



设备仿真技术在电网中的应用案例分享

程建伟 研究员

南方电网科学研究院

2017年7月 中国 烟台

一、设备仿真背景

设备运行现状：变压器、断路器、GIS等主设备故障率较高；分析手段主要依赖专家经验和高压试验；分析时间长，代价高，耗时耗力；缺乏有效的量化分析和重现手段。

仿真计算优势：通过对设备工况的假设、穷举和反推，可以迅速实现设备技术问题的精确定位和量化分析，大幅节约时间和成本，满足设备问题分析时效性的要求。

软件使用现状：商业软件琳琅满目，使用门槛高、上手困难、功能与需求不符，扩展性和互通性欠佳。

仿真应用现状：水平参差不齐、工程经验欠缺、有需求无能力、分析周期长、难以满足实时性要求。

设备仿真发展趋势：通用性，集成性，易用性，专有性，可扩展性。

二、设备仿真案例清单

- 1、直流极线分压器击穿故障分析
 - 2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析
 - 3、换流站阀厅及直流场电场设计优化
 - 4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化
-

1、直流极线分压器击穿故障分析

极 I 解体情况



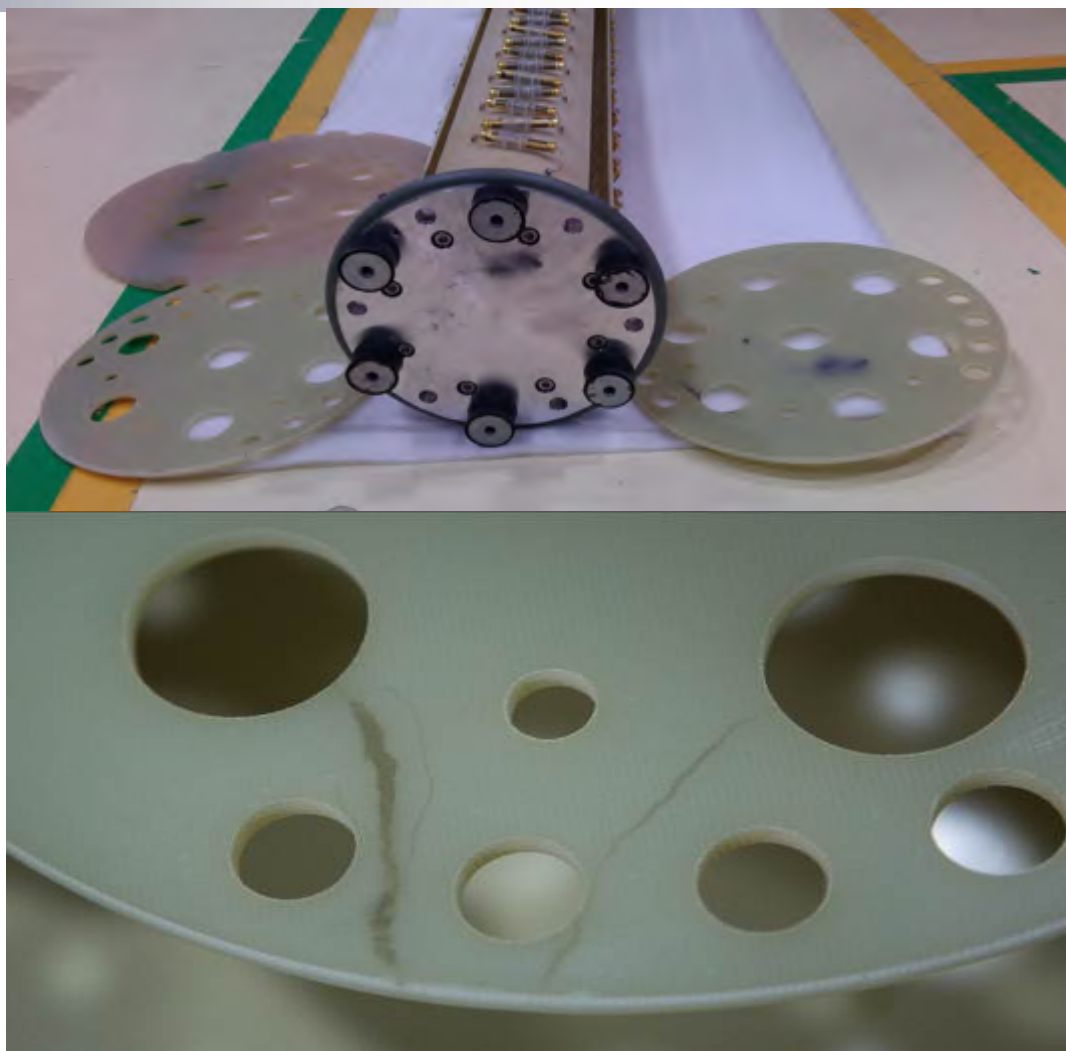
- ◆ 直流分压器内部阻容分压单元烧损严重。
- ◆ 部分单元隔板内部的电容器元件融化毁坏。
- ◆ 因阻容分压单元面目全非，已难以找到故障引发点。
- ◆ 环氧筒内壁存在鼓包和放电通道。

极 I 分压器内部发生绝缘击穿和沿面爬电，绝缘破坏严重，已不可恢复

1、直流极线分压器击穿故障分析

极 II 解体情况

- ◆ 每节阻容分压单元下法兰和环氧板间都有不同程度的放电和炭黑痕迹。
- ◆ 分压器高压端放电痕迹更明显，且各节法兰位置用于固定分压器的环氧板表面有明显的爬电痕迹。

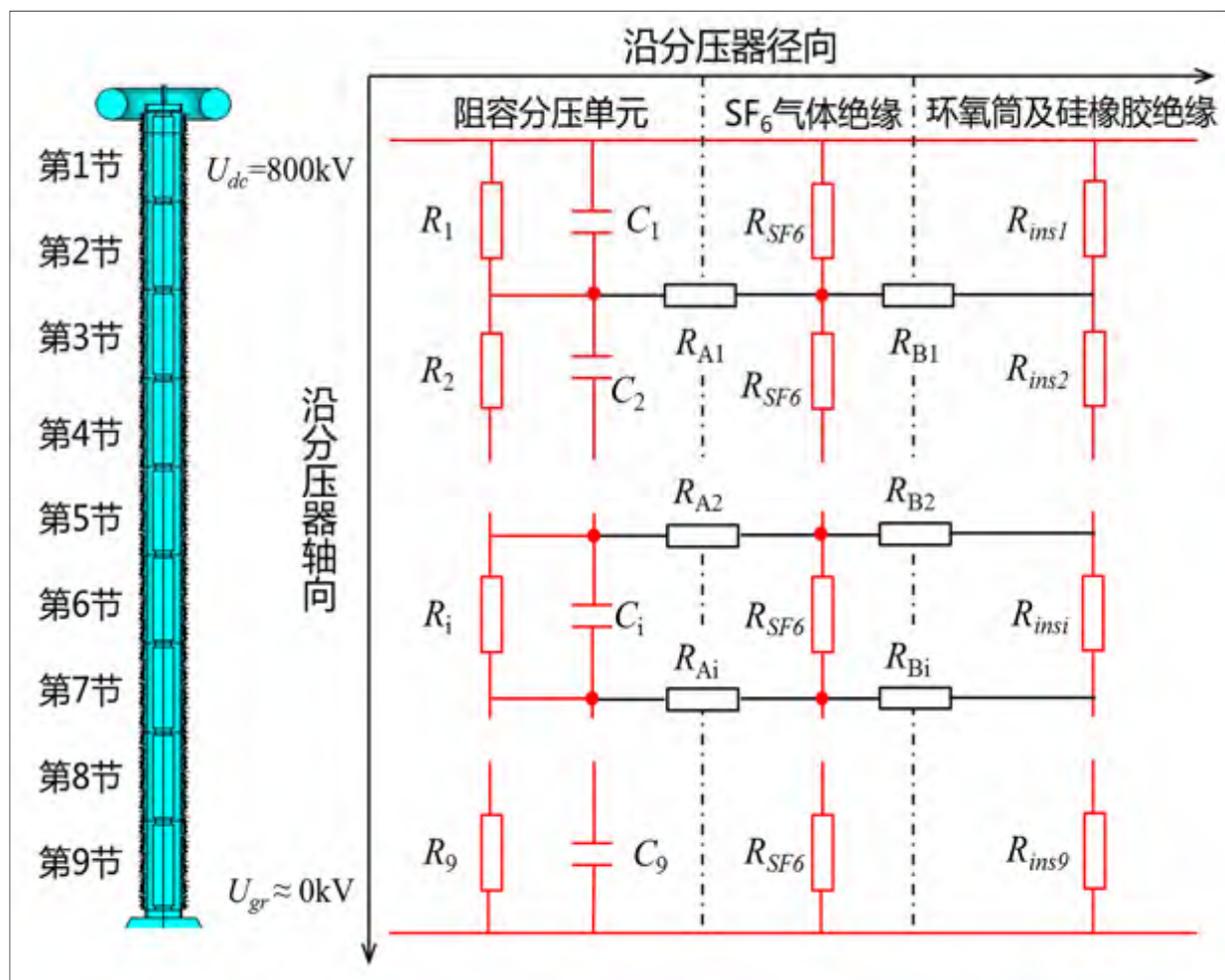


极 II 分压器内部法兰盘位置发生局部放电和沿面爬电，若放电继续发展，可能将导致与极 I 分压器类似的严重绝缘故障

1、直流极线分压器击穿故障分析

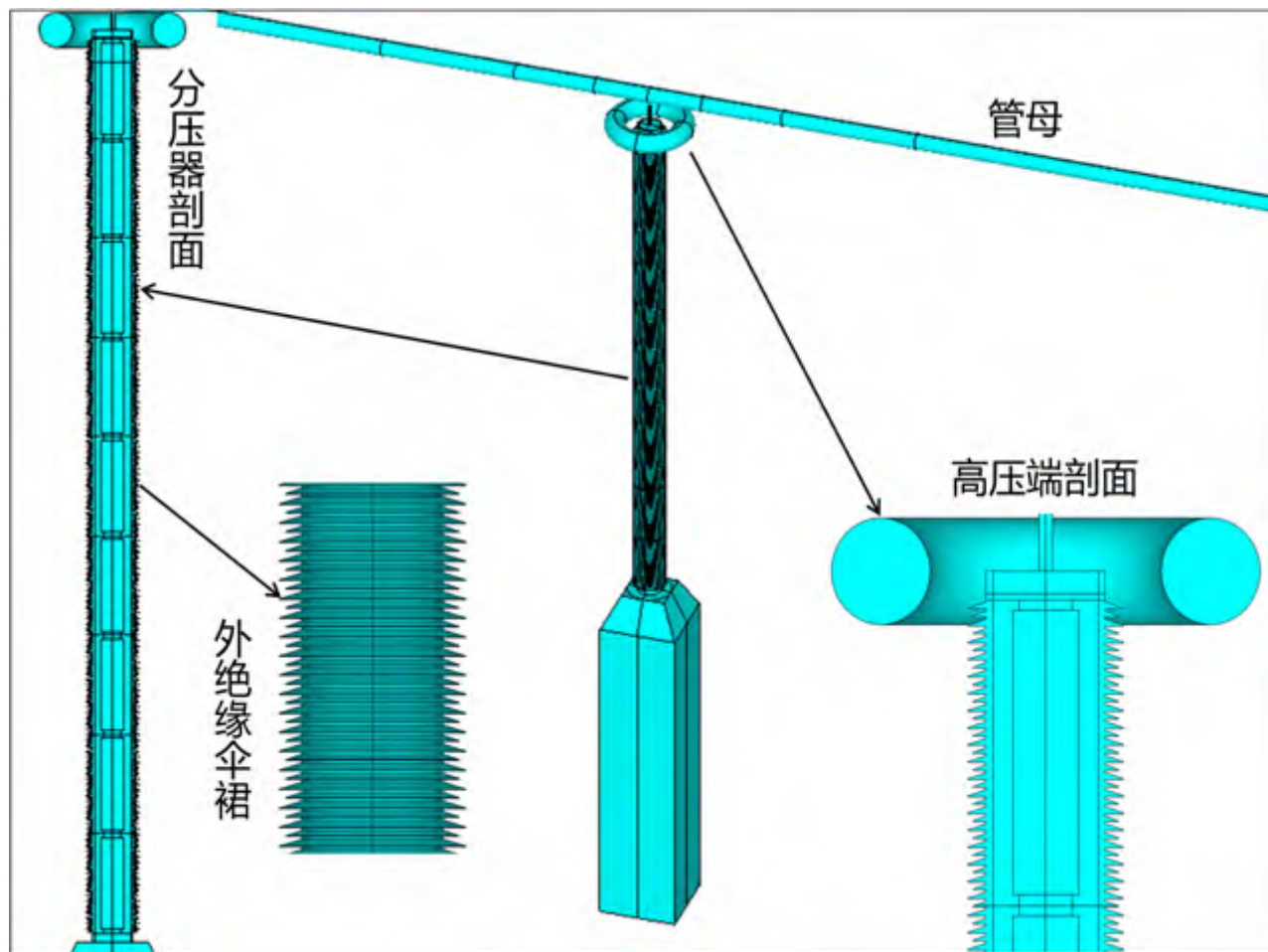
绝缘结构分析

- ◆ 分压器高压臂由9节相同的阻容分压单元组成。
- ◆ 由内到外依次是阻容分压单元、环氧树脂玻璃钢筒、硅橡胶复合伞裙。
- ◆ 通过法兰盘中间的环氧板实现与筒内壁的相对固定，以防止其径向摆动。
- ◆ 内部充SF6气体作为内绝缘，外绝缘为硅橡胶伞裙的复合绝缘。



1、直流极线分压器击穿故障分析

计算模型

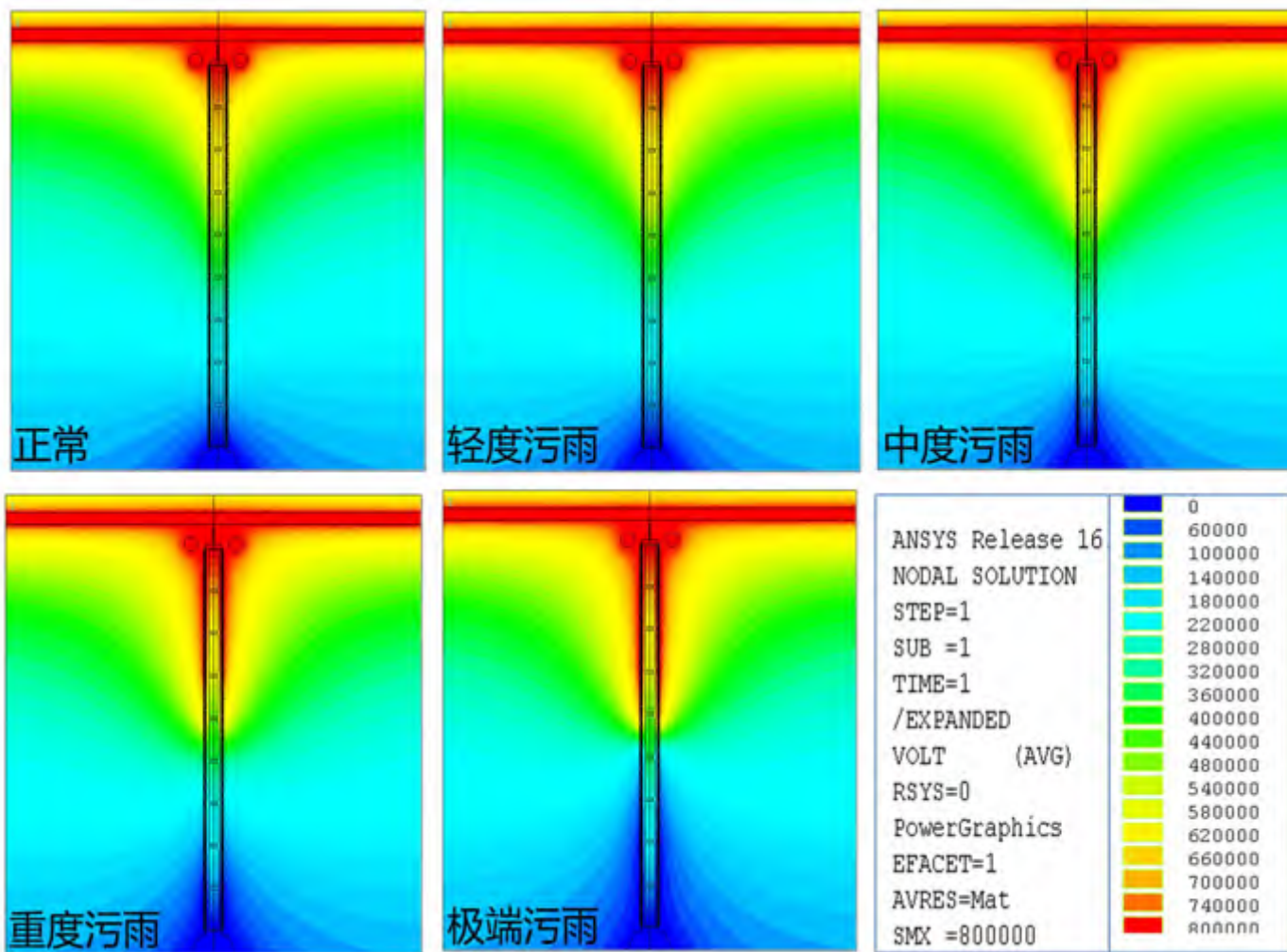


管母直径300 mm，管母对地高度17120 mm；分压器本体高度11370 mm（含均压环），支架高度6000 mm，分压器上部均压环管径400 mm，外径1390 mm。

