ICS 35. xxx
CCS Lxx

团　　体　　标　　准

T/ISC XXX—XXXX

储气库数字孪生体构建技术要求
（枯竭气藏型）

Technical Requirements for Digital Twin Construction of Depleted Gas Reservoir Type Underground Gas Storage

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中 国 互 联 网 协 会　　发布

目 次

前　　言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
3.1 数字孪生 2
3.2 目标实体 2
3.3 数字实体 2
3.4 信息交互 2
3.5 储气库数字孪生体 2
3.6 骨架模型 2
3.7 肌理模型 2
3.8 驱动模型 2
3.9 孪生数据 3
3.10 坐标系 3
4 一般规定 5
5 数据体系构成 7
5.1 总则 7
5.2 气藏数字孪生数据 7
5.3 井筒数字孪生数据 8
5.4 站场数字孪生数据 9
5.5 地面设备数字孪生数据 10
5.6 一体化模型关联数据 11
6 数字孪生体构建数据要求 13
6.1 地质模型构建数据 13
6.2 地应力模型构建数据 13
6.3 一体化模型构建数据 13
7 数据交互要求 14
7.1 总则 14
7.2 测量感知 14
7.3 反馈控制 15
7.4 服务调用 15
7.5 数据输出 16
7.6 数字实体内交互 16
7.7 数字实体间交互 17
8 数据管理要求 18
8.1 数据质量要求 18
8.2 数据更新维护要求 18
8.3 数据安全要求 18
9 附录 A　数据体系总览表 19
10 附录 B　信息交互典型应用场景 20

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。

本文件是储气库数据系列团体标准之一。该系列标准拟由以下部分构成：

——第 1 部分：通则；

——第 2 部分：井筒工程数据（与本文件同期编制）；

——第 3 部分：气藏工程数据；

——第 4 部分：地面工程数据；

——第 5 部分：注采运行与监测数据；

——第 6 部分：数字孪生体数据（本文件）。

其他部分视行业发展与需求情况另行立项制定，部分编号按业务域预留，各部分分别单独编号发布。

本文件是储气库数据标准体系的数字孪生体数据部分，旨在规范储气库数字孪生体的数据构成、数据交互和数据管理。本文件的制定参考了 GB/T 43441.1—2023《信息技术 数字孪生 第 1 部分：通用要求》、GB/T 43441.2—2026《信息技术 数字孪生 第 2 部分：数字实体》和 GB/T 43441.3—2026《信息技术 数字孪生 第 3 部分：信息交互》，并结合了储气库智能注采建设实践经验，为储气库数字孪生系统的规划、设计、构建与运维提供技术依据。

储气库数字孪生体的构建涉及气藏、井筒、站场、地面设备等多个业务域，各业务域数据的对象、粒度与更新机制差异较大，宜在统一的数据体系下分别规定其数据构成，并针对典型建模对象规定相应的数据要求。

本文件覆盖气藏、井筒、站场、地面设备四个业务域，不限于井筒，故名称中不含“井筒”。

本文件由国家管网集团中原储气库有限责任公司提出。

本文件由中国互联网协会归口。

本文件起草单位：国家管网集团中原储气库有限责任公司。

本文件主要起草人：×××、×××。

1 范围

本文件规定了枯竭气藏型地下储气库数字孪生体的构建要求，包括数据体系构成、模型构建数据要求、数据交互要求和数据管理要求。

本文件适用于国枯竭气藏型储气库数字孪生系统的规划、设计、建设和运维过程中所需数据的采集、存储、交互与共享。盐穴型、含水层型储气库井筒工程数据可参照使用。

本文件中的“构建”包括数字孪生体的初始构建，以及其在运行维护阶段的更新、演化与数据维护。

本文件不适用于数字孪生系统软件的体系结构设计、功能开发与运行环境配置。

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 43441.1-2023 信息技术 数字孪生 第 1 部分：通用要求
GB/T 43441.3-2026 信息技术 数字孪生 第 3 部分：信息交互
GB/T 43441.2-2026 信息技术 数字孪生 第 2 部分：数字实体
GB/T 45626—2025 信息技术 装备数字孪生系统：通用要求
GB/T 46237—2025 信息技术 数字孪生能力成熟度模
SY/T 6848-2023 地下储气库设计规范
SY/T 6805-2017 油气藏型地下储气库安全技术规程
SY/T 7652-2021 气藏型储气库库容参数设计方法
SY/T 7647-2021 气藏型储气库地面工程设计规范
SY/T 7687-2023 气藏型储气库动态分析技术规范
SY/T 6756-2024 气藏型储气库常规修井作业技术规范
SY/T7754-2024 储气库地面设施生产运行技术要求
SY/T 7875-2025 储气库数字化设计导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 数字孪生

数字孪生（Digital Twin）是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。

3.2 目标实体

目标实体（Target Entity）是现实世界被选中进行数字化映射的实体。在本文件中，目标实体指储气库的物理设施、地质体及其运行状态。

3.3 数字实体

数字实体（Digital Entity）是目标实体的数字化映射。在本文件中，数字实体指储气库物理设施和地质体的数字化模型及其关联数据。

3.4 信息交互

信息交互（Information Exchange）是信息在数字实体和目标实体之间、数字实体和服务应用之间，以及数字实体内部、数字实体之间的获取、传输、使用过程。

3.5 储气库数字孪生体

储气库数字孪生体是储气库物理实体（含气藏、井筒、站场、地面设备等）的数字化表达，包含骨架模型、肌理模型和驱动模型三层结构，支持储气库全生命周期数据的动态映射、仿真模拟和智能决策。

