

特高压输电线舞动动力学行为及灾害防治虚拟仿真实验

一、实验目的

本虚拟仿真实验项目为有限元方法课程培养学生应用有限元法解决具体工程实际案例的虚拟仿真实验训练项目，也可作为工程力学课程学习工程实践认识性实验。

特高压输电是目前世界上最先进的输电技术，为能源战略方针，国家近年来大力发展特高压输电技术。在特高压线路运行中，存在覆冰导线舞动的难题。覆冰导线的舞动是发生在极端天气条件下的导线长时间大幅度非线性振动，是威胁架空输电线路安全运行的重要灾害。导线舞动灾害的一个重要特点在于其空间和时间上发生的偶然性，它只能在实际运行线路中偶然观察到，难以进行真实实验重现。

本项目采用有限元方法和三维虚拟仿真技术，再现架空输电导线舞动及其防治的真实场景，模拟导线和塔架的全部动力学行为和运动过程，分析舞动的影响因素、结构强度和稳定性，设计防舞器参数，仿真防舞器对舞动的抑制效果，寻求经济实用的灾害防治方案。通过本虚拟仿真实验项目练习，使学生了解工程力学基本知识在分析大型复杂工程实际问题的具体应用和方法，培养学生处理工程实际问题的能力和研究性创新思维能力。

通过本虚拟仿真实验，训练学生利用有限元法计算分析具体工程实际案例，取得以下学习效果：

- (1) 了解特高压架空输电线舞动和防舞装置的基本力学机理；
- (2) 以架空输电线舞动工程实际案例学习有限元建模分析方法；
- (3) 学习静力学计算导线悬挂形状的方法；
- (4) 学习覆冰导线气动力特性的流体力学数值计算过程；
- (5) 观察导线舞动过程，测量获得导线舞动幅值和频率，特征节点运动时间历程曲线、塔架构件应力时间历程曲线，分析结构强度和稳定性；
- (6) 对防舞器进行参数设计，仿真防舞器对舞动的抑制效果，分析参数对防舞效果的影响规律。

二、实验原理

首先用两节点Belytschko梁单元离散覆冰导线，该梁单元使用共旋技术来处理大转动，把梁的变形分为刚体平动、转动与真实变形，适合于导线舞动过程的大位移大转动处理；用两节点欧拉梁单元建立塔架有限元模型；采用抛物线理论进行迭代计算，得到导线在重力作用下的初始形状；施加静态风载用静态有限元方法计算导线的静平衡形状；然后施加随相对风速、攻角变化的气动升力、阻力和扭矩动态载荷，用二阶中心差分格式的显式时间积分动态有限元方法进行求解，仿真覆冰导线的动态舞动过程；提取塔架各个构件的内力-时间历程数据，根据材料力学校核构件强度，根据钢结构规范校核构件稳定性；最

后设计防舞器质量、刚度、阻尼参数，将各个防舞器有限元模型并添加至整体有限元模型中，进行抗舞动计算并分析防舞效果。如图1所示。

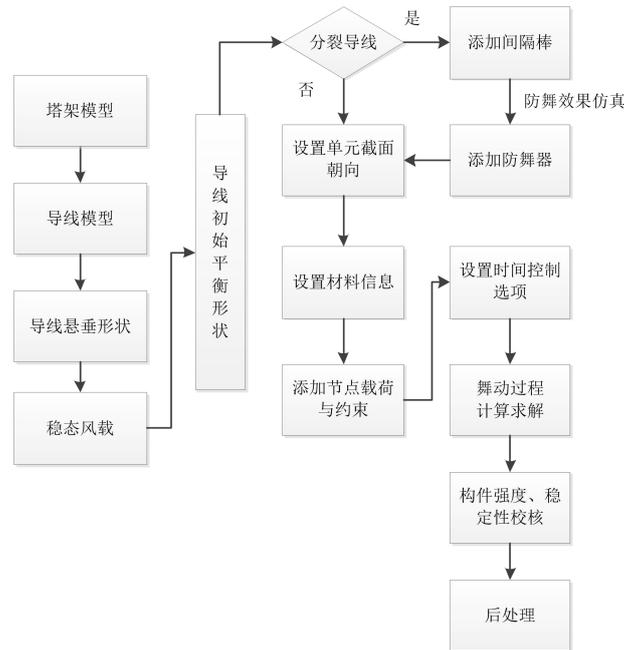


图1 实验原理示意图

本虚拟仿真实验计划帮助学生了解和掌握特高压覆冰导线和塔架的有限元建模、结构静力学计算、结构气动系数数值计算、导线舞动计算和结构动力学行为分析的方法、防舞器参数设计原理和防舞效果分析方法，涉及《有限元方法》、《材料力学》、《计算流体力学》、《结构力学》等课程的相关概念和原理。对应的知识点数量有以下5个：

