



**中国航空发动机集团有限公司**  
AERO ENGINE (GROUP) CORPORATION OF CHINA

# 中国航空发动机集团 2019 年度 产学研合作项目指南

中国航空发动机集团  
二〇一九年十月

# 目录

一、申报原则.....	4
二、申报要求.....	5
三、主要内容.....	6
<b>（一）精细化结构设计、振动抑制与宏/微观监控及检测技术</b> .....	<b>6</b>
1. 航空发动机增材制造回流燃烧室火焰筒设计优化及寿命预估研究 .....	6
2. 航空发动机用轻质高效换热器分析优化技术 .....	8
3. 航空发动机盘鼓式转子系统精确模拟及振动抑制方法研究 .....	10
4. 航空发动机高速轻质重载齿轮传动系统动力学分析技术研究 .....	12
5. 航空发动机机匣安装边密封特性分析及试验研究 .....	14
6. 航空发动机陶瓷基复材构件智能检测方法 & 缺陷形成演化规律研究 .....	15
7. 高温合金叶片榫齿磨削烧伤和裂纹产生机理与工艺优化监控研究 .....	17
8. 基于铸造叶片射线检测数字图像大数据的缺陷自动识别系统 .....	18
9. 基于微小容腔的压气机出口动态总压智能传感方法研究 .....	21
10. 叶片生产车间数字孪生监控平台研究与开发 .....	23
<b>（二）新型/耐磨材料与先进评估技术</b> .....	<b>25</b>
11. 气冷叶片高温热障涂层隔热效果表征技术及评价方法研究 .....	25
12. 航空发动机燃油系统复杂高压壳体用高强耐热铸造铝合金自主研发 .....	27
13. 多电发动机用高性能高温稀土永磁材料 .....	28
14. 高强单晶高温合金多尺度力学模拟计算 .....	30
15. 航空发动机涡轮叶片环境障涂层(EBC)失效机理及安全评定方法研究 .....	32
16. 高性能 Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料的制备技术和摩擦学特性的技术研究 .....	34
17. 指尖片及密封座表面高温耐磨自润滑涂层研制 .....	36
18. 火焰喷涂 Y B C -2 棒材转化为火焰喷涂 Ni/BN 粉末工艺研究 .....	38
<b>（三）高效先进制造工艺技术</b> .....	<b>40</b>
19. 激光选区熔化成型 TC4 合金轴承座组织、缺陷与性能影响关系研究 .....	40
20. 薄壁件孔边电解质等离子抛光技术 .....	41

21. 航空发动机转子系统螺栓连接工艺稳定性研究 .....	42
22. 钛合金外涵机匣旋印电解加工技术研究 .....	44
23. 基于 3D 打印的型芯/型壳一体化快速铸造技术 .....	45
24. 航空发动机燃烧室帽罩精准成形技术研究 .....	47
25. 高硬度难加工材料花键加工技术研究 .....	49
26. 航空发动机机匣多轴车铣复合高效高质量切削工艺研究 .....	50
<b>中国航空发动机集团产学研合作项目立项建议书 .....</b>	<b>53</b>

中国航空发动机集团（以下简称集团）产学研合作是贯彻落实党的十九大精神，坚持创新驱动发展战略，推进产学研深度融合，加快建设“小核心、大协作、专业化、开放型”科研生产体系的一项重要举措。旨在通过识别外部优势学科/专业/技术，结合集团各单位需求，开展与国内外高等院校和科研机构的科技合作，引导并统筹集团内外优势力量，协同研发、共同创新，建立航空发动机产学研用良性生态，夯实航空发动机自主研发的技术基础。

指南是在广泛征集集团各单位需求、建议的基础上，结合国内外高等院校和科研机构专业、学科优势，依托集团内外相关专家共同论证编制，主要围绕航空发动机研制中基础薄弱、故障多发，但易被忽略的瓶颈难点技术，包括精细化结构设计、振动抑制和宏/微观监控及检测技术，新型材料与耐磨材料技术、高效先进制造工艺技术等方面，共发布 26 个项目需求。

## 一、申报原则

（一）**聚焦技术顽疾**。旨在瞄准航空发动机研制长期存在的薄弱环节与难题，以深入研究机理、补齐技术短板、突破核心技术为目的，利用外部力量协同创新发展，解决核心基础问题。

（二）**突出前沿及先进技术**。旨在瞄准具有应用潜力的航空发动机前沿技术，以先进方法、工具和软件系统的应用为目的，利用高校的理论基础和技术优势，开展合作研究，推进新技术的工程实践。

**（三）注重国际合作技术。**旨在针对航空发动机研制所需的前沿技术理论与方法，以开展技术合作为目的，利用已有的国际知名大学联合技术研究中心等开展基础和关键技术研究，提升国内先进技术水平。

**（四）确保论证质量。**项目遵循公开发布、公平竞争、鼓励创新、重在转化的原则，突出集团各单位作为产学研合作项目应用主体的地位和作用，要求与项目承研单位开展紧密合作，针对研究目标、研究内容和考核指标等进行深入沟通，确保项目申报符合研制需求，项目成果可以有效应用。

## **二、申报要求**

**（一）**项目申请人（即项目的实际负责人）应为相关高校和科研机构的正式员工，其在研的产学研合作项目总数原则上应不超过 2 项。涉密项目的承研单位应具备相应的保密资格。

**（二）**项目申报应符合指南范围和要求，研究内容、研究周期和经费预算相匹配。指南分为三类共 26 项需求，每项均属于独立的技术方向，各单位可根据自身情况选择申报，经评审后择优立项，每项资助经费不超过 300 万元。

**（三）**所申报项目应有集团所属单位作为研究和应用依托单位，集团所属单位须全程参与，与项目承研单位开展紧密合作，为本单位相关项目提供必要的研究、试验和验证条件，并实施项目的过程管控和成果的转化应用。

**（四）**请各单位按照格式编制《中国航空发动机集团产学研合作项目立项建议书》（模板见附件），并于 2019 年 11

月 18 日前将盖章的立项建议书 2 份和电子文档报至中国航发研究院。联系人及电话：

研究院基础与应用研究中心 胡文颖 13426080281

研究院科技质量部 李瑶 13910552411

### 三、主要内容

指南围绕三类共发布 26 个项目需求，一是**精细化结构设计、振动抑制与宏/微观监控及检测技术**，围绕航空发动机回流燃烧室、高效换热器、转子系统、叶片检测、数字孪生等领域，开展先进的设计、振动抑制和精密检测等技术研究，提升国内研制能力和水平；二是**新型/耐磨材料与先进评估技术**，围绕航空发动机用新型高强耐热铝合金、自润滑耐磨材料、高性能稀土永磁材料技术，以及热障涂层、环境涂层评估等领域，开展新型材料和先进评估技术研究，推动行业材料技术深入发展；三是**高效先进制造工艺技术**，围绕航空发动机快速增材制造、精密电解加工和高效成形等技术，开展新型先进制造工艺研究，夯实基础制造工艺体系。

#### （一）精细化结构设计、振动抑制与宏/微观监控及检测技术

##### 1. 航空发动机增材制造回流燃烧室火焰筒设计优化及寿命预估研究

**项目编号：**HFZL2019CXY001

**项目背景：**随着燃烧室温升提高，火焰筒的冷却问题将会越发突出，尤其在回流燃烧室上，由于冷却面积相比直流燃烧室火焰筒更大，冷却设计的难度凸显。亟需开展面向增

材制造的回流燃烧室火焰筒特征结构打印及后处理工艺研究。同时由于火焰筒工作环境工况恶劣且环境复杂，包含化学和物理反应，也需要一套完整且可信的评价标准来评定其可靠性及寿命，来满足发动机适航方面的需求。

**项目目标：**针对高性能回流燃烧室火焰筒冷却问题突出，且传统机械方式加工周期长、成本高需求。通过开展基于增材制造工艺的小直径孔的流量特性研究，建立基于增材制造回流燃烧室火焰筒特征孔流量系数及冷效数孔数据库。并建立以火焰筒缩比件及特征结构件为考核对象的增材制造火焰筒可靠性及寿命预估模型，形成评价方法和评价标准，实现高性能、低成本、短验证周期的燃烧室火焰筒在航空发动机上的工程应用。

