



国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING

# COMSOL Multiphysics 在高压开关领域的应用

张博

[pgzhangbo@163.com](mailto:pgzhangbo@163.com)

2017.11.02



- 平高和**GIS**产品
- **HVDC GIS** 电场仿真模型
- **GIS** 温升仿真模型
- 仿真**App**的应用
- 结语



国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

# 关于平高

COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING

平高集团有限公司，成立于1970年，隶属国家电网公司直属产业单位，生产包含全电压等级的高压开关设备。近年来，集团公司在国际业务、新能源等领域快速发展，通过技术创新引领公司新业务，实现高压开关技术水平从与国外先进公司并跑到赶超的逐步改变。

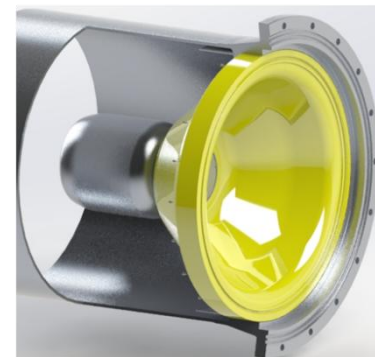




GIS是气体绝缘金属封闭开关的简称，包含断路器、隔离开关、接地开关、母线等设备，其主要绝缘介质是SF<sub>6</sub>气体和环氧树脂绝缘体。GIS是输变电中的核心设备，相比于空气绝缘，通常用于空间限制的区域。



平高生产的1100kV GIS



环氧树脂绝缘体



国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

# 为什么选用COMSOL

COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING

COMSOL  
Multiphysics



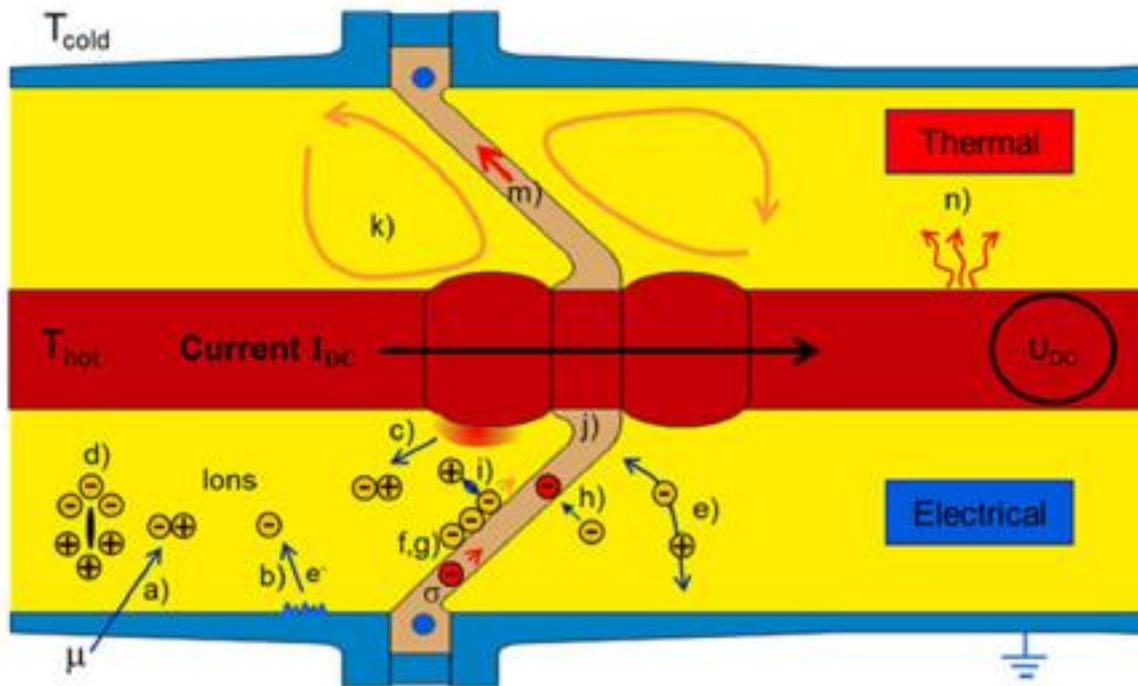




# 多场耦合案例1

## ——GIS直流场计算

- 直流GIS中的多物理场
- 直流系统中的固体绝缘介质
- 直流系统中的气体绝缘介质
- 直流系统中的气固界面



直流GIS中的物理现象

多物理场  
耦合

交流绝缘系统: 电容C决定电位分布

直流绝缘系统: 电阻R决定电位分布

- 电阻R 与温度强相关
- 电阻R 与电场强度强相关



## Solid Domain

- For solid dielectrics Ohm's law usually works sufficiently well over a range of electric field strengths.

$$\mathbf{J}_I = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \gamma_{VI} \cdot \mathbf{E}$$

$\mathbf{J}_I$  current density in the insulator

$\mathbf{D}$  electric flux density

$\mathbf{E}$  electric field strength

$\gamma_{VI}$  volume conductivity of the solid insulation material

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi$$

$\varphi$  potential

$$\rho = -\varepsilon \Delta \varphi$$

$\rho$  charge density

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_I = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$\varepsilon$  permittivity





## Gas Domain

- The dynamic change for the positive and negative ion density is described by the drift-diffusion equation:

