

2019 年度国家虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	南京理工大学
实 验 教 学 项 目 名 称	导弹末制导系统探测制导 虚拟仿真实验
所 属 课 程 名 称	探测制导与控制综合实验
所 属 专 业 代 码	082103
实 验 教 学 项 目 负 责 人 姓 名	盛卫星
有 效 链 接 网 址	http://mool.njust.edu.cn/course/details-expe/210.html

教育部高等教育司制

二〇一九年七月

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. 不宜大范围公开或部分群体不宜观看的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学项目教学服务团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况					
姓名	盛卫星	性别	男	出生年月	1966. 11
学历	研究生	学位	博士	电 话	025-84303845
专业技术职务	教授	行政职务	副院长	手 机	13851621551
院 系	电子工程与光电技术学院			电子邮箱	shengwx@njust. edu. cn
地 址	南京市孝陵卫 200 号			邮 编	210094
<p>教学研究情况：</p> <p>一、主持的教学研究课题：</p> <p>(1) 基于大数据的电子信息类人才个性化培养模式研究，江苏省教育厅，2017-2018</p> <p>(2) 电子信息类国际化拔尖创新人才培养模式的研究与实践，南京理工大学，2015-2016</p> <p>(3) 新工科背景下电子信息类创新人才培养模式改革的探索与实践，南京理工大学，2019-2020</p> <p>二、获得的教学表彰/奖励（不超过 5 项）：</p> <p>(1) 电子信息类国际化拔尖创新人才培养模式的研究与实践，江苏省教学成果二等奖，排名第二，2017 年</p>					
<p>学术研究情况：</p> <p>一、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）：</p> <p>(1) XXX 系统导引头/引信/数据链一体化技术研究，航天科工十院，2016-2020，负责人；</p> <p>(2) 导引头/引信 XXX 技术研究，航天电子科技有限公司，2013-2015，负责人；</p> <p>(3) XXX 导引头信号处理研究，航天电子科技有限公司，2007-2010，负责人；</p> <p>(4) 精确制导 XXX 设计与应用技术，军委装发部，2016-2020，主要完成人；</p> <p>(5) XXX 环境下综合抗干扰技术研究，军委装发部，2017-2020，主要完成人</p> <p>二、在国内外公开发行人刊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）：</p> <p>[1] Shurui Zhang, Weixing Sheng, Yubing Han, Xiaofeng Ma, Thia Kirubarajan. A low-complexity Laguerre wideband beamformer[J]. Digital Signal Processing, 2018, 83: 35-44.</p> <p>[2] B. Jiang, W. Sheng, R. Zhang, Y. Han, and X. Ma, "Range tracking method based on adaptive "current" statistical model with velocity prediction," Signal Processing, vol. 131, pp. 261-270, 2017/02/01/ 2017.</p> <p>[3] Wu Y T, Sheng W X, Han Y B. Fast and Accurate Evaluation of Double Surface Integrals in Time-Domain Integral Equation Formulations[J]. IEEE</p>					

Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(12): 5531-5536.

[4] Jiang B, Sheng W, Zhang R, Han Y, Ma X. Adaptive angle tracking loop design based on digital phase-locked loop[J]. Signal Processing, 2016, 125: 221-236.

[5] Jian Wang, Weixing Sheng, Yubing Han, Xiaofeng Ma. Adaptive beamforming with compressed sensing for sparse receiving array. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 823-833.

三、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）：

（1）导引头/引信 XXX 技术，国防科技进步三等奖，工业和信息化部，排名第3，2016年

（2）XXXXXXX 雷达，国防科技进步二等奖，工业和信息化部，排名第3，1997年

1-2 实验教学项目教学服务团队情况

教学服务团队中在线教学服务人员包含参与项目研发的教师和开设本实验课程的专职教师，技术支持人员为开发方指定的技术服务工程师。

1-2-1 团队主要成员（含负责人，5人以内）

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	盛卫星	电子工程与光电技术学院	教授	副院长	项目负责人，总体规划及设计	
2	郭山红	电子工程与光电技术学院	副研究员		第二负责人，实验模块1、2设计与维护	在线服务
3	张仁李	电子工程与光电技术学院	副教授		实验模块3设计与维护	
4	韩玉兵	电子工程与光电技术学院	教授		实验模块4设计与维护	
5	吴礼	电子工程与光电技术学院	讲师		实验课堂及线上教学、辅导	在线服务

1-2-2 团队其他成员

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	肖泽龙	电子工程与光电技术学院	教授		实验课堂及线上教学	
2	王宏波	电子工程与光电技术学院	副研究员		实验课堂及线上教学、辅导	在线服务
3	胡泰洋	电子工程与光电技术学院	讲师		实验指导书编写，线上教学	在线服务
4	张淑宁	电子工程与光电技术学院	教授		线上实验教学	

5	王静	电子工程与光电技术学院	工程师		实验课堂及线上教学、辅导	在线服务
6	王玮	电子工程与光电技术学院	工程师		虚拟仿真实验平台维护	
7	黄晓明	航天科工仿真中心	高级工程师		系统仿真设计，运行技术支持	技术支持
8	穆克强	航天科工仿真中心	高级工程师		系统仿真设计中的数学模型运行技术支持	技术支持
9	贾辈辈	南京恒点信息技术公司	高级工程师		仿真软件开发项目负责人运行技术支持	技术支持
10	吕恂旸	南京恒点信息技术公司	高级工程师		仿真软件开发项目总策划运行技术支持	技术支持
11	孙力	南京恒点信息技术公司	工程师		仿真软件程序设计，运行技术支持	技术支持
12	孙旭	南京恒点信息技术公司	工程师		仿真软件动画设计，运行技术支持	技术支持
13	何晶华	南京恒点信息技术公司	工程师		仿真软件模型美工设计，运行技术支持	技术支持
14	袁婷	南京恒点信息技术公司	工程师		仿真软件场景美工设计，运行技术支持	技术支持
项目团队总人数： <u>19</u> （人）高校人员数量： <u>11</u> （人）企业人员数量： <u>8</u> （人）						

注：1. 教学服务团队成员所在单位需如实填写，可与负责人不在同一单位。

2. 教学服务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

导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验

2-2 实验目的

(1) 实验开设的背景和意义

a) **导弹是兵器之王，国之重器**，是打赢高技术条件下现代化战争的杀手铜。**导弹武器系统方面的专业人才培养是国家国防建设的迫切需要**。南京理工大学的兵器科学与技术学科是国家“双一流”建设学科，在教育部最新一轮学科评估中排名全国第一，探测制导与控制专业是教育部“专业综合改革试点专业”、教育部“卓越工程师培养计划试点专业”。学校长期从事导弹武器系统的教学和科研，**服务国家战略需求，培养导弹武器系统方面的工程精英人才是南京理工大学的责任和使命**。

b) 在探测制导与控制本科专业的教学中，《近程目标探测原理》、《制导与控制技术》、《探测制导与控制综合实验》是专业的骨干课程，导弹末制导系统的工作原理、动态工作过程及总体设计是“探测制导与控制技术”兵器类专业的核心教学内容。这其中**导弹末制导系统探测、跟踪、制导、拦截和毁伤目标的动态过程，以及系统及信号处理参数对这个动态过程的影响，涉及到的理论知识点多、技术复杂，学生理解起来难度大**。

c) 导弹拦截目标的动态过程及探测制导系统设计对这一动态过程的影响**无法给学生开设实体实验**，不仅因为**代价太大**，还涉及到**难以解决的安全、保密、实验结果观测等问题**。传统上这部分教学内容多以理论授课为主，教学效率低、学生体验差。

本实验项目利用教师团队在导弹末制导系统教学和科研方面的长期的积累和前沿技术，将科研成果转化为实践教学资源，通过三维虚拟现实技术引导学生学习导弹、导引头和导引头信号处理的相关知识，通过虚拟仿真的手段让学生观察到导弹探测、截获、跟踪、毁伤目标的完整过程，观察、测量到系统参数对导弹末制导系统探测制导动态过程的影响，观察、测量到拦截过程中的弹目角度偏差曲线和制导精度。

本实验项目已进行脱密处理，所涉及到的图片、结构和系统参数、处理算法等均源自公开出版的教科书、已公开发表的文献和网上检索到的资料，**无涉密问题**。

(2) 实验目的

a) 帮助学生掌握导弹、弹上主动雷达导引头的组成、工作原理，**通过实际案例使学生深入观察导弹拦截目标的动态过程**，理解导弹探测、制导和拦截目标的机理；

b) 帮助学生熟悉雷达导引头威力方程的计算，**根据实验任务设计导引头**

主要系统参数,并观察、测量导引头系统参数对导弹拦截目标动态过程的影响,理解导引头主要系统参数的设计原则和设计约束;

c) 帮助学生熟悉雷达导引头的信号处理流程,掌握动目标检测、恒虚警处理、目标偏差角测量、制导律等关键的信号处理算法,根据实验任务设计导引头信号处理参数,并观察、测量导引头信号处理参数对导弹拦截目标动态过程的影响,进一步理解信号处理算法对导弹探测制导回路的作用机理;

d) 帮助学生了解导弹拦截目标动态过程的主要影响因素和误差指标,通过多参数组合优化设计,提高学生在导弹末制导系统总体设计方面解决复杂问题的能力。

2-3 实验课时

(1) 实验所属课程所占课时:

该实验所属课程为《探测制导与控制综合实验》,是探测制导与控制技术专业骨干实验课程,该课程总学时数为 40 学时,总学分数为 1 学分。实验课程对应的理论课程包括:《无线电近程探测系统》(总学时数 32)、《制导与控制技术》(总学时数 32)、《近程目标探测原理》(总学时数 32),这三门理论课均为专业必修的骨干课程。

(2) 该实验项目所占课时:

该实验项目所占课时为 6。

2-4 实验原理 (简要阐述实验原理,并说明核心要素的仿真度)

本实验项目通过虚拟仿真的手段仿真导弹拦截目标的动态过程,其原理框图见图 1。

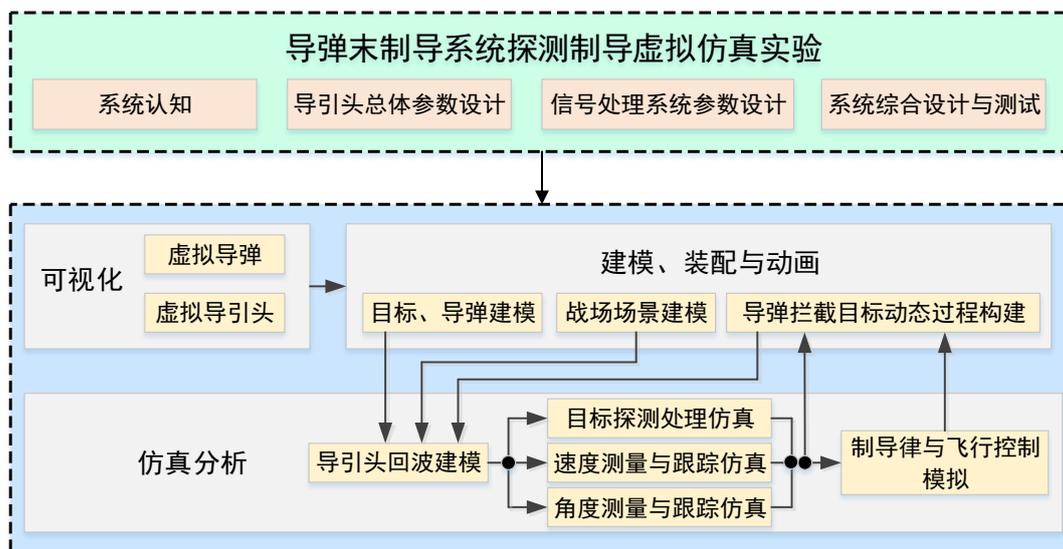


图 1 实验原理框图

在设置好导弹、目标的初始位置及运动参数等的基础上,雷达导引头回波信号模拟模块按照电磁波的传播规律,仿真计算弹上主动雷达导引头发射电磁波照射到目标后,产生的包含目标回波、噪声在内的导引头回波信号;然后导

引头目标探测处理仿真模块、速度测量与跟踪仿真模块、角度测量与跟踪仿真模块分别模拟弹上雷达导引头对接收到的回波信号的探测处理过程及速度、角度测量与跟踪处理过程；最后制导律与飞行控制模拟模块根据导引头探测、跟踪的目标数据和理论的制导律模拟导弹在舵机的控制下飞向目标并摧毁目标。整个导弹拦截目标的动态过程及过程中的测量误差以三维展示的形式实时呈现出来，供学生观测和分析。

(1) 导引头回波信号仿真原理

导引头接收的回波信号中含有目标回波信号（功率为 P_r ）和噪声（功率为 P_n ）两个部分。针对采用高脉冲重复频率脉冲多普勒体制的主动雷达导引头，接收机采用带有速度跟踪回路的窄带接收机时，目标的回波信号是一个窄带连续波信号，信号频率与导弹、目标的相对速度成正比，导引头检测前目标有效回波信号功率可按下式计算（参考《防空导弹雷达导引头设计》第 108 页）：

$$P_r = \frac{P_t d_s^2 G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s}$$

其中： P_t 为导引头发射脉冲的峰值功率， d_s 为发射脉冲波形的有效占空比（不考虑遮挡时，等于发射波形的占空比 d ）， G 为导引头天线增益， λ 为工作波长， σ 为目标的雷达散射截面积， R 为目标与导弹之间的相对距离， L_s 为导引头本身的传输损耗。

在此基础上，再考虑导引头天线对回波接收信号的影响。导引头天线阵面可划分为四个相互对称的区域（A、B、C、D，见图 2），相当于有四个小天线。同小天线 A 相比，小天线 B、C、D 与目标的距离存在着微小的差别，导致四个小天线接收到的目标回波信号存在相位差，根据目标相对导引头天线的空间角度及其几何关系，即可算出这些相位差。导引头天线有三个波束输出，分别是和波束、方位差波束和俯仰差波束，其中和波束输出信号为 $\Sigma=A+B+C+D$ ，俯仰差信号 $\Delta_\theta=B+D-(A+C)$ ，方位差信号 $\Delta_\phi=A+B-(C+D)$ 。这就仿真得到了导引头天线和波束、方位差波束、俯仰差波束三个天线的目标回波信号。

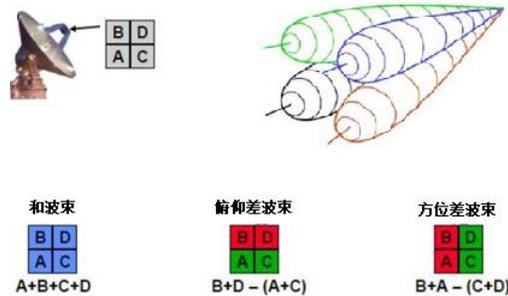


图 2 导引头天线和、差波束输出模拟

与三个天线相对应有三个微波接收机，三个接收机输出的噪声是相互独立的，它们均为高斯白噪声，其功率 P_n 为 kT_0BF_n ，其中 k 为玻尔兹曼常数， T_0 为基准温度， B 为接收机带宽， F_n 为接收机噪声系数。

(2) 导引头信号原理

导引头探测、跟踪目标时对回波信号的处理过程见图 3，包括目标探测处理、速度测量与跟踪、角度测量与跟踪三个功能。三通道微波接收机输出的信号经数字采样、滤波、动目标检测（MTD）处理、恒虚警检测处理（CFAR）探测目标。

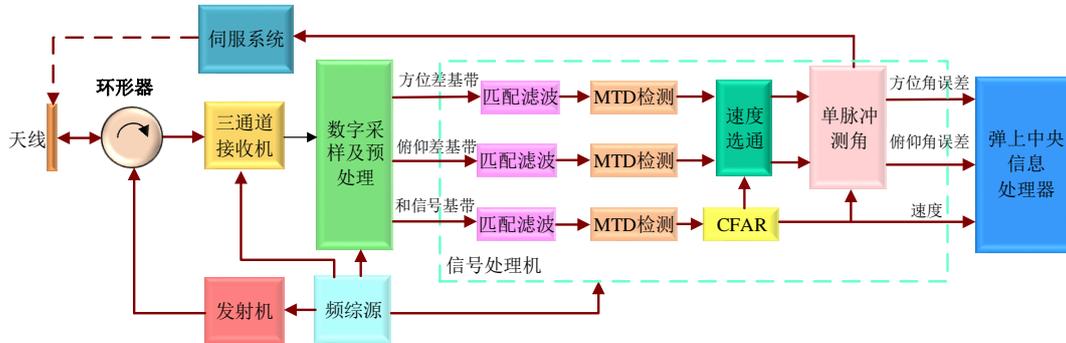


图 3 导引头探测、跟踪目标时对回波信号的处理过程

MTD 检测处理实际是用一组滤波器组来滤出目标的多普勒信号，仿真时用快速傅里叶变换（FFT）实现，FFT 的点数对应了相干积累时间。

CFAR 检测是保持虚警概率恒定的一种检测方法，即门限随着信噪比的变化而自适应改变。单元平均恒虚警检测是一种常用的恒虚警检测方法，它通过计算周围参考单元的平均功率作为检测单元的干扰估值，以确定恒虚警门限，如果目标回波高于恒虚警门限，则判断发现目标，否则，则为未发现目标。

发现目标后，根据测得目标的速度调整频综源的本振频率，实现对目标的速度跟踪。

发现目标后，再根据和波束、方位差波束、俯仰差波束三个通道的数据计算目标相对导引头天线法线的角度偏差，计算公式如下：

俯仰向角度偏差为：

$$\theta_{\varepsilon} = \varepsilon_{\theta} / k_{\theta}$$

方位向角度偏差为：

$$\varphi_{\varepsilon} = \varepsilon_{\varphi} / k_{\varphi}$$

其中：

$$\varepsilon_{\theta} = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta_{\theta}}{\Sigma}\right), \quad \varepsilon_{\varphi} = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta_{\varphi}}{\Sigma}\right)$$

$$k_{\theta} = \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{E_2}{\Sigma_2}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{E_1}{\Sigma_1}\right)}{\theta_2 - \theta_1}, \quad k_{\varphi} = \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{E_3}{\Sigma_3}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{E_4}{\Sigma_4}\right)}{\theta_3 - \theta_4}$$

(3) 制导律原理

导弹在空中飞行的弹道不是任意的，而是受一定的方式控制，按一定的规律运动，这个规律就是导引规律或导引方法。比例导引法是主动雷达导引头常

用的一种制导方法，该方法要求导弹在飞行过程中，保持速度矢量的转动角速度 $\dot{\theta}$ 与目标视线的转动角速度 $\dot{\phi}$ 成给定的比例关系：

$$\text{导引方程： } \dot{\theta} = k\dot{\phi}$$

$$\text{两边积分得： } \theta = k(\phi - \phi_0) + \theta_0$$

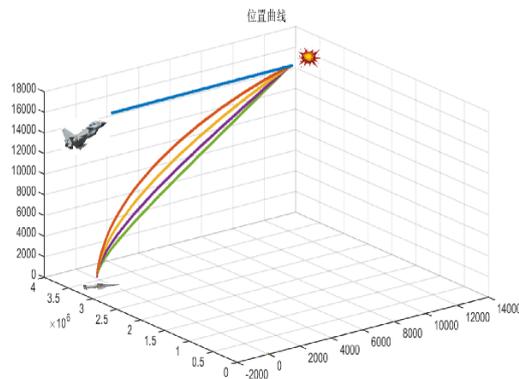


图 4 采用不同比例系数 k 的空间轨迹曲线

其中 k 为导引系数， ϕ_0 为导航开始时目标视线与基准线夹角， θ_0 为导引开始时导弹速度矢量与基准线的夹角。

图 4 为采用不同比例系数 k 的空间轨迹曲线， $k=1$ 曲线最弯曲，也称为追踪法，当 $k \rightarrow \infty$ 即为平行接近法，采用比例导引法时，导弹的理想弹道的曲率，介于平行接近法和追踪法之间。

