

第二批国家级一流本科课程申报书

(虚拟仿真实验教学课程)

课程名称：航空发动机原理虚拟仿真教学实验

专业类代码：082004

负责人：徐惊雷

联系电话：13401920445

申报学校：南京航空航天大学

填表日期：2021.06.05

推荐单位：南京航空航天大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

填报说明

- 1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。
- 2.文中○为单选；□可多选。
- 3.团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。
- 4.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。
- 5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。
- 6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

1. 基本情况

实验名称	航空发动机原理虚拟仿真教学实验	是否曾被推荐	√是○否
实验所属课程 (可填多个)	《航空发动机原理》、航空发动机总体性能设计》、《航空发动机概论》以及《飞发一体化导论》		
性质	○独立实验课 √课程实验		
实验对应专业	飞行器动力工程		
实验类型	○基础练习型 ○综合设计型 √研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	<input checked="" type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input checked="" type="checkbox"/> 不可逆操作 <input type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	√中文 ○中文+外文字幕(语种) ○外文(语种)		
实验已开设期次	共4次: 1. 2018-10、382 2. 2019-05、397 3. 2019-10、396 4. 2020-10、387		
有效链接网址	http://virtualsim.nuaa.edu.cn/exp/3.html		

2. 教学服务团队情况

2-1 团队主要成员(含负责人, 总人数限5人以内)								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	徐惊雷	1970.01	南航	副院长	教授	13401920445	xujl@nuaa.edu	总体规划
2	葛宁	1961.01	南航	无	教授	13851423709	gening@nuaa.edu.cn	整体循环
3	俞凯	1988.12	南航	无	讲师	15850682531	yukk@nuaa.edu.cn	进排气特性
4	杨荣菲	1982.08	南航	无	讲师	15295500755	yrf@nuaa.edu.cn	涡轮特性

5	张鸿	1978.05	民航大	无	副教授	18222197856	Zhanghong.siae@hotmail.com	推进原理
---	----	---------	-----	---	-----	-------------	----------------------------	------

2-2 团队其他成员

序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务
1	屠宝锋	1981.03	南航	无	讲师	压气机特性
2	孙志刚	1976.06	南航	系主任	教授	部件匹配
3	雷雨冰	1969.01	南航	无	副教授	燃烧室特性
4	于兵	1979.03	南航	无	副教授	整机试车
5	张天宏	1968.10	南航	副院长	教授	整机控制
6	黄帅	1992.03	南航	无	博士生	服务支持
7	熊为建	1996.09	南航	无	博士生	服务支持
8	李凌蔚	1996.12	南航	无	博士生	服务支持
9	顾文	1992.04	南京恒点	无	UI 设计师	效果设计
10	曹平平	1993.10	南京恒点	无	工程师	服务支持
11	李乃彬	1990.01	南京恒点	无	工程师	技术开发
12	秦宏达	1992.13	南京恒点	无	3D 模型设计师	3D 模型设计
13	袁婷	1994.10	南京恒点	无	3D 模型设计师	Unity 场景设计
14	郑馨语	1992.03	南京恒点	无	工程师	服务支持

团队总人数： 19 人 其中高校人员数量： 13 人 企业人员数量： 6 人

2-3 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

（近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）

徐惊雷，“国家百千万人才”，“江苏省优秀双创导师”，江苏省“333”工程层次中青年科学技术带头人，获国家科学技术进步奖二等奖（排名一），国防科技奖一等奖（排名一）、其他省部级奖三项，指导学生获得“小平创新科技团队”，“网+”大学生创新创业大赛金奖，国际无人飞行器创新大奖赛创意大奖，日内瓦发金奖，指导学生获江苏省优博 1 名，优硕 6 人，研究生国家奖学金 16 人。

教学研究课题：

1. 南京航空航天大学“高超声速气体动力学研究生创新实验室”建设项目，19（2011）
2. 南京航空航天大学航空特色科技创新基地基金：“基于新型全向气动推力矢量喷

高机动无舵面无人机”（2015-2016）

3. 南京航空航天大学航空特色科技创新基地基金：““扶摇”基于新型气动矢量喷垂直起降验证机”（2016-2017）

教学研究论文：

1. 徐惊雷，“如何做好本科毕业设计的组织工作”，《南京航空航天大学学报》（社科版）2004.6

2. 徐惊雷，“关于从事《工程流体力学》教学的一点体会”，《南航报》，2009.6

获得的教学表彰/奖励：

1. 2018年度“江苏省优秀双创导师”（全省共30位）
2. 第15届全国大学生课外学术科技作品竞赛暨“挑战杯”全国竞赛二等奖指导教师
3. 第15届江苏省大学生课外学术科技作品竞赛暨“挑战杯”江苏省选拔赛特等奖指导教师；
4. 2017年共青团中央“全国大学生小平科技创新团队”指导教师；
5. 2018年第四届中国“互联网+”大学生创新创业大赛全国总决赛金奖团队指导教师

注：必要的技术支持人员可作为团队主要成员；“承担任务”中除填写任务分工内容外，请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

3. 实验描述

3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

1. 必要性及实用性

为了满足我国“航空发动机和燃气轮机”国家重大专项对创新型人才培养的迫切需求，践行学科基础和专业实践并重的飞行器动力工程专业实验实践教学理念，突破航空发动机原理等系列课程的常规实验所受的场地、经费、环境、安全等因素的限制，体现“分层次、交互式、重探索、多样性”的实验教学特色，开展航空发动机原理虚拟仿真教学实验的要求迫在眉睫。

