

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：大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验

专业类代码：080102

负责人：姜金辉

联系电话：025-84896079

申报学校：南京航空航天大学

填表日期：2021.4

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	大型飞机结构振动特性虚拟仿真试验	是否曾被推荐	<input type="radio"/> 是 <input checked="" type="radio"/> 否
实验所属课程(可填多个)	结构动力学基础, 结构模态试验技术		
性质	<input type="radio"/> 独立实验课 <input checked="" type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	工程力学、飞行器设计与工程		
实验类型	<input type="radio"/> 基础练习型 <input checked="" type="radio"/> 综合设计型 <input type="radio"/> 研究探索型 <input type="radio"/> 其他		
虚拟仿真必要性	<input type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	<input checked="" type="checkbox"/> 中文 <input type="checkbox"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="checkbox"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 次: 1. 时间、人数 2. 时间、人数 3. ...		
有效链接网址	(要求填写标准 URL 格式的试验入口网页, 不允许仅为文件下载链接)		

## 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	姜金辉	1981.4	南航	副所长	副教授	18151669188	Jiangjinhui@nuaa.edu.cn	总负责
2	何欢	1978.2	南航	所长	教授	13913865435	Hehuan@nuaa.edu.cn	实验教学 设计
3	陈国平	1956.7	南航		教授	13851440687	gpchen@nuaa.edu.cn	理论教学 设计
4	张方	1962.8	南航		教授	13770518057	zhangf@nuaa.edu.cn	实验探索 设计
5	王轲	1967.7	南航		副教授	18994027581	wangk@nuaa.edu.cn	实验步骤 设计
2-2 团队其他成员								
序	姓名	出生	单位	职务	职称	承担任		

号		年月				务
1	陆洋	1977.8	南京航空航天大学	副院长	教授	在线教学服务
2	张丽	1983.11	南京航空航天大学		教授	在线教学服务
3	陈怀海	1965.11	南京航空航天大学		教授	在线教学服务
4	贺旭东	1978.2	南京航空航天大学		教授	在线教学服务
5	徐庆华	1966.11	南京航空航天大学		教授	在线教学服务
6	胡挺	1983.9	南京航空航天大学		讲师	在线教学服务
7	张飞	1989.1	南京恒点信息技术有限公司		工程师	技术支持人员
8	张军	1985.4	南京恒点信息技术有限公司		工程师	技术支持人员
9	何晶华	1987.12	南京恒点信息技术有限公司		3D 模型设计师	3D 模型设计
10	赵大力	1990.1	南京恒点信息技术有限公司		3D 模型设计师	unity3D 场景设计
11	李乃彬	1992.9	南京恒点信息技术有限公司		工程师	在线服务

团队总人数：16 人 其中高校人员数量： 11 人 企业人员数量： 5 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）

#### 1, 近 5 年试验教学任务情况

本团队承担的课程中，《结构动力学基础》包括 4 课时的教学实验，分别为：单自由度系统有阻尼受迫振动（2 课时），双筒支梁固有频率与振型测量（2 课时）。《振动测试与分析》中包含 2 课时的教学实验：单自由共振试验。《结构模态参数识别技术》课程中包含 2 课时的教学实验：结构模态参数识别试验。授课对象为工程力学专业、飞行器设计与工程专业学生，每年选修学生达到 300 余人次。

#### 2, 负责人开展教学研究

- [1] 大型结构振动机理虚拟仿真实验教学，教育部产学合作协同育人项目，2019.1-2020.12，结题，主持；
- [2] 工程力学品牌专业与一流学科协同建设的研究与实践，江苏省高等教育教改研究重点课题，2018.1-2019.12，结题，参与；
- [3] 大型飞机结构动特性测试虚拟仿真试验教学，南京航空航天大学教育教学改革项目，2019.1-2020.12，结题，主持；
- [4] 力学课程线上线下混合式双语教学研究与实践，江苏省高等教育教改研究项

目, 2019.1-2021.12, 在研, 参与;

- [5] 于虚拟仪器技术的模态参数识别教学演示系统, 国外电子测量技术, 2012 年。
- [6] 虚拟仪器技术在力学试验教学中的应用与开发, 南京航空航天大学学报 2013。

### 3, 学术研究及学术著作

- [1] 国家自然科学基金面上项目, 51775270, 结构动载荷在线识别技术研究, 2018/01-2020/12, 60 万元, 在研, 主持;
- [2] 国家自然科学基金青年基金, 51305197, 梁板结构的分布动载荷识别技术, 2014/01-2016/12, 25 万元, 已结题, 主持;
- [3] 军委装备发展部重点实验室基金, 基于矩量法的直升机旋翼动载荷识别及试验研究, 2019.1-2020.12, 35 万元, 已结题, 主持;
- [4] \*\*重点实验室基金, \*\*, 34 万元, 在研, 主持;
- [5] 高等学校博士学科点专项科研基金, 分布随机动载荷的分布虚拟机里法及逆问题研究, 20123218120005, 2013/01-2015/12, 主持。
- [6] 航空科学基金, 2012ZA52001, 飞行器结构分布动载荷识别技术研究, 2012/10-2014/10, 10 万元, 已结题, 主持;

### 学术著作

- [1] Jinhui Jiang#, M. Shadi Mohamed, Mohammed Seaid, Hongqiu Li, Identifying the wavenumber for the inverse Helmholtz problem using an enriched finite element formulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 340 (2018): 615-629; (SCI 一区, 顶刊)
- [2] JIANG Jinhui; DING, Ming; LI, Jun. A novel time-domain dynamic load identification numerical algorithm for continuous systems. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 160: 107881. (SCI 一区, 顶刊)
- [3] Jiang J, Yang H, Chen G, et al. Numerical and experimental analysis on the vibration and radiated noise of the cylinder washing machine. Applied Acoustics[J], 2021(174). 107747.
- [4] JIANG, Jinhui, et al. Real-Time Identification of Dynamic Loads Using Inverse Solution and Kalman Filter. Applied Sciences, 2020, 10.19: 6767. (SCI 二区)
- [5] JIANG, Jinhui, et al. Real-Time Identification of Dynamic Loads Using Inverse Solution and Kalman Filter. Applied Sciences, 2020, 10.19: 6767. (SCI 三区)
- [6] Jiang J., Shadi Mohamed, M., Seaid, M. et al. Fast inverse solver for identifying the diffusion coefficient in time-dependent problems using noisy data. Arch Appl Mech 91, 1623–1639 (2021). (SCI 三区)
- [7] Jiang Jinhui, Luo, Shuyi, and Liang, Zhongzai. Online Identification of Impact Loads of Multi-degree-of-freedom System Based on Kalman Filter. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2020: 359 – 367. (SCI 四区)
- [8] JIANG Jinhui, et al. Augmented Tikhonov Regularization Method for Dynamic Load Identification. Applied Sciences, 2020, 10.18: 6348. (SCI 三区)
- [9] JIANG, Jinhui, et al. One identification method of Distributed Dynamic Load Based on Modal Coordinate Transformation for thin plate structure. International Journal of Computational Methods, 2020, 2150012. (SCI 四区)
- [10] Jinhui JIANG#, Hongqiu Li\*, Fang ZHANG, Ming HAN, The Method of Moment for Identification of Dynamic Distributed Load on Plate Structure[J], International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 52 (2016): 1115–1122; (SCI 四区)

### 4, 获得教学科研表彰/奖励

- [1] 2018 年南京航空航天大学教学优秀二等奖。
- [2] 2021 年度江苏省高校青蓝工程优秀青年骨干教师；
- [3] 中国振动工程学会科学技术奖二等奖（排名第一）；
- [4] 国防科技进步二等奖（排名第五）；
- [5] 江苏省力学学会科学技术奖（排名第二）；
- [6] 2011 年南京航空航天大学科学技术奖二等奖，排名第五；
- [7] 2013 年中航工业集团科学技术奖三等，排名第九；

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） 实验的必要性及适用性

大型飞机项目是一个国家整体工业能力的综合体现，我国已将自主研发大型飞机作为国家战略进行实施。在大型飞机研制过程中，存在许多振动问题严重影响着大型飞机研制的进程，其中蕴含的动力学问题需要攻关解决，亟需大量具有航空航天背景、动力学理论基础扎实、富有实践能力和创新能力的高层次力学人才。为此，南京航空航天大学在工程力学专业和飞行器设计与工程专业开设了《结构动力学基础》、《振动测试与分析》、《结构模态试验技术》等课程，这些课程是力学人才培养计划中最重要的专业基础课和专业课。振动实验是结构动力学基础、结构模态识别技术、大学物理实验等课程的基础实验，是高等院校飞行器设计及工程、工程力学及相关工科专业的必修的核心实验课程，同时也是新工科人才培养的重要环节。课程教授的专业知识对提升学生的结构动力学理论水平，掌握大型结构的动力学设计及验证，保证飞机结构运行安全性等具有重要的意义。

但是，大型结构振动问题作为一类复杂的物理现象，涉及的概念抽象、机理复杂，学生不易理解。受实验条件及教学课时的限制，传统的力学实验只能围绕孤立的物理概念，设计简单结构的演示性物理实验，例如共振演示实验，学生参与度低、动手能力弱，更无法开展探索性的实验，这些不足和瓶颈使得目前的课程教学实验已不能满足对卓越工程师人才的培养要求。因此，亟需利用现代信息化技术构造高真实感的虚拟实验设备以及真实飞机结构模型为教学环境，按照“能实不虚”的仿真实验理念，建立一个全方位、多层次、综合性和探索性的大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验，其必要性具体体现在：

- （1） 对于大型结构振动实验而言，存在着难度大，成本高，耗时长，设备多

等特点，具体表现在：激励大型结构振动不易，设备需求高，代价大；

- (2) 大型结构振动是极易对实验人员、实验设备造成安全隐患，安全风险大，操作危险性高；试验中器材较多，试验工序复杂繁琐；
- (3) 大型结构在实际工程中的振动现象（例如大型飞机的飞行状态的振动现象）无法在实验室复现，传统的实验教学根本无法开展大型结构振动实验内容。

基于南京航空航天大学的航空航天特色，以大型飞机结构为对象，用现代信息化技术构造高真实感的虚拟实验设备以及真实飞机模型为教学环境，建立一个全方位，多层次的大型结构振动特性仿真实验教学项目是非常有必要的。

建立大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验，其实用性体现在：

(1) **解决相关课程缺乏有效教学实践手段的难题。**通过开发虚拟仿真实验，学生在虚拟环境下开展大型飞机结构振动特性，围绕振动概念分析、振动原理探索、振动现象复现等内容，进一步深入理解动力学的基本概念和内涵，把相关知识点融会贯通，为课程提供有效的教学实践手段。

(2) **解决理论知识体系与实际工程应用脱节的难题。**通过虚拟仿真实验，可以引入接近真实的实际工程应用场景，将大型飞机结构的飞的各个实验模块具体化为工程应用场景中的具体任务，可以更好地调动学生参与实验教学的积极性和主动性，激发学生的学习兴趣 and 潜能，搭建一条联系理论知识体系与实际工程应用的桥梁。

(3) **解决实验过程高风险并且无法反复实践的难题。**通过虚拟仿真实验，可以解决大型飞机结构中振动安全风险大的难题，并且借助虚拟仿真软件系统可以反复实践。

## (2) 教学设计的合理性

《大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验》共包括力学概念认知探索、大型结构振动机理分析、大型结构振动现象三个部分的学习等三个模块，通过概念-原理-现象的设计，旨在对大型飞机结构动力学教学实验提供兼具安全性、综合性、客观性、全面性、交互性的情景模拟，使学生理解和掌握大型飞机结构的**核心动力学基础**。

