

中国电科院双创示范中心
能源互联网 双创 讲坛

智能配电网数字孪生构建 和应用关键技术研究

何开元

中国电科院配电技术中心

主办：中国电科院双创示范中心

承办：国网上海能源互联网研究院有限公司

协办：中国电力百科网 国网数科控股公司双创中心

目录

CONTENTS



1 智能配电网数字孪生背景及发展

2 智能配电网数字孪生关键技术

3 智能配电网数字孪生典型应用场景

一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.1 数字孪生概述

(1) 数字孪生定义

标准化组织：数字孪生是具有**数据连接**的特定物理实体或过程的数字化表达，该数据连接可以保证物理状态和虚拟状态之间的**同速率收敛**，并提供物理实体或流程过程的整个生命周期的集成视图，有助于优化整体性能。

国内学术组织：数字孪生是综合运用**感知、计算、建模**等信息技术，通过软件定义，对物理空间进行**描述、诊断、预测、决策**，进而实现物理空间与赛博的**交互映射**。



图1 数字孪生发展历程

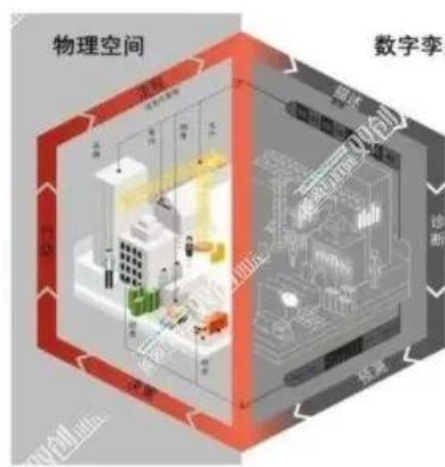


图2 物理空间与赛博空间的交互映射

一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.1 数字孪生概述

(2) 数字孪生特征

数字孪生与仿真的区别：

仿真是创建和运行数字孪生的核心技术，是数字孪生实现数据交互和融合的基础；

数字孪生基于确定性规律和完整机理模型来模拟物理世界，使用包括仿真、实测、数据分析在内的手段对物理实体状态进行感知、诊断和预测，进而优化物理实体，同时进化自身的数字模型。

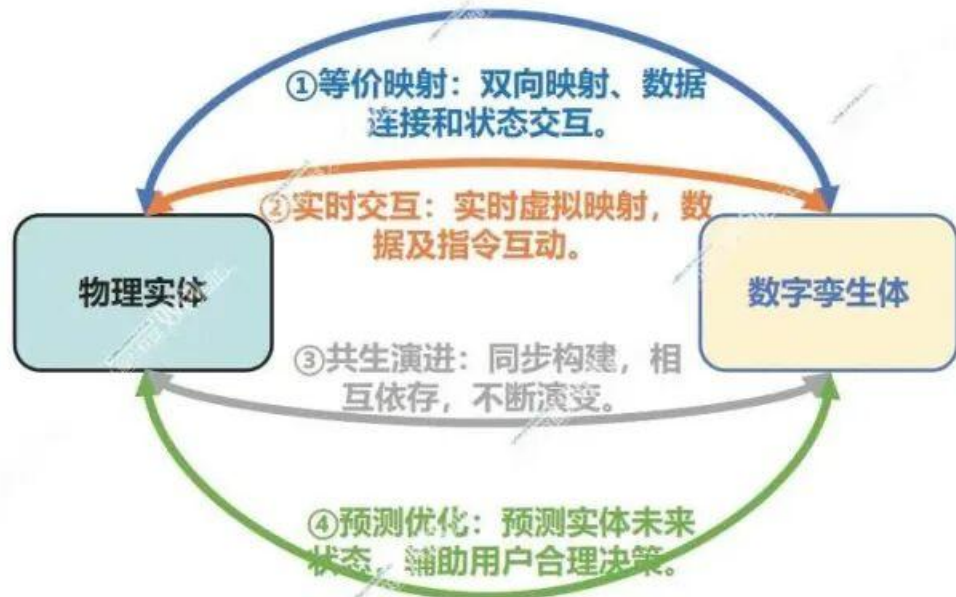


图1 数字孪生特征

一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.1 数字孪生概述

(3) 数字孪生技术的优势

1. 能够实现数据驱动和知识驱动的融合

- ◆ 考虑配电网运行的不确定输入条件
- ◆ 实现复杂配电网的随机动态模拟
- ◆ 以宏观的角度分析配电网发展态势

2. 能够实现复杂动态过程到数字模型的映射及仿真

- ◆ 进行的多物理量、多时空尺度、多概率的仿真过程，取得最优解；
- ◆ 在虚拟空间中完成运行推演，反映配电网的全生命周期过程。

3. 能够通过虚拟与现实的互动，实现优化迭代

- ◆ 通过融合现实数据与虚拟场景，不断细化模型
- ◆ 在规划建设运行全生命周期内对现实场景持续优化

4. 基于数字孪生的多场景、多边界、多目标的、平行的规划

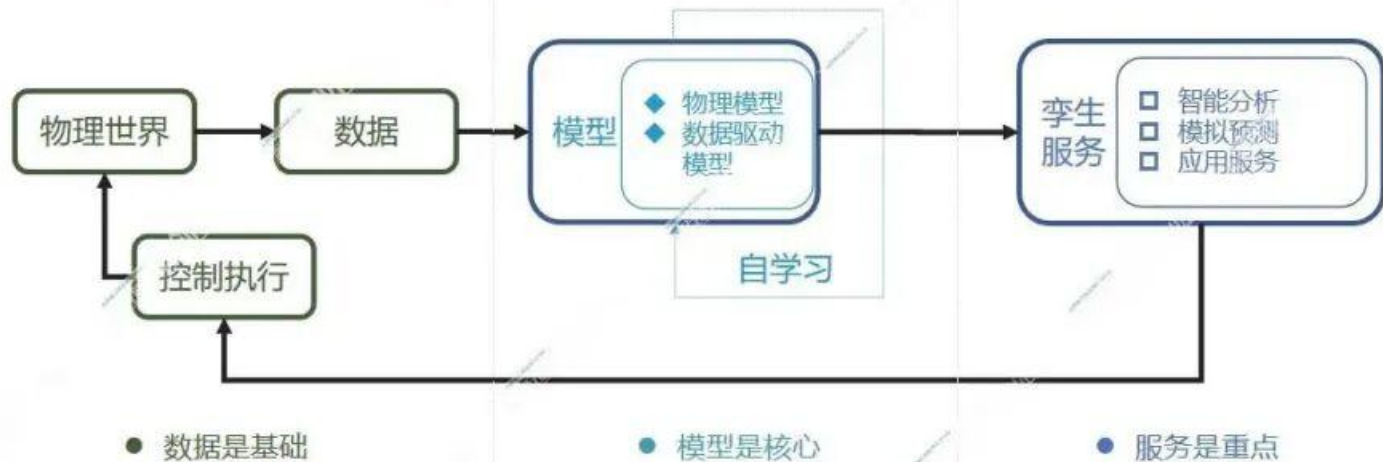
- ◆ 通过随机的、基于概率的、海量场景的生成构建，充分考虑各种边界下的系统状态
- ◆ 根据不同目标（可靠性、经济性、能效等）实现方案的优选



一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.1 数字孪生概述

(4) 数字孪生体系架构



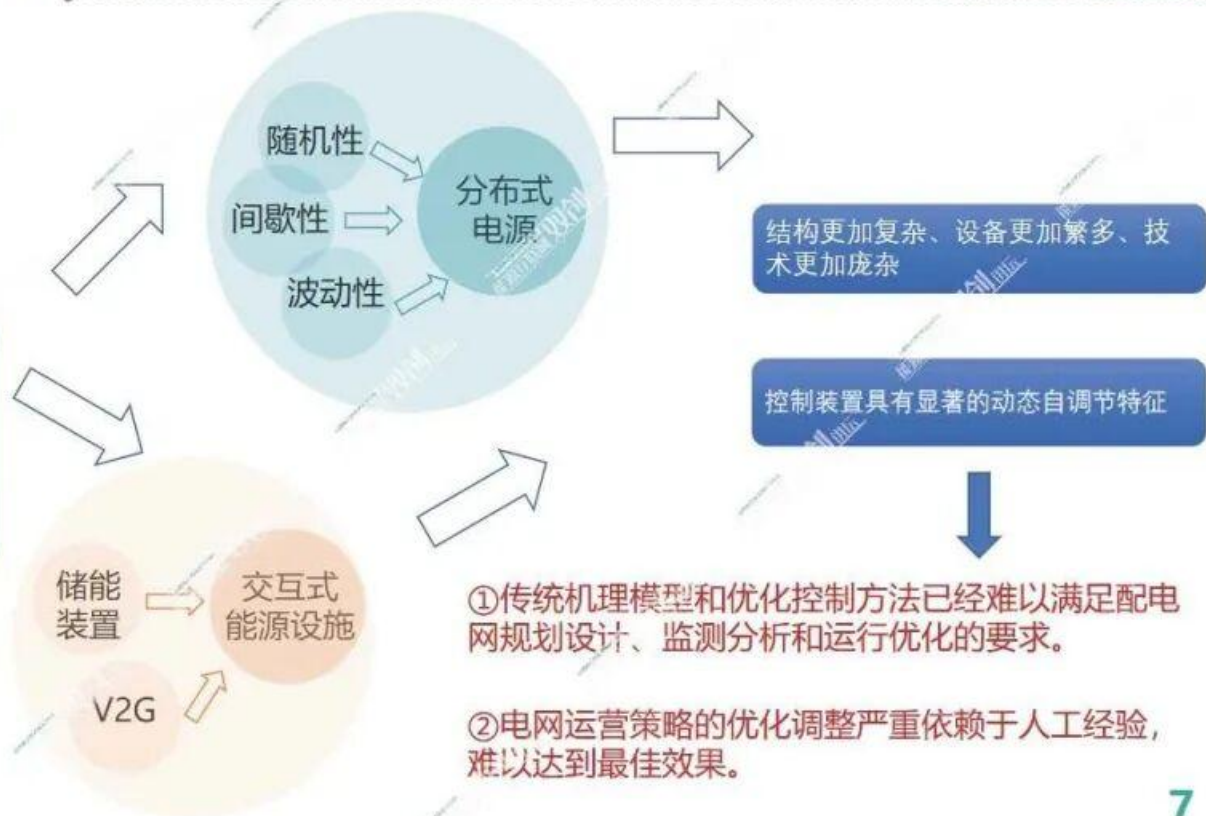
一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(1) 智能配电网需求

战略目标

- ①碳达峰、碳中和
- ②构建以新能源为主体的新型电力系统



一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(2) 数字孪生技术关键要素

配电网数字孪生能够通过**在虚拟空间中完成对象的映射**，能够随时在**平行空间里通过孪生体**实现对有源配电网运行状态的感知、预测、推演与优化等，从而为高比例分布式能源接入的配电网故障诊断、优化控制、风险评估提供支撑。



图1 数字孪生

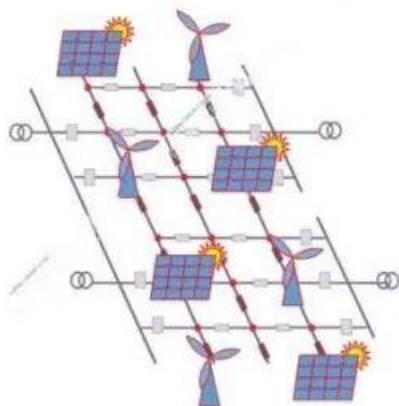


图2 高比例分布式电源接入的配电网

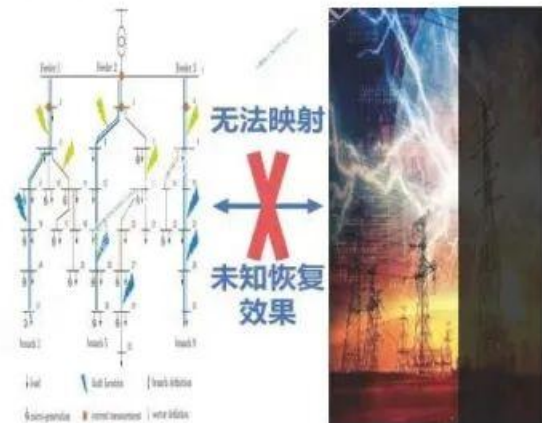


图3 实体配电网与数字配电网交互

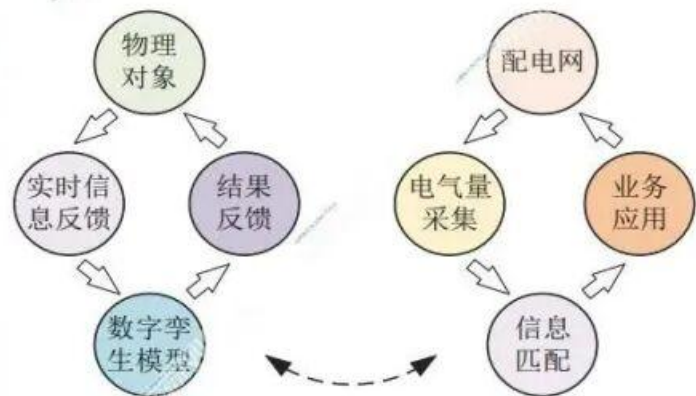
一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(2) 数字孪生技术关键要素



