

202 前沿制造技术（微纳制造）

34. 基于 MEMS 技术的传感器及数据记录仪

团队负责人：赵玉龙

依托单位：微纳传感器工程技术研究中心

所在学院：机械工程学院

一、团队简介

西安交通大学陕西省微纳传感器工程技术研究中心，以院士和长江学者为学术带头人的研究团队组成，专门从事微纳传感器设计、制造和应用研究工作。根据军工、航空航天等领域的特殊需求，依托西安交通大学精密工程与测试技术研究所及机械制造系统工程国家重点实验室在特种 MEMS 传感器领域的技术、人才、设备优势，开展 MEMS 耐高温压力传感器、超高压压力传感器、高频响压力传感器、微型化压力传感器的设计、制造及产业化研究。中心在特种传感器研究方面，已授权国家发明专利 50 余项，获得国家技术发明二等奖 1 项和省部级科学技术一等奖 4 项。

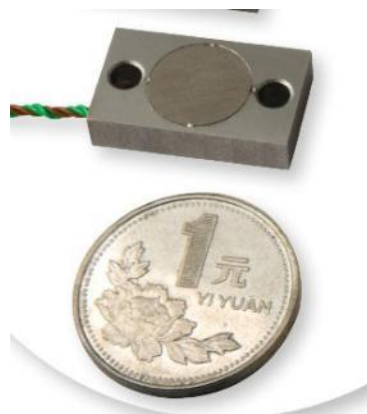
目前，中心拥有科研生产用房 1100 平方米，各类 MEMS 传感器封装测试设备总价值 1500 万元以上。中心以高温、高压压力传感器、高频、微型、力、加速度等特殊需求传感器及数据记录仪作为主要加工、生产方向，建设完成了专用的 MEMS 微纳传感器及数据记录仪的生产和检验工艺线，建立了完善的传感器测试平台，通过了 ISO9000 质量管理体系认证及 GJB9001B-2009 国军标体系认证。

二、传感器篇

1. XJA1 高 g 值加速度传感器

a. 特点

- 自主制造的微机械加工耐高 g 值压阻芯片
- 100,000g 的量程，高过载保护
- 灵敏度高、长期稳定性好
- 高频响
- 高过载,小体积



- 低成本

b. 概述

XJA1 高 g 值冲击加速度计采用的 MEMS 压阻式硅芯片拥有自主知识产权，其独特的内部结构，为传感器提供了可靠的过载保护、适当的空气阻尼及良好的密封性。主要用于航空航天、兵器、船舶、轨道交通装备等对冲击、碰撞、爆破产生的加速度测量。

c. 技术参数

过载保护：100,000g

响应频率： $\geq 100\text{kHz}$

供电：+5VDC

满量程输出： $60\text{mV} \pm 20\text{mV}$

工作温度： $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$

相对湿度：0%~85%

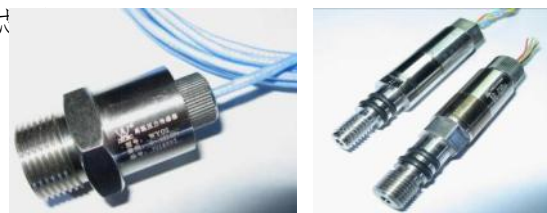
绝缘电阻： $100\text{M}\Omega$ (50VDC)

重量： $\leq 5\text{g}$

2. XJG2 高温压力传感器

a. 特点

- 自主制造的微机械加工耐高温压阻力敏感
- 可长期在高温下工作
- 灵敏度高、长期稳定性好
- 动态频响好
- 高量程、高过载



b. 概述

XJG 2 高温压力传感器采用 MEMS 技术和 SOI 技术，集成平膜压力传感器芯体，并采用先进的梁膜结构设计，使其具有耐高温及瞬时高温冲击的能力、动态频率响应高（最高可达到 1MHz）、超高量程，以及高过载（最大可承受满量程 20 倍）等特点。“耐高温压力传感器”为国家高技术研究发展计划(863 计划)MEMS 领域重点项目成果，并通过部级成果鉴定，拥有自主知识产权(发明专利：ZL 01

1 28782.9 和 ZL001.13961.4)。该压力传感器广泛应用于航空航天、国防、石油、化工、冶金、电力、船舶、汽车、医药、科研等领域对高温流体的测量。

c. 技术参数

耐瞬时高温冲击: 2000℃

测量介质: 与硅、不锈钢、玻璃兼容的各种液体或气体

量 程: 0~500KPa……150MPa

供 电: 1.5mA 或 5mA 或 9V

零位输出: $\leq \pm 2\text{mV}$

3. XJG4 微型压力传感器

a. 特点

- 微型结构体积小、重量轻
- 长期稳定性好
- 测量范围宽
- 动态频响高



b. 概述

在空气动力学研究、飞行器及发动机试验、风洞试验、流体力学及水工试验、水轮机及水下兵器试验、生物医学应用，化爆或核爆冲击波等许多研究中，出于对不改变被测流场的考虑或受安放位置局限，必须原位测压时，常常对传感器的外形尺寸的微型化有较为苛刻的要求，以期在不干扰流场状态情况下，复现动态流场的变化规律。XJG4 微型压力传感器正是为这些应用开发的，它采用了微型化设计的微机械加工工艺制成集成压阻力敏元件，进行精致巧妙的微型封装，通常外径在 $\Phi 8\text{mm}$ 到 $\Phi 15\text{mm}$ 、长度不超过 25mm，并且可按照用户要求的形状与尺寸定制。微型压力传感器系列以其小巧的外形、高输出、高温、优异的动态和静态特性以及极高的可靠性而显示其特色。

c. 技术参数

测量介质: 与硅、不锈钢、玻璃兼容的各种液体或气体

量 程: 0~10KPa……60MPa

供 电: 1.5mA 或 5mA 或 9V

零位输出: $\leq \pm 2\text{mV}$

满量程输出: $100\text{mV} \pm 40\text{mV}$

过载压力： $\geq 150\%FS$

工作温度： $-25^{\circ}C \sim 85^{\circ}C$

贮存温度： $-40^{\circ}C \sim 125^{\circ}C$

相对湿度： $0\% \sim 85\%$

绝缘电阻： $100M\Omega$ (50VDC)

4. XJG8 高频响压力传感器

a. 特点

- 动态频响好
- 自主研发的微机械加工的耐高温压阻力敏
- 长期稳定性好
- 测量范围宽



b. 概述

XJG8 高频响压力传感器利用微机械加工技术使得集成硅膜片有效尺寸小，因而固有频率高；利用硅优良的弹性力学特性，加之低的电桥内阻抗，从而不仅利于获得高频响，低至零频高至接近固有频率的宽频带响应，而且有低至亚微秒的上升时间及非常平滑的幅频特性曲线。综合性能优于压电动态压力传感器，动态频率响应极高（最高可达到 1MHz）。该系列传感器适用于军事工程、化爆试验、石油勘探与测井、材料、力学、土木工程学、岩土力学、创伤医学、液压动力机械试验等科学试验与现代化仪器仪表中，测量一些变化高、波形陡的动态压力波形与幅值、有效值，是动态测压的首选。

c. 技术参数

动态频响：最高 1MHz

测量介质：与硅、不锈钢、玻璃兼容的各种液体或气体

量 程： $0 \sim 10KPa \cdots \cdots 60MPa$

供 电： $1.5mA$ 或 $5mA$ 或 $9V$

零位输出： $\leq \pm 2mV$

绝缘电阻： $100M\Omega$ (50VDC)

5. XJG7 高过载压力传感器

a. 特点

- 测量压力高
- 自主研发的微机械加工的压阻力敏芯片

- 具备瞬间动态高压力的抗过载能力

b. 概述

XJG7 高过载压力传感器是一种能够承受并测量 2GPa 动态瞬间高压力的超高压压力传感器，主要应用领域为动能弹侵彻、油井勘探、新型材料的高压合成、地下核弹爆炸、高速公路安全防护、动能弹拦截、车辆碰撞安全、水下冲击波的测量等。

c. 技术参数

测量范围： 0~2GPa

传感器封装尺寸： $\leq \phi 30\text{mm}$

固有频率： $\geq 500\text{kHz}$

精 度： 1%FS

功 耗： 10mW

工作温度： $-40^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$

耐瞬时高温冲击： $\geq 3000^{\circ}\text{C}$ ，瞬时高温持续时间： 100 毫秒

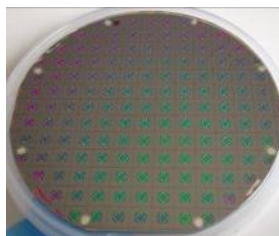
重 量： ≤ 100 克



6. XJE2 高温高压充油压力芯体

a. 特点

- 优良的线性特性
- 长期稳定性好
- 动态特性好
- 可长期在高温下工作



b. 概述

XJE2 高温高压系列充油压力芯体采用高精度、高稳定性微压力敏芯片或 SOI 压力敏芯片作为弹性敏感单元，通过（高温）充硅油工艺和（高温）精密补偿工艺，可实现（高温下）0~60MPa…~200MPa 的压力测量。将 XJE 系列充油压力传感器芯体装入具有标准和特定螺纹的压力接口中，可制作出结构型式多样的压力传感器，并与标准信号处理电路配合，可将压力信号转换成多种工业标准电信号输出，适用于各种不同压力测量产品的组装和生产。

c. 技术参数

测量介质：与不锈钢、密封圈兼容的各种液体或气体

量 程：0~60MPa……200MPa

内 阻：1K Ω ~6K Ω ，25℃

供 电：1.5mA 或 5mA 或 9V

零位输出： $\leq \pm 2\text{mV}$

满程输出：80mV $\pm 20\text{mV}$

过载压力： $\geq 200\%\text{FS}$

7. XJB2 高温压力变送器

a. 特点

- 自主研发的微机械加工的耐高温压阻力敏芯片
- 灵敏度高，长期稳定性好
- 激光全焊接封装
- 测量范围宽
- 分体式设计，用户可调整零位、满度



b. 概述

XJB2 高温压力变送器选用耐高温压力传感器芯体，由于采用 MEMS 技术和 SOI 技术，集成平膜压力传感器芯体，并采用先进的梁膜结构设计，使其具有耐高温及高温瞬时冲击的能力。传感器输出信号经过分体式变送盒的放大处理，将其转换成标准电信号。传感器壳体采用激光焊接封装，确保了该产品的优异性能和长期稳定性。分体式设计，便于用户调整零位、满度，该压力变送器广泛应用于航空、航天、国防、石油、化工、冶金、电力、船舶、汽车、医药、科研等领域对高温气体、液体的测量。

d. 技术参数

耐瞬时高温冲击：2000℃

测量介质：与硅、不锈钢、玻璃兼容的各种液体或气体

量 程：0~500KPa……150MPa

供电电压：标准 24VDC 或 12VDC~32VDC

输出信号：4~20mA 或 1~5V 或 0~5V 或 0.5~4.5V (5VDC 供电)

8. XJB6 智能数字压力变送器

a. 特点

- 宽温液晶数字显示
- 全温度范围内的数字化温度补偿技术及非线性修正技术
- 数字量输出，抗电磁及射频干扰能力强。
- 可模拟量（4~20mA）同时输出
- 具备通讯输出接口（RS-485），便于总线组网应用
- 长期稳定性好
- 性价比高、精度高



b. 概述

XJB6 是一款高精度、高稳定性的数显变送器产品。变送器传感器芯片工作温区广、信号处理部分可进行非线性和温漂补偿。解决了模拟变送器温度漂移等问题，数字量输出、抗干扰性强、无需其它采集设备，可直接与计算机通讯。该产品采用专用宽温液晶显示，并通过精密数字化温度补偿及非线性修正技术精心制造。通用的 RS485 总线，方便组成网络化的压力检测系统。产品在输出标准模拟信号的同时，可扩展各种通讯接口，是普通压力变送器的理想替代产品。该产品广泛适用于石油化工、水电、城市供水、科研等领域液体压力的精密测量与显示。

c. 技术参数

测量介质：与硅、不锈钢、玻璃兼容的各种液体或气体

量 程：0~20KPa……150MPa

供电电压：标准 24VDC 或 12VDC~32VDC

输出信号：模拟量 4~20mA/数字量液晶显示（RS485 通讯输出）

过载压力：≥150%FS

三、记录仪篇

1. 抗高过载微型记录仪

HGR-10/20 型数据记录仪内部采用一套数据采集电路、一数据储存电路和一套数据传输电路，安装在专用的金属壳体内。壳体内填充有缓冲保护层对电路进行过载保护，使记录仪抗