因此本项目拟将开展相关虚拟仿真教学实验，将知识点分解并融入“主要原理和基本概念认知、主要部件的工作原理及性能探究、部件匹配设计、整机特性实验”等四个环节，以提高学生总体设计能力和创新实践能力。通过此项目将大大降低实验教学成本，提高教学认知水平，并可以突破场地的限制服务社会，使更多的学生、学校受益。

2. 教学设计的合理性

目前航空发动机原理等课程的相关实验由于受场地、经费、环境、安全等因素限制，很难生动展现关键部件的工作原理，特别是由于高成本、高危险性，发动机集成匹配和整机特性实验难以开展。主要面临以下教学实验问题：（1）航空发动机内部流动不可见；（2）航空发动机的性能参数不可摸；（3）航空发动机真

实实验成本高昂；(4) 航空发动机原理实验难度大；(5) 航空发动机实验污染严重。这些问题极大地限制了真实实验的开展，难以设计合理的教学方案。

而本项目采用虚拟仿真实验的方式，大大的降低使得实验开展的难度，因此就教学方案的设计上也更为开放。本项目的教学设计体现了形成从易到难、从浅入深、从概貌到细节、从部件到整体的实验实践过程。主要包括两个层次、四个环节。其中第一层次为主要原理和基本概念认知，它又包括发动机推力产生原理及主要部件构成认知、主要部件的工作原理及性能探究两个环节；第二层次是匹配设计和整体性能研究，主要包括部件匹配自主设计、整机特性实验等两个环节重点是部件匹配不合理导致的喘振现象、机理和预防或者退出的主要方法等。本教学设计循序渐进、由浅入深，并将发动机部件与整机有机结合，使得学生对发动机的了解更为深刻，充分体现了理论与实践相结合的教学方针，教学设计理念先进且合理。

3. 实验系统的先进性

作为我国航空发动机领域重要的教学科研基地之一，南京航空航天大学在发动机部件特性、整机试车匹配等实验上在全国范围内具有较多的技术积累，形成了一套完整先进的实验体系。本项目依托“国家级大学生工程实践教育中心 飞行器动力工程”进行开发，在实验方案设计、实验设备选择上直接参考现有实验体系，并结合虚拟仿真的方式进行优化改良，将先进实验技术与先进计算机图形学有机结合，提高虚拟仿真实验教学的教学质量。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

1. 了解并掌握航空发动机的推进原理；
2. 掌握航空发动机部件的工作特性；
3. 掌握航空发动机集成匹配特性；
4. 掌握航空发动机的整机工作特性；

3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：42 学时

(2) 该实验所占课时：4 学时

3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

本项目主要利用虚拟的航空发动机试车台进行航空发动机相关知识的实验，学生通过虚拟界面进行交互操作进一步理解航空发动机的关键知识点，主要设计以下四个环节：

(1) 航空发动机推进原理认知

以分解部件的形式展示发动机推力产生的过程，建立对发动机整机工作过程的全面认知和理解，并为下一步认识部件特性和整机实验奠定基础。

(2) 航空发动机部件特性剖析

通过引导和自主操作的模式完成发动机中进气道、压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管特性的剖析环节，并重点掌握进气道不起动、进气畸变对压气机特性的影响、燃烧室特性、矢量喷管调节等航空发动机使用过程中遇到的关键问题。

(3) 航空发动机集成匹配探索

通过调节尾喷管面积、涡轮导向器安装角、中间级引气阀门等几何机构，观察发动机整机特性变化情况，进行发动机集成的匹配探索，特别是因不合理调节导致的发动机部件特性不匹配而导致的喘振等不正常工况。

(4) 航空发动机整机特性实验

在虚拟试车台上进行整机特性实验，获得标准/非标准天气下，随着发动机油门杆、飞行高度、飞行速度的改变，发动机的运行参数、各部件的性能参数、各部件的状态参数，理解发动机的整机工作特性。

知识点：共6个

- (1) 进气道、压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管工作原理
- (2) 航空发动机整机工作原理
- (3) 进气道、压气机、燃烧室、涡轮及尾喷管常规性能实验
- (4) 部件非常规性能实验如压气机进气畸变、矢量喷管实验
- (5) 部件非正常工作条件下的航空发动机整机匹配实验（喘振）
- (6) 模拟真实飞行条件的航空发动机整机特性实验

(2) 核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限500字以内）

通过4个环节的学习与实验，本项目完成了从整机到部件，再到部件匹配，最后回到整机的认识过程，让学生充分掌握了航空发动机整机与部件之间的关系，对航空发动机原理的核心要素进行了100%的仿真。

- 在航空发动机推进原理认知中，本项目百分百对真实航空发动机整机模型进行虚拟仿真建模。通过航空发动机部件爆炸展示，让学生通过虚拟仿真认知到航空发动机的组成以及推进原理。
- 在航空发动机部件特性中，本项目对航空发动机部件的实物模型以及部件的特性实验数据进行100%的仿真，让学生通过虚拟仿真项目熟悉航空发动机部件的工作原理及其特性。
- 在航空发动机集成匹配探索中，本项目对航空发动机模型进行了100%的仿真。对喘振实验数据由于在真实航空发动机实验没有喘振数据，因此根据航空发动机喘振实验数据进行了90%的仿真。
- 在航空发动机整机工作实验中，本项目对实物航空发动机模型以及典型的数据进行100%的仿真。

