

项目编号：_____

哈尔滨工业大学

继续实施“985工程”建设 《创新能力提升计划——创新实验课》

立项建议书 (代可行性论证)

子项目名称：_____ 气体放电及电推进技术 _____

子项目负责人：_____ 于达仁 _____

所在院系：_____ 能源科学与工程学院 _____

联系电话：_____ 13804578476 _____

申请日期：_____ 2012.09.18 _____

哈尔滨工业大学本科生院

二〇一二年八月制

撰写说明

1. 请严格按照表中要求填报，各项内容要实事求是，文字表达要明确、简洁。
2. 表中空格不够时，可另附页，但页码要清楚。
3. 审核意见和声明中需填写项目依托单位负责人姓名和负责人姓名，建议人和项目单位负责人需对建议书内容的真实性和有效性负责。
4. 与建议书一并填报附件一：“《创新实验课》建设子项目立项情况汇总表”（附后）。
5. 建议书限用 A4 纸张打印填报。

| | | | | | | |
|---|------|--|-----|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| 项目名称 | | 《创新能力提升计划——创新实验课》建设 | | | | |
| 子项目名称 (课程名称) | | 气体放电及电推进技术 | | 开课实验室 | | 等离子体推进 技术实验室 |
| 总学时、学分 | | 以下四种情况任选其一(画“√”): 48学时 2个创新学分 <input type="checkbox"/> 36学时 1.5个创新学分 <input type="checkbox"/> 24学时 1个创新学分 <input checked="" type="checkbox"/> 12学时 0.5个创新学分 <input type="checkbox"/> | | | | |
| 开课学期 | | 秋季 <input checked="" type="checkbox"/> | | 春季 <input type="checkbox"/> | | 夏季 <input type="checkbox"/> |
| 授课对象 (专业、年级) | | 飞行器动力工程、热能 动力工程、电气工程、 航空宇航科学与技术专 业大二以上学生 | | 年受益学生数 | | 20 |
| 学生选拔方式 | | 选课、面试 | | | | |
| 考核方式 | | 测量技能考核、实验报告 | | | | |
| 先修课程 | | 大学物理实验 | | | | |
| 子项目 负责人 | 姓名 | 性别 | 年龄 | 职称 | 联系电话 | 本人签字 |
| | 于达仁 | 男 | 46 | 教授 | 13804578476 | |
| 师资队伍情况: 共有指导教师 <u>5</u> 人 其中本科毕业生 <u>1</u> 人, 硕士毕业 <u>0</u> 人, 博士毕业 <u>4</u> 人。 | | | | | | |
| 高级职称 | | 中级职称 | | 初级职称 | | 55岁以上 |
| 1 | | 3 | | 1 | | 35-55岁 |
| | | | | | | 35岁以下 |
| | | | | | | 2 |
| | | | | | | 3 |
| 指导教师 情况 | 教师姓名 | 年龄 | 职 称 | 承担任务 | | 本人签字 |
| | 于达仁 | 46 | 教授 | 项目负责人 | | |
| | 宁中喜 | 32 | 讲师 | 低气压等离子体诊断指导 | | |
| | 魏立秋 | 32 | 讲师 | 新型推力器原理实验指导 | | |
| | 唐井峰 | 32 | 讲师 | 大气压等离子体诊断指导 | | |
| | 何永峰 | 42 | 实验员 | 实验指导 | | |

一、建设目的、特色及意义

进入新世纪后，低温等离子体技术在我国加快了发展和应用，在材料表面处理和改性、航空航天以及国防等诸多领域都发挥着越来越大的作用，我校也面向这些领域开展了相关基础研究和应用研究，因此具有相关理论知识和实验技能的学生培养变得越来越迫切。

电推进装置由于具有高效率、高比冲的特点逐步取代化学推进器已经成为航天推进领域发展的一种趋势。目前航天器电推进技术成为国际航天推进领域的学术前沿和世界各航天大国重点投入和发展的前沿方向。气体放电作为等离子体产生的重要方法，是认识等离子体了解其特性的重要途径。气体放电及电推进技术创新实验课，将以现有等离子体推进技术实验室的放电平台为基础，以服务于我国未来对电推进技术和燃烧流动等离子体控制技术为目标，同时结合我校其它专业对等离子体研究的需求，面向全校培养学生的基本创新技能。不但可以让学生认识气体放电现象，掌握等离子体基本性质，理解磁场、电场等对等离子体的控制规律，培养懂得相关理论知识和诊断技术的专有人才，还会在此基础上结合相关专业要求，促进解决实际问题。让更多的学生去了解电推进及相关领域并投入到其中的研究工作，充实我国航天器能源动力领域的研究力量。