#### **研究内容：**

(1) 开展基于回流燃烧室火焰筒流场特征的小孔径开孔流量控制基础研究，建立增材制造火焰筒特征开孔流量系数及冷效数据库；

(2) 基于数据库基础，开展回流燃烧室火焰筒特征结构在不同打印生长方向下的流量分配变化规律研究，提出满足火焰筒结构和性能要求的最佳打印流程；

(3) 开展不同制备工艺参数下的火焰筒特征模拟件的特性研究（包括构件力学性能、表面质量、尺寸符合性等）；

(4) 开展增材制造火焰筒失效模式研究；

(5) 建立考虑增材制造特点的火焰筒寿命预测模型。

#### **预期成果：**

(1) 基于增材制造燃烧室火焰筒小孔流量系数及冷效数据库；

(2) 基于增材制造回流燃烧室火焰筒流量分配设计及优化方法；

(3) 增材制造回流燃烧室火焰筒工艺参数及流程优选方法；

(4) 基于增材制造火焰筒寿命预估模型及评估方法。

#### **考核指标：**

(1) 火焰筒加工周期相比锻件机加火焰筒缩短 50%；

(2) 火焰筒加工成本相比锻件机加火焰筒降低 50%；

(3) 增材制造火焰筒特征模拟件热疲劳裂纹萌生寿命预测精度为正负两倍分散带；

(4) 增材制造火焰筒寿命不低于锻件机加火焰筒寿命的 80%；

(5) 火焰筒一次成型合格率（尺寸及孔隙率合格）大于 70%。

**研究周期：** 不超过 36 个月

**发布方式：** 公开发布

## **2. 航空发动机用轻质高效换热器分析优化技术**

**项目编号：** HFZL2019CXY002

**项目背景：** 换热器是航空发动机热管理系统的重要部件，航空发动机用换热器在流动、传热、强度、质量等方面都有很高的要求，使用传统设计方法难以满足换热器精细化设计的目标。而商用三维仿真软件非针对换热器设计，难以解决



换热器复杂重复单元的快速分析和优化问题。同时，其封闭性导致无法深入研究其内部求解机制，无法根据试验数据修正计算结果。基于自主开发的航空发动机换热器分析技术可以加快换热器设计流程，实现换热器多参数寻优设计。

**项目目标：**针对航空发动机用轻质高效换热器分析优化效率问题，开展基于自主开发的航空发动机换热器分析优化研究，采用开源流动传热计算库和优化方法，并针对换热器特殊的复杂重复单元进行特殊处理，形成航空发动机轻质高效换热器的高效分析及优化方法，为加快航空发动机换热器设计提供支撑。

**研究内容：**

(1) 航空发动机用换热器参数化建模，与 CAD 和仿真软件实现无缝连接；

(2) 航空发动机用换热器多物理场耦合仿真，满足工程精度和周期需求；

(3) 航空发动机用换热器优化，实现换热器自动性能寻优。

**预期成果：**

(1) 航空发动机用换热器参数化建模方法；

(2) 航空发动机用换热器多物理场耦合仿真方法；

(3) 航空发动机用换热器多参数多目标优化方法；

(4) 航空发动机用换热器建模分析及优化软件。

**考核指标：**

(1) 换热器参数化建模技术

采用参数强耦合的建模方式，建立高稳定性换热器参数化模型，换热器型式至少包括管壳式、板翅式。其参数在合理范围内保证模型创建成功，效率较传统枚举设计方法提高30%以上。

### (2) 多物理场耦合仿真分析技术

针对不同物理场时间尺度、空间尺度的差异进行特殊处理，开发多物理场耦合仿真分析程序，精度满足工程需要。求解速度较传统软件（CFX 等）提高 20%以上。

### (3) 换热器优化设计技术

采用启发式优化算法，实现对优化空间的全局寻优，针对现有优化算法迭代步数多等缺点进行改进，增强寻优方向，提高优化速度。要求优化效率较遗传算法提高 20%以上。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

## 3. 航空发动机盘鼓式转子系统精确模拟及振动抑制方法研究

**项目编号：**HFZL2019CXY003

**项目背景：**随着转动部件轻薄化，新型高性能航空发动机转子连接结构刚度降低、负载增加，鼓筒薄壳结构特征以及连接界面对转子系统动力学行为的影响日益显著。经典转子动力学理论中的弹性梁-弹簧-集中质量模型，无法反映盘鼓式转子中鼓筒的薄壳结构特征以及界面连接特性，难以精确预示转子系统的复杂动力学行为。缺少盘鼓式转子精确模拟以及鼓筒薄壁结构振动抑制方法，已成为制约我国航空发

动机结构可靠性的关键问题。

**项目目标：**针对经典转子动力学理论无法充分考虑航空发动机盘鼓式转子鼓筒薄壳结构特征以及盘鼓组合界面非线性、非确定性连接特性的问题，采用弹性理论、层合理论、接触力学、区间分析方法以及人工弹簧-阻尼技术，提出通用化的盘鼓式转子系统动力学建模和减振方法，为实现航空发动机转子系统动力学精确模拟及振动抑制提供支撑。

**研究内容：**

- (1) 盘-鼓-轴耦合动力学建模方法研究；
- (2) 盘鼓组合界面非线性、非确定性连接特性模拟方法研究；
- (3) 盘鼓式转子复杂动力学行为研究；
- (4) 盘鼓式转子振动抑制方法研究。

**预期成果：**

- (1) 盘鼓式转子系统建模及分析方法及程序；
- (2) 鼓筒振动抑制方法；
- (3) 盘鼓式转子动力学模拟研究报告；
- (4) 鼓筒振动抑制方法研究报告。

**考核指标：**

- (1) 盘鼓式转子前三阶固有频率计算结果与实测结果误差小于 5%；
- (2) 典型工况下盘鼓式转子振动响应计算结果与实测结果误差小于 10%；
- (3) 提出两种以上鼓筒薄壁结构振动抑制方法，降低

鼓筒振动幅值 30%以上。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

#### 4. 航空发动机高速轻质重载齿轮传动系统动力学分析技术研究

**项目编号：**HFZL2019CXY004

**项目背景：**航空齿轮传动系统是航空发动机动力传输的关键部件，其工作可靠性直接影响发动机的功能、性能实现性和结构安全性。由于航空发动机齿轮通常转速高、负荷大、结构轻薄、系统激振因素复杂，更容易出现振动等诱发的结构失效问题。目前，国内在齿轮传动系统动力学分析与优化方面研究基础薄弱，没有形成工程上可用、适用的相关设计、仿真和验证体系。基于上述原因，亟需开展齿轮传动系统动力学分析技术研究。

**项目目标：**针对航空发动机齿轮传动系统动力学设计分析技术储备不足、验证和评估体系不健全的问题，开展齿轮传动系统动力学分析技术研究，突破当前国内在高速轻质重载航空发动机齿轮传动系统动力学分析领域存在的技术瓶颈，补充和完善齿轮传动系统的动力学仿真设计、分析和评估技术体系，提升航空发动机齿轮传动系统动力学设计、分析能力和水平，大幅缩短产品试验阶段所需要的时间和成本，提升设计质量。

**研究内容：**

(1) 航空发动机齿轮传动系统动力学仿真分析建模方

法研究；

(2) 航空发动机齿轮系统动力学仿真分析与评估技术研究  
研究与验证；

(3) 基于液固耦合的航空发动机齿轮传动系统动力学  
仿真分析与评估技术研究  
研究与验证；

(4) 轮齿轴承等接触界面的油膜厚度、结构刚度、加  
工精度、尺寸公差等因素对齿轮系统动力学特性影响敏感性  
研究。

#### **预期成果：**

(1) 航空发动机齿轮传动系统动力学建模方法，并建  
立相应的模型简化技术体系；

(2) 航空发动机齿轮传动系统动力学仿真分析与评估  
方法；

(3) 航空发动机齿轮传动系统液固耦合动力学仿真方  
法。

#### **考核指标：**

(1) 传动系统齿轮啮合时关键部位应力，计算和实验  
误差小于 10%；

(2) 传动系统齿轮动力学响应，计算和实验误差小于  
30%；

(3) 传动系统的振动加速度分布趋势，计算和实验误  
差小于 30%；

(4) 传动系统润滑系统油路上关键点的油压，计算和  
实验相似性误差小于 10%。

**研究周期：**不超过 24 个月。

**发布方式：**公开发布

## **5. 航空发动机机匣安装边密封特性分析及试验研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY005

**项目背景：**航空发动机机匣间采用螺栓连接结构形式，在保证刚度、强度的同时，密封性是其重要的设计指标。国内机匣安装边设计目前仍然参照国外早期的设计准则，设计水平落后，设计体系陈旧，已经不能适应现代航空发动机技术发展的需求。国内对机匣安装边气体泄漏的影响因素、气体泄漏量测量与评估等的研究较少，更没有形成自主的机匣安装边密封设计准则，严重制约了我国在研发发动机性能的进一步提升，亟待开展研究，攻克技术难题。

**项目目标：**针对我国航空发动机机匣螺栓连接结构设计与分析需求，开展机匣安装边密封特性建模研究，分析结构几何参数、装配参数、机匣载荷与其密封特性的关系，通过与接触面压力、螺栓预紧力以及泄漏量测量的对比验证，形成机匣安装边密封特性分析与结构设计方法，为现代航空发动机机匣结构设计提供技术支撑。

