











基于云计算的电力系统 高性能仿真

chen_ying@tsinghua.edu.cn 陈颖



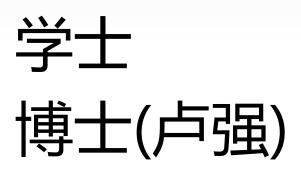
- ■学习经历
 - 1997.9~2001.7
 - •2001.9~2006.7
- 清华大学 电机系 学士 清华大学 电机系 博士(卢强)

•工作经历

- •2006.8~2010.12 电力系统所 助研
- •2010.12~2019.12 电力系统所 副教授
- •2019.12~至今
- •2013.7~2014.7
- •2004.1~2004.3
- 电力系统所 教授 美国华盛顿州立大学访学
- 英国Brunel大学 访学

●科研兴趣

- •和计算有关的: 电力系统高性能仿真、并行计算和数字孪生等
- •和信息有关的:电力信息物理融合机理和安全博弈
- •和优化有关的: 配电网韧性防御机制, 人工智能决策方法













· 未来电网物理特征:

≻高度电力电子化

≻高比例可再生能源















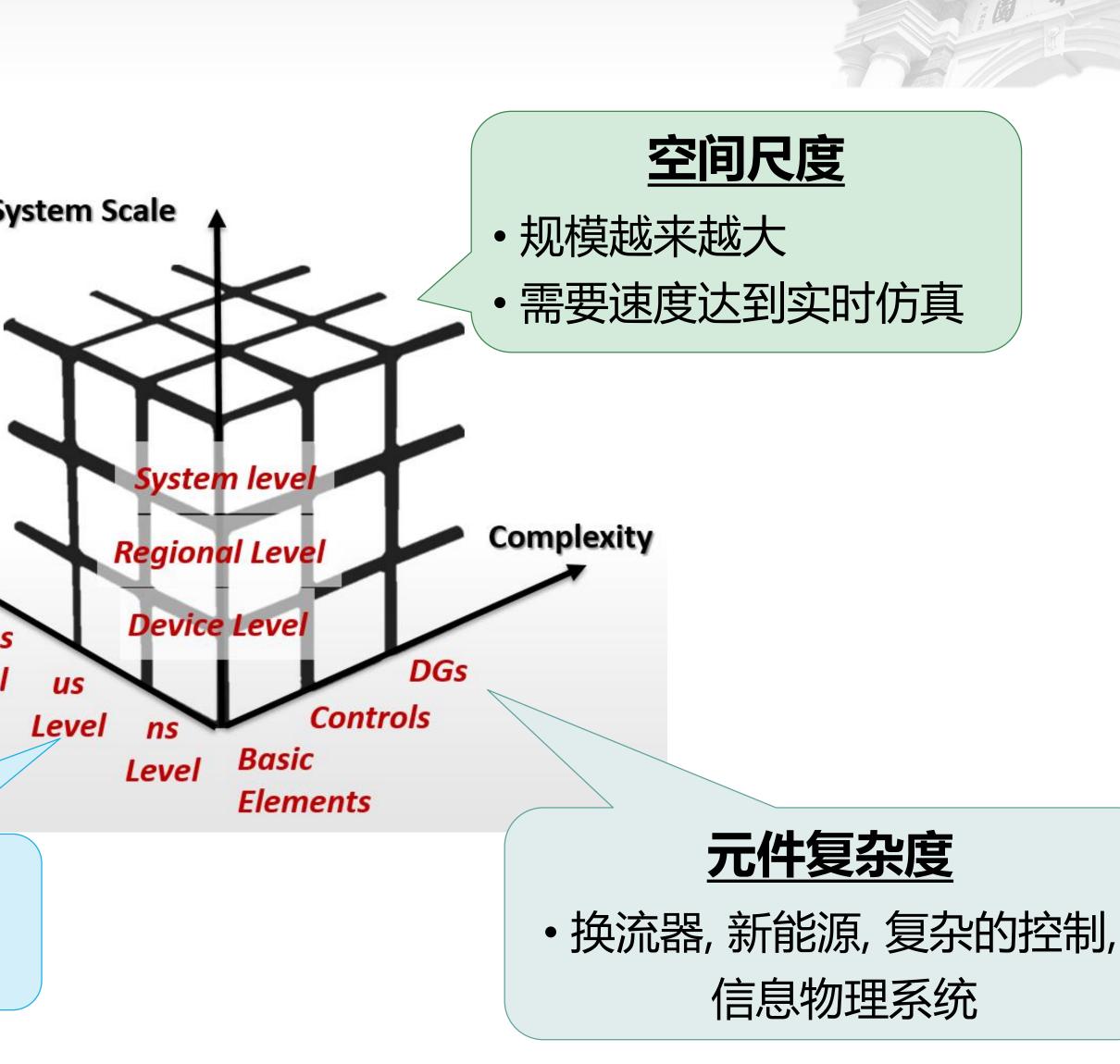
· 未来电网数学模型的特征:

S	未来电网的模型
	多时间尺度的暂态
Time Scale	高度的非线性
100us Level	规模越来越大

时间尺度

• 多种时间尺度暂态交织





如何分析如此复杂的电力系统的暂态过程?

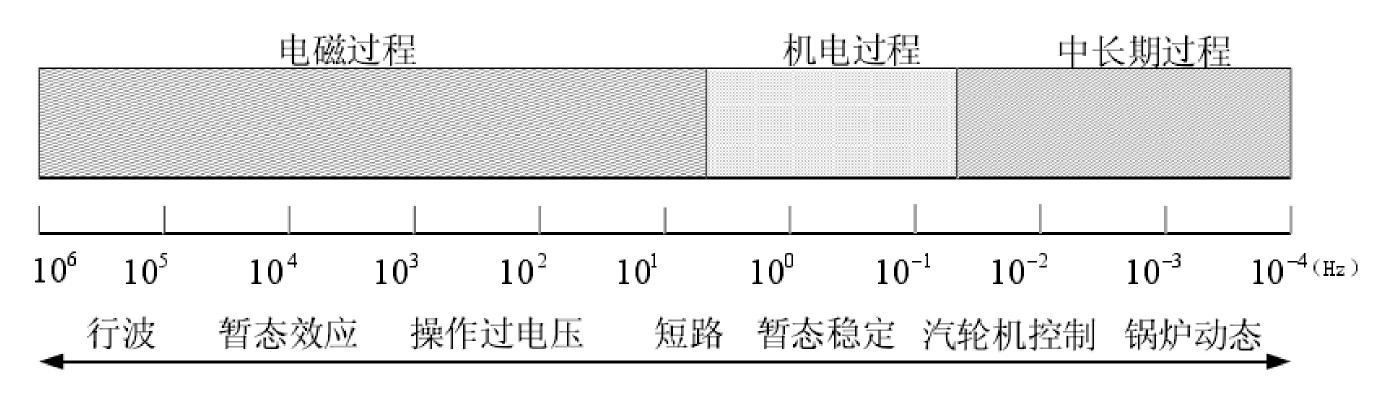


1.2 电磁暂态过程

根据暂态过程所涉及的能量转换过程,系统的暂态过程分为**机电暂态过程**和**电磁暂态过程**。

- **机电暂态过程**:由于发电机或电动机的电磁转矩变化而引起的电机转子机械运动的改变, 主要涉及到电机的机械能和电网的电能之间的相互作用;
- **电磁暂态过程:**由电场能量和磁场能量相互作用引起的电压电流变化,电磁暂态过程通常 是微秒级到秒级的。

电磁暂态过程和机电暂态过程的频率范围如下



系统时间尺度跨度如此大,如何评估系统的稳定性和安全性?

