

## 附件 2

# “高性能制造技术与重大装备”重点专项 2024 年度项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“高性能制造技术与重大装备”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2024 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：围绕国家战略产业高端产品及重大工程关键装备在复杂环境、复杂工况下高性能可靠服役需求，突破高性能制造基础前沿和共性关键技术，研制具有高精度、高可靠、高效率、智能化、绿色化等高性能特征的基础件、基础制造工艺装备、基础试验与分析平台等，实施重大装备集成应用示范，推动制造技术向材料-结构-功能一体化的高性能设计制造转变，实现高性能制造技术和重大装备的自主可控，增强我国战略性高端产品和重大工程关键装备的核心竞争力。

2024 年度指南部署坚持需求导向的原则，遵循聚焦基础、布局未来的思路，针对基础前沿技术、高性能基础件、高性能制造工艺、集成应用示范等 4 个技术方向，按照基础研究、共性关键技术、应用示范三个层面，拟启动 25 项指南任务，拟安排国拨经费 2.08 亿元。其中，在基础研究类安排 6 个青年科学家项目，

每个项目 200 万元。共性关键技术类项目配套经费与国拨经费比例不低于 1.5:1，应用示范类项目配套经费与国拨经费比例不低于 2.5:1。共性关键技术类要求有企业参加，应用示范类项目要求由企业牵头申报。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，每个指南任务拟支持项目数为 1 项，实施周期不超过 3 年。申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基础研究类项目下设课题数不超过 4 个，项目参与单位总数不超过 5 家；共性关键技术类和应用示范类项目下设课题数不超过 5 个，项目参与单位总数不超过 8 家。项目设 1 名项目负责人，项目中每个课题设 1 名课题负责人。

青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，1984 年 1 月 1 日以后出生，原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

## **1 基础前沿技术**

### **1.1 大型超结构波动行为调控理论与方法（基础研究类）**

研究内容：研究大型结构姿态-轨道-结构振动耦合动力学行为和结构波动行为，研究基于等效时变负质量超结构的空结构波调控理论，突破大型结构波动能量隔离、定向输运与低频宽带波吸收等关键技术，形成大型空结构的整体和模块化单元设计方法，研制典型空天线结构模拟样件，并进行原理性试验验证。

考核指标：形成大型超结构设计方法和设计软件，可设计超结构尺寸 $\geq 200$  m；指定路径波传播非互易度 $\geq 50\%$ ，指定路径能量耗散 $\leq 35\%$ ，带隙频率 $\leq 50$  Hz，功能部件隔振频率 $\leq 5$  Hz；研制大型空间结构缩比样件并开展试验验证：结构尺寸 $\geq 15$  m，结构基频范围 0.1~1 Hz；发表高水平论文 $\geq 3$  篇，申请发明专利 $\geq 5$  项。

关键词：大型空间结构，动力学分析，超结构设计，波传播调控。

## 1.2 大面积柔性微纳功能结构制造理论与技术(基础研究类)

研究内容：研究大面积聚合物微纳功能结构形性协同调控新原理与一体化制造基础理论，提出大面积聚合物微纳功能结构连续无损赋形技术，形成大面积微纳功能结构高精度赋形工艺；提出聚合物表面高硬度、高熔点无机层低温转化工艺方法；在高铁、风电等领域开展试验验证。

考核指标：提出大面积柔性微纳功能结构形性协同调控新原理与一体化制造技术，研制大面积柔性微纳功能结构减阻样件：100 m<sup>2</sup>幅面尺寸成形加工时长 $\leq 2$  h，弯曲曲率半径 $\leq 3$  mm，幅面宽度 $\geq 0.5$  m，无机层厚度 $\geq 30$  nm，台阶覆盖率 $\geq 40\%$ ；在 30~90 m/s 风速范围内，最大减阻率 $\geq 8\%$ ；-60~120 °C条件下，微结构高度变化量 $\leq 10\%$ ；无机转化层界面粘附能 $\geq 1.5$  N/cm。

关键词：柔性微纳功能结构，高服役性能，聚合物表面无机化，大面积形性协同制造。

### 1.3 大型镁合金构件高速整体挤压成形理论与技术（基础研究类）

研究内容：研究新型低成本镁合金高速挤压多级组织形成与织构调控机制，形成镁合金高速挤压成形缺陷控制方法，揭示大型构件型材高速挤压形性协同调控机理；突破高性能大型构件型材高速整体挤压成形关键技术，研制大型高速挤压装置，在汽车、国防军工等领域典型镁合金构件制造中试验验证。