### **研究内容：**

(1) 机匣安装边结构几何参数、螺栓连接装配参数、机匣载荷等与安装边密封特性的关系研究；

(2) 机匣安装边表面接触应力、螺栓预紧力、安装边气体泄露量测量与分析技术研究；

(3) 机匣安装边密封特性优化设计方法研究；

(4) 发动机典型工况下机匣安装边气体泄漏量评估方法研究。

**预期成果：**

(1) 建立机匣安装边密封特性与其几何参数、装配参数及机匣载荷的关系模型；

(2) 建立机匣安装边接触面压力及螺栓预紧力测量方法，获取安装边接触面压力分布，实现螺栓拧紧方法的优化；

(3) 建立机匣安装边密封特性优化设计方法；

(4) 建立发动机机匣安装边气体泄漏量评估方法。

**考核指标：**

(1) 安装边密封特性与其几何参数、装配参数及机匣载荷的模型计算误差不大于 10%；

(2) 采用优化后螺栓拧紧方法，预紧力分散度不大于 3%；

(3) 采用机匣安装边密封特性优化设计方法降低泄漏量不低于 20%。

**研究周期：** 不超过 24 个月

**发布方式：** 公开发布

## **6. 航空发动机陶瓷基复材构件智能检测方法与缺陷形成演化规律研究**

**项目编号：** HFZL2019CXY006

**项目背景：** SiC<sub>f</sub>/SiC 是新一代航空发动机及燃气轮机的核心材料之一，但其非均质、多结构单元、高缺陷容限能力的特点对无损检测方法提出了严峻挑战。传统人工检测无法

精确剥离复合材料内部成千上万的“多孔”特征与“危害”缺陷，检测效率低、成本高、漏检风险大；同时陶瓷基复合材料构件内部孔洞、外部结构、制备工艺及服役环境的复杂性，都将导致传统检测方法“失效”，亟需研究一种高精度、低漏检率的智能检测方法并获得缺陷的形成演化规律。

**项目目标：**针对  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复杂构件检测精度低、效率低和漏检率高的问题，开展缺陷精确识别和快速评价研究，基于缺陷性质判据与人工智能方法，分析典型构件缺陷的统计信息和缺陷力学性能对应关系，剥离本征孔隙与危害缺陷，获得缺陷的形成演化规律，形成缺陷的智能检测方法，为质量控制、性能优化及制备工艺优化提供支撑。

**研究内容：**

- (1)  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  典型构件设计制备与缺陷识别方法研究；
- (2)  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  典型构件缺陷快速智能评价方法研究；
- (3)  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  典型构件缺陷形成与环境演化在线监测方法研究。

**预期成果：**

- (1) 建立航空发动机  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  典型构件缺陷的智能检测方法；
- (2) 获得航空发动机  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  典型构件缺陷的形成演化规律；
- (3) 建立缺陷样本数据库；
- (4) 缺陷自动识别与评价软件。

**考核指标：**



(1) SiC<sub>f</sub>/SiC 典型构件检测效率提高至少 3 倍；

(2) 点缺陷、线缺陷智能识别精度达到 300 μm 及以上，面缺陷智能识别精度达到 4mm<sup>2</sup>。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

## 7. 高温合金叶片榫齿磨削烧伤和裂纹产生机理与工艺优化监控研究

**项目编号：**HFZL2019CXY007

**项目背景：**高温合金由于具有高温热稳定性、热强性、低热导率等特点，是典型的难加工材料。工程上对于高温合金叶片榫齿加工基本采用深切削加工的方法。加工过程中如果过程及参数控制不到位，容易引起叶片磨削烧伤甚至出现裂纹。目前，对于高温合金材料的磨削烧伤和裂纹方面的研究基本处于学术阶段，工程运用较少，因此，有必要结合实际工程运用现状，从磨削加工工艺稳定性、加工工艺参数的适用性和表面应力残留等方面开展系统性的研究工作，掌握叶片磨削烧伤及裂纹产生机理，寻找预防和解决措施。

**项目目标：**针对高温合金叶片榫齿深切削加工烧伤及裂纹问题，开展磨削温度、热应力、残余应力随工艺参数的变化规律研究，探索磨削烧伤、表面残余应力与裂纹的产生机理，形成对叶片榫齿磨削温度、热应力、残余应力以及裂纹产生的分析和预测能力。

**研究内容：**

(1) 开展高温合金叶片磨削温度与磨削传热分析、磨

削温度测量、表面残余应力、显微硬度、微观组织结构变化分析，探索磨削温度随工艺参数的变化规律和磨削烧伤产生机制，研究不同磨削参数下磨削烧伤产生的临界条件和磨削烧伤检测评价方法；

(2) 研究不同工艺参数下的磨削烧伤临界功率，开发具有磨削过程在线监控和烧伤预警能力的监控系统。

**预期成果：**

(1) 磨削烧伤/表面残余应力与裂纹产生规律及机理；

(2) 不同磨削状态的叶片表层微观组织结构及硬度变化规律；

(3) 高温合金叶片榫齿磨削烧伤检测评价方法及典型图谱集；

(4) 高温合金叶片榫齿磨削工艺监控系统。

**考核指标：**

(1) 给出铸造高温合金叶片至少 3 种磨削工艺控制参数要求；

(2) 采用优化的磨削参数和工艺条件，叶片磨削后表面无烧伤和裂纹，表面残余应力 $\leq 400\text{MPa}$ （注： $\leq$ 高温合金材料屈服强度的 50%）。

**研究周期：**不超过 36 个月。

**发布方式：**公开发布

**8. 基于铸造叶片射线检测数字图像大数据的缺陷自动识别系统**

**项目编号：**HFZL2019CXY008

**项目背景：**涡轮叶片是航空发动机核心部件，随着飞机性能的不不断提升，对其核心部件涡轮叶片的可靠性要求也在不断提升，从传统的胶片检测到计算机断层扫描，对射线检测的客观性、准确性和可靠性要求越来越高。对传统射线照相工艺而言，由于采用人工方式对图像进行评定，存在经验差异、眼睛疲劳、标准理解等人为因素影响，该影响与发动机高可靠性要求之间的矛盾日益突出。迫切需要开展基于铸造叶片射线检测图像大数据的缺陷自动识别系统研究，通过大数据存储平台实现存储和管理海量叶片射线检测图像，以存储的图像信息为基础，攻克各种深度学习算法构建、优化模型等技术难题，构建高效的智能铸造叶片缺陷识别模型，实现缺陷的自动识别，提高射线检测质量和检测效率，保证涡轮叶片检测的可靠性。

**项目目标：**针对叶片结构的复杂性、缺陷形貌的多样性、缺陷自动化识别发展较为困难等问题，开展铸造叶片射线检测图像大数据的缺陷自动识别系统研究，基于发动机叶片的射线检测图像特征和海量样本图像数据，采用人工智能、专家系统等关键技术解决“真伪”缺陷识别问题，建立基于铸造叶片射线检测图像大数据的缺陷自动识别系统，有效克服由于经验差异、人工评估眼睛疲劳、标准理解等人为因素影响，使射线检测工作目标标准化和智能化，为空军装备建设提供技术支持。

### **研究内容：**

- (1) 开展涡轮叶片常见缺陷分析研究；

(2) 涡轮叶片图像分割方法研究；  
(3) 基于多阈值分割缺陷提取技术研究；  
(4) 胶片图像数字化转化研究，收集缺陷图像大数据统计；

- (5) 涡轮叶片图像的预处理研究；  
(6) 涡轮叶片图像缺陷的提取技术研究；  
(7) 基于模糊推理方法进行的缺陷分类研究；  
(8) 各种算法对细节尺寸的影响分析；  
(9) 涡轮叶片验收标准分析和检测可靠性评价。

#### **预期成果：**

- (1) 缺陷自动识别软件和算法一套；  
(2) 缺陷自动识别软件操作规范和企业标准一份；  
(3) 各类缺陷可识别率、缺陷尺寸测量差异对比性研究报告一份；  
(4) 铸造叶片数字射线检测缺陷自动识别技术研究报告一份；  
(5) 涡轮叶片验收标准分析和检测可靠性评价报告。

#### **考核指标：**

- (1) 检测准确率达到 98%，危害性缺陷漏检率 0%，检测效率提高 20%；  
(2) 间接数字化自动评定系统：灰度 15000-60000，灵敏度优于 2%；  
(3) 直接数字化评定系统：灰度 15000-60000，灵敏度优于 2%，空间分辨率优于 4LP/mm，密度分辨率优于 1%。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

## **9. 基于微小容腔的压气机出口动态总压智能传感方法研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY009

**项目背景：**压气机是传统航空燃气涡轮发动机、未来先进多电/全电发动机的核心压缩部件，承担着产生大部分推力的任务。压气机出口总压是衡量其做功能力和判断发动机喘振的重要参数。目前在役发动机压气机出口压力测量受到压力敏感器件耐温限制，通过导气管引出检测。压力动态特性经导气管后衰减严重、气体温度降低，实际测量为低温气体静压，无法为发动机控制设计和喘振等安全与健康监测中提供压气机出口气流的高精度动态总压量测信号。因而，急需开展发动机总压的先进传感方法研究。

**项目目标：**针对发动机压气机出口动态压力测量难的问题，开展微小容腔总压衰减机理和温度总压耦合机理分析、动态总压模型建模、动态总压传感器设计等研究，形成基于微小容腔的发动机总压智能传感方法，研制基于智能传感方法的总压传感器原理样机，通过实验验证智能传感方法有效性，为发动机高温环境下动态总压测量提供一种可行途径，为发动机控制、喘振检测和故障诊断提供高精度动态总压信号。

**研究内容：**

(1) 研究短测管型微小容腔内总压衰减机理，建立压

气机出口流场和短测管型微小容腔流场简化模型、基于容积效应的微小容腔总压模型，基于上述两个模型构建微小容腔内总压衰减模型；

(2) 研究微小容腔中温度与压力的耦合机制，建立短测管传热模型、温度对压力敏感元件输出特性的稳态、动态校正模型；

(3) 基于总压衰减模型建立从压力量测数据到流场测点处总压的总压恢复模型，由总压恢复模型和温度对压力的稳态、动态校正模型，形成基于智能补偿算法的发动机总压传感方法；

