

# 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： MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验

专业类代码： 0803

负责人： 卜雄洙

联系电话： 13952037099

申报学校： 南京理工大学

填表日期： 2021 年 5 月 28 日

推荐单位： 工业和信息化部



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	MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验	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)	传感器原理及应用, 测试技术		
性质	<input type="radio"/> 独立实验课 <input checked="" type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	测控技术及仪器, 机械工程		
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 checked="" 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="radio"/> 中文 <input type="radio"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="radio"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 2 次: 1. 时间 2019 年 12 月、人数:85 人次 2. 时间 2020 年 12 月、人数: 95 人次		
有效链接网址	<a href="http://mool.njust.edu.cn/mems">http://mool.njust.edu.cn/mems</a>		

## 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	卜雄洙	1966.03	南京理工大学	无	教授	13952037099	buxu105@njust.edu.cn	负责人, 总体规划/教学服务
2	苏岩	1967.12	南京理工大学	无	教授	13952005050	suyan@njust.edu.cn	加速度计结构及工艺/教学服务
3	朱蕴璞	1964.12	南京理工大学	无	副教授	13851554499	13851554499@139.com	认知, 校准实验设计/教学服务
4	王宇	1978.02	南京理工大学	无	副教授	18052019113	wangyu78@njust.edu.cn	校准, 应用/教学服务
5	吴志强	1982.03	南京	无	讲师	15250997948	wuzhiqiang	调理电路实验,

			理工大学			@njjust.edu.cn	应用实验/教学服务
<b>2-2 团队其他成员</b>							
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务	
1	姜波	1988.11	南京理工大学	无	讲师	传感器结构实验设计/教学服务	
2	张晶	1990.04	南京理工大学	无	讲师	传感器工艺实验流程设计/教学服务	
3	范茂军	1954.11	中国电子学会传感技术与微系统分会，南京理工大学兼职博导	理事长	教授	仿真平台技术顾问	
4	郝一龙	1963.7	北京大学	无	教授	仿真平台技术顾问	
5	杨拥军	1970.6	中国电子科技集团十三研究所	总工	研究员	仿真平台技术顾问	
6	郑馨语	1992.03	南京恒点信息技术有限公司	无	课程策划	服务支持/技术支持	
7	李静	1991.09	南京恒点信息技术有限公司	无	UI 设计师	技术开发/技术支持	
团队总人数：12 人 其中高校人员数量：8 人 企业人员数量：4 人							
<b>2-3 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）</b>							
<p>（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）</p> <p>近年来承担《传感器原理及应用》、《新型传感器》、《微系统与人工智能》、《测试技术》等相关课程的教学任务，建立《面向微纳传感器的多物理场仿真》、《MEMS 谐振式传感器品质因数测试及分析》等创新性实验。到目前为止开设本实验 2 学期，参与实验的人数达 180 多人次；取得了较好的实效。</p> <p>项目负责人长期从事测控技术与仪器专业的教学工作，先后承担《新型传感器》、</p>							

《先进传感器与校准技术》、《误差理论与数据处理》等本科和研究生课程教学。指导学生参加并获得 2010 年国际大学生物联网创新创业大赛中国总决赛(iCAN)特等奖，江苏省第三，第四届虚拟仪器大赛一等奖，以及第四届全国虚拟仪器大赛三等奖等；主持完成了校级教改项目，并获得校教学成果奖二等奖一项，在《中国科技信息》、《实验技术与管理》等发表了多篇教学论文，主编了《计量学基础》、《工程测量误差与数据处理》、《现代信号分析与处理》等多本教材。

从事动态测试与新型传感技术等学术方面的研究。承担和参与了多项国家、省部级及大型企事业的科研项目，获得国防科技二等奖一项；解放军科技进步二、三等奖各一项，获发明专利（含国防专利）二十余项；在《IEEE Transactions on Industrial Electronics》等国内外期刊与会议发表论文 130 余篇，其中 SCI 及 EI 收录 70 余篇。

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）

2011年工信部发布的《物联网“十二五”发展规划》明确提出要重点支持智能传感器、基于MEMS的传感器等关键设备的研制；2012年国务院发布的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》明确提出要推进微机电系统(MEMS)、智能传感器、新型电力电子器件装备等产业化；在2014年，国务院发布的《国家集成电路产业发展推进纲要》中明确提出，要大力发展微机电系统(MEMS)等特色专用工艺生产线，增强芯片制造综合能力；由此可见，MEMS传感器芯片具有低成本、低功耗、小体积、高精度、寿命长等特点是未来传感器的发展方向。其中微机电(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)加速度计已经成为无处不在的传感器，其应用面之广，覆盖了从国防到民用基础设施等各个领域，涉及各种小尺寸、低功耗和高性能应用。

目前MEMS传感器的教学只能停留在书面教学层面，且普遍反映其内容“门楼太高”，主要是MEMS传感器设计难度大，结构复杂，制作工艺设备价格昂贵且对环境要求非常苛刻，校准试验受到场地及安全限制等实验教学的难题，因此只有通过虚拟仿真实验，才能把这一高新技术内容引进实验课堂，使学生深入了解传感器从结构设计、制作工艺、电路设计到成品的每个环节与最终的传感器静态特性指标之间的关系，掌握知识节点中某些较难理解的概念、原理等，激发学生学习兴趣，提高学生认知和分析推理能力，实现理论与实践良好结合的目的。

本实验以贴近工程实践为宗旨，首次以虚拟仿真实验的方式，把MEMS电容式加速度计的结构设计、加工工艺、调理电路、标定及应用案例进行展现，通过研讨式、任务驱动式、交互式、沉浸式、以及探索式教学方法应用于本实验教学，具有知识量大、系统性强、科学性高、综合性强等特点；把MEMS传感器的加工工艺引入到仪器科学与技术学科本科实践教学中，使学生们及时了解现代传感器复杂的工艺流程，先进的加工设备与使用；同时将MEMS传感器工艺制造误差与电路噪声的影响引入到虚拟仿真实验中，帮助学生更加深入的理解传感器的精度与设计、制造的关系，充分体现虚拟教学能实不虚的特点；设计与标定过程中，针对影响传感器指标的每个细节，在注重把握与实际环节一致性的前提下，既注重科技感，同时也考虑趣味性；利用应用案例，直接显示MEMS传感器在测量过程中其内部的工作过程，使学生们能够了解传感器输出信号的产生机理，生动直观；紧随现代科技的潮流；通过本实验，把影响MEMS传感器指标的卡脖子技术展示出来，积极引导当代学生树立正确的国家观、民族观、历史观，鼓励学生们进行原创性、开拓性、引领性研究。

整个实验提炼重点、难点、要点，使得学生对微纳加工形成了“点-线-面”的理解，做到了全局与局部重点相结合的实验特色。

此虚拟仿真系统采用C#开发语言，基于Unity开发引擎发布的webgl版本的应用，采用主要websocket协议实现与服务器的通信和数据传输，3DMAX和Maya实现3D图形可视化。系统运行平台：windows 8\windows 10，火狐浏览器、谷歌浏览器（64位）。用户使用轻便化，无需下载安装应用，直接打开网页即可运行该虚拟仿真系统。

### 3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

本课程根据《传感器原理及应用》、《测试技术》等课程大纲以及知识点的要求，结合 MEMS 传感器的军民两用的需求，从 MEMS 传感器的基本原理、结构与加工工艺、测控电路、标定与数据处理等各阶段开展了虚拟仿真实验，以传感器设计指标为任务导向，开展自主容错探究式虚拟仿真实验，使学生仅在 4 学时内深入了解传感器从设计到成品的每个环节与最终的传感器静态特性指标之间的关系，激发学生学习兴趣，提高学生认知和分析推理能力，实现理论与实践良好结合的目的。

#### （1）MEMS 电容式加速度计原理认识

以分解部件的形式展示 MEMS 电容式加速度计的过程，建立学生对 MEMS 传感器过程的全面认知和理解，并为下一步传感器的设计实验和整机标定实验奠定基础。

#### （2）传感器结构设计，加工工艺设计实验

通过引导学生自主设计传感器的结构以及加工工艺流程，使同学们掌握 MEMS 传感器的质量—弹簧—阻尼结构特点以及光刻、薄膜沉积、掺杂、刻蚀（湿法刻蚀和干法刻蚀）等关键工艺问题，为将来各类 MEMS 设计与制作打下基础。

#### （3）传感器测控电路设计

通过总体任务和分项任务，设计与实现传感器的微弱信号调制、滤波等功能，实现高仿真度的电路调试过程。引导学生根据电路的性能参数或曲线分析设计的调理电路是否满足任务要求，强化学生们的电路设计的能力。

#### （4）传感器标定与应用示例

学生通过在离心机，振动台等在虚拟仿真平台进行整机实验，获得自己设计的传感器灵敏度、线性度、重复性等指标，让学生们理解传感器的静态特性的实验过程及要求。同时把设计的传感器应用到实际的工作背景中，使学生通过探究思考，分析在该应用过程中传感器需要在哪些方面进行性能优化，提高分析问题及解决问题的能力。

### 3-3 实验课时

（1）实验所属课程课时：传感器原理与应用 48 课时，测试技术 32 课时。

（2）该实验所占课时：传感器原理与应用 3 课时，测试技术 1 课时。

### 3-4 实验原理

#### （1）实验原理(限 1000 字以内)

采用多媒体、仿真相结合的方法，模拟 MEMS 加速度传感器的工作原理及过程。

本实验以 MEMS 电容式加速度传感器为实验对象，该传感器由 MEMS 工艺加工制成，是基于电容原理的极距变化型的电容传感器，其中一个电极是固定的，另一变化电极是梳齿状可动弹性极板，与固定电极形成电容。可动弹性极板在加速度作用下发生位移，可动弹性极板和固定极板之间的电容就会发生相应的变化；通过调理电路对弱信号的滤波、调制、滤波，检测电容的变化量从而输出电压的变化，就等同于测得了执行器（质量块）的位移，继而解算加速度。电容式加速

度传感器从力学角度可以看成是一个质量—弹簧—阻尼系统，加速度通过质量块形成惯性力作用于系统，如图 3-1 所示。

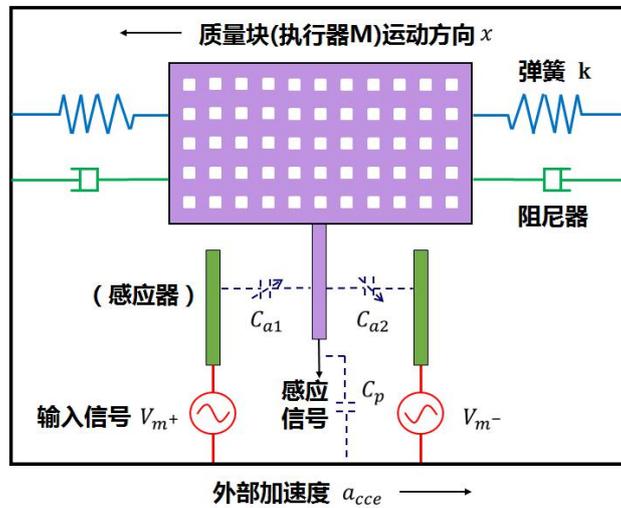


图 3-1 电容式加速度传感器基本原理图

根据上述工作原理与结构特点，引导学生根据设计需求从基体结构的模拟库中进行选型与结构参数的设定，并将计算结果向下传递，作为工艺加工的图形掩膜等理论设计条件，完全模拟实际结构设计过程。

虚拟仿真平台可引导学生对 MEMS 传感器的工艺流程进行设计，除与传统的光刻、薄膜沉积等 IC 工艺外，还有微加工技术，如湿法刻蚀和干法刻蚀、薄膜沉积、刻蚀工艺和键合等特殊微加工技术等虚拟仿真实验；同时，将真实工艺中可能出现的工艺步骤与参数设置问题预设于仿真系统中，提升工艺流程设计的仿真度。

在调理电路设计环节，在电路模型库中自行设计调理电路，引导学生根据电路的性能参数或曲线分析设计的调理电路是否满足任务要求，实现传感器的微弱信号的滤波、调制、滤波等功能，实现高仿真度的电路调试过程。

引导学生了解加速度传感器的各类标定装置的原理和 workflow，理解和掌握传感器的静动态标定的含义；开展标定模拟系统的参数设置与标定结果计算，最终反馈给平台，实现高仿真度的标定实验。