高压侧法兰、均压环及管母加载800kV直流电压，支架、地面及远场边界加载0kV电压，选用恒定电场求解器。

1、直流极线分压器击穿故障分析

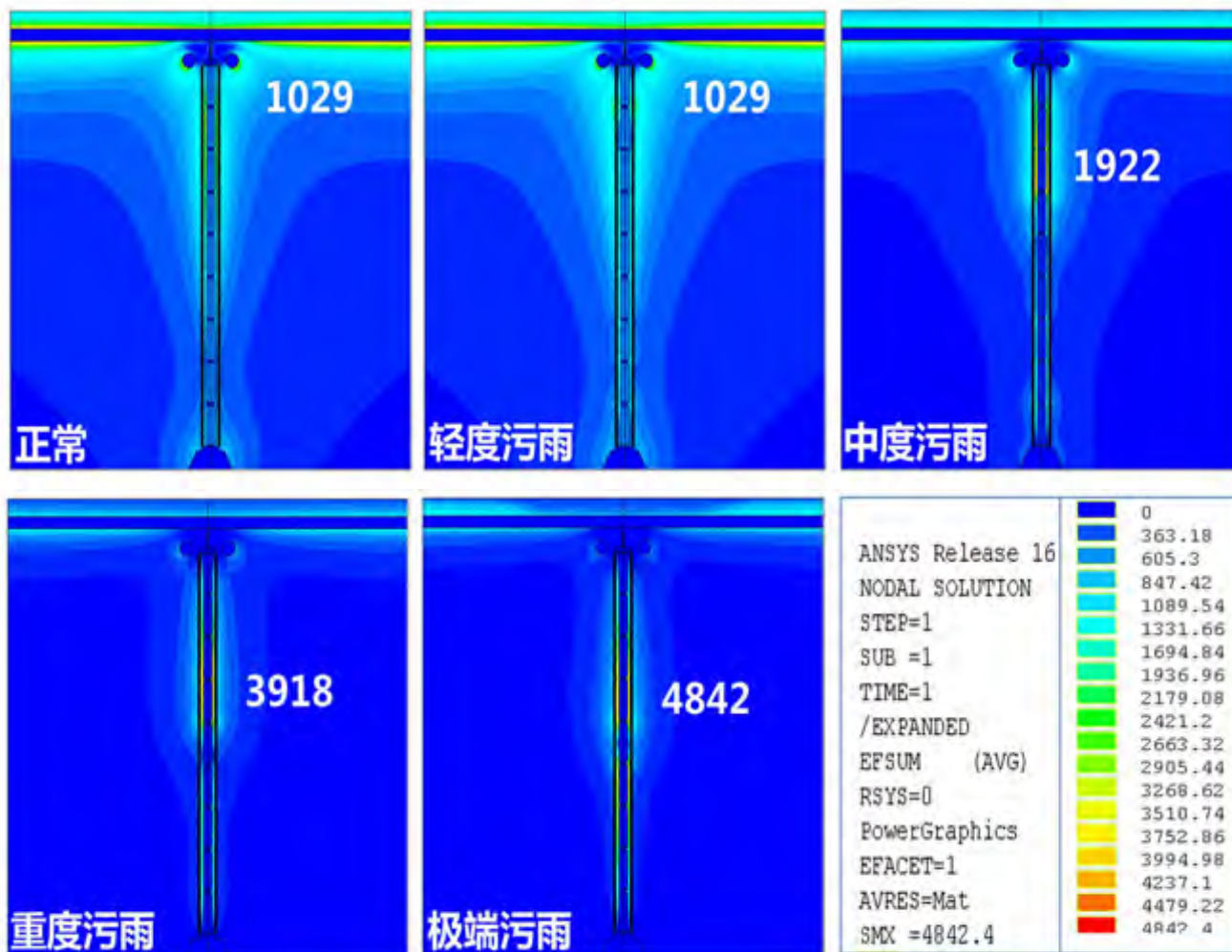
电位计算结果



- ◆ 随着外绝缘运行状况的恶化，分压器轴向电位的不均匀分布显著加强。
- ◆ 环氧筒外套的绝缘电阻从高压端到低压端逐渐不均匀降低，且高压端和低压端的下降幅度比中部更大。
- ◆ 高电位被逐渐下引，低电位被逐渐上引，电位分布在绝缘电阻更大的分压器中部出现集中。

1、直流极线分压器击穿故障分析

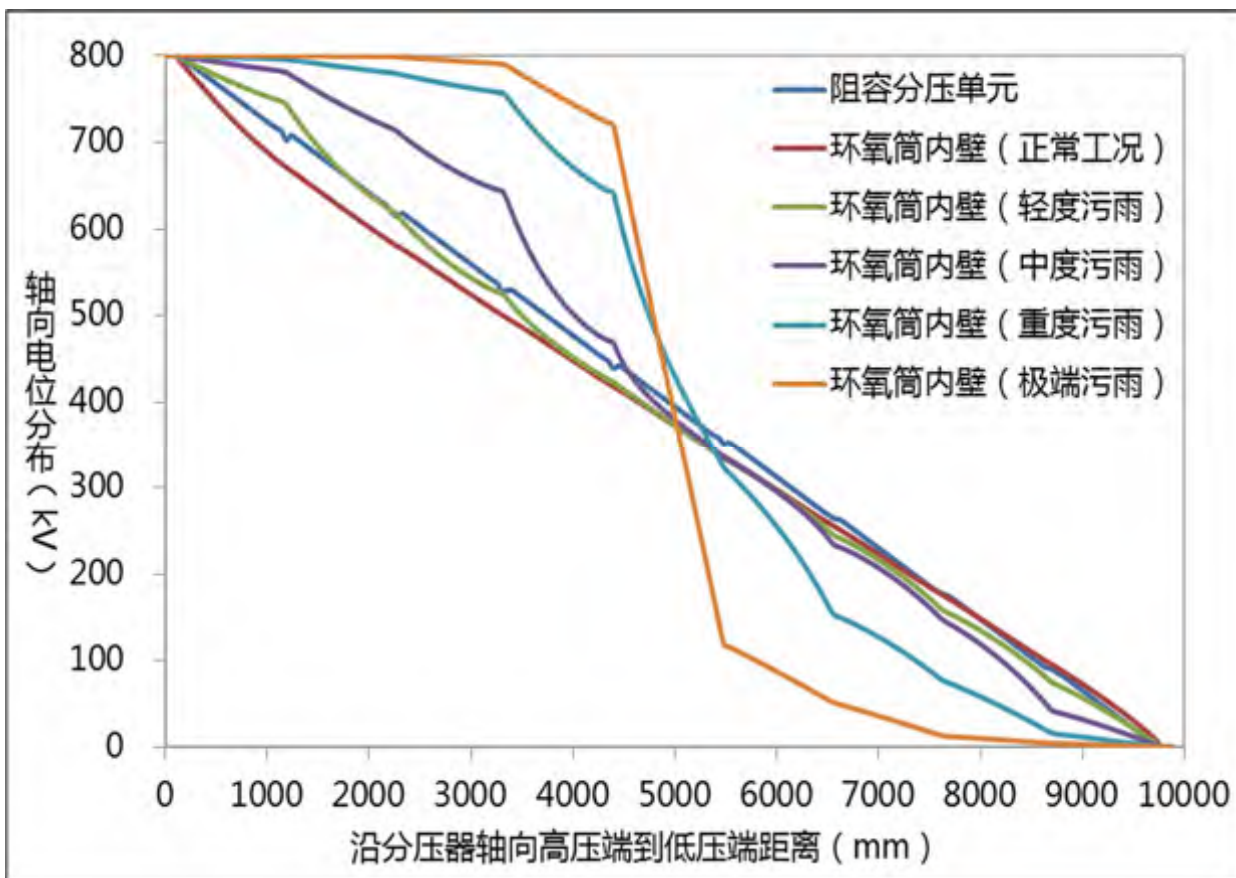
电场计算结果



- ◆ 随着分压器外绝缘运行状况的恶化，高场强区出现了转移和增强。
- ◆ 在正常和轻度污雨工况下，高场强区出现在分压器高压侧均压环及管母附近，且最高场强较小，为1029V/mm。
- ◆ 在极端污雨工况下，高场强区从分压器的高压端转移到中部，该处最高场强达到4842 V/mm，约升高到正常工况下的4.7倍。

1、直流极线分压器击穿故障分析

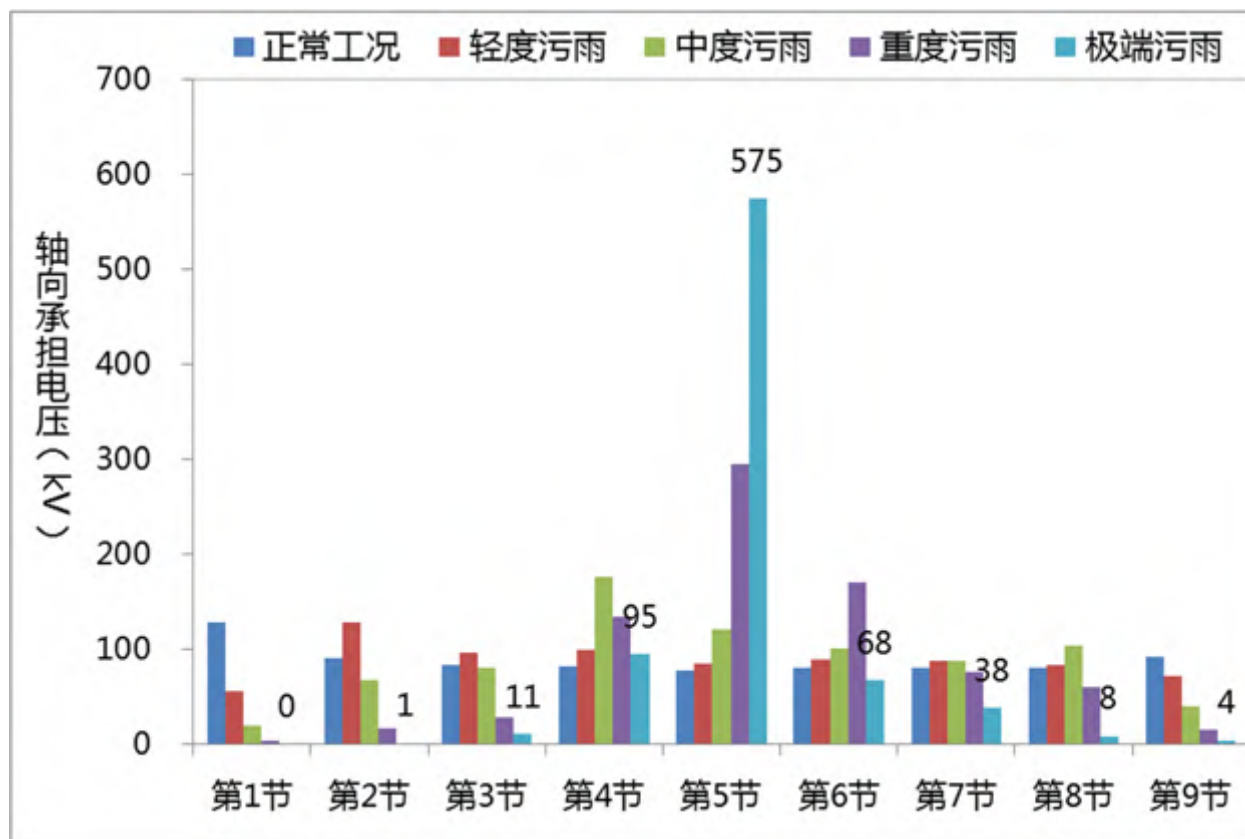
环氧筒内壁轴向电位分布



- ◆ 随着分压器外绝缘运行状况的恶化，分压器高压侧和低压侧承担的电压逐渐变小，大部分电压降由中间几节环氧筒承担。
- ◆ 在极端污雨工况下，分压器高压侧和低压侧各3000mm长度的环氧筒外套几乎不承担电压，绝大多部分的电压均由中部的环氧筒承担。

1、直流极线分压器击穿故障分析

环氧筒内壁轴向爬电的分析

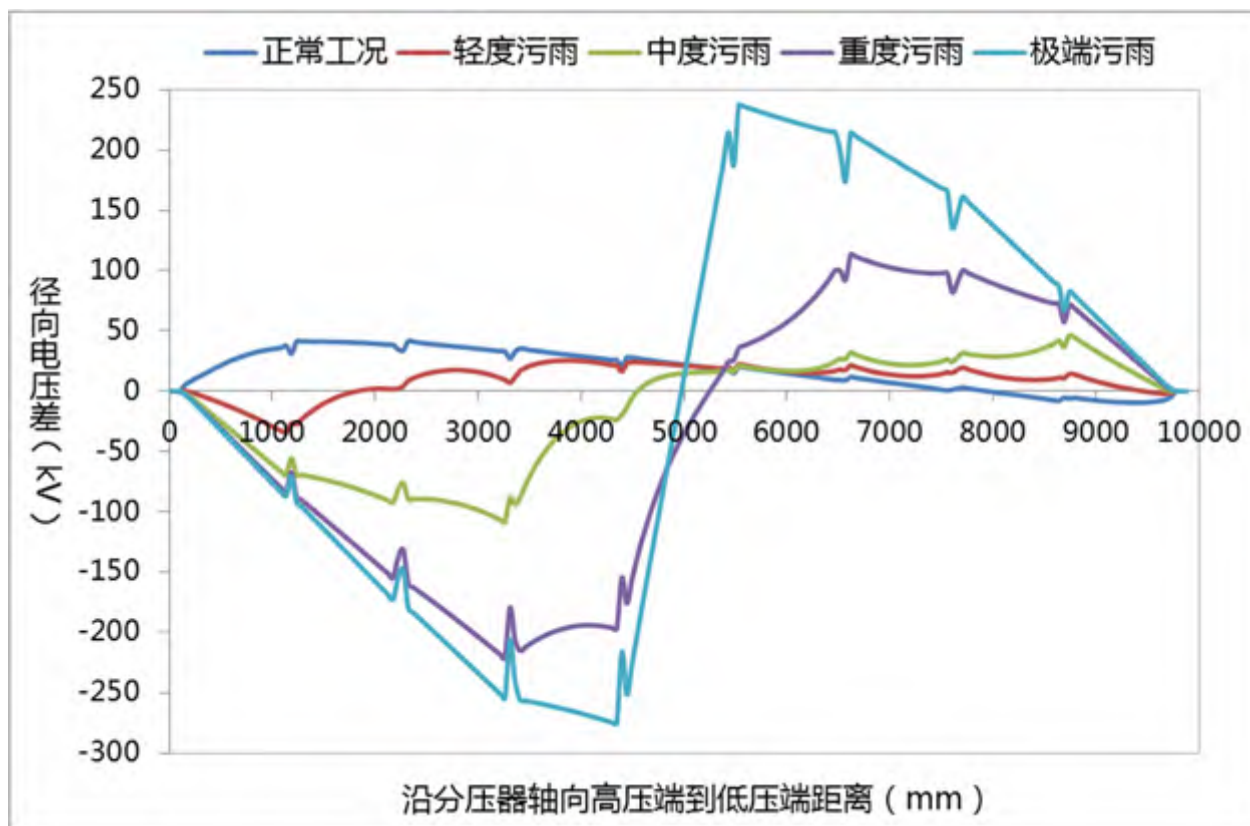


- ◆ 在极端污雨工况下，第5节环氧筒承担电压为575kV，占分压器全部运行电压的71.9%，是单节阻容单元理论分压值的6.47倍。
- ◆ 会引起环氧筒内壁局部放电，使SF₆气体及环氧筒内壁界面受到污染，导致该体系的绝缘性能下降，进一步将发展为轴向沿面爬电。

外绝缘运行状态恶化导致的轴向分压严重不均匀是环氧筒内壁爬电的主要原因

1、直流极线分压器击穿故障分析

分压器内部径向放电的分析



- ◆ 分压器内部不同位置均存在径向电位差。
- ◆ 正常工况下最大径向电位差约为40kV；极端污雨工况下最大径向电位差约为275kV，出现在第5节环氧筒。
- ◆ 阻容分压单元与环氧筒内壁较小的SF6气体间隙因承受这一较大的径向电位差而产生高场强，引发局部放电和爬电。

轴向分压严重不均匀导致分压器内部和外部径向电位差，是内部径向放电的主要原因

1、直流极线分压器击穿故障分析

结论

- ± 800 kV直流分压器的绝缘结构决定了其内绝缘受外绝缘条件的影响不可避免，这一点必须在设计和运行时引起重视并给予充分考虑。
- 在正常运行工况下， ± 800 kV直流分压器轴向电位分布较均匀，分压器内部径向电位差较小，内绝缘受外绝缘的影响较小。
- 在污雨等恶劣外绝缘运行工况下，分压器环氧筒外套绝缘电阻发生非线性下降，与阻容分压单元轴向电阻不匹配，引起分压器轴向电位差，进而导致环氧筒局放、沿面爬电，阻容分压单元法兰盘径的向局放、爬电，以及SF₆气体间隙的击穿。

建议

- 提高分压器内部击穿阈值：改进分压电阻及电容器安装工艺；提高运行气压；增大筒径或在气体间隙中增加隔板；改善环氧筒内壁工艺与界面；
- 改善分压器外绝缘电位分布：优化伞形；定期清扫以减少积污；加装大直径防雨伞；
- 针对性的运行维护：雷雨天气下降压运行；实时监测分压器电压；加强SF₆气体压力监测；电压波动后及时检查气体组分。

实际工作中在保证设备机械受力的前提下，适当提高运行气压是简便有效的手段

1、直流极线分压器击穿故障分析

小结

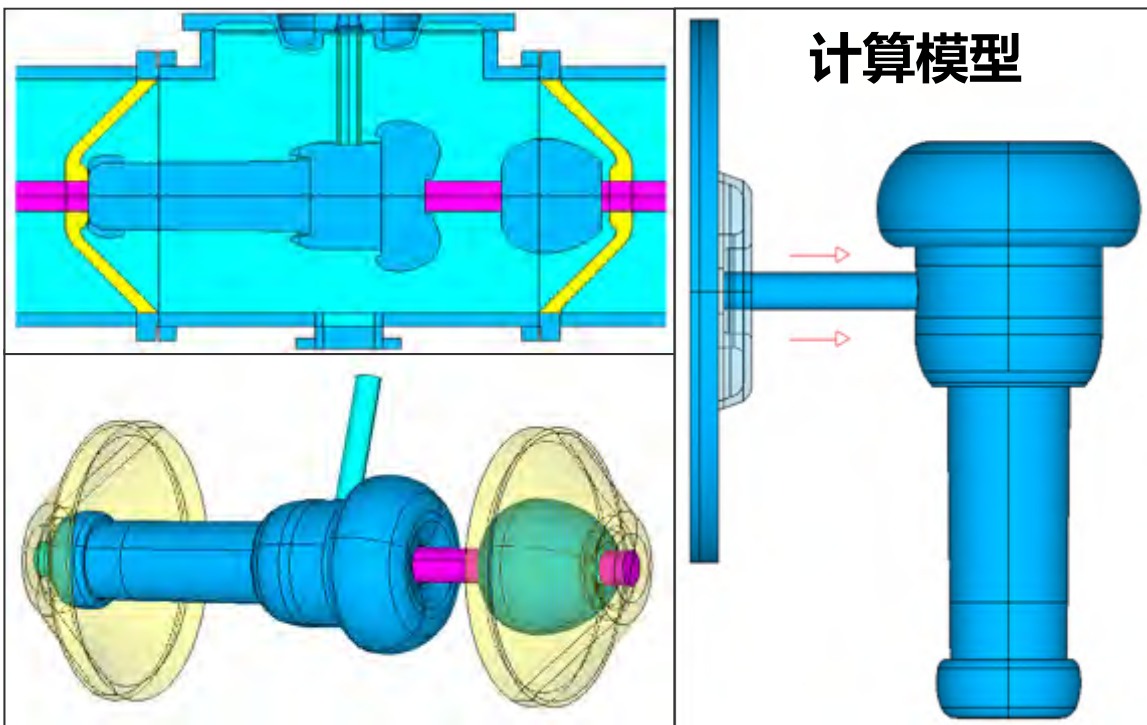
建模思路：依据分压器实际绝缘材料和结构，结合故障现场运行工况、解体情况和积累的工程仿真经验，数字化真实再现故障发展过程。

