



普达迪泰(成都)智造研究院有限公司
PRODETEC (CHENGDU) INTELLIGENT MANUFACTURING CO., LTD

创 新 成 就 未 来
Innovation Creates Future

隧道环境自主运维机器人的关键技术

主讲人：郭瑞岩 时间：2022年10月24日





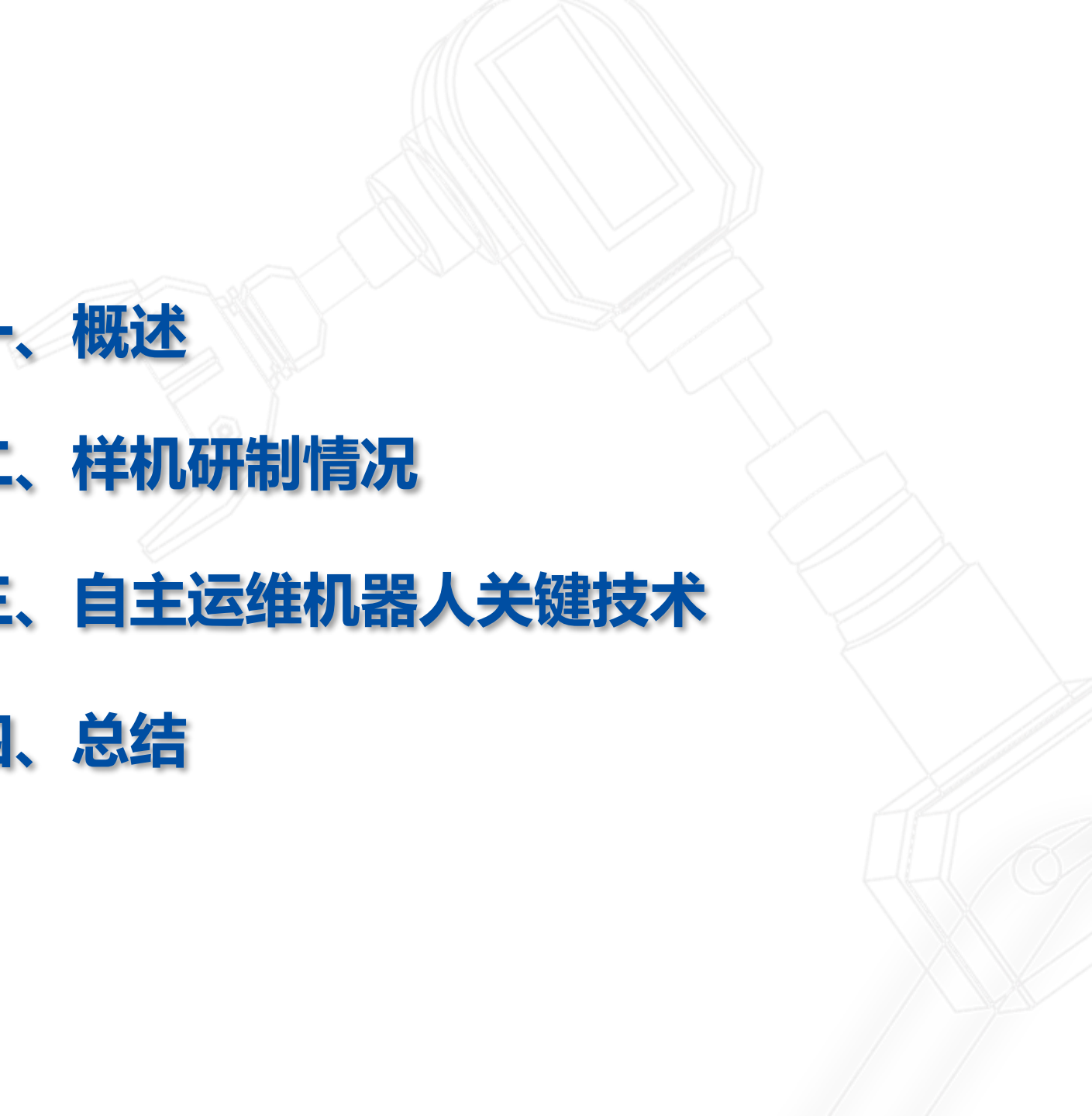
目录

一、概述

二、样机研制情况

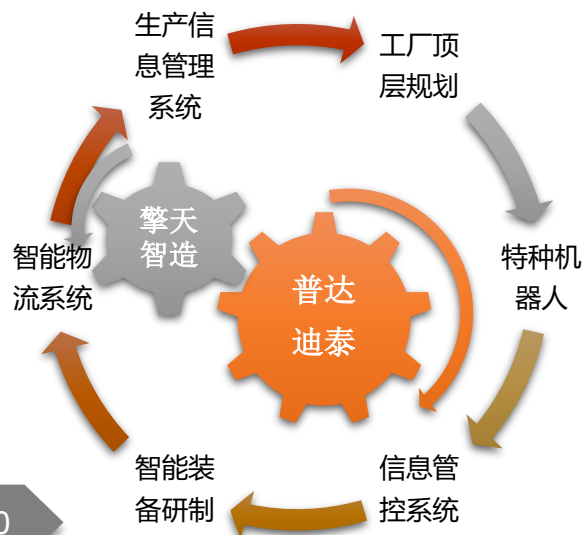
三、自主运维机器人关键技术

四、总结



2017年以来,为进一步推动技术转化、加强专业技术能力整合,普达迪泰于四川成都组建了智能制造技术团队—普达迪泰(成都)智造研究院,旨在为客户提供智能工厂顶层规划、信息管控系统、智能装备以及特种环境智能机器人等为核心的**智能制造领域一体化系统解决方案**。

普达迪泰(成都)参与研制了多套系列化的自主运维机器人,已在多个工程现场得到应用。在全向移动平台、高精度组合导航与定位技术以及基于手眼协作的自主测量和操作技术方面也开展了相应的研究并取得了一定的研究成果。同时,在超导腔加速器领域深度参与了多轴运动控制系统、全向移动机器人平台系统、摄影测量与定位控制系统等诸多课题研究与项目合作。