3.6 骨架模型

骨架模型是储气库数字孪生体的几何结构层，描述目标实体的空间形态、位置坐标、尺寸规格和拓扑关系。包括：

（1）气藏骨架模型：盖层、储层、断层、断块等地下实体要素的空间几何形态；

（2）井筒骨架模型：井眼轨迹、套管层次、射孔位置等井身结构几何信息；

（3）站场骨架模型：站场空间布局、工艺流程布局等；

（4）地面设备骨架模型：压缩机、阀门、仪表等设备的三维外形及空间位置。

骨架模型的地理坐标应采用 CGCS2000 坐标系。

3.7 肌理模型

肌理模型是储气库数字孪生体的视觉表现层，在骨架模型的基础上通过材质、纹理、颜色等视觉元素的定义，实现对目标实体外观特征和物理状态的可视化表达。包括：

（1）静态常态下的外观表现样式；

（2）不同运行工况下的视觉变化表现样式（如气藏含气饱和度变化、设备运行状态变化等）；

（3）不同破坏程度下的视觉表现样式（如锈蚀、裂纹、老化等）。

3.8 驱动模型

驱动模型是储气库数字孪生体的动态行为层，定义目标实体的物理规律、运行逻辑和运动形态的数字化表达，支持数字孪生体的动态模拟和智能分析。包括：

（1）物理驱动模型：气体扩散、渗流、流体动力学等物理规律的数学模型；

（2）运行驱动模型：压缩机工作机理、工艺流程逻辑、自动控制策略等运行模型；
（3）安全驱动模型：安全监测、风险预测与应急响应模型。

3.9 孪生数据

孪生数据（Twin Data）是记录目标实体各类相关信息的数值，包括本体数据、规则数据和衍生数据。

3.10 坐标系

2000 国家大地坐标系（CGCS2000），是我国当前最新的国家大地坐标系。建议优先使用 CGCS2000 坐标系。当数据所用的坐标和高程系统非 CGCS2000 坐标系时，应转换为 CGCS2000 坐标系，或明确标识所采用坐标系。

4 符号和缩略语

下列缩略语适用于本文件。

API：应用程序接口（Application Programming Interface）；

BIM：建筑信息模型（Building Information Modeling）；

CGCS2000：2000 国家大地坐标系（China Geodetic Coordinate System 2000）；

EAM：企业资产管理（Enterprise Asset Management）；

ESD：紧急关断（Emergency Shutdown）；

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

IMS：完整性管理系统（Integrity Management System）；

MQTT：消息队列遥测传输（Message Queuing Telemetry Transport）；

OPC：过程控制用对象链接与嵌入（OLE for Process Control）；

PBS：实物分解结构（Physical Breakdown Structure）；

SCADA：数据采集与监视控制系统（Supervisory Control And Data Acquisition）。

5　一般规定

5.1 储气库数字孪生体数据采用四层分类体系：一级分类为业务域，二级分类为模型层（骨架/肌理/驱动），三级分类为数据类别，四级分类为数据项。

5.2 储气库数字孪生体数据体系的结构层级如图 1 所示：



图 1　储气库数字孪生体数据体系结构

5.3 数据编码规则应与《储气库气藏和井筒工程实物分解结构导则及编码规定》保持一致。数字孪生体相关数据项编码可作为 PBS 编码体系的扩展。

5.4 储气库数字孪生体的建立应与储气库工程建设同步进行。在方案设计阶段即应规划数字孪生体的数据采集方案；在工程建设阶段应同步采集、存储和管理数字孪生体所需的各类数据。

5.5 数字孪生体数据应涵盖物理实体数据、虚拟模型数据、实时运行数据、应用服务数据等四大类，支撑数字孪生体在全生命周期中的迭代优化。

5.6 与相关标准的关系：本文件的标准化对象是储气库数字孪生体，覆盖气藏、井筒、站场、地面设备四个业务域，不限于井筒。井筒工程业务数据（钻井、录井、测井、实验分析）的采集与移交按《储气库井筒工程数据规定（枯竭气藏型）》执行，本文件不重复规定；本文件第 6 章规定的井筒业务域数据，是服务孪生体建模的骨架、肌理与驱动数据，与上述井筒工程业务数据为不同视角，二者可互为引用。

5.7 数据项定义：数据项定义应包含数据项名称、数据类别、类型与精度、单位、采集来源、更新频率、值域/约束。其中类型与精度按下列规则表示：

a) 字符型用 c(n)表示，n 为可容纳的字节数。例如 c(10)表示 10 个字节的字符串，可容纳 10 个英文字符或 5 个汉字；不定长字符串用“文本”表示；

b) 数值型用 d(m,n)表示，m 为总位数（含小数位），n 为小数位数。例如 d(8,2)表示总位数 8 位、小数位 2 位的数值，如 123456.78；

c) 日期时间型按 GB/T 7408 表示；

d) 布尔型（开关量）用“真/假”或“0/1”表示，取值含义应在值域/约束中说明；

e) 枚举型应列出全部取值或给出其引用文件；

f) 几何与模型类数据（三维离散网格、多边形坐标、点云、三维 CAD/BIM 模型、纹理贴图、色阶映射等）应注明数据格式与坐标参照；

g) 时间序列、曲线类数据应注明采样间隔与量纲。

单位应单独给出，按 GB 3100、GB 3101、GB 3102 使用法定计量单位；行业惯用单位（如 mD）应在初次出现处注明其含义。

5.8 技术内容的组织：本文件的技术内容按“数据体系—构建要求—交互要求—管理要求”组织。第 6 章规定储气库数字孪生体数据的体系构成，按业务域和模型层给出数据项的完整清单，回答“孪生体需要哪些数据”；第 7 章规定地质模型、地应力模型和一体化模型等典型建模对象的数据要求，是在第 6 章数据项全集基础上针对特定建模任务的选取与组合，并补充数据精度、模型验证等质量要求，回答“这些数据如何用于建模并达到什么质量”。第 6 章与第 7 章为“数据全集—典型应用”的关系，二者规定的数据项应保持一致，不一致时以第 6 章的数据项定义为准。第 8 章、第 9 章分别规定数据交互要求和数据管理要求。