意义：通过仿真计算量化了分压器绝缘性能下降的趋势和数值，分析了可能的放电和击穿路径，为事故原因分析提供了有力证据，做到了“战之能胜，胜之在理”。

仿真难点：时效性和快速响应，依托绝缘结构专业背景和仿真计算工程经验，短时间内制定方案，提供计算结果，支撑事故分析。

2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

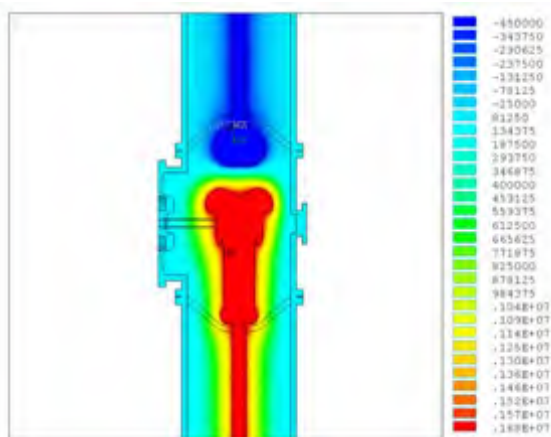
GIS隔离开关故障解体现场



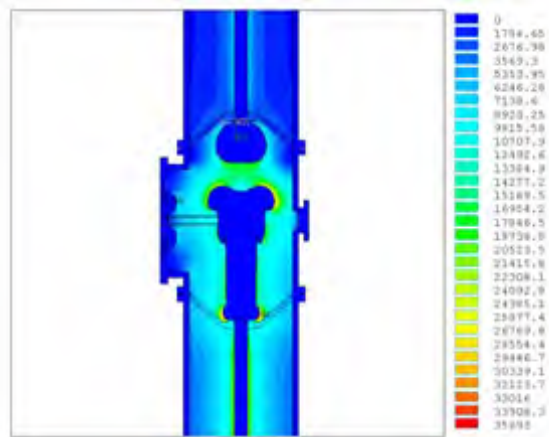
根据厂家提供的图纸，对隔离开关模块进行了三维建模和不同工况（正常、雷电操作、异物）下的电场仿真分析。

2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

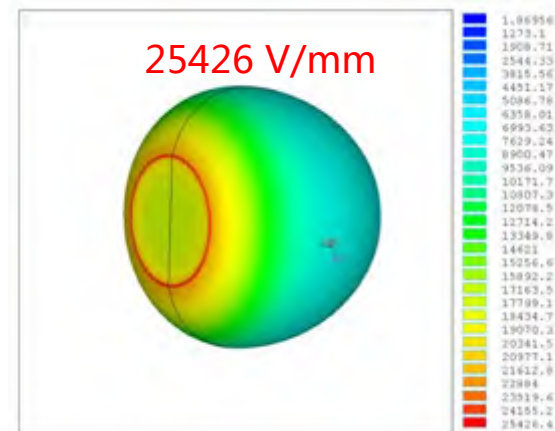
雷电操作下电场计算结果 (+1675kV , -450kV)



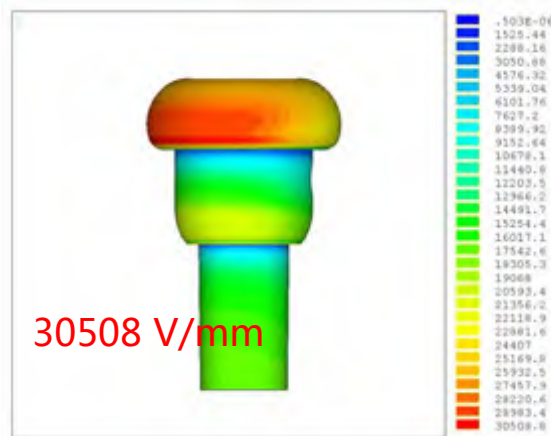
整体电位



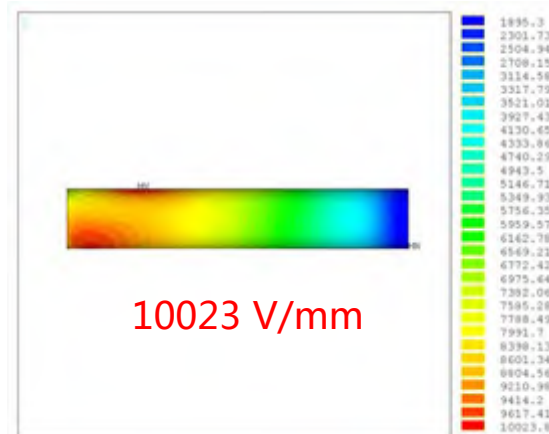
整体电场



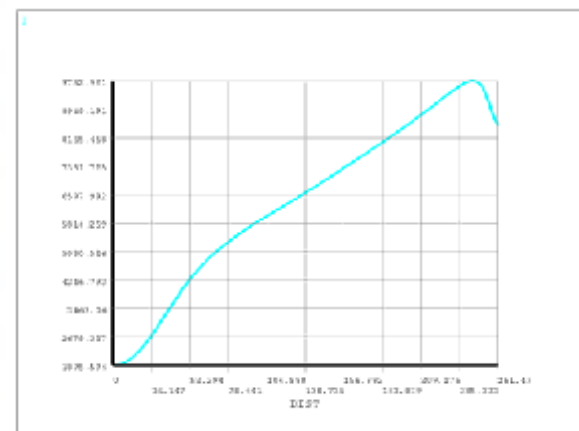
静屏蔽罩电场



动屏蔽罩电场



绝缘杆电场

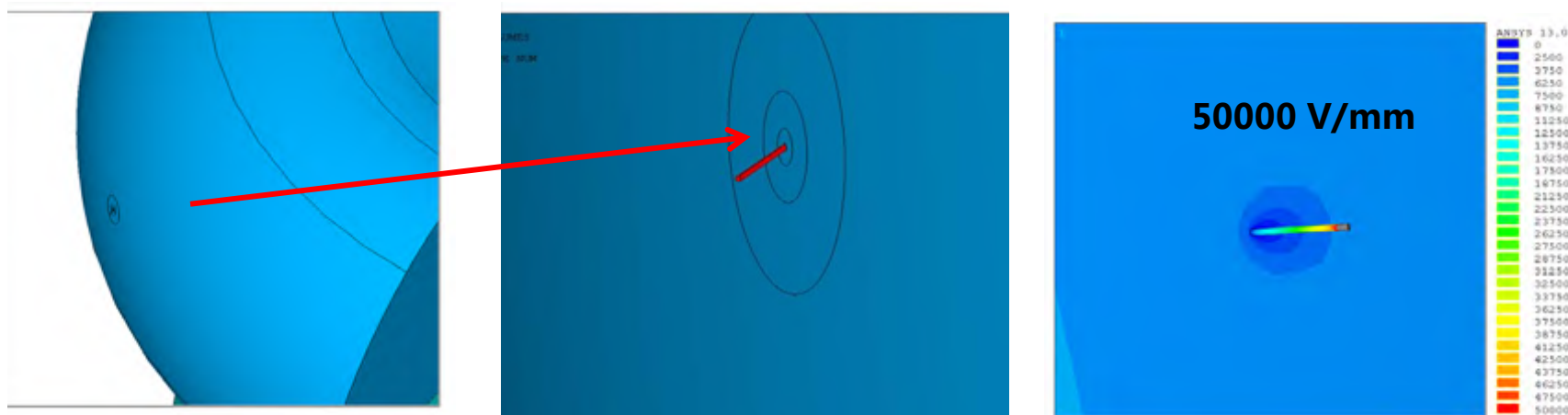


绝缘拉杆电场曲线

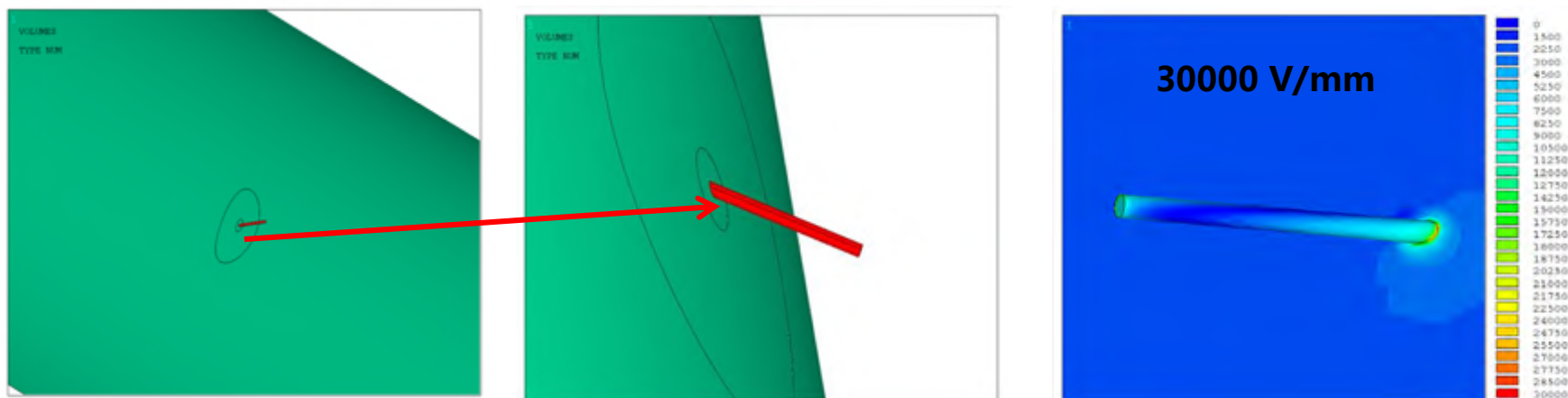
2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

正常工况屏蔽罩上存在金属异物

金属丝距离中心导杆水平距离137mm，距离屏蔽罩上端竖直距离71mm。
半径0.2mm，长2.5mm，与屏蔽罩切线方向夹角大约40度。



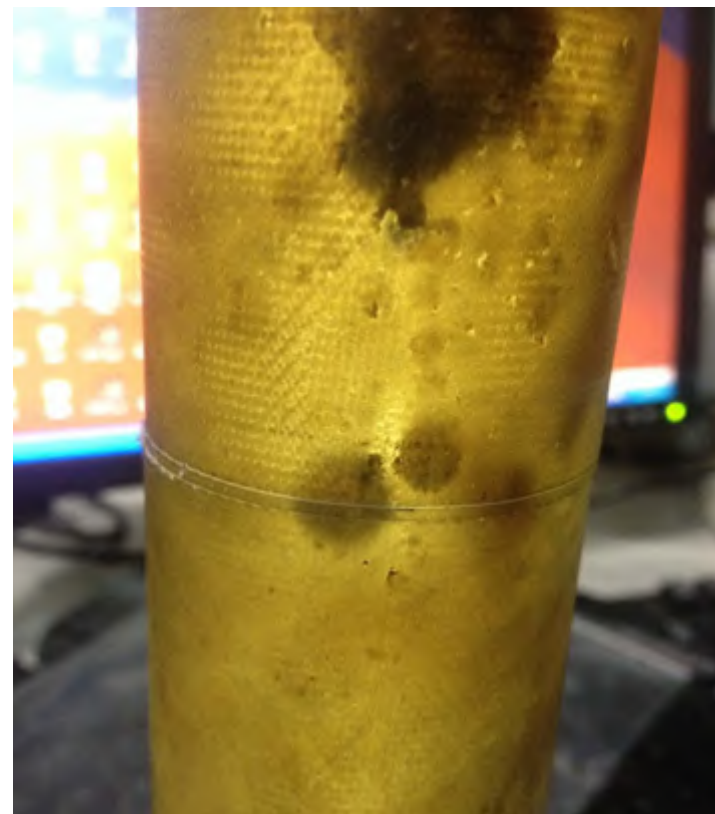
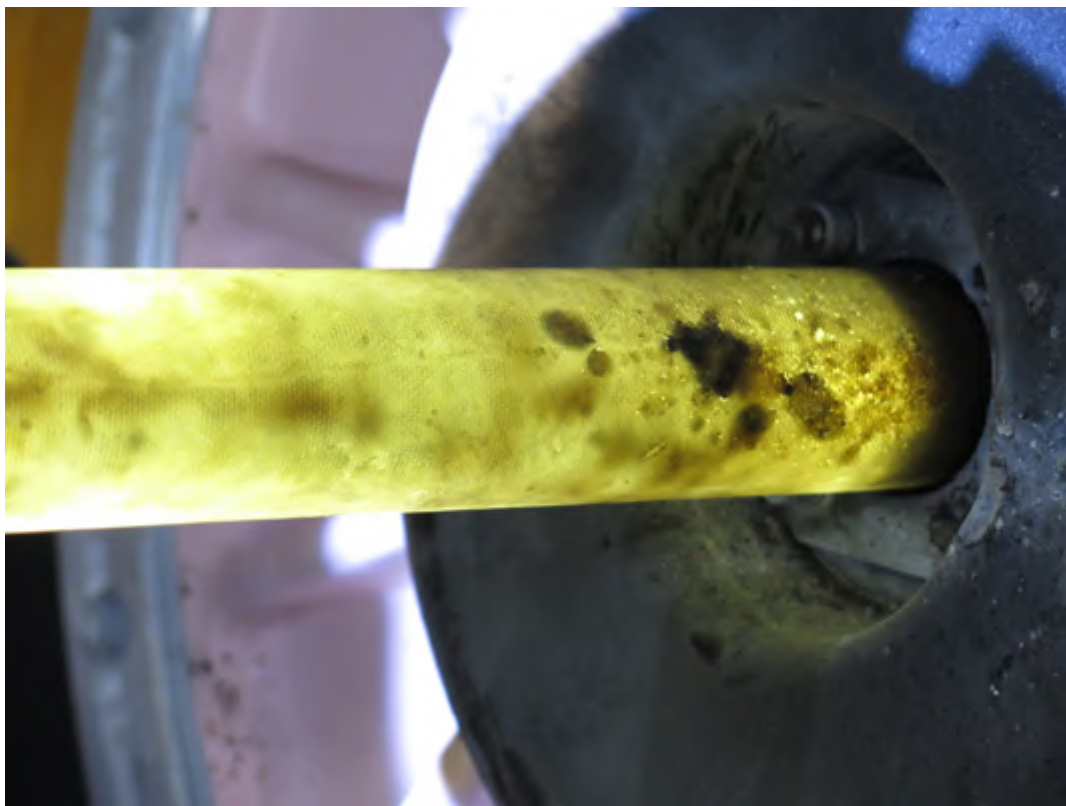
正常工况拉杆上存在金属异物：距离屏蔽罩98mm，距离拉杆上沿11mm



2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

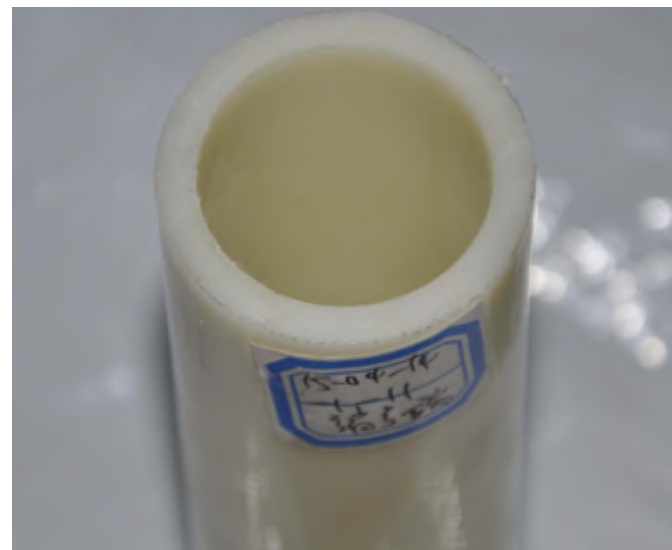
→ 绝缘拉杆解剖切片检查：

对烧损拉杆存疑点进行了解剖和切片，发现切下的约1mm厚的薄片试样截面存在3处异常，极可能为分层或裂隙（深入拉杆内部）。



2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

绝缘拉杆解剖切片检查：

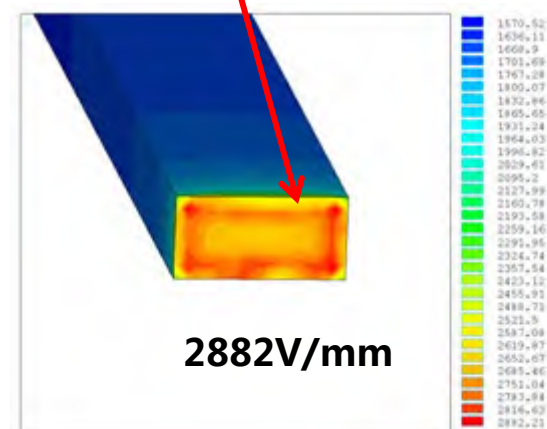
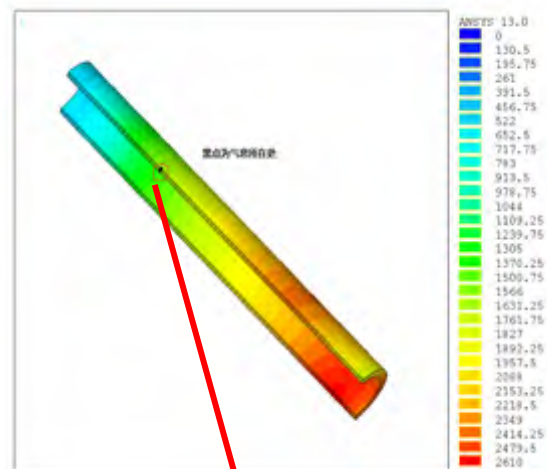
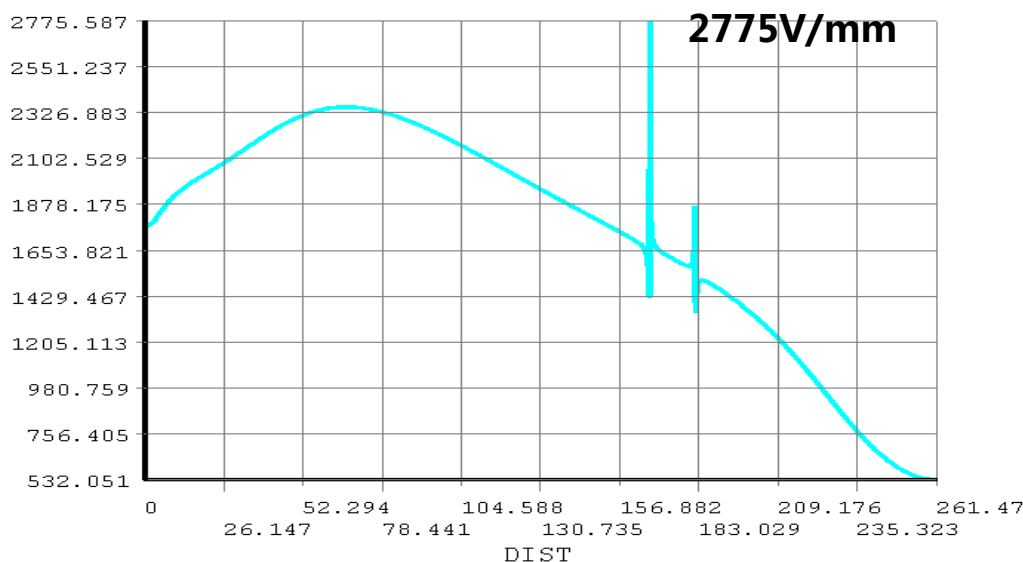