本实验教学设计的合理性体现在：

(1) **明确的教学目标：**在该项目中围绕培养学生对振动基本概念、原理的理解和认知这一核心教学目标，课程设计有的放矢。

(2) **融合的教学内容**: 在一个教学实验中, 融合贯通单自由度振动分析、地面动特性、振动响应分析等课程主要教学内容, 全面提升学生对知识的掌握度。

(3) **理论与实践的统一**: 克服传统力学课程理论晦涩、概念抽象的难点, 融会贯通理论建模预测与工程实践验证, 全面提升学生学习兴趣和学习能力。

(4) **教学平台的贯通**: 融入高等学校虚拟仿真实验教学共享平台, 与兄弟院校相关的虚拟仿真实验贯通, 形成完整系统的飞行器结构力学仿真实验教学平台。

### (3) 实验系统的先进性

本实验系统的先进性体现在:

(1) **教学功能的先进性**: 建立一个全方位、多层次的大型飞机结构虚拟仿真实验, 融合结构动力学基础、结构模态参数识别技术、振动测试与分析等课程主要教学内容, 形成了“概念-原理-现象”递进式的实验设计方案, 培养学生综合应用知识的能力以及解决实际工程结构中的力学问题的能力。

(2) **教学技术的先进性**: 综合运用数字化 3D 仿真技术、虚拟仪器与设备以及人机在线交互等技术构建了虚拟而真实的大型飞机结构振动的实验平台, 促使传统物理实验与信息技术相融合, 通过虚拟仿真实验将飞机结振动现象、机理与概念融会贯通。

### 3-2 实验教学目标 (实验后应该达到的知识、能力水平)

通过开发大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验, 学生在虚拟环境下开展振动特性机理探索, 围绕大型结构的振动现象分析、振动机理探索, 进一步深入理解振动的基本概念和内涵, 把相关知识点融会贯通。通过物理概念探索实验, 让学生参与设计实验, 通过探索更加精准的理解振动的基本概念; 通过机理探索实验, 让同学们在物理概念的基础之上, 探索振动发生的机理; 通过大型结构的振动现象实测实验, 让学生基于机理和概念分析振动现象。突破传统教学中无法开展大型结构振动探索性实验局限, 并且全过程实时在线评价, 提供以学生为中心, 具有安全性、综合性、客观性、趣味性以及强交互性的振动特性虚拟仿真实验, 从而达到“以虚补实、虚实结合、融会贯通、开拓创新”的教学效果。另外, 虚拟仿真实验可以更好地调动学生参与振动实验教学的积极性和主动性, 激发学生的学习兴趣 and 潜能, 增强学生的创新能力; 同时节约了振动实验的成本, 缩短实验时间和空间, 提升实验安全性, 将大型结构在工程中可能发生的振动现象在实验室复现。本实验的具体其目的为:

(1) “立体化”的教学内容, 融合贯通物理学中共振、谐振、弹性体动态响应等知识点, 实现线上和线下教学的融合, 提升研究兴趣和创造力。

(2) 重点在于服务学生, 探索数学理论方法与物理概念之间的内在联系。融汇理论教学、虚拟试验、探索拓展, 实现虚实结合。

(3) 通过力学拓展性实验, 培养学生发散性的思维方式, 提升基于振动机理、



力学模型，分析力学现象的能力。

(4) 融入高等学校虚拟仿真实验教学共享平台，形成完整的大型结构振动虚拟仿真实验教学平台。

通过本实验将实现以下教学目标：

(1) 理解固有频率的概念，掌握固有频率与刚度、质量、阻尼等参数之间联系。

(2) 理解振动频率响应函数的概念，掌握频率响应函数的测量方式、激励方式以及影响因素，能够完成大型飞机结构的频率响应函数测量。

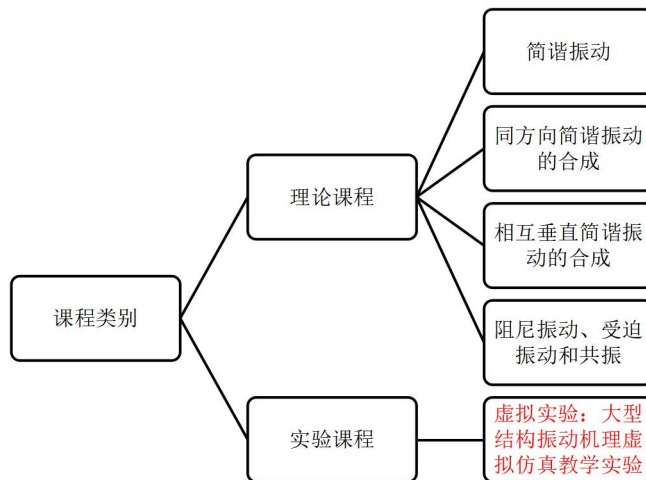
(3) 理解振动响应与频率响应函数、振动激励三者之间的关系，掌握结构共振、阻尼对振动现象的影响方式。

### 3-3 实验课时

(1) 实验所属课程所占课时：50

(2) 该实验项目所占课时：2

课程体系内容：



### 3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

#### 1. 振动的基本理论

##### (1) 振动系统及其模型

振动是机械系统围绕平衡位置的往复运动。一个振动系统包括了三个方面：输入，输出，系统模型，

**输入：**动载荷，可以是力或力矩

**输出：**就是响应，包括位移，加速度和速度，或者内力应力与应变  
其中，将描述系统模型的独立坐标数目称作系统的**自由度**。

##### (2) 振动问题的分类

第一类：已知系统模型和外载荷，求系统响应，称为响应计算或正问题。

第二类：已知输出和输入，求系统特性，例如系统的质量、刚度和阻尼，系统的频响函数、脉冲响应函数等，被称为**参数识别**，又称为**第一类逆问题**；从实测数据中识别出频率，阻尼和振型等模态参数被称为**模态参数识别**。若需要系统在物理坐标下的质量、刚度和阻尼，则称为物理参数识别。

第三类：已知系统特性和响应求载荷，称为载荷识别，又称为**第二类逆问题**。要使这一类问题取得精确的结果，必须与第一类逆问题紧密结合起来，也就是系统特性应该建立在可靠的基础上。

### 实验模块一原理：

首先引入结构固有频率等基本概念。

现以有阻尼单自由度系统的自由振动为例，介绍一些振动的基本概念及运动机理。有阻尼单自由度系统运动方程为：

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0$$

$m$ —系统质量； $c$ —系统阻尼； $k$ —系统刚度；

对上式进行变形得：

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0$$

其中： $\zeta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_c}$  称为**阻尼比**， $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  称为系统的**固有**

**圆频率**，常简称为**固有频率**，单位为  $rad/s$ ； $T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  称为系统振动的**固**

**有周期**； $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$  也称为系统的**固有频率**，单位是 Hz。在  $\omega_n$  和  $f_n$  同时出现的场合，常常称前者为固有圆频率，而称后者为固有频率。当  $c=0$ ，即考虑无阻尼状态下，上述方程的解为：

$$u(t) = a \sin(\omega_n t + \varphi)$$

上述式子所确定的振动称为**简谐振动**，其中  $a$  称为振动的**振幅**， $\varphi$  称为**初相位**。

### 实验模块二原理：

进而有基本概念引入结构振动的原理。

当有外激励作用下，以简谐激励为例，运动方程为：

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f_0 \sin \omega t$$

当  $\omega = \omega_n$  时，即外激励的频率等于系统的固有频率时，系统就会发生**共振**。

对上式两边进行傅里叶变换：

$$(k - m\omega^2 + ic\omega)U(\omega) = F(\omega)$$

令  $H(\omega) = \frac{U(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - m\omega^2 + ic\omega}$ ，称为系统的频率响应函数，等价于同频单位幅

值简谐力所引起的系统位移。

**实验模块三原理：**

**明确结构响应与频响函数之间的关系。**

对于多自由度系统运动方程有相似的形式：

$$\begin{cases} M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \\ u(0) = u_0, \quad \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \end{cases}$$

其中  $M$  为质量矩阵； $C$  为阻尼矩阵； $K$  为刚度矩阵； $u(t)$  和  $f(t)$  分别为系统的位移向量和加速度向量。

以二自由度无阻尼自由振动为例，将方程的试解写为：

$$u(t) = \varphi \sin(\omega t + \theta) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \sin(\omega t + \theta)$$

其中  $\varphi$  是表述振幅的二维向量；带入上式，可得到特征方程：

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0$$

即

$$\left( \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

要使其存在非零解，则有

$$\det \begin{bmatrix} k_{11} - m_1\omega^2 & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} - m_2\omega^2 \end{bmatrix} = 0$$

由此可解得  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ，依据从小到大分别称为系统的第一阶固有频率和第二阶固有频率，相应的振动分别称为第一阶固有振动和第二阶固有振动。将两个值回带进上式，可得到两个向量  $\varphi_1, \varphi_2$ ，其分别能够反应了在第一、第二阶固有振动下，两个自由度的振幅之比，也即能反应系统作固有振动时的形态，分别称为系统的第一阶和第二阶固有振动的振型，简称固有振型。将系统的固有频率和固有振型称为系统的固有模态。只和系统的弹性和惯性有关，反映的是系统的内在属性。

对多自由度进行傅里叶变换， $([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])\{U(\omega)\} = \{F(\omega)\}$ ，称

$[H(\omega)] = ([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1}$  为系统的频响函数矩阵，此时

$$\{U(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\}。$$

$[H(\omega)]$  的元素  $H_{ij}(\omega)$ ，反映了在系统第  $j$  个自由度上施加单位正弦激励后第  $i$  个自由度的稳态位移响应幅值。由此可见：结构振动水平与两个因素有直接关系： $F(\omega)$  和  $H(\omega)$ ，其中， $F(\omega)$  反映了激振力大小频率， $H(\omega)$  反映频域响应特性，与结构的固有频率、模态阻尼以及模态振型有关系，两者共同决定结构振动水平大小。

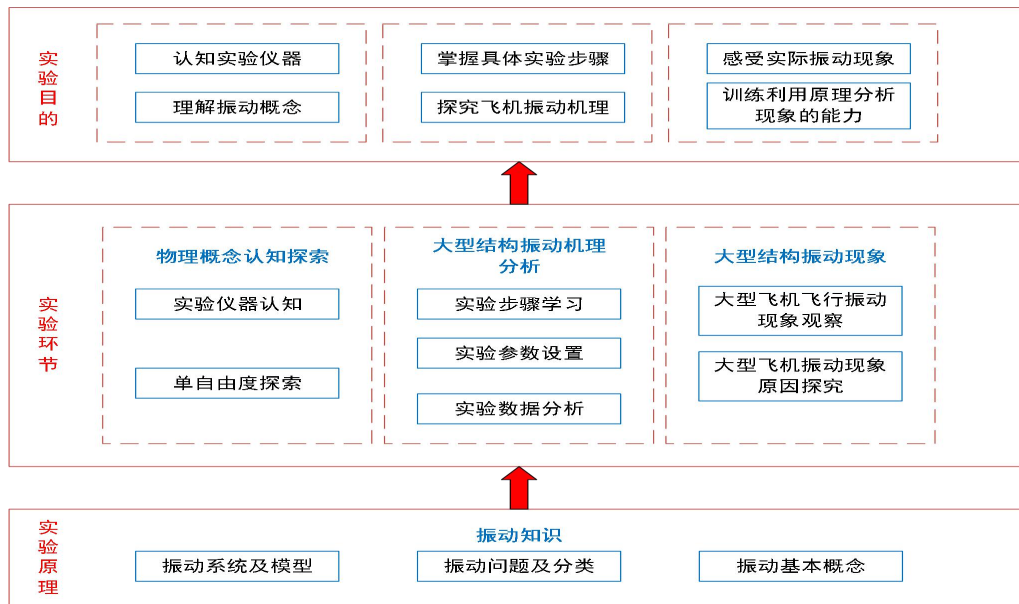


图 3.1 实验原理及架构

知识点：共 12 个

#### 1) 振动系统的构成

一个振动系统包括三个方面：输入、输出和模型（或系统特性）。输入就是动载荷，可以是力、力矩等，也可以是运动量或称为振动环境。输出就是响应，包括系统的位移、速度、加速度或内力、应力、应变等。

