

大学生创新训练项目申请书

项目编号 s201910536008

项目名称 两自由度非线性谐振式液压滤波器实验研究

项目负责人 高阳 联系电话 13553043080

所在学院 汽车与机械工程学院

学 号 201721031209 专业班级 机械 1712 班

指导教师 何志勇

E-mail 1352172312@qq.com

申请日期 2019. 4

起止年月 2019. 4-2020. 3

长沙理工大学

填 写 说 明

1、本申请书所列各项内容均须实事求是，认真填写，表达明确严谨，简明扼要

2、申请人可以是个人，也可为创新团队，首页只填负责人。“项目编号”一栏不填。

3、本申请书为大16开本（A4），左侧装订成册。可网上下载、自行复印或加页，但格式、内容、大小均须与原件一致。

4、负责人所在学院认真审核，经初评和答辩，签署意见后，将申请书（一式两份）报送××××大学项目管理办公室。

一、 基本情况

项目名称	两自由度非线性谐振式液压滤波器实验研究						
所属学科	学科一级门:	工学		学科二级类:	机械类		
申请金额	20000 元		起止年月	2019 年 4 月至 2020 年 3 月			
负责人姓名	高阳	性别	男	民族	汉	出生年月	1999 年 7 月
学号	201721031209	联系电话	宅: 手机:13553043080				
指导教师	何志勇	联系电话	宅: 手机:18932431726				
负责人曾经参与科研的情况	加入本田节能车队并参加过本田节能大赛。为汽机学院 CDIO 实验班学生, 已进入导师的科研课题组学习。						
指导教师承担科研课题情况	<p>1、主持湖南省自科基金项目 (09JJ3087): 液压系统压力脉动抑制的结构振动方法研究。</p> <p>2、主持湖南省科技计划项目 (2010FJ3003): 挖掘机液压系统振动控制技术研究。</p> <p>3、参与国家自科基金项目 (51275059): 基于耳蜗基底膜仿生原理的液压系统流体脉动抑制方法。</p>						
指导教师对本项目的支持情况	对产品研制及实验测试分析进行技术指导, 对专利申请、论文撰写与投稿进行全程质量把关。						
项目组主	姓 名	学号	专业班级	所在学院	项目中的分工		
	邓雄耀	201721030423	机械 1704	汽车与机械工程学院	产品结构设计及制造		

要 成 员	罗雅云	201821030601	机械 1806	汽车与机械工程学院	试验台搭建及实验数据采集
	马伟刚	201721031234	机械 1712	汽车与机械工程学院	产品结构设计及试验台搭建
	杜圣	201721031208	机械 1712	汽车与机械工程学院	实验数据采集与分析

二、 立项依据（可加页）

（一） 项目简介

针对液压系统泵源输出压力脉动的冲击性、周期性及多变性特点，围绕非线性振动构件的原理设计、“液体-构件”耦合振动建模及求解、自适应共振系统的优化设计等关键问题，研究“液-固”之间的非线性能量转移原理及液压脉动抑制的技术，为高压液压系统流体振动广谱、自适应控制提供全新的技术手段。

（二） 研究目的

液压技术是国家的基础技术，广泛应用于国民经济的各个领域；是衡量国家工业化水平的一个重要标志，直接影响到装备制造业的强弱。随着液压系统向高压大功率方向发展，**液压振动和噪声已经成为一个迫切需要解决的问题，其不仅影响系统性能，甚至会导致系统失效、设备毁坏。**

液压系统的振动与冲击来源于液压系统本身固有特性及工作部件和液压控制元件的瞬态扰动。其中，液压系统压力脉动引发的振动和噪声沿管路传播，直接导致管道的应力脉动和机械振动。研究表明：流体压力脉动幅值超过系统工作压力的 2.5% 以上时，则可能使管接头松动或管夹垫子磨损，影响系统工作可靠性，缩短元件使用寿命，严重时可引起设备的灾难性破坏。

液压系统流体脉动抑制是亟需解决的技术难题，使用合适的方法衰减压力脉动对着液压系统的减振降噪有十分重要的意义。目前，工程上广泛使用的流体滤波器都是基于声学消声原理的抗性滤波模式。受抗性滤波机制影响，这种滤波器具有很强的频率选择性，且滤波频带窄，结构体积庞大，因而使用安装受到空间限制，无法满足实际使用需求。