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - K_r n^+ n^- + \nabla \cdot (D^+ \nabla n^+) + \nabla \cdot (n^+ b^+ \nabla \varphi) - \nabla \cdot (n^+ V_G)$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - K_r n^+ n^- + \nabla \cdot (D^- \nabla n^-) - \nabla \cdot (n^- b^- \nabla \varphi) - \nabla \cdot (n^- V_G)$$

$\partial_t IP$  ion pair generation rate due to nature radiation

$D^+, D^-$  diffusion coefficient for positive/negative ions

$b^+, b^-$  mobility of positive/negative ions

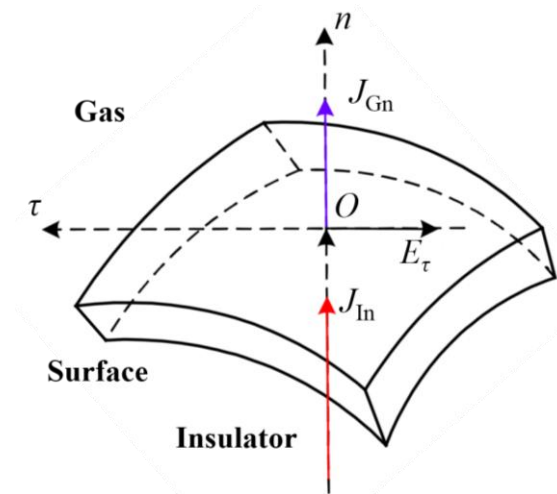
$k_r$  recombination coefficient of positive/negative ions



## Gas-Solid Interface

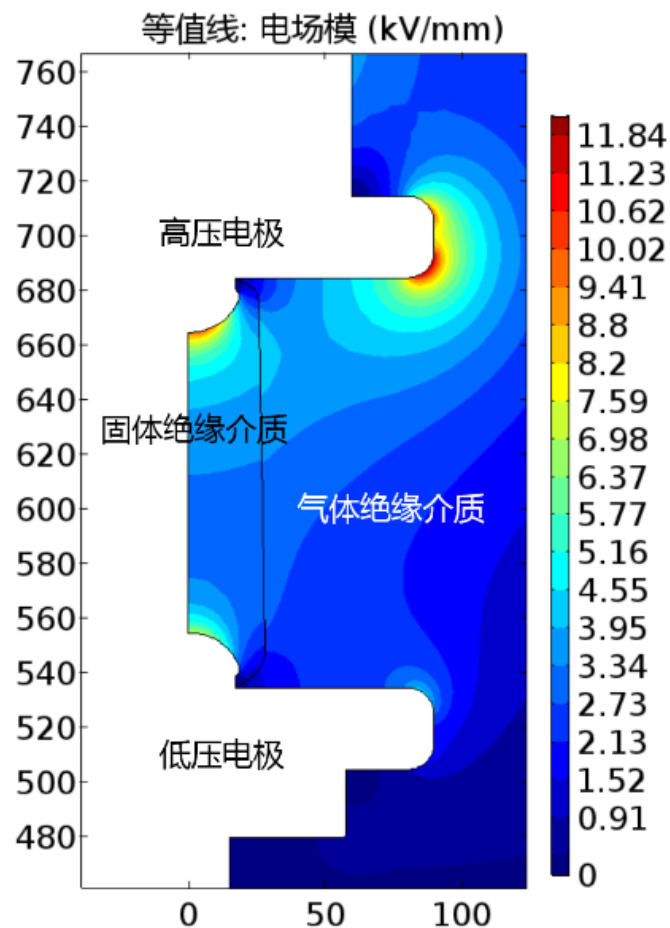
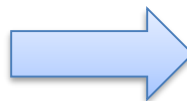
- Charging of the gas-solid interface results in the surface charge density  $\rho_s$ , for which, current flow into and out of the interface as well as current flow along the surface must be considered:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{In}} - \mathbf{J}_{\text{Gn}} - \text{div}(\gamma_s \cdot \mathbf{E}_\tau)$$