根据设计的不同量程传感器，设置了两种场景。一是根据身管武器射角测量反馈的应用需求，二是利用加速度传感器测量旋转弹体在飞行过程中的转速，希望学生通过探究思考，分析在该应用过程中传感器需要在哪些方面进行性能优化，并给出具体的设计思路和改进措施。

知识点：共 5 个

- ①MEMS 加速度传感器的工作原理和过程；
- ②MEMS 加速度传感器的结构设计及工艺流程；
- ③MEMS 加速度传感器的调理电路的设计；
- ④MEMS 加速度传感器的静态校准原理和过程；
- ⑤MEMS 加速度传感器的特性指标的计算与分析。

(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）

设计环节利用模块化建模的形式，引导学生完成板面布局、结构参数设计、

工艺条件限制等结构设计全过程，为其掌握微纳结构设计方法奠定了基础。

建立了包括光刻、干法刻蚀、牺牲层去除等7大过程高仿真度虚拟环境，实现一个微机电敏感结构的完整制作流程。实验也包含微纳加工中的“卡脖子”问题和关键工艺特点，着重刻画了“光刻工艺”过程，引导学生对光刻流程、曝光精度有了更为形象的理解。

建立了完整的模块化测控电路虚拟仿真平台，可以实现多类型测控方案的仿真实验。通过电路搭建、关键电路参数设置、虚拟示波器观测等多种实验手段，形象直观地展示了电路的工作原理，实现了高仿真度的电路调试过程。

搭建了离心机转台和线振动台模拟环境，可实现MEMS加速度计的标度、零位、迟滞、带宽、固有频率和阻尼比六个仿真实验过程。并绘制出工作直线，幅频特性曲线等，与设计环节的相应参数进行比对，验证实验结果的准确性。

构建了具有军工背景的典型的应用环境，通过动画和曲线展示等形式，直观形象地展示了传感器设计误差对应用结果的影响，并根据验证结果指导学生先前的设计进行改进优化，提高学生对传感器关键参数影响性的理解和认知。

### 3-5 实验教学过程与实验方法

本实验项目通过改革测控专业课程教学理念、教学内容、教学方法，实行基于任务驱动式、探讨式实验教学，利用文字、图片、3D模型、视频等多种新媒体，虚实结合，通过学生线上MEMS电容式加速度计设计的虚拟仿真实验及课程的教科书等混合式学习，突破时间与空间限制，让学生对测量系统中的每个环节有一个全面的认识，培养学生具有自主设计创新型测控系统的能力。

(1) 通过多媒体技术、虚拟现实技术构建了高度逼真的MEMS加速度传感器设计到校准及应用的教学环境，并对MEMS传感器的原理、结构、工艺、电路、校准等进行详细地认知说明；同时构建了典型的MEMS加速度传感器的三维模型，根据任务驱动，学生根据性能指标设计结构参数，直观地了解传感器结构组成、加工工艺流程、校准过程及应用特点；

(2) 利用虚拟仿真实验展示MEMS加速度传感器制作工艺流程，通过交互式操作加强学生对MEMS工艺以及器件制造流程的理解，包括：学生依次开展晶圆选择、光刻、深硅刻蚀、牺牲层释放、金属层沉积、引线键合、真空封装部分，学生将融合MEMS制造的全过程，其中每一个参数设置都对应工艺中的关键要素，同时实验以动画的方式，再现了洁净室的工艺环境。通过该实验，学生可以了解和掌握MEMS工艺（半导体工艺）加工器件的方式以及基本流程。

(3) 构建传感器调理电路的设计实验场景，由学生根据总体任务和分项任务，根据提供的调理电路模型库中，自行选择调理电路和设计相应的参数，获取调理电路的性能参数，引导学生根据电路的性能参数或信号特征，分析调理电路是否满足任务要求。

(4) 构建加速度传感器的静动态标定环境，包括离心机、振动台等标定设备、传感器安装要求及位置和方向等，形象地揭示不同影响因素条件下（包括环境因素）对传感器的静动态特性的变化规律，并利用数据处理方法求出静动态特性指标，加深同学们对计量校准中抽象概念的理解，提高学生数据处理、分析与推断能力。

(5) 搭建虚拟仿真环境，利用学生自己设计的虚拟加速度测量系统，对典型的火炮身管的射角和弹丸飞行过程中的转速等静动态运动参数进行测量，并根据射程与击中目标为依据，帮组学生了解和掌握加速度计的设计指标与应用背景之间的相互关系，分析误差源及其影响因素，评估测量不确定度。

**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 24 步（■操作成绩，■实验报告，●预习成绩，●教师评价报告）

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
<b>传感器认知</b>					
1	完成传感器应用认知学习	20 分钟	学习传感器的应用典型案例，掌握 MEMS 加速度计典型应用场景。完成学习并给分。	4	■操作成绩
2	完成传感器结构认知以及环节考核	10 分钟	学习传感器工作原理，并完成考核，每题 2 分，3 题，共 6 分。	6	■操作成绩 ■实验报告
<b>传感器设计——结构设计</b>					
3	完成结构模块搭建	7 分钟	将结构模块拖拽到画布上，后台根据结构元件是否实现工作原理与导线连接是否正确给分。	3	■操作成绩
4	设置结构模块参数	14 分钟	根据设计目标设置结构参数，后台根据固有频率、深宽比、非线性、版面等相关制约关系分步骤给分。	9	■操作成绩
5	计算并填写结构输出参数，提交设计	9 分钟	对比学生计算结果和后台模型计算结果的误差，误差在 20%内分参数给分。	3	■操作成绩 ■实验报告
<b>传感器设计——电路设计</b>					
6	完成测控电路的搭建	10 分钟	拖拽电路模块，形成完成的测控电路图，包括模块选择和连线。后台有几种典型的测控电路搭建方案，学生设计的与后台数据库中的电路结构进行	5	■操作成绩

			对比。		
7	完成电路环节关键参数设置	8分钟	设置的参数包括信号发生器驱动信号幅度频率和相位、前置电容电压放大器反馈电容和反馈电阻、低通滤波器阻容参数等,其中这些参数的设置均会影响后台实时解算的测控电路数学模型,并对电路的增益、带宽、噪声谱密度等电路性能产生影响。	6	■操作成绩
8	完成测控电路总体性能参数的计算,并依据传感器设计目标进行环节参数优化设计	12分钟	以传感器的总体设计目标为依据,通过调节测控电路相关参数获得最佳的设置值。后台始终在计算测控电路的数学模型及参数,根据与设计目标的差异进行设计评判。	4	■实验报告
<b>传感器设计——MEMS 加工制造工艺</b>					
9	工艺排序	5分钟	后台设置了工艺流程,根据学生选择的工艺排序分阶段给分,考察学生对工艺全流程的了解。	10	■操作成绩
10	晶圆选择	3分钟	晶圆选择包括四个选项,其中两个为干扰项目。选择SOI晶圆得分,但不同选项对制造精度有影响。	3	■操作成绩
11	光刻工艺	10分钟	根据理解在说明引导下完成顶层硅厚度、晶元前处理。	9	■操作成绩
12	深硅刻蚀	3分钟	按照提示完成工艺步骤,需要填写刻蚀速率和刻蚀时间,其中两者乘积需要大于顶层硅厚度,作为	3	■操作成绩

			考核点。		
13	干法释放及金属溅射	4分钟	按提示完成工艺步骤,观察金属沉积内部工艺状态与流程。	1	■操作成绩
14	划片及引线键合	7分钟	完成晶圆划片操作以及引线键合操作,学习划片、引线键合原理,掌握信号是如何从芯片引出的。	2	■操作成绩
15	真空封装	3分钟	输入真空封装度,该数值与阻尼有关。在0.001到1atm范围内得分。	2	■操作成绩 ■实验报告
<b>传感器校准</b>					
16	设置符合要求的标定 点; 按照步骤完成所设 标定 点采集。	3分钟	标定点设置不少于5个,且等间隔满量程设置;实验操作不当扣分,比如实验开始前不关门、实验结束不关电源、没有采集结束就按键结束实验等	4	■操作成绩
17	根据采集的数据完成 标定实验的计算。	15分钟	拟合求取传感器标度和零偏并输入结果,结果与后台模型比较,并根据误差大小进行给分; 拟合求取传感器标度重复性并输入结果,结果与后台模型比较	4	■实验报告
18	按照步骤完成迟滞实验的数据采集。	4分钟	按照操作要求正确完成采集,有不当的实验行为扣分	2	■操作成绩
19	根据采集的数据完成迟滞实验的计算。	4分钟	拟合求取传感器的迟滞并输入结果,结果与后台模型比较	2	■实验报告

20	根据量程选择正确的激励幅值；按照步骤完成所设激励幅值振动数据的采集。	4分钟	根据设计的加速度计量程选择激励幅值，选择值需与传感器的量程相当；按照操作要求正确完成采集，有不当的实验行为进行扣分	2	■操作成绩
21	根据输出曲线计算带宽、固有频率和阻尼比。	15分钟	按照知识角的公式求取传感器的带宽、固有频率和阻尼比，并输入结果，结果与后台模型比较，并根据误差大小进行评分。	6	■实验报告
<b>应用实例</b>					
22	根据任务目标计算相关的参数	3分钟	后台运行数学模型对学生计算值进行判断。	2	■操作成绩
23	完成传感器安装	2分钟	根据任务目标的不同，选择传感器的安装方式，包括安装位置和安装方向。安装错误将影响应用效果。	3	■操作成绩
24	根据实测结果与理论值的对比曲线分析确定所设计传感器的误差源，并返回设计环节进行迭代设计	5分钟	后台运行有应用过程理论模型和根据传感器参数计算的测量模型，通过模型计算结果对比评价传感器设计优劣	5	■实验报告

## (2) 交互性步骤详细说明

**步骤 1:** 认知环节包括传感器应用场景认知、结构及工作原理认知两部分。传感器应用场景认知通过六个经典的 MEMS 加速度传感器应用案例，配以动图的形式，形象生动的再现了传感器的应用场景。3-2 (a) 是实验的首页，可以从中选

择所需的流程；3-2（b）给出了加速度计在不同场合应用案例的介绍。



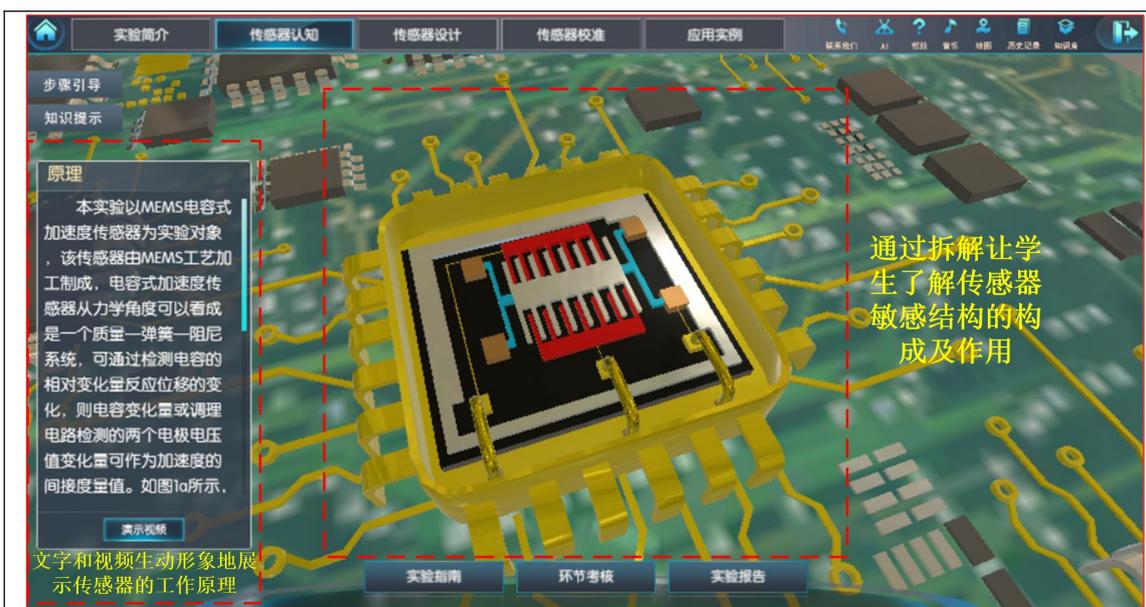
(a)



