



电机工程与应用电子技术系

Department of Electrical Engineering



面向新型电力系统的 数字孪生技术

Digital Twin Technology for a New Type of Power Systems



沈 沉



2021年5月18日

目录

CONTENTS

01

对数字孪生概念的解读

02

传统电力系统仿真与数字孪生

03

构建电力系统数字孪生的关键技术

04

电力系统数字孪生技术实践

电机工程与应用电子技术系
Department of Electrical Engineering



01 对数字孪生概念的进一步解读

- **数字孪生到底是什么 —— 模型、仿真、系统工程？**
- **数字孪生最关键的特征是什么？**
- **提出数字孪生概念的目的是什么？**

• 数字孪生概念的起源

- 数字孪生 (Digital Twin) DT一词, 业界一般认为, 最早是密西根大学Michael Grieves教授于2002年针对产品全生命周期管理 (PLM) 提出的一个概念, 当初并不叫Digital Twin, 而是叫镜像空间模型 (Mirrored Space Model, MSM) 。
- 2003年他在讲授PLM课程时使用了 “Digital Twin (数字孪生)” 。
- 在2014年他在撰写的 “数字孪生: 通过虚拟工厂复制实现卓越制造 (Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication)” 一文中对数字孪生进行了较为详细的阐述, 奠定了数字孪生的基本内涵。

- 数字孪生的定义

国防采办大学

- 数字孪生是充分利用对象的物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的**仿真过程**。通过**在虚拟空间中**完成对象的映射，**反映对象的全生命周期过程**。

Defense Acquisition University, "Digital System Model," Glossary of Defense Acquisition Acronyms and Terms, 2015. [Online].

Available: https://www.dau.edu/tools/Documents/Glossary_16th%20_ed.pdf

- 数字孪生的定义

ANSYS公司

- 数字孪生是在数字世界中建立一个与真实世界系统的运行性能完全一致，且可实现**实时仿真的仿真模型**。利用安装在真实系统上的传感器数据作为该仿真模型的边界条件，实现真实世界的系统与数字世界的系统**同步运行**。

- 数字孪生的定义

北京航空航天大学 张霖教授

- 数字孪生是物理对象的**数字模型**，该模型可以通过接收来自物理对象的数据而**实时演化**，从而与物理对象在**全生命周期保持一致**。
- 基于数字孪生可进行分析、预测、诊断、训练等（即**仿真**），并将仿真结果反馈给物理对象，从而帮助对物理对象进行优化和决策。物理对象、数字孪生以及基于数字孪生的仿真及反馈一起构成一个信息物理系统 (cyber physical systems)。

- 数字孪生的定义

NASA

- 数字孪生是充分利用对象的物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的**仿真过程**。通过**在虚拟空间中**完成对象的映射，**反映对象的全生命周期过程**。
- DigitalTwin就是“**基于仿真的系统工程**” (Simulation-Based Systems Engineering)

Piasek, R., et al., Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map. 2010, NASA Office of Chief Technologist.

张霖，北京航空航天大学，Beepower公众号微文：

关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术

- (1) DT是物理设备的一个**实时的数字副本**[1]。
- (2) DT是有生命或无生命的物理实体的**数字副本**。通过连接物理和虚拟世界，数据可以无缝传输，从而使得虚拟实体**与物理实体同时存在** [2]。
- (3) DT是对人工构建的或自然环境中的资产、流程或系统的**数字表示** [3]。
- (4) DT是资产和过程的**软件表示**，用于理解，预测和优化性能以改善业务 [4]。

[1] Bacchiega IRSrl, Gianluca (2017-06-01). "Embeddeditdigital twin".

[2] Saddik, A. El(April 2018). "Digital Twins: The Convergence of MultimediaTechnologies". IEEE MultiMedia. 25 (2): 87–92. doi: 10.1109/MMUL.2018.023121167. ISSN 1070-986X.

[3]"The Gemini Principles". www.cdabb.cam.ac.uk. Centre for Digital Built Britain.2018. Retrieved 2020-01-01.

[4] <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>

- (5) DT是实际产品或流程的**虚拟表示**，用于理解和预测对应物的性能特点 [5]。
- (6) DT是在云平台上运行的真实机器的**耦合模型**，并使用来自**数据驱动**的分析算法以及其他可用**物理知识**的集成化知识对健康状况进行**仿真** [6]。
- (7) DT是物理对象或系统在其整个生命周期中的**动态虚拟表示**，使用**实时数据**实现理解，学习和推理 [7]。
- (8) DT使用物理系统的**数字副本**执行**实时优化** [8]。
- (9) DT是**现实世界和数字虚拟世界沟通的桥梁** [9]。

[5] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/zh/our-story/glossary/digital-twin/24465>

[6] Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (January 2015). "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems". Manufacturing Letters. 3:18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001

[7] Bolton, Ruth N.; McColl-Kennedy, Janet R.; Cheung, Lilliemay; Gallan, Andrew; Orsingher, Chiara; Witell, Lars; Zaki, Mohamed (2018). "Customer experience challenges: Bringing together digital, physical and social realms". Journal of Service Management. 29 (5): 776–808. doi:10.1108/JOSM-04-2018-0113

[8] Söderberg, Rikard, et al. "Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production." CIRP Annals 66.1 (2017): 137-140.

[9] http://www.cs.com.cn/gppd/gsyj/201903/t20190313_5930441.html

几个重要的概念

01

数字孪生体

特指在数字空间中与物理对象对应的模型

02

物理-数字孪生系统

由物理对象和其数字模型共同构成，两者保持同步、平行推演、闭环互动的信息物理系统

03

数字孪生技术

涉及物理对象的数字孪生体构造、基于数字孪生体的仿真、分析、预测和控制决策相关技术

混用“数字孪生”指代上述不同概念是造成概念模糊的重要原因！

孪生与镜像的区别

孪生体



物体与镜像



01

特征相似?

02

是否同步?

03

是否自治?

04

能否互动?