- SHINE自动维护机器人
- SHINE真空激光准直系统
- 超导腔场平坦度调谐机
- 超导腔电化学抛光装置
- 超导腔高压超纯水喷淋装置
- 垂直消能散器

多轴运动控制系统

集成控制系统

生产管理信息系统

全向移动平台研制

高精度组合导航定位

特种机器人研发



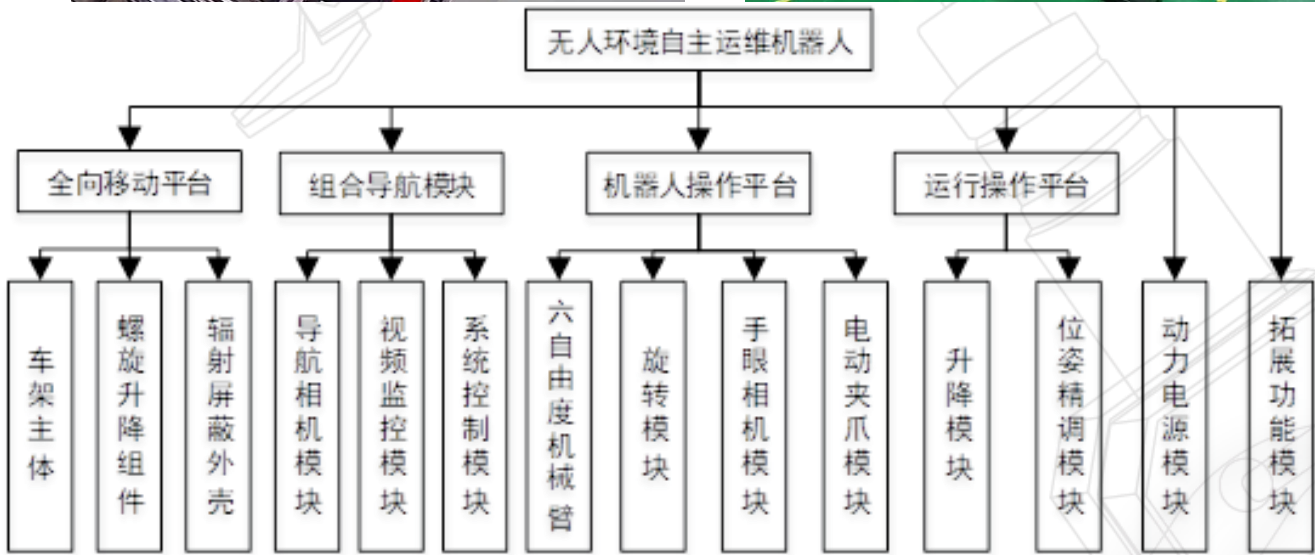
二、样机研制情况



二、样机研制情况

适用于隧道运维与巡检的无人操作机器人还处于研究和探索阶段。2020年，隧道环境无人自主运维机器人样机——SHINE自动维护机器人成功交付，是一台可以实现在**硬X射线自由电子激光装置SHINE**运行期间进行**自动化无人操作**的设备。

- 在运行期间对**固放功率源损坏插件**进行**自动化无人操作更换**；
- 在运行期间对隧道进行**巡检、束损剂量测量**和实时**图像传输**；
- 停机完成强排风换气后，对整条隧道**辐射剂量**进行**快速测量**。



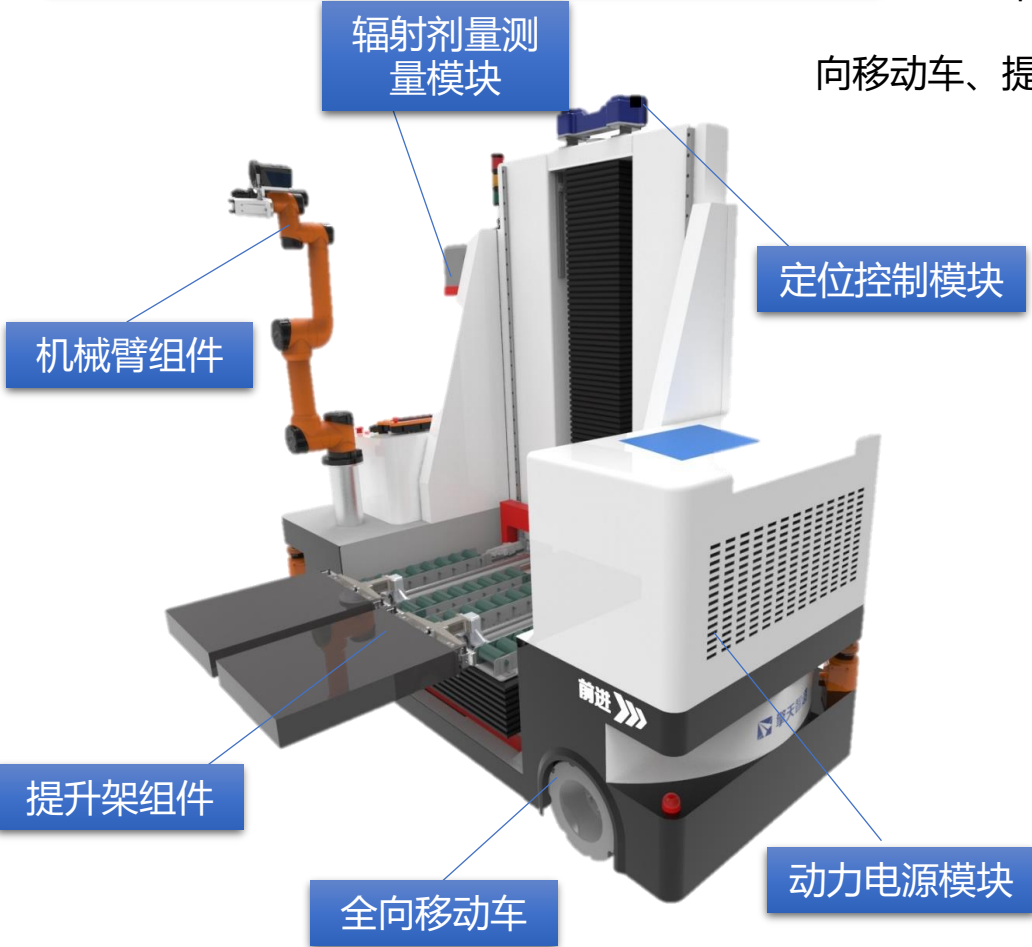
二、样机研制情况

➤ 自动维护机器人样机工作模式



➤ 自动维护机器人样机工作流程

2020年，隧道环境无人自主运维机器人第一台样机——**SHINE自动维护机器人**成功交付，由全向移动车、提升架组件、机械臂组件、定位控制模块、动力电源模块和辐射剂量测量模块 组成。



无人环境自主运维机器人样机

➤ 自动维护机器人样机现场演示

自动维护机器人样机采用融合隧道内摄影测量控制网的组合导航形式，具备全向移动和远程自主操作，在硬X射线自由电子激光装置运行期间执行**损坏插件更换、巡检、辐射剂量快速测量**等自主运行和遥操作任务。