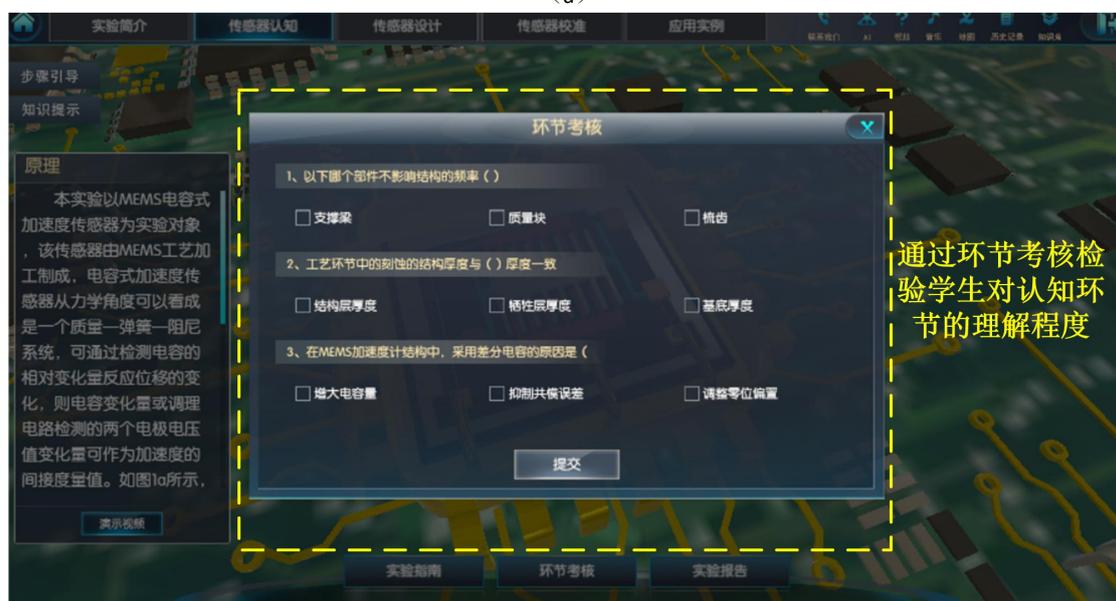
(b)

图 3-2 虚拟仿真实验总界面（a）和应用认知界面（b）

**步骤 2:** 除了应用认知，在实验开始前，实验简介还包含实验的背景、目的及操作流程的介绍，并形象化地展示了 MEMS 电容式加速度传感器的工作原理及敏感结构组成，最后通过环节考核的方式给出相关认知部分的思考题。其中，3-3（a）展示了了传感器结构和工作原理的认知部分，3-3（b）展示了环节考核的内容。



(a)



(b)

图 3-3 结构及工作原理认知 (a) 和认知环节考核 (b)

在认知环节后，学生进入传感器设计环节，该环节包括在 MEMS 加速度传感器结构设计、测控电路设计以及工艺加工三个环节，具体的交互步骤如下。

**步骤 3:** 在点击结构版图设计后，会随机产生一组需要学生设计的传感器性能参数，学生以该性能参数作为设计目标开始结构版面设计与测控电路模块设计。图 3-4 (a) 为传感器结构与电路设计首页，3-4 (b) 为随机生成的设计指标。设计指标分为大量程 30g 和小量程 2g 两种。



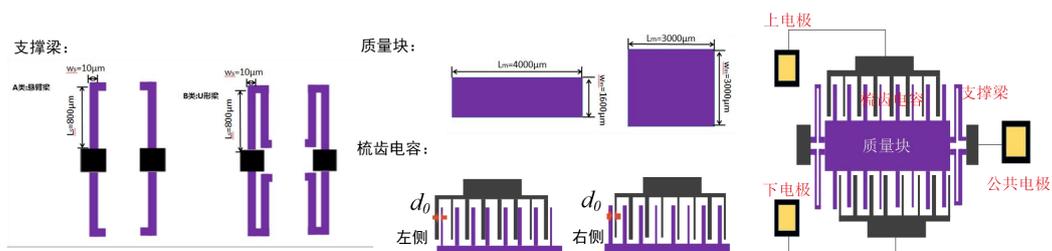
(a)



(b)

图 3-4 传感器设计环节首页 (a) 及设计目标展示 (b)

**步骤 4:** 根据设计目标与敏感加速度的方向，学生在元件库中拖动对应尺寸的结构元件，选择不同几何参数的梳齿电容（二选一）、支撑梁类型（二选一）、质量块、电极及摆放位置，根据指定敏感加速度方向在中间画布中设计敏感结构，搭建 MEMS 电容式加速度传感器结构基本框架，如图 3-5 所示。



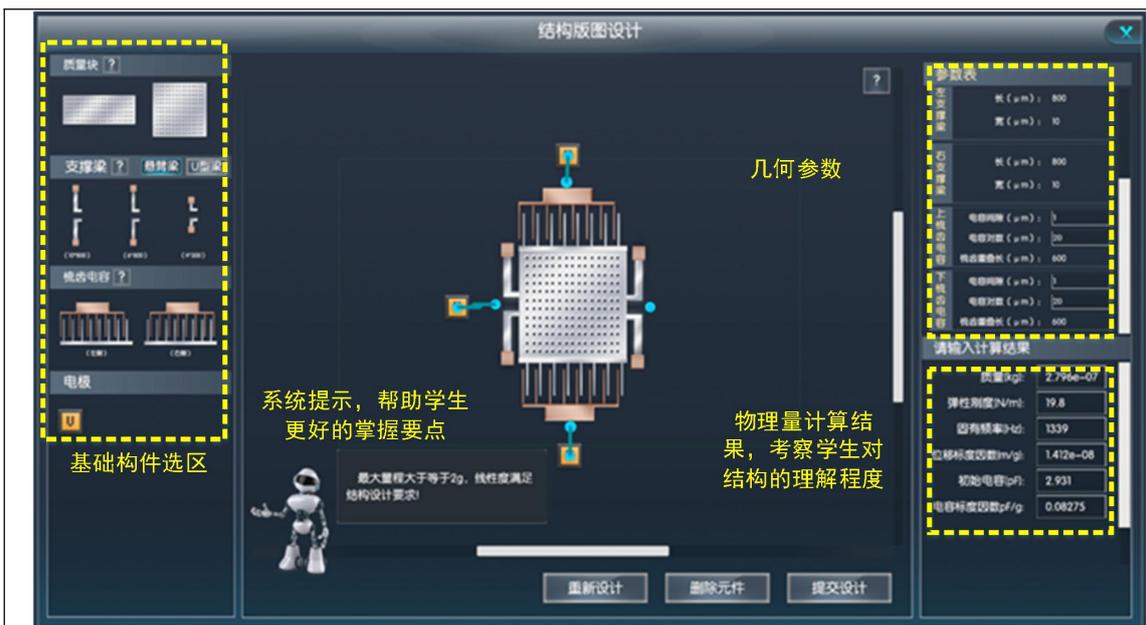


图 3-5 传感器结构框架搭建示意图

**步骤 5:** 在敏感结构的搭建过程中，需要输入各组件的结构参数，包括质量块的长宽、梳齿电容的间隙和对数、支撑梁的尺寸等，在搭建完成后还可以在图 3-5 右侧的参数表中进行修改。在确定结构参数的基础上，学生根据所学知识计算敏感结构的输出参数，包括质量、弹性刚度、固有频率、初始电容和电容标度因数等，并将结果输入到图 3-5 的右下方位置。如果计算偏差不大，在提交设计后，会展示图 3-6 所示的结构设计输出。



图 3-6 结构设计输出结果

**步骤 6:** 学生在设计和加工形成的敏感结构基础上，根据应用需求确定技术指标，选择测控电路方案，并根据方案拖拽电路模块到画布上，使用导线进行模块互连，形成电路设计原理图，如图 3-7、图 3-8 分别是设计前和设计后电路原理框图。

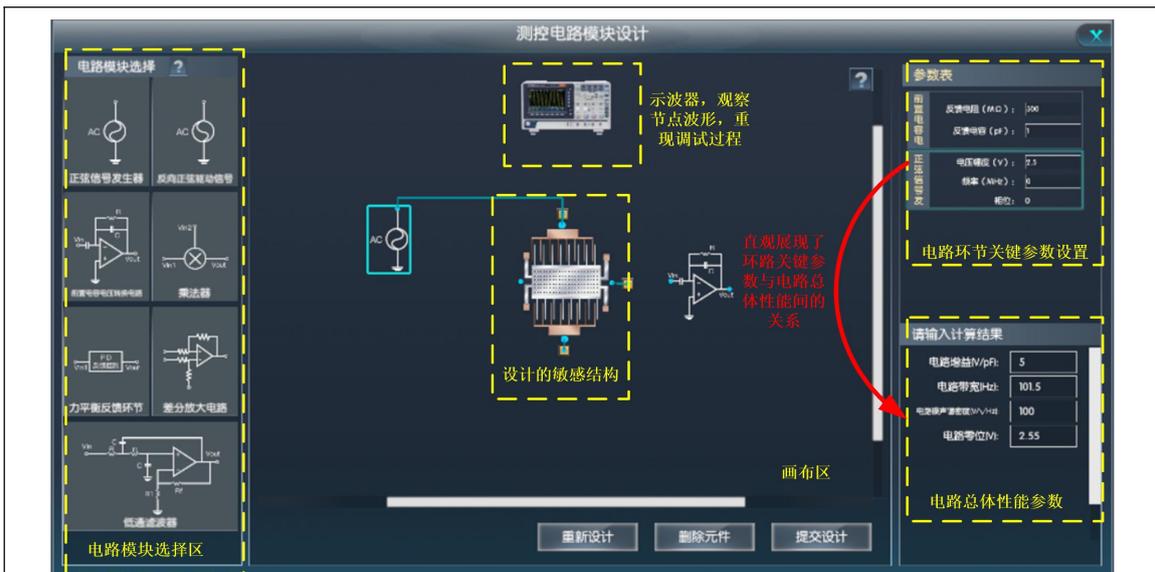
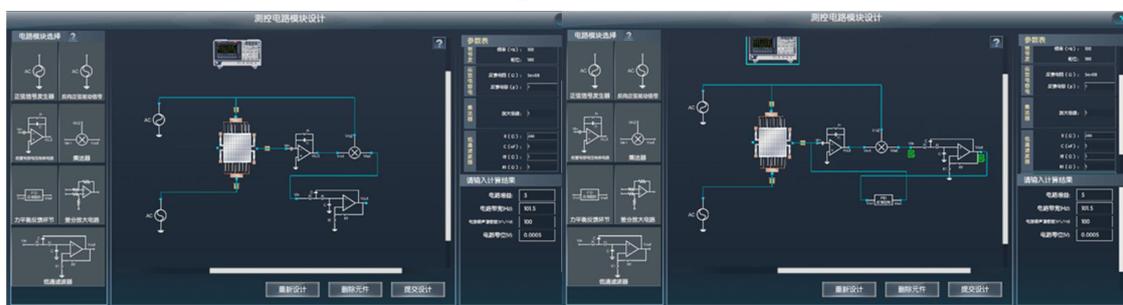


图 3-7 电路设计初始界面



双端激励单端检测方案

双端激励单端检测带闭环检测方案



单端激励双端检测方案

单端激励双端检测带闭环检测方案

图 3-8 通过提供基础构建, 学生可自由组合, 实现四种测控电路

学生可自由设计测控电路方案, 且有多种测控放啊可选, 如图 3-8 所示。在电路搭建过程中学生还可以通过鼠标点击查看各模块的功能及波形输出, 如图 3-9 所示。