#### 2) 共振

振荡系统在周期性外力作用下，当外力作用频率与系统固有振荡频率相同或很接近时，振幅急剧增大的现象。

#### 3) 固有频率

结构系统在受到外界激励产生运动时，将按特定频率发生自然振动，这个特定的频率被称为结构的固有频率，通常一个结构有很多个固有频率。固有频率与外界激励没有关系，是结构的一种固有属性。不管外界有没有对结构进行激励，结构的固有频率都是存在的，只是当外界有激励时，结构是按固有频率产生振动响应的。

#### 4) 振型

振型是指弹性体或弹性系统自身固有的振动形式。可用质点在振动时的相对位置即振动曲线来描述。由于多质点体系有多个自由度，故可出现多种振型，同

时有多个自振频率，其中与最小自振频率（又称基本频率）相应的振型为基本振型，又称第一振型。

#### 5) 阻尼

阻尼是指任何振动系统在振动中，由于外界作用或系统本身固有的原因引起的振动幅度逐渐下降的特性。

#### 6) 频率响应函数

表征了测试系统对给定频率下的稳态输出与输入的关系。这个关系具体是指输出、输入幅值之比与输入频率的函数关系，和输出、输入相位差与输入频率的函数关系。这两个关系称为测试系统的频率特性。频率响应函数一般是一个复数，一般可以表示为幅频和相频两个曲线。

#### 7) 半功率带宽法

频响曲线的幅频与相频图，首先选取峰值点  $c$ ，将其峰值除以  $\sqrt{2}$ ，得到半功率带宽点  $a, b$ 。其对应的  $x$  轴数值为  $\omega_a$  与  $\omega_b$ ，该频率下的阻尼比为  $\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_b + \omega_a}$ 。

#### 8) 振动激励方式

目前，动特性测试实验中主要的响应和载荷获取设备是传感器。产生外载荷的设备一般有力锤和激振器，力锤可以产生冲击激励；激振器一般搭配功率放大器使用，可以产生正弦、随机、步进正弦等激励。数据的采集与计算则由动态分析仪完成。

#### 9) 采样定理

采样率指系统在一秒时间内的采样点数。采样定理：当采样频率大于信最高采样频率高于最高频率分析频率的 2 倍时，采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息，否则会发生频率混叠现象。

#### 10) 传感器原理

将被测物理量转换为电信号的转换器；传感器分类：测物理量：温度传感器，压力传感器，力传感器，振动传感器（位移传感器，速度传感器，加速度传感器）；加速度传感器分类：压电式，压阻式，电容式，伺服式；

传感器的指标：灵敏度：指定的输出量与指定的输入量之比；测量范围，线性度

#### 11) 悬挂频率

要求支持频率低于最低弹性模态频率的 1/3；

#### 12) 窗函数

常见的窗函数有 Hanning 窗、矩形窗、平顶窗、凯塞-贝塞尔窗、力窗和指数衰减窗；窗函数选用：矩形窗：瞬态信号、伪随机或周期随机，窗长等与周期信号整周期时；Hanning 窗：纯随机；平顶窗：周期或准周期信号；力窗和指数衰减窗：锤击法测试频响函数时的力信号和响应信号

(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)

虚拟仿真实验的客观结构和知识点关联图如下所示：

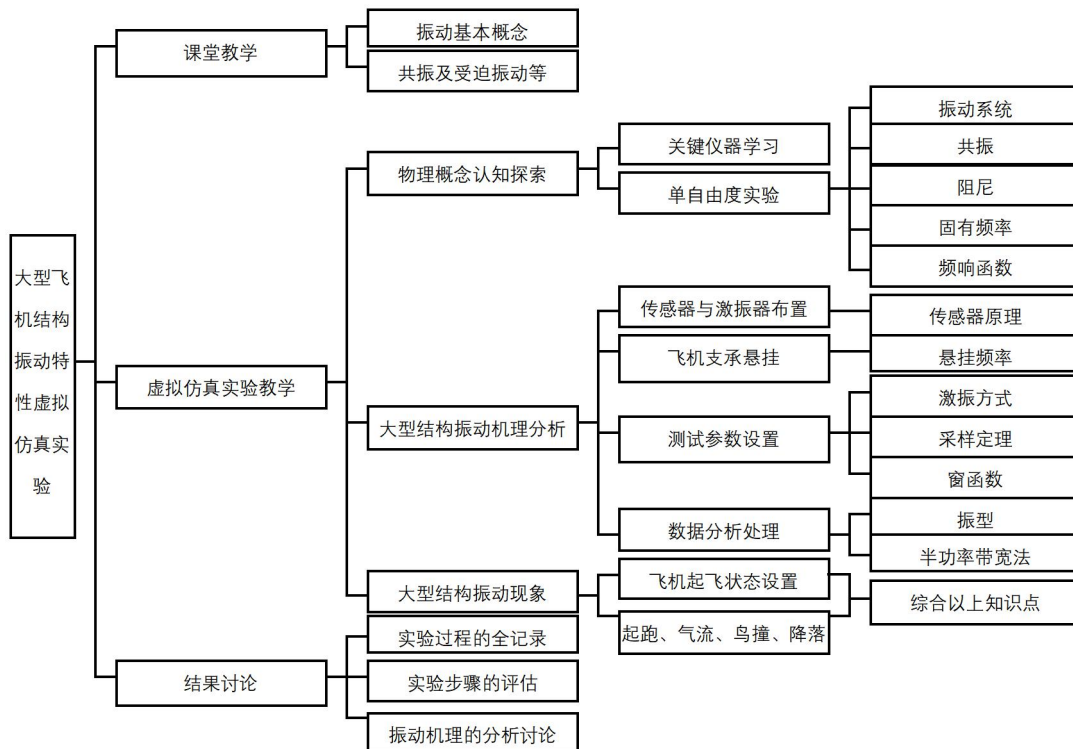


图 3.2 虚拟仿真实验客观结构和知识点关联图

项目的核心要素仿真设计体现在以下几个方面：

(1) 虚拟仿真实验过程中的主要仪器设备以实体实验室的设备为基础建模，仿真度达到 95%以上，并通过仪器设备认知环节给出实验涉及的主要设备的功能介绍。

(2) 物理概念认知探索模块实验过程中实验操作以及主要实验现象的仿真度达到 90%以上，这些实验操作主要包括：单自由共振设计；

(3) 大型结构振动机理分析中实验过程中实验操作以及主要现象的仿真度达到 90%以上，这些实验操作主要包括：飞机结构悬挂设置、采样参数设置、传感器布置、激振器布置、激励方式布置等；这些实验现象主要包括：频响函数清晰显示、时域数据的实时显示等。

(4) 大型飞机结构振动现象分析中实验过程中实验操作以及主要现象的仿真度达到 90%以上，这些实验操作主要包括：飞机起飞参数设置等；这些实验现象主要包括：频响函数清晰显示、时域数据的实时显示等。

### 3-5 实验教学过程与实验方法

#### (1) 试验教学过程

本教学实验在开放式虚拟仿真实验教学管理和网络共享平台上运行。教师可

利用该平台在网上安排学生预习、指导学生实验和批改实验报告，学生可利用该平台在网上进行力学概念认知探索、大型结构振动机理分析、大型结构振动现象三个部分的学习。教学实验采用启发式教学和创设问题教学方法，学生在探究和解决实际问题的过程中理解力学概念、掌握振动原理、分析实际现象，从而全面的学习和掌握振动知识。



图 3.3 虚拟仿真实验平台的 3 个系统

各部分的功能如下：

**概念认知探索：**该部分主要包括实验仪器认知和单自由度探索。实验仪器认知通过陈列的形式展示振动实验中常用的实验仪器，点选可以展示实验仪器的名称、作用、原理和主要参数等信息，使学生既可以快速地从整体上了解实验仪器，也可以深入地学习实验仪器的原理和参数含义；单自由度探索设置了一个振动问题，学生将参与一个单自由度系统的设计，在设计过程中逐步了解质量、刚度、阻尼、固有频率、激励等力学学概念，并进一步探索这些力学概念之间的关系。

**大型飞机结构振动机理分析：**该部分带领学生进入一个大型飞机振动机理分析实验的实验现场，让学生亲身体验真实的实验步骤。学生可自由的设计各个实验步骤的参数，探究实验中各个步骤和参数在实验过程中的作用，并通过实验数据分析飞机的振动机理。

**大型飞机结构振动现象：**该部分模拟了大型飞机实际飞行过程中可能遇到的工况，给出这些工况下飞机的振动数据，让学生结合前两个部分的知识解释飞机在不同工况下的振动原因，训练学生将振动概念和原理在实际工程中进行运用的能力。

教学实施过程如下：

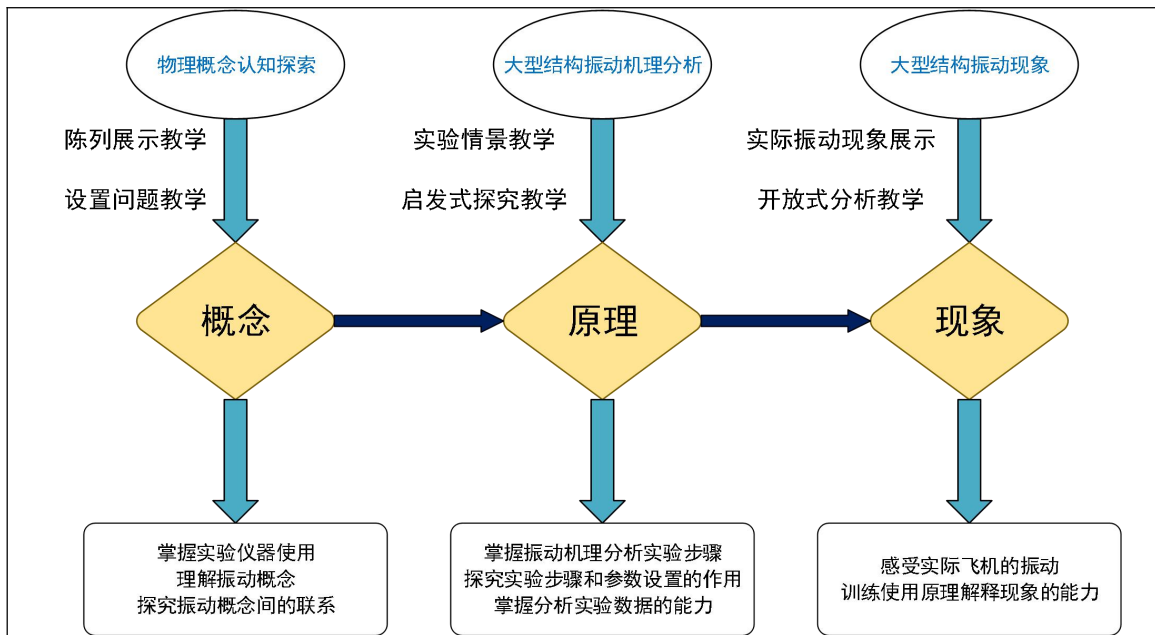


图 3.4 学习过程示意图

第一课时：基于启发式的教学理念，教师给出必要的概念和支持，由学生自主完成力学概念认知探索部分，以实验仪器认知的学习状况和单自由度探索中的问题解决程度作为考核标准，考核不合格的不可进行下一个部分的学习，老师在后台查看完成情况，保证学生的学习进度。