6 数据体系构成

6.1 总则

储气库数字孪生体的数据体系按业务域划分为气藏、井筒、站场、地面设备四个专业域，每个专业域的数据进一步按模型层分为骨架模型数据、肌理模型数据和驱动模型数据。

各类数据按数据项名称、数据类别、类型与精度、采集方式、更新频率等维度进行规范定义。数据采集应遵循“一次采集、多场景复用”的原则，避免数据冗余。

表 1 储气库数字孪生体数据体系总览

业务域	骨架模型数据	肌理模型数据	驱动模型数据
气藏	地质构造、岩性、物性、流体、网格等	岩性纹理、含气状态、物性渲染等	气体扩散、边底水动态、渗流等
井筒	井眼轨迹、套管、封隔器、射孔等	井壁肌理、部件外观、工况状态等	井筒流动、压力变化、完整性诊断等
站场	站场布局、建筑、管线走向等	地形地貌、建筑外观、设备细节等	工艺流程逻辑、设备运行规则等
地面设备	设备外形、尺寸、安装位置等	材质纹理、光影效果、运行状态等	压缩机机理、控制策略、联锁逻辑等

6.2 气藏数字孪生数据

气藏数字孪生数据涵盖了地下储气层的三维地质构造、储层物性及其多周期注采运行状态的数字化表达所需数据。

6.2.1 骨架数据

气藏骨架数据是描述地下气藏三维空间形态和内部构成的基础数据，是气藏数字孪生体的几何框架。数据项如下：

表 2 气藏骨架数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	构造层面数据	几何数据	d(10,2)	m	地震解释、钻井分层	地质认识更新时
2	断层数据	几何数据	d(10,2)	m	地震解释	地质认识更新时
3	储层顶底深度	几何数据	d(10,2)	m	测井解释、地质分层	新井完钻后
4	盖层厚度分布	属性数据	d(8,2)	m	地质建模	地质认识更新时
5	网格模型数据	几何数据	三维离散网格		地质建模软件	模型更新时
6	含气面积边界	几何数据	多边形坐标		气藏工程分析	每注采周期
7	坐标系说明	几何数据	默认 GCS2000		气藏工程分析	每注采周期
8	气水界面	几何数据	d(10,2)	m	生产动态分析	每注采周期
9	储层横向展布	几何数据	空间分布		地质建模	地质认识更新时

6.2.2 肌理数据

气藏肌理数据定义了地下气藏的可视化渲染规则和外观表现参数。数据项如下：

表 3 气藏肌理数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	说明
1	岩性纹理样式	渲染数据	枚举/纹理 ID		砂岩、泥岩、盐岩等不同岩性的颜色和纹理表现
2	物性渲染参数	渲染数据	色阶映射表		低渗/中渗/高渗区域的颜色映射

					规则
3	含气饱和度渲染	渲染数据	色阶映射表		含气区/气水过渡区/含水区的颜色和透明度
4	压力场渲染参数	渲染数据	色阶映射表		高压区/低压区的颜色梯度映射
5	温度场渲染参数	渲染数据	色阶映射表		不同温度区域的映射规则
6	多孔介质微观纹理	渲染数据	纹理 ID		储层微观孔隙结构的可视化纹理
7	裂缝网络渲染	渲染数据	样式参数		裂缝密度和方向的可视化表达

6.2.3 驱动数据

气藏驱动数据定义了地下气藏流体运动、压力变化等物理行为和动态演化规律的数学模型参数。数据项如下：

表 4　气藏驱动数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	孔隙度分布	物性数据	d(6,4)	—	测井解释、岩心分析	地质认识更新时
2	渗透率分布	物性数据	d(10,4)	mD	测井解释、岩心分析	地质认识更新时
3	相对渗透率曲线	流体数据	曲线数据		岩心实验	必要时更新
4	毛管压力曲线	流体数据	曲线数据		岩心实验	必要时更新
5	PVT 流体参数	流体数据	参数组		流体实验分析	必要时更新
6	岩石压缩系数	力学数据	d(8,6)	1/MPa	岩心实验	必要时更新
7	地层压力数据	动态数据	d(8,2)	MPa	压力监测	实时/定期
8	注采气量数据	动态数据	d(12,2)	万方/天	计量系统	实时/日
9	气体组分数据	流体数据	d(6,4)	—	气体分析	定期
10	边底水活动数据	动态数据	d(10,2)	m	监测井数据	定期
11	储层应力敏感数据	力学数据	曲线数据		岩心实验	必要时更新
12	多周期储层参数变化	动态数据	时间序列		历史数据分析	每注采周期

6.3　井筒数字孪生数据

井筒数字孪生数据涵盖了井的物理结构及其在注采过程中的运行状态的数字化表达所需数据。

6.3.1 骨架数据

表 5　井筒骨架数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	井口坐标	几何数据	d(12,6)		井位测量	一次性
2	井眼轨迹数据	几何数据	d(10,2)	m/°	测斜数据	钻井期间
3	套管层次数据	结构数据	外径/内径/下深/壁厚		钻井工程设计	完井时
4	水泥返高数据	结构数据	d(8,2)	m	固井数据	固井后
5	射孔位置数据	结构数据	d(8,2)	m	射孔设计	完井时
6	封隔器位置	结构数据	d(8,2)	m	完井设计	完井时
7	人工井底深度	结构数据	d(8,2)	m	钻井数据	完井时
8	井口装置结构	结构数据	型号/尺寸/压力等级		设备资料	安装时
9	套管鞋深度	结构数据	d(8,2)	m	钻井数据	完井时
10	油管数据	结构数据	外径/内径/下深		完井设计	完井时