▶ 解析方法 x

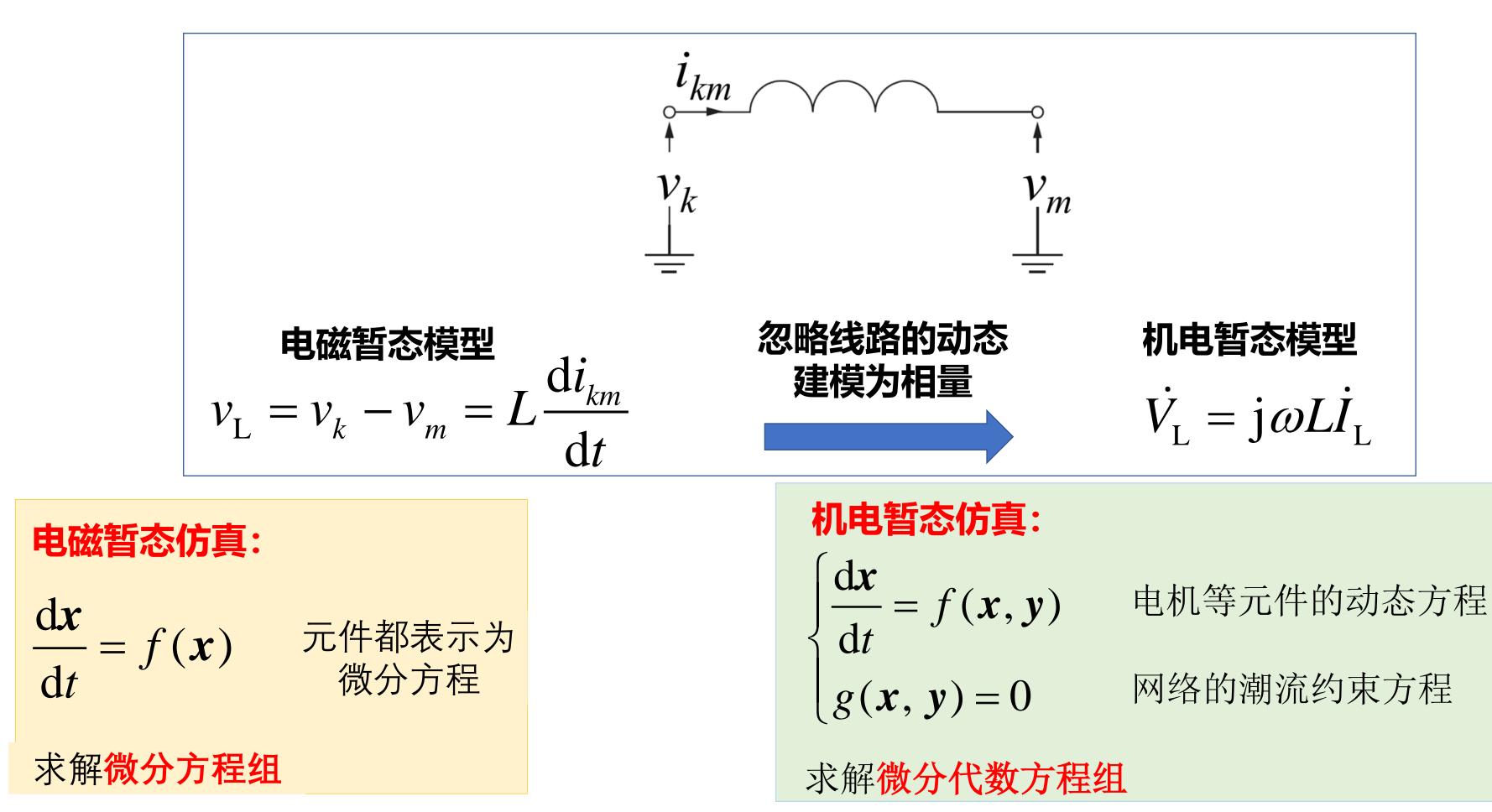
▶ 时域仿真方法 √



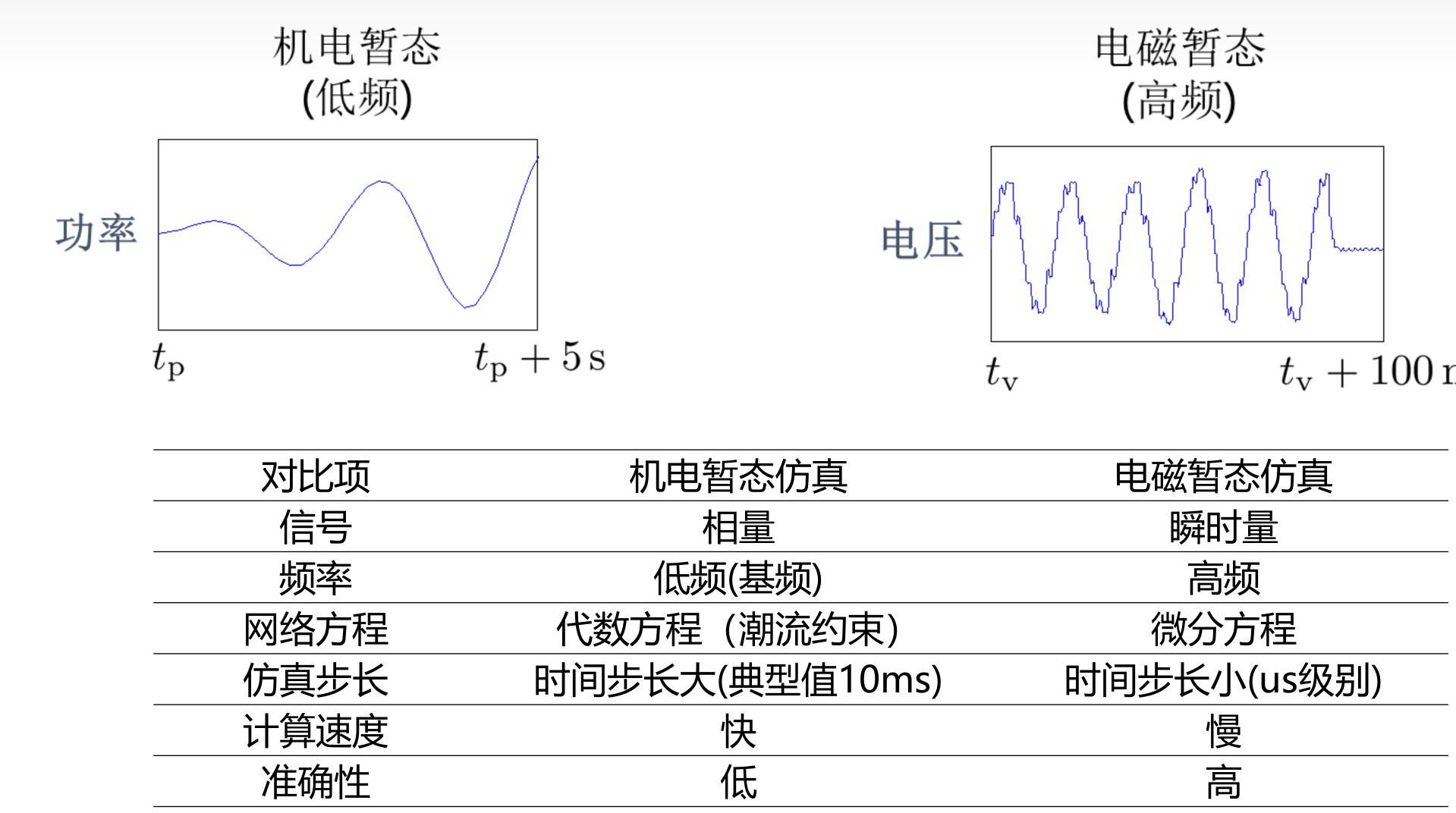
1.3 电力系统时域仿真方法

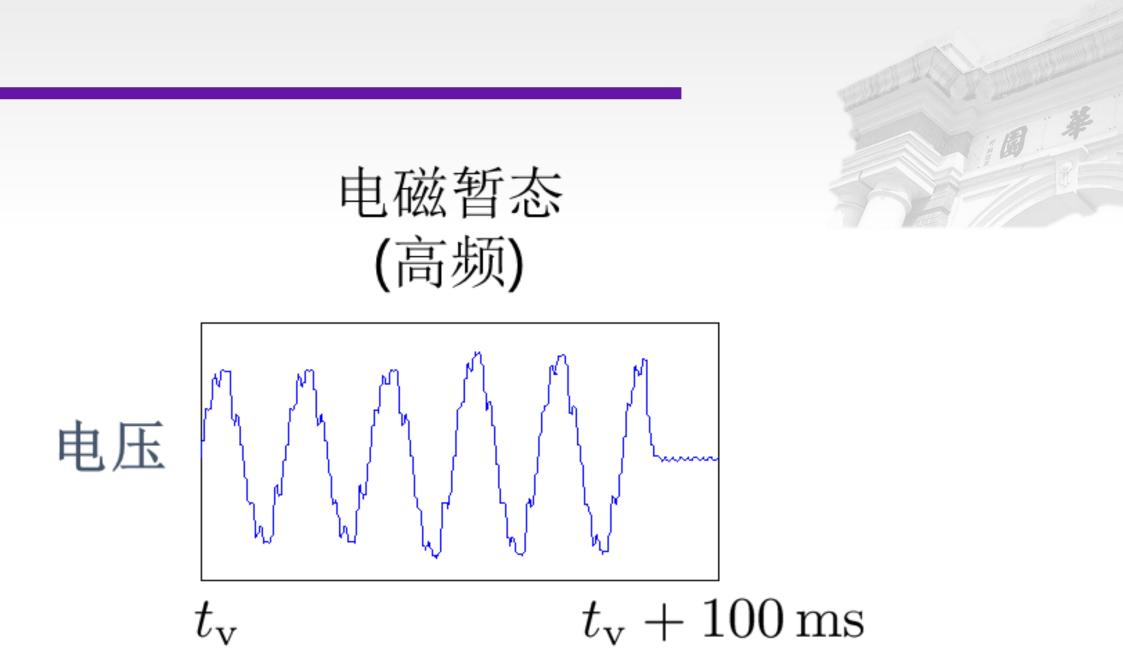
dx

- > 电力系统的各元件的动态都可以用微分方程表示, 系统可以建模一个为微分方程组。电力系统时域仿 真就是为系统的微分方程组提供在一些离散时间点的解。
- > 电力系统时域仿真方法可以分为电磁暂态仿真和机电暂态仿真,下面以线路电感为例简单介绍电磁暂态仿真 和机电暂态仿真的区别。



1.3 电力系统时域仿真方法





只有使用电磁暂态建模和仿真才能准确刻画电力电子化电力系统的暂态过程

1.4 电磁暂态仿真基本原理

・求解方法

状态变量分析法:

- ▶ 主要思想:利用系统状态变量的数值积分来得到状态变量的值。 → $\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$
- ▶ 缺点:确定状态变量的独立性困难,尤其是系统较大的时候尤其困难。方程的维度高,求解效率低。状态变量分析方法的程序复杂冗长,不易维护。
 ▶ 代表软件: MATLAB/Simulink

节点分析法:

- 主要思想:将待求解的微分方程组转换为差分方程组求解。将各个支路上的元件用一个诺顿等效支路来代替。这一操作是针对单个元件进行的,而不像状态变量分析法那样将整个微分方程组作为一个整体进行差分化。
- > 优点: 简单、高效
- ▶ 代表软件: EMTP、EMTP-RV、PSCAD/EMTDC
- > 梯形法数值稳定性好,在差分方程法中被广泛用于差分化(离散化)微分方程。



1.4 电磁暂态仿真基本原理

基于梯形法的电磁暂态仿真

电感 $v_L = v_k - v_m = L \frac{di_{km}}{dkm}$ 微分方程 $i_{km(t)} = i_{km(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} \left(\left(v_k - v_m \right)_{(t)} + \left(v_k - v_m \right)_{(t)} \right) \right)$ 离散化 $i_{km}(t) = I_{hL}(t - \Delta t) + G_{L}(v_{k}(t) - v_{m}(t))$ 差分方程 $G_{\rm L} = \frac{\Delta t}{2L}$ $I_{\rm hL}(t-\Delta t) = i_{km}(t-\Delta t) + G_{\rm L}(v_k(t-\Delta t) - v_m)$ $I_{\rm hL}(t-\Delta t)$ 诺顿电路 $i_{km}(t)$ $v_k(t)$ G_{L} $v_m(t$ 其他元件也可以通过类似方法转化为诺顿等效电路。

➢ 将各个元件支路表示为诺顿等效电路后,就可以建立网络的节点方程。 对网络方程循环循环求解,就可以获得系统的仿真结果,循环的时间从0开始到给定的终止时间结束。

电容

$$i_{km}(t) = C \frac{d(v_k(t) - v_m(t))}{dt}$$

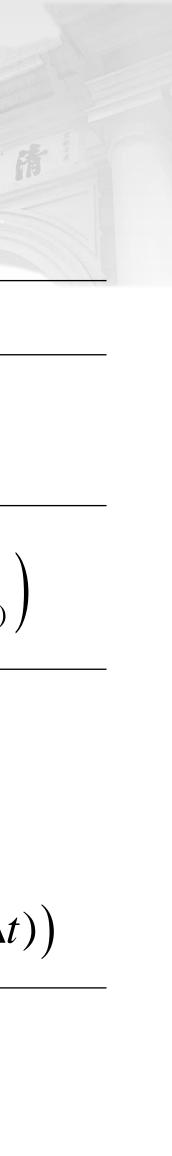
$$v_m)_{(t-\Delta t)} \qquad i_{km(t)} = i_{km(t-\Delta t)} + \frac{2C}{\Delta t} ((v_k - v_m)_{(t)} + (v_k - v_m)_{(t-\Delta t)})$$

$$i_{km}(t) = I_{hC} (t - \Delta t) + G_C (v_k(t) - v_m(t))$$

$$G_C = \frac{2C}{\Delta t}$$

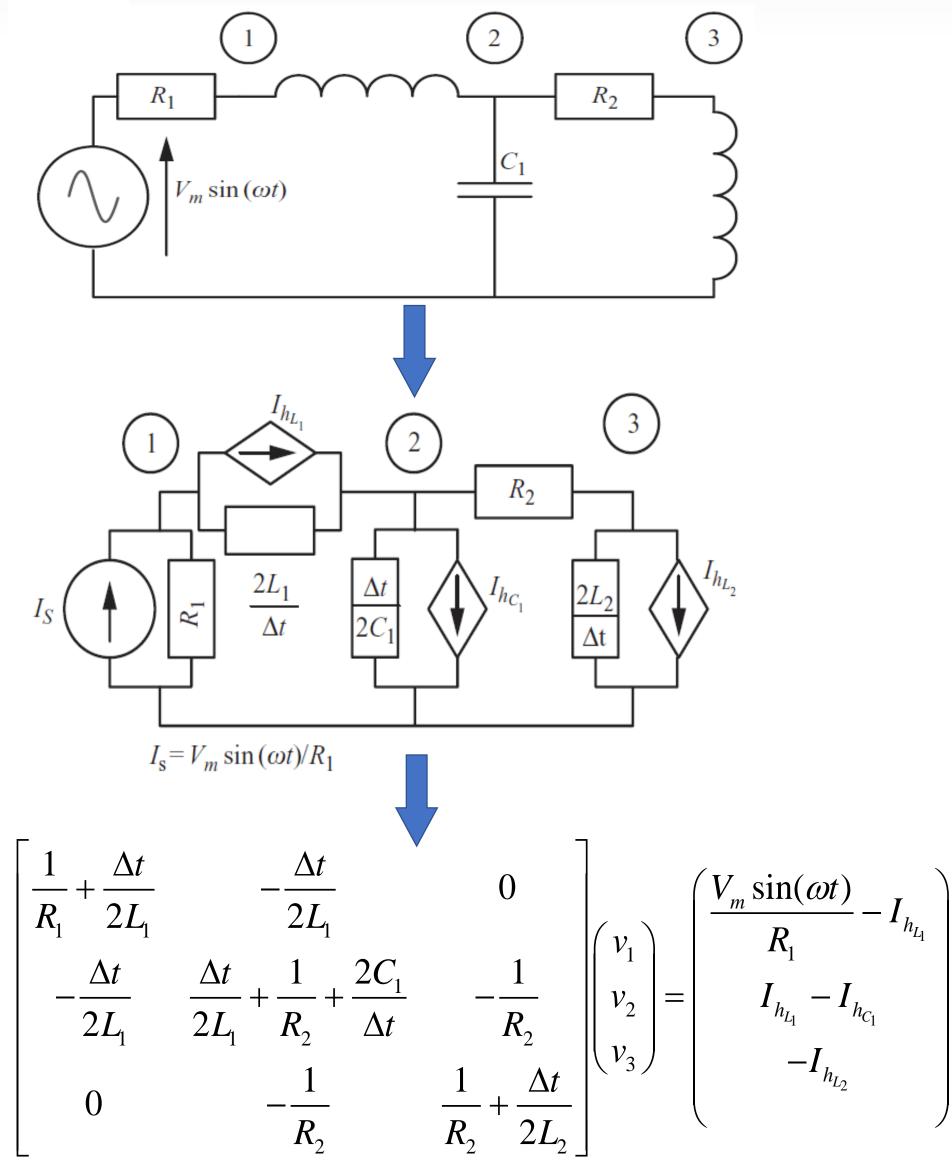
$$I_{hL} (t - \Delta t) = i_{km} (t - \Delta t) + G_C (v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t))$$

$$I_{hL} (t - \Delta t) = i_{km} (t - \Delta t) + G_C (v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t))$$



