

2020年度国家虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	华中科技大学
实 验 教 学 项 目 名 称	特高压输电线舞动动力学行为及灾害防治虚拟仿真实验
所 属 课 程 名 称	有限元方法
所 属 专 业 代 码	080102
实验教学项目负责人姓名	
实验教学项目负责人电话	
有 效 链 接 网 址	

教育部高等教育司 制

二〇二〇年七月

填写说明和要求

1. 以 Word 文档格式，如实填写各项。
2. 表格文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
3. 所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》填写 6 位代码。
4. 涉密内容不填写，有可能涉密和不宜大范围公开的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学建设项目团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况																																																																												
姓名		性别		出生年月																																																																								
学历	研究生	学位	博士	电话	87543238																																																																							
专业技术职务	教授	行政职务		手机																																																																								
单位	土木工程与力学学院		电子邮箱																																																																									
<p>教学研究情况：主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过5项）；作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过10项）；获得的教学表彰/奖励（不超过5项）。</p> <p>主持的教学研究课题：</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>序号</th> <th>课题名称</th> <th>来源</th> <th>年限</th> <th>经费（万元）</th> <th>依托单位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>工程力学在线开放课程群建设的创新与实践</td> <td>国家十三五高等教育科学研究重大攻关课题子课题</td> <td>2016-2017</td> <td>25</td> <td>教育部高教司</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>面向新工科多学科交叉为特征的工程力学本科教育模式研究与实践</td> <td>省教改</td> <td>2018-2019</td> <td>5</td> <td>省教育厅</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>工程力学国家精品资源共享课建设</td> <td>教育部</td> <td>2012-2013</td> <td>10</td> <td>教育部</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>工程力学教材改编</td> <td>学校</td> <td>2017</td> <td>2</td> <td>华中科技大学</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>工程力学实验模拟仿真平台的建设与实践</td> <td>学校</td> <td>2015-2016</td> <td>5</td> <td>华中科技大学</td> </tr> </tbody> </table> <p>教学研究论文：</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>序号</th> <th>论文题目</th> <th>刊物</th> <th>时间</th> <th>备注</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>突出主线，启发思维，建设工程力学在线开发课程</td> <td>第11届中国大学基础力学课程论坛大会论文集，高教社出版</td> <td>2017, 5</td> <td>基础力学课程论坛百篇优秀论文</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>创新与突破，新形势下工程力学专业建设思考</td> <td>中国力学大会2013年论文摘要集</td> <td>2013, 9</td> <td>大会报告</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>基于有限元分析的虚拟实验室系统设计</td> <td>科技展望</td> <td>2017, 6</td> <td>通讯作者</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>力学人才培养与教学改革发展思考</td> <td>西安建筑科技大学学报（社会科学版）</td> <td>2012, 12</td> <td>第一作者</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>工程力学教学团队建设思考</td> <td>全国力学课程报告论坛2009论文集，高等教育出版社</td> <td>2009, 9</td> <td>大会报告</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>MOOC课程的设计与制作——工程力学MOOC课程制作交流</td> <td>华中地区高校力学在线开放课程建设与应用研讨会</td> <td>2014, 6</td> <td>大会报告</td> </tr> </tbody> </table>						序号	课题名称	来源	年限	经费（万元）	依托单位	1	工程力学在线开放课程群建设的创新与实践	国家十三五高等教育科学研究重大攻关课题子课题	2016-2017	25	教育部高教司	2	面向新工科多学科交叉为特征的工程力学本科教育模式研究与实践	省教改	2018-2019	5	省教育厅	3	工程力学国家精品资源共享课建设	教育部	2012-2013	10	教育部	4	工程力学教材改编	学校	2017	2	华中科技大学	5	工程力学实验模拟仿真平台的建设与实践	学校	2015-2016	5	华中科技大学	序号	论文题目	刊物	时间	备注	1	突出主线，启发思维，建设工程力学在线开发课程	第11届中国大学基础力学课程论坛大会论文集，高教社出版	2017, 5	基础力学课程论坛百篇优秀论文	2	创新与突破，新形势下工程力学专业建设思考	中国力学大会2013年论文摘要集	2013, 9	大会报告	3	基于有限元分析的虚拟实验室系统设计	科技展望	2017, 6	通讯作者	4	力学人才培养与教学改革发展思考	西安建筑科技大学学报（社会科学版）	2012, 12	第一作者	5	工程力学教学团队建设思考	全国力学课程报告论坛2009论文集，高等教育出版社	2009, 9	大会报告	6	MOOC课程的设计与制作——工程力学MOOC课程制作交流	华中地区高校力学在线开放课程建设与应用研讨会	2014, 6	大会报告
序号	课题名称	来源	年限	经费（万元）	依托单位																																																																							
1	工程力学在线开放课程群建设的创新与实践	国家十三五高等教育科学研究重大攻关课题子课题	2016-2017	25	教育部高教司																																																																							
2	面向新工科多学科交叉为特征的工程力学本科教育模式研究与实践	省教改	2018-2019	5	省教育厅																																																																							
3	工程力学国家精品资源共享课建设	教育部	2012-2013	10	教育部																																																																							
4	工程力学教材改编	学校	2017	2	华中科技大学																																																																							
5	工程力学实验模拟仿真平台的建设与实践	学校	2015-2016	5	华中科技大学																																																																							
序号	论文题目	刊物	时间	备注																																																																								
1	突出主线，启发思维，建设工程力学在线开发课程	第11届中国大学基础力学课程论坛大会论文集，高教社出版	2017, 5	基础力学课程论坛百篇优秀论文																																																																								
2	创新与突破，新形势下工程力学专业建设思考	中国力学大会2013年论文摘要集	2013, 9	大会报告																																																																								
3	基于有限元分析的虚拟实验室系统设计	科技展望	2017, 6	通讯作者																																																																								
4	力学人才培养与教学改革发展思考	西安建筑科技大学学报（社会科学版）	2012, 12	第一作者																																																																								
5	工程力学教学团队建设思考	全国力学课程报告论坛2009论文集，高等教育出版社	2009, 9	大会报告																																																																								
6	MOOC课程的设计与制作——工程力学MOOC课程制作交流	华中地区高校力学在线开放课程建设与应用研讨会	2014, 6	大会报告																																																																								