无人环境自主运维机器人样机

➤ 技术指标及符合性

序号	要求项目	要求值	实测值	测试方法	结果
1	*整车尺寸	宽度<1m,高度<2m	宽度960mm, 高度2000mm	卷尺测量	符合
2	整车重量	<1000kg	960 kg	称重测量	符合
3	最小转弯半径	0m	0m	整车运动控制测试	符合
4	移动速度	0~1m/s	0~1m/s	整车运动控制测试	符合
5	*整车移动位置精度	≤±10mm	-5.6~7.1 mm	整车移动位置精度测试	符合
6	续航能力	≥8h	10 h	整车运动控制测试	符合
7	车架固有共振频率	≥300Hz	359.52Hz	分析计算	符合
8	*避障功能	各向≥200mm	四向均为0~2m避障区间	整车运动控制测试	符合
9	*整车运动方式	前行、横移、斜行、旋转及组合等方式	全向移动	整车运动控制测试	符合
10	*整车满足工作环境	高电离辐射和电磁辐射的工作环境	满足高电离辐射和电磁辐射的工作环境	辐射防护设计分析	符合
11	*插件更换平台定位精度	≤±0.5mm	-0.39~0.47	插件更换平台定位调姿精度测试	符合
12	*插件更换时整车稳定精度	≤±0.2mm	±0.2mm	整车运动控制测试	符合
13	*插件更换平台负载	40kg	100kg	极限负载测试	符合
14	*插件更换平台角度调节精度	≤0.05°	0.02°	插件更换平台定位调姿精度测试	符合

➤ 技术指标及符合性

序号	要求项目	要求值	实测值	测试方法	结果
15	*插件更换平台调整角度范围	-5° ~5°	-5° ~5°	基础功能测试	符合
16	*更换插件高度范围	500-1800mm	500-1800mm	基础功能测试	符合
17	*插件更换机构调整功能	插件更换末端执行机构应具有六自由度调整功能	插件更换末端螺钉旋拧机构为六自由度机械臂	基础功能测试	符合
18	*安全保护功能	保护插件、机柜及周围设备，过载保护	更换平台末端均安装有行程开关，插件更换过程力矩实时控制，激光雷达安全保护和防撞触边	安全功能测试	符合
19	更换机构固有共振频率	≥25Hz	42.917Hz	分析计算	符合
20	动力来源	直流电池	磷酸铁锂电池	—	符合
21	*自动充电功能	有	有	整车运动控制测试	符合
22	整车旋转最大速度	15° /s	18° /s	整车运动控制测试	符合
23	移动启停加速度	<0.3m/s ²	0.06-0.3m/s ²	整车运动控制测试	符合
24	*插件更换时视频监控及传输功能	有	具备视频监控及无线传输功能	安全功能测试	符合
25	*无线远程通信及遥操作功能	有	具备无线远程通信及遥操作功能	安全功能测试	符合
26	*关键易损部件更换备件	有	关键易损部件有更换备件	—	符合



三、自主运维机器人关键技术

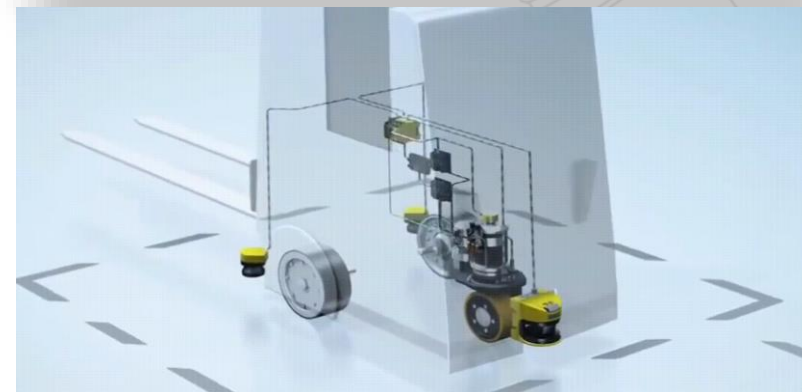
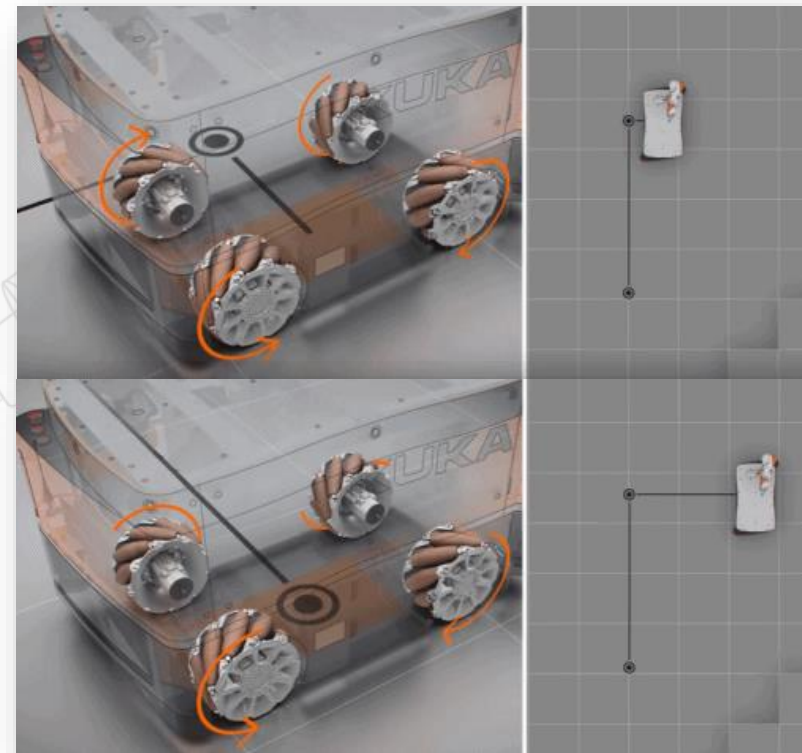
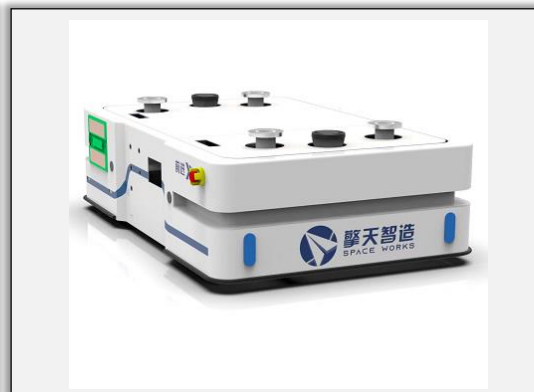
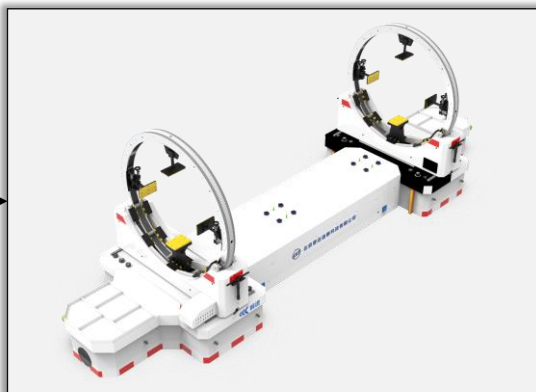
➤ 全向移动底盘技术

