

ICS

CCS

团体标准

T/CI XXX-2024

电力装备数字孪生模型构建标准

Technical Specification for electric power equipment digital Twin model
construction Standard

(征求意见稿)

2024 -X-X 发布

2024 -X -X 实施

中国国际科技促进会 发布

中国国际科技促进会 (CIAPST) 是 1988 年经中华人民共和国国务院科技领导小组批准而成立的全国性社会团体。制定团体标准、开展标准国际化和推动团体标准实施,是中国国际科技促进会的工作内容之一。任何团体和个人,均可提出制、修订中国国际科技促进会团体标准的建议并参与有关工作。

中国国际科技促进会标准按《中国国际科技促进会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国国际科技促进会征求意见稿经向社会公开征求意见,并得到参加审定会议的 80% 以上的专家、成员的投票赞同,方可作为中国国际科技促进会标准予以发布。

在本标准实施过程中,如发现需要修改或补充之处,请将意见和有关资料寄给中国国际科技促进会标准化工作委员会,以便修订时参考。

任何团体和个人,均可对本标准征求意见稿提出意见和建议,牵头起草单位联系方式:
wangpb@cqu.edu.cn。

中国国际科技促进会

地址:北京市海淀区中关村东路 89 号恒兴大厦 13F

邮政编码: 100190

电话:010-62652520 传真: 010-62652520

网址: <http://www.ciapst.org>

前言

本文件按 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》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。

本文件由重庆大学等提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件主要起草单位：重庆大学、上海科梁信息科技股份有限公司、四川汇思电气有限公司、科创引领（北京）国际科技中心、等。

本文件主要起草人：杨帆、桑苏明、陈明禄、马利豪。

本文件为首次发布。

征求意见稿

电力装备数字孪生模型构建标准

1 范围

本文件规定了电力装备数字孪生模型构建的技术要求。

本文件适用于主变为550kV及以下的电力装备数字孪生模型。

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 41723	自动化系统与集成 复杂产品数字孪生体系架构
GB/T 43441.1	信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求
DL/T 860	变电站通信网络和系统

3 术语与定义

GB/T 43441.1、GB/T 41723、界定的以及下列术语与定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 43441.1、GB/T 41723 中的某些术语与定义。

3.1

实体 entity

具体或抽象的事物。

3.2

目标实体 target entity

现实世界被选中进行数字化映射的实体。

3.3

数字实体 digital entity

目标实体的数字化映射。

3.4

数字孪生 digital twin

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达。

3.5

数字孪生系统 digital twin system

基于数据驱动来实现目标实体与数字实体间各要素动态迭代的系统。

注：数字孪生系统由目标实体、数字实体、两者之间的数据连接以及数据连接过程中涉及的模型、数据和接口等要素组成。

3.6

数据驱动 data driven

通过构建物理实体的高保真虚拟模型，采集传感器数据和运行数据驱动虚拟对象和物理同步运动、实现物理世界和信息世界的深度融合和互联互通。

4 总则

4.1 电力装备数字孪生模型构建系统功能架构

4.1.1 电力装备数字孪生模型的构建应包含以下功能：

- a) 信息交互能力：将电力装备的关键参数信息通过通信网络传输至数字孪生模型构建系统。
- b) 实时数据驱动：现实世界的目标实体的状态变化数据能够实时地作用于数字实体，目标实体和数字实体的状态变化完全同步。
- c) 预测分析能力：基于数字实体，通过模拟计算和预测推演目标实体未来一段时间内的状态情况，实现实时状态监测和故障定位。
- d) 数字实体可视化：将目标实体的多维模型进行深度融合，能够在信息系统中对数字实体模型进行渲染，最终查看到目标实体的虚拟对象三维动态显示效果。

e) 模型的

4.2 电力装备数字孪生模型数据

4.2.1 几何数据：

几何数据按分级，分为设备类型、部件类型、具体参数 3 个层级。其中部件类型和具体参数关键词中包含“NOTE”和“ORIGINCOORD”关键词。“NOTE”关键词为备注内容。“ORIGINCOORD”关键词为设备/部件建模原点的世界坐标，用 1×3 的数组定义。所有数据单位默认为 m。