考核指标：研发大型镁合金构件高速整体挤压装置，主缸最小速度 0.20 mm/s、最大速度 18 mm/s，最大挤压力 $\geq 50000$  kN；挤压型材（密度 $\leq 1.78$  g/cm<sup>3</sup>）截面最大幅宽 $\geq 500$  mm，挤压速度 $\geq 3$  m/min；抗拉强度 $\geq 250$  MPa，屈服强度 $\geq 200$  MPa，伸长率 $\geq 8\%$ ，腐蚀速率 $\leq 0.3$  mm/年（3.5wt.% NaCl）；研制 2 种典型高速挤压镁合金样件，投影面积 $\geq 400\text{mm} \times 1200\text{mm}$ ，在 1000mm 长度直线度 $\leq \pm 1.5$  mm。

关键词：镁合金，高速挤压，整体制造，大型构件。

### 1.4 微米级金属微球阵列定向沉积制备方法（基础研究类）

研究内容：研究无喷嘴约束的金属微滴定向沉积新方法，探明热力效应驱动下金属微滴自由喷射机理，揭示金属微滴高速飞行特性与动态演变规律，提出金属微滴沉积微球形性及界面行为调控方法；突破自由喷射金属微滴高稳定沉积、高精度对准、高效率排布等关键技术，研制微米级金属微球阵列无喷嘴定向沉积

原型样机，在典型光电器件高密度互联金属微球阵列制造中试验验证。

考核指标：形成无喷嘴微球阵列定向沉积制备原理与技术，建立金属微滴喷射沉积工艺数据库 1 套，适用于纯铜、纯钨、金锡合金 3 种及以上典型材料，微球最小尺寸 $\leq 5\ \mu\text{m}$ ，尺寸偏差 $\leq 5\%$ ；研制金属微球阵列定向沉积原型样机 1 台，沉积幅面不小于 4 英寸，定位精度优于 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ，沉积微球尺寸范围 5~50  $\mu\text{m}$ ，对准精度优于 $\pm 1\ \mu\text{m}$ ，效率 $\geq 1000$  个/秒；制备光电器件高密度互联金属微球阵列样件 3 件，微球阵列最高密度 $\geq 10^5$  个/ $\text{cm}^2$ 、阵列面积 $\geq 10\ \text{cm}^2$ ，封装连接力学与电学性能优于现有植球工艺。

关键词：微球阵列，金属微滴，定向沉积，自由喷射。

### 1.5 重载传动齿轮啮合表面服役性能感测与预测方法（基础研究类）

研究内容：研究重载齿轮表层接触滚-滑-弹宏观力学行为、服役过程中齿轮表层梯度微观组织演变行为及多维多尺度损伤机制，揭示复杂外场条件下齿轮梯度表面结构与缺陷的动态演化规律，突破齿轮表层服役行为多元信息原位感测、表面梯度组织多维多尺度表征关键技术，建立齿轮失效模型与数据联合驱动的重载齿轮服役性能评估与寿命预测方法，在重载齿轮设计、制造、服役评估方面实现试验验证。

考核指标：提出多要素原位感测方法，服役过程中齿轮表面

宏观参量原位感测信息种类 $\geq 3$ 类,其中感测最大应力 $\geq 2000$  MPa;研发重载齿轮传动系统服役状态演化预测软件平台,修正的粘着磨损理论分析误差值 $\leq 7.5\%$ ;数模联合驱动的齿轮传动零部件服役寿命预测均方根误差 $\leq 3.3\%$ 。

关键词: 重载齿轮, 服役行为, 微观组织演化, 性能预测。

### **1.6 精密电子表面焊装全工序调控理论与方法(基础研究类)**

研究内容: 研究精密电子制造表面焊装中锡印、点胶、贴装、焊接、检测等工序中焊接性能演化规律,构建基于数据驱动与机理建模混合的焊接质量与生产工艺参数关系模型;开展关键工艺参数辨识研究,提出基于多维动态数据的在线焊装质量预测方法;开发多层次网络环境下全工序工艺参数智能优化调控技术;在精密电子制造表面焊装中进行试验验证。