(4) 采用硅压阻式 MEMS 压力传感器、皮托管型短测管和智能压力信号处理单元，设计并试制短测管型硅压阻式智能 MEMS 压力传感器，设计压力信号智能处理软件和压力信号上位机软件；

(5) 构建压气机出口流场模拟试验台，设计动态总压测试实验系统，设计并开展压气机出口动态总压测试实验，基于测试数据修正动态总压恢复模型、温度对压力的稳态、动态校正模型。

#### **预期成果：**

(1) 基于微小容腔的动态总压衰减机理和动态总压恢复模型；

(2) 基于微小容腔的温度与压力的耦合作用机制和动态压力的温度校正模型；

(3) 基于机理模型和试验数据的发动机动态总压智能

传感方法；

(4) 基于智能传感方法的总压传感器原理样机。

**考核指标：**

(1) 在 $-55^{\circ}\text{C}\sim 175^{\circ}\text{C}$ 介质温度范围、 $-55^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 环境温度范围里，对于稳态压力信号测量综合误差（含非线性、重复性、迟滞）不劣于 $\pm 0.5\%FS$ （ $FS=2.5\text{MPa}$ ）；

(2)  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下，包含短测管在内的总压传感器，脉动压力信号测量幅值误差不劣于 $\pm 2\%FS$ （ $FS=1.0\text{MPa}$ ）、相位滞后不超过  $4\text{ms}$ ；频率测量误差不劣于 $\pm 0.1\%FS$ （ $FS=100\text{Hz}$ ）；

(3) 智能总压传感器原理样机总重量不超过  $200\text{g}$ （不含短测管）。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

## 10. 叶片生产车间数字孪生监控平台研究与开发

**项目编号：**HFZL2019CXY010

**项目背景：**航空制造企业是典型的离散型制造企业，企业引入了生产执行系统（MES），但在生产决策方面的应用还不够深入并且对于制造系统未来中长期的计划和排产，受确定数据的限制，不能充分将各种可能的风险纳入考虑，从而影响了排产结果对生产实际的指导作用，亟需开展研究，攻克技术难题。

**项目目标：**针对目前企业叶片生产计划和排产需求，结合智能制造发展趋势，开展数字孪生监控技术研究，以典型

的生产部门为对象，借助仿真技术，开发一个叶片生产车间数字孪生监控系统，模拟生产过程中可能出现的各种风险，验证或评价排产结果的可行性，提前发现可能存在的问题，对企业的生产具有重大意义。

### **研究内容：**

(1) 叶片制造部门的排产/仿真需求分析。对叶片生产组织模式进行分析，重点研究其排产的约束条件，优化目标和核心算法，梳理其生产过程中经常与可能面临的各类波动和突发情况，确定数字孪生监控系统的总体需求；

(2) 数字孪生平台选择与模型架构设计。针对上述总体需求，选择相应的制造过程仿真软件，并结合软件自身的功能和特点，设计仿真模型的总体架构；

(3) 数字孪生系统开发。以上述总体架构为指导，开发仿真模型中的各个模块，其中包括排产模块、调度模块、主设备模块、辅助设备模块以及信息更新模块等。

### **预期成果：**

叶片生产车间数字孪生监控软件。

### **考核指标：**

- (1) 100%生产主设备纳入数字孪生监控软件；
- (2) 80%以上波动和突发情况纳入数字孪生监控软件；
- (3) 关键订单按期执行率 80%以上；
- (4) 动态调度响应时间不超过 2min。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布



## （二）新型/耐磨材料与先进评估技术

### 11. 气冷叶片高温热障涂层隔热效果表征技术及评价方法研究

**项目编号：**HFZL2019CXY011

**项目背景：**目前，隔热效果的测定主要采用对预埋铠装热电偶的圆管试件进行“外加热、内冷却”方式进行。测试手段方面，铠装外壳的导热具有一定延迟性，导致测试数据具有延迟和不确定性。测试环境方面，与叶片服役状态相差较大，难以表征涂层隔热效果。测试内容方面，只测短时的隔热性能，未考虑服役时间、不同涂层厚度对隔热效果的影响。以上因素造成在涡轮气冷叶片设计中，评估不同工况下涂层的隔热效果十分困难，这一工程问题亟需解决。

**项目目标：**针对叶片热障涂层隔热效果测试评价不够完善和准确的问题，开展叶片实际服役状态下的热障涂层隔热效果研究，基于超薄涂层热电偶、薄膜热电偶技术和研究所的冷效试验器，形成近服役状态叶片热障涂层隔热效果测试技术，完善和改进热障涂层隔热效果测试方法，研究不同厚度、不同结构的热障涂层在不同实际工况下隔热效果的规律，建立涡轮叶片在实际工况下的热障涂层隔热效果表征技术评价方法，结合模拟实际工况的冷却效果试验，验证评价方法的工程适用性。

**研究内容：**

（1）高精度薄膜热电偶在热障涂层试验件上的应用研究；

(2) 热障涂层在不同厚度、结构、不同服役时间下的隔热效果试验研究；

(3) 带有涂层的涡轮叶片隔热效果仿真模拟研究；

(4) 模拟实际工况的冷却效果试验对比验证与评价。

#### **预期成果：**

(1) 研制出丝径 $\leq 0.1\text{mm}$ 、绝缘涂层厚度 $\leq 50\ \mu\text{m}$ 的超薄铠装热电偶，或厚度 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 的薄膜热电偶；

(2) 获得不同服役时间、不同涂层厚度、不同涂层结构隔热效果规律和试验曲线；

(3) 建立涡轮叶片在实际工况下的热障涂层隔热效果表征技术和评价方法；

(4) 研制出热障涂层隔热效果测试装置。

#### **考核指标：**

(1) 超薄铠装热电偶或薄膜热电偶的动态响应时间 $\leq 100\text{ms}$ 量级，在 $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 范围内精度 $\leq 1\%$ ；

(2) 不同厚度（ $50\ \mu\text{m}$ ， $100\ \mu\text{m}$ ， $200\ \mu\text{m}$ ， $500\ \mu\text{m}$ ）热障涂层在不同时间、不同温度、不同冷气条件下的实测数据不少于 1000 点，形成测试报告；

(3) 不同结构（制备态，服役态）热障涂层在不同时间、不同温度、不同冷气条件下的实测数据不少于 1000 点，形成测试报告；

(4) 隔热效果测试装置最高温升不低于  $1200^\circ\text{C}$ ，温度均匀性不大于  $5^\circ\text{C}$ 。

**研究周期：**不超过 36 个月

发布方式：公开发布

## 12. 航空发动机燃油系统复杂高压壳体用高强耐热铸造铝合金自主研发

项目编号：HFZL2019CXY012

**项目背景：**燃油控制系统是航空发动机的重要组成部分，随着未来战机对航空发动机在高推重比、高速、高可靠性等方面的需求，燃油控制系统的研制也面临高压（22MPa）、高温（ $>200^{\circ}\text{C}$ ）、高可靠性、轻量化、长寿命等技术难题。复杂高压油泵壳体作为燃油控制系统的核心零部件，现有铸造铝合金材料难以满足高温高压的技术要求，亟需开展高强度耐热铸造铝合金材料的自主研发，突破西方国家对高压壳体用铝合金材料及成型技术的封锁，保障国防工业健康发展。

**项目目标：**针对现有燃油控制系统复杂高压壳体用铝合金在高温环境下强度较低，以及材料本身强度低无法满足高压工况下的轻量化研制等问题，开展高强度耐热铸造铝合金材料的自主研发，采用先进的材料设计和凝固新技术，形成新型高强度耐热铸造铝合金及复杂壳体“近净”铸造成型新技术，保障新型发动机的研制，具有重要的战略意义。

### 研究内容：

（1）高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸造合金的成分优化设计及制备工艺研发；

（2）高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸造合金的熔体和铸造性能综合调控技术研究；

（3）高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸

造合金的复杂高压铝合金壳体类构件的“近净”铸造技术研发。

**预期成果：**

(1) 高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸造合金的优化成分范围及其熔制工艺规范；

(2) 高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸造合金的熔体和铸造性能综合调控技术规范；

(3) 高强耐高温新型纳米颗粒增强 Al-Cu/Al-Si 基铸造合金的复杂高压铝合金壳体类构件的“近净”铸造工艺规范及五件样件。

**考核指标：**

(1) 新型 Al-Cu 基铸造合金的拉伸力学性能指标：抗拉强度 > 400MPa；屈服强度 > 350MPa；延伸率 > 4%；合金 300℃ 瞬时高温强度 > 180MPa；250℃, 100h 高温持久强度 > 80Mpa；

(2) 新型 Al-Si 基铸造合金的拉伸力学性能指标：抗拉强度 > 370Mpa；屈服强度 > 320Mpa；延伸率 > 3%；合金 200℃ 瞬时高温强度 > 260MPa；

(3) 高压铝合金壳体内部油路最大可耐受 35MPa 燃油压力不渗漏；铸件最小成型壁厚 1.0mm；铸件尺寸精度 CT6 级；铸件内部质量达到 I-HB963。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