1.4 电磁暂态仿真基本原理

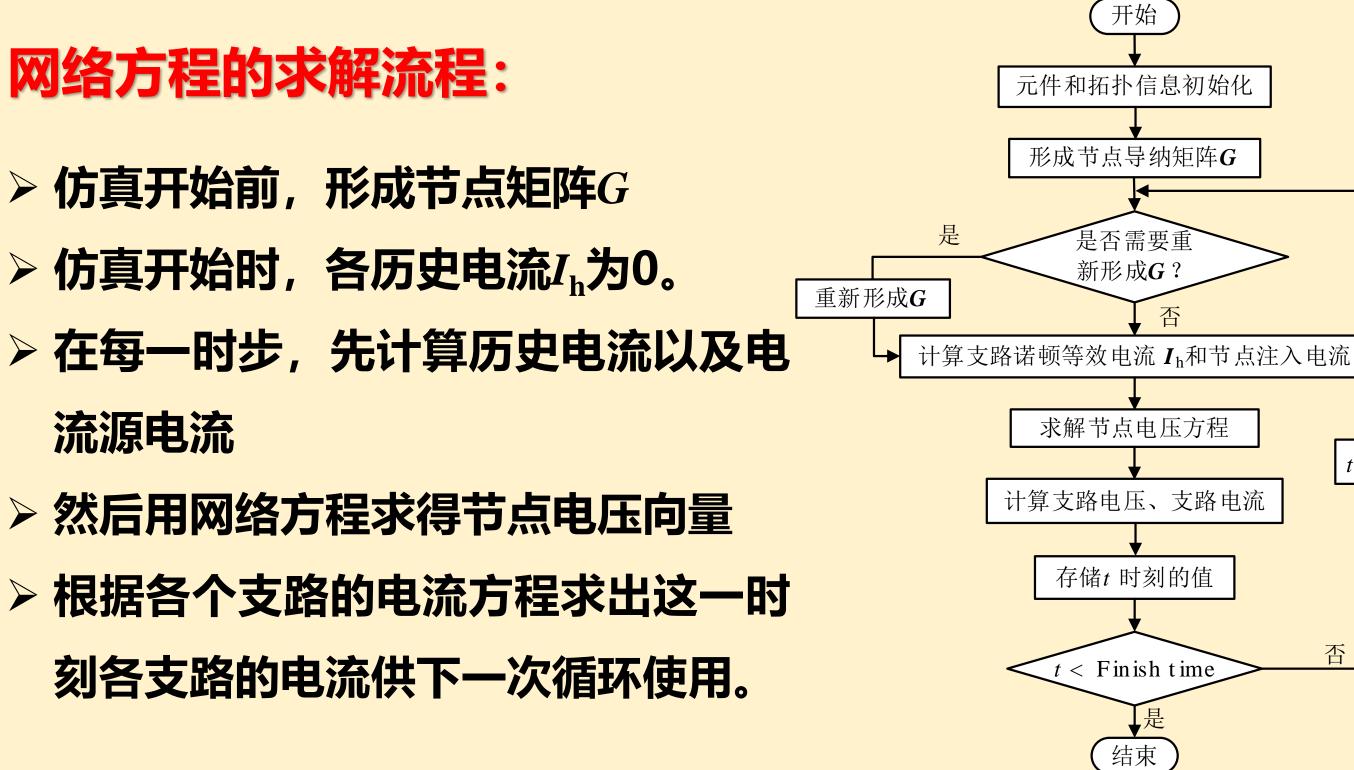
网络方程的建立和求解





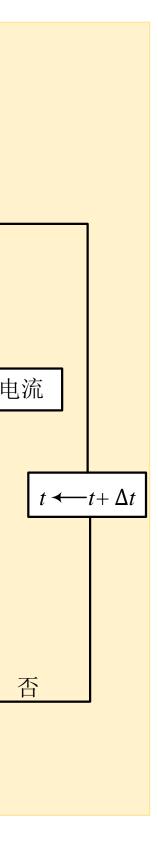


$GU(t) = I_h + i(t)$ (网络方程)



节点分析方法优势:导纳矩阵基本不变或结构基本不变,且高度 稀疏,可以运用稀疏技术、GPU计算等进行加速







1.5 电磁暂态仿真研究现状

未来电力系统的电磁暂态模型具有复杂性高、非线性强、维度高等特点,这使 得现有的电磁暂态仿真工具在进行计算分析时存在如下问题:

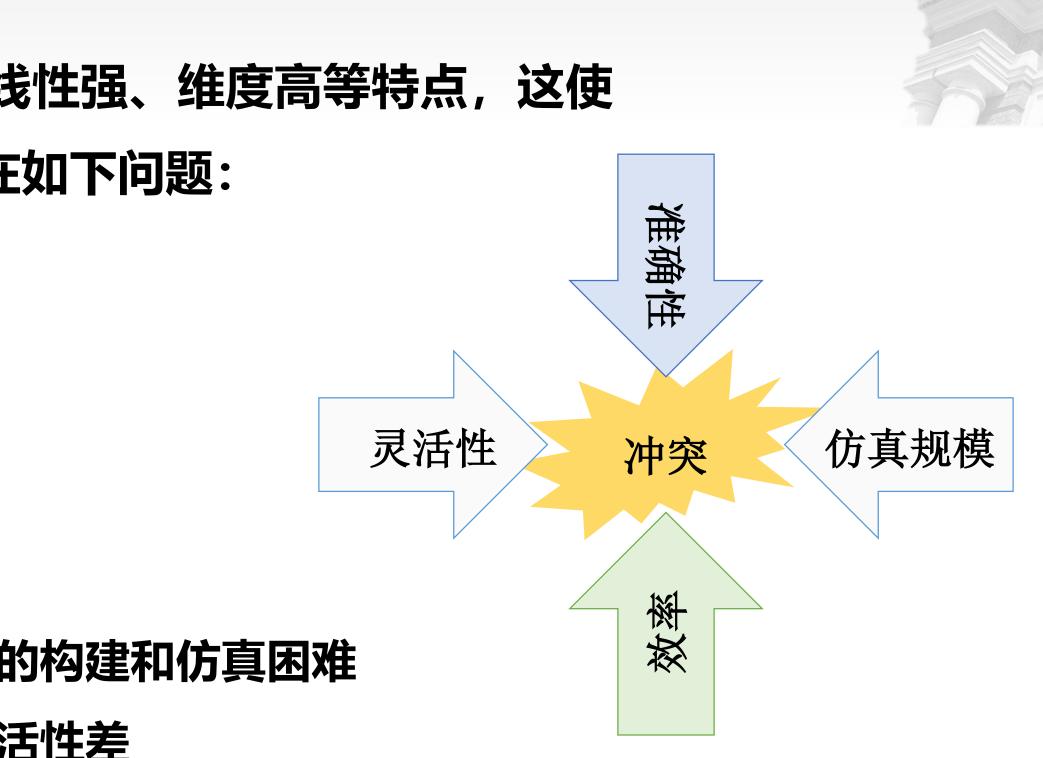
≻ 准确性和效率难以同时保证

采用小步长时,准确性高,但效率低 采用大步长时,效率高,但准确性差

> 灵活性和仿真规模难以同时保证

传统离线商业仿真工具硬件受限,大规模算例的构建和仿真困难 采用高性能仿真器,又依赖专有仿真平台,灵活性差

- 为了解决**准确性**和**效率**之间的矛盾,研究了**可采用大步长的电磁暂态仿真技术**
- 为了进一步提升效率,研究了基于GPU加速的电磁暂态并行仿真技术,该技术也可一定程度 解决灵活性和大规模仿真之间的矛盾
- 为了彻底解决**灵活性性**和**仿真规模**之间的矛盾,研究了**基于云计算的电磁暂态仿真技术**



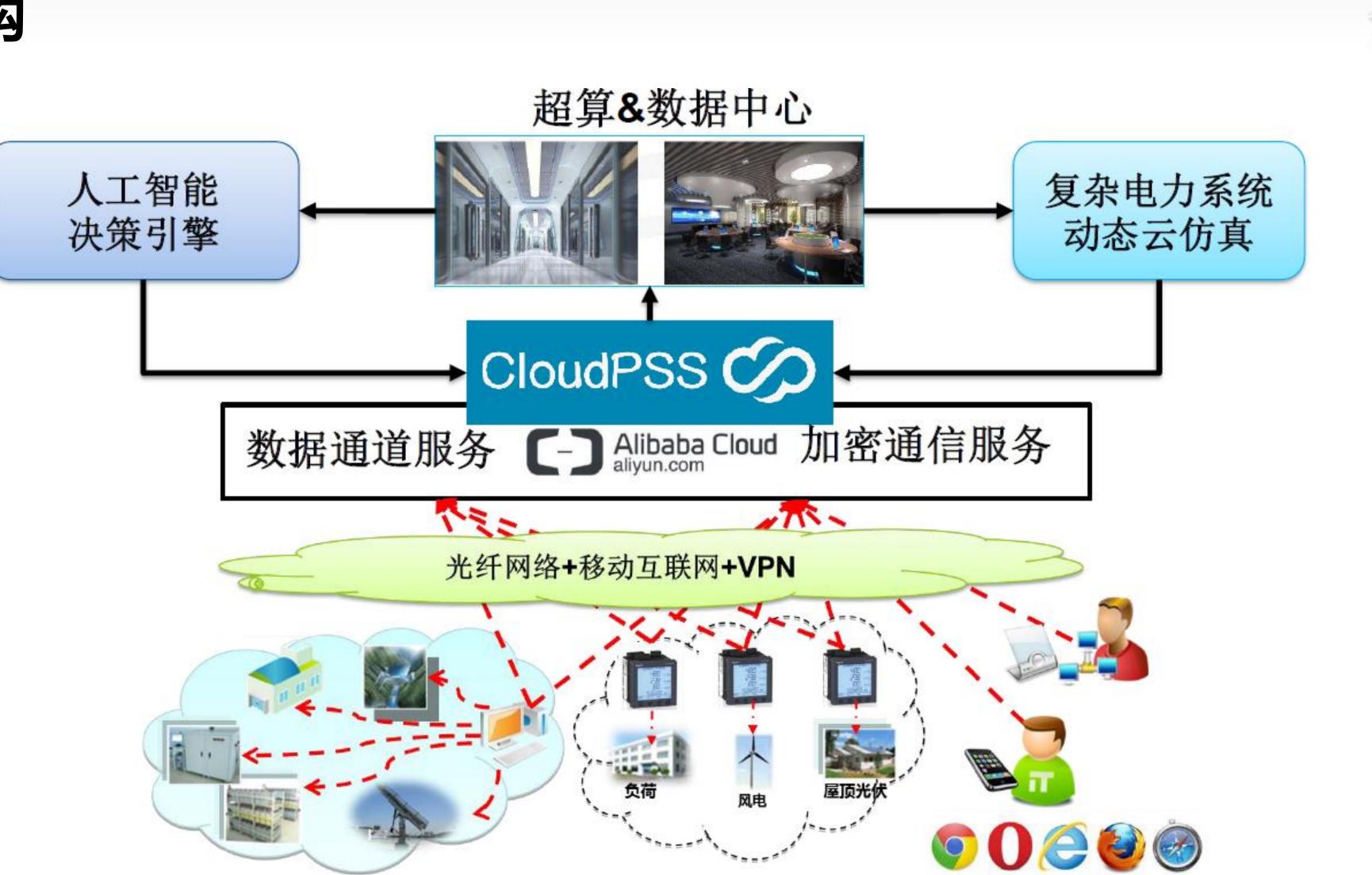


二、基于云计算的电力系统高性能仿真









2.1 高性能云仿真平台(CloudPSS)