6.3.2 肌理数据

表 6　井筒肌理数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	说明
1	井壁常态纹理	渲染数据	纹理 ID		正常状态下井壁外观纹理
2	井壁注采态纹理	渲染数据	纹理 ID/动态		注气/采气状态下井壁外观变化
3	套管腐蚀纹理	渲染数据	分级纹理		轻度/中度/重度腐蚀的外观表现
4	水泥环状态渲染	渲染数据	透明度/颜色		水泥环完整性状态的颜色指示
5	流体颜色标识	渲染数据	色阶映射		气体/液体在井筒中的颜色标识
6	环空压力颜色映射	渲染数据	色阶映射		正常/警告/危险三级映射
7	井筒温度场渲染	渲染数据	色阶映射		温度分布的颜色梯度
8	井口设备外观纹理	渲染数据	纹理 ID		采气树各部件材质纹理

6.3.3 驱动数据

表 7　井筒驱动数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	井筒流动模型参数	物理模型	参数组		流体力学计算	必要时更新
2	井筒压力分布	动态数据	d(8,2)	MPa	压力计/计算	实时/定期
3	井筒温度分布	动态数据	d(6,2)	° C	温度计/计算	实时/定期
4	冲蚀临界流速	安全数据	d(8,2)	m/s	工程计算	必要时更新
5	井筒完整性诊断规则	规则数据	规则集		行业规范/经验	持续完善
6	环空压力安全阈值	安全数据	d(8,2)	MPa	工程设计	设计时确定
7	腐蚀速率模型参数	物理模型	参数组		检测数据分析	定期更新
8	底水锥进预测参数	物理模型	参数组		气藏工程分析	每注采周期
9	水泥环密封失效判据	安全数据	规则集		行业标准	持续完善

6.4　站场数字孪生数据

站场数字孪生数据涵盖了注采站场物理布局、工艺流程及其运行状态的数字化表达所需数据。

6.4.1 骨架数据

表 8　站场骨架数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	站场边界坐标	几何数据	多边形坐标		工程测量	建设时
2	设备布局坐标	几何数据	d(10,6)		设计图纸/三维扫描	建设/改造时
3	管线走向数据	几何数据	管线路径坐标		设计图纸	建设/改造时
4	坐标系说明	几何数据	默认 GCS2000		工程测量	建设时
5	建筑物三维模型	几何数据	BIM 模型		建筑设计	建设/改造时
6	管廊桥架数据	几何数据	三维路径		设计图纸	建设/改造时
7	阀门位置数据	几何数据	d(10,6)		P&ID/三维扫描	建设/改造时

8	法兰/接头位置	几何数据	d(10,6)		P&ID	建设/改造时
9	仪控点位置	几何数据	d(10,6)		仪表清单	建设/改造时

6.4.2 肌理数据

表 9　站场肌理数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	说明
1	地形地貌纹理	渲染数据	纹理贴图		站场周边地形外观表现
2	建筑物外观材质	渲染数据	材质/颜色		建筑物外墙、屋顶材质表现
3	管汇外观渲染	渲染数据	材质/颜色		管线外壁材质和颜色
4	工艺流程颜色标识	渲染数据	色标体系		不同介质/压力等级的管线颜色
5	设备运行状态颜色	渲染数据	色阶映射		运行/停止/故障等状态的颜色指示
6	光照阴影效果	渲染数据	光照参数		日照角度、阴影投射参数
7	安全标识渲染	渲染数据	标识样式		危险区域、逃生路线等标识

6.4.3 驱动数据

表 10　站场驱动数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	工艺流程图（P&ID）	逻辑数据	流程拓扑		工程设计	改造时更新
2	管线压力等级	属性数据	d(8,2)	MPa	工程设计	改造时更新
3	管线口径数据	属性数据	d(6,1)	mm	工程设计	改造时更新
4	阀门控制逻辑	规则数据	逻辑规则		自动控制设计	改造时更新
5	ESD 联锁逻辑	安全数据	逻辑规则		安全工程设计	改造时更新
6	流量调节控制策略	控制数据	算法参数		工艺设计	调优时更新
7	分离器工作参数	运行数据	d(8,2)		设备规格书	设备更换时
8	脱水装置工作参数	运行数据	d(8,2)		设备规格书	设备更换时
9	计量装置工作参数	运行数据	d(8,2)		设备规格书	设备更换时

6.5　地面设备数字孪生数据

地面设备数字孪生数据涵盖了压缩机、自动化仪表、井控设备、电气设备及特种设备等关键动、静设备的数字化表达所需数据。

6.5.1 骨架数据

表 11　地面设备骨架数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	压缩机三维模型	几何数据	三维 BIM/CAD 模型		设备厂商/三维扫描	设备更换时
2	压缩机安装位置	几何数据	d(10,6)		工程测量	安装时
3	阀门三维模型	几何数据	三维 CAD 模型		设备厂商	设备更换时
4	仪表安装位置	几何数据	d(10,6)		仪表清单	安装/更换时
5	井控设备三维模型	几何数据	三维 CAD 模型		设备厂商	设备更换时
6	电气设备三维模型	几何数据	三维 CAD 模型		设备厂商	设备更换时
7	设备连接关系	拓扑数据	连接矩阵		P&ID/设计图纸	改造时更新
8	设备基础尺寸	几何数据	d(8,2)	mm	设备厂商/设计	安装时