3-5 实验教学过程与实验方法

实验教学过程：

本实验项目针对航空发动机原理以及总体涉及基础知识面广、工程实践性强的特点，教学方法重点体现“分层次、交互式、重探索、多样性”的特征。项目将各专业的知识点分解并融入“基础型学习、原理型剖析、综合型认知和探索型实验”四个层面的实验环节，以服务学生“基本原理学习、综合能力训练和创新能力的培养”的实践学习过程。

(1) 基础型学习

这一层面的环节着眼于提升学生对《航空发动机原理》、《航空发动机总体性能设计》、《航空发动机概论》以及《飞发一体化导论》课程中基础理论知识的学习以及掌握程度。学生通过交互式操作和全方位观察，以视频、动画以及VR等技术深层次的展现航空发动机各部件的工作基本原理、推力的分布以性能参数的变化，可以使得学生有效建立对发动机推进原理以及各部件作用系统的全面认知和理解，并为下一层次的部件原理型剖析奠定基础。

(2) 原理型剖析

在这一层面，通过讲授、引导和自主模式，让学生对航空发动机内典型部件进行相关实验，如进气道、压气机、燃烧室、涡轮以及尾喷管等航空发动机典型部件，理解并掌握相关部件的特性变化。进一步的，学生通过交互界面，对航空发动机部件的部件工作点进行设置以及调节参数，并进行相关部件的原理剖析，获取航空发动机部件的性能参数变化，使得学生可清楚的认识航空发动机部件的工作原理，加深学生对《航空发动机叶轮机原理》、《航空发动机燃烧室原理》课程中基础知识的理解。

(3) 综合型认知

综合型认知的教学目的是通过让学生“亲身”参与发动机的工作原理中，掌握航空发动机的专业基础知识，提升学生综合运用专业知识分析处理问题的能力。

以航空发动机综合型认知为例，学生不仅要掌握航空发动机各个部件的工作原理和工作性能参数变化，还需要掌握进气道与压气机的匹配特性、压气机与涡轮的共同工作特性以及喷管部件调节对于航空发动机工作裕度的影响等。在此基础上，学生在虚拟试车台上进行相关整机实验，获得标准/非标准天气下，随着发动机油门杆、飞行高度、飞行速度的改变，发动机的运行参数、各部件的性能参数、各部件的状态参数，理解发动机的整机工作特性以及工作性能变化。本认知模块侧重点在于学生可以通过界面交互来改变来流状态、发动机油门来获取发动机工作特性，深入了解航空发动机的工作原理。

(4) 探索性实验

探索性实验主要是指航空发动机部件以及来流调节实验，即让学生根据发动机的工作状态，完成其部件以及燃油的控制优化工作。具体涉及航空发动机尾喷管调节、共同工作特性、加速路径设置以及喘振等发动机虚拟工作仿真。系统默

认给出了巡航点的航空发动机工作特性，包括各部件的性能以及工作状态，此时航空发动机处于稳定工作状态。进行实验时，提出航空发动机的工作飞行状态点，由学生根据发动机特点和所学气动原理的相关知识进行参数调整与优化。参数优化过程中，学生需要提供航空发动机调节的具体实施方案，保证发动机在共同工作范围内进行运行，避免发动机进入喘振、失速等极限工作状态。对于可能会出现的情况需要学生及时应对处理。最终得到一组学生认为最好的控制规律及其运行结果。

本层面实验的教学目的是引导学生自主、开放性提出发动机调节规律和控制参数，并通过改变上述各种相关参数，虚拟仿真发动机运行的可视化效果，进而不断优化调节规律和控制参数，保证航空发动机顺利工作，避免进入喘振、失速等状态。通过实验，学生能够全面认识航空发动机共同工作、调节规律以及控制参数对于航空发动机工作的性能影响，通过自主设计调节规律，从而有效保证航空发动机正常工作，进一步提升学生探索与创新优化能力。

实验方法：

本项目以一台典型的涡扇发动机为基础构建航空发动机原理虚拟仿真教学实验教学平台。学生在该虚拟仿真环境中可以通过交互式操作，全方位地观察、学习航空发动机各部件的基本工作原理与特性，并能直观地观察到各部件的性能参数变化以及飞行条件对于航空发动机总体性能的影响，同时可以加深对于发动机喘振现象的理解与认识，提高对《航空发动机叶轮机原理》、《航空发动机燃烧室原理》、《航空发动机原理》等课程中基础知识的理解。项目设计了4个环节：航空发动机航空推进原理认知；航空发动机部件特性剖析；航空发动机集成匹配探索；航空发动机整机特性实验；下图是4个模块的逻辑关系图：