- 通过运用麦克纳姆轮、舵轮、差分轮以及差速轮等多种轮系模块，搭配不同的底盘架构，可以实现**运动底盘的全向移动**，适应隧道内狭窄通道。

麦克纳姆轮

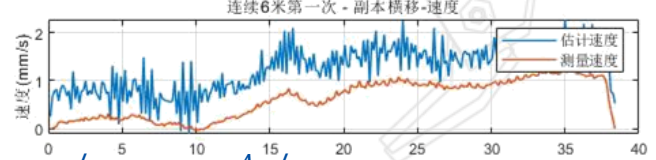
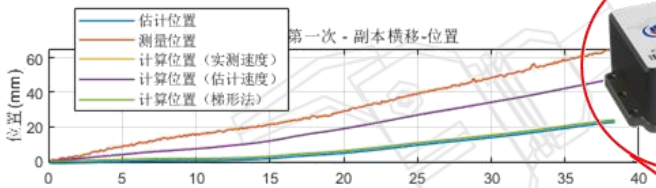
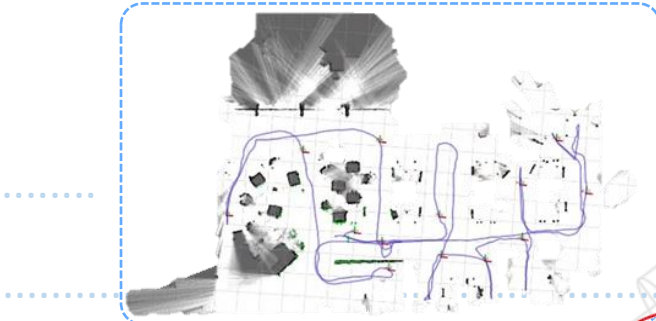


舵轮

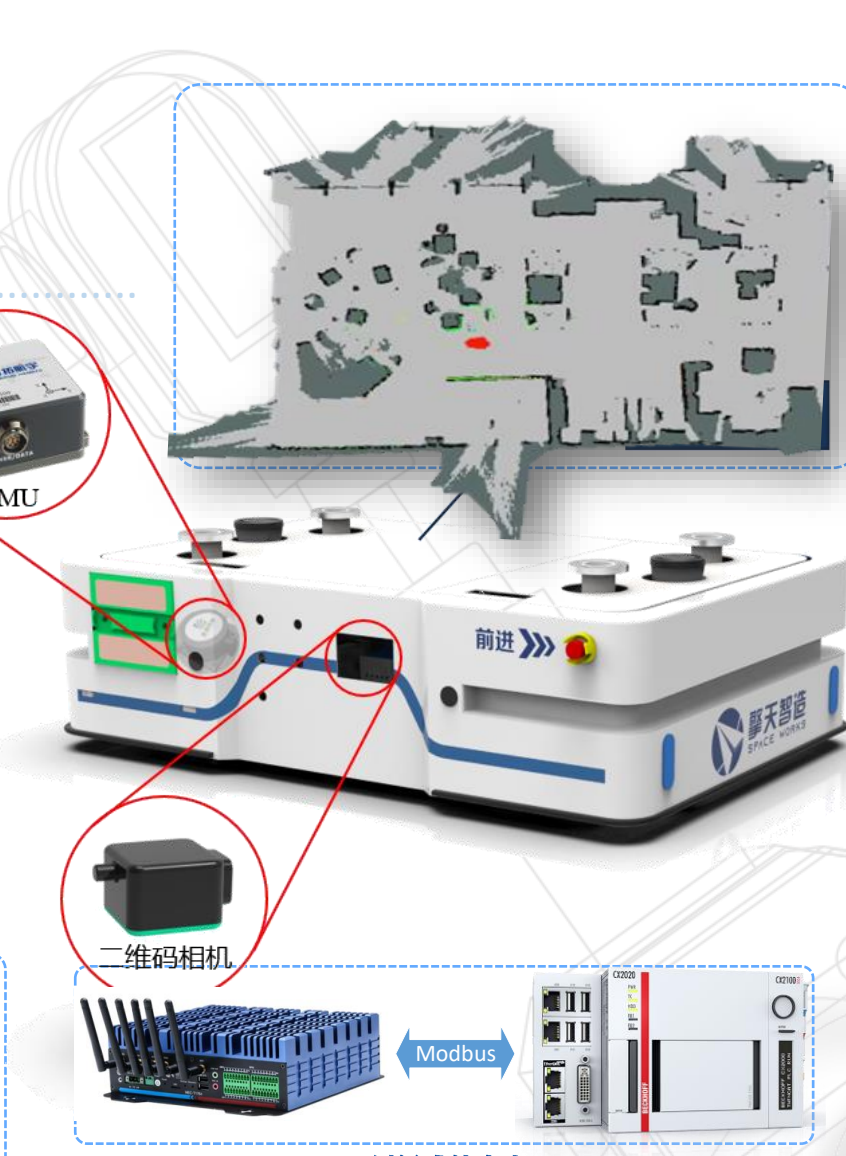
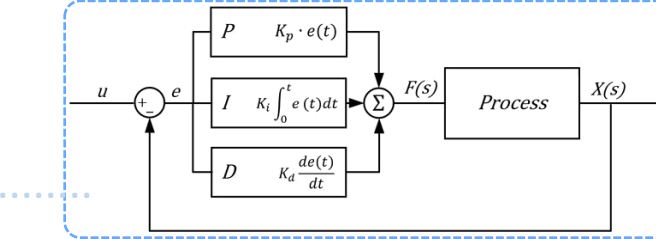


➤ 多传感器组合导航技术

摄影测量控制网	数据处理	
	地图与识别匹配	
	快速自主定位	
避障策略	避障范围自定义	
	雷达点云实时监测	
全局路径规划	路径点设置	
	插值算法	
	连续点连接规划路径	
PLC数据通讯	Modbus/TCP协议	位置模式
	自主导航模式	
局部轨迹跟踪	预瞄点跟踪	速度模式
	PID控制调节	



$$\begin{aligned}x/y_{(k|k-1)} &= Ax/y_{(k-1)} \\ P_{(k|k-1)} &= AP_{(k-1)}A^T + Q \\ K_k &= P_{(k|k-1)}H^T(HP_{(k|k-1)}H^T + R)^{-1} \\ x/y_k &= x/y_{(k|k-1)} + K_k(z_k - Hx/y_{(k|k-1)}) \\ P_k &= (I - K_kH)P_{(k|k-1)}\end{aligned}$$