过载能力达 5 万 g；记录仪具有体积小、多通道高采样率、大容量、低功耗、抗高冲击过载、数据记录可靠性高等特点，适用于高过载环境下的多参数数据采集。

表 1 HGR-10/20 主要性能指标

型号	HGR-10	HGR-20
数据通道	1 通道（H）+4 通道（L）	1 通道（H）+4 通道（L）
采样率	高速通道 3MHz，12 位 ADC 低速每通道 125KHz，8 位 ADC	高速通道 8MHz，12 位 ADC 低速每通道 500KHz，8 位 ADC
体积	$\phi 30 \times 35\text{mm}^3$	
重量	50 克	
抗过载能力	5 万 g	
供电要求	5V，50mA	
动态范围	根据用户具体要求设置	
输入阻抗	$>1\text{M}\Omega$	
频率响应	0.1 Hz~500KHz	
共模拟制比	$>90\text{dB}$	
存储容量	1~4G 字节	
传输接口	采用 USB2.0 标准，300M 字节/分钟	
工作温度范围	$-40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$	

在 HGR-10/20 型数据记录仪的基础上，可以根据用户要求定制记录仪，模拟通道数可以增加至 16 通道还可以增加数字通道，采样率也可以进行灵活配置。

2. 抗高过载大容量可编程高采样率 XX 记录仪

HDR-10/40/80 具有 8 个同步采样的模拟通道，输入电压范围、输入通道数、采样频率和采集时间可以编程，记录器具有存储容量大、抗高过载、数据记录可靠性高等特点。



表 2 HDR-60/80/90 主要性能指标

型号	HDR-10	HDR-40	HDR-80
----	--------	--------	--------

数据通道	1 通道	同步 4 通道	同步 8 通道
	12 位 ADC	12 位 ADC	12 位 ADC
采样率	80MHz,	每通道 20MHz	每通道 10MHz
体积	电路仓体积 $\phi 52 \times 46\text{mm}^3$, 电池仓体积 $52 \times 66 \times 20\text{mm}^3$		
重量	235 克		
抗过载能力	5 万 g		
供电要求	自代电池 8.4V/1000mAh, 功耗 200mA		
动态范围	根据用户具体要求设置		
输入阻抗	$>1\text{M}\Omega$		
频率响应	0.1 Hz $\sim$ 8MHz		
共模拟制比	$>90\text{dB}$		
存储容量	4 $\sim$ 16G 字节		
传输接口	采用 USB2.0 标准, 300M 字节/分钟		
工作温度范围	$-40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$		

3. 多路模拟信号及多种总线通讯数据记录仪

MBR-200 型记录仪具有 32 路模拟信号通道和一路总线数字信号通道, 按照一定的采样频率, 存储被测产品在测试过程中的各种模拟信号 (例如振动信号、冲击信号、压力信号、温度信号等) 和被测产品中心处理器产生的总线上的数字信号 (包括 RS232、RS485、RS422 和 CAN 总线等)。模拟信号每通道输入电压范围和每个通道的采样率可以分别进行设置, 既可以同时采集高速信号和低速信号; 数字通道的总线类型、同步方式和波特率可以设置。

记录仪采用 2 路冗余的存储系统, 内置高容量独立的电池系统, 安装在专用的壳体内, 内部填充高强度树脂材料。记录仪数据通过 SPI 接口上传至上位机。



表 3 MBR-200 主要性能指标

型号	MBR-200
模拟通道	32 通道
采样率	100 KHz, 12 位 ADC
总线类型	RS232、RS485、RS422 和 CAN 可选
波特率	9600、19200、115200、1Mbps 可选
体积	65×70×55mm ³
重量	560 克
抗过载能力	5 万 g
供电要求	自代电池 8.4V/1000mAh, 功耗 100mA
动态范围	根据用户具体要求设置
输入阻抗	>1MΩ
频率响应	0.1 Hz~500KHz
共模拟制比	>90dB
存储容量	4~16G 字节
传输接口	采用 USB2.0 标准, 300M 字节/分钟
工作温度范围	-40℃~50℃

4. 冲击过载测试记录仪

IAR-100 型记录仪采用抗高过载测试技术和高 g 值加速度计, 获取在给定弹目交会条件下的冲击加速度曲线。与被测产品同样的目标和着靶速度条件下, 冲击过程中记录仪和被测产品受到的冲击加速度幅值和历程相同。冲击试验完毕后回收到记录仪, 读出冲击加速度数据, 并对冲击加速度进行积分获得模拟试验弹的速度曲线, 再对速度数据积分获得模拟冲击试验弹的位移曲线, 通过速度曲线和位移曲线来评判加速度测试的准确性。

表 4 IAR-100 主要性能指标

型号	IAR-100
采样率	100kHz

数据分辨率	8 位二进制，即 40g/LSB
加速度测量范围	-10000g~+50000g
测试误差	不大于 15% 加速度传感器的非线性误差不大于 10% 交叉轴灵敏度不大于 10%
形态	形状与结构与被测产品完全相同
质量	质量与被测产品完全相同
抗过载能力	10 万 g
供电要求	自代电池，功耗 10mA
输入阻抗	>1M Ω
频率响应	0.1 Hz~100KHz
存储容量	1G 字节
传输接口	SPI 数字接口，100M 字节/分钟
工作温度范围	-40℃~50℃

5. 恶劣环境下无线分布式存储测试系统

无线分布式存储测试系统由数据控制中心和若干个测试节点(无线存储测试系统)组成。无线存储测试系统将 ICP 传感器、信号调理电路、数据采集存储电路、时间统一电路、控制系统电路、无线数据通讯模块、电源管理电路和电池组等集成封装成一体，构成一个可植入爆炸现场独立工作的微小系统，具有很高的可靠性。数据控制中心通过发送测试命令来控制、管理以及协调测试节点去完成测试任务，而测试节点主要是负责采集爆炸冲击波场信号，并回传给数据控制中心，进行后续分析处理。由于无线存储测试系统防护等级达到 10 万 g，较好地解决了“引线电测法”的各种问题，可靠获取冲击波超压曲线，并通过计算得到正压持续时间和冲量。

表 5 IAR-100 主要性能指标

型号	DTS-100
采样率	采样率可以编程，100 K Hz~4 MHz；

数据分辨率	12 位二进制
放大倍数	8 档放大倍数可编程
输入阻抗	1M Ω
传感器指标	量程范围是 50 psi ~15 000 psi，谐振频率大于 500 kHz， 响应时间小于 1 μ s，非线性小于 1%FS
体积	$\Phi 60 \times 120\text{mm}^3$
重量	500 克
电池容量	1Ah
抗过载能力	10 万 g
存储容量	4G 字节
读数接口	USB2.0 高速模式，传输速度为 100M 字节/分钟
工作温度范围	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$
无线电作用距离	1Km

四、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☐工程样机 ☒中试 ☐产业化

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

35. 微型集成式固体电解质环境监测气体传感器

负责人:王海容

所在学院: 机械工程学院

一、项目简介

随着工业化进程的加速推进,人类社会各方面的发展对化石燃料的消耗与日俱增,而由此产生的大气环境污染问题也愈发严重,对人类的生存和健康、自然生态环境造成极大的损害。基于固体电解质的气体传感器,结合先进的 MEMS 和镀膜技术,对于 CO_2 、 SO_2 等污染性气体浓度的实时监测、防治十分重要。

项目以 Li_3PO_4 、 Li_3PO_4 - Li_2SiO_3 薄膜固体电解质薄膜作为导电介质,研制 CO_2 、 SO_2 等环境监测气体传感器。通过固体电解质薄膜的 CO_2 、 SO_2 气体传感器的响应原理分析,设计了集成式环境监测气体传感器,选择了合适的反应电极材料,结合 MEMS 薄厚膜工艺,采用热阻蒸发镀膜工艺沉积 Li_3PO_4 固体电解质薄膜,丝网印刷厚膜技术制备反应电极和加热电极,完成了集成式微型 CO_2 、 SO_2 气体传感器的研制、封装、测试,为工业应用奠定了基础。微型气体传感器可实现 CO_2 和 SO_2 气体的高精度监测,并具有体积小、功耗低、成本低的特点。

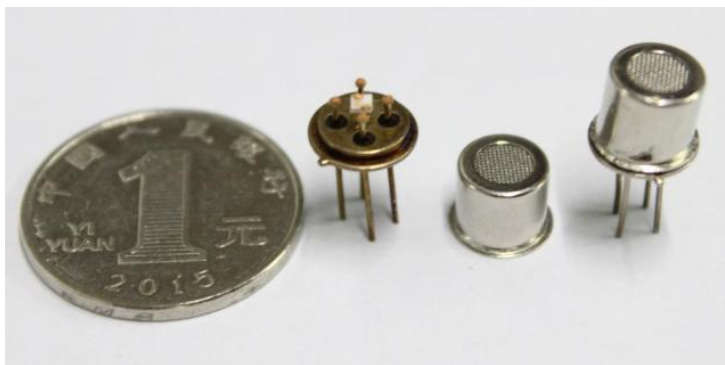


图 1 封装的气体传感器

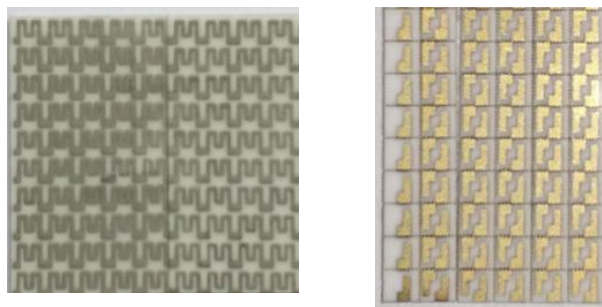


图 2 批量化加工的气体传感器芯片

二、技术指标（性能参数）

芯片尺寸	1.6mm x 1.8mm
封装方式	T0 封装
检测范围	CO ₂ (100~5000 ppm) , SO ₂ (1~200 ppm)
测量误差	±5%
工作电压	<2.0V(直流)
传感器灵敏度	CO ₂ (60-90mV/dec) , SO ₂ (70-95mV/dec)
响应时间	CO ₂ (<20s) , SO ₂ (<30s)
工作温度	常温
功耗	功耗≤800mW
预期寿命	>2 年

三、市场前景及应用

在诸多大气污染物中，CO₂与SO₂是引起气候变化和雾霾的主要污染源，其主要产生于各种金属的冶炼、石油化工产品的加工、工业及民用燃料的燃烧、各类机动车尾气的排放，对环境造成了严重的危害。由于此类污染性气体的危害迫在眉睫，因而对CO₂、SO₂气体的实时、快速、有效检测，以及根据检测结果采取相应防治控制措施非常有必要。由此可见，随着我国对环境保护治理的重视，将对高性能低成本的气体传感器具有紧迫而巨大的需求。

四、技术成熟度

☒概念验证
 ☒原理样机
 ☐工程样机
 ☒中试
 ☒产业化

可小批量生产微型气体传感器；已申请国家专利7项，其中授权4项。

五、合作方式

☒联合研发
 ☒技术入股
 ☐转让
 ☒授权（许可）
 ☒面议

203 高档数控机床

36. 航空航天典型零件加工工艺和刀具

负责人：陈雪峰

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

本项目针对航空航天中的钛合金框架类零件，拟通过加工工艺优化实现效率最大化和成本最小化双目标；并以典型零部件，即某型航空发动机机匣的切削大数据为研究对象，采用深度学习方法对其进行多层次、多目标优化分析，研发可替代进口航空航天精密刀具 9-12 种。并将应用对象扩展到大飞机滑轨零件、涡轮盘零件、航空高温合金零件等航空航天关键零部件。



二、市场前景及应用

该项目成果已在西飞、西航等大型航空航天企业的重点型号工程上得以应用。预期在未来五年内产生 1 亿元的经济效益；相较现有加工方式，预期可节省 10% 的原料，同时缩短加工周期；项目预期产生 2 亿元左右的间接经济效益；项目成果的整体性价比优于同类国外进口刀具产品的 15%。本项目极大推动了校企合作平台的构建、制造大数据示范应用及工业 4.0 大学版智能制造平台的建设；部分打破国外垄断，实现行业引领和国际领先。