本项目是仿真环境下的真实实验，核心要素的逼真度高。实验过程中可随机设置拦截的目标对象（靶机）的位置和运动特性，导弹根据探测结果和制导规律拦截目标，如果参数设计不合理，不能正确发现目标或测量偏差太大无法持续稳定地跟踪目标，都可能会导致拦截失败。学生只有理解、掌握了导引头探测、跟踪目标的原理、算法，针对设定的实验任务，计算并输入了准确的参数，仿真软件在验证测试时，导弹才会成功地拦截目标。验证测试时，实验项目软件还会记录导弹在不同时刻测量得到的弹目角度偏差和制导精度，用于的对学生的实验结果进行客观评价。

本教学实验项目共分为 4 个模块，包括：系统认知、导引头总体参数设计、信号处理系统参数设计、系统综合设计与测试。

涉及的知识点共 14 个，包括：

- (1) 导弹的主要组成部件及各部分功能；
- (2) 导弹拦截目标的原理及主要过程；
- (3) 主动雷达导引头探测跟踪目标的基本原理；
- (4) 主动雷达导引头主要组成部件及各部分功能；
- (5) 雷达导引头天线的主要参数及其对系统性能的影响；
- (6) 雷达导引头发射机/接收机的主要参数及其对系统性能的影响；
- (7) 雷达导引头发射波形设计；

- (8) 雷达导引头回波信号时域波形、频谱及其分析；
- (9) 主动雷达导引头信号处理流程；
- (10) 主动雷达导引头恒虚警检测原理及主要参数设计；
- (11) 单脉冲测角原理及主要参数设计；
- (12) 角度跟踪回路工作原理及主要参数设计；
- (13) 比例法制导的基本原理及主要参数设计；
- (14) 导弹目标拦截的主要性能指标及测试方法。

2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

导弹末制导系统探测制导虚拟仿真教学软件；
 学生和教师用电脑：带有独立显卡的笔记本或台式电脑；
 互联网的网络环境；
 导弹雷达导引头教学样机、频谱分析仪、示波器、稳压电源、六旋翼无人机（用作被探测、跟踪的目标）。

2-6 实验材料（或预设参数等）

本实验项目的预设参数包括：
 环境参数设置：可设置导弹攻击的场景，攻击方式（迎头或尾追）；
 目标参数设置：目标的雷达散射截面积（RCS），目标初始距离、速度，目标航迹，可自动根据导引头参数及目标参数计算得到目标信噪比；
 导引头工作参数设置：载波频率、峰值发射功率、天线增益、中频频率、脉冲宽度、带宽、脉冲重复周期、数据采样率、接收机噪声功率；
 导引头信号处理参数设置：相干积累时间（CPI）、滤波处理的窗函数、恒虚警（CFAR）门限、角度跟踪回路环路滤波器带宽；
 制导律参数设置：比例导引制导律比例系数。

2-7 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）

1. “一人一题、一次一题”的互动式教学

(1) **使用目的**：通过随机设置的实验任务，增加实验的趣味性和挑战度，以激发学生的学习兴趣、主动性和探索性，提高教学效果。

(2) **实施过程**：本实验在导引头总体参数设计、信号处理系统参数设计和系统综合设计与测试等实验模块均按照的“一人一题、一次一题”原则设计，即**不同学生开展实验，或学生多次开展实验，实验任务的关键参数或场景配置随机给定**，由虚拟教师设置和修改目标靶机的参数和特性（包括：目标雷达散射截面积、距离、速度、加速度、航迹等），学生须针对不断变化的来袭目标的情况，设计系统参数。

(3) **实施效果**：采用“一人一题、一次一题”的互动式实验教学方法后，提高了实验项目的难度、趣味性和互动性。同时也有效避免了传统实验过程中

学生相互对答案等不良现象，提高了实验项目目标达成度评价的准确性。

2. “线下设计、线上测试”的探究式教学

(1) **使用目的**：让学生自觉地、主动地学习、探索、掌握导弹探测、制导、拦截目标的机理和导引头参数设计的方法，研究这些参数与拦截效果的关系，发现影响导弹拦截性能的因素及其内部的联系，从中找出规律。

(2) **实施过程**：学生在实验过程中，针对布置的实验任务和给定的系统参数，首先需要从实验指南、知识角和教材中学习相关的知识，寻找相应的设计方法和计算公式（例如雷达方程、临近单元平均恒虚警算法门限计算公式等），在**线下通过探究完成参数设计**；然后将设计的参数值输入对话框，点击试验测试，在**线上观察、测量导弹对目标的拦截效果和动态过程中的角度、速度测量误差**，判断参数设计的合理性；如果不能有效拦截目标，还要进一步学习相关知识，查找问题，对设计值进行修改，直到完成拦截任务。学生提交实验结果，还可以看到系统自动对本实验步骤的评分，学生根据系统的评分值还可以判断所设计的参数值偏离正确值的程度，从而便于学生进行完善设计。

本实验项目网络平台为学生提供了丰富的学习资料，包括实验操作指南、经典文献、技术报告、视频资料、前沿报道等等，学生可以通过**自主学习**获取相关知识，也可以通过**交互平台**向老师请教。

(3) **实施效果**：采用“线下设计、线上测试”的探究式实验教学方法后，学生能积极主动地去探索导弹末制导系统探测制导与控制的相关问题，寻求问题的答案，学生在探究学习的过程中对导引头探测制导原理有了更深刻的理解。

2-8 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

(1) 控制变量法

影响导弹探测制导拦截目标的系统参数非常多，本实验项目在实验模块二、实验模块三中采用控制变量法，对影响导引头探测目标的因素加以人为控制，在实验模块二中**分别只改变收发天线增益、发射机的峰值发射功率、发射信号占空比的大小，而保证其它的变量不变，来寻找这些导引头的主要总体参数对导引头探测拦截目标影响的规律**。在实验模块三中**分别只改变导引头信号处理中的动目标检测积累时间、恒虚警门限、角度测量误差、比例导引制导律比例系数的大小，而保证其它的变量不变，来寻找这些导引头的信号处理参数对导引头探测拦截目标影响的规律**。

(2) 约束条件下的正交试验法

在实验模块四中，学生需要同时对系统或信号处理过程中的**多个参数进行设计和优化**，采用的实验方法为约束条件下的正交试验法。需要设计的导引头系统参数或信号处理参数在实际系统实现时都是有约束的，例如：天线增益与天线的面积有关，而天线面积受导弹的口径大小约束；发射机峰值功率受发射

机功率管水平和系统供电能力约束；发射脉冲宽度受占空比极限和发射机功率管散热能力约束；恒虚警概率受系统虚警概率指标约束。实验时，**学生首先要学习和理解导引头主要系统参数的设计原则和设计约束，在设计约束下确定设计值的范围。然后，根据参数性质确定参数之间的相互关系，根据参数之间的独立性制定正交参数表，依据正交参数表开展实验，寻找满足导弹拦截目标要求的优化的参数组合。**通过该综合实验，帮助学生全面理解导弹末制导系统的原理和设计方法，提高学生在导弹末制导系统总体设计方面解决复杂问题的能力。

(3) 留迹法

导弹拦截目标的动态过程瞬间即逝。本实验中我们**采用留迹法将导弹、目标所处的位置、运动轨迹保留下来，以便从容地测量、比较和研究导弹探测、截获、跟踪、拦截目标的动态过程，从容地测量、比较和研究导引头系统参数和信号处理参数对导弹拦截目标动态过程的影响。**

2. 实验过程和交互性操作步骤

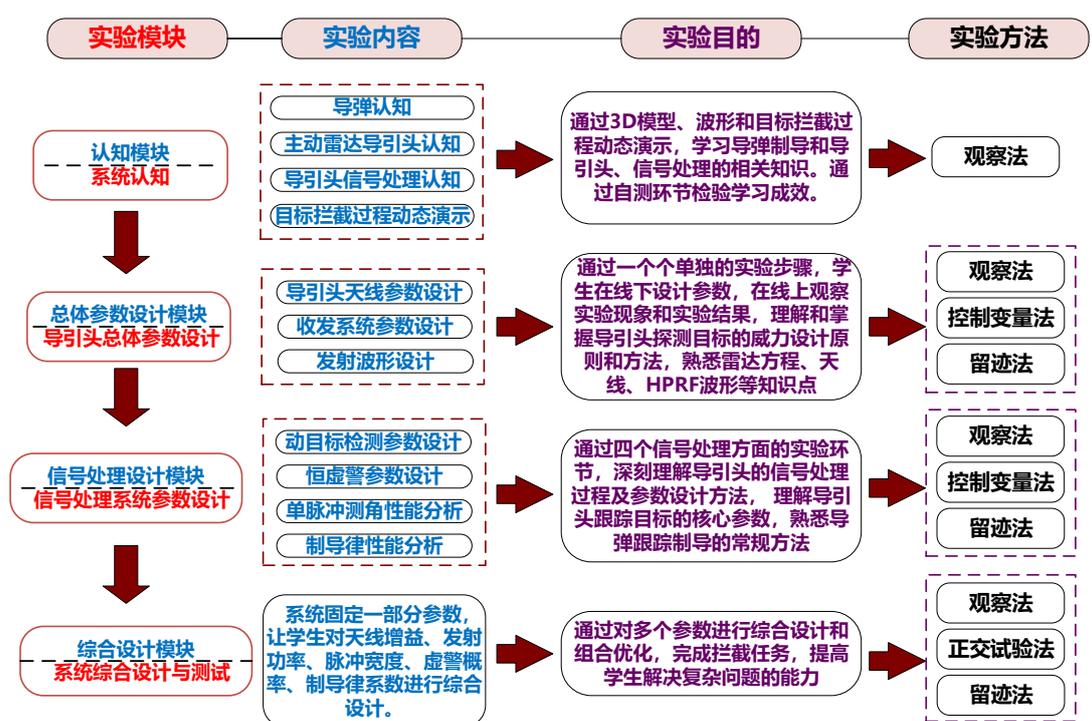


图 5 实验项目的总体实验框图

本实验项目的总体实验框图见图 5。共分为 4 个模块，包括：系统认知、导引头总体参数设计、信号处理系统参数设计、系统综合设计与测试。**共有 76 个交互性操作步骤。**

在系统认知模块，学生学习导弹结构，主动雷达导引头结构和信号处理过程，观察导弹迎头、追击目标过程的全过程。在导引头总体参数设计模块，学生分别调节导引头天线增益、发射功率和脉冲宽度，观察并分析系统参数对系统跟踪制导影响。在信号处理系统参数设计模块，学生通过设计或调节 FFT 点

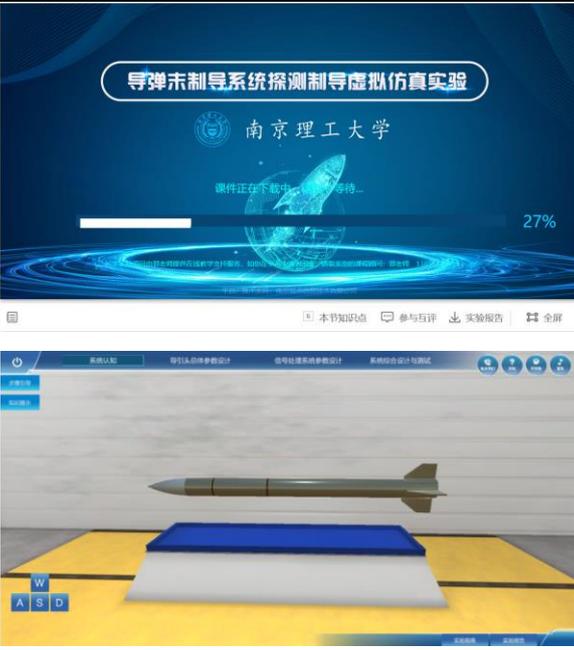
数、恒虚警概率、测角偏差大小和制导率，观察并分析信号处理参数对系统跟踪制导影响。在系统综合设计与测试模块，学生通过优化设计导引头的多项参数，理解参数之间的相互联系和约束。

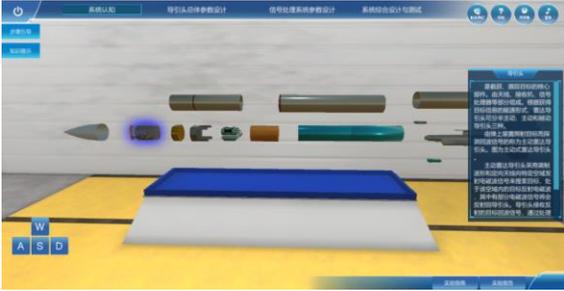
实验模块 1：系统认知

该模块是通过三维虚拟现实技术引导学生学习导弹、导引头和导引头信号处理的相关知识，通过虚拟仿真的手段让学生观察到导弹探测、截获、跟踪、毁伤目标的完整过程，内容包括：(1) 主动雷达导引头探测制导基本原理；(2) 主动雷达导引头主要部件分解图；(3) 主动雷达导引头信号处理流程。**本模块共有 13 个交互式操作步骤，对应学时数为 0.5。**

操作步骤：

1.1 “导弹认知”的交互性操作步骤说明

步骤	实验操作过程	实验场景
1	<p>点击链接，进入实验。</p> <p>点击“系统认知”，进入模块一，点击“导弹认知”，进入场景。</p> <p>按住鼠标右键，拖动鼠标，观测导弹外观。</p>	 <p>The screenshot shows the main interface of the 'Active Radar Guidance System Detection and Guidance Virtual Simulation Experiment'. At the top, it displays the title and Nanjing University of Aeronautics and Astronautics logo. A progress bar indicates that the software is downloading (27%). Below the title, there are navigation buttons for 'System Recognition', 'Guidance Head Structure Design', 'Signal Processing System Parameter Design', and 'System Integration Design and Testing'. The main 3D view shows a missile on a blue and white display stand on a yellow platform. A control panel at the bottom left shows 'W', 'A', 'S', and 'D' keys.</p>
2	<p>点击导弹 3D 图，观察导弹内部结构。</p>	 <p>This screenshot shows the same 3D environment as the previous one, but the missile is now shown in an exploded view, revealing its internal components such as the seeker, guidance electronics, and motor. The navigation buttons and control panel remain visible.</p>

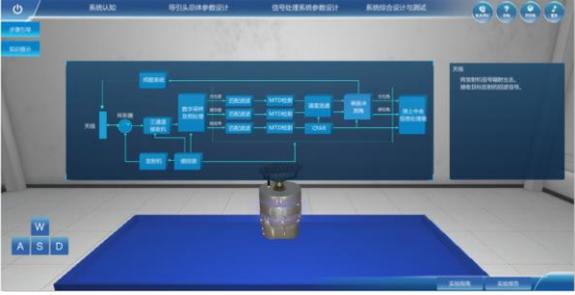
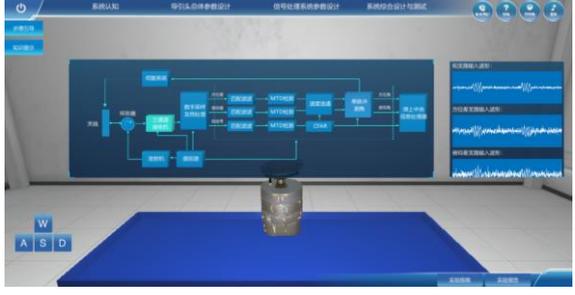
3	分别点击导弹各部件，观看右侧知识框，了解该部件作用。	
---	----------------------------	--

1.2 “主动雷达导引头认知”的交互性操作步骤说明

步骤	实验操作过程	实验场景
1	点击实验页眉“系统认知/主动雷达导引头认知”，进入场景。按住鼠标右键，拖动鼠标，观测导引头外观。	
2	点击导引头 3D 图，观察导引头组成结构。	
3	分别点击导引头各部件，观看右侧知识框，了解该部件作用。	

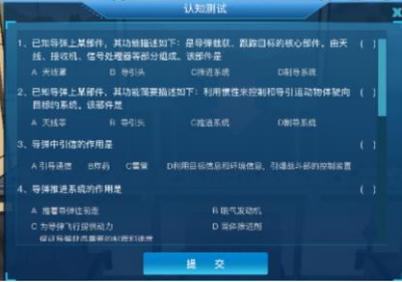
1.3 “导引头信号处理认知”的交互性操作步骤说明

步骤	实验操作过程	实验场景
----	--------	------

1	<p>点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”，进入场景。</p> <p>观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图，了解各部件之间关系。</p>	
2	<p>分别点击框图中的各模块，观看右侧知识了解该单元作用，熟悉其输入输出波形。</p>	

1.4 “目标拦截过程动态演示”的交互性操作步骤说明

步骤	实验操作过程	实验场景
1	<p>点击实验页眉“系统认知/目标拦截过程动态演示”，进入场景。</p> <p>点击选择迎头。</p>	
2	<p>点击动态演示。观看实时攻防对抗过程，观察右侧俯仰角、方位角误差曲线和速度误差曲线变化，了解导引头探测、跟踪、摧毁目标全过程。</p>	
3	<p>点击“返回”，选择追击。</p>	

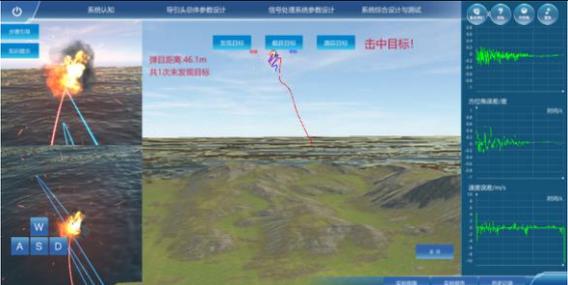
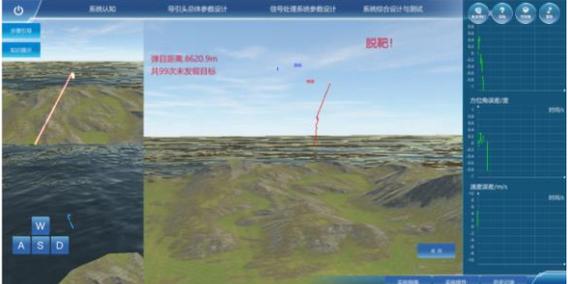
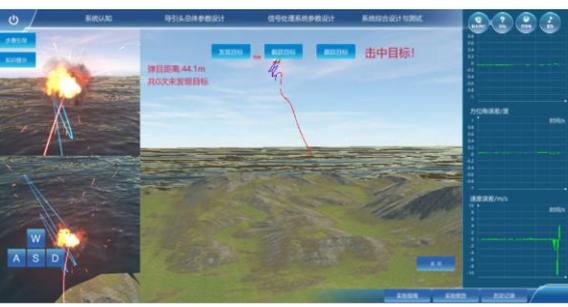
4	<p>点击动态演示。观看实时攻防对抗过程，观察右侧俯仰角、方位角误差曲线和速度误差曲线变化，了解导引头探测、跟踪、摧毁目标全过程。</p>	
5	<p>点击“测试”，完成10道自测题。</p>	

