

数字孪生及其在电力系统的应用

张东霞

2021-5-18

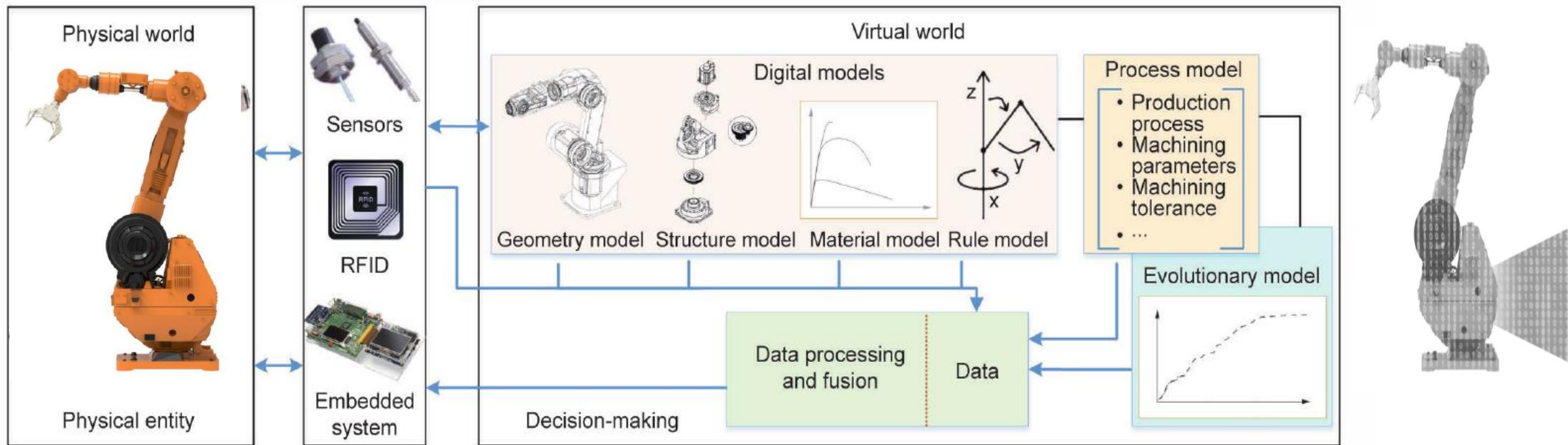
主要内容

- 基本概念
- 研究现状
- 面临挑战

数字孪生定义

是物理实体全方位的数字化表示，包含着描述物理实体结构和行为的模型。

- ◆ 是物理实体的**实时**反映
- ◆ 通过物理实体和数字孪生状态的**连续同步**（**连续数据流动-环境交互**）而实现
- ◆ 数字孪生与物理实体的**当前以及历史的数据交互**中，不断得到更新。