**13. 多电发动机用高性能高温稀土永磁材料**

**项目编号：HFZL2019CXY013**

**项目背景：**多电/全电飞机发动机是在传统的航空燃气涡轮发动机上，采用了大功率内置式整体起动/发电机和磁浮轴承，用全电化传动附件取代机械液压式传动，采用分布式控制系统，从而大大提高发动机的推重比。高温磁浮轴承是多电/全电发动机的关键部件，其核心材料之一是使用温度达到 550℃的高温磁性材料。为了适应发动机内部有限的结构空间和高使用环境温度（大于 500℃），需要高功率密度且耐高温稀土永磁材料。目前国内现有永磁材料难以满足要求，因此亟需开展研究，攻克材料技术难题。

**项目目标：**针对多电/全电发动机的高温磁浮轴承需求，开展高温永磁材料制备技术研究，基于稀土永磁材料的成分设计和工艺控制，研制出满足要求的高性能高温稀土永磁材料，制备出大块磁体及应用元器件，为多电/全电发动机研制提供材料支撑。

**研究内容：**

（1）高性能高温稀土永磁材料成分设计、元素交互作用及内禀磁性研究；

（2）高温稀土永磁材料相组织演变规律、微观结构与工艺控制关联性研究；

（3）高温永磁材料热、力、磁及物理性能表征及热退磁服役特征研究；

（4）制备出高性能高温稀土永磁材料及高温磁浮轴承需求样件，在原理样机上开展应用验证。

**预期成果：**

- (1) 高温永磁材料工艺规范；
- (2) 高温永磁材料样品；
- (3) 高温永磁材料轴承零件样件；
- (4) 高温永磁材料测试报告；
- (5) 高温永磁材料研究报告。

**考核指标：**

- (1) 高温永磁材料毛坯尺寸达到  $50\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ；
- (2) 常温磁性能：剩磁 ( $B_r$ )  $\geq 0.9\text{T}$ ，内禀矫顽力 ( $H_{c_j}$ )  $\geq 2.0\text{T}$ ，最大磁能积 ( $(BH)_{\max}$ )  $\geq 160\text{kJ/m}^3$ ；
- (3)  $550^\circ\text{C}$  磁性能：剩磁  $B_r \geq 0.6\text{T}$ ，内禀矫顽力  $H_{c_j} \geq 0.6\text{T}$ ，最大磁能积 ( $(BH)_{\max}$ )  $\geq 80\text{kJ/m}^3$ 。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

#### **14. 高强单晶高温合金多尺度力学模拟计算**

**项目编号：**HFZL2019CXY014

**项目背景：**单晶高温合金是按预定方向生长而制备的单一柱状晶，由于完全消除了晶界而具有优异的综合性能，可在高温、高压、高转速、高应力、氧化腐蚀等极其苛刻条件下长期工作，是先进航空发动机涡轮叶片首选材料。先进单晶高温合金含 10 余种合金元素，存在固溶强化、沉淀强化和界面强化等多种强化机制，对合金高温力学性能影响复杂，亟待开展高强单晶高温合金多尺度力学计算研究，建立多尺度单晶高温合金力学模型。

**项目目标：**针对具有优异高温强度的先进单晶高温合金

研制需求，开展高强单晶高温合金多尺度模拟计算研究。基于已有实验测试及表征分析结果，采用第一性原理、分子动力学、蒙特卡洛方法、相场模拟等跨尺度模拟计算方法与技术，在多个时间和多个空间尺度上对单晶高温合金的微观结构(点缺陷、位错、相等)给予表征，构建微观组织结构与力学性能之间的关联，揭示在外场（力场、温度场）作用下微观结构组织演化对单晶高温合金高温力学性能的影响规律。

### **研究内容：**

(1) 基于机器学习的方法对多组元镍基合金原子间相互作用力场开发；

(2) 原子尺度合金元素对位错动力学行为影响规律研究；

(3) 微纳米尺度外场（力场、温度场）作用下相演化研究；

(4) 高强单晶高温合金多尺度力学模型构建。

### **预期成果：**

(1) 开发出能较为准确地描述平衡相图、弹性常数、层错能等的多元镍基高温合金原子相互作用力场；

(2) 定量表征合金元素对层错能、位错临界启动应力、位错滑动拖拽系数等参量的影响规律；

(3) 揭示出相在力场、温度场中的变化规律；

(4) 构建基于位错理论可定量或半定量分析缺陷类型及其浓度对力学性能影响的力学模型。

### **考核指标：**

(1) 开发出准确描述镍基高温合金体系的原子相互作用力场，合金组元数不少于 4；

(2) 获得体系势函数，其描述的平衡相图、弹性常数、空位形成能等数据准确率高于 80%；

(3) 构建合金元素含量、温度等因素对层错能影响的模型，可定量描述层错能、位错临界启动应力、位错滑动拖拽系数等力学参量，计算的层错能等数据准确率高于 80%；

(4) 构建基于位错理论的力学模型，能定量描述缺陷类型及浓度对高温单晶合金力学行为的影响。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

15. 航空发动机涡轮叶片环境障涂层 (EBC) 失效机理及安全评定方法研究

**项目编号：**HFZL2019CXY015

**项目背景：**航空发动机涡轮所处燃气环境中不仅包含 Na、Cl、S 等各种熔盐腐蚀介质，还有水蒸汽，给涡轮叶片寿命带来显著影响，尤其对陶瓷基复合材料叶片环境障涂层 (EBC) 的影响十分明显，会与  $\text{SiO}_2$  保护层发生反应生成挥发性气态物质，使其丧失保护基体的功能，从而导致陶瓷基复合材料热端部件性能急剧恶化。高温水氧条件下的环境障涂层失效是航空发动机陶瓷基复合材料涡轮叶片的主要破坏模式。

**项目目标：**针对当前研究主要没有完全考虑水氧和热力化耦合的影响，导致失效机理和强度评估模型与方法存在不足的问题，开展高温水氧腐蚀条件下的环境障涂层 (EBC) 热



力化学耦合理论、层级异质材料多裂纹任意路径扩展算法、高温水氧腐蚀条件下环境障涂层(EBC)微结构演化与宏观力学性能间的定量关联等研究,清晰高温水氧腐蚀条件下的环境障涂层(EBC)损伤机理,发展基于失效特征参量定量表征的环境障涂层(EBC)强度评估方法,建立基于物理机制的环境障涂层(EBC)损伤强度评估模型。

### **研究内容:**

(1) 高温水氧及热力化耦合条件下环境障涂层(EBC)的应力演化机制研究,包括热生长氧化物(TGO)热力化耦合生长机制、全寿命周期涂层系统内应力演变规律等;

(2) 高温水氧及热力化耦合条件下环境障涂层(EBC)失效机理研究,包括水氧腐蚀环境下稀土双硅酸盐微结构演化、涂层微观结构演变及其与性能的定量关联、热生长氧化物(TGO)裂纹萌生与扩展规律、涂层失效状态参量表征等;

(3) 复杂服役条件下环境障涂层(EBC)的强度预测模型研究,包括高温水氧条件下涂层试样的循环水氧腐蚀试验研究、环境障涂层(EBC)的时间相关损伤机理等研究;

(4) 带环境障涂层(EBC)陶瓷基复合材料涡轮叶片强度评定方法研究,建立带环境障涂层(EBC)涡轮叶片损伤部位、损伤面积对涡轮叶片温度载荷的影响,形成带环境障涂层(EBC)陶瓷基复合材料涡轮叶片强度评定方法。

### **预期成果:**

(1) 高温水氧及热力化耦合条件下环境障涂层(EBC)失效机理;

(2) 环境障涂层(EBC)的强度预测模型;

(3) 带环境障涂层(EBC)陶瓷基复合材料涡轮叶片强度评定方法。

**考核指标:**

(1) 环境障涂层(EBC)热力化耦合数值模拟程序,预测结果与试验结果误差不小于 20%;

(2) 环境障涂层(EBC)微结构演化及性能数据库,其中微观组织典型图谱不少于 500 张,包含服役时间、性能退化等因素影响;

(3) 高温水氧环境下环境障涂层(EBC)强度预测模型,含涂层叶身部位寿命预测与试验结果在 3 倍误差分散带内。

**研究周期:** 不超过 36 个月

**发布方式:** 公开发布

**16. 高性能 Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料的制备技术和摩擦学特性的技术研究**

**项目编号:** HFZL2019CXY016

**项目背景:** 燃油调节器属于辅助动力装置中的燃油控制系统。它依照辅助动力装置中电子控制器的指令,按照预定的控制规律调节供往辅助动力装置燃烧室的增压计量燃油,其中,轴承是燃油调节器的关键零件,轴承的力学性能、高耐磨性、低摩擦系数和自润滑性等直接影响燃油调节器的使用寿命。随着国内新型航空发动机的持续发展,对该燃油调节器有着迫切需求。目前,受调节器运转速度高、压力大的影响,滑动轴承采用铸造锡青铜材料表面涂覆二硫化钼涂层

的结构。从使用情况来看，容易出现磨损、冲刷、气蚀等问题，影响着该产品的可靠性与使用寿命。因此，研制在燃油介质中具有高耐磨性能、高 PV 值的自润滑铜基复合材料，对满足型号任务需求具有重要意义。