表 1 几何数据关键词分级

设备类型	部件类型	具体参数
EQUIP_NAME	PART_NAME	PARAS_NAME : 2022
		ORIGINCOORD : [x y z]
		NOTE : “xxx”
	ORIGINCOORD : [x y z]	
	NOTE : “xxx”	

以换流变压器为例,换流变压器按部件分为铁心、绕组、夹紧件及拉板、油箱 4 部分。

表 2 换流变压器设备部件分级

设备类型	部件类型
TRANSFORMER	CORE
	WINDING
	FRAME
	TANK
	ORIGINCOORD : [x y z]
	NOTE : "xxx"

换流变压器铁心为双心柱有旁轭结构,铁心框结构如单框式、双框式等在几何建模中不予考虑。双心柱有旁轭结构在几何建模时具体参数如下:

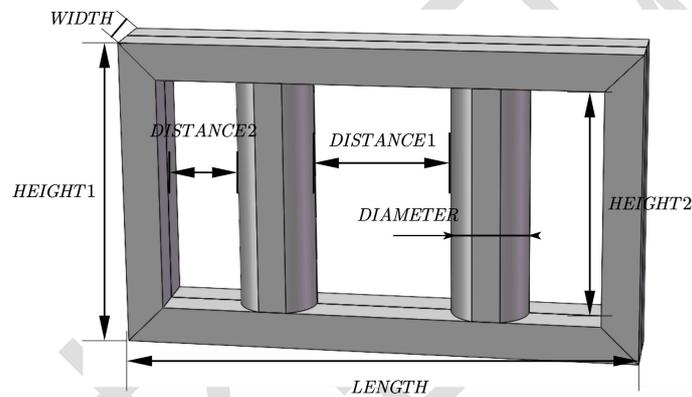


图 1 双心柱有旁轭结构图

表 3 双心柱有旁轭结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
CORE	LENGTH	float	铁心长度
	WIDTH	float	铁心宽度
	HEIGHT1	float	铁心高度
	HEIGHT2	float	铁心框高度
	DISTANCE1	float	两心柱间距
	DISTANCE2	float	心柱与旁轭间距
	DIAMETER	float	心柱直径

线圈几何数据：两柱式换流变压器绕组线圈几何结构具体参数如下：

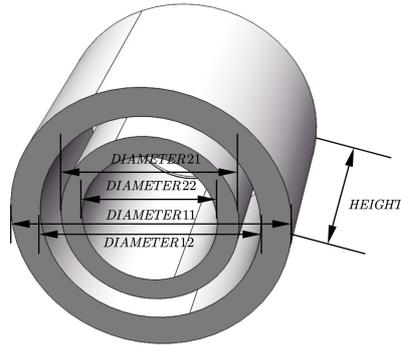


图 2 线圈结构图

表 4 线圈结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
WINDING	DIAMETER11	float	阀侧绕组外径
	DIAMETER12	float	阀侧绕组内径
	DIAMETER21	float	网侧绕组外径
	DIAMETER22	float	网侧绕组内径
	HEIGHT	float	绕组电抗高度

夹紧件几何数据：

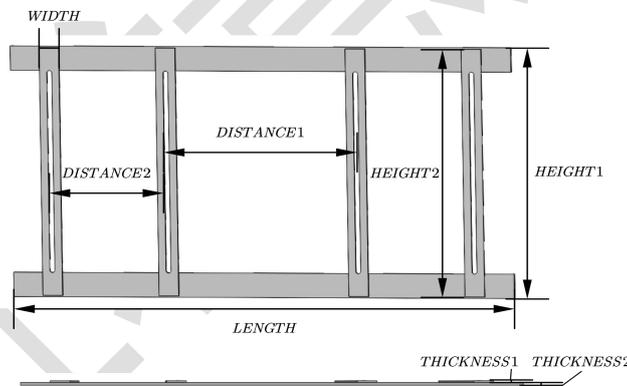


图 3 夹紧件结构图

表 5 夹紧件结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
FRAME	WIDTH	float	拉板宽度
	DISTANCE1	float	两拉板中心距 1
	DISTANCE2	float	两拉板中心距 2
	HEIGHT1	float	夹紧件总高度
	HEIGHT2	float	拉板高度
	THICKNESS1	float	拉板厚度
	THICKNESS2	float	夹件厚度

