



国家电网公司  
STATE GRID  
CORPORATION OF CHINA



# 数字孪生电网 白皮书

国网河北省电力有限公司

2021年





## FOREWORD

# 前言

近年来，数字孪生作为一项推动数字化转型的关键技术，备受学术界和企业界关注，并被应用到了航空航天、工业制造等诸多领域。部分电力企业也对数字孪生进行了探索和应用，但对数字孪生在电网领域的实现途径、功能作用和管理方式还缺乏统一的认识。国网河北省电力有限公司自2019年来，便开始着手对数字孪生进行研究与实践，初步形成了数字孪生电网的体系架构、技术实现方式等研究成果，并以数字化建设，尤其是雄安数字化主动电网建设为契机，建成了数字孪生开关站、数字孪生光伏电站、数字孪生微电网等一批具有代表性的示范项目。为与从事数字孪生电网研究探索的各位同仁分享研究成果和项目经验，特编制本白皮书，如有不足之处，还请见谅与指正。



# CONTENTS

# 目录

## 01

### 数字孪生概述

1.数字孪生技术简介	02
2.数字孪生发展历程	03
3.数字孪生技术内涵	04
4.数字孪生应用领域	06

## 02

### 数字孪生电网

1.数字孪生电网的必要性	08
2.数字孪生电网主要功能	09
3.数字孪生电网体系架构	10
4.数字孪生电网技术实现	12
5.数字孪生电网结构描述	16
6.数字孪生电网自动演进	19
7.与数字孪生城市的关系	21

## 03

### 典型应用场景

1.数字孪生微电网	25
2.数字孪生综合能源系统	27
3.数字孪生开关站	29
4.数字孪生新能源场站	31
5.数字孪生基建现场	33
6.数字孪生电缆线路	35
7.数字孪生配网台区	37
8.数字孪生流水线车间	39

## 04

### 未来展望

	41
--	----



01  
CHAPTER ONE

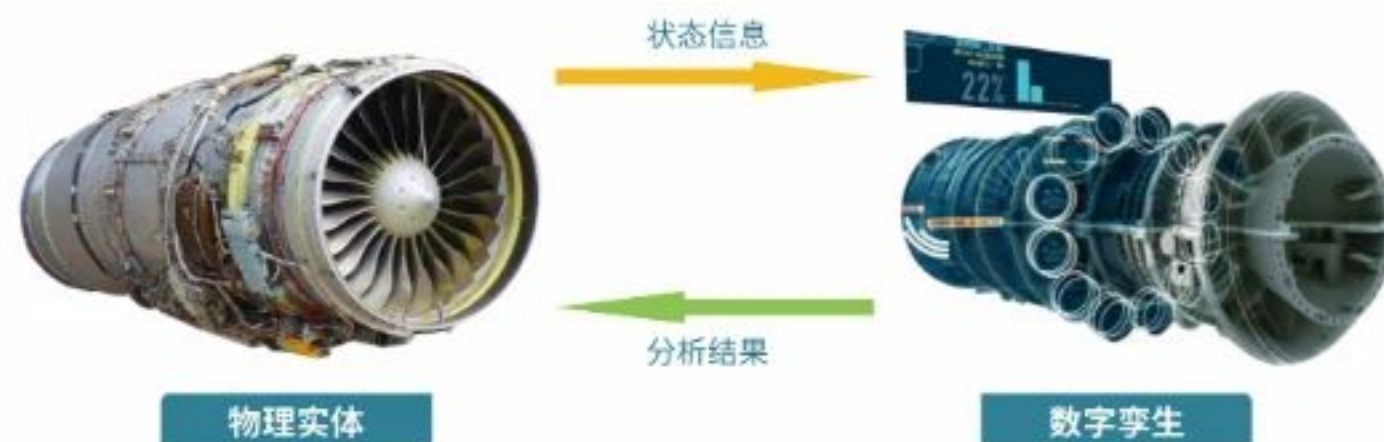
## 数字孪生概述

- ★ 数字孪生技术简介
- ★ 数字孪生发展历程
- ★ 数字孪生技术内涵
- ★ 数字孪生应用领域

## 1. 数字孪生技术简介

数字孪生是将物理实体以数字化方式映射至虚拟空间，借助历史数据、实时数据以及算法模型等，模拟物理实体在现实环境中的行为特征，从而实现对物理实体的监测、诊断、预测、优化。

物理实体与数字孪生的关系如下图所示。



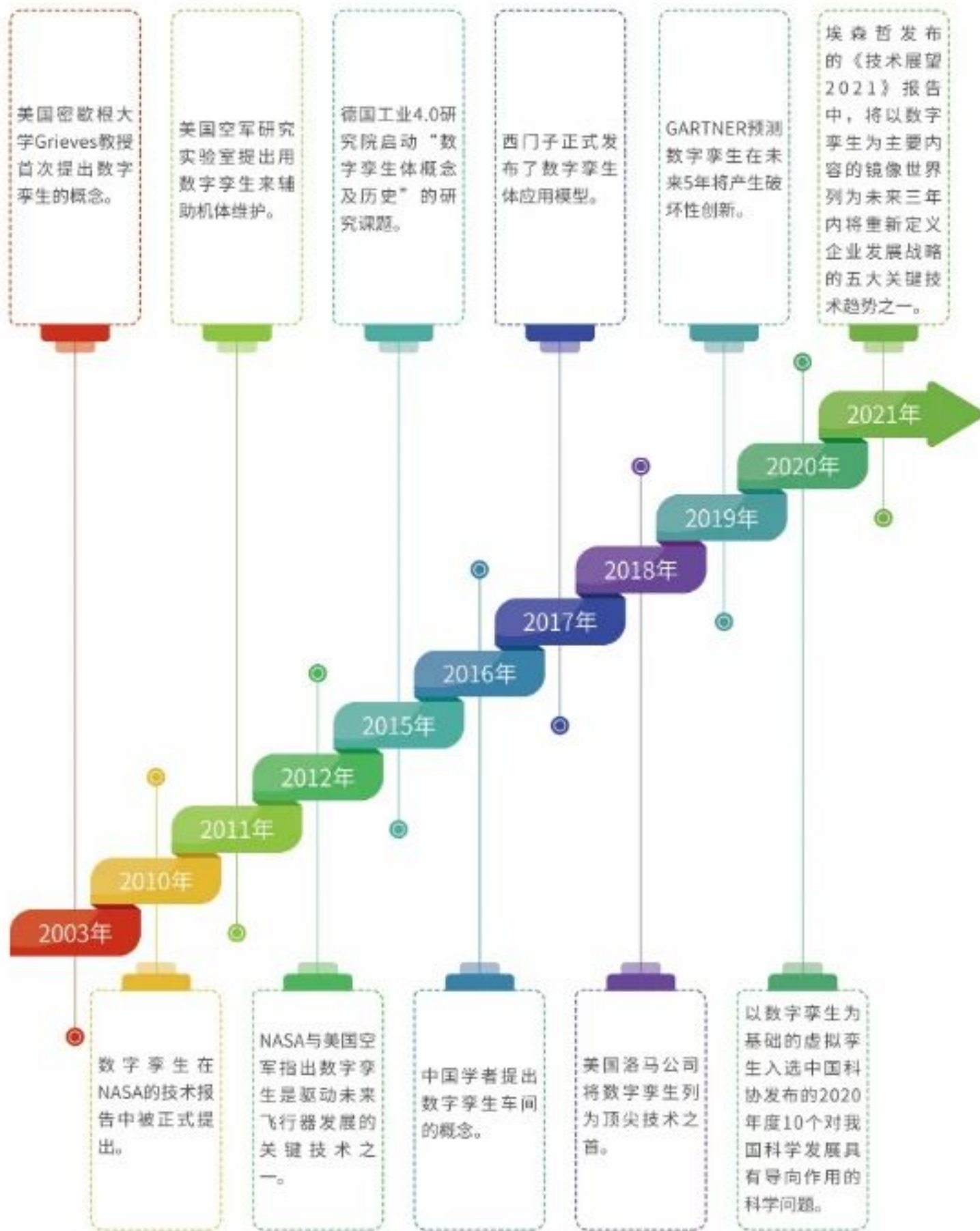
物理实体与数字孪生的关系

数字孪生通过接收来自物理实体的状态信息而同步演化，并基于物理实体的状态信息，进行诊断、预测等一系列计算分析后，将分析结果反馈给物理实体，从而推动物理实体优化调整。