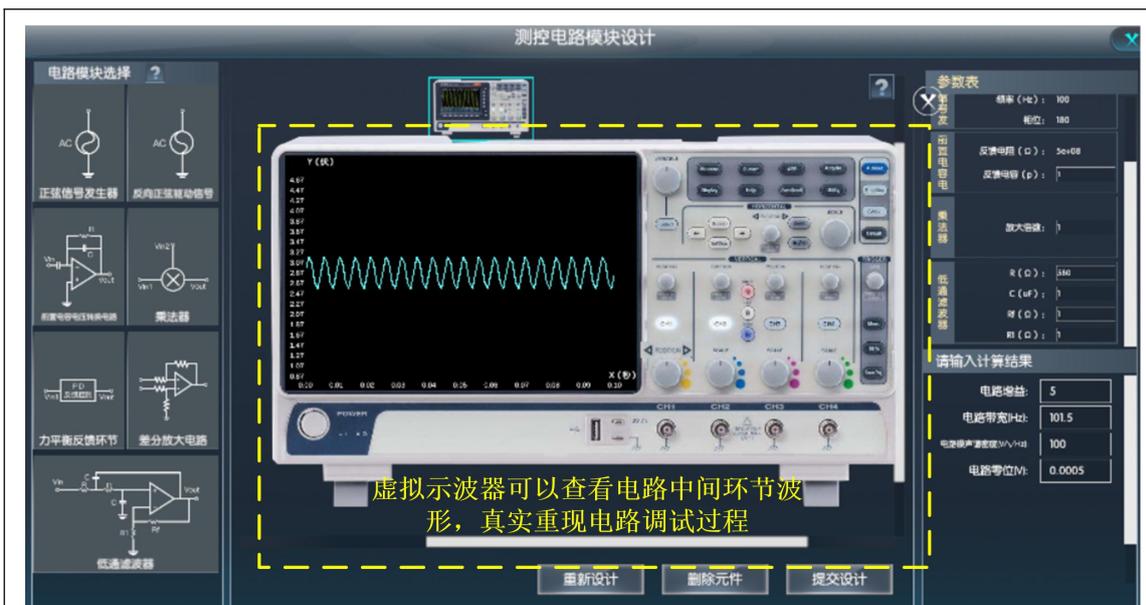


图 3-9 各环节节点的信号波形

**步骤 7:** 学生可根据指标要求和敏感结构的参数进行电路模块参数的设置，主要设置参数包括前置电荷放大器反馈电阻和电容参数的设置，低通滤波器参数的设置等。设置的参数将直接影响测控电路的增益、带宽和噪声水平，间接反映学生参数设置的优劣及对测控电路的理解。



图 3-10 电路参数优化迭代

**步骤 8:** 在确定电路环节关键参数后，学生可根据这些参数计算测控电路的主要性能参数，包括电路增益、带宽、零位、噪声谱密度等，这些电路参数与之前的敏感结构输出参数一起作为传感器的设计参数。如果电路性能参数输入偏差不大，可以点击提交设计按钮，而后点击“生成版图”按钮，将展示形成的电路版图和最终形成的电路总体参数，如图 3-11 所示。



图 3-11 形成电路版图的界面

**步骤 9:** 在完成结构和电路设计后，需要进入关键的加工环节，对设计的 MEMS 敏感结构进行加工。进入 MEMS 加工工艺环节后首先需要选择工艺流程，如图 3-12 所示，通过排序的方式让学生熟悉 MEMS 加工的全流程。



图 3-12 加工工艺排序

**步骤 10:** 首先进入光刻间，并进行晶圆选择。图 3-13 为晶圆选择界面。



图 3-13 晶圆选择及相关提示

**步骤 11:** 学生进入光刻环节；光刻包括两种光刻机台选择，分别为步进式光刻机和接触式光刻机；选择不同的机台会产生不同的工艺误差，导致最终的传感器性能差异；光刻中分为三个子步骤，分别是涂覆光刻胶/图形曝光/显影，如图 3-14 所示。

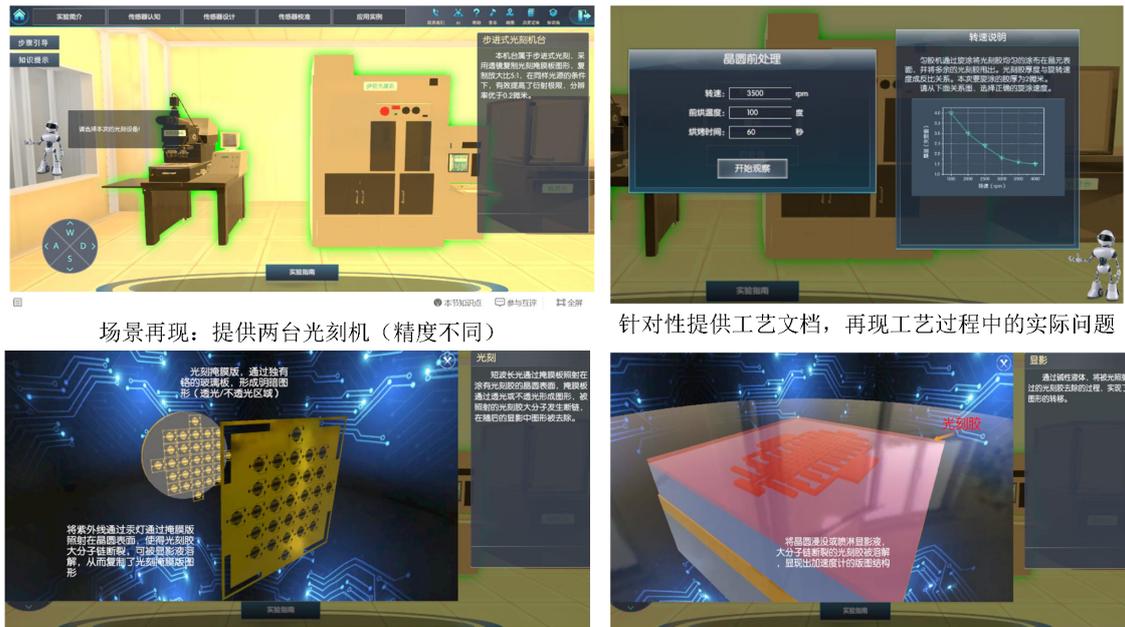


图 3-14MEMS 光刻工艺

**步骤 12:** 深硅刻蚀工艺环节，学生自行设定深硅刻蚀深度、刻蚀气体等工艺参数，点击鼠标，进入牺牲层释放环节，如图 3-15 所示。

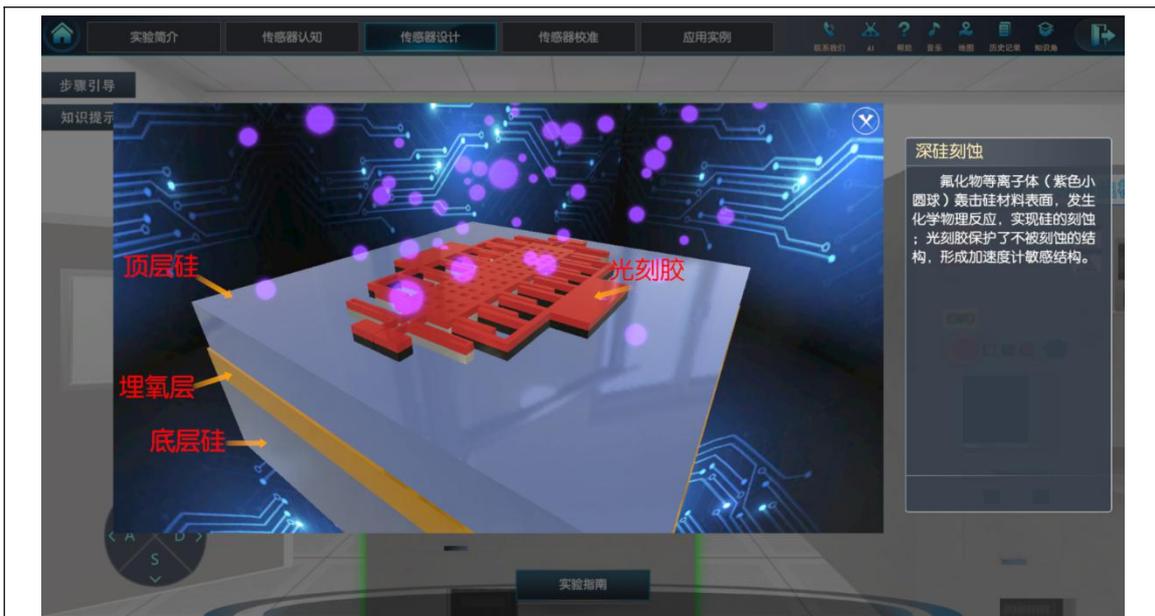


图 3-15 MEMS 深硅刻蚀工艺

**步骤 13:** 点击鼠标，进入干法释放工艺步骤，选择释放速度（一个参数），如图 3-16 所示。

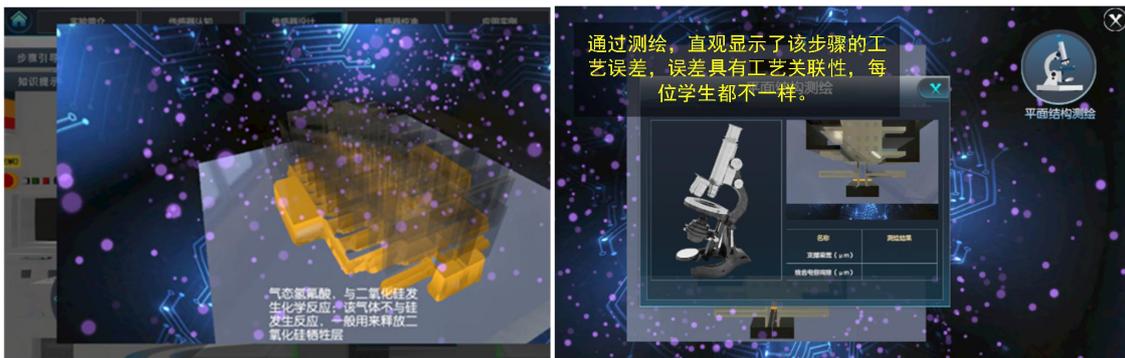


图 3-16 干法释放工艺

**步骤 14:** 点击鼠标，进入沉积金属层工艺步骤，选择金属厚度（一个参数），如图 3-17 所示。

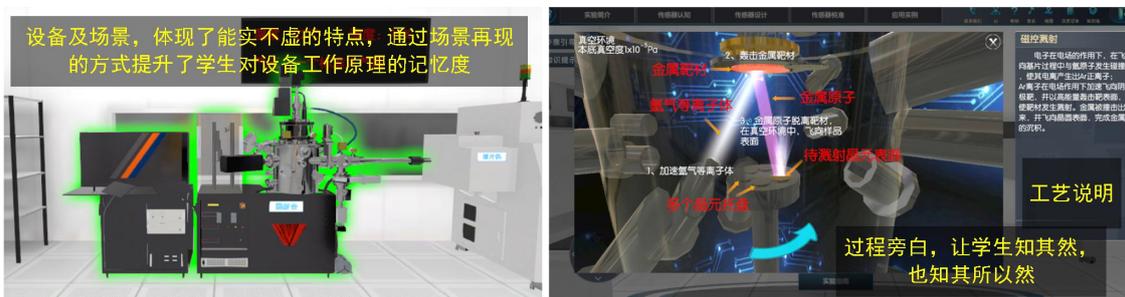


图 3-17 金属层沉积工艺

**步骤 15:** 学生引出信号线，需要将对应管脚和已有外壳关键相连；点击鼠标，进入真空封装，选择真空度（一个参数），如图 3-18 所示。



图 3-18 MEMS 引线与真空封装工艺

在完成传感器的设计和加工后，学生相当于得到了一个完整的传感器，下一步就是通过校准环节对传感器的性能进行测试。学生点击选择进入传感器校准环节。

**步骤 16:** 首先进行离心机静态校准，校准得到的参数包括标度因数及标度因数线性度等。学生选择静态标定环境，如图 3-19 (a) 所示。在离心机和精密线振动台上确定传感器安装位置及方向，见图 3-19 (b) 所示。



(a)



(b)

图 3-19 标定环境 (a) 和离心机 3 维示意图 (b)

根据显示的离心机杆臂长和对应的转动速率确定标定点的加速度，其界面如图 3-20 所示；先进行正向加速度实验，然后将 MEMS 电容式加速度计反向安装，进行反向加速度实验；分别给出正向实验和反向实验的输出平均值。