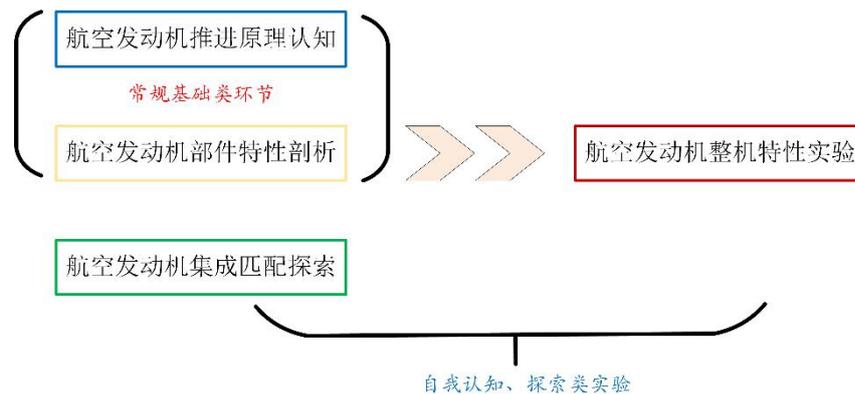


图1 实验模块逻辑关系图

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共 28 步

1) 航空发动机推进原理认知：

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	进入“航空发动机原理虚拟仿真教学实验”大厅	1m	线性步骤得分模型	10	✓操作成绩 ●实验报告 ✓预习成绩 ✓教师评价报告
2	点击“航空发动机推进原理认知”模块	1m	线性步骤得分模型	10	
3	查看发动机的内部结构	15m	线性步骤得分模型	50	
4	合并发动机	10m	线性步骤得分模型	30	

2) 航空发动机部件特性剖析：

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	点击并进入“部件特性剖析”环节	1m	线性步骤得分模型	5	✓操作成绩 ●实验报告 ●预习成绩 ✓教师评价报告
2	进入“进气道”子环节	20m	线性步骤得分模型	18	
3	进入“压气机”子环节	20m	线性步骤得分模型	18	
4	进入“燃烧室”子环节	20m	线性步骤得分模型	18	
5	进入“涡轮”子环节	20m	线性步骤得分模型	18	
6	进入“喷管”子环节	20m	线性步骤得分模型	18	

7	退出实验	1m	线性步骤得分模型	5	
---	------	----	----------	---	--

3) 航空发动机集成匹配探索:

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	进入“集成匹配探索”环节	1m	线性步骤得分模型	10	✓操作成绩 ✓实验报告 ●预习成绩 ✓教师评价报告
2	阅读实验说明	10m	线性步骤得分模型	10	
3	阅读实验安全事项	5m	线性步骤得分模型	15	
4	启动并调节发动机	15m	线性步骤得分模型	15	
5	触发发动机喘振现象	15m	线性步骤得分模型	20	
6	消除发动机喘振	10m	线性步骤得分模型	20	
7	查看实验报告	5m	线性步骤得分模型	10	

4) 航空发动机整体特性实验

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	进入“航空发动机整体特性实验”环节	1m	线性步骤得分模型	5	✓操作成绩 ✓实验报告 ●预习成绩 ✓教师评价报告
2	阅读设备简介	10m	线性步骤得分模型	5	
3	观察模拟实验台	5m	线性步骤得分模型	5	
4	阅读安全注意事项	5m	线性步骤得分模型	10	
5	记录实验数据	10m	线性步骤得分模型	15	

	据		模型	
6	切换发动机至正常状态	5m	线性步骤得分模型	15
7	调节油门杆	5m	线性步骤得分模型	10
8	调试飞行高度与飞行马赫数	5m	线性步骤得分模型	10
9	处理实验数据	10m	线性步骤得分模型	15
10	查看实验报告	5m	线性步骤得分模型	10

(2) 交互性步骤详细说明

1) 航空发动机推进原理认知

步骤序号	步骤目标要求	步骤详细说明
1	进入“航空发动机原理虚拟仿真教学实验”大厅	在浏览器中输入虚拟仿真实验教学项目网址，进入“航空发动机原理虚拟仿真教学实验”大厅，可以通过左侧的知识角等了解航空发动机相关的基础知识；通过菜单栏，可以基本了解本虚拟仿真项目的基本模块及环节；通过点击注意事项，可以得知本实验的安全须知。
2	点击“航空发动机推进原理认知”模块	点击“航空发动机推进原理认知”模块，进入航空发动机推进原理认知，通过本模块学习可以让学生有效认识航空发动机原理。
3	查看发动机的内部结构	通过交互式按钮，学生可以完整的查看航发动机的内部结构。进一步可获取航空发动机爆震图，点击对应部件就可获得航空发动机的具体组成，加深对航空发动机部件的认识。
4	合并发动机	点击合并标签将发动机合并，来回切换，充分认识航空发动机的组成结构。最后可点击退出按钮，完成本模块内容。

