

ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

变压器多物理场耦合数值模拟计算与 工程应用

李德波/ 博士、高级工程师

广东电科院能源技术有限责任公司

中国 烟台

2017.07.27

报告内容

- 一、**研究背景**
- 二、国内外研究进展
- 三、研究必要性
- 四、技术路线与研究思路
- 五、研究结果分析

一、研究背景

➤ 长期以来，非电量保护并未受到业界关注，始终处于初级、落后水平。



➤ 近些年，广东电网等屡次发生因外部短路冲击造成主变重瓦斯保护跳闸、压力释放阀动作喷油等。

一、研究背景

500kV莞城站、西江站、香山站主变发生外部短路导致压力释放阀动作喷油。

500kV沧江站主变发生变中侧近区短路，主变重瓦斯动作跳闸。

国内其他地区电网出现过多次类似故障。

传统的瓦斯、压力保护无法满足对于变压器区内故障中出现的**油流涌动**和**压力升高**等非电量特征的可靠、灵敏地监测和动作。

一、研究背景

故障特征复杂，研究分析不足

精度不足

安装位置影响性能

整定计算困难

- 作为机械式继电器，其测量反映油箱内部故障的非电动作量精度不足，且其性能受变压器运行环境及人为因素影响大，同时机械部件磨损老化也影响其灵敏度。

一、研究背景

故障特征复杂，研究分析不足

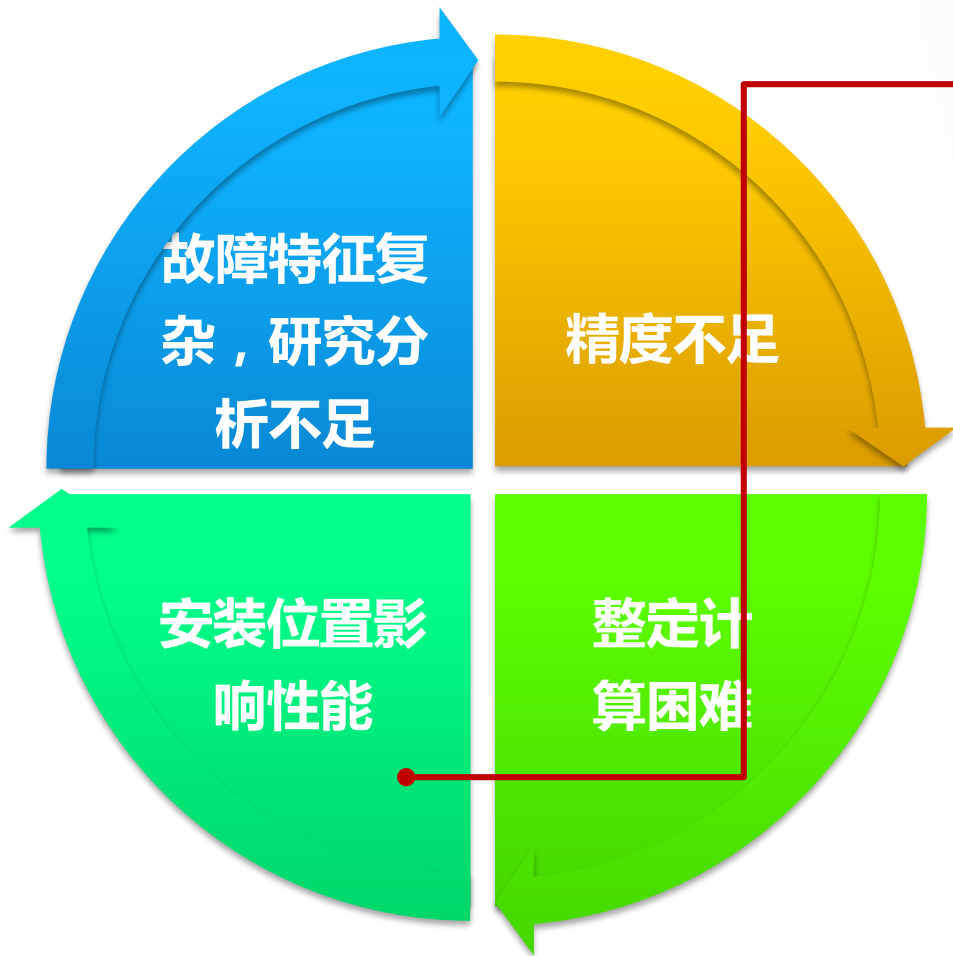
精度不足

安装位置影响性能

整定计算困难

- 机械式继电器整定计算困难，目前现场安装的瓦斯继电器动作定值根据上世纪五十年代前苏联提供的试验结果和运行经验选取，其正确性、合理性无从判定；

一、研究背景



- 变压器只装设同类型一台非电量继电器且安装位置固定，而油箱内部故障位置及强度存在很大的随机性，故障点距离继电器安装位置对非电量继电器动作性能存在较大影响。

一、研究背景

故障特征复杂，研究分析不足

精度不足

安装位置影响性能

整定计算困难

- 油箱内部故障前后非电量故障特征的变化过程极其复杂，而对其深入研究分析不足，同时非电量保护装置由变压器厂家配置，导致继电保护工作者重视程度不足也是重要原因。

- 一、研究背景
- 二、**国内外研究进展**
- 三、研究必要性
- 四、技术路线与研究思路
- 五、研究结果分析

二、国内外研究进展

井永腾

针对大容量变压器油流冷却系统的固有特性及工作状态、绕组区域温升问题进行了理论比较研究。

单东磊

利用FLUENT软件，建立适当的等效计算模型，进行了变压器绕组温度场分布数值模拟研究。

庄少丰

利用Ansoft Maxwell软件，进行了油浸式变压器绕组电场、温度场分布数值模拟。

目前国内外在变压器油流涌动导致瓦斯继电器保护跳闸方面的多物理场数值模拟还没有相关的研究报告，缺乏系统深入研究。

二、国内外研究进展

本项目研究是行业需要**重点突破**的关键技术难题，国内很多变压器研制与应用单位都想在此方面实现突破。但是油流涌动的实际工况涉及**多学科、多物理场作用、多部件传递等因素**综合在一起，采用**传统的试验测量手段**，无法获得有价值的信息。

变压器多物理场耦合数值模拟是深入了解油流涌动导致瓦斯继电器保护跳闸过程机理一种有效的技术手段，对于减少事故具有重要的工程应用价值。

报告内容

- 一、研究背景
- 二、国内外研究进展
- 三、研究必要性
- 四、技术路线与研究思路
- 五、研究结果分析

三、研究必要性

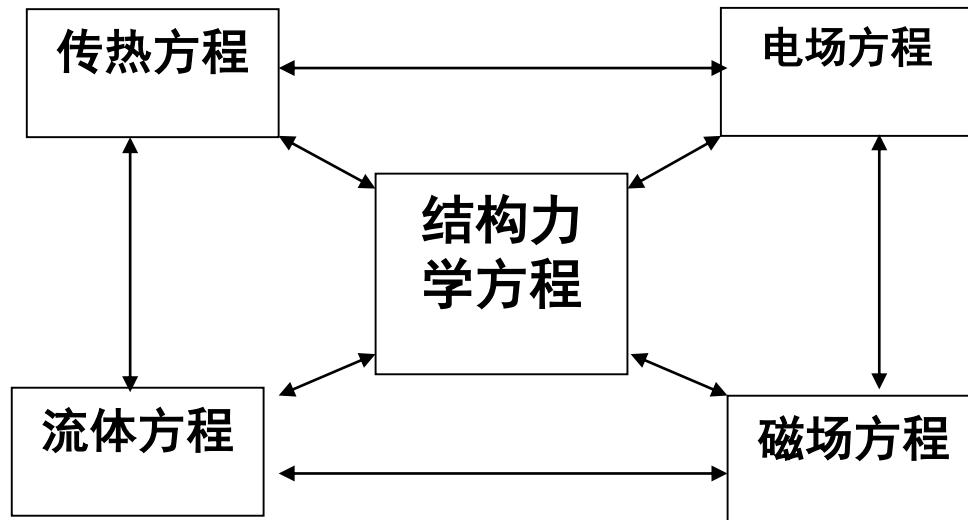
- 利用**ANSYS多物理场耦合数值模拟计算工具**，通过建立变压器外部短路、冲击合闸等情况时绕组受力导致的油流速度及压力变化的仿真计算模型，探寻绕组流过的瞬态电流与瓦斯继电器上的**油流速度**以及压力释放阀上油压之间的对应关系。
- 通过上述研究给出主变**非电量保护整定值的设定理论依据**、短路冲击时变压器振动特性及油流涌动特性、变压器非电量保护误动的成因及防范措施等，为**电网安全提供重要的技术保障**。

报告内容

- 一、研究背景
- 二、国内外研究进展
- 三、研究必要性
- 四、**技术路线与研究思路**
- 五、研究结果分析

四、整体技术路线和研究思路

本项目建立一套基于**有限元、有限体积法**结合仿真分析的变压器结构-流体-电磁场多学科耦合仿真计算的方法与流程，为变压器的性能评估、优化分析提供科学的、具有行业先进技术水平特点的技术支持。



涉及电场、磁场、传热学、流体力学以及结构力学多学科

四、整体技术路线和研究思路

基于ANSYS Workbench计算平台，利用ANSYS Maxwell I 分析变压器的感应涡流等电磁特性，计算其损耗，通过Workbench耦合将损耗热映射到ANSYS Fluent，通过流体仿真技术，结合高性能计算HPC，精确分析其热特性并加速仿真分析进程。

四、整体技术路线和研究思路

油流涌动的实际工况涉及多学科、多物理场作用、多部件传递等因素综合在一起，直接考虑所有因素、进行全系统建模分析不可行。**该项目的突破，在于简化工况，去除旁支，选取主要影响因素，考虑建立两条多物理场数值模拟计算途径：**

- (1) 励磁电流-线圈结构形变-油流涌动；
- (2) 励磁电流-温升-因温升膨胀导致的油流涌动/油气挥发；

而且在处理这两条通道的各个传递环节，都还要进行合理的简化。这样才能在目前的应用数学与仿真软件条件约束下，达到工程应用的突破性。

四、整体技术路线和研究思路-电磁场计算

➤ 电磁仿真技术路线

利用**ANSYS Maxwell**分析由低频交变（AC）电流或电压所产生的磁场分布以及涡流损耗，并考虑集肤效应，计算油箱壁、夹件等屏蔽件中的涡流分布以及电磁力、电感等其他物理参数。

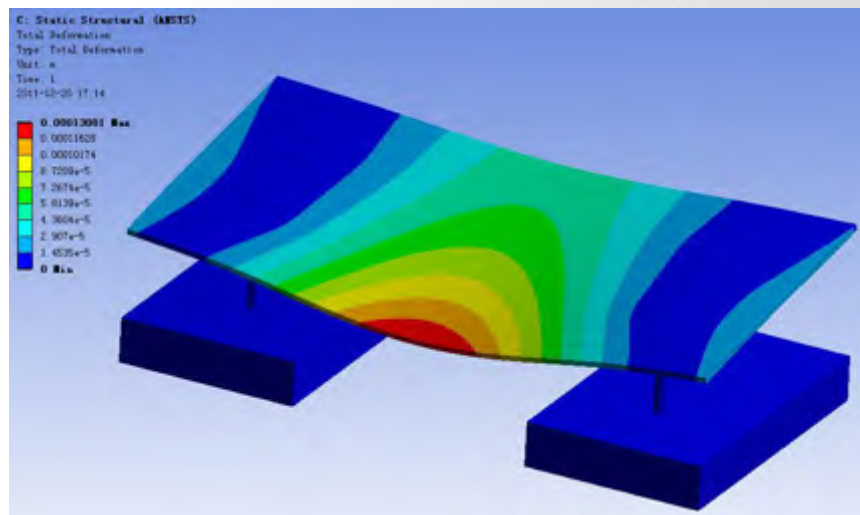
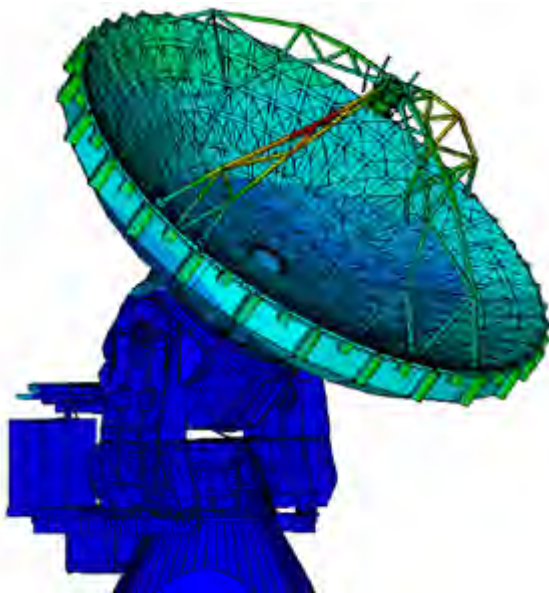
多物理场耦合（结构和流体）提供的参数：电磁力，电磁热等

ANSYS Maxwell可以直接用电路模型模拟有限元电磁场分析区域的源或负载等外电路特性，支持静态、谐波和瞬态分析类型，为瞬态耦合仿真提供基础。

四、整体技术路线和研究思路-结构计算

➤ 结构仿真技术路线

采用**ANSYS Mechanical**的结构力学分析部分（Structural模块）、热分析部分（Professional）及其耦合分析功能，分析在电磁力、热应力等作用的应力、应变、强度。



结构流体耦合计算案例

四、整体技术路线和研究思路-结构计算

总体思路是将线圈受到的瞬态电磁力传递给结构，计算瞬态结构形变。

计算漏磁场在线圈中产生的洛伦兹力，将洛伦兹力传递到结构中计算结构形变，接下来将结构模型产生的形变位移传递给电磁场，计算在结构形变下的电磁力，再次传递给结构。这样迭代下来，可以得到瞬态情况下的结构形变情况。

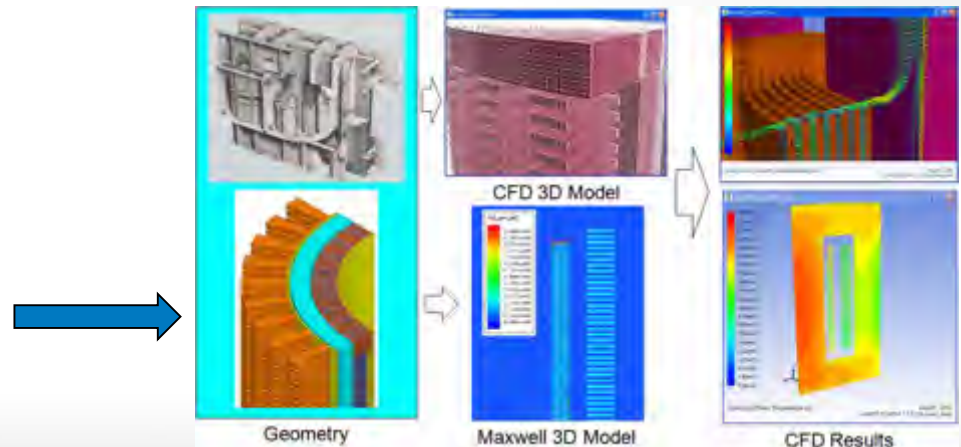
四、整体技术路线和研究思路-油流涌动计算

➤ 流体仿真技术路线

采用**ANSYS Fluent** 和 **ICEM CFD**两个模块，建立高精度CFD仿真技术路线。
ANSYS ICEM CFD是世界顶尖专业的网格生成工具，其中纯六面体网格雕塑技术为变压器油流速度场、温度场、压力场计算，以及瞬态冷却油路动态仿真提供高质量的结构化网格。