数字孪生特点

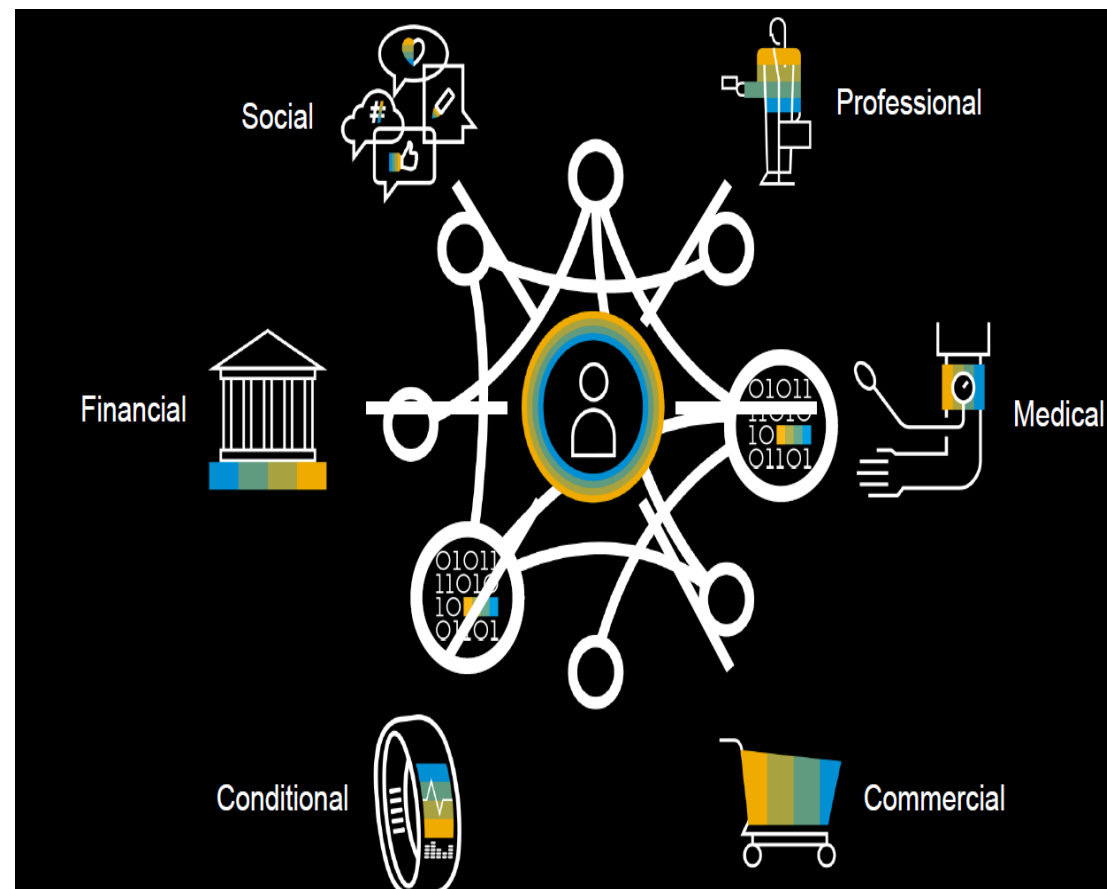


高保真



Living 模型

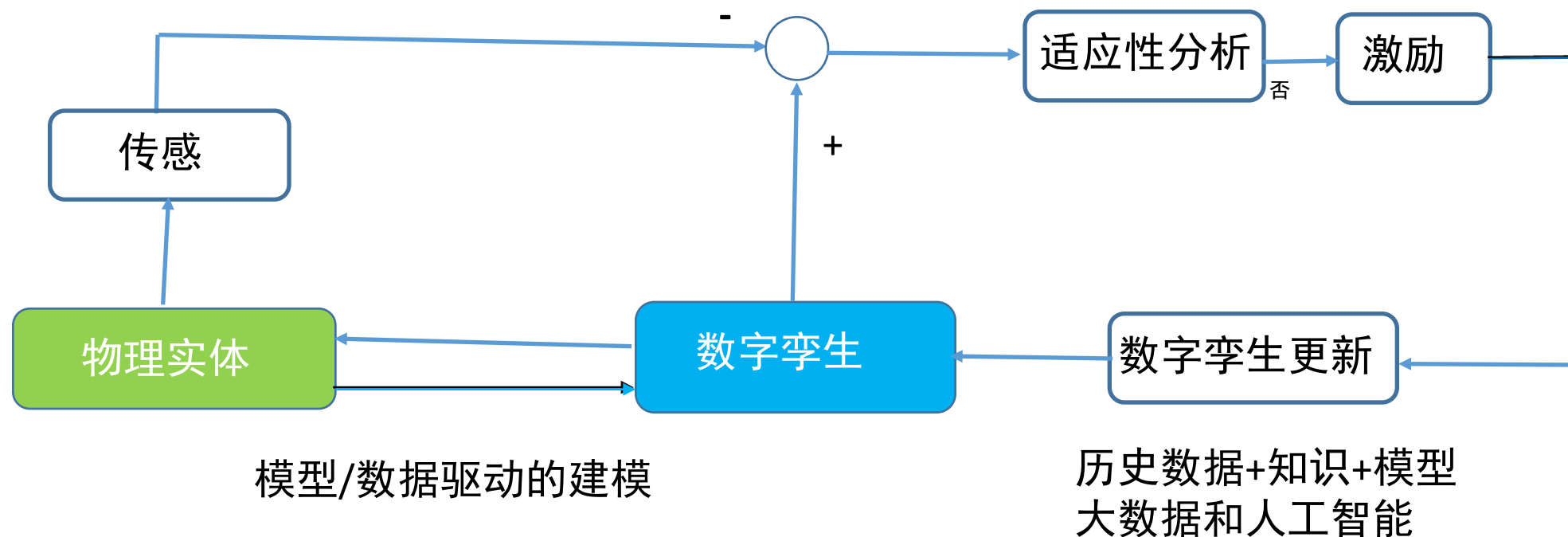
考虑风的干扰、齿轮的损耗、老化过程、运行异常等的钟摆轨迹特性



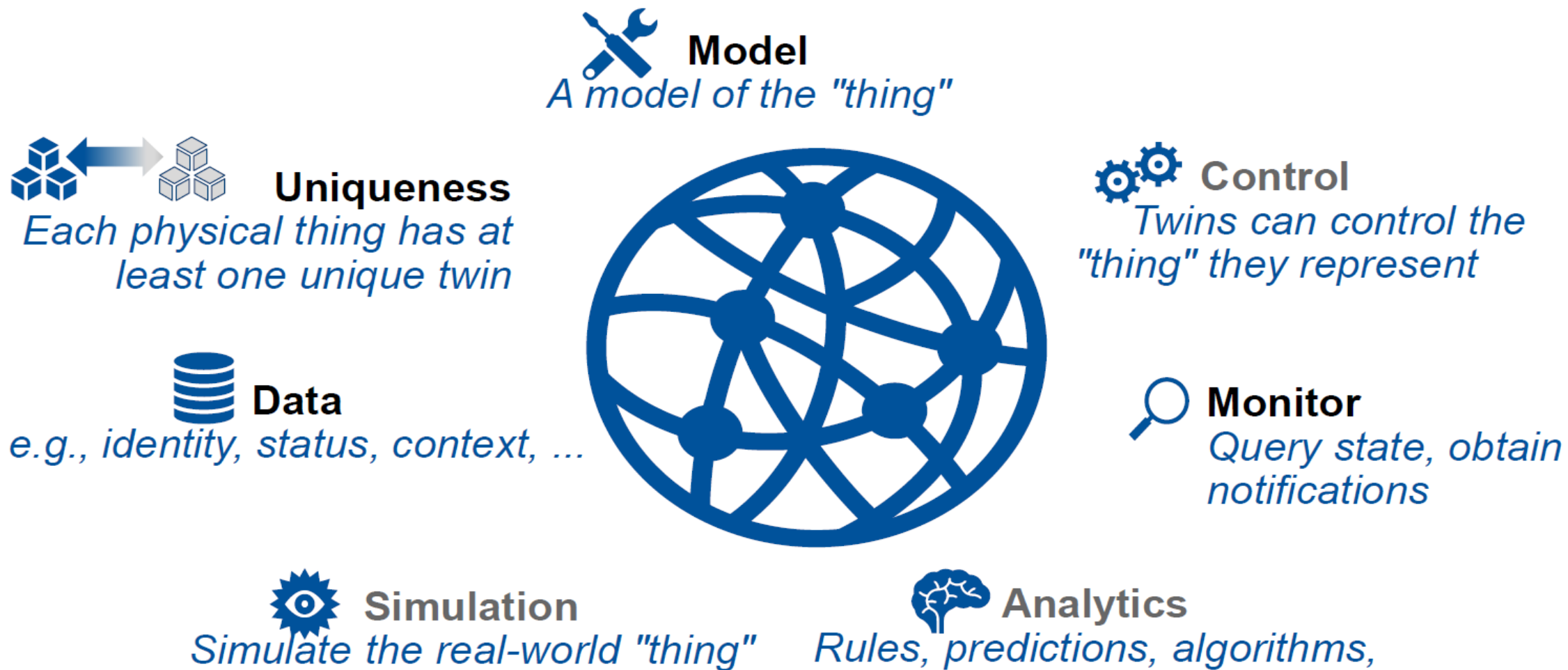
整体性+长期性

数字孪生：物理实体-数字孪生的实时交互

利用仿真和物理实体的差距，调整仿真模型参数，实现数字孪生和物理实体的同步，数字孪生又反作用于物理实体

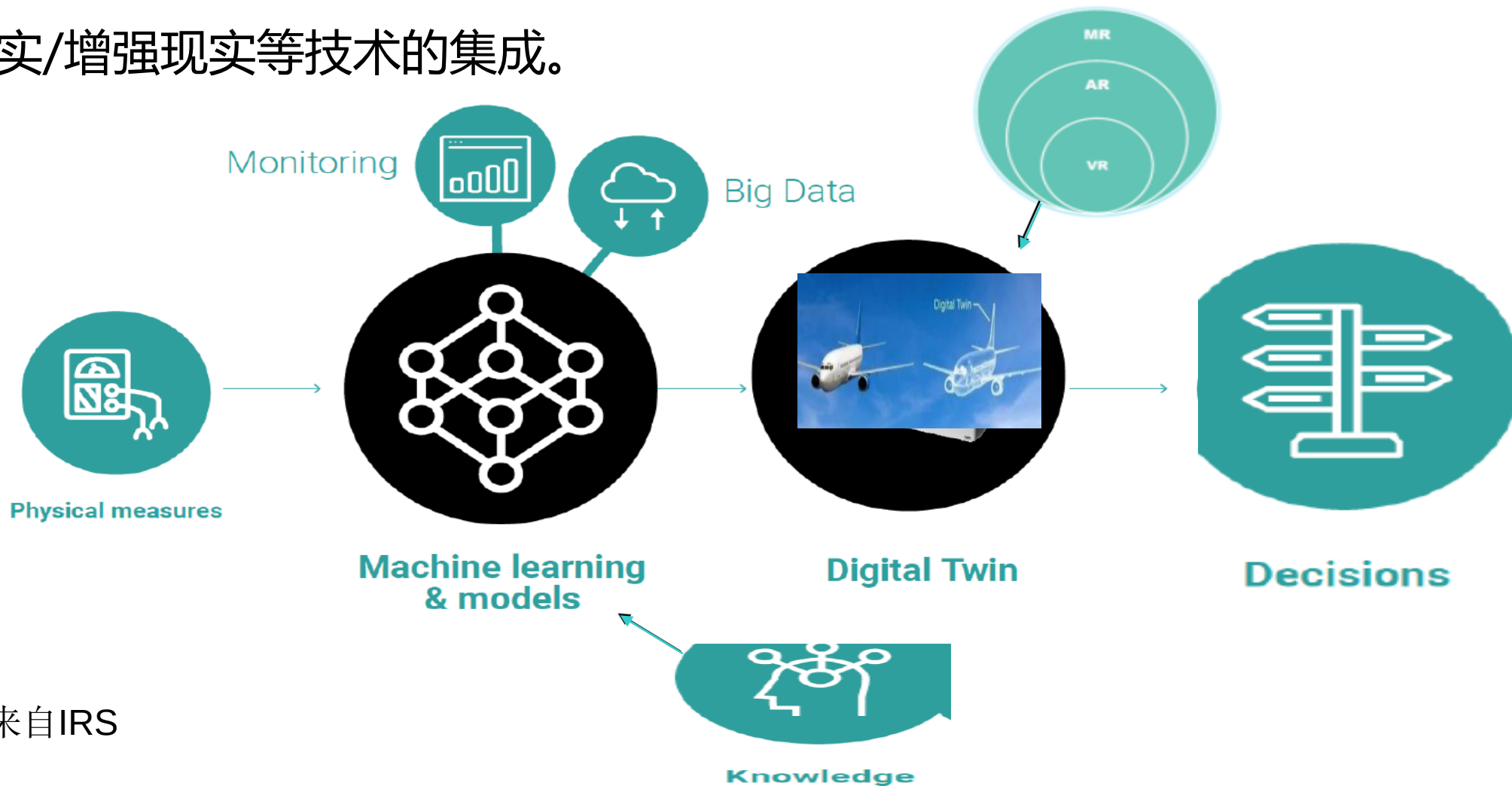


数字孪生不仅是物理实体的数字模型



数字孪生-综合性技术

是物联网、智能传感技术、云计算、5G 技术、边缘计算、大数据、人工智能、虚拟现实/增强现实等技术的集成。



来自IRS

主要内容

- 基本概念
- 研究现状
- 面临挑战

现状和前景

2011年	美国空军实验室	飞行器	超高保真飞机数字孪生模型，考虑飞行条件、飞机结构变形和温度变化，在虚拟模型中模拟对飞机结构造成的局部损伤和组织变化，以保证飞机结构的完整性并对飞机结构进行寿命预测。
2015年以来	GE	海上风机运维	风机数字孪生
	西门子	电力系统	运行、维护