我们设想，根据液压系统压力脉动的“时间-频率-能量谱”物理特性，仿照机械系统动力吸振器工作原理，设计一种特殊结构的两自由度非线性谐振系统，

优化其立方刚度、阻尼及质量系统匹配，在液压流场中自适应实现广谱频率范围内脉动及冲击能量的耗散，达到完美的液压振动广谱滤波消声效果。

基于这一设想，本项目将从产品结构设计和实验验证两个方面入手，对全新原理的两自由度非线性谐振式液压滤波器用于高压液压系统压力脉动抑制进行探索性研究，为液压系统振动控制提供实用技术手段。

（三） 研究内容

1、基于“液体-非线性振子”耦合谐振的液压脉动抑制原理研究

通过对液压柱塞泵结构及运行参数、流体脉动频率、流体脉动能量三者之间的相互作用机理研究，建立泵出口液压脉动的“时间-频率-能量谱”数学计算模型、测试验证并确定参数识别方法。

在此基础上，探索谐振构件在流场中的非线性动力学响应，研究谐振构件与流体间的能量交换过程，建立构件与流体脉动耦合谐振的理论模型，并利用小扰动分析方法对构件在液压脉动流中的振动响应进行研究，探讨几何参数（如结构尺寸、谐振质量、立方刚度、流体阻尼等）及运行参数（如压力、流量等）对构件耦合谐振频率响应及能量耗散的影响。

同时，考虑液压系统高压、大流量的运行工况，结合振动频率响应及脉动能量耗散要求，保证结构的灵巧性，制造硅树脂纤维薄膜基体附加集中质量的谐振构件，设计合适的阻尼结构，达到系统对脉动能量传递及耗散效果。

2、两自由度非线性谐振式滤波器研制

两自由度非线性谐振构件耗散流体脉动能量模型如图1所示。其原理是在单自由度非线性谐振构件后附加一个二级非线性谐振构件，对系统脉动能量进行串联衰减。相关研究表明：二级非线性谐振构件的立方刚度 K 及阻尼 C 越小，非线性谐振构件的振动抑制效率下降越慢，非线性谐振构件的振动抑制效率越高。

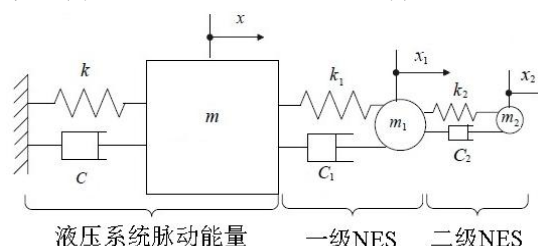


图1 两自由度非线性谐振构件耗散流体脉动能量模型

两自由度非线性谐振式滤波器结构模型如图2所示。一级非线性谐振构件结构包括柔性膜附加大刚性质量块、阻尼孔、液体容腔及液体阻尼；二级非线性谐振构件结构包括柔性膜附加小刚性质量块、气体容腔及气体阻尼。这样，二级非线性谐振构件的立方刚度 K 及阻尼 C 均比一级非线性谐振构件小。

根据结构模型，我们需要确定的是各级非线性谐振构件系统中立方刚度 K 、阻尼 C 、质量 m 的合适大小及相互比例关系，最优能量传递条件及有效工作带宽等。

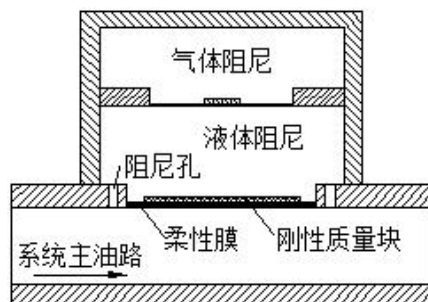


图2 两自由度非线性谐振式滤波器结构模型

3、两自由度非线性谐振式滤波器试验研究

测试试验系统结构方案如图3所示：

按照测试试验系统结构方案，试验研究的思路是：

1) 依据理论分析得出的滤波器相关设计及性能数据，调整电机转速，改变泵源输出脉动频率。

2) 在稳态工况下，针对两自由度非线性谐振式滤波器进行测试，采集滤波器前后的相关数据，对压力信号进行时域和频域对比分析，并通过流量信号和速度信号的引证，得出压力脉动衰减程度和衰减率，验证滤波器的滤波性能，迭代改进样机设计参数。

