



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY



# 智能工业机器人操作系统 及应用探索

---

汇报人： 牛建伟

2023年8月12日

# 汇报内容

- **机器人操作系统发展及背景**
- 机器人+多核系统面临的挑战
- 机器人智能操作系统构建及应用
- 下一代机器人操作系统展望



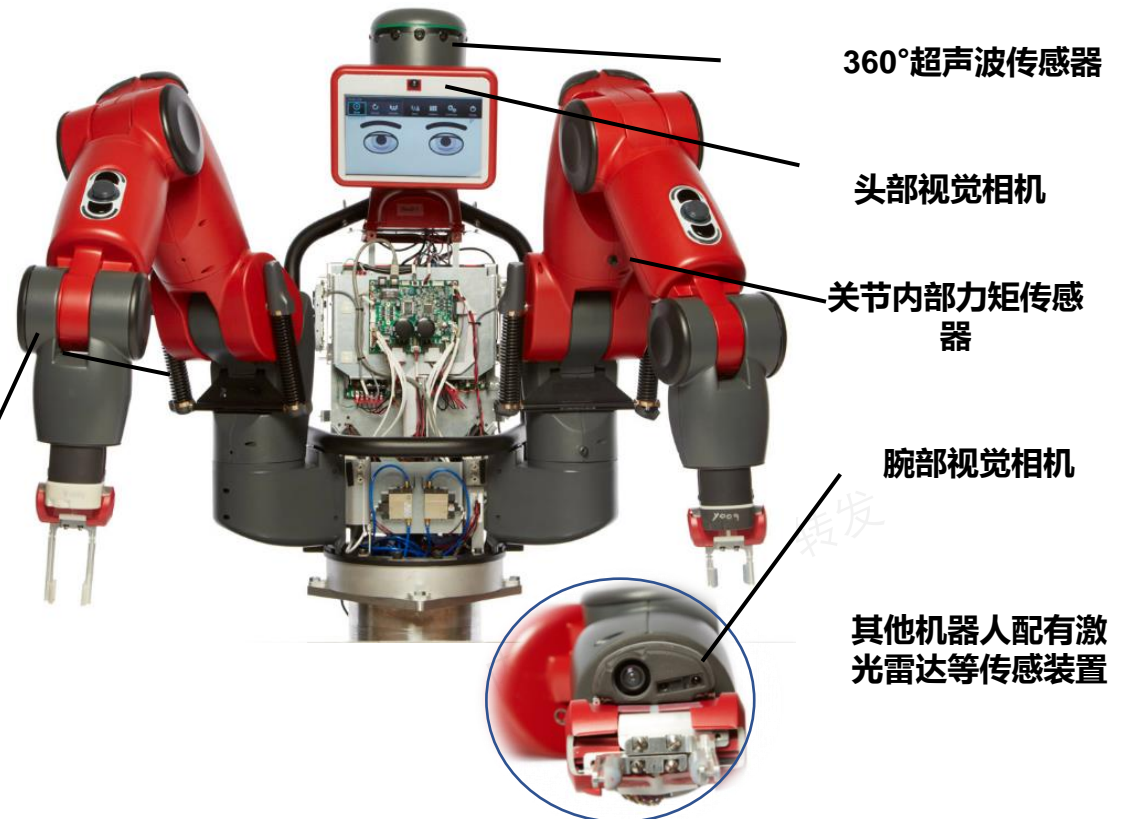
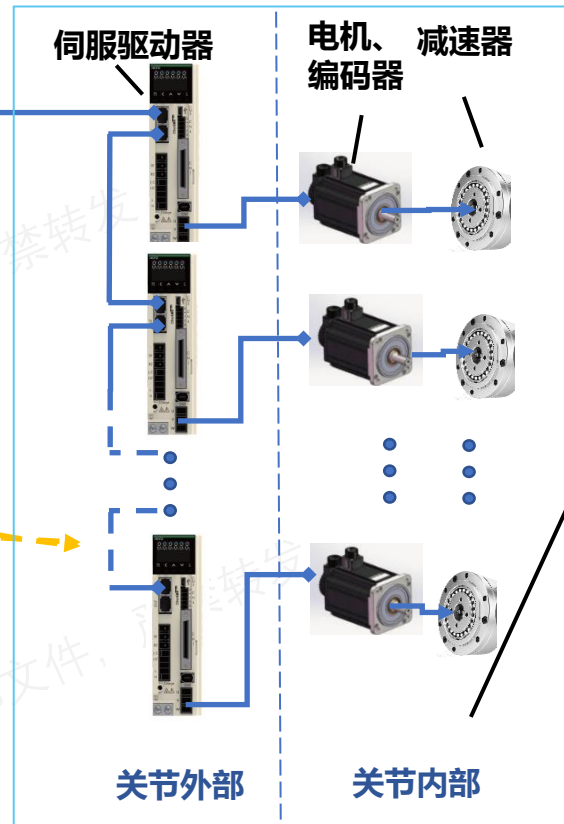
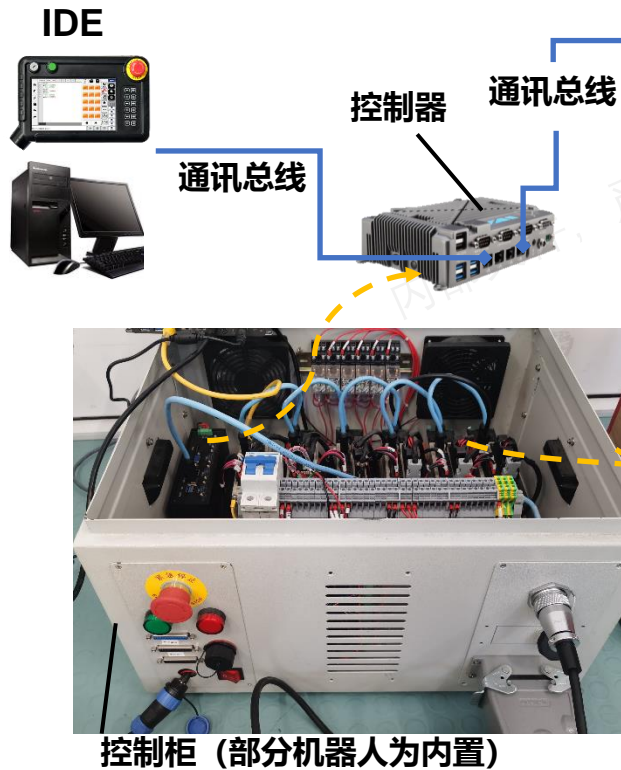
# 机器人行业的背景 (机器人构成)