图 3-20 输入标定数据界面

**步骤 17:** 实验共进行 3 轮实验，得到 3 组测试结果；采用最小二乘拟合的方法，对输出平均值进行处理并画出如图 3-21 所示的静态标定曲线，得到 MEMS 电容式加速度计的标度因子、偏值和标度因子非线性。



图 3-21 加速度计标定因子及非线性特性实验界面

**步骤 18:** 完成离心机静态实验后进入传感器迟滞实验。实验界面如图 3-22 所示。同样等间隔设置 6 组标定点, 实验共三轮。



图 3-22 离心机迟滞实验

**步骤 19:** 在完成三轮往复实验后, 学生根据获得的实验数据计算传感器的迟滞特, 计算结果如图 3-23 所示。



图 3-23 迟滞特性实验结果

**步骤 20:** 点击进入振动台幅频特性环节。根据显示的精密线振动台的设置频率点和设置振动幅值 (1g 和 15g, 根据量程的设计, 两者选一), 其界面如图 3-24。从低频到高频输入正弦振动加速度 (正弦振动加速度的公式  $a = \text{幅值} * \sin(2 * \pi * \text{频率})$ )。

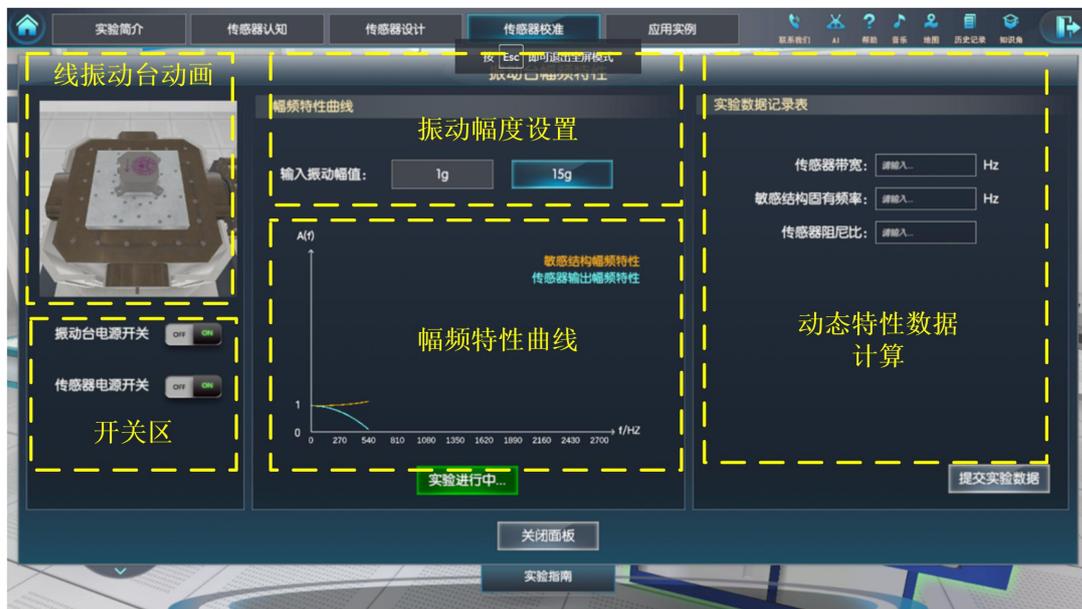


图 3-24 加速度计动态标定输入参数界面

**步骤 21:** 记录实测输入输出值, 得到加速度计在各个频率点的幅度; 学生根据加速度计的幅频曲线, 如图 3-25 所示, 计算出加速度计的工作带宽 (敏感结构和电路), 敏感结构的固有频率以及阻尼比。



图 3-25 加速度计的频响特性示意图

传感器校准后进入应用实例环节。应用实例根据传感器设计不同量程 (2g 和 30g), 对应其中的某一应用对象。

### 加速度计典型应用部分——(1) 火炮发射角测量应用场景 (2g)

**步骤 22 (2g):** 展示实验任务目标和应用环境, 如下图 3-26 所示。

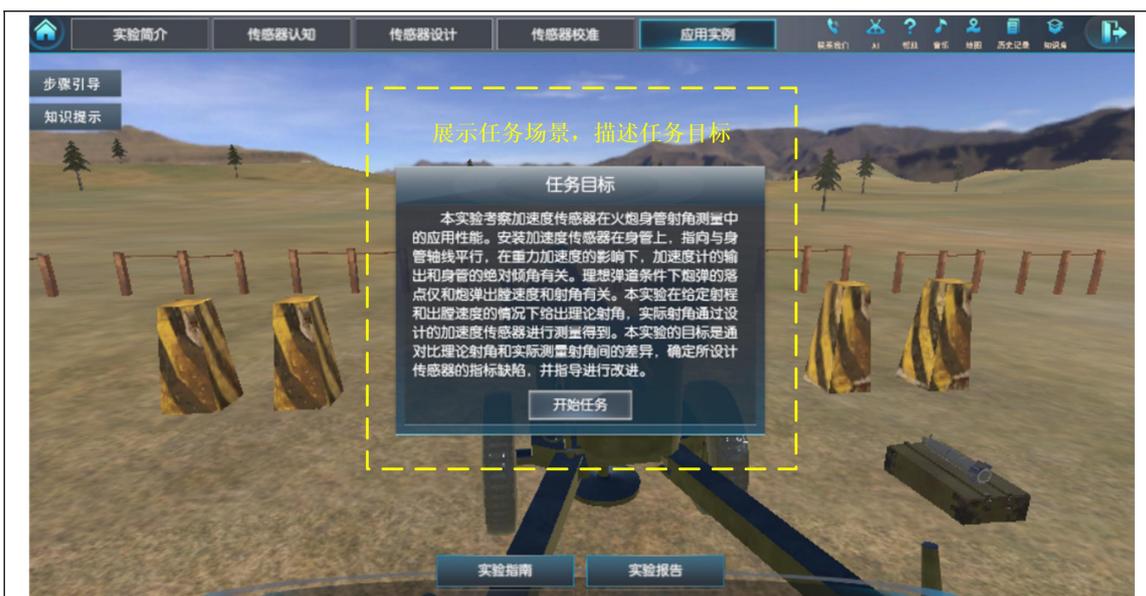


图 3-26 应用案例的任务目标

点击“开始任务”，展示射击目标及前面设计加速度传感器的关键参数，随机产生的设计目标包括射程和初速两个参数，在两个参数已知的条件下，射程仅和发射角相关，根据前面的条件计算理论发射角。而实战中，往往是通过实时测量发射角，在装填药满足初速条件的基础上，追求希望的射程。本实验就是通过是否命中目标，来间接评判传感器对发射角的测量精度，当测量发射角和理论发射角相差不大时，炮弹能够命中目标。设计目标和传感器参数如图 3-27 所示。

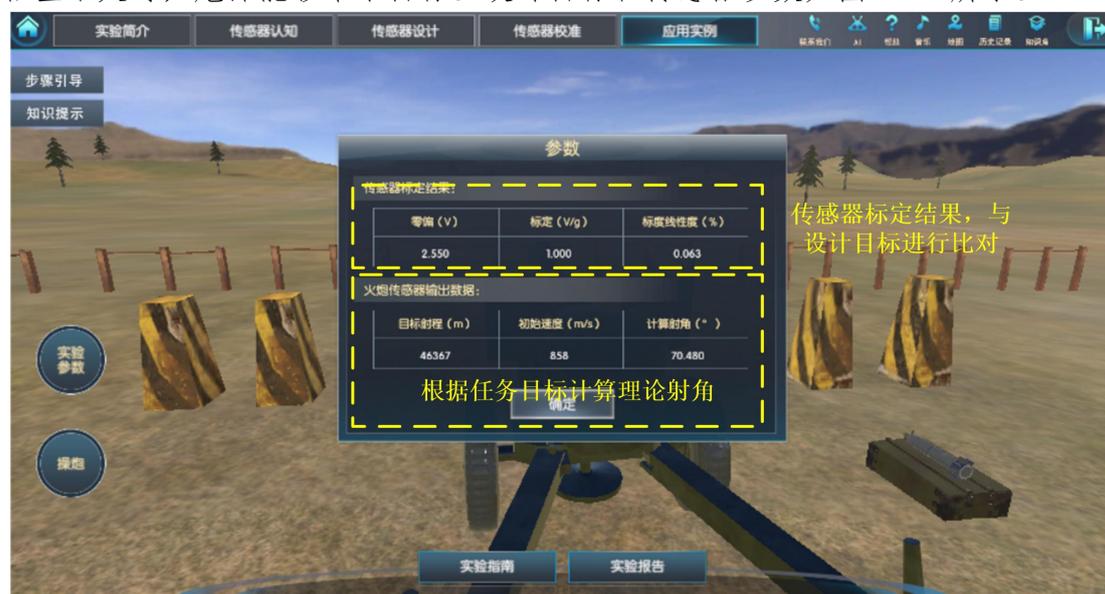


图 3-27 设计目标及传感器参数界面

**步骤 23 (2g):** 点击“确定”进入操炮环节。该环节模拟火炮操炮手打击目标的过程，通过操纵炮管仰角达到打击预定目标的过程。点击“操炮”进入传感器安装环节。我们通过安装传感器代替传统的读取角度刻度盘的方式，可为自主装填发射提供技术支撑。点击“传感器安装后”，火炮炮管中心区域高亮显示，点击高亮区域可以开始安装传感器，如图 3-28 所示。由于加速度传感器测量倾角的原理是利用重力矢量及其在加速度计轴上的投影来确定倾斜角度。安装传感器时要保证传感器的敏感轴方向与火炮炮管的指向平行，保证传感器测量的倾角是炮管的发射角。

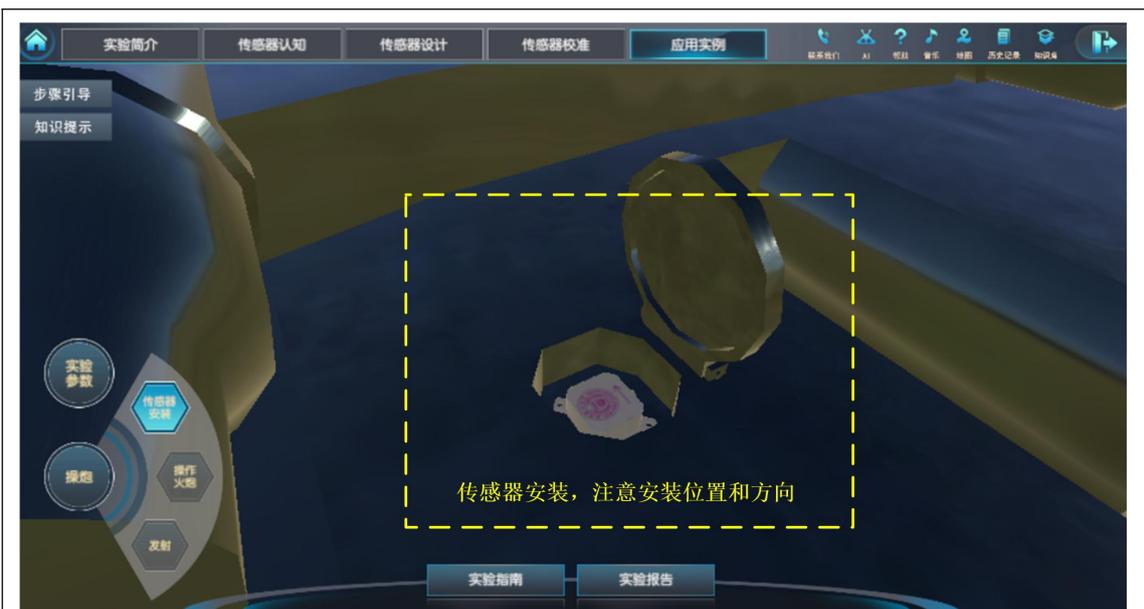


图 3-28 操炮过程中传感器安装环节

**步骤 24 (2g):** 点击“操作火炮”，火炮炮管缓缓升起，并最终停在传感器测量得到的目标射角上，如果传感器设计没有问题且误差较小，则该测量射角与理论射角应该保持一致。在火炮操作过程中，右侧会实时显示加速度传感器的输出值以及利用该输出值计算的倾角测量值，如图 3-29 所示。