变电站、施工现场数字孪生

人员非法进入区域
录像-警告

电子围栏、工作区管理

人员违反规程
录像-警告

人员和内容管理

设备异常
录像-警告

设备管理

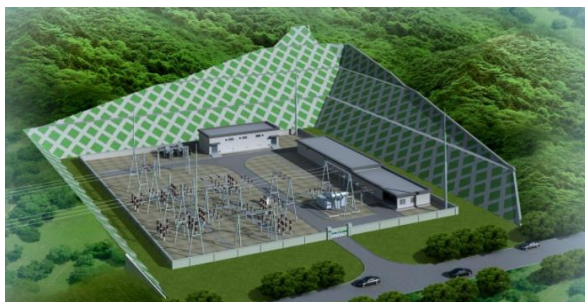
数字孪生

运行环境-3D模型

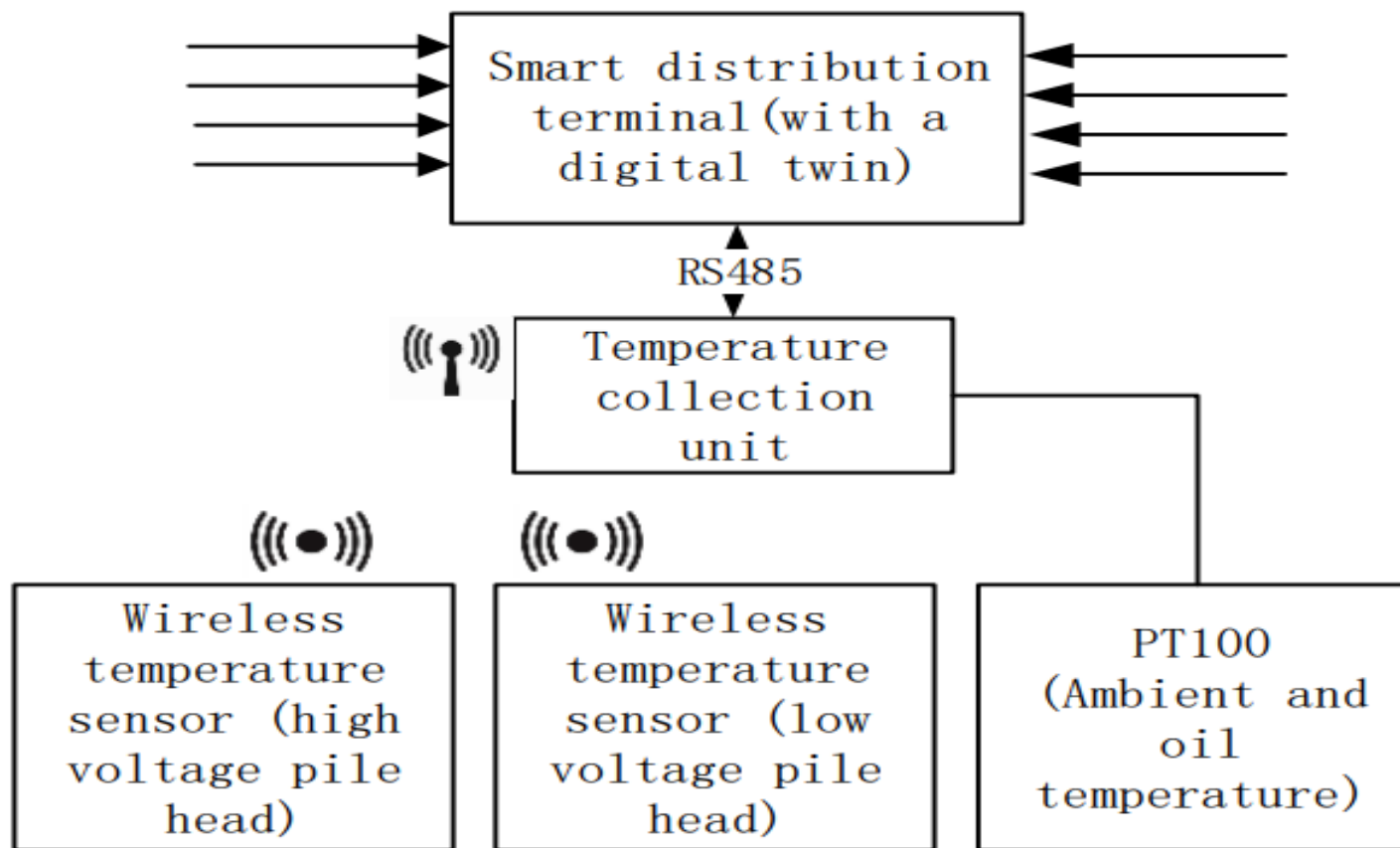
设备状态-3D模型
工作内容展示

人员-3D模型
位置标签

模型和数据

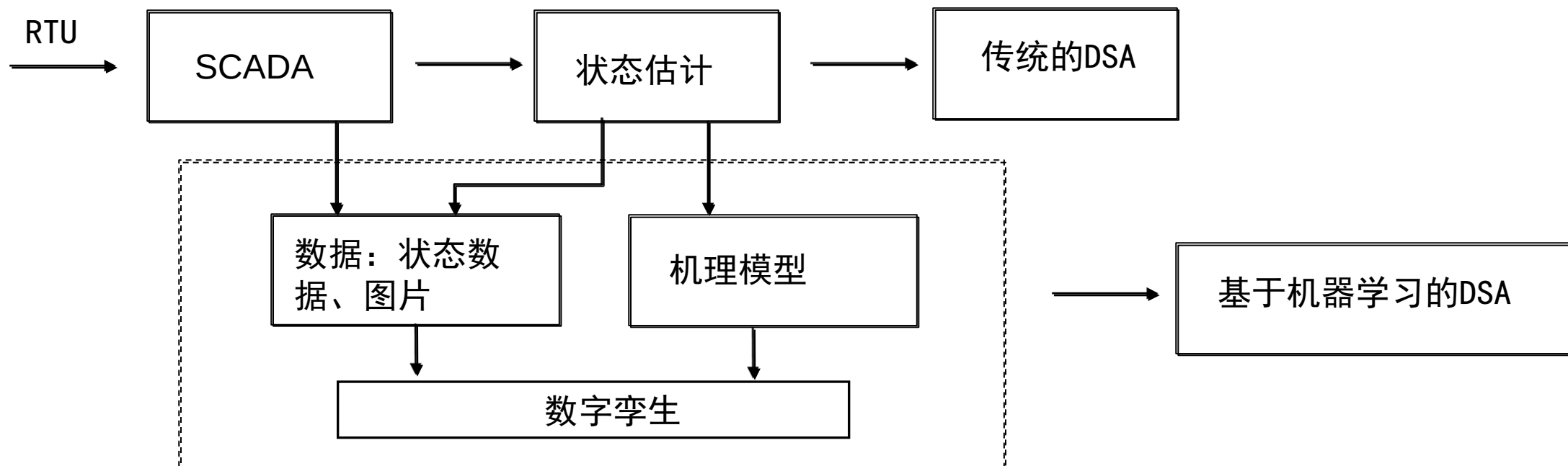


智能配电网-配电变压器健康评估



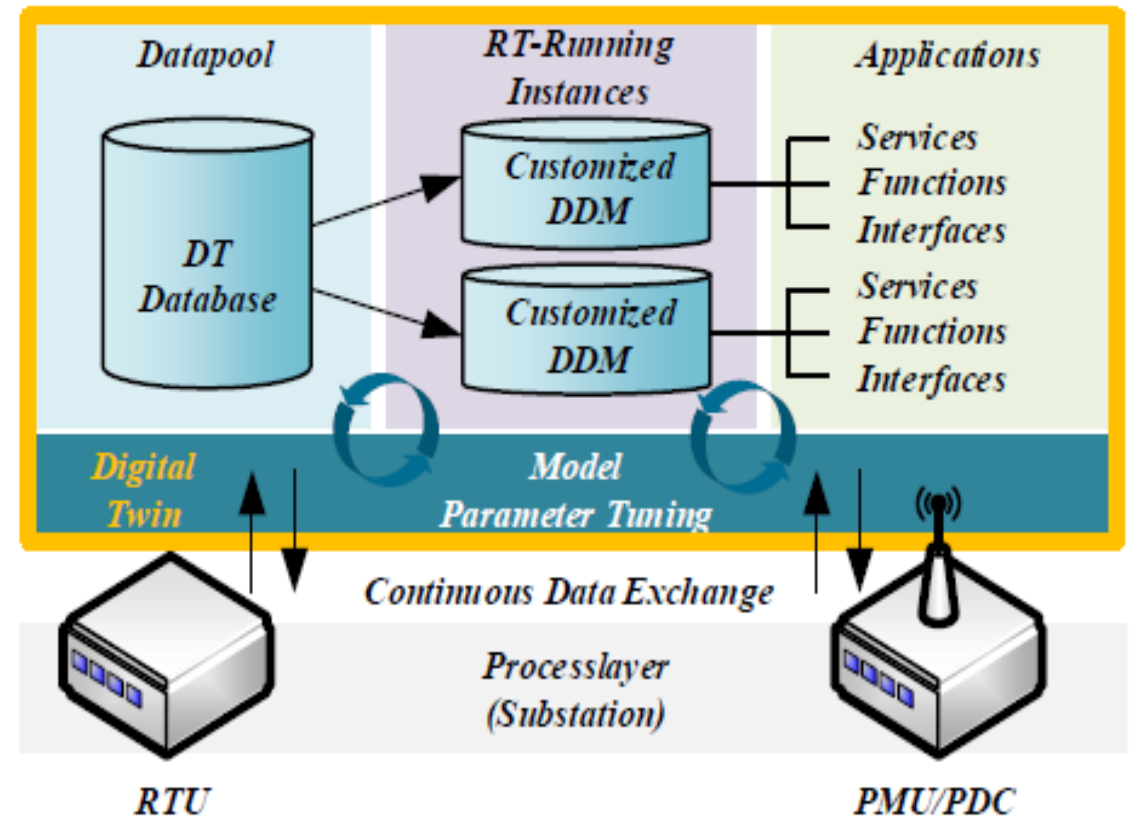
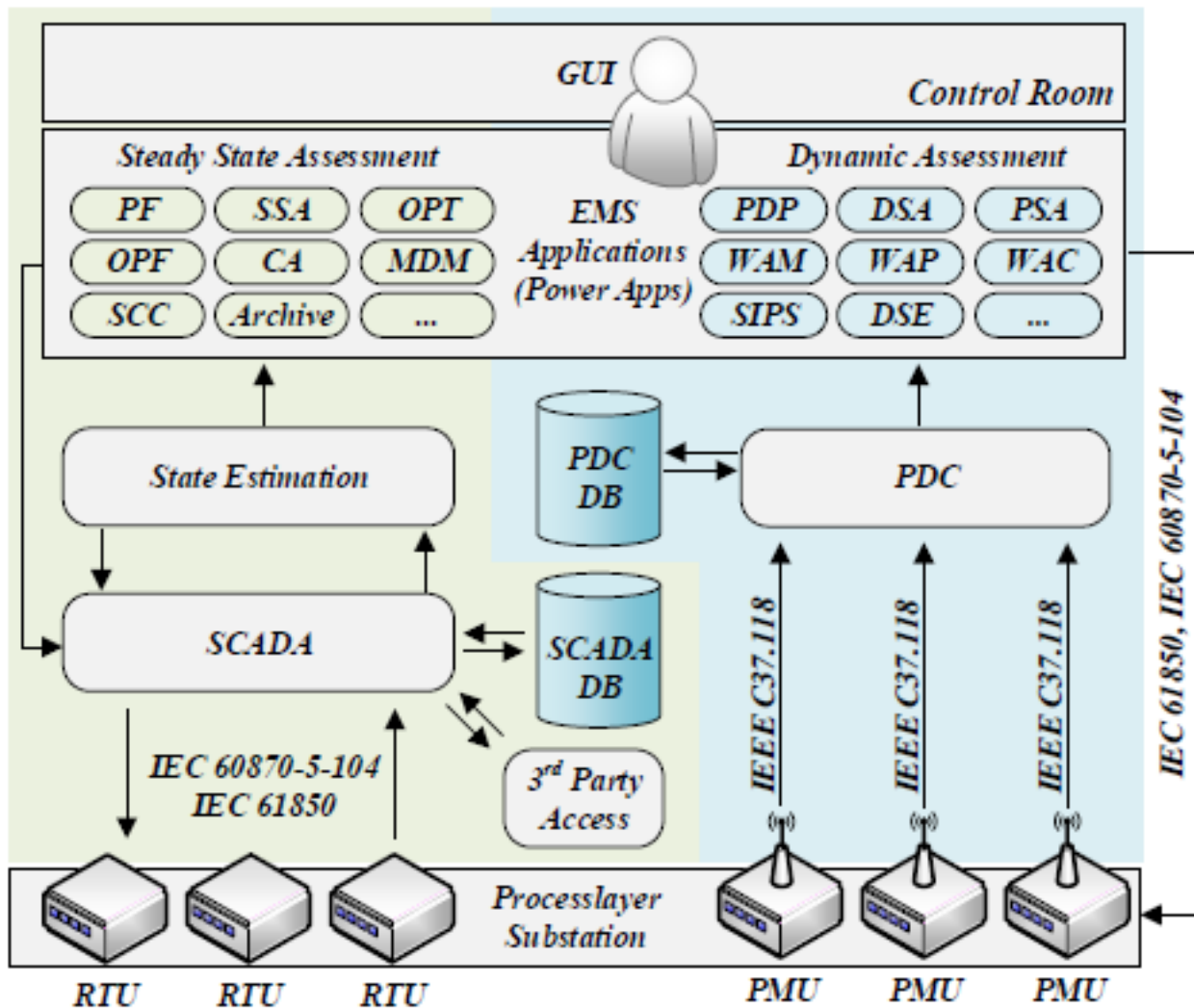
Ganghong Zhang, Chao Huo (国网智芯) An Architecture Based on Digital Twins for Smart Power Distribution System

