

基于施工全要素映射的抽蓄数字孪生平台架构设计与数据接口标准化

冯 斤

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]抽水蓄能电站施工环境复杂、要素繁多,传统的管理模式不能达到对施工过程进行精准感知、动态协同的目的。文中提出了一个基于施工全要素映射的抽蓄数字孪生平台架构,形成了物理工地和虚拟空间之间五个层次的映射。就多源异构数据集成问题而言,创建数据接口框架,包含接口分类、数据格式、通信协议、安全控制和性能保证等各个方面。通过实践证明,在某抽水蓄能电站中使用该平台可以使得施工人员、设备、材料、环境等各方面实时映射、动态同步,从而大大提高施工管理的可视化程度和协同工作效率。

[关键词]抽水蓄能电站;施工管理;数字孪生;数据接口标准化;平台架构

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20084

中图分类号: TV211.3

文献标识码: A

Architecture Design and Data Interface Standardization of a Digital Twin Platform for Pumped Storage Based on the Mapping of All Construction Elements

FENG Jin

PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: The construction environment of pumped storage power stations is complex and has numerous elements. Traditional management models cannot achieve the goal of precise perception and dynamic coordination of the construction process. The article proposes a digital twin platform architecture based on the mapping of all construction elements, forming five levels of mapping between physical construction sites and virtual spaces. In terms of multi-source heterogeneous data integration, create a data interface framework that includes various aspects such as interface classification, data format, communication protocol, security control, and performance assurance. Through practice, it has been proven that using this platform in a pumped storage power station can enable real-time mapping and dynamic synchronization of various aspects such as construction personnel, equipment, materials, and environment, greatly improving the visualization level and collaborative work efficiency of construction management.

Keywords: pumped storage power station; construction management; digital twin; standardization of data interfaces; platform architecture

引言

抽水蓄能电站是电力系统重要的调峰调频电源,对我国能源结构调整起着越来越大的作用。抽水蓄能电站一般处在复杂的地质条件下,施工场地狭窄,洞室群密集,工序衔接紧密,施工过程中要对人员、机械设备、建筑材料、施工环境、进度计划、质量检测、安全监控等诸多因素实施协同管理。传统的管理方式依靠分散的信息化系统以及人工填写的方式,存在着数据采集不及时、信息孤岛严重、状态感知迟缓、协同决策效率低下的问题。数字孪生技术依靠创建物理实体和虚拟模型之间双向映射的关系,给复杂工程系统全生命周期管理赋予了新的技术途径。

1 施工全要素映射与抽蓄数字孪生理论基础

施工全要素映射就是把抽水蓄能电站施工过程中所有的物理实体、行为活动、环境状态以及管理信息,用统一的语义模型和时空基准,转换成数字空间里可以计算、分析、推演的虚拟对象和它们之间的关系网络^[1]。根据抽水蓄能电站施工特点,全要素可以分为人员要素、设备要素、材料要素、环境要素、管理要素。数字孪生的关键就是虚实映射的保真度、实时性、闭环性^[2]。在抽水蓄能电站施工场景中,数字孪生要达到四个基本要求:几何一致性,虚拟模型与物理实体的空间形态一致,状态同步性,虚拟空间中各个要素的状态参数与物理现场的延迟不超

过施工决策可接受的范围,行为逼真性,关键施工工艺和设备的运行规律可以在虚拟环境中得到准确的仿真,演化可推性,根据当前状态可以对后续施工过程进行预测优化。

施工全要素映射和数字孪生的关系表现在三个方面。从语义角度来说,需要创建统一的要素分类编码体系以及属性描述标准,保证各个来源的数据在语义上可以相互使用。从时空上要建立统一的坐标系、时间基准,解决施工过程中移动要素和固定要素的空间配准问题。从动态上来说要设计出状态变更的触发机制以及传播途径,从而达成物理空间改变之后虚拟空间自动更新的目的。

2 抽蓄数字孪生平台架构设计

2.1 平台总体分层架构

平台采用分层解耦的架构设计,从下至上分为感知接入层、数据融合层、孪生模型层、应用服务层和交互呈现层,如图1所示。各个层次之间用标准的接口进行数据交换和指令传递,层内的模块采用高内聚低耦合的原则来组

织。感知接入层对施工现场各种终端设备进行接入管理,即物联网传感器、定位终端、视频监控设备、移动终端、施工机械车载终端等。该层完成设备注册、状态监测、指令下发以及数据预处理等任务。数据融合层是处理多源异构数据,对齐、融合并存储的过程。根据抽水蓄能电站施工数据特点,用时序数据库存储传感器流数据,用空间数据库存储BIM、GIS数据,用图数据库存储施工要素间的关系。孪生模型层是平台的核心,它对应着物理施工现场的数字孪生体。每个孪生体有几何模型、物理模型、行为模型、规则模型这四个部分。应用服务层封装了施工管理业务相关的功能模块,包含进度控制、质量追溯、安全预警、设备运维、环境监测等功能模块。交互呈现层有二维看板、三维场景、移动端应用等不同的可视化方式。图1为平台各个层之间的标准数据接口双向通信示意图,感知数据向上传递驱动孪生模型更新,控制指令向下传输实现物理设备的反向控制。