**控制系统：** 机器人运动、控制、决策的关键系统为“机器人的大脑”。

**执行器：** 机器人通过关节旋转实现末端运动的驱动装置。

**本体：** 机器人内部机械零部件的承载构件，相当于“人类骨骼”。

**传感器：** 机器人采集外部环境、内部状态信息的单元。



智能机器人四大核心组成部件：本体、传感器、执行器、控制系统(含OS)



# 机器人操作系统发展背景

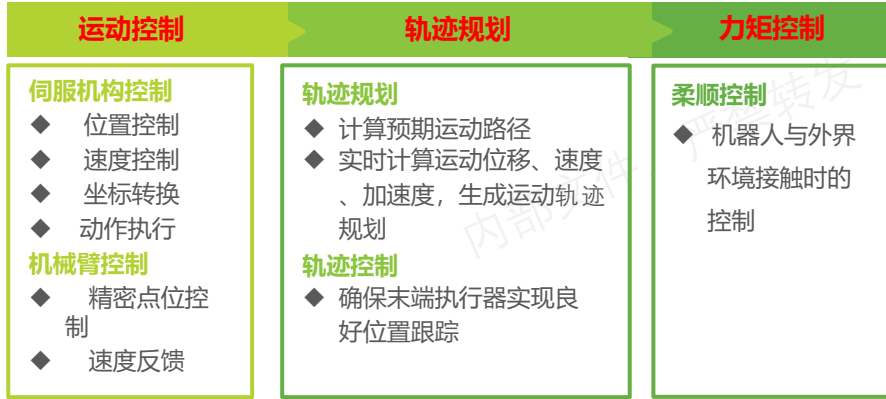
控制系统是机器人的大脑，传统控制系统仅为系统软件中间件，完成运动控制、轨迹规划等。而面对集成控制硬、软件需求，需要提出**智能机器人操作系统**。

**融合OS内核 + 分布式通信机制 + 标准化功能组件 + 智能化 + 一体化集成开发环境的新型系统**

传统控制系统  
仅为软件中间件

集成控制硬件、软件  
推进控制系统智能化需求

智能机器人操作系统



### 传统控制系统面临难题

#### 依赖精确数学模型

- 控制系统的设计与分析依赖已知系统精确的数学模型
- 数学模型受限于实际系统的复杂性、非线性、不确定性及不完全性，精确性有偏差

#### 遵循严苛假设

- 假设与实际并不完全吻合

#### 系统复杂，成本增加

- 通过复杂化集成提升系统性能，但设备成本及维护费用相应增高

### 控制系统需求

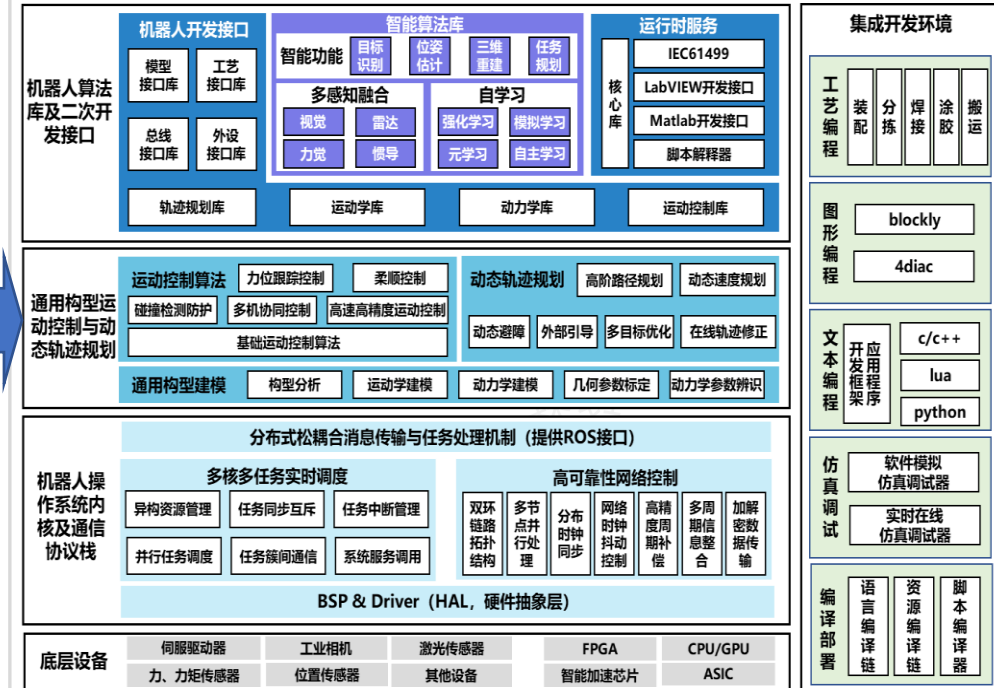
- 集合控制硬件、软件与人工智能，推进控制系统智能化
- 融合自动控制学、信息科学、系统科学与AI，完善智能控制