• 访问方法

打开网页即刻使用CloudPSS的云仿真功能

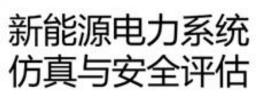






柔性直流系统 电磁暂态仿真











压缩空气储能仿真

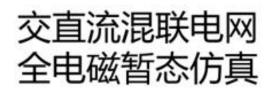


大型风电场仿真





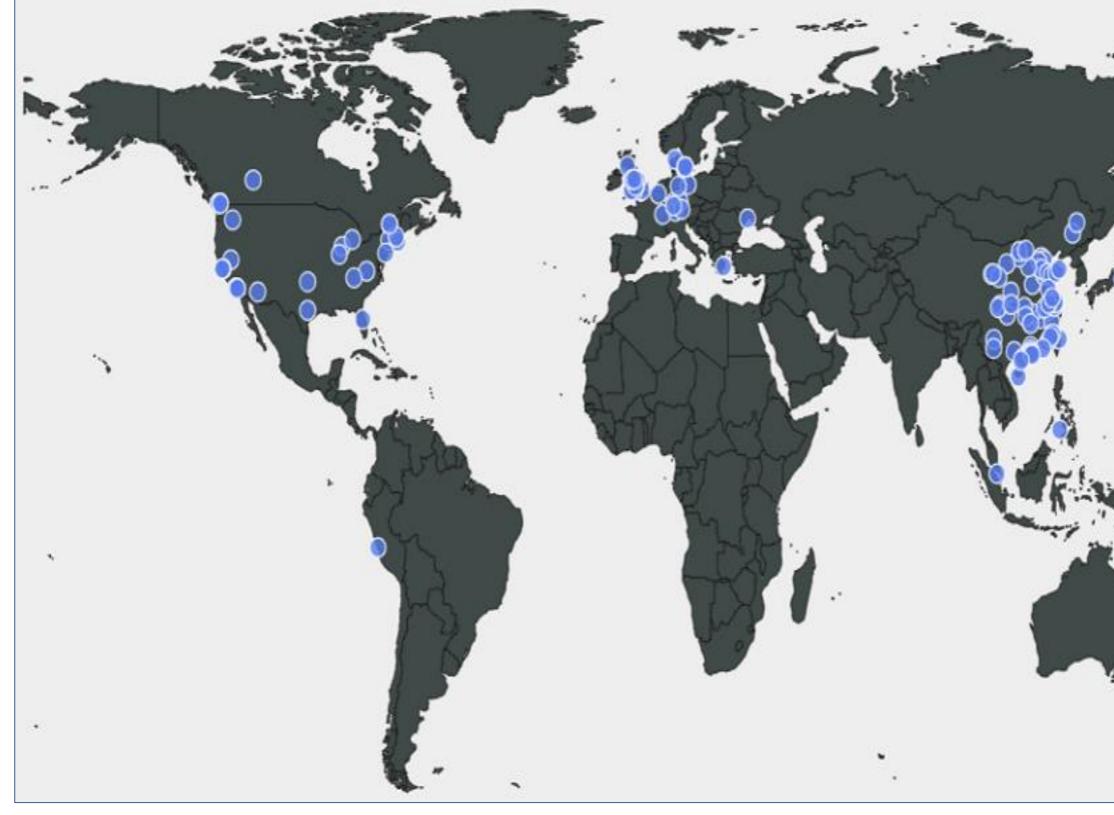




2.1 高性能云仿真平台(CloudPSS)

● 用户分布 ▶国内外50多所高校和机构,4000多用户

用户分布图







• 交流系统多时间尺度移频建模技术

						理论证	鱼用性
	代表软件	建模理论	数学基础	建模精度	仿真步长	弱非线性暂态 (如: 饱和特性)	强非线性暂态 (如: 开关过程)
	PSCAD	电磁暂态	时域分析	无损	」	能	能
	BPA	机电暂态		有损	大	不能	不能
	PSCAD兼容	动态相量	傅里叶	有损	大	部分能	不能
支持上述各类 建模技术		平均化	分析	有损	大	部分能	不能
	PSCAD兼容	频域拟合		有损	不确定	部分能	不能
	FAST	移频分析	希尔伯特 变换	无损	灵活	能	能
	1/711-11			A I •			

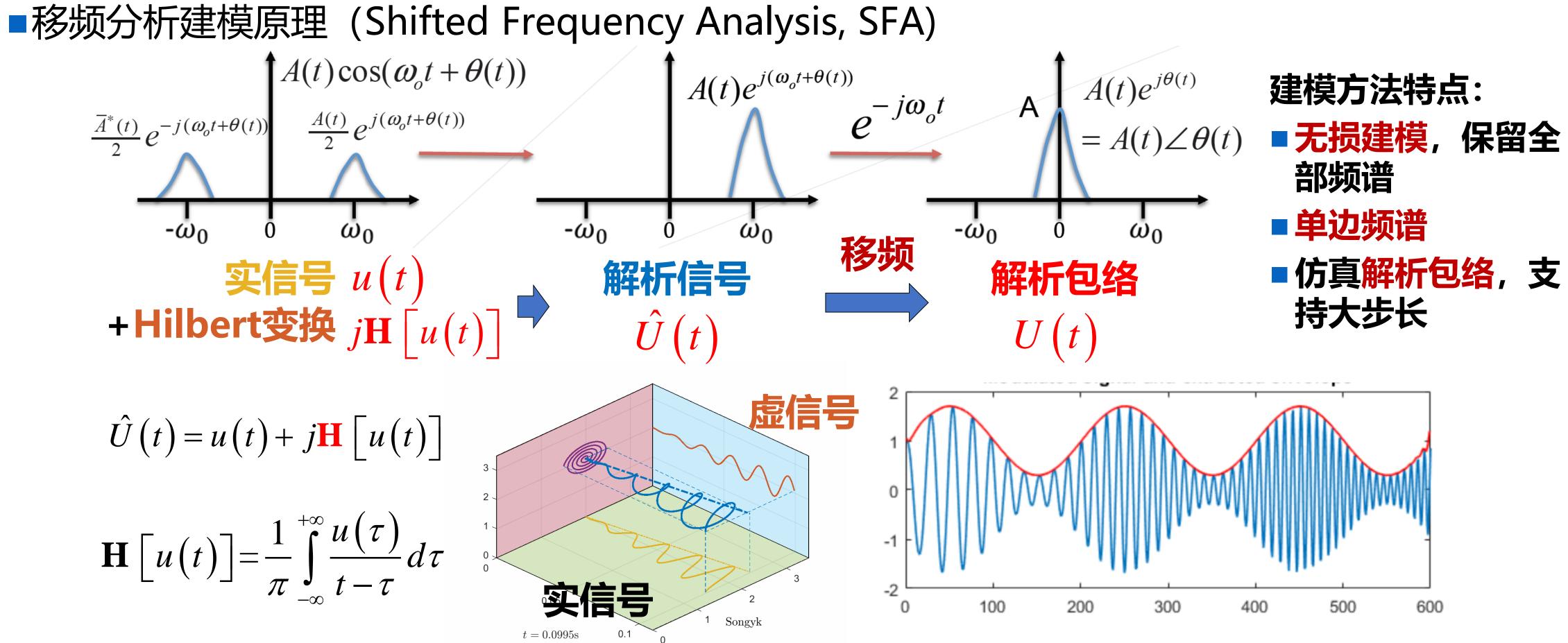


电磁暂态各类建模理论对比

移频分析 (Shifted Frequency Analysis, SFA) 理论优势 基于瞬时解析信号,无损建模,精度高,仿真步长灵活



• 交流系统多时间尺度移频建模技术



Circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(12): 2788–2803. Systems I: Regular Papers, 2010, 57(9): 2564–2574.



[1] Strunz K, Shintaku R, Gao F. Frequency-Adaptive Network Modeling for Integrative Simulation of Natural and Envelope Waveforms in Power Systems and

[2] Zhang P, Marti J R, Dommel H W. Shifted-Frequency Analysis for EMTP Simulation of Power-System Dynamics[J]. IEEE Transactions on Circuits and