ANSYS FLUENT是当今最先进的CFD求解器。该求解包括变压器仿真所需要的高级湍流模型、传热模型、先进的辐射模型，以及先进的数值算法和格式，并且ANSYS FLUENT能够结合结构、电磁等软件真实呈现冷却油在电磁力，焦耳热，结构力的作用下，油流的局部脉动情况和压力分布状态。

变压器多物理场耦合仿真案例



四、整体技术路线和研究思路-油流涌动计算

采用**流固耦合技术**，将上一步计算出的结构随时间的形变量传递给流体，同时考虑流体对线圈形变的影响，计算流体在结构形变下的流动情况。

变压器冷却系统内油流涌动有两个原因：**绕组局部形变、位移和振动和油温局部过高造成冷却油膨胀。**

第一种情况因为冷却系统局部形变引起流路发生变化，从而造成油路瞬态不稳定的物理问题，解决方案是双向流固耦合。

第二种情况因温度改变而油膨胀引起的油流涌动可以采用ANSYS Fluent软件中热膨胀模块和重力模型即可以实现模拟。

四、整体技术路线和研究思路

- ◆ 以电磁-结构-流体多物理场耦合有限元分析技术为基础，建立变压器油流仿真分析中不同物理参数之间的传递关系，最终建立多学科系统化的、参数协同变化的数字化仿真模型。

瓦斯继电器电磁-结构-流体耦合多物理场分析计算思路

电磁计算方法

结构计算方法

流体计算方法

瓦斯继电器电磁-结构-流体流固耦合计算

终极仿真计算

报告内容

- 一、研究背景
- 二、国内外研究进展
- 三、研究必要性
- 四、技术路线与研究思路
- 五、**研究结果分析**

五、研究内容

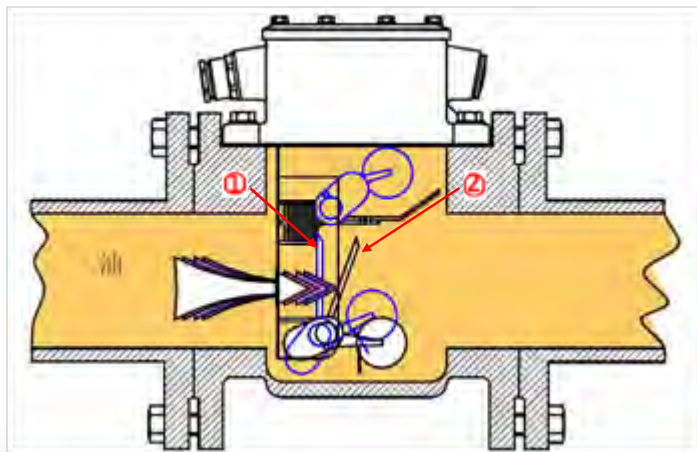
研究内容1: 110kV变压器电磁场数值模拟—Maxwell 17.0软件



变压器外箱体



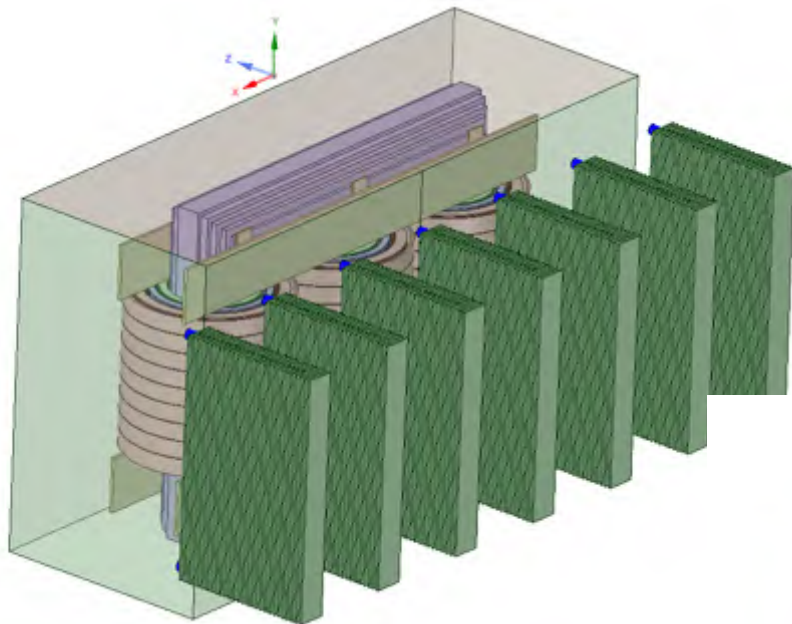
内部铁心、绕组



变压器

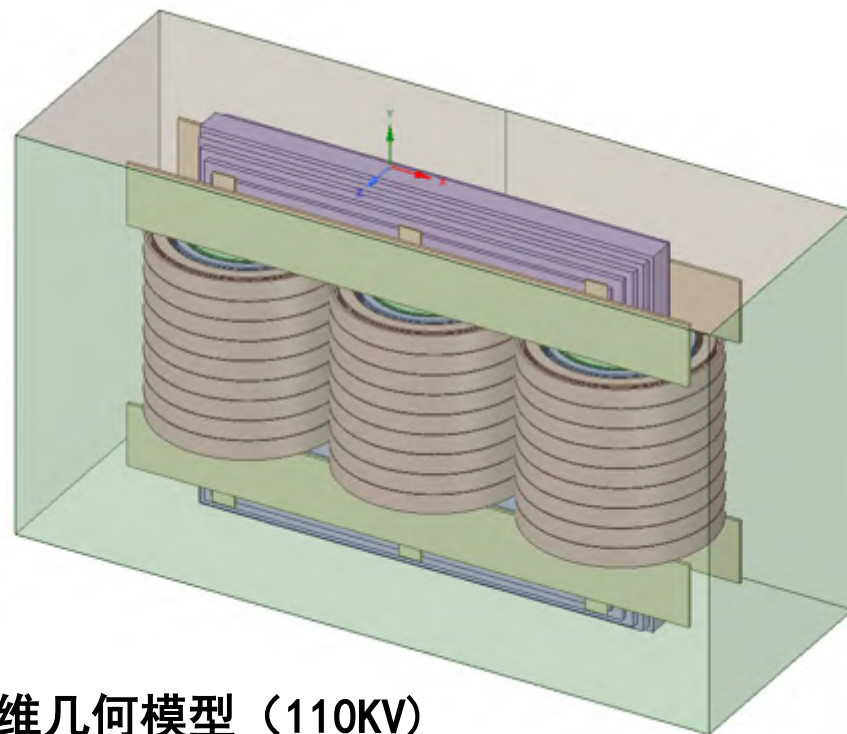
五、研究内容

研究内容1：110kV变压器电磁场数值模拟—Maxwell 17.0软件



变压器三维几何模型（110KV）

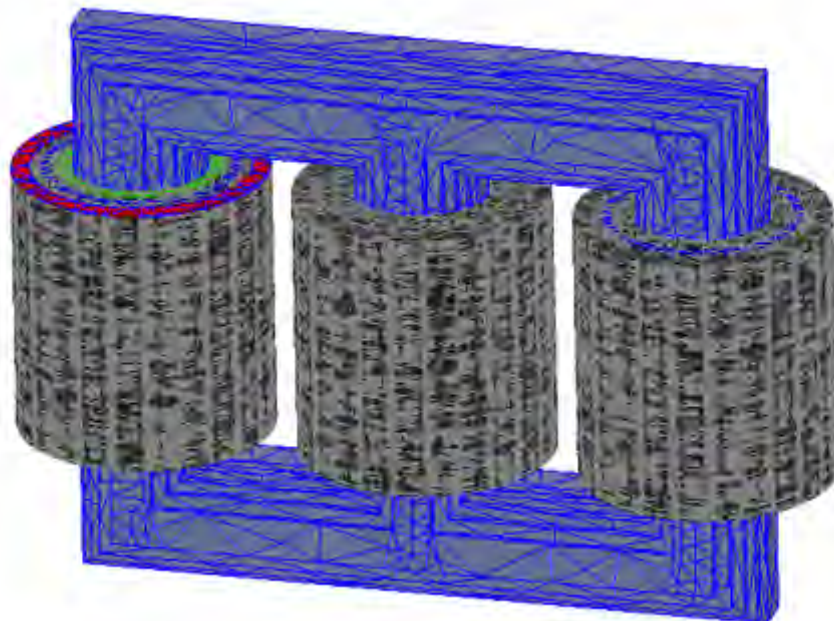
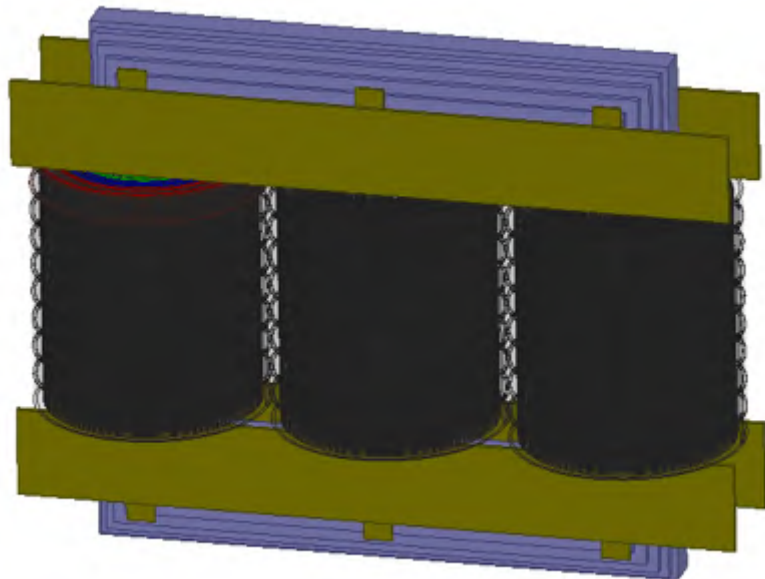
建立了110KV变压器电磁场模型



变压器三维几何模型（110KV）

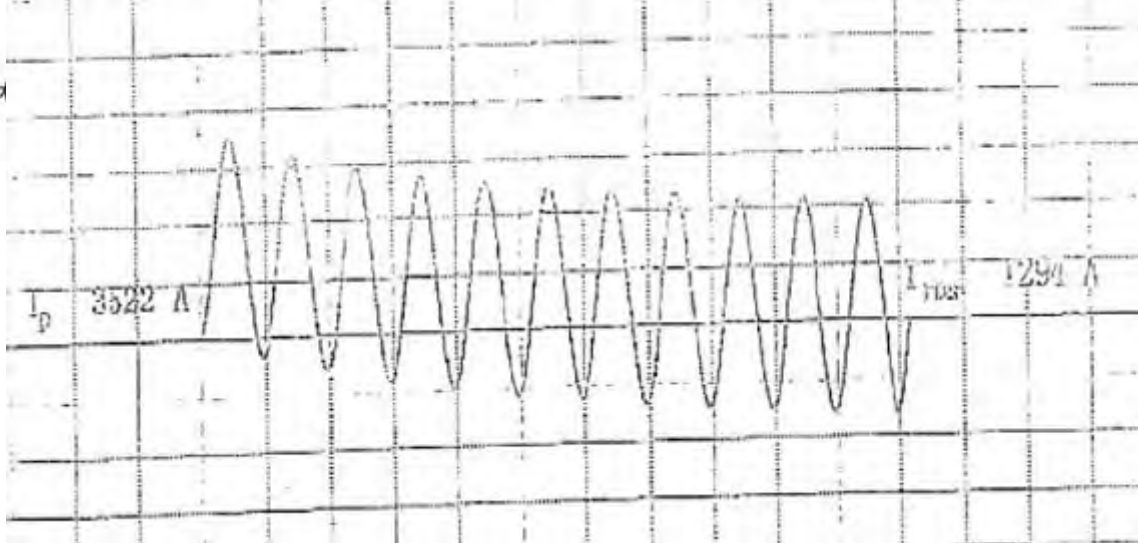
五、研究内容

研究内容1：110kV变压器电磁场数值模拟—Maxwell 17.0软件



绕组参数：三相绕组，高压：92（其中1饼有15匝），中压：76（其中1饼有6匝） 低压：100（其中1饼有1匝）、调压匝数：9（1匝）

| Task | Real Time | CPU Time | Memory | Information |
|-------------------------|-----------|----------|--------|---|
| Solve TD4 | 00:10:53 | 00:31:25 | 21.4 G | 1361799 tetrahedra |
| Solver Progress | | | | Completed time point 0.096s |
| Solver DR54, 11 iter... | 00:26:14 | 01:40:01 | 11.7 G | 1799547 matrix, 0KB disk |
| Solve TD4 | 00:07:25 | 00:24:50 | 21.4 G | 1361799 tetrahedra |
| Solver Progress | | | | Completed time point 0.096s |
| Solver DR54, 10 iter... | 00:23:48 | 01:30:57 | 11.6 G | 1799547 matrix, 0KB disk |
| Solve TD4 | 00:09:13 | 00:25:44 | 21.4 G | 1361799 tetrahedra |
| Solver Progress | | | | Completed through I = 0.1 |
| Solution Process | | | | Elapsed time : 32:11:39, Maxwell ConEngine Memory : 2 |



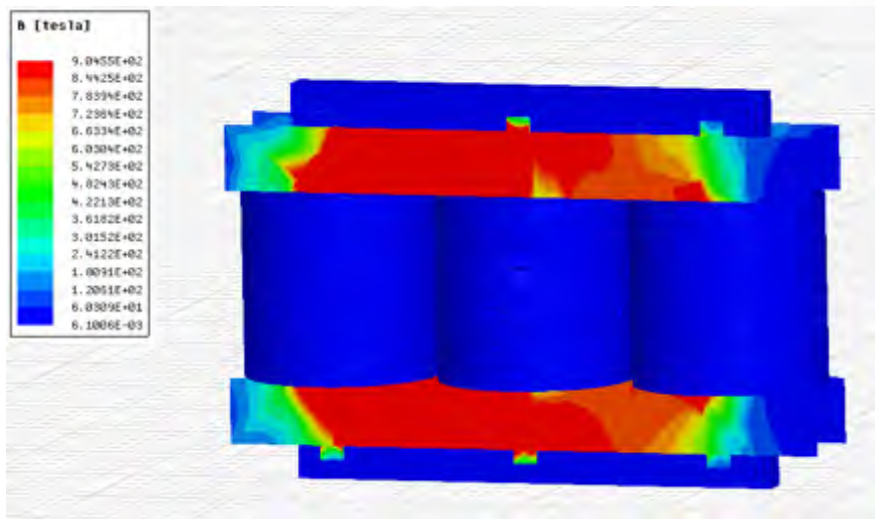
短路瞬态电流波形

| 参数名称 | A相 | B相 | C相 |
|--------|---------------------------------|--|--|
| 高压绕组/A | i_k | $190.9 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 120 * \pi / 180)$ | $190.9 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 240 * \pi / 180)$ |
| 中压绕组/A | i_k | $599.8 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 120 * \pi / 180)$ | $599.8 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 240 * \pi / 180)$ |
| 低压绕组/A | $2200 * \sin(2 * \pi * 50 * t)$ | $2200 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 120 * \pi / 180)$ | $2200 * \sin(2 * \pi * 50 * t + 240 * \pi / 180)$ |
| 调压绕组/A | 0 | 0 | 0 |