教学表彰/奖励:

序号	获奖项目名称	获奖等级	奖励年度	授奖单位	排名
1	工程力学国家精品在线开放课程	国家级	2017	教育部	1
2	工程力学名师工作室负责人	湖北省	2019	湖北省教育厅	1
3	宝钢教育奖全国优秀教师奖	国家	2013	宝钢教育基金会	1
4	工程力学国家精品资源共享课程	国家	2013	教育部	1
5	工程力学湖北省优秀基层组织	湖北省	2019	湖北省教育厅	1

学术研究情况: 近五年来承担的学术研究课题(含课题名称、来源、年限、本人所起作用,不超过5项);在国内外公开发行人物上发表的学术论文(含题目、刊物名称、署名次序与时间,不超过5项);获得的学术研究表彰/奖励(含奖项名称、授予单位、署名次序、时间,不超过5项)。

学术研究课题:

序号	课题名称	来源	年限	经费(万元)	本人作用
1	考虑相变影响的双相高强度钢动态电阻点焊性能的数值分析	国家自然科学基金面上项目	2011-2013	40	项目负责
2	结构的时变可靠性分析及全寿命优化的最优控制理论方法	国家自然科学基金面上项目	2015-2019	80	排名2
3	XXXX显示系统装调测试装置	国防横向	2015-2016	408.7	项目负责
4	热镀锌钢锌液流动传热及气刀吹锌数值研究	武钢集团重大专项课题	2011-2013	180	项目负责
5	大型整体结构等离子弧电弧增材制造工艺及装备技术	民机重大专项	2018-2020	2370	参与

学术论文:

序号	论文题目	刊物	时间	署名次序
1	A comparison of two types of neural network for weld quality prediction in small scale resistance spot welding	Mechanical Systems and Signal Processing	2017(93): 634-644	通讯作者
2	Weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding by dynamic resistance and neural network	Measurement	2017(99): 120-127	通讯作者
3	Numerical simulation on deformation and stress variation in resistance spot welding of dual-phase steel	Int J Adv Manuf Technol 2629	2017(92): 2619-2629	通讯作者
4	Effects of electrode force on microstructure and mechanical behavior of the resistance spot	Materials & Design	2013(50): 72-77	通讯作者

	welded DP600 joint			
5	Quality evaluation in small-scale resistance spot welding by electrode voltage recognition	Science and Technology of Welding and Joining	2016(5): 358-365	通讯作者

学术研究表彰/奖励:

序号	获奖项目名称	获奖等级	奖励年度	授奖单位	排名
1	大型袋式除尘器结构优化设计与虚拟装配关键技术及应用	湖北省科技进步二等奖	2011	湖北省科技厅	3
2	偏场约束下器件结构的关键动力学行为与控制研	湖北省自然科学三等奖	2008	湖北省科技厅	4
3	实用车体生产线 3D-CAD 软件系统的开发研究	山东省科技进步三等奖	2004	山东省科技厅	5