在10倍放大镜下可见位置2异常处极可能为裂隙，其深度在径向圆周方向上不一致。

2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

→ 气隙的电场仿真：

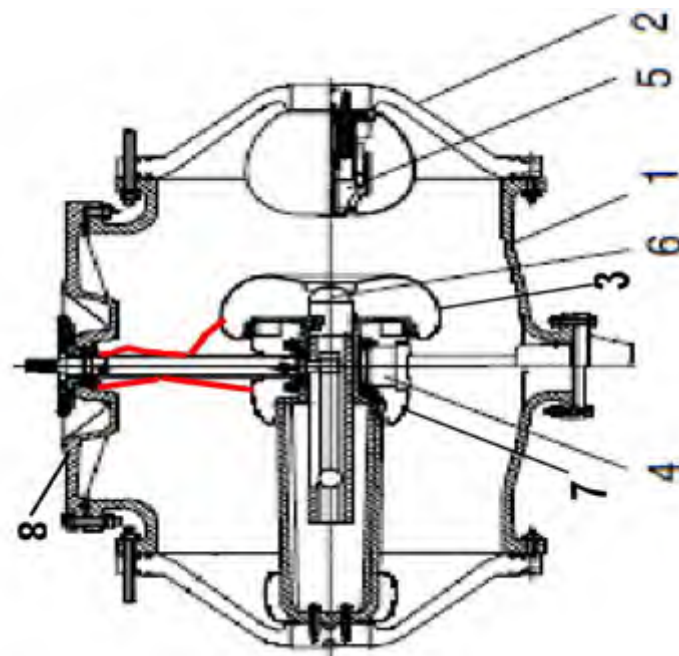
设定气隙形状为长15mm，宽1mm，高0.5mm的长方体。距绝缘拉杆上表面1mm深度，距拉杆低压端1/3拉杆总长处（发现内部黑斑位置）。



2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

放电路径

故障发生在该隔离开关动触头上屏蔽罩（3）与盖板（8）之间，电弧路径如图所示，烧蚀最为严重的部分在上屏蔽罩（3）和盖板（8）上，上屏蔽罩（3）上烧蚀为直径约30mm的孔洞，盖板（8）上四个内部固定螺栓中一个的头部已经融化，盖板内孔侧有两处烧蚀融化点。



故障原因

由于57232 A相隔离开关模块绝缘拉杆的局部存在分层或裂隙，导致个别位置局部放电，在长期的运行电压下，局放点附近区域逐渐碳化，形成部分导电区域，引发绝缘拉杆的沿面闪络，导致本次事件发生。

2、GIS隔离开关绝缘拉杆故障分析

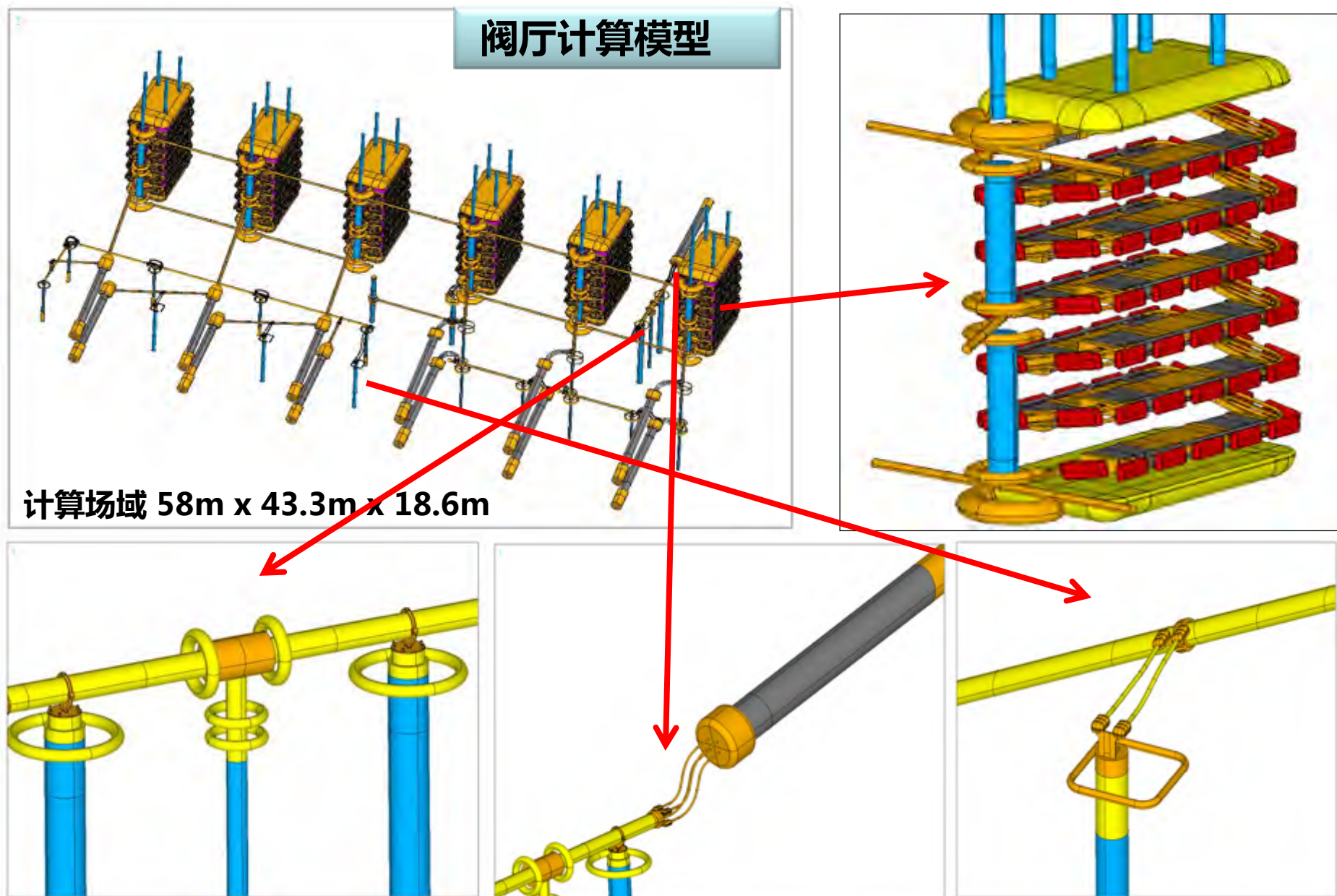
小结

建模思路：依据隔离开关模块实际结构尺寸，建立包括多个运行工况下的计算模型，并在不同的计算模型下进行差异化的后处理及分析。

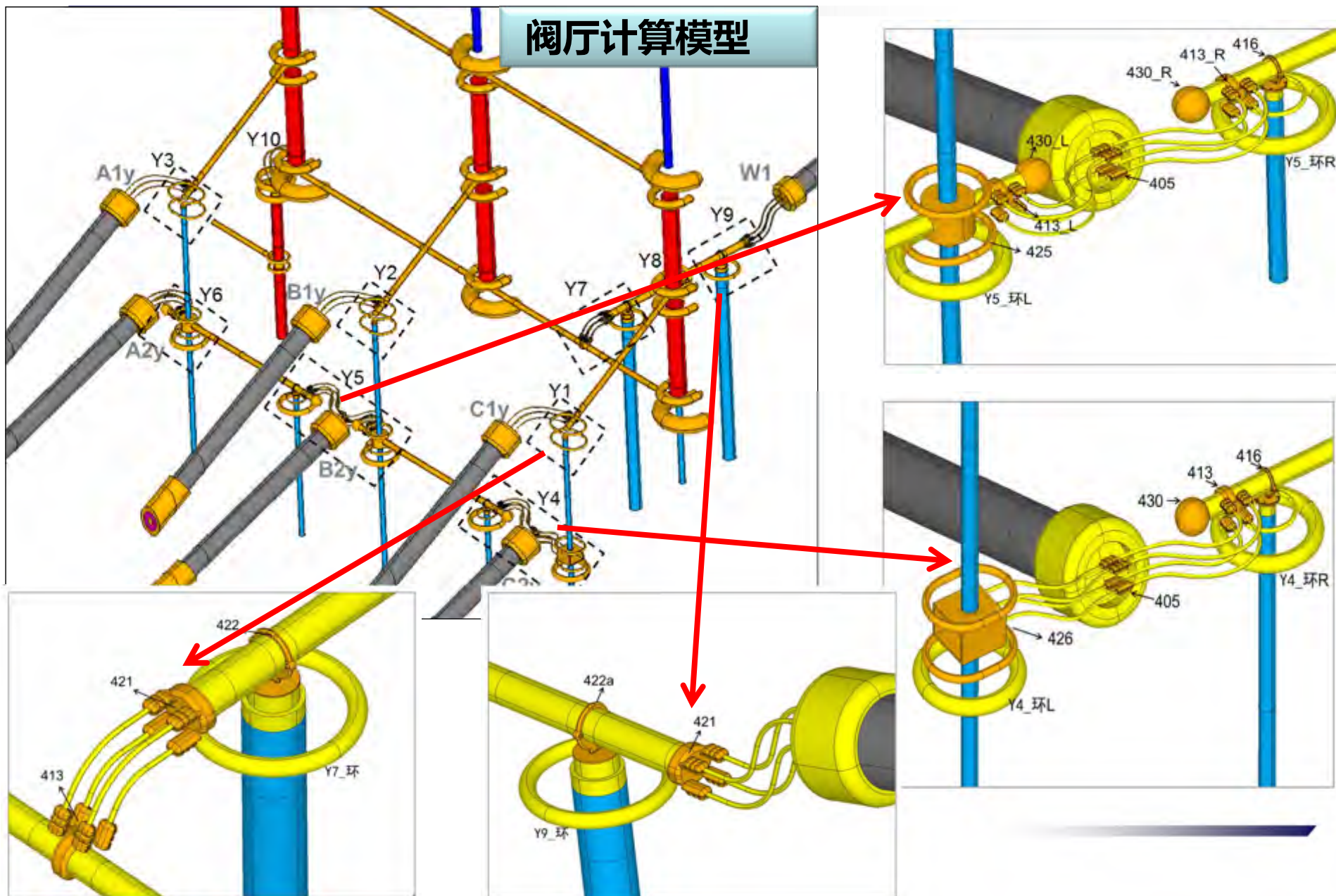
意义：计算了不同工况下（正常、操作、异物）隔离开关的电场，仿真了导电和非导电微粒对隔离开关绝缘性能的影响，论证了绝缘拉杆内部存在裂隙是导致本次事故的直接原因。

仿真难点：时效性和快速响应，短时迅速仿真分析能力，不同工况的建模和差异化的后处理。

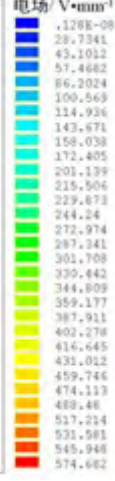
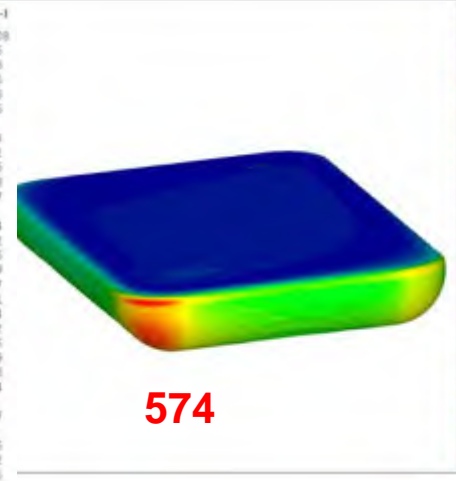
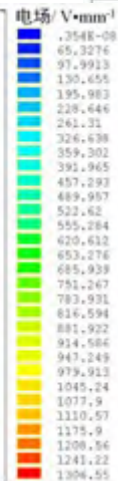
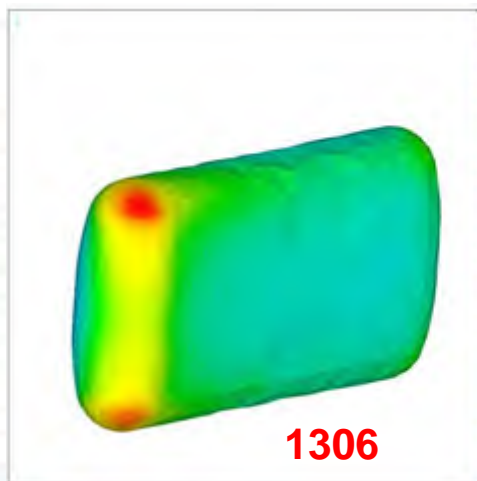
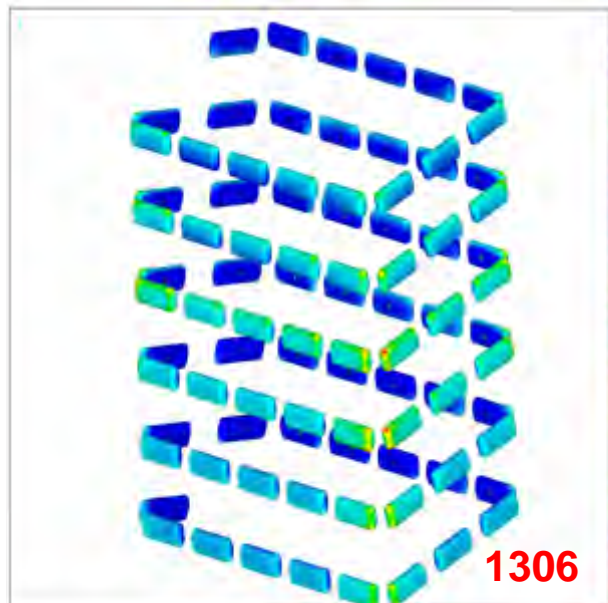
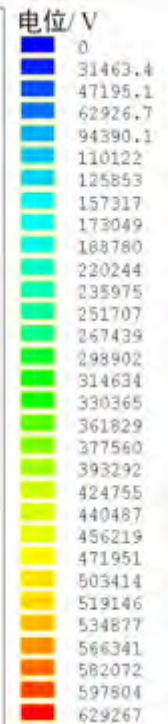
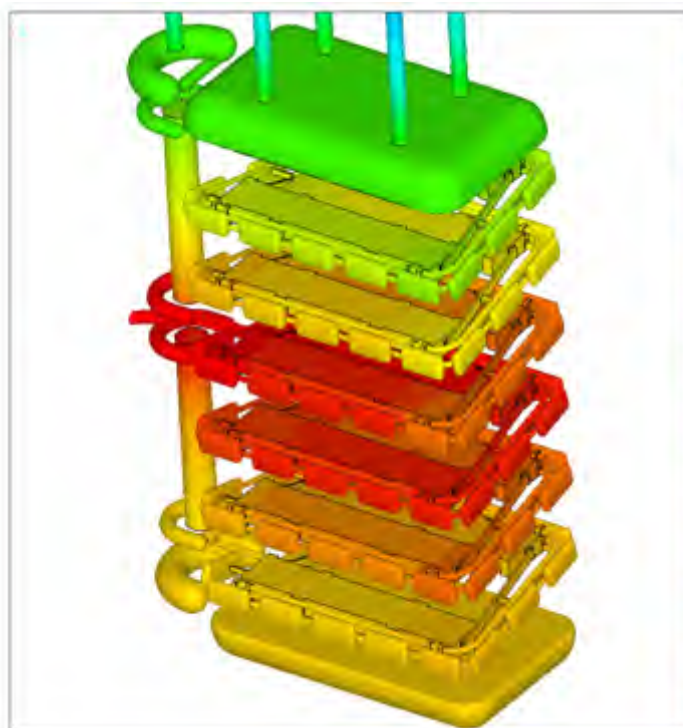
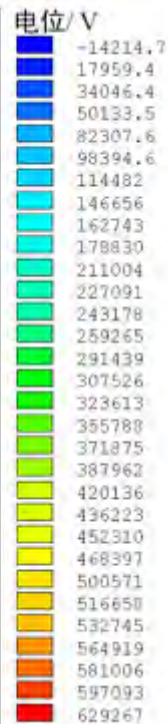
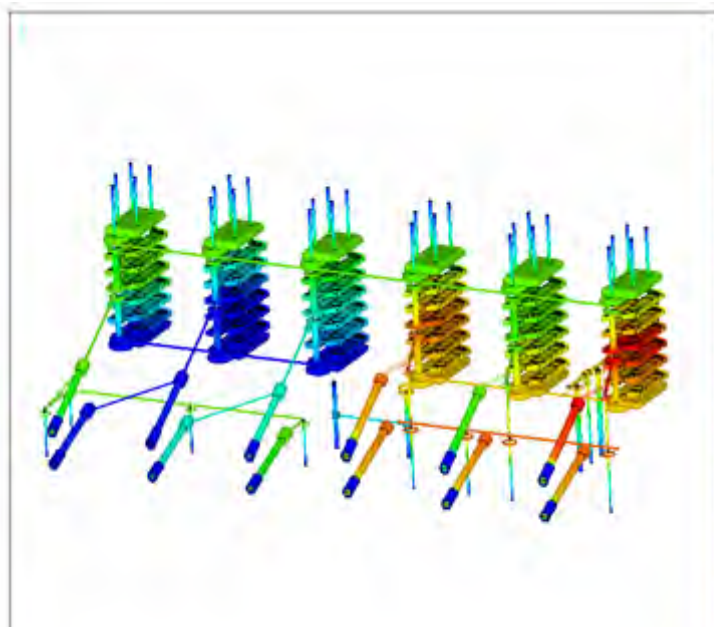
3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



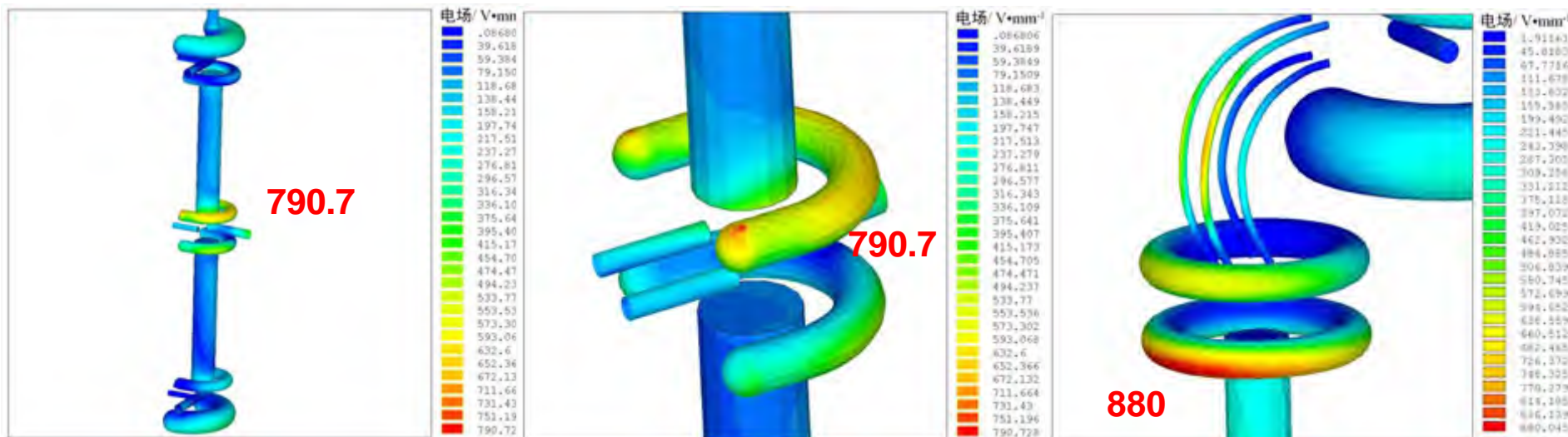
3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