- (1) 结构有限元建模方法
- (2) 结构静态有限元计算方法
- (3) 流体力学数值计算方法
- (4) 结构非线性动态有限元计算方法
- (5) 结构强度和稳定性校核方法

三、实验仪器设备（装置或软件等）

实验仪器设备：计算机服务器及终端

软件：虚拟仿真操作软件平台；

服务器有限元分析软件工具；

仿真模块数据库包括：

- 前处理模块

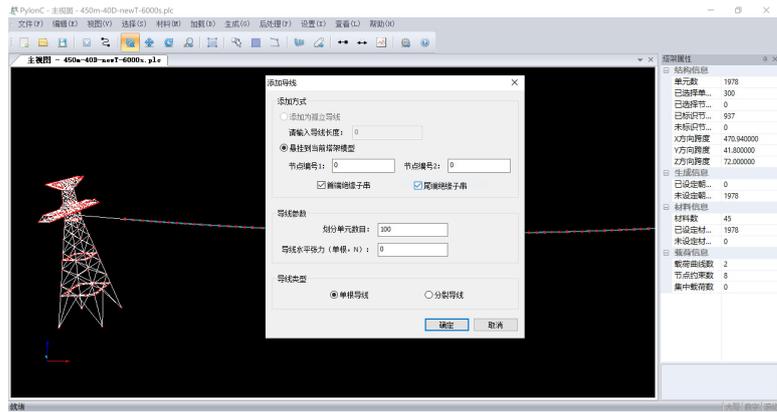


图2 前处理模块

➤ 有限元静力计算模块

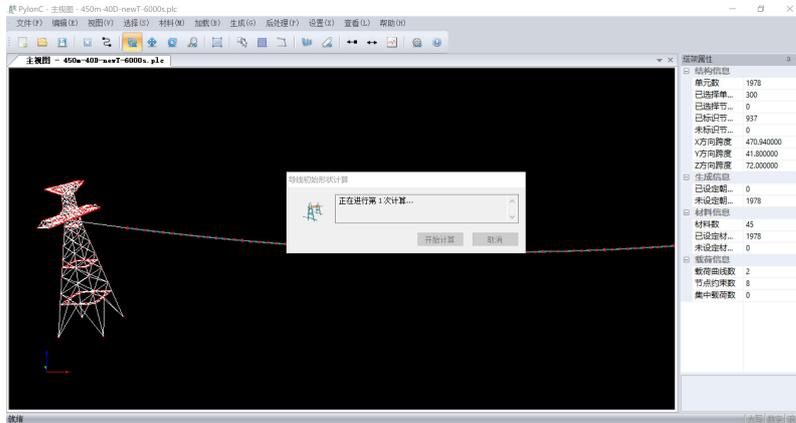


图3 静力学计算模块

➤ 覆冰导线气动力流体力学计算模块

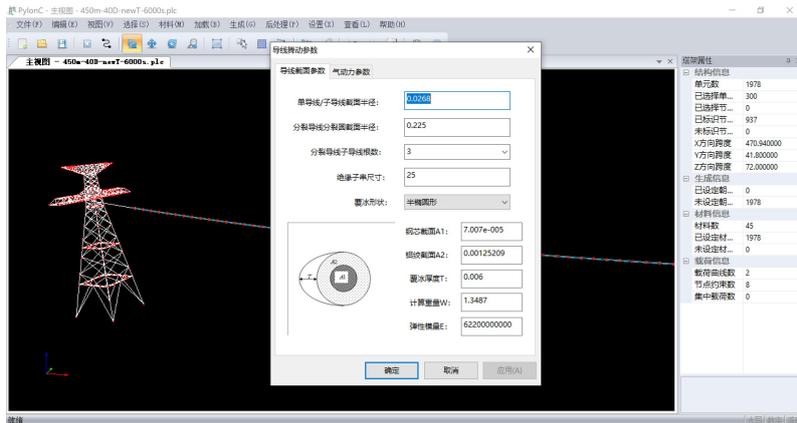


图4 覆冰导线气动力计算模块

➤ 舞动过程动态有限元计算模块

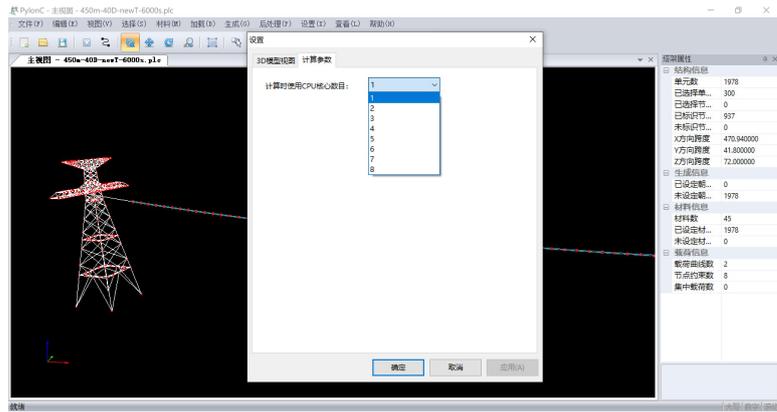


图5 舞动计算模块

➤ 防舞器参数设计模块

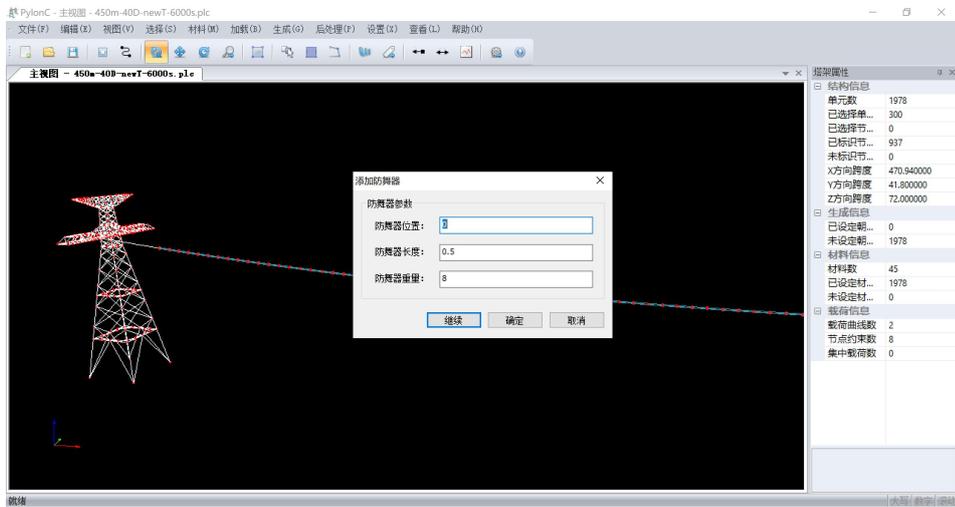