3) 在动态工况下，同理测试两自由度非线性谐振式滤波器对冲击载荷的响应和衰减性能。

4) 在全带宽范围内测试两自由度非线性谐振式滤波器的滤波特性，验证理论成果并评价滤波效果。

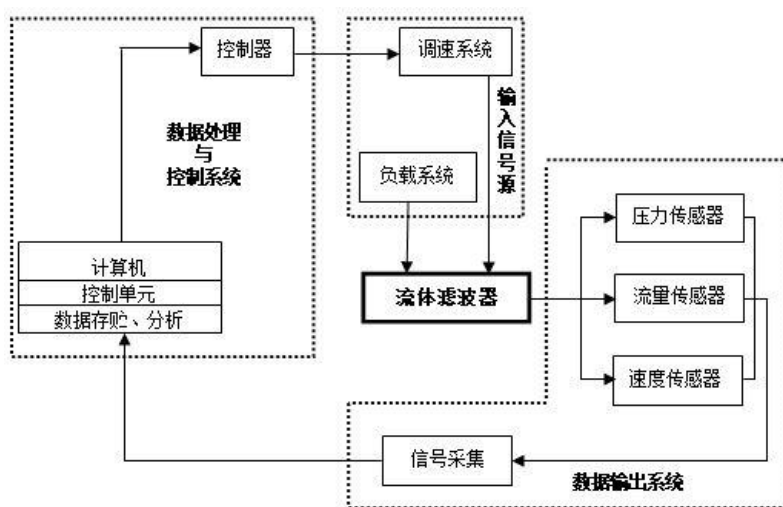


图3 测试试验系统结构方案

总之，本项目强调理论研究、产品制作、实验验证及工程实践相结合，注重

学科交叉，充分利用其它行业和领域已取得的先进成果。

（四） 国、内外研究现状和发展动态

液压泵的内部结构特性决定了输出的流量不是恒定而是变化的，泵的输出流量遇到系统负载阻抗后形成系统压力，从而决定了输出流量和压力的周期性和动态性^[1]。直接在脉动源处消除流体的振动是降低液压脉动最自然的方法。如优化液压泵的设计、合理布置管路及元件等。但由于系统负载特性的多样性，高压液压油与液压元件的耦合作用，使液压能在液压系统中的传递呈现出复杂多样的动力学特征。因此，需要研究液压系统的动力学行为，掌握液压脉动产生和传播的机理及特征，从液压系统负载匹配的视角寻找降低压力脉动的方法。

流体滤波器就是从负载系统出发来衰减压力脉动的被动式滤波器，其原理来源于气体消声器，分为阻性滤波和抗性滤波两大类。**阻性滤波虽然滤波频带较宽，但低频性能差，压力损失大而无法应用。**抗性滤波器是在管道上连接截面突变的管段或旁接共振腔，利用阻抗失配，使压力波在阻抗突变的界面处产生反射达到滤波目的。如蓄能器、扩张室型消音器、旁支共鸣器、赫姆霍兹共鸣器以及多腔共鸣器等，其结构及理论研究已非常成熟^[2]。

目前常用扩张室型及干涉型抗性滤波器结构形式相对固定，只对特定频率点及狭窄频段才有良好滤波效果，无法自动调节谐振频率以适应工况变化，因而限制了其应用范围。

鉴于常见被动式滤波器的应用不足，国内外学者提出了多种主动消振策略，通过检测脉动源，自动引入与初级脉动源幅值相等、相位相反、随初级脉动源变化的次级脉动源进行叠加，实现脉动的主动衰减^[3,4]。**主动式脉动衰减器的工作本质是通过对系统施加反向能量来衰减脉动，一旦匹配失当反而会加大原系统的脉动，具有成本高、可靠性差等问题，目前大都还停留在实验室阶段。**

结构耦合振动式气体消声原理为液压系统脉动控制提供了借鉴^[5]。滤波器利用构件与流体的耦合共振将流体脉动能量转化为机械振动能量来控制 and 衰减，能在某一小频段范围内达到良好使用效果^[6]。

如图1所示，奥地利的MIKOTA^[7]设计了一种由活塞和液压弹簧构成的紧凑型液压脉动衰减器，弹簧起着对中和支撑活塞的作用；活塞与配合孔之间的间隙能平衡腔体内外压力，以适应各种压力等级；通过调节腔体容积可以改变等效液压弹