1-2 实验教学项目建设团队情况

序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	刘小虎	华中科技大学	教授/博士		平台设计	
2	赵高煜	华中科技大学	讲师/博士		后台管理	
3	李振环	华中科技大学	教授/博士	院长	教学设计	
4		华中科技大学	教授/博士		实验设计	
5		华中科技大学	教授/博士		实验设计	
6		华中科技大学	教授/博士		实验设计	
7	梁政平	中国电力规划总院	高级工程师	总经理	虚拟仿真实验项目指导	
8		北京润尼尔网络科技有限公司			虚拟仿真实验教学项目维护	
9		北京润尼尔网络科技有限公司			在线实验资源管理与技术支持	

注：1. 项目建设团队成员所在单位可与负责人不在同一单位。

2. 项目建设团队须有在线教学服务人员和技术支持人员，请在备注中说明。

2. 实验教学项目描述

2-1 名称

特高压输电线舞动动力学行为及灾害防治虚拟仿真实验

2-2 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。

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。

2-3 实验原理（或对应的知识点）

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，根据材料力学核校构件强度，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。

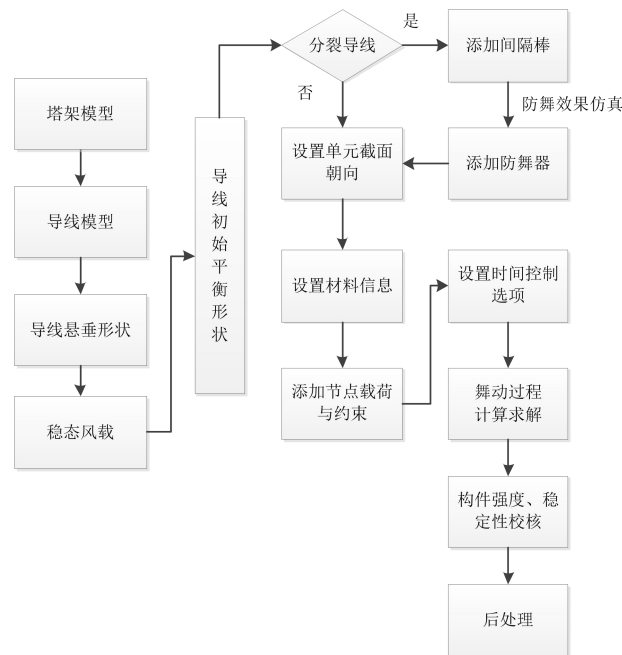


图1 实验原理示意

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

2-4 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（开发）；

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

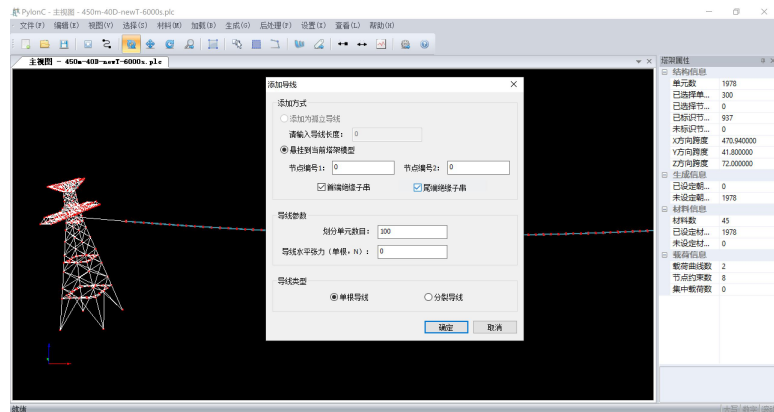


图1. 前处理模块

➤ 有限元静力计算模块

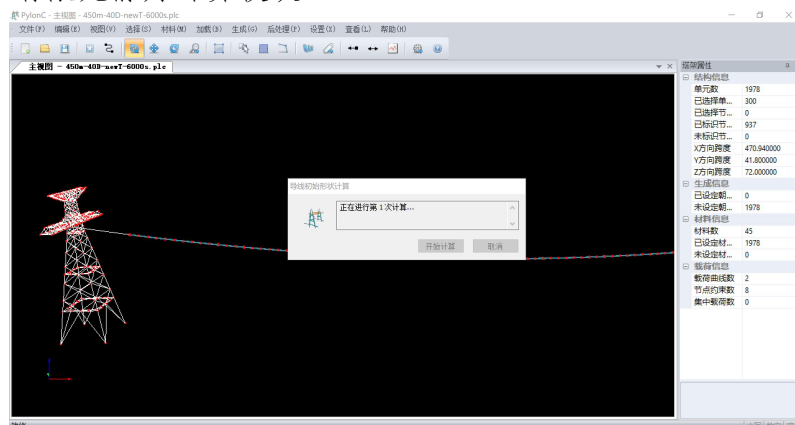


图2. 静力学计算模块

➤ 覆冰导线气动力流体力学计算模块

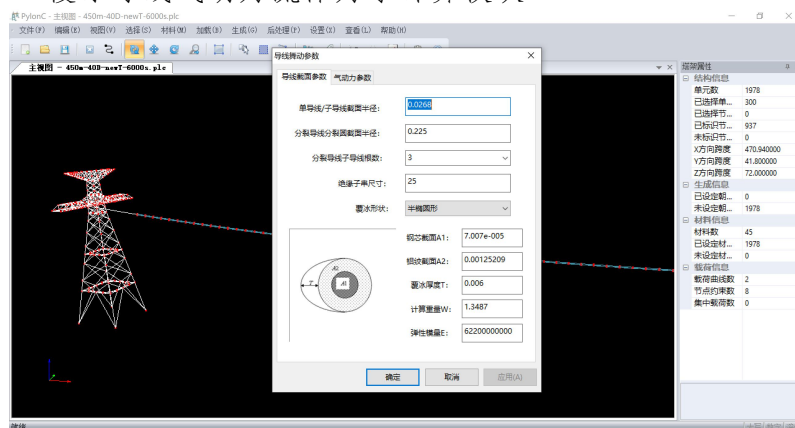


图3. 覆冰导线气动力计算模块

