



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

上海高校 一流本科课程申报

2023



上海市一流本科课程

申报书

(2023 年)

申报类型：公共基础课 专业基础课
专业核心课 跨学科融合课
产教融合课 其他：

课程名称(全英语课) 可重复使用运载器 RLV 再入返回控

程还需填写英语名称)： 制虚拟仿真实验

课程负责人： 陈方

联系电话： 13816801556

申报学校： 上海交通大学

填表日期： 2023 年 11 月

上海市教育委员会 制

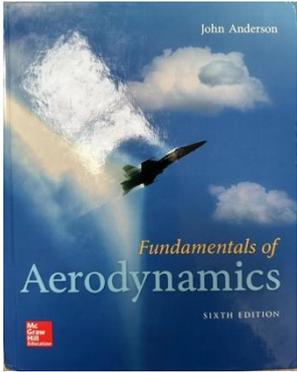
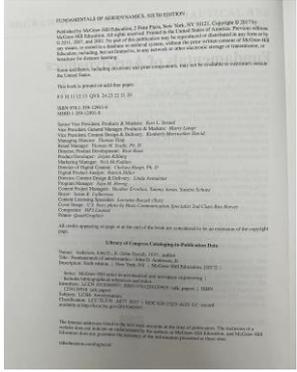
目 录

填报说明	4
一、 课程基本信息	5
二、 授课教师（教学团队）	6
三、 课程目标（300 字以内）	7
四、 课程建设及应用情况（1500 字以内）	7
1、 课程建设发展历程	8
2、 课程与教学改革要解决的重点问题	8
3、 课程内容与资源建设及应用情况	9
4、 课程教学内容及组织实施情况	10
5、 课程成绩评定方式	10
6、 课程评价及改革成效	10
五、 课程特色与创新（500 字以内）	11
六、 课程建设计划（500 字以内）	12
七、 学校意见	13
附件一： 教学团队教学情况	14
附件二： 实验教学项目描述	15
附件三： 实验内容方法、人机交互操作步骤和项目展示	21
附件四： 技术架构及主要研发技术	25
附件五： 相关网络描述	27

填报说明

1. 申报课程名称、授课教师（含课程负责人）须与教务系统中已完成的学期一致，并须截图上传教务系统中课程开设信息。

2. 相同授课教师、不同选课编码的同一名称课程，若教学设计和教学实施方案相同，教学效果相近，可以合并申报。

先修（前序）课程、 后续课程名称	先修：航空航天概论、飞越未来：空气动力与人类飞行 后续：空气动力学（2）、粘性流体力学、空气动力学实验设计和测试方法、航空发动机设计与工程
选用教材	填写书名、书号、作者、出版社、出版时间等 (并插入封面及版权页图片) Fundamentals of Aerodynamics (第六版), John D. Anderson(著), McGraw-Hill Education(出版), 2017年, ISBN: 9781259129919  
使用的在线课程	(线上线下混合式课程必须填写) 填写课程名称、所获称号、学校、负责人、网址等 使用方式： <input type="radio"/> MOOC <input type="radio"/> SPOC

注：教务系统截图须至少包含课程编码、选课编码、开课时间、授课教师姓名等信息。

二、授课教师（教学团队）

课程团队主要成员 (序号1为课程负责人, 课程负责人及团队其他主要成员总人数限5人之内)								
序号	姓名	单位	出生年月	职务	职称	手机号码	电子邮箱	教学任务
1	陈方	上海交通大学	197709	研究员/ 博导	研究员	13816801556	fangchen@sjtu.edu.cn	负责人
2	徐辉	上海交通大学	198104	长聘教 副教授	副教授	15202192258	dr.hxu@sjtu.edu.cn	基本原理
3	赵睿文	上海交通大学	199110	助理研 究员	助理研 究员	17621563365	zhaoruiwen@sjtu.edu.cn	教案设计
4	孟宇	上海交通大学	199209	助理研 究员	助理研 究员	15801571069	yumengl23@sjtu.edu.cn	操作实践
5	王福新	上海交通大学	196602	研究员	研究员	15821656871	fuxinwang@sjtu.edu.cn	实验指导
授课教师（课程负责人）教学情况（300字以内）								
（教学经历：近5年来在承担学校教学任务、开展教学研究、获得教学奖励方面的情况）								

- 1. 教学任务：**课程负责人陈方承担了本科生课程《空气动力学(1)》《飞越未来：空气动力与人类飞行》《粘性流体力学》和研究生课程《空气动力学实验设计和测试方法》《航空发动机设计与工程》的教学任务，其中《空气动力学(1)》荣获2022年度上海高校市级重点课程建设项目支持。
- 2. 教学研究：**课程负责人主编1本上海高校航空航天类（航空航天工程专业）课程思政指南，主持8项教改课题，发表7篇教研论文，出版2本教学用书和2章英文专著。教学团队结题完成2020年度上海交大在线课程建设项目，已录制58个教学知识点视频；结题完成2020年度上海交通大学教育教学研究项目“面向新教学模式的督-教-学协同组织与管理机制”和“影响学生在线学习效果的因素研究”；结题完成2021年度上海交通大学虚拟仿真实验教学项目“可重复使用运载器RLV再入返回控制虚拟仿真实验”。
- 3. 教学奖励：**课程负责人荣获2022年度上海市优秀教学成果研究生教育一等奖、2019年度上海交通大学“教书育人”二等奖和上海交通大学课程思政建设专项优秀。教学团队荣获全国新华思政示范课程《航空航天概论》，在上海交通大学青年教师竞赛中荣获二等奖和三等奖等荣誉。

近5年来教学团队教学情况详见[附件一](#)。

三、课程目标（300字以内）

（结合本校办学定位、学生情况、专业人才培养要求，具体描述学习本课程后应该达到的知识、能力水平。）

坚持上海交通大学价值引领、知识探究、能力建设、人格养成的“四位一体”育人理念，面向航空航天重大需求建设国家一流专业：航空航天工程基础课程，构建“以学生为中心”的教学模式，使学生深入了解航空航天前沿科技、现代工业设计与验证技术，重点提高学生的专业技能水平和激发学习兴趣：