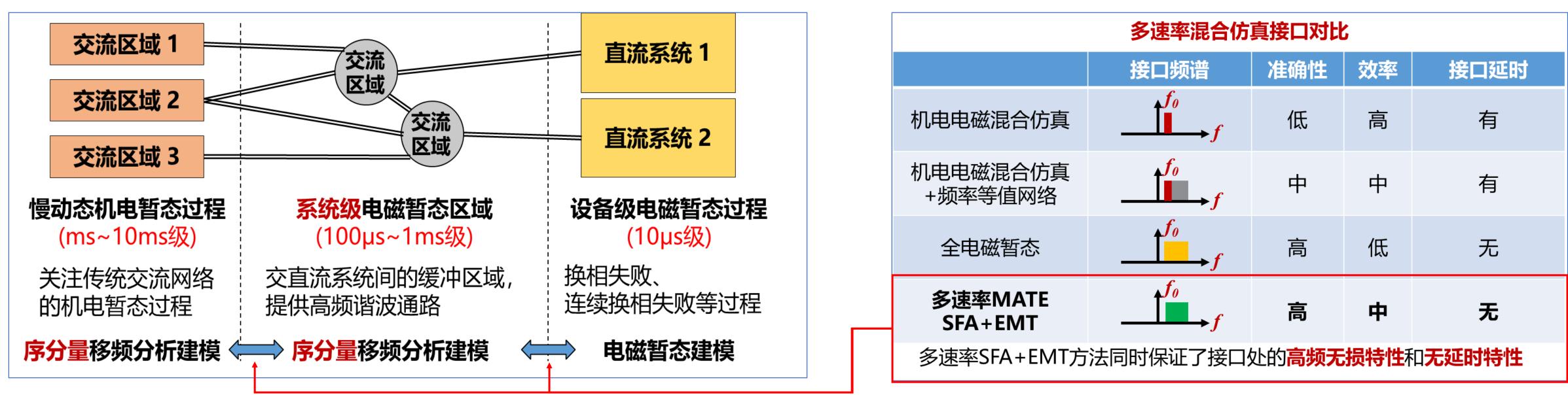


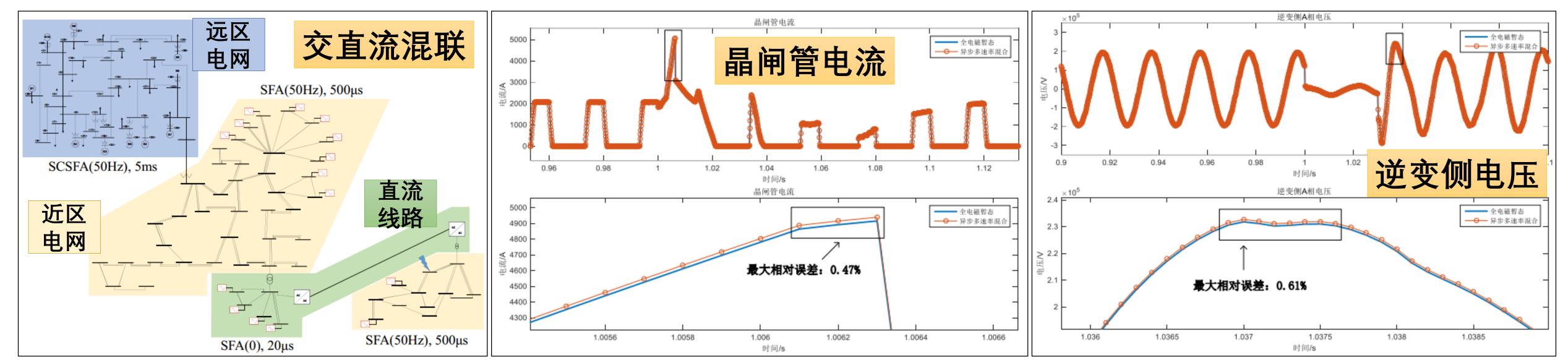






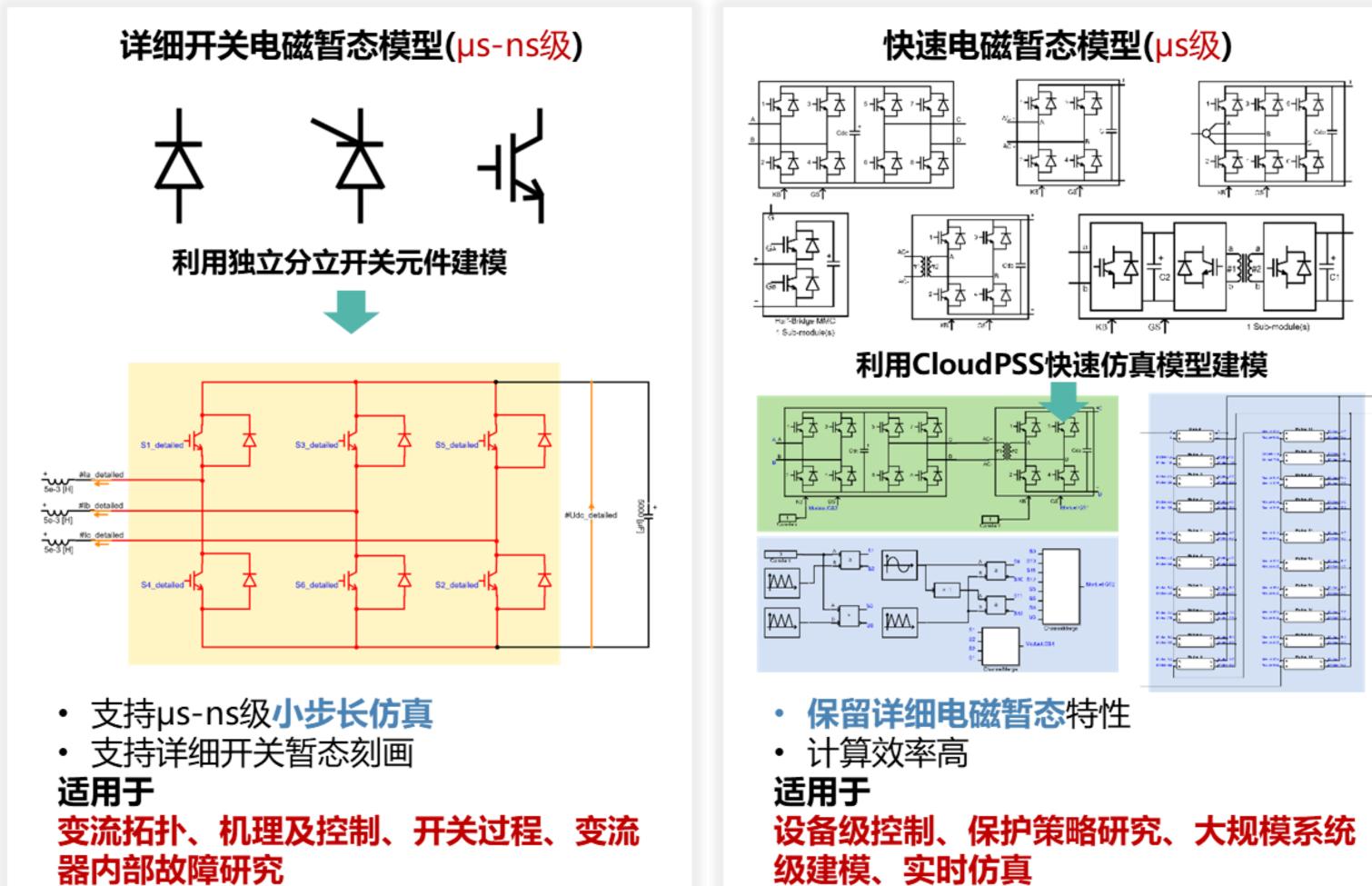
交流系统多时间尺度移频建模技术



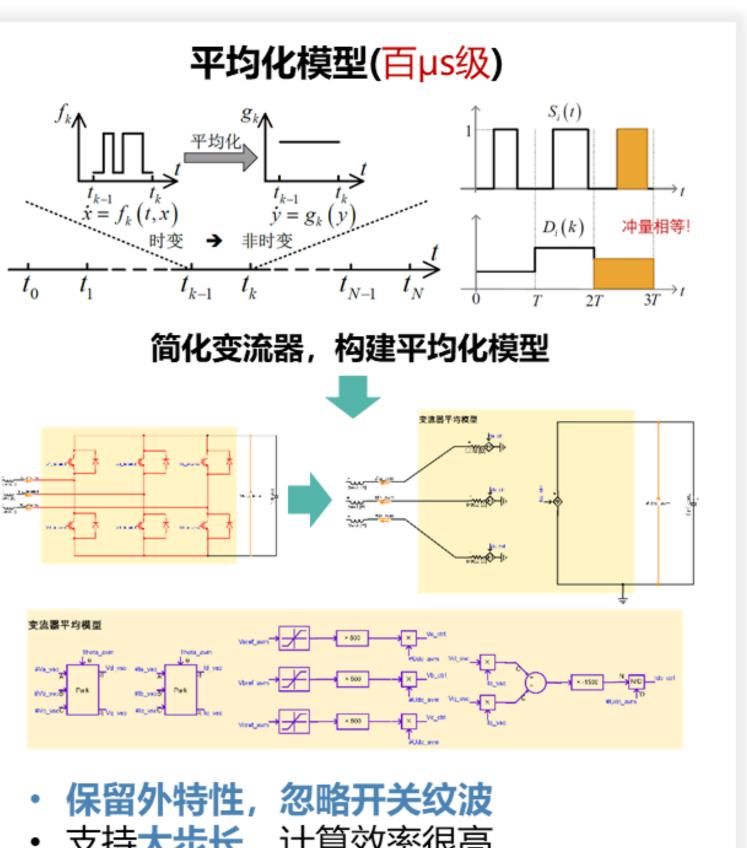




电力电子电路快速仿真模型







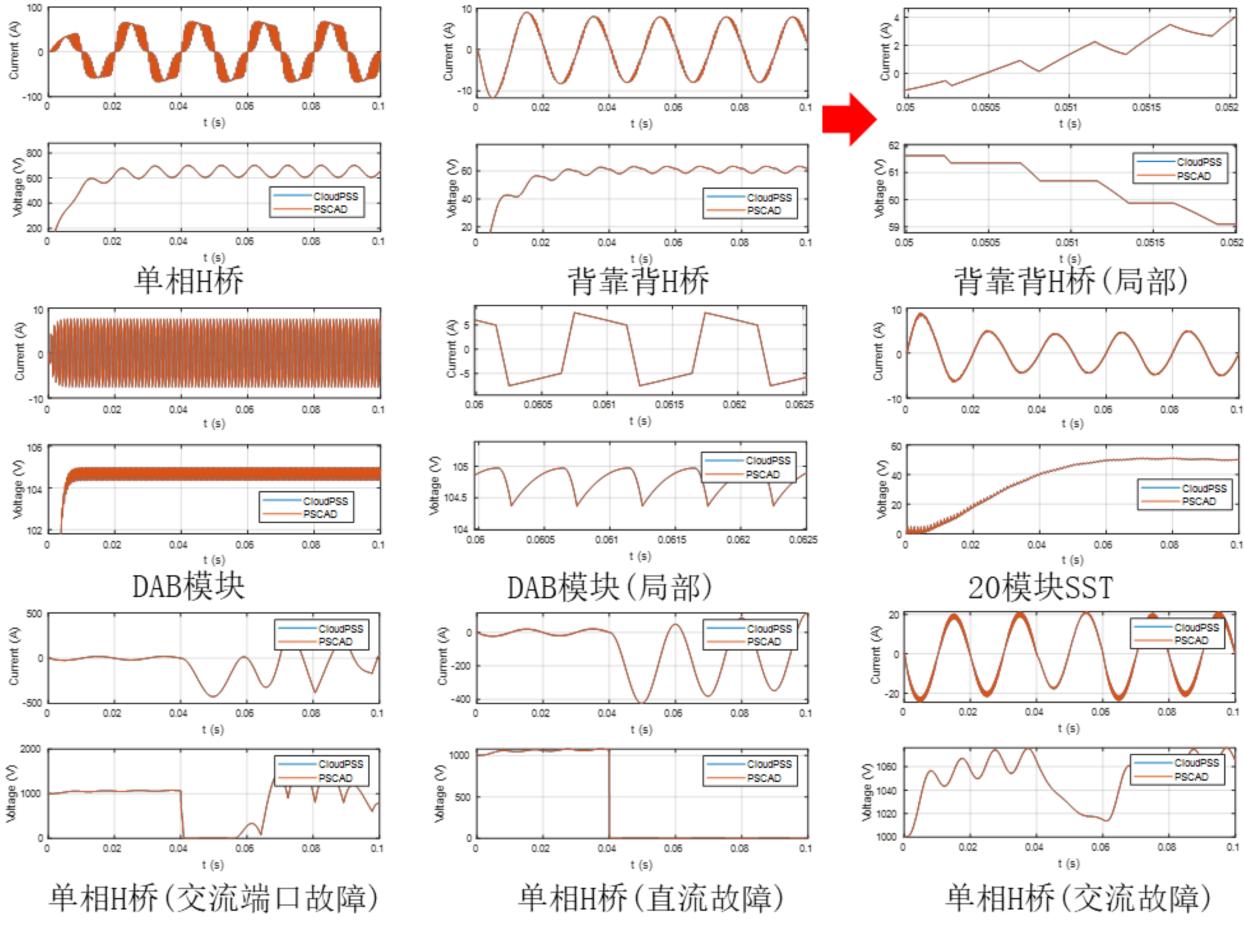
- 支持**大步长**, 计算效率很高

适用于 系统级控制保护研究,大规模交直流系统。 建模仿真





电力电子电路快速仿真模型



快速仿真模型与PSCAD详细模型进行对比,相同步长下误差不超过0.6%

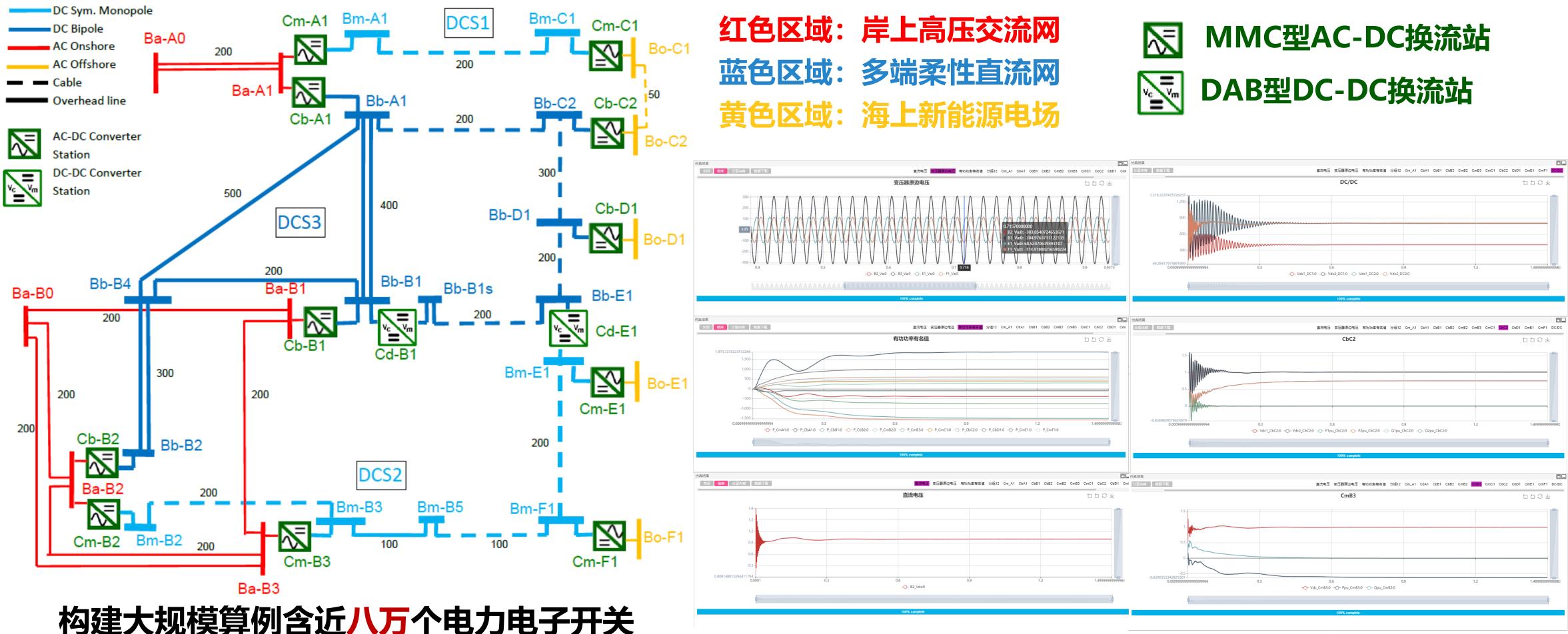


不同步长下与PSCAD误差对比

*此表数据均以1µs PSCAD结果为参考波形计算

模块名称	误差(1µs)	误差(10µs)
DAB	2.20e-5	5.37e-4
半桥	1.80e-5	2.36e-3
单相H桥	2.20e-5	1.12e-3
三相H桥	9.88e-6	4.71e-4
背靠背H桥	3.20e-5	3.41e-4
H桥-电感	6.60e-5	1.18e-3
H桥-变压器	3.61e-6	9.80e-5
单模块SST	9.70e-5	7.34e-4
3模块SST	1.19e-4	1.07e-3
20模块SST	1.75e-4	5.41e-3