➤ 舞动过程动态有限元计算模块

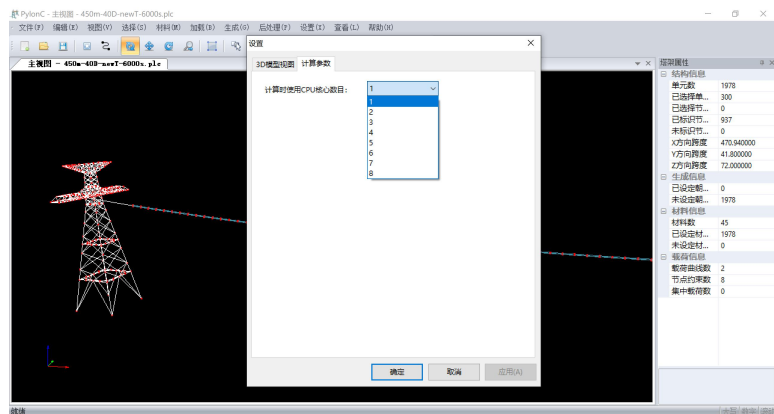


图4. 舞动计算模块

➤ 防舞器参数设计模块

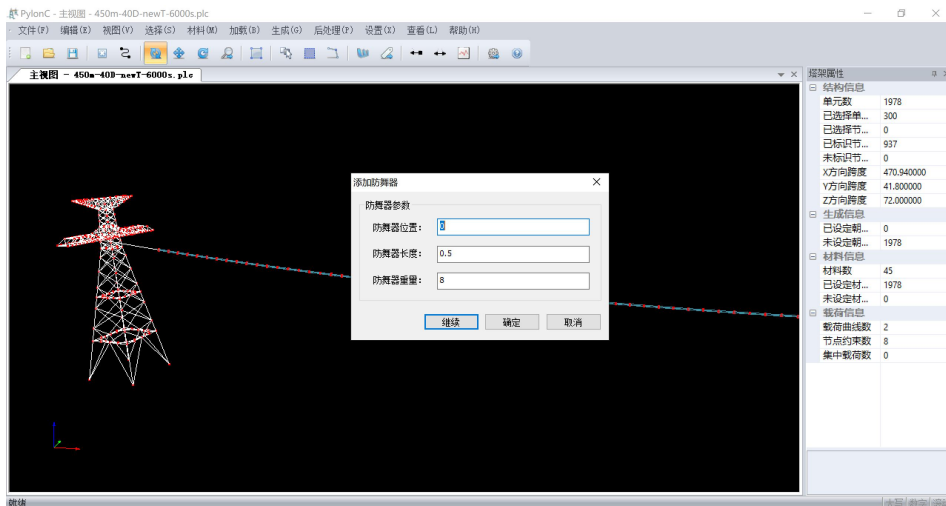


图5. 防舞器设计模块

➤ 结构强度和稳定性校核模块

➤ 后处理模块

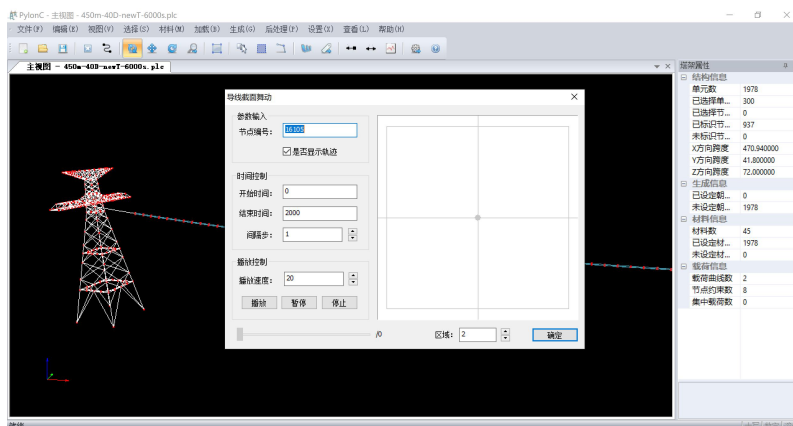


图6. 后处理模块

2-5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）

2-6 实验教学方法（举例说明采用的教学方法的使用目的、实施过程与实施效果）

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
	依托虚拟实验平台，分析虚拟实验结果	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 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

2-7 实验方法与步骤要求（学生交互性操作步骤应不少于 10 步）

（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征防治虚拟仿真实验”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

14	设计防舞器质量、刚度、阻尼参数
15	仿真带有防舞器的塔-线系统的导线运动过程，采集导线整体和特征点的位移和应力时间历程曲线，判断导线舞动是否得到抑制，分析构件的强度和稳定性
16	改变防舞器设计参数，进行多次仿真，采集相关数据，分析防舞器参数抑制舞动的效果，总结规律

下面，对各步骤操作要求和过程显示画面进行详述：

步骤 1：实验开始后，界面会自动显示一个档距的两个塔架的几何结构和导线挂点，可以以三维线条形式显示，也可以选择以构件截面三维展开形式显示，学生通过鼠标平移、旋转、放大缩小观察塔架和导线。根据提示设置塔架模型边界条件。当把鼠标放置到塔架和导线相应位置后，点会变色，显示此处可以布置测点，选择塔架和导线上 1-300 个点均可作为测点，采集仿真后的运动位移、应力时间历程曲线。

步骤 2：设置塔架构件的材料模型和材料参数，设置塔架构件的截面参数。

步骤 3：选择导线分裂数（单根，六分裂），设置分裂半径。

步骤 4：设置导线材料、截面参数、张力、覆冰厚度、覆冰形状。

步骤 5：设置相内间隔棒间距。