多传感器组合导航技术

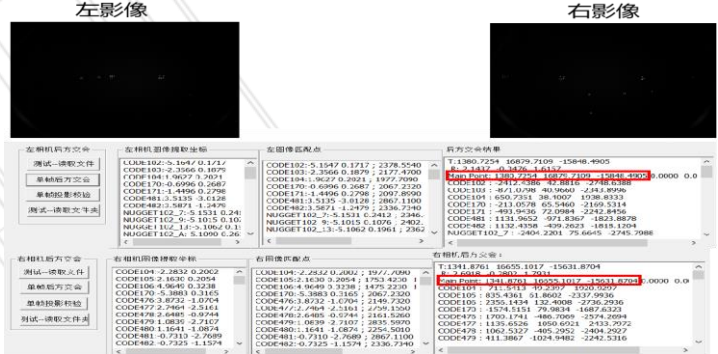
测试次数	拆螺钉1 误差 (mm)	拆螺钉2 误差 (mm)	引导更换 机构1误差 (mm)	引导更换机构2 误差 (mm)	装螺钉1误差 (mm)	装螺钉2误差 (mm)
1	0.234	0.421	0.345	0.114	0.175	0.317
2	0.471	0.287	0.412	0.254	0.254	0.145
3	0.169	0.398	0.217	0.332	0.401	0.136
4	0.224	0.417	0.269	0.385	0.152	0.241
5	0.354	0.347	0.354	0.414	0.340	0.325
6	0.411	0.125	0.422	0.421	0.411	0.354
7	0.336	0.452	0.158	0.114	0.385	0.271
8	0.117	0.179	0.442	0.333	0.276	0.306
9	0.487	0.332	0.326	0.369	0.266	0.428
10	0.269	0.347	0.378	0.212	0.211	0.449



手眼相机导航作业精度测试



摄影测量控制网

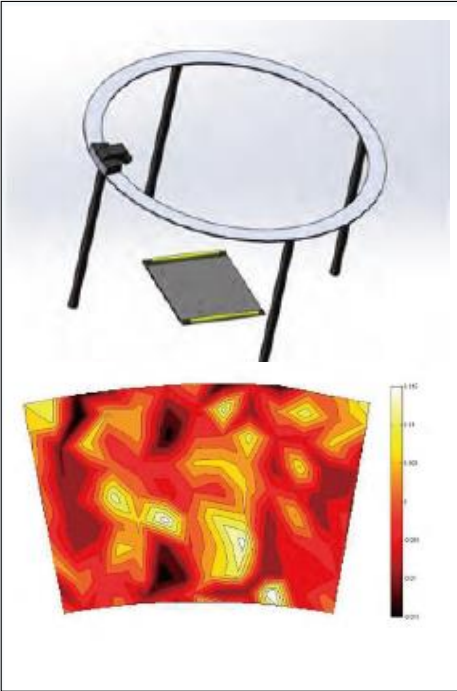


导航定位精度测试

测试次数	目标点(IDPMS测量值)			双目导航到位点			误差 (mm)
	X	Y	Z	x	y	z	
1	1436.214	15562.327	-12476.325	1435.398	15562.004	-12476.968	1.897
2	1465.547	15487.325	-12476.331	1466.278	15491.478	-12476.478	4.768
3	1532.478	16321.854	-12476.101	1536.698	16322.745	-12476.224	4.587
4	1365.554	14123.548	-12476.421	1369.447	14123.968	-12476.414	4.645
5	1654.246	15478.249	-12476.879	1658.365	15477.329	-12476.587	4.674
6	1554.879	14568.325	-12476.587	1556.784	14572.456	-12476.478	4.965
7	1469.245	15987.369	-12476.874	1466.217	15985.946	-12476.537	3.968
8	1654.759	14669.227	-12476.665	1655.447	14671.578	-12476.114	3.245
9	1554.745	14876.358	-12476.225	1554.894	14877.897	-12476.258	1.246
10	1651.025	16105.221	-12476.325	1654.285	16108.541	-12476.087	4.247

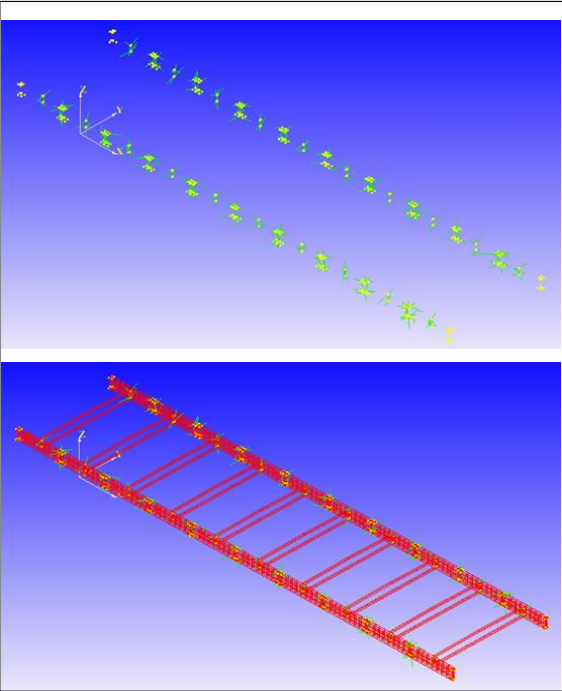
➤ IDPMS视觉识别、检测与定位技术

高精度三维测量技术



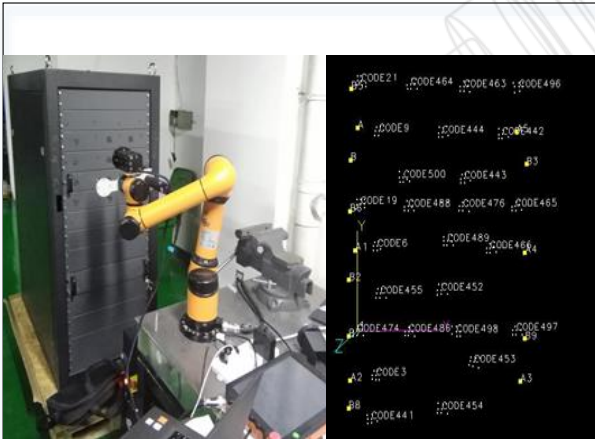
测量精度: 3um+3um/m
测量方式: 非接触测量
技术特点: 自动测量, 满足无配