图6 防舞器设计模块

➤ 结构强度和稳定性校核模块

➤ 后处理模块

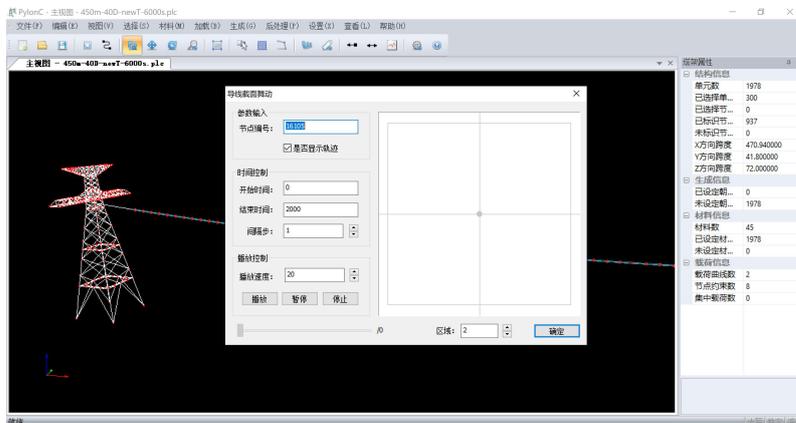


图7 后处理模块

四、实验材料（或预设参数等）

- (1) 导线分裂数（单根，六分裂）
- (2) 覆冰（2种）
- (3) 相内间隔棒布置间距（50m, 60m, 70m）
- (4) 风速（4m/s, 8m/s, 12m/s）
- (5) 风初始攻角（30°, 45°, 60°）
- (6) 防舞器质量（5kg, 15kg）
- (7) 防舞器弹簧刚度（100kg/m, 500kg/m）
- (8) 防舞器阻尼（15, 25）

五、实验教学方法

本虚拟仿真实验教学项目列入有限元方法课程设计教学大纲，实验教学采取以学生为中心的交互式自主设计方法。教学实践中分为“工程背景及基本原理讲授”、“学生线上自主虚拟设计进行虚拟实验”和“学生线上分析虚拟实验结果”三个环节。其中第一个环节属于实验前预习，后两个环节属于虚拟仿真实验操作环节。每个环节所需完成的工作及需要达到的效果如下表所示：