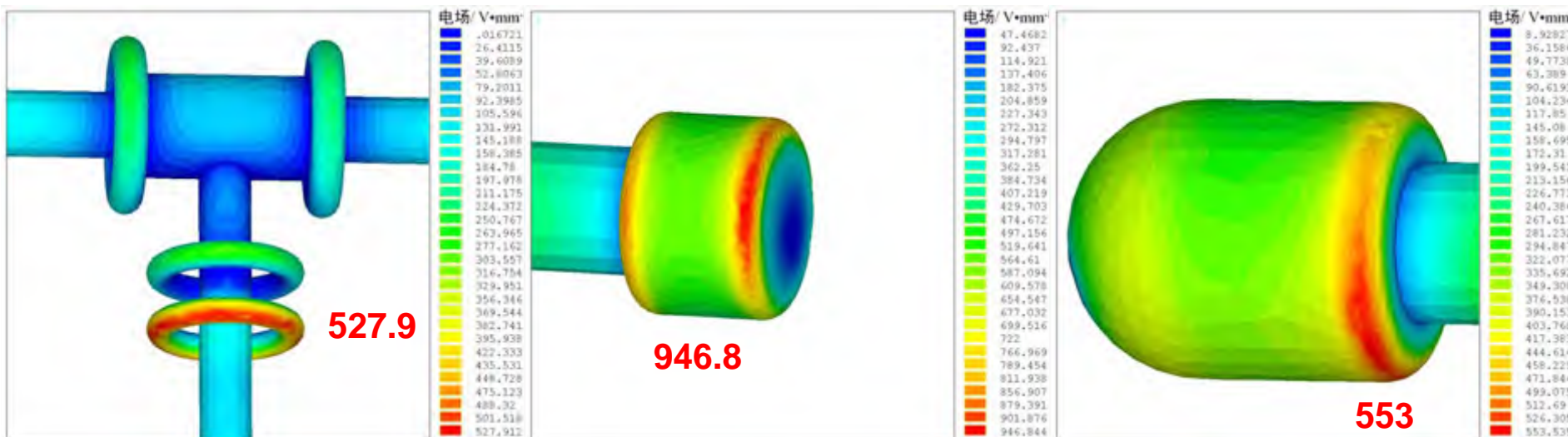
3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



阀避雷器

阀避雷器

桥避雷器

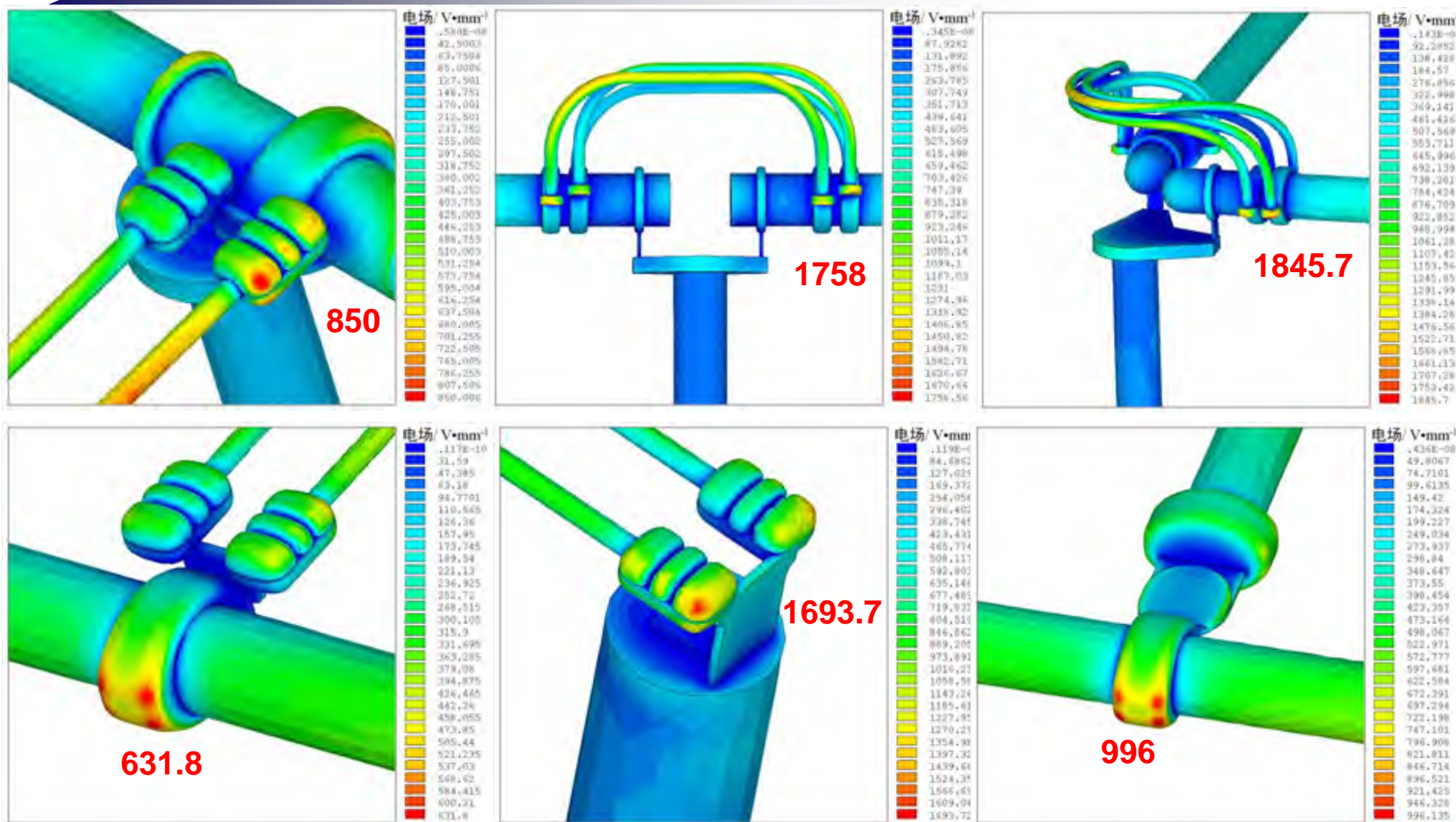


极线OCT

YY套管

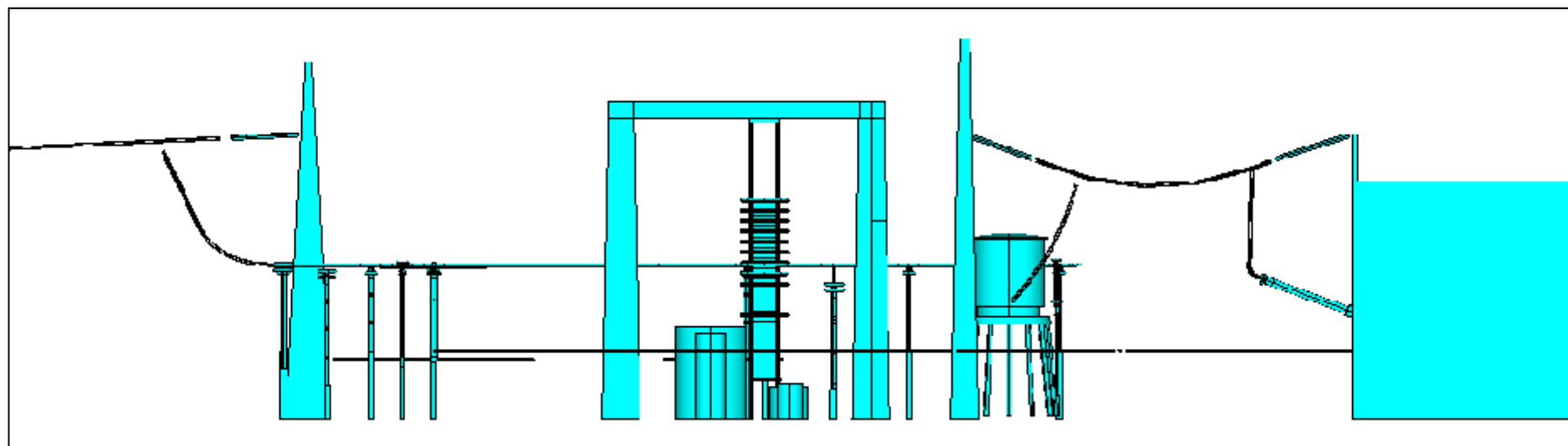
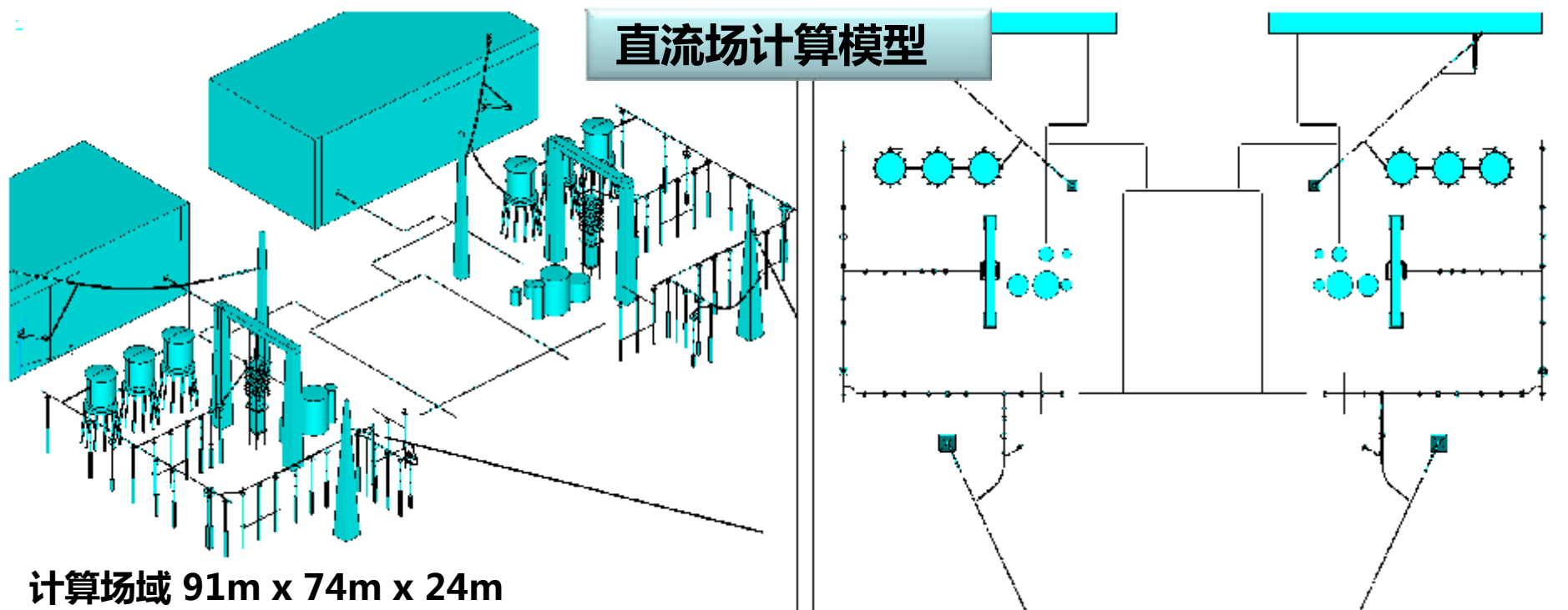
YD套管

3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



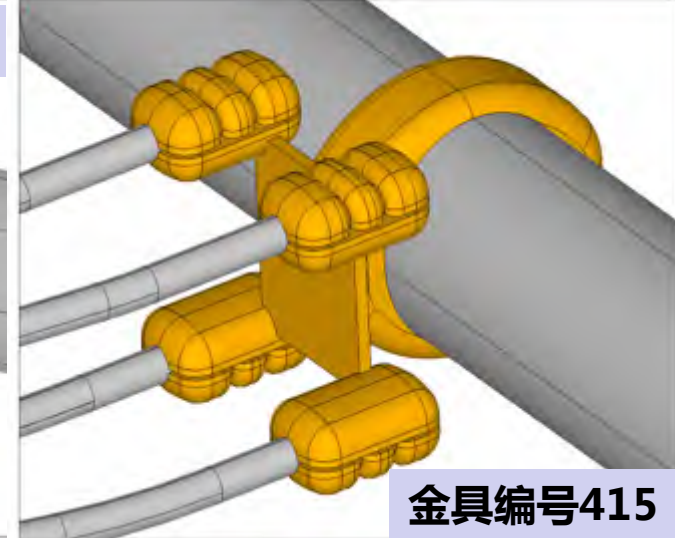
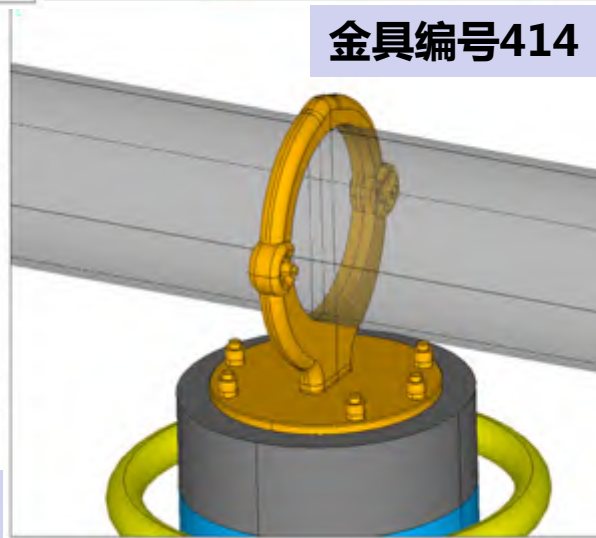
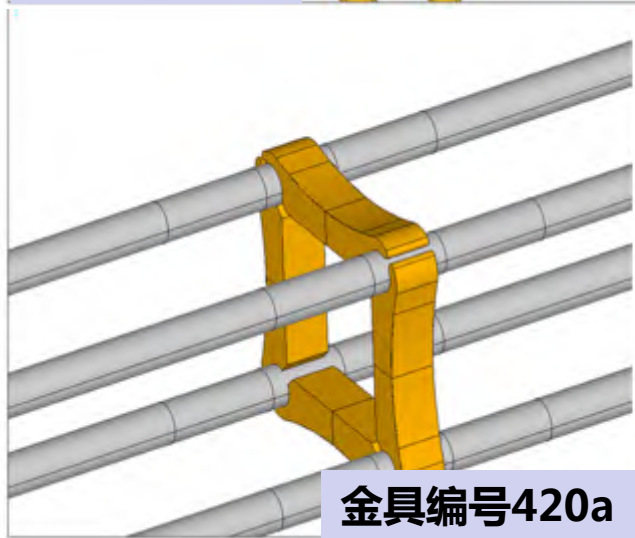
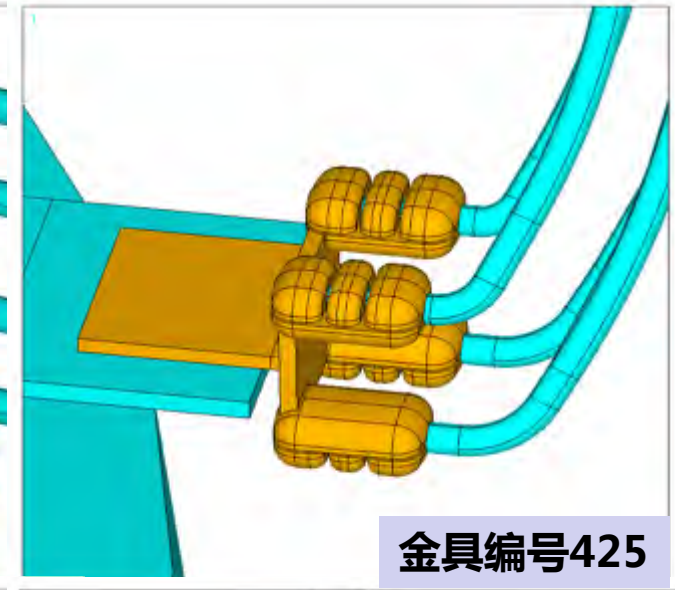
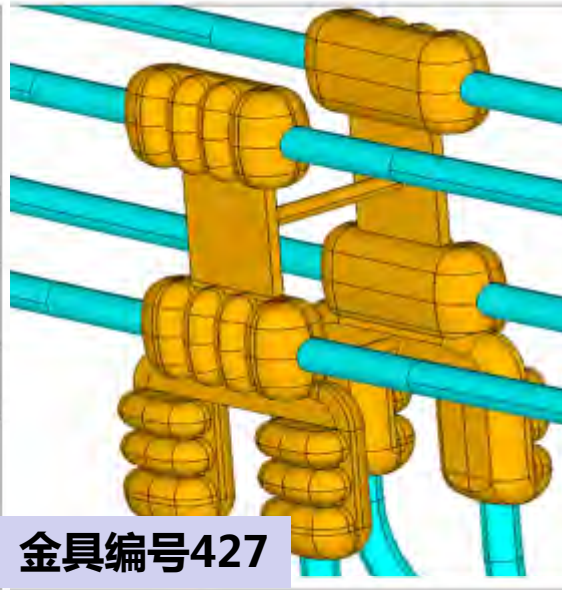
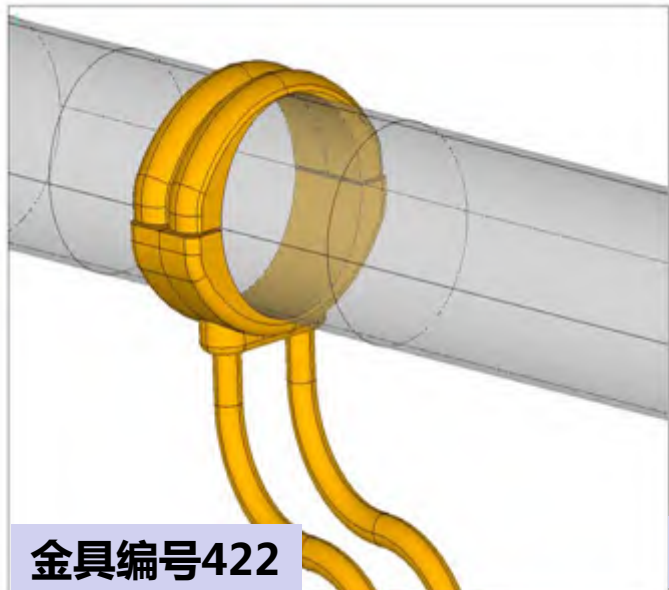
经过计算校核，金中阀厅金具设计满足工程需求。