2) 航空发动机部件特性剖析：

步骤序号	步骤目标要求	步骤详细说明
------	--------	--------

1	点击并进入“部件特性剖析”环节	点击并进入“部件特性剖析”环节其教学目的在于让学生对航空发动机核心部件（进气道、压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管）的特性有直观的认知，加深对各个部件功能的理解。
2	进入“进气道”子环节	进入“进气道”子环节，通过进气道风洞实验简介给学生对于进气道实验的基础认知；点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项；学生依次将进气道模型、压力探针、总压耙、压力扫描阀、纹影仪安装至风洞中，并依次打开背压阀和总压阀，通过交互式操作加深学生对于实验室规范操作流程的认知。点击相关实验仪器，会出现实验仪器的相关知识，强化学生对于实际实验以及实验仪器的了解；通过移动进气道堵锥的位置，同时观看实验视频，使学生了解到进气道的不启动问题以及其解决方法；通过点击记录实验数据页面，学生可以了解到实验环节中需要注意的实验数据，并根据绘制出的曲线图，直观认知到增压比对于进气道特性的影响；点击实验报告，告知学生实验各步骤得分情况，帮助学生反思实验中出现的问
3	进入“压气机”子环节	进入“压气机”子环节，通过压气机特性实验简介给学生一个对于压气机特性的基础认知；点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项，使学生意识到实验安全是第一位； 学生依次将静压探针、总压耙、压力扫描阀安装至压气机模型上，并打开阀门，接通机电电源，通过交互式操作加深学生对于压气机特性实验操作流程的认知。点击相关实验仪器，会出现实验仪器的相关知识，强化学生对于实际实验以及实验仪器的了解；学生通过鼠标点击方式获取压气机工作点以及速度三角形，并在压气机特性曲线上分析稳定裕度，加深学生对于压气机特性曲线的理解；点击实验报告，告知学生实验各步骤得分情况，帮助学生反思实验中出现的问
4	进入“燃烧室”子环节	进入“燃烧室”子环节，通过燃烧室实验简介给学生一个对于燃烧室的基础认知；点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项，使学生意识到实验安全是第一位；学生首先安装燃烧室模型和压力探针，并依次打开蒸发管空气流量阀门以及燃油流量阀门，点击点火按钮，通过交互式操作加深学生对于燃烧室实验操作

		<p>流程的认知。通过观察实验监控台界面中出口温度曲线随阀门开度的变化以及燃烧室实验的相关视频，加深学生对于燃烧室出口温度影响因素的认知；学生可以在实验数据界面观察实验中仪器采集的数据，并在结果分析界面中了解本次实验的相关结论，加强对于燃烧室实验的分析能力；点击实验报告，告知学生实验各步骤得分情况，帮助学生反思实验中出现的问題。</p>
5	进入“涡轮”子环节	<p>进入“涡轮”子环节，通过涡轮平面叶栅风洞实验简介给学生一个对于涡轮的基础认知；点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项，使学生意识到实验安全是第一位；学生将实验模型安装至风洞中，随后将相机、激光器放置在指定位置，并打开背压阀，通过交互式操作加深学生对于涡轮平面叶栅风洞实验操作流程的认知。点击相关实验仪器，会出现实验仪器的相关知识，强化学生对于实际实验以及实验仪器的了解；学生通过调节背压阀来调节涡轮工作状态，并可以在实验数据处理界面中观察不同位置出涡轮叶栅的速度分布以及其和 CFD 计算结果的对比图，直观地了解涡轮叶栅的速度分布情况以及背压对于涡轮工况的影响，强化对于涡轮特性的认知；点击实验报告，告知学生实验各步骤得分情况，帮助学生反思实验中出现的问題。</p>
6	进入“喷管”子环节	<p>进入“喷管”子环节，通过喷管风洞实验简介给学生一个对于喷管的基础认知；点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项，使学生意识到实验安全是第一位；学生首先将喷管安装在实验台上，接着安装静压探针、总压耙、纹影仪以及压力扫描阀，并依次打开背压阀和总压阀，通过交互式操作加深学生对于喷管风洞实验操作流程认知。点击相关实验仪器，会出现相关知识，强化学生对于实验以及实验仪器的了解；通过调节总压阀，学生可以在实验数据界面观察到喷管落压比的变化以及喷管内部沿程的压力分布情况，并可以与数值模拟结果对比，同时可以看到真实实验的纹影视频，全方位地加深学生对于喷管实验流程以及喷管特性的认知；点击实验报告，告知学生实验各步骤得分，帮助学生反思实验中出现的问題。</p>
7	退出实验	<p>最后点击退出实验按钮，完成本环节内容。</p>

3) 航空发动机集成匹配探索:

步骤序号	步骤目标要求	步骤详细说明
1	进入“集成匹配探索”环节	点击“集成匹配探索”环节，进入环节界面，本环节的内容旨在加深学生对于航空发动机中重要的喘振现象的认知。
2	阅读实验说明	首先学生阅读集成匹配的简介，了解喘振现象发生的原因以及发动机喘振造成的严重后果，强调喘振现象研究的重要性；在实验仪器简介中可以使学生了解实验台的相关信息；在测试参数界面中通过图片与文字说明的形式向学生说明了实验中的各个测点以及它们在发动机中的位置，给学生一个实验的总体认知；控制参数界面中想学生展示了实验台上各个部件的具体功能；而数据采集系统界面详细地向学生介绍了原始实验数据的采集方式。
3	阅读实验安全事项	点击开始实验，首先向学生展示实验室的安全注意事项，使学生意识到实验安全是第一位。
4	启动并调节发动机	学生点击发动机试验台的点火按钮，启动发动机，并推动油门杆与喷管面积调节杆，使发动机正常工作，在实验数据界面中学生可以观察到发动机共同工作点在共同工作线上的移动以及压力随时间的曲线，同时可以看到发动机正常运行的视频，直观地向学生展示了发动机的启动与正常运行过程。
5	触发发动机喘振现象	学生通过推动喷管面积调节杆减小喷管面积，在实验数据界面中学生可以观察到发动机共同工作点向左上方向移动并超出了喘振边界，同时压力曲线出现巨大波动，并在视频中观察到发动机出现起火，并发出异常声音的现象。这个步骤不仅在数据波动上，同时也在视觉听觉上给学生的强烈冲击体验，给学生在发动机喘振现象中留下深刻的印象。
6	消除发动机喘振	学生接着推动油门杆以及喷管面积调节杆，减小进油量以及增加喷管面积，在实验数据界面中学生可观察到发动机共同工作点逐渐下移并回到原先的共同工作线上，但流量压比均比发生喘振之前降低，压力曲线中压力逐渐增大并趋于平稳，视频中发动机喘振现象消失，回归正常工作。这个步骤可以让学生认知到发动机退出喘振的过程和方法，加深对于发动机共同工作以及调节的理