6.5.2 肌理数据

表 12　地面设备肌理数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	说明
1	设备表面材质纹理	渲染数据	材质贴图		金属/塑料/橡胶等表面材质
2	设备运行状态颜色	渲染数据	色阶映射		运行(绿)/待机(黄)/故障(红)/停用(灰)
3	设备铭牌信息渲染	渲染数据	纹理+文字		铭牌文字在模型中可视化
4	压缩机润滑油颜色	渲染数据	色阶映射		正常/变质状态的颜色
5	仪表盘面显示	渲染数据	动态纹理		模拟真实仪表盘的外观
6	设备老化痕迹	渲染数据	分级纹理		新/正常老化/严重老化的外观
7	管道保温层外观	渲染数据	纹理贴图		保温层完好/破损的外观

6.5.3 驱动数据

表 13　地面设备驱动数据项

序号	数据项名称	数据类别	类型与精度	单位	采集来源	更新频率
1	压缩机特性曲线	物理模型	曲线数据		设备厂商	设备更换时
2	压缩机转速数据	动态数据	d(6,0)	rpm	SCADA	实时
3	压缩机进出口压力	动态数据	d(8,2)	MPa	SCADA/传感器	实时
4	压缩机进出口温度	动态数据	d(6,2)	° C	SCADA/传感器	实时
5	压缩机电流/功率	动态数据	d(8,2)	A/kW	SCADA	实时
6	压缩机振动监测	动态数据	d(8,4)	mm/s	振动传感器	实时
7	阀门开度数据	动态数据	d(6,2)	%	SCADA/执行器	实时
8	紧急切断阀状态	动态数据	开关量		ESD 系统	实时
9	电机运行参数	动态数据	d(8,2)		SCADA/变频器	实时
10	润滑系统参数	动态数据	d(6,2)		传感器	定期
11	安全阀校验数据	安全数据	日期/压力		检验记录	年检后
12	设备检修履历	管理数据	时间序列记录		EAM 系统	检修后

6.6　　一体化模型关联数据

一体化模型是将气藏、井筒、站场、地面设备四个业务域的数字孪生模型进行集成耦合的数据层。一体化模型应能反映地面设施之间、地面和井筒、以及井筒和储层之间的耦合关系。

表 14　一体化模型关联数据项

序号	数据项名称	数据类别	说明	关联方向
1	井位-地层对应关系	关联数据	井轨迹与地层界面的空间对应关系	井筒↔ 气藏
2	射孔-储层对应关系	关联数据	射孔段与储层层位的对应关系	井筒↔ 气藏
3	井口-集输管线连接关系	关联数据	井口装置与站场集输管网的连接	井筒↔ 站场
4	井口-计量系统关联	关联数据	注采井与计量装置的计量对应关系	井筒↔ 地面设备
5	压缩机-井网关联	关联数据	压缩机运行对注采井网的影响关系	地面设备↔ 井筒
6	监测井-气藏关联	关联数据	监测井数据与气藏压力场的关联	井筒↔ 气藏

7	ESD 系统-全流程关联	关联数据	紧急切断对全流程影响的关联路径	安全↔ 全业务域
8	注采方案-流程切换关联	关联数据	注气/采气工艺流程切换逻辑	决策↔ 执行

7 模型构建数据要求

7.1 地质模型构建数据

7.1.1 地质模型构建应注重数据的准确性与安全性，详细考量储气库的地质特征，包括岩性、孔隙度、渗透率、地层厚度、断层、天然裂缝等，合理评估储层物性的不确定性。

7.1.2 应根据储气库的类型和地质条件，考虑离散网格的大小、形状和数量，利用专业的三维地质建模软件精确建立物性模型。

7.1.3 地质模型准确度应进行验证，包括：地质体空间形态的准确性验证、储层参数精度的验证、流体性质表征的验证、模型分辨率和网格大小的验证以及地质合理性的控制验证。