全球最具权威的IT研究与顾问咨询公司GARTNER连续三年（2017年至2019年）将数字孪生列为“十大战略技术趋势”，数字孪生已成为全球信息技术发展的新焦点。



## 2. 数字孪生发展历程



## 3. 数字孪生技术内涵

数字孪生在技术架构上包括数据层、模型层、功能层以及展示层等4个层次，如下图所示。



数字孪生技术架构

数据层由档案类数据与量测类数据构成，负责为模型层提供数据基础。

模型层由一系列机理模型与数据驱动模型构成，负责对数据层内的数据进行计算分析，并将计算分析结果提供给功能层。

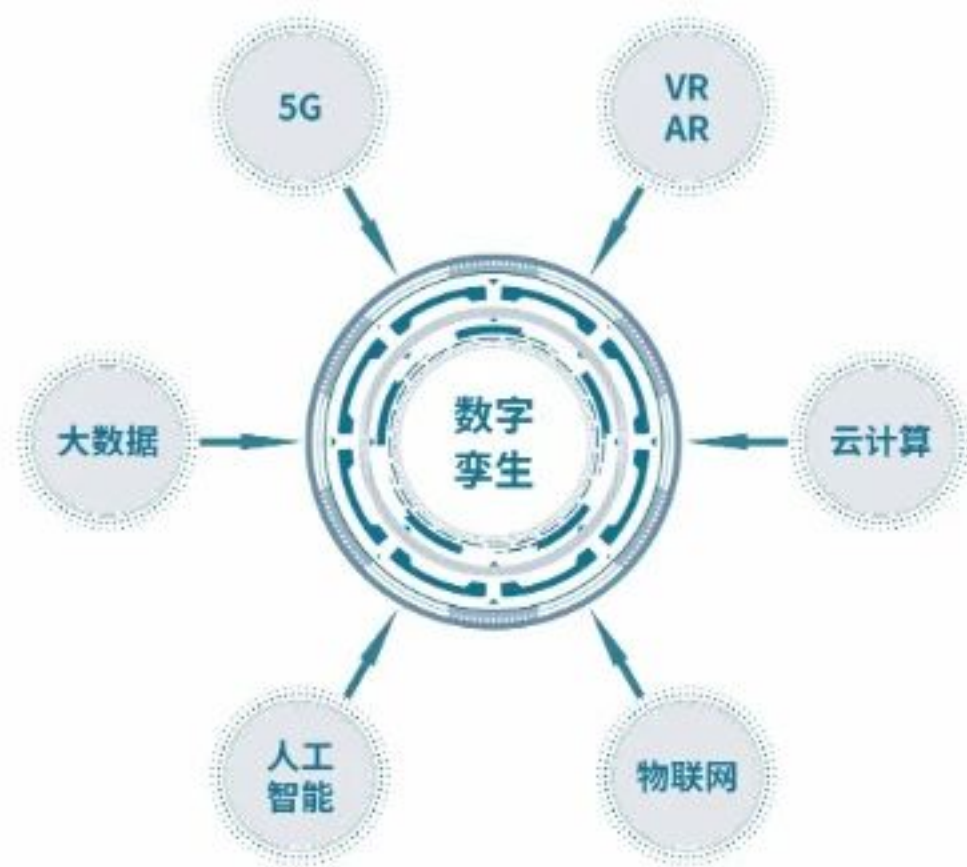
功能层由监测、诊断、预测、优化等类型的功能应用构成，负责为展示层提供功能支撑。

展示层由三维模型或拓扑图、地理接线图等专题图构成，负责将需展示的数据直观的展示给工作人员。

数据越全面精准、模型越科学合理、功能越智能丰富、展示页面越友好生动，数字孪生的孪生程度也就越高。



数字孪生实现了对VR/AR、云计算、物联网、人工智能、大数据、5G等技术的有机融合。



数字孪生相关技术

云计算	云计算可以动态的为数字孪生提供强大的计算与存储能力。
物联网	物联网能够为数字孪生提供与物理实体进行信息交互的通道。
人工智能	人工智能可以提升数字孪生的智能化水平，赋予数字孪生思考的能力。
大数据	大数据可以为数字孪生挖掘物理实体海量数据中的价值信息提供支撑。
5G	5G可以为数字孪生与物理实体间的海量数据低延迟传输提供可靠保障。
VR/AR	VR/AR为数字孪生的动态逼真展示提供了技术途径。

## 4.数字孪生应用领域

目前，数字孪生已经被应用于航空航天、建筑施工、城市管理、工业制造、健康医疗以及交通运输等诸多领域。

航空航天



建筑施工



城市管理



工业制造



健康医疗



交通运输



同时，已有部分电力企业对数字孪生在电网领域的应用进行了探索和尝试，并建成了数字孪生变电站、数字孪生输电线路等示范项目。



# 02

## CHAPTER TWO

# 数字孪生电网

- ★ 数字孪生电网的必要性
- ★ 数字孪生电网主要功能
- ★ 数字孪生电网体系架构
- ★ 数字孪生电网技术实现
- ★ 数字孪生电网结构描述
- ★ 数字孪生电网自动演进
- ★ 与数字孪生城市的关系

## 1. 数字孪生电网的必要性

### 技术方面

随着“碳达峰、碳中和”、“构建以新能源为主体的新型电力系统”等战略目标的提出，电网将会接入大量具有随机性、间歇性、波动性特征的分布式能源，以及储能装置、V2G等交互式能源设施，使其呈现出结构更加复杂、设备更加繁多、技术更加庞杂的趋势。传统机理模型和优化控制方法已经难以满足电网规划设计、监测分析和运行优化的要求。



### 管理方面

受产业结构调整、能源领域改革、电价下调等政策影响，依靠电量增长拉动收入的传统经营发展模式难以为继，电网企业迫切需要优化经营策略，实现企业的精益化管理。由于对电网缺乏精准刻画，无法准确把握电网的状态信息，导致电网的运维效率难以得到有效提升，另外，对电网运营策略的优化调整，严重依赖于人工经验，难以达到最佳效果。