考核指标: 形成焊装质量与生产工艺参数关系模型、在线焊装质量预测方法、全工序工艺参数智能优化调控技术;完成精密电子制造表面焊装全工序调控理论与方法试验验证,可协同调控的关键装备节点数 $\geq 10$ 个,数据采集节点数 $\geq 500$ 个,可预测表面焊装质量问题 $\geq 10$ 种,焊装质量自动调控成功率达到 90%,换线至稳定生产时间降低 30%;申请发明专利 $\geq 5$ 项,发表高水平论文 $\geq 3$ 篇,申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$ 项。

关键词: 精密电子制造, 表面焊装, 焊接质量预测, 全工序优化调控。

### **1.7 复杂环境下高端钻探装备虚实融合智能运维技术（基础研究类）**

研究内容：研究大变速高负载等极限工况下高端钻探装备故障失效机理及表征图谱，建立物理感知受限下的虚拟传感监测理论，提出机电控耦合的钻探装备数字孪生模型构建方法，开发虚实融合的智能检测协同健康状态感知与异常预警技术，研发高端钻探装备智能运维系统样机，在深海钻井、深地钻探进行试验验证。

考核指标：形成钻探装备虚实融合智能运维算法模型库，分析算法不少于 50 个，分析钻探装备及构件失效案例不少于 100 项，异常预警准确率 $\geq 90\%$ ，诊断准确性 $\geq 85\%$ ；研发边缘智能监测终端 1 套，支持高频振动、电流、工艺参数等不少于 3 类；研发结构损伤电磁检测装置 1 套，异常检测分析准确率大于 90%；研制钻探装备虚实融合智能运维样机 1 套，在至少 2 个典型场景开展应用；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 2$  项。

关键词：钻探装备，智能检测运维，故障机理。

### **1.8 多功能复合微型齿轮一体化设计制造方法（基础研究类，青年科学家项目）**

研究内容：研究直驱、传动、传感多功能复合微型齿轮材料、结构、工艺与性能的映射关系，提出多功能复合微型齿轮结构-功能耦合并行设计理论与方法；研究磁响应、自润滑、导电等不

同功能材料异质融合机理，建立多材料按需定点设计数字模型；研究多功能复合微型齿轮一体化制造过程的形性演化规律，突破多功能复合微型齿轮形性协同一体化制造技术；研制安全鉴码器、微泵等器件用多功能复合微型齿轮样件，并开展试验验证。

考核指标：提出多功能复合微型齿轮结构-功能耦合并行设计理论与形性协同一体化制造技术，研制多功能复合微型齿轮样件：集成无线直驱、传动、传感等功能数量 $\geq 3$ 种，集成磁响应、自润滑、导电等功能材料 $\geq 3$ 种，尺寸 $\leq 3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ （厚度尺度），密度 $\leq 3\text{ g/cm}^3$ ，微型结构特征尺寸 $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$ ，角位移测量分辨率 $\leq 2^\circ$ ，无线直驱输出力矩密度 $\geq 1\text{ }\mu\text{N}\cdot\text{m/mm}^3$ ，多材料一体成形异质界面强度不低于母材的 70%。

关键词：多功能，微型齿轮，并行设计，一体化制造。

### **1.9 动力系统紧固连接装置故障诊断预警方法(基础研究类，青年科学家项目)**

研究内容：研究复合动态激励下紧固连接装置非线性动力响应特性及装配界面应力变化规律，建立紧固连接装置非线性接触动力学模型，阐明复杂动态载荷下紧固件失效机理，突破基于振动特征信号的非均匀分布式紧固件应力监测技术，搭建多模态数据驱动的复杂工况下紧固连接装置故障诊断预警系统，在风电、高铁、航发等领域动力系统关键连接装置开展试验验证。

考核指标：建立紧固连接装置非线性动力响应以及振动松弛



理论预测方法，提出复杂工况下紧固连接装置的故障诊断与预警方法；研制一套故障诊断预警试验平台：服役温度范围 $-40\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，振动频率 $\geq 200\text{ Hz}$ ，幅度 $\geq 1\text{ mm}$ ；建立风电、高铁、航发等3种及以上领域动力系统关键紧固连接装置的非均匀分布式监测与故障诊断系统，可实现紧固状态下5%松弛量的可靠识别，单个紧固连接件应力衰退测量误差 $\leq 10\%$ ，可识别紧固连接装置的应力衰退、损伤、断裂及其耦合故障模式类别 $\geq 7$ 种，故障诊断准确率 $\geq 95\%$ 。