物理实体与数字孪生体的相互关系



数字孪生技术的主要特征



Oracle, "Digital Twins for IoT Applications," 2017. [Online].
Available: <https://www.oracle.com/assets/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>

数字孪生技术的核心

建模与仿真



02 传统电力系统仿真与数字孪生

两者之间有何异同？数字孪生的关键特征是什么？





数字孪生和传统的电力系统仿真有何区别？



人们不是一直通过仿真认识电力系统、校核控制策略的吗？



数字孪生到底给我们带来了什么新的东西？



2000年 卢强院士
首次提出数字电
力系统的概念

2000年 5月 10日

May. 10, 2000

1

数字电力系统 (DPS)

卢 强
(清华大学电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 提出了数字电力系统 (DPS) 的概念, 并对其主要功能、所需进行的基础研究工作以及如何实现等问题进行了阐述。数字电力系统有助于实现电力系统的科学化管理和决策以及系统状态实时评估, 改善系统的安全稳定性, 制定和实施经济运行策略, 对电力系统实施紧急控制和反事故控制等。最后还专门论述了建立数字电力系统所需的硬件支持问题。

关键词: 数字电力系统; 安全稳定性; 经济运行; 实时仿真

中图分类号: TM 73

1 数字电力系统的定义与内涵

数字电力系统 (digital power systems, 缩写为 DPS) 的定义是: 某一实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科教活动等数字地、形象化地、实时地描述与再现。如果做到了这一点, 可以说我们建立了该实际电力系统的数字电力系统。某个电力系统的数字电力系统可能包含以下内容与功能:

- a. 电力系统的物理结构 (即真实结构), 各组成部分 (单元) 及整体的物理性能、运行方式和运营策略、管理模式、人员信息等。
- b. 电力系统的各元件、各网络、各节点的实时状态变量 (state variables)。
- c. 各种自动控制装置的动作特性 (包括继电保护装置、FACTS 设备、电力电子设备、可控超导储能装置等)。
- d. 发电厂、变电站等主要设备的“健康”状态。
- e. 经济结构、市场信息。
- f. 影响电力系统安全的特殊自然环境, 比如某一条超高压线路正处于落雷区或者台风袭击中, 可能造成灾害。数字电力系统应能及时提示运行人员给予特别关注, 以免发生重大灾难。
- g. 科技管理阶层、技术人员管理信息。
- h. 环保指标和环保设备投入及运行情况。
- i. 电力系统的各个环节的实时效率, 即热力系统、汽轮机、发电机系统、网络损耗、变电站用户等环节的效率。
- j. 重要的信息, 比如人才的信息、科教活动的信息。

2 数字电力系统的功能

2.1 管理和决策的科学化

DPS 可帮助电力系统实现管理和决策的科学化。有了 DPS, 即可知晓管理层下达的指令在实际电力系统中产生的效果, 这就是“指令效果反馈”, 据此管理层可以进一步改进管理和决策。此外, 电力系统是分层的, 每一层要向上一级管理层通报信息, 有了 DPS, 就能很快地把这些信息及时收集起来, 加以科学处理, 向上一级通报。最终目的是实现全系统的高效管理, 这就是 DPS 所含有的高级 MIS 功能。

2.2 安全稳定性实时评估与改善

对于电力系统, 最重要的是运行的安全性。这个问题在全世界均未得到很好解决。我国电力系统也出现过稳定破坏的重大事故。美国曾发生过六七次大范围灾难性稳定破坏导致的停电事故。这告诫我们要更加关注电力系统的安全与稳定问题。

首先要实时地对系统进行安全评估。在系统正常运行时, 应该给出“忧患预告”, 实时告知系统薄弱所在, 以引起特别注意。系统的实时稳定域的变化和状态点所处位置应予以实时显现。实际上, 电力系统有一个稳定域, 这个稳定域随运行情况的变化而改变。有了 DPS, 可图形化地显示稳定域的实时变化和状态点在稳定域中的运动轨迹; 同时, 还可给出改善安全稳定性的建议和策略。因此, 我们可以不断地对电力系统的安全稳定性进行再评估、再调整, 以达到最佳的安全运行状态。

2.3 经济运行策略制定和实行

在日常运行中, DPS 可给出在满足安全稳定约束条件和市场化运行规则指导下的全系统的经济运行策略 (这里讲的经济运行不是“自私”的经济运行, 它必须受到环保指标的制约)。就是说, 在正常运行

收稿日期: 2000-03-30

国家“九五”重点科技攻关项目 (95-7230-00-00) 资助项目

清华大学出版社 (Beijing 100084) 出版

- 实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科教活动等数字地、形象化地、实时地描述与再现。它包含:
- 电力系统的物理结构;
 - 实时状态 (量测);
 - 影响电力系统安全的环境信息;
 - 经济机构、市场信息;
 - 管理信息;
 - 各种类型的运行指标, 如效率、环保;
 - 其他。



为什么数字孪生的从机械制造行业里诞生？

为什么对系统进行仿真推演的思想在电力行业早已有之？

为什么数字孪生技术中关键的物理-数字闭环构想在电力行业没有广泛地实践？

历史回顾：

- 1965年发生北美大停电（Northeast blackout of 1965，1965年东北部停电），受影响人数约有3000万人，207,000平方公里，停电时长达13小时。
- 1970s，能量管理系统诞生，包括数据收集、能量管理、网络分析和调度员培训等功能。开始大规模使用仿真分析工具进行电力系统运行管理。