动态安全评估



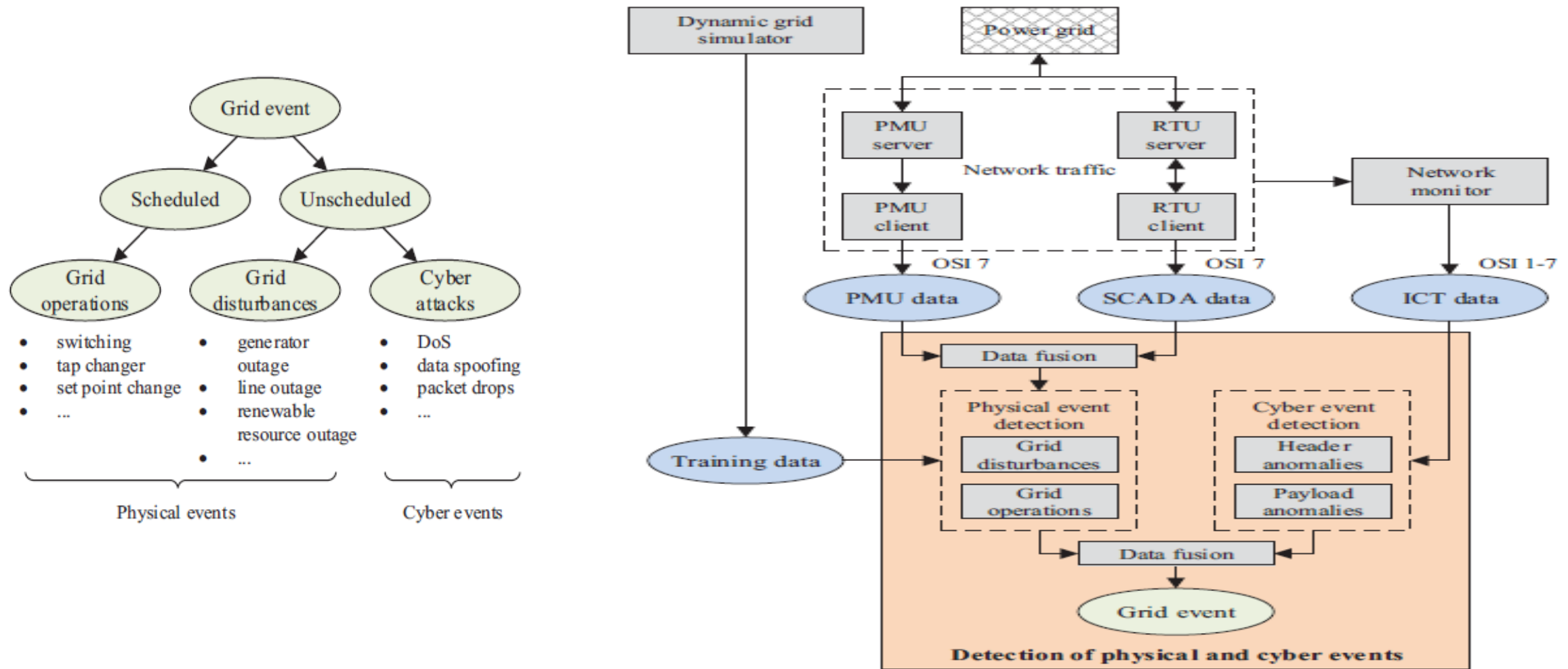
- 用数据分析-10秒完成
- 基于模型的分析-20秒
- 利用虚拟模型、运行状态、和运行图片，应用神经网络算法，可快速给出分析结果

支撑下一代的调控中心建设



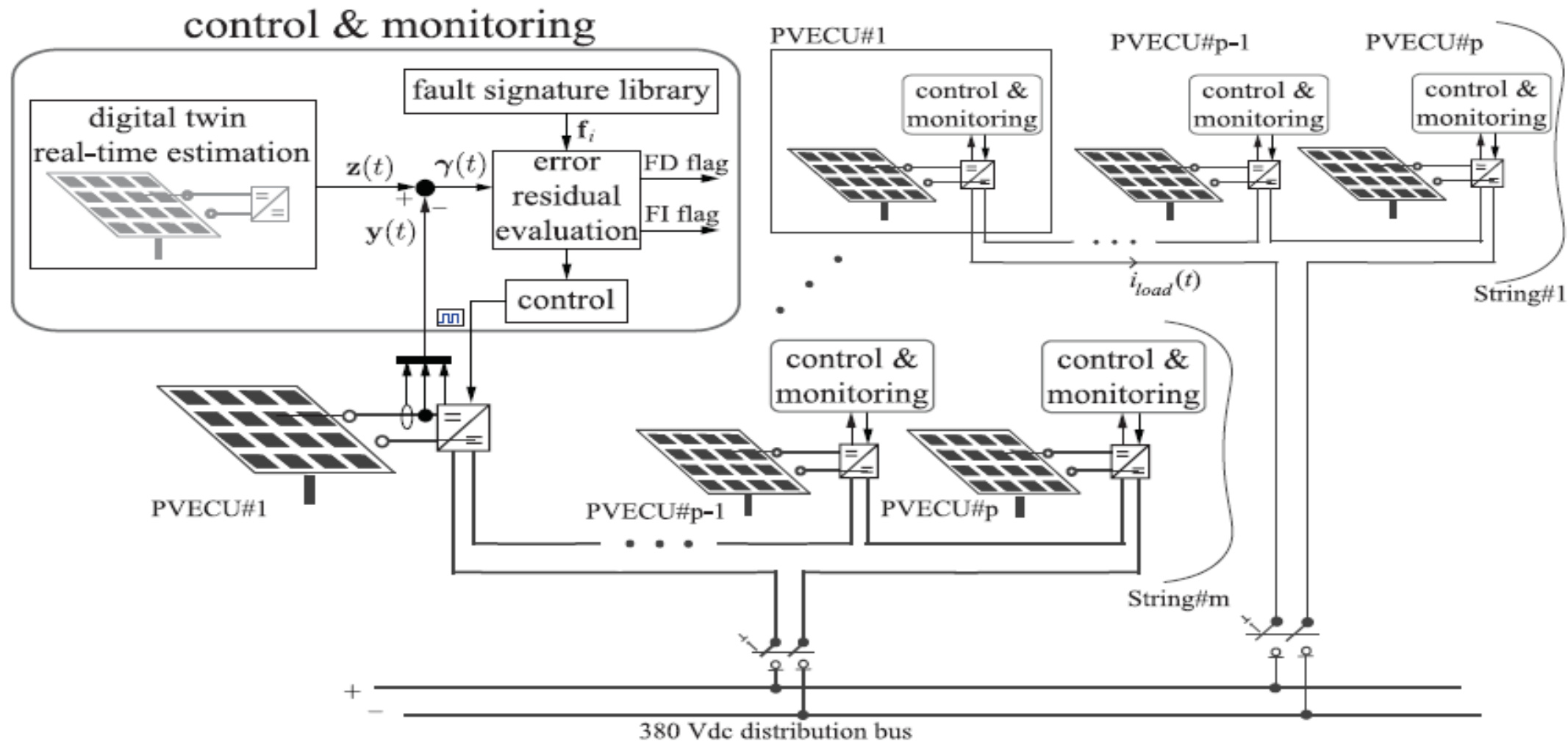
Christoph Brosinsky , Dirk Westermann and Rainer Krebs. 伊尔梅瑙工业大学和西门子 .Recent and prospective developments in power system control centers. Adapting the digital twin technology for application in power system control centers.