实验模块 2：导引头总体参数设计

学生根据下达的实验任务，根据雷达导引头探测距离的计算公式，分别设计计算收发天线增益、发射机的峰值发射功率、发射信号占空比的大小，通过观测导弹拦截目标的动态过程，记录导引头发现目标的最远距离，探究导引头最大探测距离与收发天线增益、发射机的峰值发射功率、发射信号占空比的关系。本模块共有 24 个交互式操作步骤，对应学时数为 2。

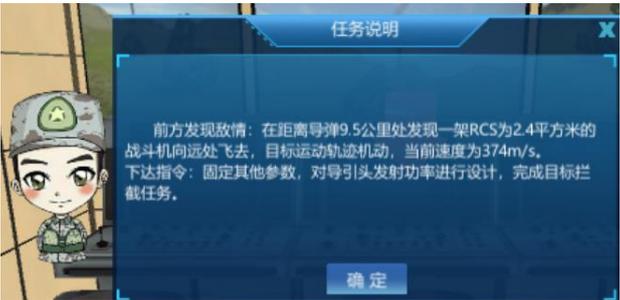
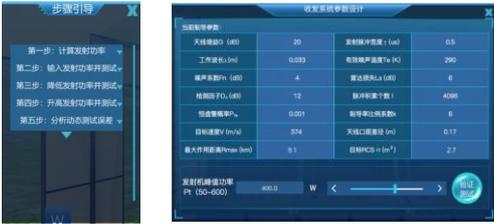
2.1 “天线参数设计”的交互性操作步骤说明

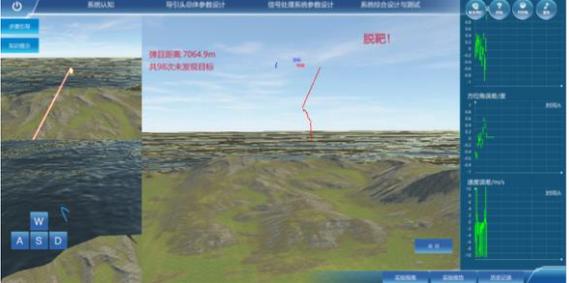
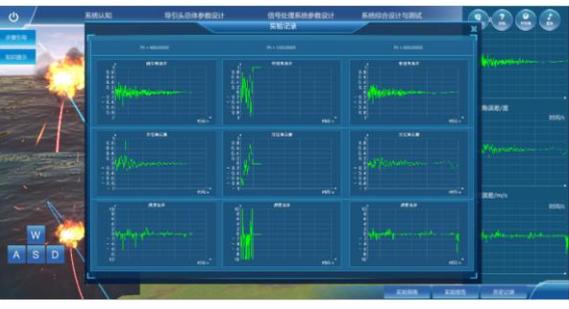
步骤	实验操作过程	实验场景
1	<p>点击“导引头总体参数设计”，进入模块二，点击“天线参数设计”，弹出任务界面，在一个随机距离上发现一个速度和雷达截面积随机的目标，要求设计合适的天线增益，完成目标拦截任务。</p>	

2	<p>点击“确定”，进入参数设计环节。</p>	
3	<p>点击“步骤引导”和“知识提示”，了解实验步骤和相关知识。根据参数列表，依据雷达方程计算攻击目标所需的增益数值G。对增益数值G求dB，即 $G_{dB}=10*\log_{10}(G)$。</p>	
4	<p>输入计算值，点击验证测试，观察拦截目标效果，以及测角测速误差曲线。</p>	
5	<p>点击“返回”，降低G，再次进行验证测试。</p>	
6	<p>点击“返回”，升高G，再次进行验证测试。</p>	

7	<p>点击“历史记录”，对三次试验得到的测角、测速误差曲线进行对比分析，确定合适的G增益值，并输入系统进行最后测试。</p>													
8	<p>点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”。</p>	 <table border="1" data-bbox="791 577 1203 658"> <thead> <tr> <th>作用距离 Rmax (km)</th> <th>目标RCS σ (m²)</th> <th>目标速度 v (m/s)</th> <th>天线增益G (dB)</th> <th>拦截效果</th> <th>丢失目标次数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9.5</td> <td>2.4</td> <td>374</td> <td>30</td> <td>命中目标</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	作用距离 Rmax (km)	目标RCS σ (m ²)	目标速度 v (m/s)	天线增益G (dB)	拦截效果	丢失目标次数	9.5	2.4	374	30	命中目标	0
作用距离 Rmax (km)	目标RCS σ (m ²)	目标速度 v (m/s)	天线增益G (dB)	拦截效果	丢失目标次数									
9.5	2.4	374	30	命中目标	0									

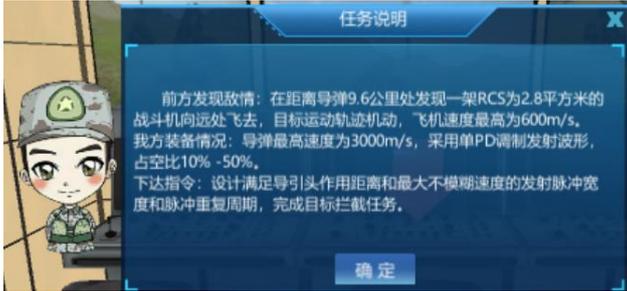
2.2 “收发系统参数设计”的交互性操作步骤说明

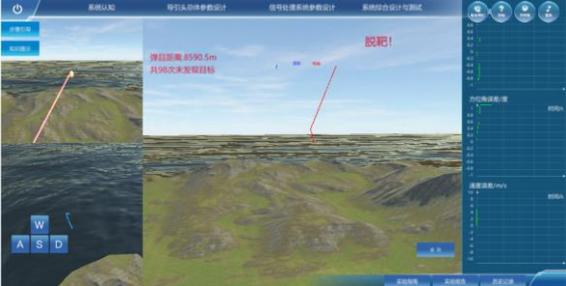
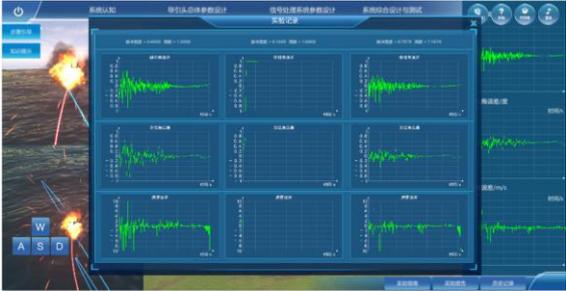
收发系统参数设计																		
步骤	实验操作过程	实验场景																
1	<p>点击实验页眉，选择”导引头总体参数设计/收发系统参数设计”，弹出任务界面，在一个随机距离上发现一个速度和雷达截面积随机的目标，要求设计合适的发射功率，完成目标拦截任务。</p>	 <p>前方发现敌情：在距离导弹9.5公里处发现一架RCS为2.4平方米的战斗机向远处飞去，目标运动轨迹机动，当前速度为374m/s。下达指令：固定其他参数，对导引头发射功率进行设计，完成目标拦截任务。</p>																
2	<p>点击“确定”，进入参数设计环节。</p>	 <table border="1" data-bbox="730 1464 1267 1621"> <thead> <tr> <th>发射功率Pt (W)</th> <th>工作波长λ (m)</th> <th>天线增益G (dB)</th> <th>探测距离Rd (km)</th> <th>探测仰角θ (°)</th> <th>探测速率 (m/s)</th> <th>探测精度 (m)</th> <th>探测RCS σ (m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4000</td> <td>0.033</td> <td>30</td> <td>9.5</td> <td>0.5</td> <td>374</td> <td>2.4</td> <td>2.7</td> </tr> </tbody> </table>	发射功率Pt (W)	工作波长λ (m)	天线增益G (dB)	探测距离Rd (km)	探测仰角θ (°)	探测速率 (m/s)	探测精度 (m)	探测RCS σ (m ²)	4000	0.033	30	9.5	0.5	374	2.4	2.7
发射功率Pt (W)	工作波长λ (m)	天线增益G (dB)	探测距离Rd (km)	探测仰角θ (°)	探测速率 (m/s)	探测精度 (m)	探测RCS σ (m ²)											
4000	0.033	30	9.5	0.5	374	2.4	2.7											
3	<p>点击“步骤引导”和“知识提示”，了解实验步骤和相关知识。根据参数列表，依据雷达方程，计算攻击目标所需的功率数值Pt。</p>	 <p>第一步：计算发射功率 第二步：输入发射功率并测试 第三步：降低发射功率并测试 第四步：升高发射功率并测试 第五步：分析动态测试误差</p>																

4	输入计算值,点击验证测试,观察拦截目标效果,以及测角测速误差曲线。	
5	点击“返回”,降低 P_t ,再次进行验证测试。	
6	点击“返回”,升高 P_t ,再次进行验证测试。	
7	点击“历史记录”,对三次试验得到的测角、测速误差曲线进行对比分析,确定合适的发射功率 P_t ,并输入系统进行最后测试。	
8	点击实验报告,查看参数及成绩,选择“提交”。	

2.3 “发射波形设计”的交互性操作步骤说明

步骤	实验操作过程	实验场景
----	--------	------

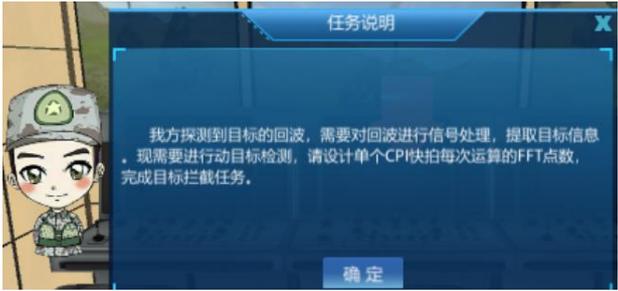
1	<p>点击“发射波形设计”，弹出任务界面，在一个随机距离上发现一个雷达截面随机的目标，并已知雷达和导弹的最高速度，要求设计合适的发射波形，完成目标拦截任务。</p>	
2	<p>点击“确定”，进入参数设计环节。</p>	
3	<p>点击“步骤引导”和“知识提示”，了解实验步骤和相关知识，根据参数表和雷达威力方程，确定τ。</p>	
4	<p>根据最大不模糊速度，确定T_r的范围。同时根据占空比0.1-0.5的范围，综合确定T_r值。</p>	
5	<p>输入T_r和τ，启动系统运行，观看动态演示效果及误差曲线。</p>	

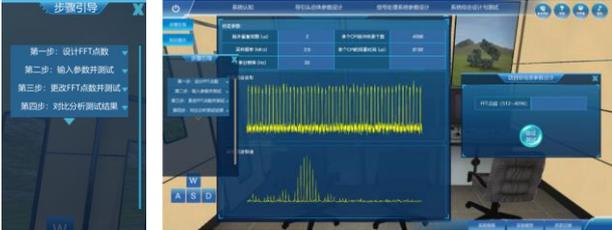
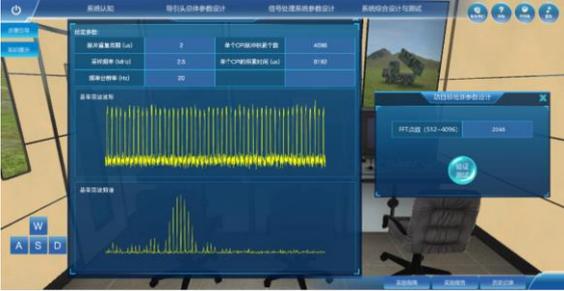
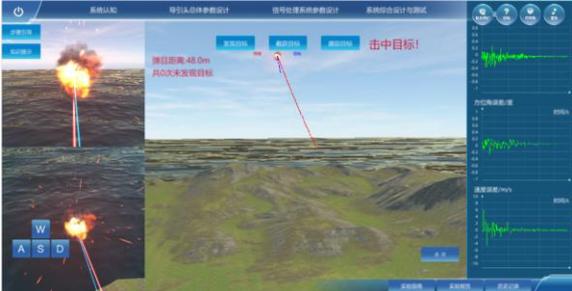
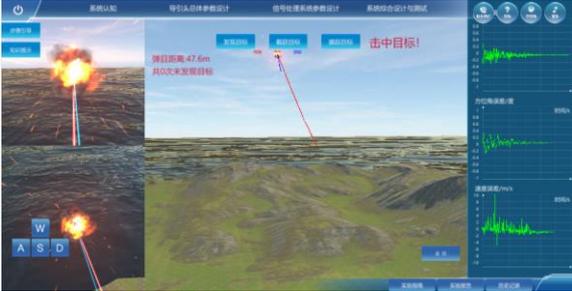
6	点击“返回”，改变 t 和 T_r ，再次进行验证测试。	
7	点击“历史记录”，对比误差曲线，确定脉冲宽度和脉冲重复周期的值，并输入系统进行最后测试。	
8	点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”。	

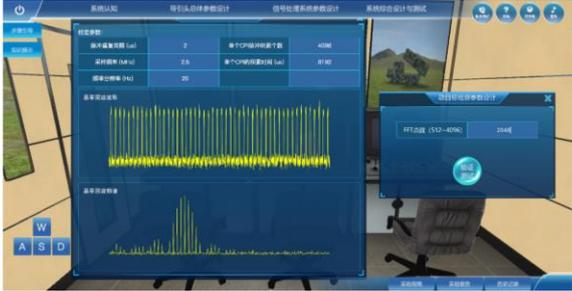
实验模块 3 导引头信号处理参数设计

学生根据下达的实验任务，根据导引头动目标检测、恒虚警处理、单脉冲测角、比例导引制导律算法，分别设计、计算动目标检测积累时间、恒虚警门限、角度测量误差、比例导引制导律比例系数，通过观测导弹拦截目标的动态过程，分析导弹拦截目标过程中的方位/俯仰角度测量误差、速度测量偏差、拦截精度，探究动目标检测积累时间、恒虚警门限、角度测量误差、比例导引制导律比例系数与导引头最大探测距离、测角精度、测速精度、拦截精度等的关系。本模块共有 33 个交互式操作步骤，对应学时数为 2.5。

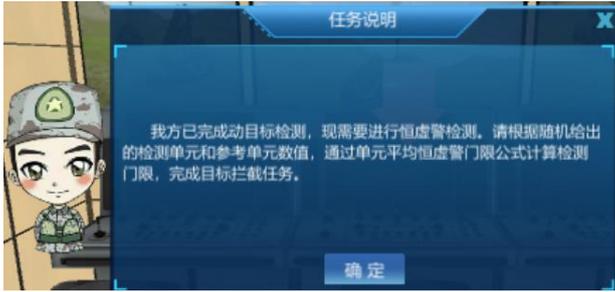
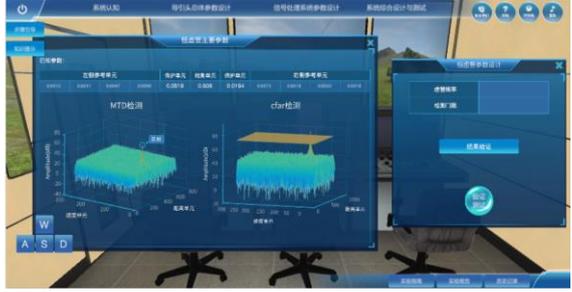
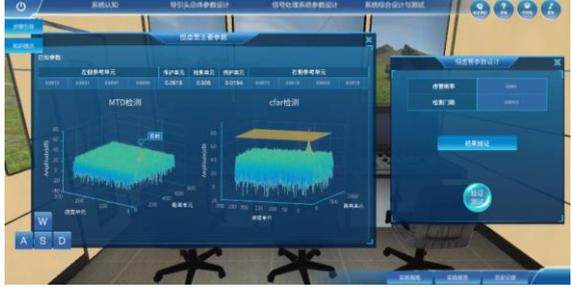
3.1 “动目标检测参数设计”的交互性操作步骤说明

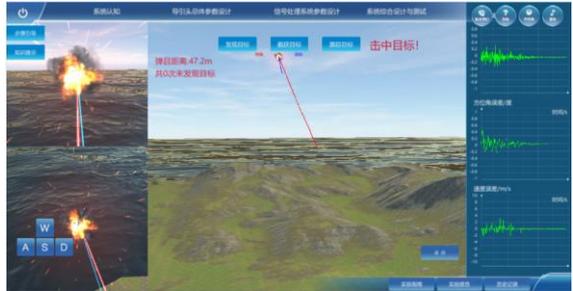
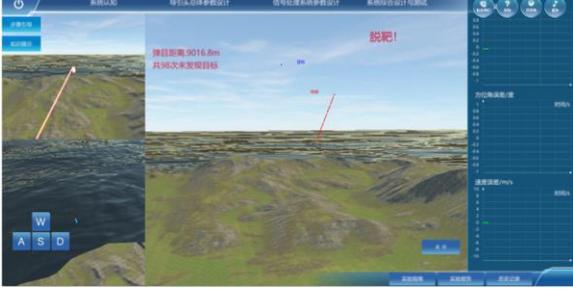
步骤	实验操作过程	实验场景
1	点击“信号处理系统参数设计”，进入模块三，点击“动目标检测参数设计”，弹出任务界面，要求设计合适的 FFT 点数，完成目标拦截任务。	

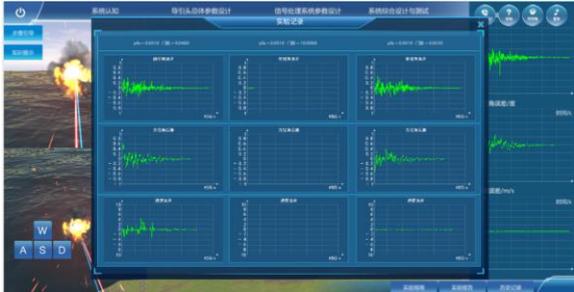
2	<p>点击“确定”，进入参数设计环节。</p>	
3	<p>点击“步骤引导”和“知识提示”，了解测速精度与FFT点数关系，根据给定参数，计算FFT点数范围。</p>	
4	<p>输入满足 2^n 方且在范围内的FFT点数。</p>	
5	<p>点击验证测试，观测动态过程及测速曲线。</p>	
6	<p>点击“返回”，重新输入FFT点数，观察动态过程及测速曲线。</p>	
7	<p>点击“历史记录”，对比各次运行的速度误差曲线，分析FFT点数对目标跟踪影响。</p>	

8	输入最终确认的FFT点数，进行系统测试。	
9	点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”。	

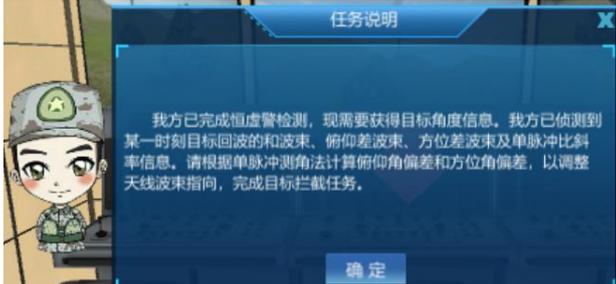
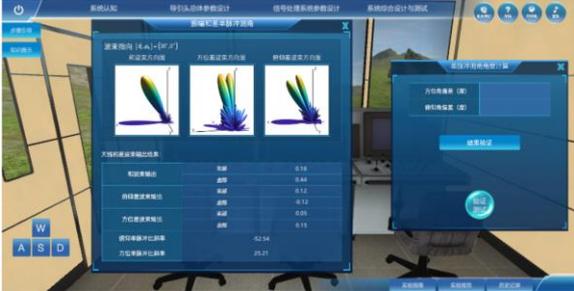
3.2 “恒虚警参数设计”的交互性操作步骤说明

