

区域多能源系统数字孪生应用平台构建^{*}

唐学用¹, 姚俊荣², 万会江³, 李震¹, 杨禾⁴

(1.贵州电网有限责任公司电网规划研究中心,贵州 贵阳 550003;

2.贵州大学,贵州 贵阳 550003;3.贵州电网有限责任公司电力调度控制中心,贵州 贵阳 550003;

4.清华四川能源互联网研究院,四川 成都 610213)

摘要: 针对缺乏支撑区域多能源系统数字孪生动态规划、运行优化等上层应用接入、管理和运行的高性能平台的现状,考虑到数字孪生应用对通信效率、数据安全的要求,借助 CloudPSS 云仿真平台设计了包含基础层、应用层、业务层的安全、灵活、可扩展的数字孪生应用平台的软硬件;并以贵州红枫湖区域多能源系统为试点区域,介绍了包括建模仿真、数据通信和应用集成功能的区域多能源系统数字孪生应用平台的构建过程。所构建的区域多能源系统数字孪生应用平台作为数字孪生从概念到应用的理想实现工具,其架构设计方案与具体构建经验可为数字孪生技术的广泛落地提供理论和实践参考。

关键词: 区域多能源系统;数字孪生;应用平台;CloudPSS

中图分类号: TP319

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212443

中文引用格式: 唐学用, 姚俊荣, 万会江, 等. 区域多能源系统数字孪生应用平台构建[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 59–66.

英文引用格式: Tang Xueyong, Yao Junrong, Wan Huijiang, et al. Construction of digital twin application platform for regional multi-energy system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 59–66.

Construction of digital twin application platform for regional multi-energy system

Tang Xueyong¹, Yao Junrong², Wan Huijiang³, Li Zhen¹, Yang He⁴

(1.Power Grid Planning & Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

2.Guizhou University, Guiyang 550003, China;

3.Power Dispatching Control Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

4.Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: For the status quo of lack of high-performance platforms that support the access, management and operation of upper-layer applications such as dynamic planning and operation optimization of digital twins in regional multi-energy systems, this paper takes into account the requirements of digital twin applications for communication efficiency and data security, with the help of CloudPSS cloud simulation platform, the software and hardware of a secure, flexible, and scalable digital twin application platform including the basic layer, application layer, and business layer are designed. Taking Guizhou Hongfeng Lake regional multi-energy system as the pilot area, it introduced the construction process of the regional multi-energy system digital twin application platform including modeling and simulation, data communication and application integration functions. The built regional multi-energy system digital twin application platform serves as an ideal tool for realizing digital twins from concept to application, its architecture design plan and specific construction experience can provide theoretical and practical references for the wide implementation of digital twin technology.

Key words: regional multi-energy system; digital twin; application platform; CloudPSS

0 引言

区域多能源系统是包含电力、天然气、供冷热、分布式发电设备、储能设备的物理系统,其多种能源的源、网、荷、储深度融合、紧密互动,能够有效提升能源供用

系统的灵活性、安全性、经济性和自愈能力^[1],但同时区域多能源系统具有多能相互耦合、含有大量电力电子设备、暂态过程跨多时间尺度的特点,使传统的控制、规划策略和仿真手段受到挑战。一方面,传统确定性建模仿真工具无法支撑区域多能源系统的随机性特点;另一方面,区域多能源系统复杂性高,传统基于经验驱动的优

* 基金项目:中国南方电网有限责任公司重点科技项目(067600KK52190010)

化模型难以直接用于区域多能源系统的优化运行。可以看出,目前区域多能源系统规划、运行受定制化的控制策略和拓扑运行数据失真的制约,难以在经济性、可靠性上取得进一步突破。

为解决上述问题,在建模层面,有必要从经验驱动向经验+数据驱动模式转变;在仿真层面,有必要考虑随机性的仿真;在分析层面,有必要从传统的建模仿真分析,进一步上升为仿真驱动的优化工具,从而指导区域能源系统的规划运行,数字孪生技术应运而生。

从功能上看,传统的工业系统仿真只是一种分析工具,而数字孪生技术是以应用为导向的智能手段,数字孪生应用是指为物理实体对象提供数字空间映射模型并保持双向同步和持续进化的可行性数字化解决方案。关于数字孪生的相关研究和应用构建是近些年来的热点话题,研究方向和成果已渗透到能源领域的多个环节。

在理论研究层面,文献[2]给出了能源互联网数字孪生的构建方式与可能应用,并以能源互联网规划为例,详述了数字孪生技术能够解决的关键问题;文献[3]对数字孪生技术的应用领域和应用模式进行了归纳,分析了应用过程中面临的主要技术挑战;文献[4]从工程和科学的角度阐述了建设电力系统数字孪生的思路,设计了电力系统数字孪生的实现框架并探究了其建设所面临的关键问题和核心技术;文献[5]提出了基于CloudPSS构建区域多能源系统数字孪生模型的有效方案。

在应用构建层面,西门子公司针对芬兰电力系统开发了支撑规划、运行和感知的数字孪生平台,有效提升了智能运维和优化决策水平^[6]。通用电气将数字孪生这一概念推向了实用化新高度,借助数字孪生技术对风电场的从投入运行再到检修的全生命周期进行智能优化^[7-8]。