油箱几何数据:

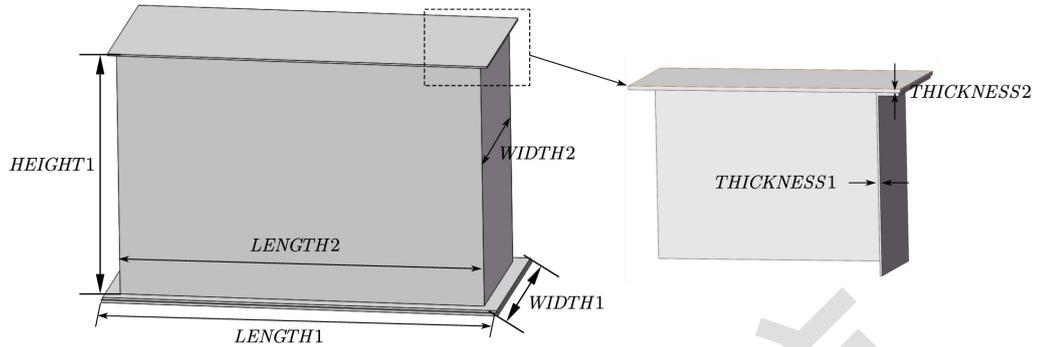


图 4 油箱几何结构图

表 6 油箱结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
TANK	LENGTH1	float	箱体长度
	LENGTH2	float	箱底/箱盖长度
	WIDTH1	float	箱底/箱盖宽度
	WIDTH2	float	箱体宽度
	HEIGHT1	float	箱体高度
	THICKNESS1	float	箱体厚度
	THICKNESS2	float	箱底/箱盖厚度

网格数据应包括有限元网格和渲染网格两部分，其中有限元网格以 nas (bdf) 文件格式存储，渲染网格以 stl 文格式存储。

有限元（有限体积等）网格可使用四面体（CTETRA）、六面体（CHEXA）网格等，应包含“\$\$ Grid Data Section”和“\$\$ Element Data Section”两部分。

nas (bdf) 文件数据部分格式为：

表 7 nas (bdf) 文件数据部分格式

行	数据格式	格式说明
1	\$\$ GRID Data	网格节点数据部分
2	GRID 1 1.09357 -8.0 -160.935274	标识号(GRID) 节点编号(1) x y z
3	GRID 2 1.09911 -8.0 -160.886703	
4	GRID 3 0.900888 -6.6 -160.913297	
5	GRID 4 0.906428 -6.6 -160.864726	
6	\$\$ Element Data Section	网格单元数据部分
7	CTETRA 1 1 1 9 10 8	标识号(CTETRA) 网格编号(1) node1 node2 node3 node4
8	CTETRA 2 2 10 1 8 2	

渲染网格以三角形网格形式存储，如一个部件各部分几何需要分别作为单独对象渲染，

则各部分几何应分别保存为一个 stl 文件。

表 8 stl 文件数据部分格式

行	数据格式	格式说明
1	facet normal -1.000000e+02 0.000000e+00 0.000000e+00	面法向量 (facet normal) normal_x normal_y normal_z
2	outer loop	三角面顶点列表(outer loop)
3	vertex 0.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00	顶点 1(vertex) x y z
4	vertex 0.000000e+00 0.000000e+00 1.000000e+01	顶点 2(vertex) x y z
5	vertex 0.000000e+00 1.000000e+01 0.000000e+00	顶点 3(vertex) x y z
6	endloop	结束三个顶点的定义 (endloop)
7	endfacet	结束一个三角面的定义

4.2.2 材料数据:

材料物理参数包括数据类型, 材料型号和具体参数 3 个层级。其中, 数据类型分为①材料物理参数“MATERIAL_SIMU”, 用于仿真计算; ②渲染材质“MATERIAL_JS”, 用于渲染。具体参数“PARA1”应根据具体需要进行自定义。