数字孪生电网为解决上述问题提供了新的技术途径，可以有效保证电网经济、优质、安全的运行。



## 2. 数字孪生电网主要功能

通过数字孪生电网可以监测电网实时状态、诊断电网异常原因、预测电网发展趋势、优化电网运营策略。



### ◇ 监测电网实时状态

通过数字孪生电网可以实时反映开关通断、设备负载、用户负荷、新能源出力等电网运行状态，还可以实时反映电网的异常信息、故障信息，以便工作人员全面实时的监测电网状态。

### ◇ 诊断电网异常原因

通过数字孪生电网可以实现电网电压异常、电能质量异常、电费异常等各类异常的溯源分析，准确研判出导致异常的原因，以便工作人员制定相应的改进措施。

### ◇ 预测电网发展趋势

通过数字孪生电网可以准确预测新能源出力、电力用户用电负荷、电气设备负载情况，还可以预测设备故障、客户投诉等，以便工作人员制定相应的应对措施。

### ◇ 优化电网运营策略

通过数字孪生电网还可以优化设备检修频率、电力设施配置、联络开关投切、相间负荷调整等运营策略，进而为工作人员提供科学的决策支撑。

数字孪生电网可以大幅提升电网的数字化、智能化水平。

## 3. 数字孪生电网体系架构

数字孪生电网体系架构由设备级数字孪生、单元级数字孪生、系统级数字孪生三个层级所构成。



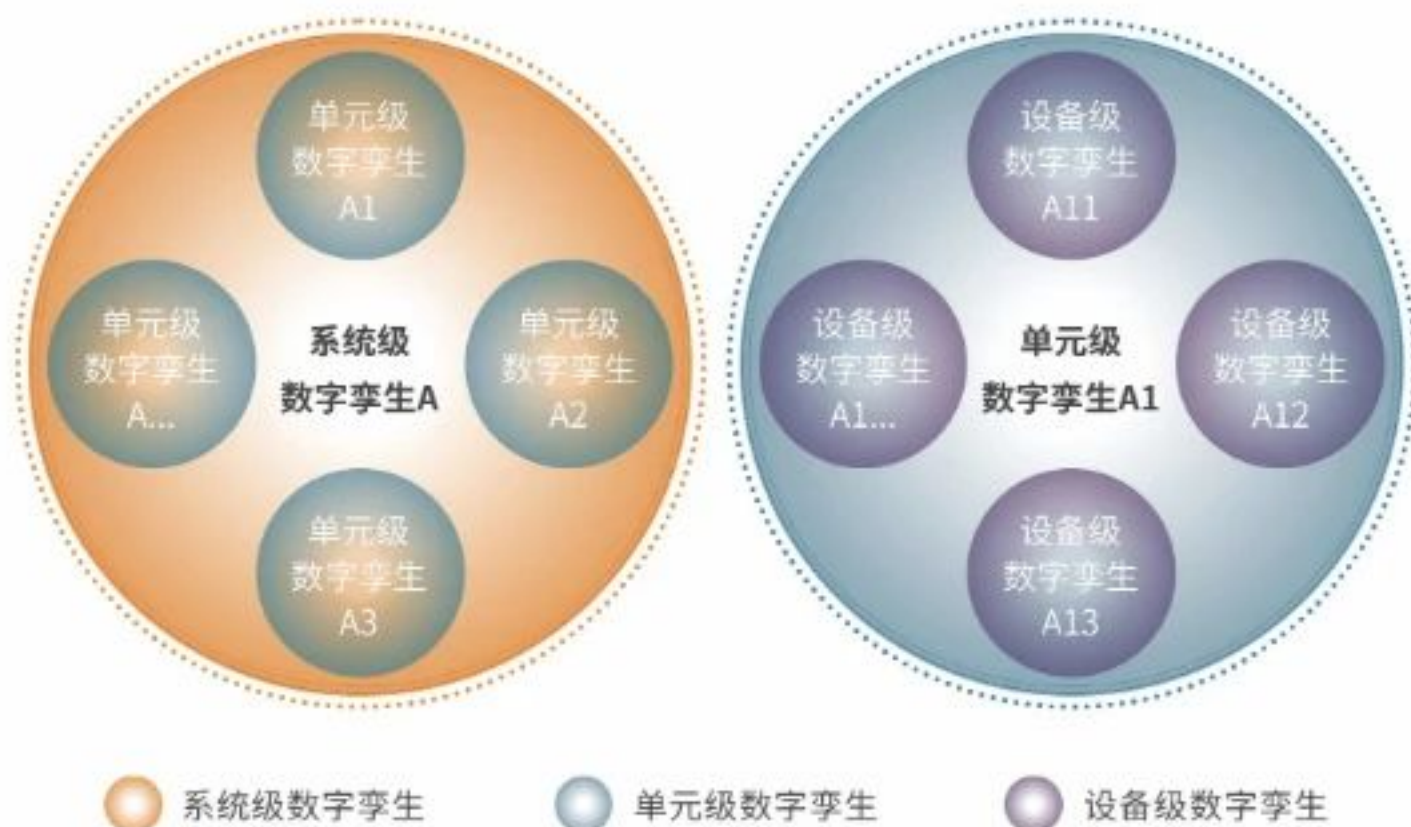
设备级数字孪生指电网中单个设备的数字孪生，如数字孪生变压器、数字孪生断路器、数字孪生隔离开关等。

单元级数字孪生是指电网中由多个设备所组成的功能单元的数字孪生，如数字孪生变电站、数字孪生微电网、数字孪生输电线路等。

系统级数字孪生是指电网中由多个功能单元所组成的系统的数字孪生，如数字孪生区域电网、数字孪生省级电网、数字孪生市级电网等。



系统级数字孪生并不是单元级数字孪生的简单叠加，同样，单元级数字孪生也不是设备级数字孪生的简单叠加。不同层级数字孪生之间的功能关系如下图所示。



系统级数字孪生除了涵盖该系统所包含功能单元的数字孪生的功能外，还具有自身的一些特有功能。如数字孪生市级电网除了涵盖该市级电网所包含变电站、输电线路等功能单元的数字孪生的功能外，还具有无功优化、网架优化等特有功能。同理，单元级数字孪生除了涵盖该功能单元所包含设备的数字孪生的功能外，还具有自身的一些特有功能。如数字孪生变电站除了涵盖该变电站所包含变压器、断路器等设备的数字孪生的功能外，还具有整站状态评估、站内风险点识别等特有功能。

## 4. 数字孪生电网技术实现

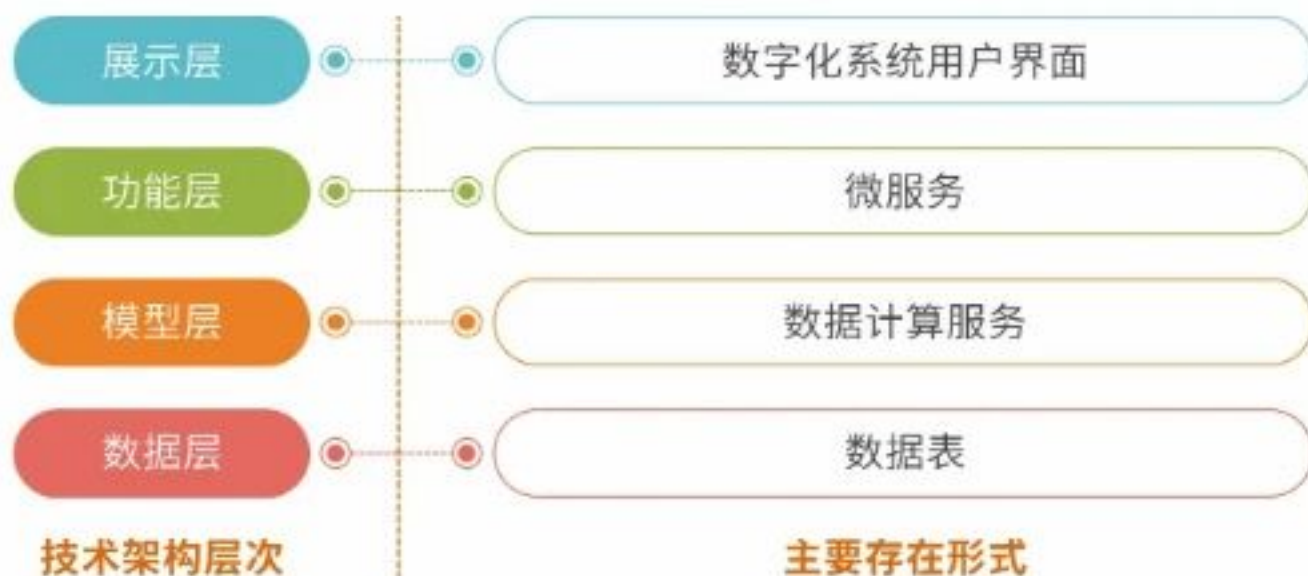
数字孪生电网每个层级的数字孪生在技术架构上均由数据层、模型层、功能层以及展示层等四层组成，以数字孪生微电网为例，其技术架构如下图所示。