具体的过程如下：

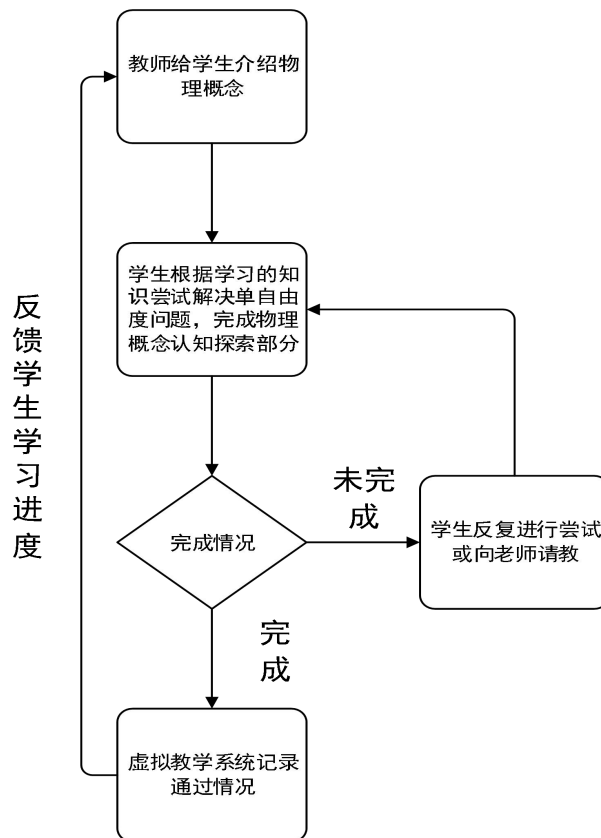


图 3.5 学生第一课时学习过程



第二课时：学生完成大型飞机结构振动机理分析和大型飞机结构振动现象两个部分，并撰写实验报告。

学生在完成力学概念认知探索部分后，大型飞机结构振动机理分析部分开放。学生根据引导完成大型飞机振动机理分析实验，根据实验数据分析飞机振动机理。系统根据实验完成情况和分析结果的误差给出成绩并反馈给学生，让学生通过反馈的信息尝试修改实验参数，探究提高实验结果精度的方法。大型飞机结构振动机理分析部分完成后，进入到大型飞机结构振动现象部分，学生通过观察大型飞机在不同的飞行工况中的振动现象，结合虚拟仿真实验教学系统提供的振动数据，将自己对飞机振动现象的原理分析填写进实验报告中，教师在后台进行批改与打分。

具体过程如下：

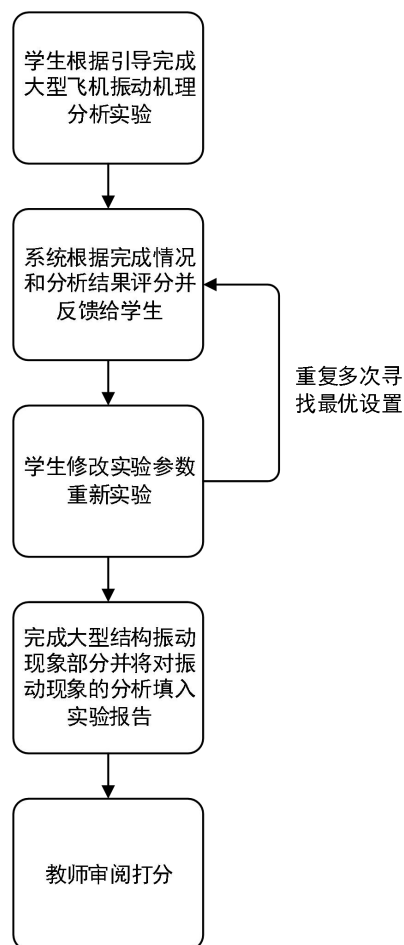


图 3.6 学生第二课时学习过程

该教学方式充分利用了“虚拟仿真实验”的成本低，重复简单的优点，为学生提供了大量的试错机会，使学生能够从尝试中学习知识，加深理解，训练实际应用能力。学生的知识学习过程如下：

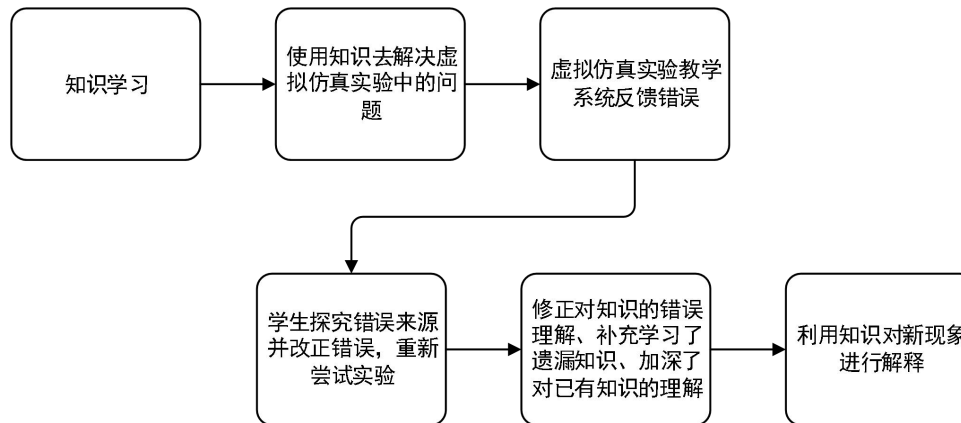


图 3.7 知识学习过程

## (2) 实验教学方法

### 1) 基于启发式的教学方法

根据实验原理和实验背景，本项目共设置三个模块，对应三个循序渐进的实验任务。实验模块一中，对单自由度通过实验的固有频率，通过软件设计启发学生对于固有频率的影响因素的思考，不同调整影响因素使之达到确定目标。实验模块二中，通过程序引导，启发学生了解振动问题的本质以及蕴含的原理。实验模块三中，进一步设计振动响应与边界工况之间的关联，启发学生进一步探索振动剧烈的原因。

### 2) 理论与实践比较式教学

本项目实验充分利用虚拟仿真技术的特点和优势，使学生借助人机交互技术能够迅速而正确地理解理论教学知识点和实验教学内容，从而达到实验教学目的。本项目在每个实验模块根据实验需要，设置了理论知识点复习模块，对所涉及的知识点进行复习，并通过给定力学模型以及相应的公式和参数，预测其动力学性能，并将与之后实验获得的测试数据进行验证和比较，使得学生更好地巩固理论知识的学习，理论与实践相结合并进行比较，理解其在实际工程结构中的应用。在每个实验模块开始之前，对实验所涉及的仪器设备进行认知，并详细介绍每个操作步骤的过程和原理。将进行阶段性的过程考核测试，考核通过之后方能进行相关的操作。通过这种理论和实践相结合的教学方式，使学生能够更快地融合理论知识，提高综合应用知识的能力。

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 21 步

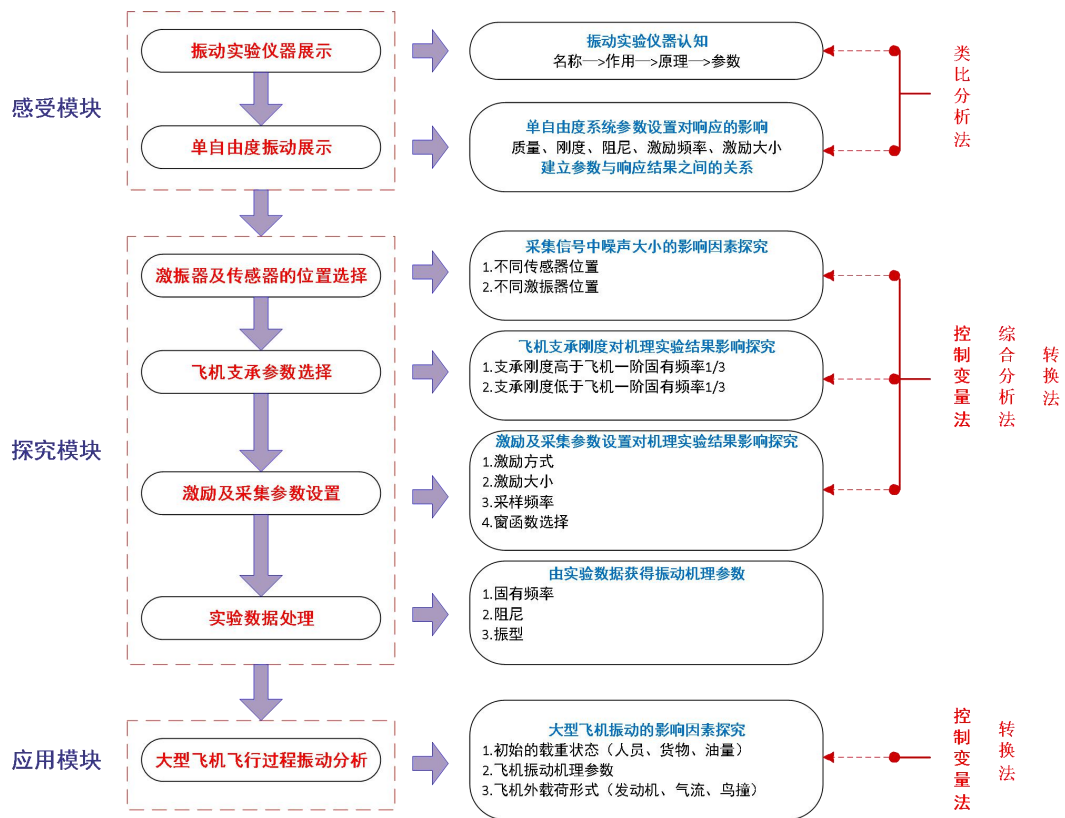


图 3.8 交互性操作示意图

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	知识点复习	8 分钟	在规定时间内完成即得 8 分	8	✓ 操作成绩 ✓ 实验报告 ✓ 预习成绩 ✓ 教师评价报告
2	仪器设备与操作步骤认知	6 分钟	在规定时间内完成即得 5 分	10	
3	单自由共振试验质量设置	3 分钟	正确的 4 分, 不正确得 0 分。	4	
4	单自由共振试验刚度设置	3 分钟	正确的 4 分, 不正确得 0 分	4	
5	单自由共振试验阻尼设置	3 分钟	正确的 4 分, 不正确	4	

			得 0 分		
6	频域数据及时域数据保持。	3 分钟	正确的 4 分，不正确得 0 分	4	
7	扩展知识学习	8 分钟	在规定时间内完成即得 5 分	5	
8	传感器激振器及激振器布置	4 分钟	传感器及激振器旋转布置正确得 5 分，不正确得 0 分。	5	
9	飞机支承设置	3 分钟	支撑频率设置正确得 5 分，不正确 0 分。	5	
10	激励方式设置	1 分钟	在规定时间内完成即得 2 分	5	
11	传感器通道参数设置	5 分钟	在规定时间内完成即得 5 分	5	
12	激励设置与采集参数设置	3 分钟	在规定时间内完成即得 4 分	4	
13	窗函数及保持设置	3 分钟	教师对分析和讨论进行评价打分	4	
14	开始试验，并曲线实时显示	4 分钟	在规定时间内完成即得 5 分	5	
15	振动现象分析，设置飞机状态，满油、半油、满员、货物等情况设置	2 分钟	在规定时间内完成即得 2 分	2	

16	起飞状态的振动曲线	2分钟	在规定时间内完成即得2分	2
17	遭遇气流的振动曲线	2分钟	在规定时间内完成即得2分	2
18	遭遇鸟撞的振动曲线	2分钟	在规定时间内完成即得2分	2
19	飞机飞行降落的飞机振动响应曲线	2分钟	在规定时间内完成即得2分	2
20	完成实验报告	8分钟	教师对分析和讨论进行评价打分	18