		解。
7	查看实验报告	点击实验报告，告知学生实验各步骤得分情况，帮助学生反思实验中出现的的问题。最后点击退出实验按钮，完成本环节内容。

4) 航空发动机整体特性实验：

步骤序号	步骤目标要求	步骤详细说明
1	进入“航空发动机整体特性实验”环节	在“航空发动机原理虚拟仿真教学实验”大厅中，选择进入“航空发动机整体特性实验”教学模块。本环节需要顺利完成航空发动机集成匹配探索模块后才能继续推进。本环节主要是为了让学生从整体方向上掌握
2	阅读设备简介	点击“设备简介”，学生可以知道本环节内所采用的相关设备，其中主要有：虚拟大涵道比齿轮传动全电发动机，虚拟试车台架，虚拟数据采集仪器，虚拟试车操作台灯，通过阅读这些设备简介，让学生可以迅速进入本环节。
3	观察模拟实验台	学生可以在虚拟实验环节中观察虚拟实验台，了解整个实验环境，为实际实验提供相关参考。
4	阅读安全注意事项	点击“开始实验”，学生可以看到安全注意事项，让学生了解本环节的主要目的，主要内容等相关内容。
5	记录实验数据	点击“记录实验数据”，学生可以对发动机点火，学生在发动机工作初始状态时观察发动机参数变化。
6	切换发动机至正常状态	学生将发动机状态切入到正常状态，发动机进入正常状态，通过这几个步骤，学生可以了解到发动机的正常启动状态。
7	调节油门杆	学生调动左侧油门杆，可以看出航空发动机性能参数的变化，这一步可以让学生了解到发动机推力增加的途径。
8	调试飞行高度与飞行马赫数	学生进一步可以完成飞行高度和飞行马赫数对航空发动机性能的影响规律，此外也可以通过点击发动机运行界面，看到此时的发动机运行状态。
9	处理实验数据	点击实验数据处理按钮，可以让学生进行实验报告的处理，完成整个实验。
10	查看实验报告	退出本实验模块，返回“航空发动机原理虚拟仿真教学实验”大厅

3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

（1）航空发动机推进原理认知

通过浏览发动机部件，充分认识航空发动机的组成结构

（2）航空发动机部件特性剖析

1) 调节背压阀，进气道出现启动/不启动现象

2) 调节压气机共同工作点，压气机出现正常工作/失稳现象

3) 调节燃烧室阀门开度，出口温度曲线会随阀门开度变化

4) 调节背压阀，涡轮出现不同速度分布形式，体现涡轮工作特性

5) 调节总压阀，喷管出现临界/亚临界/超临界等工作状况

（3）航空发动机集成匹配探索

1) 喷管出口面积调节国小，发动机出现喘振现象

2) 调节油门杆以及喷管出口面积，发动机退出喘振并正常工作

（4）航空发动机整体特性实验

1) 调大油门杆，发动机推力增加

2) 调节飞行高度以及马赫数，发动机推力受到影响

3-8 面向学生要求

（1）专业与年级要求

本实验教学项目的授课对象是飞行器动力工程专业的本科生（三年级及以上）及航空宇航推进理论与工程学科的研究生。相关的实验模块可拓展至航空航天大类专业方向概论课程的辅助学习。工科飞行器设计类学生可以对航空发动机推进原理以及整机性能实验模块进行实验。

（3）基本知识和能力要求

进行本项目实验学习的学生，先修课程应包括高等数学、大学物理、理论力学、流体力学、航空叶轮机原理、航空发动机燃烧室原理、航空发动机总体性能设计、航空发动机概论、飞发一体化导论和航空发动机原理等。学生应熟练掌握先修课程中的基本物理概念，具备综合运用所学专业基础知识进行复杂问题分析的能力。

3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2019年5月1日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校1562人，外校0人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：

纳入教学计划的专业数：1，具体专业：飞行器动力工程，

教学周期：4，学习人数：1562

(4) 是否面向社会提供服务：是 否

(5) 社会开放时间：2019年5月1日

(6) 已服务过的社会学习者人数：0人

4. 实验教学特色

（该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限800字以内）

实验方案设计思路：

本项目紧紧围绕“以满足国家重大需求为牵引，学科基础实践和专业实践并重”的飞行器动力工程专业实验实践教学理念，以提高学生总体设计能力和创新实践能力为核心，基于真实的涡轮喷气发动机原理的虚拟教学实验方案。实验环节覆盖航空发动机原理相关课程的重要知识点，且形成一个综合、系统化的实验体系，能够有效激发学生的学习和实践兴趣，并且有利于学生创新和探索能力的培养。实验方案的设计具有如下鲜明的特色：

