T 36252—2018 基于模型的航空装备研制 数字化产品定义准则

[2] GB/T 36457—2018 复杂产品虚拟样机建模方法

[3] ISO/IEC 20546:2019 Information technology—Big data—Overview and vocabulary

[4] ISO/TR 24464:2020 Automation systems and integration—Industrial data—Visualization elements of digital twins

[5] IEEE 1516.4—2007 Recommended practice for verification, validation, and accreditation of a federation-an overlay to the high level architecture federation development and execution process

[6] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019(1):1-18.

[7] 李浩,陶飞,王昊琪,等.基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1320-1336.

[8] 任杉,张映锋,黄彬彬.生命周期大数据驱动的复杂产品智能制造服务新模式研究[J].机械工程学报,2018,54(22):194-203.

[9] 苗田,张旭,熊辉,等.数字孪生技术在产品生命周期中的应用与展望[J].计算机集成制造系统,2019,25(6).

[10] Zhang, Y.F., Ren, S., Liu, Y., et al. A framework for big data driven product lifecycle management, Journal of Cleaner Production, 2017, 159, 229-240.

[11] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.

[12] Ren, S., Zhang, Y.F., Liu Y., et al. A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: a framework, challenges and future research directions, Journal of Cleaner Production, 2019, 210, 1343-1365.

[13] Glaessgen E., Stargel D.. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012: 1818.

资料整理
火龙果科技 荐