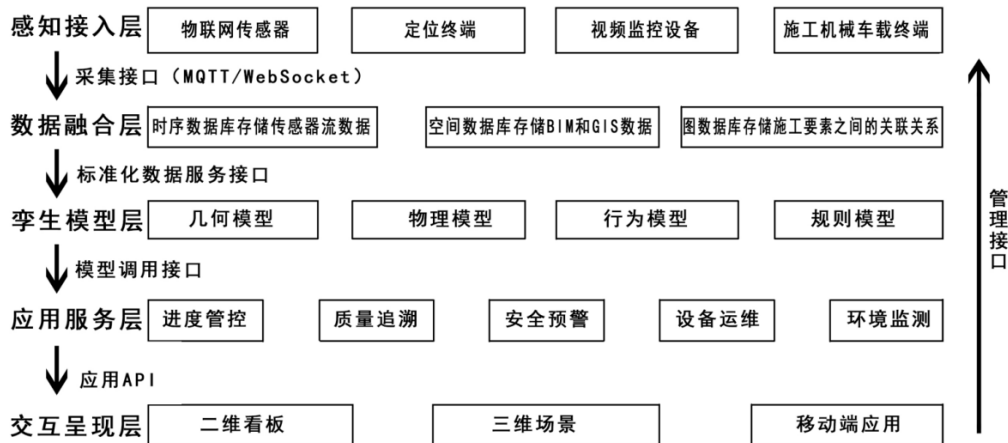


图1 抽蓄数字孪生平台总体分层架构图

2.2 全要素映射与数据融合机制

全要素映射要依靠统一的要素编码体系以及空间配准技术。平台使用工程部位、要素类型和实例编号三级编码方式来给每一个施工要素分配唯一的标识。以C1+EQ+EX01为例,表示的是C1号引水隧洞区域的第1台挖掘机。空间配准上以抽水蓄能电站设计坐标系为基准,用坐标转换参数把GPS坐标、UWB局部坐标、BIM模型坐标统一到同一个空间参考系。

数据融合使用多模态关联融合的方法。从时间上来说,用网络时间协议(NTP)来给每一项数据加上统一的时间戳。空间上用要素编码建立几何模型和属性数据之间的联系。以某一部位的混凝土温度传感器数据为例,用编码与

该部位对应的BIM模型构件相联系,从而得到温度场在三维模型上的可视化映射。对于存在数据冲突的同位移计不同采集通道读数不一致的情况,用基于置信度加权的数据融合算法,优先采信校准周期更近或者精度等级更高的数据源。

3 数据接口标准化设计

3.1 接口标准体系框架

为了使平台各个层次之间以及平台同外部系统之间能够进行交流,建立分层分类的接口标准体系。该体系根据接口功能分为五个部分,分别是采集接口、数据服务接口、模型接口、应用接口和管理接口。每类接口又细分为若干子类型,见表1。

表 1 抽蓄数字孪生平台接口分类与功能说明

接口类别	子类型	主要功能	典型调用场景
采集接口	传感器接口	接收传感器上报数据	位移计、应力计数据采集
采集接口	定位接口	获取人员、设备位置	UWB 标签、北斗终端定位
采集接口	视频接口	获取视频流及抓拍图片	施工现场视频监控
数据服务接口	查询接口	按条件检索历史数据	质量追溯、进度查询
数据服务接口	订阅接口	订阅要素状态变更	预警推送、实时看板更新
模型接口	同步接口	更新孪生模型参数	设备状态变更同步
模型接口	仿真接口	调用仿真计算服务	进度推演、工艺仿真
应用接口	业务接口	调用业务功能	生成施工日志、报验申请
管理接口	注册接口	新设备/系统注册	新增传感器接入
管理接口	监控接口	接口调用统计与健康检查	运维监控平台调用

3.2 数据格式与通信协议规范

数据格式使用 JSON 为主要的数据交换格式，二进制数据（图像、点云）用 Base64 编码后嵌入 JSON 结构中或者用独立的传输通道发送。每条数据消息有三个必填字段，分别为 header（元数据，包含消息 ID、时间戳、发送方标识、消息类型），body（业务数据，按照接口类型定义结构），signature（签名信息，用于完整性校验）。

设备状态上报接口的数据格式如下所示，包括设备编码、状态类型、状态值、采集时间、上报序号。对需要表示空间信息的要素，在 body 里加入 location 字段、坐标类型以及坐标值数组。