目前数字孪生技术在复杂、高维、强非线性、强不确定性的区域多能源系统环境中的广泛部署和普遍应用尚处于初步探索阶段,需要强大的应用平台来支撑数字孪生应用的实现。然而,现阶段缺乏一款适用于区域多能源系统不同业务场景的数字孪生应用平台,无法支撑数字孪生应用的运行,为解决上述问题,本文设计构建

了以CloudPSS平台为基础的区域多能源系统数字孪生应用平台,用于实现上层数字孪生应用的接入、管理和运行。

1 区域多能源系统数字孪生应用平台架构

为把数字孪生技术切实应用到区域多能源系统的智能决策层面,为区域多能源系统的优化运行提供支撑,进而提升区域多能源系统源网荷储的协同互动水平,必须着力构建区域多能源系统的数字孪生应用集成平台。

考虑到区域多能源系统规模庞大、模型复杂、计算量巨大,其数字孪生上层应用对基础平台的计算能力、通信速度和通信带宽具有很高的要求,采用传统仿真软硬件已无法满足区域多能源系统的实时仿真、海量场景批量仿真等数字孪生底层计算和通信需求。基于云服务框架,借助云计算资源和云存储资源,构建区域多能源系统数字孪生应用平台成为了必然之路。

1.1 基础平台——CloudPSS

数字孪生应用平台的构建包含硬件和软件部署两部分工作。在硬件部分,必须依赖计算能力充足、通信速度高的先进计算设备,在软件部分则依赖高度灵活可扩展的多能源系统建模仿真平台。从仿真内核技术、云端兼容技术、接口开放程度综合比对了国内外已有的能源系统建模仿真工具,选取了CloudPSS作为区域多能源系统数字孪生应用的基础建模仿真平台。

CloudPSS是由清华四川能源互联网研究院自主研发的一款面向能源互联网的云端建模仿真工具^[9]。该工具采用全电磁暂态仿真内核,利用云端CPU及GPU等异构并行计算资源,提供面向交直流混联电网、可再生能源发电、微电网、配电网、热网等多种能源网络的建模及仿真分析功能。同时,CloudPSS在开放式服务框架的基础上结合了精细化电磁暂态建模仿真理论,采用了高性能细粒度并行加速计算的方法,在保证了建模仿真的准确性的前提下,实现了电磁暂态实时仿真和海量场景批量加速仿真,能最大限度地实现对实际电网的数字镜像,最终立足模拟运行结果进行分析,并指导决策。

1.1.1 CloudPSS 框架

如图1所示,CloudPSS采用开放式的云服务集成框

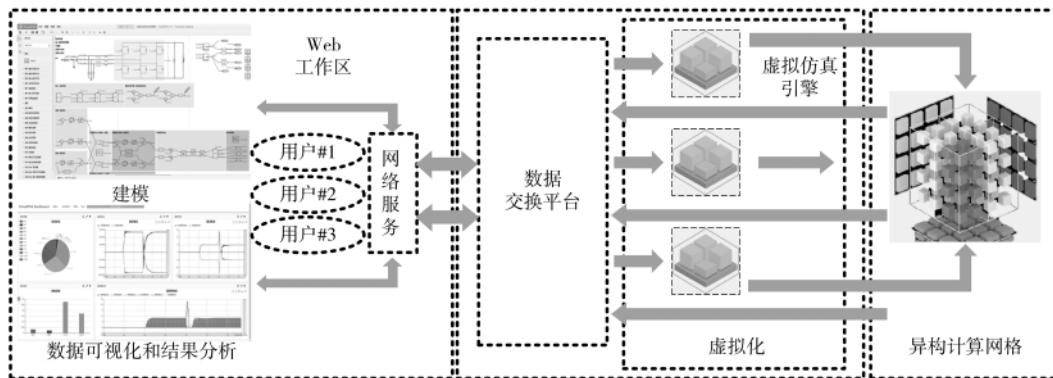


图1 CloudPSS 的开放式云服务框架

架设计,由数字孪生建模 Web 工作区、数据交换平台和底层数字孪生仿真引擎组成。

数字孪生建模 Web 工作区(Web-based Workspace)是一个可视化的建模和结果分析工具,主要使用 HTML5 和 Web 技术开发。在建模层面,用户可以通过拖放和连接组件来构建能源电力系统数字孪生模型。数字孪生模型和仿真任务以 JSON 格式存储。仿真模型建立后,用户可以在数据可视化工作区中查看并分析仿真结果。

数据交换平台(Data-Exchange Platform)是云服务框架的中间件。当用户发送仿真计算任务时,数据交换平台采用虚拟化技术为每个业务计算任务生成虚拟仿真引擎(Virtual Simulation Engine, VSE),并将 VSE 分配至异构计算网格(Heterogeneous Computing Grid)中的相应单元,最后接收并存储从计算网格接收到的结果。