### 智能系统特点

- 具备学习、抽象、推理、决策能力
- 适应环境变化
- 自动完成任务
- 数学模型+知识系统

### 内置智能算法

专家控制系统 + 模糊控制系统 + 神经网络控制 + 学习控制系统 = 集成智能算法

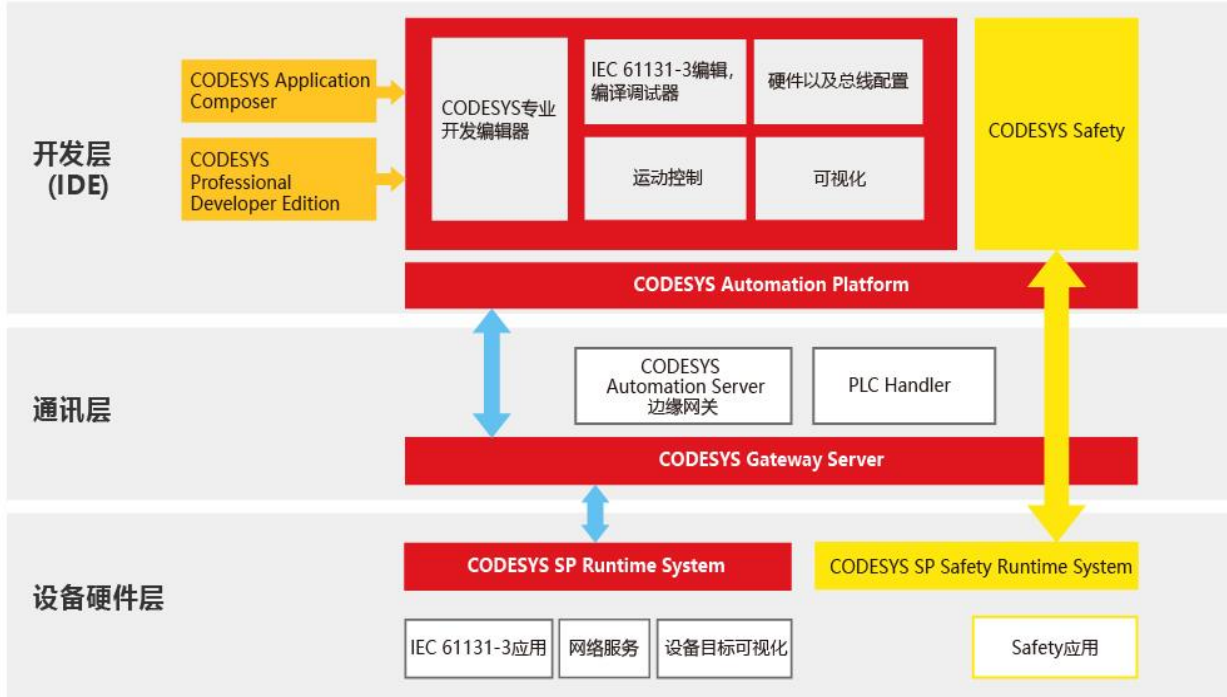






# 机器人操作系统现状

## CODESYS：典型的工业机器人系统方案

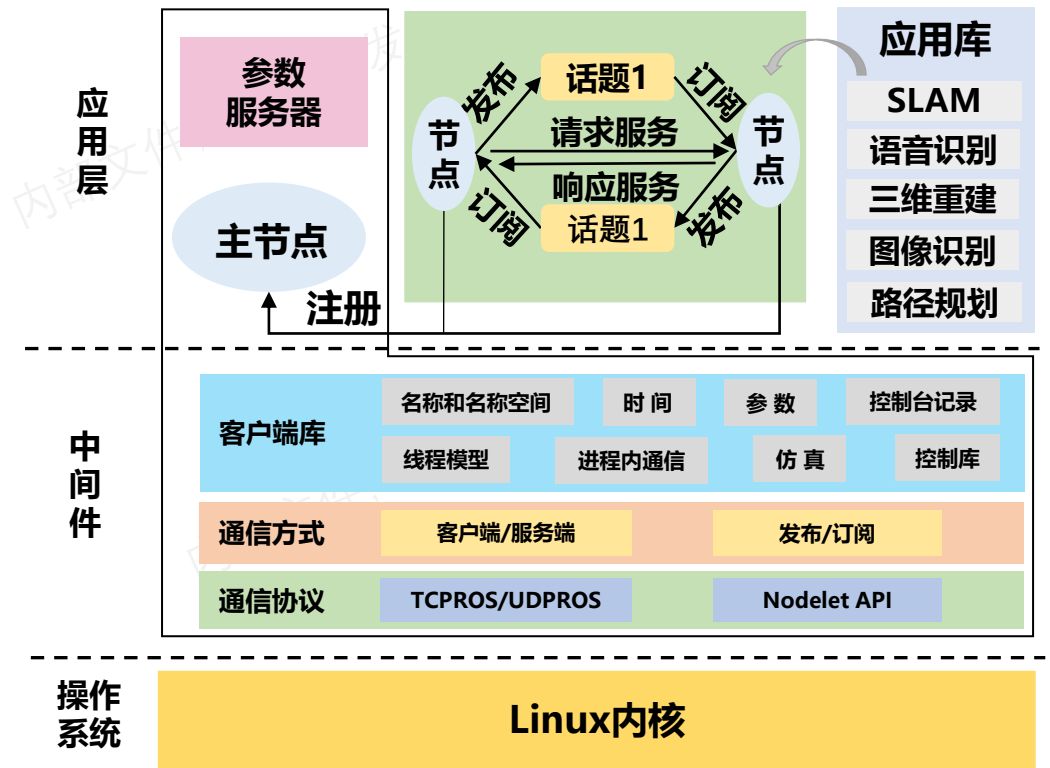


VXWork/Xenomai Linux/RT-Linux/RTOS/.....内核

## 传统工业机器人系统

- ✓ 实时性好、稳定性强
- ✓ 提供了配套的集成开发环境 (IDE)，包括编辑 (文本和图形化)、编译、仿真和 (单步、断点和回退) 调试
- ✓ 工业领域商业大规模应用

## ROS 机器人开源软件ROS架构



VS

## 服务机器人操作系统

- ✓ 通过解耦 (PUB/SUB) 的分布式方式提供了丰富的机器人相关第三方软件开发工具, 支持仿真和离线编程等功能
- ✓ 具有完善的开发工具链, 已形成机器人软件技术生态
- ✓ 软件可靠性和成熟度高, 在教学科研领域应用多, 在工业界应用较少