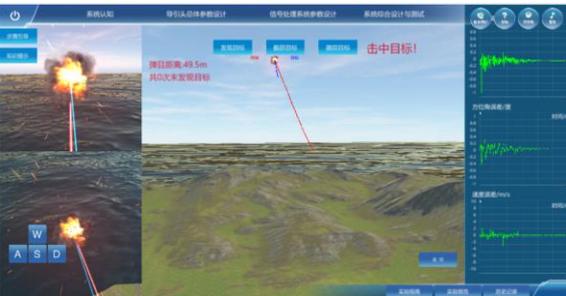
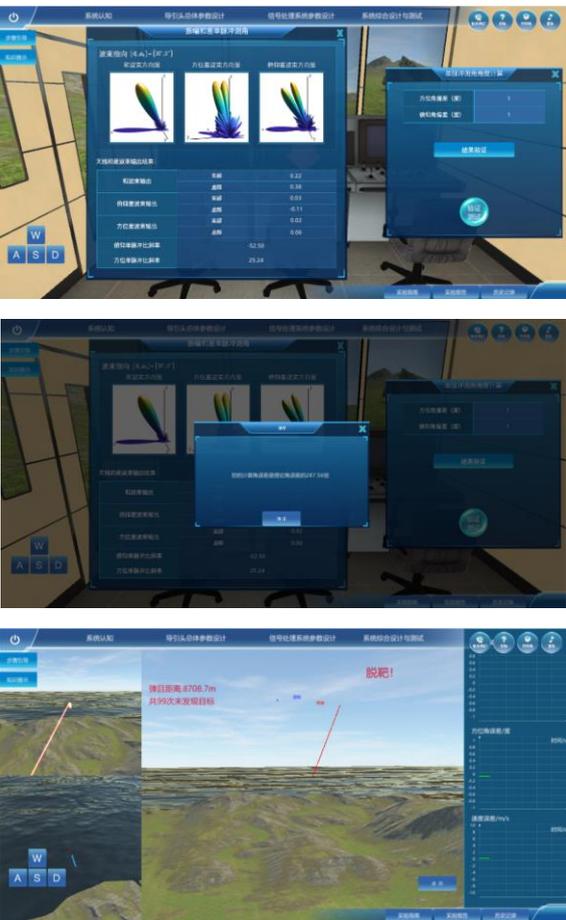
步骤	实验操作过程	实验场景
1	点击“信号处理系统参数设计”，进入模块三，点击“恒虚警参数设计”，弹出任务界面，要求设计合适的恒虚警门限，完成目标拦截任务。	
2	点击“确定”，进入参数设计环节。	
3	在 Pfa 栏输入恒虚警概率 $P_{fa}=0.001$ ，利用恒虚警门限计算公式，计算并输入恒虚警检测门限值。	

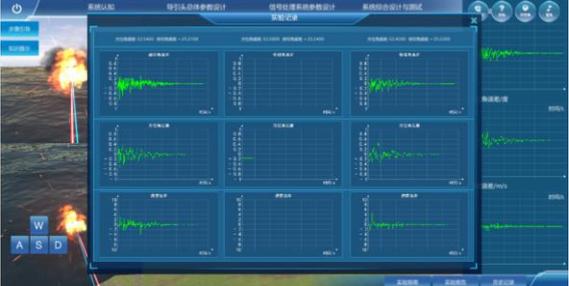
4	<p>点击“结果验证”， 观看计算门限/理论 门限的倍数。</p>	
5	<p>点击“验证测试”， 系统根据计算门限/ 理论门限的倍数关 系，调节恒虚警门 限值，观看测试结 果。</p>	
6	<p>点击“返回”，改变 输入门限，并进行 “结果验证”和 “验证测试”。</p>	 
7	<p>重新输入新的虚警 概率，再计算门限， 进行测试验证。</p>	

8	分析 Pfa 对目标跟踪制导影响。输入最终恒虚警概率和门限值，进行测试验证。	
9	点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”。	

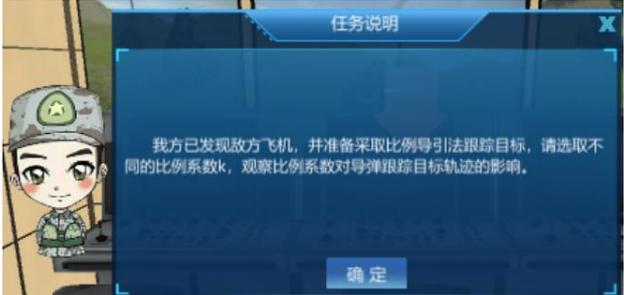
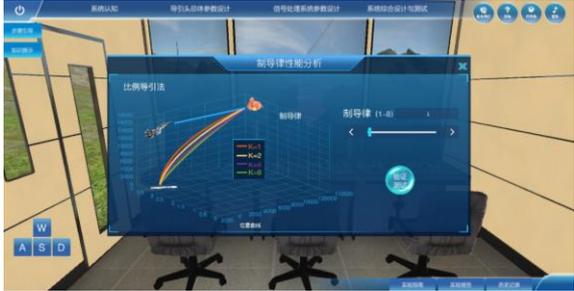
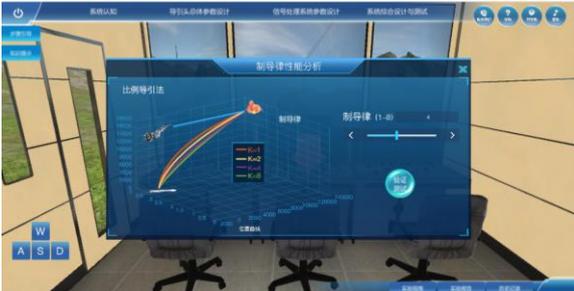
3.3 “单脉冲测角性能分析”的交互性操作步骤说明

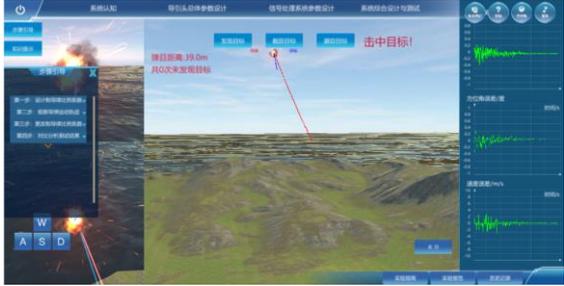
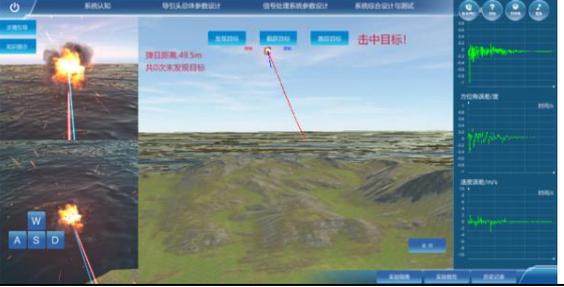
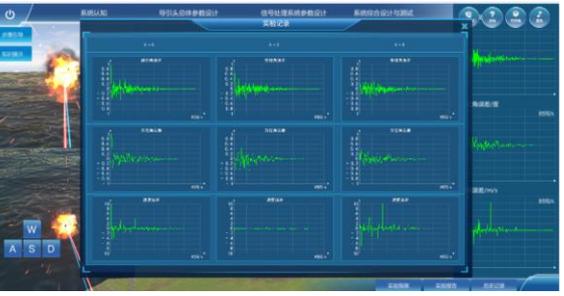
步骤	实验操作过程	实验场景																					
1	点击“单脉冲测角性能分析”，弹出任务界面，给出随机时刻侦测回波的和差波束及单脉冲比斜率，要求计算角偏差以调整天线波束指向，完成目标拦截任务。																						
2	点击“确定”，进入参数设计环节。	 <table border="1" data-bbox="798 1467 1061 1680"> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.14</td><td></td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.21</td><td></td></tr> </table>	方位角偏差输出结果	0.00	0.10	俯仰角偏差输出结果	0.00	0.04	方位角偏差输出结果	0.00	0.12	俯仰角偏差输出结果	0.00	0.05	方位角偏差输出结果	0.00	0.11	俯仰角偏差输出结果	0.14		方位角偏差输出结果	0.21	
方位角偏差输出结果	0.00	0.10																					
俯仰角偏差输出结果	0.00	0.04																					
方位角偏差输出结果	0.00	0.12																					
俯仰角偏差输出结果	0.00	0.05																					
方位角偏差输出结果	0.00	0.11																					
俯仰角偏差输出结果	0.14																						
方位角偏差输出结果	0.21																						
3	根据天线和差波束输出结果，参考单脉冲测角计算公式，计算并输入方位角偏差和俯仰角偏差。	 <table border="1" data-bbox="798 1803 1061 2016"> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.00</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>俯仰角偏差输出结果</td><td>0.14</td><td></td></tr> <tr><td>方位角偏差输出结果</td><td>0.21</td><td></td></tr> </table>	方位角偏差输出结果	0.00	0.10	俯仰角偏差输出结果	0.00	0.04	方位角偏差输出结果	0.00	0.12	俯仰角偏差输出结果	0.00	0.05	方位角偏差输出结果	0.00	0.11	俯仰角偏差输出结果	0.14		方位角偏差输出结果	0.21	
方位角偏差输出结果	0.00	0.10																					
俯仰角偏差输出结果	0.00	0.04																					
方位角偏差输出结果	0.00	0.12																					
俯仰角偏差输出结果	0.00	0.05																					
方位角偏差输出结果	0.00	0.11																					
俯仰角偏差输出结果	0.14																						
方位角偏差输出结果	0.21																						

4	<p>点击“结果验证”， 观看计算角偏差/理论角偏差的倍数。</p>	
5	<p>点击“验证测试”， 系统根据计算角偏差/理论角偏差的倍数关系调节测角误差，观看测试结果。</p>	
6	<p>点击“返回”，改变方位角和俯仰角偏差值，并进行“结果验证”和“验证测试”。</p>	

7	<p>点击“历史记录”，分析角偏差对目标跟踪制导影响。输入最终方位角和俯仰角偏差值，进行测试验证。</p>																																																													
8	<p>点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”</p>	 <table border="1" data-bbox="774 504 1220 801"> <thead> <tr> <th colspan="2">和波束</th> <th colspan="2">方位偏差</th> <th colspan="2">俯仰偏差</th> <th colspan="2">方位跟踪冲</th> <th colspan="2">俯仰跟踪冲</th> <th colspan="2">得分</th> </tr> <tr> <th>实际</th> <th>理论</th> <th>实际</th> <th>理论</th> <th>实际</th> <th>理论</th> <th>比跟踪a0</th> <th>比跟踪a1</th> <th>比跟踪a2</th> <th>比跟踪a3</th> <th>5 (星)</th> <th>5 (星)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.18</td> <td>0.41</td> <td>0.08</td> <td>-0.13</td> <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>-52.45</td> <td>25.22</td> <td>0.002</td> <td>0.002</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">计算角偏差/理论角偏差</td> <td colspan="2">拦截效果</td> <td colspan="2">命中目标</td> <td colspan="2">丢失目标次数</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">0.57</td> <td colspan="2">0.57</td> <td colspan="2">0</td> <td colspan="2">0</td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table>	和波束		方位偏差		俯仰偏差		方位跟踪冲		俯仰跟踪冲		得分		实际	理论	实际	理论	实际	理论	比跟踪a0	比跟踪a1	比跟踪a2	比跟踪a3	5 (星)	5 (星)	0.18	0.41	0.08	-0.13	0.05	0.15	-52.45	25.22	0.002	0.002			计算角偏差/理论角偏差		拦截效果		命中目标		丢失目标次数						0.57		0.57		0		0					
和波束		方位偏差		俯仰偏差		方位跟踪冲		俯仰跟踪冲		得分																																																				
实际	理论	实际	理论	实际	理论	比跟踪a0	比跟踪a1	比跟踪a2	比跟踪a3	5 (星)	5 (星)																																																			
0.18	0.41	0.08	-0.13	0.05	0.15	-52.45	25.22	0.002	0.002																																																					
计算角偏差/理论角偏差		拦截效果		命中目标		丢失目标次数																																																								
0.57		0.57		0		0																																																								

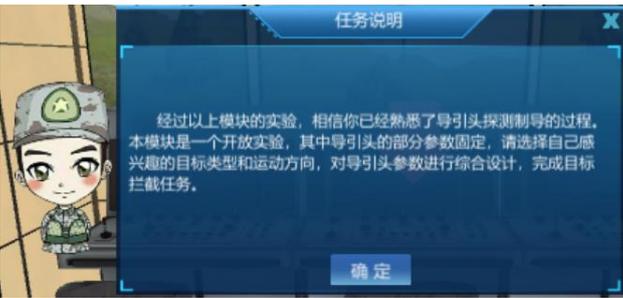
3.4 “制导律性能分析”的交互性操作步骤说明

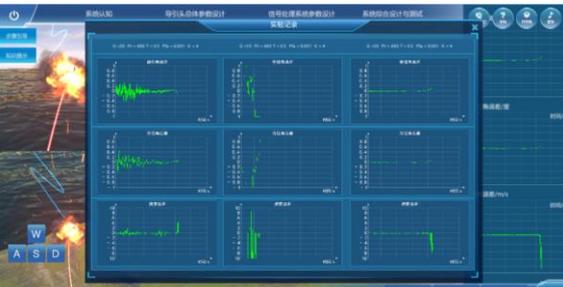
步骤	实验操作过程	实验场景
1	<p>点击“制导律性能分析”，弹出任务界面，要求选择不同的比例系数，观察比例系数对导弹跟踪目标轨迹的影响。</p>	
2	<p>点击“确定”，进入参数设计环节。</p>	
3	<p>输入满足范围的比例系数 k。</p>	

4	点击“验证测试”，观察导引头跟踪目标轨迹的影响。	
5	点击“返回”，选择不同的k进行测试。	
6	点击“历史记录”，对不同k的弹目轨迹及测角测速误差进行分析，确定合适的k。	
7	点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”	

实验模块 4：系统综合设计与测试

本模块共有 6 个交互式操作步骤，对应学时数为 1。

步骤	实验操作过程	实验场景
1	点击“系统综合设计与测试”，进入实验模块，弹出任务界面，进入开放实验，要求设计合适的相关参数，完成目标拦截任务。	

2	选择飞机类型和运动方向。	
3	根据前面实验掌握的知识和已知的参数，分别对天线增益、发射功率、发射脉冲宽度、制导律比例系数和恒虚警概率进行设计并输入。	
4	点击“测试验证”，观看效果。	
5	观看打击结果及过程中的速度误差、角度误差曲线，若不满意，点击“返回”，重新调节参数，或者选择其它飞机，重新验算并测试。	
6	点击实验报告，查看参数及成绩，选择“提交”。	

2-9 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：实验情况的描述与分析。

学生实验报告样例如下：

南京理工大学《导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验项目》实验报告					
姓名：评审专家1	学号：123456	开课学期：第四学期	实验日期：2019/09/16		
一、实验内容与实验记录					
实验模块一、导引头总体参数设计					
1.导引头天线参数设计					
作用距离 Rmax (km)	目标RCS σ (m ²)	目标速度 v (m/s)	天线增益G (dB)	拦截效果	丢失目标次数
9.2	2.4	367	20	击中目标	0
实验分析： 通过观测不同增益下的动态跟踪过程及结果，分析天线增益对导引头探测目标的影响。					

2.导引头发收系统参数设计					
作用距离 Rmax (km)	目标RCS σ (m ²)	目标速度 v (m/s)	峰值功率 (W)	拦截效果	丢失目标次数
9.6	2.5	367	480	击中目标	1
实验分析： 通过观测不同增益下的动态跟踪过程及结果，分析天线增益对导引头探测目标的影响。					

3.发射波形设计						
弹目最大径向 速度Vmax(m/s)	作用距离 Rmax(km)	目标RCS σ (m ²)	脉冲宽度 τ (us)	脉冲重复周期 Tr(us)	拦截效果	丢失目标次数
3600	9.1	2.2	0.3	1.4	击中目标	14
实验分析： 通过选择不同脉冲重复周期和脉冲宽度，分析Tr和 τ 对导引头探测目标速度的影响。						

实验模块二、导引头信号处理参数设计

1. 动目标检测参数设计

测速精度 (Hz)	脉冲重复周期 (us)	单个CPI脉冲积累个数	采样频率 (MHz)	单个CPI 每次 FFT 点数	拦截效果	丢失目标次数
20	2	4096	2.5	2048	击中目标	0

实验分析:

通过选择每次CPI不同的FFT运算点数, 分析FFT点数对导引头探测目标速度的影响。

2. 恒虚警参数设计

虚警概率 Pfa	门限计算值	计算门限/理论门限	拦截效果	丢失目标次数
0.001	0.041	1.049	击中目标	0

实验分析:

通过观测虚警概率下检测门限实验, 分析虚警门限对导引头探测目标的影响。

3. 单脉冲测角性能分析

和波束 Σ		俯仰维差波束 $\Delta\theta$		方位维差波束 $\Delta\varphi$		俯仰单脉冲比斜率 k_θ	方位单脉冲比斜率 k_φ	俯仰角误差 θ_e (度)	俯仰角偏差 (P_e) (度)
实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部				
0.23	0.46	0.1	-0.01	0.01	0.07	-52.52	25.22	0.0052	0.001
计算角偏差/理论角偏差				1.00		拦截效果	击中目标	丢失目标次数	0

实验分析:

通过观察实验现象, 分析测角误差对导引头探测目标的影响。

4. 制导律性能分析

序号	比例系数k (比例导引法)	拦截效果	丢失目标次数
1	2	击中目标	0
2	4	击中目标	0
3	6	击中目标	0

实验分析:

描述通过观测不同增益下的跟踪曲线变化, 分析天线增益对导引头探测目标的影响。

实验模块三、系统综合设计与测试						
目标类型	目标距离 (km)	目标速度 (m/s)	运动方向	设计参数	拦截效果	丢失目标次数
歼击机	9.1	391	迎头	G=19.3dB Pt=480W Pfa=0.1 $\tau=0.3\mu s$ K=5	击中目标	0
实验分析： 通过设计导引头参数动态验证参数设计效果，说说你对导引头的认识。						

二、实验评分		
实验模块	实验内容	考核成绩
预习与认知	自测题	9
导引头总体参数设计	导引头天线参数设计	9
	导引头收发系统参数设计	10
	发射波形设计	5
导引头信号处理参数设计	动目标检测参数设计	10
	恒虚警参数设计	10
	单脉冲测角性能分析	10
	制导律性能分析	10
系统综合设计与测试	系统综合设计与测试	20
实验项目总得分		93

2-10 考核要求

本实验项目软件会自动记录各个实验步骤下学生输入的设计参数值、验证测试时导弹在不同时刻测量得到的弹目角度偏差和制导精度，生成实验报告，用于的对学生的实验结果进行客观评价。

本实验项目的成绩包括 4 个模块的成绩，合计 100 分，评分标准如下：

(1) 系统认知模块（占 10%）的考核评分标准如下：

序号	实验操作过程	评分标准
1	导弹认知	
2	主动雷达导引头认知	
3	导引头信号处理认知	
4	目标拦截过程动态演示	
5	完成自测题	满分 10 分，每题 1 分；
实验累计总分按虚拟实验所占百分比进行折算，计入虚拟仿真实验成绩。		