关键词：紧固连接装置，复杂工况，失效机理，故障诊断预警。

### **1.10 陶瓷基复合材料微结构功能表面设计制造理论与技术（基础研究类，青年科学家项目）**

研究内容：揭示陶瓷基复合材料跨尺度微结构对高超声速飞行器边界层转捩的影响机理，建立转捩调控性能与微结构特征之间的关联关系，研究陶瓷基复合材料微结构功能表面设计制造基础理论，形成陶瓷基复合材料曲面构件的跨尺度微结构功能表面优化设计与高效低损伤精密加工方法，研制高超飞行器头锥模拟样件，开展风洞试验验证。

考核指标：形成陶瓷基复合材料微结构功能表面的设计制造理论与方法，研制具有跨尺度微结构功能表面的高超声速飞行器头锥模拟样件，构件尺寸 $\geq 500\text{ mm}$ ，陶瓷基复合材料微结构形状

精度优于 $\pm 0.01$  mm，开展总温不低于 900K、马赫数范围 4~8 的头锥模拟样件风洞对比试验，微结构头锥样件的转捩线前缘变化范围与典型特征长度比值 $\geq 5\%$ ，与光滑样件相比气动阻力减小 10%以上。

关键词：陶瓷基复合材料，表面微结构，高超声速，转捩调控。

### **1.11 超临界二氧化碳润滑轴承设计制造理论与技术（基础研究类，青年科学家项目）**

研究内容：研究超临界二氧化碳（S-CO<sub>2</sub>）动静压混合润滑理论，揭示 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承内部湍流、传热、形变耦合效应与轴承性能形成机制，提出 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承结构-材料-界面-性能一体化设计方法，攻克 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承形性协同制造技术，研制高性能 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承样件，并开展试验验证。

考核指标：提出 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承形性协同设计制造理论与技术，开发 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承设计软件，研制 S-CO<sub>2</sub> 润滑轴承样件 2 件，最高转速 $\geq 20000$  rpm，服役温度 $\geq 150$  °C，最大承载 $\geq 50$  kg，轴承寿命 $\geq 1000$  h。

关键词：超临界二氧化碳轴承，润滑机理，形性协同设计制造。

### **1.12 高陡度三维电磁结构自适应精密装配方法（基础研究类，青年科学家项目）**

研究内容：研究高陡度三维不可展电磁结构的自适应自动精密装配基础理论，揭示高陡度三维辐射阵面高光反射成像误差抑制机理，突破大型三维多功能电磁结构跨尺度高精测量与精准定位、面向性能的自适应精密装配工艺优化与调控等关键技术，开发高陡度三维电磁结构自适应精密装配装置，并在新一代飞机的曲面蒙皮装配中试验验证。

考核指标：形成三维多功能电磁结构自适应精密装配技术及装置；三维辐射阵面上通孔、间隙等装配特征识别准确率 $\geq 99\%$ ，视觉位置测量精度优于 $\pm 10\ \mu\text{m}$ ，力控精度优于 $\pm 0.1\ \text{N}$ ，装配双极化多功能曲面蒙皮样件 $\geq 200\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 且曲率半径 $\leq 40\ \text{mm}$ ，装配效率优于100个特征/小时，在复杂力热服役环境下其相位一致性优于 $15^\circ$ ，幅度一致性优于3 dB；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$ 项。

关键词：高陡度曲面电磁结构，多功能蒙皮，三维高密集特征，自动精密装配。

### **1.13 碳纤维复合材料构件原位固化方法（基础研究类，青年科学家项目）**

研究内容：研究碳纤维复合材料构件电热耦合加热原位固化成型方法，揭示原位电热耦合效应下碳纤维-碳纳米管薄膜-树脂固化应力变化机制与界面结合机理，建立固化应力及微裂纹的评测方法与控制策略，探明电热效应与固化均匀性的影响因素及规

律，开发碳纤维预浸料-碳纳米管薄膜布置与电流加载的匹配设计方法，形成碳纳米管薄膜原位电热固化的复合材料构件成型技术，并在典型变直径复合材料壳体样件制造中试验验证。

考核指标：形成碳纤维复合材料构件原位铺设碳纳米管薄膜电热耦合原位固化成型方法，研发典型变直径复材壳体样件，最大直径 $\geq 500$  mm、长度 $\geq 500$  mm；成型过程中壳体面内和厚度方向温度偏差均优于 $\pm 10$  °C；与传统烘箱加热固化方法相比，原位电热固化成型复合材料的拉伸强度相当，微裂纹密度不高于传统成型方法，最大内应力比传统烘箱加热固化方法降低 10%以上，固化能耗降低 $\geq 35\%$ ，固化效率提升 $\geq 20\%$ 。