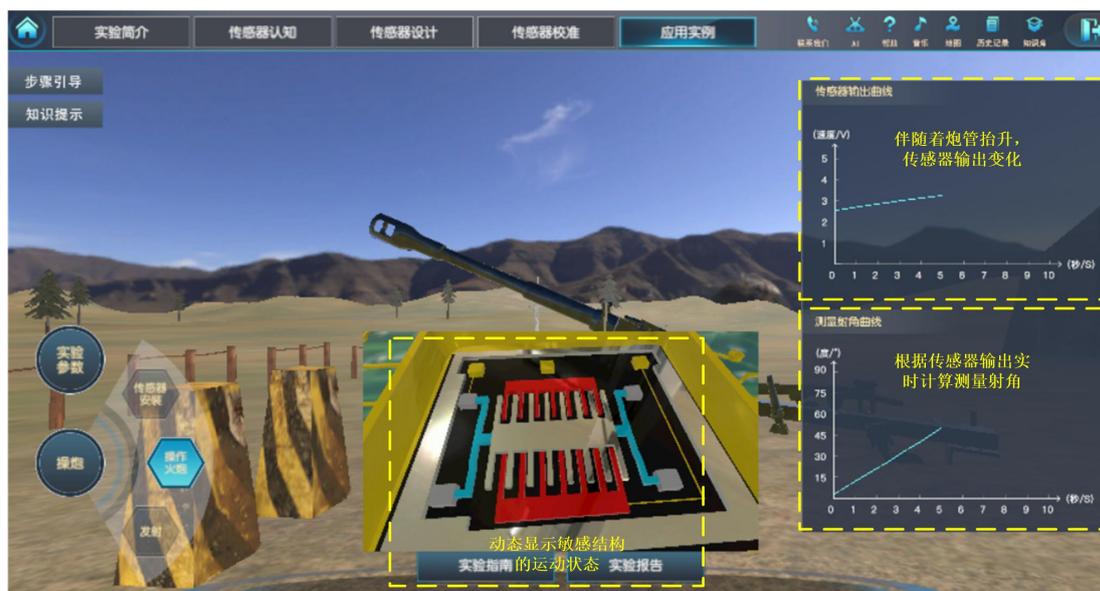


图 3-29 操炮过程中传感器输出及对应倾角

点击“发射”按钮，进入炮弹发射环节，视角进入发射区的侧面，左面显示射击目标，中间会显示一条虚线的弹道轨迹，该轨迹是根据发射条件和测量得到的发射角计算的一条轨迹线，炮弹落地后会显示“理论射角和发射射角的对比曲线”，如图 3-30 所示。如果测量射角与理论射角间的偏差大于 10%，则将无法命中目标。

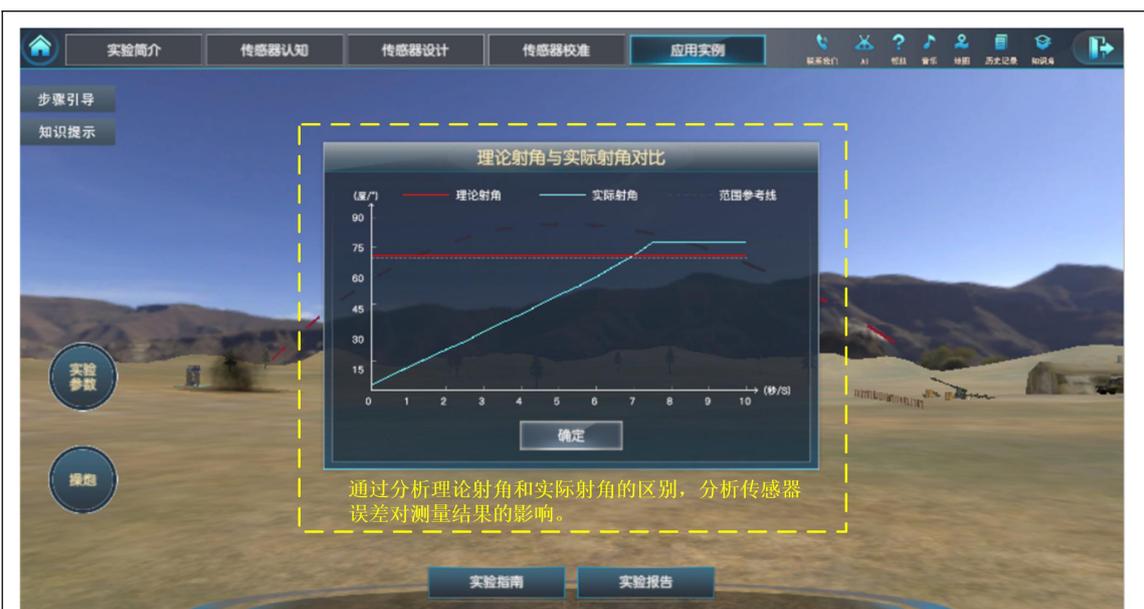


图 3-30 理论射角与实际射角的对比曲线

实验结果展示，如果传感器设计得当，会显示“命中目标，请整理实验报告”，如果传感器关键参数设计超差，将展示“未命中目标，设计的传感器 XXX 超差，请返回设计环节修正后重试。”其中 XXX 为传感器的关键参数，主要包括标度因数、零位和标度因数非线性等三个指标。后台会对设计的传感器进行评估，并指出传感器超差的参数。如图 3-31 所示。学生也要根据实验现象分析，传感器参数超差对设计效果的影响，并返回到设计环节进行设计改进。



图 3-31 结果显示及超差反馈提示

## 加速度计典型应用部分——（2）炮弹转速测量应用场景(30g)

**步骤 22(30g):** 之前的设计实验考虑的是真空弹道，并且忽略了炮膛磨损、火药起爆差异等因素，实际的火炮发射具有偶然性，落点也会散布到一个比较大的圆圈内。现在智能弹药希望对炮弹运行中的外弹道参数进行实时测量，并通过鸭舵、喷嘴等执行机构对弹体的飞行姿态进行实时控制，以提高打击命中率。而炮弹转速是一个关键的测量参数，由于炮弹的转速一般比较高，利用陀螺仪测量弹体的旋转角速率面临着传感器量程不够的问题，利用加速度传感器测量旋转的离心加速度并间接解算弹体转速的方法具有很好的应用前景。本实验通过大量程加速度传感器实时测量转速的精度来评价传感器的设计性能。图 3-32 所示，展示“任务目标”和应用场景。



图 3-32 应用案例的任务目标

点击“开始任务”，展示设计目标和根据设计目标确定的炮膛出膛转速，如图 3-33。该转速根据炮弹外弹道的经验公式获得，并呈现逐步衰减的趋势。另外展示前面设计传感器的标定结果，利用刚体绕定轴旋转时，离心加速度与转速间的关系可以通过测量加速度的方式间接获取转速，但传感器中的关键参数误差会对转速测量结果产生影响，而转速测量误差将影响实时修正的结果，造成炮弹脱靶。



图 3-33 设计目标及传感器参数界面

**步骤 23(30g):** 点击“确定”，进入操炮环节，首先点击“传感器安装”，右侧的炮弹高亮显示。根据测量原理，传感器需要安装在炮弹横截面内，且方向指向横截面圆心（反向也可以）。点击“炮弹”高亮区，炮弹断开显示横截面和传感器安装过程，且标注传感器与圆心间的距离为 30mm，如图 3-34 所示。学生再根据前面的转速可以计算旋转过程中的最大离心加速度，并评价设计传感器的量程指标是否满足要求。

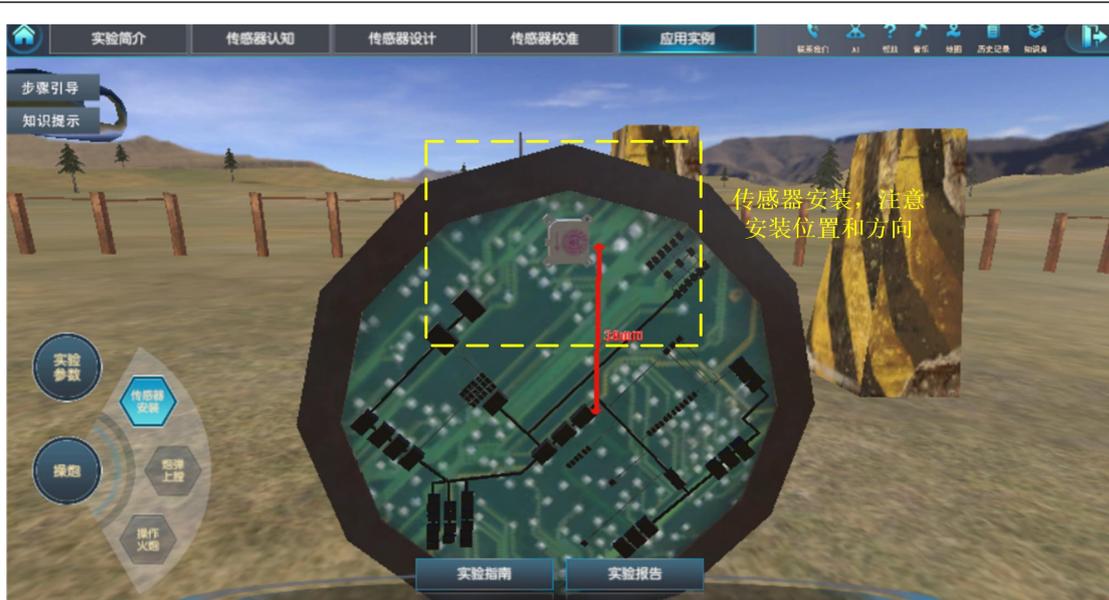
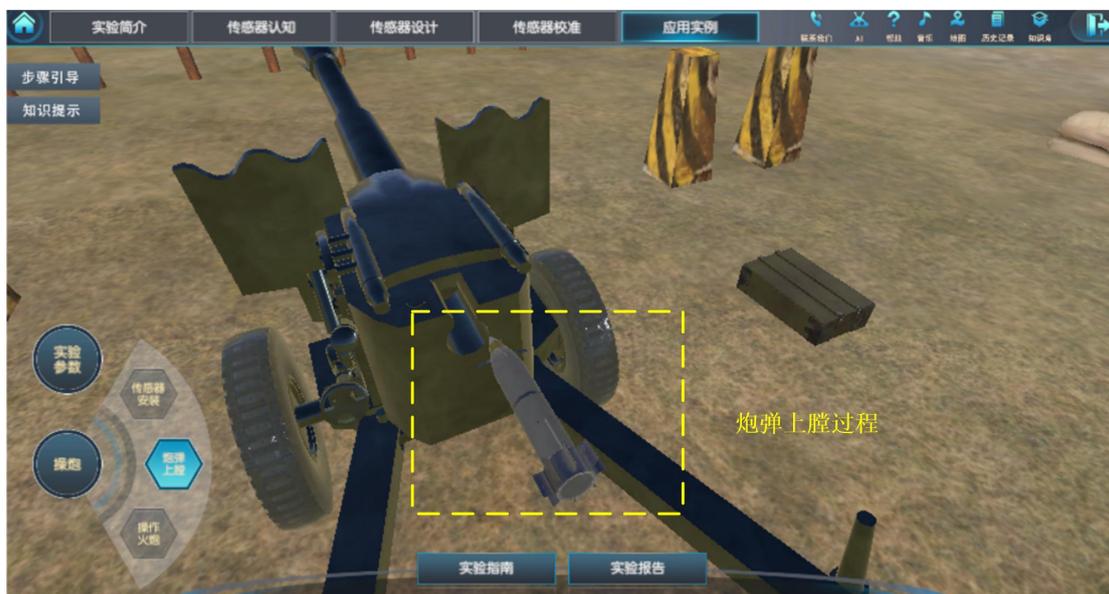
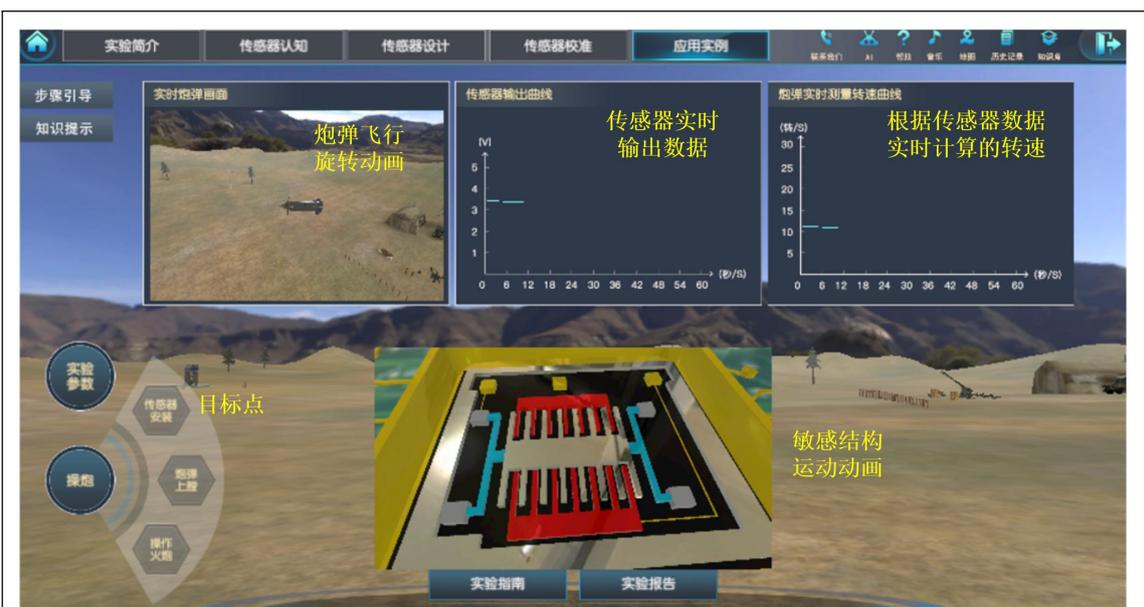