支撑下一代的调控中心建设-故障和攻击识别

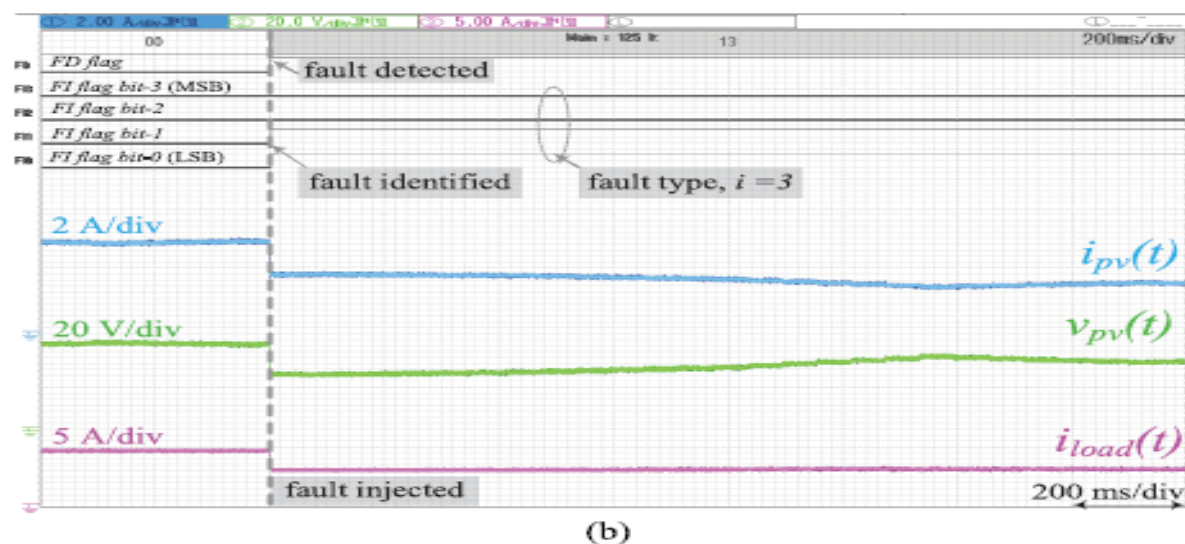
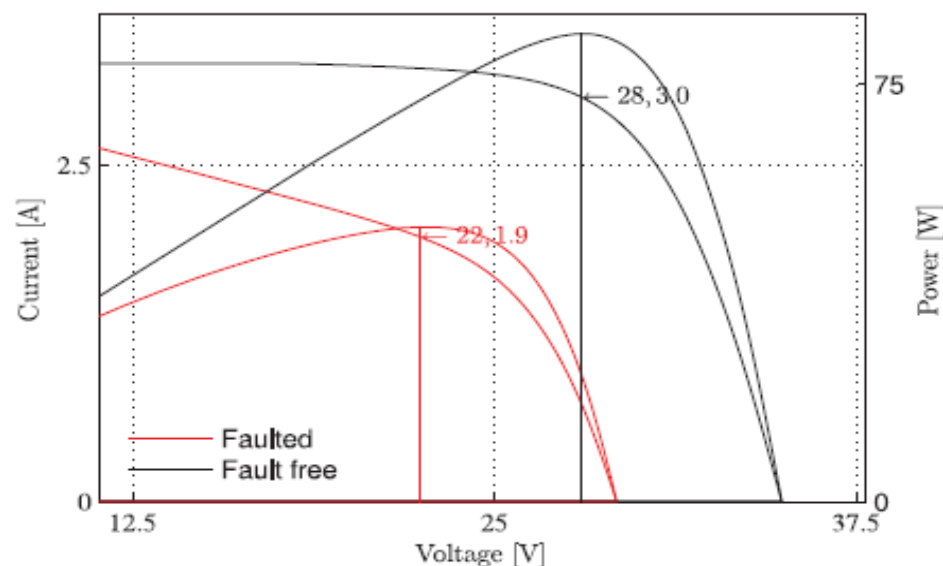


•Christoph Brosinsky , Dirk Westermann 伊尔梅瑙工业大学. Challenges and opportunities for phasor data based event detection in transmission control centers under cyber security constraints