簧刚度的大小，从而改变衰减器固有振动频率。

密歇根大学的Sripriya Ranlamoorthy研究结果也表明，液压系统中若能够加入结构声学消声器，其吸声频带和衰减效果良好^[8]。此后，高峰等设计了一种机械弹簧耦合振动式脉动衰减器，通过改变叠加弹簧个数调整刚度，并在28 MPa的高压高速下取得明显的试验效果^[9]。

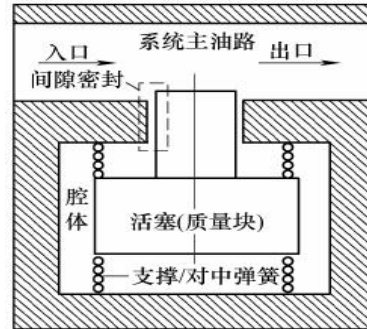


图1 结构共振式液压脉动衰减器

与常规C型、K型、T型、H型等抗性滤波器相比，**结构共振式滤波器同样存在结构复杂、体积大、工作频率较窄等不足，没有明显使用优势。**

为此，贺尚红、何志勇等提出利用机械谐振式脉动补偿器来消减流体压力脉动。其思路是设计一种结构简单、灵巧的多自由度的机械谐振机构，在较宽频率范围内，使任意频率成份的流体脉动都可以对应一个与之谐振的吸振系统，将液压脉动最大限度地转换成机械振动，再通过内部阻尼消耗振动能量，则可获得广谱高效的液压脉动抑制效果^[10]。

随后，贺尚红、何志勇及其团队分别对单薄板^[11]、多薄板^[12,13]、预张拉膜片^[14,15]等机械谐振式流体滤波器进行了理论和试验研究。试验结果表明，该种类型的脉动衰减器在50~1000Hz的范围内，插入损失可达10 dB以上，脉动抑制效果较好。结果同时显示，与预张拉膜片式滤波器相比，薄板谐振式滤波器对流体脉动频率响应灵敏度要差，滤波频带范围稍窄，且系统压力损失大，但脉动抑制效果明显。

但相关文献研究也表明，**柔性材料式脉动衰减器的衰减特性随系统压力变化而变化，而薄板式脉动衰减器也面临着工作频带窄的问题^[16]。**因此，结构紧凑性好、通用性高、频带宽、频率适应性强是未来液压脉动衰减器的发展趋势。

在机械系统中，振动能量在不同的非线性模态间传递是广泛存在的现象。非线性耦合关系使得振动能量可以在具有不同频率的非线性模态之间传递，由于非线性系统中可以发生主共振、超谐振和次谐振，所以即使当两个不同非线性模态

间的模态频率差别很大时，能量传递同样可以产生^[17]，该成果已研制成单自由度非线性动力吸振器（工作原理如图2所示）应用于结构工程及航空航天领域的减振系统。

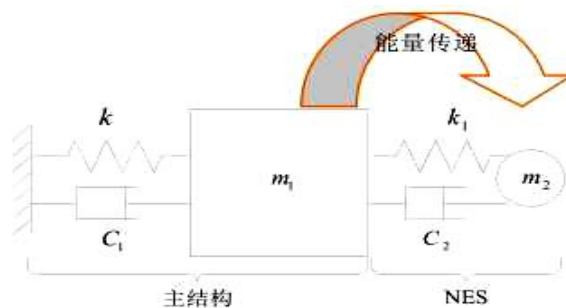


图2 单自由度非线性动力吸振器能量传递示意图

研究表明，非线性谐振构件中引发最优靶能量传递的初始能量与立方刚度 k 大小成反比，即 k 越小，系统对频率响应越灵敏，吸振越快^[18]；合理设计NES系统中的阻尼比，能使非线性能量阱吸振效果更佳^[19]。

非线性动力吸振器的工作原理为液压系统脉动控制提供了借鉴。但是，与机械系统的减振消声滤波器不同的是，液压滤波器结构还必须适应液压油的高压、大流量、冲击载荷、流体介质低压缩性及腐蚀等工况要求。