注: ROS仅仅为机器人中间件, 并非完整的机器人操作系统



# 机器人操作系统现状 (工业机器人系统)

品牌

操作系统构成

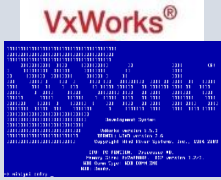
系统软件

应用编程语言

主要业务

代表产品及特性

**KUKA**



KRL

**系统集成+  
本体**

KUKA的新一代控制器KRC4

**ABB**



RAPID

**控制系统+  
机器人辅助系  
系统集成方案**

离线编程软件、IRB系列机器人、控制器等

**FANUC  
Robotics**



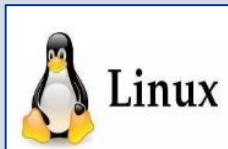
KAREL

**数控系统+  
机器人产品及  
系统**

LR Mate系列装配机器人、C系列、M系列物流搬运机器人等

OR

**YASKAWA**



VAL

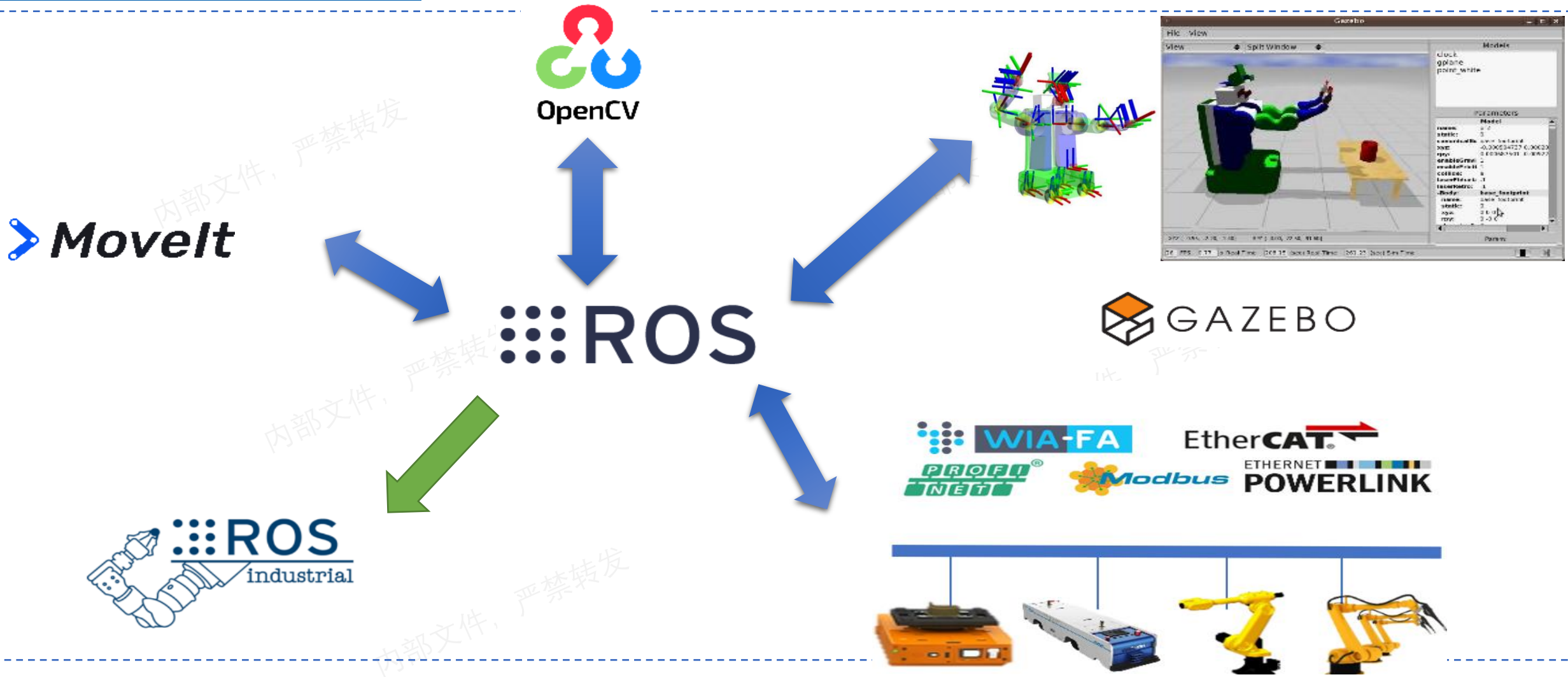
**伺服+机器人  
运动控制器、  
机器人本体**

GP、VA、MA、MFL、MFS系列搬运、码垛等机器人

**四大家族机器人 (工业机器人) : 运行稳定、实时性好、控制精度高**



# 机器人操作系统现状 (服务机器人系统)



服务机器人厂商首选ROS：利用分布式机制实现节点间进程通信的松耦合框架，软件包丰富、代码可重用率高，逐步成为研发领域的事实标准