底层数字孪生仿真引擎负责执行数据交换平台发送来的仿真计算任务。其由 CloudPSS 提供的专有计算设备完成。其中,软件内核为 CloudPSS 自主研发的潮流计算和电磁暂态仿真内核,计算硬件为含 CPU 和 GPU 的异构并行计算机。

1.1.2 CloudPSS 对数字孪生平台的支撑

CloudPSS 具备丰富的多能源系统电气、控制基础元件模型库,支持包括元件级、设备级、系统级等多时间尺度暂态过程的建模和仿真,作为区域多能源系统数字孪生底层仿真计算引擎,具备以下 3 点优势。

(1) CloudPSS 提供相对独立的计算环境

数据交换平台与底层数字孪生仿真引擎之间采用虚拟化容器技术,在计算层面保证不同业务之间运行环境和数据的独立性。不同业务实际执行过程处于不同的虚拟环境,避免了应用之间的干扰和因单一业务失败带来的系统崩溃,从而保证系统的高可靠性。

(2) CloudPSS 提供 API 支持

相较于 RTDS、RTLab 等架构复杂且老旧的商业仿真器,CloudPSS 具有更高的接口开放程度,其开放了建模、仿真、分析等多环节的内核 API,可为基于数字孪生的规划设计和运行优化等区域多能源系统上层应用提供底层仿真调用接口。

(3) CloudPSS 提供高性能并行加速计算内核

由于区域多能源系统中风、光等新能源存在随机性、波动性,真实物理系统的实际动态无法通过单次仿真结果完全展现出来。因此,可通过随机函数抽样生成仿真场景,来对全部仿真场景进行仿真验证,利用多场景的仿真结果反映实际物理系统的运行特性。

在保证建模仿真准确性的前提下,为了挖掘 GPU 并行加速计算潜力,CloudPSS 从细粒度并行计算、任务并行切分、批量化并行加速^[10-12]等多角度出发提供了多层次高性能的并行加速仿真计算内核。

首先,CloudPSS 采用一套适用于 GPU 的细粒度并行计算方法,将暂态仿真计算过程分解为一系列可并行执

行的简单运算组合,从而启动大量并发线程执行计算。具体地,先将主要计算转化为单指令多数据流的向量计算模式,再用单个线程对电气或者控制元件分解计算,借助共享内存处理多个线程之间的耦合,实现了 GPU 计算资源的有效利用。

其次,基于 GPU 计算构架,分别利用分层有向无环图、积和熔加、线性方程组求解来组织暂态仿真过程涉及的三种计算模式,通过“指令-线程-核心”细粒度计算资源映射方法来对多场景仿真进行加速,实现了计算资源在不同计算任务之间的最大化利用。

最后,针对复杂设备,通过将其拆分为多个拓扑上独立而内部计算耦合的单体元件,形成了元件级并行和网络级并行相结合的混合并行优化切分方案,并在此基础上,通过计算流程的优化调整以及计算量的合理分配,提高了暂态仿真并行计算的均衡度。具体的,采用含隐式同步机制的混合并行算法,在一个并行仿真的计算步长内将分区侧和协调侧之间原本交替执行的部分任务分解至分区侧的等待时间内执行,再减少同步等待时间的同时,合理规避了同步操作。

基于上述 CloudPSS 提供的高性能仿真并行加速计算内核,可充分利用异构并行计算机的优势,对海量场景进行仿真加速,从而满足运行优化、态势推演等数字孪生上层应用的计算需求。

1.2 区域多能源系统数字孪生应用平台架构

为了给数字孪生的数据源、业务模块的接入和管理提供安全、高效的环境,基于 CloudPSS 基础平台设计了包含建模仿真、数据通信和应用集成功能的安全、灵活、可扩展的区域多能源系统数字孪生应用平台架构,如图 2 所示。

数字孪生应用平台架构由基础层、平台层和业务层

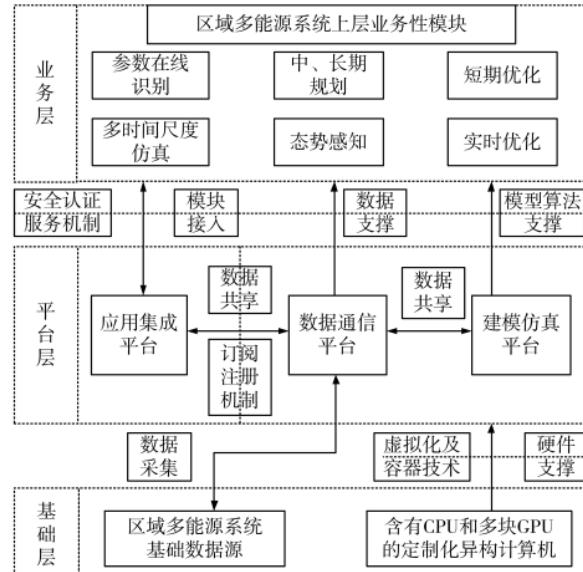


图 2 区域多能源系统数字孪生应用平台架构

三部分构成。

(1) 基础层

基础层包含数字孪生应用平台运行所依赖的基础硬件和外部数据源。采用了多台异构并行计算机作为底层计算硬件,采用千兆、万兆以太网卡连接外部数据源,包括录波系统、计量系统和调度自动化系统等。具体设计详见 1.3.1 节。