三、技术成熟度

●概念验证 ●原理样机 ●工程样机 ⚙中试 ●产业化

四、合作方式

●联合研发 ●技术入股 ●转让 ●授权（许可） ⚙️面议

204 工业机器人

37. 智能机器人技术

团队负责人：曹建福

依托单位：自动控制所

所在学院：电子与信息学部

一、团队简介

自动控制研究所前身是创立于 1958 年的自动控制教研室，1994 年改名成立研究所。现有教师 11 人，其中教授 4 人，有硕士、博士等 70 多人。主要研究方向为机器人装备、智能制造系统、视觉感知与工业大数据、智能电网。

二、团队项目

1、机器人控制关键技术研究

针对制造过程上下料、物料传送、喷涂作业，及电商无人配送、建筑作业，研究机器人控制关键技术与装备。

（1）研究内容

- ① 面向快速生产线的机器人高效平稳动力学控制方法；
- ② 复杂作业的机器人路径规划；
- ③ 双臂机器人协作方法

（2）承担课题

- ① 国家重点研发计划，复杂建筑作业环境的双臂机器人规划与协作控制关键技术，2018 年-2021 年；
- ② 陕西省重点项目，面向智能生产线的快速机器人控制系统，2014-2016；
- ③ 苏州市重大科技项目，面向大型构件再制造的机器人三维感知与控制技术；
- ④ 产学研项目，机器人控制系统关键技术研究等；
- ⑤ 产学研项目，防爆型喷涂机器人关键技术及喷涂装备研制；

⑥ 产学研项目，无人配送机器人研制。

(3) 取得的研究成果

① 考虑了惯量变化及多关节非线性耦合的影响，提出了三次曲线插值、斜角逆运动学、非线性补偿等新算法，发明了实用的轨迹控制及柔性速度控制算法。

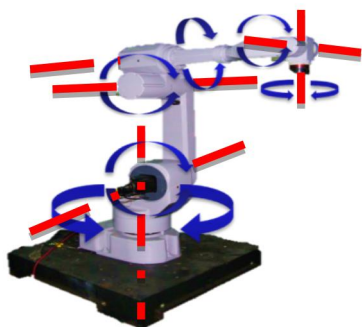
② 开发出多种机器人控制器：实现了机器人运动学、逆运动学、动力学、示教重现、协作控制等算法。可以为多种机器人装备进行配套，控制器末端定位精度 0.01 毫米，最大速度达 $300^{\circ}/s$ 。

(4) 技术特点

① 伺服接口采用高速以太网接口：

② 控制器采用双核处理器，它有两个核：DSP 核 和 ARM 核。示教盒基于 Wincc 6.0。

③ 软件采用可组态结构。



2、工业制造用机器人装备开发

(1) 关节型机器人装备，已产业化；



(2) 高速冲压机器人装备，已产业化；

(3) 相贯线切割机器人。



制运，开发出喷涂机器人控制器。



4、机器人化的无人配送系统

无人机智慧物流系统由配送无人机（大中型）、智慧无人机场、智能配送终端、无人小车等构成。

(1) 配送无人机

干线货机实现跨跨省份的货物调配;利用几百公斤到几吨载重的大型无人机,完成省内城市间货物的转运;利用载重 5-50 公斤、飞行半径 10-50 公里的末端无人机,实现最后一公里的物流配送。

(2) 智慧无人机场

半径 10-50 公里的无人机货物配送中心,包括配送无人机调度和管理,由各种码垛机器人、分拣机器人等构成的智能仓储系统。

(3) 智能配送终端

智能配送终端是无人机配送网络中非常关键的节点,通过在配送区域密点布置终端,把无人机、无人小车与收货人连接起来。

主要工作内容:

在已开发出的智能配送终端基础上，按照无人机配送的场合和需求，开发多种规格的智能配送终端：

- (1) 智能配送终端机构优化与系列化设计
- (2) 货物转移机器人机构改进设计；
- (3) 无人机在终端上准确定位技术；
- (4) 信息管理软件开发，包括终端设备软件、机场服务器调度软件及 APP 软件。

- (5) 产品化技术准备。

5、机器人化智能配送终端关键技术

- (1) 无人机在智能终端上准确定位

智能终端是直径 3.3m 的圆形，要求无人机的定位精度范围达到 $\pm 50\text{mm}$ 。使用 GPS 进行导航时，定位精度只能达到 1m 范围精度。

- (2) 货物转移机器人机构的设计

需要实现货物在无人机、储物格、取发货口之间的转移。如果采用一个 6 关节机器人，虽然能实现货物拆包，但机构较复杂，会使价格较贵。

- (3) 终端控制与管理单元

多轴联动、快速运动控制，控制、通信与管理一体化技术。

项目创新点

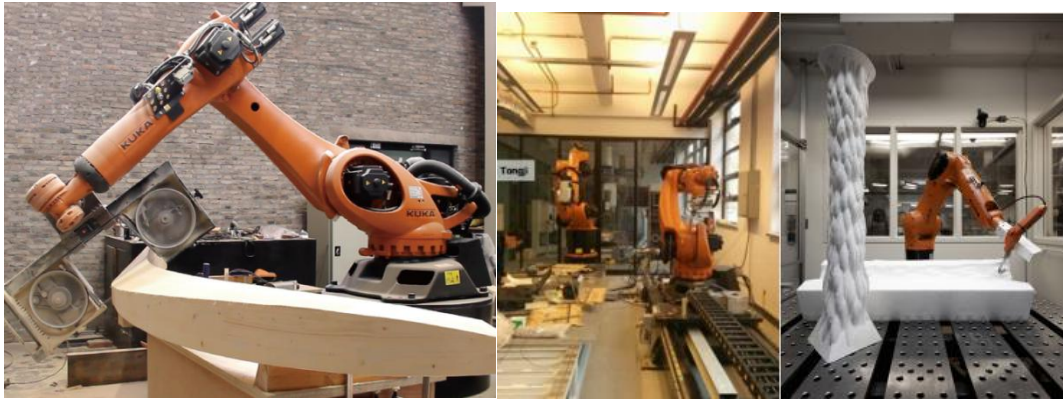
- (1) 终端内部货物转移机器人的灵巧机构设计；
- (2) 结合 GPS、机器视觉与机械机构的无人机精准定位技术；
- (3) 通过机器人化节点实现了无人机与送发货人的连接

6、建筑机器人

正在承担一个国家重点研发计划项目，“面向建筑领域的智能机器人关键技术与装备”。

项目目标开发：

- (1) 大载荷液压驱动双臂板材安装机器人；
- (2) 大曲率异形木构加工机器人；
- (3) 三种材质建筑结构打印机器人。



三、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

38. 高压输电线智能巡检排异物机器人

负责人：朱爱斌

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

目前我国 500 kV 超高压线路已经发展到 12.2 万 km 以上。由于高压输电线路时常会悬挂有各种异物，如不及时进行处理，将会威胁线路的安全运行，造成极大的经济损失。目前高压输电线路清除异物仍主要是采用人工作业方式，这种方法危险性大、成本高，劳动强度大、受线路环境制约。该团队成功设计了一款能够巡线、排除异物的机器人，安全性高、适应性强、成本低、效率高，具有广泛的应用前景。

二、产品性能优势

1. 单双线设计

采用单线/双线两种设计，以适应不同线路对线路路数、重量、体积等要求。

2. 自动越障

合理设计行走轮以及张紧轮，平稳翻阅间隔棒和防震锤。

3. 多功能除障

机械臂、砂轮、刀片的联合控制，实现对障碍物的抓取、切割和去除。

4. 远程遥控

基于手机 APP 的远程遥控，从地面即可实现对机器人的远程操作，方便且安全。

5. 视频传输

远程实现视频传输与监控，方便观察输电线路实际情况，采取相应措施。

三、市场前景及应用

国内目前成熟的智能清障巡线机器人较少，技术并不成熟；且高压线巡线清障的难度大，危险程度高。截至 2015 年底，国家电网公司经营区域 110 千伏及以上输电线路长度约 66.23 万公里，其中 220 千伏及以上线路长度 32.06 万公

里，它是我国电力系统的主网架。按照平均每 10 公里引进 1 个高压输电线路巡检机器人，每个巡检机器人初步价格 10 万元计算，则市场空间近 70 亿元，潜力巨大。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

目前已于陕西某供电公司签订合作开发协议。

专利：

一种用于输电线路巡检机器人的行走机构 CN206417094U；

一种用于输电线路巡检机器人的辅助爬坡机构 CN206416176U；

一种用于输电线路除异物机器人的组合清障装置 CN206432623U；

一种履带机器人摆臂驱动装置 CN102887181B。

五、合作方式

☒联合研发 ☐技术入股 ☒转让 ☒授权（许可） ☒面议



图 1 样机试验

205 机械故障诊断与预测技术

39. 设备状态点检网络化管理系统

负责人：徐光华

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

设备状态点检管理系统（以下简称为点检系统）是工业企业全面实施设备状态点检信息管理的数据平台。该系统托企业内部网络，采用 c/s 与 B/S 混合体系结构，构建以数据库为核心的网络信息管理系统，将企业内部各部门的设备状态点检信息自动上传至数据库服务器，在整个企业范围内实现数据共享。系统为用户提供全面的数据获取手段，长运行周期的数据管理，丰富的设备状态监测功能，并利用便捷快速的网络，将企业设备运行状态信息化并及时传递，以便企业中、高层技术人员和各级管理人员可以及时发现设备的异常，掌握设备的运行状况，从而全面支持预知维修，优化设备管理，提升企业设备管理水平，为保障设备长期的高效、安全运行、降低运营成本提供了一个开放易用的信息化平台。

点检系统是目前企业设备管理实现数字化、信息化的关键，也是构建企业资源计划系统（ERP）的设备管理信息基础。

二、系统结构

点检系统主要由三个部分组成：点检工作站、数据库服务器和客户端。其网络结构如图所示：

点检工作站：管理日常点检工作，利用数采仪按计划获取设备全面的状态信息，并自动上传至数据库服务器。

网络数据库：存储全企业点检设备酌状态数据和诊断与管理的辅助信息。应用客户端：通过网络获取数据库服务器中的数据，为专业技术人员提供信号分析软件，为管理人员提供状态浏览软件。

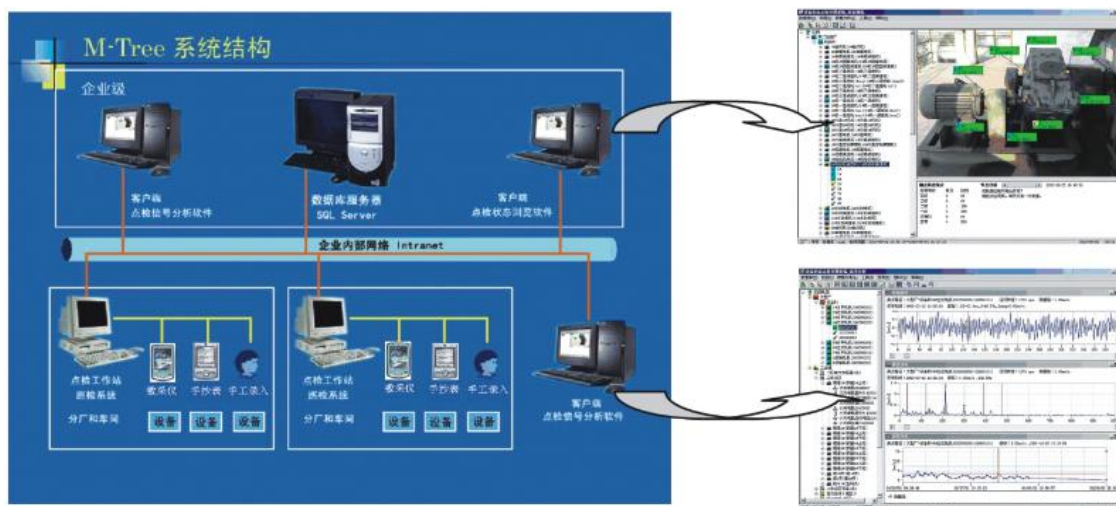


图 1 点检系统结构示意图

三、系统功能及优势

1. 系统功能

1. 全面获取设备动态信息	振动温度测量、工艺量观察量现场抄入、辅助信息人工录入。
2. 巡检计划管理	根据设备巡检要求设定巡检计划，并可以随状态变化及时调整巡检周期。
3. 自动数据上传	自动上传点检工作站的设备数据至企业数据库，实现数据的及时传递。
4. 网络化数据管理与共享	采用大型网络数据库管理全企业数据并实现共享。
5. 信号处理与分析	为专业技术人员和现场诊断专家提供全面的信号处理与分析方法。
6. 状态浏览	为企业各级管理人员提供设备的最新状态信息，及时掌握其发展变化
7. 报警管理系统	报警管理系统分级显示、查询报警状态，及时跟踪设备状态的变化。
8. 报告生成系统	提供了自动生成测点的事件报警报告以及数据分析报告。