## (2) 交互性步骤详细说明

前置操作：打开虚拟仿真实验平台

打开浏览器，在地址栏中输入实验项目展示网站网址：

<http://vibration.nuaa.edu.cn>

点击页面中的“进入实验”按钮即可开始实验。

该网页下方有实验背景、实验要求、成绩评定、教学团队、在线讨论等如图



图 3.9 网页功能图

**步骤 1：知识点复习。**进入实验，弹出欢迎界面，点击确定，弹出模块介绍界面

模块介绍分别介绍：在线教学服务联系、AI 指引、操作帮助、力学概念认知探索、大型飞机结构振动机理分析、大型飞机结构振动现象、背景音乐、小地图、

实验步骤、注意事项、成绩评定、实验报告、仪器库、排行榜、重新实验等子界面。点击知识角，完成知识点复习。



图 3.10 主界面截图

**步骤 2:** 仪器设备与操作步骤认知。点击物理概念认知探索，弹出两个子菜单：关键仪器学习、单自由度实验。该步骤旨在了解振动物理概念、认识相关仪器。菜单中的关键仪器学习，实验桌上出现所需仪器，点击高亮仪器，进行仪器学习。该仪器学习总计有 8 个仪器，均为后续实验所需设备，多角度观察实验中使用到的设备，增加对仪器设备的认知。供学生在进行操作前学习。

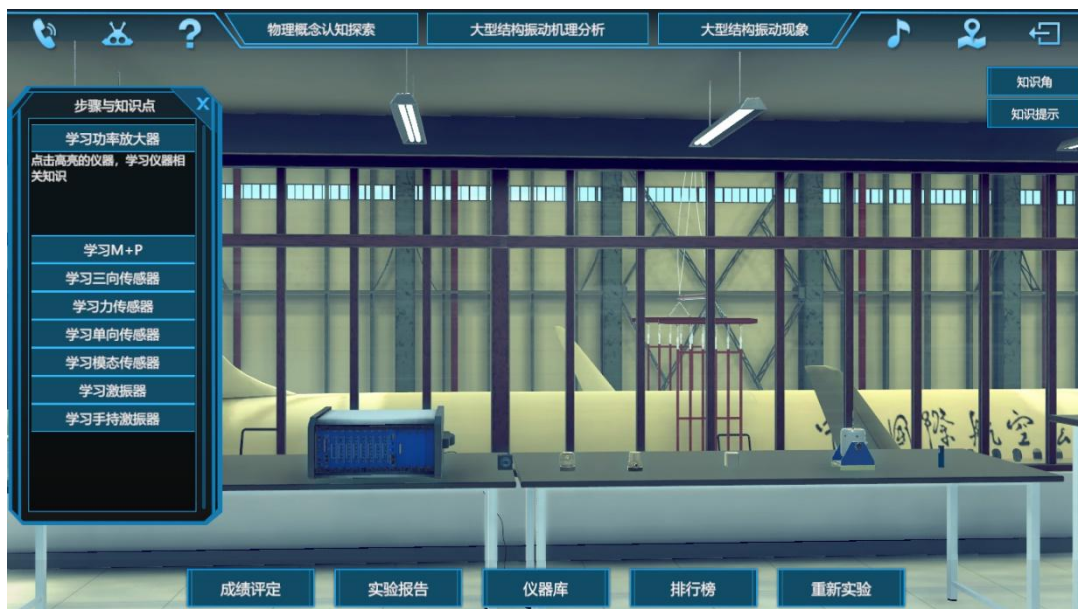


图 3.11 仪器学习图

**步骤 4:** 固有频率测试中的质量参数设置。点击子菜单中的单自由度实验，弹出实验参数设置界面。界面左侧分别为：实验步骤和物理概念，供学生参考学习，为设置相关参数提供依据；

界面正中为参数设置，上方是设置问题：所需固有频率，学生需要设置质量块质量  $m$ ，来达到所设置的需要固有频率；

**步骤 4：固有频率测试中的刚度参数设置。**如图 3.12 所示，设置刚度参数  $K$ 。



图 3.12 参数设置图

**步骤 5：固有频率测试中的阻尼参数设置。**如图 3.12 所示，设置阻尼  $C$ 。

**步骤 6：频域数据及时域数据绘制，时域及频域数据曲线。**

学生可选择查看时域数据 time record 与频域数据 fft，观察所设置的参数之后的单自由度系统其固有频率，同所需要的频率进行对比，满足要求点击提交，或者认为不满足可选择设置重新开始实验。

该单自由度模块，探究固有频率概念，探究不同参数对于系统固有频率的影响，为后续模块奠定基础。

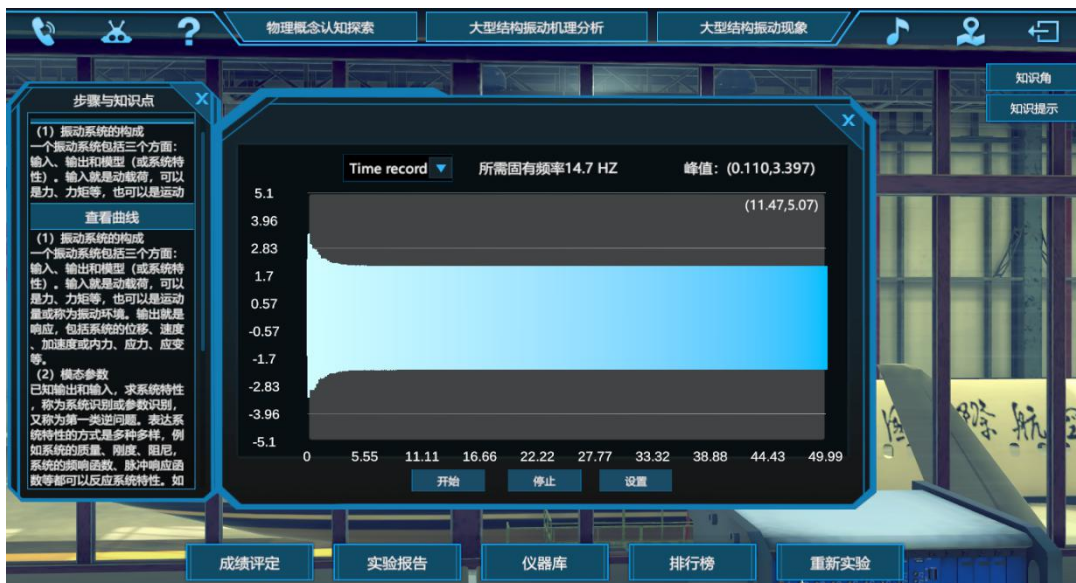


图 3.13 曲线图

**步骤 7：扩展知识学习。**点击大型结构振动机理分析，点击知识角进行扩展知识学习。

进入模块，该模块旨在掌握动机理分析实验的基本流程，完成简单的动特性试验，更加深刻的理解共振、谐振等内容。

**步骤 8：传感器激振器及激振器布置。**弹出大型飞机俯视图，进入飞机传感器、激振点布置

点击仪器库，选择激振器，拖动到飞机高亮区域，出现通道一的指示，视为布置完成。

选择传感器，拖动到飞机高亮区域，出现通道的指示图，视为该传感器布置正确。

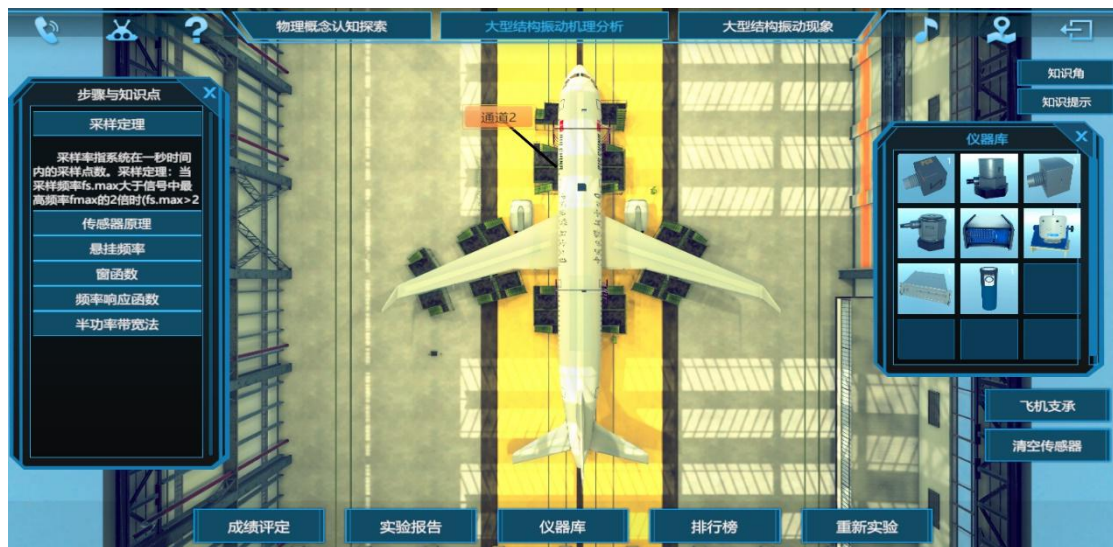


图 3.14 传感器布置图

**步骤 9：飞机支承设置。**点击飞机俯视图右侧按钮，飞机支承，跳出界面，飞机支承设置

提供飞机第一阶固有频率与飞机质量，学生对弹簧绳的刚度与数量进行设置。

实验中要求实际支承的最高刚体频率小于最低弹性频率的  $1/3$ ，探究不满足该条件下的测试试验中所获得的飞机固有频率的变化；学生选择不同刚度长度的橡皮绳，得到不同的悬挂频率。