(2) 平台层

平台层包括 CloudPSS 建模仿真平台、数据通信平台和应用集成平台 3 部分。其中,建模仿真平台是区域多能源系统数字孪生应用平台的基础计算内核;数据通信平台是区域多能源系统数字孪生应用平台的数据枢纽,对基础数据源进行高效的采集、传输和共享,来方便上层业务模块和底层建模仿真平台对中间数据的高效取用;应用集成中台是区域多能源系统数字孪生应用平台的接口,对上层功能模块进行接入和管理,来方便其对模型库和底层仿真功能的调用。数据通信平台和应用集成平台为数字孪生的数据源、业务模块的接入和管理提供安全、高效的接口平台。

(3) 业务层

业务层包含了数字孪生应用平台中集成的业务模块,例如区域多能源系统规划优化、运行优化、态势推演等。业务层与平台层的接口具备高度可扩展特性,从而兼容不同类型的业务内核接入。为保证内部运行环境的安全性和用户数据的隐私性,业务层与平台层之间建立了一层安全认证服务机制,负责权限管理,避免后台资源对外直接暴露。同时,数据通信平台和应用集成平台之间采用了订阅和注册机制,不同业务只能访问与本业务有关的数据源,避免了不同应用之间的数据干扰,从而实现不同应用计算中数据、模型和算法以及计算资源的分离。

1.3 区域多能源系统数字孪生应用平台部署

为发挥数字孪生技术在区域多能源系统运行优化中的独特优势,需要将区域多能源系统数字孪生应用平台软硬件整体部署至多能源系统现场控制中心。为此,需设计区域多能源系统数字孪生应用平台硬件架构和数字孪生应用平台与区域多能源系统之间安全的双向通信方式。

1.3.1 硬件架构

考虑到数字孪生技术对时效性和数据通信的要求,合理配置了计算资源,设计了满足通信、计算需求的硬件计算架构,如图 3 所示。其中计算资源由多台含 CPU 和 GPU 的异构并行计算机组成,每台包含 1 组 Intel/AMD 多核 CPU 和多块 NVIDIA 的高性能计算 GPU,内置 CloudPSS 电磁暂态实时仿真求解器内核和批量电磁暂态计算内核。多台计算机之间采用 FPGA,基于 Aurora 协议进行高速互联,实现计算节点间的高速通信,支撑实时仿真等应用。

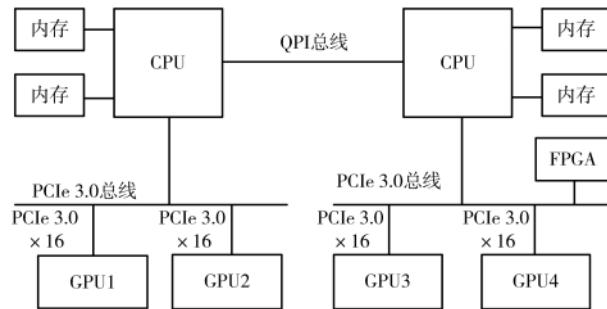


图 3 区域多能源系统数字孪生应用平台的硬件架构

1.3.2 双向通信方式

考虑到生产安全需求,数字孪生应用平台需部署在生产管理 III 区,不直接参与系统的实时控制,只负责决策管理。因此,需要在数字孪生应用平台和生产设备控制系统之间加装正反向隔离装置来确保两者进行安全的双向数据传输。

具体的,数字孪生应用平台一方面通过正反向隔离装置采集计量系统、录波系统、调度自动化系统的数据,另一方通过正反向隔离装置与生产设备控制系统互连,借助现有的从“控制主站”到“一次设备”的双向数据通道,利用生产设备控制系统将数字孪生体的运行决策优化控制指令间接下发表到终端设备,实现数字孪生体和实体系统之间的双向同步。所设计的数字孪生应用平台与区域多能源系统之间的双向通信方式如图 4 所示。

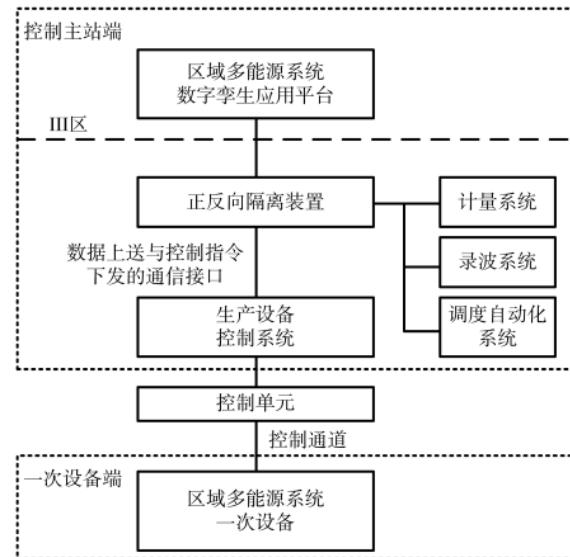


图 4 数字孪生应用平台与区域多能源系统之间的双向通信方式

本文第 2~4 节,将以贵州红枫湖区域多能源系统为试点区域,红枫湖试点区域是一个集成可再生能源的主动配电网,基于主动规划、分布式能源主动控制、多能源网络间协同优化、负荷主动管理等主动配电网关键技术的基础上,建成的集水电、风电、光伏、冷热电联供、储能、电动汽车充电设施于一体的典型区域多能源系统。介