数字孪生微电网技术架构



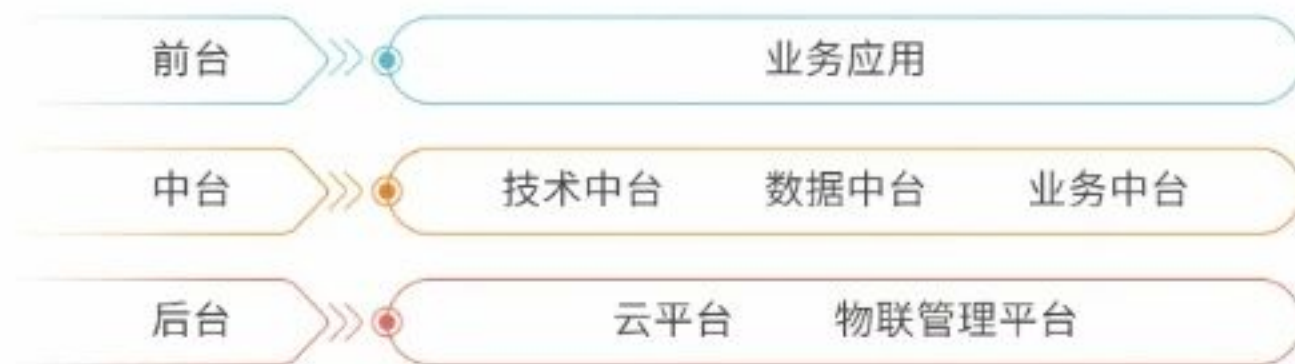
数字孪生电网技术架构中各层的主要存在形式如下图所示。



数字孪生电网技术架构中：

- **数据层**内各类档案类数据和量测类数据主要以数据表的形式存在；
- **模型层**内各类计算模型主要以数据计算服务的形式存在；
- **功能层**内各类功能主要以微服务的形式存在；
- **展示层**内各类三维模型、专题图主要以数字化系统用户界面的形式存在。

当前，国网公司构建的“前台+中台+后台”电网数字化架构，可以为数字孪生电网技术架构提供有力支撑。



### 电网数字化架构

电网数字化架构中的云平台、数据中台、人工智能平台（技术中台的一部分）等为数字孪生电网技术架构提供了数字化载体。

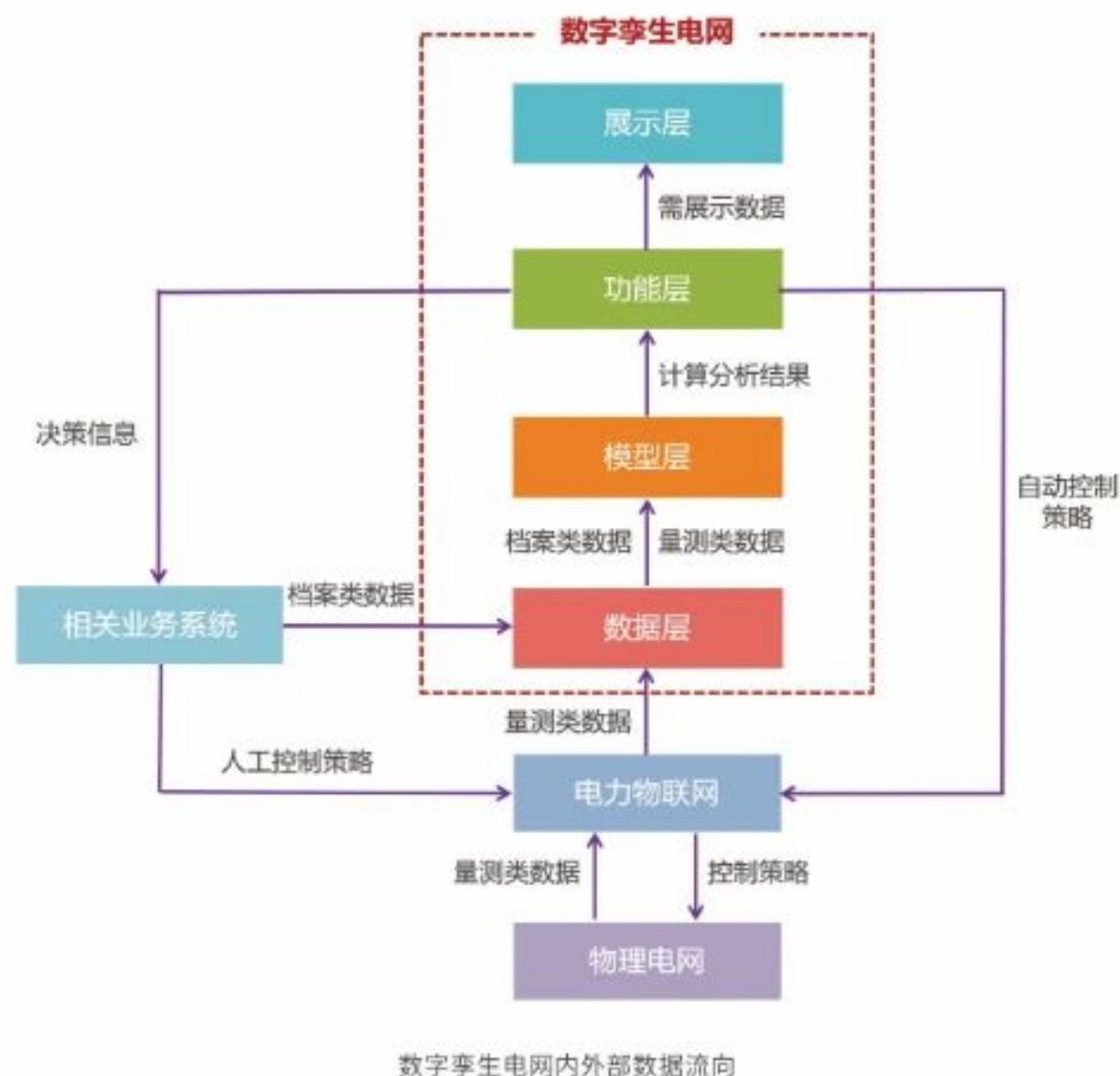
数字孪生电网技术架构中各层的主要数字化载体如下。



数据中台共享层为各类数据表提供了数字化载体；人工智能平台为机器学习类的数据计算服务提供了数字化载体，数据中台分析层为非机器学习类的数据计算服务提供了数字化载体；云平台容器为各类微服务以及数字化系统提供了数字化载体。