**项目目标：**针对滑动轴承采用现有结构（铸造锡青铜基体加表面涂覆涂层）在使用时宜出现涂层脱落、磨损异常等可靠性不稳定的问题，通过采用先进的粉末冶金工艺制备高性能 Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料并由其加工成轴承使用，为新型航空发动机用燃油调节器提供高强度、高耐磨、低摩擦及与环境介质相容的新型轴承材料。

**研究内容：**

(1) Cu-Ni-Sn 合金中 Ni、Sn 含量的确定和制备工艺的优化；

(2) 研究 Fe、Al、Si、Ti 等微量强化元素对 Cu-Ni-Sn 合金的微观相组织演变以及力学性能、硬度、耐腐蚀性能的影响；

(3) Cu-Ni-Sn 合金调幅工艺的研究；

(4) 石墨、氧化物、氟化物等固体润滑剂的选择、复合化及与环境介质相容性的研究；

(5) Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料的摩擦学特性的研究。

**预期成果：**

(1) Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料制备工艺规范（含材料成分范围）；

(2) Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料及部件企业标准;

(3) Cu-Ni-Sn 合金基耐磨自润滑复合材料制备的典型产品。

**考核指标:**

(1) 密度:  $\rho \leq 8.20\text{g/cm}^3$ ;

(2) 布氏硬度:  $\text{HB} \geq 75$ ;

(3) 屈服强度: (室温)  $\sigma_{0.2} > 135\text{MPa}$ ;

(4) 径向压溃强度: (室温)  $> 160\text{MPa}$ ;

(5) 摩擦系数: (室温干摩擦)  $< 0.20$ ;

(6) 磨损率: (室温干摩擦)  $< 5.0 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。

**研究周期:** 不超过 24 个月

**发布方式:** 公开发布

**17. 指尖片及密封座表面高温耐磨自润滑涂层研制**

**项目编号:** HFZL2019CXY017

**项目背景:** 指尖密封是一种应用于发动机空气流路的先进的密封技术,对降低发动机燃料消耗率、飞行成本,提高推重比和发动机部件寿命等方面具有显著作用。目前指尖密封的使用寿命不能完全满足发动机的要求,其中影响指尖密封寿命的最关键因素是高温下指尖片之间和指尖片与密封座之间的高摩擦和粘着导致的指尖梁径向随动性滞后,以及指尖片和密封座的磨损严重。因此,迫切需要解决指尖片间及指尖片与密封座间的高温润滑和抗磨损问题,以提高指尖密封装置在航空发动机上的服役寿命。

**项目目标：**针对航空发动机对指尖密封高性能和长寿命的需求，开展指尖密封片及密封座表面高温耐磨自润滑涂层的成分设计、制备工艺、性能评价、台架实验及性能改进等研究，突破涂层成分优化、结构可控设计、制备工艺稳定性及综合性能评价等关键技术，研制出指尖密封片及密封座表面抗高温自润滑耐磨涂层，形成涂层的组分设计、制备工艺、试验方法等技术规范。

**研究内容：**

(1) 适用于指尖密封片及密封座的高温耐磨自润滑涂层的组配方案研究；

(2) 指尖密封片及密封座的高温耐磨自润滑涂层制备工艺研究；

(3) 涂层抗氧化和摩擦学性能研究；

(4) 带涂层指尖片及密封座在模拟发动机工作条件下的试验验证。

**预期成果：**

(1) 适用于指尖密封片及密封座的高温耐磨自润滑涂层材料规范；

(2) 适用于指尖密封片及密封座的高温耐磨自润滑涂层制备工艺规范；

(3) 适用于指尖密封片及密封座的高温耐磨自润滑涂层综合性能评价方法。

**考核指标：**

(1) 涂层使用温度：15℃~750℃；

(2) 涂层摩擦系数: 15°C~550°C时, 摩擦系数小于 0.2, 550°C~750°C时, 摩擦系数小于 0.1;

(3) 涂层对指尖片屈服强度的影响 $\leq$ 10%;

(4) 涂层抗热震性能: 700°C保温 10min, 空冷至室温, 通过 300 次循环, 剥落面积 $\leq$ 涂层总面积的 5%;

(5) 采用模拟件, 在 750°C温度下涂层使用寿命 $\geq$ 1000 小时。

**研究周期:** 不超过 24 个月

**发布方式:** 公开发布

## 18. 火焰喷涂 Y B C-2 棒材转化为火焰喷涂 Ni/BN 粉末工艺研究

**项目编号:** HFZL2019CXY018

**项目背景:** 发动机后机匣采用火焰喷涂 GH3030 钢丝底层和 Y B C-2 棒材面层工艺方法制备的高温封严涂层, 该工艺技术引进于俄罗斯, 距今已有 20 年以上, 工艺较为落后。且使用的火焰喷涂设备也为修理建线时引进的旧设备, 使用时间在 30 年以上, 设备已经老化严重, 且无备件供应。后机匣零件喷涂的 Y B C-2 涂层自 2018 年以来质量出现波动, 多台发动机在工厂试车或服役过程中出现大面积涂层脱落现象, 这与落后的喷涂工艺及喷涂设备老旧、状态不稳定有较大关系。

**项目目标:** 针对后机匣零件喷涂的 Y B C-2 涂层出现大面积涂层脱落问题, 开展火焰喷涂 Y B C-2 棒材转化为火焰喷涂 Ni/BN 粉末工艺研究, 主要针对 Y B C-2 粉末成份、涂

层性能等数据进行分析，进行粉末态材料的制备，采用目前较为流行的火焰喷涂粉末工艺制备相应涂层，达到或超越原有涂层性能，满足使用要求。

### **研究内容：**

(1) 分析 Y B C-2 棒材成份，研制出相同成份并适用于火焰喷涂工艺的粉末材料；

(2) 针对所制备的粉末材料，进行火焰喷涂粉末工艺试验，在试验中根据数据对粉末进行调整与优化，最终确定粉末要求及喷涂参数；

(3) 对所制备的涂层进行相应涂层性能测试，确定性能测试种类及指标；

(4) 喷涂试验件，并进行试车考核，验证涂层在零件上的符合性。

### **预期成果：**

确定 Ni/BN 粉末的材料标准。

### **考核指标：**

(1) Ni/BN 粉末的成分与原 Y B C-2 棒材成份相似，其中 BN 含量约为 10.5%~12.5%；Ni/BN 粉末的粒度范围应符合火焰喷涂的要求；

(2) 火焰喷涂 Ni/BN 粉末涂层的性能达到或超过原涂层性能指标，即：硬度 HB 8~10，热震性能  $700 \pm 10^\circ\text{C}$ ，反复 15 次，无剥落，无分层。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

### （三）高效先进制造工艺技术

#### 19. 激光选区熔化成型 TC4 合金轴承座组织、缺陷与性能影响关系研究

**项目编号：**HFZL2019CXY019

**项目背景：**发动机轴承座采用集成化设计，带有复杂内部进油，同时集成应急油路，结构精细且复杂程度高，采用常规工艺方法，零件成型难度大，且冶金质量及尺寸精度不满足设计要求。激光选区熔化成型技术，适用于复杂精密构件的直接制造，是解决该零件成型的理想工艺方法。但该技术当前属于新工艺技术，缺少对组织、缺陷的研究数据及技术标准，影响制件的质量判定及检验，因此有必要开展相应的研究工作，积累典型数据，为应用于发动机之中奠定基础。

**项目目标：**针对涡轴发动机激光选区熔化成型 TC4 轴承座的应用需求，开展激光选区熔化成型组织、缺陷与性能影响关系研究。通过材料和制件的组织形态、缺陷形式、力学性能及检测技术研究，形成组织、缺陷图谱及相关检验标准，为激光选区熔化成型 TC4 轴承座的长寿命使用奠定技术基础。

#### **研究内容：**

- （1）激光选区熔化成形 TC4 合金组织图谱研究；
- （2）激光选区熔化成形 TC4 合金缺陷图谱研究；
- （3）激光选区熔化成形 TC4 合金组织、缺陷对性能影响规律研究；
- （4）激光选区熔化成形 TC4 进气轴承座组织、缺陷分布规律研究；



(5) 激光选区熔化成形 TC4 进气轴承座缺陷检测技术研究；

(6) 激光选区熔化成形 TC4 进气轴承座力学性能研究。

**预期成果：**

(1) 形成组织图谱；

(2) 形成缺陷图谱；

(3) 建立“工艺-组织-缺陷-力学性能”的对应关系；

(4) 建立零件金相检验标准；

(5) 建立零件无损检测方法及验收标准。

**考核指标：**

(1) 形成不少于 20 张的组织 and 缺陷图谱（包含可接受图谱和不可接受图谱）；

(2) 建立直径不大于 1mm 的最小缺陷的检测方法和验收标准。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

## **20. 薄壁件孔边电解质等离子抛光技术**

**项目编号：**HFZL2019CXY020

**项目背景：**航空发动机混合器、隔热屏等筒形薄壁件通常有大量的孔，目前工艺为机加、电火花或激光方式打孔结合钳工倒圆抛修，存在技术经验要求高、毛刺去除效果不佳、质量一致性差等问题，出现过多起孔边抛修部位开裂的故障。为解决上述问题，迫切需要一种操作简洁，质量可靠的新型加工工艺技术及方法。