绍区域多能源系统数字孪生应用平台的设计。具体包括模型构建、数据平台构建和应用集成平台构建三部分。

2 区域多能源系统数字孪生模型构建

与传统的电力系统仿真中的固定化模型相比,区域多能源系统数字孪生模型需要随时保持与实际物理系统一致。因此,传统的人工建模方式很难满足数字孪生模型更新的实时性。因此,基于 CloudPSS 模型构建工具的 API 接口,设计了基于原始数据的能源系统自动化建模功能。

2.1 基于原始数据的自动化建模

如图 5 所示, 以贵州红枫湖区域多能源系统为例, 在建模仿真平台导入描述系统网架结构的图模信息文件(SVG 图), 平台首先会对 SVG 图中断路器、馈线等设备之间的拓扑关系进行识别, 根据识别出的设备类型和接线方式调用模型库中相对应的数字孪生元件, 并自动搭建了仿真接线图, 生成了元件参数表。对元件参数表进行数据填充, 如图 6 所示。

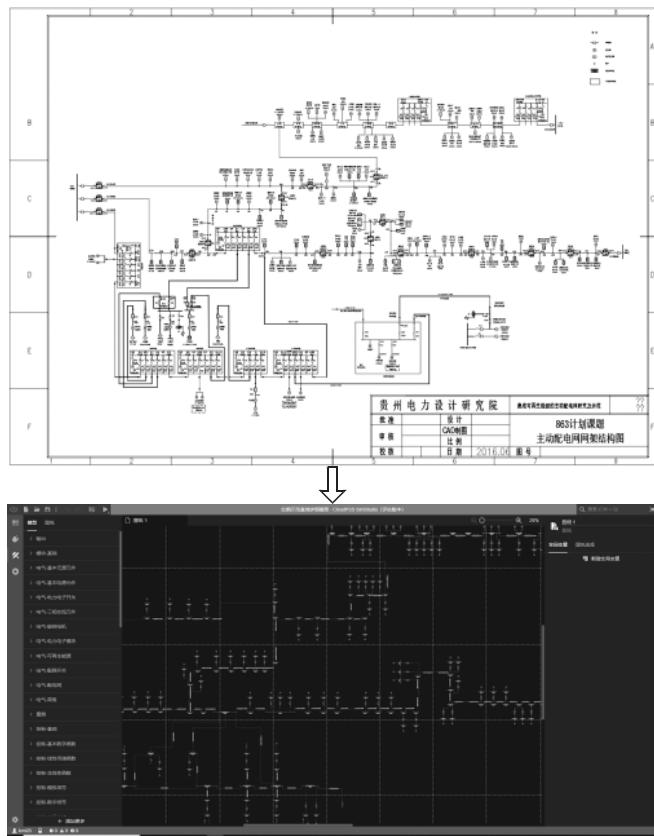


图 5 自动搭建的贵州红枫湖区域多能源系统仿真接线图

2.2 基于量测数据的设备参数在线优化

考虑到数字孪生模型不是一组恒定不变的代数方程式,而是一个参数时变、持续更新的进化模型,为了满足精确模拟实际系统的要求,每当实际系统参数发生变化时,

图 6 对元件参数表进行数据填充

就需要将变动反馈到数字空间中来重构数字孪生模型。

因此,在自动化建模的基础上进一步设计了设备参数的在线优化功能,即利用量测数据通过统计和机器学习的手段来不断修正数字孪生模型,实现物理系统与数字孪生模型之间的同步。

当监测到系统发生故障、电压波动等暂态过程后，触发参数优化模块，基于 CloudPSS 提供的底层仿真程序 API 来启动后台仿真程序对待优化模型算例进行批量仿真，输出识别后的最优参数组合，将此参数组合回写到模型中，完成元件参数表中相应元件参数的更新。

设备参数在线优化功能作为一个上层业务模块通过应用集成平台提供的模型更新 API 集成到了区域多能源系统数字孪生应用平台。

3 区域多能源系统数字孪生数据平台构建

由于数字孪生中物理实体需要与数字空间的虚拟镜像保持实时映射,考虑到区域多能源系统网络规模庞大,需要采集和通信的数据(馈线电气量、设备状态等)量大,周期短,数据传输需要依赖高效的交互和管理机制,解决该问题的关键是构建数据通信平台,采用统一的数据结构对数据进行管理和通信。

3.1 数据的存储和传输

区域多能源系统数字孪生体的构建与自我优化依赖全域全量的信息数据,这些信息数据具有来源繁多、结构复杂、动态变化和实时及准实时交互的特点,考虑到区域多能源系统的数字孪生底层依托于电力系统建模与电磁暂态仿真技术,相应的物理实体的监测则依赖于量测设备。上述两个过程在数字孪生运行过程中会产生大量数据。为了实现数字孪生模型与物理系统间的高效数据交互,首先需要保证数据的高效采集、存储和查询。