依托电网数字化架构构建数字孪生电网后，其内外部数据流向如下图所示。



以物联管理平台为基础的电力物联网以及相关业务系统，共同承担了数字孪生电网与物理电网之间信息沟通桥梁的角色。

## 5. 数字孪生电网结构描述

数字孪生电网中每个层级数字孪生的结构均通过数字孪生结构图谱来描述。



设备级数字孪生结构图谱

设备级数字孪生结构图谱由数据、模型、功能组成，实物ID是设备级数字孪生结构图谱的唯一标识。

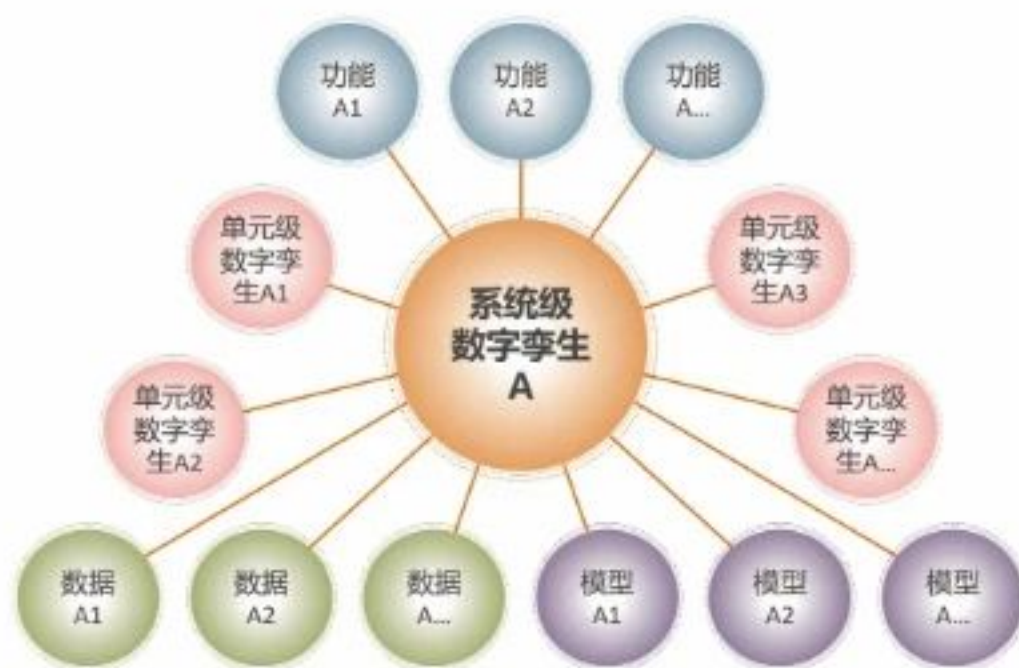


单元级数字孪生结构图谱

单元级数字孪生结构图谱由该功能单元所包含的各设备的设备级数字孪生结构图谱，以及该功能单元独有的数据、模型、功能组成。工作人员应为单元级数字孪生结构图谱设定唯一标识。



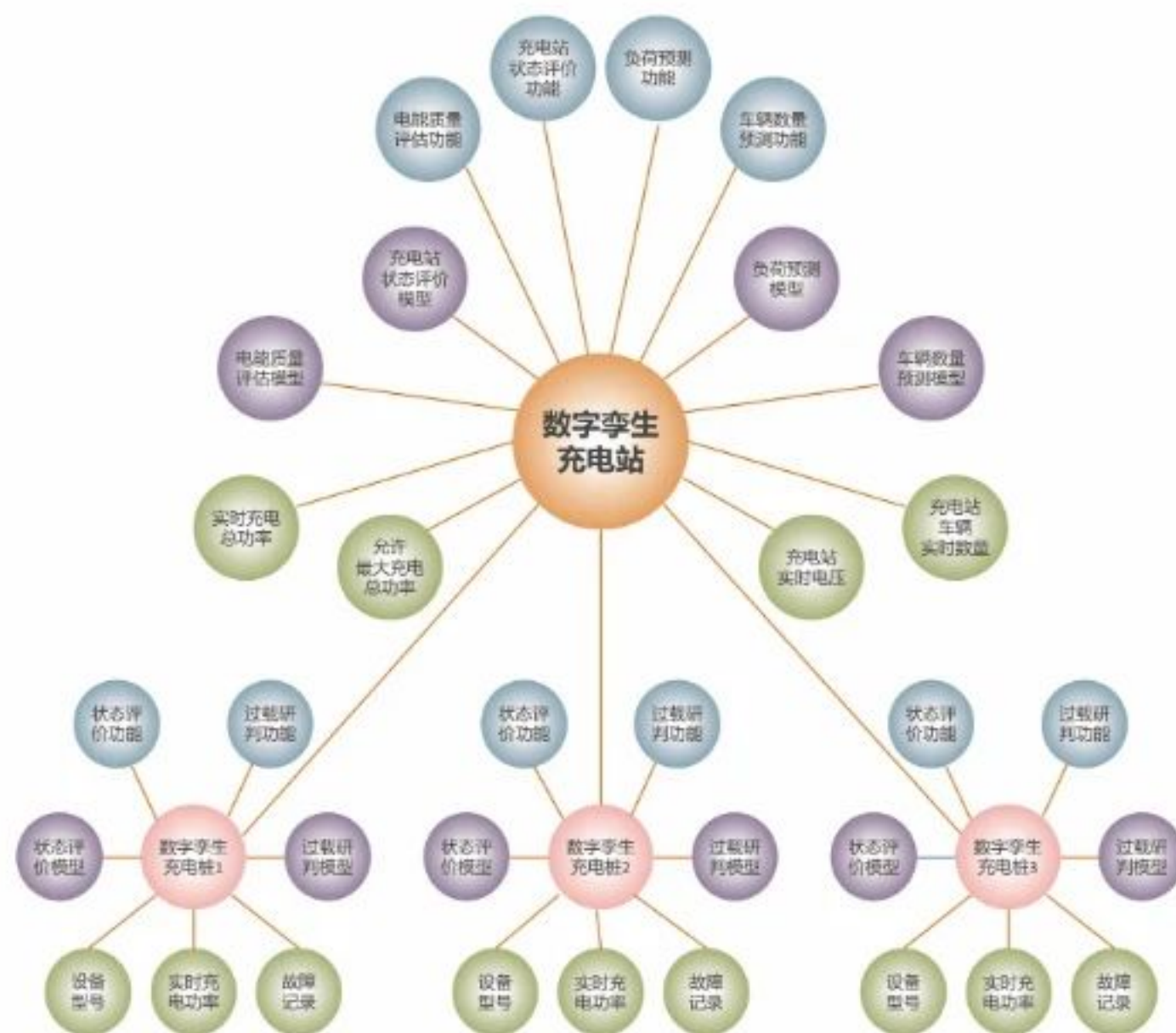
系统级数字孪生结构图谱由该系统所包含的各功能单元的单元级数字孪生结构图谱，以及该系统独有的数据、模型、功能组成。工作人员应为系统级数字孪生结构图谱设定唯一标识。



系统级数字孪生结构图谱

数字孪生结构图谱将位于不同数字化载体上的数据、模型以及功能进行了梳理归纳，准确描述了数字孪生与数据、模型、功能之间，以及数字孪生与数字孪生之间的关系，相当于为数字孪生这本“书”构建了“目录”。某充电站的数字孪生结构图谱如下图所示。

工作人员通过数字孪生结构图谱可以快速查阅数字孪生的数据、模型和功能，以及数字孪生与数字孪生之间的关系。



某充电站数字孪生结构图谱



## 6. 数字孪生电网自动演进

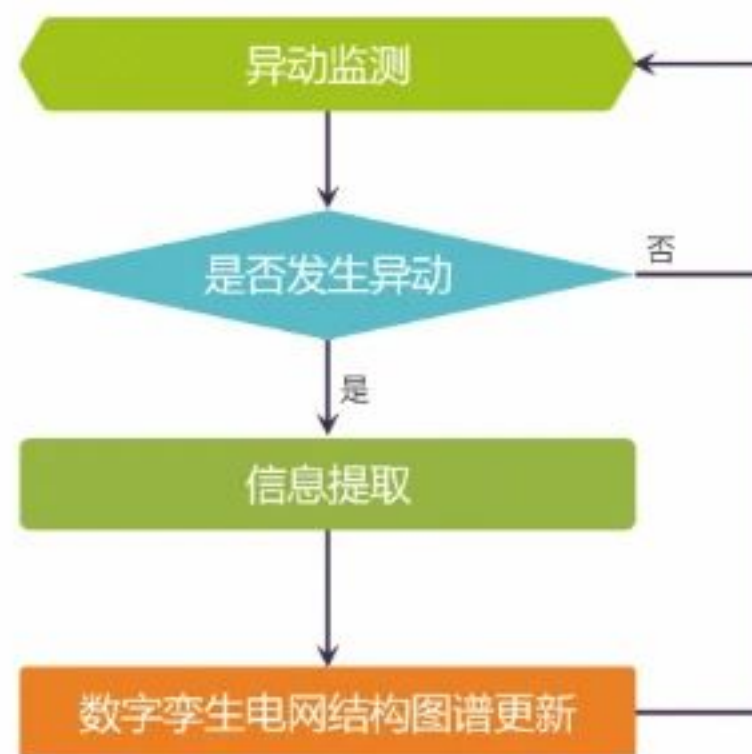
数字孪生电网的自动演进主要包括两方面内容：一是数字孪生电网功能的自动迭代，二是数字孪生电网结构图谱的自动更新。