# 机器人操作系统趋势

## 国内处于战略攻坚阶段

- 国内机器人OS：主要是基于Linux等操作系统研发机器人中间件，不同企业、同一企业不同部门各自为政，互不兼容、无法跨平台，运行稳定性、工艺开发难度高，对硬件平台支持的扩展性差
- 在非结构化环境下：工业机器人对环境感知能力弱、人机协作柔顺性差，智能化程度低



工业机器人软件运行欠成熟，智能化程度较低



不适用于实时性要求高的工业场景

行业共同诉求：研发开放性好、跨平台、强实时、智能化的工业机器人OS

实时OS内核 + 分布式通信机制 + 标准化功能组件 + 智能化 + 一体化集成开发环境



# 汇报内容

- 机器人操作系统发展及背景
- **机器人+多核系统面临的挑战**
- 机器人智能操作系统构建及应用
- 下一代机器人操作系统展望

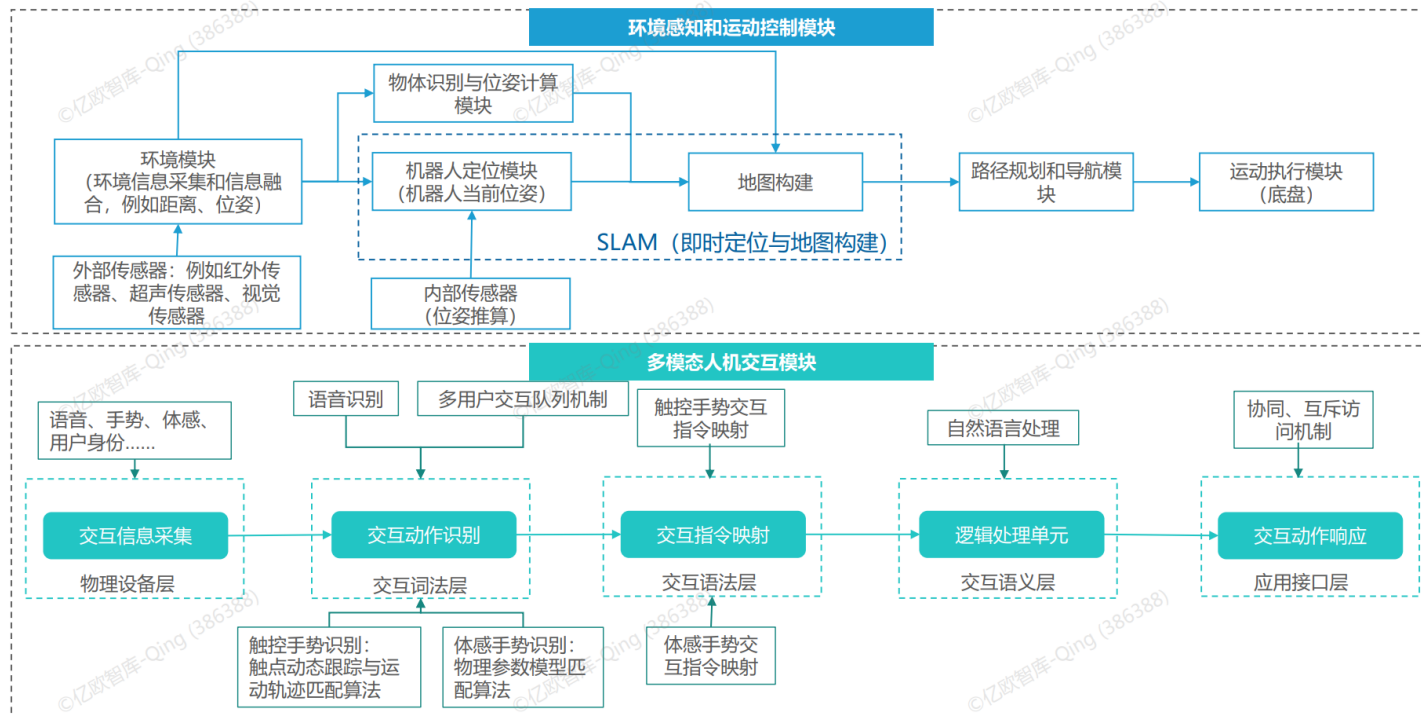
## ① 提升基础算力，构建复杂应用

——机器人面临越来越复杂的场景，非机构化或半结构化场景，需要更强算力支持

运动控制：动态避障、柔顺力控等

环境感知：地图构建、位姿计算、多模态感知融合等

人机交互：语音识别、指令解析、手势交互等



智能算法与工业技术融合催生新技术和新产品：

1. 智能避障等控制算法
2. 视觉装配、视觉码垛服务
3. 协作机器人智能抓取-开放式服务场景
4. 复合机器人智能应用
5. ....