光伏故障检测和识别

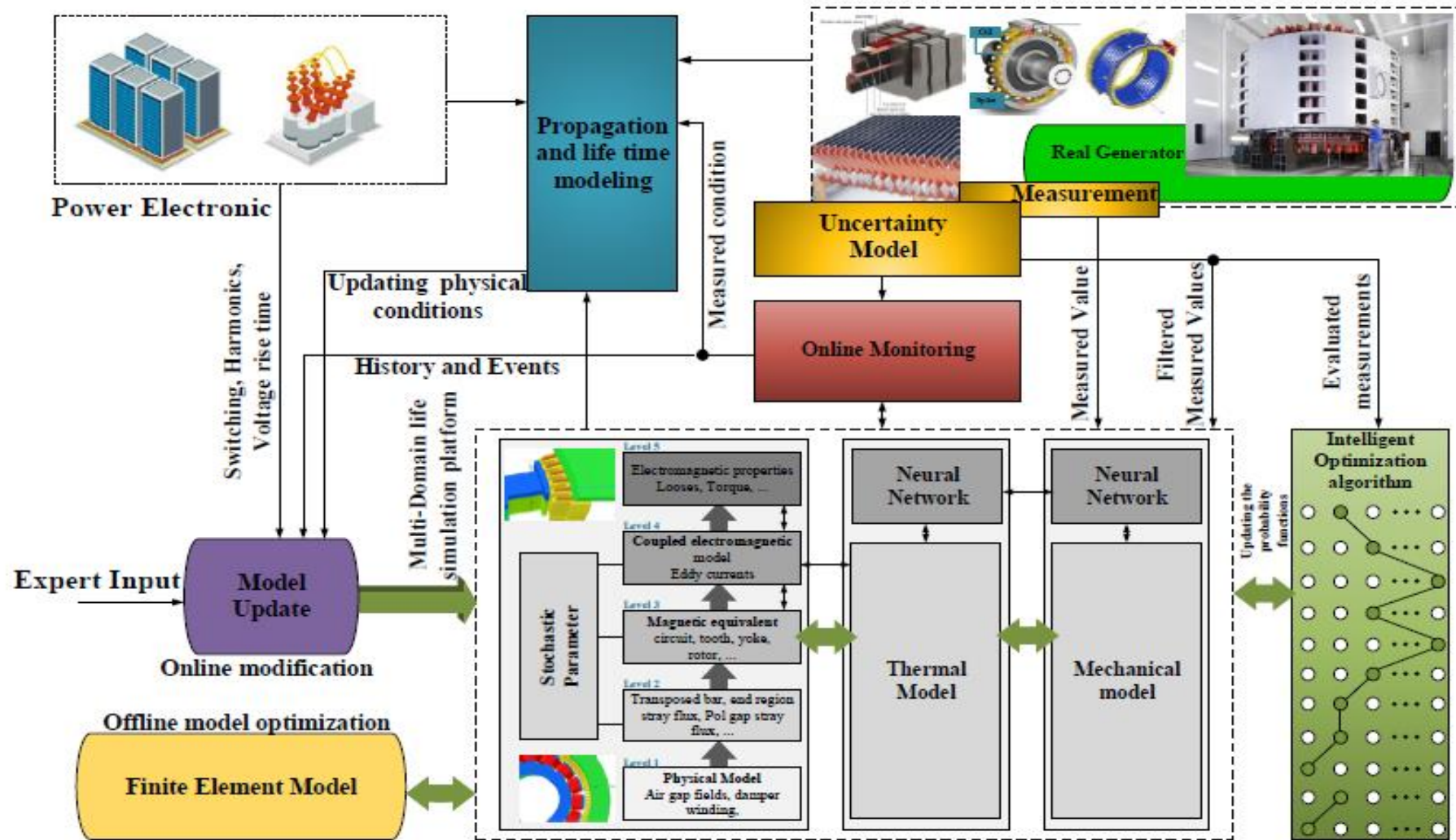


光伏故障检测和识别



Fault type	Fault event	Minimum fault magnitude	Time to FD	Time to FI
PV panel faults				
$i = 1$	Continuous/repetitive mild partial shading	20%	80 ms	939 ms
$i = 2$	Continuous/repetitive severe partial shading	40%	60 ms	1.14 s
$i = 3$	Internal PV panel fault (panel PID)	—	80 μ s	2.08 ms
Power converter faults				
$i = 4$	Open switch fault in SW_1	—	14.8 μ s	4.01 ms
$i = 7$	Short switch fault in SW_2	—	5.6 μ s	2.01 ms
$i = 10$	Open switch fault in SW_4	—	33.6 μ s	2.03 ms
$i = 11$	Short switch fault in SW_4	—	30 μ s	4.03 ms
Electrical sensor faults				
$i = 12$	Fault in $i_L(t)$ sensor	20%	1.44 μ s	2.00 ms
$i = 14$	Fault in $i_{load}(t)$ sensor	20%	290 μ s	2.29 ms
$i = 15$	Fault in $v_{pv}(t)$ sensor	20%	1.5 μ s	2.00 ms

大型可再生能源发电机组性能多域智能仿真



Amir Ebrahimi (德国汉诺威莱布尼兹大学) Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators

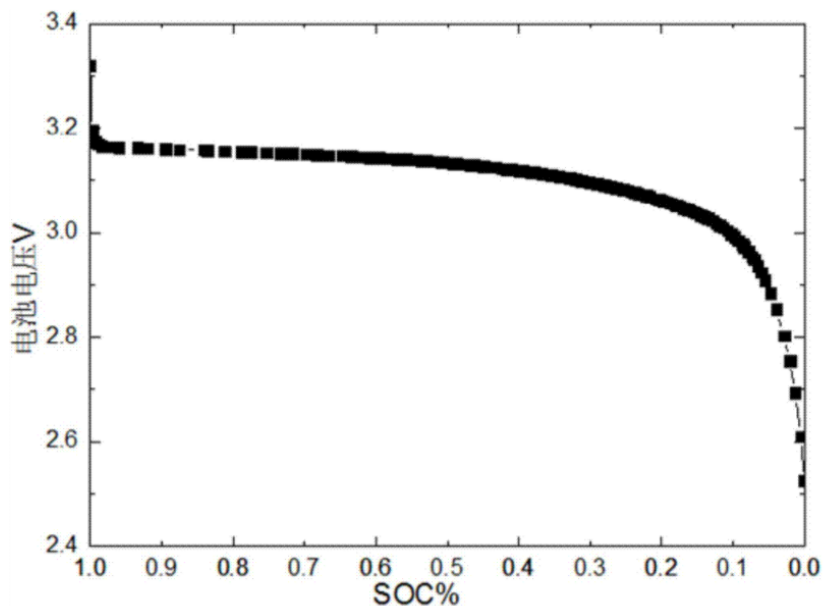
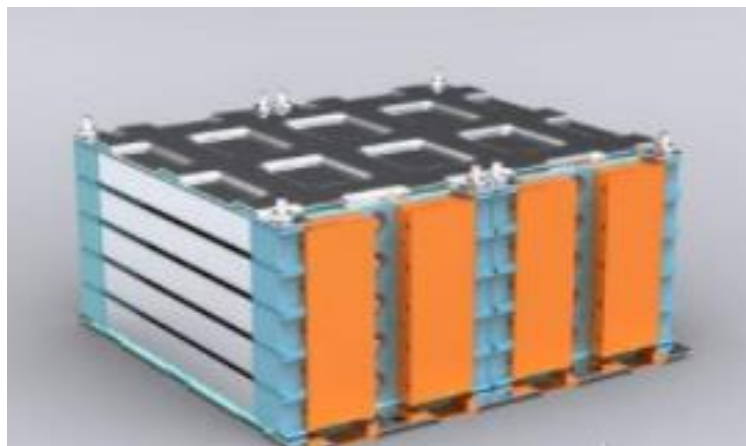
大型风力发电机组性能多域智能仿真



加装500多个传感器：振动、温度、磁通量、电流、电压电容气隙、位置、速度、气流、气压等。

配置安装有三维磁通测量装置的机器人

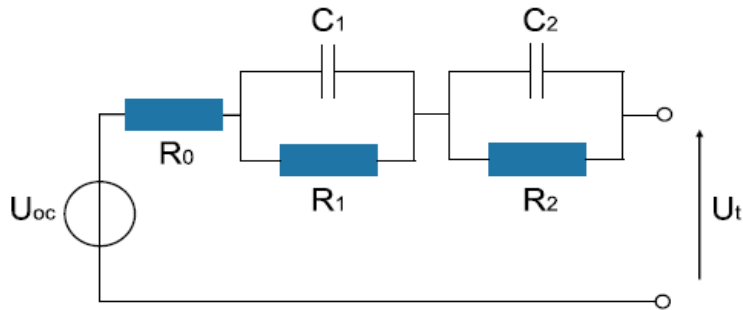
电池储能的数字孪生



- 移动式电池储能应用更广泛，应用场景多变
- 需真实评价&预测其电荷状况（SOC）和健康状况（SOH）
- SOC传统评估方法：开路电压方法、库仑计算—误差较大
- SOH面临更大挑战—复杂因素影响下的非线性衰老特性

电池储能的数字孪生

- 实时评估SOC 基于电路理论计算公式+自适应扩展H无限滤波方法（状态估计）



$$\dot{U}_1 = -\frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1}$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{U_2}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2}$$

$$U_t = U_{oc} - U_1 - U_2 - IR_0$$

利用H-Infinity进行状态评

$$u_k = I_k$$

$$y_k = U_{t,k}$$

$$x_k = [\text{SoC}_k \quad U_{1,k} \quad U_{2,k}]^T.$$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\text{SOC}_t = \text{SOC}_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta I dt$$

$$B_k = \begin{bmatrix} \frac{\eta \Delta t}{C_N} \\ R_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) \\ R_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}\right)\right) \end{bmatrix}$$

$$C_k = \left[\frac{dU_{oc,k}(\text{SOC})}{d\text{SOC}} \Big|_{\hat{\text{SoC}}_k} \quad -1 \quad -1 \right]$$

$$D_k = [-R_0]$$

$U_{oc,k}(\text{SOC})$ 表示SOC和 U_{oc} 的非线性关系

Weihan Li, Monika Rentemeistera, b, Julia Badedae, Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. Achen University. Journal of Energy Storage, 2020.