数字孪生电网的部分功能（数据驱动模型所支撑的功能）应具备自动迭代的能力，以确保数字孪生电网的相应功能能够持续的进行自我优化完善，进而保证该部分功能的持久有效性和准确性。为实现数字孪生电网功能的自动迭代，相应功能所对应数据驱动模型应采用增量学习的方式，不断从新的数据样本中获取知识，用以对自身进行优化迭代，从而支持该部分功能完成自动迭代。数字孪生电网功能自动迭代流程如下图所示。



数字孪生电网功能自动迭代流程

数字孪生电网的结构图谱应具备自动更新的能力，以保证物理电网或数字孪生电网本身发生变化后，数字孪生与数据、模型、功能之间，以及数字孪生与数字孪生之间关系的准确性。数字孪生电网结构图谱自动更新流程如下图所示。



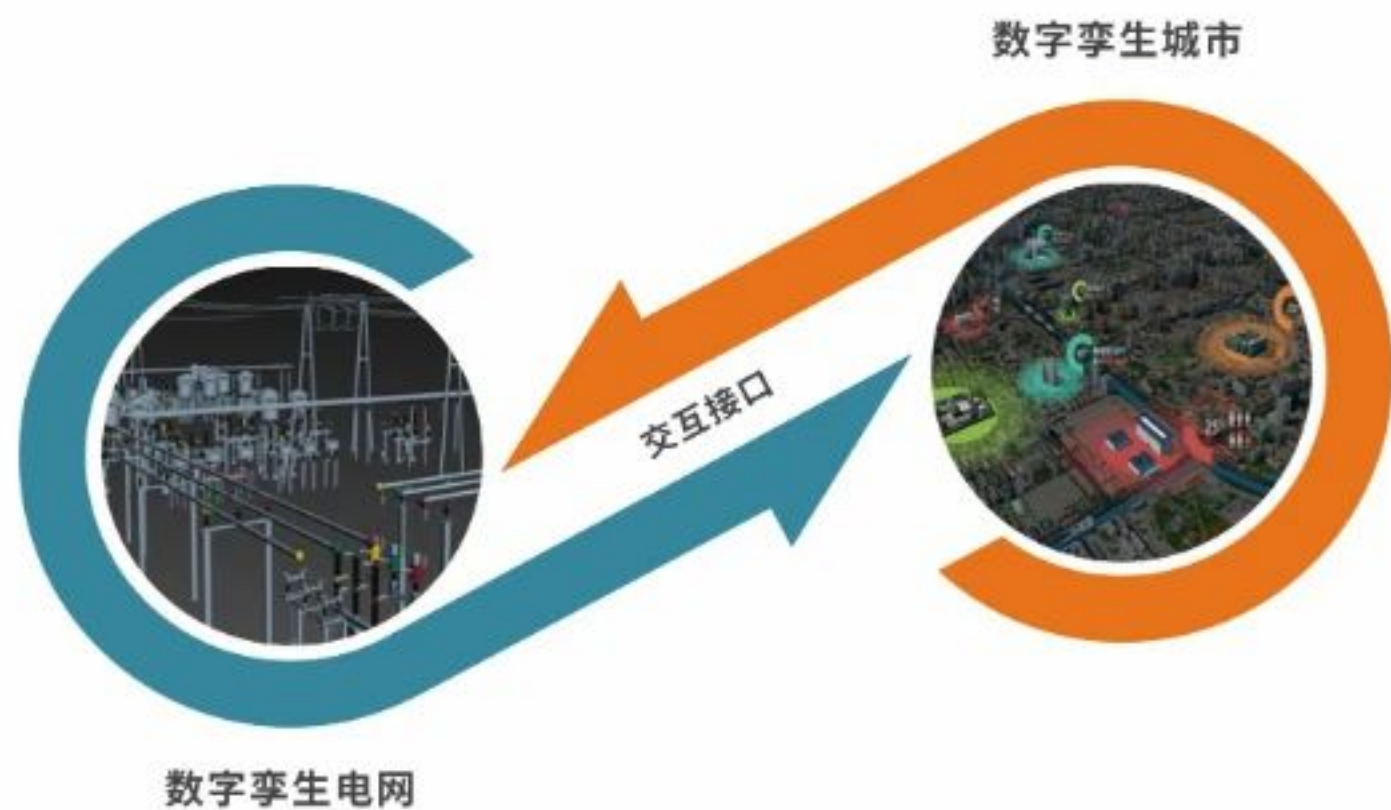
数字孪生电网结构图谱自动更新流程

当物理电网的结构或组成发生变化，或者对数字孪生电网的功能需求发生变化时，工作人员完成相应的信息更新工作（如添加设备档案、发布数据计算服务等）后，会触发数字孪生电网的结构图谱异动条件，相应的计算服务会自动提取出所更新信息中的数据和关系，并以此为基础自动完成数字孪生电网结构图谱的更新。



## 7. 与数字孪生城市的关系

数字孪生电网与数字孪生城市之间应建设交互接口，以实现数据上的交互共享，功能上的相互支撑。



数字孪生电网需要从数字孪生城市获取城市规划、人口密度、车辆流向、建筑布局等信息；数字孪生城市需要从数字孪生电网获取电力设施配置、电力管线走向、电网承载能力等信息。

数字孪生电网可为数字孪生城市提供功能上的支撑，如数字孪生电网可以分析出违规生产的重点污染企业，为数字孪生城市的环境管理模块提供支撑。同样，数字孪生城市也可为数字孪生电网提供功能上的支撑，如数字孪生城市可以将预测到的人员流动趋势（如务工人员返乡潮）提供给数字孪生电网，以便于数字孪生电网优化电网运行策略，保障电网安全稳定运行。





# 03

## CHAPTER THREE

# 典型应用场景

- ★ 数字孪生微电网
- ★ 数字孪生变电站
- ★ 数字孪生开关站
- ★ 数字孪生新能源场站
- ★ 数字孪生基建现场
- ★ 数字孪生电缆线路
- ★ 数字孪生配网台区
- ★ 数字孪生综合能源系统
- ★ 数字孪生流水线车间

为国网河北省电力有限公司结合实际业务需求，将建设6类17种典型应用场景，本节对已建成的8种典型应用场景进行了简要介绍。

### 能源协同 互动类

数字孪生  
虚拟电厂

数字孪生  
微电网

数字孪生  
综合能源系统

### 场站类

数字孪生  
变电站

数字孪生  
充电站

数字孪生  
开关站

数字孪生  
新能源场站

数字孪生  
基建现场

### 线路类

数字孪生  
输电线路

数字孪生  
配电线路

数字孪生  
电缆线路

### 台区类

数字孪生配网台区

### 用户类

数字孪生  
高压用户

数字孪生  
低压用户

数字孪生  
分布式光伏

### 车间 仓库类

数字孪生  
仓库

数字孪生  
流水线车间

拟建设应用场景

已建成应用场景



## 1. 数字孪生微电网

为提升微电网的运维工作效率，以及探索数字孪生电网与数字孪生城市相融合的技术途径，国网雄安新区供电公司基于GIS、BIM、倾斜摄影以及电力物联网等技术，在雄安新区王家寨构建了数字孪生微电网，实现了对该微电网的全景监测、状态评价等功能。



通过数字孪生微电网的状态评价功能，可以诊断识别出微电网的薄弱环节，为微电网的升级改造工作提供决策依据。

后期，该数字孪生微电网还将增加新能源出力预测、储能充放电策略优化、柔性负荷控制策略优化等功能，以加强微电网的源网荷储互动协同性，从而达到促进清洁能源消纳、减少碳排放的目的。