01 电力系统动态过程太快

02 电力系统动态过于复杂

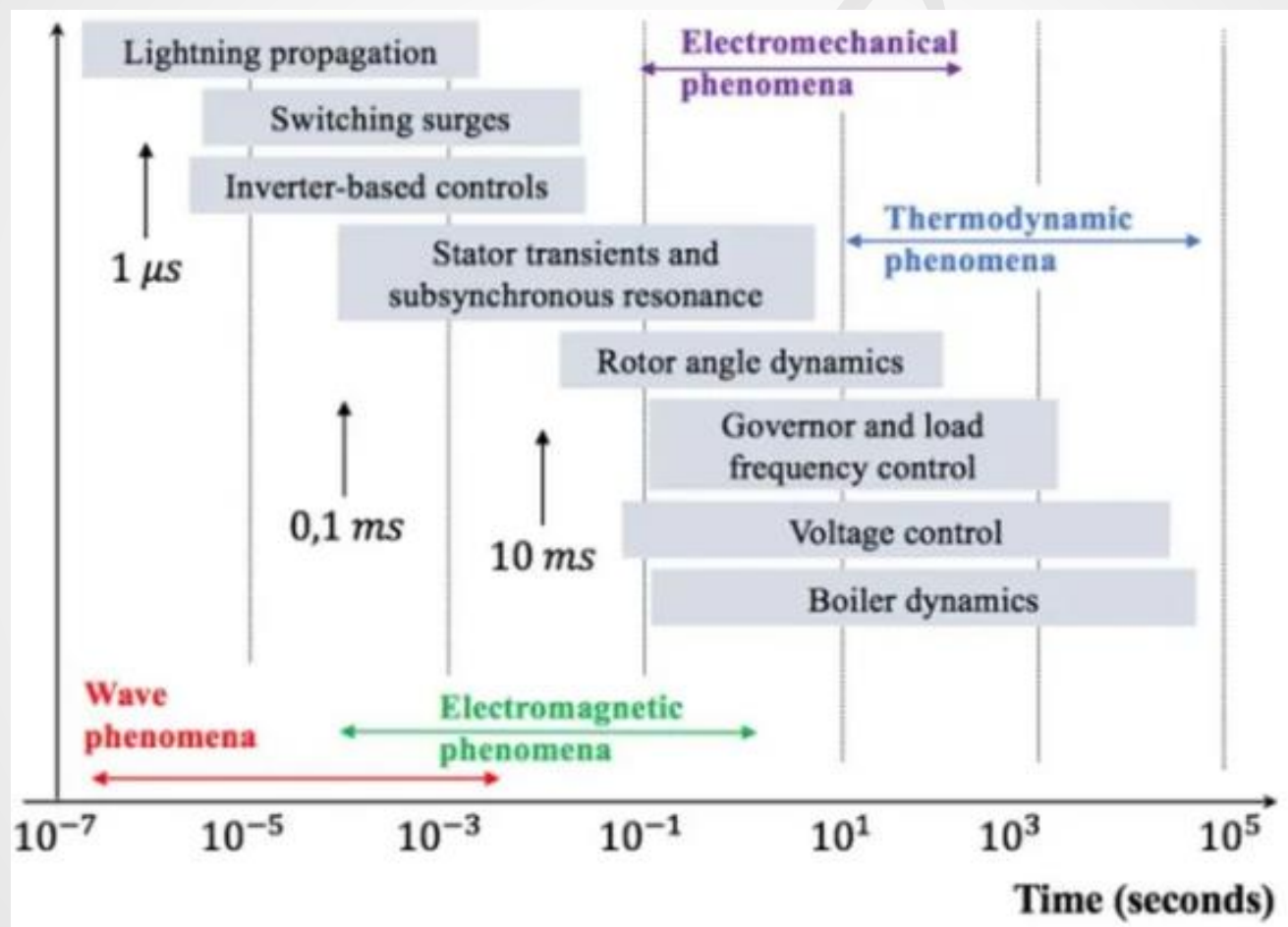
03 电力系统灾变代价过大

必须仿真

谨慎闭环

成也萧何
败也萧何





电力系统动态的时间尺度

不同层次对象在不同时间尺度上的仿真模拟



从功用上看：传统的电力系统仿真只是分析工具 数字孪生以应用为导向



01

增强感知

利用物理规律补充
传感器的不足



02

增强认知

AlphaGO下出
人类从未下过的棋



03

增强智能

训练自动驾驶
所用的虚拟场景

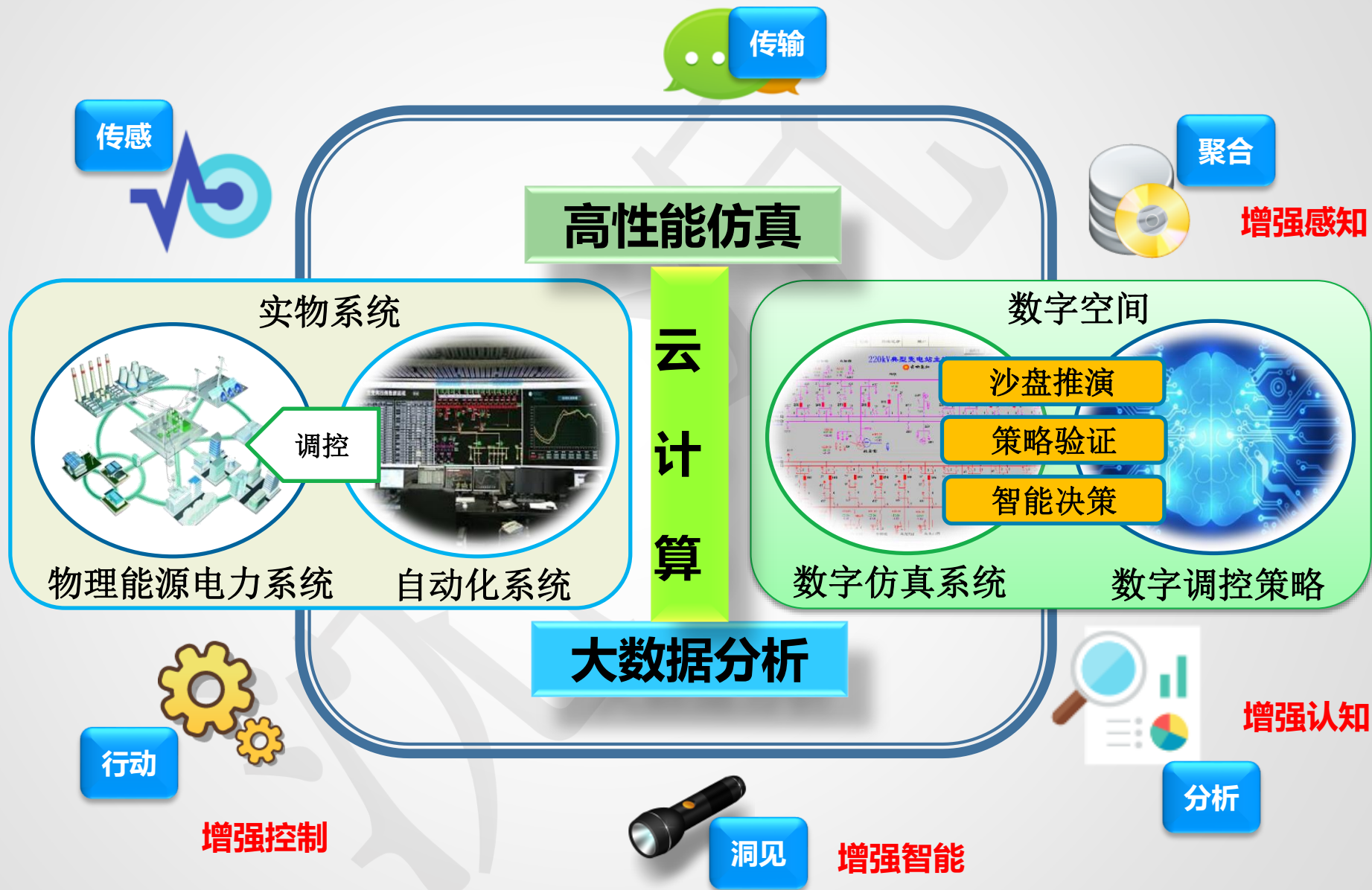


04

增强控制

闭环校正

数字孪生技术支撑的控制闭环



An aerial photograph of a university campus during sunset. The scene features a winding river or canal that reflects the golden light of the setting sun. On the left, there are large, multi-story brick buildings with traditional architectural styles. The right side of the river is lined with lush green trees and a paved path where several people are walking or cycling. In the background, more campus buildings and distant mountains are visible under a dramatic sky with scattered clouds.

03 构建电力系统数字孪生的关键技术



01 对象多层次



02 动态多尺度



03 业务多方面

构造一个统一的电力系统数字孪生服务于众多业务既无必要也无可能！



高性能仿真计算技术

大电网运行



重大需求

- 电力电子设备的加入造成**微秒级~秒级动态的相互影响**;
- 大规模交直流互联造成电网**局部故障影响的大范围传播**;