图 3.15 飞机悬挂设置图

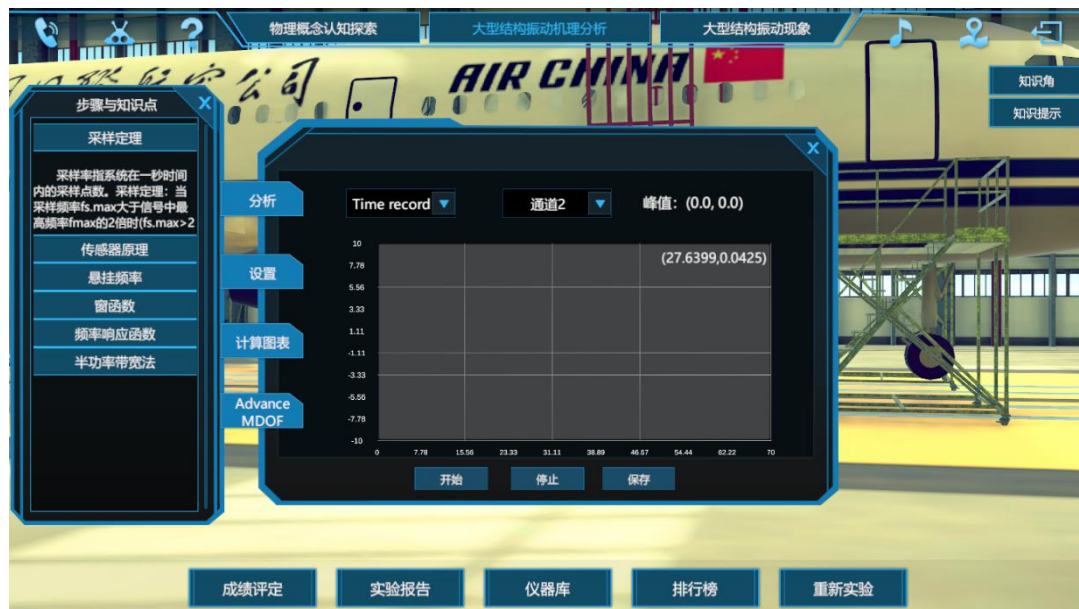


图 3.16 初始界面图

步骤 10; 激励方式设置。弹出实验模式选择，出现三个选项：锤击、正弦扫频、步进正弦扫频。



图 3.17 实验模式选择

**步骤 11: 传感器通道参数设置。**

根据布置的激振器与传感器的通道与类型，对其中的 Usage、EU、Sensitivity 进行设置。



图 3.18 通道设置图

**步骤 12: 激励设置与扫描参数设置。**在通道设置完成后，点击确定，弹出激励设置与扫描参数设置界面

设置激励的起始与截止频率，选择其变化类型、设置步长、每步长的持续时间、以及选择合适的采样率。



图 3.19 弹出激励设置与扫描参数设置界面

**步骤 13:** 窗函数及数据存储方式设置。设置采样完成后点击下一步，弹出处理方式与窗类型的界面

选择处理方式与窗的类型。

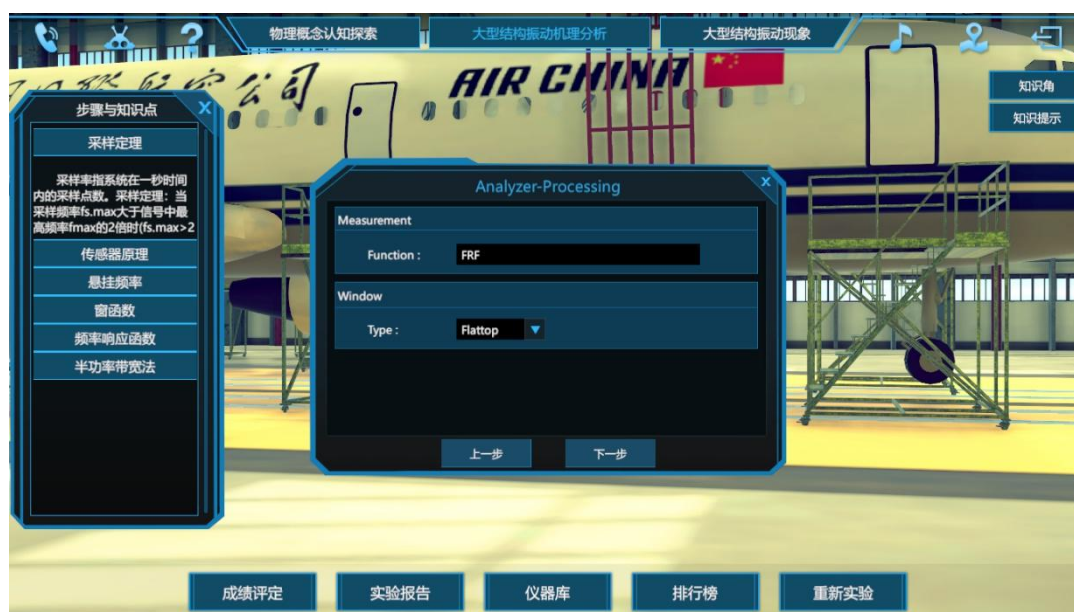


图 3.20 处理方式与窗类型的界面



图 3.21 存储方式选择图

步骤 14: 开始试验，并曲线实时显示。弹出曲线显示界面

点击开始，开始振动特性测试，学生可以选择不同的曲线类型 **time record** 或者 **FRF**，以及不同的通道所测得曲线。

选择 **FRF** 曲线图，选择其峰值，读出其幅频相频坐标，选择半功率带宽点，通过程序计算，得到其阻尼，频率和振型。

当所设置的悬挂频率不满足要求，导致所测得的频率误差较大，可选择重新开始设置悬挂，进行后续操作，探究悬挂频率对飞机固有频率测试的影响，点击提交，完成大型结构振动机理分析模块，

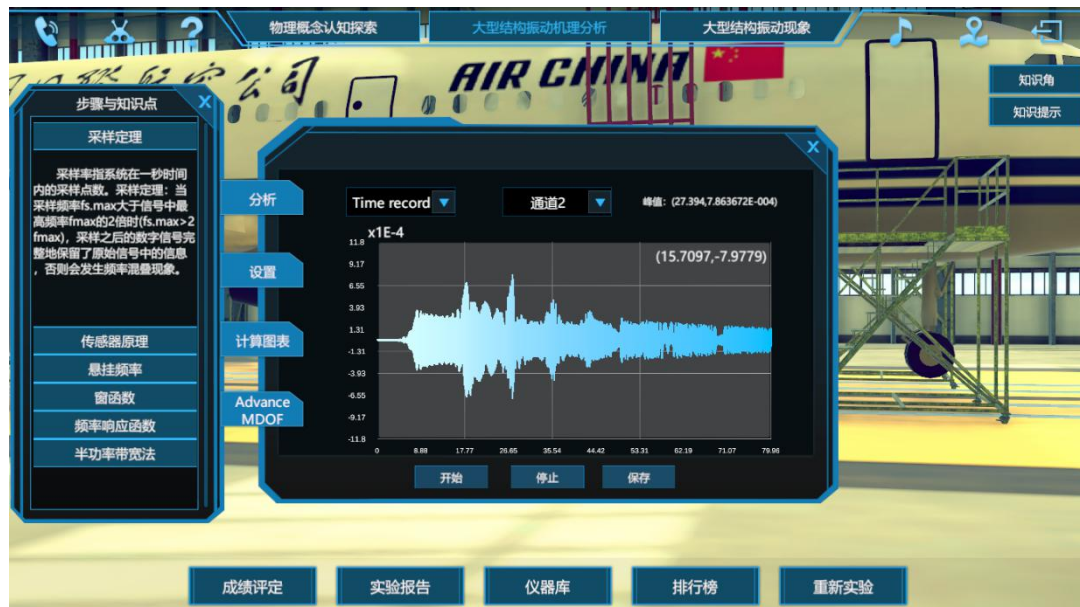


图 3.22 飞机振动特性曲线图

步骤 15: 振动响应分析，设置飞机状态，满油、半油、满员、货物等状态设置。点击大型结构振动现象，弹出飞机起飞状态设置。

该模块旨在根据大型飞机结构,探究其不同飞行工况对飞机振动特性的影响,充分考虑随机激励、扫频激励、冲击激励,进行探索性的试验分析,综合考虑一些因素:

首先设置飞机状态:满油、半油、满员、货物等情况设置飞机重量与路线选择。



图 3.23 飞机起飞状态设置图

**步骤 16:** 弹出飞机起飞时,飞机振动响应曲线。

飞机起跑时,发动机转速逐渐增加,探究发动机对飞机振动的影响。



图 3.24 飞机起飞图

**步骤 17:** 飞机飞行遭遇气流,弹出飞机振动响应曲线

飞机遭遇气流时,近似于受到随机载荷作用,探索气流对于飞机振动的影响。



图 3.25 飞机遭遇气流图

**步骤 18:** 飞机飞行遭遇鸟撞，弹出飞机振动响应曲线



图 3.26 飞机鸟撞图

飞机遭遇鸟撞时，近似于受到一个冲击载荷，探索撞击对于飞机振动的影响。在时域频域幅值到达一定程度时可视为破坏，同时飞机固有频率降低。

**步骤 19:** 飞机飞行降落，弹出飞机振动响应曲线

飞机降落时，发动机转速逐渐增加降低，着陆时飞机承冲击载荷，探究发动机对飞机振动的影响。

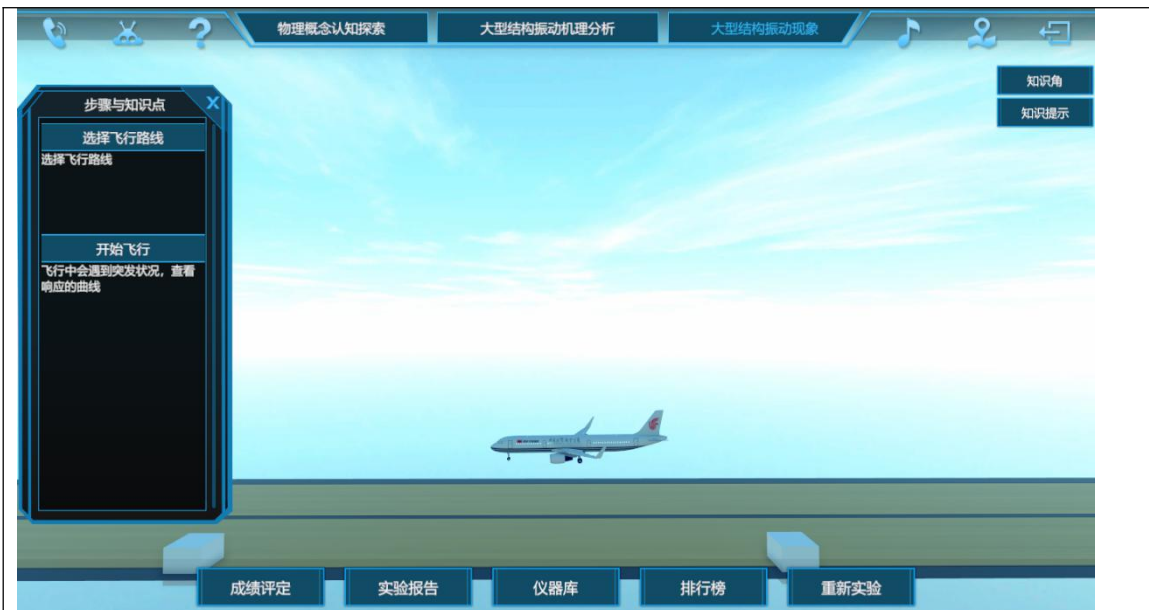


图 3.27 飞机降落图

**步骤 20: 实验的报告整理。**

弹出实验的实验报告，分布将包括三个实验模块的输入及输出以及典型结果记录下来，给出固有频率、频响函数、振动现象曲线，并分析振动原因。

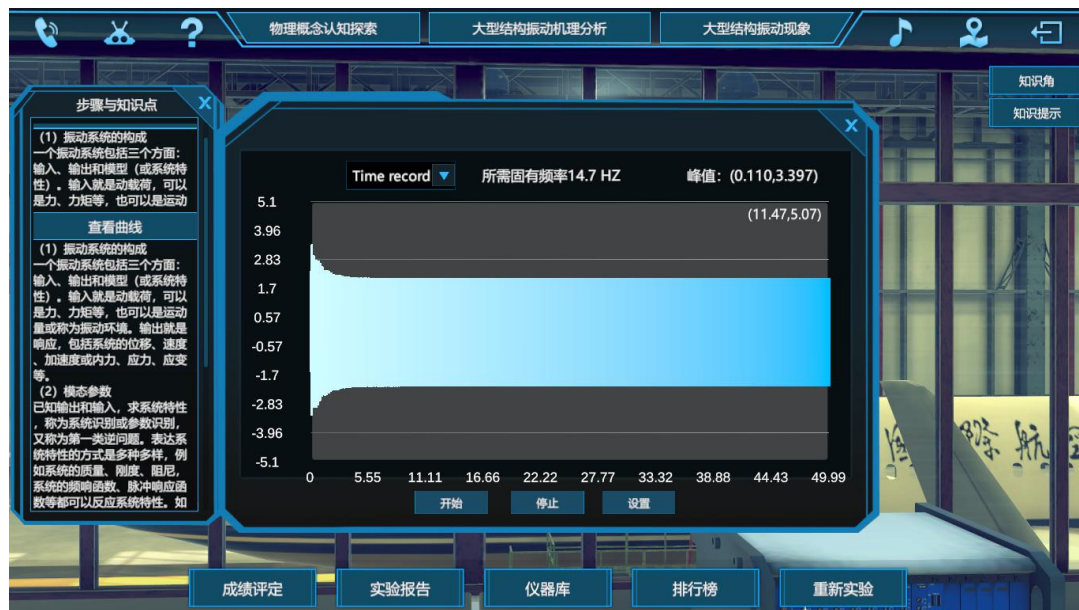


图 3.28 实验报告整理

**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）

大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验包括 3 个实验模块，分别从概念认知探索、大型飞机结构振动机理分析、大型飞机结构振动现象，形成从概念到原理再到现象的完整的试验教学。