(2) 导引头总体参数设计模块（占 30%）考核评分标准如下：

序号	实验操作过程	评分标准
----	--------	------

1	天线参数设计与优化	理论计算值为 G ，学生输入的值为 G' 。 $G' < G$ ，得 0 分； $G \leq G' < G+0.5$ ，得 9 分； $G+0.5 \leq G' \leq G+1$ ，得 10 分； $G+1 < G' \leq G+2$ ，得 9 分； $G' > 2$ ，得 0 分；
2	收发系统参数设计与优化	理论计算值为 P_t ，学生输入的值为 P_t' 。 $P_t' < P_t$ ，得 0 分； $P_t \leq P_t' < 1.1P_t$ ，得 9 分； $1.1P_t \leq P_t' \leq 1.25P_t$ ，得 10 分； $1.25P_t < P_t' \leq 1.6P_t$ ，得 9 分； $P_t' > 1.6P_t$ ，得 0 分；
3	发射波形设计	脉冲宽度理论计算值为 τ ，脉冲重复周期 T_r ，学生输入的脉冲宽度和脉冲重复周期分别为 τ' 和 T_r' 。评分标准=标准 1（5 分）+标准 2（5 分）。 标准 1： $\tau \leq \tau' \leq 1\mu s$ ，得 5 分；其余 τ' ，得 0 分。 标准 2： $T_r' \leq 4.2\mu s$ 且 $0.1 \leq \tau' / T_r' \leq 0.5$ ，得 5 分；其余 T_r' ，得 0 分；
实验累计总分按虚拟实验所占百分比进行折算，计入虚拟仿真实验成绩。		

(3) 信号处理系统参数设计模块（占 40%）考核评分标准如下：

序号	实验操作过程	评分标准
1	动目标检测参数设计	学生输入值为 2048，得 10 分； 学生输入值为 4096，得 9 分； 学生输入值为其他值，得 0 分；
2	恒虚警参数设计	根据输入的虚警率 P_{fa} ，取 $N=8$ ，计算所有参考单元的数值和 S_{sum} ，按照公式计算理论门限 $Thsd$ 。 记实际输入门限为 $Thsd'$ ，计算 $Thsd'/Thsd$ 比值 x 。 若 $0.95 \leq x \leq 1.05$ ，10 分；其余值，0 分。
3	单脉冲测角性能分析	根据随机产生的俯仰维、方位维差波束的虚部和实部值，以及和波束值、单脉冲比斜率值，计算理论俯仰角偏差和理论方位角偏差。 学生输入俯仰角偏差和方位角偏差值，计算倍数： x_1 =输入俯仰角偏差/理论俯仰角偏差， x_2 =输入方位角偏差/理论方位角偏差，取 $x=\max(\text{abs}(x_1), \text{abs}(x_2))$ 。 评分标准=标准 1（5 分）+标准 2（5 分）， 标准 1：击中 5 分，脱靶 0 分。

		标准 2: $0.95 \leq x \leq 1.05$ 倍, 5 分; 其他值 0 分。
4	制导律性能分析	点击不同的制导律系数, 运行过 2 个及以上不同比例系数, 得 10 分, 运行 1 个得 5 分;
实验累计总分按虚拟实验所占百分比进行折算, 计入虚拟仿真实验成绩。		

(4) 系统综合设计与测试模块 (占 20%) 考核评分标准如下:

序号	实验操作过程	评分标准
1	综合参数设计	脱靶: 0 分 击中: 判断参数范围: 天线增益 G (dB) (5-40) 发射功率 P_t (W) (50-800) 脉宽 τ (us) (0.1-1) 恒虚警概率 P_{fa} (0-0.1) 制导率比例系数 k (1-8) 都满足 20 分 有 3 个满足 10 分 其余 0 分
实验累计总分按虚拟实验所占百分比进行折算, 计入虚拟仿真实验成绩。		

2-11 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

探测制导与控制技术专业、电子信息工程专业大四学生

(2) 基本知识和能力要求等

- a) 掌握导弹的基本原理及其组成, 知悉主要部件的功能和工作机制;
- b) 了解导弹拦截目标的基本原理和工作过程;
- c) 了解主动雷达导引头的基本工作原理及其组成, 知悉主要部件的功能和工作机制;
- d) 掌握主动雷达导引头的威力计算方法, 熟悉导引头系统参数的设计方法和设计约束, 了解导引头系统参数对目标探测、跟踪的影响;
- e) 了解导引头信号处理的工作流程和主要算法的工作原理;
- f) 熟悉导引头/雷达动目标检测处理算法、恒虚警处理、单脉冲角度测量算法, 掌握恒虚警门限、目标方位/俯仰角度偏差的设计或计算方法, 了解导引头信号/雷达信号处理参数对目标探测、跟踪的影响;
- g) 了解导弹制导律的算法原理, 了解导弹制导律比例系数对导弹飞行控制的影响;
- h) 了解导弹拦截目标动态过程的主要误差指标, 掌握导弹探测制导多参数优化设计方法。

2-12 实验项目应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2018年3月

(2) 已服务过的本校学生人数：786人，并已在三个学期的《探测制导与控制综合实验》的教学中应用。其中：

2018年第一学期，本校探测制导与控制技术专业参加上课和实验的学生人数：35人，任课教师：王静；

2018年第二学期，本校探测制导与控制技术专业参加上课和实验的学生人数：40人，任课教师：王静；

2019年第一学期，本校探测制导与控制技术专业参加上课和实验的学生人数：59人，任课教师：吴礼；

非本校探测制导与控制技术专业学生登录使用的学生人数652人，包括南京航空航天大学信息工程专业学生114人，西安电子科技大学探测制导与控制技术专业学生60人。

(3) 是否纳入到教学计划：是 否

南京理工大学课程教学大纲

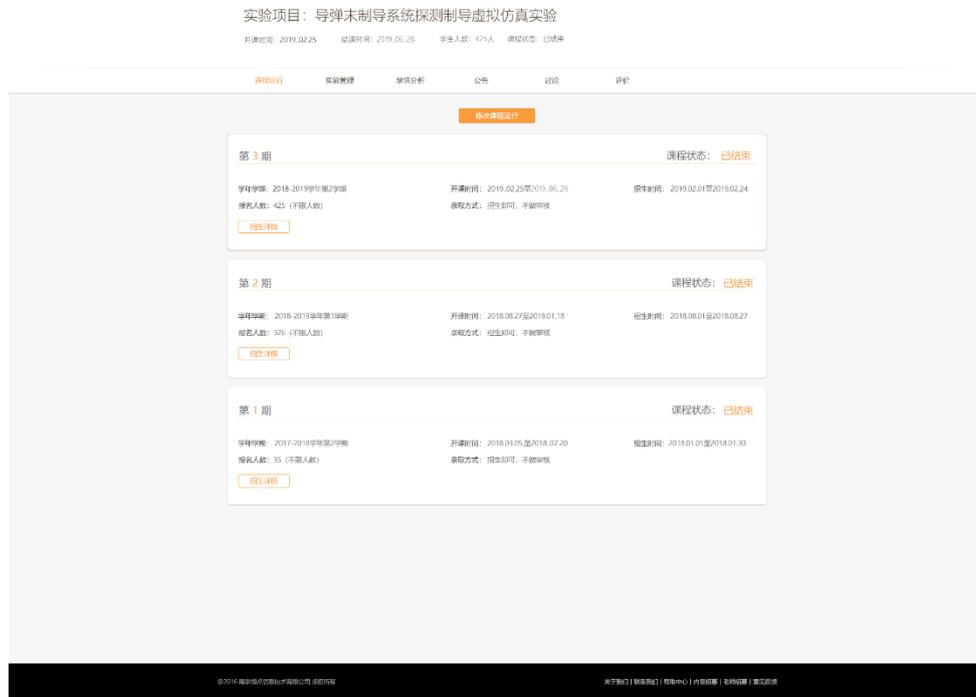
课程编号	04040501	课程名称（中）	探测制导与控制综合实验		学分	学时	
授课语言	中文	课程名称（英）	Comprehensive Experiments of Detection Guidance and Control Techniques		1	40	
开课单位	电子工程与光电技术学院	执笔人	吴礼	课程负责人	吴礼		
课程介绍【课程的学科背景、教学内容（具体到章）、修学该课程所需的预备知识、考核与成绩记载方式；字数300-500字】							
“探测制导与控制综合实验”是探测制导与控制专业高年级本科生的一门专业实验课程。课程以工程设计、应用为背景，系统介绍了基于多普勒、线性调频等体制的探测系统及目标探测方法，典型探测信号波形频谱特性，导弹末制导系统探测制导虚拟仿真导弹拦截目标的动态过程及系统参数对拦截过程的影响，目标探测干扰方法及隐身目标探测方法等内容。本课程对探测制导与控制专业学生树立专业思想，综合运用已学专业知 识，增强动手实践能力，培养创新能力，以及拓宽知识面，具有重要引领和指导作用。							
教学目标【主要表述学生通过课程学习后应掌握的方法、具备的能力；字数控制在200-300字】							
探测制导与控制技术综合实验需达到如下目的： (1) 进一步加强学生对所学专业理念课程内涵的理解； (2) 提高学生综合运用所学专业知 识进行实验设计和结果分析能力； (3) 培养学生的科学研究能力和提供学生进行科学研究的机会。							
教学内容及安排【理论课程内容具体到节或知识块，用分号断开；上标“△”表示重点，“*”表示难点。课程设计、实习列出内容、安排、步骤和要求等。】							
章号	理论教学内容	时间分配（学时）					小计
		讲课	实验	上机	实践	课外	
合 计							
实验项目（参照最近提交的实验项目数据）							

序号	实验名称	实验内容与要求	实验学时	实验类型
01	多普勒探测器目标探测实验	1、实验介绍（内容、目的、注意事项等） 2、正确连接多普勒探测器电路，操作探测器探测运动目标，观测并采集探测器输出信号。分析采集信号并获取运动目标参数，总结实验结果并提交实验报告。要求掌握运动目标多普勒探测原理及多普勒频率的计算和分析。	8	综合实验
02	线性调频探测器目标探测实验	正确连接线性调频探测器电路，操作探测器探测固定目标，观测并采集探测器输出信号。分析采集信号并获取目标距离参数，总结实验结果并提交实验报告。要求掌握线性调频连续波雷达的系统组成及工作原理，掌握目标线性调频探测信号处理方法及目标测距误差分析。	8	综合实验
03	8mm 波段被动探测器目标探测实验	正确连接 8mm 波段被动探测器电路，操作探测器探测具有温度差异的两个目标，观测并采集探测器输出信号。分析采集信号，观察频谱特性，总结实验结果并提交实验报告。要求掌握辐射测量的理论基础、辐射计系统结构和原理、目标被动探测原理和方法等。	8	综合实验
04	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验	实验项目共分为 4 个模块，包括：导弹末制导系统认知、主动雷达导引头总体主要参数设计实验、主动雷达导引头信号处理主要参数设计实验、目标跟踪与制导控制参数设计。每个实验模块下设计相应的系统总体参数或信号处理参数，通过验证测试观察系统参数对导弹末制导系统探测制导动态过程的影响，观察、测量导弹在不同时刻测量得到的弹目角度偏差和制导精度，并提交实验报告。要求理解和掌握导弹末制导系统组成、工作原理和工作过程；理解和掌握导弹末制导系统中各种参数对目标拦截动态过程的影响。	6	综合实验
05	无线电引信干扰实验	正确连接无线电引信电路，操作干扰信号源干扰无线电引信，观测无线电引信输出信号。总结实验结果并提交实验报告。了解等无线电探测的工作原理，掌握无线电引信的工程技术基础及干扰原理。	4	综合实验
06	反金属涂层隐身探测实验	正确连接 8mm 波段被动探测器电路，利用微波吸收材料对目标进行隐身，观测隐身效果。利用目标加热器对目标进行加热，观测并记录被动探测器输出信号。总结实验结果并提交实验报告。了解目标隐身原理，熟悉隐身目标的探测方法。	6	综合实验
教材与参考书目				
书名		作者	出版社	出版年度
探测制导与控制综合实验指导书		吴礼	南京理工大学出版社	2014
毫米波近感技术基础		李兴国	北京理工大学出版社	2009
无线电近感系统		许建中	南京理工大学出版社	2000
课程考核				
考核方式	实验报告			
成绩记载	考勤占 10%，实验操作动手能力占 70%，实验报告占 20%。			

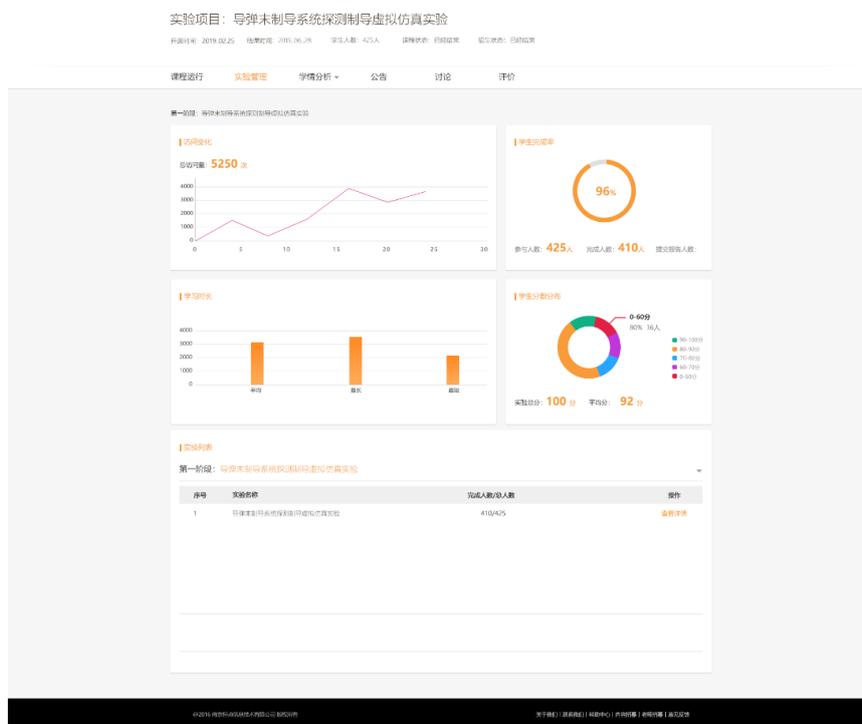
(4) 是否面向社会提供服务: 是 否

(5) 社会开放时间: 2018年9月, 已服务人数: 65人

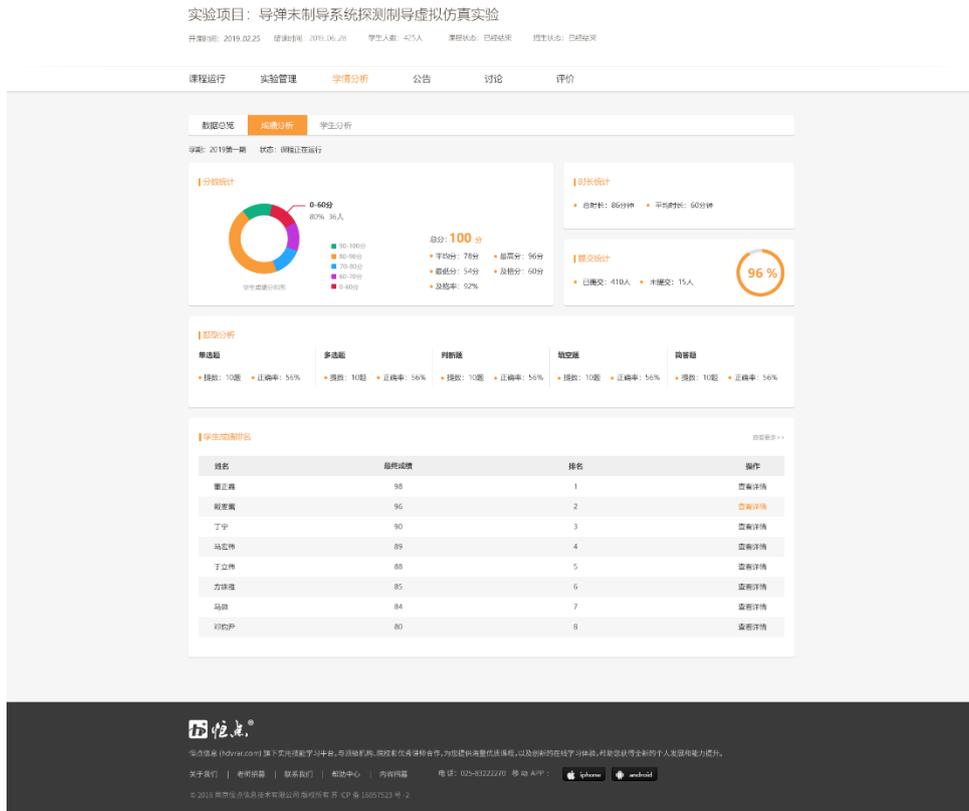
下图为平台显示的本虚拟仿真实验项目的课程运行情况:



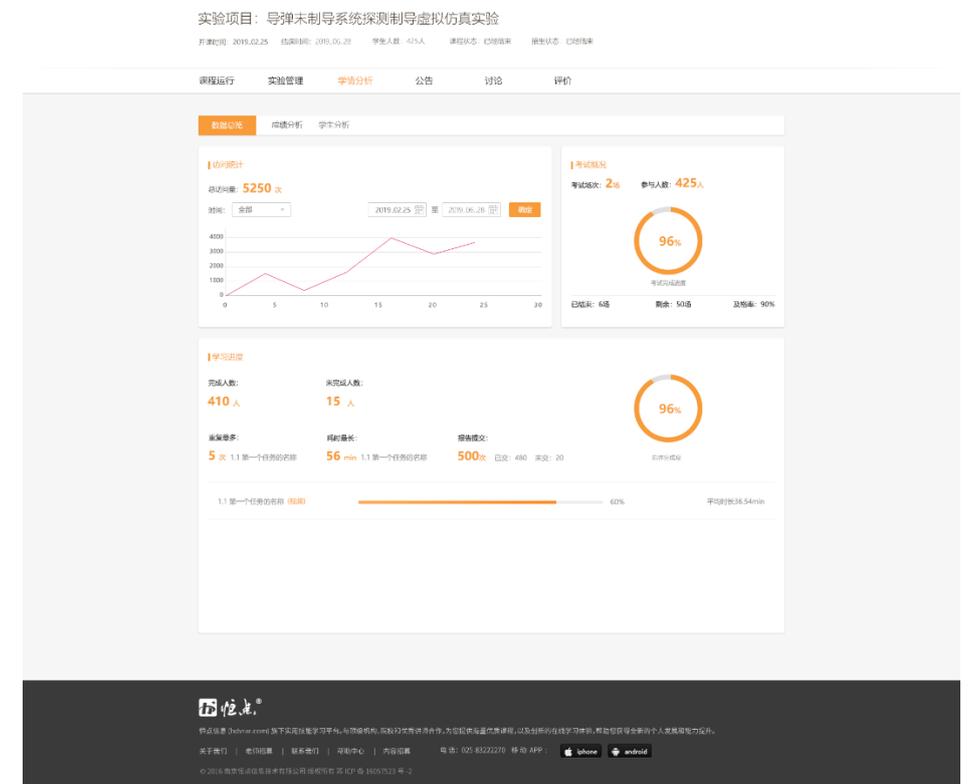
下图为平台显示的本虚拟仿真实验项目的实验管理情况:



下图为平台显示的本虚拟仿真实验项目的学情分析之成绩分析情况：



下图为平台显示的本虚拟仿真实验项目的学情分析之数据总览情况：



3. 实验教学项目相关网络及安全要求描述

3-1 有效链接网址

<http://mool.njust.edu.cn/course/details-expe/210.html>

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）

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。

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

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

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_____ 插件容量_____

下载链接_____

(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）

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。	基于（IE）内核，不支持

浏览器:Google Chrome

下载地址：http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe

<p>3-5 用户硬件配置要求（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>3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）</p> <p>(1) 计算机特殊外置硬件要求：无</p> <p>(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：无</p>
<p>3-7 网络安全</p> <p>(1) 项目系统是否完成国家信息安全等级保护 <input type="checkbox"/>是 <input checked="" type="checkbox"/>否 （勾选“是”，请填写） 级</p>

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</p>

	<p>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。</p>
<p>实验教 学项目</p>	<p>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 其他_____</p> <p>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 type="checkbox"/>其他_____</p>

运行环境	<p>服务器 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 <u>NVIDIA GRID K1</u></p> <p>操作系统 <input type="checkbox"/>Windows Server <input checked="" type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本__</p> <p>数据库 <input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle 其他_____</p> <p>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）_____</p>
项目品质	<p>单场景模型总面数：40 万三角面</p> <p>贴图分辨率：512*512</p> <p>每帧渲染次数：30fps</p> <p>动作反馈时间：1/90s</p> <p>显示刷新率：60HZ</p> <p>分辨率：4K</p>

5. 实验教学项目特色

（体现虚拟仿真实验教学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）实验方案设计思路

导弹是兵器之王，国之重器，是打赢高技术条件下现代化战争的杀手锏。导弹武器系统方面的专业人才培养是国家国防建设的迫切需要。导弹末制导系统的工作原理、动态工作过程及系统总体设计是“探测制导与控制技术”兵器类专业的核心教学内容，其中，导弹末制导系统探测、跟踪、制导、拦截和毁伤目标的动态过程，以及系统及信号处理参数对这个动态过程的影响，涉及到的理论知识点多、技术复杂，学生理解起来难度大。但这部分内容无法给学生开设实体实验，不仅因为代价太大，还涉及到难以解决的安全、保密、实验结果观测等问题。

a) 本实验项目将最新科研成果转化成教学资源，是仿真环境下的真实验，核心要素的逼真度高。实验过程中可随机设置拦截的目标对象（靶机）的位置和运动特性，导弹根据探测结果和制导规律拦截目标，如果参数设计不合理，不能正确发现目标或测量偏差太大无法持续稳定地跟踪目标，都可能会导致拦截失败。学生只有理解、掌握了导引头探测、跟踪目标的原理、算法，针对设定的实验任务，计算并输入了正确的参数，仿真软件在验证测试时，导弹才会成功地拦截目标。实验项目覆盖了导弹末制导系统从总体、探测器到制导的三

个主要环节，学生通过实验能学习和理解从全局到细节的完整知识。能培养学生针对导弹探测制导系统综合设计解决复杂问题的能力和高级思维，项目具有先进性；

b) 以学生为中心，配置丰富的教学资源，采用灵活的教学方法，虚实结合，培养学生的实践创新能力。本实验项目设有知识角，内有教材、视频、实验指导书等丰富的教学资源，教师还可发布根据实验需要录制的微课视频；学生通过在线阅读、观看视频等方式进行预习。实验中，虚拟仿真系统可随机设定实验任务，学生自主思考与设计，通过计算完成参数设计，并通过测试验证观测导弹对目标的拦截效果。实验后，学生可在仿真系统中自主学习，反复练习与思考，进一步优质完成学习，提高水平；系统建有在线互动版块，实现线上线下互动，提高学习质量；项目网站还提供教师在线团队的服务和指导，保证教学的顺利进行；在教学过程中，还利用实验室已有的近程探测设备，让学生可以直观地看到导引头实验装置及其工作波形，帮助学生深入理解目标探测的原理和方法，虚实结合提升学生对探测制导的原理的理解和对系统总体性能的分析设计能力；在综合设计环节鼓励学生通过探究和研讨，设计出个性化的解决方案。本实验项目在操作和认知两个层面实现了实验教学的创新；

c) 攻防对抗，互动性强，挑战度高。本实验项目设计了很多攻防对抗的互动环节，学生在完成本实验项目的过程中，在布置实验任务时，由虚拟教师随机设置目标靶机的参数和特性（包括：目标雷达散射截面积、距离、速度、加速度、航迹等），学生须针对不断变化的来袭目标的情况设计系统参数，提高了实验项目的趣味性、互动性和挑战度。

d) 融入课程思政元素，润物细无声，培养学生的家国情怀。我们把我国发展导弹事业的艰辛历程、老一辈军工人服务国家、献身国防的先进事迹收录在实验项目的在线“知识角”中。学生通过自主学习，激发爱国情怀，增强民族使命感和责任感。

(2) 教学方法创新

a) 采用“一人一题、一次一题”的互动式教学方法，不同学生开展实验，或学生多次开展实验，实验任务的关键参数或场景配置随机给定，提高了实验项目的难度、趣味性和互动性，也提高了实验项目目标达成度评价的准确性。

b) 采用“线下设计、线上测试”的探究式教学方法，在线下通过自主学习、探究完成参数设计；然后在线上观察、测量导弹对目标的拦截效果和动态过程中的角度、速度测量误差，让学生自觉地、主动地学习、探索、掌握导弹探测、制导、拦截目标的机理和导引头参数设计的方法，研究这些参数与拦截

效果的关系，发现影响导弹拦截性能的因素及其内部的联系，从中找出规律。
训练了学生主动学习的能力，提高了实验教学的效果。

(3) 评价体系创新

本实验项目对预习、学习、参数设计、验证测试过程均有详细的客观记录，在预习和认知环节，系统设有自测题，学生在自测环节需取得 80% 的成绩才能真正进入实验。在实验环节，系统自动对学生提交的实验结果进行客观评分，在学生完成所有实验步骤后生成实验报告。实验项目平台具有数据分析和统计功能，能够对教学过程的全部数据进行评估、评价，实现了教学过程质量监控与评价，并可依据各类自定义教学数据分析结果，实施持续改进。能够保证实时在线管理和对实验效果的评价考核，保证教师大规模网上授课的开展。

(4) 对传统教学的延伸与拓展

本实验项目将最新科研成果转化成实验教学资源，实验内容具有先进性、前沿性，拓展了传统实验教学的深度；该实验项目充分利用互联网+环境下的信息化资源，网络使用便捷，配套自主学习教学资源丰富，拓展了传统实验教学的广度；本仿真实习项目建有开放的网络使用平台，实验项目网络使用便捷，并能满足大规模线上使用需求，方便学生随时随地开展实验；仿真实习项目建有配套的电子教材和操作导引视频，以及关于导弹、导引头、导引头信号处理方面的教学资源，便于学生自主学习，通过实验能有效提升学生在导弹末制导系统总体设计方面的能力与创新实践素养；同时，本虚拟仿真实验项目也为导弹系统研制、生产的科研院所和工业部门提供了一个很好的人员培训平台，通过这个平台，相关技术人员能更好地理解系统参数对导弹拦截过程的影响机理，服务社会也是本实验项目对传统教学的延伸和拓展。

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及预计服务人数)

(1) 项目持续建设与服务计划:

本项目坚持“重点突出,持续发展”的理念,在现有实验教学项目建成后,持续收集学生对已有的实验项目实施效果的意见反馈,加强虚拟仿真实验教学资源建设,将部分实体实验的探测信号时域波形、频谱等补充到认知环节,将参数设计中的设计约束完善到软件中,补充更多的参数设计内容,完善测试数据的分析功能,进一步充实实验项目内容,扩展软件功能,使项目成为一个体系完善、运行高效、特色鲜明、开放服务的在线实验教学资源。具体计划如下:

- 2020 年,将导引头实体实验中的部分信号波形、频谱补充到认知环节;
- 2021 年,将参数设计中的设计约束完善到软件中;
- 2022 年,补充接收机噪声系数、导弹机动性能等参数设计的实验步骤;
- 2023 年,在回波信号模拟中完善地面杂波环境模拟;
- 2024 年,完善对测角、测速误差曲线等实验数据的分析功能。

(2) 面向高校的教学推广应用计划:

本虚拟仿真实验项目秉持“资源共享”的理念,建设产学研结合的虚拟实验教学中心,扩大高校的在线开放共享范围。首先向开设探测制导与控制本科专业的哈工大、西工大、北理工、北航、南航等高校进行推广,后期将陆续在各高校进行持续推广。具体计划如下:

- 2020 年,服务在校学生人数超过 600 人/年;
- 2021 年,服务在校学生人数超过 700 人/年;
- 2022 年,服务在校学生人数超过 800 人/年;
- 2023 年,服务在校学生人数超过 900 人/年;
- 2024 年,服务在校学生人数超过 1000 人/年。

(3) 面向社会的推广应用计划:

本虚拟仿真实验项目除可以为本科和研究生提供实验授课,还可用于相关企业、研究所的人员培训。目前已在航天科工十院十部推广应用。下一步将与其他相关工业部门合作,开展人员培训,同时,进一步探索教学科研协同、行业、企业联合培养人才的实验教学新模式、新机制。预计服务行业企业员工的人数为 200 人/年。

- 2020 年,服务行业企业员工人数超过 100 人/年;
- 2021 年,服务行业企业员工人数超过 200 人/年;
- 2022 年,服务行业企业员工人数超过 300 人/年;
- 2023 年,服务行业企业员工人数超过 350 人/年;

2024 年，服务行业企业员工人数超过 400 人/年。

7. 知识产权

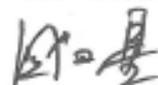
软件著作权登记情况	
软件著作权登记情况	<input checked="" type="checkbox"/> 已登记 <input type="checkbox"/> 未登记
完成软件著作权登记的，需填写以下内容	
软件名称	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验软件 V1.0
是否与项目名称一致	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
著作权人	南京理工大学
权利范围	全部权利
登记号	2019SR0863279

8. 诚信承诺

本人承诺：所申报的实验教学设计具有原创性，项目所属学校对本实验项目内容（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项目的一切资源）享有著作权，保证所申报的项目或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

本人已认真填写、检查申报材料，保证内容真实、准确、有效。

实验教学项目负责人（签字）：



2019年9月24日

9. 附件材料清单

1. 政治审查意见

（本校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。须由学校党委盖章。无统一格式要求。）

南京理工大学党委对本虚拟仿真实验教学项目的政治审查意见。

2. 校外评价意见

（评价意见作为项目有关学术水平、项目质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由项目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。）

西安电子科技大学的应用证明；

南京航空航天大学的应用证明；

中国航天科工集团第十研究院第十总体设计部的应用证明。

3. 软件著作权证书

“导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验软件 V1.0”软件著作权登记证书。

南京理工大学虚拟仿真实验项目思想政治审查表

实验教学项目名称	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验				
项目负责人	盛卫星	职称/职务	教授/副院长	政治面貌	中共党员
团队主要成员	姓名	职称/职务			政治面貌
	郭山红	副教授			群众
	张仁李	副教授			中共党员
	韩玉兵	教授			群众
	吴礼	讲师			群众
	王静	工程师			群众
项目内容简介	<p>导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验教学项目利用虚拟仿真模拟攻防场景下导弹探测、跟踪、制导、拦截目标的动态过程及系统参数对动态过程的影响，包括导引头认知、系统总体参数设计、信号处理系统参数设计和综合设计与测试四个模块。涉及主动雷达导引头威力计算、弱信号检测、测角与角度跟踪、制导率等方面的知识点。学生在学习导弹和导引头知识基础上，针对具有不同距离和特性的目标，设计合适的系统和信号处理参数，通过观察、测量导弹与目标相对运动过程中的探测误差和拦截效果，理解和掌握参数设计对导弹末制导系统探测制导性能的影响。本实验项目已随《探测制导与控制综合实验》课程在我校探测制导与控制专业的教学中应用，并被航天科工集团十院等单位引进用于人员培训，取得了良好的教学效果。</p>				
学院党委 政审意见	<p style="font-size: 1.2em;">该团队成员均能以马列主义的立场和观点，认真学习党的理论，坚定理想信念，平时团结同学，精神良好，有良好的作风纪律。该项目内容无不良政治倾向，符合要求。</p> <p style="text-align: right;">签字（盖章）：  2019年8月23日</p>				
学校党委 审核意见	<p style="font-size: 1.5em; text-align: center;">情况属实。</p> <p style="text-align: right;">签字（盖章）：  张骏 2019年8月23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。

应用证明

项目名称	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验软件
应用单位	南京航空航天大学
应用起止时间	2019年3月~2019年9月
单位地址与邮编	江苏省南京市江宁区将军大道29号, 211106
联系人与电话	周贞琪, 15715150607

应用推广情况及产生的社会效益:

2019年3月起, 我校将南京理工大学研制的“导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验”项目课件应用于信息工程专业《雷达原理》课程的课内实验。至今利用该虚拟仿真实验项目进行实验的学生人数为114人。

该虚拟仿真实验项目课件通过三维虚拟现实技术帮助学生掌握导弹及导引头的组成、工作原理, 通过虚拟仿真手段帮助学生观察、测试导弹探测、跟踪、制导、拦截目标的动态过程及系统参数对动态过程的影响。学生通过使用该软件, 直观地观测了导弹末制导系统探测制导的完整过程, 学习、理解和掌握了导弹末制导系统组成、工作原理和工作过程; 理解和掌握了导弹末制导系统中多项参数对目标拦截动态过程的影响; 加深了学生对探测、制导与控制理论知识的理解, 提高了学生在探测制导系统方面的总体设计能力和实践能力。

南京理工大学研制的“导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验”项目课件, 算法正确, 技术先进, 教学方式新颖, 在操作和认知两个层面实现了实验教学的创新, 互动性好, 趣味性强, 挑战度高, 配套资料丰富, 教学效果好。

南京航空航天大学

(盖章)

二〇一九年九月十二日

应用证明

项目名称	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验软件
应用单位	西安电子科技大学
应用起止时间	2019年3月~2019年9月
单位地址与邮编	陕西省西安市西沔路兴隆段266号, 710126
联系人与电话	冯冬竹, 13389281325/029-81891860
应用推广情况及产生的社会效益: <p>2019年3月起,我校空间科学与技术学院探测制导与控制技术专业针对《制导与控制原理》课程,采用南京理工大学研制的“导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验项目”课件,对学生开设课内实验,作为实体实验的补充。至今利用该虚拟仿真实验项目进行实验的学生人数为60人。</p> <p>该软件在认知学习模块,通过虚拟现实技术,让学生对导弹和导引头组成、导引头信号处理流程和关键部位波形有了直观的了解和认识;在设计实验模块,通过虚拟仿真的手段,让学生直观地观察、测量导弹末制导系统探测制导的完整过程和系统参数对这个动态过程的影响。学生通过线下设计、线上测试,加深了对雷达威力方程、信号处理算法机理的理解,提高了在探测制导方面的总体设计能力和实践能力。</p> <p>南京理工大学研制的“导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验”项目课件是仿真环境下的真实验,核心要素的逼真度高,技术先进,教学方式新颖,互动性好,挑战度高,取得了很好的教学效果。</p>	

西安电子科技大学(盖章)

二〇一九年九月六日



中华人民共和国国家版权局
计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第4284036号

软件名称： 导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验软件
[简称： 导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验]
V1.0

著作权人： 南京理工大学

开发完成日期： 2019年07月25日

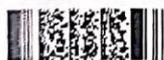
首次发表日期： 未发表

权利取得方式： 原始取得

权利范围： 全部权利

登记号： 2019SR0863279

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。



No. 04380005



10 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”，学校将严格贯彻《教育部高等教育司关于加强国家虚拟仿真实验教学项目持续服务和管理有关工作的通知》（教高司函〔2018〕56号）的要求，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。