- 新能源渗透率的不断提高引入**大量不确定性**;
- 亟需**大规模电网高性能（计算规模、计算时间、批量处理能力）电磁暂态仿真工具**。

国防建设



重大需求

- **中压直流供电系统**是适应大型舰船供电的先进独立电力系统;
- **多电和全电化**飞机是未来的发展趋势;
- 空间站供电系统是**采用大量电力电子装置**的独立直流系统;
- 亟需**全数字模拟+控制器在环+功率在环仿真分析工具**;

高性能仿真计算技术

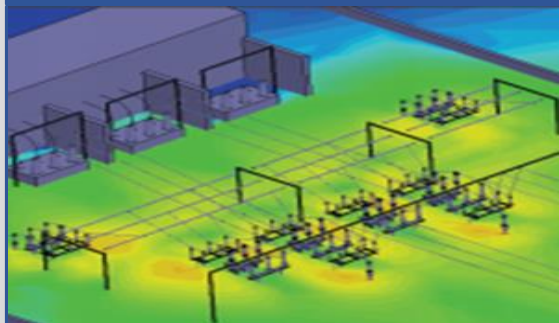
装备制造



重大需求

- 亟需通过大量数字仿真了解不同工况下的设备运行状态并进行一二次设计;
- 亟需通过大量仿真模拟进行设备故障溯因;
- 亟需通过在线多物理场仿真开展设备状态评估与预测性维修;
- 亟需数模混合仿真工具设计并验证装置设计和性能;
- 亟需高效一体化的**数字模拟+数模混合仿真分析工具**。

教学科研



重大需求

- 先进电力电子设备的研究开发需要**ns级的精细仿真**;
- 新型储能设备（如氢燃料电池）的研究开发需要**多物理场及场路耦合仿真工具**;
- 能源互联网的研究需要**跨学科的综合仿真工具**;
- 大范围跨领域的学术研究与交流亟需便捷的**协作共享仿真平台**;

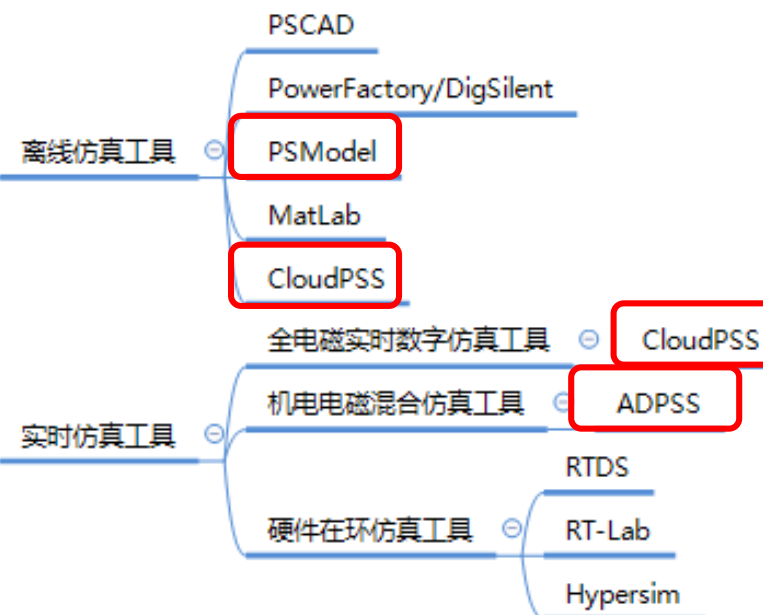
高性能仿真计算技术

面向电力系统与电力电子设备的宽频仿真工具

基于电路原理的
宽频域仿真技术

1. 稳态潮流
2. 中长期动态
3. 机电暂态
4. 电磁暂态
5. 纳秒级动态

电磁暂态仿真工具



商业化的电力系统电磁暂态离线仿真工具、硬件在环仿真工具、电力电子系统纳秒级动态仿真被国外垄断，国产软件在艰难的发展中！

高性能仿真计算技术

面向变电站、换流站及电气设备的多物理场仿真

基于数学模型的电磁场及多物理场仿真技术

- 1. 多物理建模
- 2. 最优计算网格
- 3. 多物理耦合机理
- 4. 多物理场软件
- 5. 增材制造设计打印

多物理场软件工具

国外软件

- ANSYS (HFSS, Maxwell, WorkBench)
- COMSOL
- Altair (Flux)
- CST Studio Suite
- JMAG, Infolytica
- FreeFem++, Elmer (开源)