通信协议按照接口的实时性以及数据量的不同来采取不同的策略。采集接口中传感器高频数据挂接 MQTT 协议，MQTT 协议轻量且支持发布订阅模式，适合低带宽、高延迟或者不稳定网络环境。定位接口、视频接口使用 WebSocket 协议来保持长连接，保证数据的实时推送。数据服务接口和应用接口使用 RESTful API 风格，采用 HTTP/2 协议。模型接口中仿真接口因为计算时间长，使用异步调用方式，客户端提交仿真任务之后，会通过轮询或者回调的方式获取结果。所有的接口都支持 TLS 1.2 及以上版本的加密传输。

3.3 接口安全与权限控制

接口安全使用认证、授权、加密、审计这四个层次的防护措施。认证层用 JSON Web Token（JWT）做身份认证，令牌有效期是 2h，有令牌刷新功能。授权层以角色、资源二维控制为基础，将系统管理员、项目管理人员、监

理人员、施工班组、设备供应商这五种角色划分出来，每个角色可以访问不同的接口并具有不同的操作权限^[3]。数据加密用 AES256 算法对敏感数据做字段级加密，在 JSON 体里把加密好的密钥交给密钥管理服务（KMS）来集中保管。传输通道只能采用 TLS 1.2 及以上版本的协议，不能使用弱密码套件。接口日志记录每次调用时间、来源 IP、用户标识、操作类型、返回状态，日志保存时间不少于 180 天，可用于安全审计和事后追踪。

3.4 接口性能与一致性保障

抽水蓄能电站施工环境下，传感器数据采集频率可以达到秒级或者毫秒级，对接口性能有较高的要求。平台在接口网关层就对数据进行了压缩、流量控制。对连续上报的同类数据（同一种传感器的温湿度序列）使用差分编码加 gzip 压缩，压缩比可以达到 10：1 以上。流量控制使用令牌桶算法，给不同的优先级接口分配不同的带宽配额，保证预警类数据优先通过。

分布式部署环境下接口一致性使用的是最终一致性加上业务补偿的策略。对孪生模型同步这样的要求较高的一致性操作，用两阶段提交协议（2PC）简化版本来实现，即主节点更新成功后异步通知从节点，并将更新日志存入数据库以备不时之需。出现数据不一致的时候，平台会给出手动对账以及自动修复的功能，对物理端采集的日志和孪生端更新记录加以对比，找出缺少的更新操作之后再予以重新执行。为了定量地得到接口性能指标，表 2 给出平台在典型工况下测试的结果。

表 2 接口性能测试结果（某抽水蓄能电站现场环境）

接口类型	测试场景	数据频率	平均延迟	99.9%延迟	吞吐量
传感器接口	100 个位移计同时上报	1Hz	86ms	210ms	1250msg/s
定位接口	50 个 UWB 标签连续定位	10Hz	45ms	120ms	620msg/s
视频接口	4 路 1080P 视频流	25fps	180ms	340ms	38MB/s
查询接口	7 天历史数据检索	10QPS	210ms	490ms	10QPS
同步接口	孪生模型批量更新	每秒 20 次	150ms	310ms	22 次/s

从表 2 可知,所有的接口平均延迟都在 500ms 以下,可以满足施工管理的要求。视频接口因为数据传输量大,延迟略高,但还在可接受范围内。

4 数字孪生平台关键映射与集成技术

4.1 施工要素实时感知与映射技术

施工要素的实时感知依靠的是多源传感网络的协同部署。在某抽水蓄能电站地下厂房洞室群施工区,布置了 UWB 高精度定位基站 12 台,人员定位精度达到 30cm 以内,定位延迟小于 100ms。主要施工机械加装车载诊断终

端,用 CAN 总线读取发动机转速、燃油消耗、工作时间等参数,并接入北斗定位模块。施工材料的映射用物料跟踪码来完成。预拌混凝土运输车装有 RFID 电子标签,出场、进场、浇筑三个环节分别用固定式读卡器识别,配合地磅称重数据一起使用,从而对混凝土从拌和站到浇筑仓面的全部过程进行追溯。在洞室关键断面布置多参数环境监测气象站,测温、测湿、测风、测尘。图 2 中各类感知数据经过边缘网关预处理之后,通过标准接口传送到平台,再由平台的数据融合模块进行融合,得到相应的孪生要素状态。