步骤 6：设置风速、初始攻角、计算仿真参数。

步骤 7：仿真导线自重作用下的形状。

步骤 8：仿真导线在稳态风下的形状。

步骤 9：仿真覆冰导线气动力系数。

步骤 10：仿真导线舞动过程。

步骤 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、波形数据。

步骤 12：分析塔架、导线的强度和稳定性。

步骤 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，采集数据，分析影响舞动的因素，总结规律。

步骤 14：设计防舞器质量、刚度、阻尼参数。

步骤 15：仿真带有防舞器的塔-线系统导线的运动过程，采集导线整体和特征点的位移和应力时间历程曲线，采集导线舞动幅值、频率、波形数据，判断导线舞动是否得到抑制，分析构件的强度和稳定性。

步骤 16：改变防舞器设计参数，进行多次仿真，分析防舞器参数抑制舞动的效果和规律。

2-8 实验结果与结论要求

- (1) 是否记录每步实验结果：■是 否
- (2) 实验结果与结论要求：■实验报告 心得体会 其他
- (3) 其他描述：

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。

2-9 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%

2-10 面向学生要求

- (1) 专业与年级要求：力学、土木、机械及相关专业大学三年级和大学四年级本科生。

(2) 基本知识和能力要求： 具备《理论力学》、《工程力学》、《材料力学》、《计算力学》、《结构力学》等课程基础知识和基本实验、实践技能。

2-11 实验项目应用情况

- (1) 上线时间： 2019 年
- (2) 开放时间： 2019 年
- (3) 已服务过的学生人数： 400
- (4) 是否面向社会提供服务： 是 否

3. 实验教学项目相关网络要求描述

3-1 有效链接网址

3-2 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）

1) 基于公有云服务器部署的系统，5M-10M 带宽

2) 基于局域网服务器部署的系统，10M-50M 带宽

(2) 说明能够提供的并发响应数量（需提供在线排队提示服务）

支持 100 个学生同时在线并发访问和请求，如果单个实验被占用，则提示后面进行在线等待，等待前面一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。