3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



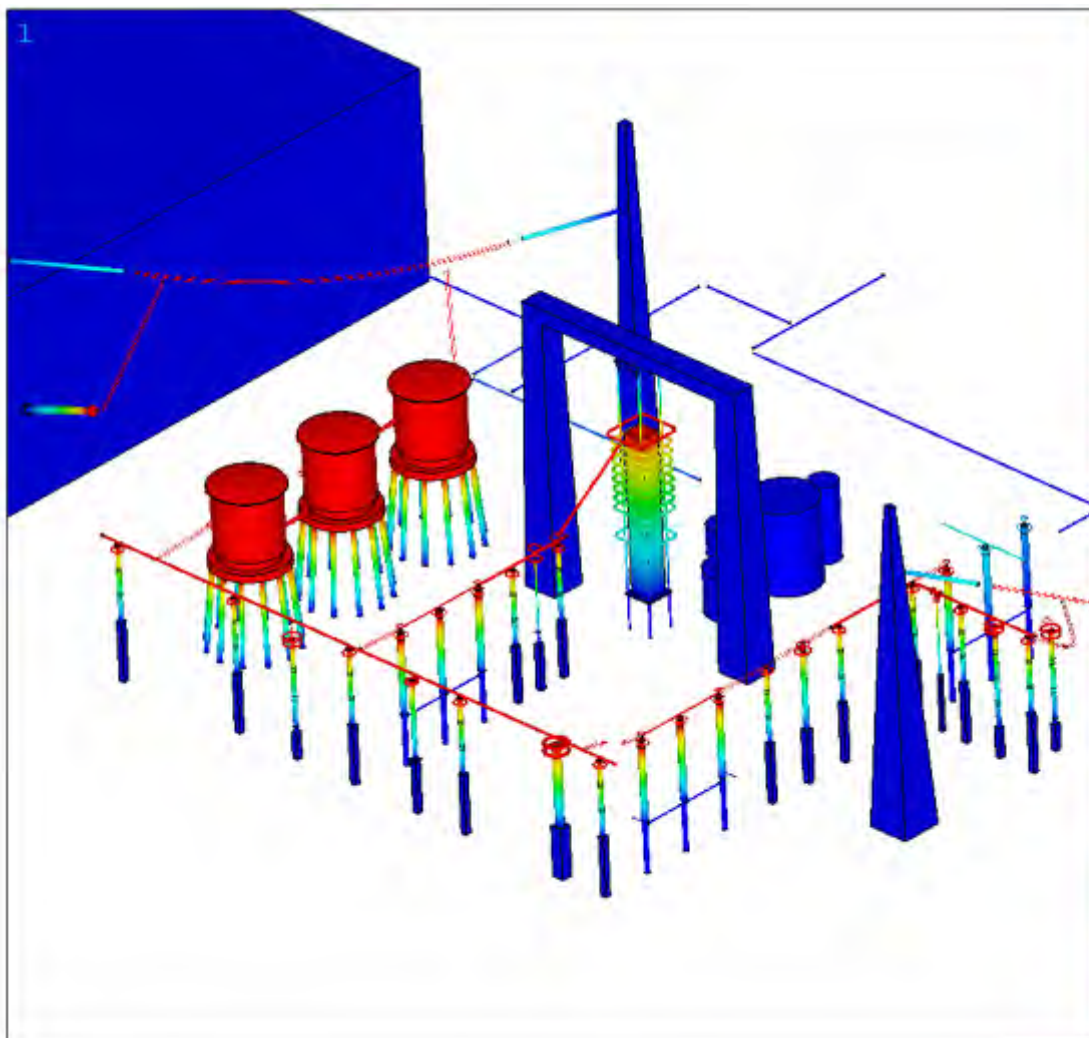
3、换流站阀厅及直流场电场设计优化

直流场计算模型



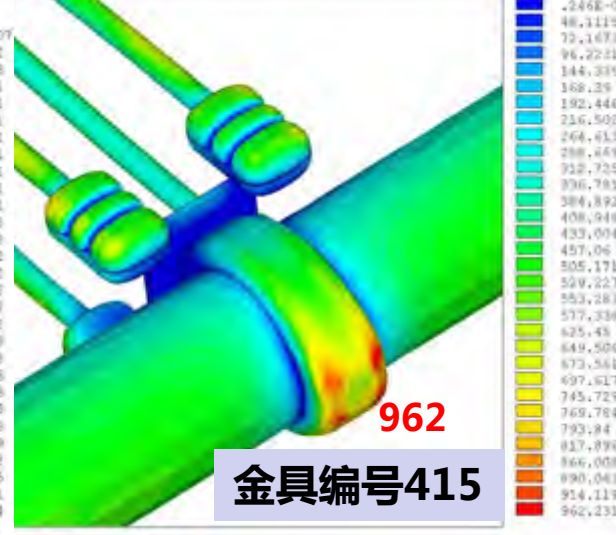
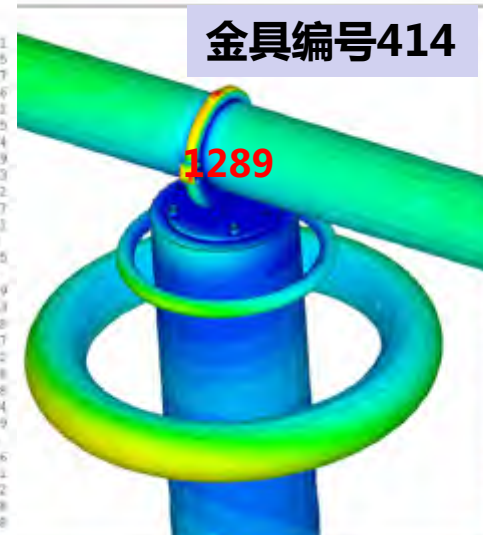
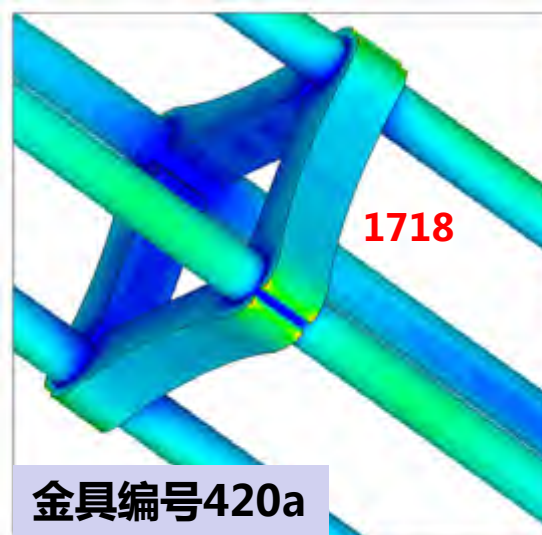
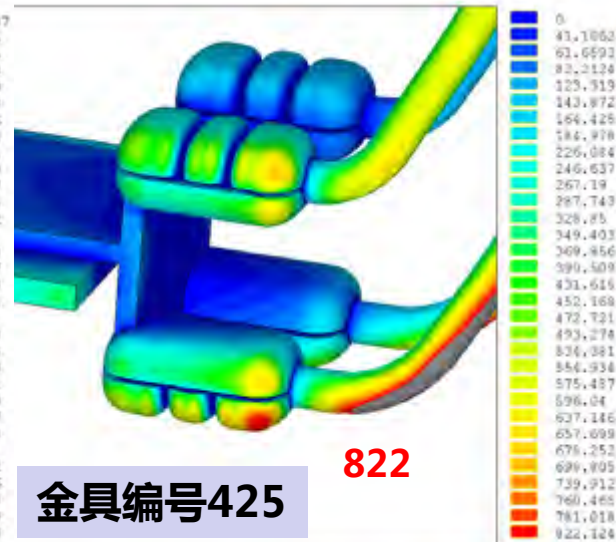
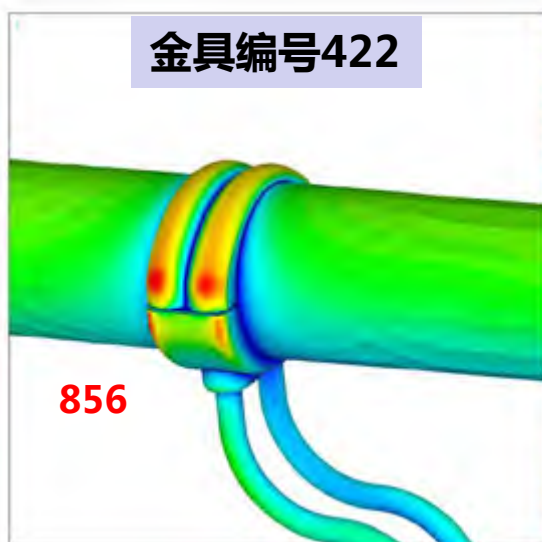
3、换流站阀厅及直流场电场设计优化

直流场计算结果



对极母线加载
额定运行电压
500kV，对中性
母线、地面
、阀厅墙壁、
设备支架以及
远场边界等位
置加载0V，场
域内其它导体
为悬浮电位。

3、换流站阀厅及直流场电场设计优化



经过计算校核，金中直流场金具设计满足工程需求。

3、换流站阀厅及直流场电场设计优化

小结

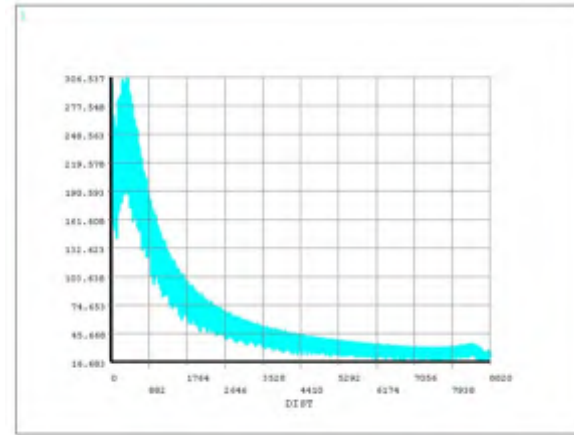
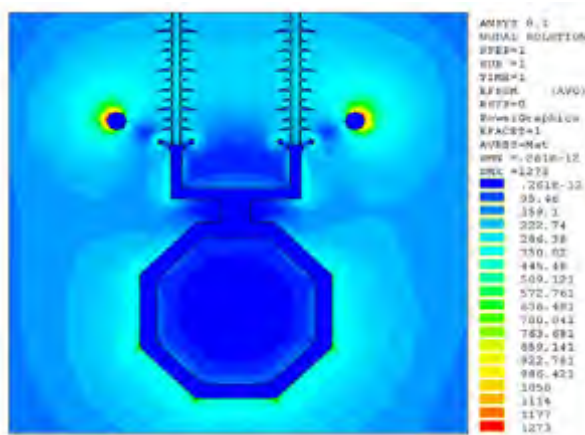
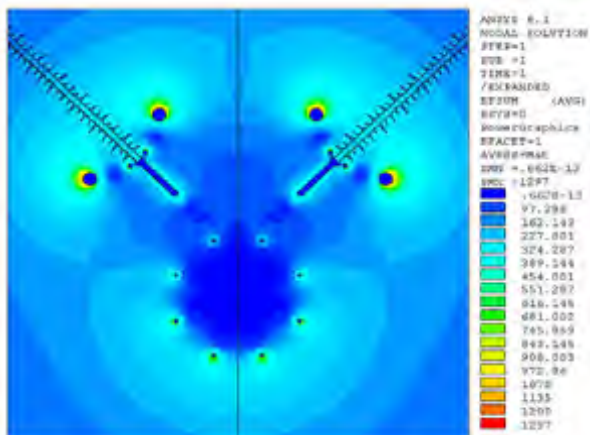
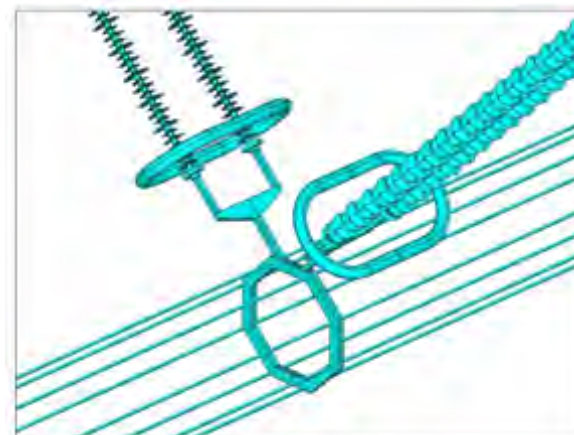
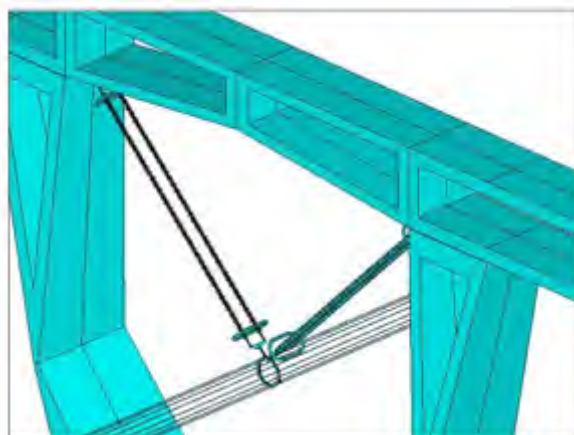
建模思路：依据设计院提供的平断面图、设备厂家提供的设备外形图以及金具厂家提供的金具配合图，完成阀厅及直流场的三维全场域建模及计算分析。

意义：校核直流工程阀厅及直流场的金具设计，对不合理的设计提出改进措施和优化方案，保证金具的电晕性能与规范书要求一致，使其满足工程需求。

仿真难点：三维全场域计算模型，数千万节点的时变场求解，对计算机硬件，以及建模、包空气、布尔运算、网格划分、后处理技术要求极高。

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

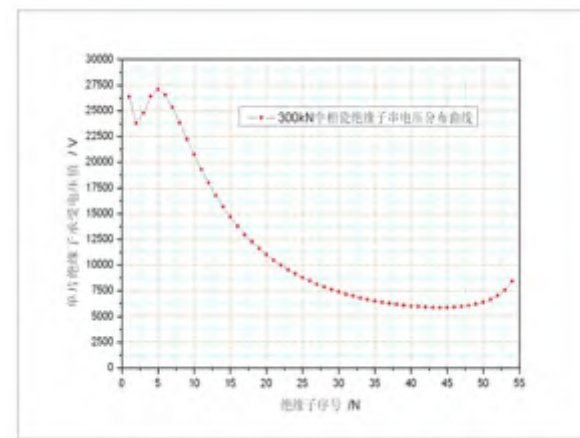
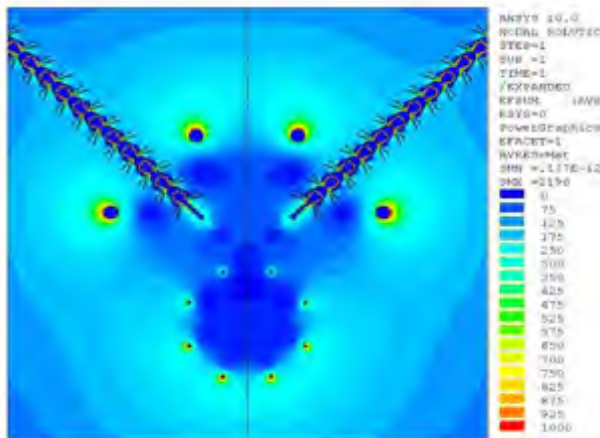
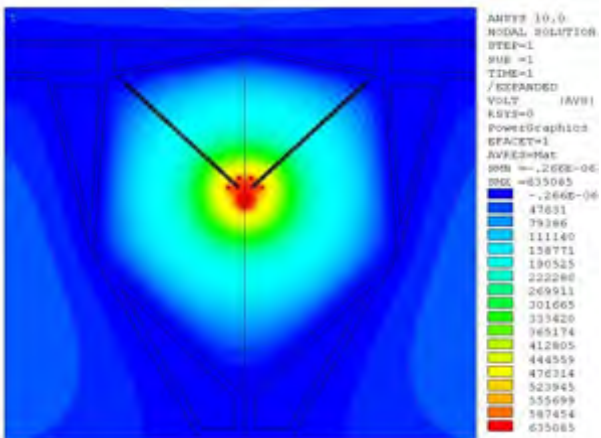
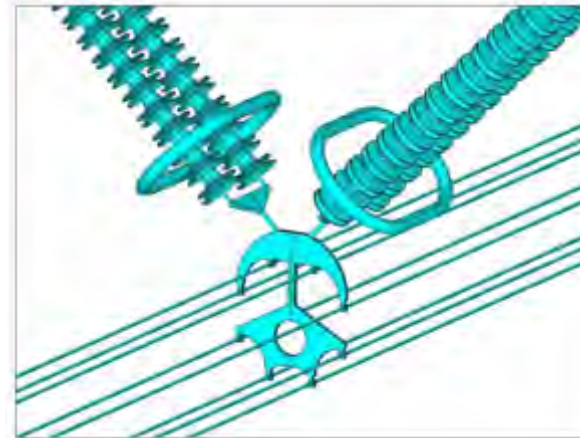
交流线路绝缘子



典型复合绝缘子串计算模型和仿真结果

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

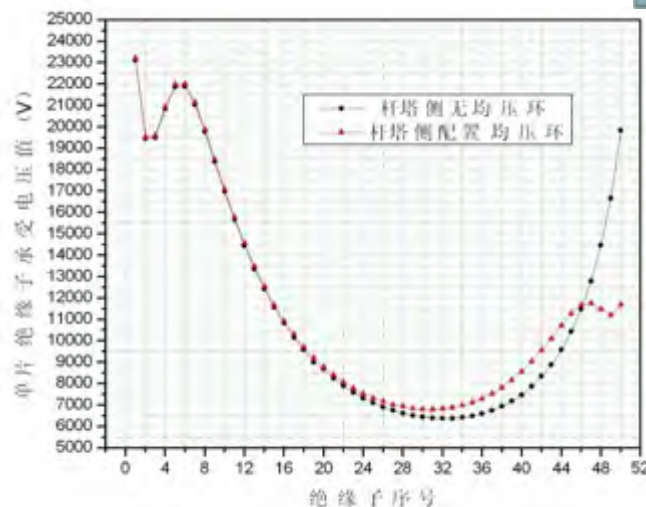
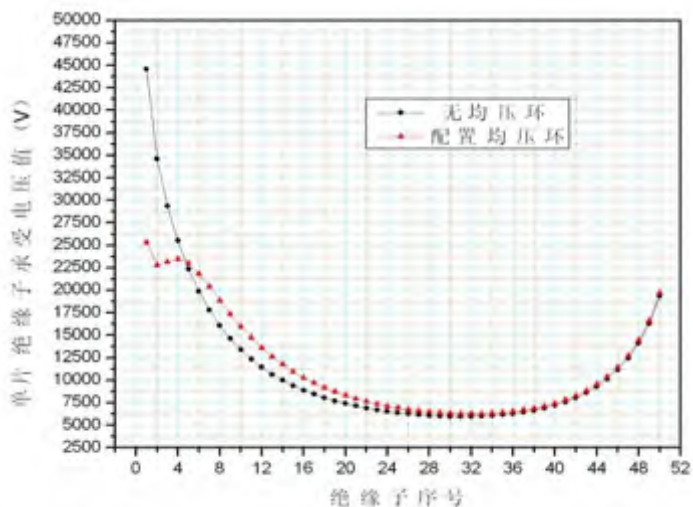
交流线路绝缘子