主管校领导（签字）：

（学校公章）



2019年8月23日

南京理工大学课程教学实施计划

上课时间：2018年3月至2018年7月 春季学期 班级：9141043301 任课教师：吴礼、郭山红、王静

课程名称：《探测制导与控制综合实验》 学分数：1 总学时数：40 考核方式：实验操作和实验报告

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
1		多普勒探测器认知 0.5学时	了解运动目标的探测原理和基本组成；	1) 教师演示拆解多普勒探测器实验装置； 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测多普勒探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形； 3) 教师演示多普勒探测器的使用方法，讲解实验的操作过程和注意事项。	第1周 周二 第一大节 实验室 A247		1) 多普勒探测器；
2	多普勒探测器运动目标探测实验 10学时	运动目标探测与最大发现距离测量 3.5学时	1) 了解雷达探测的威力方程，熟悉影响作用距离的主要因素； 2) 了解目标雷达散射截面积的概念及其对探测距离的影响。	1) 将探测器固定在三角架上，被测目标（角反射器 1）置于小车杆上，注意目标中心与天线波束中心保持水平； 2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V 和+9V，并用数字万用表测量确定，然后关闭电源； 3) 通过两付电源夹子线接到多普勒探测器对应的电源输入端，并将多普勒探测器输出接到示波器。打开电源，等待探测器稳定； 4) 径向匀速拉动放于轨道上的小车，接近探测器装置运动，观察示波器上显示的时域波形和频谱仪上显示的信号频谱； 5) 记录频谱仪上显示的目标多普勒谱线高于噪声电平 10dB 时，测量目标与探测器的距离； 6) 更换目标（更换不同大小的角反射器），保持大致相同的目标运动速度，重复步骤 4 和 5，记录多普勒探测器对不同目标的探测距离。	第1周 周二 第一、二大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	2) 面积大小不同的角散射体若干； 3) 三角架、木制小车及轨道； 4) 直流稳压电源； 5) 示波器； 6) 频谱仪； 7) 电脑； 8) 数字万用表。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
3		运动目标多普勒频率测量 4学时	1) 了解多普勒频率与目标运动速度和运动方向的关系; 2) 了解目标运动速度的计算方法。	1) 在上一个实验模块的基础上, 记录频谱仪上显示的目标的多普勒频率, 根据该多普勒频率计算目标运动速度, 并与实际目标运动速度的估计值进行比较; 2) 将小车运动的轨道相对探测器天线法线方向旋转一个角度(分别为 10 度、30 度、60 度), 即轨道小车上目标中心偏离天线波束中心, 匀速拉动小车, 记录示波器和频谱仪上显示的目标多普勒频率; 改变角度, 重复上述实验; 3) 将轨道垂直于探测器天线法线方向放置, 匀速拉动小车平行于探测器运动, 即运动时目标与探测器距离保持不变, 无径向运动分量, 观察目标运动时示波器和频谱仪上显示的回波信号时域波形和频谱。	第 1 周 周二 第三、四节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
4		多普勒探测器回波信号频谱分析 2学时	了解多普勒探测器回波信号频谱分析算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的连续波多普勒探测器时域目标探测信号, 并作图显示; 3) 对运动目标回波信号进行傅里叶变换分析, 并作图显示; 4) 基于变换实现目标速度信息提取; 5) 分析处理结果。	第 2 周 周二 第一小节 实验室 A247	完成编程、调试、测试; 提交实验报告	
5	线性调频探测器目标探测实验	线性调频探测器认知 0.5学时	了解线性调频探测器工作原理和基本组成;	1) 教师演示拆解线性调频探测器实验装置; 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测线性调频探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形; 3) 教师演示线性调频探测器的使用方法, 讲解实验的操作过程和注意事项。	第 3 周 周二 第一小节 实验室 A247		1) 线性调频探测器; 2) 面积大小不同的金属球若干;
6		静止金属目标探测与最大发现距离测量	1) 了解线性调频探测器目标距离	1) 将线性调频探测器固定在三角架上;	第 3 周 周二	分组完成实验	3) 三角架;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数		实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
	线性调频探测器目标探测实验	7.5学时		的计算方法； 2) 了解影响线性调频探测器作用距离的主要因素。	2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定,然后关闭电源; 3) 通过两付电源夹子线接到探测器电源输入端; 4) 将探测器输出接到示波器和频谱仪; 5) 打开电源,等待探测器稳定; 6) 在离探测器一定距离的地面上放置金属目标,探测器对其扫描,观察示波器显示的时域波形、频谱仪显示的频谱变化,记录频谱仪上接收信号谱线超过噪声基底10dB时,接收信号频率及对应的目标与探测器的距离值; 7) 径向移动金属目标改变距离,观察示波器、频谱仪上显示的时域波形和信号频率及幅度变化,记录频率及对应的目标与探测器之间的距离值。 8) 改变大小不同的金属目标,重复上述实验。	第一、二、三、四大节 电光学院北侧小操场	操作; 提交实验报告	4) 直流稳压电源; 5) 示波器; 6) 频谱仪; 7) 电脑; 8) 数字万用表。
7	10学时	线性调频探测器回波信号频谱分析及信号处理 2学时		了解线性调频探测器回波信号分析处理算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的线性调频探测器时域目标探测信号,并作图显示; 3) 分别对上/下扫频段目标回波信号进行傅里叶变换,并作图显示; 4) 基于变换信号完成目标的距离、速度信息提取; 5) 在时域信号中补零,并重复步骤3、4; 6) 对比信号处理结果的不同。	第4周 周二 第一大节 实验室 A247	完成编程、调试、测试;提交实验报告	
8	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验	系统认知实验模块	导弹认知	1) 熟悉导弹组成及功能; 2) 掌握导弹跟踪制导原理;	1) 点击“导弹认知”,进入场景,观测导弹外观。 2) 点击导弹3D图,观察导弹内部组成结构。 3) 分别点击导弹各部件,观看右侧知识框,了解该部件作用。	第4周 周二 第一大节 第三小节	在线上完成10道及以上的自测题	联网电脑 实验指导书第3-6页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
9	6学时	0.5学时	主动雷达导引头认知	1) 熟悉主动雷达导引头组成; 2) 掌握主动雷达导引头工作原理;	1) 点击实验页眉“系统认知/主动雷达导引头认知”, 进入导引头装配车间场景, 观测导引头外观。 2) 点击导引头 3D 图, 观察导引头内部组成结构。 3) 分别点击导引头各部件, 观看右侧知识框, 了解该部件作用。	实验室 B301	(单项选择题), 并提交。	
10			导引头信号处理认知	1) 熟悉雷达导引头信号处理流程; 2) 掌握雷达导引头各部件输入输出信号特点及过程;	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”, 进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图, 了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块, 观看右侧知识了解该单元作用, 熟悉其输入输出波形。			
11			目标拦截过程动态演示	1) 熟悉导弹跟踪制导目标处理过程。 2) 熟悉导弹跟踪目标过程中的测速、测角误差曲线。	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”, 进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图, 了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块, 观看右侧知识了解该单元作用, 熟悉其输入输出波形。			
12		导引头总体参数设计实验模块	导引头天线参数设计	1) 掌握导引头威力方程计算。 2) 熟悉天线增益、效率及口径关系。 3) 理解天线增益	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算天线增益; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变天线增益的设计值, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析天线增益对目标跟踪制导性能的影响。	第 4 周 周二 第二大节 实验室 B302	完成实验操作; 提交实验结果。	联网电脑 实验指导书第 7-9 页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
13		2学时		的设计约束。				
		收发系统参数设计	1) 熟悉导引头威力方程计算。 2) 了解发射功率大小与导弹电池供电关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射功率; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射功率的设计值, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析发射功率对目标跟踪制导性能的影响。			联网电脑 实验指导书第10-11页	
14			发射波形设计	1) 掌握 HPRF -PD 测速满足的约束条件。 2) 了解常规占空比范围。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动发射波形参数对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书第12-13页
15		信号处理系统参数设计 2学时	动目标检测参数设计	1) 熟悉 FFT 点数与测速分辨率关系。 2) 了解FFT运算与信号处理硬件关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算动目标检测的积累时间和对应的 FFT 点数; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变动目标检测参数, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动目标检测的积累时间和对应的FFT点数对目标跟踪制导影响。	第4周 周二 第三大节 实验室 B302	完成实验操作; 提交实验结果。	联网电脑 实验指导书 P14-17
16			恒虚警	1) 熟悉单元平均	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的临近单元测试结果, 采用临			联网电脑

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
17		参数设计	恒虚警处理算法及过程。 2) 掌握 CA-CFAR 的计算方法。 3) 理解恒虚警概率、恒虚警门限与目标检测概率关系。	近单元平均恒虚警算法，利用恒虚警门限计算公式，在线下设计计算并输入恒虚警检测门限值； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计的恒虚警门限与理论门限之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变恒虚警概率、恒虚警门限的设计值，对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析虚警概率、恒虚警算法对目标跟踪制导影响。			实验指导书 P18-20
		单脉冲测角性能分析	1) 熟悉单脉冲测角原理。 2) 掌握振幅和差式单脉冲测角俯仰角偏差和方位角偏差计算方法。 3) 了解角跟踪回路工作原理。	1) 针对随机布置的实验任务，根据平台给定的天线和、差波束输出结果，参考单脉冲测角计算公式，在线下设计计算方位角偏差和俯仰角偏差； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计计算的角度偏差与理论角偏差之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变方位角和俯仰角偏差值，对多次试验得到的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析角偏差对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P21-24
		制导律性能分析	1) 了解制导系统及比例导引法工作原理。 2) 掌握比例导引法轨迹特点及生成计算方法。	1) 根据实验任务设计比例系数，观察、测量导弹拦截目标的动态过程； 2) 改变比例系数，观察导引头跟踪目标轨迹变化情况； 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析，分析比例系数对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P25-27
18							

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
19		系统综合设计 实验模块 1.5学时	1) 在掌握各模块工作原理基础上进行综合设计。 2) 通过多参数组合优化设计,提高学生在导弹末制导系统总体设计方面解决复杂问题的能力。	1) 根据实验任务和平台给定的部分系统参数,选择飞机类型和导弹拦截目标的方向,在线下分别对天线增益、发射功率、发射脉冲宽度、制导律比例系数和恒虚警概率进行设计,在仿真平台上进行验证测试,并观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 2) 采用正交试验法对多参数进行优化组合,并考虑这些参数本身的设计约束,重新验算并测试。观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析,分析参数优化的成效。	第4周 周二 第四大节 实验室 B302	完成实验操作;最后生成实验报告,并提交。	联网电脑 实验指导书 P28-30
20	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计 认知 0.5学时	了解毫米波辐射计的工作原理和基本组成	1) 教师介绍毫米波段目标辐射特性; 2) 教师介绍毫米波辐射计地面金属目标探测识别方法; 3) 教师介绍毫米波辐射计空中金属目标探测识别方法; 4) 教师演示拆解毫米波辐射计; 2) 教师介绍辐射计设计基本参数指标。	第5周 周二 第一大节 实验室 A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源 3) 数字万用表;
21	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计地面目标探测 4学时	了解地面金属目标与普通地面的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计地面金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源,两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V和+9V连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 在离毫米波辐射计天线前面一定距离的地面上放置一平面金属目标板。	第5周 周二 第一、二大节 光电学院北侧小操场	分组完成实验操作;提交实验报告	4) 示波器; 5) 三角架; 6) 毫米波吸波材料; 7) 支撑杆若干。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
22		毫米波辐射计空中目标探测 3.5学时		6) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 7) 将毫米波辐射计对着地面匀速扫描, 寻找扫描范围内的金属目标, 观察示波器并记录数据; 重复多次测量。 8) 在金属目标上覆盖吸波材料, 重复步骤 7, 观察示波器并记录数据; 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;			
			了解空中金属目标与天空背景的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计空中金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源, 两输出端口电压分别调至+18V 和+9V, 并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V 和+9V 连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 6) 将探测器天线对着空中扫描, 观察并记录示波器输出。 7) 选择平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前一定距离的位置, 观察 并记录示波器输出; 重复多次测量。 8) 选择覆有吸波材料(即黑体)的平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前和 7 相同距离的位置, 观察并记录示波器输出; 重复多次测量。 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;	第 5 周 周二 第三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
23	目标电磁隐身特性测试实验	雷达目标电磁隐身认知 0.5学时	了解目标电磁隐身机理	1) 教师介绍雷达目标电磁隐身的机理和途径; 2) 教师介绍金属目标温度控制装置的组成和工作原理;	第 6 周 周二 第一大节 实验室A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源
24	6学时		了解金属目标采用涂敷材料后的	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上, 连接直流电源18V 和9V(见实样), 输出接到示波器;	第 6 周		3) 数字万用表; 4) 示波器;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
		涂敷金属目标电磁散射特性测量 5.5学时	散射特性 了解涂敷金属目标在温度变化时散射特性的变化情况。	2) 在地面放一金属目标，将探测器对着地面、金属目标扫描，观察示波器波形并记录实验数据； 3) 更换金属目标为涂层隐身金属目标，或在金属目标上覆盖吸波材料，重复步骤2，观察示波器波形并记录实验数据； 4) 给温度控制器加电，设定温度（因材料和环境温度而定），加热该涂层隐身金属目标，重复步骤2、3，观察示波器波形实验数据； 5) 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据。 6) 更换非金属目标，观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据；	周二 第二、三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	5) 三角架； 6) 金属板、非金属板（目标） 7) 毫米波吸波材料； 8) 支撑杆若干； 9) 加热装置。

南京理工大学课程教学实施计划

上课时间：2018年8月至2018年9月 夏季学期 班级：9151043301 任课教师：王静、郭山红、吴礼
 课程名称：《探测制导与控制综合实验》 学分数：1 总学时数：40 考核方式：实验操作和实验报告

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
1	多普勒探测器运动目标探测实验 10学时	多普勒探测器认知 0.5学时	了解运动目标的探测原理和基本组成；	1) 教师演示拆解多普勒探测器实验装置； 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测多普勒探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形； 3) 教师演示多普勒探测器的使用方法，讲解实验的操作过程和注意事项。	第1周 周一 第一大节 实验室 A247		1) 多普勒探测器； 2) 面积大小不同的角散射体若干；
2		运动目标探测与最大发现距离测量 3.5学时	1) 了解雷达探测的威力方程，熟悉影响作用距离的主要因素； 2) 了解目标雷达散射截面积的概念及其对探测距离的影响。	1) 将探测器固定在三角架上，被测目标（角反射器 1）置于小车杆上，注意目标中心与天线波束中心保持水平； 2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V 和+9V，并用数字万用表测量确定，然后关闭电源； 3) 通过两付电源夹子线接到多普勒探测器对应的电源输入端，并将多普勒探测器输出接到示波器。打开电源，等待探测器稳定； 4) 径向匀速拉动放于轨道上的小车，接近探测器装置运动，观察示波器上显示的时域波形和频谱仪上显示的信号频谱； 5) 记录频谱仪上显示的目标多普勒谱线高于噪声电平 10dB 时，测量目标与探测器的距离； 6) 更换目标（更换不同大小的角反射器），保持大致相同的目标运动速度，重复步骤 4 和 5，记录多普勒探测器对不同目标的探测距离。	第1周 周一 第一、二大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	3) 三角架、木制小车及轨道； 4) 直流稳压电源； 5) 示波器； 6) 频谱仪； 7) 电脑； 8) 数字万用表。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
3		运动目标多普勒频率测量 4学时	1) 了解多普勒频率与目标运动速度和运动方向的关系; 2) 了解目标运动速度的计算方法。	1) 在上一个实验模块的基础上, 记录频谱仪上显示的目标的多普勒频率, 根据该多普勒频率计算目标运动速度, 并与实际目标运动速度的估计值进行比较; 2) 将小车运动的轨道相对探测器天线法线方向旋转一个角度(分别为 10 度、30 度、60 度), 即轨道小车上目标中心偏离天线波束中心, 匀速拉动小车, 记录示波器和频谱仪上显示的目标多普勒频率; 改变角度, 重复上述实验; 3) 将轨道垂直于探测器天线法线方向放置, 匀速拉动小车平行于探测器运动, 即运动时目标与探测器距离保持不变, 无径向运动分量, 观察目标运动时示波器和频谱仪上显示的回波信号时域波形和频谱。	第 1 周 周二 第一、二大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
4		多普勒探测器回波信号频谱分析 2学时	了解多普勒探测器回波信号频谱分析算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的连续波多普勒探测器时域目标探测信号, 并作图显示; 3) 对运动目标回波信号进行傅里叶变换分析, 并作图显示; 4) 基于变换实现目标速度信息提取; 5) 分析处理结果。	第 1 周 周二 第三、四大节 实验室 A247	完成编程、调试、测试; 提交实验报告	
5	线性调频探测器目标探测实验	线性调频探测器认知 0.5学时	了解线性调频探测器工作原理和基本组成;	1) 教师演示拆解线性调频探测器实验装置; 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测线性调频探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形; 3) 教师演示线性调频探测器的使用方法, 讲解实验的操作过程和注意事项。	第 1 周 周三 第一大节 实验室 A247		1) 线性调频探测器; 2) 面积大小不同的金属球若干;
6		静止金属目标探测与最大发现距离测量	1) 了解线性调频探测器目标距离	1) 将线性调频探测器固定在三角架上;	第 1 周 周三	分组完成实验	3) 三角架;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数		实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
	线性调频探测器目标探测实验	7.5学时		的计算方法； 2) 了解影响线性调频探测器作用距离的主要因素。	2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定,然后关闭电源; 3) 通过两付电源夹子线接到探测器电源输入端; 4) 将探测器输出接到示波器和频谱仪; 5) 打开电源,等待探测器稳定; 6) 在离探测器一定距离的地面上放置金属目标,探测器对其扫描,观察示波器显示的时域波形、频谱仪显示的频谱变化,记录频谱仪上接收信号谱线超过噪声基底10dB时,接收信号频率及对应的目标与探测器的距离值; 7) 径向移动金属目标改变距离,观察示波器、频谱仪上显示的时域波形和信号频率及幅度变化,记录频率及对应的目标与探测器之间的距离值。 8) 改变大小不同的金属目标,重复上述实验。	第一、二、三、四大节 电光学院北侧小操场	操作; 提交实验报告	4) 直流稳压电源; 5) 示波器; 6) 频谱仪; 7) 电脑; 8) 数字万用表。
7	10学时	线性调频探测器回波信号频谱分析及信号处理 2学时		了解线性调频探测器回波信号分析处理算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的线性调频探测器时域目标探测信号,并作图显示; 3) 分别对上/下扫频段目标回波信号进行傅里叶变换,并作图显示; 4) 基于变换信号完成目标的距离、速度信息提取; 5) 在时域信号中补零,并重复步骤3、4; 6) 对比信号处理结果的不同。	第1周 周四 第一大节 实验室 A247	完成编程、调试、测试;提交实验报告	
8	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验	系统认知实验模块	导弹认知	1) 熟悉导弹组成及功能; 2) 掌握导弹跟踪制导原理;	1) 点击“导弹认知”,进入场景,观测导弹外观。 2) 点击导弹3D图,观察导弹内部组成结构。 3) 分别点击导弹各部件,观看右侧知识框,了解该部件作用。	第1周 周四 第二大节	在线上完成10道及以上的自测题	联网电脑 实验指导书第3-6页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
9	6学时	0.5学时	主动雷达导引头认知	1) 熟悉主动雷达导引头组成; 2) 掌握主动雷达导引头工作原理;	1) 点击实验页眉“系统认知/主动雷达导引头认知”,进入导引头装配车间场景,观测导引头外观。 2) 点击导引头3D图,观察导引头内部组成结构。 3) 分别点击导引头各部件,观看右侧知识框,了解该部件作用。	实验室 B301	(单项选择题),并提交。	
10			导引头信号处理认知	1) 熟悉雷达导引头信号处理流程; 2) 掌握雷达导引头各部件输入输出信号特点及过程;	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”,进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图,了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块,观看右侧知识了解该单元作用,熟悉其输入输出波形。			
11			目标拦截过程动态演示	1) 熟悉导弹跟踪制导目标处理过程。 2) 熟悉导弹跟踪目标过程中的测速、测角误差曲线。	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”,进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图,了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块,观看右侧知识了解该单元作用,熟悉其输入输出波形。			
12		导引头总体参数设计实验模块	导引头天线参数设计	1) 掌握导引头威力方程计算。 2) 熟悉天线增益、效率及口径关系。 3) 理解天线增益	1) 针对随机布置的实验任务,根据平台给定的系统参数,设计计算天线增益; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证,观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变天线增益的设计值,对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析,分析天线增益对目标跟踪制导性能的影响。	第1周 周四 第二、三大节	完成实验操作;提交实验结果。	联网电脑 实验指导书第7-9页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
13		2学时		的设计约束。				
		收发系统参数设计	1) 熟悉导引头威力方程计算。 2) 了解发射功率大小与导弹电池供电关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射功率; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射功率的设计值, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析发射功率对目标跟踪制导性能的影响。				
14		发射波形设计	1) 掌握 HPRF -PD 测速满足的约束条件。 2) 了解常规占空比范围。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动发射波形参数对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书第 12-13页	
15		信号处理系统参数设计	动目标检测参数设计	1) 熟悉 FFT 点数与测速分辨率关系。 2) 了解 FFT 运算与信号处理硬件关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算动目标检测的积累时间和对应的 FFT 点数; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变动目标检测参数, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动目标检测的积累时间和对应的 FFT 点数对目标跟踪制导影响。	第 1 周 周四 第三、四大节	完成实验操作; 提交实验结果。	联网电脑 实验指导书 P14-17
16		2学时	恒虚警	1) 熟悉单元平均	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的临近单元测试结果, 采用临	实验室 B302		联网电脑

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
17		参数设计	恒虚警处理算法及过程。 2) 掌握 CA-CFAR 的计算方法。 3) 理解恒虚警概率、恒虚警门限与目标检测概率关系。	近单元平均恒虚警算法，利用恒虚警门限计算公式，在线下设计计算并输入恒虚警检测门限值； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计的恒虚警门限与理论门限之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变恒虚警概率、恒虚警门限的设计值，对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析虚警概率、恒虚警算法对目标跟踪制导影响。			实验指导书 P18-20
		单脉冲测角性能分析	1) 熟悉单脉冲测角原理。 2) 掌握振幅和差式单脉冲测角俯仰角偏差和方位角偏差计算方法。 3) 了解角跟踪回路工作原理。	1) 针对随机布置的实验任务，根据平台给定的天线和、差波束输出结果，参考单脉冲测角计算公式，在线下设计计算方位角偏差和俯仰角偏差； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计计算的角度偏差与理论角偏差之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变方位角和俯仰角偏差值，对多次试验得到的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析角偏差对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P21-24
		制导律性能分析	1) 了解制导系统及比例导引法工作原理。 2) 掌握比例导引法轨迹特点及生成计算方法。	1) 根据实验任务设计比例系数，观察、测量导弹拦截目标的动态过程； 2) 改变比例系数，观察导引头跟踪目标轨迹变化情况； 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析，分析比例系数对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P25-27
18							