7.1.4 地质模型数据输入要求：

（1）井数据：井位坐标、补心海拔、井轨迹、分层数据、测井曲线、岩心分析数据等；

（2）地震数据：地震解释层位、断层数据、速度场数据、属性体数据等；

（3）地质认识：沉积相分析、构造解释成果、储层评价成果等；

（4）生产动态数据：压力历史数据、产量历史数据、流体分析数据等。

7.2 地应力模型构建数据

7.2.1 构建精确的地应力模型对储气库的安全至关重要。应在地质模型的基础上，对模型进行合理的网格划分，特别是在断层、盖层等关键部位进行网格细化。

7.2.2 应根据实际地质资料和实验室测试结果，合理选择模型参数，如弹性模量、泊松比、破裂韧度等，并在模拟过程中进行参数校准，以确保模型的准确性。

7.2.3 地应力模型精度验证要求：从地质构造吻合度、应力应变模拟准确性、地质力学特征反映以及安全性评估等多个方面进行综合考虑和验证。

7.2.4 地应力模型数据输入要求：

（1）岩石力学参数：弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角、抗压强度等；

（2）地应力测量数据：最小/最大水平主应力、垂向应力及其方向；

（3）孔隙压力数据：地层压力分布数据；

（4）断层力学参数：断层摩擦系数、断层渗透率等。

7.3 一体化模型构建数据

7.3.1 应基于气藏模型、井筒模型、站场模型、地面设备模型构建成一体化模型。一体化模型应能反映地面设施之间、地面和井筒、以及井筒和储层之间的耦合关系。

7.3.2 一体化模型构建的核心关联数据包括井位-地层对应关系、射孔-储层对应关系、井口-集输管线连接关系等（见 6.6）。

7.3.3 一体化模型的精度应满足储气库智能注采和应急管理的应用需求。在气藏和井筒的关键节点上，数据精度应达到工程设计级别。

8 数据交互要求

8.1 总则

8.1.1 本章基于 GB/T 43441.3-2026 规定的数字孪生信息交互的六大过程，结合储气库领域特点进行具体化规范。

8.1.2 储气库数字孪生的信息交互应覆盖以下六类过程：

（1）测量感知：通过测量和感知等方式获取储气库物理实体信息，实现其向数字实体的动态映射；

（2）反馈控制：基于服务应用的指令或分析结果，数字实体对储气库物理实体进行信息反馈和控制；

（3）服务调用：上层应用通过调用数字实体提供的信息接口，实现模型计算和数据查询等；

（4）数据输出：服务应用形成的仿真、分析和决策结果向数字孪生系统的输出；

（5）数字实体内交互：数字实体内部数字模型和孪生数据之间的信息交互；

（6）数字实体间交互：不同数字实体之间的跨实体信息交互。

8.1.3 信息交互的数据结构应包含首部、信息主体和尾部三部分，具体要求参照 GB/T 43441.3-2026 附录 A。信息接口应满足物理接口和逻辑接口要求，具体要求参照 GB/T 43441.3-2026 附录 B。

8.2 测量感知

8.2.1 交互内容

储气库数字孪生的测量感知过程应获取以下类别的目标实体信息：

（1）固定参数（本体数据）：目标实体本身具有的特性，如井口坐标、套管尺寸、地层厚度、断层产状、设备几何参数等。数据来源包括工程设计文件、竣工资料、设备技术规格书等。

（2）动态特性（实时数据）：目标实体在运行过程中的状态参数，如井口压力、温度、流量、压缩机转速、地层压力、气水界面变化等。数据来源包括 SCADA 系统、现场传感器、物联网设备等。