通过数字孪生微电网的全景监测功能，可准确掌握微电网各设备的运行状态，从而实现虚拟巡视功能，在提升运维效率的同时降低人力成本投入。



## 2. 数字孪生综合能源系统

为提升雄安市民服务中心综合能源系统的运维效率，国网雄安新区供电公司依托自主研发的城市智慧能源管理系统（CIEMS），结合BIM、物联网、大数据等技术，构建了数字孪生综合能源系统。



通过数字孪生综合能源系统，工作人员能够实现对系统整体状态以及各设备状态的全景监测。



数字孪生综合能源系统能够快速定位故障设备，并依托建筑三维模型进行展示，还能够自动生成抢修工单，将故障影响范围、维修建议等信息推送给工作人员。



数字孪生综合能源系统还能够基于各建筑的用能数据，对其进行能效分析，进而为能源的精益化管理提供科学依据。



另外，数字孪生综合能源系统还能够对区域内的用能负荷进行预测，并根据预测结果制定合理的机组启停策略，以达到节能减排、降本增效的目的。



### 3. 数字孪生开关站

基于三维建模、VR以及视频融合等技术，国网雄安新区供电公司构建了与雄安市民服务中心1#开关站虚实同态的数字孪生开关站，以支撑运维人员对开关站开展虚拟巡检，提升开关站运维效率。



在三维模型的基础上引入监控视频流，实现虚实结合，全方位掌握开关站的现场环境信息。



在三维模型上加载设备档案信息以及实时运行数据，实现电气设备运行状态的远程实时监测。



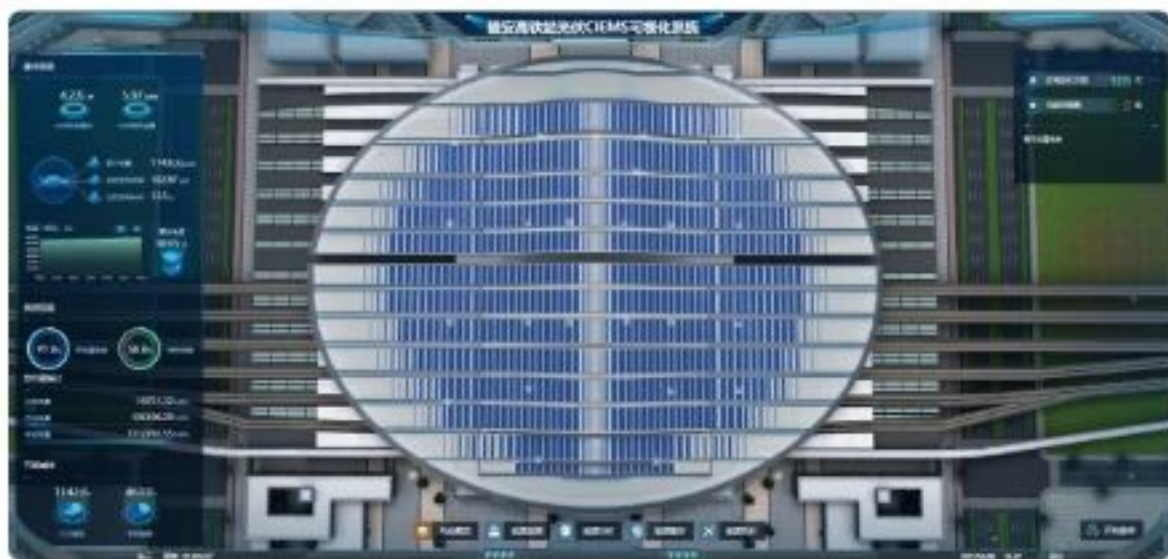
具有VR端、PC端两种虚拟巡检模式，可供工作人员灵活选择。

基于数字孪生开关站开展远程虚拟巡检，可实时掌握电力设备的现场环境和运行状况，能有效减少巡检工作的人力、物力以及时间成本，同时还可解决快速查看现场以及重要保电任务中部分关键电力场所无法直接值守的问题。



## 4. 数字孪生新能源场站

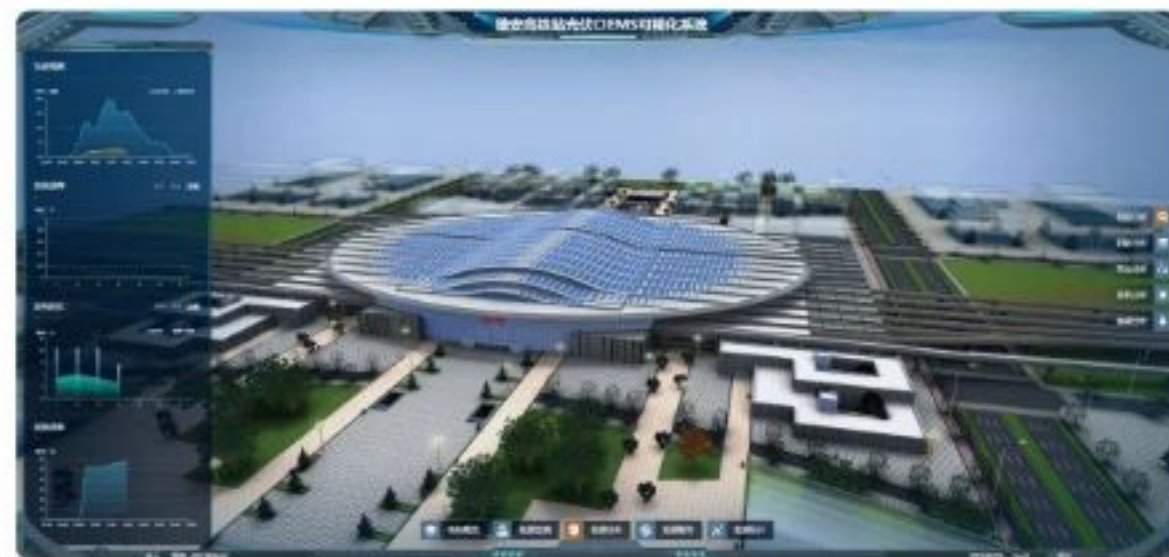
为提升雄安高铁站屋顶光伏电站的运维效率，国网雄安综合能源公司打造了与该光伏电站同态运行的数字孪生新能源场站—数字孪生光伏电站，实现了对该光伏电站的全景监测、指标分析、积尘分析等功能。