2. 系统优势

比较项目	点检网络管理系统	普通数据采集系统
应用对象	中小型机电设备	
应用目标	设备全运行之气监测与诊断	故障分析
应用人员	全员性：点检人员、诊断分析人员、各级企业管理人员	非全员性：诊断分析人员
数据管理方式	数据库存贮网络化管理、全企业共享	文件/单机数据库管理、故障数据“病例”式管理
系统开放性	具有开放性的数据接口，可支持与企业其他信息系统（如ERP）的集成	封闭系统
支持预知维修能力	高	低
数据采集器成本	低	高
专利技术支持	基于概率模型的设备状态动态自适应报警方法 设备运行状态数据质量动态检测和保障方法	

四、市场前景及应用

冶金、石化、电力、造纸等流程工业、由众多设备组成的机械加工生产线、大量散在分布的工业设备群。

五、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☐工程样机 ☒中试 ☐产业化

系统已在武钢公司 12 个主体厂、马钢 11 个分厂、酒钢 2 个工序、上海金山石化塑料事业部和大连西太平洋石化全面应用，其中仅在武钢大型轧钢分厂的两年应用中，及时发现重大故障隐患 13 起，创造经济效益 5508 万元，新增企业利润 571 万元。

六、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

40. 复杂服役环境下机械装备的早期和定量化诊断技术

负责人: 赵明

所在学院: 机械工程学院

一、项目简介

故障诊断技术是保障重大装备健康稳定运行的基础,当前诊断理论的研究对象多针对定转速设备,几乎所有设备都会经历不同程度的转速变化。对于大转速变化过程,如:飞机的起降,大型回转设备的启停车等。准平稳过程:受载荷、工况影响,设备转速存在微弱波动,转速的变动给动态信息提取带来挑战。

本项目开发了一种无键相阶次跟踪技术,利用变转速下的早期与定量化诊断研究,将变转速理论技术应用于铁路运输、数控装备等领域。

二、技术性能优势

1. 无键相阶次跟踪技术(TLOT)

构建了自适应 Chirp-Fourier 变换的时频分析方法,基于局部迭代搜索的时频脊线提取策略。

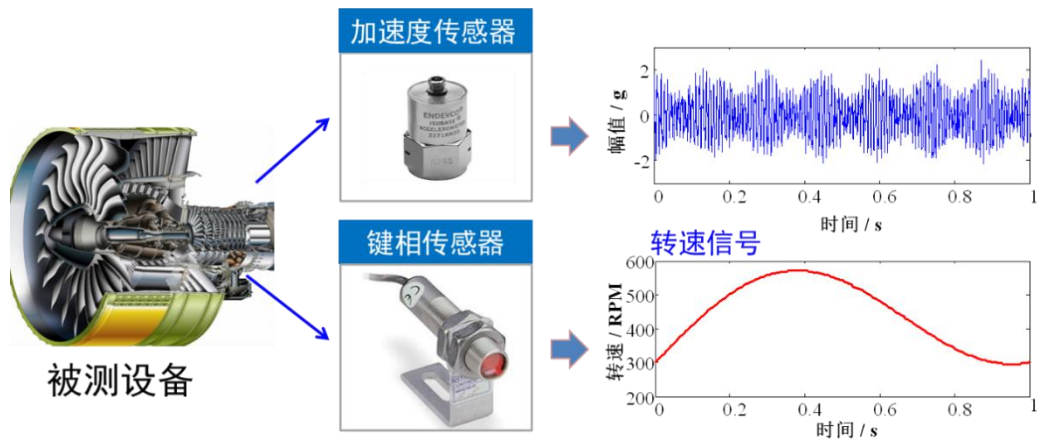


图1 无键相阶次跟踪技术

2. 短时相位解调分析方法(STPD)

基于柔性时域平均的短时相位解调分析方法。

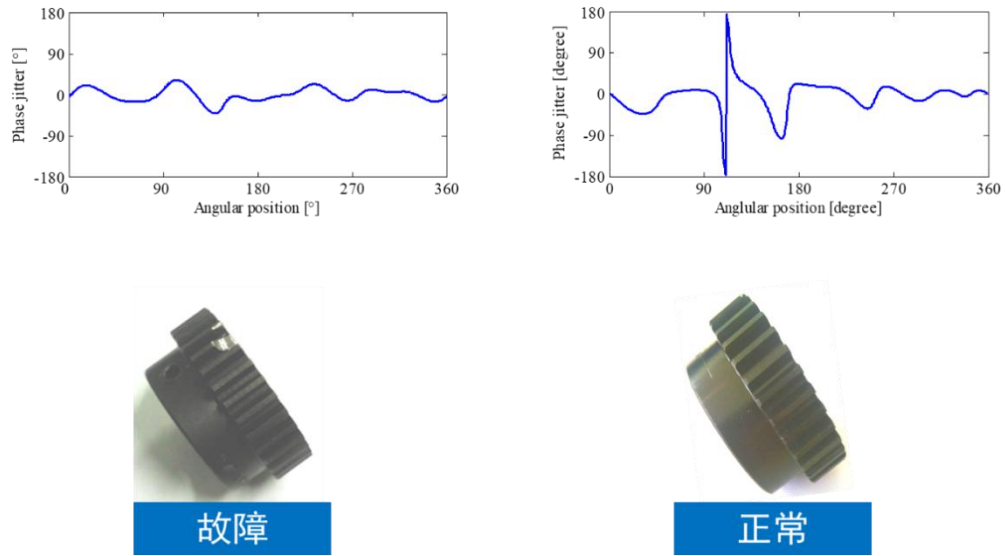


图2 传统方法

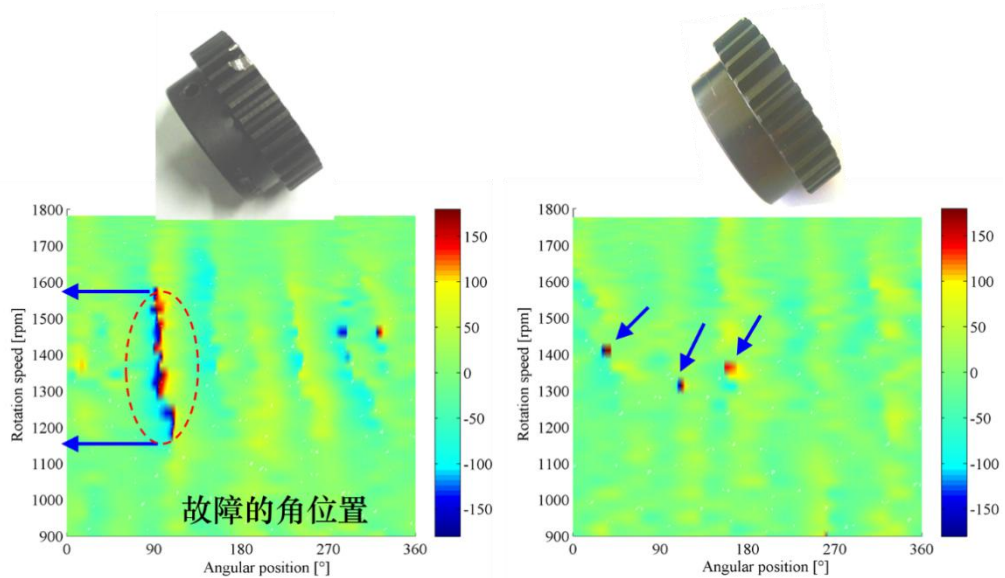


图3 短时相位调节法

3. 基于 HPS 的轴承定量诊断研究

鲁棒性强，对弱冲击敏感：能够在强噪声背景下，检测并增强弱冲击特征，并给出冲击的周期。物理意义明确，可实现故障信息量化：周期性冲击和随机信号的能量比，反映了故障严重程度。以周期性冲击为靶向，自适应判别最优共振频带；而其拓展边频乘积谱则可应用于边频检测，实现带内噪声抑制。

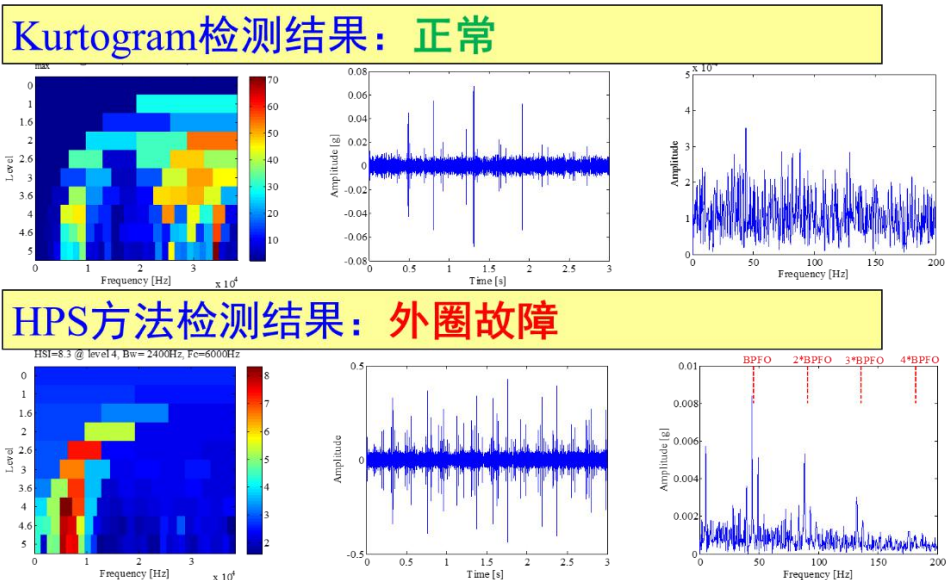
三、技术成熟度

●概念验证 ✓□原理样机 □工程样机 ●中试 ●产业化

四、合作方式

●联合研发 ●技术入股 □转让 ●授权（许可） ✓●面议

附图



41. 便携式磨粒图像分析仪

负责人：武通海、王硕

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

面向机械装备视情维护的需求，本项目提供了一种应用于高端机械装备油液健康状态监测的磨粒图像分析技术，可实现机械装备关键摩擦副宏观磨损状态与微观磨损机理的多层次分析，为机械装备的磨损故障检测及预警提供技术保障。

（一）磨粒图像分析技术

本项目依托单位是中国最早开展在线铁谱技术研究单位，在基础理论研究和传感器研制上都取得了丰富的成果。经过长期研发，在在线铁谱传感器设计领域先后申请了 20 余项国家发明专利。根据分析时磨粒所处状态，可将所研发的磨粒图像分析技术分为静态、运动两种模式。

1. 静态磨粒图像分析技术

本项目提出了一种新型的在线铁谱监测系统，通过高梯度磁场从润滑油液收集并分析设备磨损产生的铁磁性磨粒，如图 1 所示为该系统的工作原理示意图，其实质就是将离线铁谱分析中磨粒分离的流程融合为一体，借助计算机在较短的时间内自动完成一个分析周期。