国产软件

- 英特仿真-单场求解模块功能不完善，耦合场求解功能缺乏基准测试
- 云道智造-手机端云仿真，国内首创，起步较晚，产品功能不成熟
- 元计算-缺乏电磁场专用单元，前处理依靠国外软件

高性能仿真计算技术

场路协同仿真

- ❑ 燃料电池工作在恒定工况条件下，边界条件时不变，“场”和“路”可解耦优化
- ❑ 燃料电池工作在变工况条件下，边界条件时变，“场”和“路”难以解耦优化

燃料电池参数寻优

基于路描述的燃料电池工艺流程

基于场描述的燃料电池电堆结构

动量传递 $\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{G} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u})$

热量传递 $\frac{\dot{q}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{DU}{Dt} + p \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \frac{\Phi}{\rho}$

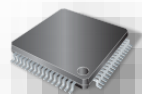
质量传递 $\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

化学反应过程 Nernst方程，B-V方程

参数寻优空间 = 场的参数空间 × 路的参数空间，亟需“路”与“场”迭代优化的新型软件！³⁴

高性能仿真计算技术

基于芯云边协同架构
的电力仿真专用设备



电力仿真专用加速芯片



电力仿真专用主机



电力专用仿真集群

高性能电磁暂态仿真软件

多物理场在线仿真软件

场/路协同优化软件

电力系统实时仿真软件

实时操作系统

大容量功率发大器

高性能仿真计算技术



目标一

实现大规模电力系统硬件在
环仿真设备的完全**自主化**

目标二

实现数字仿真与半物理仿真
的**一体化**

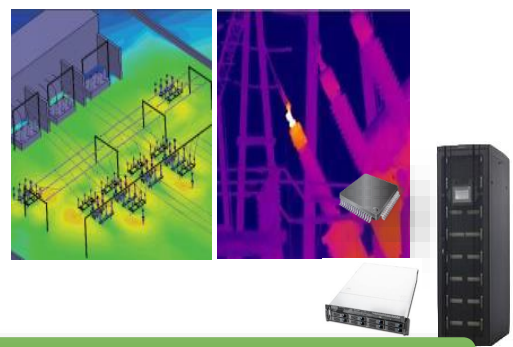
目标三

实现多物理场仿真的**在线化**

目标四

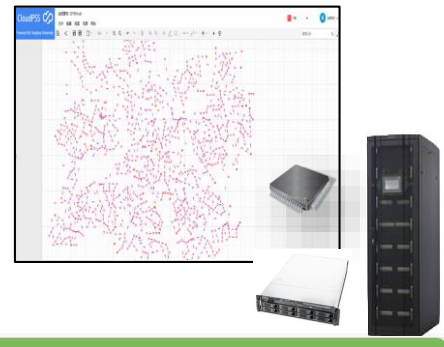
实现场/路仿真的**协同化**

变电站多物理场仿真



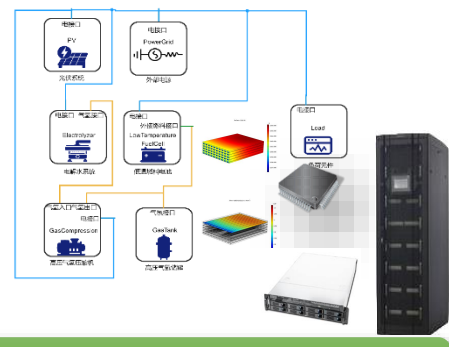
多物理场在线仿真软件

电网全电磁暂态仿真



高性能电磁暂态仿真软件

综合能源系统场/路协同优化



场/路协同优化软件

边缘侧应用数字孪生



电气设备



功率放大器



硬件在环仿真接口



硬件在环仿真服务器

实时操作系统

电力系统实时仿真软件

边缘侧应用硬件在环仿真



云仿真平台：协同共享

04 电力系统数字孪生技术实践

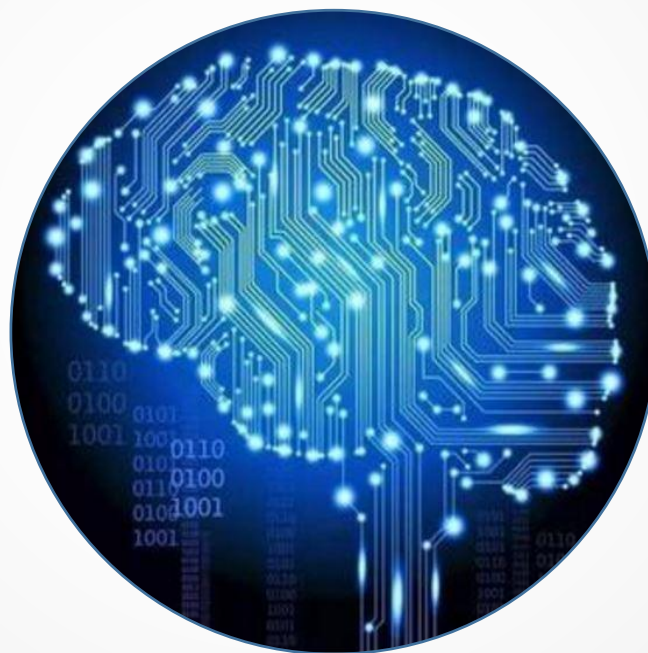


增强感知

基于场路联合仿真的电气设备电磁场分布在线计算

增强智能

基于场/路协同仿真优化
氢燃料电池设计



增强认知

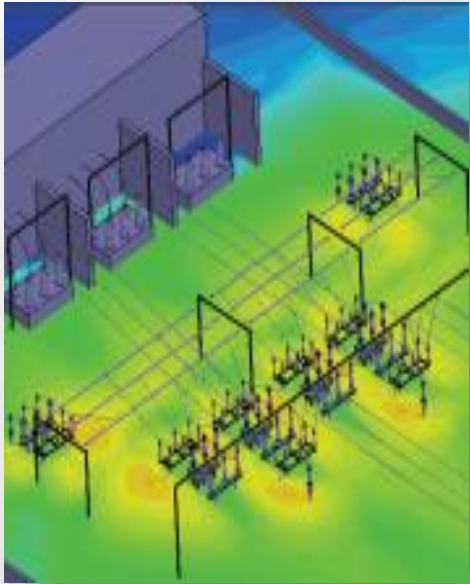
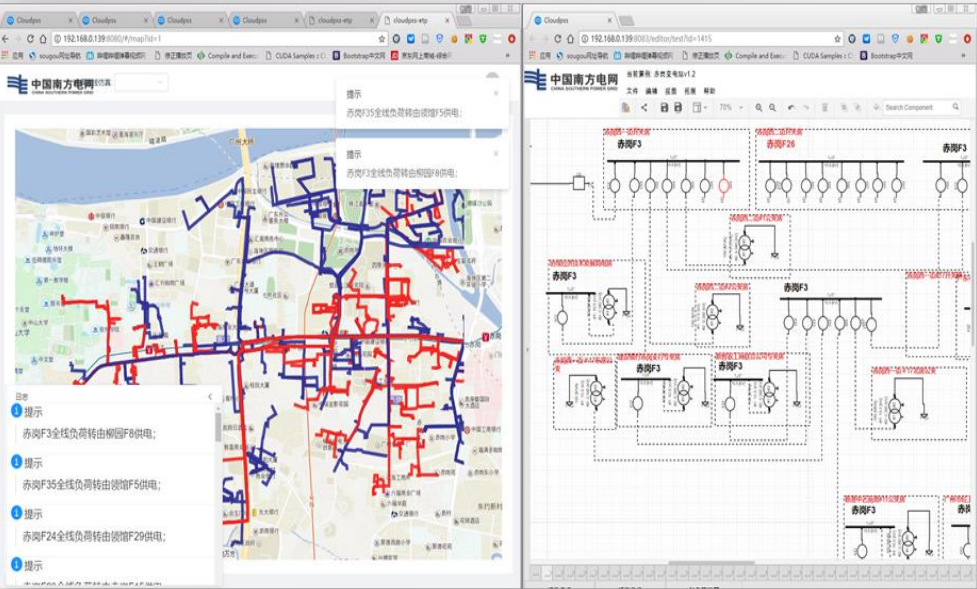
基于仿真数据挖掘的连锁故障模式分析与预测