(1) 知识目标：系统掌握可重复使用运载器再入过程姿态控制原理；熟悉虚拟仿真技术在航天领域应用；进行气动热特性计算和分析，了解在不同飞行参数下运载器面临的气动热挑战；通过实践参与闭环虚拟仿真实验。

(2) 能力目标：熟练应用虚拟仿真工具实验和模拟；将理论知识应用于实际问题解决；形成系统学习方法，包括独立思考、实验探究和问题解决的能力；掌握实际动手操作技能，培养在实验室和工程项目中实际操作经验。

(3) 素质目标：树立学生对航空航天工程专业兴趣和热情，具备正确学习方法。

四、课程建设及应用情况（1500字以内）

（本课程的建设发展历程，课程与教学改革要解决的重点问题，课程内容与资源建设及应用情况，课程教学内容及组织实施情况，课程成绩评定方式，课程评价及改革成效等情况。）

1、课程建设发展历程

教学团队一直积极开展教学改革,以适应新时代的教育需求和空天技术日新月异的发展,近3年来课程建设取得了长足的发展,分别获得上海交通大学在线课程建设项目和上海交通大学教育教学研究项目的支持,2022年荣获上海高校市级重点课程建设项目支持,教学质量和教学效果得到了进一步的明显提升。

可重复使用运载器是目前备受国际瞩目的领域,也是航天器发展的主要方向之一,了解运载器回收的相关知识也成为航空航天工程专业基础课程中的一个核心内容。针对教学过程无法真实实现的运载器再入飞行实验,利用虚拟实验技术,将空气动力学现象等融入基本原理的讲解,建设课程配套的2学时仿真实验教学项目(有效链接网址:<http://jd.getyun.com/>,详见简介视频和引导视频),不仅可以服务于课堂教学,还可以使学生熟悉并掌握空气动力学的基本理论/实践体系、思维方式和研究分析方法。

本着“学生中心,问题导向,技战融合”的实验教学理念,坚持航空航天特色、产学研协同、虚实并进、虚为实用的发展思路,建立开放式虚拟仿真实验教学管理平台,以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托,采用面向服务的软件架构开发,如图1所示,集创新设计、人机交互指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体,具有良好自主性、交互性和可扩展性。



2、课程与教学改革要解决的重点问题

(1) 如何适应高等教育发展趋势? 顺应国内外高等教育的发展趋势,结合信息技术与教育教学,旨在推动教育与科技深度融合,提升教学质量。

(2) 如何创新虚拟仿真实验平台? 建设集教学、实训、研发功能于一体的虚拟仿真实验平台,现实技术与真实结构结合,创新性提供学生与真实实验相似的虚拟体验,降低教学成本、避免危险操作,确保操作安全。

(3) **如何提高教学效率?** 实现实验反复进行, 在虚拟环境中进行多次实验操作, 提高技能水平, 加深对实验原理的理解, 从而提高教学效率。

(4) **如何激发学习兴趣?** 将抽象的理论知识呈现为直观的虚拟体验, 激发学生兴趣, 增强对学科的好奇心和主动学习的积极性。

(5) **如何提升教学效果?** 提供高质量的虚拟实验环境, 更深入地理解课程内容, 培养实际操作技能, 最终提升教学效果。

3、课程内容与资源建设及应用情况

课程内容重塑

(1) 通过虚拟仿真实验平台 (有效链接网址: <http://jd.gotyun.com/>) 为学生提供近距离接触再入飞行器操纵过程与操纵实践的教学改革;

(2) 培养自主构建研究体系和物理模型的能力, 促进创新能力发展;

(3) 系统形成从结构认知到飞行原理, 再到仿真操纵的再入飞行控制过程学习的课程内容建设, 具体实验教学项目描述详见附件二;

(4) 提高学生对课程兴趣, 拓宽教学方式方法, 具体实验内容详见附件三。

教学资源建设

(1) **技术架构支撑:** 包括校内实验教学 (C/S 架构)、校外/浏览器用户 (B/S 架构) 和云 VR 用户, 具体技术架构及主要研发技术详见附件四。

(2) **实验仪器及设备:** 实验平台架构如图 2 所示, 包括虚拟系统和实物平台, 提供真实的飞行器姿态等传感信息, 与控制系统形成闭环。主要使用设备和装置如下: VR 系统主机及体验端 (包括 VR 手柄、头盔、电脑主机等) 和虚拟仿真教学系统 (基于 Simulink/Unity 开发)。



图 2 实验平台构成

(3) **网络及操作系统要求:** 客户端到服务器的带宽要求, 基于公有云服务器部署的系统, 5M-10M 带宽; 基于局域网服务器部署的系统, 10M-50M 带宽。支持 50 个学生同时在线并发访问和请求, 如果单个实验被占用, 则提示后面在线

等待，等待前面结束后，进入预约队列。具体网络要求详见附件五。

4、课程教学内容及组织实施情况

(1) **教学模式**：借助多媒体技术、虚仿技术和传感技术，体验置身其中的沉浸感，寓教于学，互动形式教学，激发了学生自主实验兴趣。

(2) **教学方法改革**：减少传统实验课程中教师主导、学生机械模仿和操作等学习模式的不足，形成以学生为中心、讨论式教学方法，引导学生从验证式教学模式向探究式教学模式过渡，培养创新思维能力。基于互联网与3D虚拟仿真技术，突破实验教学对客观条件的依赖，将实验与课程教学、实践教学和进行有机融合。