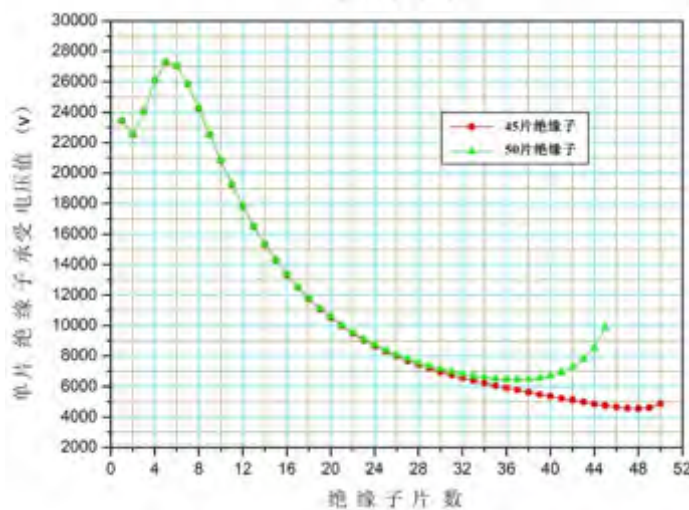
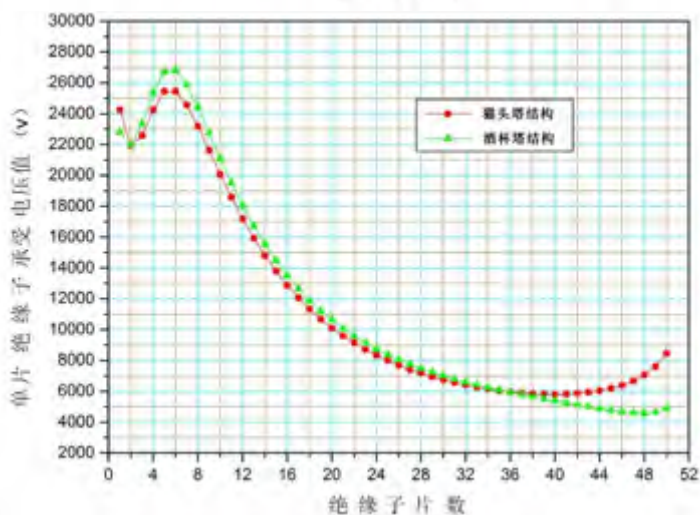
典型瓷绝缘子串计算模型和仿真结果

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

交流线路绝缘子



酒杯塔边相

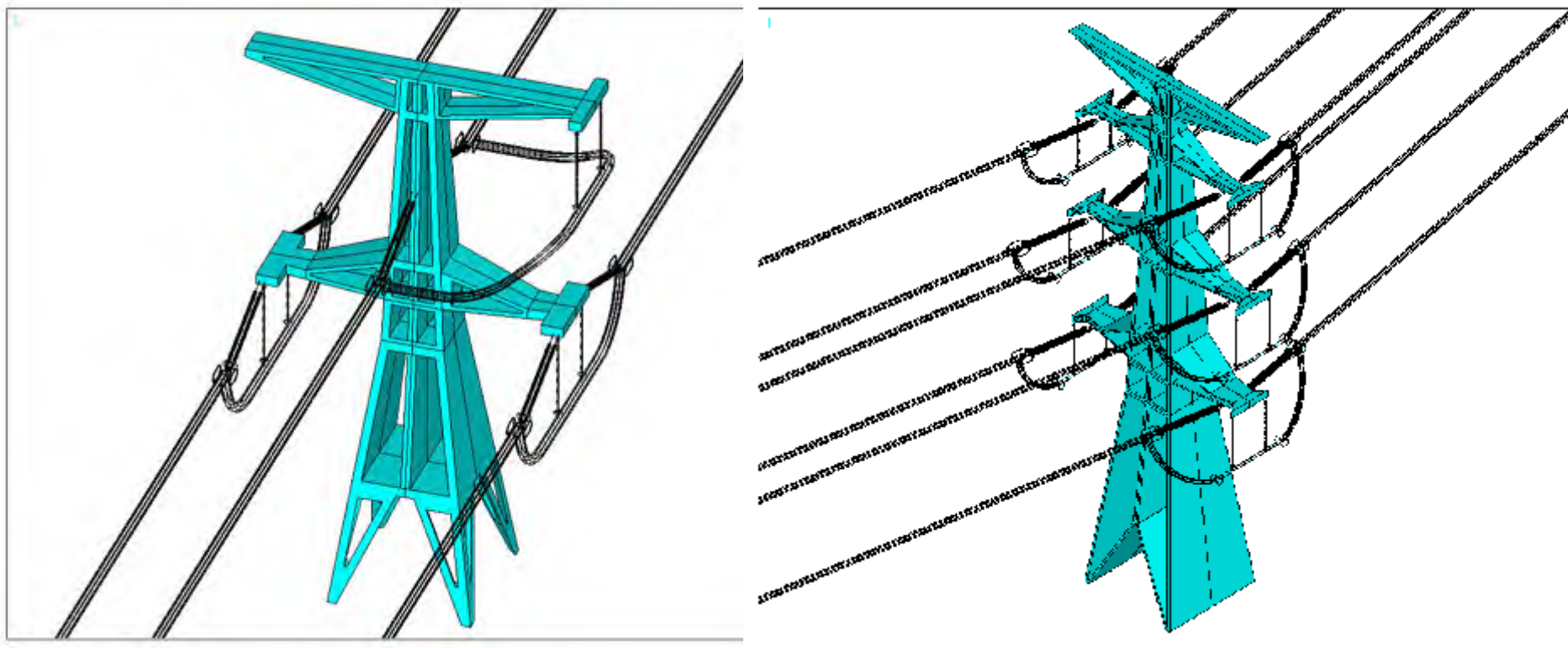


猫头塔和
酒杯塔中相

典型瓷绝缘子串均压特性

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

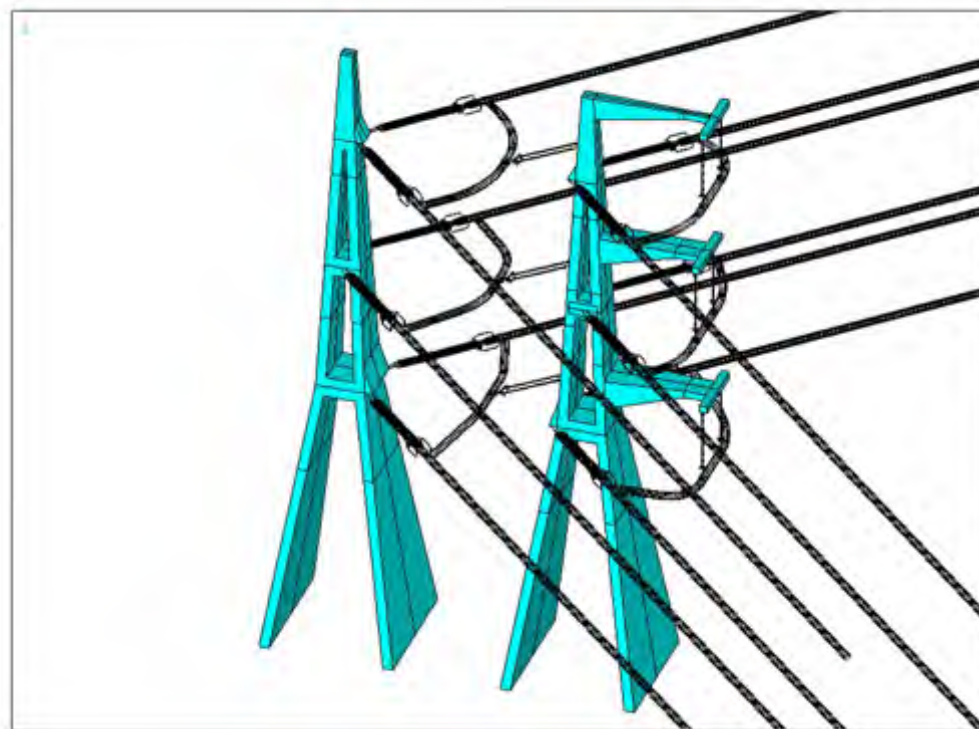
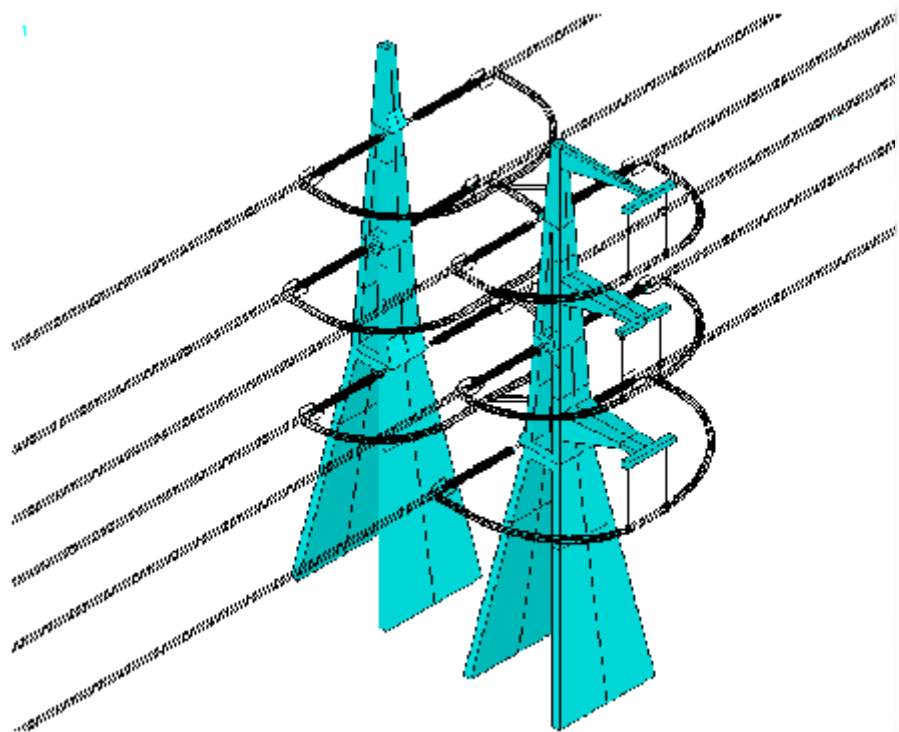
交流线路绝缘子



1000kV一般线路耐张塔

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

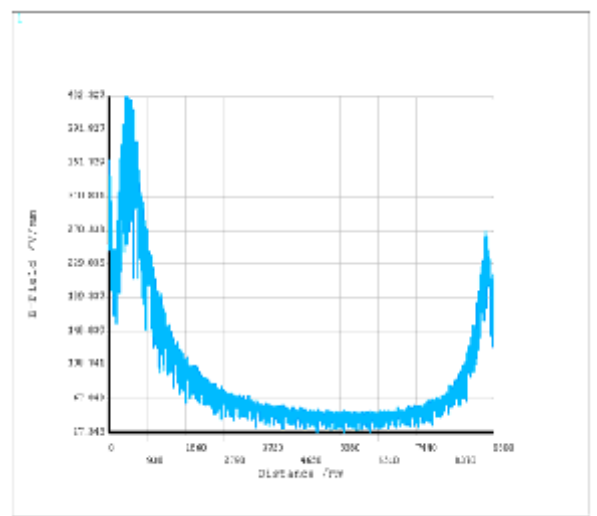
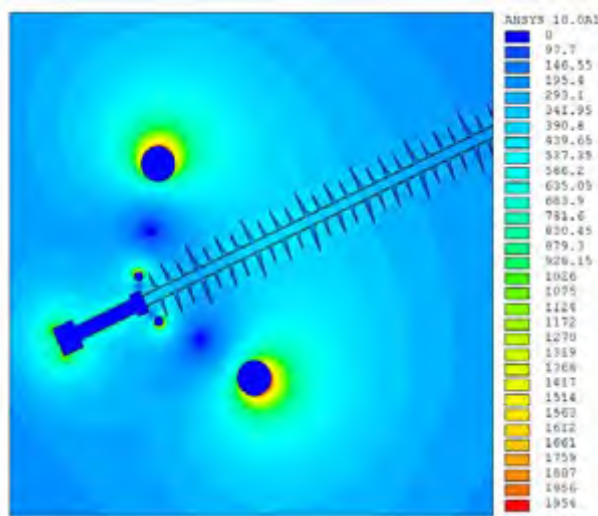
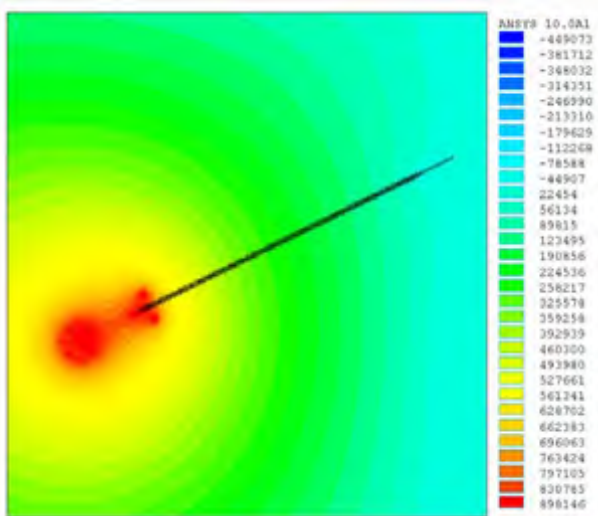
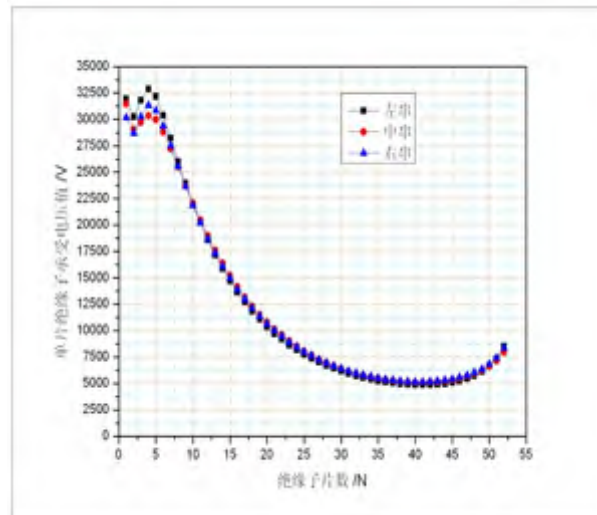
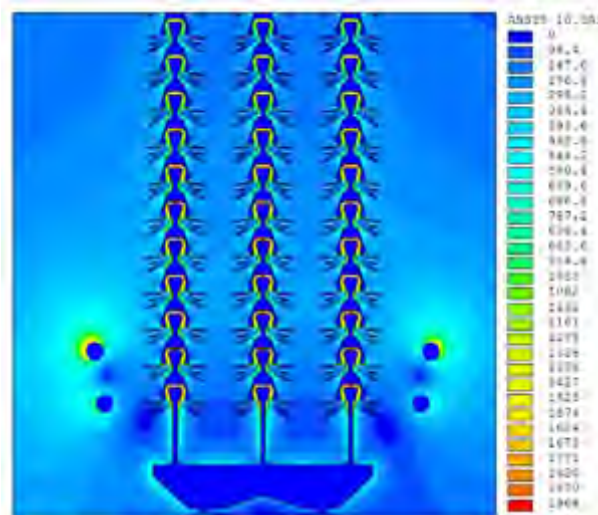
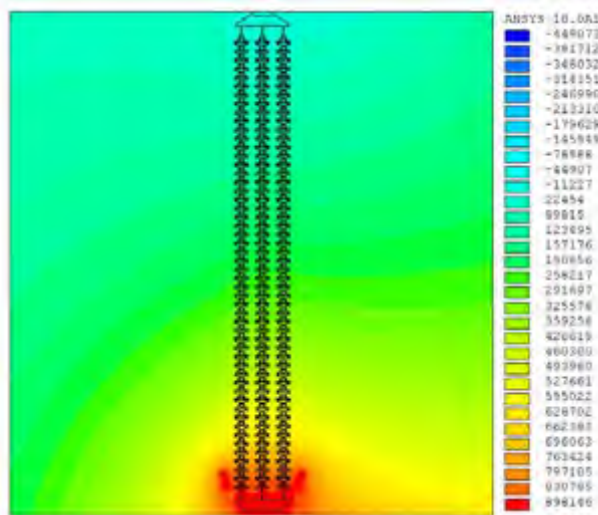
交流线路绝缘子



单柱组合耐张转角塔

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

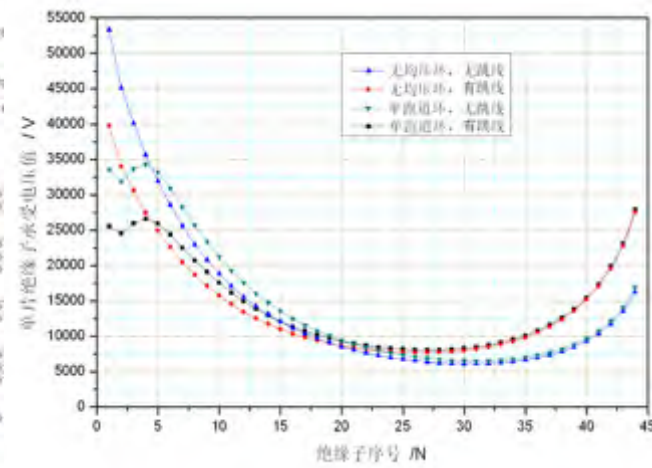
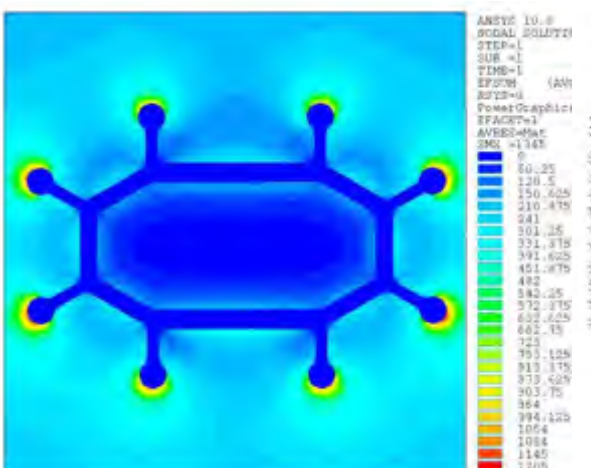
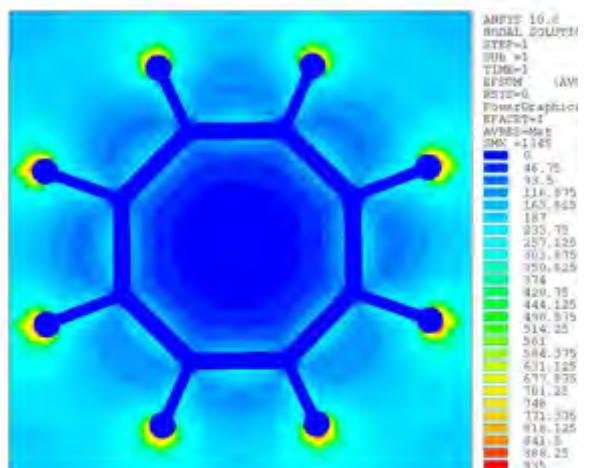
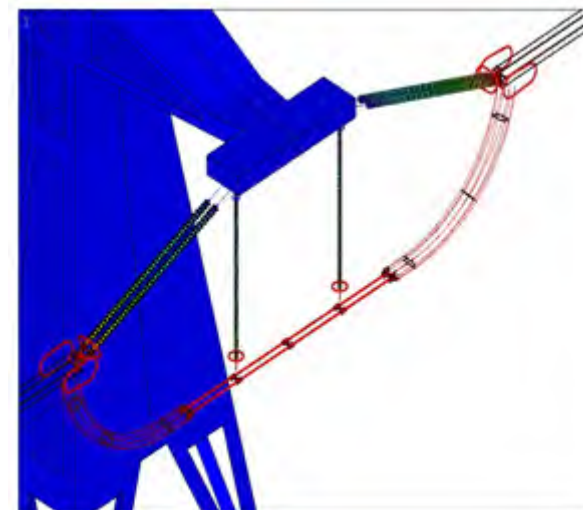
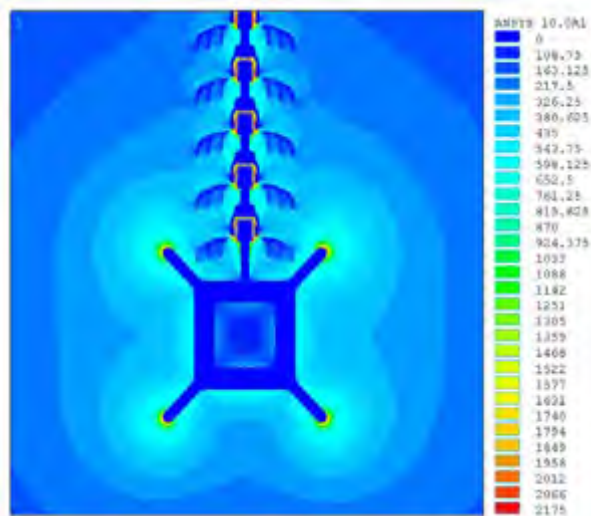
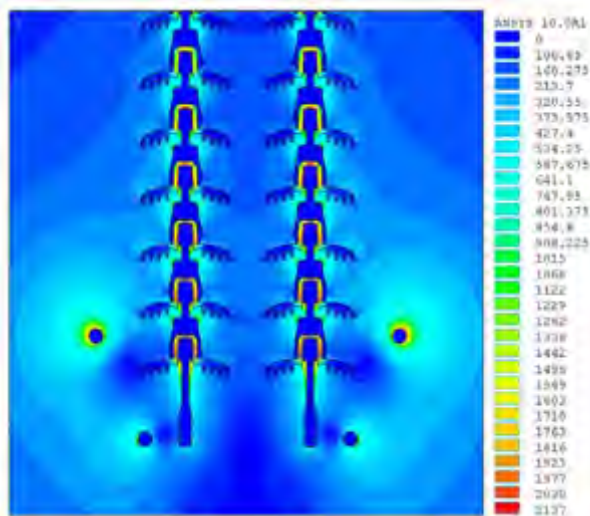
交流线路绝缘子