图 3-34 操炮过程中传感器安装示意图

**步骤 24(30g):** 点击“炮弹上膛”, 动画展示炮弹装填的过程, 如图 3-35a。点击“发射”按钮, 视角切换到发射区侧面。除了会展示目标区和火炮发射区之外, 在上面还是对炮弹出膛旋转过程给出特写镜头, 并实时给出传感器输出曲线和根据传感器输出计算的转速测量值, 如图 3-35b。在此之后会展示炮弹落地过程, 并对是否命中目标进行评估。



(a) 炮弹上膛动画界面



(b) 传感器输出曲线和相应计算的转速测量值

图 3-35 炮弹上膛动画示意与转速测量

如果传感器设计参数合理，则将展示“命中目标，整理实验报告”的结论，如果没有命中目标，和前面的实例一样，也会给出传感器某个设计参数超差的提示，并要求学生返回到前面的设计环节进行设计修正。为了帮助学生发现问题，在实验结束后，同样会显示“炮弹实时转速测量曲线和理论转速曲线”的对比图，并将偏差 5%作为评价标准，只有当传感器的设计参数保证转速测量结果与理论转速偏差小于 5%，学生才能得到转速测量合格的评价。其界面如图 3-36 所示。

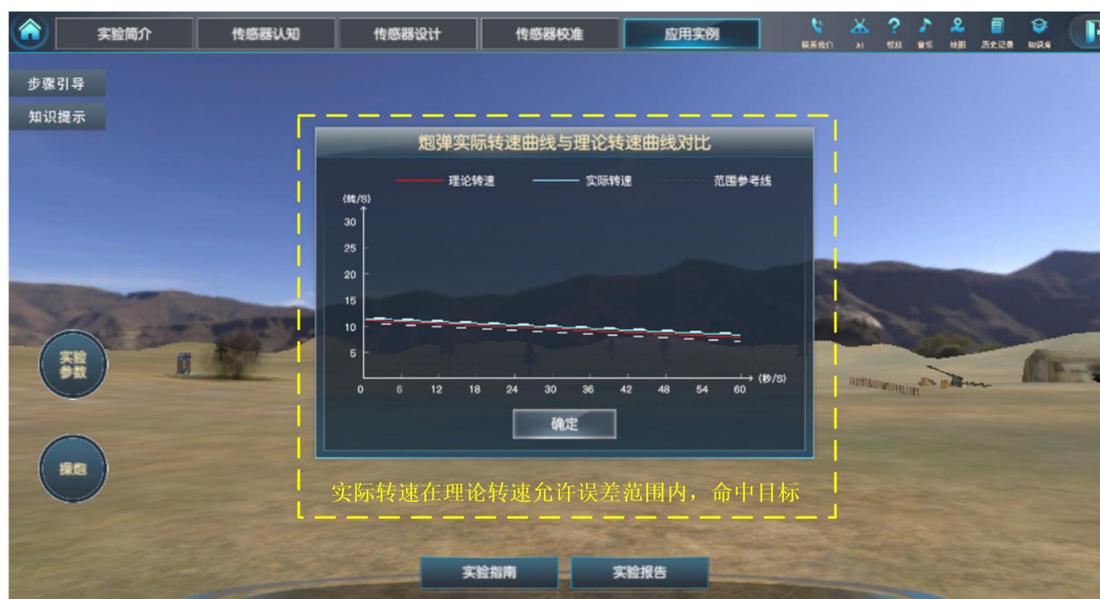


图 3-36 结果显示及超差反馈提示

### 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）

是否记录每步实验结果：  是  否

(1) 实验结果与结论要求：■实验报告 ●心得体会 其他

(2) 其他描述

本实验为学生随机选择 2g 和 30g 两种不同量程的加速度计作为实验对象,并在给定性能参数设计目标的前提下要求学生完成加速度传感器的设计、加工、标定和应用四个实验环节,其中设计环节又包括了敏感结构设计和测控电路设计两个环节。实验过程中需要学生设计的诸多参数,包括加速度计的结构参数,测控电路参数、制作工艺中的设备参数等,都会直接影响传感器最终的性能参数。学生在设计加工完成后,可以通过静、动态标定实验环节对传感器的性能参数进行标定计算。最终再通过应用案例实验环节对传感器性能进行验证,由于每名学生设计的传感器性能都不相同,实验系统设置了 5%作为设计门限,只有当设计的传感器多个关键参数的误差均满足 5%偏差要求时,所设计的传感器才能通过实验验证。针对不同量程的传感器,应用实例也是不同的,2g 量程的加速度计被用来测量炮管的射角,30g 量程的加速度计被用来测量炮弹的转速。另外,每种应用实例的任务目标对学生来讲也不相同,具体来讲就是炮射的射程和初速不同,学生需务目标计算炮管射角的理论值,并采要根据自己的任用设计的加速度计对该角度进行测量,理论值和实测值间的差异直接反应了设计传感器指标参数与设计目标的差异。通过应用实例的结果分析,当设计传感器存在设计指标超差时,实验系统会给出提示,并指出可能的设计误差来源,引导学生返回设计环节对参数设置值进行优化,进而得到更加符合设计目标的传感器,并可在应用实例环节反复进行验证。

### 3-8 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

测控技术与仪器、机械工程本科三年级及以上年级。

(2) 基本知识和能力要求

掌握一定的机械设计,传感器原理及应用,测控电路设计等相关知识。

### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2019 年 10 月 11 日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校 180 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：2，具体专业：测控技术及仪器，机械工程

教学周期：2 次/年，学习人数：180 人。

(4) 是否面向社会提供服务：●是 ○否

(5) 社会开放时间：2020 年 10 月 20 日

(6) 已服务过的社会学习者人数：62 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）

本实验秉承以“学生为中心，服务于社会”的发展理念，培养符合“新工科”建设要求。主要应用于测控工程与仪器类专业的本科教学实验工作，服务于机械工程、兵器工程专业的学生。

### (1) 实验方案设计思路

#### ①多学科跨专业设计实验

首次突破专业课程界限，以设计加速度测量系统为主要任务，综合机械结构设计，MEMS 制作加工工艺（多学科交叉现象极其明显），模电设计，校准与数据处理等，系统学习加速度传感器相关知识，提升实验教学水平。

#### ②任务驱动设计实验

根据设计任务要求，学生以设计者的身份参与到高逼真度的虚拟仿真环境。整个实验设计了四个逐层递进的实验项目，从 MEMS 及加速度传感器原理认知，到加速度测量系统的设计分析与验证，最后是应用过程模拟。能够激发学生科研兴趣，培养学员科研思维，实现科研反哺教学，为培养高素质新工科型人才提供

有力支撑。

### (2) 教学方法创新

通过虚拟仿真技术，建设知识体验式、时空开放性、能力多元化的虚拟仿真实验。将研讨式（构建贴近生活中 MEMS 加速度计应用虚拟场景，提出有思考价值的问题，引导学生研究、讨论，开展 MEMS 加速度计的认知与设计。）、任务驱动式（根据实验设计的三项主要任务开展相关实验，使学生和 MEMS 加速度传感系统进行“零距离”接触。）、交互式（利用虚拟现实交互功能进行 MEMS 传感器系统设计实验，让学生自主参与到教学中来，最大限度地发挥学生的主动性和创造性）、沉浸式（提供全面的 MEMS 生产加工视觉工具，设计显微放大、动画等各类综合展示方式，让学生有身临其境开展 MEMS 生产活动之感）以及探索式（针对同一组任务，学生可以开发不同的测控方案，并探索方案可行性，充分体现实验教学多元化结果输出的特点）教学方法应用于虚拟仿真系统实验教学，结合调研、归纳、推演法和比较等实验手段，实现高阶性、创造性和挑战度兼具的“两性一度”金课标准。

### (3) 评价体系创新

主要以“任务完成度和质量”为评测依据。采用的评分方法中，一般会以知识点学习时间，计算正确率、操作次数，完成时间等象征知识点掌握程度的量化指标作为评分重要依据。注重学生对知识点掌握，动手能力及分析问题的能力的评价。

## 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

■支持与服务群 ●其他

(4) 6名提供在线教学服务的团队成员；4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3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）

带宽要求：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，最大限度地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：

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%；

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常有发生，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

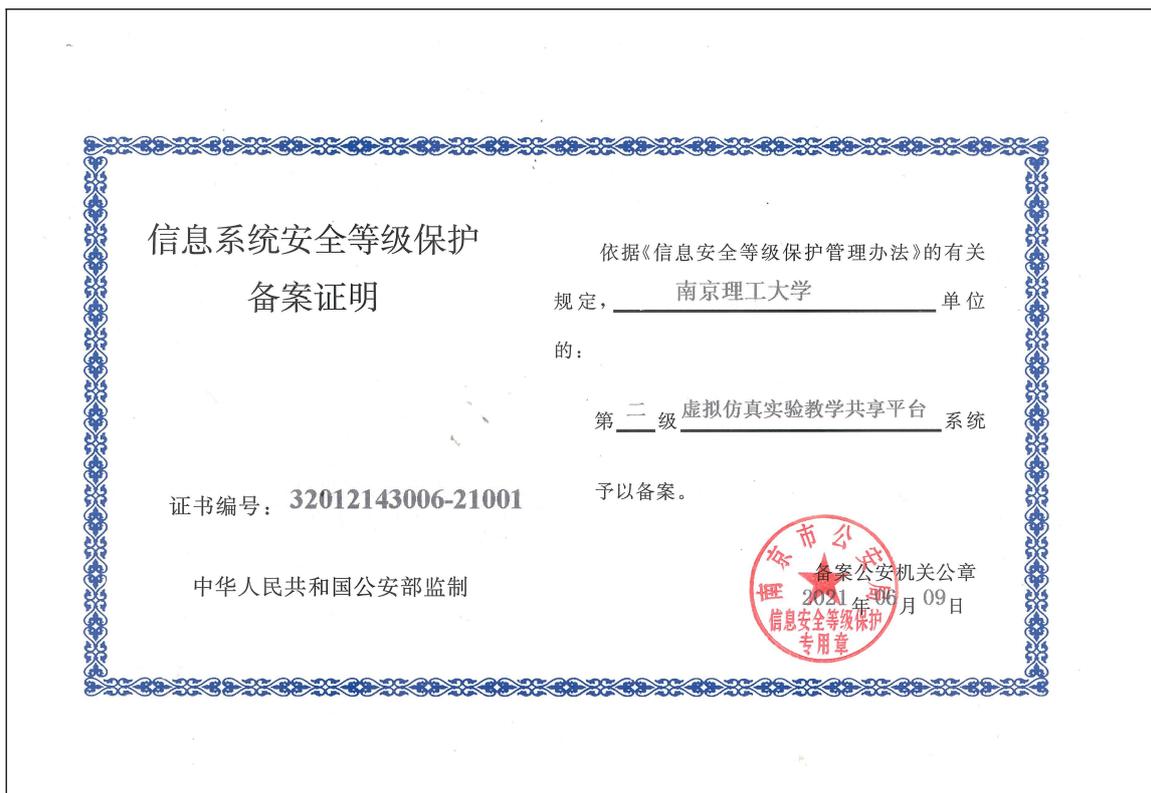
下载链接：

(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）

学生需要在 Windows7、Windows8、Windows10 系统环境下，使用以下浏览器打开：

浏览器类型	支持 WebGL	不支持 WebGL
Mozilla Firefox 52 及以上版本	支持	
Google Chrome 57 及以上版本	支持	
Apple Safari 11 及以上版本	支持	
MS Edge 16 及以上 版本	支持	
360 浏览器	基于（Chrome）内	基于（IE）内核，