图1 数字孪生的基本要素和作用机制



(a)数字孪生架构

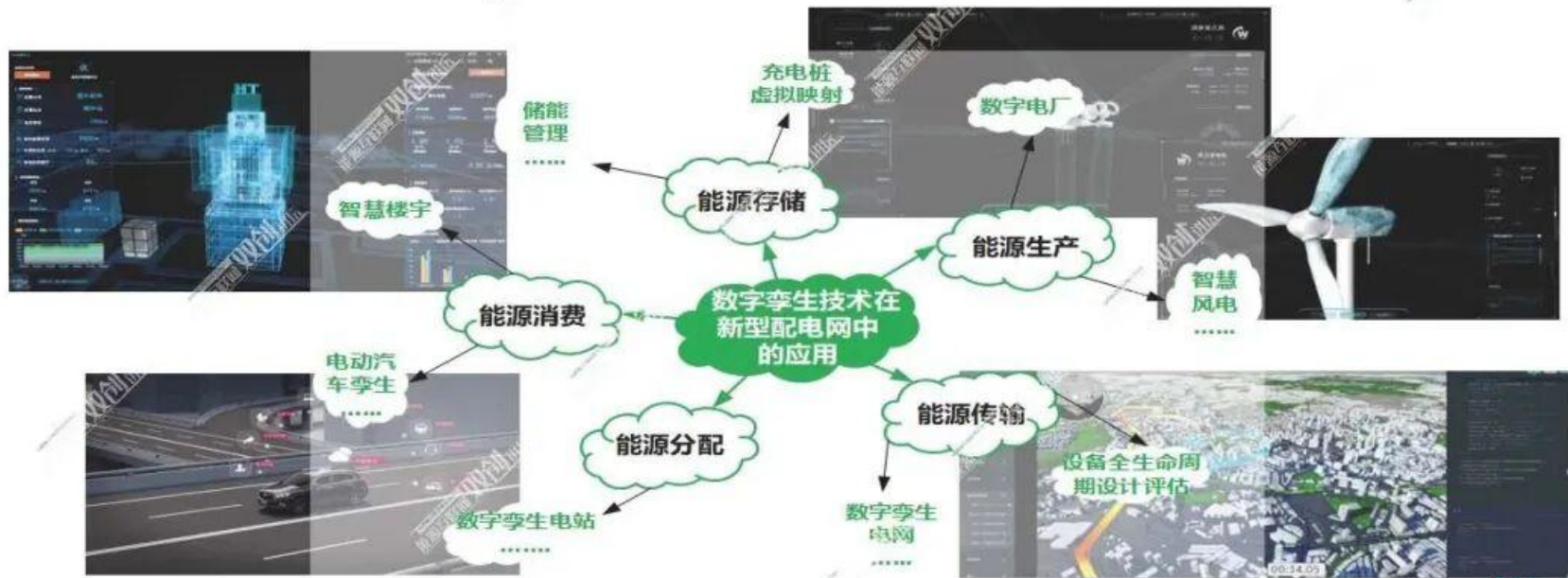
(b)数字孪生配网业务应用

图2 基于数字孪生架构的配电网业务应用示意图

一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

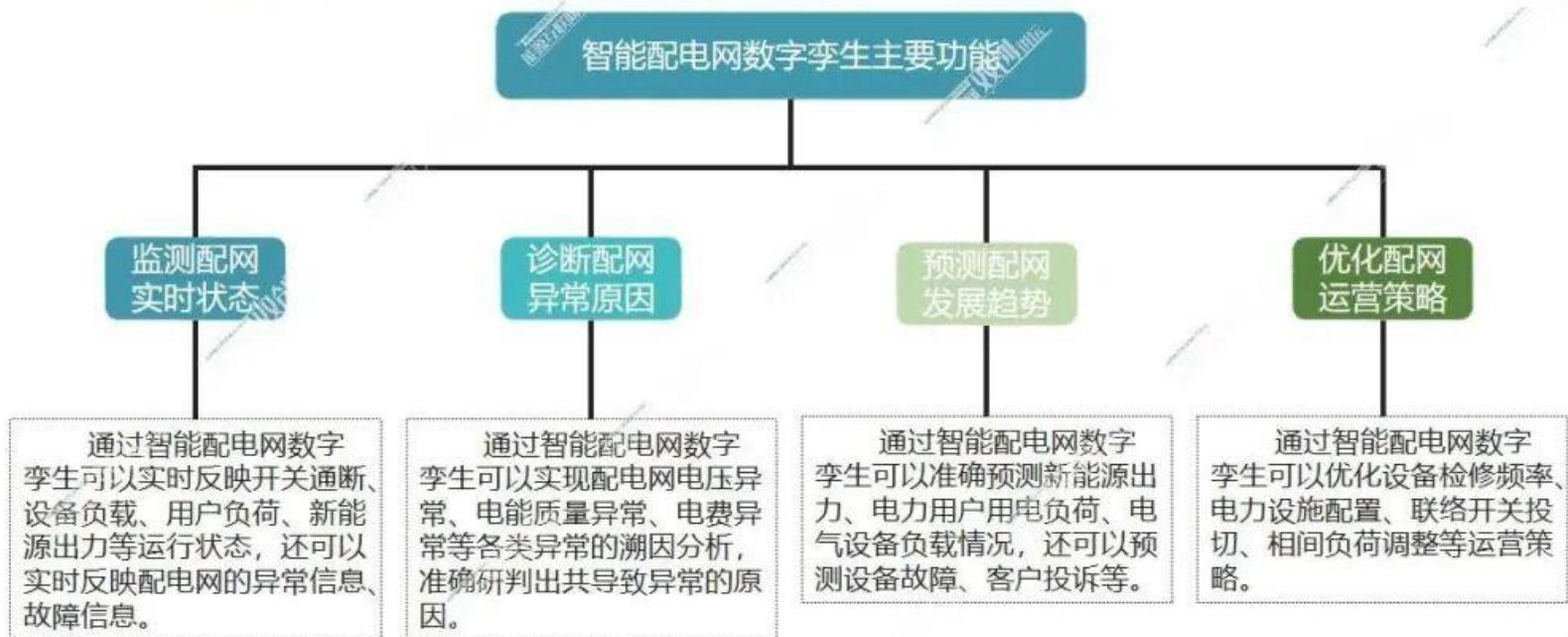
(3) 智能配电网数字孪生技术现状



一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(4) 典型应用范围



一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(5) 智能配电网数字孪生价值

①通过建设跨电压等级的配网数字孪生体，健全配电网的智能感知能力。

②通过研发跨环节的能源控制数字孪生体，增强多能源协调控制能力。

③通过助推行业各数字孪生体互动融合技术，提升电力供给效率和效益。

④通过推广数字孪生技术示范，推进电力行业的服务延伸与数字化转型。

⑤通过发展数字孪生技术打造行业整体认识，助力“碳达峰，碳中和”总体目标。

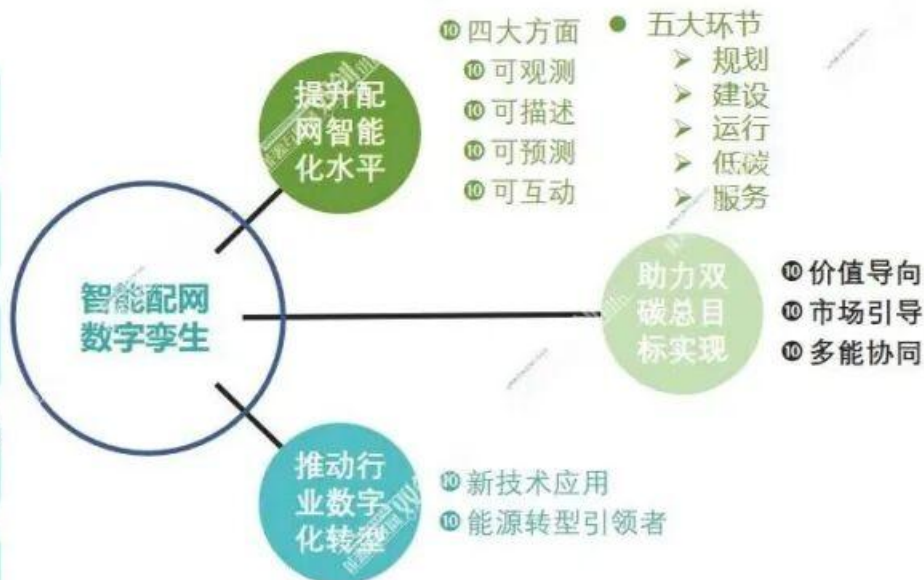


图1 智能配网数字孪生体系架构

一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

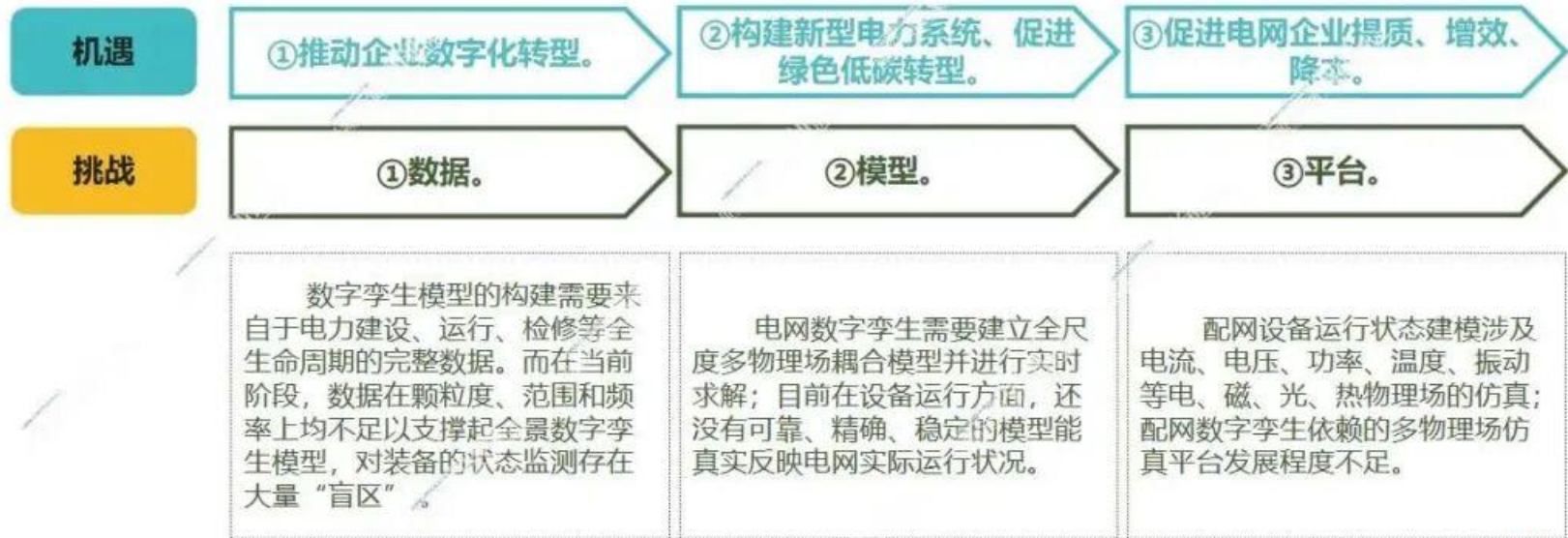
(6) 关键技术体系



一、智能配电网数字孪生背景及发展

1.2 智能配电网数字孪生

(7) 机遇和挑战



目录

CONTENTS



1 智能配电网数字孪生背景及发展

2 智能配电网数字孪生关键技术

3 智能配电网数字孪生典型应用场景

二、智能配电网数字孪生关键技术

主要技术内容

内容1：
智能配电网数字孪生
建模方法

- ① 配电网数字孪生多维多尺度构建方案；
- ② 配电网数据适配与即插即用；
- ③ 数字孪生闭环反馈方法。

内容2：
基于数字孪生和人工智
能技术的配电网智能化
故障诊断方法

- ① 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型；
- ② 配电网停电事故原因分析；
- ③ 智能配电网故障在线诊断方法。

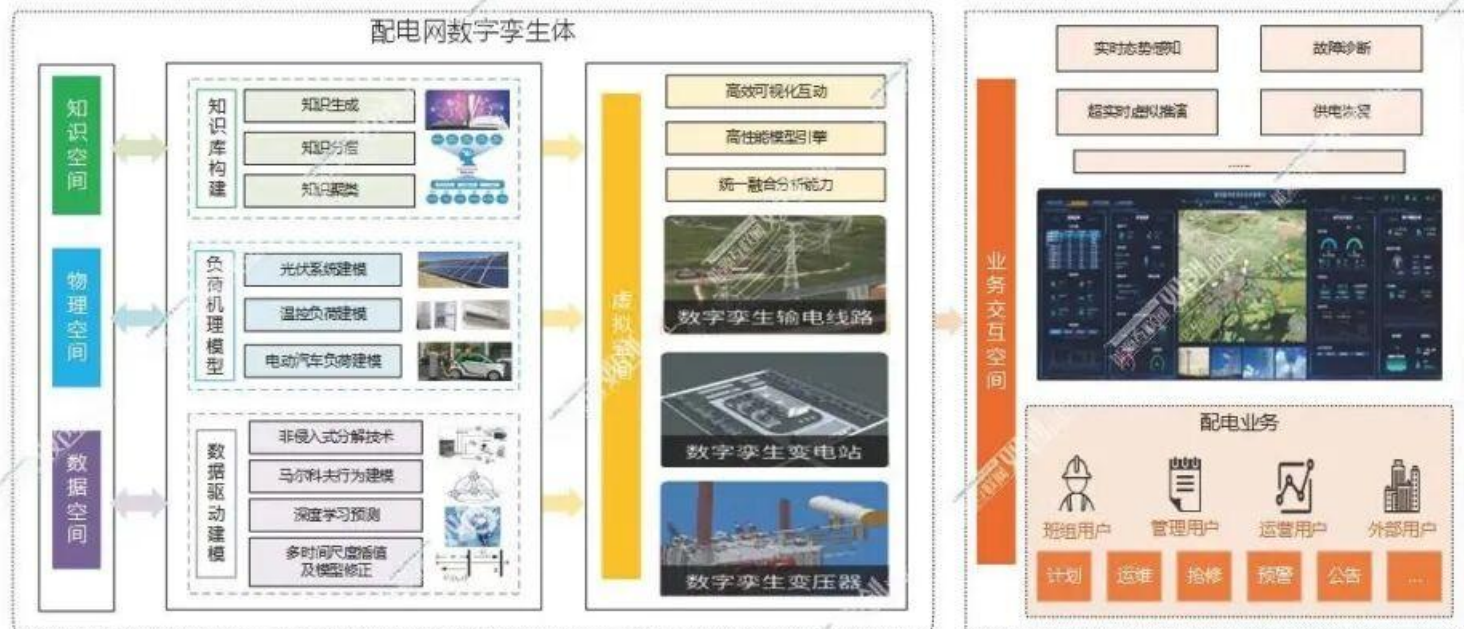
内容3：
提升配网故障复电效果
的负荷转供鲁棒优化策
略生成方法

- ① 配电网概率潮流孪生仿真模型；
- ② 不同拓扑方案下配电网负荷供电可靠性评估；
- ③ 基于数字孪生的负荷转供鲁棒优化辅助决策。

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

物理空间建模：依据配电网元素的材料属性、物理参数等物理特性，建立其机理模型，并通过静态、动态状态感知技术实现对全网物理运行维度的全息认知与描述。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

物理空间建模：针对配电网多种运行状态之间依概率迁移的特征，通过**基于多分辨率的配电网模型多粒度优化方法**，实现配电网机理模型的多态全过程多分辨率的**自适应适配与切换**。

频谱建模（细粒度）

离散非线性、时变系统原数学模型

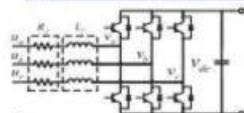
$$① \hat{h}_i(t) = -e^{j\omega_i t} \left(\underline{g}_i \underline{v}_i(t-\Delta t) + \frac{2-j\omega_i \Delta t}{2+j\omega_i \Delta t} \underline{L}_i(t-\Delta t) \right)$$

$\omega_i = 0 \sim 1 \text{ Hz}$
↓
低频仿真模型

$\omega_i = \omega_i$
↓
高频仿真模型

$$② \hat{h}_i(t) = -\underline{g}_i \underline{v}_i(t-\Delta t) - \underline{L}_i(t-\Delta t) \quad ③ \hat{h}_i(t) = -\underline{g}_i D[\underline{v}_i(t-\Delta t)] - \frac{2-j\omega_i \Delta t}{2+j\omega_i \Delta t} D[\underline{L}_i(t-\Delta t)]$$