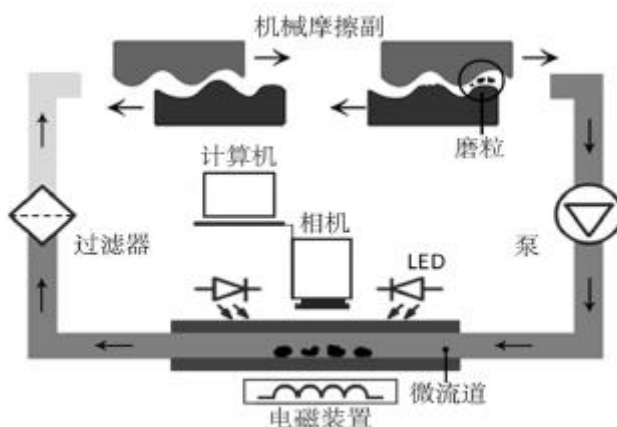


图 1 在线铁谱监测系统示意图

2. 运动磨粒图像分析技术

上述静态磨粒图像分析技术实现了磨粒群统计信息的提取，但是因借助于磁场力吸附磨粒，致使铁谱图像中磨粒呈链状分布，无法实现单磨粒精准分析。并

且，该技术仅能提供磨粒单侧表面信息，无法探究背向显微镜一侧的磨粒表面。磨粒沉积的随机性易导致包含表征典型磨损机理的磨粒表面形貌丢失。针对此问题，本项目创新性地提出了第二代磨粒图像分析技术，即基于磨粒随机运动的多视角图像分析方法。本项目基于固液两相流理论分析了无磁场作用下磨粒在微流道内的运动特性，确定磨粒翻滚力矩与其粒径和流道结构的关系，促使磨粒在流场力作用下周期性滚动。

(二) 系统集成与研发

1. 磨粒图像分析系统

以上述磨粒图像分析技术为核心，结合微量泵、油路、嵌入式自动控制系统本项目研发了在线磨粒图像监测系统，使用 VS2008 开发了上位机采集软件，包括串口数据的接收发送、USB 视频接收显示、磨粒图像处理分析、数据库管理等功能，如图 2 所示。



(a) 磨粒图像分析系统



(b) 上位机采集软件



c) 上位机采集软件

图 2 磨粒图像分析系统

该系统突破了嵌入式磨粒显微成像、典型磨粒类型分层辨识以及磨损状态监测与趋势分析等关键技术，可以快捷地分析不同油样，具备 20-500 微米磨粒的

自动检测能力。该系统不仅能提取磨粒的浓度信息，还能运用图像处理算法对磨粒链进行分割，统计 0-20 μm 、20-40 μm 、40-60 μm 、60-80 μm 、大于 80 μm 的磨粒数量以及最大磨粒的等效直径。此外，该系统能够自动地将所采集的磨粒特征存储于特定的数据库中，并生成随时间变化的趋势线，从而判断机械装备的磨损状态与磨损趋势。

所研发的系统通过分析润滑油样进行机械装备摩擦副磨损机理判断与失效预警。该系统降低了长期以来磨损检测行业对分析铁谱仪的依赖，同时具有分析速度快、操作简便、检测费用低等特点，达到了国际同类产品的标准，是第三方检测机构及工业现场油液检测实验室的理想选择。

2. 润滑油在线监测系统

单一磨损指标监测技术在装备状态监测领域取得了不错的工程效果，但是对于复杂机械设备而言，依靠磨粒数量和尺寸信息仅仅能给出磨损剧烈程度，而无法给出润滑剂性能衰变程度以及磨损故障的诱因。因此，本项目研发了一套润滑油在线监测系统，从摩擦学系统角度，提出了从磨损、理化、污染三个方面表征机械装备磨损和润滑状态的监测方法，通过可测性分析建立基于磨粒、粘度、水分、油温、介电常数、污染度指标的集成监测技术。此外，通过机械装备全寿命监测数据采集，开发数据清理及趋势分析等算法，为机械装备提供失效预警。

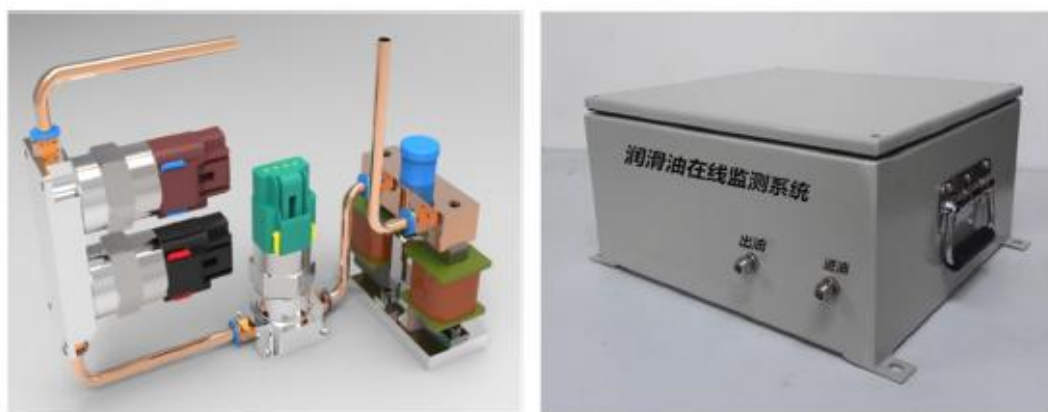


图 3 润滑油在线监测系统

二、产品性能优势

经研发，该系统已形成了集磨粒分析、油液理化、污染监测监测等功能的完整油液分析体系并通过传感器级联设计、嵌入式采集及远程数据传输技术实现机

械装备摩擦学状态的全信息实时监测，包括：磨粒浓度、磨粒尺寸分布、油液粘度、水分含量、油液温度、油液密度以及污染度等多种指标。同时，该系统能够采用网络通信协议，实现远程监测。该系统实现了在线的全信息获取，能够定位磨损故障并为换油提供维护建议，对于降低机械装备的摩擦学故障及延长整机寿命具有重要的工程意义

本项目研发产品主要针对高端机械装备的关键摩擦副（如风电齿轮箱、航空发动机轴承等）进行健康状态分析。油液监测的市场正在快速增长，每年参与油液监测大会的公司与产品种类均在快速增长，涉及中国石油、广研检测、国联质检等等。这表明：工业界逐渐意识到油液监测的重要性。但是，其中 90%以上产品是集成国外的传感器，5%产品是仿造国外的产品，只有本项目的磨粒图像分析技术具有完全自主知识产权。

目前国内在售产品仅有美国一家企业，产品售价约 50 万人民币/台。与该产品相比，本项目研发产品可获得表面形貌、颜色等更多的磨粒表征信息，因而在磨损机理判别与失效预警方面更具优势。本项目产品价格估算仅为进口产品的 30%-40%，可替代/超越进口产品，填补国内市场空白。

三、市场前景及应用

上述磨粒图像分析系统与润滑油在线监测系统均采用一体式设计，具有安装方便、操作简单的显著优势。上述系统既可作为实验室油样离线检测设备在实验室分析油样，也可作为便携式设备在工业现场检测，提高油样分析效率。同时，上述系统可作为机械装备运行状态实时监测设备，仅利用进出油口与机械装备回油管路连接（如图 4 所示），通过网络通信协议与上位机软件实现数据传输，就可以实现机械装备全寿命周期运行状态的多指标监测与失效预警。



图 4 油液在线监测系统实际使用现场

所开发系统先后获得军队科技进步二等奖、陕西高等学校科学技术二等奖、工业博览会一等奖等多项科研奖励，并且在船舶、石化、风电等高端装备中已经试用，具体包括：矿用刮板输送机减速器，南海救护船和南通挖泥船的动力滑油监测系统，独山子石化挤压造粒机的油液集成在线监测系统，大唐风电场风机的油液在线监测系统等。



图 5 救护船的动力滑油监测系统



图 6 挤压造粒机的油液集成在线监测系统

综上所述，本项目提供了一项面向机械装备磨损状态监测的关键技术，具有离线检测、便携式与在线监测三种应用模式，可用于航空发动机、风力发电机、

矿用机械、化工机械、电力机械等多种设备的日常维护中。可见，本项目产品类型多样、应用范围广泛，商业前景良好，适合推广。

四、技术成熟度

☒概念验证 ☐原理样机 ☐工程样机 ☒中试 ☐产业化

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☐面议

206 精密加工和精密测量技术

42. 基于精密测量技术的检测设备

依托单位：机械工程学院精密工程研究所

一、团队（专家）简介

精密工程研究所成立于 1996 年，其前身为机械学机制教研室公差组、微型技术教研室、精密技术教研室，是机械工程和仪器科学与技术两个一级学科博士学位授权点和博士后流动站。是机械制造系统工程国家重点实验室、高端制造装备协同创新中心、机械工程以及仪器科学与技术博士点和博士后流动站的组成单位，同时筹建有“微纳制造与纳米测试技术”高等学校学科创新引智基地、“微纳制造与测试技术”国际合作联合实验室、陕西省微型机械电子系统（MEMS）研究中心、陕西省微纳传感器工程技术研究中心，有力地支持机械工程和仪器科学与技术两个一级学科的建设和发展。

研究所共有教师及职工 44 名，其中教授 10 人、副教授 9 人、讲师（博士）13 人，助理研究员 11 人。教师队伍中有中国工程院院士 1 名、国家杰出青年科学基金获得者 1 名、国家科技创新创业人才 1 名、国家“百千万人才工程”入选者 1 名、中组部“万人计划”入选者 1 名、中组部青年千人 1 名、国家优秀青年基金获得者 1 名、教育部新世纪优秀人才 7 名。团队成员荣获首届全国创优争先奖、何梁何利科技进步奖、全国优秀科技工作者、中国机械工程学会青年科技成就奖、陕西省青年科技奖、陕西省青年科技标兵、西安科技人才奖等荣誉称号各 1 人次。

研究所研究方向包括：微纳机械电子系统与微纳米测试技术、微纳制造与先进传感技术、超精密加工技术与装备、精密测量技术与仪器、生物制造与仪器等。

二、团队项目

1、零件多几何要素在线快速检测仪

负责人：李兵

（1）项目简介

该项目以研发在复杂环境下多几何要素高精度检测专用机床为业务核心,面向精密零件加工质量检测市场,定制零件的形位误差检测设备,并开发相应的检测系统。

课题组先后研发了两台不同型号的零件多几何要素在线快速检测仪,此两款设备适用于批量化自动生产线,可在生产线上对加工完成的零件进行快速自动化测量,剔除不合格零件、优化生产线加工过程。该快速检测仪主要由孔位置度测量部、精密气动测量部、平行度测量部、精密回转平台、电器集成柜等部分组成,集孔组位置度测量、孔径测量、孔的圆度及端面平行度测量于一体,实现多几何要素的在线快速测量。



图 1 零件多几何要素在线快速检测仪

(2) 技术指标 (性能参数)

①孔径测量:

测量尺寸: 55.00mm (可定制不同尺寸规格);

测量误差: $\leq 0.002\text{mm}$;

重复性精度: $\leq 0.001\text{mm}$;

测量节拍: $\leq 40\text{s}$;

②圆度测量:

测量误差： $\leq 0.001\text{mm}$;

重复性精度： $\leq 0.001\text{mm}$;

测量节拍： $\leq 10\text{s}$;

③孔组位置度测量:

孔径尺寸：55mm（可定制不同尺寸规格）

测量精度： $\pm 0.003\text{mm}$;

重复性精度： $\leq 0.0025\text{mm}$;

测量节拍： $\leq 10\text{s}$;

④平行度测量:

测量误差 $\leq 0.001\text{mm}$;

重复性精度： $\leq 0.001\text{mm}$;

测量节拍： $\leq 10\text{s}$;

(3) 市场前景及应用

项目团队在李兵教授的领导下已掌握了精密零件检测成套化技术并具备工程化能力，相关测量系统已经应用于减速器零部件的检测中。

应用案例：可用于工业机器人减速器生产线上，检测减速器关键零件摆线轮和行星架的加工质量。主要可完成圆周等分孔位置度测量、孔径及圆度测量、端面平行度测量等，测量节拍快、准确度高，实现在自动化生产线的进行零件加工质量检测，效率高。测量过程如下：