部分仿真结果

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

交流线路绝缘子

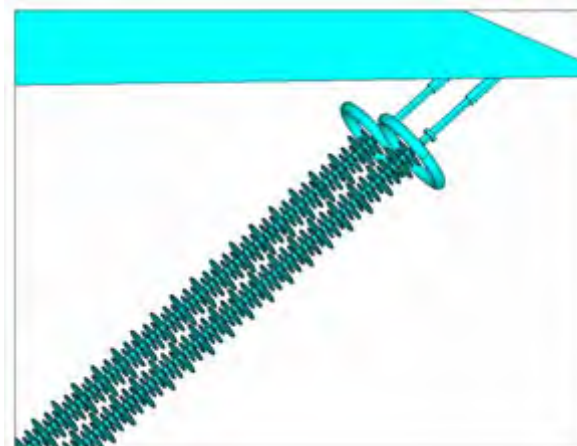
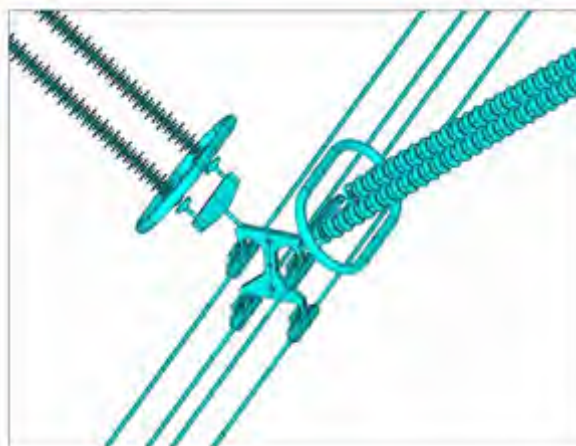


部分仿真结果

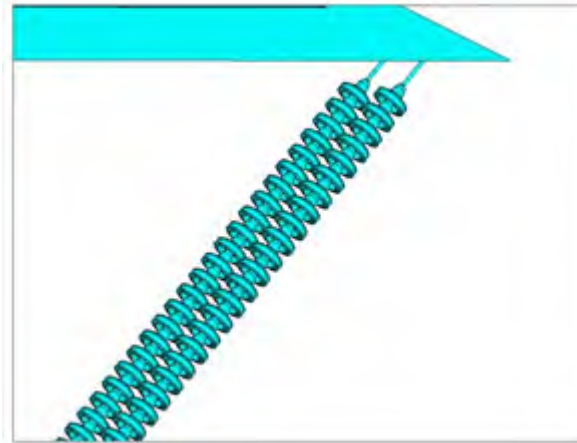
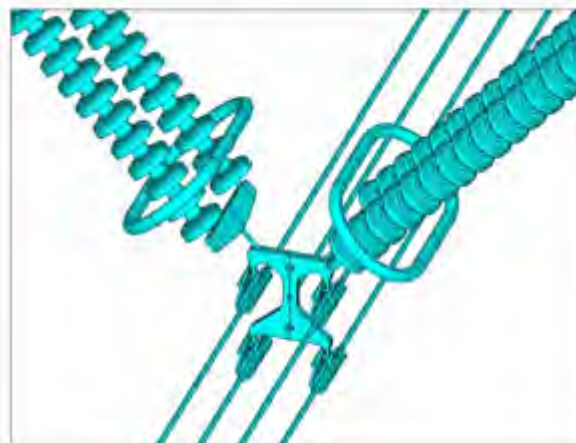
4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

计算模型：双V悬垂复合串

直流线路绝缘子



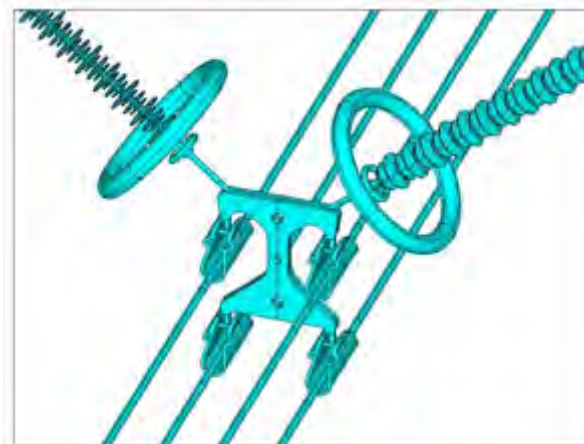
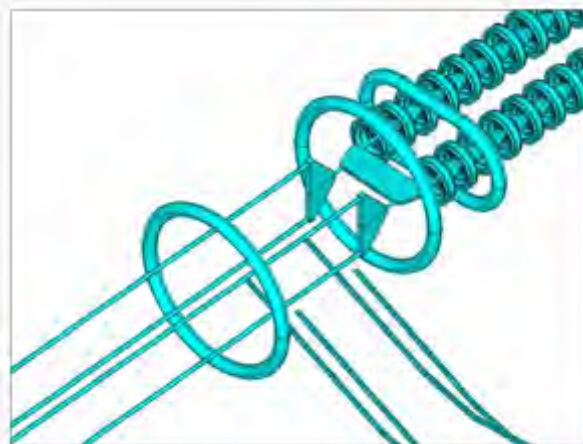
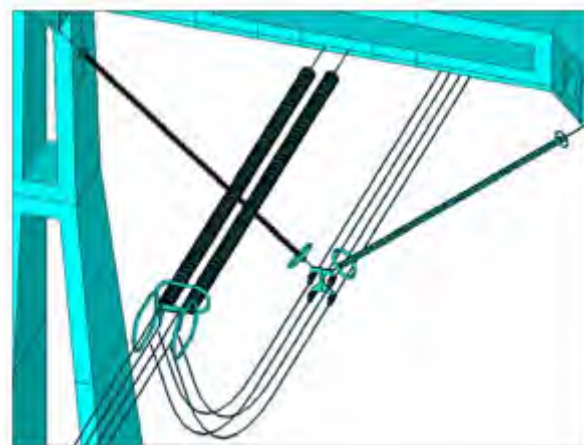
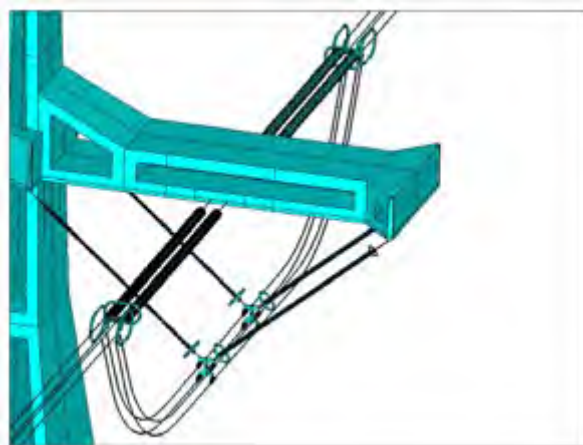
计算模型：双V悬垂瓷串



4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

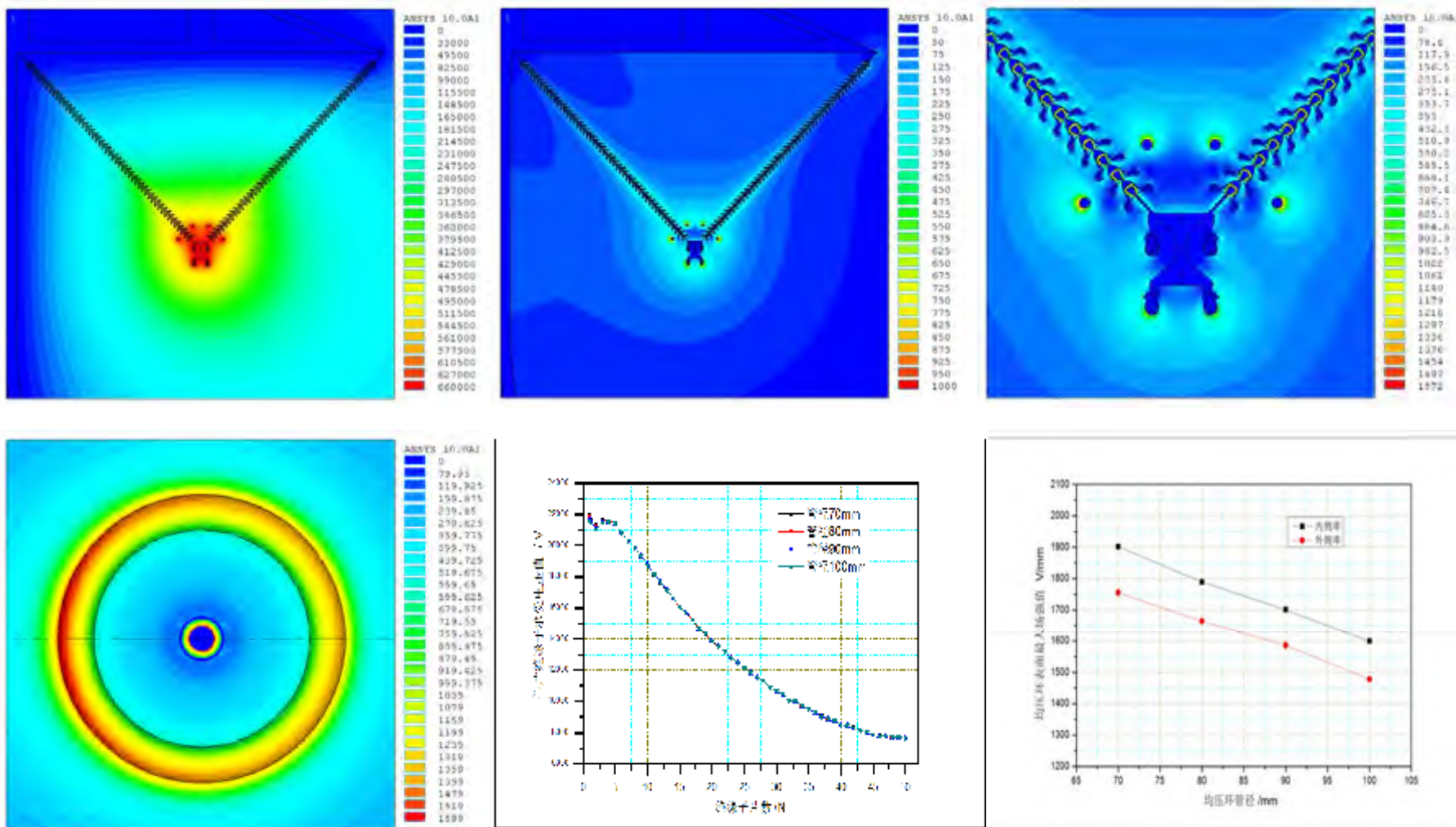
直流线路绝缘子

计算模型：双联耐张瓷串



4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

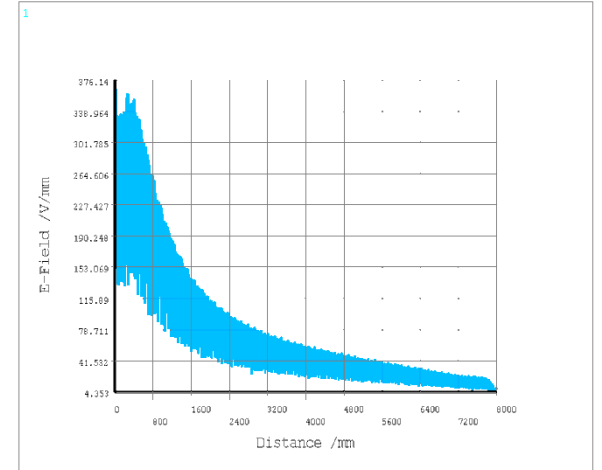
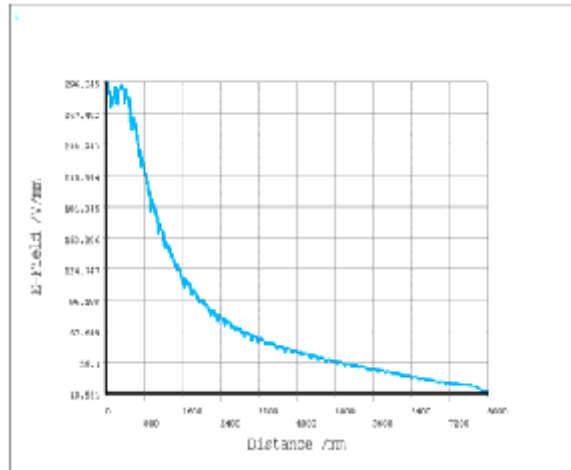
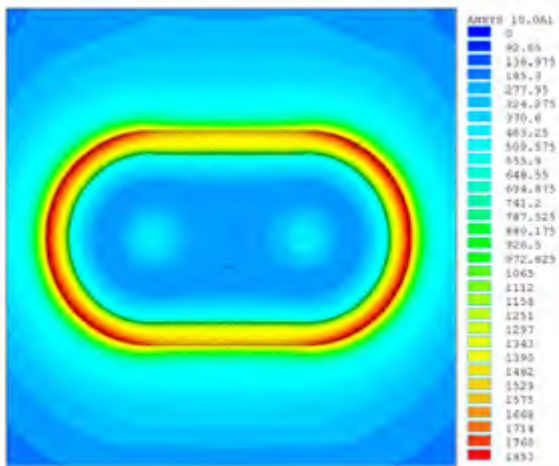
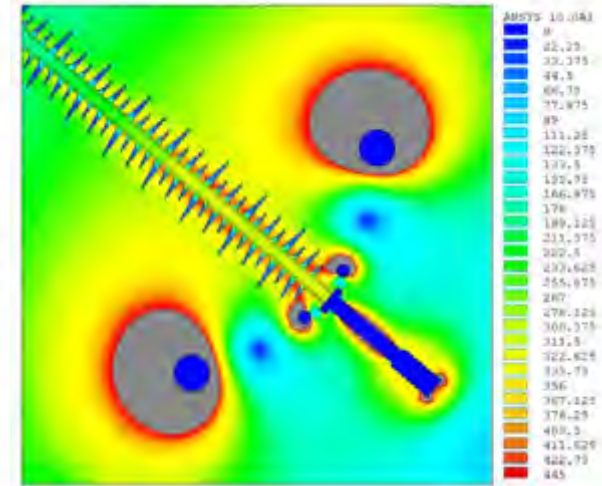
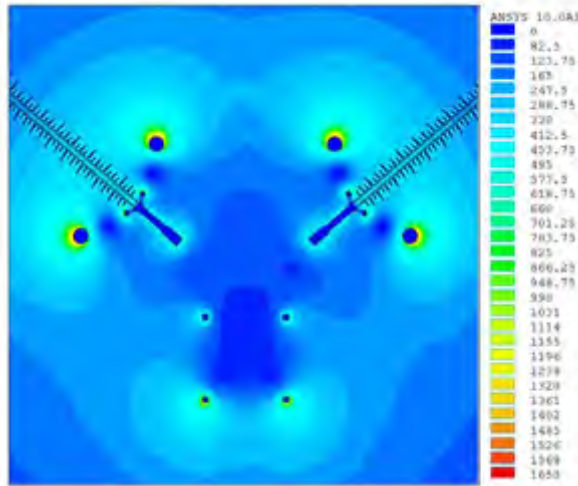
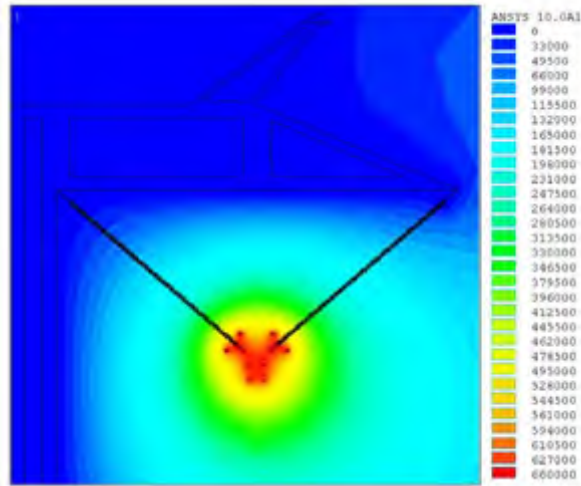
直流线路绝缘子



部分计算结果

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

直流线路绝缘子



部分计算结果

4、线路绝缘子电场分布计算及均压环优化

小结

建模思路：依据设计院提供的杆塔图、绝缘子串图以及配套金具图，完成线路绝缘子的三维全场域建模及计算分析。

意义：校核线路绝缘子串电压分布及电场分布，优化均压屏蔽环配置方案，保证绝缘子串的电气指标满足工程需求。

仿真难点：复杂的几何模型，数百片绝缘子的建模处理，对计算机硬件，以及建模、包空气、布尔运算、网格划分、后处理技术要求极高。

- 硬件与数值计算方法的发展使复杂问题的仿真计算成为可能。仿真计算在设计审核、工程监造、技术监督、缺陷故障分析等方面大有可为，通过假设、穷举和反推，可以少走弯路，事半功倍，大幅提升工作质量。
- 目前以ANSYS系列软件为代表和主流的商业软件仍然是优秀的，软件使用不在于多而在于精，重要的是软件的熟练使用和仿真经验积累，而不是软件的底层开发。
- 仿真计算是极其专业的工作，专业门槛很高，希望短期内从无到有解决实际问题几乎不可能。需要扎实的专业背景、熟练的软件使用、优秀的硬件平台以及丰富的工程经验，需要精益求精的态度以及长久的专注与积累。



感谢聆听