实验第一模块的研究目的是让学生加深对固有频率的概念的理解以及其影响因素。系统会自动随机给定一个设计要求，每一位同学的设计要求都不一样，根据设计要求，让用户设计刚度、阻尼及质量信息。并通过试验结果，分析设计偏差，并讨论引起偏差的原因。

实验第二模块的研究目的是探索振动的机理，研究频率响应函数的概念以及影响。系统通过频响函数的测试，让同学们掌握频率函数的测试方法，试验涉及到激励方式、传感器布置方式、采集参数等各个环节设计，因此该模块测量得到的频响函数也会不尽相同，体现出测试结果的差异性。学生根据测试结果分析激励和响应之间的传递关系。

实验第三模块为振动现象的复现模块，学生根据第二模块的原理特性分析振动现象，指出振动响应中的频率成分，并分析这些频率信息与共振频率之间的关系，弄清楚结构共振现象以及与受迫振动之间的区别。

总体要求是能够顺利执行并完成所有实验项目，掌握实验原理、实验过程和操作方法，启发学生创新性思维。

### 3-8 面向学生要求

#### (1) 专业与年级要求

主要面向工程力学、飞行器设计与工程及相关工程类专业的大三、大四或研究生。本实验项目也可以面向其他专业学生，通过虚拟仿真动画演示和应用实例展示，让学生了解大型飞机结构动特性测试试验过程。

#### (2) 基本知识和能力要求

- 1) 了解相关仪器参数与规范；
- 2) 掌握结构振动测试理论基本知识；
- 3) 具备工程力学和振动测试与数据处理课程基本知识；
- 4) 有一定计算机软件应用能力；
- 5) 有一定的科研创新能力，对飞机结构振动具有一定研究想法。



### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间： 2019 年 9 月 日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校 93 人，外校 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：2 ，具体专业：工程力学、飞行器设计与工程 ，

教学周期：2 ，学习人数： 93

(4) 是否面向社会提供服务：是 否

(5) 社会开放时间： 2021 年 4 月 日

(6) 已服务过的社会学习者人数： 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）

项目的主要特色包括：

### (1) 概念-机理-现象递进式实验方案设计思路：

振动力学实验是高等院力学及相关工科专业的必修的核心实验课程，是结构动力学基础、结构模态识别技术等课程的基础实验，同时也是新工科人才培养的重要环节。从力学的角度来看，振动是研究力与运动之间的相互关系，在力学中占有十分重要的地位，大型结构振动问题是一类复杂的力学现象，涉及的概念抽象、机理复杂，学生不易理解。以大型飞机结构为何振动剧烈、振动背后的机理以及所蕴含的物理概念为主线，试验教学提出了从**概念-机理-现象递进式的虚拟仿真实验建设思路和内容**，由浅入深的设计了大型飞机结构振动测试虚拟仿真实验教学，学生深度参与的物理机理实验的可拓展性和可设计性，增加了趣味性，互动性，由此学生可以完善其知识盲区，从而着力培养学生基于力学概念机理分析振动这一力学现象的能力。

### (2) 教学方法与评价体系：

1) 采用启发式教学，培养学生基于机理/概念分析物理现象能力，**激发学生发散性思维。**

2) “以学生为中心”的教学理念和“立体化”的教学内容。

3) 学科的交叉融合

4) 评价体系

大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验教学系统能够对参加实验学生的全过程进行记录，并能够随时进行实验指导，平台建立完善的反馈机制，对参加实验学生各方面的建议、评价与反馈信息，进行全面系统的统计分析，为指导教师改进和完善实验提供参考，提高教学效果。

(3) 传统教学的延伸与拓展:

1) 一是以大型飞机结构为目标，提升学生基于振动机理\概念分析振动现象能力。

2) 提高了实验的可操作性。传统的力学试验存在一定的安全风险，本项目在培养学生实际操作能力的同时，避免了相关伤害发生的可能性，可以与现有的课堂教学、慕课教学等手段进行深度融合，大大提升教学灵活性。

3) 增加了可拓展可设计的研究内容；融汇理论教学、虚拟实验和探索拓展，虚实结合；强调“可实验性”和“可探索性”，虚实结合；在该实验中，学生能够完成在力学实验中不能实现的工况，

## 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) 名提供在线教学服务的团队成员； 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 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行 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。

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：浏览器 Google Chrome

插件容量：48.1MB

下载链接：[http://dl.hdmoool.com/tools/chrome\\_x64.exe](http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe)

(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）**

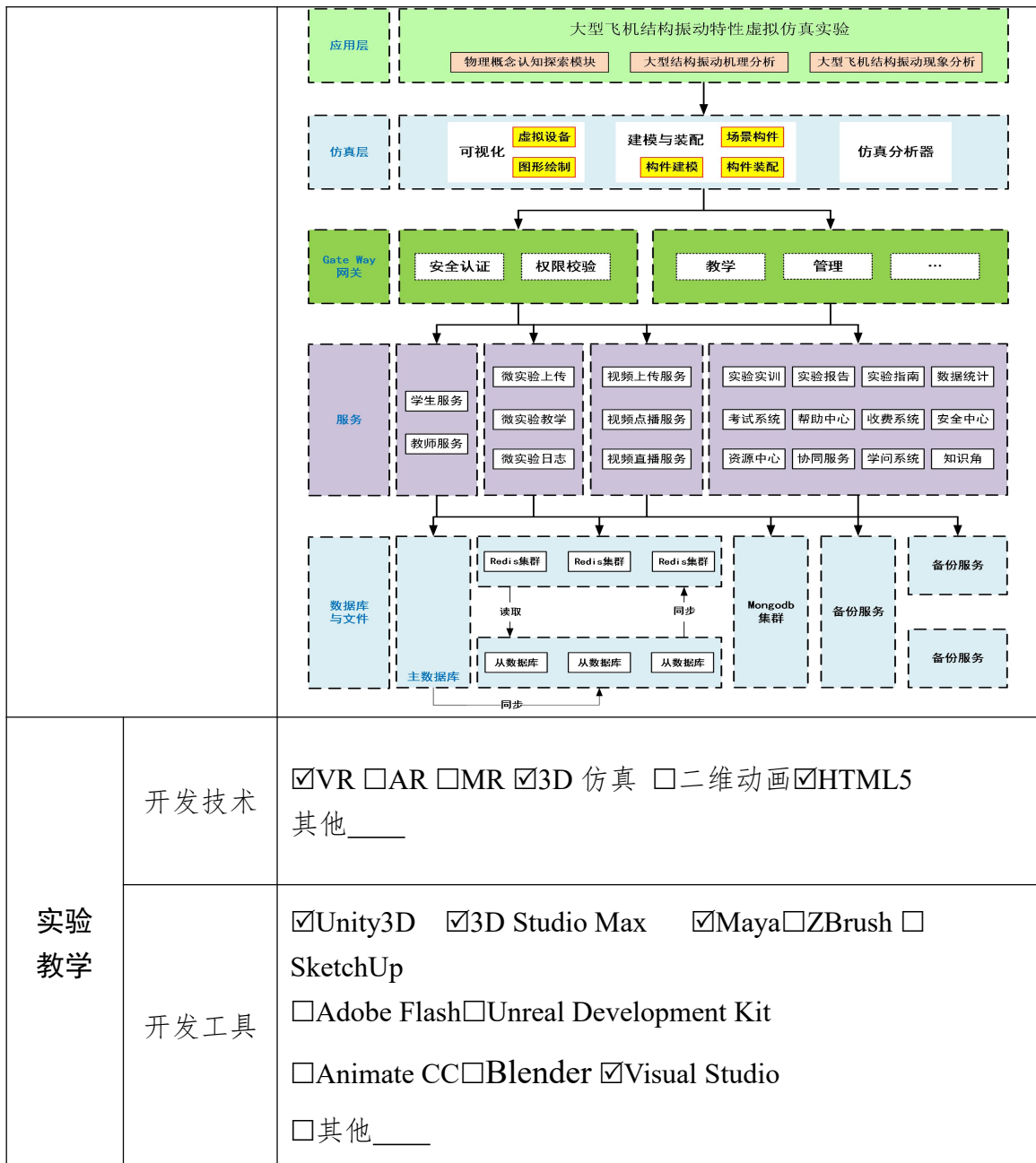
(1) 证书编号：

GA20210608000182

(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
系统架构图及简要说明	用户通过 PC 端或者 WEB 端进入虚拟实验，自主选择实验项目，系统通过模块调用、数据交互，完成用户请求实验展示。



运行环境	<p><b>服务器</b> CPU 16 核、内存 32 GB、磁盘 1000 GB、 显存 16 GB、GPU 型号 NVIDIA GRID K1</p> <p><b>操作系统</b> <input type="checkbox"/>Windows Server <input checked="" type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本： <b>数据库</b> <input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle <input type="checkbox"/>其他 <b>备注说明</b>（需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请说明） <b>是否支持云渲染：</b> <input type="radio"/>是 <input type="radio"/>否</p>
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）	<p>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</p>

## 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	在现有系统的基础上，增加中英文切换功能，丰富动力学响应测试模块，直观显示振动水平大小，通过动画直观显示振动大小。
第二年	将振动频响响应函数测试方法进一步完善，增加锤击法及步进正弦扫频算法，满足工程测试和教学的需要。

第三年	进一步增加探索环节，继续挖掘开拓性、趣味性的试验环节设置。
第四年	增加振动的逆设计环节，当振动剧烈时，通过调整结构参数降低振动水平，为振动抑制奠定基础
第五年	将振动分析模型模型进一步拓展，满足开展地面共振试验需要。

其他描述：

课程建设围绕课程教学的需要，结合虚拟仿真的优势，持续丰富和完善仿真试验内容，突出特色，打造精品。

(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	2	200 人	2	100 人
第二年	6	300 人	2	300 人
第三年	8	550 人	3	800 人
第四年	15	1000 人	3	1400 人
第五年	25	2000 人	4	2500 人

其他描述：南京航空航天大学力学专业是全国双一流专业，结构动力学方向是传统优势学科方向，虚拟仿真试验的建设和推广将对其他高校具有一定的引领效果，同时促进在交通、土建、航空航天等领域的应用推广。

## 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	大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验
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，可自行增加著作权人填写栏进行填报。	
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	



软件著作权登记号	
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	2021R11S0869064

## 10.诚信承诺

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。

实验教学课程负责人（签字）：

年 月 日

## 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。）

### 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。）

## 《结构动力学基础课程教学大纲》

课程编号	01301210	开课学院	一院	开课系	0131	
课程名称	中文	结构动力学基础		课程类别	专业选修课	
	英文	Vibration Analysis and Measurement				
课程学时	总学时	理论教学	实验教学	自学	上机	课程设计
	48	42	6			1. 有 2. <input checked="" type="checkbox"/> 无
<p>课程简介：</p> <p>本课程是为航空宇航科学与技术、机械工程、力学、动力工程、交通运输工程等专业本科生开设的专业基础课。是一门理论性、逻辑性、应用性很强的课程。</p> <p>课程首先详细介绍单自由度系统的振动，力求阐明本课程的一些基本概念和分析方法，然后介绍多自由度系统的振动，介绍了多自由度系统有别于单自由度系统的振动现象和概念。对于无限自由度系统的振动，分别介绍杆、轴、弦、梁等连续体构件的振动分析方法。所有这些内容构成了线性振动理论分析的主要基础。</p> <p>振动实验不仅可对理论分析和数值计算的正确性作出检验，而且成为建立分析模型、确定振动载荷等方面的有效工具。本课程还介绍由计算机支持的现代振动实验技术，为学生了解振动实验基本仪器设备、振动实验的基本方法、加深对理论的理解提供帮助。</p> <p>通过本课程的学习，可使学生认识和掌握机械振动的基本理论和基本实验方法，为学习后续课程学习、工作、开展科学研究打好基础。本课程的具体培养目标是：<b>(1) 使学生掌握振动分析的基本理论基本方法。</b>具体包括动振动系统运动方程的建立、固有振动分析、自由振动分析、强迫振动分析、模态叠加法和方程解耦方法、频响函数和单位脉冲响应函数分析等方面的内容。<b>(2) 使学生了解振动实验基本仪器掌握其使用方法，提高学生实验和动手能力。</b>主要包括：认识基本振动实验仪器、掌握振动实验的基本步骤、针对具体的振动系统（单自由度振动系统和多自由度系统）完成振动实验并对测试结果进行分析，得到系统的模态参数，撰写实验报告。<b>(3) 在教学中注重培养学生的逻辑思维能力、抽象能力、自学能力、表达能力、计算能力以及创新设计能力，为后续工作和研究打下基础。</b>振动分析与测试这门课程的显著特点是该课程能够做到理论联系实际，具有极强的应用价值。针对实际工程中出现的典型振动问题和振动现象，引导学生学会应用振动理论知识分析问题、解决问题、提升自己的综合素质和能力是本课程的最终目标。</p>						