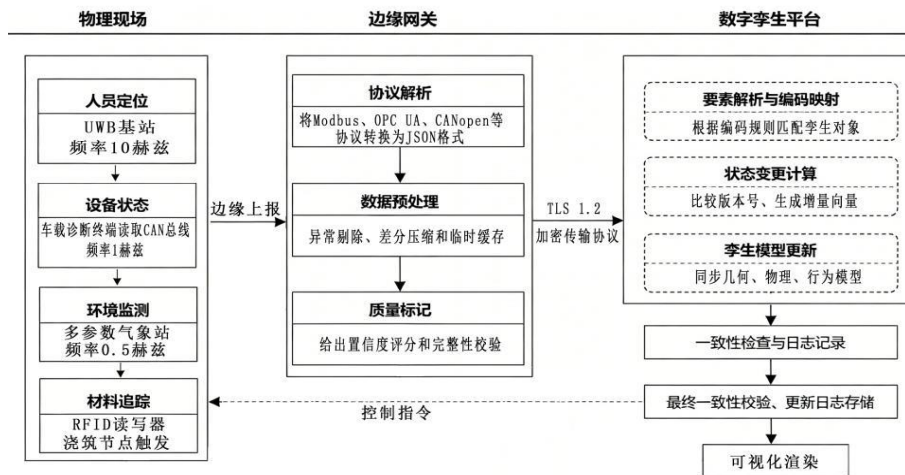


图 2 施工全要素实时感知与映射流程图

4.2 孪生数据模型动态同步技术

孪生数据模型动态同步有两个问题,一个是多源数据到达时间不同步,另一个是高频更新造成计算、网络资源压力大。平台对状态改变的事件采取增量同步的方式。每个孪生要素都维护一个版本号,当平台收到新的感知数据的时候,计算状态变更向量,只把发生变化的属性字段同步到孪生模型层,而不是全部替换^[4]。为了克服多源数据之间的时间同步问题,提出了用时间窗口来实现同步的方法。将连续时间轴分成长度为 500ms 的窗口,窗口内到达的所有数据按照最新值优先、异常剔除的方式进行融合得到一个状态快照,然后触发孪生模型的更新。对重要的安全相关数据用事件触发的方式,当变形速率大于阈值时立刻同步,不受时间窗口的限制。

4.3 多尺度仿真与可视化交互技术

平台具有多尺度仿真功能,可以进行施工方案的虚拟检验和改进。采用离散事件仿真法建立施工进度仿真模型,模拟洞室开挖、支护、衬砌等工序的排队、资源冲突情况,预测关键线路的变化。从细观尺度上,对重点部位建立有限元模型,用实时监测数据做围岩稳定性分析。在可视化

方面采用分级渲染的方式。全局视角下展现整个站区的施工全景,使用 LOD 技术,远处模型用简化的三角网和纹理。可以通过调整视角聚焦单个作业面,显示设备运动姿态、人员行走轨迹、混凝土浇筑进度。平台支持 VR 模式,管理人员戴上头戴式显示设备之后,可以在虚拟工地进行沉浸式巡查。

4.4 平台接口兼容性与扩展性设计

由于抽水蓄能电站建设周期长、参建单位多、信息系统更换频繁,因此,在平台接口设计时就考虑到了兼容性以及扩展性。接口协议支持版本号协商,客户端请求标明自己支持的接口版本,平台回传相应的接口响应格式。旧版本接口在公告期结束后至少 6 个月内保持过渡状态。为将来可能接入的新类型传感器或者第三方系统设计适配器模式。新设备只需按照平台的要求实现数据采集适配器,即可完成接入,无需修改平台的核心代码。目前平台已经完成了对 5 种主流工业协议的适配器开发。

5 结束语

本文根据抽水蓄能电站施工管理的复杂性、实时性要求,提出以施工全要素映射为基础的数字孪生平台架构,

设计由五层构成的分层架构以及全要素映射机制。重点解决了多源异构数据集成中接口标准化的问题,创建了包含分类体系、数据格式、通信协议、安全控制、性能保证的完整接口标准框架。未来的研究将会以数字孪生为基础的施工过程自主决策和控制为研究重点,对挖掘、运输、浇筑等工序进行闭环优化调度,研究多参建单位之间孪生模型的联邦协同机制,在保护数据隐私的基础上实现跨标段、跨项目模型共享和联合仿真。

[参考文献]

[1]唐腾飞,徐林,崔进,等.抽水蓄能电站工程数字化建设研究[J].水力发电,2025,51(9):99-104.

[2]王仲,李世强.数字孪生抽水蓄能电站建设研究[J].水利水电快报,2023,44(9):110-115.

[3]罗斌,周超,张振东.数字孪生水利专业模型平台构建关键技术及应用[J].人民长江,2024,55(6):227-233.

[4]武志强.融合人工智能与 BIM 的水利水电施工协同控制技术——以某抽水蓄能电站工程为例[J].技术与市场,2025,32(12):116-119.

作者简介:冯斤(1991—),男,工程师,工学学士,现就职于中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,项目经理,长期从事水利水电、抽水蓄能工程数字化建设与项目设计管理工作。