智能避障



视觉装配



智能抓取



复合机器人

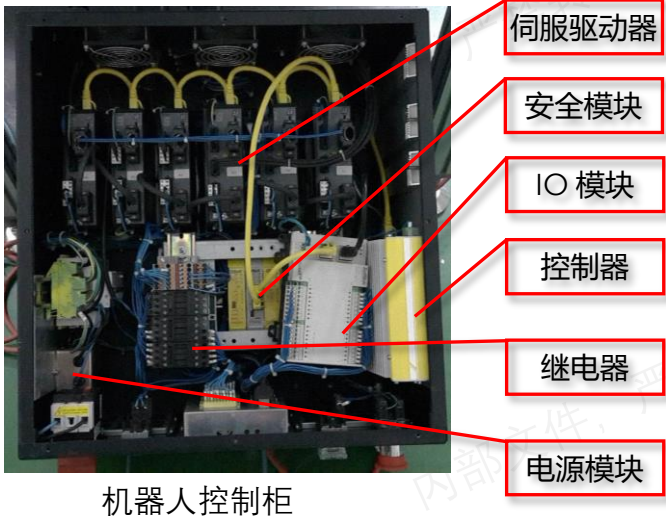


# 机器人为什么需要异构多核智能系统

## ② 解决“智能”与“实时”冲突问题

为满足智能化及实时性需求，通常采用网络分布式的系统解决

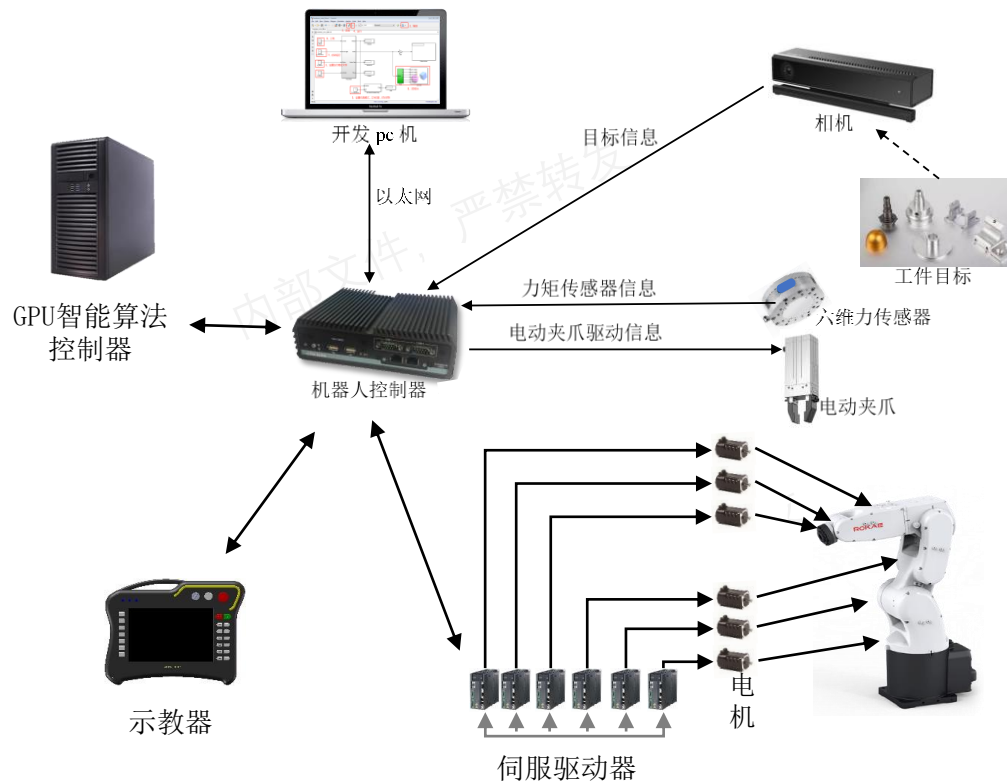
- GPU算力服务、实时控制系统分离
- 控制系统、驱动系统分离
- 控制系统、传感系统分离



分布式带来的问题：体积庞大、调试困难、维护部署复杂.....

为什么当前一块板卡完不成任务：

1. GPU程序的执行是非抢占式的，GPU的使用可能会导致优先级反转。
2. 当GPU使用存在竞争时，受阻的任务会占用GPU资源
3. GPU 驱动程序是为通用操作系统，没有任务优先级的概念
4. GPU与CPU共用缓存会影响实时线程的响应



一个典型的智能机器人控制系统



# 机器人为什么需要异构多核智能系统

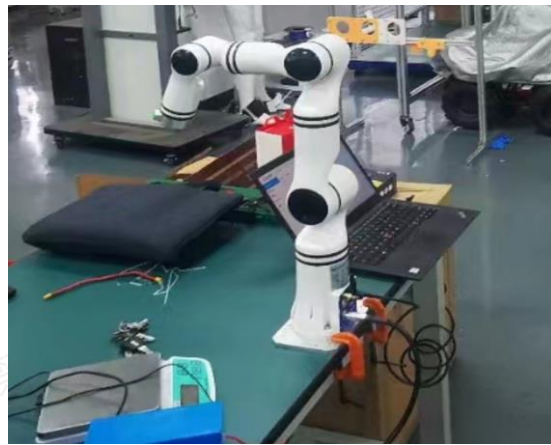
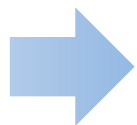
## ③ 实现高集成度