(3) **教学过程管理**：进行实验教学体系与实验内容（附件三）、教学方法的改革，分为多个模块化教学环节。在实验教学阶段，开展基于线上线下的混合式实验教学和探究型学习方式，学习过程得到有效指导和反馈。教学活动地点在课堂和实验室之间，同学交流、互动甚至比赛形式完成实验内容（附件三）。改变“一门课程，一门实验，一人管理”非系统性方式，建立“实体实验-虚拟仿真实验-远程实验”的多层次化、多模块化系统教学过程。

5、课程成绩评定方式

总成绩由随堂上机实验、实验报告和课下作业三个部分组成。如图3所示，具体权重分配为：上机实验占30%、实验报告占30%、课下作业占40%。学生至少完成一次实验报告和一次课下作业，每次实验进行三次提交，其中有效得分中最高分被计入成绩。学生课程研究论文的公开发表和获得知识产权的课程设计等优秀学习成果，将额外获得15分加分，鼓励积极学习和追求创新精神。

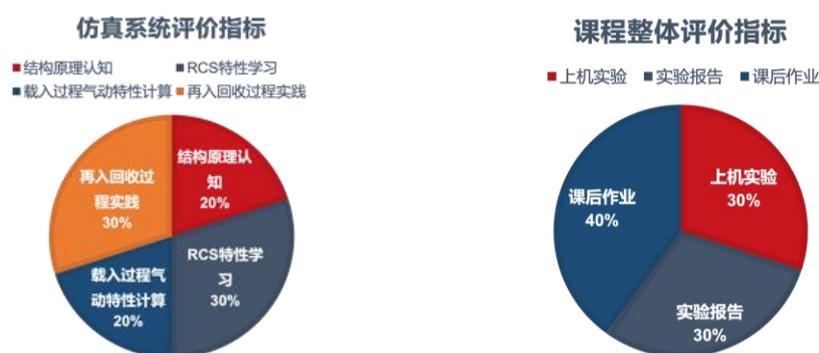


图3 知识考核与操作评价体系

6、课程评价及改革成效

课程评价

图4所示的多层次、模块化、全方位的实验教学评价体系，包括实验结果自动批改、实验过程智能指导和实验效果在线评估，已有145个注册用户，考核265次。依据此体系，可以观察到学生的学习效果显著提升，对课程参与度、学习获

得感和对教师教学的满意度明显提高。



图 4 课程评价体系

改革成效

(1) **提高学习体验，培养创新能力。**将传统课程书本和讲义中再入飞行器相关原理进行虚拟化仿真，直观形象地展示效果（附件三），其交互式学习和自主探究过程便于学生理解和掌握，锻炼其创造力和操作能力。

(2) **构建以学生为中心，自主探索学习模式。**融入探究式教学方法，实验前教师引导、问题导向，学生自主完成预习内容；实验时，学生通过交互式系统学习，小组讨论交流，老师指导答疑；实验后及时反馈和撰写报告，形成完整闭环。通过自主探究、结合研讨的混合式教学方式，师生共同构建知识体系。

(3) **创建良好实验环境，激发学习热情。**将抽象 RCS 控制原理形象化、再入飞行动态化，生动丰富教学资源，提高学生学习积极性和自主学习兴趣。

五、课程特色与创新（500 字以内）

（概述本课程的特色及教学改革创新点。）

本项目由上海交通大学航空航天学院空天动力创新实验室主导，由教师引导、学生自主进行操作开展虚拟仿真实验。通过学生自主探究、结合研讨的混合式教学方式，达到师生共同构建空气动力学、控制原理、力学与飞行等多个学科知识体系的教学目标。通过先进的虚拟仿真技术指导实践教学，力求通过沉浸式的虚拟交互体验掌握可重复使用运载器再入飞行控制过程，培养学生对知识原理的学习和动手操作能力。

本着“学生中心、问题导向、技战融合”的实验教学理念，坚持以培养学生实践能力和创新能力为核心，借助多媒体技术、虚仿技术和传感技术，以“能实不虚”“虚实结合”“相互补充”为原则，将传统实验教学向课前延伸、向课后拓展，开展任务牵引的三阶段（课前学习、课中导学、课后拓展）混合式实验教学。基于互联网与 3D 虚拟仿真技术，丰富课堂教学形式，将虚拟仿真实验与课程教学、实践教学和进行有机融合，为学生提供认知、设计、分析及创作等难度逐渐递增的实验内容，突破实验教学对客观条件的依赖。建立“实体实验-虚拟仿真实验-远程实验”的多层次化、多模块化的系统教学过程，激发学生求知欲，提升学生认知水平，提高创新实践能力。

实验平台具有高度开放性和共享性，校内外学生和社会学习者均可获益。既

通过计算机访问平台在线学习课程内容，又积极参与课程相关的虚拟仿真实验，促进课堂教学、实践教学、创新创业以及社会共享教育的深度融合，使之成为航空航天技术领域开放共享教学的典型示范课之一。

六、课程建设计划（500字以内）

（今后的持续建设计划、需要进一步解决的问题，改革方向和改进措施等。）

此实验课程平台将依据实验教学需求和效果反馈进行持续性更新，面向国内高校开放，对部分项目可以在约定时间开设远程实验，提高实验资源的共享度与效益，为学生专业化学习提供稳定、先进的虚拟仿真平台。同时依托《空气动力学》《航空航天概论》《飞越未来：空气动力与人类飞行》等课程，计划与校内其他学院以及上海市兄弟院校开展校际合作与互动，建立跨院系虚拟实验与实体实验的交互共享，提高实验资源的共享度与效益，服务于全国高校实验教学。

计划在成功推广上海市部分高校和研究机构后，进一步解决扩大宣传推广至全国范围内的航空航天相关行业的问题。举办项目学习培训班和科技竞赛活动，为学生和专业人士提供更多机会来深入了解虚拟仿真技术。计划开放和推广相关知识和技能，服务于航天科普教育开展与示范工作，满足社会公众的需求，实现资源的更广泛共享，构建虚拟仿真实验与远程实验相结合的科普实验教学体系。