二、具体建设内容及实施方案

2.1 建设内容

气体放电及电推进技术实验创新课建设，主要包括基本现有平台的诊断能力升级和专业研究对象的研制两个部分。具体内容如下：

1) 低压气体放电实验课建设

在现有低温等离子体教学演示平台的基础上，丰富探针和光谱诊断系统，为低温等离子体参数诊断提供有效的手段。形成让学生研究低气压放电现象，掌握等离子体基本性质，理解电磁场等对等离子体运动影响的教

学方法，培养具有较强动手能力的优秀学生。

2) 大气压放电实验课程建设

围绕等离子体作用下的燃烧强化特征，搭建起气体放电下燃烧波传播试验台，形成让学生认识燃烧过程中的气体放电现象，理解等离子体对燃烧强化和火焰稳定影响的教学方法。认识气体放电有利于增强燃烧波传播速度，进而利于火焰稳定的规律。

3) 新型推力器原理实验课程建设

根据磁约束等离子体放电的基本工作原理，设计永磁、HEMP 等新型推力器原理样机，通过推力器结构设计和原理实验，理解电推进的基本工作原理及电磁场作用下的等离子体流动控制特性及机理，以原理样机为基础做探索性的基础实验研究。

2.2 具体实施方案

1) 低压气体放电实验课建设实施方案

探针和光谱诊断系统建设将以现有等离子体推进技术实验室所使用的探针和光谱诊断方法为基础，结合具体创新任务，构建单探针、双探针、发射探针等多种探针诊断系统，含电源及与现有接口匹配的探针；构建发光光谱诊断系统，含光谱仪及光路采集、显示系统。它们的原理参见图 1 和图 2。

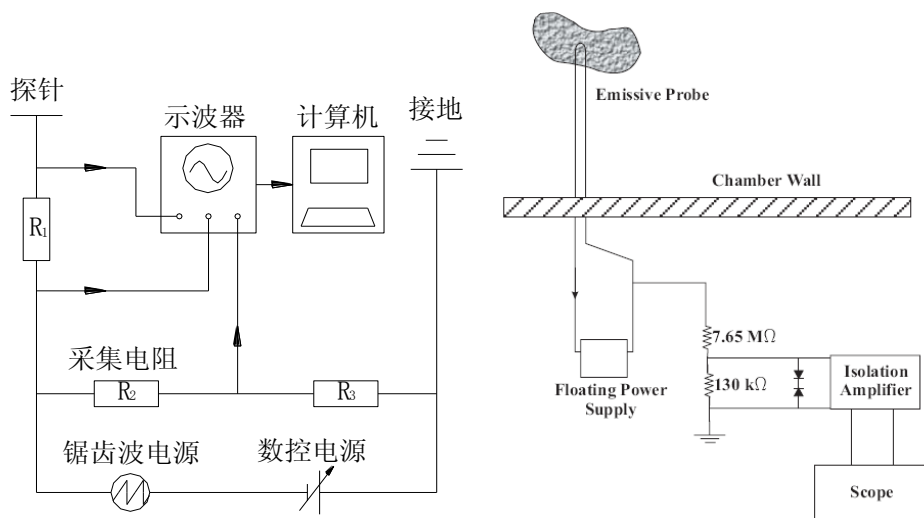


图 1 单探针（左）和热发射探针（右）测量原理示意图

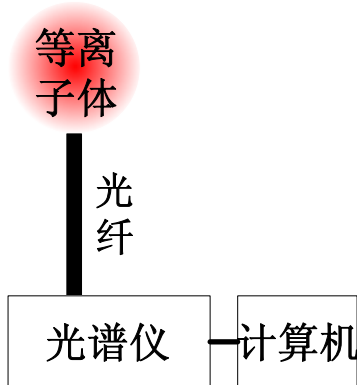


图 2 等离子体发光谱诊断系统图

教学方法建设方面。课程将以实验教学为主，以理论讲述为辅，着重培养学生的动手能力和实际问题解决能力。通过增加实验课前的预习报告和课后的实验报告来强化学生的理论理解，重点让学生实践气体放电过程，以及探针、光谱等多种方法诊断等离子体参数的过程，学会数据的基本处理，强调发现问题和分析问题的教学思想，形成一套独特的注重学生实践的创新性课程。