——在一块板子中，实现尽可能多的功能

去掉控制柜、去掉示教器、实现一体化关节、实现驱控一体……

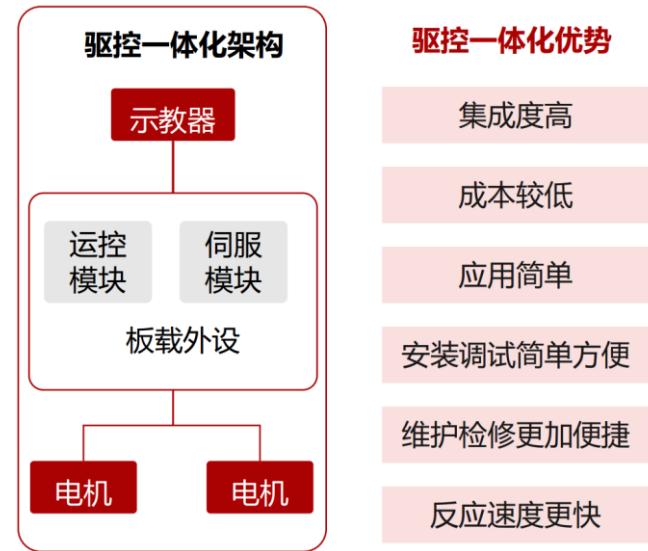
1. 示教器和控制器能否集成？ Windows/Android + RT-Linux ？
2. 控制器和驱动器能否集成？ RT-Linux + RTOS ？