增强控制

基于仿真校核的黑启动策略在线生成

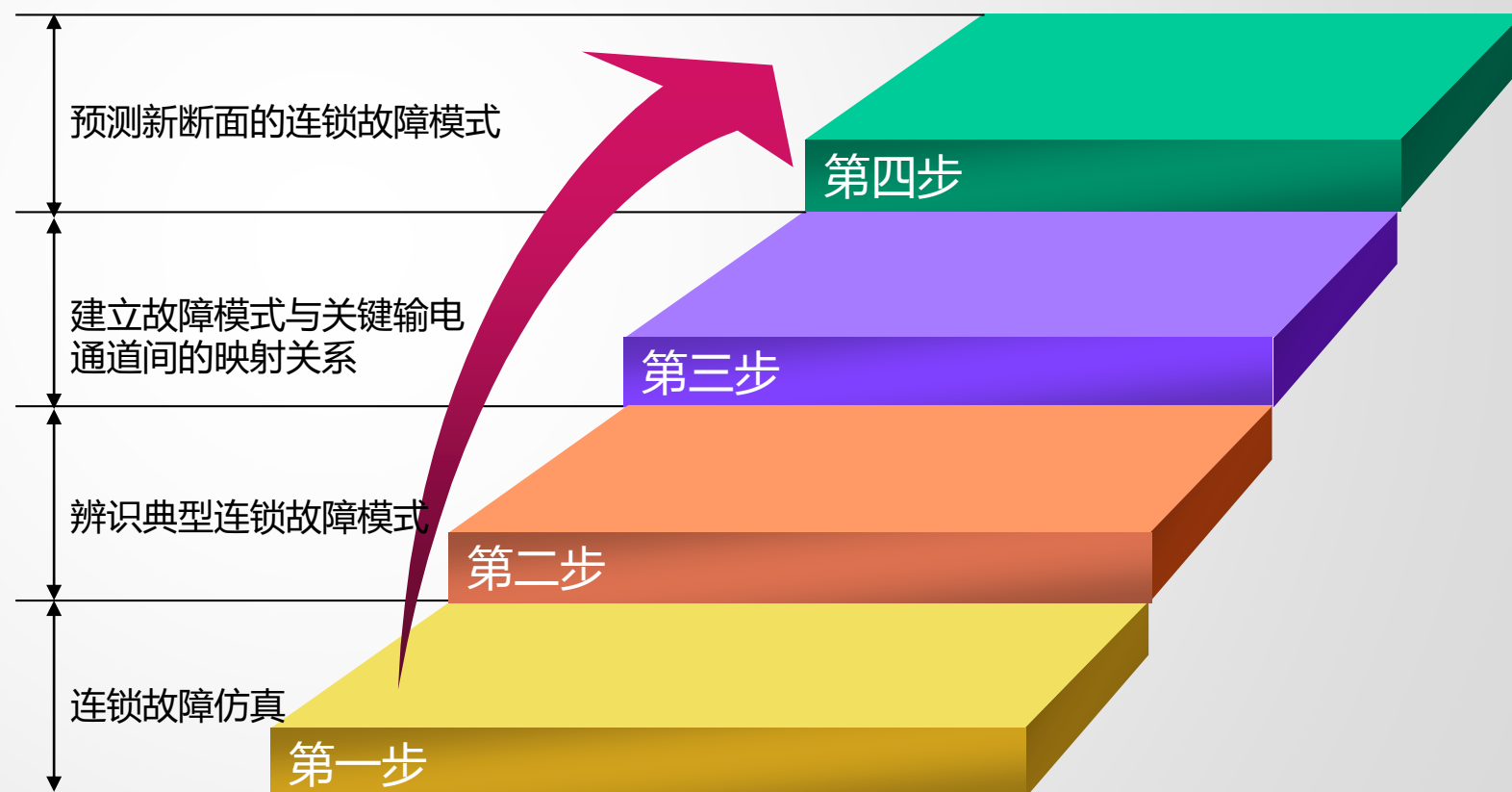
增强感知

基于场路联合仿真的电气
设备电磁场分布在线计算



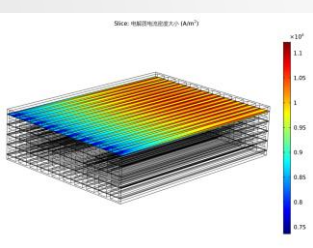
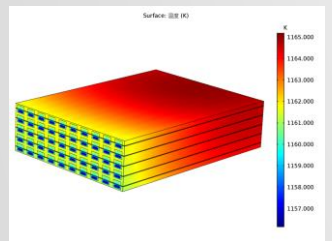
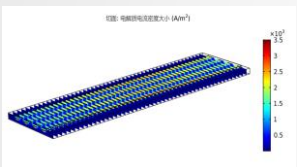
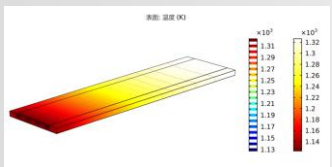