2) 大气压放电实验课建设实施方案

通过本试验，认识气体放电有利于增强燃烧波传播速度，进而利于火焰稳定的规律。开展等离子体作用下一维燃烧波传播试验，分析甲烷燃料/空气

的预电离下混合燃气的一维燃烧波传播过程，总结气体放电下一维燃烧波传播的试验规律，进而开展气体放电下火焰稳定试验，总结气体放电下扩散火焰的稳定性规律。

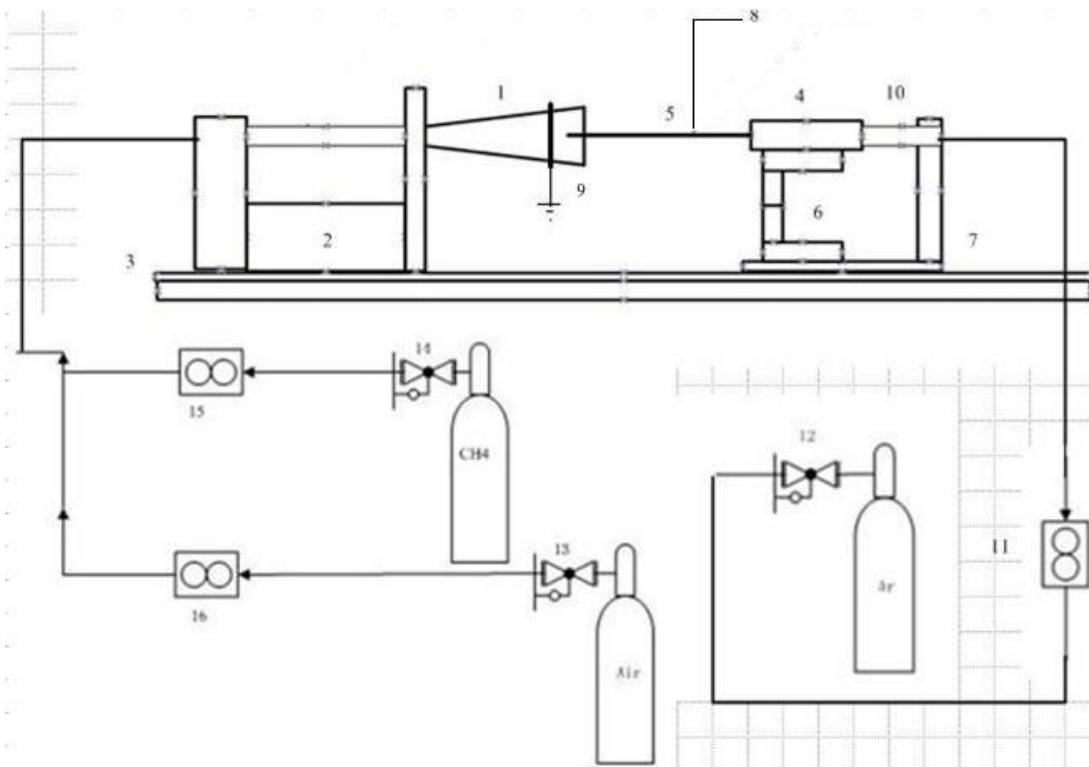


图 3 大气压放电实验平台改进方案

1. 量杯 2.左导轨车 3.玻璃导轨 4.玻璃针管 5.金属针头 6.可调螺栓 7.右导轨车 8.高频电压 9.铜环接地
10.导管 11.Ar 质量流量计 12.Ar 减压阀 13.Air 减压阀 14.CH₄ 减压阀 15.CH₄ 流量计 16.Air 流量计

3) 新型推力器原理实验课程建设

拟设计的永磁霍尔推力器原理如图 4 所示。在线圈单独励磁条件下，通过改变各个励磁线圈的安匝数来改变通道内磁场位形、强度及梯度，确定最优放电工况对应的安匝数，同时采用热电偶测量铁芯的温度，为永磁铁的选择提供参考。利用 FEMM 磁路设计软件计算在考虑永磁铁的剩磁温度系数条件下选择合适的永磁铁。通过对比实验优化永磁铁位置和几何尺寸，使得永磁铁产生的磁场更接近于优化状态下的磁场，最终实现永磁铁单独励磁条件下 SPT 可靠高效放电。

拟通过创新实验设计的 HEMP 推力器原理如图 5 所示，HEMP 结合了多种推力器设计理念，需要设计具有多级永磁铁产生多级磁路形成会切磁场将电子束缚在推力器轴向区域；利用 FEMM 建立磁场仿真模型，结合高斯计测量，设计满足推力器需求的磁场位型。参考其他电推进器设计，选择陶瓷材料、阳极结构设计气体分配器结构设计。在放电条件下，通过参数诊断方法，优化磁极和磁路位置，实现 HEMP 的可靠稳定放电。根据阴极的基本工作原理，参考离子发动机的工作原理，利用合理的栅极设计通过电场将离子引出并加速，利用快速扫描探针测量空心阴极不同放电模式羽流区等离子体密度、电子温度等参数的分布规律及随时间的演化过程，结合少量模拟计算，改进阴极结构设计，热设计，实现阴极作为微推力器的基本功能