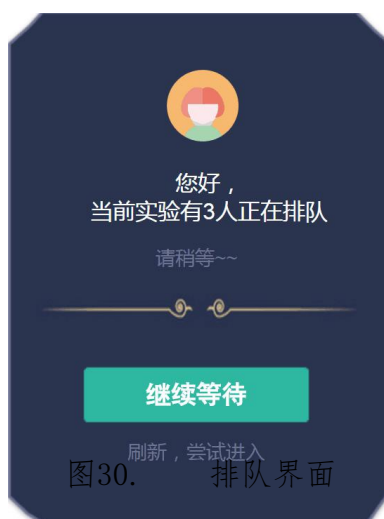


图30. 刷新, 尝试进入排队界面

3-3 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

Windows7 及以上。

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求 无。

(3) 支持移动端：是 否

3-4 用户非操作系统软件配置要求（如浏览器、特定软件等）

(1) 需要特定插件 是 否

（勾选是请填写）插件名称 UnityWebPlayer 插件容量 1MB

下载链接 <https://unity3d.com/cn/webplayer>

(2) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

IE 自带 IE8.0 及以上（推荐使用 360 浏览器极速模式）

❖ UnityWebPlayer 5.3.6 插件，提供下载

3-5 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

(1) 计算机硬件配置要求

软件配置需求（最低）	软件配置需求（推荐）
操作系统：Windows 2000 以上 浏览器：IE6.0 以上	操作系统：Win7 及以上 浏览器：IE8.0
配件配置需求（最低）	配件配置需求（推荐）
处理器：Intel 2GHz 及以上 内存：2GB 及以上 硬盘空间：40G 显卡：分辨率 1024x768 像素及以上 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：1M 以上	处理器：Intel 2.2GHz 内存：2GB 硬盘空间：80G 显卡：分辨率 1280x1024 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：2M

(2) 其他计算终端硬件配置要求 无。

3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

(1) 计算机特殊外置硬件要求 无

。

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求

无。

4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

指标	内容
<p>系统架构图及简要说明</p>	<p>本虚拟仿真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虚拟仿真实验教学管理平台进行实验，通过数据接口无缝对接，保证用户能够随时随地的通过浏览器访问该项目，并通过平台提供的面向用户的智能指导、自动批改服务功能，帮助用户实现自主的实验，加强实验项目的开放服务能力，提升开放服务效果。</p> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机虚拟仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，具有实物仿真、创新设计、智能互动指导、实验报告自动批改等功能。</p> <p>系统总体架构图如下：</p> <p>应用层</p> <p>特高压架空输电线舞动动力学行为及征防治虚拟仿真实验</p> <p>仿真层</p> <p>可视化 虚拟装置 建模 场景虚拟 仿真 图形绘制 构件建模 装配 分析器</p> <p>交互层</p> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台</p> <p>教务管理 教学管理 智能指导 报告批改 指导团队 理论学习 资源管理 互动交流 效果评估 扩展接口</p> <p>支撑层</p> <p>安 身份认真 学员管理 服 服务部署 服务处理 访问控制 服务安全 服务监控 服务通知 数据缓存 数据访问 数据转换 资源 系统管理 日志统计 信息 数据缓存 数据转换 系统管理 监控分析</p> <p>数据层</p> <p>用户信息 课程库 典型案例 规则库 测试题 实验数据 基本元件</p> <p>支撑项目运行的平台及项目运行充分考虑不同区域、不同层次、不同类型学生接入实验教学项目的运行需求，搭建开放性、扩展性、兼容性和前瞻性的虚拟仿真教学运行平台，满足线上线下实验教学、讨论交流、考核评价需要。运</p>

行平台架构系统共分为五层，每一层都为其上层提供服务，直到完成具体虚拟实验教学环境的构建。

(1) 数据层：极端力学示范性虚拟仿真实验项目涉及到多种工程实际案例的虚拟实验组件及数据，数据层分别设置虚拟实验的基础元件库、实验课程库、典型示范性实验库、实验测试题及标准答案库、规则库、实验数据、用户信息等来实现对相应数据的存放和管理。

(2) 支撑层：支撑层是虚拟仿真实验教学与开放共享平台的核心框架，是实验项目正常开放运行的基础，负责整个基础系统的运行、维护和管理。支撑平台包括以下几个功能子系统：安全管理、服务容器、数据管理、资源管理与监控、域管理、域间信息服务等。

(3) 交互层：交互层即开放式虚拟仿真实验教学管理平台，提供虚拟实验教学环境的一些通用支持组件，以使用户能够快速在虚拟实验环境完成虚拟仿真实验。交互层包括：实验教务管理、实验教学管理、理论知识学习、实验资源管理、智能指导、互动交流、实验结果自动批改、实验报告管理、教学效果评、项目开放与共等，同时提供相应拓展接口工具，以便该平台能够方便进行案例实验拓展或集成第三方的虚拟实验软件进入统一管理。