表 9 材料数据关键词分级

数据类型	材料型号	具体参数
MATERIAL_SIMU	MATERIAL_NAME	PARAS_NAME : xxx
		PARAS_NAME: xxx
	NOTE : “xxx”	
MATERIAL_JS	MATERIAL_NAME	PARAS_NAME: xxx
		PARAS_NAME: xxx
	NOTE : “xxx”	

材料物理参数 (MATERIAL_SIMU)

材料型号“MATERIAL_NAME”应根据需要自行定义, 可选的, 可以为“B27P095”、“TRANS_OIL”、“COPPER”等, 格式为字符串。具体参数“PARAS_NAME”应根据材料参与的物理场自行定义, 可以为“Permeability”、“Bulk Conductivity”等, 参数值可以为整型、浮点数或数组。

换流变压器材料可以有铜(COPPER)、硅钢(如 B27P095)、油(OIL)、绝缘纸板(INSULATING CARDBOARD)。变压器参与磁场、温度场、流场计算, 具体参数有密度、电导率、磁导率、热导率、比热容、动力黏度等。

表 10 变压器材料物理参数

材料型号	具体参数	数据类型	参数说明
COPPER	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	float	磁导率
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率
B27P095	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	array	磁导率, N×2 数组
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率
OIL	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	float	磁导率
	Density	array	密度, N×2 数组
	Cp	array	比热容, N×2 数组
	Thermal_Conductivity	array	热导率, N×2 数组
	Viscosity	array	动力黏度, N×2 数组
INSULATING_CARDBOARD	Bulk_Conductivity	array	电导率, N×2 数组
	Permeability	float	磁导率
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率

4.2.3 监测数据:

监测数据以数据库方式存储。每种监测数据应单独保存为一个数据表，每种监测数据类型（DATA_NAME）可选的，包括数据条目（ID）、监测的设备 ID（EQUIPMENTID）、传感器 ID（SENSORID）、传感器状态（SENSORSTATE）、采集时间（CAPTURETIME）和监测数据（PARAS）。传感器状态可选的为 0（暂停运行）或 1（在运行），或根据需要自行定义。

表 11 监测数据关键词分级

表名	表头	数值类型
DATA_NAME	ID	INT
	EQUIPMENTID	INT
	SENSORID	INT
	SENSORSTATE	INT
	CAPTURETIME	DATETIME
	PARAS_NAME	FLOAT

换流变压器的监测数据根据状态评估的需要和实际情况，应包括油温（TEMPERATURE）、电压（VOLTAGE）、电流（CURRENT）、有功功率（ACTIVE_POWER）、油色谱数据（OIL_CHROMATOGRAM）。

表 12 换流变压器监测数据

表名	表头	数值类型	参数说明
TEMPERATURE	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	SENSORID	INT	传感器 ID
	SENSORSTATE	INT	传感器状态
	CAPTURETIME	DATETIME	数据采集时间
	TEMPERATURE	FLOAT	温度值
VOLTAGE	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	VOLTAGE	FLOAT	电压值
CURRENT	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	CURRENT	FLOAT	电流值
ACTIVE_POWER	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	ACTIVE_POWER	FLOAT	有功功率
OIL_CHROMATOGRAM	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	JWND	FLOAT	甲烷浓度
	YWND	FLOAT	乙烷浓度
	YXND	FLOAT	乙烯浓度
	YQND	FLOAT	乙炔浓度
	YYHT	FLOAT	一氧化碳
	EYHT	FLOAT	二氧化碳
	QQND	FLOAT	氢气浓度
	SND	FLOAT	水浓度
	DND	FLOAT	氮浓度
	YQND	FLOAT	氧气浓度

4.2.4 结果数据：

结果数据以 json 文件格式存储。结果数据应包括数值计算结果数据，每次计算保存一个文件。数值计算结果（FIELD_NAME）用 $N \times 1$ 维数组保存，同时应与渲染网格的网格顶点相匹配，N 为网格顶点数。

表 13 结果数据关键词分级

设备/部件	场量
EQUIP_NAME	TIME：“xxx”
	FIELD_NAME：“xxx”