（3）外界信息（环境数据）：影响目标实体状态的外部信息，如环境温度、气象数据、周边地质活动数据等。

特别应注意的是，测量感知的对象不仅包括常规生产数据（温度、压力、流量），还应包括：

——地质力学数据：盖层应力、断层活动性、地层沉降等；

——井筒完整性数据：环空压力、腐蚀速率、水泥环密封状态等；

——空间数据：三维地震解释成果、时移地震监测数据等。

8.2.2 交互方式

（1）通过 SCADA 系统采集储气库生产过程数据（压力、温度、流量、设备状态等），经数据接口传输映射到数字实体。

（2）通过物联网传感器系统采集井筒环空压力、腐蚀监测、微地震监测等专业数据。

（3）从其他信息系统（如 ERP、EAM、IMS 等）获取设备台账、检修记录、检验报告等管理数据。

（4）通过人工录入或批量导入方式采集无法自动获取的数据（如实验室分析结果、地质研究成果等）。

8.2.3 技术要求

（1）所感知的目标实体数据应符合数字孪生系统对数据格式、精度和内容的要求。

（2）应根据目标数据特征，确定数据测量感知的方式、精度和频率等技术参数。生产

运行数据建议采集频率≥1 次/分钟；地质力学监测数据建议采集频率≥1 次/日。

（3）应具备多种数据感知和采集技术，包括有线/无线传感器、SCADA 接口、OPC 协议、MQTT 协议等。

（4）数据采集过程应使用时间戳，并记录和存储完整的数据采集日志。

（5）信息结构应符合 GB/T 43441.3-2026 附录 A 的要求；信息接口应符合附录 B 的要求。

8.3 反馈控制

8.3.1 交互内容

（1）反馈信息：经过服务应用与数字实体处理，向储气库物理实体反馈的信息。主要包括：

——智能注采方案优化结果：最优配产方案、日配注配采量分配方案等；

——安全预警信息：盖层破裂风险、断层泄漏风险、井筒冲蚀风险等分级预警；

——状态评估结果：井筒完整性评价、设备健康状态评估等。

（2）控制信息：由数字实体向目标实体下达的控制指令。主要包括：

——自动开关井指令；

——流量/压力调节指令；

——地面注采工艺流程自动切换指令；

——紧急关断（ESD）指令。

8.3.2 交互方式

（1）直接控制：数字实体形成决策指令，通过自动控制系统直接传输到目标实体（如调节阀门开度、启停压缩机等），适用于自动化程度高、安全性已充分验证的场景。

（2）间接控制：数字实体形成反馈信息和操作建议，通过可视化人机交互界面反馈给操作人员，指导操作人员进行分析决策后下达控制指令，适用于高风险或需人工确认的场景。

8.3.3 技术要求

（1）反馈控制应包含闭环特征——控制效果必须通过测量感知环节实时回传，形成“感知→分析→决策→控制→再感知”的动态优化循环。

（2）应基于模型和实时数据，利用反馈控制算法进行数据分析、仿真模拟，形成可靠的反馈信息和/或控制指令。

（3）目标实体应支持控制指令的格式校验和指令注入权限管理等接入要求。

（4）控制指令传输应满足工业控制系统的网络安全要求，关键控制指令应具备冗余通信通道。

（5）应对目标实体与数字实体之间的数据采集、传输、转换和控制过程进行动态可视化监控，形成可追溯的控制指令和反馈信息流。

8.4 服务调用

8.4.1 交互内容

服务应用从数字实体调用的服务类别包括：

（1）数据服务：气藏压力分布查询、井筒运行参数查询、设备状态查询等；

（2）分析服务：气藏数值模拟分析、井筒完整性诊断分析、设备故障预测分析等；

（3）控制服务：智能配注配采方案优化、应急联动控制策略等；

（4）可视化服务：三维场景概览与导航、动态模拟展示、虚拟仿真等。

8.4.2 交互方式

服务应用通过标准化 API 接口调用数字实体提供的信息接口，提取数字实体运行模型和数据，并驱动数字孪生系统执行相应操作。典型的储气库服务调用场景包括：

——应急演练应用调用数字孪生体的“气体扩散模型”进行泄漏模拟；

——智能配产应用调用“气藏数值模拟”服务预测不同方案效果；

——设备管理应用调用“压缩机健康模型”进行预测性维护。

8.4.3 技术要求

（1）应明确服务所执行的功能和任务，根据服务范围对服务类别进行划分。

（2）服务提供者应将服务信息注册到管理平台，包括信息接口、版本和元数据等。

（3）应定义服务调用的格式和方法，包括服务请求、服务响应和服务执行过程中的状态监控和异常处理。

（4）应定义服务的性能参数，包括响应时间、吞吐量和并发处理能力等，确保高可用性和容错性。

（5）应明确服务调用的环境和传输安全，包括物理隔离、权限管控和数据传输加密。

8.5 数据输出

8.5.1 交互内容

（1）结果信息：服务应用经过仿真、分析和处理得到的结果性信息，如：注采方案优化结果、风险诊断报告、生产报告等。

（2）更新信息：经过服务应用处理后，用于更新数字实体的信息，如：模型校准参数更新、状态更新指令等。

（3）系统信息：服务应用在运行过程中产生的自身状态、性能和健康等信息，确保应用的稳定性、可靠性和高效性。

8.5.2 交互方式

数据输出可通过以下方式实现：

（1）三维可视化平台展示：通过三维引擎展示储气库“概览与导航”全景图及“动态模拟”场景；

（2）标准化 API 接口输出：通过 API 向 ERP、IMS 等管理系统输出关键运行指标和报表数据；

（3）实时数据流输出：通过数据流方式将模拟结果、状态信息等持续输出至外部系统或用户界面；

（4）报告生成：定期或按需生成分析报告，供用户或系统进行分析和存档。

8.5.3 技术要求

（1）数据输出内容应包含发起对象、指向目标、输出类型和输出内容等要素。

（2）数据输出应减少数据冗余，严格控制服务应用的数据输出模型，减少冗余数据的无效流动。

（3）数据输出应记录输出时间、应答时间和执行时间等信息，实现全流程可追溯。

（4）输出衍生数据和指令的精度和通信频率等技术参数应满足数字模型计算和目标实体的响应时间要求。

（5）应统一输出数据、指令的传输方式和接口协议标准，确保数据输出的安全稳定。

8.6 数字实体内交互

8.6.1 交互内容

储气库数字实体内交互主要包括以下内容：

（1）数据→模型：实时测量的“压力”数据驱动“井筒肌理模型”更新显示状态；储层生

产动态数据驱动“气藏数值模拟模型”进行计算。

（2）模型→数据：气藏数值模拟计算结果（压力场、饱和度场等）存入孪生数据库；井筒完整性诊断结果更新井筒状态数据。

（3）模型→模型：地质模型→地应力模型的参数传递；地应力模型→井筒完整性模型的安全边界传递。

8.6.2 交互方式

（1）数字孪生数据中的实时或历史数据流向孪生模型，驱动模型运行和更新。

（2）孪生模型的分析计算结果流向数字孪生数据，进行数据汇聚和共享。

（3）不同学科模型之间通过标准化数据接口进行参数传递和耦合计算。

8.6.3 技术要求

（1）应实时监视信息交互过程，识别和解决信息传递中的异常和错误，并记录和存储交互信息。

（2）应评估和优化信息交互的效率和质量，对模型计算耗时和数据传输延迟进行监控。

（3）在储气库智能注采场景中，注采方案优化模型的迭代计算应在规定时间内完成，以满足日配产配注的时效性要求。

8.7 数字实体间交互

8.7.1 交互内容

在储气库数字孪生体系中，数字实体间交互主要包括：

（1）气藏数字实体↔井筒数字实体：气藏压力场影响井筒流入动态，井筒注采数据反馈气藏模型更新。

（2）井筒数字实体↔站场数字实体：井口参数传递至站场工艺流程模型，站场控制指令反馈至井筒。

（3）站场数字实体↔地面设备数字实体：工艺流程模型驱动设备运行模型，设备状态反馈至工艺流程。

（4）库群间交互：多个储气库（库群）之间，或储气库与管道数字孪生体之间的跨实体数据共享和协同。

8.7.2 交互方式

数字实体间交互通过不同数字实体之间交互模型和数据信息，在数字空间中实现逻辑联动。储气库数字孪生系统应采用统一的数据模型和语义标准，确保跨实体交互的信息一致性。

8.7.3 技术要求

（1）参与信息交互的数字实体应满足数字孪生系统功能需求，包括但不限于生产过程数据、运营数据和维护数据。

（2）应通过本体论定义实体间共享术语，确保信息交互的语义统一。在储气库领域，各专业术语的定义应遵循行业标准。

（3）共享统一逻辑对象时，应保持信息的状态同步与一致性。

9 数据管理要求

9.1 数据质量要求

9.1.1 数据完整性：数字孪生体数据应覆盖气藏、井筒、站场、地面设备全业务域的骨架、肌理、驱动三层模型数据，确保数据体系的完整性。

9.1.2 数据准确性：

（1）空间坐标数据精度应满足工程设计级别要求，轨道数据偏差应控制在工程允许范围内；

（2）生产运行数据的精度应满足工艺控制和安全监测的要求，关键参数的测量精度应符合行业标准；

（3）地质模型数据的精度应通过多种手段交叉验证。

9.1.3 数据一致性：同一实体在不同系统中的数据应保持一致。当数据存在冲突时，应以优先级最高的数据源为准。数据源优先级由高到低为：SCADA 实时数据 > 测试/检测数据 > 工程设计数据 > 历史经验数据。