此外，未来改革方向包括创建在线社群或论坛，促进学生和教师之间的互动，分享经验，解决问题，促进合作。同时计划实施改进措施，建立评估系统，以跟踪平台的使用情况，从而不断改进和优化平台，达成用户需求并提高学习体验，确保该虚拟仿真平台保持高水准质量，满足不断增长的学术和行业需求。

七、学校意见

7-1 课程负责人诚信承诺

本人已认真填写并检查以上材料，保证内容真实有效。

课程负责人（签字）：

陈方

2023年12月1日

7-2 申报单位政治审查意见

该课程内容及上传的申报材料无危害国家安全、涉密及其他不适宜公开传播的内容，思想导向正确，不存在思想性问题。

该课程团队负责人及成员遵纪守法，无违法违纪行为，不存在师德师风问题、学术不端等问题，五年内未出现过重大教学事故。

申报单位党组织（盖章）

2023年12月1日



7-3 教务处意见

本单位对课程有关信息及课程负责人填报的内容进行了核实，保证真实性。经对该课程评审评价，择优申报推荐，已于11月29日至12月1日在学校网站上公示。

该课程如果被认定为“上海市一流本科课程”，本单位承诺为课程团队提供政策、经费等方面的支持，确保该课程的后续建设。本单位同意课程建设和改革成果在指定的网站上公开展示和分享。本单位将监督课程教学团队经审核程序后更新资源和数据。

负责人签字（盖章）：

章俊良

2023年12月1日

7-4 学校意见

丁奎岭

主管校长签字（盖章）：

2023年12月1日



附件一：教学团队教学情况

1、教学荣誉：

- [1] “构建双向贯通国际合作模式，培养航空航天战略科技人才”，上海市优秀教学成果一等奖，2022年；
- [2] 上海交通大学“教书育人”二等奖，2019年；
- [3] 上海交通大学教师教学创新大赛二等奖，2022年；
- [4] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》，上海交通大学本科课程思政示范课程，2022年；
- [5] 《航空航天概论》，全国新华思政示范课程，2018年。

2、教改课题：

- [1] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》课程思政建设与教学实践案例，教育部飞行器设计与工程专业虚拟教研室教改立项，2023年；
- [2] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》，教育部航空发动机原理课程虚拟教研室教改立项，2023年；
- [3] 《空气动力学（1）》，上海高校市级重点课程建设项目，2022年；
- [4] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》，上海交通大学第五批在线课程建设项目，2022年；
- [5] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》，上海交通大学课程思政建设专项基金，2022年（结题优秀）；
- [6] “可重复使用运载器RLV再入返回控制虚拟仿真实验”，上海交通大学虚拟仿真实验教学项目，2021年；
- [7] “面向新教学模式的‘督-教-学’协同组织与管理机制”，上海交通大学教学研究项目，2020年；
- [8] “影响学生在线学习效果的因素研究”，上海交通大学教学研究项目，2020年。

3、教研论文：

- [1] 《RLV再入返回控制虚拟仿真实验》课程建设与思考，第五届全国航空航天教育教学研讨会，2023年；
- [2] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》课程建设与教学思考，第三届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集，2022年；
- [3] 《飞越未来：空气动力与人类飞行》课程思政建设与教学实践案例，第三届全国航空航天类课程思政教学改革论坛论文集，2022年；
- [4] 面向新教学模式的“督-教-学”协同组织与管理机制——以上海交通大学航空航天学院为例，教育教学论坛，2022年；
- [5] 建构空天大学生新时代归属心理特色化融合教学途径探究，教育教学论坛，2022年；
- [6] 面向工程教育专业认证教学档案袋的构建与实施，教育教学论坛，2022年；
- [7] 课程思政协同育人——航空航天工程专业课程思政教学设计与实践，第三届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集，2022年。

4、出版教材：

- [1] 《飞机推进》，译著，上海交通大学出版社，2011；
- [2] 《工程师用空气动力学》，译著，上海交通大学出版社，2016；
- [3] Aircraft Technology, IntechOpen, 2018, Chapter6；
- [4] Advances in Some Hypersonic Vehicles Technologies, IntechOpen, 2018, Chapter5。

附件二：实验教学项目描述

2-1 名称

可重复使用运载器 RLV 再入返回控制虚拟仿真实验

2-2 实验目的

本实验基于可重复使用运载器（Reusable Launch Vehicle, RLV）再入过程姿态控制原理，对反作用控制系统（Reaction Control System, RCS）理论进行学习和操作仿真实践。项目建设旨在构建闭环可重复使用航天运载器结构原理认知-气动热特性计算分析-回收控制虚拟仿真实验，使学生深入了解航空航天前沿科技、现代航空工业设计与验证技术，重点培养学生了解航空航天专业的历史和未来，激发学习兴趣，培养新生的初步专业热情以及对航空航天专业课程的学习方法。

通过 VR 模拟可重复使用运载器回收过程，结合实验课程知识讲解和学习，学生应掌握可重复使用运载航天器系统的基础理论知识，包括运载器系统的原理和结构、动力系统构成、控制原理；掌握航天器回收原理、RCS 姿态控制原理，了解和 VR 仿真可回收运载器发射、入轨和回收过程等。系统地掌握基本实验方法与技能，同时具备一定的计算能力和操作能力，能够归纳、整理、分析实验结果，熟练掌握相关计算分析软件，针对具体问题进行仿真以及进行数值分析：

- （1）基于虚仿技术，学习可重复使用运载器结构和控制原理；
- （2）使学生快速理解航天器再入过程及工作原理；
- （3）锻炼学生动手操作能力，验证探索不同飞行参数对气动热特性的影响；
- （4）了解和掌握运载器再入过程和 RCS 系统对飞行性能的影响；
- （5）掌握可重复使用运载器再入回收原理和操作过程，加深对运载器飞行控制关键参数的理解等。