数字化检测技术



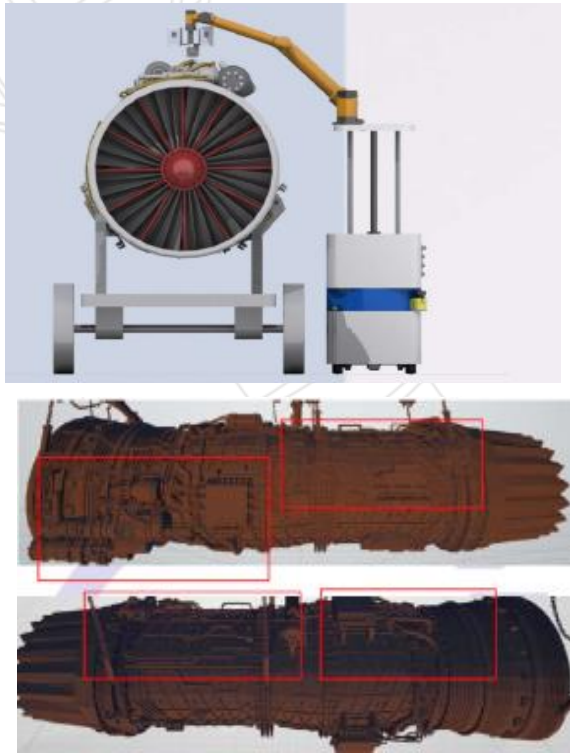
测量精度: 3um+3um/m
测量方式: 非接触测量
技术特点: 三维可视化显示, 多个杆件的组合拼装及精度分析, 精度分析报表输出

视觉识别与机械臂引导



序号	IDPMS 理论值 (mm)	测量值 (mm)	误差值 (mm)	相对误差
1	X ₀ -578.271	-578.636	0.365	0.00063
	Y ₀ -105.702	-106.024	0.322	0.00304
	Z ₀ 121.997	122.347	0.35	0.00286
2	X ₀ -415.398	-415.441	0.043	0.00010
	Y ₀ -105.333	-105.717	0.384	0.00364
	Z ₀ 125.918	125.881	0.037	0.00029
3	X ₀ -576.473	-576.459	0.02	0.00034
	Y ₀ -106.787	-107.192	0.41	0.00383
	Z ₀ 121.282	121.329	0.03	0.00024
4	X ₀ -585.97	-585.994	0.02	0.00034
	Y ₀ -105.475	-105.85	0.38	0.00360
	Z ₀ 118.473	118.528	0.05	0.00042
5	X ₀ -421.52	-421.567	0.04	0.00009
	Y ₀ -101.016	-101.439	0.42	0.00415
	Z ₀ 122.115	122.169	0.05	0.00040

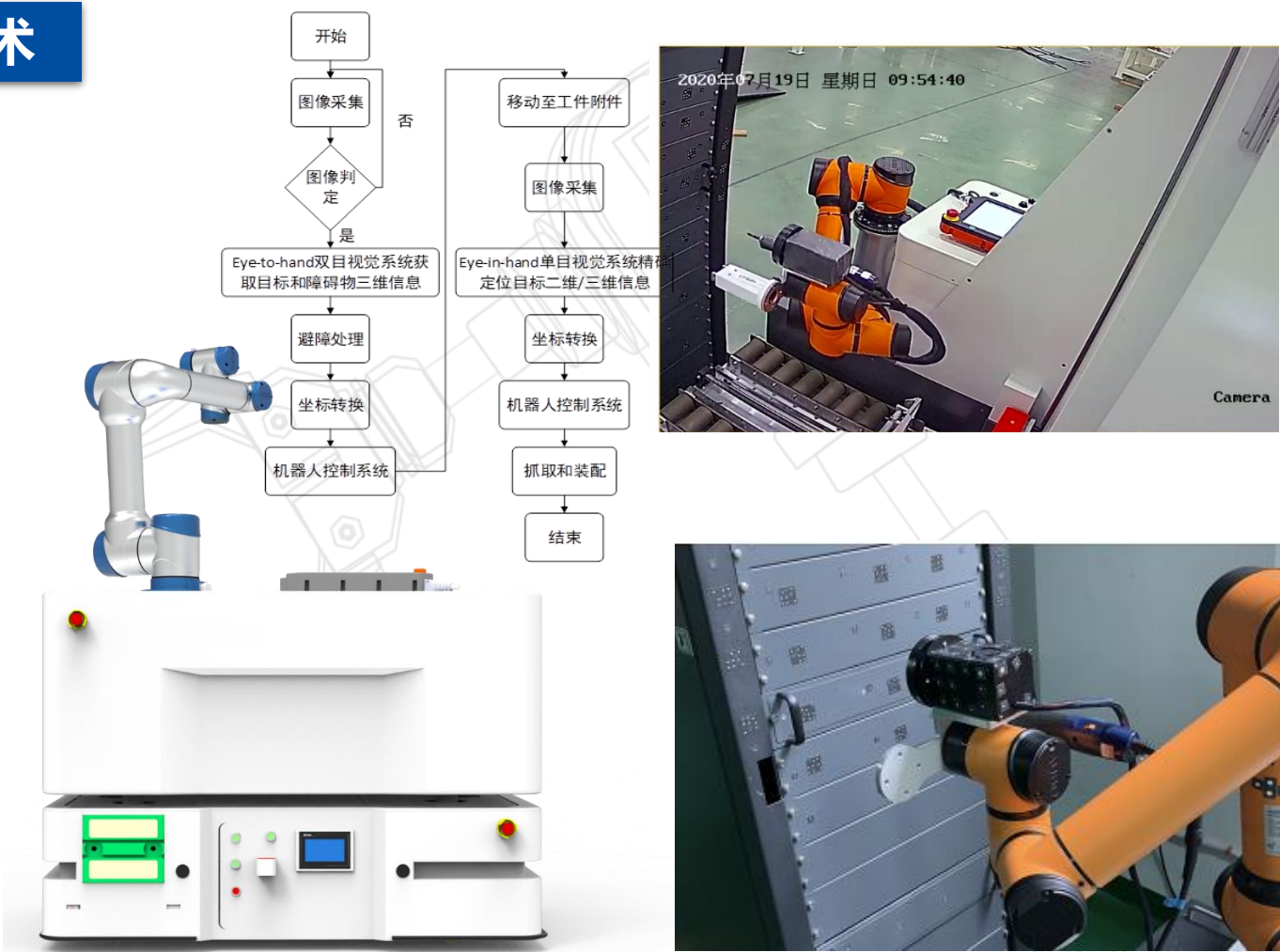
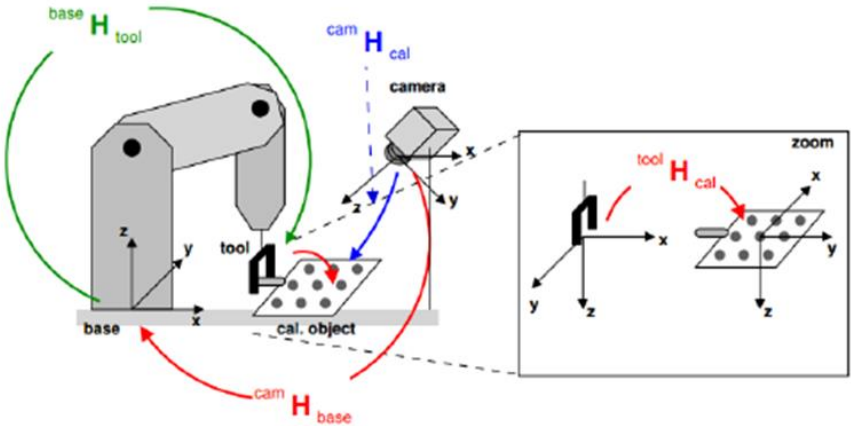
视觉识别与高精度定位