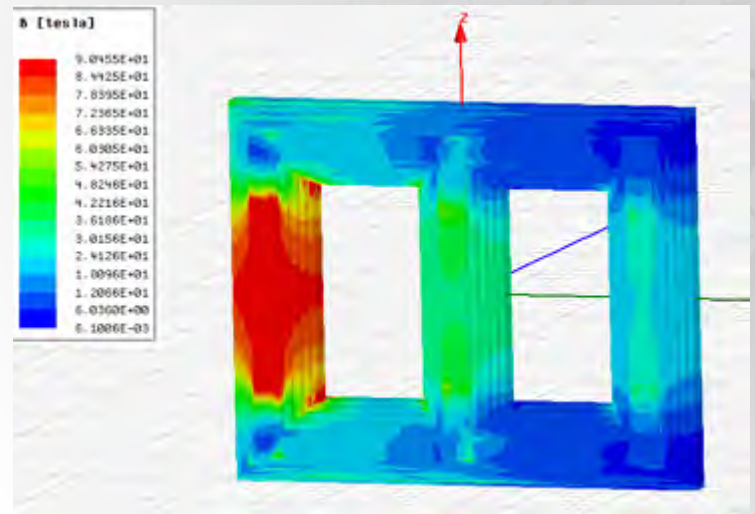
变压器各相绕组电流

五、研究内容

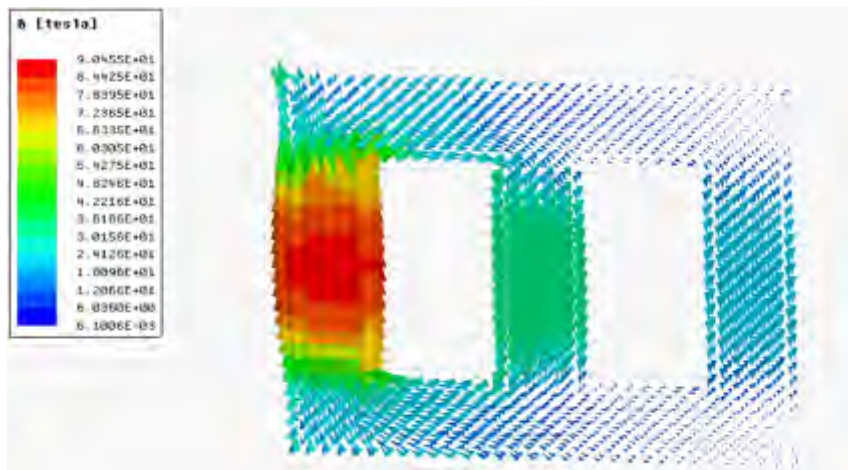
研究内容1：110kV变压器电磁场数值模拟—Maxwell 17.0软件



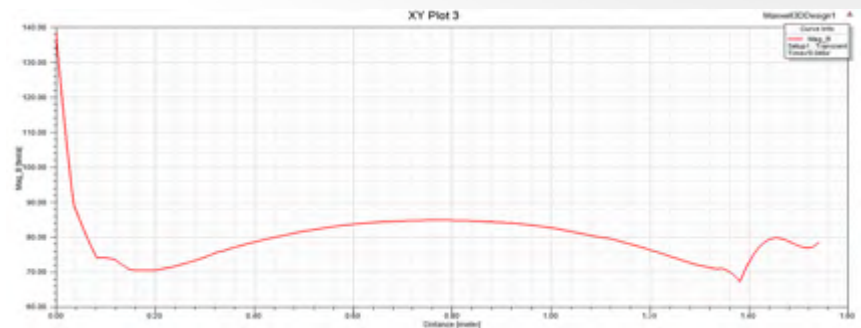
某时刻磁密分布



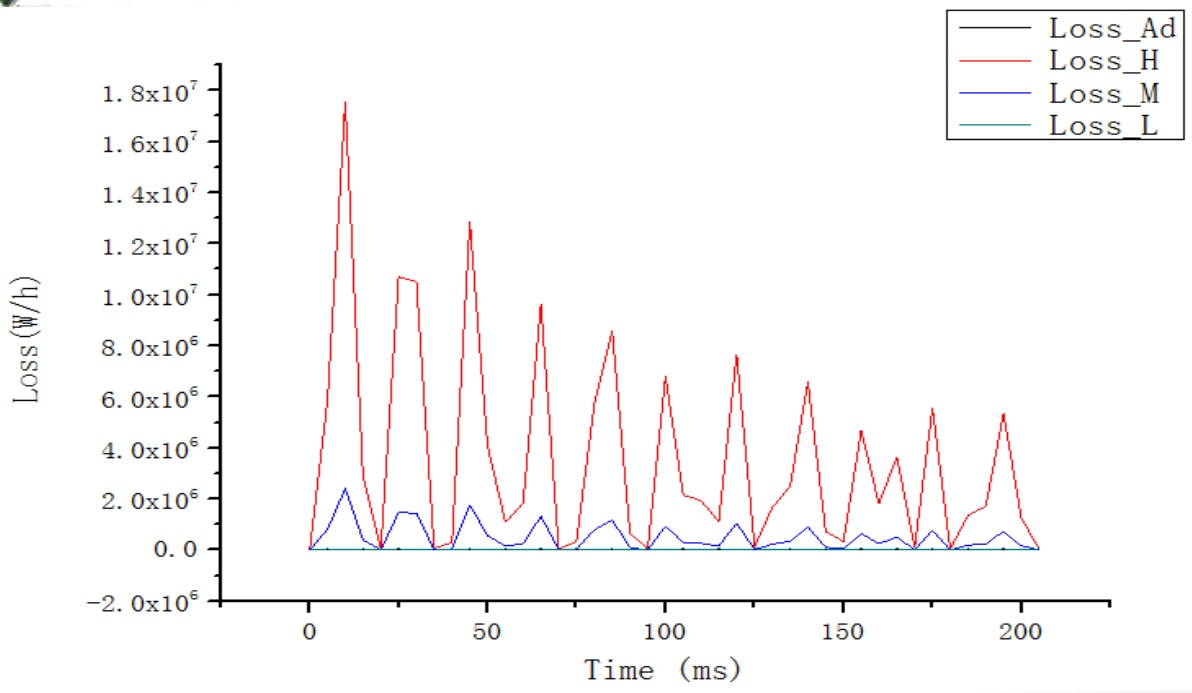
铁芯磁密分布



铁芯磁矢量分布



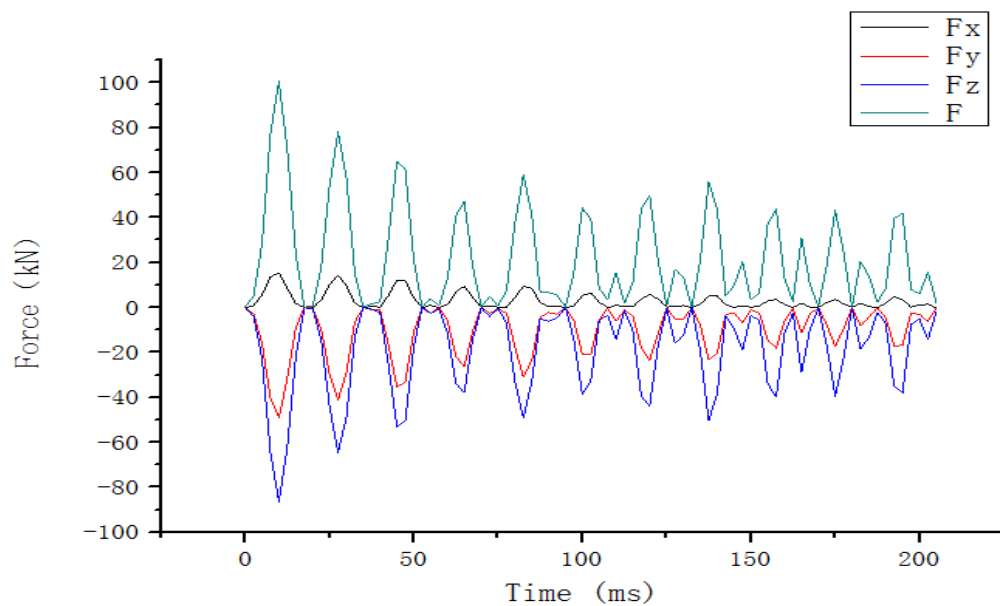
旁轭A相（短路相）内侧磁密分布曲线



A (短路) 相绕组欧姆损耗 (热源) 数

图 为短路相上的绕组 (包括调压线圈、高压线圈、中压线圈和低压线圈) 欧姆损耗随时间的变化曲线 (Loss_Ad表示调压线圈, Loss_H表示高压线圈, Loss_M表示中压线圈, Loss_L表示低压线圈)。从图可以看出, **高压线圈的欧姆损耗的值最大, 随着时间的变化, 欧姆值逐渐减小。其次是中压线圈的欧姆值较大。低压线圈和调压线圈的欧姆值较小。**





A（短路）相调压绕组线圈的受力

图为短路相上的调压绕组受到的电磁力随时间的变化曲线（ F_x 表示电磁力在X方向的分量， F_y 表示电磁力在Y方向的分量， F_z 表示电磁力在Z方向的分量， F 表示电磁力的合力，坐标方向以建模方向为基准）。从图中可以得出，在A相短路时，**调压绕组受到的合力为正值**，随着时间的增加，合力的大小呈现降低的趋势。从三个分量来看，**Z方向的分量的绝对值最大**，随着时间的增加，**绝对值逐渐减少**，其次是Y方向的分量，同样随着时间的增加，**绝对值逐渐减少**。

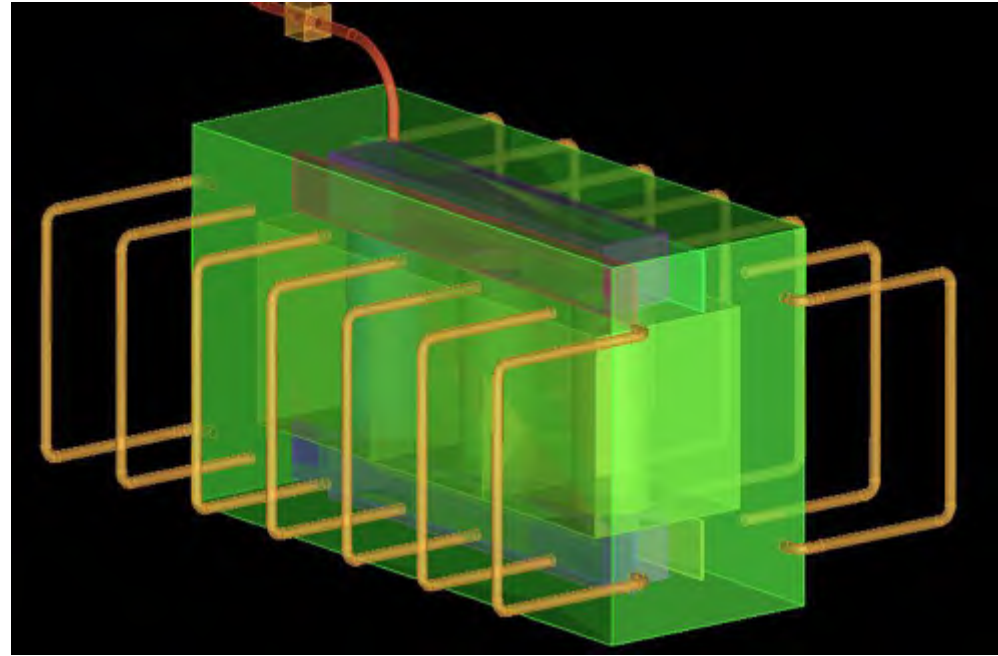
五、研究内容

研究内容2：110kV 变压器冷态油流涌动动态仿真

◆ 工况描述

变压器非工作状态后短路：

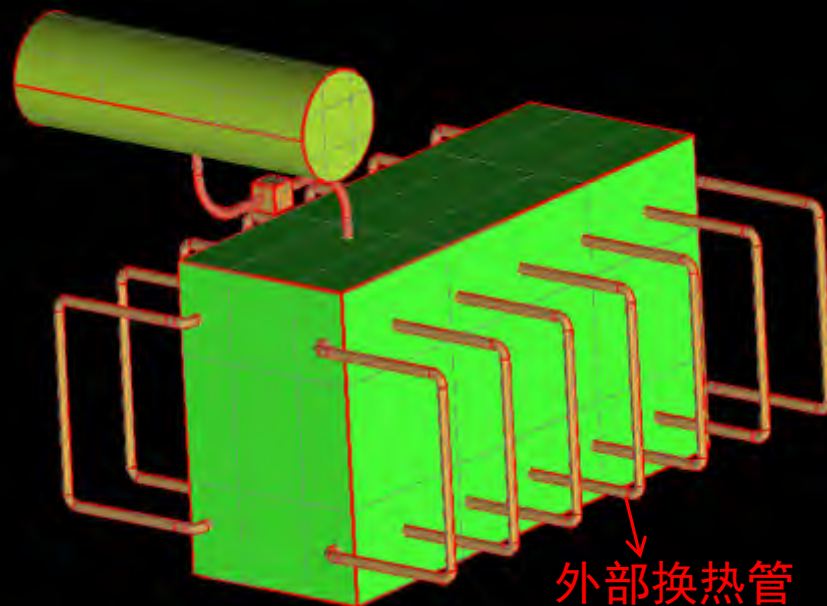
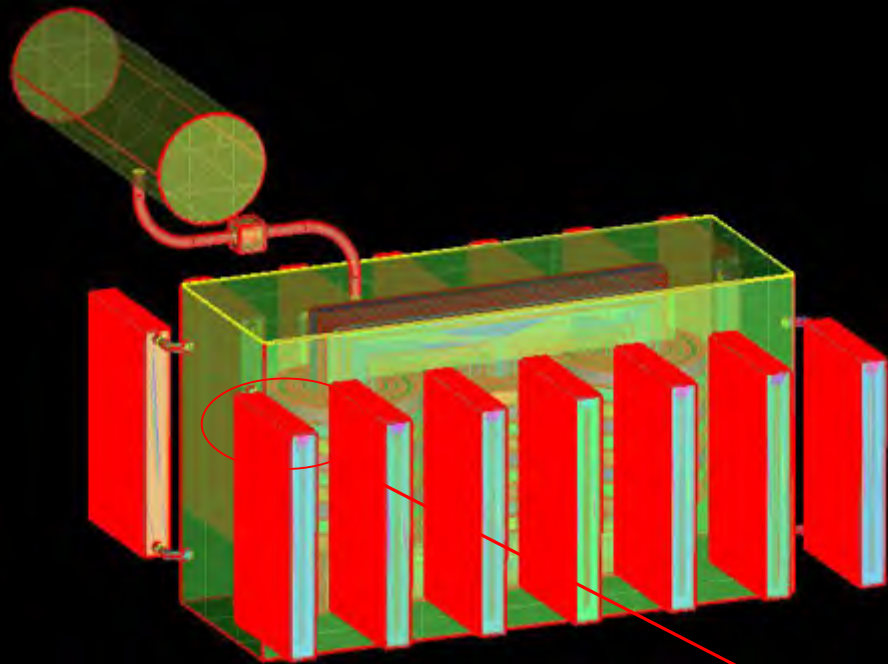
- 1， 变压器冷却油为常温
- 2， 变压器油流速度为零
- 3， 变压器A相高压绕组短路， 持续时间为0.205s