**项目目标：**通过研究验证采用“电解质等离子抛光技术”解决薄壁类零件孔边毛刺、重熔层去除难度大，孔边倒圆质量不易控制等问题的可行性。在此基础上通过开展电解质研制、参数调整以及工装设计等工作，解决多孔筒形薄壁件孔边抛光效率低、质量一致性差等问题。

**研究内容：**

- (1) 薄壁件常用材料抛光的电解质配方研制；
- (2) 薄壁件孔边电解抛光参数优化研究；
- (3) 筒形薄壁件动态分段抛光工装研制；
- (4) 薄壁件孔边重熔层定量控制去除研究。

**预期成果：**

- (1) 含电解质配方、抛光参数及专用工装等内容的筒形薄壁件孔边电解质等离子抛光技术方法及工艺方案；
- (2) 筒形薄壁件专用电解质等离子抛光设备。

**考核指标：**

- (1) 抛光试验件孔边无毛刺，筒壁平面粗糙度 $\leq Ra0.2$ ；
- (2) 最大抛光去除量不低于 $0.3\mu m/min$ 。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

## **21. 航空发动机转子系统螺栓连接工艺稳定性研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY021

**项目背景：**航空发动机转子结构中，螺栓连接结构作为转子部件连接的主要连接方式，目前连接方式主要采用手工“十字交叉”法拧紧，未考虑转子部件结构特性、配合特点

以及试车工作的稳定性，所有转子系统的螺栓连接要根据其装配部件特点、连接类型、转子工作特点以及受力因素等多方面考虑并形成典型特点的转子系统螺栓连接工艺方法，且由于转子系统螺栓连接技术具有多型号通用性，急需对转子工作特性及结构特点进行研究，从理论及工程经验上摸索分析，同时结合型号对不同类型转子结构的工作特点进行分析，深入开展螺栓连接工艺技术研究工作。

**项目目标：**针对螺栓连接的主体零件结构特性和使用环境的差异，结合发动机型号，开展螺栓连接稳定性研究工作，采用理论分析、数值仿真与试验验证相结合的方法，完成发动机上的验证试验，形成系统的螺栓连接过程控制方法，为不同型号、不同结构转子装配提供技术支撑。

**研究内容：**

(1) 不同螺栓连接的基本方式及不同转子结构的连接特性研究；

(2) 不同螺栓连接结构的物理特性特点及影响因素分析；

(3) 螺栓连接的优化工艺方法理论论证与试验验证评估。

**预期成果：**

(1) 典型螺栓的典型连接工艺技术方法的现场验证及实际效果评估；

(2) 基于不同结构转子件和螺栓连接方式的优化螺栓连接工艺技术方法。

### **考核指标：**

实现按典型螺栓的典型工艺技术方法连接，螺栓连接力矩分散度偏差小于 8%。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

## **22. 钛合金外涵机匣旋印电解加工技术研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY022

**项目背景：**旋印电解加工技术是将机匣毛坯作为阳极工件，采用回转体电极作为阴极工具，以相同的角速度和恒定的进给速率进给，旋印电解相比于现有机匣制造手段具有原理上的优势，尤其适合钛合金机匣等薄壁回转体零件加工。目前，旋印电解已可以在小尺寸回转体上加工栅格和凸台等异型结构，但仍需加强对大尺寸的回转体加工的研究。

**项目目标：**为解决钛合金外涵机匣壁厚不均匀、零件超重的问题，通过开展钛合金网格结构外涵机匣旋印电解加工技术的研究，掌握钛合金电化学溶解特性及加工表面质量控制方法、大面积旋转域流场分布特性及流场均匀性设计方法和机匣旋印电解加工成型阴极设计与精度控制方法，实现钛合金旋印电解新型加工技术的突破，使所加工的网格结构机匣，符合设计要求。

### **研究内容：**

(1) 钛合金加工表面质量控制，实现对表面质量的有效控制；

(2) 大面积加工流场均匀性控制，优化流场，实现流

场均匀、稳定；

(3) 阴极型面加工精度控制，实现机匣壁厚均匀，符合设计要求。

**预期成果：**

- (1) 大型钛合金机匣旋印电解加工研究报告；
- (2) 钛合金机匣旋印电解加工工艺路线与工艺规范；
- (3) 钛合金外涵机匣旋印电解加工标准。

**考核指标：**

(1) 加工零件满足外涵机匣典型构件结构的设计要求；零件表面光滑连续，保证机匣壁厚均匀，要求壁厚 $1.1_0^{+0.1}$  mm；

(2) 加强筋根部 R 角最小 R5 ( $\pm 0.5$ )，交付一件符合技术要求的全尺寸的外涵机匣零件。

**研究周期：**不超过 36 个月

**发布方式：**公开发布

### **23. 基于 3D 打印的型芯/型壳一体化快速铸造技术**

**项目编号：**HFZL2019CXY023

**项目背景：**航空发动机新机预研需要快速获取性能数据，对影响其性能、可靠性、寿命等关键零件需要设计、制造、试验验证快速迭代。空心涡轮导向叶片是影响其性能最复杂的长线产品之一，传统无余量熔模精铸法制造涡轮导向叶片周期长，合格率低，严重影响新机预研对叶片快速迭代的需求。3D 打印型芯/型壳一体化铸造技术为新型涡轮导向叶片的快速制造提供了一种新途径，可显著缩短叶片制造周期，具有成本低、改型快、效率高的特点。该技术在某高空长航

时发动机的试制中得到了初步验证，但叶身与缘板转接处质量欠佳，需要进一步开展一体化铸型结构对金属叶片晶粒的定向生长和微观组织的影响研究、适应一体化铸型的涡轮导向叶片结构设计方法研究等。

**项目目标：**针对传统的需要模具辅助的熔模精铸法制造涡轮导向叶片周期长、迭代慢的问题，开展型芯/型壳一体化快速铸造技术试验研究，采用 3D 打印一体化型芯/型壳技术，提高复杂叶片冶金质量，解决其制造周期长、成本高等问题，形成可快速制造涡轮叶片的新工艺，对涡轮叶片的快速优化迭代、试验改型具有重要意义。

**研究内容：**

(1) 适应 3D 打印的型芯/型壳一体化铸造技术的结构设计方法研究；

(2) 型芯/型壳一体化铸型的高温性能研究；

(3) 型芯/型壳一体化铸型的精度对金属叶片铸造精度的影响研究；

(4) 适应 3D 打印的型芯/型壳一体化铸造技术的组壳及浇注工艺研究。

**预期成果：**

(1) 适应 3D 打印的型芯/型壳一体化铸造技术的结构设计方法；

(2) 3D 打印一体化型芯/型壳建模方法；

(3) 适应 3D 打印的型芯/型壳一体化铸造的浇注工艺规范。

### **考核指标:**

- (1) 型芯/型壳一体化铸型的高温强度（1500℃）达到10~20MPa，孔隙率 30~40%；
- (2) 型芯/型壳一体化铸型的烧结收缩率不大于 0.2%；
- (3) 空心导向叶片叶盆叶背表面粗糙度不大于 3.2；
- (4) 比传统无余量熔模精铸法制造涡轮导向叶片毛坯缩短周期 2~3 个月。

**研究周期:** 不超过 24 个月

**发布方式:** 公开发布

### **24. 航空发动机燃烧室帽罩精准成形技术研究**

**项目编号:** HFZL2019CXY024

**项目背景:** 帽罩是航空发动机燃烧室一个非常关键的部件，其内、外端与燃烧室内、外壁连接，起到承上启下、整流高温高压燃气的作用，产品质量对组接、装配及燃烧室整体使用性能有很大的影响。目前基于帽罩成形技术的相关研究很少，特别是对高温合金薄壁复杂截面环形帽罩精确成形加工方面，缺少精准成形方法研究与工艺方案评估，缺少参数化设计制定与评估，亟需深入系统开展相关研究，开发新的加工方法，攻克其技术难题。

**项目目标:** 针对发动机燃烧室帽罩零件存在加工精度低，内部加工应力大的问题，开展帽罩成形技术研究，采用热精准成形的加工方法，形成适用于各种型号、类型与材料的燃烧室帽罩精准成形加工设计与评估方法，为燃烧室帽罩热精准成形加工提供有力技术支撑。

### **研究内容：**

(1) 燃烧室帽罩常用高温合金材料成形特性试验、分析研究；

(2) 影响成形精度关键因素的调整和控制，提高成形精度的精准成形方法研究；

(3) 成形模具结构设计及工装优化研究；

(4) 加工工艺方案设计与加工参数数据库评估。

### **预期成果：**

(1) 基于各种型号、类型与材料的燃烧室帽罩精准成形加工方案设计与评估方法；

(2) 基于各种型号、类型与材料的燃烧室帽罩精准成形模具结构与评估方法；

(3) 加工工艺方案设计与加工参数数据库；

(4) 完整的帽罩精准成形加工工艺规范；

(5) 形成全套精准成形加工工装图纸，加工用工装附带使用说明书。

### **考核指标：**

(1) 选取典型发动机燃烧室帽罩作为研究对象，开发出一种新型低应力帽罩精准成形技术，形成发动机燃烧室帽罩精准成形加工工艺标准；

(2) 内外端直径尺寸公差精度达到 IT10 级 (+0.32mm 和 +0.36mm)，型面面轮廓度达到 0.3mm；

(3) 加工出符合设计图纸要求的样件，合格零件数不少于 3 件，合格率达到 90% 以上。



**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

## **25. 高硬度难加工材料花键加工技术研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY025

**项目背景：**由于近年来航空发动机传动系统及直升机传动系统对于关键齿轮的硬度、韧性和耐磨性的要求不断提高，高硬度难加工材料运用越来越广泛。当前对于高硬度材料（例如第三代齿轮钢硬度高达 HRC48~52）以及结构特殊（例如内孔不通）的内花键前只能采用磨削或者插齿完成内花键加工。磨花键加工效率低，成本高，且常常受限于结构无法磨削加工。而采用插齿加工时，由于材料硬度高，插齿刀往往极易磨损，刀具寿命短，容易出现“崩刃”现象，较难保证花键精度。目前，高硬度难加工材料花键加工工艺方面的研究较少，亟需开展该方面研究，攻克加工技术难题。