5. 关于数字孪生信息系统的设计

5.1 电力装备数字孪生模型构建系统架构见附录 A。

5.2 数字孪生引擎服务交互接口架构图见附录 B。

6 数据存储和管理模块

6.1 数据存储和管理：

是数字孪生引擎运行的一个数据支撑环境。虚拟实体的信息系统包括了物理实体运行过程的相关数据，但是这些数据是根据业务需求而定义的，不能满足数字孪生系统运行过程的数据需求，因此，在已有的信息之外，数字孪生引擎需要定义自己的数据存储和管理。数字孪生引擎的数据存储和管理是虚拟实体中包含的信息系统中的数据存储之外的一个补充。

7 模型/数据融合模块

7.1 模型和数据映射：

是建立相关模型和实时数据的关联关系。比如利用三维几何模型，可以构建实时数据的空间关系，支持数据在三维空间中的展示；对于仿真模型引入实时数据，可以完善仿真参数，让模型运行更加贴合实际过程。

7.2 数据驱动下的模型更新：

是对传统建模过程中参数不确定的一个补充。在物理实体运行前，很多仿真参数都是假设的，或者是理论模型，不能和实际运行状况吻合。通过数据分析结果来完善模型参数让模型更拟实，是数字孪生的一个基本功能

7.3 模型驱动下的数据采集：

是利用机理模型来指导数据分析的基础，由于传感器部署都是需要成本的，没有目的的数据采集在工业领域往往不切实际。利用机理模型分析需求来指导数据采集过程，有限成本下部署最多的数据感知点，是数字孪生应用顺利开展的一个基础。

7.4 数据和模型：

是数字孪生系统的两个基本面。数据代表了物理实体，是从物理实体运行过程采集而来，代表实际；模型代表虚拟，是从数字模型分析、仿真而来，虚实融合就是模型和数据的融合。

8 智能计算模块

8.1 预测分析：

是利用“模型+数据”对物理实体的运行过程进行预测。可以是一个运行规律的计算，也可以是对几种方案的仿真评估。给出虚拟实体未来运行趋势的分析，为物理实体的运行提供优化建议。

8.2 在线/离线分析：

是利用计算模型，进行在线分析、离线分析。根据所掌握的分析模型以及应用需要，可以选择在线或离线模式。大量的计算需要采用离线模式；局部的、明确的一些判断，则可以结合边缘计算架构实现在线模式。

9 交互驱动模块

9.1 物理实体交互驱动接口：

是从物理实体采集实时数据的接口以及传送给物理实体的指令执行接口。传统的信息系统应用、管控软件中，也包括了对物理实体的数据采集和指令下达，但是数字孪生系统根据模型和数据融合需求，需要更多的数据，以及更精准的指令执行功能，就需要数字孪生引擎的交互接口来提供额外的驱动接口，实现数字孪生的增强功能。

9.2 虚拟实体交互驱动接口：

是数字孪生引擎的一个主要接口。模型数据大部分通过这个接口进入数字孪生引擎。一些计算结果也通过这个接口传回给虚拟实体。虚拟实体包括了数字模型和信息系统，传统的管控功能还是需要通过信息系统完成，而数字孪生引擎所产生的新的数据能辅助模型仿真、信息系统运行更好地完成。

9.3 外部软件交互驱动接口：

是指物理实体和数字孪生体本身之外的一些软件，为数字孪生系统提供软件环境。外部软件为数字孪生系统的运行提供了参考信息，以及一些功能支撑，所以需要专门的接口来获取相关的模型和数据。

附录 A

(规范性)

电力装备数字孪生模型构建整体架构

A. 1 整体架构

基于数字孪生的智能系统强调的是物理系统与虚拟系统的协调感知统一，所以基于数字孪生的智能系统最重要的有两个方面：一是数字化的物理系统与虚拟系统的实时连接；另外就是实现数字孪生系统的智能计算模块。本节将实时连接以及智能计算的模块定义为“数字孪生引擎”，最终形成数字孪生系统的通用参考架构，包括物理实体、虚拟实体、数字孪生引擎和数字孪生服务四个部分。电力装备数字孪生模型构建系统整体架构见图 A. 1。