2-3 实验课时

- （1）实验所属课程所占课时：空气动力学 1（48 学时）、空气动力学 2（48 学时）、航空航天概论（32 学时）、飞越未来：空气动力与人类飞行（32 学时）
- （2）该实验项目所占课时：2

2-4 实验原理



图 1 再入飞行器结构图

可重复使用运载器高空飞行时，通过气动面改变姿态和轨迹的能力很弱，而 RCS 改变姿态的能力强，改变轨迹的能力弱，这是因为高空气动力很低，通过改变姿态来改变气动力从而改变轨迹的能力很弱，因此 RCS 仅用于姿态保持与控制，以姿态稳定确保飞行安全为主，不追求很高的精度，容许姿态控制在一定偏差范围内。姿态控制上通过姿态偏差量反馈来进行 RCS 控制，主要原理是通过飞行器的角速度和姿态误差来形成推力器开关指令。

实验平台架构包括虚拟软件系统和 VR 硬件平台。硬件平台提供真实的飞行器姿态等传感信息，包括操作手柄、VR 眼镜等相关实践和反馈实物，与控制系统形成闭环。实验操作系统包括实践教学和实验服务两大功能模块，实践教学模块又分 3 个二级模块，分别是可重复使用运载器结构原理认知模块、可重复使用运载器再入过程气动热特性认知与计算模块和再入过程操纵仿真实践模块。结构原理认知模块实现运载器结构认知、任务剖面学习、坐标系认知、RCS 特性及知识点、Simulink 仿真基础与实践的学习；气动热特性认知与计算模块主要进行再入过程气动热相关参数学习与计算；再入过程操纵仿真实践模块则涵盖回收控制虚拟仿真功能，包括空间运动认知、发射轨道规划、自动发射与回收控制等实验模块，各个实验模块既能独立运行又可相互衔接。实验服务模块配合实验过程的实验指导、知识学习、考核评价、交流讨论，并在后台全流程记录、分析和评价学生实验中的操作信息，形成实验行为和效果的系统、快捷、准确、公平评价。

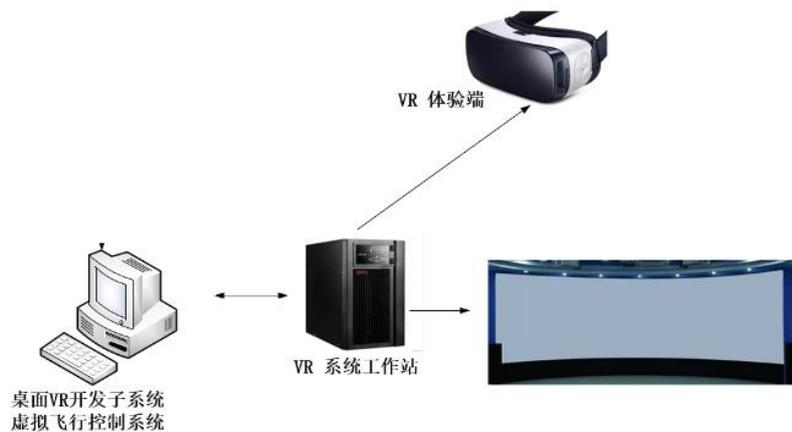


图 2 实验平台构成

知识点：6 个

(1) 运载器回收原理，包括发射、入轨和回收过程等知识

航天器发射过程和入轨知识的了解；反推力、滑翔等回收理念的了解；包括不同航天器的回收的区别和优势。

(2) 高超声速飞行器再入段 RCS 姿态控制原理

RCS 由多个喷管推力器构成，利用横向喷流的反推力控制姿态。与连续气动舵面不同，RCS 推力器是开关型的执行机构，只能提供常值离散力矩，需要利用脉冲调制技术将姿态连续控制量调制为 RCS 推力器的脉冲指令进行姿态控制。

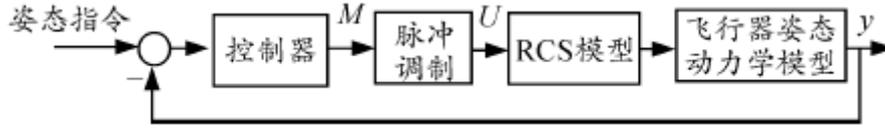


图3 RCS 脉冲指令

(3) RCS 控制结构原理，控制系统设计。

RCS 姿态控制系统由控制器、脉冲调制、RCS 模型及飞行器姿态动力学模型 4 部分构成。姿态控制律解算出三轴姿态控制力矩，并将其与 RCS 提供的该通道最大力矩的比值 M (即标准化处理) 作为脉冲调制环节的输入， U 为飞行器三通道 RCS 的开关脉冲控制指令。

(4) RCS 姿态调控理论，包括射流控制。

RCS 推力器利用横向喷流产生反推力，当反推力不过质心时便产生力矩，从而控制飞行器的姿态。推力器只有开/关 2 个状态，控制系统给出推力器开关指令，使推力器产生反推力，其数学描述为：

$$F_i = \begin{cases} 0, U_i = 0 \\ F_m, U_i = 1 \end{cases}$$

其中： F_i 为推力器 i 的推力； F_m 为推力器稳态输出的推力； U_i 为推力器 i 的开关指令，0 表示关，1 表示开。实际上推力 F_i 存在上升和下降时间，需对推力改变的速率限幅 s 。下图给出了 RCS 推力器在一个开关周期内输出推力随时间变化的特性曲线。