动态平均值建模（中粒度）



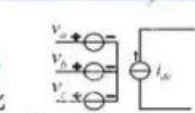
平均化

$$\frac{dx}{dt} = A_0 x + B_0 u$$

平均化前

$$+ \sum_{i=1}^3 [(A_i x + B_i u) S_i]$$

平均化



$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A_0 \bar{x} + B_0 \bar{u}$$

平均化后

$$+ \sum_{i=1}^3 [(A_i \bar{x} + B_i \bar{u}) N_i]$$

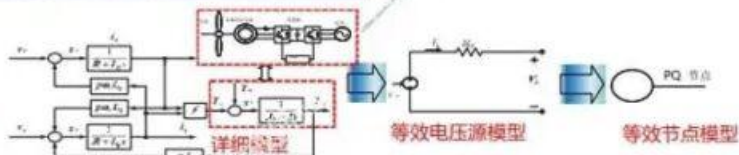
系统动态等值建模（粗粒度）

$$f_{fit}(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_N s^N}$$

基于频率响应的等值原理

$f(s)$

实例



等效电压源模型

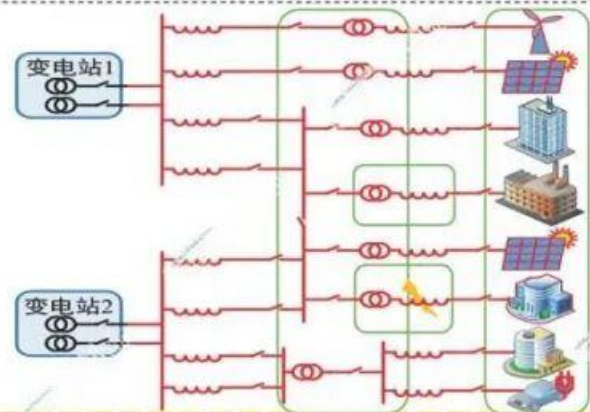
等效节点模型

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

物理空间建模：通过基于马尔可夫过程的多状态迁移在线模型修正方法，解决运行状态迁移带来的数字孪生机理模型累积误差扩散难题。



数字孪生机理模型

典型负荷：



配电线路：



联络开关：



分布式电源：



* A_{Load} 、 A_{Line} 、 $A_{K_{LS}}$ 、 A_{DG} 表示风险系数

$$f(\alpha_z V^2 + \alpha_1 V + \alpha_p) \& A_{Load}$$

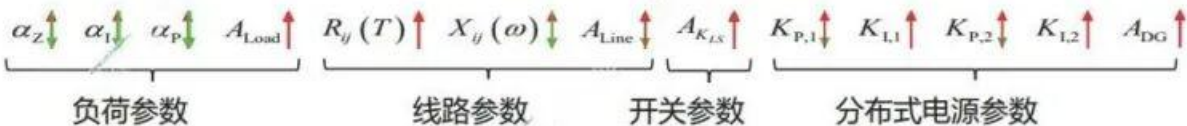
$$f(R(T) + jX(\omega)) \& A_{Line}$$

$$f(K_{LS}) \& A_{K_{LS}}$$

$$\& A_{DG}$$

模型在线修正

实时数据



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

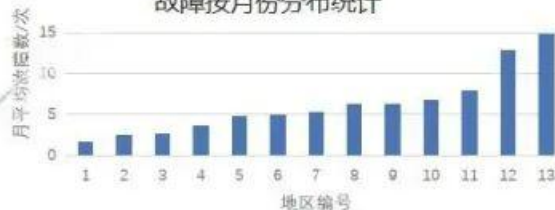
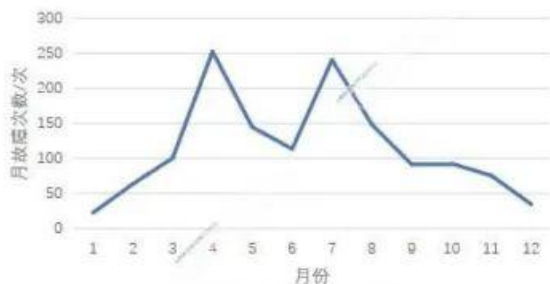
(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

数据空间建模：通过多源数据的实时采集、清洗、融合与处理，建立配电网典型业务应用的数据支撑，分析典型业务中数据流的耦合关联关系，构建刻画典型业务特征的行为及响应模型，利用大数据统计学习方法实现典型业务的感知与预测。

数据类型	数据名称
气象数据	月平均气温、月最高/低气温、月降水量等级、月雷暴日数等级、月大风日数等级

风险等级	风险状态	每周故障次数n	周停电时长比例T ₁
1	轻度	少于2次	小于30%
2	中度	3~6次	30%~80%
3	严重	6次以上	80%以上

考虑温度升高、湿度过大及降雨等问题会导致设备绝缘水平下降；大风天会增加异物及树线故障的发生率；雷雨天气会导致设备被雷击等。分析过后初步确定实验所用故障特征包括月份分级、地区分级、最高温度等。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

知识空间建模：采用专家经验和精细规则对电网运行知识的特征和规律进行总结，实现电网运行知识的存储，为电网业务提供更丰富的辅助决策信息。

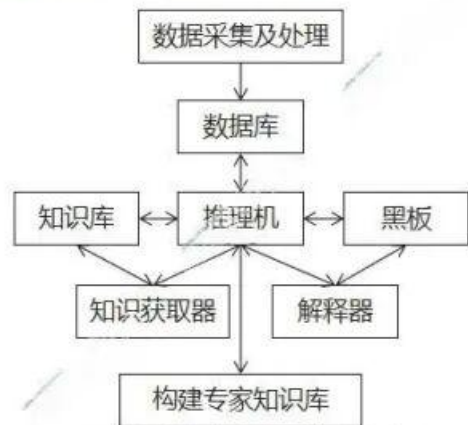


图1 专家知识库模型构建流程

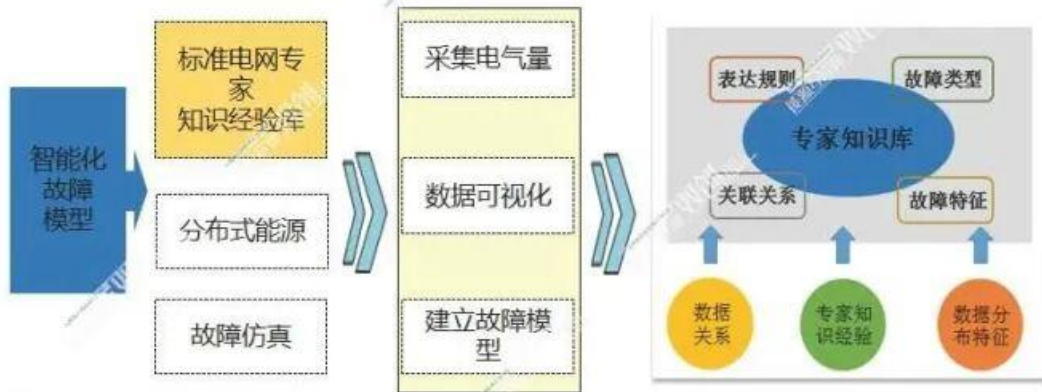


图2 本项目构建的故障专家知识库

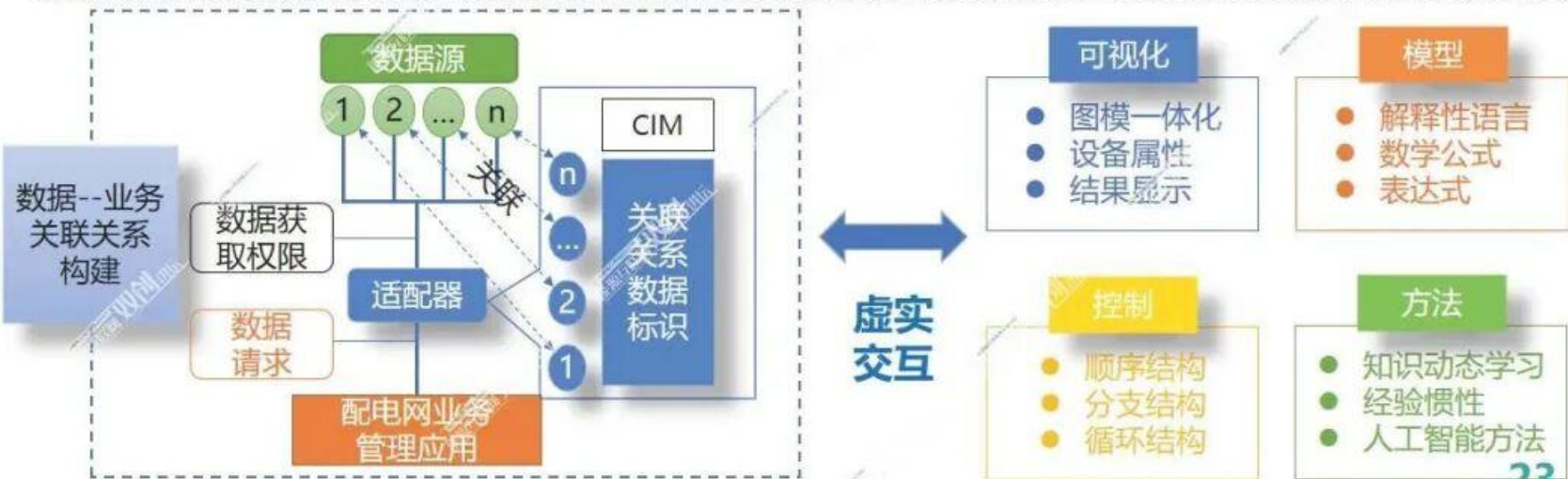
配电网数字孪生故障专家知识库模型主要存储和管理专家系统中用于进行故障诊断的知识，利用监测数据可实现对配电网及相关设备的故障报警、诊断和预测等辅助决策功能。

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(1) 配电网数字孪生多维多尺度构建方案

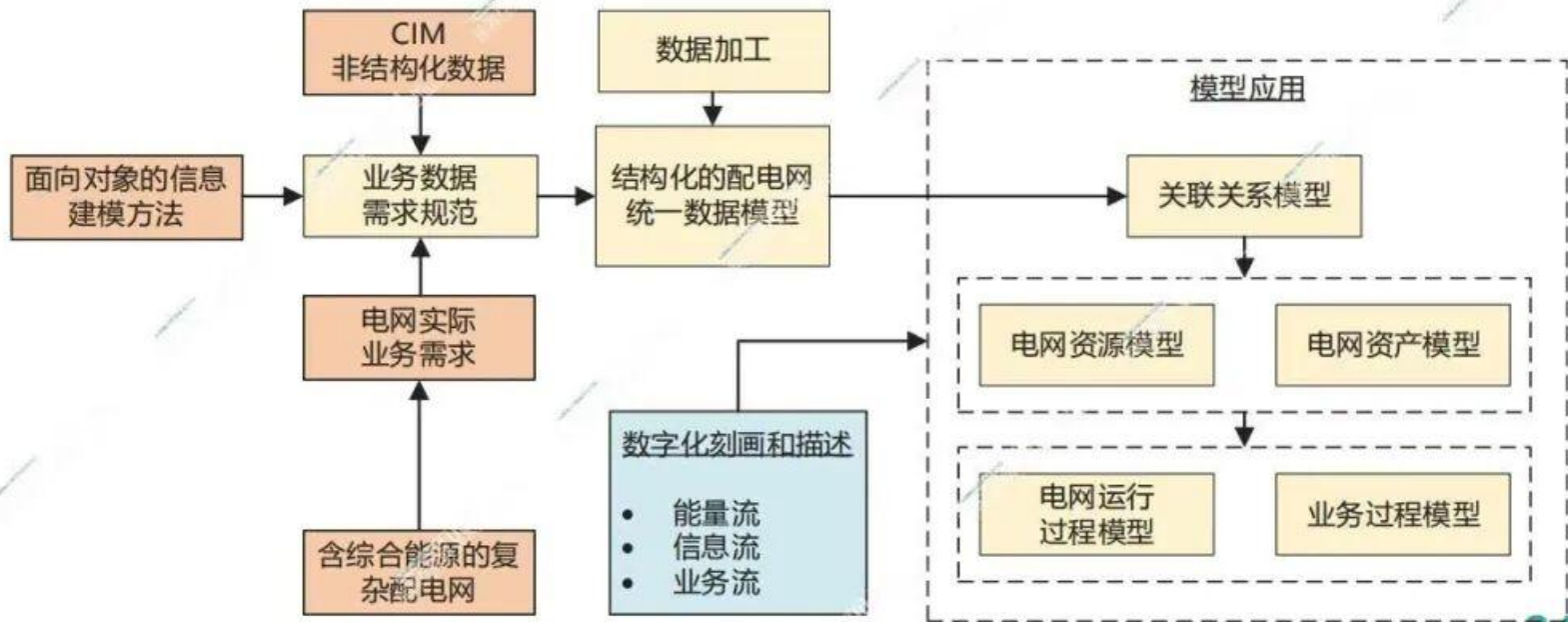
虚拟空间建模：是配电网数字孪生体的大脑，集成了多领域、多尺度、高保真的孪生模型，通过对物理、数据、知识空间的模型融合与可视化，建立起配电网虚实交互的连接，一方面可自主感知和超前推演配电网运行过程全数据，另一方面通过故障诊断、供电恢复等业务的结果反馈施用到物理、数据、知识空间，从而为物理、数据、知识空间和业务交互空间中的多主体协同决策与优化提供支持，实现数字孪生体的统一规范管理。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