为应对高效的数据采集、存储和查询，设计了基于键值对、标量、数组和时间序列的数据存储模式，将来自

物理系统中的量测设备得到的量测结果、电磁暂态仿真中虚拟探针和虚拟示波器的计算结果及控制算法和网络分析应用的分析结果统一为基于该存储模式的系统量测数据。

在此基础上,设计了以下三层的数据传输表示机制。

在数据表示层,量测数据被转换成易于传输的数据流格式,基于文本的 JSON、XML 和基于二进制的 Proto-BUF、Cap'n Proto 等。使用文本协议可以使量测数据易于读取,方便系统的调试,使用二进制协议则可以减少数据交互过程中的计算量和网络流量,是线上应用环境下首选的数据表示方式。

在数据压缩层,依据数据表示形式的不同,选择适当的压缩方案,进一步减少数据传输中的带宽消耗。常用的通用压缩算法包括 gzip、lzma 等,对于基于文本的数据表示,brotli 压缩算法能够提供良好的压缩效果。需要注意的是,对数据进行压缩和解压缩需要消耗量测终端的 CPU 和内存资源,在计算资源不足或网络资源极为充足的情况下,选择省略数据压缩,直接传输原始数据。

在数据传输层,基于现有的应用层协议进行构建,依据数据传输的需要和数据采集终端对应用层协议的支持情况,系统量测数据可以选择合适的应用层协议进行传输,最大限度地保证数据的完整性和可靠性。

对于数据资源的高效存储,依据数据类型的不同,选择相应的存储方式,方便大规模数据的存储和查询,将标量数据存储于 Redis 数据库;将数组数据存储于 MySQL 数据库;将时间序列数据存储于 ClickHouse 数据库。

3.2 数据中台

目前的区域多能源系统数据来源分散、结构多样、关系复杂、粒度精细、体量巨大,无法提供全面的数据资源、数据服务。通过建设横向关联、纵向贯通的数据中台,作为数据的汇聚和共享中心,可以实现超大规模全量多源数据的安全存储、高效读取、为实时信息交互系统提供精细的数据连接机制。

具体的,在数据库和数据传输协议之间,设置数据中台作为数据传输的中间层,其主要职责包括:

(1)验证数据量测终端的身份和权限,与数据量测终端建立连接;

(2)解析采集得到的数据,与数据库交互,将数据依据类型存储到相应的数据库实例;

(3)解析终端的数据查询请求,构建相应的查询命令,从不同的数据库实例得到数据,进行分析和整形得到待传输的数据,依据终端要求的表示、压缩和传输方式,将数据打包传输;

(4)进行日志记录。

数据中台用于融合整个数字孪生体与物理实体的全部数据,打通数据隔阂,消除数据标准和口径不一致的问题。数据中台通过对来自多方面的基础数据进行清洗,按照特定主题域的概念建立多个以事务为主的主题

域。数据中台不仅汇聚多元数据,而且让这些数据遵循相同的标准和口径,对事物的标识能统一或者相互关联,并且提供统一的数据服务接口。基于数据中台可以提供以下服务:

(1)数据订阅服务:提供订阅对应的数据源的数据,当数据发送变化时通知订阅者,订阅者根据响应去获取数据。

(2)数据采集服务:使用 Web Service 接口和缓存机制实现高速数据采集,并根据数据采集的速度和数据量的不同自动选择合适的数据存储方式,以实现本项目多时间尺度应用的要求。

(3)数据仓库服务:提供数据存储服务器和数据的快速分类和查询服务。

4 区域多能源系统数字孪生应用集成平台构建

考虑上层业务模块的集成,本质上是对多种异构的底层功能进行调度管理,因此,除了借助数据中台实现不同业务、功能之间的数据交互之外,还需构建多应用的调度中台,实现底层不同功能性服务之间、上层不同业务性服务应用之间的调用和协调。

4.1 数据流与业务流模型

区域多能源系统数字孪生的复杂业务应用是通过多个异构的底层功能性计算任务之间的配合实现的,不同功能性计算任务之间可能存在信息交互、前后依赖和逻辑触发关系,例如:规划和运行优化业务依赖多场景批量仿真功能,而多场景批量仿真又需要依赖电磁暂态计算功能。一个复杂业务应用的功能性计算任务之间可能互为父子关系,为保证区域多能源系统中不同模型、不同业务和功能在数字孪生中的集成管理和调度,有必要先梳理清楚复杂应用的功能性计算任务之间的全局依赖关系,统一数字孪生的数据流与业务流模型,建立数据流和业务流的交互规范。

具体的,采用有向无环图(DAG)来构建数字孪生数据流与业务流模型,其中有向无环图的顶点代表功能,边代表功能之间的数据流。进一步对 DAG 图中的顶点进行分层,如图 7 所示,即可描述出不同业务或功能之间的串行依赖和并行关系。基于上述数据流建模和业务流建模方法,可统一区域多能源系统数字孪生全生命周期的数据表述和业务描述,从而成为调度中台的设计基础。