	核，并且 开启极速模式、智能开启硬件加速情况下支持存在右键划线问题，属于浏览器自身设置原因，关闭浏览器鼠标手势即可	不支持
<p>浏览器:Google Chrome</p> <p>下载地址: <a href="http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe">http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe</a></p>		
<p><b>6-4 用户硬件配置要求</b>（如主频、内存、显存、存储容量等）</p> <p>(1) 计算机硬件配置要求</p> <p>Web 端 用户硬件要求</p> <p>处理器: Intel (R) Core (TM) i5</p> <p>主频: 2.4GHz</p> <p>内存: 8GB</p> <p>显卡: NVIDIA GeForce GTX GT740 2G</p> <p>(2) 其他计算终端硬件配置要求</p> <p>无特殊要求，满足能上网功能即可。</p>		
<p><b>6-5 用户特殊外置硬件要求</b>（如可穿戴设备等）</p> <p>(1) 计算机特殊外置硬件要求</p> <p>无</p> <p>(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求: <input type="radio"/>无 <input checked="" type="radio"/>有</p> <p>如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求:</p> <p>无</p>		
<p><b>6-6 网络安全</b>（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）</p> <p>(1) 证书编号 32012143006-21001</p> <p>(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明</p>		



## 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	<p>本系统是基于B/S架构设计的虚拟仿真实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化部署还可实现自动扩容，无需人为干预。</p> <p>系统包含实验实训、实验报告、实验指南、数据统计、考试系统、帮助中心、收费系统、安全中心、资源中心、协同服务、学问系统和知识角等功能模块。系统除支持虚拟仿真实验外还可上传视频和其它文档资料，支持系统化课程体系学习。系统可对学生实验、学习数据做详细记录并分析每个学生的学习情况和整体学生知识掌握情况，实验报告系统可对学生提交的实验报告进行自动批阅也可由教师人工批阅或学生相互阅评。</p> <p>系统用户可分为教师和学生两种角色。教师可发布</p>

实验资源、建设实验课程、设置课程共享信息、可查看发布课程的学习情况、可批阅学生实验报告和考试。学生可报名参与课程，可观看报名课程的视频操作课程的实验资源，可查看个人的学习情况，可评价学习课程、参与课程讨论，可参与实验报告互评等。



实验 教学	开发技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ VR   ● AR   ● MR   ■ 3D 仿真   ● 二维动画   ● HTML5</li> <li>● 其他</li> </ul>
	开发工具	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unity3D   ■ 3D Studio Max   ■ Maya</li> <li>● ZBrush   ● SketchUp   ● Adobe Flash</li> <li>● Unreal Development Kit   ● Animate CC</li> <li>● Blender   ● Visual Studio</li> <li>● 其他</li> </ul>

运行环境	<p><b>服务器</b> CPU <u>16</u> 核、内存 <u>32</u> GB、磁盘 <u>1000</u> GB、 显存 <u>16</u> GB、GPU 型号 NVIDIA <u>GRID K1</u></p> <p><b>操作系统</b> <input checked="" type="radio"/>Windows Server <input checked="" type="radio"/>Linux <input checked="" type="radio"/>其他 具体版本：</p> <p><b>数据库</b> <input checked="" type="radio"/>Mysql <input checked="" type="radio"/>SQL Server <input checked="" type="radio"/>Oracle <input checked="" type="radio"/>其他</p> <p><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） 无</p> <p><b>是否支持云渲染</b>：<input type="radio"/>是 <input checked="" 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	在现有开放和运行经验上，完善加速度计虚拟仿真课程平台及对外开放共享平台建设；
第二年	收集加速度计在各种行业中的应用案例，补充和完善虚拟仿真实验中加速度计的应用环节。
第三年	继续完善和开发学习内容，丰富学习过程中测量精度以及操作过程中考核的题库。
第四年	随着 MEMS 加速度计结构不断出新，丰富结构模块库，电路模块库中的功能单元，
第五年	随着新型的 MEMS 加速度计制作工艺出现，补充和完善加速度计的制作工艺模块。

其他描述：未来5年中，与时俱进，对虚拟仿真系统进行持续不断的开发和更新，进一步增强虚拟仿真教学的研讨式、任务驱动式、交互性沉浸性、探索式、逼真性建设。并将人文因素、环境因素、工程创新思维与工程实践能力等因素进一步植入到实验教学系统中。

(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	3	100	3	50
第二年	5	150	4	80
第三年	7	200	5	110
第四年	9	250	6	130
第五年	10	300	7	150

其他描述：目前国内测控技术与仪器专业都是以传统传感器的设计为主，且都是利用PPT的形式进行讲解，为了提高学生们对MEMS传感器的兴趣及创新的能力，本虚拟仿真实验将依托各相关课程开展校际合作与互动，与江苏省内及其他省的兄弟院校进行合作与推广，预计五年后外校服务人数达年均300人次以上。

通过江苏省仪器仪表学会，中国电子学会微系统与传感技术分会，中国仪器仪表学会嵌入式仪表和系统技术分会，中国高等教育学会仪器科学及测控技术专业委员会，中国兵工学会测试技术专业委员会等多种渠道，在学会组织的相关会议上宣传和推广本虚拟仿真软件，使更多高校和企业了解本虚拟仿真实验的功能与特点。发挥学校学科优势，进一步与MEMS生产企业合作，共同开发，整合虚拟仿真实验教学项目和资源，持续增加新案例，进一步完善虚拟实验教学平台的网络化，面向社会推广，提高使用率，实现校企共赢。目前，随着国家对芯片的重视程度的大力加大，可以说虚拟仿真实验的推广应用，具有重大的社会效益。下图给出了社会推广的应用证明。

## 证明

我单位是一个以生产传感器为主的实体企业，南京理工大学开发的“MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验”贴合了时代发展的趋势，软件虚实结合。我单位员工认真学习了相关知识，通过该虚拟实验平台认真实践，员工们从传感器设计、生产加工工艺、电路设计、静动态标定（特性指标获取）、传感器应用等有了一个全面的认知，知识在全方位得到一个大的提升，对企业生产很有大的帮助。

特此证明

深圳市信为科技发展有限公司



二〇二一年六月九日

## 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	MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验平台
是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
<p>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。</p>	
著作权人	著作权人类型
	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	全部权利
软件著作权登记号	2020SR1081081（已授权）  

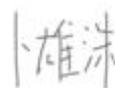
如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。

受理流水号

## 10. 诚信承诺

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）：

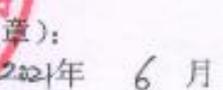


2021 年 6 月 10 日

## 11. 附件材料清单（见下页）

1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）
2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）
3. 校外评价意见（可选提供）

南京理工大学一流课程（虚拟仿真项目）思想政治审查表

虚拟仿真实验项目名称		MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验			
项目负责人	卜雄洙	职称/职务	教授	政治面貌	中共党员
团队主要成员	姓名	职称/职务			政治面貌
	苏岩	教授			中共党员
	朱蕴璞	副教授			群众
	王宇	副教授			中共党员
	吴志强	讲师			中共党员
	姜波	讲师			中共党员
	张晶	讲师			中共党员
项目内容简介	<p>MEMS 传感器是在微电子技术基础上发展来的多学科交叉的前沿研究领域。已成为世界瞩目的重大科技领域之一，是未来小型化传感器的发展方向。</p> <p>目前 MEMS 传感器的教学只能停留在书面教学层面，且普遍反映其内容“门楼太高”，主要是 MEMS 传感器设计难度大，结构复杂，制作工艺设备价格昂贵且对环境要求非常苛刻，校准试验受到场地及安全限制等实验教学的难题，因此只有通过虚拟仿真实验，才能把这一高新技术内容引进实验课堂，秉持“能实不虚”的原则，使学生深入了解 MEMS 加速度计的原理，掌握结构设计、制作工艺、电路设计到成品的每个环节与最终的传感器静动态特性指标之间的关系，同时多维度了解 MEMS 加速度计的典型应用场景，激发学生学习的兴趣，提高学生认知和分析推理能力，实现理论与实践良好结合的目的。</p>				
学院党委政审意见	<p>机械工程学院对申报《MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验》教学项目在院内进行公示，并审核实验教学项目的相关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，同时项目团队成员均遵守学校各项规章制度，无违反学校纪律行为。经学院党委评审评价，现同意择优申报。</p> <p>本实验教学项目如果被认定为“国家虚拟仿真实验教学项目”，学院严格按照认定后的管理要求，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。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，同时对其定期检查，对课程继续建设情况进行跟踪监督和管理。</p> <p>签字（盖章）： 2021年6月9日</p>				
学校党委审核意见	<p>情况属实。</p> <p>签字（盖章）： 2021年6月10日</p>				

注：学院党委须对项目团队成员情况进行审查，并对项目内容的政治导向进行把关，确保项目正确的政治方向、价值取向。

## 关于《MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验》

### 校外专家评价意见

南京理工大学卜雄洙教授主持的《MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验》线上实验教学成效显著,从实验课程体系到教学方法上都进行了富有成效的创新与改革。申报书系统介绍了实验目标、实验原理、实验教学过程与实验方法、实验步骤及实验评价方法等内容,满足了虚拟仿真实验“能实不虚”教学改革思路,符合“两性一度”的金课标准。该实验课程教学理念先进,应用效果显著,具有较高的学术水平,具体评价如下:

(1) 该课程以虚拟仿真实验的方式,把 MEMS 电容式加速度计的结构设计、加工工艺、调理电路、校准及应用案例进行展现,贴近工程实践,具有知识量大,系统性强,科学性高,综合性强等特点。

(2) 该课程将 MEMS 加工工艺引入本科生教学中,使学生们及时了解现代传感器复杂的工艺流程及先进加工设备的使用方法,体现了课程的前瞻性和挑战度。

(3) 该课程通过数学模型将结构设计、电路设计、工艺加工、校准和应用环节有机地结合起来,帮助学生更加深入地理解传感器性能参数与设计环节和加工环节的关系,有助于培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维。

(4) 采用了研讨式、任务驱动式、交互式、沉浸式、探索式教学等多种教学方法,激发了学生学习的主动性,提高了理论修养和实践能力,充分体现了现代教育思想,教学效果显著,在同类院校中有较好的影响。

因此,推荐该课程申报“国家级一流本科课程”。



2021年6月8日

# 关于《MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验》

## 校外专家评价意见

南京理工大学卜雄洙主持的《MEMS 电容式加速度计虚拟仿真实验》教学效果优秀，从课程实验体系到教学方法上都进行了富有成效的创新与改革。该实验瞄准国内外先进的教学体系、方法，反映学科最新发展成果和教改教研成果，使得课程教学改革具有创新性、高阶性、适用性，具有较高的科学性水平。

该实验以“MEMS 电容式加速度计”为设计对象，包含 MEMS 加速度计认知、结构和电路设计及制造工艺、加速度计校准和应用示例四个环节。围绕着传感器测量精度为核心要素，秉持“能实不虚”的原则，采用个性化定制模式，开放性任务，寻优式设计，激发了学生创新动力；实验逼真度高，一体化实验内容丰富，引导学生深度参与实验，激发了学生学习的积极性，提高研究兴趣，熏陶了科研素养，锻炼了创新思维；有效解决了 MEMS 电容式加速度计理论学习与工程应用脱钩的问题，提升了实验的挑战度和创新性，在潜移默化中锻炼了学生的工程素养与实践能力，可满足高校师生、研究开发人员和工程技术人员自主学习的需求。探索以学生为中心的课程教学组织新模式，提供有效的教学服务，及时对课程内容进行更新和完善。

该实验课程知识体系科学，资源配置合理，适合在线学习和混合式教学。其共享范围广，教学模式多样化，线上线下结合效果好，可有效地提高了教学质量，在同类实验课程中有很好的导向性和示范性。

因此，推荐其参加申报国家级一流本科课程。

专家签字：

2021



年

6

月

7

日