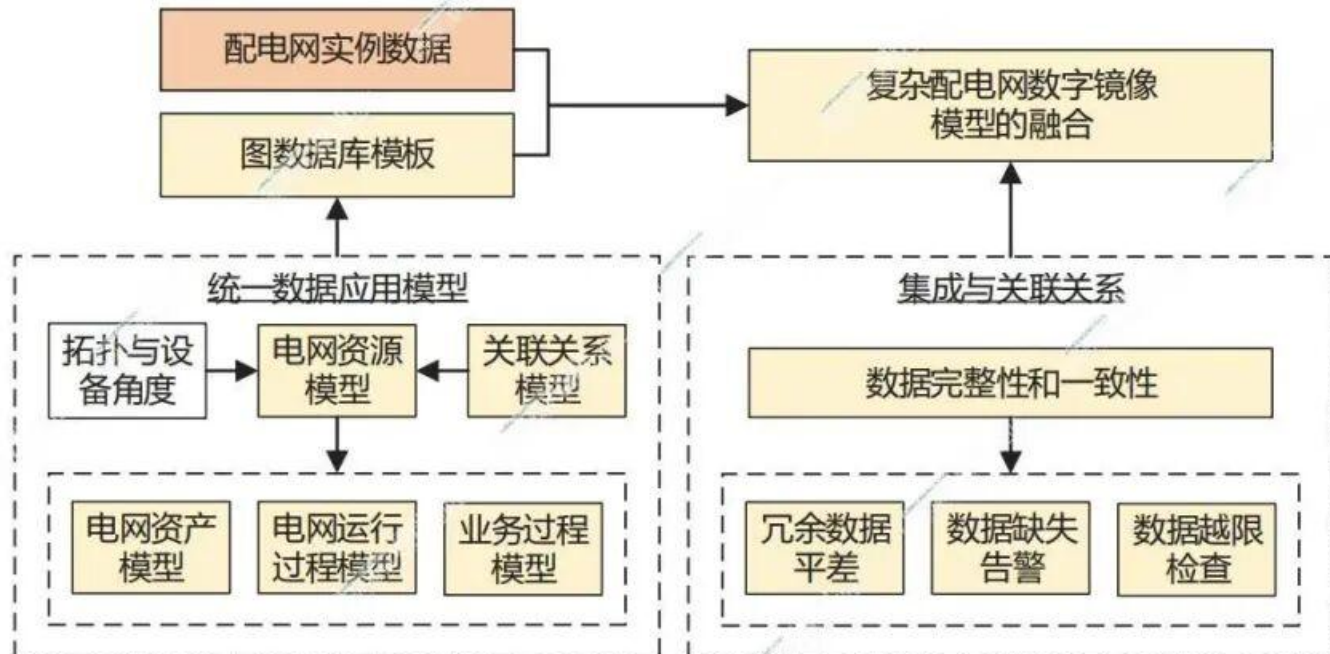
(2) 配电网数据适配与即插即用



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(2) 配电网数据适配与即插即用



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(2) 配电网数据适配与即插即用

针对配电网数据源混杂的问题，基于CIM标准建立配电网多能系统统一数据模型，实现含综合能源的复杂配电网的能量流、信息流、业务流的数字化刻画和描述，推进配电网数据标准化、模块化实现给定范围内的数据即插即用。

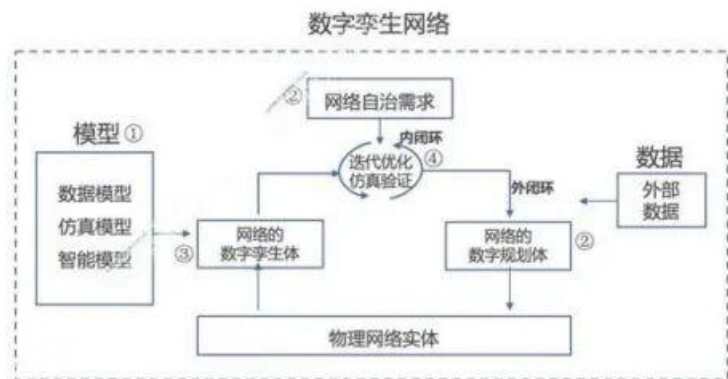


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.1 智能配电网数字孪生建模方法

(3) 数字孪生闭环反馈方法

根据物理网络实体构建数字孪生体，运维人员下发意图，系统通过意图网络将其解码为网络自治需求；数字孪生体以需求为导向，内部不断进行自我迭代优化和仿真验证，直至孪生网络的性能达到预期目标；然后数字孪生网络生成“数字规划体”，并以其为将优化好的数据同步给物理网络实体。物理网络用新的数据运行之后，发现结果跟目标还是有差距，于是把结果反馈给数字孪生体继续进行优化。两个闭环就这样不断运转，驱动物理网络性能达成预期目标。

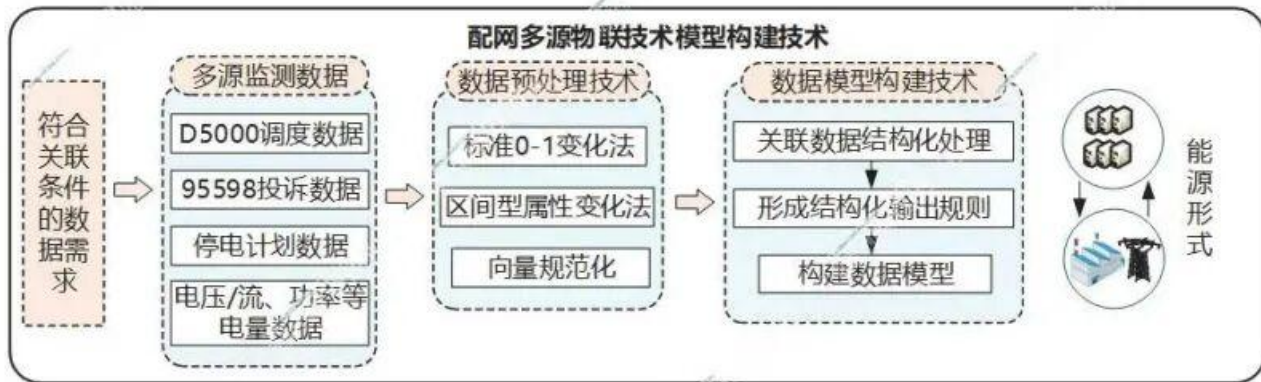


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型

根据中低压配电网物联信息关联条件的数据需求，依托D5000、营销系统、95598系统、智能配变终端、低压智能断路器、低压故障传感器、电压分路监测单元等“云、边、端”系统，收集包括电压、电流、功率等电量数据与调度数据、投诉数据、停电数据、环境数据等非电量数据，按照不同数据类型和特点对采集数据进行标准化、归一化预处理，根据数据预处理结果进行结构化处理并形成输出规则，结合配电物联网历史数据，构建符合配电网物联信息关联关系的数据模型。

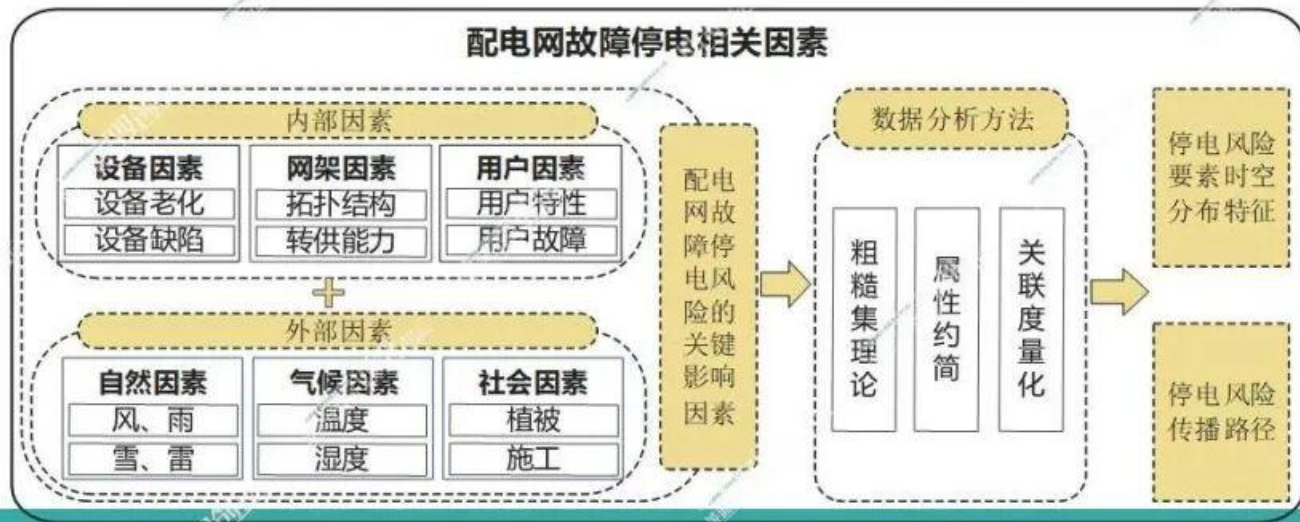


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型

基于配电网馈线、台区、用户的拓扑关系，分析自然因素（风、雨、雷、雪、晴）、气候因素（温度、湿度、降水量、风速等）、社会因素（如植被、建筑物、施工、偷盗等）等外部因素与设备因素（设备老化、设备缺陷、过负荷、电网接地方式）、网架因素（辐射网接线、环网接线、系统运转能力不足）、用户因素（用户特性、内部故障）等内部因素对配电网停电风险的影响。

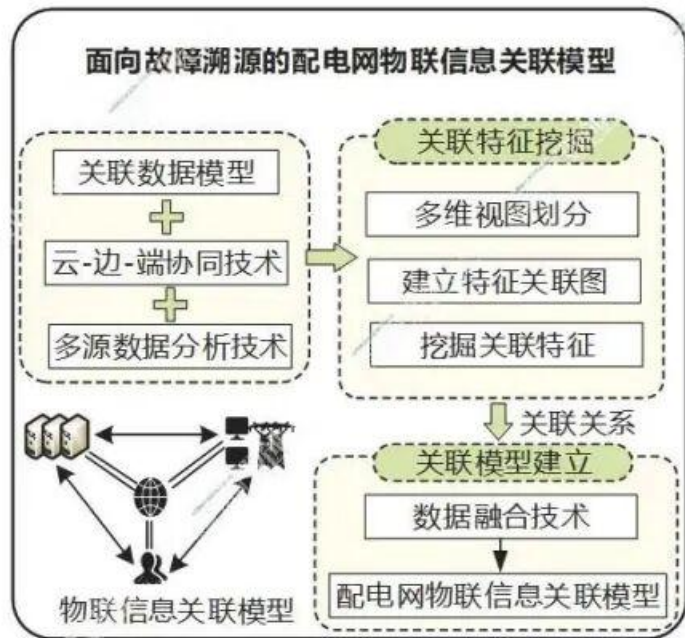


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型

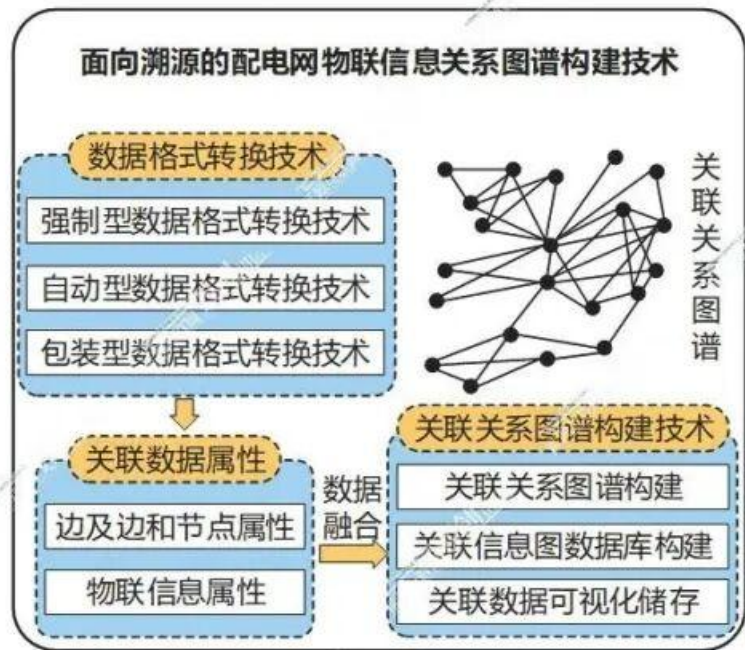
基于“云-边-端”协同和多源数据分析方法，挖掘配电物联网数据模型中面向供电可靠性的关联特征信息，基于关联特征将配网物联网数据划分为多个视图，分别提取不同视图中的特征数据构建特征关联图，通过数据融合的方式，建立面向配电网短路、断线及接地故障原因的配电物联网信息关联模型。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型



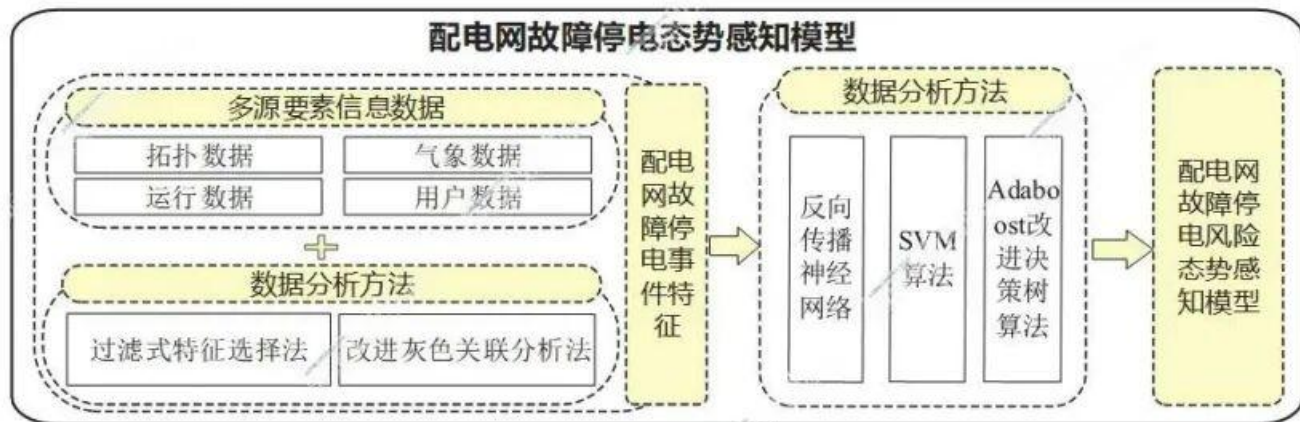
将关联模型中数据进行格式转换并选择边及边属性，利用关联特征确定关键节点与节点属性，结合边属性与节点属性，创建配电网物联信息图数据库，构建物联信息关联图谱，完成数据的视图化储存。

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(2) 配电网停电事故原因分析

基于配电网故障停电风险传播路径，利用过滤式特征选择算法、改进灰色关联分析等方法，研究配电网网络拓扑、用户特征、设备状态和气象环境多源要素信息融合数据下配电网不同类型故障停电事件特征；利用反向传播（BP）神经网络、SVM算法、Adaboost改进决策树算法等机器学习方法，分析配电网不同停电风险预测模型的准确率，建立配电网馈线、台区的多维度停电态势模型。