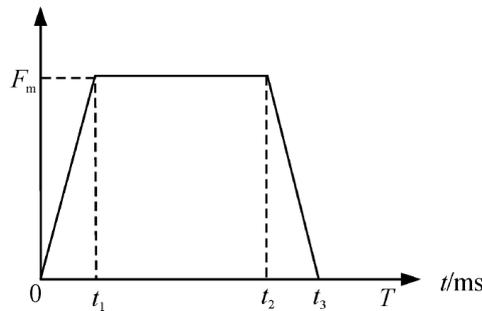


图4 RCS 推力变化曲线

第 i 个推力器产生的力矩表达式为：

$$M_i^{rCS} = r \times F_i U$$

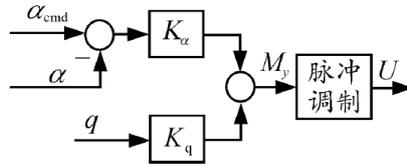
RCS 的流量，即推进燃料的消耗，是评价 RCS 最重要的参数之一，表征飞行器对推进燃料的需求。RCS 的燃料消耗与喷管推力成正比，且随着 RCS 喷管的开启时间不断累加。因此 RCS 的流量 Q 可用 RCS 的推力与工作时间来衡量如下：

$$Q = \int \sum_{i=1}^8 |F_i| dt$$

(5) RCS 姿态纵向控制

飞行器再入初期，升降舵可以不用于配平迎角，使用 RCS 保持迎角的稳定与

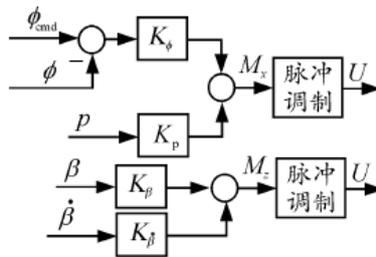
控制。再入段并不追求迎角控制精度，因此采用经典的控制结构如图所示。迎角偏差与俯仰角速率反馈形成脉冲调制器的输入指令，控制律形式如式所示。



$$M_y = K_\alpha^{\text{rcs}} (\alpha_{\text{cmd}} - \alpha) + K_q^{\text{rcs}} q$$

(6) RCS 姿态横侧向控制

飞行器再入段横侧向控制聚焦于滚转控制与抑制侧滑角。滚转角偏差和滚转角速率形成脉冲调制器的输入指令，跟踪滚转角剖面；航向 RCS 根据侧滑角与 $\dot{\beta}$ 反馈控制抑制飞行器滚转过程中产生的侧滑角。整个横侧向的控制结构如图所示，下式中给出横侧向控制律形式。



$$\begin{cases} M_x = K_\phi^{\text{rcs}} (\phi_{\text{cmd}} - \phi) + K_p^{\text{rcs}} p \\ M_z = K_\beta^{\text{rcs}} (\beta_c - \beta) + K_{\dot{\beta}}^{\text{rcs}} \dot{\beta} \end{cases}$$

航向 RCS 增稳荷兰滚抑制侧滑过程中使用 $\dot{\beta}$ 反馈量，考虑工程应用上无法直接测量 $\dot{\beta}$ 信号，故采用近似值代替，如下式所示：

$$\dot{\beta} = p \sin \alpha - r \cos \alpha$$

2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

- (1) VR 系统主机及体验端（包括 VR 手柄、头盔、电脑主机等）；
- (2) 虚拟仿真教学系统（基于 Simulink/Unity 开发）。

虚拟仿真教学系统是整个系统的核心，是内部数据的分析和控制器；运载器 VR 体验端与系统控制程序形成闭环，实现整实验的成功进行；VR 主机用于虚拟显示实验的显示和操作过程中的数据处理，包括人机交互等。

2-6 实验材料（或预设参数等）

项目基于三维建模的虚拟实验环境和实验对象，不消耗实验耗材，以真实发射环境为依托，飞行轨迹、姿态变化、运动参数的动态过程与真实运载器基本一致，实验中预设参数如下：

- (1) 初始条件：俯仰角 $\theta=0^\circ$ ，滚转角 $\varphi=20^\circ$ ，侧滑角 $\beta=2^\circ$ 。
- (2) 控制目标：俯仰角 $\theta_c=10^\circ$ ，控制精度 $\pm 1^\circ$ ；滚转角 $\varphi_c=0^\circ \sim 5^\circ$ ，控制精度 $\pm 1^\circ$ ；

侧滑角 $\beta_c=0^\circ$ ，控制精度 $\pm 0.5^\circ$ 。

2-7 实验教学方法

本着“学生中心，问题导向，技战融合”的实验教学理念，坚持航空航天特色，产学研协同，虚实并进，虚为实用的发展思路，借助信息化手段，将传统实验教学向课前延伸、课后拓展、开展任务牵引的三阶段（课前学习、课中导学、课后拓展）进行混合式实验教学，创新实践任务化、问题化、形象化、立体化、交互化、自主化的“六化”建构式实验教学方法，有效激发学生求知欲，提升学生认知水平，提高创新实践能力。

在实验开始前，学生带着问题进行学习，老师负责答疑和实验指导，体现以学生为中心的教学方法。在认知类实验部分，通过运载器任务剖面三维模拟、仿真分析等功能，对需要空间想象来理解的坐标系、姿态控制及入轨等知识逐一演示，以加深学生对重复使用火箭和高超声速飞行器再入过程的掌握。在实验操作过程中，在传统的授课方式基础上基于虚拟现实 VR 技术，学生通过 VR 头盔、手柄等实施对飞行器姿态控制，以三维模型模拟真实场地运载器再入过程场景，给出清晰的运行过程，直观检验器操作程序正确与否。

VR 虚拟现实运用的实施效果，可将抽象的内容可视化，能够激发学生的学习兴趣，提高实验教学质量。针对传统意义上无法进行的运载器再入飞行实验，通过虚仿系统后不仅可以设置实验条件和参数，而且实验体验直观形象。实验结束后，生成学生实验成绩报告与反馈，及时了解学生对知识的学习与掌握情况，形成完整的试验系统闭环。本项目提供远程实验体验功能，通过在线网页端访问系统，完成在线理论学习、实验过程和报告提交。

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，详见附件三）

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：
 - 知识点考核部分最多可提交三次，以最高成绩作为最终考核结果；
 - 通过调整阶跃响应初始信号，可对比研究二阶相应曲线变化情况；
 - 再入操纵过程要求在标定位置能够完全对准目标轨迹，完成所有操作后才能正确实现回收，否则需要重新开始操纵部分实验。