增强认知

基于仿真数据挖掘的连锁故障模式分析与预测

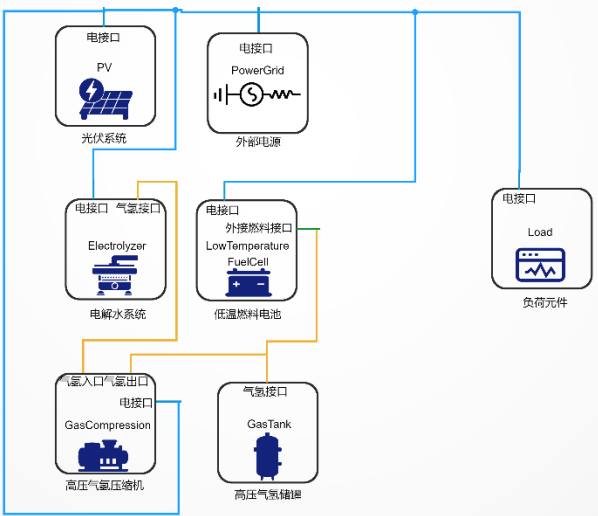


增强智能

基于场/路协同仿真优化 氢燃料电池设计

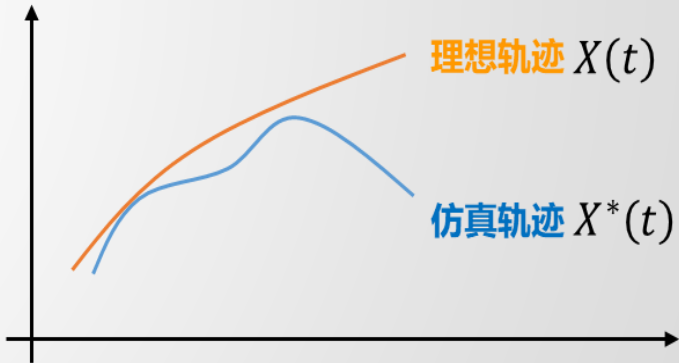


氢燃料电池多物理场仿真



氢能综合利用系统

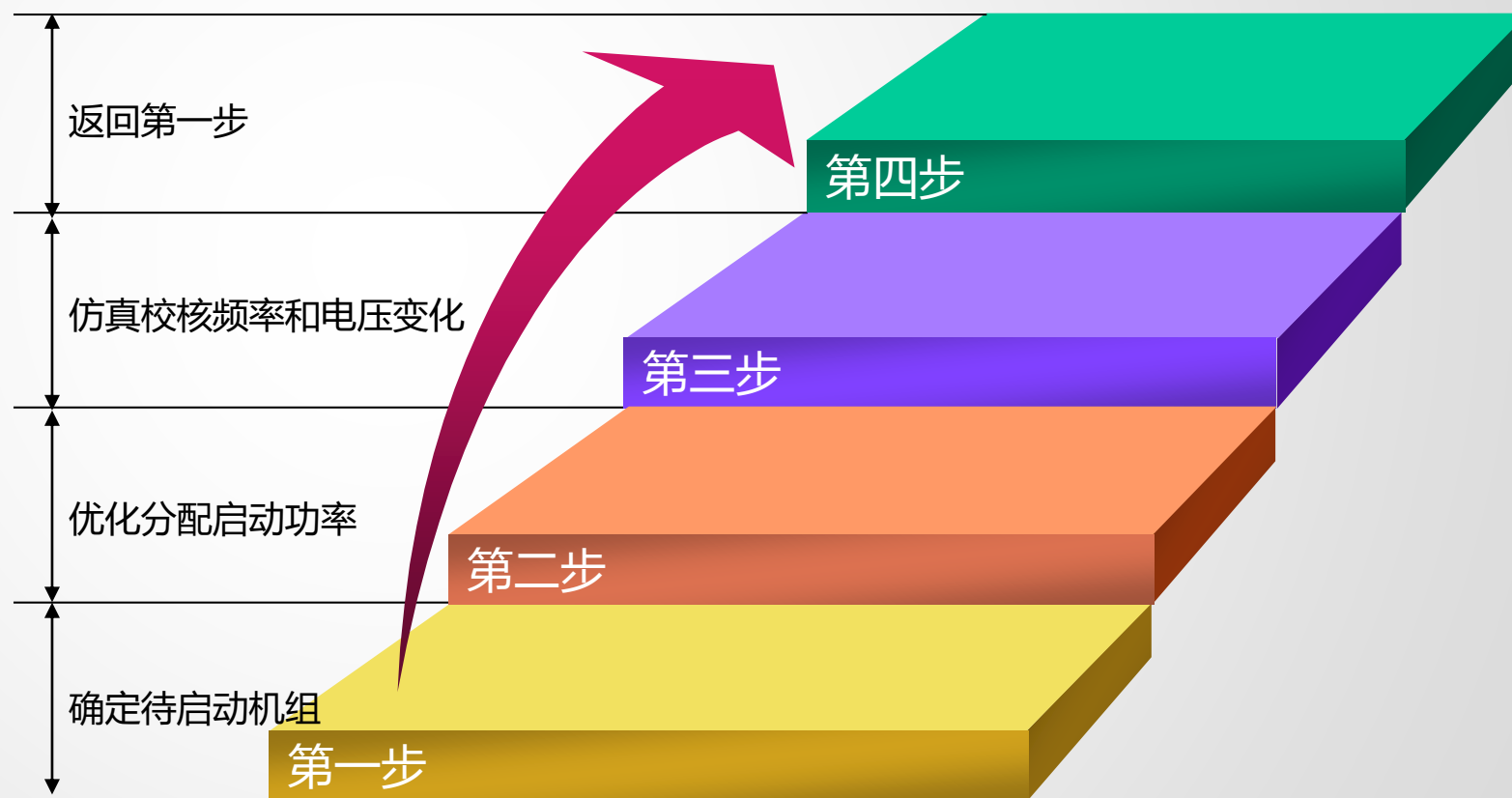
$$\min_{t \in \Omega} \|X(t) - X^*(t)\|$$