先修课程、能力和知识结构要求：

前修课程：高等数学、线性代数、普通物理、材料力学、理论力学等。  
主要能力和知识结构：学生通过前修课程的学习，能掌握极限、微分、定积分、线性常微分方程等高等数学的有关基本概念和基本计算方法；掌握矩阵特征问题，线性空间变换等线性代数的基本概念与计算方法；掌握牛顿三定律和达朗贝尔原理的概念，掌握普通物理与理论力学中有关运动学、动力学的基本概念。掌握材料力学有关基本概念，了解结构元件弦、轴、杆、梁等的受力特性和分析方法。

课程结构说明：

本课程由单自由度系统振动、多自由度系统振动和无限自由度系统振动三大部分组成，其结构和学时分配如下所示：

序号	内 容	理论授课	实验教学	课堂讨论	课外作业
1	单自由度系统振动	15	2	2	√
3	多自由度系统振动	15	4	2	√
4	无限自由度系统振动	10	2	2	√
5	总复习	2			
总学时	50	42	8	6	

根据课程的特点，本课程的教学活动主要包括理论授课、课堂讨论（习题课）、实验教学、课外作业、考试。

课程知识结构说明：

**知识单元一：单自由度系统的振动**

**理论授课（15 学时）**

本章主要学习：振动描述形式；单自由度系统的建模；单自由度系统的固有振动、自由振动；简谐激励、周期激励、一般激励下的系统振动；阻尼的机理及影响等。该章的理论和方法不仅是全课的基础，而且在解决许多工程技术问题中有着广泛应用。

**\*绪论（1 学时）**

借助航空工业和土木工程典型工程实例和日常生活中的现象介绍振动科学是如何随着人类认识世界、改造世界能力的提高而不断发展起来的。理清本课程与我校开设的其他课程之间的上下位关系，显示振动在力学学科及工程中的地位。介绍本课程的研究对象、研究内容、研究方法、学习目的、教学安

排、教学要求等，使学生对本课程有一个总的和初步的了解。

**\*单自由度系统振动方程（课时 1 学时）**

介绍动力学系统的构成，基本元件弹簧、阻尼器的串并联，工程结构的单自由度动力学模型的建立和简化。

**\*无阻尼系统的自由振动（课时 2 学时）**

介绍自由振动形式与特征、基本概念和分析方法，用能量法确定固有频率，弹性元件的分布质量及其简化。

**\*粘性阻尼系统的自由振动（课时 2 学时）**

介绍有阻尼单自由度系统自由振动的基本概念和分析方法，各种阻尼状况的自由振动响应分析，振动衰减的基本原理。

**\*简谐力激励下的受迫振动（课时 2 学时）**

介绍无阻尼、有阻尼单自由度系统在简谐力作用下受迫振动的基本概念和分析方法，包括瞬态振动和稳态振动的概念，动力响应放大因子的概念，描述系统共振概念，旋转部件偏心质量引起的振动。

**\*基础简谐激励下的受迫振动（课时 2 学时）**

介绍基础激励下振动微分方程建立，绝对运动和相对运动的稳态振动响应解。

**\*振动的隔离（课时 2 学时）**

介绍振动隔离的基本概念和思路，第一类、第二类振动隔离方法，工程应用背景。

**\*等效线性粘性阻尼（课时 1 学时）**

介绍等效阻尼的基本概念和分析方法，若干阻尼类型及等效方法。

**\*周期激励下的受迫振动（课时 1 学时）**

周期函数的级数展开，受迫振动响应分析方法。

**\*瞬态激励下的受迫振动（课时 2 学时）**

单位脉冲响应函数、阶跃函数的概念及瞬态激励响应的卷积积分求解。频域和拉氏域动响应分析的基本概念和方法，频响函数的定义。

**\*实验一：单自由度系统有阻尼受迫振动（课时 2 学时）**

了解和掌握单自由度系统在简谐激励力作用下受迫振动的一般规律及现象；掌握根据李萨育图获得结构固有频率的方法；掌握机械结构加速度幅频特性曲线的测量方法以及如何由幅频特性曲线得到结构的固有频率及阻尼比，完成实验报告。

**\*课堂讨论（习题课）（课时 1 学时）**

知识单元二：多自由度系统的振动

**理论授课（15 学时）**

本章讲授多自由度系统的结构力学和分析力学建模方法；固有模态、实模态、复模态理论基础知识；离散多自由度系统的固有振动、自由振动；简谐激励、周期激励、一般激励下的系统振动等。

**\*系统运动微分方程（课时 3 学时）**

学习刚度系数、柔度系数概念，使用柔度法、刚度法建立多自由度系统微分方程。区分刚度法和柔度法的适用条件。学习广义坐标概念和对系统的描述以及耗散函数定义，使用拉格朗日方法建立多自由度系统微分方程。

**\*无阻尼系统的自由振动（课时 4 学时）**

学习固有模态理论，研究多自由度系统的运动耦合和解耦，进行包括单构系统和重构系统的固有振动分析和自由振动响应分析。在此过程中掌握模态刚度、模态质量，刚体运动振型等概念。

**\*无阻尼系统的受迫振动（课时 3 学时）**

在频域和时域分析多自由度系统的动态响应，模态叠加和截断，多自由度系统共振和反共振，使学生掌握多自由度离散系统动力学分析过程和步骤。

**\*比例阻尼系统的振动（课时 4 学时）**

分析粘性阻尼特性及其对于动力学方程组求解带来的影响。探讨可用模态解耦的比例阻尼的形式。研究学习用实模态解耦的方法进行比例阻尼系统自由振动响应和时域、频域下的受迫振动响应的计算方法。

**\*一般粘性阻尼系统的振动（课时 1 学时）**

学习复频率、复模态概念和多自由度系统状态空间描述方法，了解一般粘性阻尼系统的自由振动和受迫振动的响应求解。

**\*实验二：多自由度系统有阻尼受迫振动（课时 4 学时）**

了解和掌握多自由度系统在简谐激振作用下受迫振动的一般规律及现象；理解多自由度系统固有振型的物理概念，掌握简单测试方法；巩固基本振动测试设备的原理与使用，学会模态频率和振型的基本测试方法，完成实验报告。

**\*课堂讨论（习题课）（课时 2 学时）**

知识单元三：无限自由度系统的振动

理论授课（10 学时）

本章讲授弦、杆、轴、梁连续体的动力学方程建立方法，以及弦、杆、轴、梁连续体的固有振动、自由振动、受迫振动。

**\*弹性杆、轴、弦的振动微分方程（课时 2 学时）**

应用微元体法建立弹性杆、轴、弦振动微分方程。

**\*弹性杆、轴、弦的模态（课时 2 学时）**

使用分离变量法求解弹性杆、轴、弦的固有特性和固有振型，分析固有振型的正交性。

**\*大型飞机结构振动特性虚拟仿真实验教学（课时 2 学时）**

使用该虚拟仿真实验系统，完成该振动特性实验

**\*弹性杆、轴、弦的响应计算（课时 1 学时）**

弹性杆的自由振动响应，受迫振动响应计算。

**\*弹性梁的振动微分方程与模态（课时 2 学时）**

应用微单元法推导弹性 Euler 梁振动微分方程，使用分离变量法求解弹性梁的固有特性和固有振型。

**\*弹性梁模态的性质与特殊边界条件（课时 2 学时）**

分析弹性梁的固有振型的正交性，特殊边界条件及对应的加权正交性。

**\*弹性梁的动响应计算（课时 1 学时）**

梁的自由振动、受迫振动响应计算。

轴向力对固有振动的影响；Timoshenko 梁的固有振动。

**\*课堂讨论（习题课）（课时 2 学时）**

**总复习：（课时 2 学时）**

课程考核形式与要求：

课程成绩构成：平时成绩（作业、考勤）占 30%；实验 10%、期末考试成绩占 60%。

课程考试形式：闭卷考试。

课程考试要求：

按结构分：概念题，约占 20%；

计算题，约占 80%。

按内容分：单自由度系统振动，约占 40%；

多自由度系统振动，约占 40%；

无限自由度系统振动，约占 20%；

课程教授方法说明：

本课程的教学包括理论讲授、课堂讨论、实验、课后作业等教学环节，在课程教学中应适当采用多媒体课件，有效运用现代化教学手段的优势，充分利用现有的课程实验教学设备，同时注意以下诸方面：

1、在单自由度系统振动教学中，注重围绕简谐激励下响应全解和瞬态激励下响应全解两大核心公式，要求学生背诵；在多自由度系统振动和无限自由度系统振动教学中注重围绕振型正交性和模态叠加法两大基础，要求学生理解并掌握相应公式和方法。

2、由于学生缺乏工程经历与工程经验，建议加强学生的工程概念，突出振动的工程背景及其有关知识在工程中，特别是在航空航天工程中的应用，例题、作业尽可能引入工程实例；

3、正确处理定性分析与定量分析的关系，建议进一步重视有关基本原理的应用，突出分析问题的方法、求解问题的思路；

4、瞬态激励下的响应计算为课程教学中的难点，建议安排讨论课，适当补充习题；

5、多自由度系统建模为课程教学中的难点，建议安排讨论课，适当补充

习题； 6、模态理论为课程教学中的难点，建议安排讨论课，适当补充习题； 7、为了加强学生对基本概念的理解与掌握，建议补充适量的概念性习题。		
课程能力培养说明：  通过课程的讲授、讨论课、实验、习题等各个教学环节，训练和培养学生的以下能力： 1、建模能力：具有将典型振动问题抽象成为离散或连续自由度振动系统，构建微分方程进行分析的能力； 2、思维能力：通过包括推理、分析、判断的逻辑思维过程，对离散自由度和无限自由度振动问题具有定性分析的能力； 3、计算能力：对离散自由度和无限自由度振动问题具有定量的模态分析和响应分析的能力； 4、自学能力：根据已有基础具有进一步自我学习，自我提高的能力。		
先修主要课程	高等数学、线性代数、普通物理、材料力学、理论力学等	
使用教材	胡海岩主编，机械振动基础，北京航空航天大学出版社，2005	
参考书目文献	1. 季文美，机械振动，科学出版社，1985 2. <a href="#">郑兆昌主编</a> ， <a href="#">机械振动 上册</a> ，机械工业出版社，1980 3. Singiresu S R, <a href="#">Mechanical Vibrations</a> , <a href="#">Longman Prentice Hall</a> , 2004	
主要教学方式	理论讲授	
主要适用专业	飞行器设计与工程	飞行器动力工程
	工程力学	机械工程及自动化