高压电流短路，对各绕组产生强大的电磁力作用，从而造成各绕组形成强烈运动，冷却油流长城剧烈的涌动，以至于对整个变压器造成极度破坏。本次模拟耦合电磁力学，分析短路时，各绕组的运动情况和油流的涌动状态。

CFD分析几何模型

◆ 变压器外部结构



变压器外部几何构件：

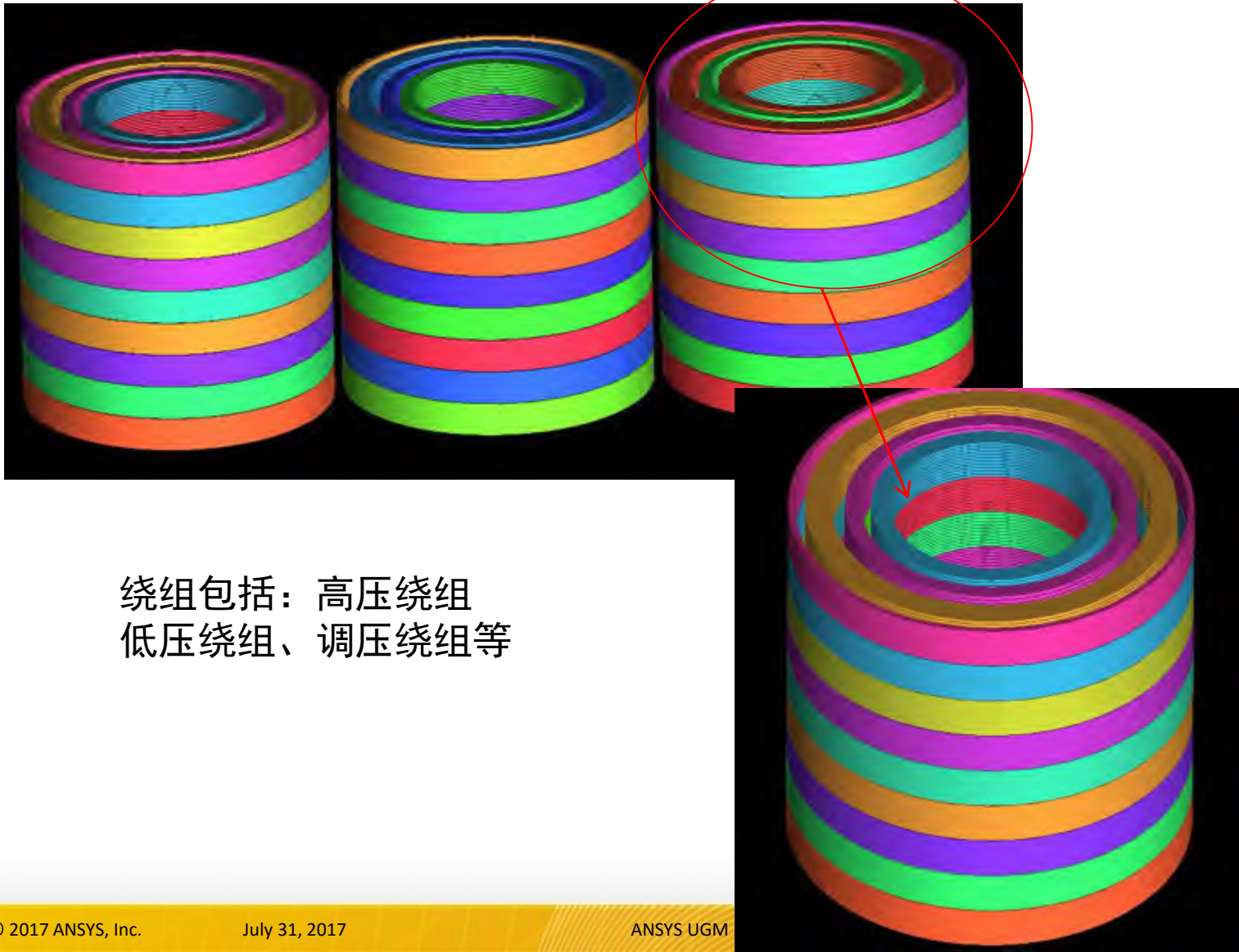
- 油枕
- 继电器
- 变压器外腔体
- 外部换热管
- 散热翅片



散热翅片

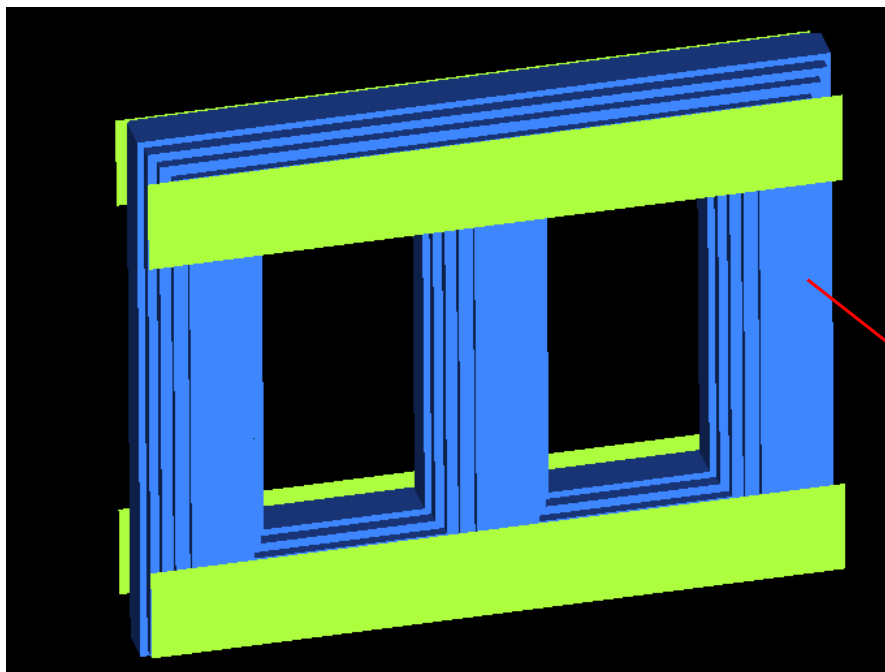
CFD分析几何模型

◆ 变压器外部结构



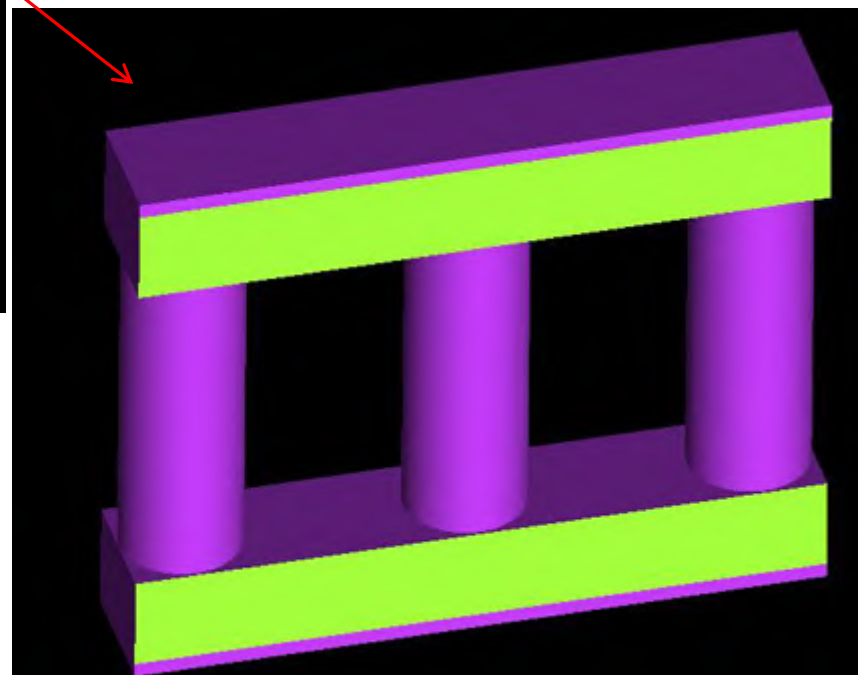
绕组包括：高压绕组
低压绕组、调压绕组等

◆ 变压器外部结构



铁芯几何复杂，为了划分高质量的计算网格，在不影响模拟结果的基础上，将铁芯几何做出相应的处理

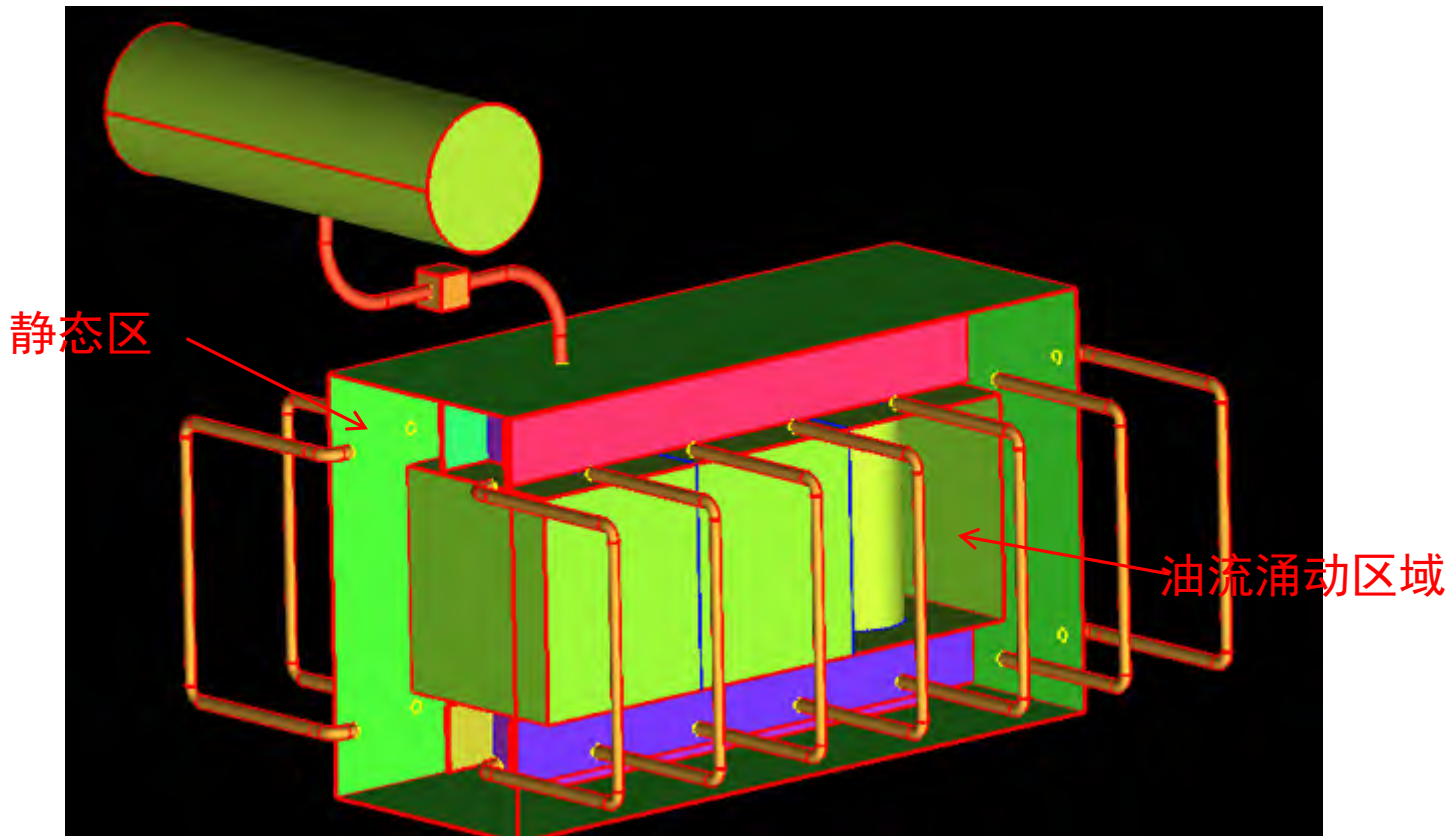
CFD分析几何模型



研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真

CFD分析几何模型

◆ 网格划分



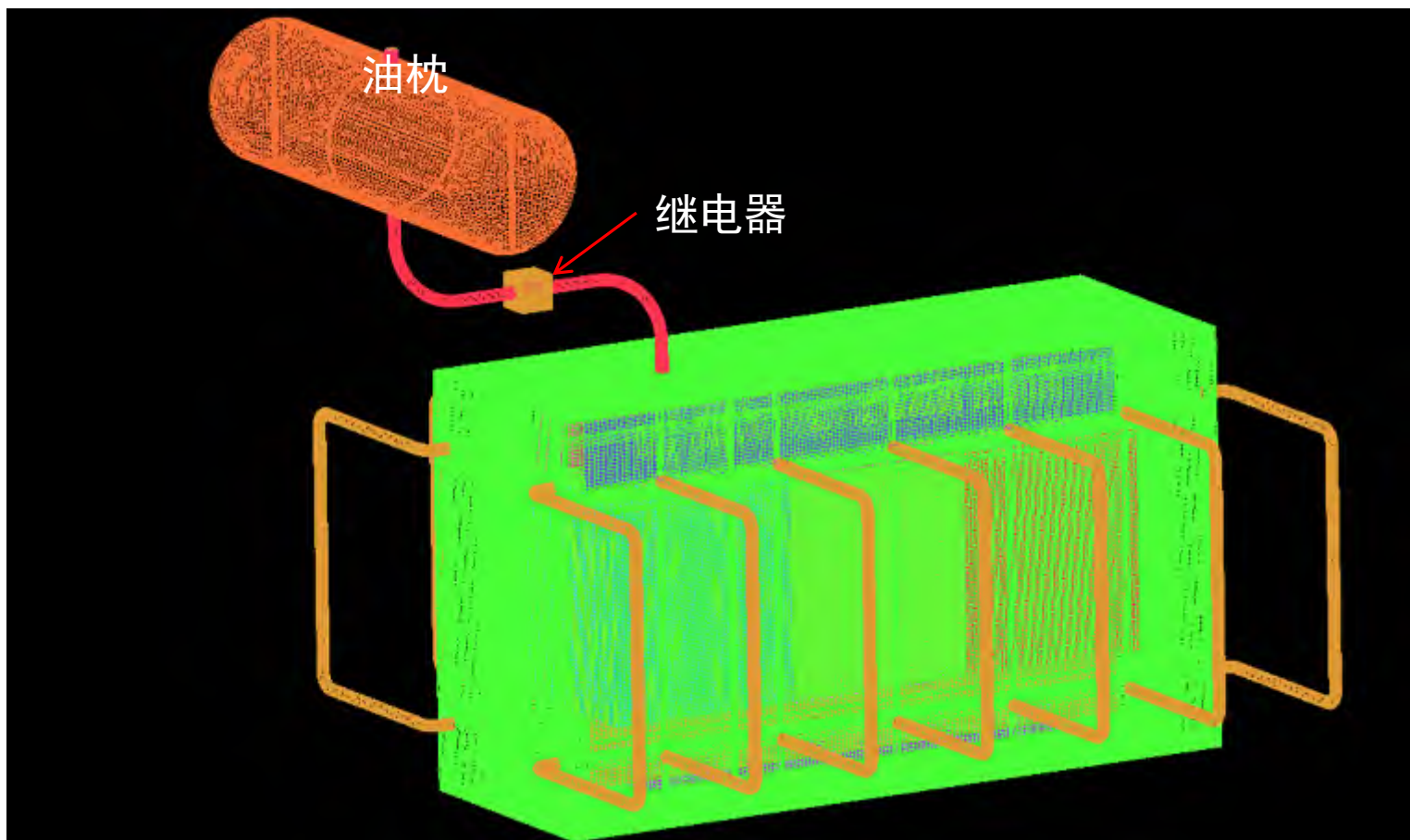
网格划分策略：为了保证计算精确，采用ICEM BLOCK技术，划分全六面体网格