- 科教融合：科研与教学相互促进发展，用多年的航空发动机科研成果带动并发展航空发动机的教学，以科研成果反哺教学，培养素质高、能力强的发动机专业人才，最终再回馈航空发动机的进一步发展；

- 虚实结合：在虚拟实验中所用到的实验场景、分析手段和实验数据、极端实验状况下的复杂现象等，均源于实际的实验教学和科研素材；

- 系统性强：部件与整机实验环节实现有机融合，形成综合实验体系；

- 富于探索：部件匹配特性试验环节可提供多样性的探究式实验平台。

教学方法创新：

本项目设计的航空发动机原理的四个场景、六个环节模块和诸多实验步骤，遵循了学生知识能力训练由浅入深、循序渐进的基本方针。项目所设计的“基础型、综合型和探索型”三个层面的实验环节，充分体现了教学方法中“分层次、交互式、重探索、多样性”的特征。虚拟仿真技术构建的实验场景克服了传统课堂教学“重理论讲授、轻实验操作”的不足，让学生在“沉浸式”感受中加深了对航空发动机推进原理、部件特性、匹配工作以及整机性能的基础理论知识的理解，而且可以有效支持学生开展航空发动机原理的探索研究，为学生创新能力的培养提供了很好的平台。

评价体系创新：

实验项目所依托的实验教学平台可自动收集学生实验前的测试结果、实验中的操作统计数据 and 实验报告等，实验各模块间可能通过数据库关联，通过知识交叉的方式考核学生；通过调查问卷收集学生对实验系统、实验设计、学习效果等方面的评价与反馈信息，进行统计分析，以便于教师进一步改善虚拟实验平台的功能，提高虚拟仿真实验的教学质量。

对传统教学的延伸与拓展：

本项目提出的航空发动机原理虚拟仿真教学实验系统是基于真实的涡轮喷气发动机构建的。虚拟实验与传统的实物教具相结合，可以有效地拓展、提升航空发动机实物教学实验系统的功能、效果和受益面。与南京航空航天大学已经完成的国家虚拟仿真实验教学项目“航空发动机装配与试车虚拟仿真实验”可以形成航空发动机虚拟仿真实验项目群，将有机融合形成完整的飞行器动力工程实践及虚拟仿真教学平台，在众多开设飞行器动力工程专业的高校中具有较强的引领示范作用。

5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：教学指导书 教学视频 电子教材 课程教案

(申报系统上传) 课件 (演示文稿) 其他

(2) 实验指导资源：实验指导书 操作视频 知识点课件库 习题库

(申报系统上传) 测试卷 考试系统 其他

(3) 在线教学支持方式：热线电话 实验系统即时通讯工具 论坛

支持与微信群 其他

(4) 2名提供在线教学服务的团队成员；1名提供在线技术支持的技术人员；教

学团队保证工作日期间提供 7 小时/日的在线服务

6. 实验教学相关网络及安全要求描述

6-1 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）

20M 下行对等带宽。

经测试客户机带宽在 20M 以上时能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机，模拟学生在校内校外不同的使用环境，最大限度的还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一：物理连接链路测试，测试目的：测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况，测试方法：客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进 PING 操作。

测试二：网络质量测试，测试目的：测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况，测试方法：通过 IP 代理，测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果：

1、当客户机带宽小于 20M 时，丢包情况严重、网络延时都很高，部分环境延时可以达到 20ms 以上，丢包率超过 5%；

2、当客户机带宽小于 20M 的时候，在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中，网页打开速度较慢，特别是课件加载卡顿现象也畅游发生，访问效果不理想。(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

基于以上测试结果，我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试，当用户数量达到在 300 以下时，各项服务均能在 0.2s 内做出响应，服务器负载处于较低水平，课件加载也很快。当用户数达到 2000 服务响应时间维持在 0.8s 以内，但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时服务响应时间超过 1s，服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果我们认为本虚拟仿真项目服务器的最佳响应并发数为 300

6-2 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

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10、Deepin15.7(国产 Linux 系统)

(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

6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

(1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他

(2) 需要特定插件 是 否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量：M

下载链接：

(3) 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）

无其它要求。不提供软件下载服务。

6-4 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

Web 端 用户硬件要求

处理器：Intel (R) Core (TM) i5

主频：2.4GHz

内存：8GB

显卡：NVIDIA GeForce GTX GT740 2G

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无特殊要求，满足能上网功能即可

6-5 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 ○有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

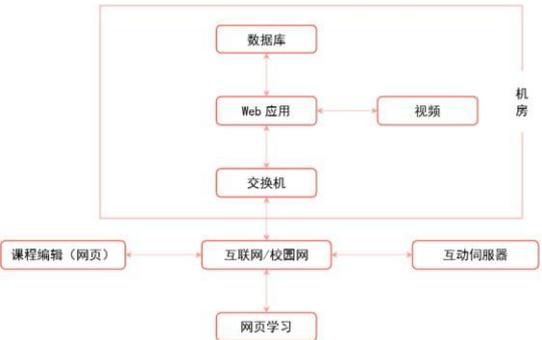
6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