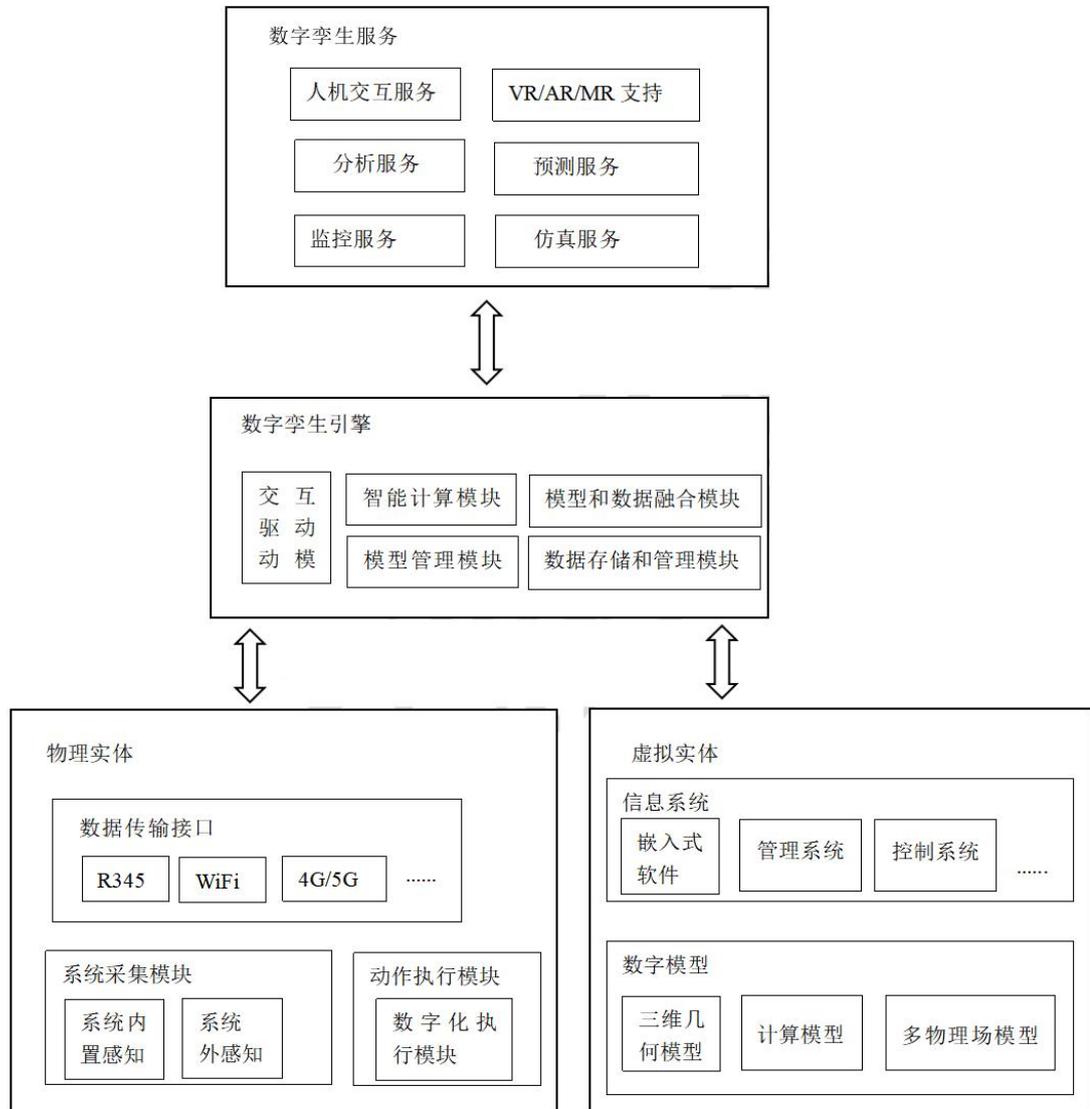


图 A. 1 电力装备数字孪生模型构建整体架构

附录 B

(规范性)