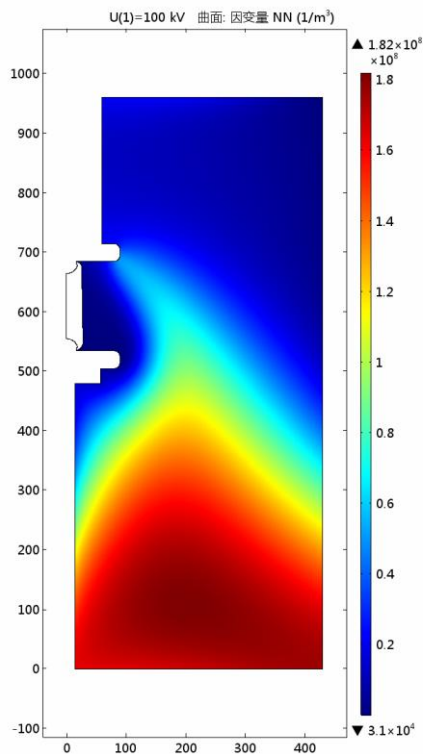


## 容性场分布计算结果

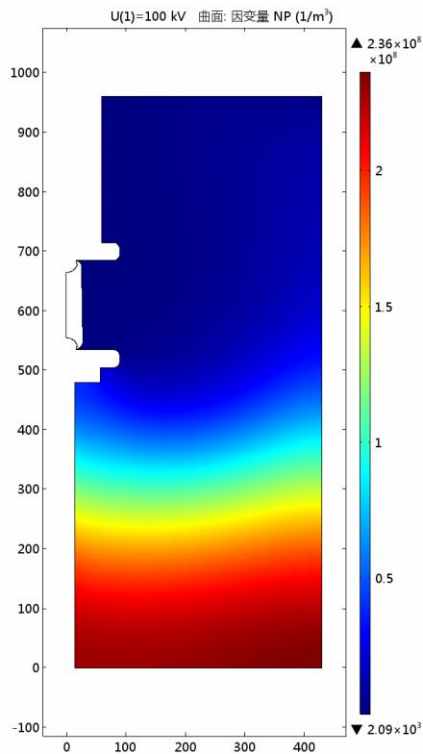




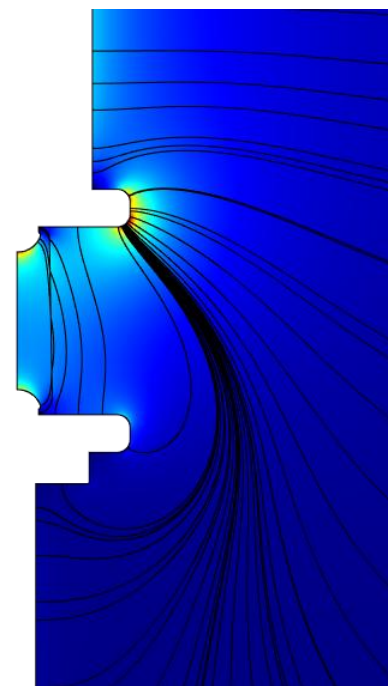
## 离子密度分布和直流电场



负离子



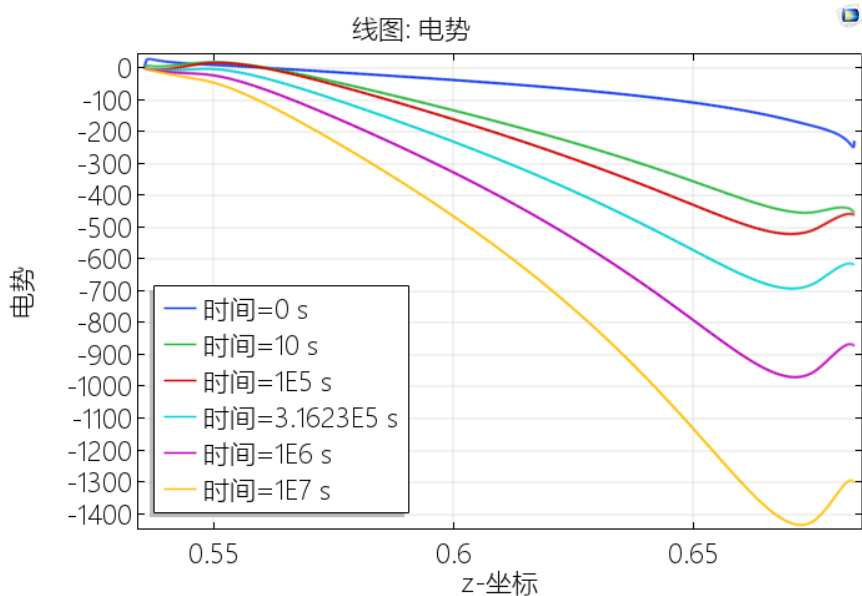
正离子



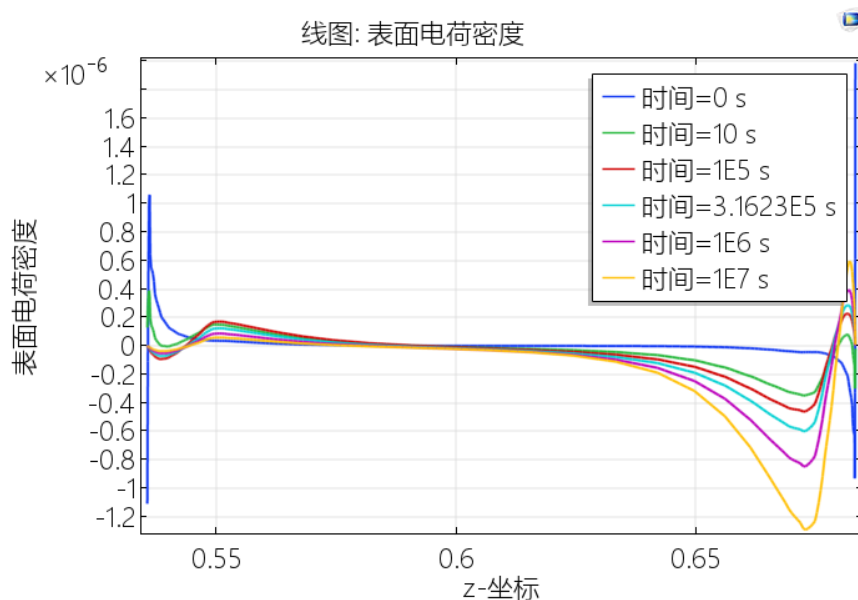
直流电场分布



## 绝缘子表面电位和电荷密度分布



表面电位随时间的变化



表面电荷密度随时间的变化



# 多场耦合案例2

## ——GIS温度场计算

- 背景
- 热的产生和交换
- 仿真计算
- 试验验证





GIS温升仿真计算涉及**多学科交叉**，主要有**传热学**、**电磁原理**、**计算流体力学**等。可用于计算电力装备在稳态运行时的**功率损耗**、**温度与流场分布**，从而在设计阶段解决因温升问题造成的各类过热故障。