实验环节	主要任务及实现方式	应达到效果
预习	学生通过在实验中心网站上下载的实验指导书和视频进行自学	<ul style="list-style-type: none">◇ 了解特高压架空导线舞动灾害和防舞的工程背景◇ 了解防舞器设计的原理及参数含义◇ 了解虚拟舞动和防舞实验的基本原理◇ 了解覆冰导线气动力的计算流体力学方法◇ 掌握导线-塔架耦联舞动的有限元建模方法
虚拟实验	依托虚拟实验平台，开展线上自主虚拟设计和虚拟实验	<ul style="list-style-type: none">◇ 自主选取导线分裂数、导线的覆冰形状及尺寸、风速和攻角、相内间隔棒间距等参数，结合塔架结构和导线材料参数及截面参数，建立塔-线耦联舞动虚拟实验模型◇ 观察导线舞动虚拟实验结果，了解舞动的非线性特征，测量舞动幅值、频率和舞动波形◇ 分析导线塔架构件的应力时程曲线，校核构件强度和稳定性◇ 自主进行防舞器参数设计，进行防舞虚拟实验◇ 分析总结舞动、防舞效果的影响因素和规律

六、实验方法与步骤要求

(1) 实验方法描述：

本实验基于华中科技大学极端力学示范性虚拟仿真教学实验中心所属的

虚拟仿真实验平台进行实验。

打开浏览器后，在地址栏中输入华中科技大学极端力学示范性虚拟仿真实验教学中心网址，进入虚拟实验平台主页。点击主页右上方登录按钮，输入账号和密码登录系统。

登录系统后，点击主页上方“特高压架空输电线舞动动力学行为及防治虚拟仿真实验”教学项目图片，进入虚拟实验界面，开始实验。

本实验项目包括塔架和输电导线几何参数、物理参数设定、相内间隔棒设置、有限元建模和舞动认知，导线初始下垂形状计算，覆冰导线气动力计算，覆冰导线舞动计算，防舞器参数设计，防舞效果计算分析，塔架、导线强度和稳定性分析 7 个环节，16 个步骤，需要 4 个课时。

认知环节对塔-线耦合系统整体结构的力学建模与舞动、防舞机制进行介绍。参数设定环节需要学生设定塔架、导线、覆冰、风场、档距等各类几何、物理、计算等参数。防舞器设计环节需要学生自行设计防舞器参数并计算仿真，观察分析防舞效果。分析环节需要学生改变参数并进行虚拟仿真，根据采集的舞动数据分析影响舞动的因素及规律；设计不同的防舞器，进行虚拟仿真并比较防舞效果，分析其中的规律。实验全部环节均需要学生进行人机交互式操作，亲身经历原理学习、自行设计、实验观测、数据处理和结果分析整个过程，最后以实验报告形式提交实验成果。

(2) 学生交互性操作步骤说明：

全部实验环节包含 16 个步骤，步骤详表如下：

步骤	操作内容
1	塔架建模：导入预置高压塔架3维数值分析模型，设置塔架边界条件
2	设置塔架构件材料模型和材料参数、截面参数、
3	选择导线分裂数（单根，六分裂），设置分裂半径
4	设置导线材料、截面参数、张力、覆冰厚度、覆冰形状
5	设置相内间隔棒间距
6	设置风速、初始攻角、计算时间、输出量、输出间隔等计算仿真参数
7	仿真导线自重作用下的形状
8	仿真导线在稳态风下的形状
9	仿真覆冰导线气动力系数
10	仿真导线舞动过程
11	观察导线运动过程，判断是否舞动。采集塔架、导线整体和特征点的运动位移、应力时间历程曲线，采集舞动幅值、频率、波形
12	分析塔架、导线的强度和稳定性
13	改变导线分裂数、覆冰、间隔棒间距、风速、攻角参数，进行多次舞动仿真，观察导线运动过程，判断是否舞动，采集相关数据，分析影响舞动的因素，总结规律。

七、实验结果与结论要求

(1) 记录每步实验结果

(2) 实验结果与结论要求：完成实验报告，提交实验心得体会。实验报告应包含以下内容：

- 1) 实验目的
- 2) 实验仪器设备与测量原理概述
- 3) 实验过程概述
- 4) 各测点实验结果数据
- 5) 实验结果分析

实验报告中实验结果分析部分需要学生完成以下内容并得到相应结论：

1) 对比不同参数下的导线舞动情况，分析影响舞动的主要因素，总结这些因素对舞动的影响规律。

2) 对比不同防舞器参数的防舞效果，分析防舞器参数对舞动的抑制规律。

八、考核要求

实验考核包含三部分内容：实验预习、实验数据和实验报告，分项如下表所示（满分 100 分）：

考核要求	考核内容	分数占比
实验预习	实验原理及实验步骤是否清楚	5%
	实验原理是否掌握	10%
实验数据	实验数据记录充分，能够有效反映实验操作与原理分析	15%
	实验结果数据正确、完整	15%
实验报告	实验报告内容完整	10%
	实验数据分析详细	25%
	实验结论正确	20%