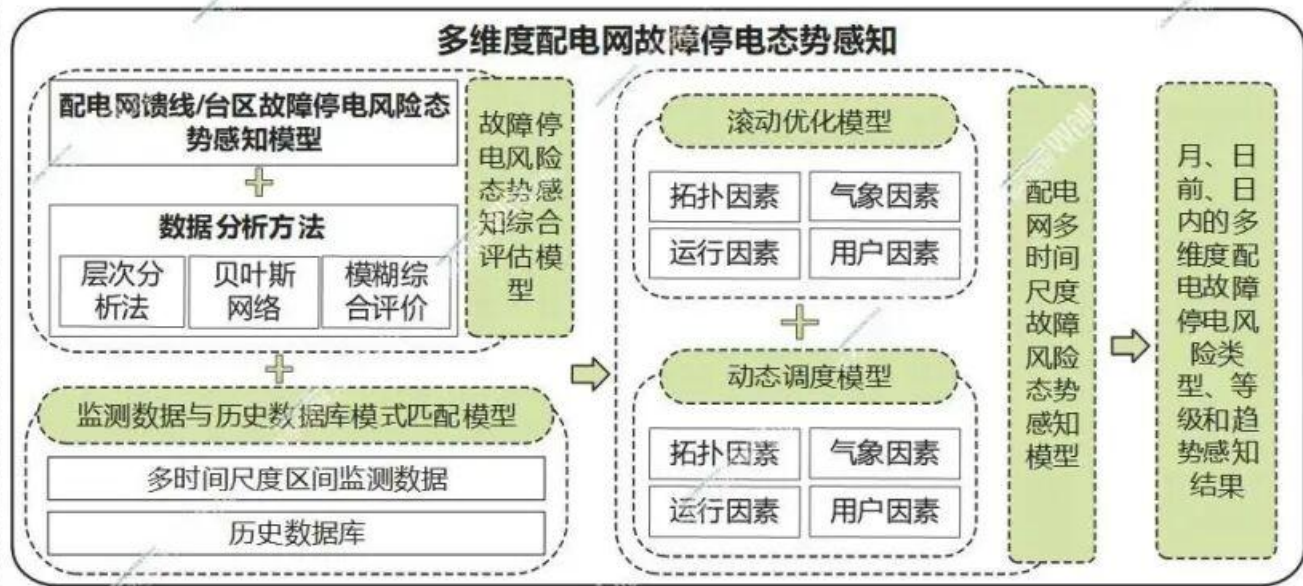


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(2) 配电网停电事故原因分析

利用层次分析法、贝叶斯网络和模糊综合评价等方法，建立多维度配电网故障停电风险态势感知综合评估模型；利用深度学习等方法，建立多时间尺度区间监测数据与历史数据库的模式匹配模型，提出多时间尺度下配电网故障停电风险态势感知模型的求解方法，实现配电网馈线、台区月、日前、日内的故障停电风险类型、等级和趋势的感知。

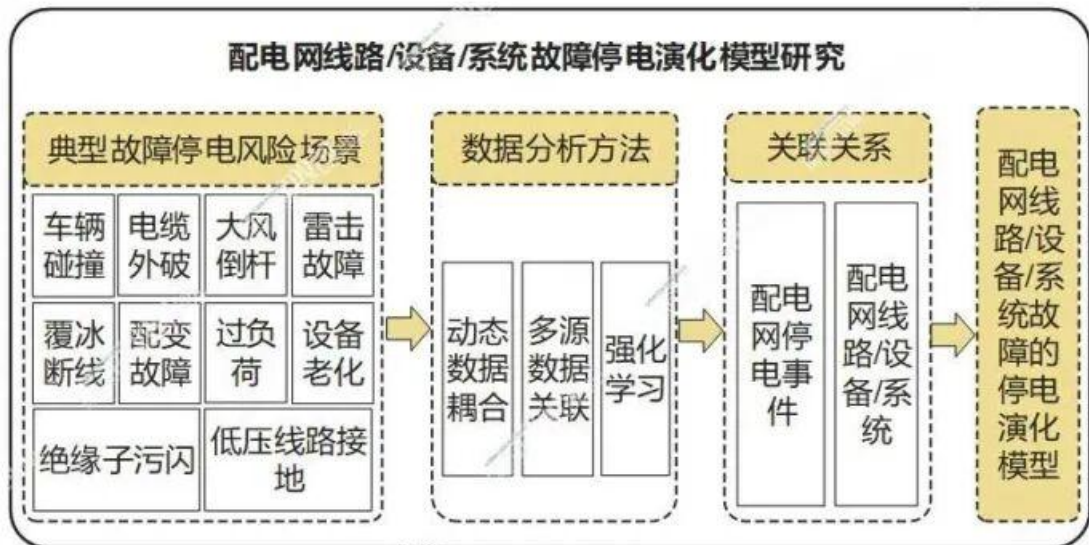


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(2) 配电网停电事故原因分析

基于动态数据耦合分析理论、多源数据关联和强化学习等数据分析与数据挖掘方法，分析车辆碰撞、电缆外破、大风倒杆、雷击故障、覆冰断线、绝缘子污闪、设备老化、过负荷、配电变压器故障、低压线路接地等典型场景下配电网停电事件与线路、设备、系统的关联关系，建立配电网线路、设备、系统的故障停电演化模型。

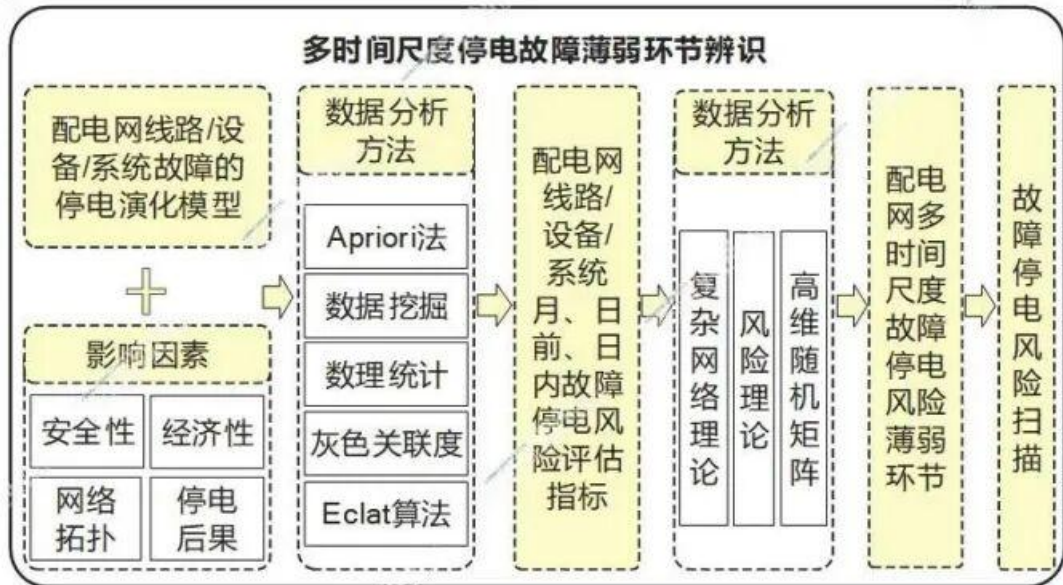


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(2) 配电网停电事故原因分析

考虑配电网安全性、经济性、网络拓扑结构、故障停电对用户和供电企业的影响，利用数据挖掘、数理统计、Eclat算法、Apriori算法、灰色关联度等数据分析方法，研究不同故障停电风险事件的评估指标；利用复杂网络理论、风险理论和高维随机矩阵理论等方法，建立多层次多角度的配电网故障停电风险薄弱环节评估模型，辨识多时间尺度故障停电风险薄弱环节，实现配电网故障停电风险的在线扫描。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(3) 智能配电网故障在线诊断方法

- 特征搜索算法 快速搜索并确定最优故障特征的维数

前向序贯搜索

假设已经从原始特征空间 $A = \{a_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 中挑选出 k 个特征组成特征子集 η_k ，第 $k+1$ 个特征需要从剩下的特征子集 $A - \eta_k$ 中挑选，并需满足：

$$J_1(\eta_{k+1}) = \max J_1(\eta_k \cup a_i), a_i \in A - \eta_k$$

后向序贯搜索

假设已经从原始特征空间 $A = \{a_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 中删去 k 个特征，剩下的特征组成特征子集 η_{n-k} ，第 $k+1$ 个将要删去的特征需从 η_{n-k} 中挑选，使得：

$$J_1(\eta_{n-k-1}) = \max J_1(\eta_{n-k} - a_i), a_i \in \eta_{n-k}$$

- 类间离散度越大，类内离散度越小 特征分类效果越好

$$\begin{cases} S_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m N_i (\mu_i - \mu) (\mu_i - \mu)^T \\ S_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^{N_i} (X_r^i - \mu_i) (X_r^i - \mu_i)^T \end{cases}$$

类间离散度

类内离散度

构造如下判据：

$$J_1 = \text{tr}(S_w^{-1} S_b)$$

建立如下决策：

$$\text{If } J_1(\eta_M) = \max J_1(\xi_M)$$

then η_M 中的 M 个特征为最优 M 维特征子集

挑选指定维数下的最优故障特征

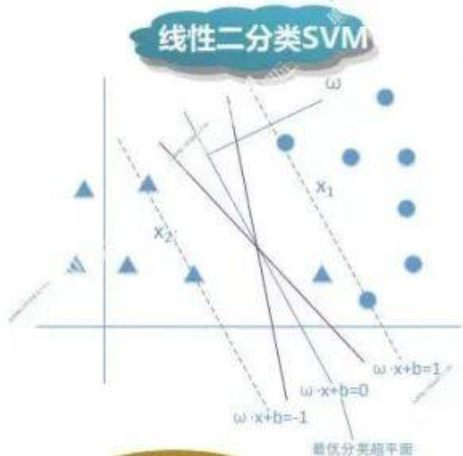
判据形成

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

(3) 智能配电网故障在线诊断方法

故障判别



线性二分类SVM

其中:

$$Q_0 = Y^T Y K(X_i, X_j)$$

$$K(X_i, X_j) = \varphi(X_i)^T \varphi(X_j)$$

核函数

选取RBF核函数:

$$K(X_i, X_j) = e^{-\gamma \|X_i - X_j\|^2}$$

KKT条

$$\begin{cases} \alpha_i = 0 \Rightarrow f(x_i) \geq 1 \text{ 或 } f(x_i) \leq -1 \\ 0 < \alpha_i < C \Rightarrow f(x_i) = 1 \text{ 或 } f(x_i) = -1 \\ \alpha_i = C \Rightarrow -1 \leq f(x_i) \leq 1 \end{cases}$$

根据KKT条件求解上式, 得到最优拉格朗日乘子, 则原问题的最优解为:

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* Y_i X_i$$

$$b_0 = \frac{1}{m_1 + m_2} \left[\sum_{i=1}^{m_1} (1 - \omega_0 X_i^{(m_1)}) + \sum_{j=1}^{m_2} (-1 - \omega_0 X_j^{(m_2)}) \right]$$

$X_i^{(m_1)}$ 为正样本中第i个支持向量
 $X_j^{(m_2)}$ 为负样本中第j个支持向量
 m_1 量为正样本支持向量个数;
 m_2 量为负样本支持向量个数。

分类函数

$$\text{sgn}(\omega_0 X^{(i)} + b_0) = \begin{cases} 1, & \text{判断为正样本类} \\ -1, & \text{判断为负样本类} \end{cases}$$

二次规划

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \alpha^T Q \alpha - e^T \alpha$$

S. $Y^T \alpha = 0, 0 \leq \alpha_i \leq C$

t

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.2 基于数字孪生和人工智能技术的配电网智能化故障诊断方法

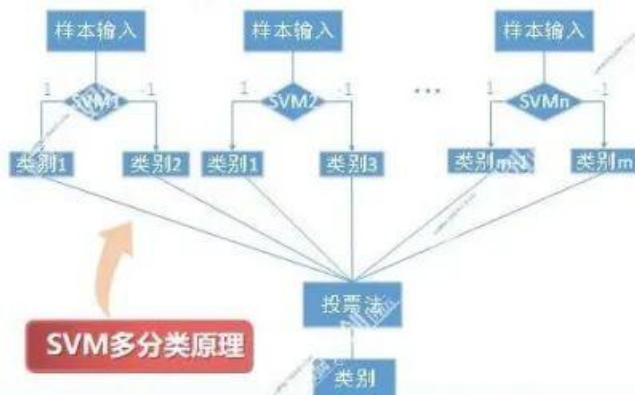
(3) 智能配电网故障在线诊断方法

故障诊断及
区域定位

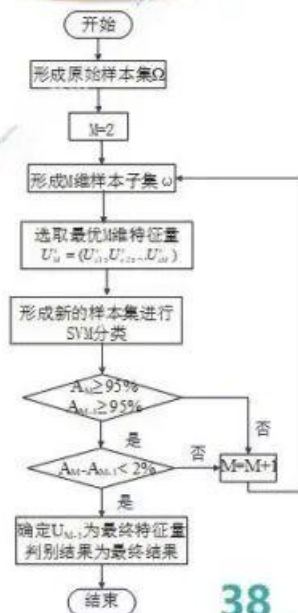
多分类SVM

- ◆ 基于二分类SVM，将任意两类样本集分别设为正负样本来训练一个二分类SVM，若要实现m分类，共需训练个二分类模型

- ◆ 将测试样本分别输入至每个二分类SVM模型中，若判为**正样本**，则正样本对应的类别投票数加1，反之则**负样本**对应的类别投票数加1，得票数最高的类别即为测试样本类别