4.2 调度中台

为了兼容区域多能源系统数字孪生建模、仿真、规划优化、运行优化功能及业务集成和管理,基于服务框架,设计了调度中台方案,以实现建模仿真、优化决策等业务的接入、管理和调度。

调度中台用于快速响应和调用各种业务功能,为底层功能性服务、上层业务性模块的交互提供高效的管理机制,基于调度中台提供以下服务:

(1)业务数据流定义服务:提供不同类型应用与对应输入数据流、输出数据流的注册,保证相关业务可订阅

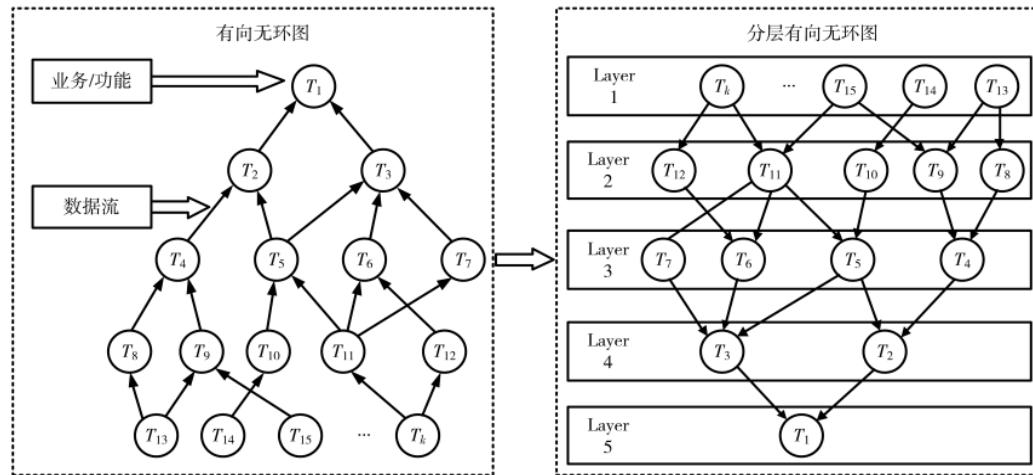


图 7 统一数字孪生的数据流与业务流模型

对应的数据源的数据，并具备对结果数据的写入权限。

(2) 多元业务多语言接入接口：提供调用 MATLAB、C、C++、Python、Java 主流语言编写的业务程序接入接口 API，降低各类功能接入平台的复杂度，提高接口的开放程度。

(3) 业务之间逻辑关系定义及调度：提供不同业务之间调用先后流程及逻辑关系的定义方法，即支持基于 DAG 图的业务流描述录入，方便管理复杂业务对基础功能的调用。

4.3 上层业务模块的集成模式

区域多能源系统数字孪生的上层业务模块需要配合数据中台和调度中台来一起使用，围绕数据中台和调度中台将底层建模仿真平台和上层业务模块衔接了起来，通过区域多能源系统数字孪生应用平台接口、内核、枢纽三个要素之间的交互，来实现上层业务模块在区域多能源系统数字孪生应用平台的集成，集成模式如图 8 所示。

此处以贵州红枫湖区域多能源系统数字孪生应用平台中的运行优化模块为例，介绍具体业务应用的集成方法。

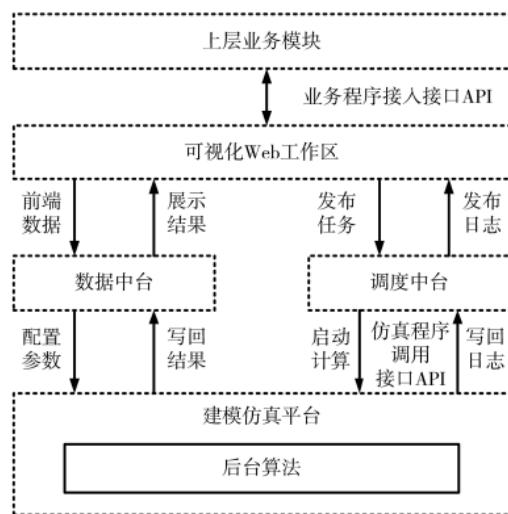


图 8 上层业务模块的集成模式

首先，基于调度中台提供的业务程序接入接口 API，将由 Python 语言编写的优化程序内核接入到区域多能源系统数字孪生应用平台，并在可视化 Web 工作区搭建了多能源系统运行优化模块的用户交互界面，如图 9 所示。



图 9 多能源系统运行优化模块的信息输入界面

在信息输入页面完成对区域多能源系统数字孪生模型参数和成本等优化信息的配置，通过可视化 Web 工作区把前端页面的配置数据写入数据中台；同时建模仿真平台，从数据中台读取多能源系统运行优化模块的前端数据，来对数字孪生模型的相应参数进行修改。

在优化搜索页面启动双层优化程序，可视化 Web 工作区向调度中台发布任务，调度中台利用建模仿真平台提供的底层仿真程序调用接口 API，根据双层优化程序的需求，来调用相应的后台仿真功能，配合双层优化程序的执行，如图 10 所示。