电力电子电路快速仿真模型 ■CIGRE多端直流网测试系统 用以模拟海上风电并网。主拓扑包含3套MMC柔性直流系统,两个DC/DC型SST



构建大规模算例含近八万个电力电子开关



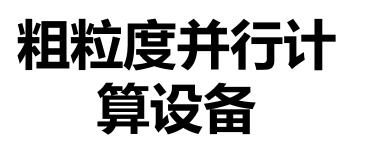




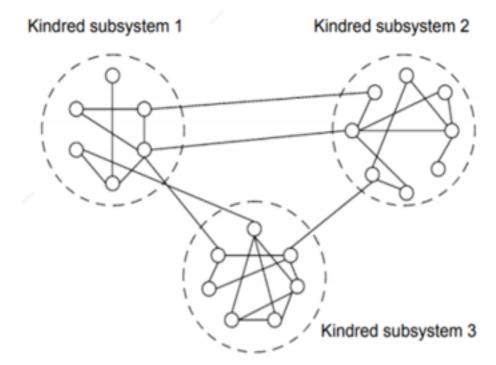
2.3核心技术: 面向GPU的细粒度并行电磁暂态仿真算法

• 粗粒度并行 vs. 细粒度并行





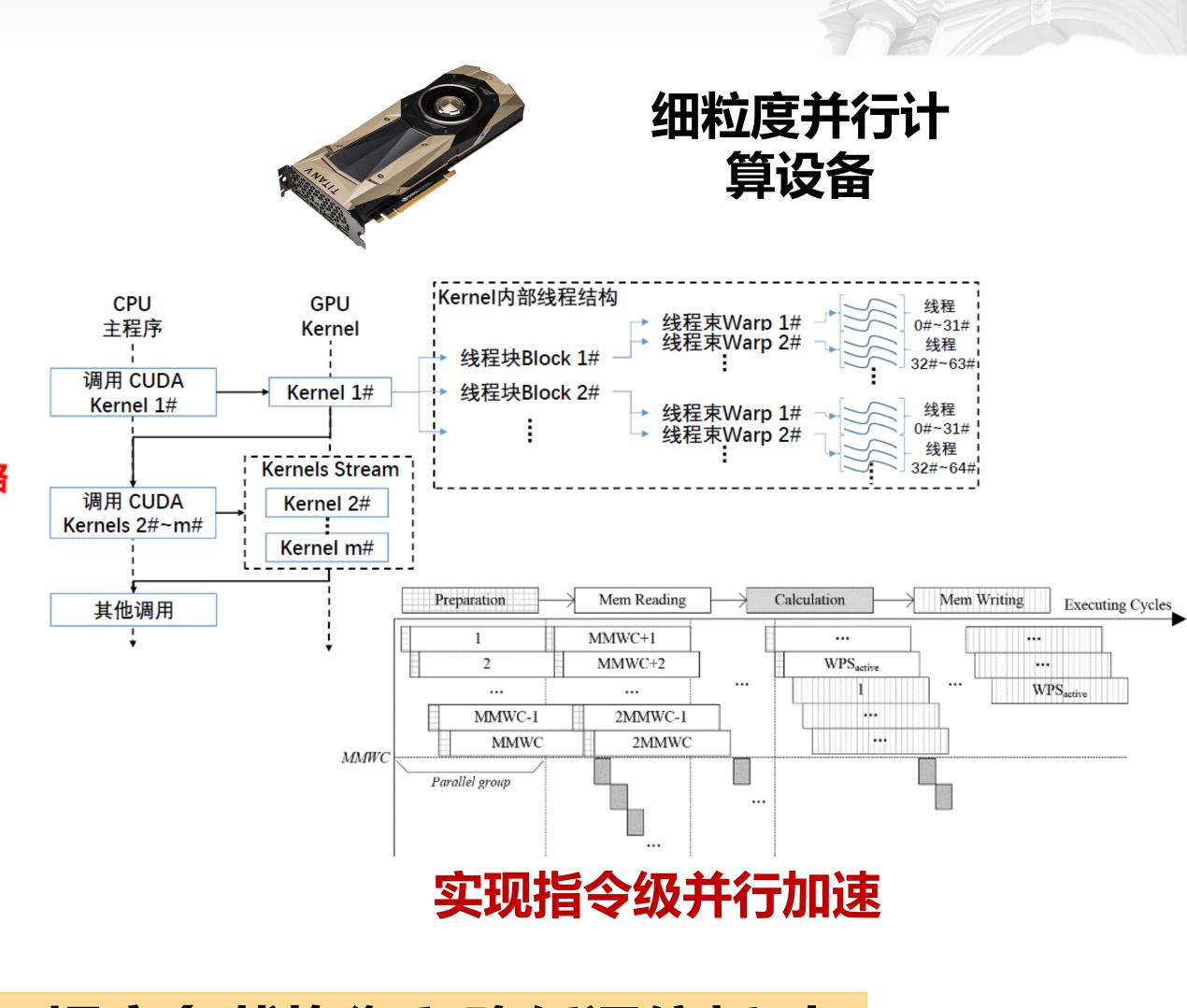
MATE: Multi-Area Thévenin Equivalents



- Step 1: 并行更新各个子分区的诺顿等值电路
- Step 2: 在端口处形成端口戴维南等值
- Step 3: 等值侧计算边界联络线电流
- Step 4: 根据联络线电流, 计算各子分区节点电压

粗粒度并行,实现任务级并行 但通信开销大

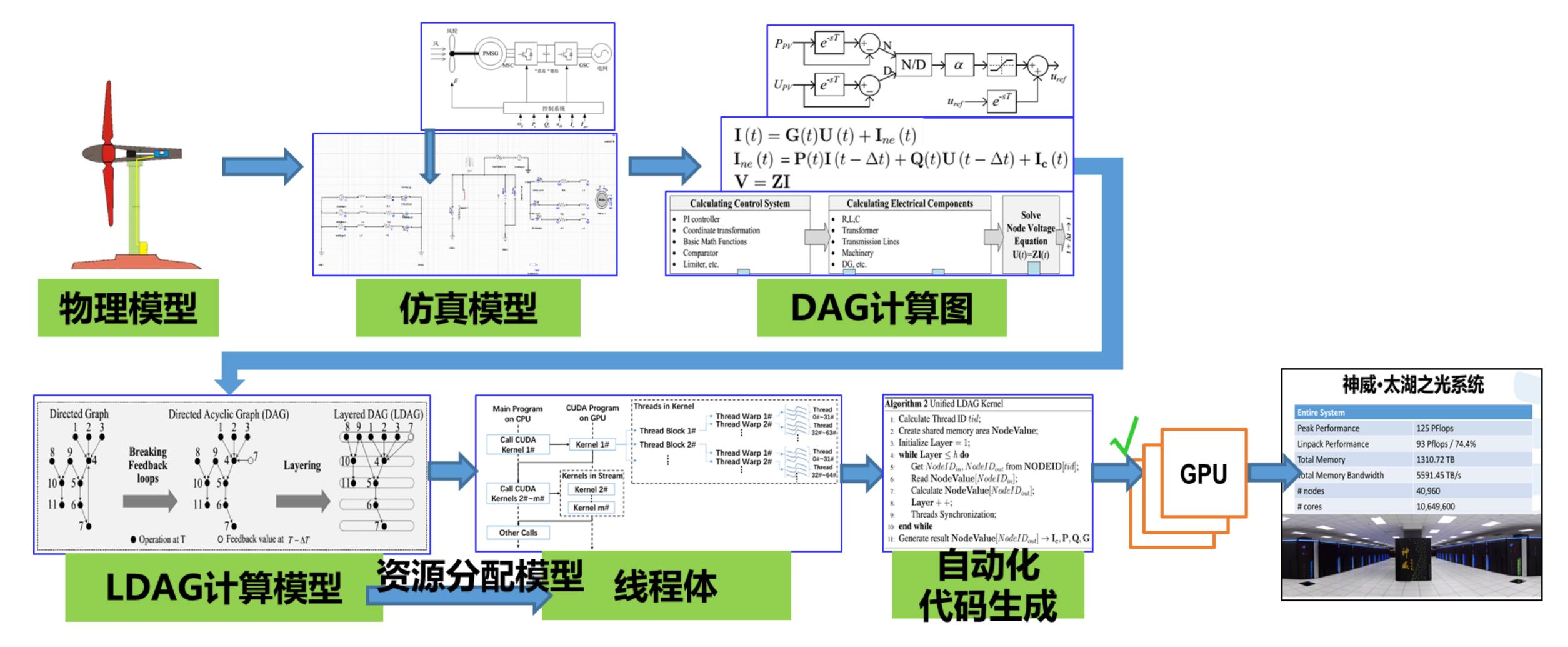
分区级并行加速 实现任务级.