关键词：碳纤维复材壳体，碳纳米管薄膜，原位电热固化。

## **2 高性能基础件**

### **2.1 高速高负载磁悬浮轴承关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究高速磁轴承转子磁滞损耗机理、节能型多极独立高冗余磁悬浮轴承设计方法；突破高负载磁轴承流体脉动时变耦合高抗扰控制、高速磁轴承转子高频变频高效驱动、磁轴承变偏置电流分配策略与低功耗鲁棒控制等关键技术；研制高速高效磁悬浮轴承、高负载磁悬浮轴承，分别在高速空压机、透平真空泵等装备中应用验证。

考核指标：研制高速高效磁悬浮轴承，转速 $\geq 80000$  rpm，磁悬浮轴承效率 $\geq 99\%$ ，高速驱动变频器输出频率 $\geq 1500$  Hz，低能耗

鲁棒控制系统的能耗比差动驱动控制降低 50%以上，在高速空压机上应用验证，比无油螺杆压缩机能效提升 15%以上；研制高负载磁悬浮轴承，满载回转精度 $\leq 20\text{ }\mu\text{m}$ ，功率 $\geq 1.0\text{ MW}$ ，转速 $\geq 12000\text{ rpm}$ ，在透平真空泵上应用验证，比水环真空泵节能 40%以上；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$  项。

关键词：高负载磁轴承，高速磁轴承，鲁棒控制，节能降耗。

## 2.2 多孔质高稳定精密气浮轴承关键技术(共性关键技术类)

研究内容：研究气浮轴承高承载润滑机理与瞬稳态性能演化机制、高精度性能调控与形性协同设计方法、轴系稳定性评估与增稳抑振优化方法；突破多孔质轴承材料制备与控形控性加工、气浮轴承高承载润滑与性能自适应调控、轴系高精度可控装配与调校工艺等关键技术，研制高稳定精密气浮轴承，在高端减薄抛光气浮轴和高稳定气浮载台上应用验证。

考核指标：开发多孔质气浮轴承性能预测、润滑控制和参数优化等功能设计软件；研制高稳定精密气浮轴承，多孔质轴承材料最大孔径 $\leq 30\text{ }\mu\text{m}$ ，转速 $\geq 4000\text{ rpm}$ 、内径 $\geq 100\text{ mm}$ 、径向旋转精度 $\leq 30\text{ nm}$ 、轴向旋转精度 $\leq 20\text{ nm}$ 、轴向刚性 $\geq 1000\text{ N}/\mu\text{m}$ ，轴向承载力 $\geq 2400\text{ N}$ ，在高端减薄抛光机上装机应用，气浮载台盘面端跳 $\leq 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、平均无故障时间 $\geq 5000\text{ h}$ ，满足 8 英寸 SiC 减薄抛光加工后局部厚度偏差 (LTV)  $\leq 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、粗糙度 (Ra)  $\leq 2\text{ nm}$ ，单面去除  $100\text{ }\mu\text{m}$  时产能 (UPH)  $\geq 15\text{ 片/h}$  等指标；申请国家、行

业或团体技术标准≥1 项。

关键词：多孔质，精密气浮轴承，高承载，高稳定。

### **2.3 超精密陶瓷滚动轴承关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究宽温域、欠润滑、超高速等极端工况下陶瓷滚动轴承关键单元及装配体在滚动服役中多界面系统的摩擦学行为与失效机理；突破陶瓷滚动轴承高可靠性设计、陶瓷组件高精度与高一致性的控形控性制造工艺、精密装配与服役性能评价等关键技术；研制超精密陶瓷滚动轴承，在超低温风洞压缩机、真空薄膜设备上应用验证。

考核指标：开发面向陶瓷滚动轴承的设计分析软件工具 1 套；研制两种以上不同型号的陶瓷滚动轴承，陶瓷轴承精度≥P4 级，极限转速  $D_m N \geq 3.0 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，使用寿命≥15000 h；搭建高低温拟实工况试验平台 1 套；在超低温风洞压缩机设备上应用验证，满足宽温域 -150~120 °C、转速≥8000 rpm、无油自润滑等工况要求；在真空薄膜设备上应用验证，满足宽温域 20~400 °C、真空度≥ $10^{-8} \text{ Pa}$ 、无油自润滑等工况要求；申请国家、行业或团体技术标准≥1 项。