通过数字孪生光伏电站的全景监测功能，可以实现对升压变、逆变器、光伏组串等设备运行数据和告警信息的实时展示，从而可以支撑工作人员开展虚拟巡视。



通过数字孪生光伏电站的指标分析功能，可以统计计算发电小时数、系统发电量、系统效率、系统故障次数等指标，以便工作人员深入掌握光伏电站的运营状况。

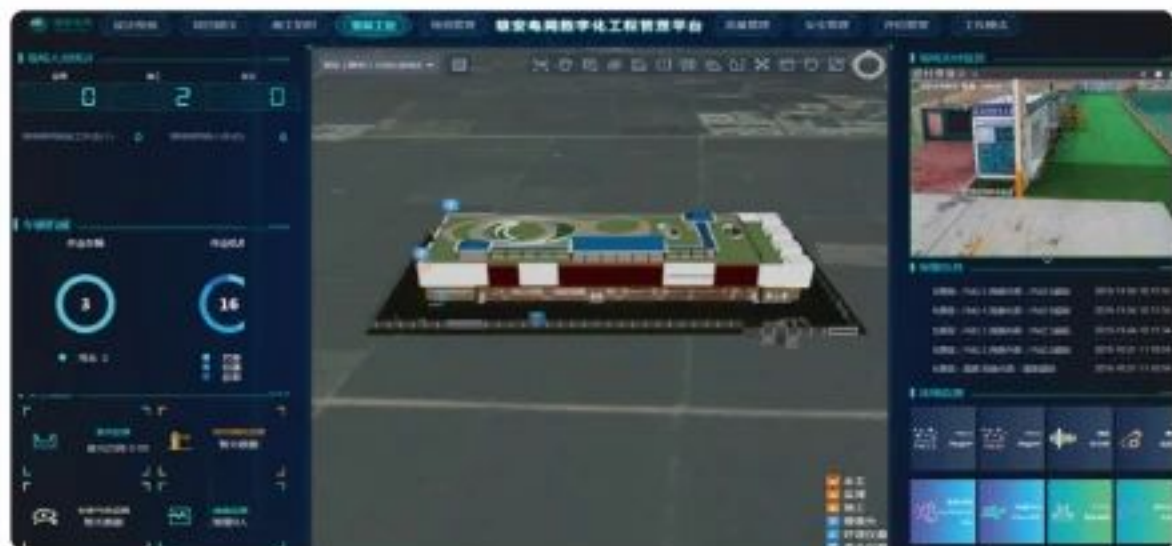


通过数字孪生光伏电站的积尘分析功能，可以推算出光伏电站光伏板上积尘的厚度，并为工作人员制定合理的清洗策略，进而保证光伏电站的发电效率。



## 5. 数字孪生基建现场

为提升对基建现场的管控能力，国网雄安新区供电公司依托电网数字化工程管理平台（EIM），分别在220KV剧村变电站、110KV河西变电站施工现场构建了数字孪生基建现场。



通过数字孪生基建现场，除能够实现对现场人员、施工车辆等信息的实时监测外，还能实时监测基坑沉降、塔吊倾斜、有害气体等环境信息。



施工质量方面，数字孪生基建现场能够自动统计标准工艺应用率、缺陷消除率、验收合格率，从而为质量管理人员提供管控依据。



施工安全方面，数字孪生基建现场能够实时监控安全风险、作业违章，从而为安全管理人员提供管控依据。



施工组织方面，数字孪生基建现场能够应用三维模型对施工过程开展模拟推演，通过不断优化施工顺序、迭代完善，自动生成最优的施工组织计划，从而为项目经理提供决策支撑。



## 6. 数字孪生电缆线路

基于物联网、大数据、三维建模等技术，国网石家庄供电公司构建了与110KV方北站至110KV建华站之间电缆线路虚实同态的数字孪生电缆线路，以实现电缆线路的虚拟巡视和精细化管理，进而提升电缆线路运维工作的智能化水平，节省人力、物力成本，降低电缆线路故障损失。



数字孪生电缆线路将三维模型与设备台帐、运行数据、环境信息进行有机融合，可实时直观的监测电缆线路的运行状态和电缆隧道内的环境信息，从而达到虚拟巡视的目的。



数字孪生电缆线路还能够根据档案数据、试验数据、故障记录等信息，实现对电缆线路的状态评价，进而辅助工作人员制定检修计划。

后期，数字孪生电缆线路还能够根据人员、车辆、检修装备、备品备件、故障情况等信息，以抢修时间最短、人力成本最低为目标，构建最优化的抢修模型，给出抢修方式、抢修资源方面的建议。

未来雄安新区的电力线路将全部以电缆线路的方式敷设在综合管廊内，大量的电缆线路隐蔽于地下，必将给运维人员带来巨大的工作压力，数字孪生电缆线路为保障电缆线路的运维效率提供了有效的技术途径，因此，数字孪生电缆线路在雄安新区具有较大的推广前景。



## 7. 数字孪生配网台区

通过有机融合大数据、人工智能以及物联网等技术，国网河北电科院在雄安新区王家寨构建了数字孪生配网台区，实现了对配网台区的实时状态监测、历史状态回溯、未来趋势推演等功能。



数字孪生配网台区可实时展示物理配网台区的线损指标、异常告警、配变负载等信息，为台区经理的运维巡检工作提供支撑。



通过数字孪生配网台区可以实现物理配网台区历史状态的回溯，进而复现异常发生时的各类电气量，为台区经理开展异常原因诊断提供参考依据。



通过数字孪生配网台区还可以对物理配网台区的未来趋势进行预测推演，如在迎峰度夏、迎峰度冬前对配电变压器的负载率开展预测推演，校核配电变压器是否会发生重过载，以便台区经理提前采取应对措施。

另外，数字孪生配网台区还能够基于人工智能优化算法，自动生成相间负荷调整策略、储能装置充放电策略，为配网台区的优质运行提供决策支撑。



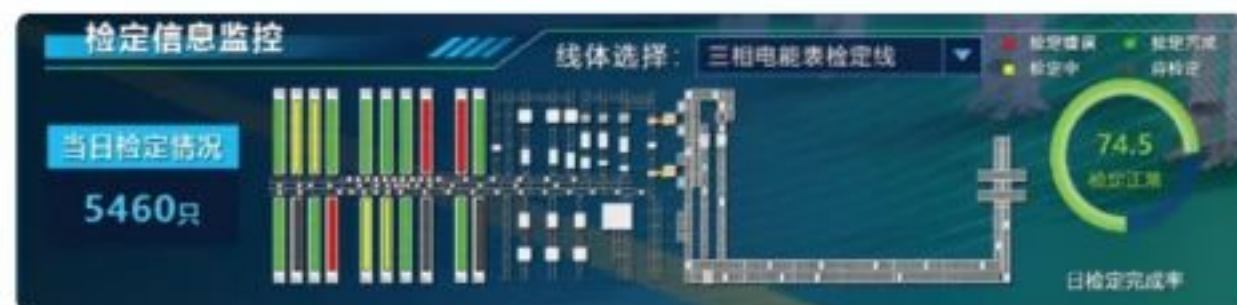
## 8. 数字孪生流水线车间

为提升电能表的检定效率，以及实现对电能表检定工作的精益化管理，国网河北营销中心构建了数字孪生流水线车间—数字孪生电能表检定流水线，实现了对物理电能表检定流水线的全景监测、视频巡检、故障告警等功能。



通过数字孪生电能表检定流水线的全景监测、视频巡检、故障告警功能，可以准确掌握各设备的运行状态和告警信息，从而实现虚拟巡视，在提升电能表检定效率的同时，还可降低所投入的人力成本。

通过数字孪生电能表检定流水线的检定信息监控功能，可实时掌握电能表检定任务的整体进展情况以及每个检定仓的检定进度，以支撑工作人员实现对电能表检定工作的精益化管理。





04  
CHAPTER FOUR

## 未来展望

当前，数字孪生在电网领域的应用场景还主要为“碎片化”的单点示范工程，功能上以监测为主，智能化水平较低。随着物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的快速发展和深度融合，必将会导致数字孪生电网的建设应用取得质的突破，未来数字孪生电网将呈现出精细化、系统化、智能化、普遍化、开放化等五个趋势。

#### ▣ 精细化

随着数字孪生电网的发展，未来电网内每一台设备，甚至是每一个部件都会有其对应的数字孪生，并且贯穿于全生命周期，以满足相关业务精细化管理的需求。

#### ▣ 系统化

未来数字孪生电网将打破原有的“碎片化”建设应用方式，会把所有设备级数字孪生、部件级数字孪生有机整合到一起，形成整个电网的数字孪生，为精准掌握整个电网的实时状态和发展趋势提供支撑。

#### ▣ 智能化

随着人工智能技术的发展，数字孪生电网的智能化水平将大幅度提升，不但能够准确预测电网的发展趋势，还能够自动做出合理的应对措施，为电网的稳定经济运行提供决策支撑。

#### ▣ 普遍化

随着物联网、大数据、人工智能等技术的日臻成熟，构建数字孪生的成本将会显著降低，数字孪生将会在电网领域得到普遍应用，并在电网的规划、建设、运营等环节发挥强有力的支撑作用。

#### ▣ 开放化

随着数字孪生城市和数字孪生电网的建设与发展，两者相互融合将成为必然趋势，数字孪生电网会呈现出较强的开放性，其将与数字孪生交通、数字孪生建筑、数字孪生水务等交叉融合，共同为数字孪生城市提供支撑。