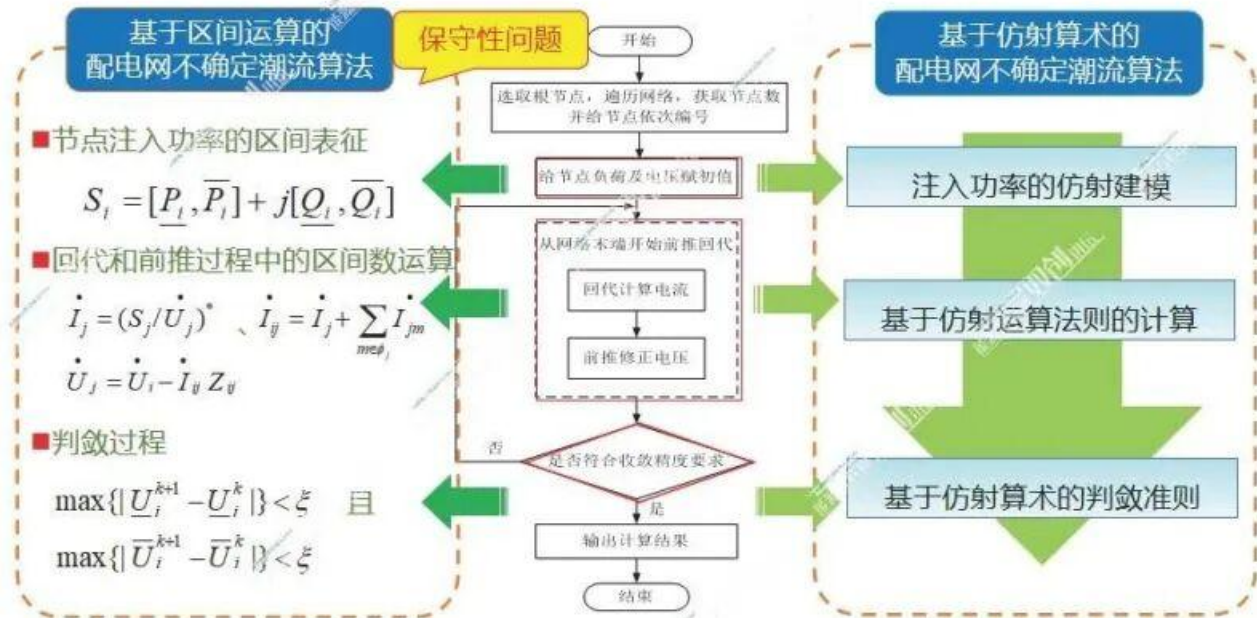
故障判别及定位流程



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

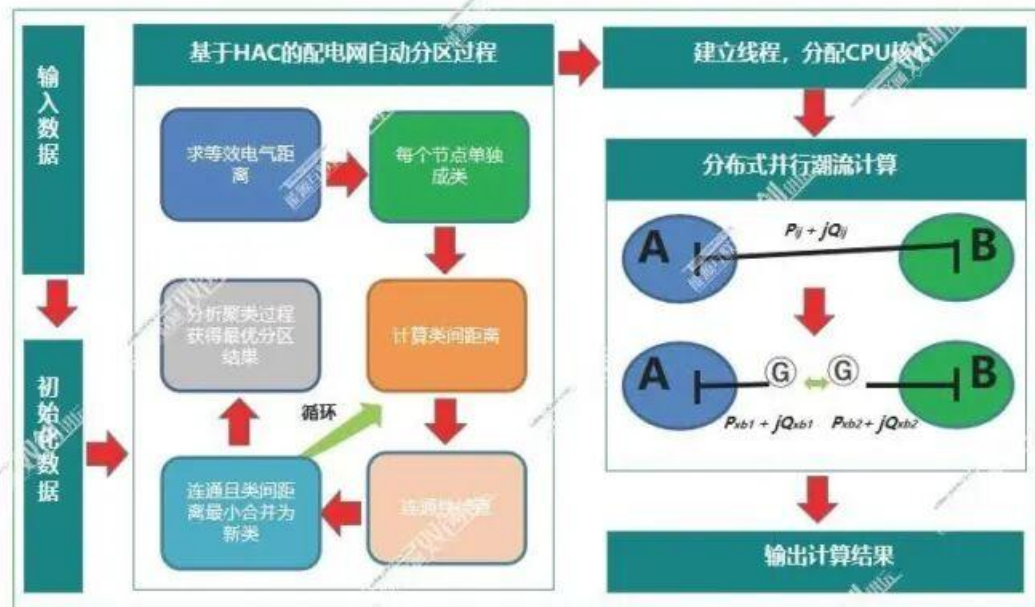
(1) 配电网区间潮流孪生仿真模型



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

(1) 配电网区间潮流孪生仿真模型



提取节点间等效电气距离，利用层次聚类技术对配电网进行自动分区，实现多线程分布式仿真。

图1. 大规模配电网分布式并行潮流计算流程

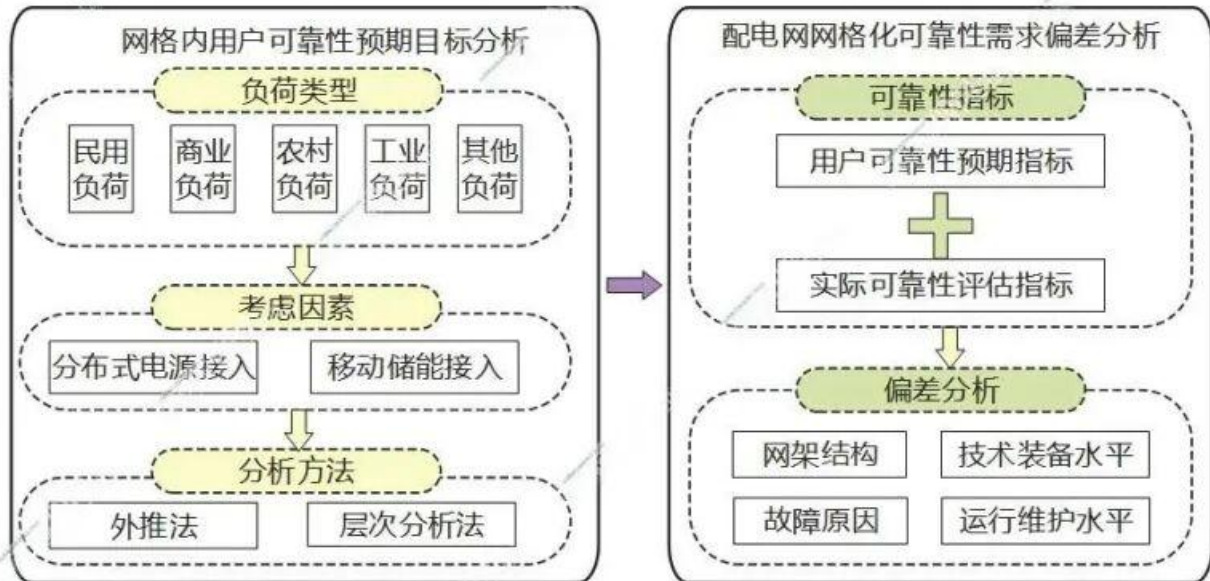
二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

(2) 不同拓扑方案下配电网负荷供电可靠性评估

考虑配电网规划及运维网格化开展现状，分析A+~E类地区网格内工业、商业、农业、用户、其他负荷等不同类型负荷的差异化需求，考虑分布式电源、移动储能接入、配电网网格内负荷水平及增长情况，利用外推法、层次分析法等方法，分析网格内用户差异化需求的可靠性预期目标。

通过比较网格内用户差异化需求的可靠性预期目标及配电网可靠性评估指标，分析从网架结构、技术装备水平、技术质量、故障原因、运行维护水平等方面影响配电网网格化区域可靠性需求偏差的因素。

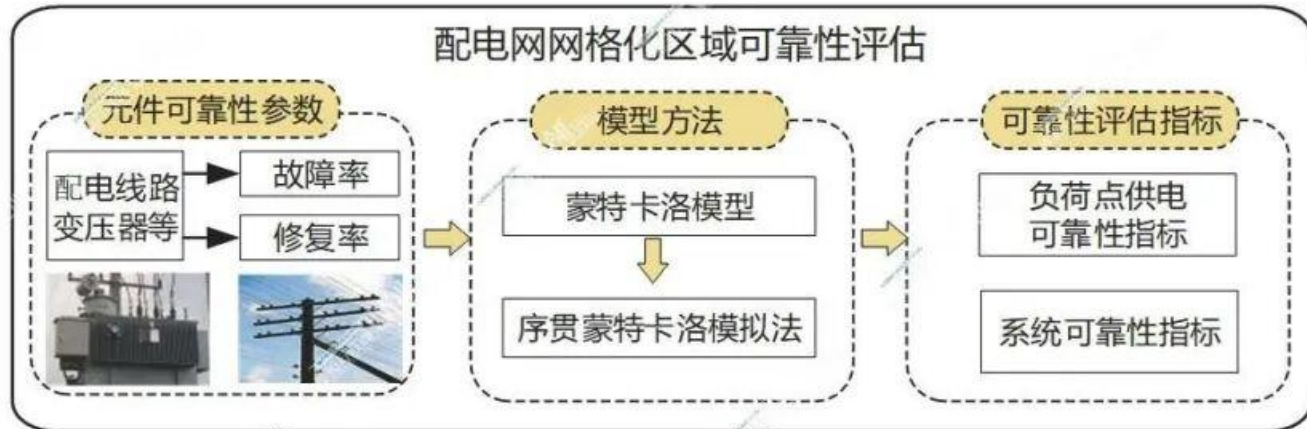


二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

(2) 不同拓扑方案下配电网负荷供电可靠性评估

考虑配电线路、变压器、断路器、隔离开关等元件，从元件故障率、修复率评估元件可靠性，考虑配电网网格内元件类型及数量，提出平均故障率、年平均停电时间等负荷点可靠性评估指标及用户平均停电时间、用户平均缺供电量、供电可靠率等系统可靠性评估指标，建立配电网元件两状态、三状态马尔科夫状态转移模型，采用最小路法、最小割集法等解析法及序贯蒙特卡洛模拟法，统计配电网可靠性运行数据，计算负荷点及系统可靠性评估指标。



二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

(3) 基于数字孪生的负荷转供鲁棒优化辅助决策

评估体系
建立方法

明确评
估目标

选取评
估指标

构建评估指标
体系层次结构

评估体系
构建原则

系统性
一致性

可测性
独立性

可比性

配电网负荷转供鲁棒优化指标体系

供电可靠性

系统平均停电频率

系统平均停电持续时间

用户供电可靠率

负载率

主变重过载比例

配变重过载比例

配变存在危机风险比例

电压合格率

主变10kV母线
电压合格率

台区关口电压合格率

低压用户电压合格率

三相不平衡指标

轻微三相不平衡
配变比例

严重三相不平衡
配变比例

线损指标

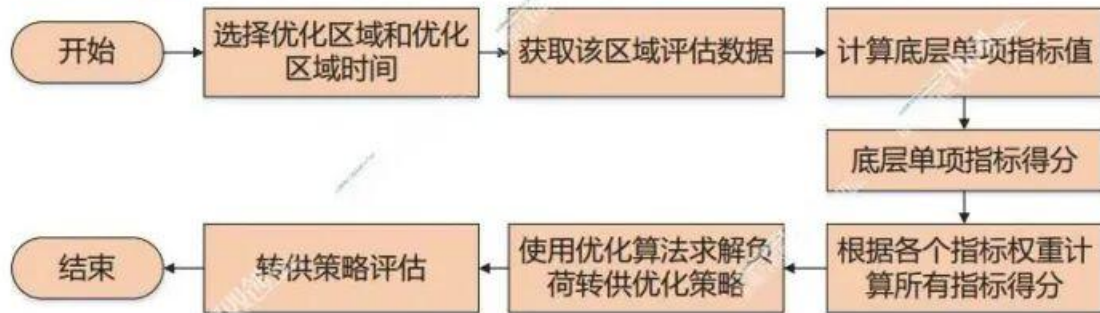
中低压统计线损率

基于系统性、一致性、可测性、独立性、可比性的评估体系构建原则，建立以供电可靠性、负载率、电压合格率、三相不平衡、线损为导向的配电网负荷转供鲁棒优化指标体系。

二、智能配电网数字孪生关键技术

2.3 提升配网故障复电效果的负荷转供鲁棒优化策略生成方法

(3) 基于数字孪生的负荷转供鲁棒优化辅助决策



准则层及目标层评分公式如下：

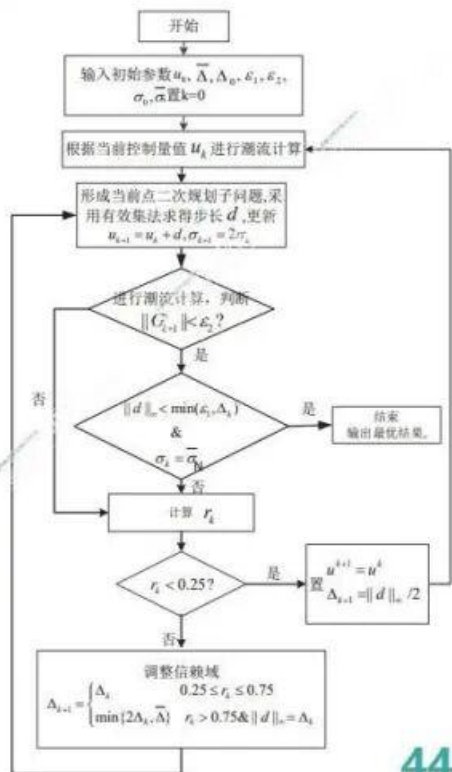
$$S^{(k+1)} = \sum_{j=1}^n S_j^{(k)} w_j^{(k)}$$

式中， $S^{(k+1)}$ 代表层级结构中第 $k+1$ 层某指标 $A^{(k+1)}$ 的评分； n 表示指标 $A^{(k+1)}$ 的 k 层子指标的个数； $S_j^{(k)}$ 表示 $A^{(k+1)}$ 的 k 层子指标的评分； $w_j^{(k)}$ 表示 $A^{(k+1)}$ 的 k 层子指标的权重。

确定单项指标打分公式

利用模糊隶属度评价函数

- 确定该底层单项指标对应的函数曲线类型；
- 确定曲线上的关键点；
- 将确定的模糊隶属度函数图转换为计算公式



目录

CONTENTS



1 智能配电网数字孪生背景及发展

2 智能配电网数字孪生关键技术

3 智能配电网数字孪生典型应用场景

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.1 多源异构信息的实时联通

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型



图1 配电网数据源

表1 配电网部分数据源数据特征

数据源名称	年均存量	更新周期	主要数据问题
配电自动化	>10TB	15Min	台帐错误率> 80%
地理信息系统	1TB~3TB	天级	非结构化特征
用采系统	>10TB	15Min	采集缺失率>40%
电能质量系统	>20TB	平均5s	数据连续性较差，存在一定主观性
生产管理系统	>10TB	-	缺失严重、部分地区数据混乱
气象信息系统	>2TB	3h	数据错误率>20%
95598系统	>300TB	-	非结构化数据较多
社会经济数据	-	-	外部数据统计口径差异大
...