我们设想，根据液压系统压力脉动的“时间-频率-能量谱”物理特性，仿照NES的工作原理，设计一种特殊结构的两自由度非线性谐振系统，优化其立方刚度、阻尼及质量系统匹配，在液压流场中自适应实现广谱频率范围内脉动及冲击能量的耗散，达到完美的液压振动广谱滤波消声效果。

这正是申请者提出的立项基本出发点。

（五）创新点与项目特色

1、提出在液压系统中以两自由度非线性谐振构件与流体脉动耦合共振方式消减液压脉动的新机制，突破传统抗性滤波器的滤波消声局限。

2、设计宽频“液体脉动能量-结构谐振”的高效频率响应及振动能量传递耗散的流体滤波器，实现液压脉动及冲击的自适应滤波衰减效果。

（六）技术路线、拟解决的问题及预期成果

一、项目的技术路线

液压系统在各行各业的应用已相当广泛，然而，由于容积式泵的结构因素导

致的流体脉动为系统的安全工作带来了隐患。而实现高压液压系统流体振动的自适应控制一直是行业设计人的梦想，国内外研究者为此付出大量的努力，但一直未能获得有效突破。

因此，要实现项目既定的目标，需要从最新的理论研究，产品研发中寻找突破。本项目将学习国内外相关研究和产品资料的基础上，充分了解当前主流技术和相关领域的应用状况，吸取经验取长补短。发挥本项目组前期研究基础优势，充分利用本领域的最新研究成果，完成项目的顶层设计。

本项目将通过理论分析，设计制造两自由度非线性谐振式滤波器样机，在现有的专用液压脉动测试实验台（图4）上进行滤波器特性试验，以实际测试数据来检测理论分析结果的正确性、有效性和稳定性，实验方案如下：

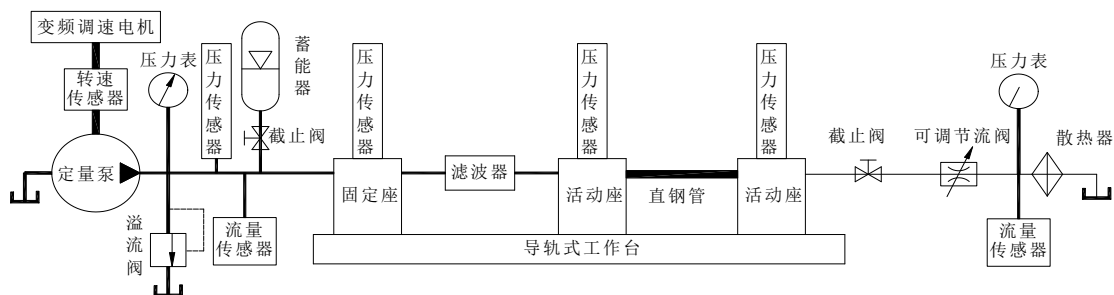


图4 液压脉动测试实验台

1、图4所示，用流量脉动比较显著的7柱塞泵作为液压脉动源，液压泵由变频调速电机驱动。通过改变电机转速调整液压泵的流量脉动频率，以获得尽量宽的脉动频率范围。

2、实验系统采用终端节流加载、截止冲击加载等方式模拟系统负载变化，测试液压滤波器在不同瞬态负载及稳态负载下的使用工况参数。

3、试验主要测量的参数有：液压泵转速、滤波器前后瞬态和稳态流量与压力、直钢管管壁应力等。测量数据进入数据采集与分析系统，进行在线和离线分析。实验系统中的流量传感器和转速传感器主要用实验过程的监测和数据对比。

4、对于每一个工况点，通过滤波器前后的各两组压力测试数据，结合各自的动态阻抗，通过相关数学处理，可得到待测滤波器的四极子传递矩阵。通过设计新的动态阻抗，则可以对测试的传递矩阵模型进行验证。