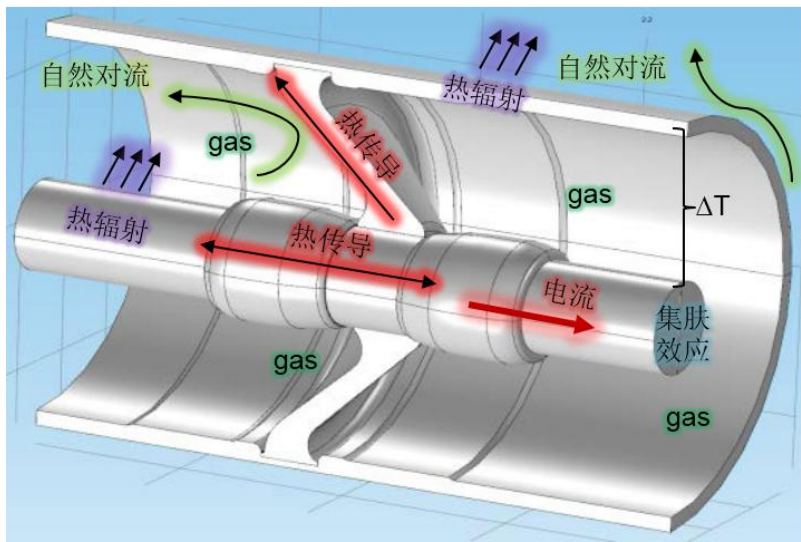


热量产生的主要来源是欧姆热，在交流GIS中，集肤效应是必须考虑的。

热量的交换包括传导、对流和辐射，在GIS中均需进行计算。在GIS内部，由于通流导体发热造成气体的自然流动，从而形成非轴对称的温度梯度。GIS内部流场对于整体温度分布十分重要。



GIS安装现场



GIS母线的传热过程



## Maxwell 方程

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} & \text{全电流定律} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} & \text{电磁感应定律} \\ \nabla \cdot B = 0 & \text{磁通连续性原理} \\ \nabla \cdot D = \rho & \text{高斯定律} \end{cases}$$

## 辐射方程

$$Q_i = \sigma \varepsilon_i F_{ij} A_i (T_i^4 - T_j^4)$$

## N-S 方程

连续性方程:

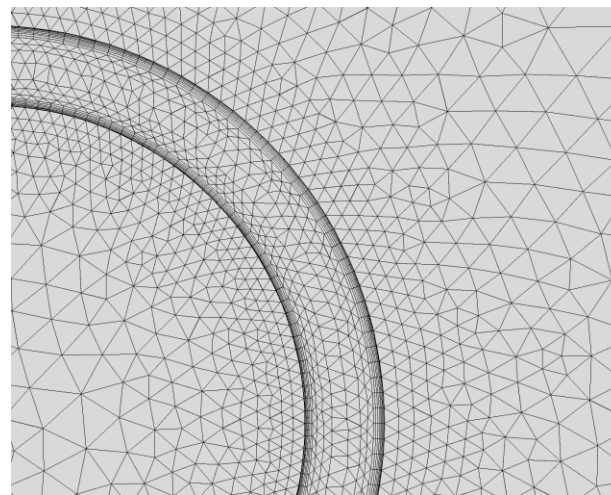
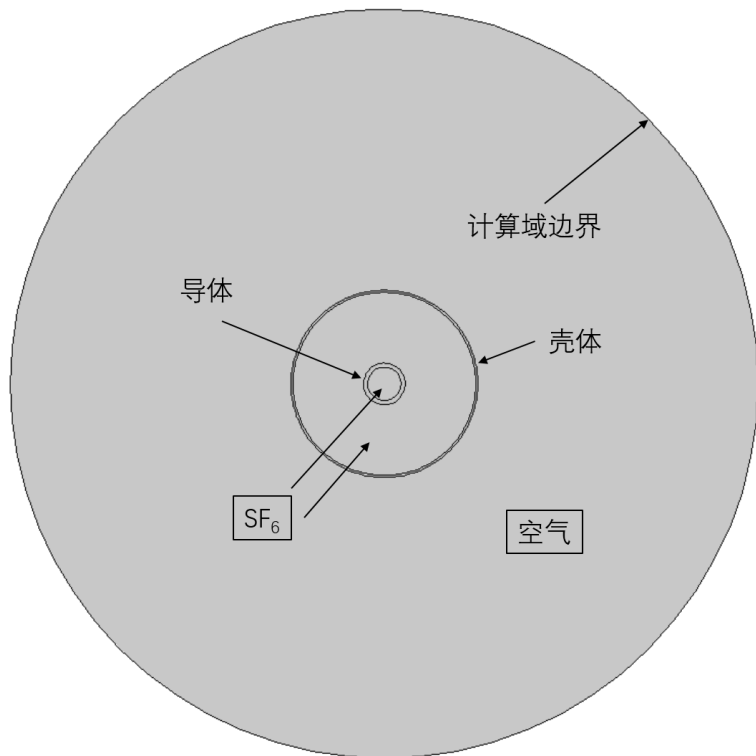
$$\nabla \cdot (\rho V) = 0$$

动量守恒方程:

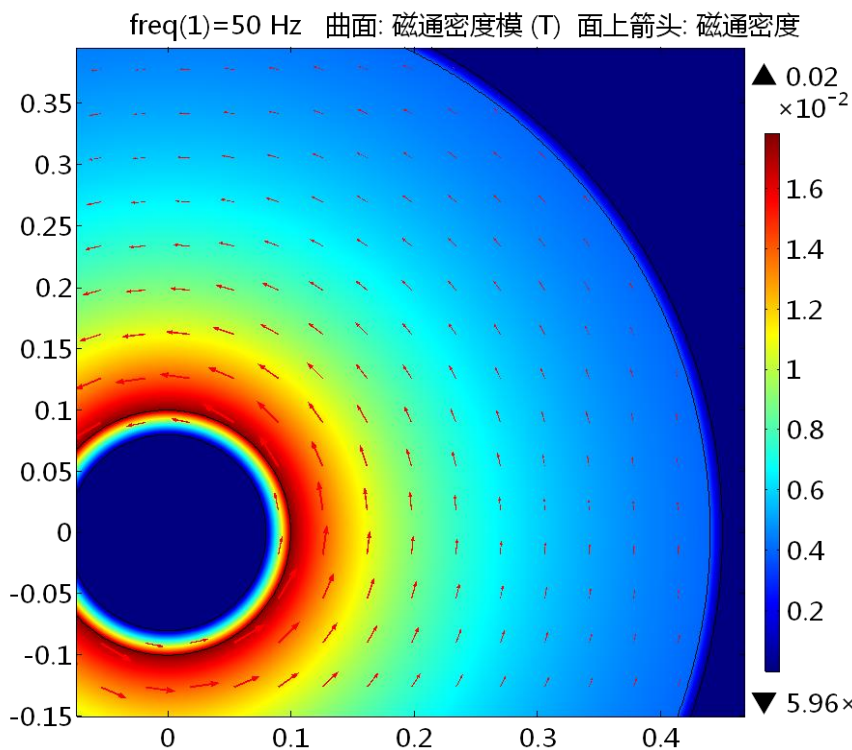
$$\nabla \cdot (\rho V \otimes V) = \nabla \cdot \left( -pI + \mu (\nabla V + (\nabla V)^T) \right) + S$$

能量守恒方程:

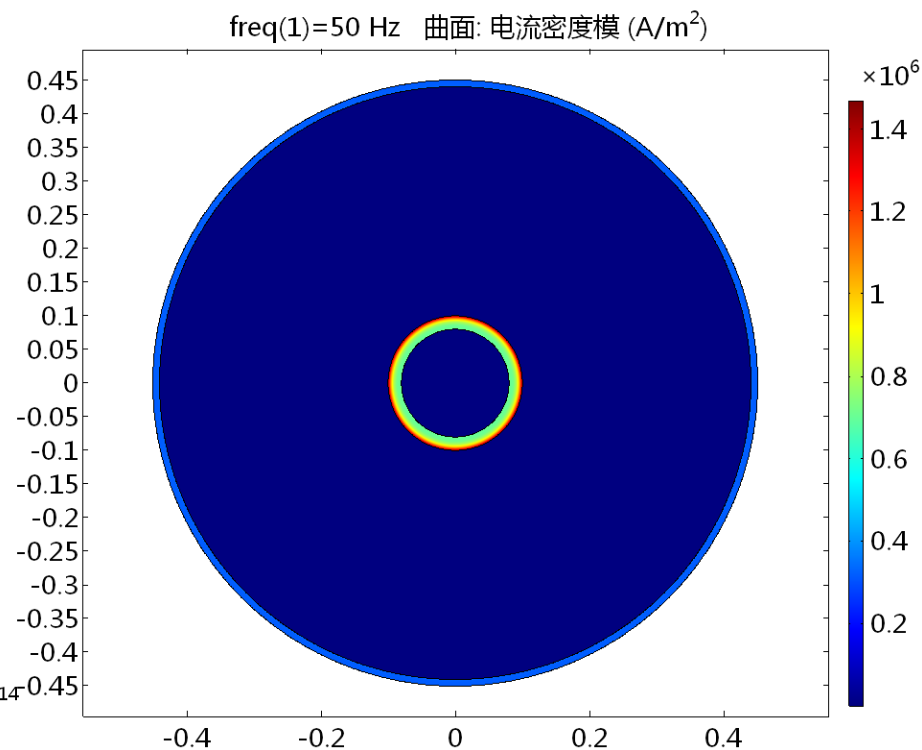
$$\nabla \cdot (\rho C T V) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_v$$



序号	参数化名称	表达式或值	备注
1	Di_cond	$De\_cond - 2 * t\_cond$	导体内径
2	De_cond	200[mm]	导体外径
3	Di_shell	$De\_shell - 2 * t\_shell$	壳体内径
4	De_shell	900[mm]	壳体外径
5	f	50[Hz]	频率
6	t_cond	20[mm]	导体厚度
7	t_shell	10[mm]	壳体厚度
8	Db	$De\_shell * 4$	计算边界直径
9	I	6300[A]	通流有效值
10	rho1	$3.3e-8[ohm * m]$	导体电阻率
11	rho2	$4.6e-8[ohm * m]$	壳体电阻率
12	p_sf6	0.5[MPa]	充气压力
13	lamda_cond	$210[W / (m * K)]$	导体热导率
14	lamda_shell	$120[W / (m * K)]$	壳体热导率