数据类型:

结构化数据

非结构化数据

结构化/非结构化

结构化/半结构化

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.1 多源异构信息的实时联通

(1) 配电网短路、断线及接地故障原因相关性分析模型

✓ 从业务流程和管理评价体系入手，分析了多个细分场景下智能配电网数字孪生的数据需求，得到了多种典型场景下智能配电网数字孪生与数据源之间的关联映射关系。



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.1 多源异构信息的实时联通

(3) 智能配电网数字孪生数据架构



图1 因果集群架构

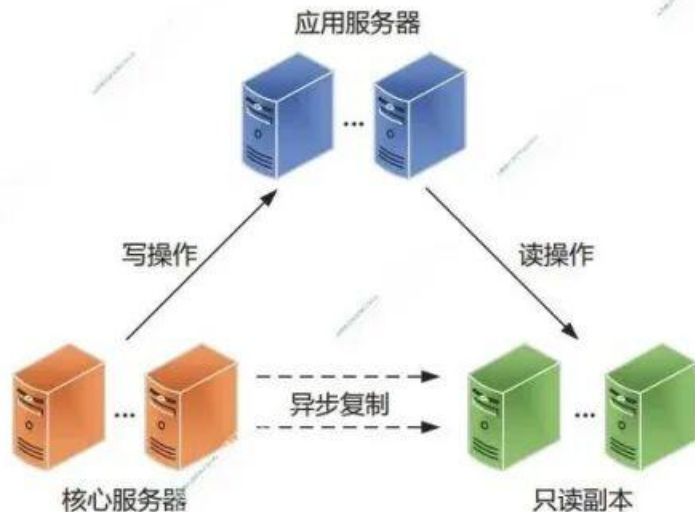


图2通过Nco4j驱动程序实现因果一致性的因果集群设置

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(1) 智能配电网数字孪生体系架构

数字孪生智能配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、数字孪生馈线等。

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数字孪生，如数字孪生区域电网、数字孪生市级电网、数字孪生县级电网等。

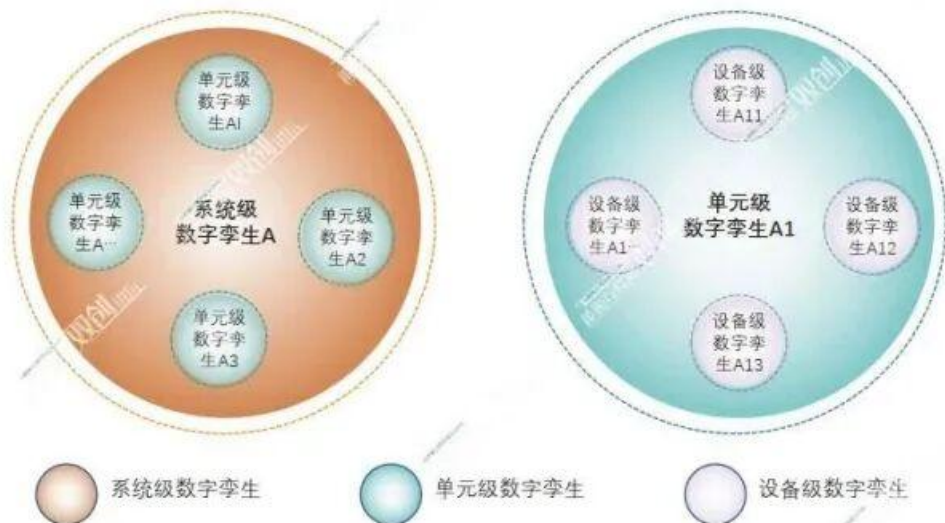


三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(1) 智能配电网数字孪生体系架构

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、馈线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。如数字孪生变电站所包含变压器、断路器等设备的数字孪生功能外，还具有整站状态评估、站内风险点识别特有功能。

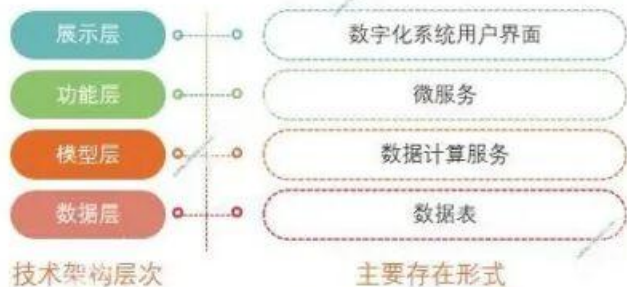
三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(2) 智能配电网数字孪生计算架构

数字孪生智能配电网每个层级的数字孪生体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，其技术架构如图 所示。

数字孪生智能配电网技术架构中各层的主要存在形式如下图所示。



数字孪生智能配电网技术架构中：

- 数据层内各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。



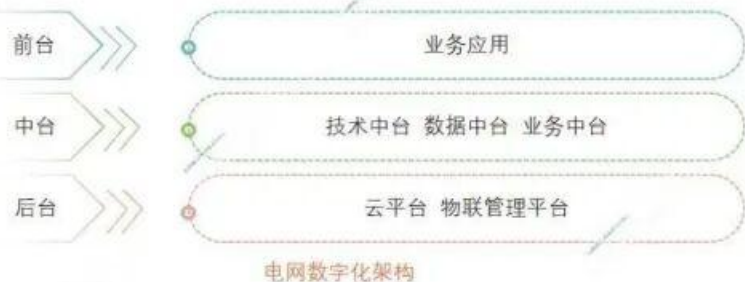
智能配电网数字孪生计算架构

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

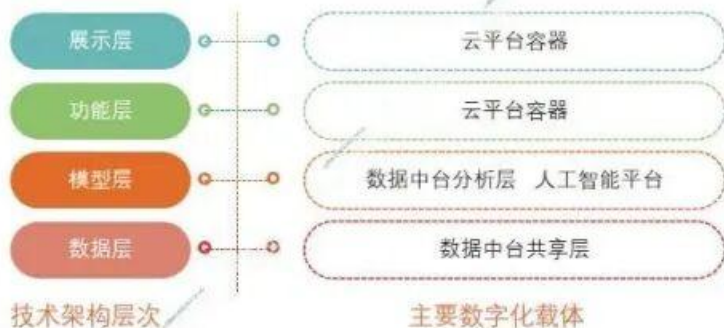
(3) 智能配电网数字孪生数字化

国网公司“前台+中台+后台”电网数字化架构，可以为数字孪生智能配电网技术架构提供有力支撑。



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）等为数字孪生智能配电网技术架构提供了数字化载体。

数字孪生智能配电网技术架构中各层的主要数字化载体如下。



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

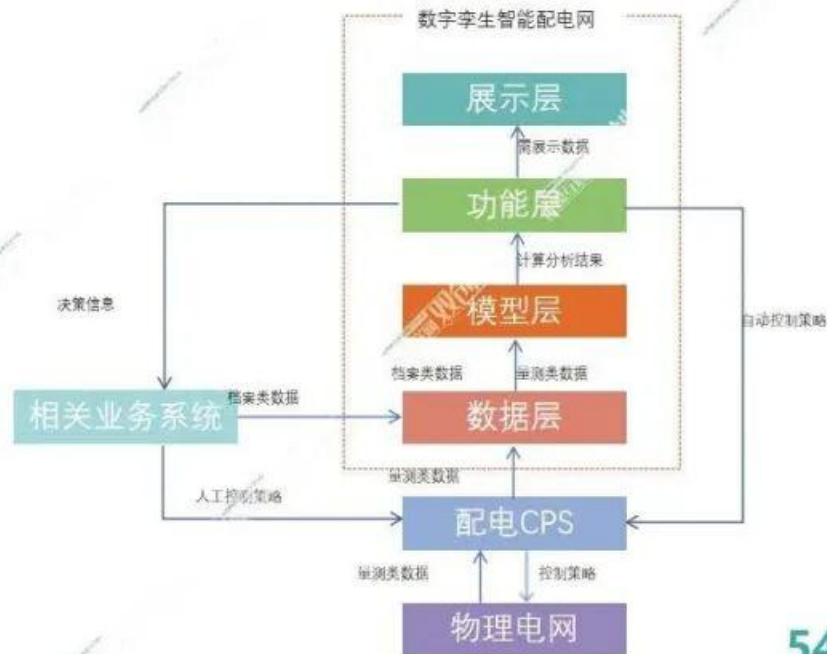
3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(4) 智能配电网数字孪生数据流

数据中台共享层为各类数据提供了数字化载体；人工智能平台为机器学习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智能配电网后，其内外部数据流向如图所示。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智能配电网与物理电网之间信息沟通桥梁的角色。

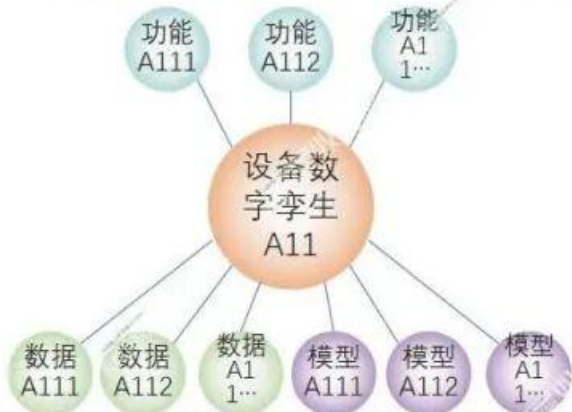
数字孪生智能配电网内外部数据流向



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

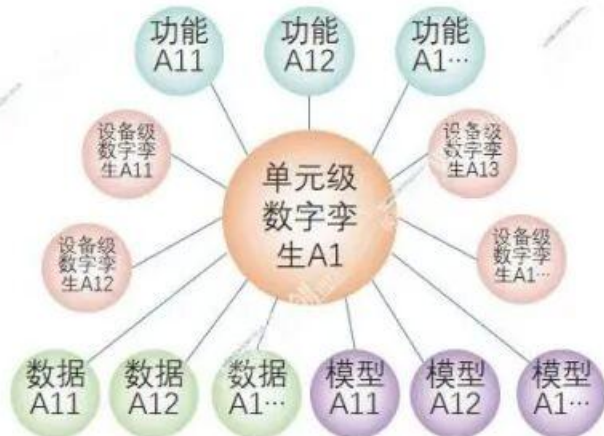
3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(5) 智能配电网数字孪生结构图谱



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。

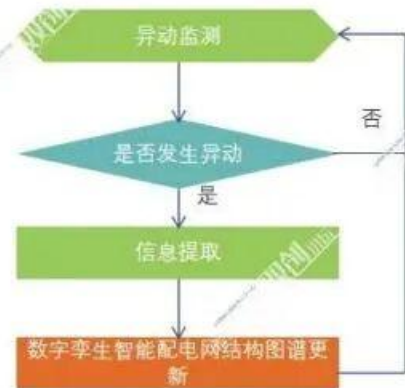
三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.2 配电网网络实体及其数字孪生体的实时双向映射与交互

(6) 数字孪生智能配电网自动演进

数字孪生智能配电网的自动演进主要包括两方面内容：一是数字孪生智能配电网功能的自动迭代，二是数字孪生智能配电网结构图谱的自动更新。当物理电网的结构或组成发生变化，或者对数字孪生智能配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，会触发数字孪生智能配电网的结构异动条件，相应的计算服务会自动提取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智能配电网结构图谱的更新。

数字孪生智能配电网功能自动迭代流程



数字孪生智能配电网的结构图谱具备自动更新的能力，以保证物理电网或数字孪生智能配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。

数字孪生智能配电网结构图谱自动更新流程

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.3 数字孪生体构建过程中模型、算法、工具的共享共用

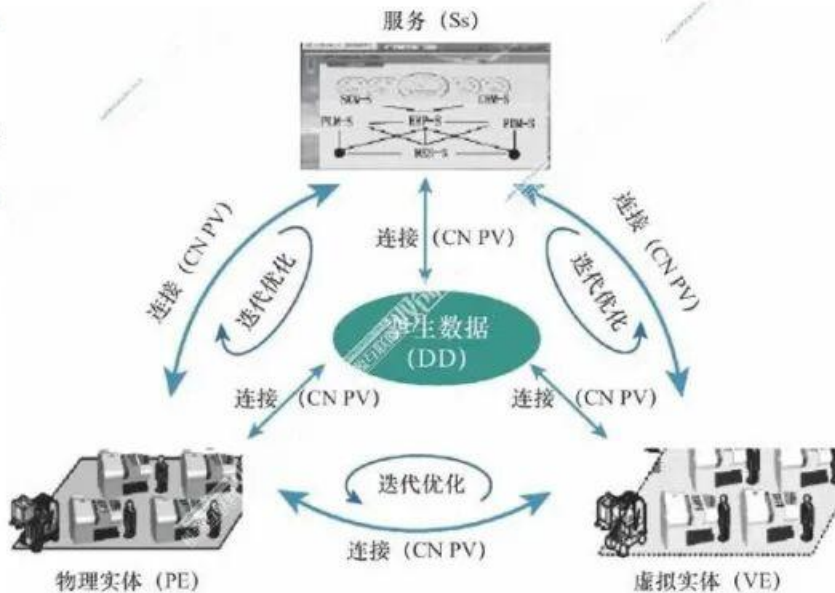
(1) 数字孪生的五维模型

数字孪生五维模型如下式所示：

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN)$$

式中：PE表示物理实体，VE表示虚拟实体，Ss表示服务，DD表示孪生数据，CN表示各组成部分间的连接。

- 服务 (Ss) 面向不同领域、不同层次用户、不同业务所需的各类数据、模型、算法、仿真、结果等进行服务化封装，并以应用程序或移动端App的形式提供给用户，实现对服务的便捷与按需使用。
- 连接 (CN) 实现物理实体、虚拟实体、服务及数据之间的普适工业互联，从而支持虚实实时互联与融合。
- 虚拟实体 (VE) 从多维度、多空间尺度及多时间尺度对物理实体进行刻画和描述。

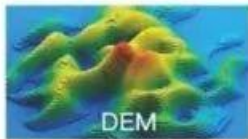


三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.3 数字孪生体构建过程中模型、算法、工具的共享共用

(2) 三维建模软件及其作用

- UE虚拟引擎
- Unity
- 3DMax (格式转换+场景整合+Datasmith导出)
- Maya (模型骨骼动画)
- Blender
- SketchUp (面数低)
- Revit (1:1参数化建模)
- Rhino (高精度地形)
- 倾斜摄影OSGB数据 (作为外围环境模型)
- Marvelous Designer(布料解算)
- Daz studio(人体表现)
- CityEngine CGA规则 (低模城市集群快速生成)
- PointCloud点云数据 (作为大远景背景)
- Houdini (程序化建模)
- Bentley (实景建模)