2-10 考核要求

- (1) 能够熟练掌握再入飞行器结构、飞行任务剖面、RCS 控制原理以及 Simulink 仿真基础；
- (2) 能够结合理论学习，对再入过程气动热特性进行计算分析；
- (3) 能够基于 RCS 控制原理，掌握相关参数对实践操控的影响；
- (4) 能够熟练操作 VR 虚仿系统，完成可重复使用运载器再入回收过程。

2-11 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

- 航空宇航学科与技术、控制科学与工程学科、机械工程、仪器科学与技术等专业的本科生；
- 航空航天、飞行器设计、流体力学、机械等学科高年级本科生或研究生；
- 航空航天专业科研院所工程技术人员及飞行器设计人员；
- 开展科普教育、创新性教育及科技创新竞赛的地方性中小学学生。

(2) 基本知识和能力要求

需具备高等数学、航空航天导论、自动控制原理等专业基础知识,具备 Matlab、C/C++等编程语言基础

附件三：实验内容方法、人机交互操作步骤和项目展示

本虚拟仿真实验基于可重复使用运载器（Reusable Launch Vehicle, RLV）再入过程姿态控制原理，对反作用控制系统（Reaction Control System, RCS）理论进行学习和操作仿真实践。项目建设旨在构建闭环可重复使用航天运载器结构原理认知-气动热特性计算分析-回收控制虚拟仿真实验，重点培养学生了解航空航天专业的历史和未来，激发学习兴趣，培养新生的初步专业热情以及对航空航天学科的学习方法。涉及实验内容方法、人机交互操作步骤和项目展示如下：

1、实验内容方法描述

实验通过 VR 系统完成可回收运载器再入过程飞行控制过程。学生首先通过认知学习和场景交互，深入了解运载器结构、再入飞行 RCS 控制原理和 Simulink 仿真实践过程。通过三维模型了解姿态控制硬件系统和工作原理；观看运载器和航天飞机任务剖面动画，了解再入返回过程；对气动热特性认知与计算，掌握相关原理和公式，掌握三维模型结构和控制参数功能，实现控制系统与仿真系统的关联；设置实验参数，输入阶跃响应信号，获得 RCS 控制二阶响应函数和相应曲线；最后启动虚拟实验系统，完成可回收运载器完整回收过程，期间反馈实时控制参数和位置参数，若操作有误则实验失败，重新开始。

2、人机交互操作步骤

(1) 熟悉实验平台,了解实验各个部分硬件组成，包括实物平台、传感器反馈系统、VR 系统和虚拟平台系统；

(2) 登录实验项目平台，阅读实验说明和教学大纲，进入实验系统；

(3) 如图 1 所示进入结构原理认知板块，分别按照可重复使用运载器结构认知-返回器任务剖面认知-坐标系认知-RCS 控制系统认知-Simulink 仿真认知子模块学习。结束后进入考核模式，掌握学生对知识点理解程度；



图 1 结构原理认知板块

(4) 进入可重复使用运载器任务剖面认知板块，如图 6 所示，分别学习再入飞行器和可回收运载火箭任务剖面图，并观看相关原理动画；

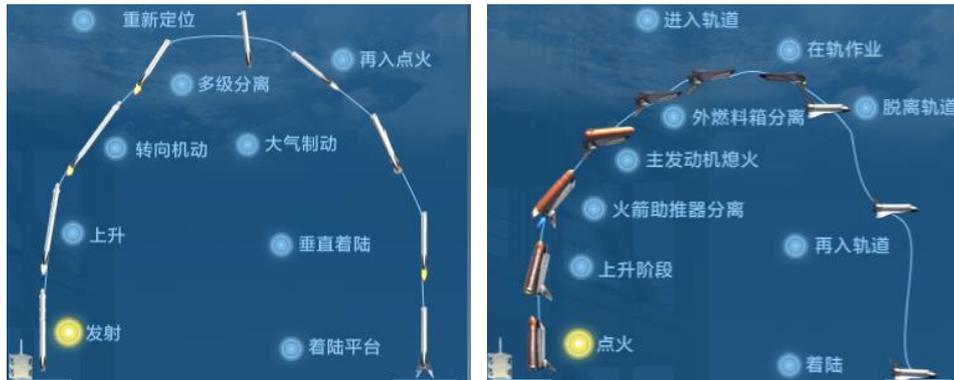


图 2 可回收火箭和航天飞机任务剖面

(5) 进入坐标系认知板块，对赤道惯性坐标系、地心轨道坐标系、航天器本体坐标系等进行学习和认知，了解相关运动参数、操纵面等，认识运载器偏转角、翻滚角等；

(6) 进入 RCS 特性认知板块，了解 RCS 结构、姿态控制系统原理，并对相关知识点进行考核；

(7) 进行飞机动力学模型 Simulink 仿真模拟，输入阶跃信号，获得响应曲线参数和动力学模型广义二阶传递函数；

(8) 进入再入过程气动特性认知与计算模块，首先学习气动热理论知识点，之后调用热力学函数和大气模型函数，按照知识板块对来流压力、驻点静压力、驻点密度、边界层外缘压力、驻点热流等相关参数进行计算；

(9) 进入网页端再入过程仿真实践平台，练习俯仰角、偏转角和旋转角操作按键，观察 RCS 对飞行器姿态的作用和影响，完成操作训练；

(10) 进入网页端再入过程操作时间，分别完成太空姿态调整-再入大气控制-返回过程控制-拉平平飞降落-起落架操作-降落伞操作等相关操作步骤，实现可重复使用运载器再入过程操作仿真实践；