**项目目标：**针对高硬度难加工材料花键加工技术难题，开展电解法与插齿复合加工技术研究，采用电解法粗加工去除大量余量，插齿精加工保证花键精度的加工方案，形成一种能解决高硬度难加工材料花键加工的新工艺新方法，为第三代齿轮钢等先进材料的制造工艺技术提供支撑。

**研究内容：**

- （1）高硬度难加工材料花键电解法粗加工技术研究；
- （2）高硬度难加工材料花键插削精加工技术研究。

**预期成果：**

- （1）电解法插齿机床设备；

(2) 高硬度难加工材料（第三代齿轮钢等）花键加工技术方案。

**考核指标：**

(1) 单件产品花键加工时间控制在 1 小时内；

(2) 产品花键合格率 $\geq 90\%$ 。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

**26. 航空发动机机匣多轴车铣复合高效高质量切削工艺研究**

**项目编号：**HFZL2019CXY026

**项目背景：**航空发动机机匣类零件形状复杂，多为难加工材料，切削效率较低、加工变形大、质量不稳定等问题常常成为制约发动机生产周期的瓶颈。目前的工艺手段很难在加工效率上有所突破，并且航空发动机机匣典型的孔系位置度要求较高，很多需要基准和孔同时加工，多次装夹和找正，对形位公差精度影响较大，零件质量不稳定，急需研究面向车铣复合加工设备的新工艺方法，提高机匣加工质量和生产效率。

**项目目标：**针对大尺寸复杂薄壁机匣零件切削效率较低、加工流程较长等问题，结合航空发动机机匣车铣复合切削加工工艺特点，发挥多轴机床复合加工优势，缩短加工流程，应用陶瓷刀具等新型刀具实现高速切削加工，采用降低应力应变和加工振动等方法，提高机匣精加工效率和加工质量，建立高质量高效率复合切削加工工艺方法。

### **研究内容：**

- (1) 机匣零件难加工材料高速切削机理研究；
- (2) 薄壁机匣复合加工过程振动机理研究；
- (3) 薄壁机匣复合加工气体阻尼减振工艺方法及自适应减振装置研究；
- (4) 典型机匣零件车铣复合工艺技术研究；
- (5) 机匣高效低缺陷车铣复合加工技术应用研究。

### **预期成果：**

- (1) 薄壁机匣复合加工气体阻尼减振工艺方法及其工艺装备；
- (2) 形成薄壁机匣零件车铣复合加工变形预测及控制技术规范；
- (3) 形成机匣高效低缺陷车铣复合加工方法，制定零件车铣复合高效低缺陷加工工艺规范；
- (4) 3 种大尺寸复杂薄壁机匣试验件：直径大于 2000mm 铝合金材料薄壁机匣、直径大于 800mm 钛合金薄壁机匣、直径大于 800mm 镍基高温合金薄壁机匣。

### **考核指标：**

- (1) 针对镍基高温合金切削加工粗加工效率提高 10 倍以上；
- (2) 形成典型机匣技术规范三种以上，在 3 种典型机匣件上进行试验，实现数控加工工序减少超过 5 个；
- (3) 典型机匣复合加工气体阻尼减振工艺装备 3 套，复合加工振动幅度降低 90%以上。

**研究周期：**不超过 24 个月

**发布方式：**公开发布

附件：中国航空发动机集团产学研合作项目立项建议书  
(模板)

附件

密级:

HF05XX(V01)表单 02

# 中国航空发动机集团产学研合作 项目立项建议书

项目名称: \_\_\_\_\_

项目承研单位: \_\_\_\_\_ (公章)

集团合作单位: \_\_\_\_\_

项目负责人: \_\_\_\_\_

项目联系人: \_\_\_\_\_

联系人电话: \_\_\_\_\_

填报日期: \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

中国航空发动机集团有限公司制

# 填 写 说 明

## 一、填写要求

本报告各项内容必须如实填写，各项栏目不得空缺，无此内容时填“无”，数字一律取整数，申报单位名称填写标准简称和代号，每份封面需加盖公章。

## 二、报告格式

页边距：上 2.5cm，下 2cm；左 2.5cm，右 2cm，页脚 1.2cm，封面、简表、目录不设页码，正文页码从第一页开始，置于页脚居中。

目录使用**黑体**，小四号字，标题一加粗，单倍行距。

标题一使用**黑体**，四号字，行间距 1.25 倍，段前、段后空一行。

标题二使用**黑体**，小四号字，行间距 1.25 倍，段前、段后空 0.5 行。

标题三及以后使用**仿宋加粗**，小四号字，行间距 1.25 倍，段前、段后空 0.5 行。

正文：中文用仿宋；数字、符号用 Times New Roman，小四号字，行间距 1.25 倍，段前、段后不空。

## XX 项目简表

项目名称			
申报单位		集团合作单位	
项目负责人		职务/职称	
项目经费	总经费 XX 万元	项目周期	XX 个月
总目标及应用方向 (300 字)			
主要研究内容 (200 字)			
关键技术和创新点 (300 字)			
主要指标 (200 字)			
预期成果 (200 字)			
现有能力 (200 字)			

## 项目无重复支持承诺书

本人郑重承诺，XX 项目研究内容未获得其他渠道项目经费支持。如发现重复支持情况，将偿还全部资助经费，且集团两年之内将不再受理该项目责任人新的产学研项目申请。

项目负责人签字：

日期：



## 目 录

一、项目概况 .....	59
(一) 原理及需求分析 .....	59
(二) 国内外研究现状及趋势 .....	59
(三) 必要性分析 (差距分析) .....	59
二、研究目标、内容、关键技术和指标 .....	59
(一) 研究目标 .....	59
(二) 研究内容 .....	59
(三) 关键技术 .....	59
(四) 主要指标 .....	59
三、技术可行性和创新点 .....	59
(一) 已具备的技术基础及现处阶段 .....	59
(二) 拟采用的技术路线和创新点 .....	59
(三) 技术风险分析与规避措施 .....	59
四、进度安排、成果形式和应用方向 .....	59
(一) 进度安排 .....	59
(二) 成果形式 .....	60
(三) 应用方向 .....	60
五、效益分析 .....	60
六、经费概算 .....	60
七、合作单位任务分工及经费分配 .....	60
八、课题组主要成员 (含合作单位人员) .....	61

九、研究条件及保障措施 .....	61
(一) 承研单位基本情况 .....	61
(二) 研究条件 .....	61
(三) 外协条件 .....	61
(四) 管理保障 .....	61

## 一、项目概况

### （一）原理及需求分析

### （二）国内外研究现状及趋势

（1）国外技术研究现状及趋势

（2）国内技术研究现状及趋势

### （三）必要性分析（差距分析）

## 二、研究目标、内容、关键技术和指标

### （一）研究目标

（注明关键技术成熟度（TRL）要达到的等级）

### （二）研究内容

### （三）关键技术

### （四）主要指标

## 三、技术可行性和创新点

### （一）已具备的技术基础及现处阶段

（注明现阶段 TRL）

### （二）拟采用的技术路线和创新点

### （三）技术风险分析与规避措施

## 四、进度安排、成果形式和应用方向

### （一）进度安排

（各年度工作安排及里程碑节点）

(二) 成果形式

(三) 应用方向

## 五、效益分析

核心技术或产品能力分析（对国内外同类技术或产品的主要性能指标和价格进行比较分析）

经济效益预测（技术或产品在发动机研制中得到应用后的收益预测）

## 六、经费概算

总经费拟申请 XX 万元，经费预算明细如表 X。

表 X 经费预算明细表

费用项目	经费概算 (万元)	2016	2017	2018	2019	2020
设计费						
材料费						
外协费						
专用费						
试验费						
固定资产使用 费						
管理费						
不可预见费						
总计						

## 七、合作单位任务分工及经费分配

经费单位：万元

序号	单位	任务分工	资助经费	自筹经费
1				
2				

3				
---	--	--	--	--

## 八、课题组主要成员（含合作单位人员）

### （一）人员基本信息

序号	姓名	单位	年龄	职称/职务	专业	课题组分工
1						
2						
3						

### （二）人员情况简介

## 九、研究条件及保障措施

### （一）承担单位基本情况

1. 承担单位研究基础等；
2. 承担单位上年度产学研专项项目执行情况、项目成果的应用情况、后评价情况等（由产学研办负责确认）。

### （二）研究条件

### （三）外协条件

### （四）管理保障