关键词：陶瓷轴承，摩擦，精密制造，性能评价。

### **2.4 耐高温干运转齿轮传动关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究高温环境下齿轮传动热弹耦合性能演化机理与齿轮干运转承载设计方法，突破热变形自适应性齿形设计、高

强度齿轮钢抗回火组织调控、低热膨胀性干运转齿面改性/涂层制备、传动系统热态服役性能测试与评价等关键技术，研制耐高温干运转齿轮传动装置，在核电装备、高端航空装备等应用验证。

考核指标：开发极端工况齿轮传动系统设计分析软件，仿真精度 $\geq 90\%$ ；研制耐高温干运转齿轮传动装置，服役温度 $\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，高温服役工况下齿轮热变形量 $\leq 3\text{‰D}$ ，齿面硬度下降 $\leq 2\text{ HRC}$ ，齿面硬度 $\geq 60\text{ HRC}$ ，齿轮传动系统连续干运转时间 $\geq 40\text{ min}$ ，传动装置回程精度优于 $\pm 0.2^{\circ}$ ；搭建 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 齿轮热态服役性能试验平台；在核岛设备与航空飞行器等装备上应用验证 $\geq 3$ 台套；申请国家、行业或团体标准 $\geq 1$ 项。

关键词：高温，干运转，齿轮传动，齿面改性/涂层。

## **2.5 高可靠双向机电传动行星减速器关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究双向机电传动精密行星减速器传动精度-传动效率-反驱能力-服役寿命多目标耦合设计理论、内齿轮复杂修形硬齿面车珩复合加工创成机制；突破内齿轮车珩复合高性能工具设计与制备、车珩复合加工装备设计制造及智能调控软件开发、车珩复合高效加工工艺等关键技术；研制双向机电传动高可靠精密行星减速器，在人形机器人、自动导引车等领域应用验证。

考核指标：开发双向机电传动精密行星减速器专业设计软件；形成内齿轮车珩复合加工装备、工具、工艺成套技术，内齿

轮加工精度达到 GB/T 4-5 级，齿形/齿向形状误差 $\leq 3\ \mu\text{m}$ ；珩磨轮齿形鼓形量偏差  $C\alpha$  优于 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ ；研制双向机电传动行星精密减速器，传动比 $\geq 30$ ，传动误差 $\leq 2\ \text{arcmin}$ 、回差 $\leq 2.5\ \text{arcmin}$ ，传动精度保持性 $\geq 10000\ \text{h}$ ，正向传动效率 $\geq 92\%$ 、反向 $\geq 85\%$ ，反驱动力矩 $\leq 0.4\ \text{N}\cdot\text{m}$ ，噪声 $\leq 52\ \text{dB}$ ；在人形机器人关节、自动导引车舵机等 2 类及以上微小机电传动系统中应用验证；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$  项。

关键词：行星减速器，微小机电传动，车珩复合加工，高可靠。

## 2.6 高耐压全压差变载机械密封技术（共性关键技术类）

研究内容：研究适应高参数、变载工况机械密封摩擦润滑界面作用规律；突破高变压/大变速等机械密封自适应结构设计、低功耗机械密封摩擦端面织构与精密制造、全压差变载机械密封性能评价等关键技术；研制高耐压全压差机械密封样机，在海工装备、油气钻采设备等领域应用验证。

考核指标：研制全压差变载机械密封样机 $\geq 2$  型，机械密封承受全压差 $\geq 15\ \text{MPa}$ ，密封摩擦功耗 $\leq 0.5\ \text{kW}$ （轴径 $\geq 50\ \text{mm}$ ，转速 $\geq 2000\ \text{rpm}$ ），泄漏率 $\leq 20\ \text{mL/h}$ ，服役寿命 $\geq 4000\ \text{h}$ ；建立全压差变载机械密封性能测试试验系统，全压差 $\geq 20\ \text{MPa}$ ，功耗的测量精度优于 $\pm 1\%$ ；在海工装备的动力系统、油气钻采设备的集输装置等 2 种及以上领域完成  $10\sim 15\ \text{MPa}$  范围的应用验证；申请国家、