场/路协同优化目标

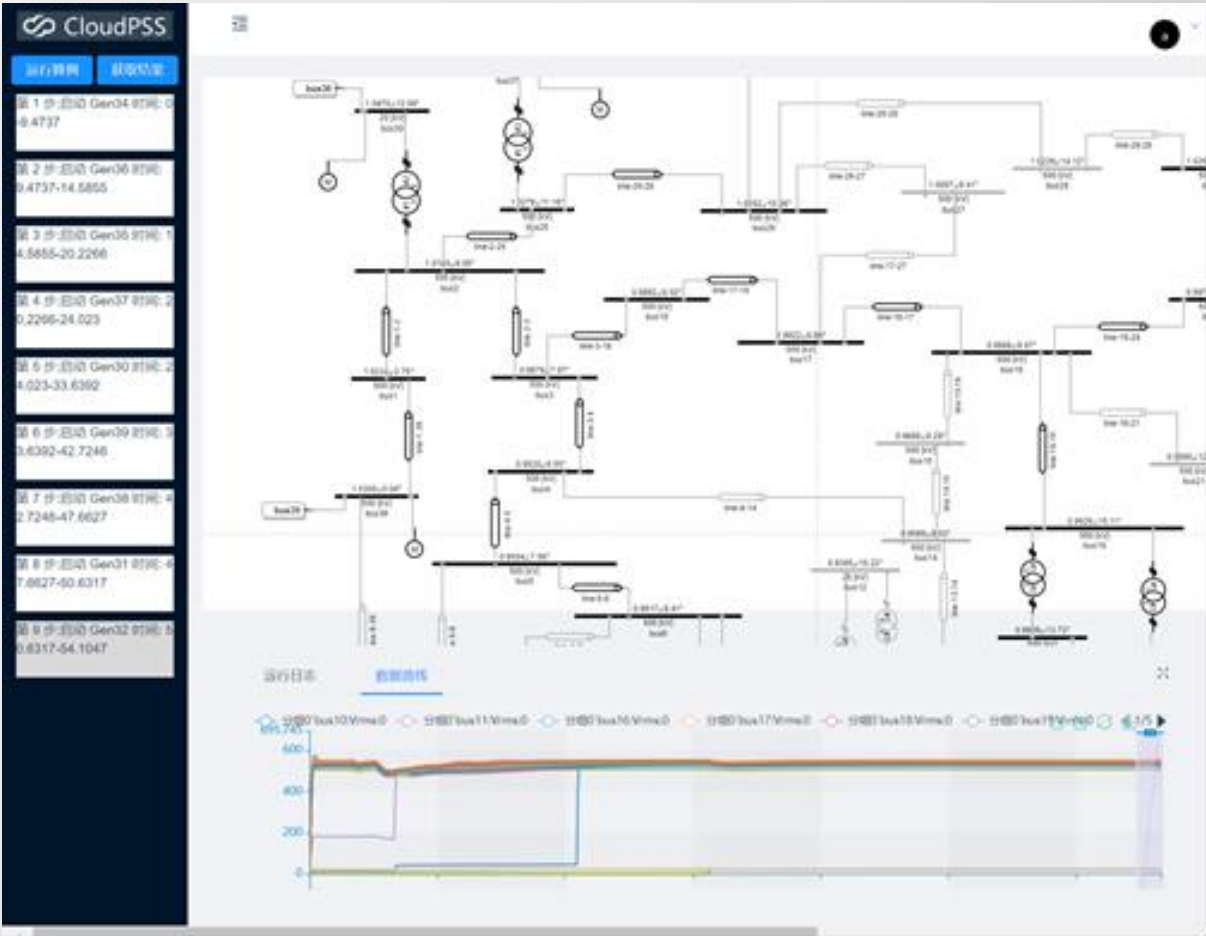
增强控制

基于仿真校核的黑启动策略在线生成



增强控制

基于仿真校核的黑启动策略
在线生成



Cloudpss平台：黑启动电磁仿真界面

- 1 数字孪生技术的核心是建模与仿真
- 2 电力系统不可能构建一个统一的数字孪生体
- 3 数字孪生技术在电力系统中的应用应该以业务为导向
- 4 数字孪生技术可以提升对电力系统的认识和管理水平



电机工程与应用电子技术系

Department of Electrical Engineering



谢谢！

Digital Twin Technology for a New Type of Power Systems



沈 沉



2021年5月18日