网格划分分区：油流涌动区（动网格区域），静态区，铁芯

各绕组等固体区域。

三维网格

◆ 网格合并

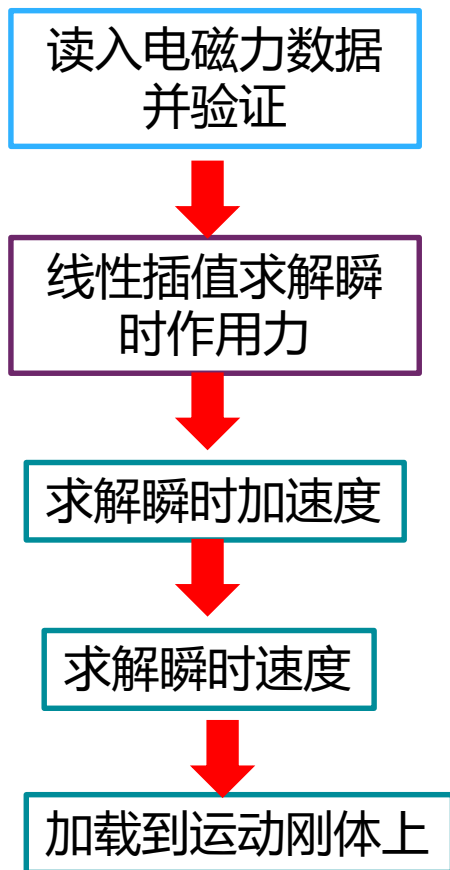


三相绕组动网格与外箱体网格合并, 写出整体网格文件

整个数值模拟计算网格规模为1500万, 采用64G内存, 16核CPU计算

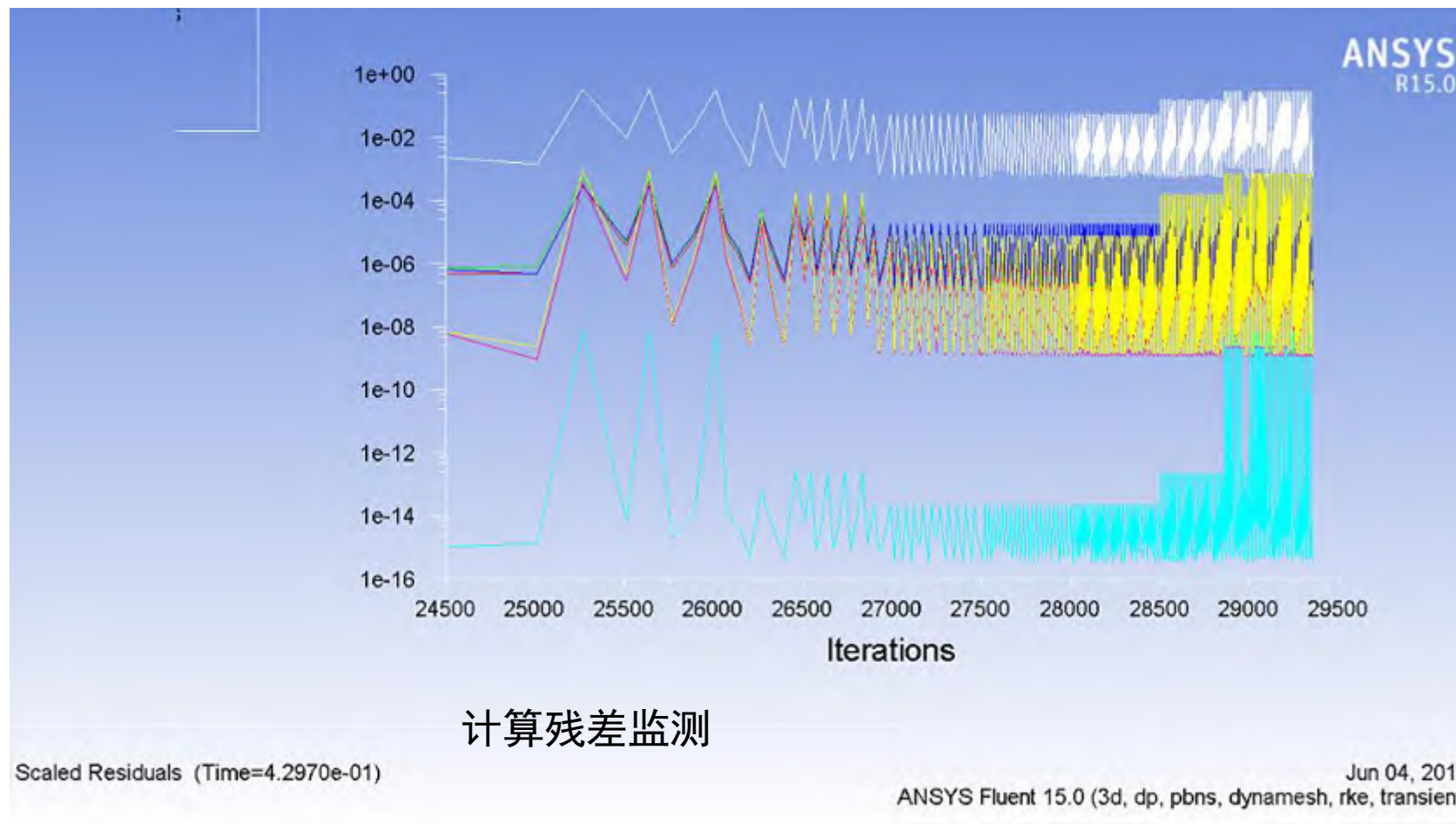
电磁力与结构和流体耦合—UDF编写

◆UDF总体框架

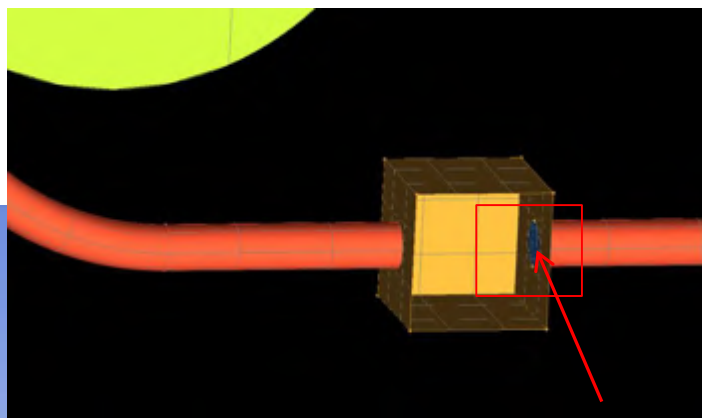


研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真

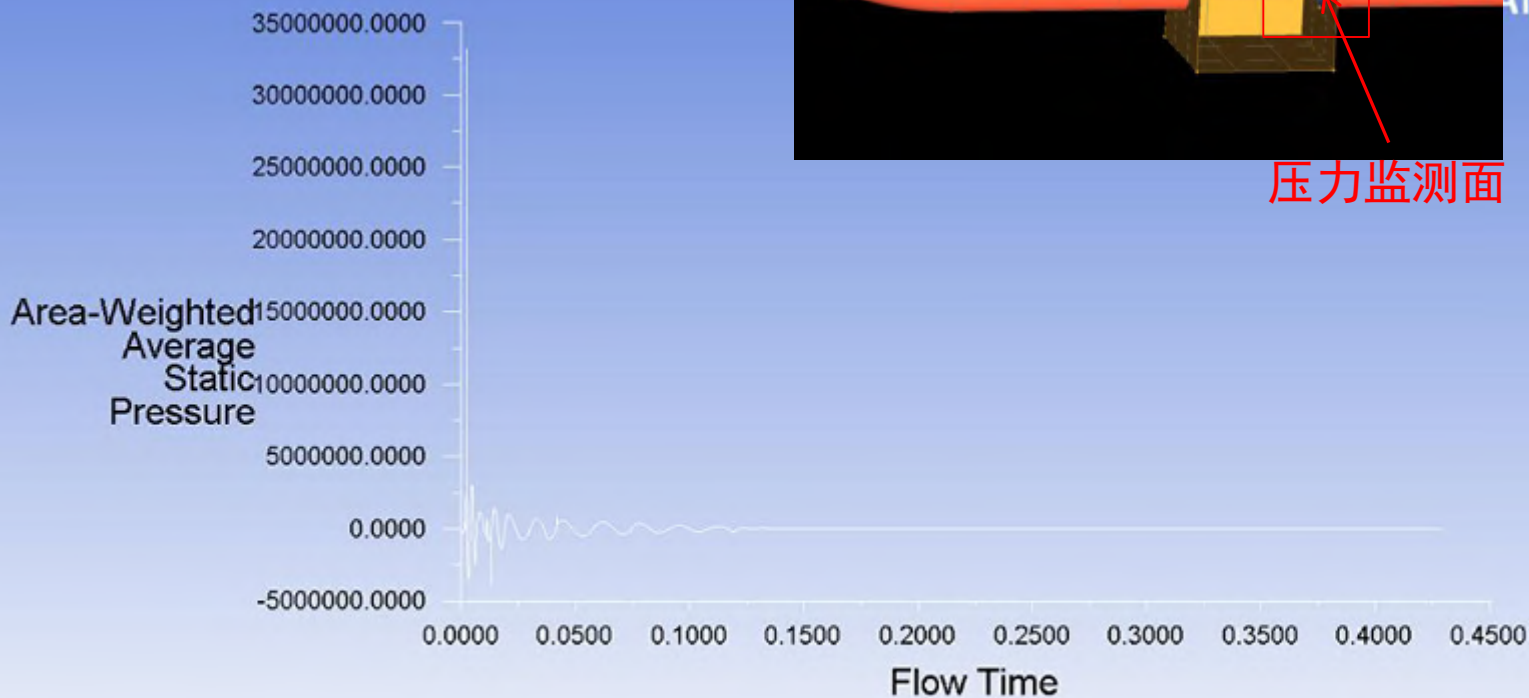
◆模型基本设置



◆模型基本设置



压力监测面

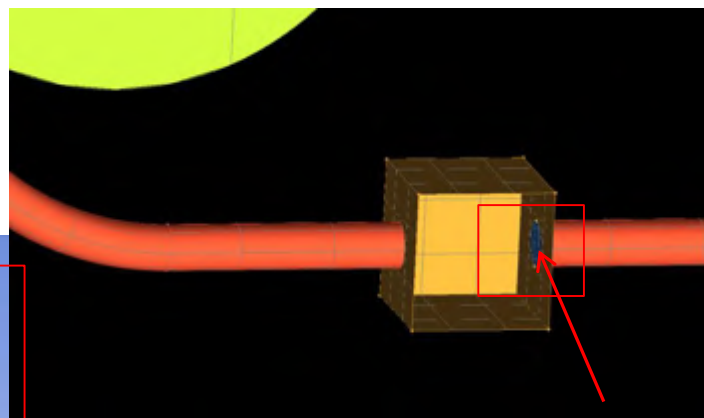


Convergence history of Static Pressure on monitor_face_1 (in SI units) (Time=1.0000e-03)

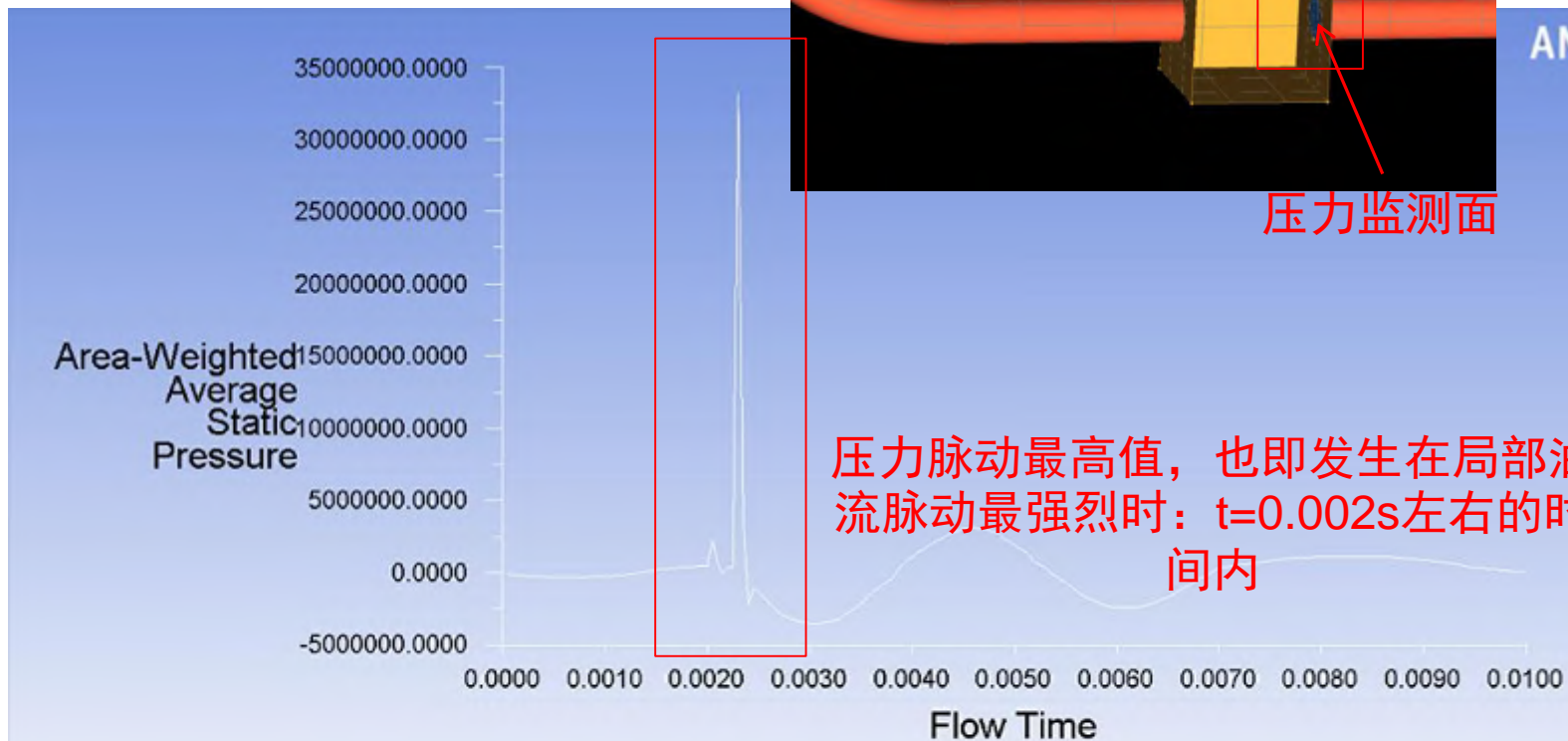
Jun 04, 2017
ANSYS Fluent 15.0 (3d do nbns dynamesh rke transi)