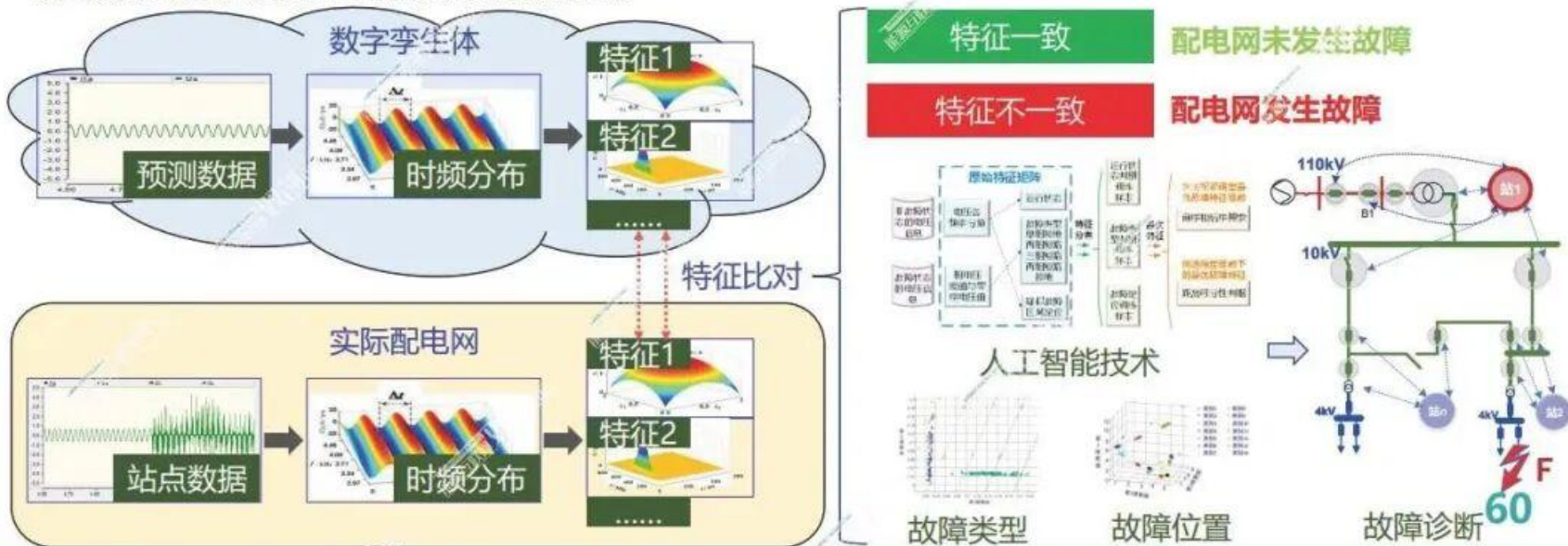


三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法

基于数字孪生体预测配电网在正常运行状态下的特征向量值，并与实际配电网特征向量值实时比对，若两者不一致，则配电网发生故障。此时，通过人工智能技术进行故障诊断。

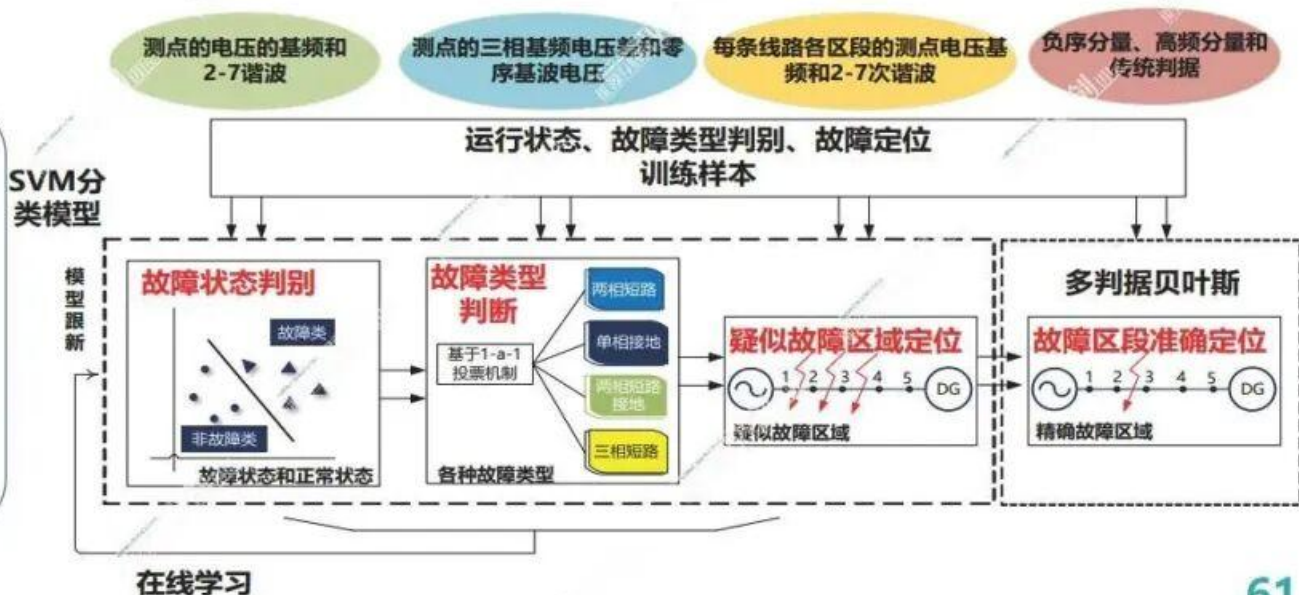


三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法

- 通过故障特征辨识诊断配电网故障状态和类型，定位配电网疑似故障区域。
- 利用贝叶斯网络实现精确到两个测量点之间的故障精细定位。

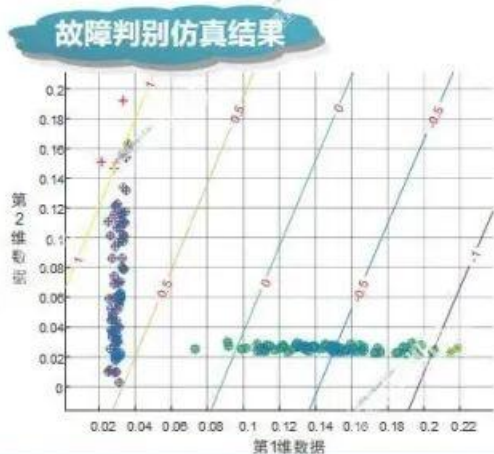


三、智能配电网数字孪生典型应用场景

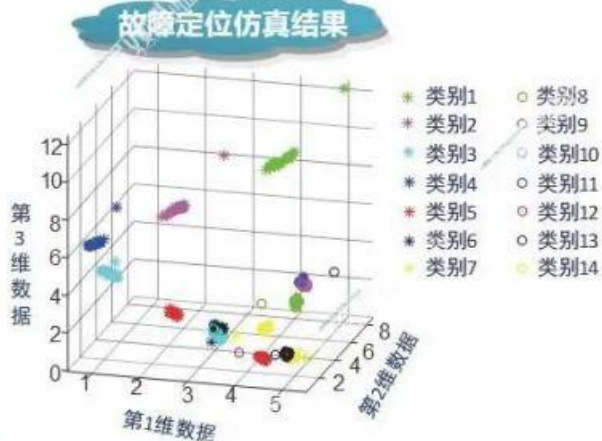
3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法

仿真结果



- ◆ 测点2的7次谐波电压幅值和测点3的7次谐波电压幅值组成最优2维测量点，将由该2维特征量组成的样本集输入至SVM分类器中训练出运行状态判别的SVM模型。
- ◆ 将测试样本输入至该模型得到分类准确率为98%。



- ◆ 测点8的基波电压幅值、测点5的基波电压幅值、测点15的基波电压幅值组成最优3维特征量，将测试样本输入至SVM中分类得到疑似故障区域定位准确率为95%。

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法

配电网故障定位方法

贝叶斯分类算法是统计学的一种分类方法，它是一类利用概率统计知识进行分类的算法。该算法能运用到大型数据库中，而且方法简单、分类准确率高、速度快。使用SVM进行故障区域定位，但无法实现精确定位，而是用贝叶斯算法、网络以及推理过程可以实现故障精确定位。

基本思路

基于多变量信息，
形成各保护判据

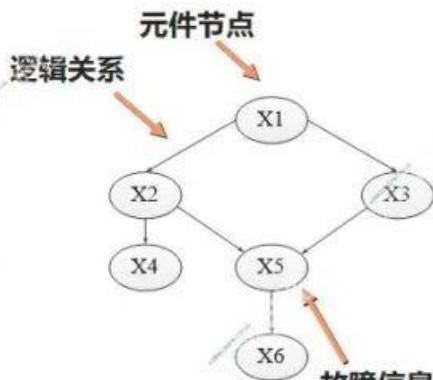
建立各判据之间的
逻辑关系矩阵

形成多参数贝叶斯
网络，并进行概率
赋值

计算元件故障概率

贝叶斯定理：

应用到故障诊断中



元件故障的后验概率：

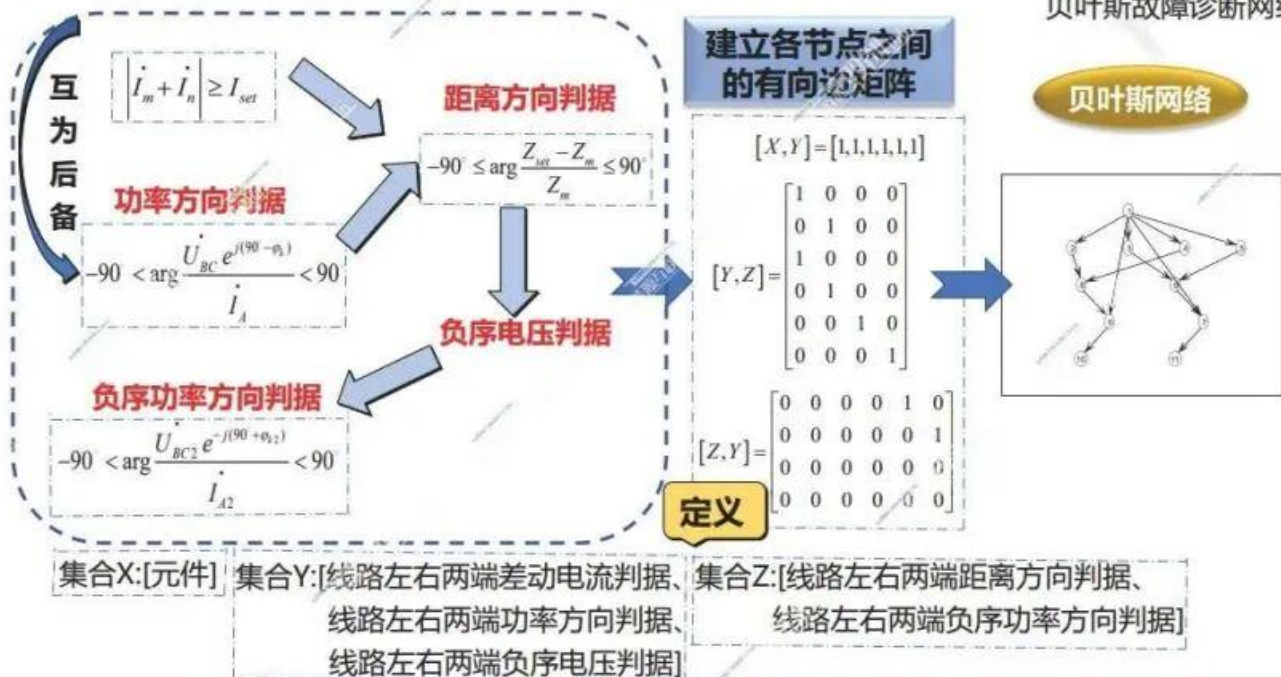
故障信息节点

用V表示元件节点的状态，0表示正常，1表示故障；用U表示可以获得的故障信息，其取值用u表示。

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(1) 基于数字孪生和人工智能技术的配电网故障诊断方法

节点概率赋值和算例

节点1先验概率

线路状态	0	1
概率/%	98.36	1.37

节点2、3、4、5条件概率

线路L状态	0		1	
主一、主二判据状态	0	1	0	1
条件概率/%	99.78	0.22	0.05	99.95

节点6、7条件概率

线路状态	0		1					
主三判据状态	0	1	0	1				
后备一判据状态	0	1	0	1	0	1	0	1
条件概率/%	90	10	90	10	0.4	99.6	90	10

节点8、9条件概率

主一判据状态	0		1					
主二判据状态	0	1	0	1				
主三判据状态	0	1	0	1	0	1	0	1
条件概率/%	99.52	0.48	0.83	99.17	0.83	99.17	0.83	99.17

节点10、11条件概率

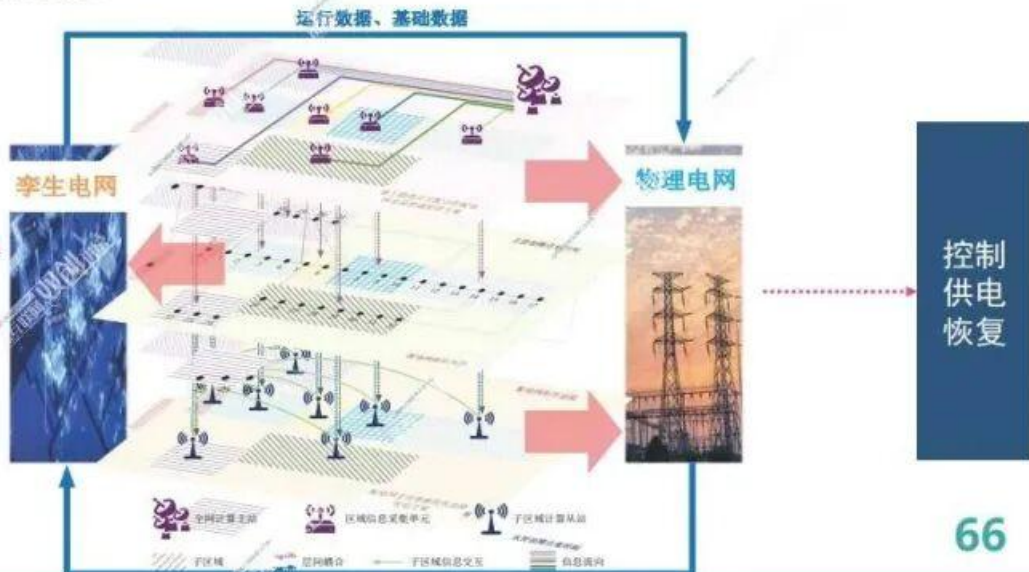
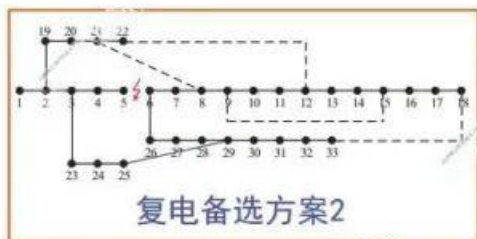
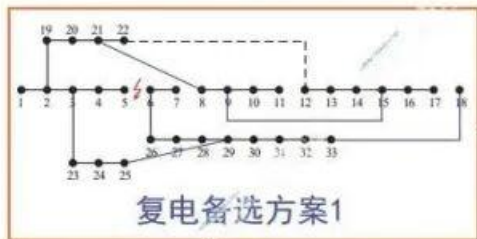
后备一判据状态	0		1	
后备二判据状态	0	1	0	1
条件概率/%	99.52	0.48	0.83	99.17

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(2) 基于数字孪生的配电网供电恢复方法

通过配电网数字孪生体的精准模拟，预测配电网复电后的运行情况。基于此，构建配电网复电效果评估指标体系，评估配电网备选复电方案的复电效果，指导实际复电方案的选择。



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(3) 配电网数字孪生仿真平台

多维度可视一体化管理



地图、接线图、三维场景三维一体



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(3) 配电网数字孪生仿真平台

潮流实时孪生



三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(3) 配电网数字孪生仿真平台

■ 配电网典型设备数字孪生体模型



变电站



光伏与储能



光伏、风机灯杆



1#灯杆



T接灯杆



负荷开关



支撑杆



柱变



箱变

三、智能配电网数字孪生典型应用场景

3.4 智能配电网数字孪生示范工程

(3) 配电网数字孪生仿真平台

故障事件孪生模拟



事件一
断电故障



事件二
PT/CT爆燃



事件三
瞬时故障

中国电科院双创示范中心
能源互联网 双创 讲坛

汇报完毕，谢谢观看！

主讲人：何开元

联系方式：

hekaiyuan@epri.sgcc.com.cn
010-82812168

主办：中国电科院双创示范中心

承办：国网上海能源互联网研究院有限公司

协办：中国电力百科网 国网数科控股公司双创中心