(1) 证书编号：

32010743001-21001

(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明

7. 实验教学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>恒点 Mool 系统是基于 B/S 和 C/S 架构的虚拟教学平台。系统服务器部分代码采用 PHP 语言编写，由用个人中心、课程编辑，网页学习、管理后台、API 等模块构成。系统采用 MySQL 数据库，并采用缓存技术来提升访问速度。客户端支持 pc 端和移动端，对应的有 vr 版本和非 vr 版本，通过互动伺服器实现和平台的数据交互，以及实现不同终端之间的互动教学。</p>  <pre> graph TD subgraph ServerRoom [机房] DB[数据库] WA[Web 应用] SW[交换机] WA <--> V[视频] DB <--> WA WA <--> SW end CE[课程编辑(网页)] <--> IN[互联网/校园网] IN <--> IS[互动伺服器] IN <--> SW IN <--> WL[网页学习] </pre>

实验 教学	开发技术	<input checked="" type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input type="checkbox"/> 二维动画 <input checked="" type="checkbox"/> HTML5 <input checked="" type="checkbox"/> 其他：WebGL、C#语言、网络通信(Socket, Rpc, Http)、人工智能算法
	开发工具	<input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input type="checkbox"/> SketchUp <input type="checkbox"/> Adobe Flash <input type="checkbox"/> Unreal Development Kit <input type="checkbox"/> Animate CC <input type="checkbox"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>Photoshop、SteamVr SDK、大朋 vr 一体机 SDK (DpnUnity</u>
	运行环境	服务器 CPU16 核、内存 32GB、磁盘 1000GB、显存 16GB、GPU 型号 NVIDIA GRID K1 操作系统 <input type="checkbox"/> Windows Server <input checked="" type="checkbox"/> Linux <input type="checkbox"/> 其他 具体版本： 数据库 <input checked="" type="checkbox"/> Mysql <input type="checkbox"/> SQL Server <input type="checkbox"/> Oracle <input type="checkbox"/> 其他 备注说明 （需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请说明） 是否支持云渲染： <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
	实验品质（如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等）	单场景模型总面数： 40 万三角面； 贴图分辨率： 512*512； 每帧渲染次数： 30fps； 动作反馈时间： 1/90s； 显示刷新率： 60HZ； 分辨率： 4K

8. 实验教学课程持续建设服务计划

(本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

(1) 课程持续建设

日期	描述
第一年	进一步深化虚拟仿真平台内容
第二年	进一步开放虚拟仿真探索性研究
第三年	根据学生反馈, 调整考核内容
第四年	进一步优化考核指标
第五年	形成完备的虚拟仿真实验平台

其他描述:

南京航空航天大学在本实验教学项目的基础上将按照既定计划持续推动涡扇发动机虚拟仿真实验系统、航空发动机结构虚拟仿真实验系统的建设, 并与目前已经建成的航空发动机装配与试车虚拟仿真实验进行有机融合, 力争在今后 5 年里构建成特色鲜明的国家级飞行器动力工程实践及虚拟仿真教学平台。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	1	50	1	30
第二年	1	50	1	30
第三年	1	50	1	30
第四年	1	50	1	30
第五年	1	50	1	30

其他描述:

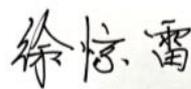
我国于 2016 年正式实施“航空发动机与燃气轮机”国家科技重大专项。这意味着“自主设计”航空发动机已被提升为国家意志。在此时代背景下, 开设航空航天类专业的高校数目众多, 覆盖面广。本项目开发团队将持续改进和补充现有的校内航空发动机虚拟仿真实验项目综合资源, 配合具有虚拟仿真实验需求的高校推广其应用, 编制实验教学指导书, 制定实验教学大纲, 以及学生实验成绩考核方法, 提升本虚拟实验项目的功能、效果和受益面。

9. 知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	航空发动机原理虚拟仿真教学实验软件

是否与课程名称一致	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作人填写栏进行填报。	
著作权人	著作权人类型
	<input checked="" type="checkbox"/> 课程所属学校 <input type="checkbox"/> 企业 <input type="checkbox"/> 课程负责人 <input type="checkbox"/> 学校团队成员 <input type="checkbox"/> 企业人员 <input type="checkbox"/> 其他
权利范围	全部权力
软件著作权登记号	2019SR0934833
如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。	
受理流水号	

10. 诚信承诺

<p>本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。</p> <p style="text-align: right;">实验教学课程负责人（签字）： </p> <p style="text-align: right;">2021年6月9日</p>
--

11. 附件材料清单

1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

政治审查意见

兹证明我校所申报的国家虚拟仿真实验教学项目《航空发动机原理虚拟仿真教学实验》内容，能够严格遵守国家、地方和部门的法律法规，政治导向正确，政治方向正确、价值取向正确。

本项目团队成员包括：徐惊雷、葛宁、俞凯凯、杨荣菲、张鸿、屠宝锋、孙志刚、雷雨冰、于兵、张天宏、黄帅、熊为健、李凌蔚、顾文、曹平平、李乃彬、秦宏达、袁婷、郑馨语，团队成员均未发现违法违纪行为。

特此证明。

中国共产党南京航空航天大学委员会

2019.8.22

2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学

科专业领域专家（不少于 3 名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

3. 校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以 1 份为宜，不得超过 2 份。无统一格式要求。）