继电器**压力监测面**压力动态数据：0-0.45s

◆模型基本设置



压力监测面



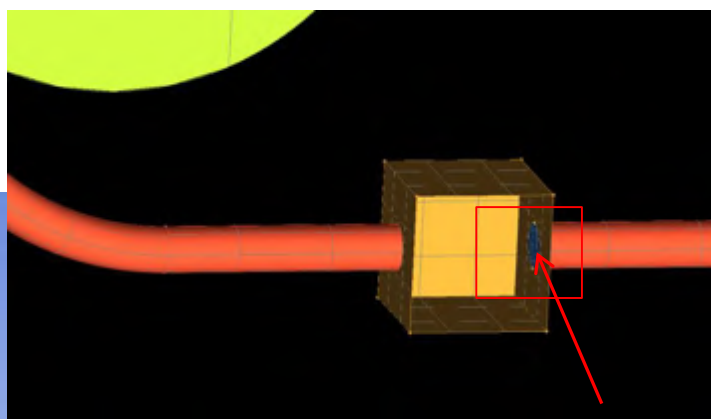
压力脉动最高值，也即发生在局部油流脉动最强烈时： $t=0.002s$ 左右的时间段内

Convergence history of Static Pressure on monitor_face_1 (in SI units) (Time=1.0000e-03)

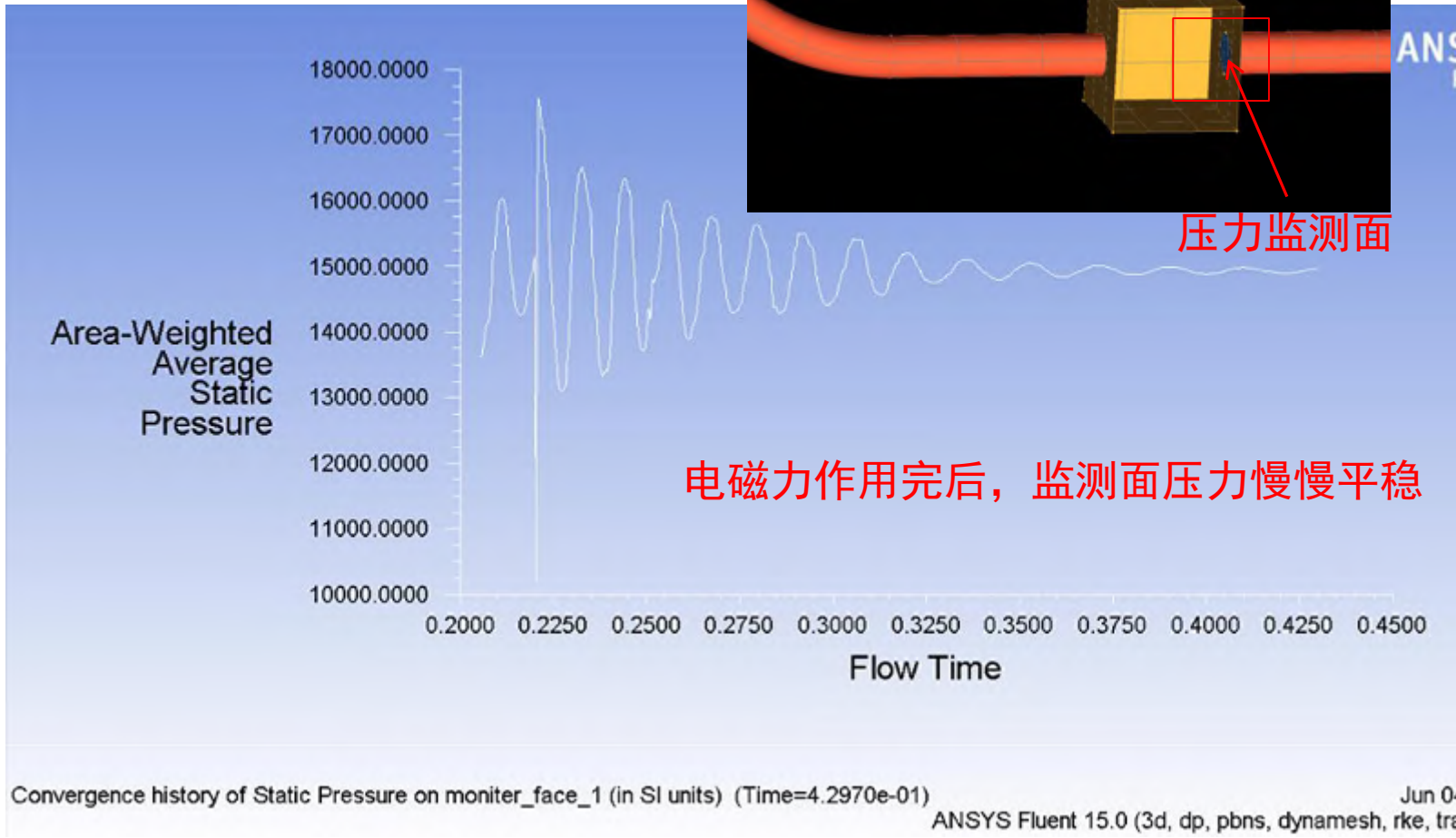
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, rke, l Jun