(4) 仿真层：仿真层主要针对该实验项目进行相应的装置建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、提供通用的仿真器，最后为上层提供实验结果数据的格式化输出。

(5) 应用层：基于底层的服务，最终进行虚拟仿真实验项目教学与开放共享。该框架的应用层具有良好的扩展性，实验教师可根据教学需要，利用服务层提供的各种工具和仿真层提供的相应的器材模型，设计各种典型实验实例，最后面向学校或远程开展实验教学。

实验教 学项目	开发技术 (如：3D 仿 真、VR 技术、 AR 技术、动画 技术、WebGL 技术、OpenGL 技术等)	3D 仿真技术
	开发工具(如： Unity3d、 Virtools、Cult3D 、Visual Studio 、Adobe Flash、 百度VR内容展示 SDK等) 、 Unity3d 、	Unity3d、3DMax、Maya、Visual Studio、Photoshop 等
管理 平台	开发语言 (如： JAVA、.Net、 PHP等)	JAVA
	开发工具 (如： Eclipse、 Visual	Eclipse

	Studio、NetBeans、百度VR课堂SDK等)	
	采用的数据库 (如： Mysql、SQL Server、Oracle等)	Mysql

5. 实验教学项目特色

(体现虚拟仿真实验项目建设的必要性及先进性、教学方式方法、评价体系及对传统教学的延伸与拓展等方面的特色情况介绍。)

1) 教学理念

本虚拟仿真实验建设项目接近工程具体实际，使学生在理论学习的基础上，认识工程力学理论在工程实际的应用和处理工程复杂问题的方法。项目建设以学生为中心，以启迪和培养学生创新研究型思维为核心，从教学内容、教学方法、教学资源等各环节、全过程、多方位培育学生探究性学习能力，形成工程力学虚拟仿真实验课程鲜明特色。

2) 教学内容特色

导线舞动灾害会导致相间闪络、地线和导线、金具及部件的损坏，更甚者会导致线路跳闸停电、断线倒塔等重大事故，防舞对于架空输电线路安全稳定运行至关重要，但是舞动在特定的真实自然气象条件下发生，形成条件较为苛刻，无法进行实验重现。导线舞动现象在数学物理上非常复杂，涉及静力学、动力学、结构有限元建模计算、气动力流体力学计算、大位移几何非线性等知识，力学等相关专业本科生无法通过书本抽象理论学习来认识和理解导线舞动灾害及其防治。

本项目在实验方案设计方面的特色在于“真实性”，即让学生在虚拟实验过程中尽可能的具有真实实验的体验。为了实现此目标，在实验方案设计和实现过程中，重点关注了实验环境的真实性、实验操作的真实性、实验结果的真实性。基于 Unity3D 虚拟仿真技术和精细化 3D 建模技术，搭建了一个逼真的极端自然气象条件下的实验环境，实现了实验环境的真实性；在实验过程中设计大量人机交互环节实现了实验操作的真实性；将有限元静力和动力计算核心算法嵌入至虚拟实验中，所有实验结果均是通过操作者输入的信息通过有限元计算得到，实现了实验结果的真实性。

本实验项目涵盖理论力学、材料力学、流体力学、计算力学、结构力学等力学基础知识，量大面广，适用专业广。

3) 教学方式方法

虚拟实验吸引学生随时随地通过网络远程进行自主实验，增加学生对基础理论知识学习的兴趣；系统虚实结合的实验教学，使学生更好地理解书本理论知识；将传统授课以书本和观看视频为主的教学方式转变为了身临其境人机交互式的虚拟实验教学方式。一方面，将抽象枯燥的书本内容可视化，另一方面，将学生无法接触到的极端气象条件下无法进行的实验变为每个人都可以上手一试的虚拟实验，拓展自主工程案例实验，有助于培养具有宽广眼界和专门知识的卓越工程师，培育学生创新实践能力。

随着我国特高压等大型工程的建设，工程界对高校力学专门人才培养的要求不断提高，既懂理论又精于实验和编程计算仿真，已经成为力学人才的核心素养，显然，“纸上谈兵”式的传统教学模式不能够培养出真正的力学工程师，必须将实验实践作为培养环节中最重要的部分。

但是，极端力学实验往往是高风险、高成本的代名词，在高校开展具有代表性的真正极端力学实验的可能性微乎其微。要解决学生需要学而实验又无法做的矛盾，唯有虚拟仿真实验才能够解决问题。