行业或团体技术标准 $\geq 1$ 项。

关键词：机械密封，全压差变载，自适应结构，高耐压。

## **2.7 空间高压高功率密度伺服电机系统关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究空间极端环境对高压伺服电机系统的影响机理、“电-磁-热-机-材”近极限性能设计方法；突破伺服电机系统中空构型/驱控一体化及适应性装配工艺优化、稳定高效多机协同控制、空间环境服役特性表征评估与测试等关键技术；研制高压高功率密度中空伺服电机系统，在空间太阳能装备上装机应用。

考核指标：研制高压高功率密度中空伺服电机系统，母线电压  $DC \geq 400\text{ V}$ ，重量功率密度 $\geq 200\text{ W/kg}$ ，体积功率密度 $\geq 1600\text{ W/L}$ ，电机内外径之比 $\geq 0.6$ ，额定负载下转速脉动 $\leq 2\%$ ；在温度 $-100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空度 $\leq 10^{-4}\text{ Pa}$ 、辐射剂量 $\geq 1.5 \times 10^3\text{ Gy}$ 模拟环境下伺服电机系统平均无故障时间（MTBF） $\geq 10000\text{ h}$ ；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$ 项。

关键词：空间环境，中空伺服电机系统，高功率密度，空间高电压。

## **3 高性能基础工艺**

### **3.1 变截面超高强梁类结构整体渐进冷成形工艺与装备（共性关键技术类）**

研究内容：研究超高强钢变截面几何特征渐进冷成形过程的

形性演变规律；突破超高强变截面梁类构件多维度成形协调控制、渐进成形高效及高精度建模、成形工具型面及路径优化、基于碰撞性能要求的零件型面优化等关键技术；研发变截面梁类构件整体渐进冷成形装备与产线；在新能源汽车等产品的变截面梁类构件制造中应用验证。

考核指标：研发变截面梁类构件整体渐进冷成形装备，最大成形力 $\geq 200$  吨，截面调控自由度 $\geq 3$ ，实现材料抗拉强度 $\geq 1500$  MPa、单件长度 $\geq 1.6$  m 变截面梁类构件整体成形；构件长度方向截面面积最大变化率 $\geq 25\%$ ，装配面弯曲角度精度优于 $\pm 1^\circ$ ，装配面外形尺寸轮廓精度优于 $\pm 1.0$  mm/m，边波高度 $\leq 0.3$  mm；建设产能 10~20 万米/年的渐进成形零件生产线，应用于 3~4 个汽车车型变截面超高强梁类结构的制造；申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 3$  项。

关键词：超高强钢，变截面梁，渐进变形，整体冷成形。

### **3.2 等离子体高能束复合表面处理工艺及装备（共性关键技术类）**

研究内容：研究等离子体放电与高能束耦合机制、复合场状态下离子运动和分布规律、典型载荷条件下的表面防护技术和防护材料结构设计、等离子体复合表面处理工艺与性能间的关系，突破等离子体与高能束协调匹配、高效且精确的渗层控制、表面处理均匀性控制等关键技术，研制等离子体高能束复合表面处理

装备，在新能源汽车、流程工业装备及舰载武器等关键构件制造中应用验证。

考核指标：形成等离子体高能束复合表面处理工艺与装备，实现模具钢、不锈钢、钛合金等 3 种及以上典型材料表面处理；最大处理面积 $\geq 1 \text{ m}^2$ ，等离子体密度 $\geq 10^{12}/\text{cm}^3$ ，脉冲电流 $\geq 5000 \text{ A}$ ；膜层厚度 $\geq 10 \text{ }\mu\text{m}$ ，渗层及膜层厚度均匀性 $\geq 90\%$ ，划痕结合强度 $\geq 40 \text{ N}$ ，硬度 $\geq 20 \text{ GPa}$ ，摩擦系数 $\leq 0.15$ ，中性盐雾环境下 360 h 无明显腐蚀斑点，磨损率 $\leq 5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ；建立复合表面处理工艺数据库，申请国家、行业或团体标准 $\geq 2$  项。

关键词：等离子体，高能束复合，表面处理，高耐磨性。

### 3.3 高晶向性压电薄膜与金属电极沉积技术与设备（共性关键技术类）

研究内容：研究多物理场下压电薄膜与金属电极薄膜成膜机理，突破等离子体稳定性、大面积薄膜表面预处理及应力调控、薄膜成膜均匀性等关键技术，研发兼容多尺寸的集群式压电薄膜和金属薄膜沉积装备，在 5G 滤波器、智能传感器等领域的压电微机电系统（MEMS）加工中得到应用验证。