5、在获得各位置点的压力信号后，在频域内可得到实验系统任意两位置压力比的幅频和相频，与仿真结果比较，验证理论模型的正确性和精确性。

6、对比测试滤波器前后动态压力，获得滤波器的传递损失和插入损失，评价滤波器滤波性能。

7、对比加装滤波器前后的直钢管振动模态分析结果，评价滤波器的工程应用效果。

8、对实验结果进行比对分析并秉承迭代求精的开发策略，完成滤波器的结构优化设计和产品研发，为流体系统设计、流体管路匹配、流体振动的抑制方法提供技术手段。

二、预期成果

- 1、设计制造出两自由度非线性谐振式滤波器样机 1 台；
- 2、发表论文 1-2 篇；
- 3、申报专利 1-2 项。

（七）项目研究进度安排

2019.4-2019.8，通过理论分析，设计制造出 1 台两自由度非线性谐振式滤波器样机，申报专利 1-2 项；

2019.9-2019.11，通过初步实验测试，验证滤波器性能，完善滤波器结构设计，并进一步实验测试，得到滤波器性能最佳结果；

2019.12-2020.3，撰写论文投稿，并准备结题报告。

（八）已有基础

1. 与本项目有关的研究积累和已取得的成绩

项目团队成员均来自长沙理工大学汽车与机械工程学院本田节能车队。车队成员在 2018 赛季一第十二届全国 Honda 节能竞技大赛，取得了“EV 组全国第九名的成绩，燃油组全国第 31 名的好成绩”，其中 EV 组首次获得“优秀车队奖”。通过在车队的学习，项目组成员具有熟练的三维级二维建模能力，对产品结构设计具有深厚的基础。

目前，项目组大部分成员已加入学院 CDIO 实验班，在导师的带领下，对流体力学、液压传动等知识有了深刻的理解；对液压系统流体脉动产生的机理和常用滤波器性能掌握比较清楚，并在老师指导下初步设计了第一代两自由度非线性谐振式滤波器样机。此外，项目组成员熟悉学院液压脉动测试实验台及杭州忆恒数

据采集与分析仪等实验设备的工作原理和使用，这些为产品的实验验证提供了坚实基础。

我们相信在指导老师的悉心指导和项目组成员的共同努力下，充分发挥小组成员的才智和专业特长，能够顺利地完成两自由度非线性谐振式液压滤波器实验研究项目。

2. 已具备的条件，尚缺少的条件及解决方法

(1) 液压实验平台

学院自行设计定制了“液压系统振动控制实验系统”，该系统由实验平台、加载系统、动力系统、控制系统、测试系统五大部分组成。通过调整电机转速、系统加载来测试不同工况下液压系统压力脉动及管道振动信号，进行在线和离线分析。

试验平台采用固定卧式结构，配有导轨、固定座、活动座等，方便不同长度尺寸滤波器及被测钢直管的安装拆卸。

系统最大压力 31.5 Mpa，额定工作压力 28 Mpa，工作环境温度：-10~+40℃，工作环境湿度<85%，工作油温范围：-10~+70℃，手动变量柱塞泵额定排量：23ml/rev，变频电机稳定调速范围：200rpm~3000rpm。

(2) 测试及数据处理系统

16 通道高速数据采集与记录系统、dSPACE 实时仿真与控制平台，动态分析仪。

(3) 软件平台

TINKER 分子模拟程序包、Labview 虚拟仪器系统、Matlab 软件系统、AMEsim 液压仿真系统。

(4) 尚缺少的试验条件

数据测试用压力和流量传感器、耐高压和腐蚀的柔性膜片。

三、 经费预算

开支科目	预算经费 (元)	主要用途	阶段下达经费计划(元)	
			前半阶段	后半阶段
预算经费总额	20000		20000	0
1. 业务费	9800		9800	0
(1) 计算、分析、测试费	400	打印装订费	400	0
(2) 能源动力费	400	试验测试水电费	400	0
(3) 会议、差旅费	1200	调研及样机试制单位联系	1200	0
(4) 文献检索费	4200	专利查新及申请费	4200	0
(5) 论文出版费	3600	论文版面费	3600	0
2. 仪器设备购置费	5400	压力、流量传感器购置	5400	0
3. 实验装置试制费	4000	两自由度非线性谐振式滤波器样机制作	4000	0
4. 材料费	800	试验台液压油更换	800	0
学校批准经费	20000		20000	0

四、 指导教师意见

项目以泵源液压系统压力脉动衰减为研究目的，实验分析两自由度非线性谐振滤波器的性能，立意新颖，方案可行，成果可期。同意指导。

导师（签章）：

年 月 日

五、 院系大学生创新创业训练计划专家组意见

推荐校级项目

专家组组长（签章）：

年 月 日

六、 学校大学生创新创业训练计划专家组意见

推荐省级项目

负责人（签章）：

年 月 日

七、 大学生创新创业训练计划领导小组审批意见

同意

负责人（签章）：

年 月 日