并行计算效率提升的关键是:提高负载均衡和降低通信耗时

2.2 面向GPU的细粒度并行电磁暂态仿真算法

• 基于GPU的大规模电磁暂态仿真细粒度并行加速









2.3核心技术: 面向GPU的细粒度并行电磁暂态仿真算法

AC侧

 $\mathcal{U}_{d}\mathcal{U}_{q}\dot{i}_{d}\dot{i}_{d}$

PCC

PLL

.00

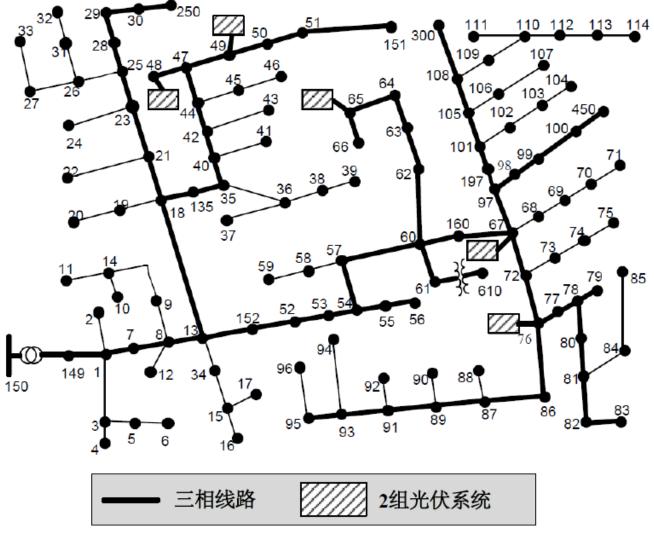
直流滤波电容 光伏元件

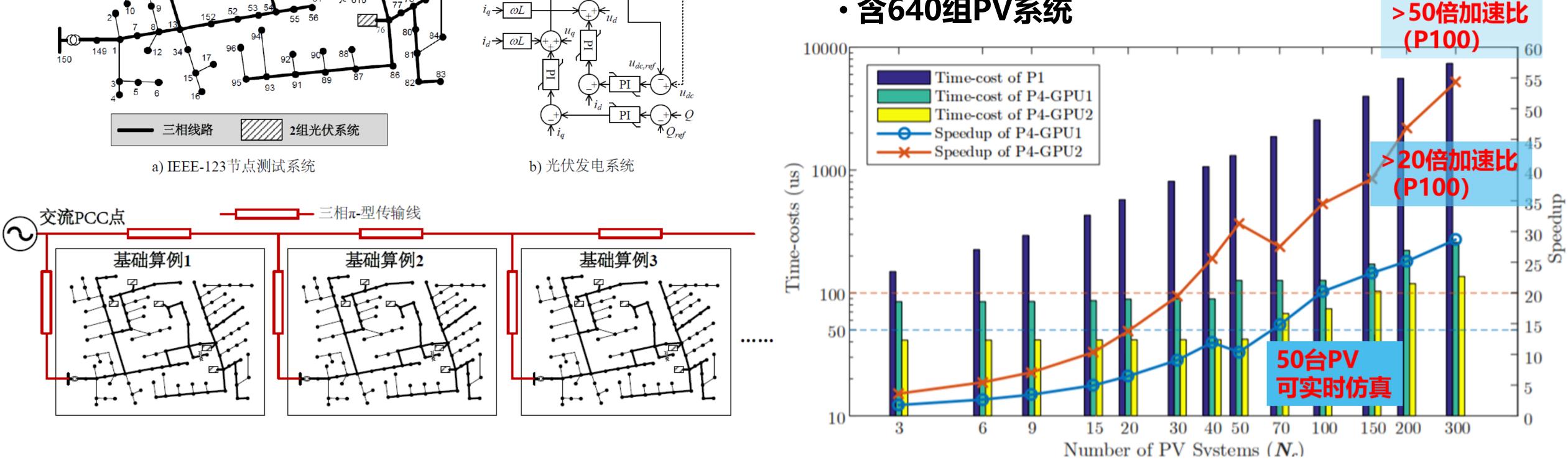
 P,Q,U_{dd}

MPPT

dabc

• 基于GPU的大规模电磁暂态仿真细粒度并行加速







- ・IEEE123系统+多台PV
- ・多个基础算例拼接
- ・最大18176节点
- ・含640组PV系统



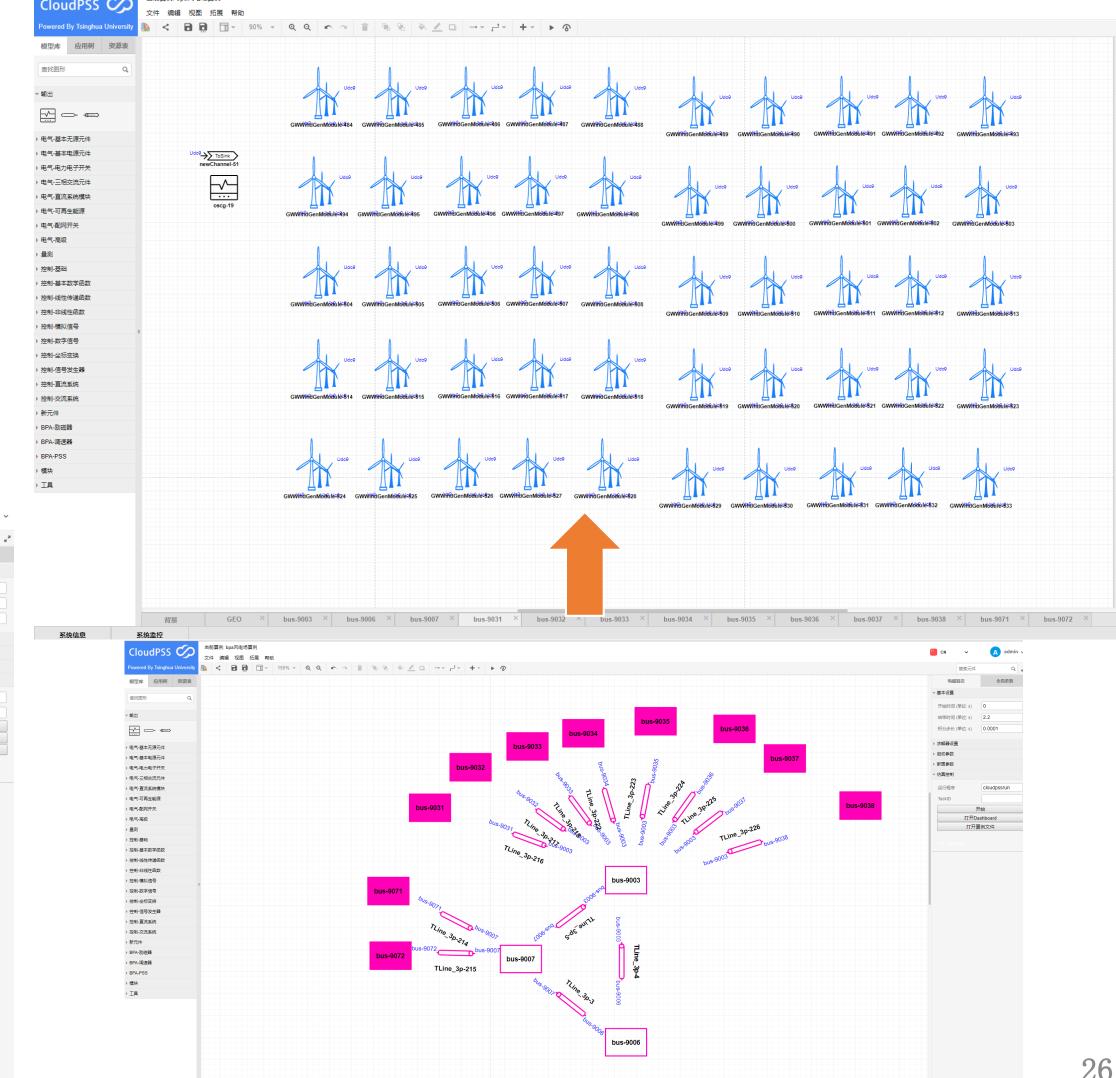
2.3核心技术: 面向GPU的细粒度并行电磁暂态仿真算法

• 基于GPU的大规模电磁暂态仿真细粒度并行加速

典型案例: 500台风机详细模型 (含保护) 仿真

- 算例拓扑与实际系统拓扑结构相同 ullet
- 含有10个小型风场,成辐射状汇入主网 ullet
- 每个小型风场含有50台详细模型风机 ullet
- 每台风机相互独立,均含有完整控制策略 ullet
- 含有完整低穿保护控制,仿真结果与实际录播结果吻合

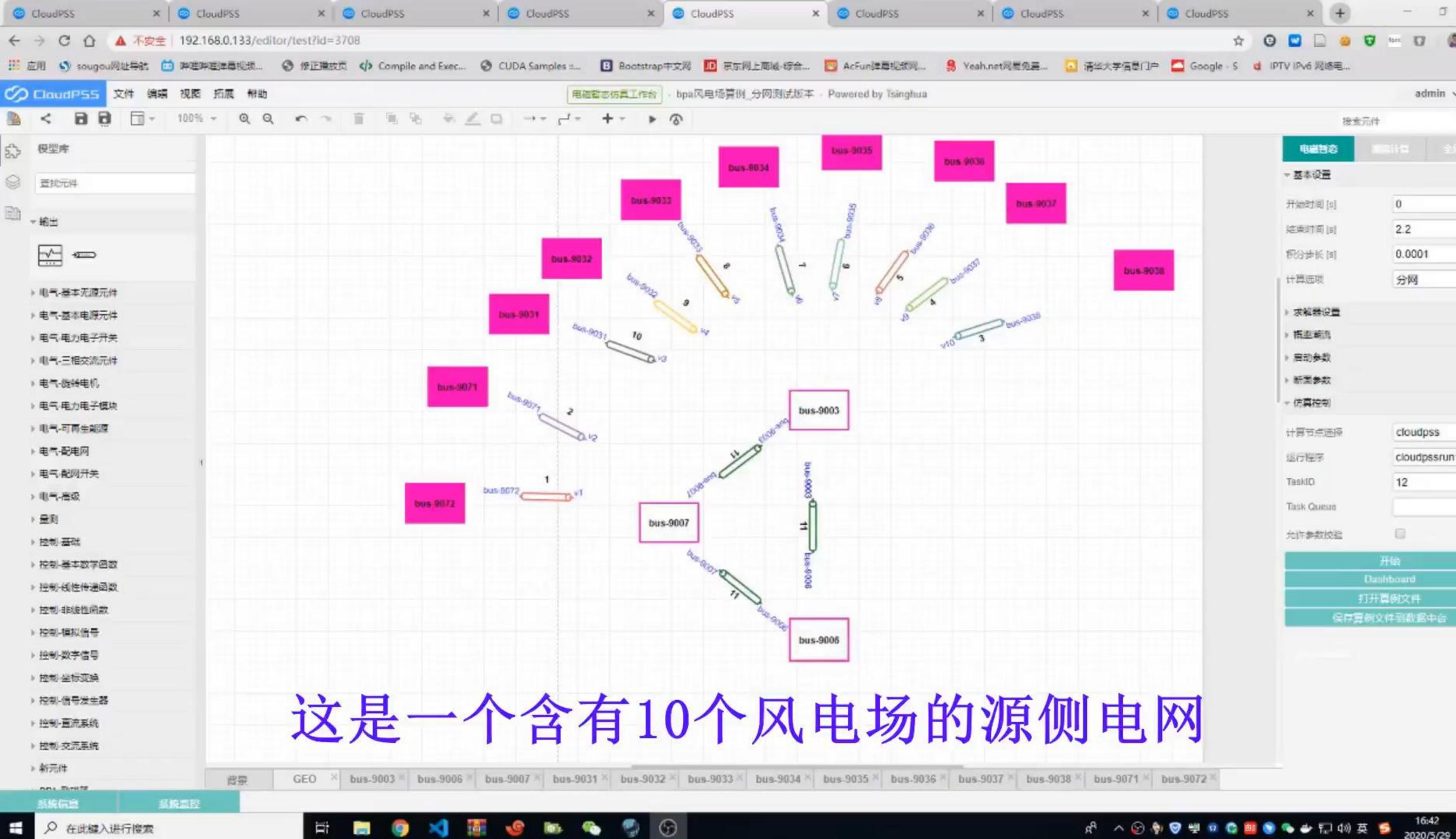
CloudPSS 🏈	当前算例: bpa风电场算例 文件 编辑 视图 拓展 帮助	低穿过程	🦲 cn 🗸
Powered By Tsinghua University	🌭 < 🖻 🗋 🗔 - 90% - 🔍		搜索元何
模型库 应用树 资源表			电磁暂态
査找图形 Q			▽ 基本设置
			开始时间 (单位: s)
* 輸出			结束时间 (单位: s)
	G		积分步长 (単位: s)
> 电气-基本无源元件		GWWfiftiGenMödtulé489 GWWfiftiGenMödtulé491 GWWfiftiGenMödtulé491 GWWfiftiGenMödtulé492 GWWfiftiGenMödtulé493	 >> 求解器设置 >> 启动参数
> 电气-基本电源元件	Udc0 ToSink newChannel-51		 ▶ 断面参数
▶ 电气-电力电子开关	newchanner-on		▼ 仿真控制
> 电气-三相交流元件	仿真结果		
 ▶ 电气-直流系统模块 ▶ 电气-可再生能源 	关闭 结束 分享内容		TaskID
) 电气-配网开关		风机内部直流电压 1 1 C 上	Tubition International Interna
▶ 电气-高级	1.4		打开
> 量測	1.2		打开
▶ 控制-基础	1-		100% c
> 控制-基本数学函数	0.8		
> 控制-线性传递函数	0.6 -		
> 控制-非线性函数	0.4-		
▶ 控制-模拟信号			
> 控制-数字信号	0.2 -		
▶ 控制-坐标变换	0.0010000000000000000000000000000000000	0.5 1 1.5 2 2.199000000154	4.
 		newChannel-51:0 newChannel-50:0 newChannel-49:0 newChannel-48:0 newChannel-47:0 newChannel-46:0 newChannel-45:0 newChannel-44:0 newChannel-43:0 newChannel-43:0 newChannel-43:0	
▶ 控制-交流系统			
▶ 新元件			
▶ BPA-励磁器		100% complete	
▶ BPA-调速器			
BPA-PSS			
> 模块			
→ 工具			
		Vitrid GenMoldule 428 GWWItrid GenMoldule 430 GWWItrid GenMoldule 430 GWWItrid GenMoldule 431 GWWItrid GenMoldule 433 GWWItrid	



宿望 GEO × bus-9003 × bus-9006 × bus-9007 × bus-9007 × bus-9017 × bus-9012 × bus-9033 × bus-9034 × bus-9035 × bus-9036 × bus-9037 × bus-9037 × bus-9071 × bus-9072 ×

系统信息

搜			
	索元件		Q
电磁智范	5	全	司参数
▼ 基本设置			
开始时间 (单)	过: s)	0	
结束时间 (单	立: s)	2.2	
积分步长 (单)	泣: s)	0.0001	
▶ 求解器设置			
▶ 启动参数			
▶ 断面参数			
▼ 仿真控制			
运行程序		cloudpss	run
TaskID			
	Я	始	
		shboard [例文件	

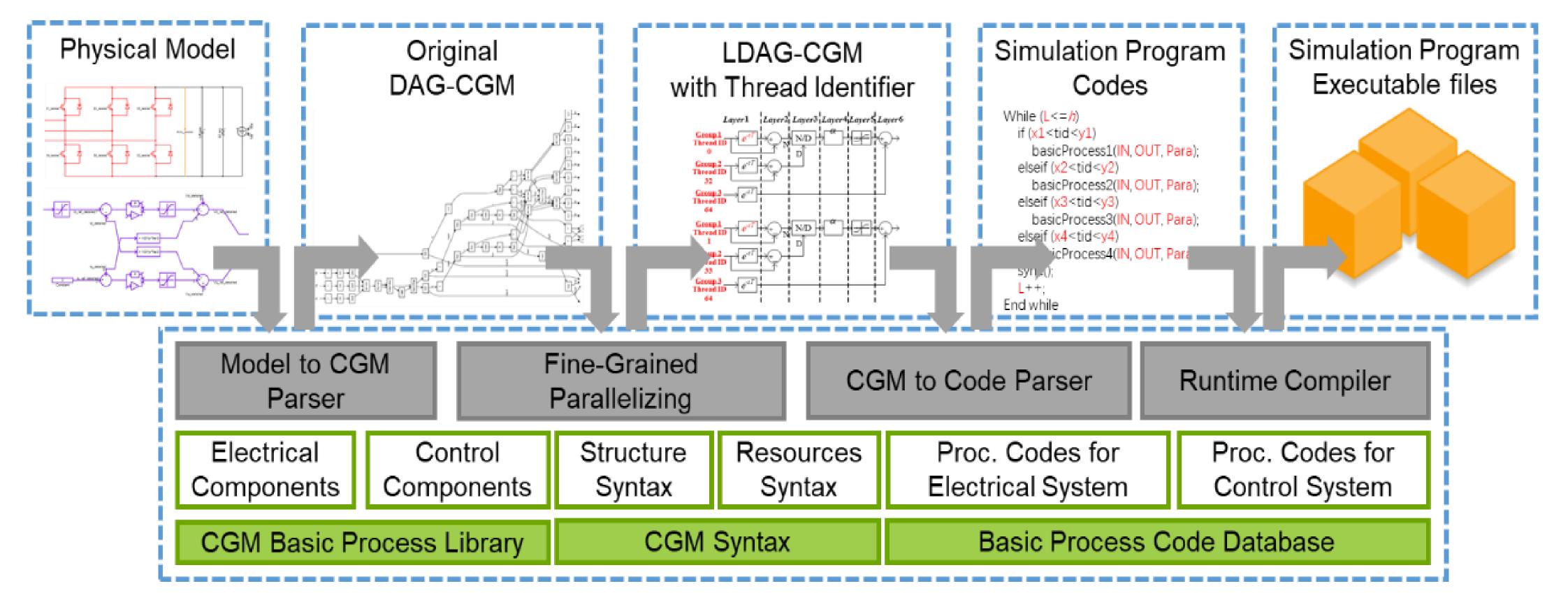


_	σ	×
Ø	0	0
		20
adı	nin ~	-
	0	* *
		68
2		
0001		
网		٠
oudp	\$\$	•
oudp	ssrun1	2
2		
ud		
文件		
副部	Þ6	