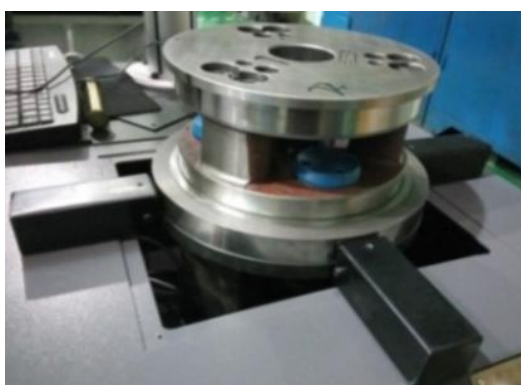


图 2 等分孔组位置度测量

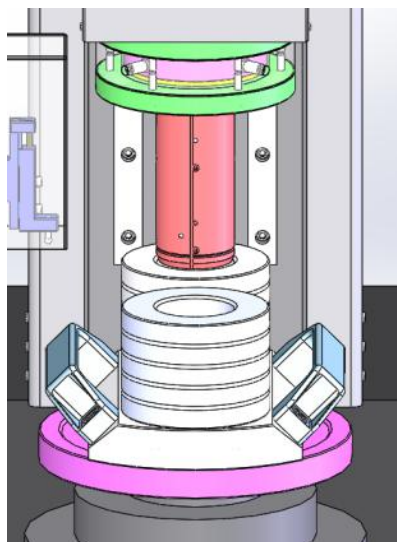


图3 孔径及圆度测量



图4 平行度测量

本课题成果还将为我国数控机床、医疗检测设备、风力发电机等同样受制于精密减速器的相关行业发展提供保障，有利于促进这些行业进行技术创新，实现相关行业的转型升级。

(3) 技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

目前已实现了在线快速检测仪的联机调试，实现了摆线轮 320E 和行星架 320E 零件的在线测量，具备高可靠性和稳定性。

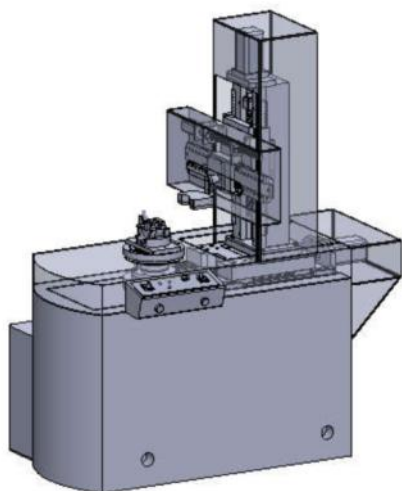
同时也进行了其他型号零件检测的预研设计工作，面向不同的零件型号、不同测量需求进行测量技术储备，同时，可根据客户具体需求进行定制化设计，并提供产品。

2、四坐标叶片型面测量仪

负责人：李兵

(1) 项目简介

叶片型面测量与分析不但是保障叶片出厂质量的重要手段，同时也是检测和评估已服役叶片表面缺陷的主要途径。测量仪由：机械模块、控制模块、数据采集模块、数据处理模块和数据显示模块组成。在数据处理模块中应用了当前国际先进的点云处理方法，实现了点云配准、点云去噪、点云精简及三维点云重构等功能。



三维建模图



实物图

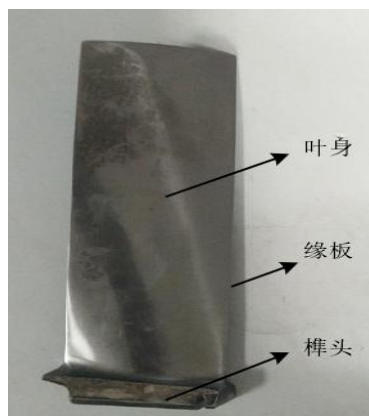
(2) 技术指标（性能参数）

1、型面检测精度： $\leq \pm 5\mu\text{m}$

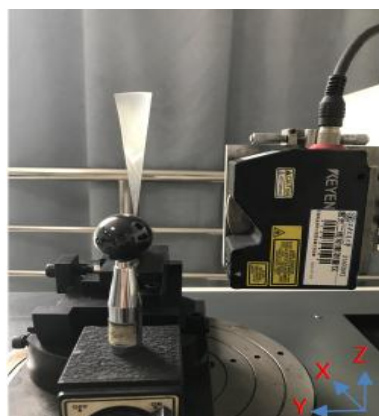
2、型面检测平均效率：

航空发动机叶片 $\leq 10\text{min}$

汽轮机及燃气轮机叶片 $\leq 15\text{min}$



叶片实物



测量过程

(3) 市场前景及应用

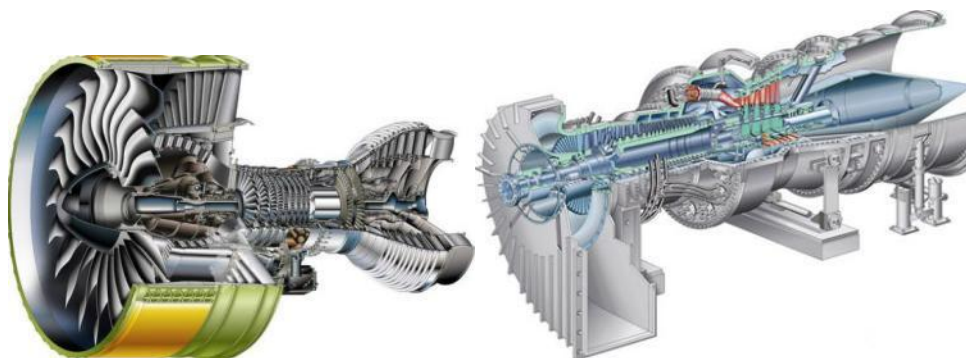
项目团队在李兵教授的带领下经过十余年攻关已掌握了相关核心技术并具备工程化能力，相关性系统已经应用于航天发动机叶片、汽轮机及燃气轮机叶片的型面检测。主要可完成两方面功能。

①叶片三维轮廓

该系统可实现叶片的全数据测量,分析形状轮廓参数和特征尺寸参数,评定叶片型面质量。其中,形状轮廓参数包括:型面型线误差、倾斜度误差、弯曲度误差和扭曲度误差等;特征尺寸参数包括中弧线、前后缘点、前后缘半径、前后缘厚度、弦线、弦长、轴弦长、弦倾角、最大厚度等。

②叶片表面缺陷

该系统可对叶片型面上存在的表面缺陷进行检测,分析出表面缺陷的三维轮廓尺寸,并对缺陷等级进行评估。评估结果可为叶片后续维护提供参考。



航空发动机

燃气轮机



汽轮机



叶片型面

(4) 技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

四坐标叶片测量系统已完成工程样机并对航空发动机及燃气轮机叶片型面进行检测,实现了叶片型面的三维重构,并完成了叶片型面质量评估及表面缺陷

的评定。测试结果验证，其具备高可靠性和稳定性。同时，可根据客户具体需求进行定制化设计，并提供产品。

3、轴类零件轴径高效高精度自动测量仪

负责人：李兵

(1) 项目简介

本项目主要研究轴径检测技术，并开发相应的检测系统以及硬件平台，研制了轴类零件轴径自动测量仪。本自动测量仪主要由双立柱测量单元、双光幕传感器测量单元、I/O 控制模块、数据采集模块、串口通信模块等部分组成。

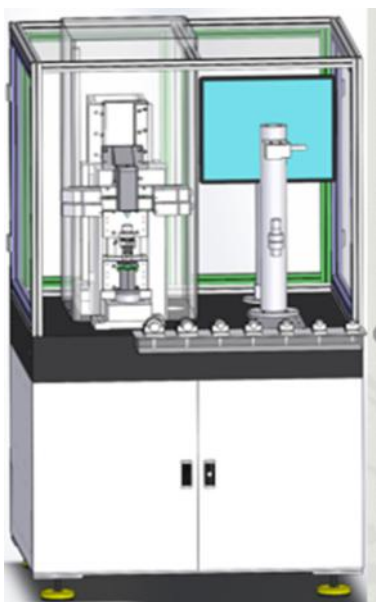


图 1 三维模型图



图 2 实物图

本测量仪在测量过程中可实现手动测量及全自动化测量（与机械手交互），可进行多种轴类工件（光轴、阶梯轴、异形轴和偏心轴等）的轴径测量，且可实现对同一个轴件的多个截面的轴径测量。测量过程中通过传感器的光幕截取工件的截面后未被遮挡边缘测量，测量精度高；测量单元的一个测量周期不超过一分钟，测量效率高；下顶尖部分的摆缸可旋转，能实现工件同一截面处的轴径的多角度多次测量，测量可靠性、稳定性高。

(2) 技术指标（性能参数）

测量范围 0-60mm（可扩展为 10-70mm，类推），公差带 0-0.010mm

测量精度： $\pm 1 \mu\text{m}$

测量节拍： $< 1\text{min}$

重复性测量精度： $\leq 0.5 \mu\text{m}$

（3）市场前景及应用

在工业产品中，轴类零件是经常遇到的典型零件之一，主要用于支撑传动零部件，传递扭矩和承受载荷，几乎是任何机械设备中不可缺少的核心零件。提高轴类工件的检测效率及测量精度对于推动我国工业化的进程具有重要的影响。

本自动测量仪可测量大范围内的多种规格轴类零件的直径，可实现同一零件上多段轴径的测量，且测量节拍快，测量精度高，重复性精度好，自动化测量功能对于批量化检测轴类产品具有重要的意义。

应用案例：可用于阶梯轴的轴径测量。测量过程中，对于大批量多型号的产品，能够实现阶梯轴的在线自动检测，在测量仪的双光幕测量单元的一次测量周期中可以精确地测量出阶梯轴各段轴径，并通过数据分析及时分离出不合格零件，并对合格工件分组，可优化产品检测分组流程，提高工作效率。对于小批量工件，可使用手动测量流程操作测量仪来对产品轴径进行精确测量，并能在软件界面查看结果分析。



图 3 工件测量过程

（4）技术成熟度

☐概念验证 ☒原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

目前已完成测量仪的硬件设计及软件开发，测量仪可以正常运行，进行大范围多种规格多段轴径的测量，具有高可靠性和稳定性，重复性测量精度良好。自

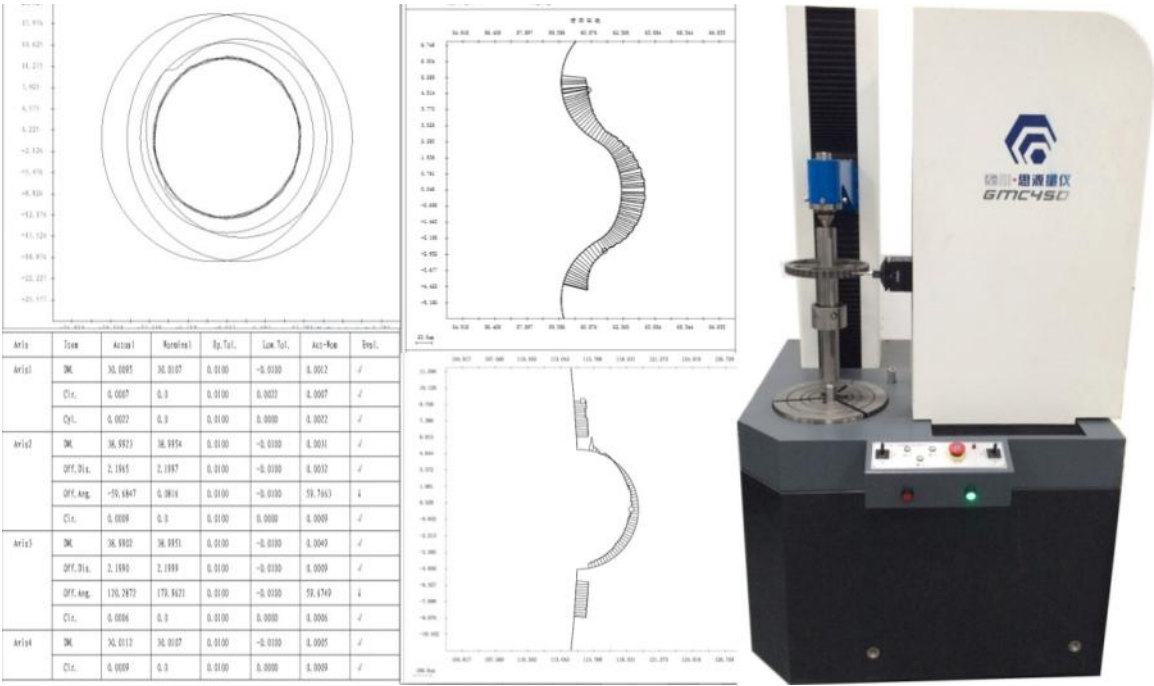
动化生产线上，测量仪与机械臂的自动交互，现阶段正在调试中，调试完毕之后可实现大范围多规格多段轴径的全自动化快速测量。

4、机器人关节减速器关键零件精密测量

负责人：丁建军

机器人关节减速器以 Rotate Vector (RV) 减速器和谐波减速器最为常见。RV 传动减速器因为克服了传统针摆传动的缺点，且具有定位精度好、效率高、体积小、质量轻、传动比范围大、传动平稳、精度保持稳定、寿命长等优点，已成为未来机器人高端精密关节减速装置的发展趋势。