9.1.4 数据时效性：实时数据应具有明确的时间戳，数据从采集到入库的延迟应满足数字孪生系统的实时性要求。生产运行数据的采集延迟不应超过 60 秒。

9.2 数据更新维护要求

9.2.1 随着储气库改扩建和井网完善，以及采用新技术、新方法对地下认识的不断深化，应及时对数字孪生体和地质模型进行更新维护。

9.2.2 考虑到多周期注采对气藏地质参数（如孔隙度、渗透率、相对渗透率等）的影响，应对地质模型和数字孪生体相关部分进行适时更新维护。建议每完成一个完整注采周期后，对模型进行一次系统评估和校核。

9.2.3 数字孪生体的更新维护应建立版本管理机制，记录每次更新的时间、内容、依据和责任人，确保模型演进过程可追溯。

9.2.4 当发生以下情况时，应强制触发数字孪生体更新：

（1）储气库完成新井钻井或老井大修作业后；

（2）储气库完成站场改扩建或工艺流程调整后；

（3）获得重大地质新认识或三维地震新资料后；

（4）发生影响储气库地质条件或工程结构的生产异常事件后。

9.3 数据安全要求

9.3.1 数字孪生体数据应建立分级分类安全管理制度，根据数据敏感程度实施不同等级的安全保护措施。

9.3.2 关键控制指令的传输应满足工控系统网络安全等级保护要求，涉及注采操作的控制信令应具备身份验证和指令完整性校验机制。

9.3.3 数字孪生体数据应建立备份与恢复机制，生产运行数据的备份周期不应超过 24 小时，地质模型等静态数据应在每次更新后进行增量备份。

9.3.4 数据访问应建立权限控制体系，数字孪生体的操作日志应完整记录，保存期限不少于 1 年。

10 附录 A　数据体系总览表

（资料性附录）

本附录汇总了储气库数字孪生体数据体系中骨架模型、肌理模型和驱动模型所对应的全部数据类别。

表 A.1　储气库数字孪生体数据体系总览

业务域	模型层	数据内容概要	数据项数量
气藏	骨架模型	构造层面、断层、储层顶底、盖层、网格、含气边界、气水界面等	8
气藏	肌理模型	岩性纹理、物性渲染、含气饱和度渲染、压力场/温度场渲染等	7
气藏	驱动模型	孔渗分布、相渗曲线、PVT 参数、地层压力、注采气量、边底水活动等	12
井筒	骨架模型	井口坐标、井眼轨迹、套管层次、水泥返高、射孔、封隔器等	10
井筒	肌理模型	井壁纹理、腐蚀纹理、水泥环渲染、流体标识、温压场渲染等	8
井筒	驱动模型	井筒流动模型、冲蚀临界流速、完整性诊断、腐蚀速率等	9
站场	骨架模型	站场边界、设备布局、管线走向、建筑物三维模型等	8
站场	肌理模型	地形纹理、建筑物外观、管汇外观、工艺颜色标识等	7
站场	驱动模型	P&ID 流程、管线压力口径、阀门控制逻辑、ESD 联锁等	9
地面设备	骨架模型	压缩机/阀门/仪表三维模型、设备安装位置、连接关系等	8
地面设备	肌理模型	表面材质、运行状态颜色、铭牌纹理、老化痕迹等	7
地面设备	驱动模型	压缩机特性曲线、振动监测、阀门开度、电机参数、检修履历等	12
一体化	关联数据	井位-地层、射孔-储层、井口-集输、压缩机-井网等关联关系	8

11 附录 B　信息交互典型应用场景

（资料性附录）

本附录给出了储气库数字孪生信息交互的典型应用场景及其对应的信息交互过程映射关系。

表 B.1　典型应用场景与信息交互过程映射

应用场景	涉及的主要交互过程	场景描述
智能配注配采	测量感知→数字实体内交互→反馈控制	实时采集井口压力温度流量→气藏/井筒模型计算→输出最优配产方案→自动调整阀门开度
三维概览导航	测量感知→数据输出	从 SCADA 获取实时数据→三维引擎渲染展示储气库注采气全流程全景
压缩机健康管理	测量感知→数字实体内交互→服务调用→数据输出	采集振动/温度/压力数据→设备模型诊断→预测维护需求→生成检修建议
井筒完整性监测	测量感知→数字实体内交互→服务调用→数据输出	采集环空压力/腐蚀数据→完整性模型评估→风险分级→输出预警信息
气藏动态模拟	测量感知→数字实体内交互→数据输出	采集生产动态数据→气藏数值模拟→模拟含气饱和度变化→三维可视化展示
应急演练仿真	服务调用→数字实体内交互→数字实体间交互→数据输出	调用气体扩散模型→模拟泄漏蔓延→联动应急响应→可视化指挥调度
工艺流程动态展示	测量感知→数字实体内交互→数据输出	实时采集工艺参数→驱动工艺流程模型→展示气体流向/设备状态
多库联动调度	数字实体间交互→服务调用→反馈控制	各库数字孪生体共享运行状态→多库优化调度算法→形成调度方案→执行控制
地层压力均衡评价	测量感知→数字实体内交互→数据输出	采集各井压力数据→气藏压力场计算→均衡性评估→三维压力场展示
安全风险诊断	测量感知→数字实体内交互→服务调用→反馈控制	多源监测数据融合→风险诊断模型→风险等级判定→预警信息输出→必要时触发 ESD