双层优化程序顺利启动后，建模仿真平台向调度中台写回操作日志，将计算结果返回数据中台，可视化 Web 工作区读取调度中台的操作日志以及数据中台的计算结果，并在结果汇总页面完成优化结果随优化次数变化情况的动态展示，如图 11 所示。

通过上述流程，在区域多能源系统数字孪生应用平台上完成了多能源系统运行优化模块的接入、管理和调



图 10 多能源系统运行优化模块的优化搜索页面

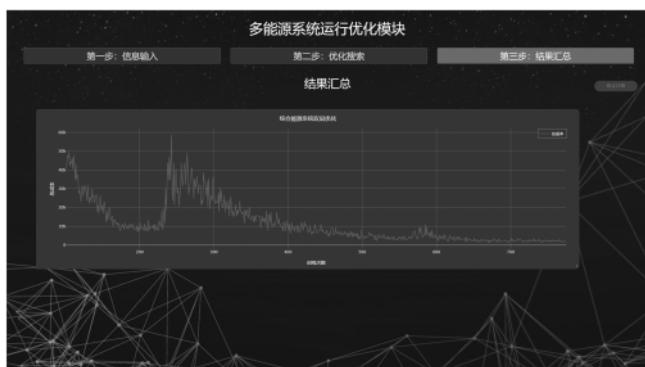


图 11 多能源系统运行优化模块的结果汇总页面

度,用于指导贵州红枫湖区域多能源系统的经济运行。

5 展望

本文所设计的区域多能源系统数字孪生应用平台具备支撑区域多能源系统规划设计、调度控制、运维保护等各种上层业务的能力,将区域多能源系统中复杂的信息物理动态在数字空间中准确描述和推演,利用模型融合和场景模拟推动人工智能决策技术与电网关键业务的有机融合;增强区域多能源系统对于可再生能源的接纳能力、提高用能质量和供能可靠性,同时适应未来可能的分布式能源交易环境;提高更高维度的分析功能,指导智能调度、运维和智能决策的发展。

通过分享数字孪生应用平台推动行业的合作和共同成长,形成一定范围内的数字能源产业合作生态圈;打破传统仿真分析工具的独享、低效、扩展难、应用支撑能力不足的困局,激活仿真平台的模型和应用市场机制,形成可以持久发展和长期繁荣的高性能、多样化数字孪生应用服务平台。

6 结论

由于数字孪生是一种涉及多领域、面向多对象、涵盖全周期的综合手段,目前尚处在探索和论证阶段,缺乏明确针对区域多能源系统数字孪生应用的构建方案和完整的开发工具。针对此问题,本文构建了以CloudPSS为基础的区域多能源系统数字孪生应用平台,该平台具有高性能、低成本、交互友好、定制开发能力强

等性能特点,能够提供广泛接入、灵活配置、开放共享的系统功能开发和测试环境。

参考文献

- [1] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考[J].电力建设,2015(1):10.
- [2] 沈沈,贾孟硕,陈颖,等.能源互联网数字孪生及其应用[J].全球能源互联网,2020,3(1):1-13.
- [3] 房方,张效宁,梁栋炀,等.面向智能发电的数字孪生技术及其应用模式[J].发电技术,2020,41(5):462-470.
- [4] 贺兴,艾萍,朱天怡,等.数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J].电网技术,2020,44(6):11.
- [5] DENG T,ZHANG K,SHEN Z J(Max).A systematic review of a digital twin city:a new pattern of urban governance toward smart cities[J].Journal of Management Science and Engineering,2021,6(2):125-134.
- [6] Siemens.For a digital twin of the grid Siemens solution enables a single digital grid model of the Finnish power system[R/OL].[2021-12-08].<https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2017/corporate/2017-12-innovation/inno2017-digitaltwin-e.pdf>.
- [7] GE Digital Twin.Analytic engine for the digital power plant[Z].2016.
- [8] PREDIX G.Predix :the industrial IoT application platform[EB/OL].(2018-xx-xx).[2021-12-08].https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Predix-The-Industrial-Internet-Platform-Brief.pdf.
- [9] SONG Y,CHEN Y,YU Z,et al.CloudPSS :a high-performance power system simulator based on Cloud computing[C]//2020 The 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering,2020.
- [10] SONG Y,YING C,HUANG S,et al.Efficient GPU-based electromagnetic transient simulation for power systems with thread-oriented transformation and automatic code generation[J].IEEE Access,2018,6:25724-25736.
- [11] 宋炎侃,陈颖,于智同,等.基于同构有向图的电网多场景仿真 GPU 批量并行加速方法[J].电工电能新技术,2020,39(3):7.
- [12] 陈颖,宋炎侃,黄少伟,等.基于 GPU 的大规模配电网电磁暂态并行仿真技术[J].电力系统自动化,2017,41(19):7.

(收稿日期:2021-12-08)

作者简介:

唐学用(1984-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统分析运行、分布式能源和数字孪生技术。

姚俊荣(1997-),男,硕士,主要研究方向:区域综合能源系统规划。

万会江(1985-),男,硕士,主要研究方向:电力系统调度自动化。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所