继电器压力监测面压力动态数据：0-0.01s

◆模型基本设置



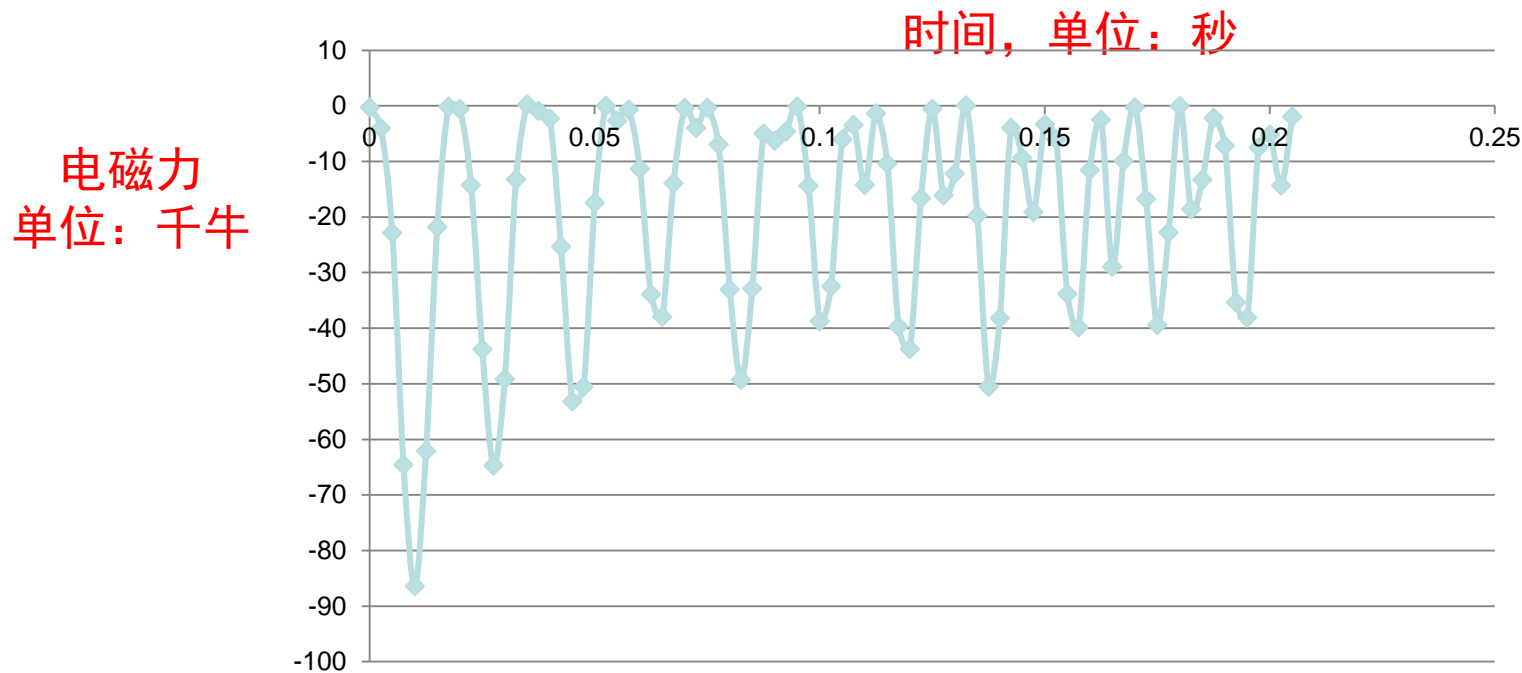
压力监测面



继电器压力监测面压力动态数据: 0.205-0.45s



◆ 模型基本设置

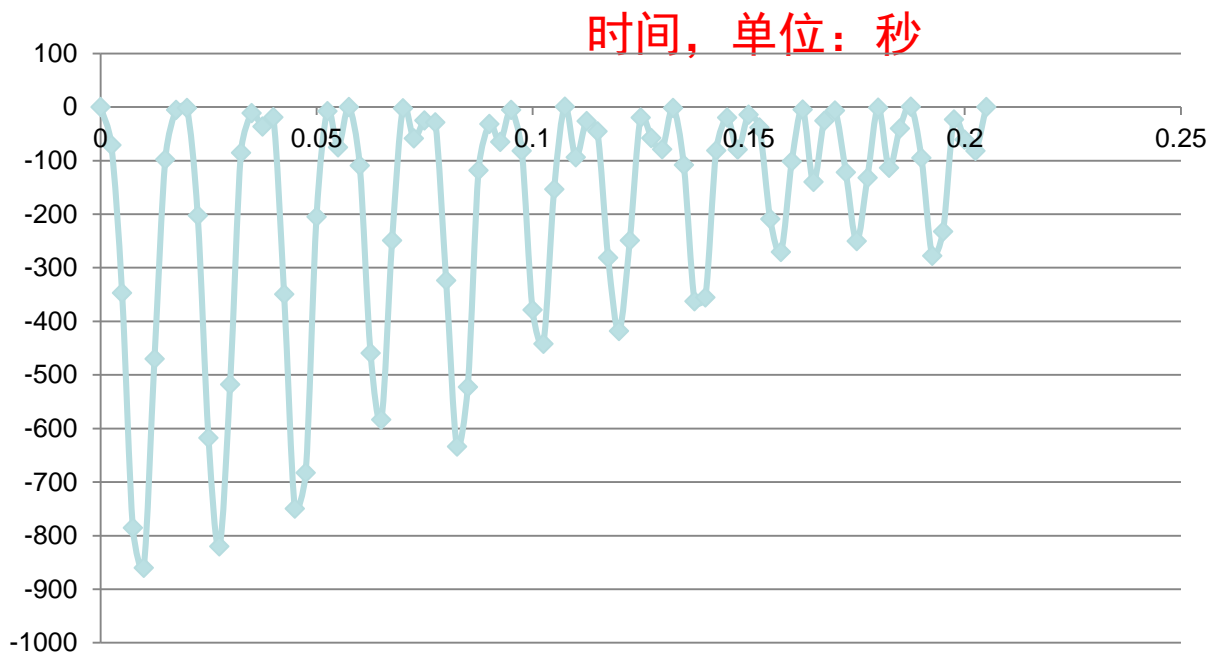


A相：调压绕组所受电磁力随时间变化数据

研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真

◆模型基本设置

电磁力
 单位：千牛

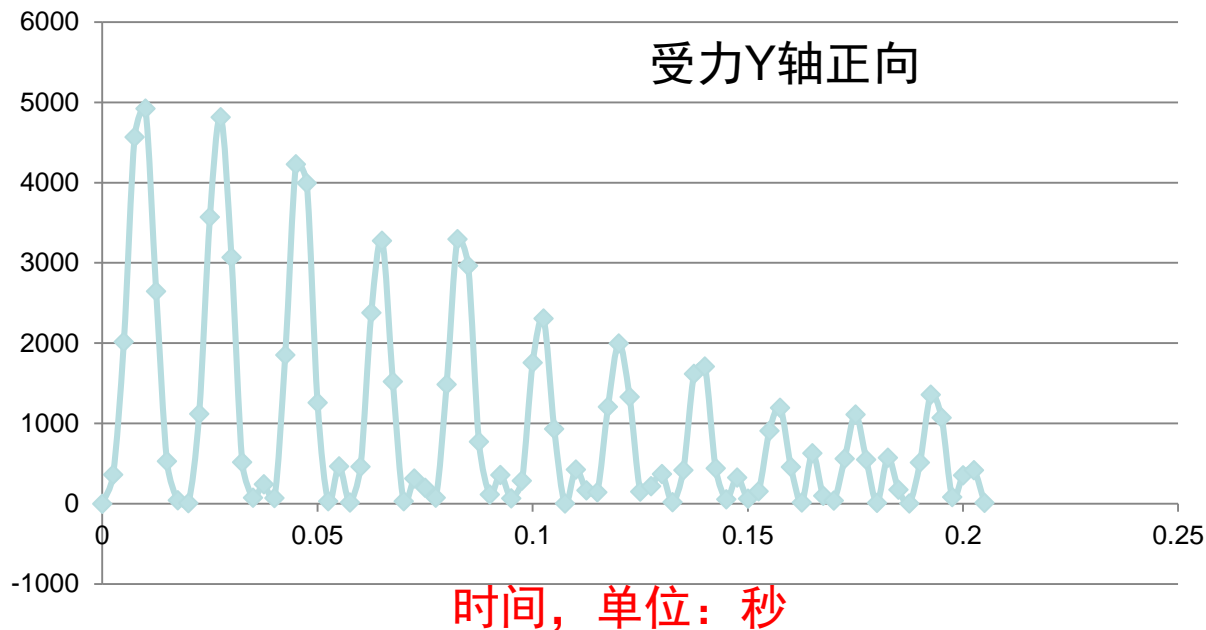


A相：高压绕组所受电磁力随时间变化数据

研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真

◆模型基本设置

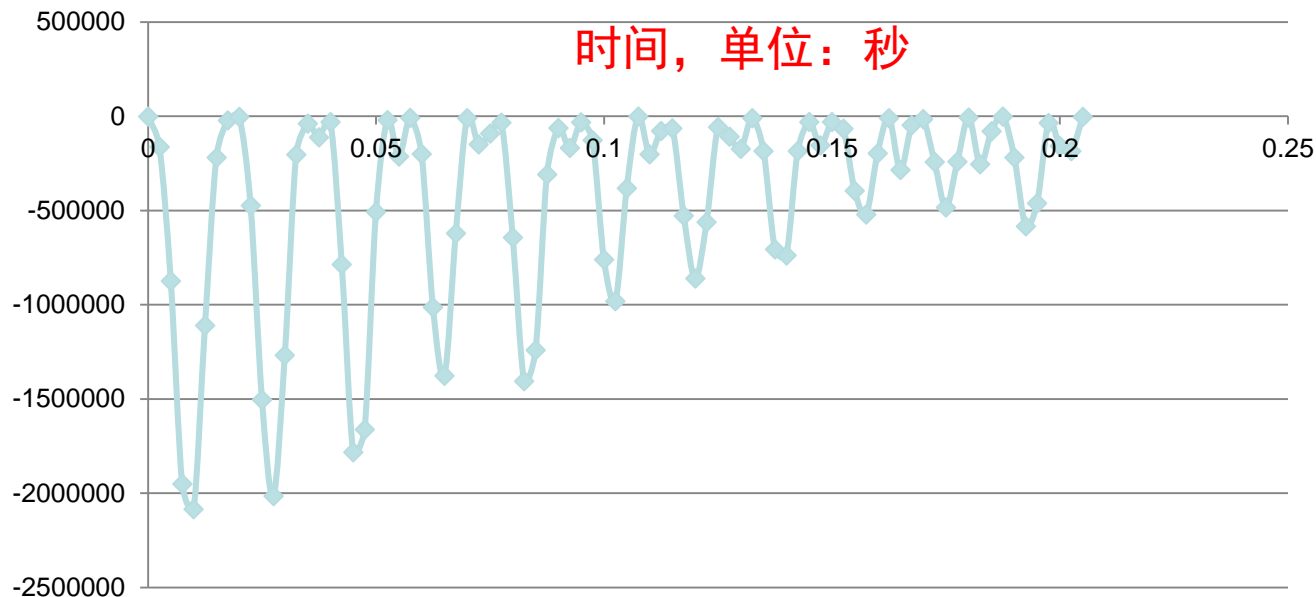
电磁力
单位：千牛



A相：中压绕组所受电磁力随时间变化数据

◆ 模型基本设置

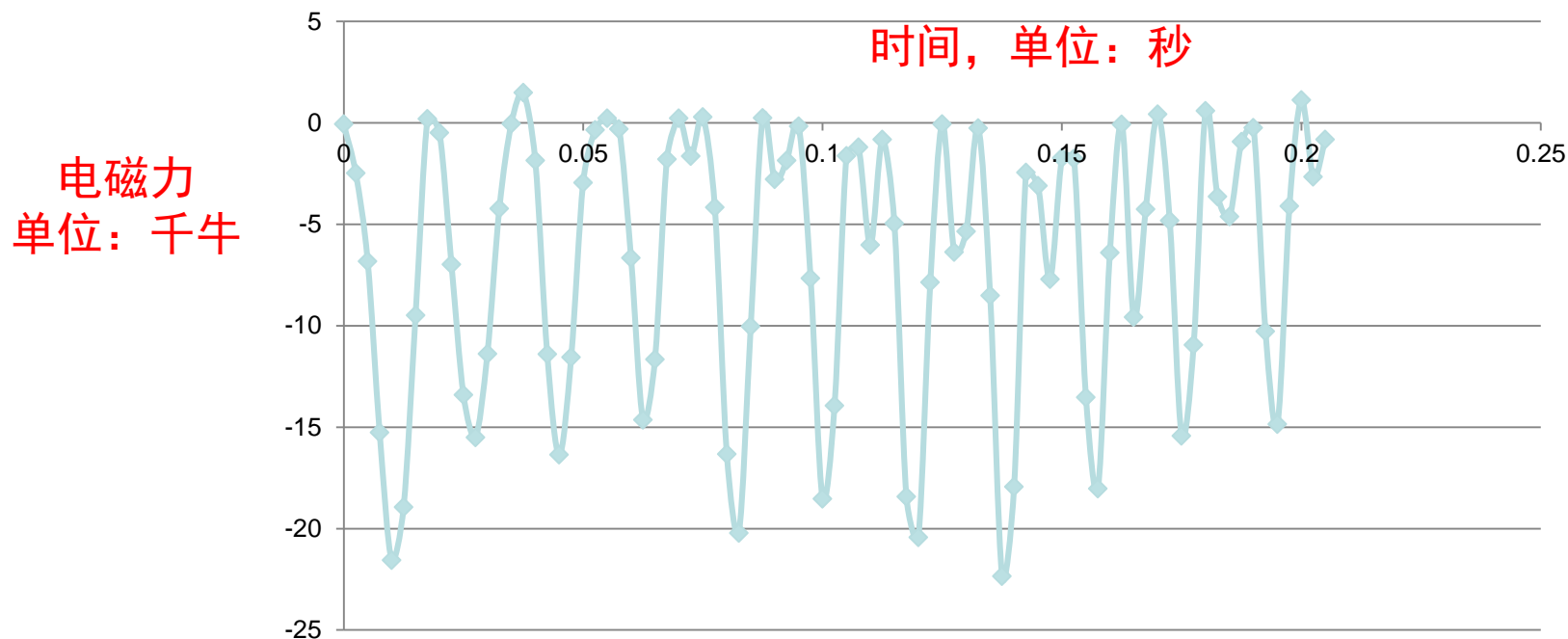
电磁力
单位：千牛



A相：低压绕组所受电磁力随时间变化数据

电磁力结果显示，三相的低压绕组所受的电磁力比同一相的高压、中压、调压所受的电磁力大很多，是量级上的差距。

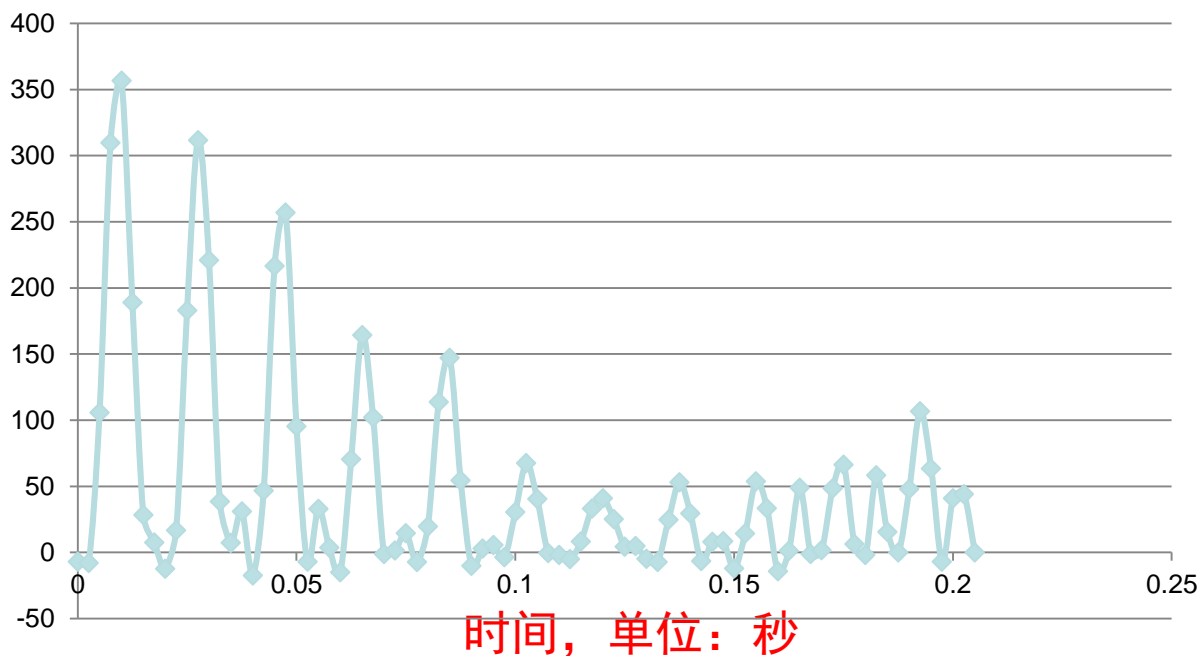
◆模型基本设置



B相：调压绕组所受电磁力随时间变化数据

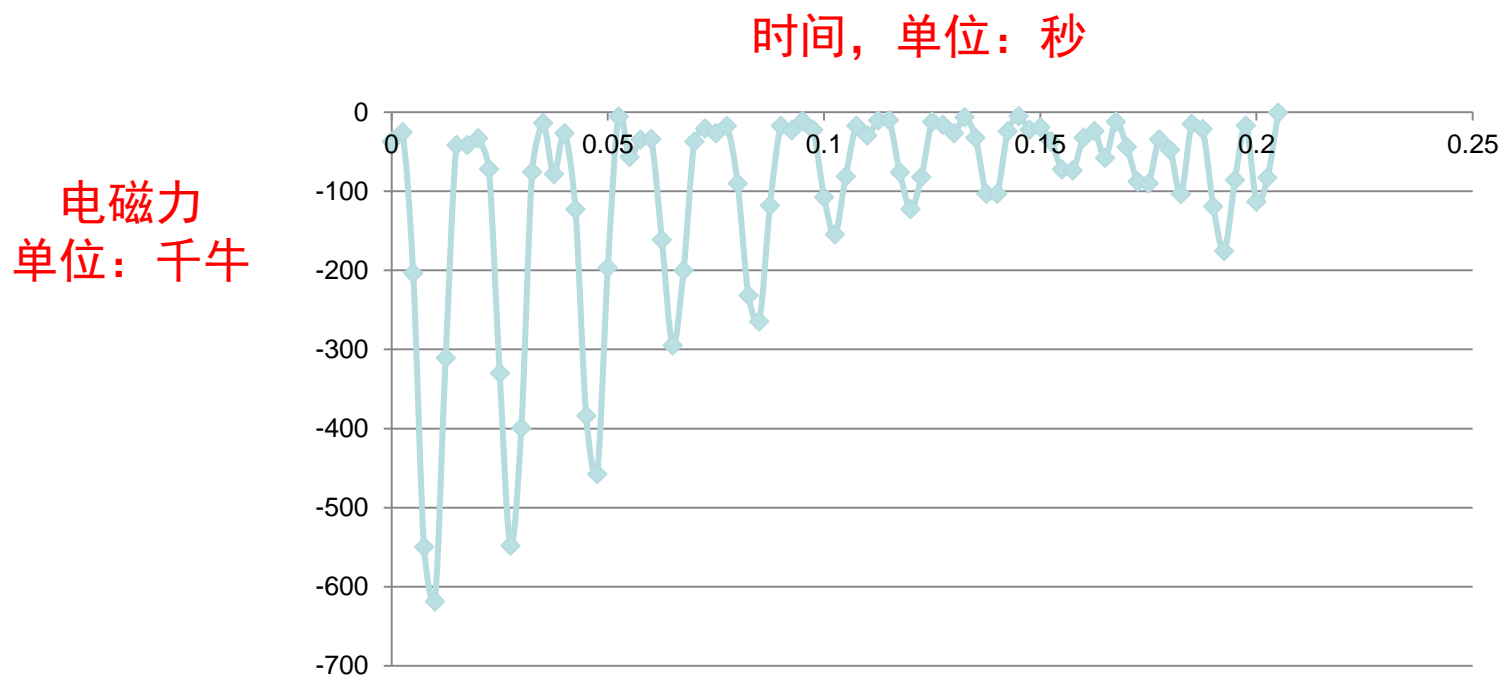
◆模型基本设置

电磁力
单位：千牛



B相：高压绕组所受电磁力随时间变化数据

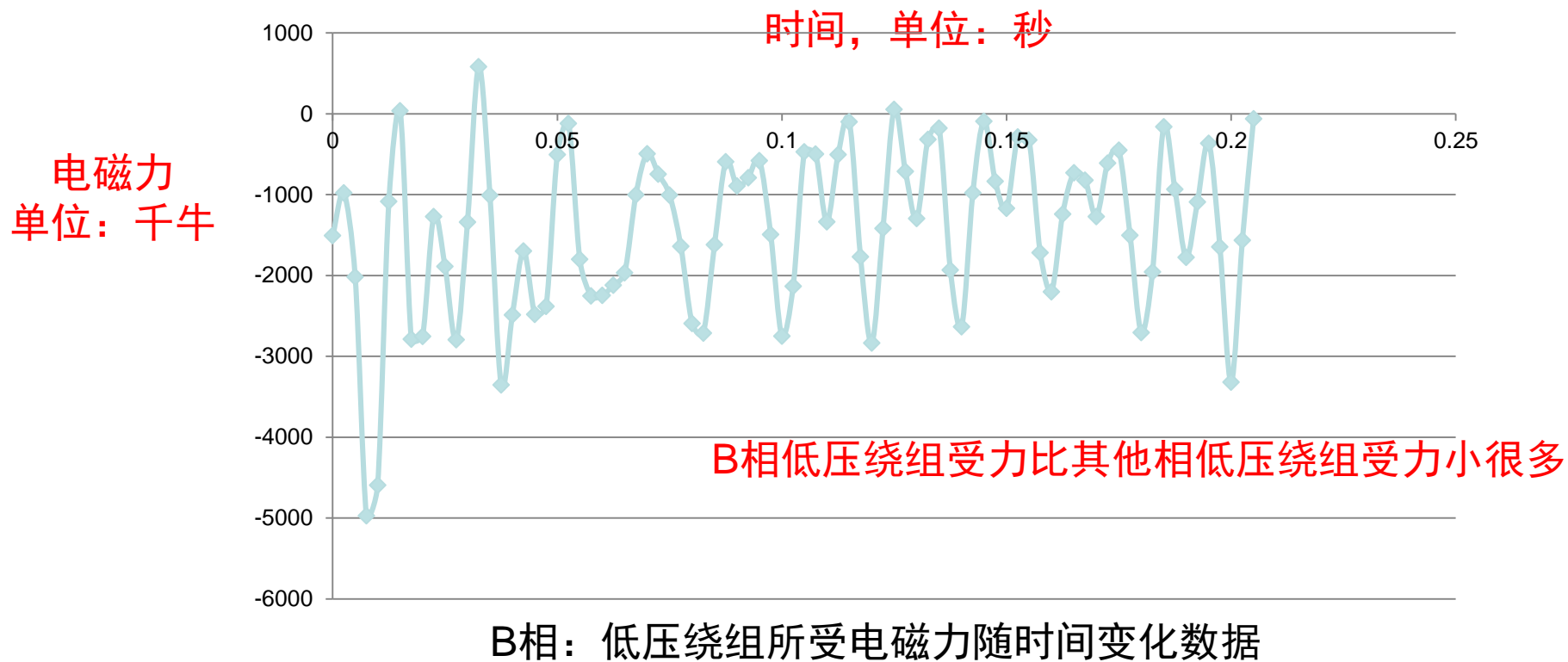
◆模型基本设置



B相：中压绕组所受电磁力随时间变化数据

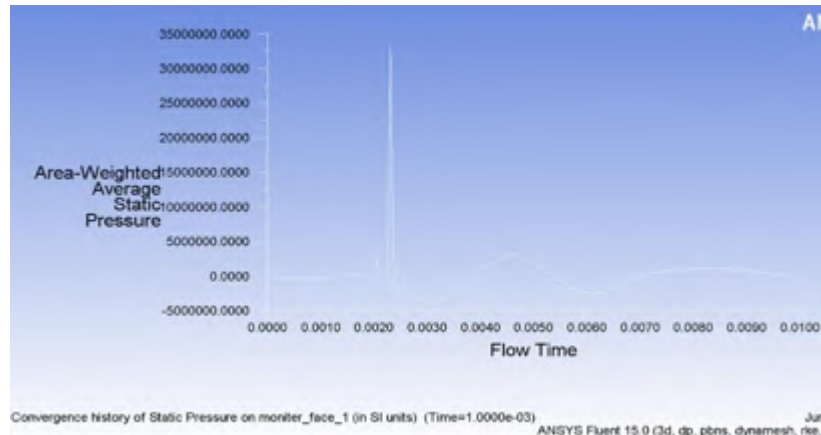
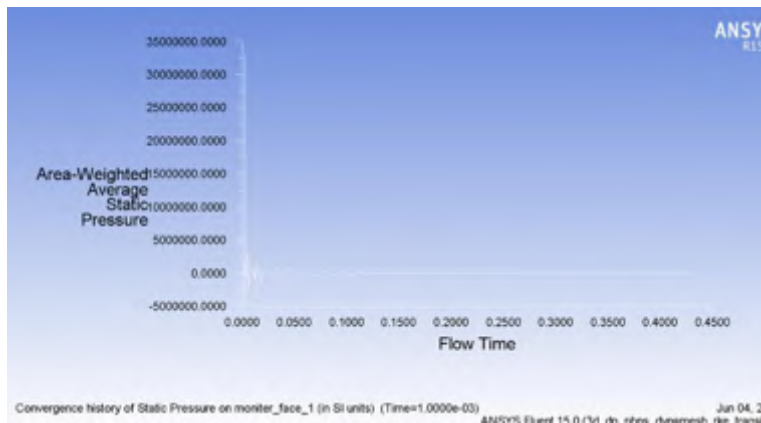
研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真