➤ 基于手眼协作的自主测量、定位和操作技术

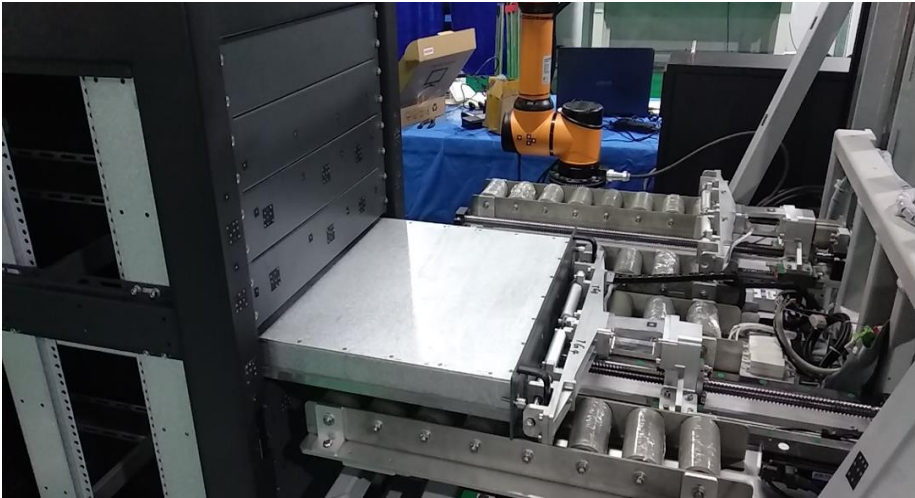
自主运维机器人通过机械臂末端携带的手眼相机对定位点进行测量评估，计算机械臂运动到位与目标点之间的差值，定位引导拆卸任务对象操作。

通过IDPMS摄影测量系统对定位点进行测量评估，计算执行机构到位点与目标点之间的差值，引导完成目标物的更换任务，实现**±0.5mm高重复定位精度**作业。

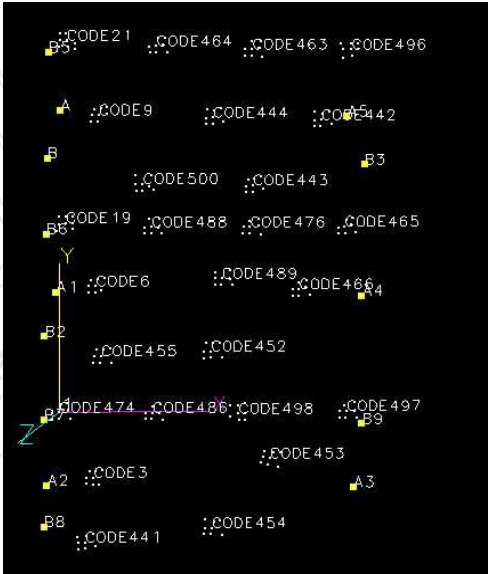


基于手眼协作的自主测量、维护和操作技术

➤ 基于手眼协作的自主测量、定位和操作技术



	序号	IDPMS理论值 (mm)	测量值 (mm)	误差值 (mm)	相对误差占比
1	X	-578.271	-578.636	0.365	0.00063
	Y	-105.702	-106.024	0.322	0.00304
	Z	121.997	122.347	0.35	0.00286
2	X	-415.398	-415.441	0.043	0.00010
	Y	-105.333	-105.717	0.384	0.00364
	Z	125.918	125.881	0.037	0.00029
3	X	-576.473	-576.459	0.02	0.00034
	Y	-106.787	-107.192	0.41	0.00383
	Z	121.282	121.329	0.03	0.00024
4	X	-585.97	-585.994	0.02	0.00034
	Y	-105.475	-105.85	0.38	0.00360
	Z	118.473	118.528	0.05	0.00042
5	X	-421.52	-421.567	0.04	0.00009
	Y	-101.016	-101.439	0.42	0.00415
	Z	122.115	122.169	0.05	0.00040

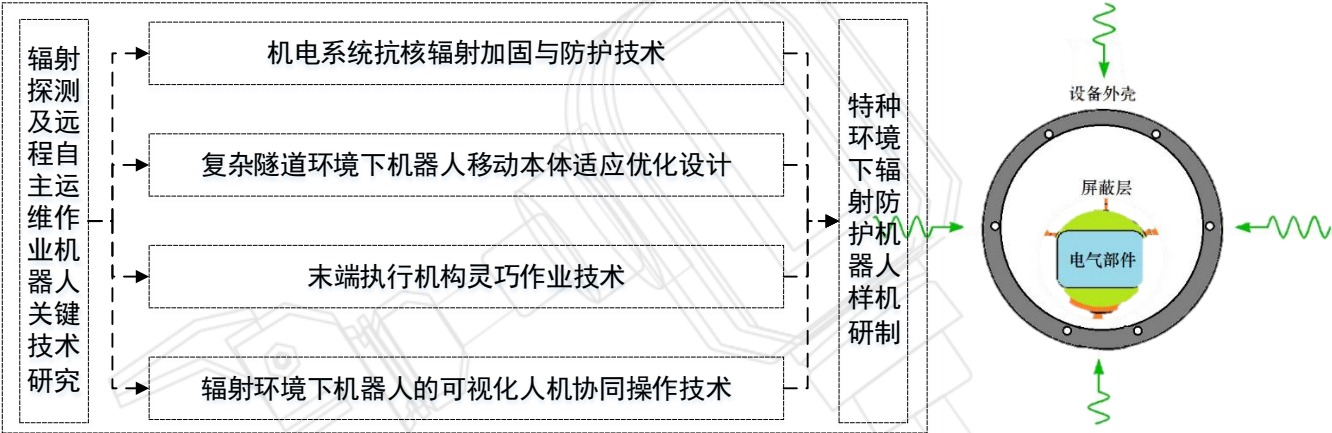


	序号	IDPMS理论值 (mm)	测量值 (mm)	误差值 (mm)	相对误差占比
1		-368.548	-368.254	0.29	0.000787
	2	-368.733	-368.254	0.47	0.001274
	3	-367.863	-368.254	-0.39	0.001060
	4	-367.942	-368.254	-0.31	0.000843
	5	-368.654	-368.254	0.40	0.001085