电力装备数字孪生模型构建服务交互架构

B. 1 服务交互架构

基于数字孪生的智能系统强调的是物理系统与虚拟系统的协调感知统一，所以基于数字孪生的智能系统最重要的有两个方面：一是数字化的物理系统与虚拟系统的实时连接；另外就是实现数字孪生系统的智能计算模块。本节将实时连接以及智能计算的模块定义为“数字孪生引擎”，最终形成数字孪生系统的通用参考架构，包括物理实体、虚拟实体、数字孪生引擎和数字孪生服务四个部分。电力装备数字孪生模型构建系统整体架构见图 A. 1

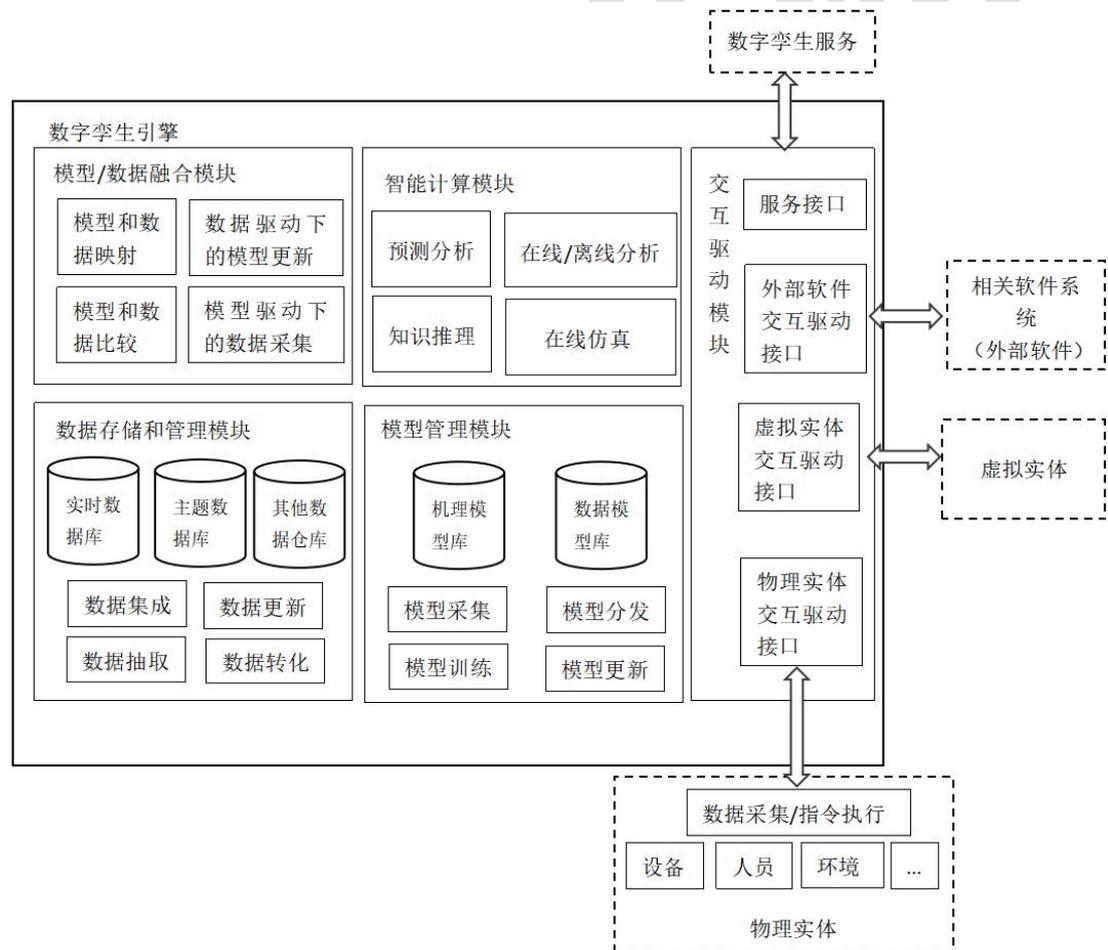


图 B. 1 电力装备数字孪生模型构建服务交互架构