考核指标：形成高晶向性压电薄膜、金属电极薄膜沉积和表面预处理装备，集群式腔室数量 $\geq 5$  个，兼容 4、6、8 英寸圆晶，真空度 $\leq 8 \times 10^{-8} \text{ Torr}$ ；沉积速率 $\geq 50 \text{ nm/min}$ （AlN 薄膜验证），预处理均匀性 $\leq 3\%$ （20 nm SiO<sub>2</sub> 薄膜刻蚀验证）；压电薄膜晶向性

$\text{FWHM} \leq 1.5^\circ$ ,  $g_{33} \geq 80 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ , 厚度均匀性  $\leq 1\%$ , 应力  $\leq 200 \text{ MPa}$ ;  
技术就绪度  $\geq 8$  级; 申请相关团体、行业或国家技术标准  $\geq 2$  项。

关键词: 集群式, 压电薄膜, 高晶向性, 高均匀性, MEMS。

## 4 集成应用示范

### 4.1 大型风电机组六自由度全功率智能测试平台（共性关键技术类）

研究内容: 研究风电机组实际安装角度及全工况下受到的各向时序载荷与试验平台多作动器之间的耦合机理, 突破风电机组驱动动力学及动力仿真验证、风电机组五自由度载荷谱复合加载、风轮端低速大扭矩长寿命高响应驱动控制等关键技术, 研制试验平台大功率低速驱动系统, 开发 35 MW 级风电机组全功率智能测试平台, 开展风电机组全工况试验应用验证。

考核指标: 开发风电机组六自由度全功率测试平台, 最大驱动功率  $\geq 35 \text{ MW}$ , 最大驱动扭矩  $\geq 70 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 最大驱动转速  $\geq 11 \text{ rpm}$ , 试验台倾斜角度（机组仰角）调节范围  $6 \sim 13^\circ$ 。开发五自由度复合加载装置, X 向（轴向）、Y 向（侧向）、Z 向（垂直）最大加载力不小于  $\pm 13 \text{ MN}$ ,  $M_y$  向、 $M_z$  向最大加载弯矩不小于  $\pm 120 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 加载力测量精度优于  $\pm 0.2\% \text{ FS}$ , 加载力控制精度优于  $\pm 0.5\% \text{ FS}$ , 载荷谱模拟 RMS 精度  $\geq 95\%$ ; X 向、Y 向、Z 向最大位移不小于  $\pm 70 \text{ mm}$ , 位移测量精度优于  $\pm 0.1\% \text{ FS}$ , 位移控制精度优于  $\pm 0.5\% \text{ FS}$ ; 电网模拟输出侧容量  $\geq 90 \text{ MVA}$ , 在 20 MW 级以

上风电机组开展全工况试验。形成风电机组在六自由度全功率测试平台上的试验方法及评价体系，申请国家、行业或团体技术标准 $\geq 1$ 项。

有关说明：由企业牵头申报，配套经费与国拨经费比例不低于 1.5:1。

关键词：风电机组，六自由度，测试平台，低速大扭矩驱动，五自由度加载。

#### **4.2 百米级轻量化智能臂架设计制造技术及装备（应用示范类）**

研究内容：研究百米级超长柔性组合臂架的材料-结构-性能一体化设计方法，突破轻质高强材料整体成形、超高强钢薄臂箱型结构小变形焊接技术，研发整体成形与焊接装备，开发 100 米级高空作业装备及臂架作业智能控制系统，在风电、桥梁、城市高层建筑等重大工程与基础设施的检修、维护、救援中应用示范。

考核指标：形成超长组合臂架轻量化设计制造方法，整车组合臂架长度/底盘桥数的比值 $\geq 21$ ，与现有高强钢臂架相比减重 $\geq 10\%$ ；研发箱型臂架整体成形装备，单节臂架全长平面度 $\leq 2$  mm，每米直线度 $\leq 1$  mm；研制焊接装备，焊缝跟踪精度优于 $\pm 0.2$  mm，随焊加热范围 $\geq 8$  m；开发高空作业装备及臂架控制系统，整车臂架长度 $\geq 105$  m，最大承载重量 $\geq 600$  kg，整车臂架系统末端振动幅度 $\leq 400$  mm；在风电、桥梁、城市高层建筑等重大工程与基础设

施的检修、维护、救援等至少 3 个典型场景中应用示范。

关键词：百米级超长柔性组合臂架，整体成形，小变形智能焊接，高精平稳控制。

浙江大学 dongxianwei2023