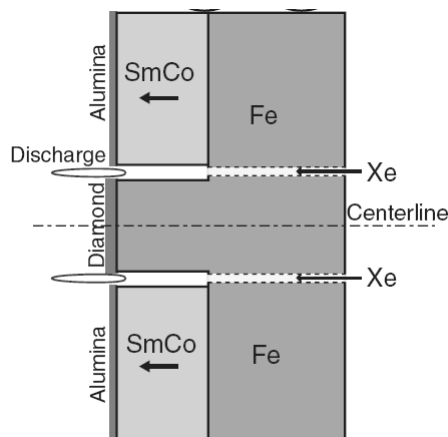


图 4 永磁霍尔推力器原理图

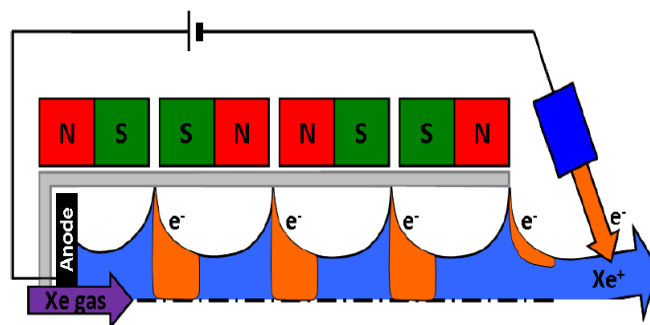


图 5 HEMP 推力器原理图

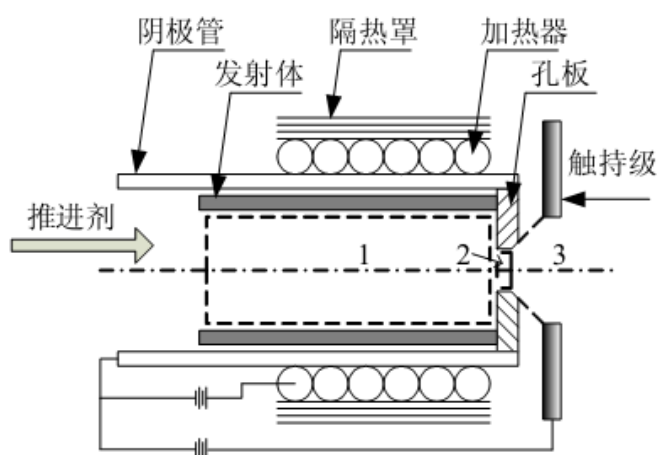


图 6 阴极结构示意图

三、实验室现有基本条件

(包括管理体制、实验室面积，实验室人员，设备状况等)

本创新课程依托于三个实验平台：等离子体推进技术实验平台、低气压放电实验台和大气压放电实验台。

等离子体推进技术实验台筹建于 2004 年，面积 100 平方米。在学校 985 和 211 学科建设的资助下，现已发展出三个基本平台。其中推力器实验放电平台两个，主要用于功率在 1 千瓦以内的推力器进行放电实验研究，实验室配备有专用的豪牛级推力计及等离子体参数测量装置。现已培养硕博士研究生 40 余名，完成多项国家级自然科学基金、航天创新基金及国防基础科研、863 等项目，并积累了丰富的等离子体参数测量、控制等方面的教学经验。

低压气体放电实验台，面积 30 平方米。含小型真空模拟装置一套和低温等离子体教学演示平台一套。其中小型真空模拟装置主要用于 200W 以下量级推力器放电实验及低温等离子体教学演示平台研究工作；低温等离子体教学演示台主要用于学生培养，该平台能在 5~1000Pa 的条件下进行低气压放电，并配有磁场调节单元，可用于探针、光谱等基本等离子体参数诊断方法的教学及演示，也可用于磁场对等离子体影响及控制的研究。该平台可同时容纳 5~10 人进行参数诊断和放电实验研究。

大气压放电实验台，占地面积 20 平方米。含大气压射频放电装置一套，可

产生低密度大气压等离子体,进行了大气环境中射流等离子体作用下 CH_4 扩散燃烧试验。

三个实验平台现采用全所统一管理,所里设有实验管理组专门负责实验平台的建设与发展。每个实验平台负责人均由理论和实践经验丰富的教师担任,各年级硕博生则配合平台管理以及低年级学生的助教工作。实验室有教师 5 人,教授 1 人,讲师 3 人,实验员 1 人。