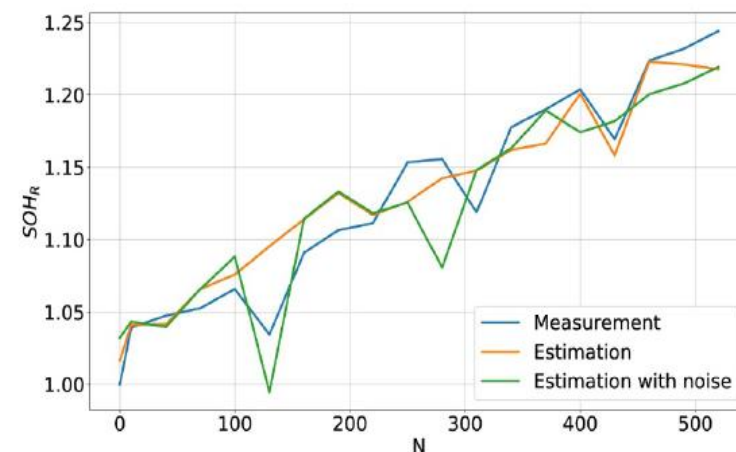
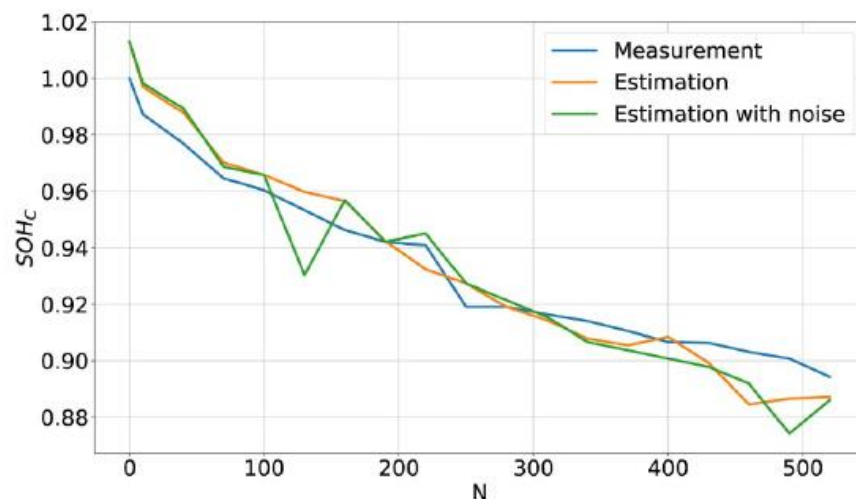
电池储能的数字孪生

- 实时评估SOH 基于电路理论计算公式+粒子群算法（识别参数）

$$\text{SOH}_{C,t} = \frac{C_{N,t}}{C_{N,0}} \quad \text{SOH}_{R,t} = \frac{R_{0,t}}{R_{0,0}}$$

参数由粒子群算法给予评估

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{t,i} - \hat{U}_{t,i})^2$$



Weihan Li, Monika Rentemeistera, b, Julia Badedae, Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. Achen University. Journal of Energy Storage, 2020.

电力系统暂态稳定分析中的负荷数字孪生

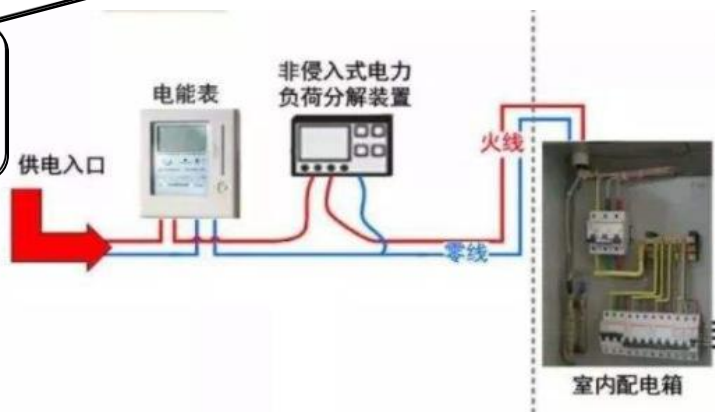
- 负荷具有时变性、随机性，在暂态稳定计算中是一个综合等值负荷



机理+非机理模型

负荷数字孪生

负荷建模法：
统计综合法+
测辨法



机理+非机理模型

负荷数字孪生

边缘智能



暖通空调 HVAC 热负荷、冷负荷与湿负荷计算

英迪朗

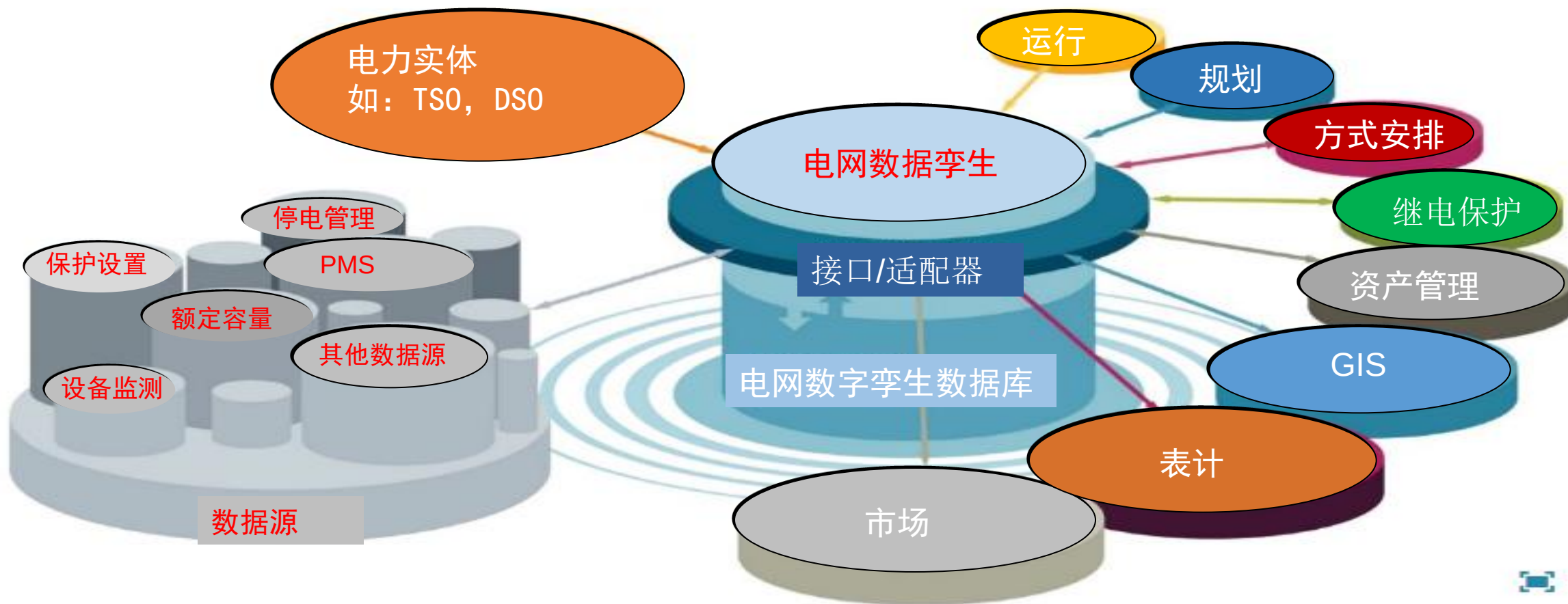


主要内容

- 基本概念
- 研究现状
- 面临挑战

复杂的系统问题

综合性技术、系统性问题



数据和方法

数据缺乏--历史数据积累不够

传感技术不够成熟，性能不够可靠

数据获取和融合困难

数据驱动/人工智能技术不成熟

数据驱动+模型驱动方法不成熟

总结

- 是认识和模拟物理实体的方向
- 体现了人类认识和模拟物理实体的雄心和信心
- 先摘下低垂的成熟果实





谢谢！