本实验项目将架空输电塔架-导线耦联舞动灾害及其防治作为实验对象，通过计算机虚拟仿真技术模拟极端自然气象条件下导线舞动过程，利用力学有限元分析技术、计算流体力学技术创造极端自然条件，再现了导线舞动的全过程，使得学生可以身临其境地观察感受导线舞动灾害，对舞动过程中导线和塔架的运动学、动力学数据进行测量，对舞动的动力学行为进行分析，对塔架和导线结构的强度和稳定性进行校核，自主设计防舞器并对其防舞效果进行实验，总结规律性，增强学生实践和分析能力。

本项目在实验教学方法方面的特色在于“虚实结合”。本项目的背景是在我国已经发生的多起极端气象条件下（例如2008年、2018年雪灾）输电线路由于导线舞动而断线倒塔的事故，选题来源于与中国电力规划总院、中南电力设计院、国网电科院的特高压输电线路防舞研究课题，所涉及的实验内容具有创新性和工程应用背景。在实际教学中，采用线下真实实验与线上虚拟实验结合的方式进行。学生可通过实验中心搭建的一个档距的塔架-导线实验平台开展有极端气象条件下的导线舞动虚拟实验，既可以了解导线舞动过程中的动力学现象，又可设计防舞器并实践考察其防舞功能，达到最佳学习效果。

4) 开放运行共享

随着网络和计算机技术的飞速发展，模拟和仿真实验教学是相关实验教学必不可少的组成部分，将日益广泛应用于各科实验教学中，并出现更加先进的形式，在教学中发挥更重要的作用。对教学来讲，不管是理论教学还是实验教学，都应更好地利用计算机模拟仿真技术提升教育质量，提高实验效率和改善教学环境。因此，模拟仿真实验系统具有广泛的前景和价值。

本系统适用于各工科专业学生工程力学课程的学习，受益面广。系统的成功开发并通过网络远程使用，可以辐射全国或国外学生。

5) 评价体系

建立实验报告、测试考试、小论文、问题反馈综合评价机制。

借助虚拟实验的模块化授课模式，将课前预习和课后答疑等环节纳入到虚拟实验的实施过程中，实现了一个“全教学过程”的虚拟实验。例如，在虚拟实验正式开始前设置了预习答题环节，不通过则无法进入实际实验环节。同时，学生从预习答题到实验到最终的实验报告提交，每个环节均有相关数据收集并纳入到总成绩的评价中，能够最全面的反映学生的实验效果。

6) 知识产权：项目研究团队在软件开发过程中特别注意知识产权保护（授权软件著作权 1 项，导线舞动极端力学虚拟实验室软件。同时，积极通过发表学术论文 和参加全国性教学会议等方式介绍我中心的虚拟仿真实验教学经验和效果，取得了较大的影响力。

6.实验教学项目持续建设服务计划

(本实验教学项目今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划, 包括面向高校的教学推广应用计划、持续建设与更新、持续提供教学服务计划等, 不超过 600 字。)

(1) 持续建设与更新:

本实验项目今后将从实验项目内容更新扩展和实验平台功能优化两个方面入手建设。

实验内容更新方面: 增加线路转角、塔架类型、数量、构件材料、塔间档距、导线张力的参数的调节功能, 增加导线姿态传感器、扭转传感器等测试手段, 使得虚拟实验的真实性和内容广度得到进一步提升, 最终形成涵盖各类典型输电线路的综合性虚拟实验。

实验平台功能优化方面: 在现有虚拟仿真实验管理平台的基础上, 增加最大同时在线人数及最大并发数, 丰富教师与学生互动手段, 细化人员分类管理机制, 引入大数据分析技术对虚拟实验效果进行评价, 使得本实验项目能够为更多校内外师生提供高质量服务。

(2) 面向高校的教学推广应用计划:

本虚拟仿真实验项目先在本校实验班作为公选课程做试点教学, 逐步向全校理工科学生开放运行, 积累经验, 完善项目内容和教学管理体系, 3年内向国内高校开放作试点教学。

根据学生和教师反馈, 持续改进实验教学评价机制和共享机制, 积极探索在线开发虚拟仿真实验教学可持续发展和运行的有效模式。

(3) 面向社会的推广与持续服务计划:

依托我校在极端力学研究方面的深厚积累, 与国网、南网、电力规划院、中南电力设计院等工程应用单位开展密切合作。一方面对实验项目内容和实现方式进行进一步的优化, 另一方面, 基于本项目开发适用于不同知识群体的实验子模块, 拓展教学服务广度和深度, 最终面向全社会各领域人员进行开放。

7. 诚信承诺

本人已认真填写并检查以上材料，保证内容真实有效。

实验教学项目负责人（签字）：

年 月 日

8. 申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“国家虚拟仿真实验教学项目”，学校承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放并提供教学服务不少于 5 年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

（其他需要说明的意见。）

主管校领导（签字）：

（学校公章）

年 月 日