表 1 等离子体推进技术实验室主要平台设备

| 序号 | 设备名称 | 主要参数 | 用途 | 设备状态 |
|----|------------------------|---|-----------------------|------|
| 1 | 大型真空模拟实验台 | $\Phi 1.2 \times 4$ 米,最低压力 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ | 新型推力器放电实验 | 良好 |
| 2 | 小真空模拟实验台 | $\Phi 0.8 \times 1.5$ 米,最低压力 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ | 阴极推力器放电实验 | 良好 |
| 3 | 低温等离子体教学演示平台 | 容积 30L,最低压力 2Pa | 产生低气压等离子体,可用于探针光谱诊断教学 | 良好 |
| 4 | 大气压射频放电台 | 功率 500W、频率 40~60kHz | 产生大气压等离子体,可用于探针光谱诊断教学 | 良好 |
| 5 | 光谱仪 Avaspec ULS2048x14 | 700~1160nm,分辨率 0.2nm | 发射光谱测量 | 良好 |
| 6 | 高速摄像机 Phantom v12.1 | 满幅 128×8 像素,拍摄速度 1,000,000 帧/秒 | 等离子体宏观变化测量 | 良好 |

四、进度安排

主要进度安排如下：

（一）实验平台诊断技术改进与完善

- 1) 2012.10-12月：采购各平台所需的设备，完成平台的升级改造。进行教学大纲编写与完善；
- 2) 2013.03-05月：完成各平台诊断方法的标准教学流程；
- 3) 2013年09月：开始进行授课，实现学生培养。

（二）课程学时进度安排

- 1) 1-4学时（授课）：介绍实验室平台情况，实验室功能及应用背景；进行探针基本理论和方法的学习，为后续实验做理论准备；
- 2) 5-10学时（实验）：探针诊断实验课，包括单探针（2学时）、双探针（2学时）和发射探针（2学时）等的制作，测量系统的组装，实验测量和数据处理等；
- 3) 11-12学时（授课）：光谱诊断理论教学，主要是讲述光谱诊断原理，诊断装置结构以及数据处理方法等；
- 4) 13-14学时（实验）：光谱诊断实验课，进行光谱设备的组装，光谱测量软件的应用测量，数据记录及处理；
- 5) 15-16学时（授课）：新型推进原理及大气压放电原理教学，含磁约束等离子体放电的基本工作原理和装置设计方法等；
- 6) 17-22学时（实验）：针对新型原理推力器中的实际科研课题，进行创新实验课。主要设计永磁、HEMP等新型推力原理样机，通过推力器结构设计和原理实验，理解电推进的基本工作原理及电磁场作用下的等离子体流动控制特性及机理；
- 7) 23-24学时（实验）：大气压放电实验。进行等离子体作用下一维燃烧波传播试验，分析甲烷燃料/空气的预电离下混合燃气的一维燃烧波传播过程等。

五、结题验收考核指标

平台建设方面

形成具有等离子体参数诊断教学的低气压和大气压放电平台，用于学生培养；

学生培养方面

年均培养学生20名；并使其掌握相关理论知识和诊断原理。

“985 工程”《创新能力提升计划——创新实验课》立项建议书 附件一:

《创新实验课》建设子项目立项情况汇总表

| 序号 | 实验项目名称 | 实验类型 ⁽¹⁾ | 实验学时 | 每组人数 | 开出组数 ⁽²⁾ | 主要购置设备 ⁽³⁾ | 经费预算 | 内容要求 | 备注 |
|----|-----------|---------------------|------|------|---------------------|-----------------------|------|------|----|
| 1 | 探针诊断实验 | 设计实验 | 6 | 3-5 | 4-6 | 1 | 3.5 | 预习报告 | |
| 2 | 光谱诊断实验 | 设计实验 | 2 | 3-5 | 4-6 | 2 | 2.0 | 预习报告 | |
| 3 | 新型推力器原理实验 | 综合实验 | 6 | 3-5 | 4-6 | 1 和 2 | 1.5 | 预习报告 | |
| 4 | 强化燃烧放电实验 | 综合实验 | 2 | 3-5 | 4-6 | 3 | 3.0 | 预习报告 | |
| | | | | | | | | | |

注: (1) 实验类型选择演示实验、验证实验、设计实验、综合实验;

(2) 实验学时(实验项目学时总和为本创新实验课总学时数)、每组人数、开出组数(指同时可接纳几组学生作此实验项目)填写建设之后的情况;

(3) 主要购置设备一栏只填写“985 工程”《创新能力提升计划——创新实验课》立项建议书中拟购仪器设备清单的序号即可。