应用复杂型线型面测量中心配备三维光栅扫描测头对针齿壳、摆线齿轮、高精度偏心轴等复杂型线工件进行检测。这类工件测量参数除基本齿轮参数外，还有离散型线坐标点数据。在开始测量前将基本参数输入参数设置栏，并加载型线数据，测量软件将笛卡尔坐标系下型线数据点转化为圆柱坐标系的坐标点，根据基本参数设置测量初始半径，要求测头在该位置的变形矢量方向与理论型线法向一致，开始初始规划数据采集检测，随后进入自适应路径规划阶段，并要求全部测量过程测头受力及方向在小范围内变化，从而实现以上工件的全自动高精度检测。



5、螺杆转子精密测量

负责人：丁建军

本项目关注于螺旋转子的精密检测技术的研究。螺旋转子是螺杆压缩机的主要零件。螺杆压缩机结构简单，易损件较少，能够承受较大的压力差或压力比，适应性强，噪声和振动低，运转可靠，输气量调节性好，操作维护简便。对螺杆压缩机核心零件制造精度的严格控制是实现这些良好性能的基础。上世纪 60 年代以来，螺杆压缩机在国外大量应用于空气动力、空调、工业制冷、冶金、矿山等领域。目前，在欧美等发达国家的制冷压缩机市场螺杆式压缩机开始逐步取代传统的活塞式机型成为标准配置。我国是上世纪八十年代才开始在国外进口样机的基础上生产螺杆压缩机产品的，如今已能在一定程度上解决国内市场需求。

螺旋转子的表面是极为复杂的螺旋曲面，其精度、表面质量的高低也会直接影响到螺杆压缩机的整体性能。一对转子工件啮合时，如果其螺旋型面误差过大，会影响压缩机内部吸气排气的正常进行，造成气压泄露，影响压缩效率，减小系统工作压力。为保证螺旋转子的加工精度，必须要对该零件进行精密检测与质量控制。

本项目以高精度四轴联动测量平台为基础，配备雷尼绍高精度三维测头，完成了螺旋转子三维自由型面的精确检测。在齿廓型线测量中，以等弧长采样思想控制测头的采样路径和采样方式，从而实现测点遍历齿廓型线，真实而完整的反映了转子的齿廓信息；齿向和周节的测量，采用 W 轴和 X，Y 轴联动的方式，精确控制测头采样路径，相对于三坐标测量机，该测量方式可以精确控制和记录转台的相位信息，更符合转子的齿向和周节的实际误差信息。



图 5-1 螺旋压缩机外形及内部结构



图 5-2 不对称型线螺旋转子零件

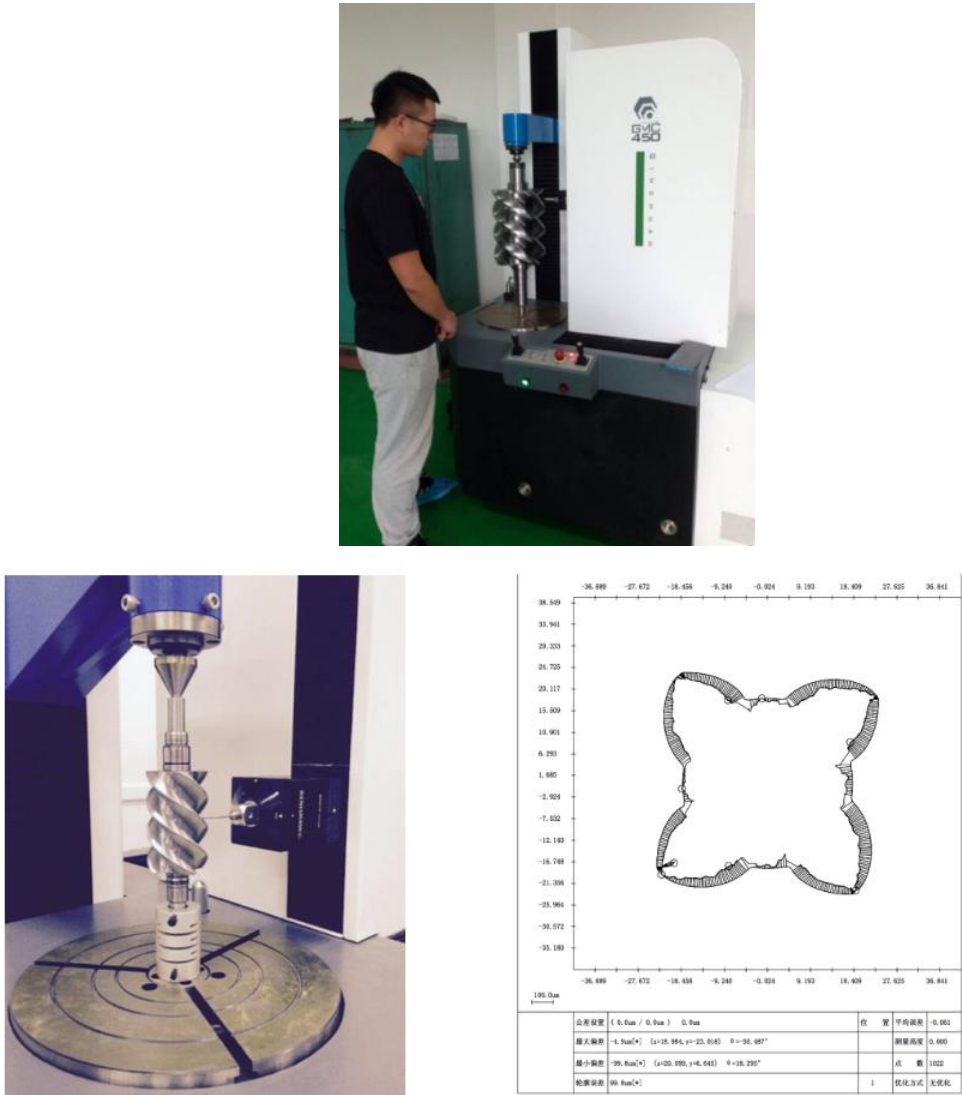


图 5-3 阳极转子检测实例及测量报告

6、齿轮与刀具精密测量

负责人：丁建军

本项目在数控系统、伺服驱动系统以及机械系统等三个方面开展全新的选型设计，开发出可达到 VDI/VDE 2612/2613 I 级精度标准的齿轮与刀具精密测量系统，可以测量 1 级以上精度的齿轮及齿轮加工刀具，相较国内同类产品测量效率提高 4 倍。

本测量系统从机械结构和材料两个方面进行全新设计，并采用如有限元等现代设计方法进行分析，提高结构的稳定性和可靠性。在结构上，关键零部件采用了花岗岩材料，可以明显降低温度对系统精度的不利影响；在导向结构上，应用标准精密直线导轨取代了非标密珠直线导轨，不仅简化了结构的安装工艺，还提

高了系统的模块化程度，使得同一零部件在不同型号设备上具有一定的兼容性；采用 ANSYS 分析机械结构精度与温度变化的关系，通过结构的优化设计降低温度对系统机械精度的影响。

数控系统是 CNC 齿轮测量机的关键技术。与已有的国产测量中心数控系统相比，本项目所开发数控系统具备：①三维模拟量测头接口和高速数据采集通道，为齿轮测量机选用三维测头提供了技术支持；②支持直线电机驱动单元，实现了直线轴的全闭环控制，提高了运动控制精度和系统动态响应频率，最终提高了齿轮测量中心的测量精度和测量效率。

伺服驱动硬件上采用直线电机，实现的“零”传动，消除了丝杠对导轨导向精度的影响，由于没有了传动环节，定位精度可以得到显著提高，消除了齿轮等传动背隙对定位精度的影响；主轴旋转电机采用直驱电机，通过连轴器直接驱动主轴旋转，达到精密定位的要求；选用智能伺服放大器，实现工作台与驱动器之间的闭环控制，同时在控制器与工作台之间形成第二层闭环控制，提高系统的伺服控制精度。



7、复杂齿轮三坐标测量分析技术

负责人：丁建军

（1）项目简介

复杂齿轮因其平稳可靠的传动、较高的承载能力等优点被广泛应用于航空航天、航海、汽车、拖拉机等。齿轮的加工精度直接影响着其寿命和可靠性，因此，对齿轮的各项参数的检测就显得至关重要。由于其齿面是一个十分复杂的空间曲面，其检测技术不如普通齿轮成熟，且复杂齿轮的专用检测仪器依赖进口，价格昂贵，技术封锁，难以实现推广应用。

本项目基于三坐标测量机开发了可用于弧齿锥齿轮等复杂齿轮精密检测的测量及分析技术。应用该技术可利用三坐标测量机实现齿轮工件的齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差的精密测量。

（2）市场前景及应用

齿轮的用途很广，是各种机械中重要的零件，近年来齿轮的设计和制造以及检测取得了显著的进步，在复杂齿轮的检测技术方面与国际上水平相差甚远。本项目从复杂齿轮的齿廓曲面成形过程出发，推导出齿面方程及齿面法向方程，并建立数学模型，完成对测量路径的规划。微位移传感器根据规划的测量路径运动，传感器示值的变化会反应出理论规划路径和实际齿面的差异，即实际齿面的误差情况。

8、叶片型面精密测量

负责人：丁建军

叶片是航空发动机的关键零件，其需求数量巨大，叶片的几何形状和尺寸决定着叶片的工作性能。叶片的型面质量对发动机的二次流损耗有着较大的影响，直接影响着其能量转换效率。随着发动机性能的不不断提升，如何高效制造出合格的叶片成为目前的一个研究热点，而检测是保证制造精度的重要手段。因此在发动机零部件的检测中，对叶片型面检测精度和检测效率的要求也越来越高，叶片型面的检测具有十分重要的意义。

目前国内对于航空发动机叶片的检测仍然以标准样板检测为主要手段，但此方式检测效率较低，远无法满足生产周期的要求。本项目采用数字化检测方式，根据设计将叶片表面的形状转换为离散的几何点坐标数值，可以接触式和非接触式两种方式进行。接触式的以扫描测头实现沿着叶片叶身型面的连续扫描测量，具有数据测量精度高的特点。该测量方式具有测量速度快、分辨率高的特点。通

过以上所采集的数据可以高效准确的完成叶片复杂曲面的建模,最后完成误差结果分析。

随着 C919 国产大飞机的试飞成功,国际上形成了以 Airbus、Boeing、COMAC 为代表的国际市场竞争新局面。国产大飞机的发展前景良好,将会逐步形成我国的民机产业。航空发动机是飞机的核心也是飞机制造中的难点,其中航空发动机的叶片在航空发动机的制造中占据了约 30%的比重。航空发动机叶片的制造与检测对于保证航空发动机的质量有着重要的意义,有着良好的市场前景。

9、精密轴件光学快速测量

负责人: 丁建军

随着汽车工业的飞速发展,轴类零件的质量控制要求在不断提高,以降低燃料消耗、环境污染和噪音排放。针对零件的精确测量越来越重要,零件只要超差而未被识别出来,通常会导致整个总成发生故障,生产厂家也会被退货。因此,越来越多的厂家要求进行百分之百的零件检测。

本项目结合接触式和光学矩阵相机两种测量模式实现发动轴类零件的快速精确检测,可以将测量时间缩短至传统测量方式所需时间的 $1/5 \sim 1/8$ 。该测量系统所配备的接触式电感测头可用于凹形的轴类轮廓、轴向跳动、轴向上的参考元素和盲孔等。光学矩阵相机可在很短的时间内测量例如直径、长度、半径、形位公差、凸轮轴(典型轴类应用)角度误差和凸轮轴升程等特征。该系统采用的模块化结构,能使其按照不同的测量任务,提供最理想的范围和组合。

三、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权(许可) ☐面议

43. 复杂曲面三维轮廓扫描仪

负责人：高智勇

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

技术瓶颈：测量速度与精度难以兼顾！以汽轮机叶片为例，一台大型汽轮机大约有 700 个叶片，若年均生产 50 台机组，所需叶片零件达 35000 个；目前国内对叶型的检测采用的三坐标，测量机进行逐点测量，平均测量一个叶片的时间长达 1 小时(型面检测)；三坐标机型线检测(10min)。