**GIS母线磁通密度分布**

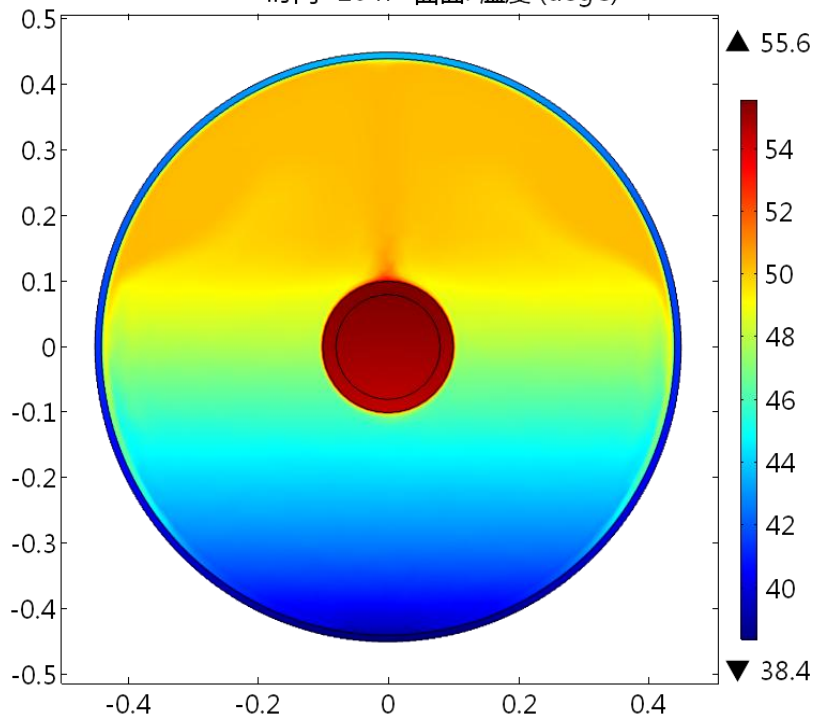


**GIS母线电流密度分布**



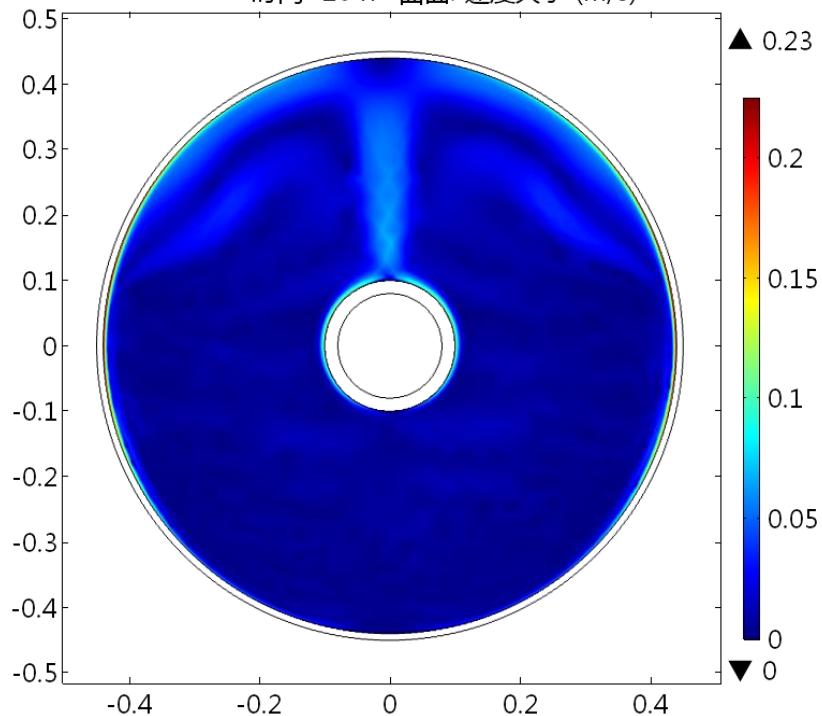


时间=20 h 曲面: 温度 (degC)



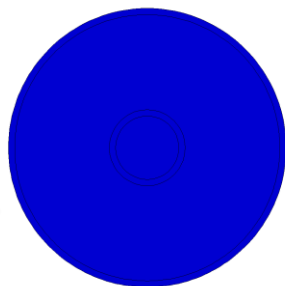
### GIS母线温度分布

时间=20 h 曲面: 速度大小 (m/s)