◆模型基本设置



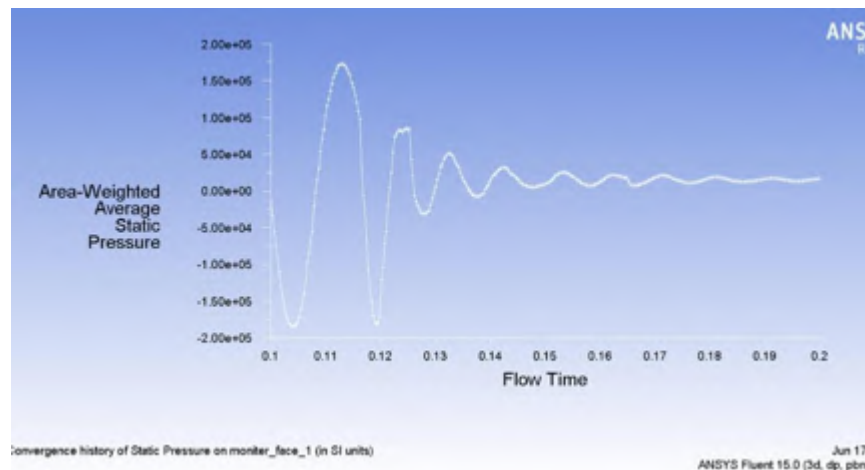
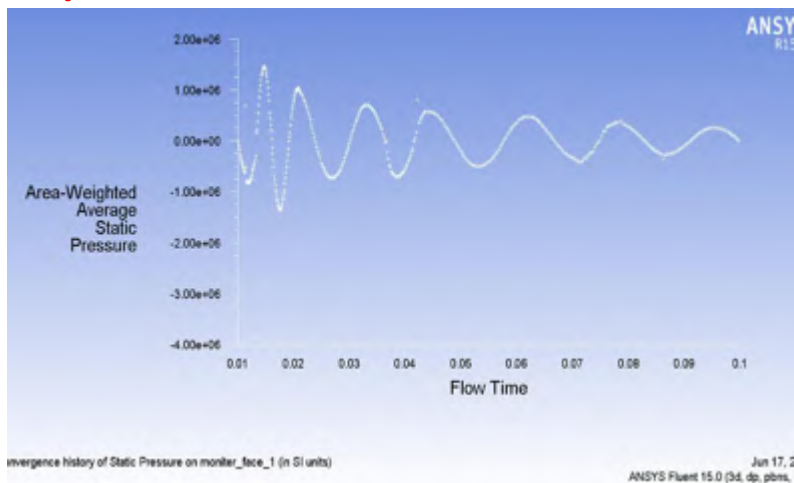
电磁力结果显示，三相的低压绕组所受的电磁力比同一相的高压、中压、调压所受的电磁力大很多，是量级上的差距

研究内容2: 110kV变压器冷态油流涌动动态仿真



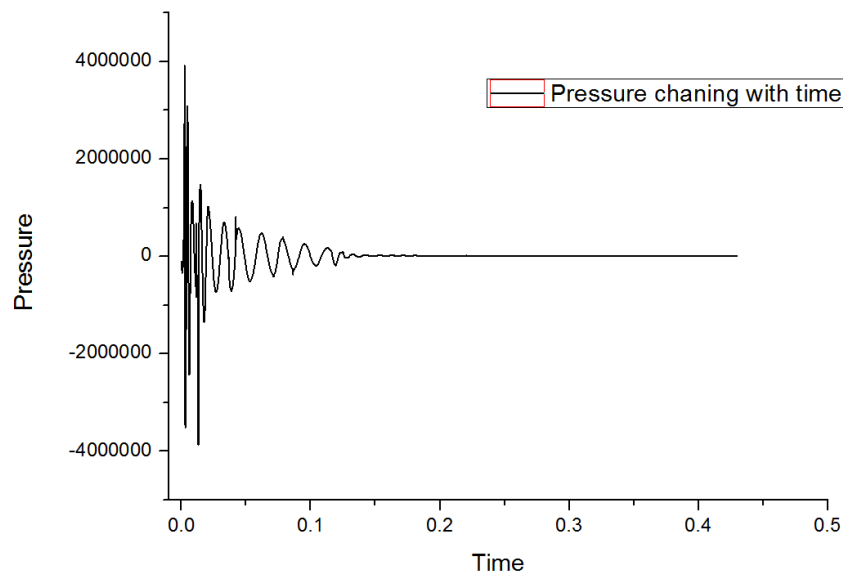
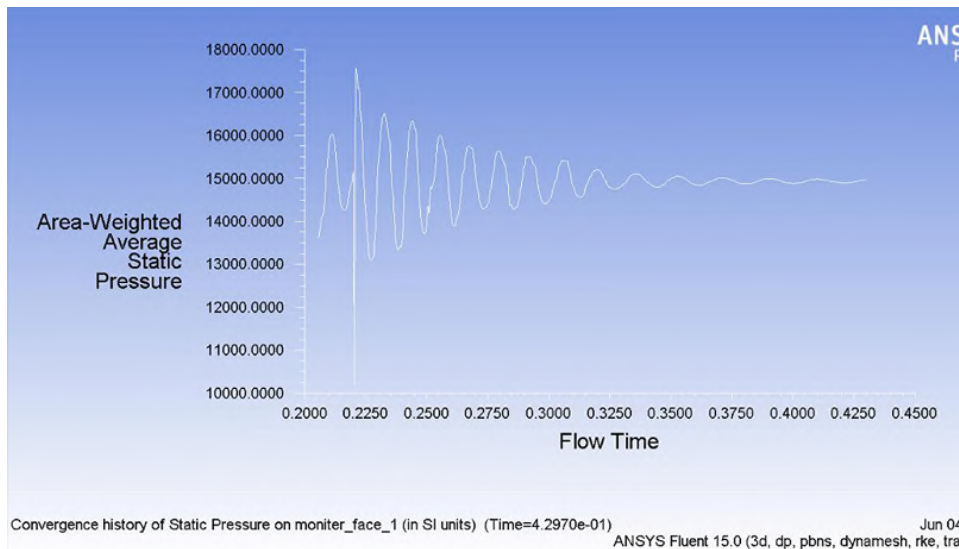
A) 监测面0-0.45s的压力变化曲线

B) 监测面0-0.01s的压力变化曲线——剧烈波期



C) 监测面0.01-0.1s的压力变化曲线——
强烈波动期

D) 监测面0.1-0.2s的压力变化曲线——
弱波动期

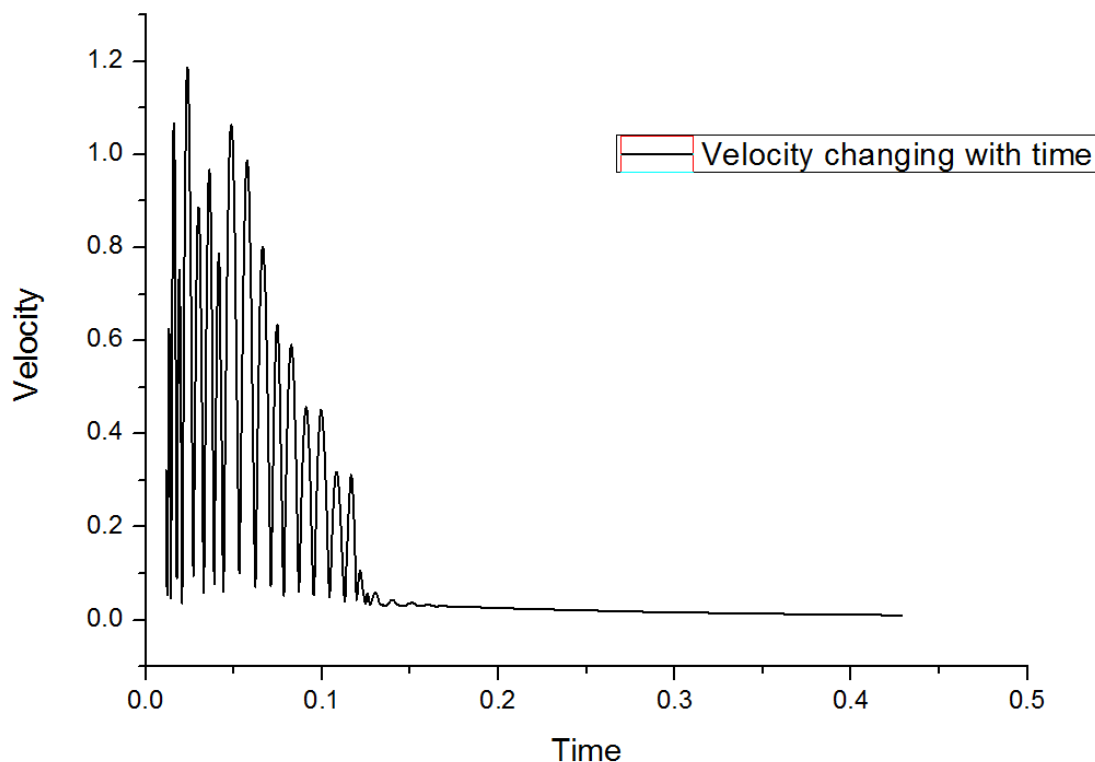


E)监测面0.2s-0.45s的压力变化曲线——稳定波动期

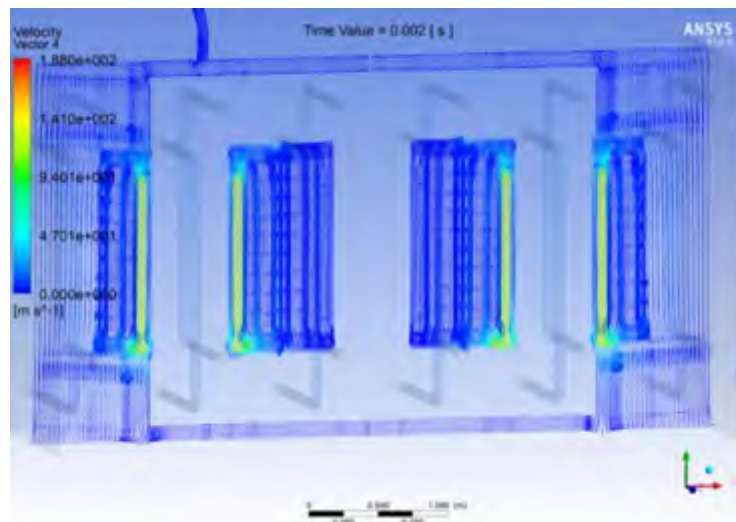
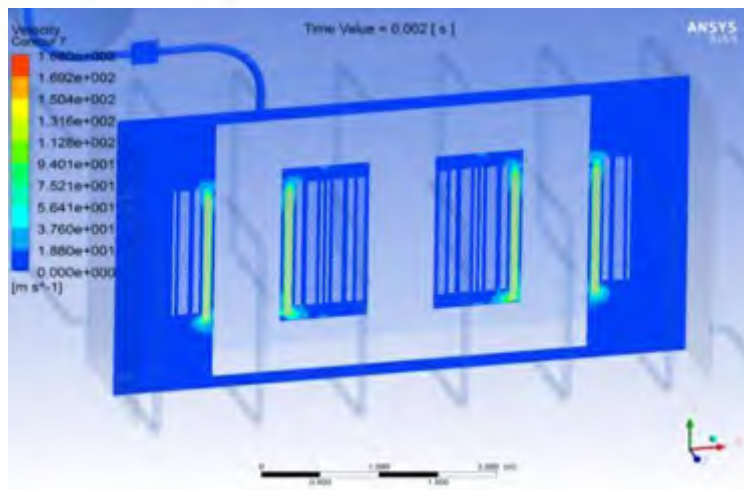
监测面压力峰值出现在低压绕组运动最强烈的时候，此时也是油流涌动最强烈的时段，随后压力波动变缓，短路电流作用时间结束后，压力趋近稳定。

整个短路过程，变压器油流涌动可以分为四个阶段：剧烈波动期，强烈波动期，过度波动期，弱波动期。剧烈波动期——压力波动量级为 10^6 ，此处正是受力最大的低压绕组速度达到最大的时段，该时段，低压绕组和铁芯局部压力非常大（ 10^6 量级），从而瞬间给变压器绕组，铁芯等组件造成破坏，油流涌动剧烈；强烈波动期——该期间压力波动在正负 10^6 量级内，油流涌动相对强烈；过度波动期——该期间压力波动在正负 10^5 量级内，油流涌动相对较弱，局部压力趋近平缓；弱波动期——该期间压力波动在几千帕，油流涌动基本消失，整体压力趋近静止状态下冷却油内部的压力分布（重力作用下的压力分布）。

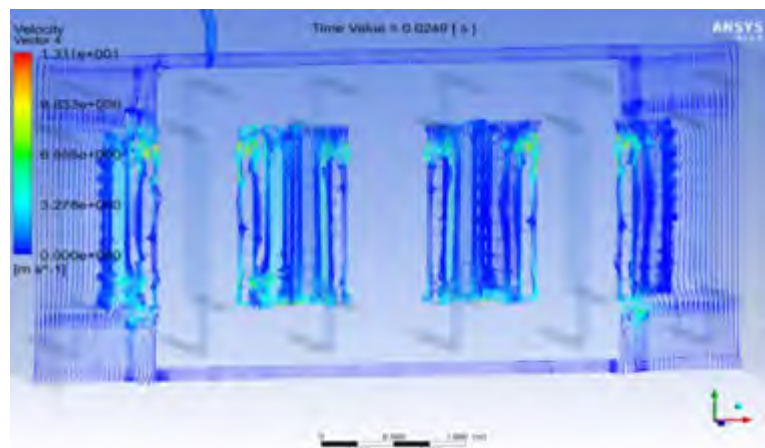
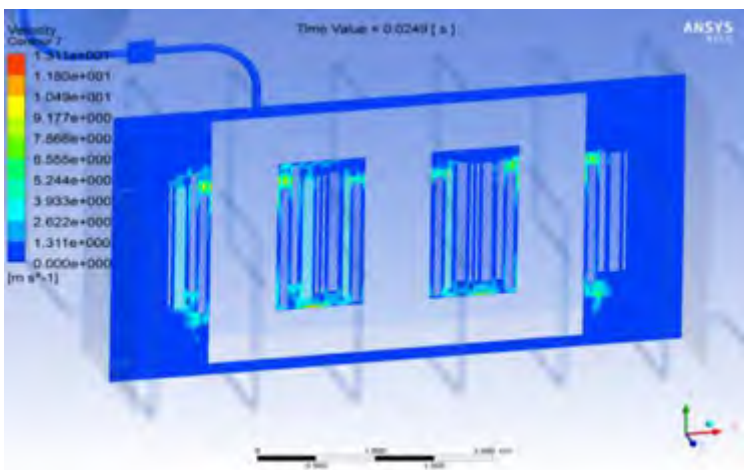
研究内容2：110kV变压器冷态油流涌动动态仿真



现场短路试验得到的瓦斯继电器位置处速度为0.9m/s，与数值模拟得到结果比较接近，验证了数值模拟计算结果准确性。因此数值模拟计算结果对于实际变压器受到外部短路冲击时整定值设定具有十分重要的参考信息。



T=0.002s时刻轴中剖面速度分布云图和速度矢量图



T=0.0249s时刻z轴中剖面

ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

感谢聆听



ANSYS-China