(11) 设置虚拟平台，建立控制程序与虚拟硬件（VR 头盔、手柄等）的关联，形成完整可操作的虚拟实验平台；

(12) 设置虚拟硬件参数，使用最优配合控制软件系统，设定运载器初始参数；

(13) 打开设置窗口，设置初始参数，自动建立三维模型等待目标参数设定；

(14) 根据 RCS 喷量、位置等指标，设置虚拟火箭模型参数；

(15) 运载器再入过程虚拟仿真操作，体验运载器姿态太正、入轨和回收过程；

(16) 虚拟系统实时反馈运载器状态，包括俯仰角、反转角、稳定性等，如图 3 所示，实时监控反馈信号来监控虚拟火箭实时状态；



图 3 再入飞行操纵过程

- (17) 完成回收任务后，分析监控数据，给出仿真曲线，分析控制任务量；
- (18) 分析监控数据和任务结果，得出控制任务质量，完成任务报告；
- (19) 退出系统，实验结束；
- (20) 保存学生实验结果和成绩。

3、项目展示

虚拟实验项目运行的架构中，结构原理认知板块如图 4 所示，主要实现人机交互、提供虚拟模型；再入过程气动热特性计算如图 5 所示，实现理论与应用相结合，针对具体飞行模型进行气动热计算；操纵仿真实践环节如图 6 所示，在虚仿系统中实现完整再入过程及控制。



图 4 实验教学系统架构

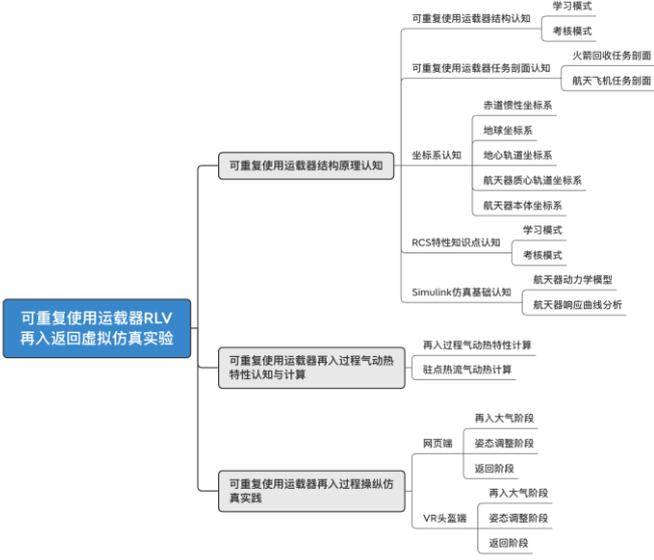


图 5 再入过程气动热特性认知与计算板块



图 6 可重复使用运载器再入过程操纵仿真实践

附件四：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>	<div style="text-align: center;">  <p>图 1 系统总体架构图</p> </div> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，集创新设计、人机交互指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体，是具有良好自主性、交互性和可扩展性的虚拟实验教学平台。</p> <p>虚拟实验项目运行的架构分为三个模块，包括可重复使用运载器结构原理认知、再入过程气动热特性计算、再入过程操纵仿真实践。结构原理认知板块主要实现人机交互、提供虚拟模型；再入过程气动热特性计算则实现理论与应用相结合，针对具体飞行模型进行气动热计算；操纵仿真实践环节则在虚仿系统中实现完整再入过程及控制。</p>
<p>实验教学项目</p>	<p>开发技术</p> <p><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 <u>WebGL 技术</u></p> <p>开发工具</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Unity3D <input checked="" type="checkbox"/>3D Studio Max <input 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 <u>Photoshop</u></p>

运行环境	<p>服务器</p> <p>CPU <u>六</u> 核、内存 <u>64</u> GB、磁盘 <u>2×1.2</u>GB、 显存 <u>0</u> GB、GPU 型号 <u>无</u></p> <p>操作系统</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Windows Server <input type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本 _____</p> <p>数据库</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle</p>
项目品质	<p>单场景模型总面数：900000 面</p> <p>贴图分辨率：1024×1024</p> <p>动作反馈时间：1 秒以内</p> <p>显示刷新率：高于 30Hz (fps)</p> <p>正常分辨率 1920×1080</p>

附件五：相关网络描述

<p>5-1 有效链接网址</p> <p>http://jd.gotyun.com/</p>
<p>5-2 网络条件要求</p> <p>(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）</p> <p> 基于公有云服务器部署的系统，5M-10M 带宽</p> <p> 基于局域网服务器部署的系统，10M-50M 带宽</p> <p>(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）</p> <p> 支持 50 个学生同时在线并发访问和请求，如果单个实验被占用，则提示后面进行在线等待，等待前面一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。</p>
<p>5-3 用户操作系统要求</p> <p>(1) 计算机操作系统和版本要求：Windows 7 以上版本</p> <p>(2) 其他计算终端操作系统和版本要求：Windows 7 以上版本</p> <p>(3) 支持移动端：<input type="checkbox"/>是<input checked="" type="checkbox"/>否</p>
<p>5-4 用户非操作系统软件配置要求</p> <p>(1) 需要特定插件 <input type="checkbox"/>是<input checked="" type="checkbox"/>否</p> <p>(2) 其他计算终端非操作系统软件配置要求</p> <p> 浏览器推荐使用谷歌 Chrome 浏览器 55.0 版本及以上，火狐 Firefox 浏览器 50.0 版本及以上。</p>
<p>5-5 用户硬件配置要求</p> <p>(1) 计算机硬件配置要求</p> <p> CPU 主频：8 核 2.0GHz 以上</p> <p> 显存容量：2GB，独立显卡</p> <p> 内存容量：8GB 以上</p> <p> 硬盘容量：1TB</p> <p> 显示器分辨率：1920×1080</p> <p> 输入设备：鼠标、键盘</p> <p>(2) 其他计算终端硬件配置要求</p> <p> 无</p>

5-6 用户特殊外置硬件要求

(1) 计算机特殊外置硬件要求

VR 体验端操作手柄、头盔

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求

无