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
19		系统综合设计 实验模块 1.5学时	1) 在掌握各模块工作原理基础上进行综合设计。 2) 通过多参数组合优化设计,提高学生在导弹末制导系统总体设计方面解决复杂问题的能力。	1) 根据实验任务和平台给定的部分系统参数,选择飞机类型和导弹拦截目标的方向,在线下分别对天线增益、发射功率、发射脉冲宽度、制导律比例系数和恒虚警概率进行设计,在仿真平台上进行验证测试,并观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 2) 采用正交试验法对多参数进行优化组合,并考虑这些参数本身的设计约束,重新验算并测试。观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析,分析参数优化的成效。	第1周 周四 第四大节 实验室 B302	完成实验操作;最后生成实验报告,并提交。	联网电脑 实验指导书 P28-30
20	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计 认知 0.5学时	了解毫米波辐射计的工作原理和基本组成	1) 教师介绍毫米波段目标辐射特性; 2) 教师介绍毫米波辐射计地面金属目标探测识别方法; 3) 教师介绍毫米波辐射计空中金属目标探测识别方法; 4) 教师演示拆解毫米波辐射计; 2) 教师介绍辐射计设计基本参数指标。	第1周 周五 第一大节 实验室 A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源 3) 数字万用表;
21	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计地面目标探测 4学时	了解地面金属目标与普通地面的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计地面金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源,两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V和+9V连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 在离毫米波辐射计天线前面一定距离的地面上放置一平面金属目标板。	第1周 周五 第一、二大节 光电学院北侧小操场	分组完成实验操作;提交实验报告	4) 示波器; 5) 三角架; 6) 毫米波吸波材料; 7) 支撑杆若干。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
22				6) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 7) 将毫米波辐射计对着地面匀速扫描, 寻找扫描范围内的金属目标, 观察示波器并记录数据; 重复多次测量。 8) 在金属目标上覆盖吸波材料, 重复步骤 7, 观察示波器并记录数据; 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;			
		毫米波辐射计空中目标探测 3.5学时	了解空中金属目标与天空背景的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计空中金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源, 两输出端口电压分别调至+18V 和+9V, 并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V 和+9V 连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 6) 将探测器天线对着空中扫描, 观察并记录示波器输出。 7) 选择平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前一定距离的位置, 观察 并记录示波器输出; 重复多次测量。 8) 选择覆有吸波材料(即黑体)的平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前和 7 相同距离的位置, 观察并记录示波器输出; 重复多次测量。 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;	第 1 周 周五 第三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
23	目标电磁隐身特性测试实验	雷达目标电磁隐身认知 0.5学时	了解目标电磁隐身机理	1) 教师介绍雷达目标电磁隐身的机理和途径; 2) 教师介绍金属目标温度控制装置的组成和工作原理;	第 2 周 周一 第一小节 实验室A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源
24	6学时		了解金属目标采用涂敷材料后的	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上, 连接直流电源18V 和9V(见实样), 输出接到示波器;	第 2 周		3) 数字万用表; 4) 示波器;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
		涂敷金属目标电磁散射特性测量 5.5学时	散射特性 了解涂敷金属目标在温度变化时散射特性的变化情况。	2) 在地面放一金属目标，将探测器对着地面、金属目标扫描，观察示波器波形并记录实验数据； 3) 更换金属目标为涂层隐身金属目标，或在金属目标上覆盖吸波材料，重复步骤2，观察示波器波形并记录实验数据； 4) 给温度控制器加电，设定温度（因材料和环境温度而定），加热该涂层隐身金属目标，重复步骤2、3，观察示波器波形实验数据； 5) 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据。 6) 更换非金属目标，观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据；	周一 第二、三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	5) 三角架； 6) 金属板、非金属板（目标） 7) 毫米波吸波材料； 8) 支撑杆若干； 9) 加热装置。

南京理工大学课程教学实施计划

上课时间：2019年8月至2019年9月 夏季学期 班级：9161043301 任课教师：吴礼、王静、郭山红
 课程名称：《探测制导与控制综合实验》 学分数：1 总学时数：40 考核方式：实验操作和实验报告

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
1	多普勒探测器运动目标探测实验 10学时	多普勒探测器认知 0.5学时	了解运动目标的探测原理和基本组成；	1) 教师演示拆解多普勒探测器实验装置； 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测多普勒探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形； 3) 教师演示多普勒探测器的使用方法，讲解实验的操作过程和注意事项。	第1周 周五 第一大节 实验室 A247		1) 多普勒探测器；
2		运动目标探测与最大发现距离测量 3.5学时	1) 了解雷达探测的威力方程，熟悉影响作用距离的主要因素； 2) 了解目标雷达散射截面积的概念及其对探测距离的影响。	1) 将探测器固定在三角架上，被测目标（角反射器 1）置于小车杆上，注意目标中心与天线波束中心保持水平； 2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V 和+9V，并用数字万用表测量确定，然后关闭电源； 3) 通过两付电源夹子线接到多普勒探测器对应的电源输入端，并将多普勒探测器输出接到示波器。打开电源，等待探测器稳定； 4) 径向匀速拉动放于轨道上的小车，接近探测器装置运动，观察示波器上显示的时域波形和频谱仪上显示的信号频谱； 5) 记录频谱仪上显示的目标多普勒谱线高于噪声电平 10dB 时，测量目标与探测器的距离； 6) 更换目标（更换不同大小的角反射器），保持大致相同的目标运动速度，重复步骤 4 和 5，记录多普勒探测器对不同目标的探测距离。	第1周 周五 第一、二大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	2) 面积大小不同的角散射体若干； 3) 三角架、木制小车及轨道； 4) 直流稳压电源； 5) 示波器； 6) 频谱仪； 7) 电脑； 8) 数字万用表。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
3		运动目标多普勒频率测量 4学时	1) 了解多普勒频率与目标运动速度和运动方向的关系; 2) 了解目标运动速度的计算方法。	1) 在上一个实验模块的基础上, 记录频谱仪上显示的目标的多普勒频率, 根据该多普勒频率计算目标运动速度, 并与实际目标运动速度的估计值进行比较; 2) 将小车运动的轨道相对探测器天线法线方向旋转一个角度(分别为 10 度、30 度、60 度), 即轨道小车上目标中心偏离天线波束中心, 匀速拉动小车, 记录示波器和频谱仪上显示的目标多普勒频率; 改变角度, 重复上述实验; 3) 将轨道垂直于探测器天线法线方向放置, 匀速拉动小车平行于探测器运动, 即运动时目标与探测器距离保持不变, 无径向运动分量, 观察目标运动时示波器和频谱仪上显示的回波信号时域波形和频谱。	第 2 周 周一 第一、二大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
4		多普勒探测器回波信号频谱分析 2学时	了解多普勒探测器回波信号频谱分析算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的连续波多普勒探测器时域目标探测信号, 并作图显示; 3) 对运动目标回波信号进行傅里叶变换分析, 并作图显示; 4) 基于变换实现目标速度信息提取; 5) 分析处理结果。	第 2 周 周一 第三、四大节 实验室 A247	完成编程、调试、测试; 提交实验报告	
5	线性调频探测器目标探测实验	线性调频探测器认知 0.5学时	了解线性调频探测器工作原理和基本组成;	1) 教师演示拆解线性调频探测器实验装置; 2) 教师演示用示波器和频谱仪观测线性调频探测器内部发射射频信号、接收射频信号、中频信号和基带信号的频谱或时域波形; 3) 教师演示线性调频探测器的使用方法, 讲解实验的操作过程和注意事项。	第 2 周 周二 第一大节 实验室 A247		1) 线性调频探测器; 2) 面积大小不同的金属球若干;
6		静止金属目标探测与最大发现距离测量	1) 了解线性调频探测器目标距离	1) 将线性调频探测器固定在三角架上;	第 2 周 周二	分组完成实验	3) 三角架;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数		实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
	线性调频探测器目标探测实验	7.5学时		的计算方法； 2) 了解影响线性调频探测器作用距离的主要因素。	2) 将直流稳压电源两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定,然后关闭电源; 3) 通过两付电源夹子线接到探测器电源输入端; 4) 将探测器输出接到示波器和频谱仪; 5) 打开电源,等待探测器稳定; 6) 在离探测器一定距离的地面上放置金属目标,探测器对其扫描,观察示波器显示的时域波形、频谱仪显示的频谱变化,记录频谱仪上接收信号谱线超过噪声基底10dB时,接收信号频率及对应的目标与探测器的距离值; 7) 径向移动金属目标改变距离,观察示波器、频谱仪上显示的时域波形和信号频率及幅度变化,记录频率及对应的目标与探测器之间的距离值。 8) 改变大小不同的金属目标,重复上述实验。	第一、二、三、四大节 电光学院北侧小操场	操作; 提交实验报告	4) 直流稳压电源; 5) 示波器; 6) 频谱仪; 7) 电脑; 8) 数字万用表。
7	10学时	线性调频探测器回波信号频谱分析及信号处理 2学时		了解线性调频探测器回波信号分析处理算法原理和编程实现过程。	1) 打开 Matlab 软件; 2) 导入保存的线性调频探测器时域目标探测信号,并作图显示; 3) 分别对上/下扫频段目标回波信号进行傅里叶变换,并作图显示; 4) 基于变换信号完成目标的距离、速度信息提取; 5) 在时域信号中补零,并重复步骤3、4; 6) 对比信号处理结果的不同。	第2周 周三 第一大节 实验室 A247	完成编程、调试、测试;提交实验报告	
8	导弹末制导系统探测制导虚拟仿真实验	系统认知实验模块	导弹认知	1) 熟悉导弹组成及功能; 2) 掌握导弹跟踪制导原理;	1) 点击“导弹认知”,进入场景,观测导弹外观。 2) 点击导弹3D图,观察导弹内部组成结构。 3) 分别点击导弹各部件,观看右侧知识框,了解该部件作用。	第2周 周四 第一大节	在线上完成10道及以上的自测题	联网电脑 实验指导书第3-6页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
9	6学时	0.5学时	主动雷达导引头认知	1) 熟悉主动雷达导引头组成; 2) 掌握主动雷达导引头工作原理;	1) 点击实验页眉“系统认知/主动雷达导引头认知”, 进入导引头装配车间场景, 观测导引头外观。 2) 点击导引头 3D 图, 观察导引头内部组成结构。 3) 分别点击导引头各部件, 观看右侧知识框, 了解该部件作用。	实验室 B301	(单项选择题), 并提交。	
10			导引头信号处理认知	1) 熟悉雷达导引头信号处理流程; 2) 掌握雷达导引头各部件输入输出信号特点及过程;	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”, 进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图, 了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块, 观看右侧知识了解该单元作用, 熟悉其输入输出波形。			
11			目标拦截过程动态演示	1) 熟悉导弹跟踪制导目标处理过程。 2) 熟悉导弹跟踪目标过程中的测速、测角误差曲线。	1) 点击实验页眉“系统认知/导引头信号处理认知”, 进入场景。观察脉冲多普勒雷达主动导引头信号处理框图, 了解各部件之间关系。 2) 分别点击框图中的各模块, 观看右侧知识了解该单元作用, 熟悉其输入输出波形。			
12		导引头总体参数设计实验模块	导引头天线参数设计	1) 掌握导引头威力方程计算。 2) 熟悉天线增益、效率及口径关系。 3) 理解天线增益	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算天线增益; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变天线增益的设计值, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析天线增益对目标跟踪制导性能的影响。	第 2 周 周四 第一大节 实验室 B302	完成实验操作; 提交实验结果。	联网电脑 实验指导书第 7-9 页

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备	
13		2学时		的设计约束。				
		收发系统参数设计	1) 熟悉导引头威力方程计算。 2) 了解发射功率大小与导弹电池供电关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射功率; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射功率的设计值, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析发射功率对目标跟踪制导性能的影响。				联网电脑 实验指导书第10-11页
14			发射波形设计	1) 掌握 HPRF -PD 测速满足的约束条件。 2) 了解常规占空比范围。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变发射波形的脉冲宽度和脉冲重复周期, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动发射波形参数对目标跟踪制导影响。		联网电脑 实验指导书第12-13页	
15		信号处理系统参数设计 2学时	动目标检测参数设计	1) 熟悉 FFT 点数与测速分辨率关系。 2) 了解FFT运算与信号处理硬件关系。	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的系统参数, 设计计算动目标检测的积累时间和对应的 FFT 点数; 2) 在虚拟仿真平台上测试验证, 观测导弹拦截目标的动态测试结果; 3) 改变动目标检测参数, 对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析, 分析动目标检测的积累时间和对应的FFT点数对目标跟踪制导影响。	第2周 周四 第二大节 实验室 B302	完成实验操作; 提交实验结果。	联网电脑 实验指导书 P14-17
16			恒虚警	1) 熟悉单元平均	1) 针对随机布置的实验任务, 根据平台给定的临近单元测试结果, 采用临		联网电脑	

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
17		参数设计	恒虚警处理算法及过程。 2) 掌握 CA-CFAR 的计算方法。 3) 理解恒虚警概率、恒虚警门限与目标检测概率关系。	近单元平均恒虚警算法，利用恒虚警门限计算公式，在线下设计计算并输入恒虚警检测门限值； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计的恒虚警门限与理论门限之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变恒虚警概率、恒虚警门限的设计值，对多次试验得到的拦截过程中的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析虚警概率、恒虚警算法对目标跟踪制导影响。			实验指导书 P18-20
		单脉冲测角性能分析	1) 熟悉单脉冲测角原理。 2) 掌握振幅和差式单脉冲测角俯仰角偏差和方位角偏差计算方法。 3) 了解角跟踪回路工作原理。	1) 针对随机布置的实验任务，根据平台给定的天线和、差波束输出结果，参考单脉冲测角计算公式，在线下设计计算方位角偏差和俯仰角偏差； 2) 在虚拟仿真平台上通过结果验证，观测所设计计算的角度偏差与理论角偏差之间的差距，观测导弹拦截目标的动态测试结果； 3) 改变方位角和俯仰角偏差值，对多次试验得到的测角、测速误差曲线进行对比分析，分析角偏差对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P21-24
		制导律性能分析	1) 了解制导系统及比例导引法工作原理。 2) 掌握比例导引法轨迹特点及生成计算方法。	1) 根据实验任务设计比例系数，观察、测量导弹拦截目标的动态过程； 2) 改变比例系数，观察导引头跟踪目标轨迹变化情况； 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析，分析比例系数对目标跟踪制导影响。			联网电脑 实验指导书 P25-27
18							

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
19		系统综合设计 实验模块 1.5学时	1) 在掌握各模块工作原理基础上进行综合设计。 2) 通过多参数组合优化设计,提高学生在导弹末制导系统总体设计方面解决复杂问题的能力。	1) 根据实验任务和平台给定的部分系统参数,选择飞机类型和导弹拦截目标的方向,在线下分别对天线增益、发射功率、发射脉冲宽度、制导律比例系数和恒虚警概率进行设计,在仿真平台上进行验证测试,并观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 2) 采用正交试验法对多参数进行优化组合,并考虑这些参数本身的设计约束,重新验算并测试。观测导弹拦截目标过程中导引头对目标的角度、速度测量误差和导弹运动轨迹。 3) 对多次试验得到的测角、测速误差曲线和导弹运动轨迹进行对比分析,分析参数优化的成效。	第2周 周四 第四大节 实验室 B302	完成实验操作;最后生成实验报告,并提交。	联网电脑 实验指导书 P28-30
20	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计 认知 0.5学时	了解毫米波辐射计的工作原理和基本组成	1) 教师介绍毫米波段目标辐射特性; 2) 教师介绍毫米波辐射计地面金属目标探测识别方法; 3) 教师介绍毫米波辐射计空中金属目标探测识别方法; 4) 教师演示拆解毫米波辐射计; 2) 教师介绍辐射计设计基本参数指标。	第2周 周五 第一大节 实验室 A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源 3) 数字万用表;
21	毫米波被动探测器(毫米波辐射计)目标探测实验	毫米波辐射计地面目标探测 4学时	了解地面金属目标与普通地面的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计地面金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源,两输出端口电压分别调至+18V和+9V,并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V和+9V连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 在离毫米波辐射计天线前面一定距离的地面上放置一平面金属目标板。	第2周 周五 第一、二大节 光电学院北侧小操场	分组完成实验操作;提交实验报告	4) 示波器; 5) 三角架; 6) 毫米波吸波材料; 7) 支撑杆若干。

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
22		毫米波辐射计空中目标探测 3.5学时		6) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 7) 将毫米波辐射计对着地面匀速扫描, 寻找扫描范围内的金属目标, 观察示波器并记录数据; 重复多次测量。 8) 在金属目标上覆盖吸波材料, 重复步骤 7, 观察示波器并记录数据; 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;			
			了解空中金属目标与天空背景的毫米波辐射特性的差别; 了解毫米波辐射计空中金属目标探测识别的原理和方法。	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上。 2) 打开直流稳压电源, 两输出端口电压分别调至+18V 和+9V, 并用数字万用表测量确定。然后关闭电源。 3) 通过两付电源夹子线将+18V 和+9V 连接到毫米波辐射计电源输入端。 4) 将毫米波辐射计输出接到示波器。 5) 打开直流稳压电源, 给毫米波辐射计预热, 等待稳定后准备测试实验。 6) 将探测器天线对着空中扫描, 观察并记录示波器输出。 7) 选择平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前一定距离的位置, 观察 并记录示波器输出; 重复多次测量。 8) 选择覆有吸波材料(即黑体)的平面金属目标, 用支撑杆把目标放置在探测器前和 7 相同距离的位置, 观察并记录示波器输出; 重复多次测量。 9) 更换非金属目标, 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据;	第 2 周 周五 第三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作; 提交实验报告	
23	目标电磁隐身特性测试实验	雷达目标电磁隐身认知 0.5学时	了解目标电磁隐身机理	1) 教师介绍雷达目标电磁隐身的机理和途径; 2) 教师介绍金属目标温度控制装置的组成和工作原理;	第 3 周 周一 第一小节 实验室A247		1) 毫米波辐射计; 2) 直流稳压电源
24	6学时		了解金属目标采用涂敷材料后的	1) 将毫米波辐射计固定在三角架上, 连接直流电源18V 和9V(见实样), 输出接到示波器;	第 3 周		3) 数字万用表; 4) 示波器;

序号	实验项目及学时数	实验模块及学时数	实验目的	实验内容及要求	集中上课时间及地点	考核要求	实验仪器设备
		涂敷金属目标电磁散射特性测量 5.5学时	散射特性 了解涂敷金属目标在温度变化时散射特性的变化情况。	2) 在地面放一金属目标，将探测器对着地面、金属目标扫描，观察示波器波形并记录实验数据； 3) 更换金属目标为涂层隐身金属目标，或在金属目标上覆盖吸波材料，重复步骤2，观察示波器波形并记录实验数据； 4) 给温度控制器加电，设定温度（因材料和环境温度而定），加热该涂层隐身金属目标，重复步骤2、3，观察示波器波形实验数据； 5) 观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据。 6) 更换非金属目标，观察比较以上几种情况下示波器显示的波形特征并分析实验数据；	周一 第二、三、四大节 电光学院北侧小操场	分组完成实验操作； 提交实验报告	5) 三角架； 6) 金属板、非金属板（目标） 7) 毫米波吸波材料； 8) 支撑杆若干； 9) 加热装置。