技术发展：阶段一：CMM、点线激光扫描测量，精度高，但速度慢，小物件、特定尺寸检测等；阶段二：面结构光全场测量，高速，但精度不高、人体三维扫描、文物遗产保护、虚拟现实(VR)、模具测量等；阶段三：面结构光全场精密动态测量、高速、高精度、现场，工业零部件光滑表面全尺寸测量、结构形变检测、逆向工程、文物修复等精密检测。

二、产品及技术特色

1. 自主研发 3D 扫描仪(面结构光三维测量技术)



2. 拥有的核心技术(测量-分析-评估)

高速的彩色编码投影技术 - 动态测量、自适应高精度标定技术 - 精确标定、免喷涂光滑表面精确测量技术 - 广泛适用、无重叠三维点云精密拼接技术 - 全形貌测量、面向对象的尺寸误差评估技术 - 定向评估；技术特色：金属表面免喷涂直接测量技术、无重叠区域高精度点云拼接。

三、市场前景及应用

三维轮廓测量技术广泛应用于各个领域，制造业：零件曲面测量、逆向工程、计算机辅助医学：牙冠外形、人体三维测量、虚拟现实技术：故宫博物院与日本合作开发的“数字故宫”、文化遗产保护：文物的三维建模（兵马俑）、文物辅助修复。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☐中试 ☒产业化

五、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☒面议

44. 半导体薄膜断层光谱仪

负责人：鲁广昊

所在学院： 前沿科学技术研究院

六、 项目简介

申请人团队发明了多种新型光谱分析方法并研制成功配套的光谱仪和仿真分析软件。所发明的断层吸收光谱可表征薄膜不同深度处的组分分布、凝聚态结构、光学分布、电荷局域态密度的空间和能量分布等，从而揭示薄膜中光学作用和电荷输运的机制。本方法既可用于有机高分子的通用薄膜，也可用于功能薄膜。该系列仪器可用作企业和研究机构实验室等的分析仪器。该方法将传统的“一维光谱”展开成“二维光谱”，为器件中电荷分布及电荷输运提供了直接的实验证据，可基于断层光谱数据建立多组分薄膜的光学和电荷输运模型。

申请人利用“软等离子体”工艺所研发的光谱仪包括原位紫外可见断层光谱仪和原位红外断层光谱仪，以及可用于监测薄膜形成和变化的原位动态吸收光谱仪。申请人研发的断层光谱仪器数据用户已达 50 余家著名科研机构 and 高校院所。

七、 产品性能优势

申请人团队发明的薄膜断层光谱分析方法、仪器以及软件均为国际首创。针对半导体薄膜的分析，申请人在国际上首次将传统的“一维光谱”展开成“二维光谱”。

本项目采用薄膜断层吸收光谱分析技术，用于研究薄膜不同深度位置(断层)处的吸收光谱以及断层形态：

1. 采用适当的光学模型，实现薄膜的深度分辨吸收光谱，并将研究成果应用于薄膜结构分析、光-物质相互作用、电荷输运、光电器件性能优化等。
2. 将断层薄膜化学和结构分析结果用于薄膜沿厚度方向的光学和电学性能研究，为光电器件性能的提高提供可靠的技术支撑。

八、 市场前景及应用

按现有光谱仪需求增速以及深度图像识别的需求统计，预计 2030 年中国对光谱仪需求在 600 亿人民币左右，其中断层光谱仪市场在 10 亿元以上。本项目所述的半导体薄膜分析方法及整体配套仪器为自主研发，市场前景广阔。申请人搭建世界上第一台原位断层光谱分析仪后，国内多个课题组寄样品，委托测试。两年内已经共同发表论文 10 多篇且影响因子 10 以上，起到了很好的广告效应，有利于拓展用户。项目初期客户主要为高校相关专业实验室、研究所、有机半导体行业、光伏及数据存储企业等。原位断层吸收光谱仪可以实现传统的吸收光谱仪的全部功能，因此中期目标有望部分占领传统的吸收光谱仪的市场。

该产品属于科学分析仪器，主要市场是 R（研究所、高校等研发机构）端和 B 端（比如京东方、TCL 等光电半导体企业）。

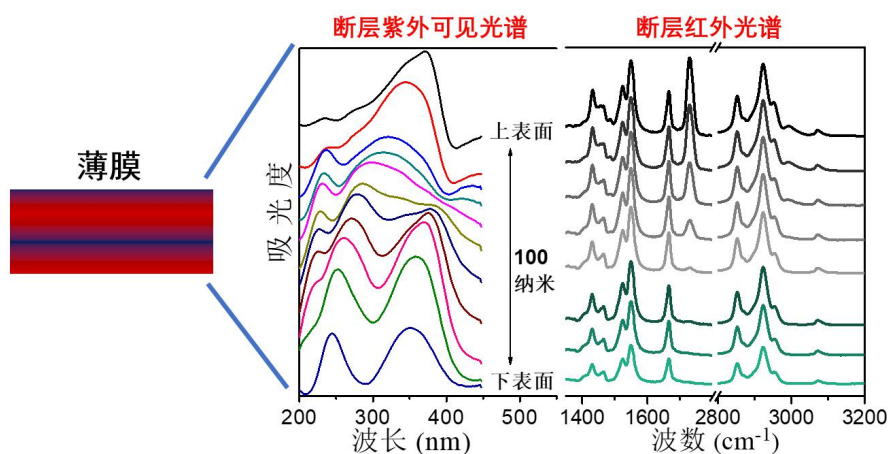
九、 技术成熟度

☒ 概念验证 ☐ 原理样机 ☐ 工程样机 ☒ 中试 ☒ 产业化

十、 合作方式

☒ 联合研发 ☒ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☒ 面议

附图



45. 工业机器人高精高效加工配套智能主轴

负责人：曹宏瑞

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

本项目针对航天舱体、飞机蒙皮、舰船螺旋桨叶片等大型复杂零件高精高效加工难题，研制与工业机器人相配套的智能主轴。主轴转速达 20000r/min，径向跳动和轴向跳动小于 $3\mu\text{m}$ ，动平衡精度 G0.4。该智能主轴具备多传感信息感知、加工状态在线监测、异常辨识与自诊断、振动主动控制等功能模块，适用于铣削、钻削和磨削等加工，实现铣削轨迹精度和制孔定位精度均在 0.3mm 以内。

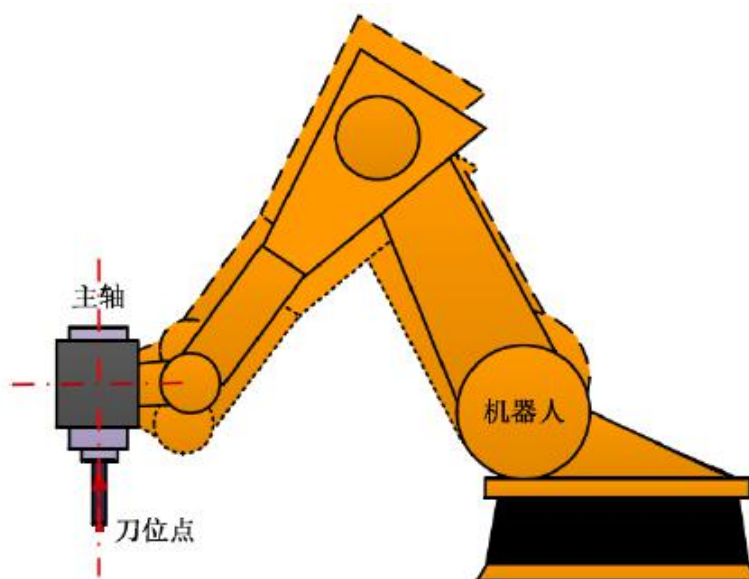


图 1 工业机器人及配套主轴

二、关键技术

本项目所研制的工业机器人高精高效加工配套智能主轴涉及的关键技术如下：

（一）智能主轴高刚性、轻质量设计技术

作为工业机器人末端执行器的智能主轴，高刚性、轻质量是其设计目标。在智能主轴动力学建模研究基础上，以减少主轴的动静态变形和提高主轴固有频率为目标，通过优化主轴轴承跨距、轴径、轴承预紧等参数，提高主轴刚性 20% 以上，质量减小 15%。

（二）智能主轴多源信息精确感知与数据获取技术

智能主轴振动、切削力、温度等多源信息采集的难点在于狭小空间限制和高速旋转部件状态的直接感知与传输。提出柔性复合传感器（厚度小于 2mm，测振带宽不低于 20kHz，芯片面积小于 5mm²，无线供电与传输等）制备方法，实现振动、切削力、温度等信号的集成感知。

（三）智能主轴信号处理与加工异常状态辨识技术

融合现有传感器及柔性传感多源信息，提出稀疏监测指标构建新方法，构建时频域、阶次域、能量域内的早期异常预警指标，利用深度迁移学习缩小主轴不同运行工况、不同健康状态表征的差异性，对主轴在加工中颤振、尺寸超差、刀具破损等异常状态进行准确辨识，实现复杂多变工况下加工异常状态监测的漏报率和误报率不高于 10%。

（四）智能主轴误差补偿与振动主动控制技术

研究控制器、作动器、主轴、切削过程之间的耦合关系，建立智能主轴切削颤振闭环控制系统，实现时变动态特性影响下智能主轴高速高效加工颤振的主动控制。将在线测量的切削力作为机器人结构刚度模型的输入，精确计算机器人末

端位姿误差并补偿，实现铣削轨迹精度和制孔定位误差小于 0.3mm。

三、应用市场

本项目研制的工业机器人配套智能主轴面向航天舱体、飞机蒙皮、舰船螺旋

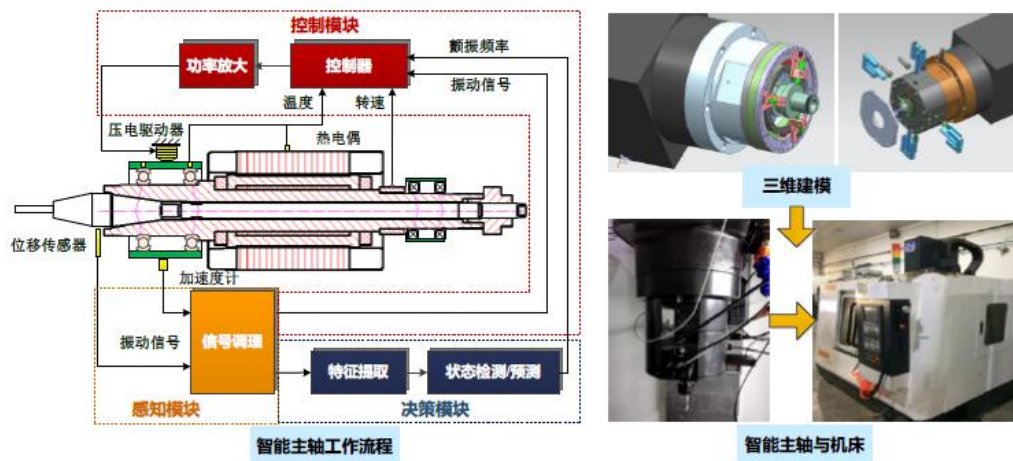


图 2 智能主轴原理样机开发

桨叶片等大型复杂零件高精高效加工。目前，这类大型复杂零件的加工主要依靠大型高性能多轴数控机床完成。大型精密机床非常昂贵，每台价格通常需要千万人民币，而且加工模式固定、配置复杂，通常不具备灵活性和并行加工能力，也不具备可重构性，难以形成加工-测量一体化系统。工业机器人将逐步成为大型复杂零件加工的主要手段。

2020 年，我国工业机器人运营库存增长了 21%，累计安装量超过 80 万台，新安装量超全球新安装总量的三分之一。全球加工领域机器人约为 5 万台左右，并连续两年保持超过 7% 的增长率不断增加。目前工业机器人在机械加工应用中多限于切边、去毛刺等轻载、精度要求不高的场合，鲜有应用于高精高效加工。本项目产品将在商用标准工业机器人的基础上，通过对主轴的智能化升级换代，解决工业机器人低精度、弱刚性与大型复杂零件高精高效加工之间的矛盾，具有广阔的应用和市场前景。

四、技术成熟度

☐ 概念验证 ☒ 原理样机 ☐ 工程样机 ☐ 中试 ☐ 产业化

五、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☐授权（许可） ☒面议