### GIS母线气流速度分布

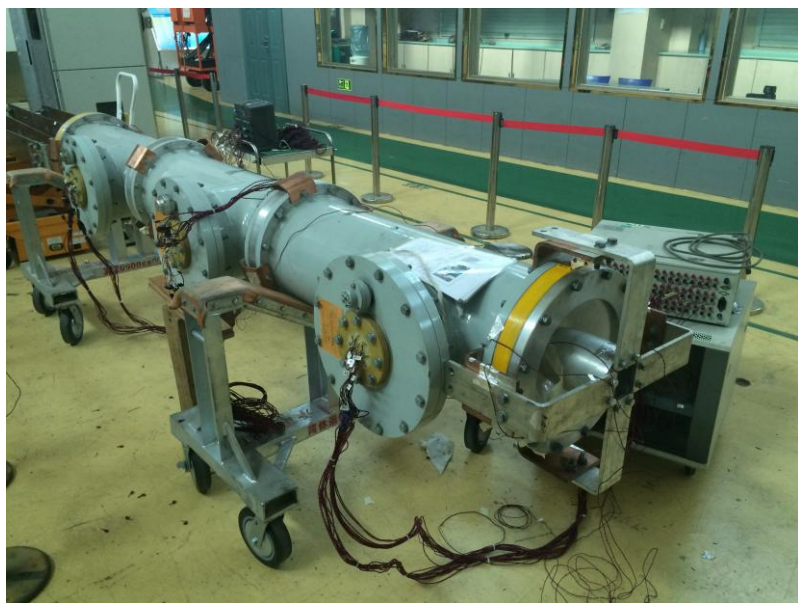
温度分布瞬态过程



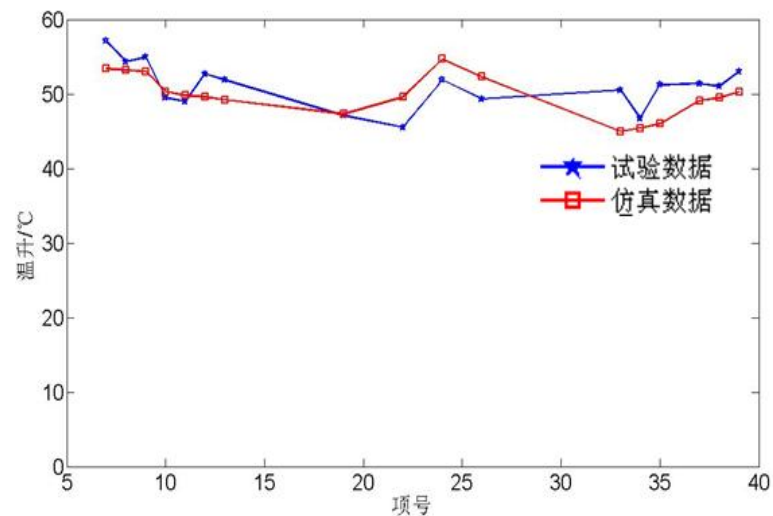




通过试验结果和仿真模型的对比，准确度达到90%以上，证明了COMSOL仿真模型的准确性。



GIS母线温升试验装置



试验和仿真结果的对比



国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

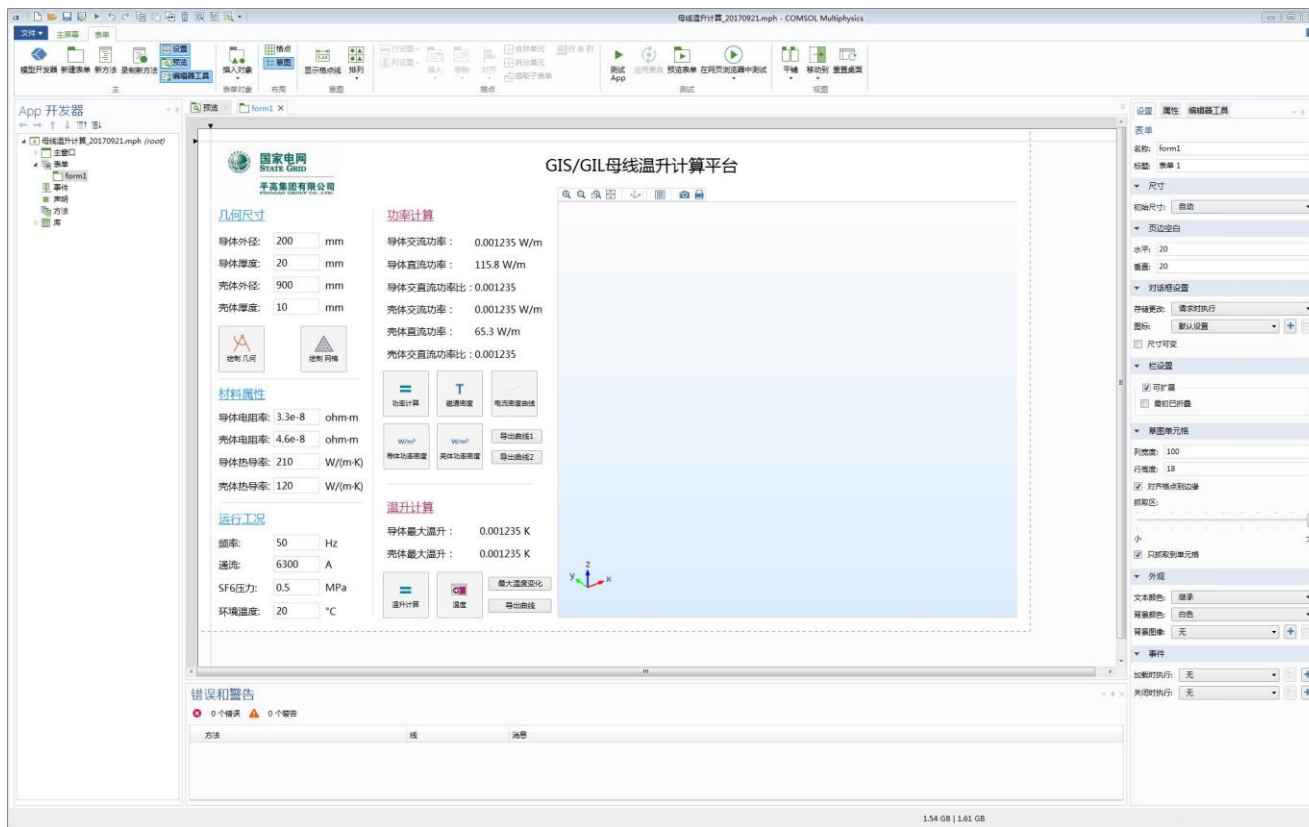
COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING

# 仿真App的应用

——GIS温升仿真App



- ✓ 知识经验的传承
- ✓ 仿真工具的普遍运用
- ✓ 市场需求的快速响应
- ✓ 产品的优化设计



- 灵活的界面设计
- 方便的操作过程
- 个性的定制方法
- 结果的多样展示

GIS温升仿真App开发界面

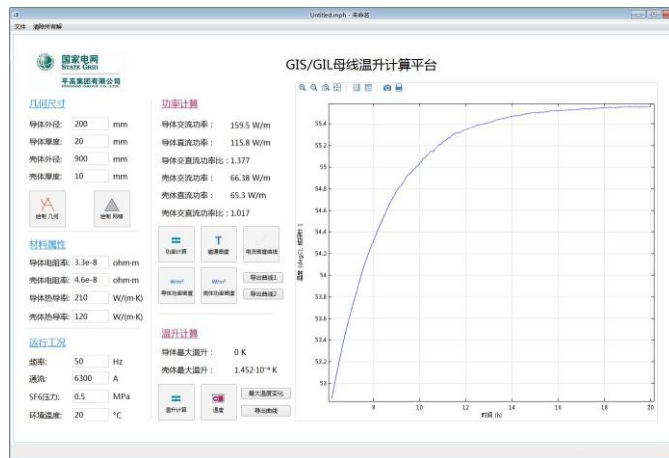
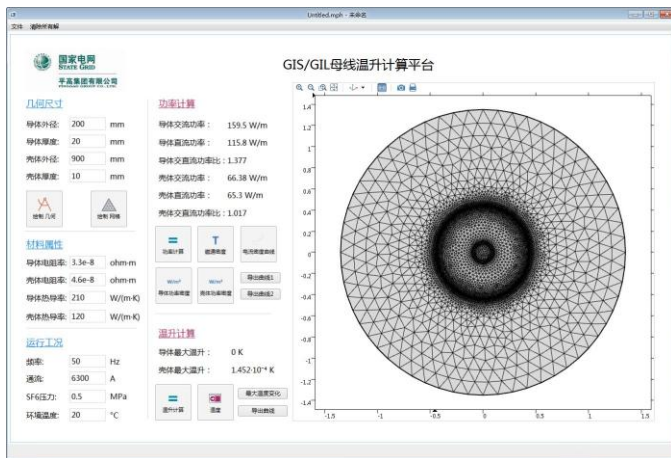
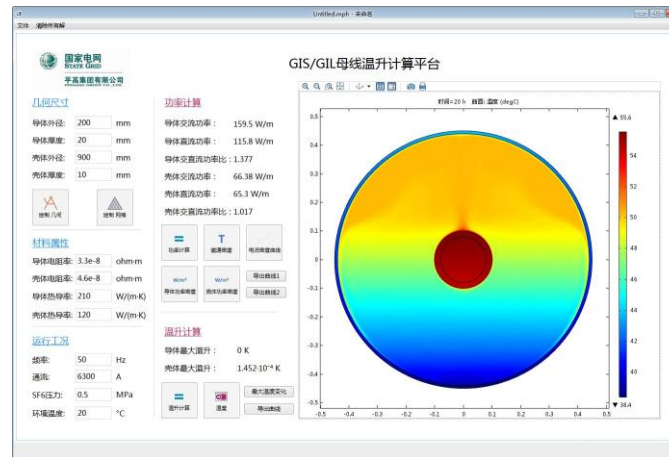
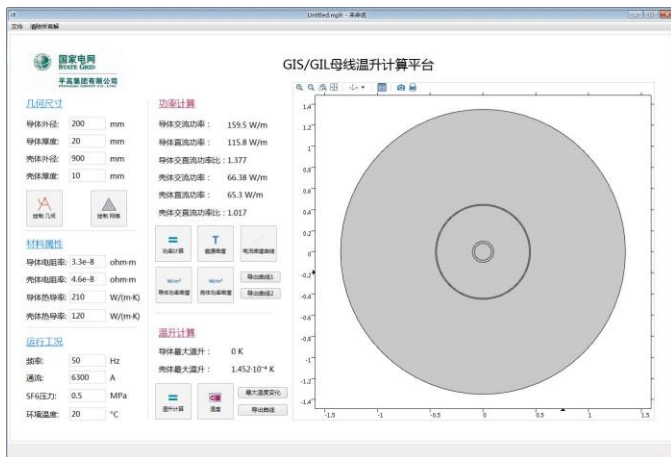


国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

# GIS温升仿真App

COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING





- 对于直流GIS，使用COMSOL 模拟GIS中气体绝缘介质在电场作用下的离子漂移、扩散作用，根据气体中正负离子的浓度的改变实时计算GIS直流电场分布。该方法解决了直流场下气体非均匀电导率造成的电场畸变，对于指导直流GIS绝缘设计起到了重要作用；
- GIS温升计算需要考虑封闭空间气体流动造成的重力方向温度梯度，利用COMSOL耦合求解电磁场、温度场、流场方程可获得GIS工作时的实际温度分布，并验证了仿真模型的准确性；
- App开发器将GIS温升仿真模型集成在App中，有利于知识的传承，降低试验成本，提高研发效率；
- 下一步COMSOL将应用于高压开关设备电动力计算、热变形计算、流固耦合计算等。





国家电网  
STATE GRID

平高集团有限公司  
PINGGAO GROUP CO.,LTD.

COMSOL  
CONFERENCE  
2017 BEIJING



谢谢