基于手眼协作的组件定位精度

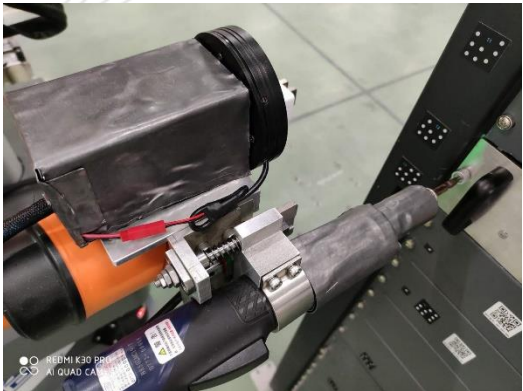
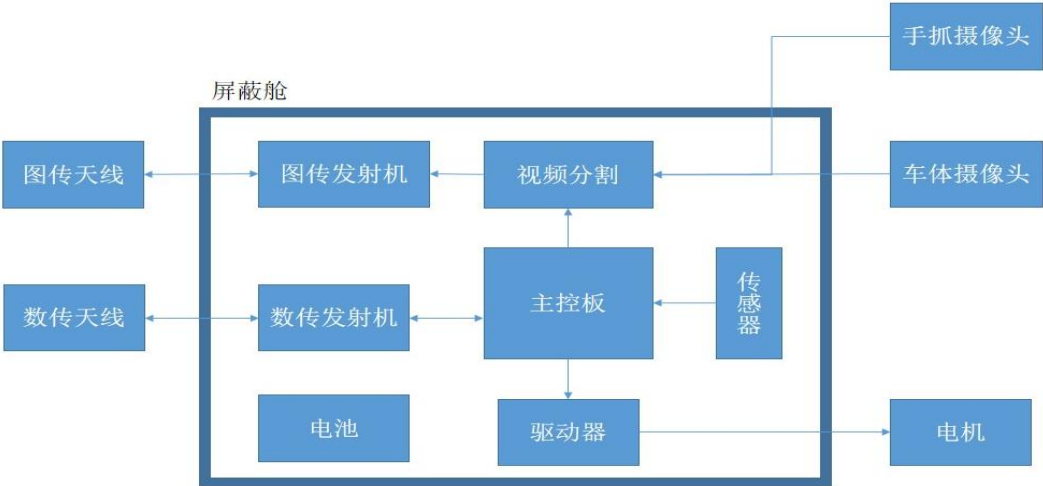
➤ 特种环境机器人辐射防护技术

- 机器人机电系统的**抗辐照加固**关键技术
 - 1) 抗辐射电子学研究
 - 2) 机电系统的辐射效应测试分析技术
 - 3) 系统抗辐照加固技术
 - 4) 多粒子屏蔽材料应用技术
- 运维机器人末端**执行机构灵巧作业**技术
- 辐射环境下机器人的**自主运维操作**技术



机器人辐射防护关键技术

屏蔽层结构



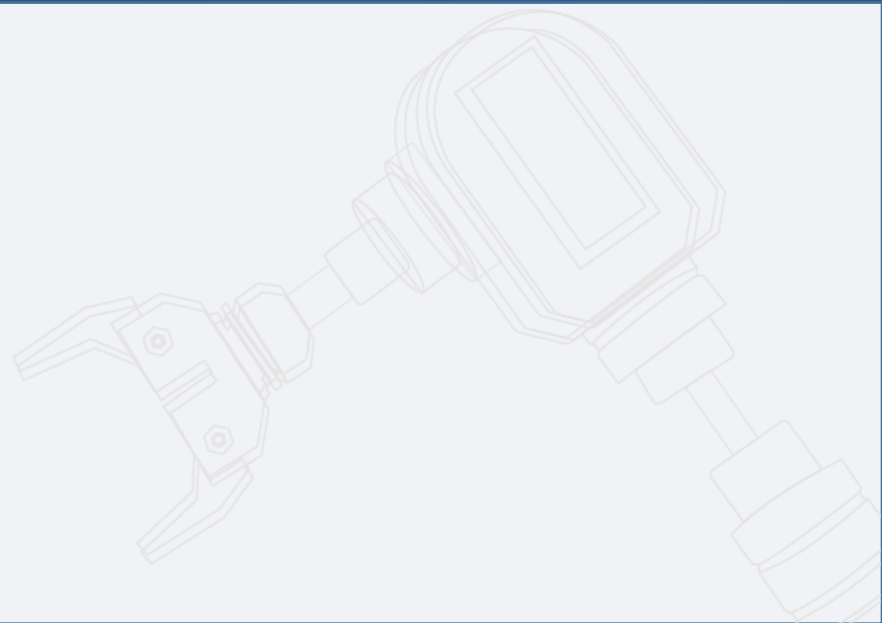
覆盖防辐射铅板



不锈钢金属壳体



四、总结



2022年工信部提出机器人行业新五年发展计划，计划通过推进创新科技发展，使中国成为全球机器人行业领路人，成为全球机器人技术创新策源地、高端制造集聚地和集成应用新高地。

自主运维机器人的发展时间还非常短，国内外在理论研究与实际应用上均存在大量空白，相关的产品设计在应用隧道的复杂环境上面，设计考量还需要进一步提升，在加速器领域隧道环境自主运维操作机器人的研制工作还需要不断结合实际进行更加深入的研究与试验工作。

- 模块化、标准化的**全向移动底盘技术**
- 结合摄影测量和惯性导航的**高精度、高可靠组合导航系统**
- 基于IDPMS摄影测量系统**视觉识别、检测与定位技术**
- 基于手眼协作的**自主测量、定位和操作技术**
- 辐射环境下**特种作业机器人防护技术**





普达迪泰(成都)智造研究院有限公司
PRODETEC (CHENGDU) INTELLIGENT MANUFACTURING CO., LTD

创 新 成 就 未 来
Innovation Creates Future

敬 请 指 导!

联系人: 郭瑞岩 联系方式: +86 13261675535

地 址: 中国 (四川) 自由贸易试验区成都市双流区
双兴大道1号B3-2

邮 箱: gry_spaceworks@163.com