16:42



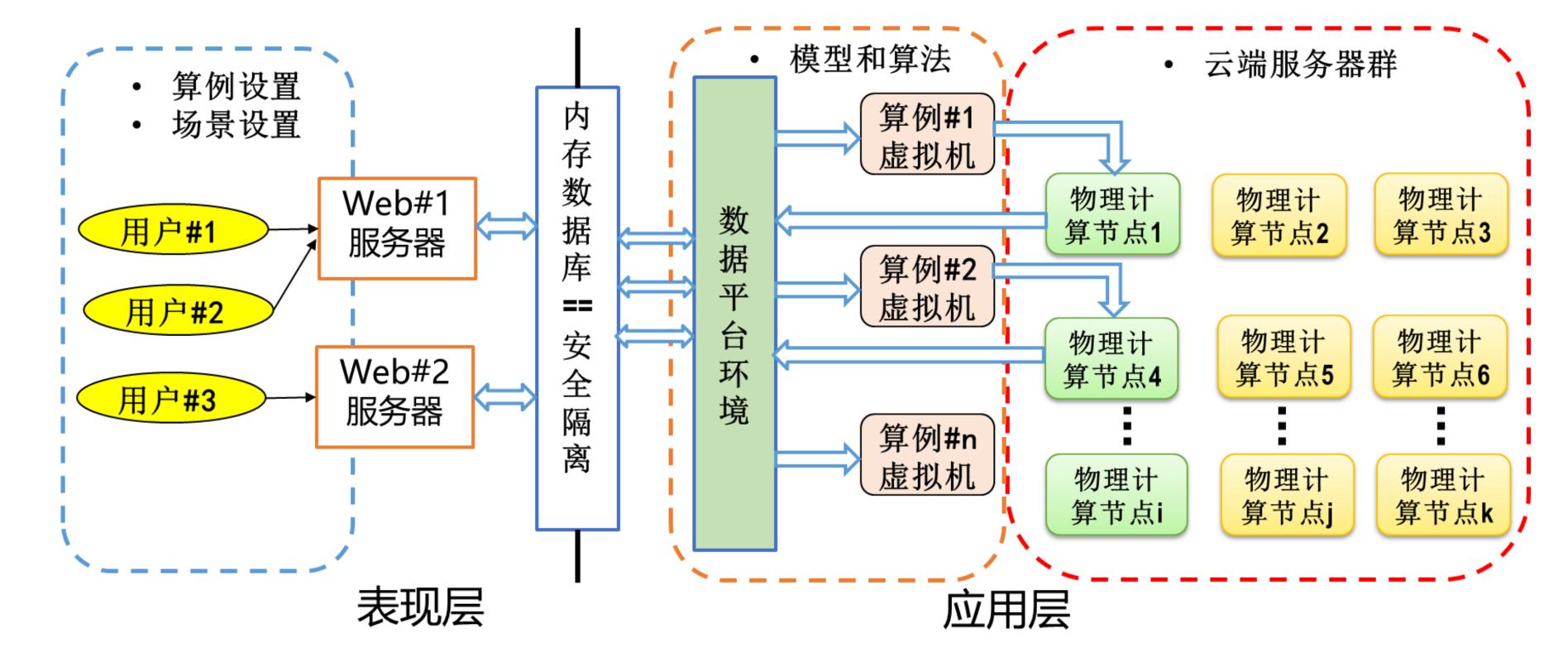
• 自动代码生成器和计算资源虚拟化



➤CGM解析器重新分析CGM描述文件,为每个基本进程分配内存空间 ▶根据计算设备的类型,从代码数据库中检索出每个基本过程的代码,并形成代码来计算整个CGM ▶将这些代码编译成可执行文件并组装到虚拟仿真引擎中



●算例管理和计算内核容器化部署





2.4核心技术:开放式云仿真应用体系

•模型和应用扩展

CloudPSS SDK

✓支持模型开发、封装和应用开发 √提供完整的数据和应用集成框架

■CloudPSS 模型开发中心 √具有模型中心功能,提供拓扑封 装、脚本封装、二进制封装 ✓脚本支持Matlab、Python语言 ✓二进制封装保证数据安全性

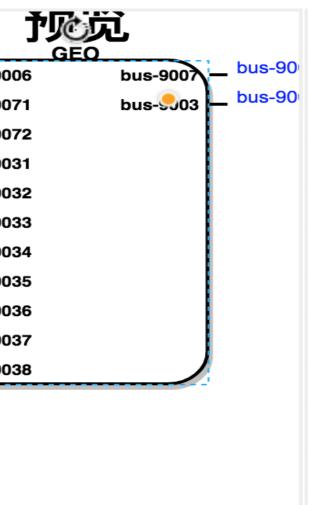
自定义子图图	
-9006 - bus-90	
s-9071 - bus-90	
5-9072 - bus-90	
s-9031 — bus-90 s-9032 — bus-90	
s-9033 - bus-90	
s-9034 — bus-90	
^{s-9035} — bus-90	
-9030 - bus-90 -9037 - bus-90	
-9038 - bus-90	

投入





口宧



			•	
classNmae	_Octa	aveCode	e	
Туре	-2			
Simu ID	0			
thutype	New	Para		
参数设置			是否是一	F算例
function_na	me:	test1		>
nInNode:		1		>
nOutNode:		3		>
输入参数名称			添加属性参	数添加

基础属性设置

Name

引脚设置删除引脚		
是否显示该引脚	引脚位置	
	左◆	
	右♥	
	右♥	
	右♥	
	是否显示该引脚 2 2 2	

global counter=1; global mag; global pha; global w1; $GH = tf([25], [0.5 \ 1 \ 0]);$ [mag,pha,w1]=bode(GH); end global counter; 10 global mag; global pha; global w1; if counter>501 counter=1; end outValue1=mag(counter); outValue2=pha(counter); outValue3=w1(counter); counter=counter+1; 22 endfunction

2 if flag==1

12

13

15

17

19

21

停止 取消



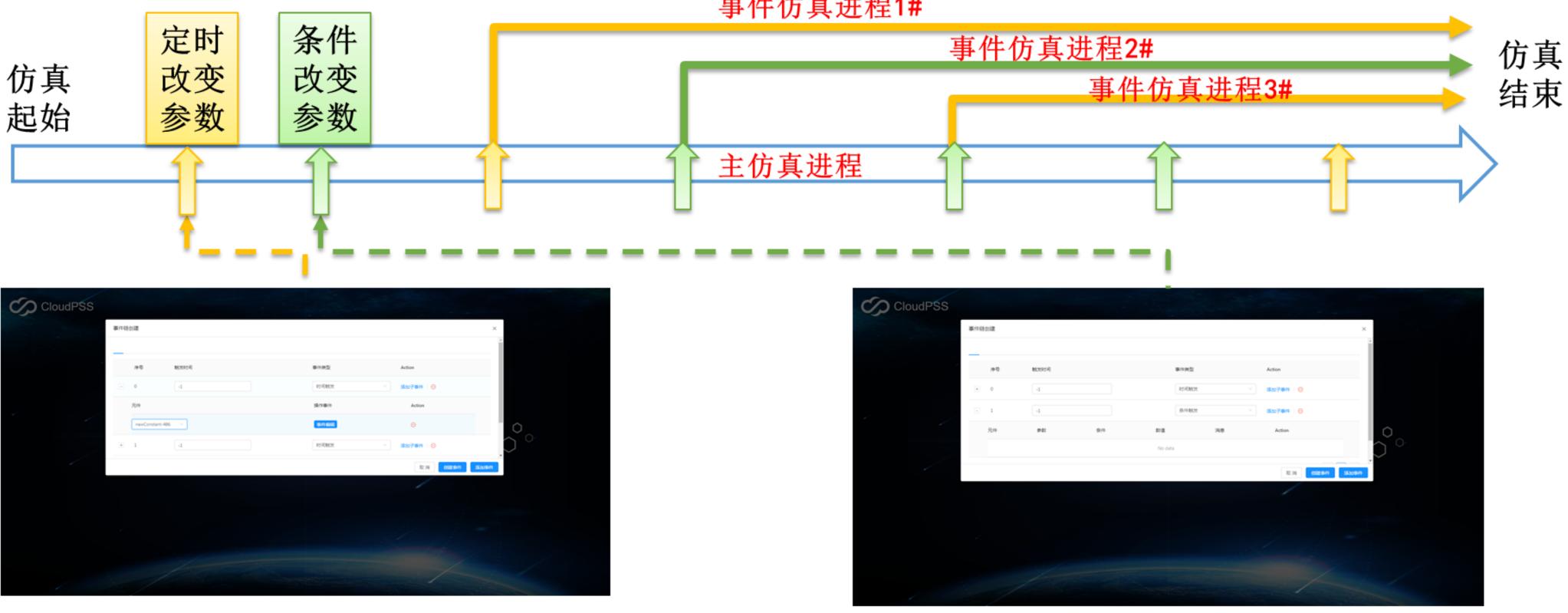


2.4核心技术:开放式云仿真应用体系

•模型和应用扩展

■ 基于事件驱动的场景自动生成

✔ 定义时间触发事件和条件触发事件,用于:调整参数、改变拓扑、执行控制、创建算例、算例合并等 ✔ 自动派生仿真算例,刻画复杂控保逻辑和连锁故障动态,考虑外部不确定性实现系统随机动态过程模拟 事件仿真进程1#



条件触发事件

C/O CloudPSS	事件時创建				×
	_				
	190	触到时间	事件快型	Action	
	. 0	4	105888 ×	15107 0 14 O	
/ /	元件		法 作事件	Action	
	newConstant-48	6 🗸	0/1502	Θ	0
	• 1	4	10/082 ×	15107 0 11 0	O °
				20.20 (SEC.04) (S	2019/19
					-
					1-1-1

时间触发事件



2.4核心技术:开放式云仿真应用体系

•模型和应用扩展 ■CloudPSS技术应用生态





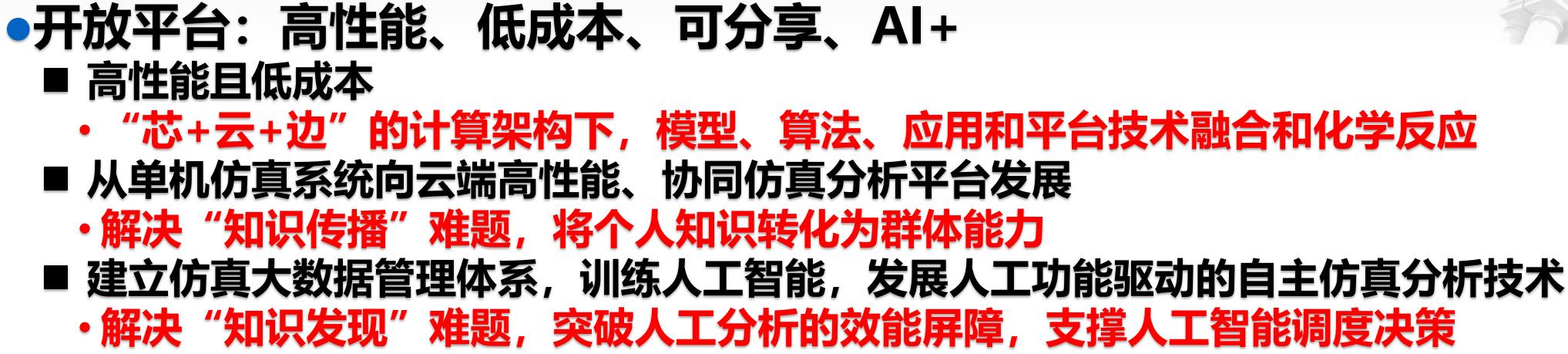








3 电磁暂态仿真工具的发展趋势





Conventional PS simulator

CloudPSS Now Open, Share, HPC



CloudPSS Future Simulations for AI



The

一日 举 府







www.cloudpss.net

清华大学电机系 陈颖 chen_ying@tsinghua.edu.cn



欢迎关注和访问