机器人体积 ↓ VS 智能化能力 ↑

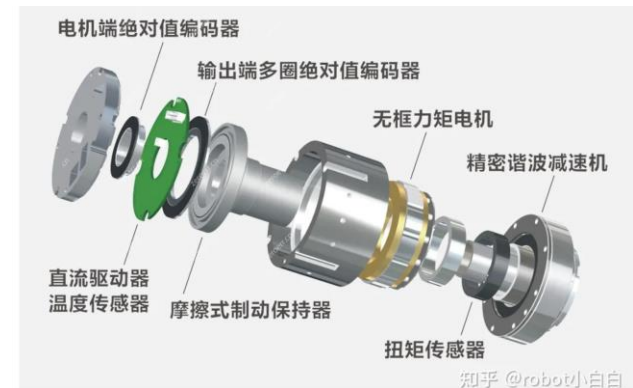


实现关键零部件的整合，是机器人轻量化的有效途径

- 驱控一体技术，将控制与驱动部分进行集成，可以完成对多个伺服电机的闭环控制和驱动



- 国产零差云控一体化关节，eRob70F直筒型，无刹车版本，最小高度60.4mm



# 人们需要既“轻量化”、又“智能化”的机器人





# 构建下一代机器人操作系统的目标

## 目标

致力于打造“开箱即用”的机器人智能系统平台，协同开源社区力量，建立从操作系统内核、控制库、开发工具等全套工具，打造机器人软件基础底座，解决共性问题。

## 内容

高可靠、强实时、跨平台、组件化、开放式、智能化、安全性

### 1 高可靠、强实时内核

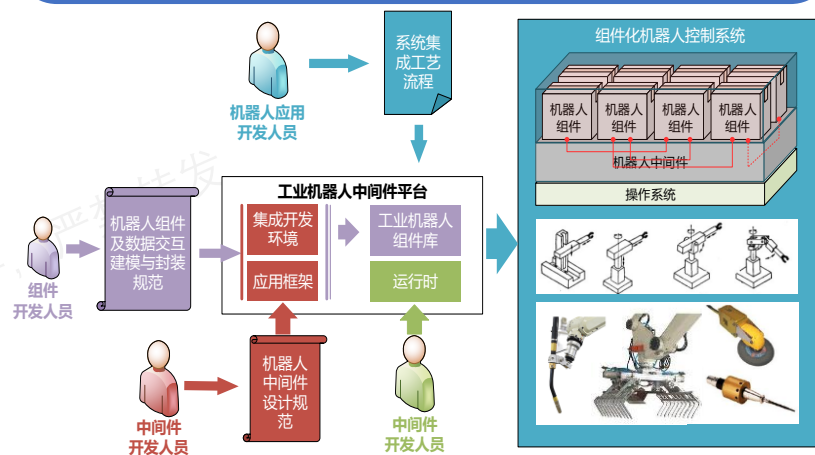
研发国产实时操作系统内核，提升操作系统实时性、稳定性，保证现场“万无一失”。



伺服传感器及相关外设支持

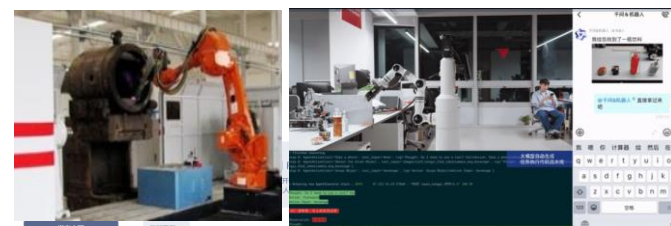
### 2 跨平台、组件化、安全性

开发一套机器人集成开发环境，完成机器人常用组件研发，实现对不同机器人型号的兼容。



### 3 开源开放、智能、安全

建立机器人社区及成果发布平台，培育国产机器人技术开放生态，利用开源推动机器人产业发展。



# 汇报内容

- 机器人操作系统发展及背景
- 机器人+多核系统面临的挑战
- **机器人智能操作系统构建及应用**
- 下一代机器人操作系统展望

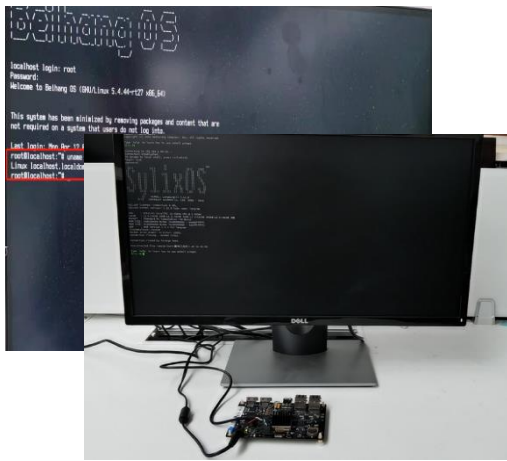


# 机器人智能操作系统（需要支撑的软件环境）

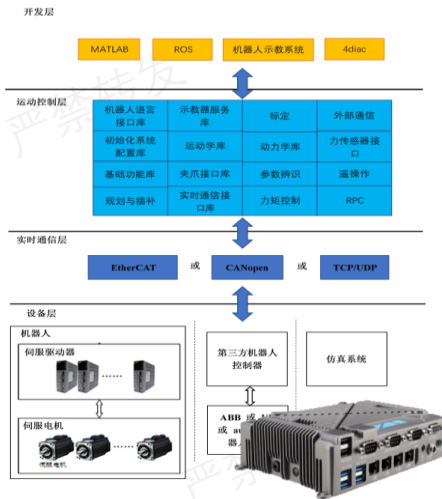
- Robot Kernel: 机器人底层实时环境、总线
- Robot Brain: 机器人系统控制库核心组件、运行时服务等
- Robot Admin: 机器人在线管理、配置工具
- Robot Studio: 机器人集成开发、调试环境、模拟仿真、数字孪生
- Robot Cloud: 云端算法分析、工艺仓库等



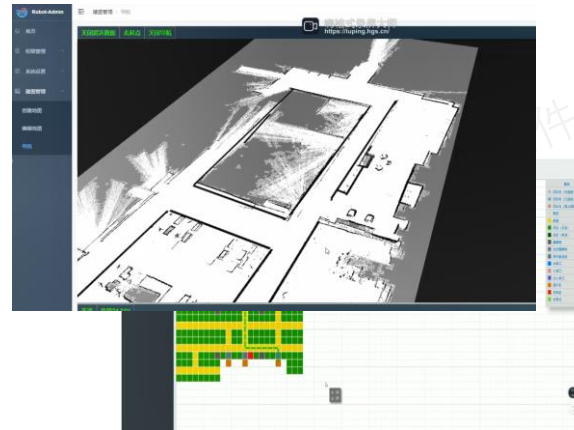
云端数据监控及分析平台



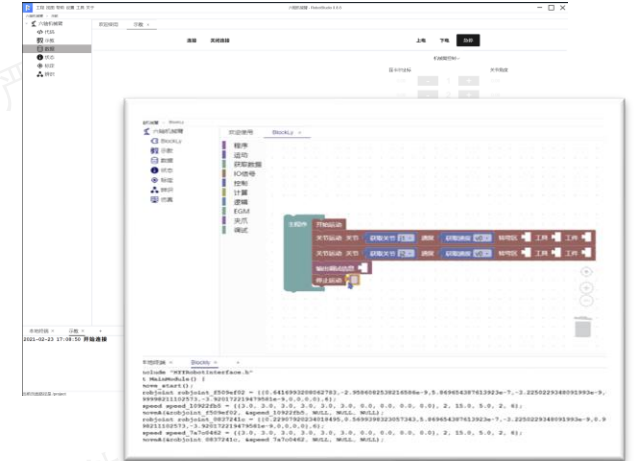
操作系统内核



机器人控制库



机器人管理配置及调度工具



机器人开发调试工具

研发全栈式工业机器人智能系统，从底层到上层应用提供“开箱即用”的完整解决方案



# 对操作系统内核实时性的需求

- 当前国内主流方案为基于Preempt-RT补丁的linux系统，其最大中断延迟约60us (Intel I5 4核)，可支撑1ms的EtherCAT通信周期
- openEuler操作系统内核实时性优化，中断延迟测试（中断平均延迟小于1 μs，最大中断时延10 μs），可支撑250 μs的EtherCAT通信周期
- 德国 acontis 数据通信周期在特定情况下可达100μs，日本安川 mechatrolink III 数据通信周期最高可达31.25μs

操作系统	EtherCAT周期通信最大时延偏差	Cyclictest时间周期最大中断时延
OpenEuler Embedded	11.8 us	10us
RT-Preemt Linux	33 us	28us

中断时延实时性测试对比（24小时不间断测试）



新松60轴+360点IO控制测试平台（测试多轴同步及稳定性）

实时性是保障多轴同步的关键，决定了机器人控制精度的上限，也是通信保障稳定性的基础





# 实时性保障的方案：支持软、硬实时操作系统内核

## 多核实时调度优化

### 1. 动态调整软硬实时核的物理核 (Core) 映射关系

- 硬核处理强实时任务 (运动控制等)
- 软核处理弱实时任务 (智能算法等)

### 2. 多任务并行调度优化

- 内核实时调度设计
- 实时任务优化

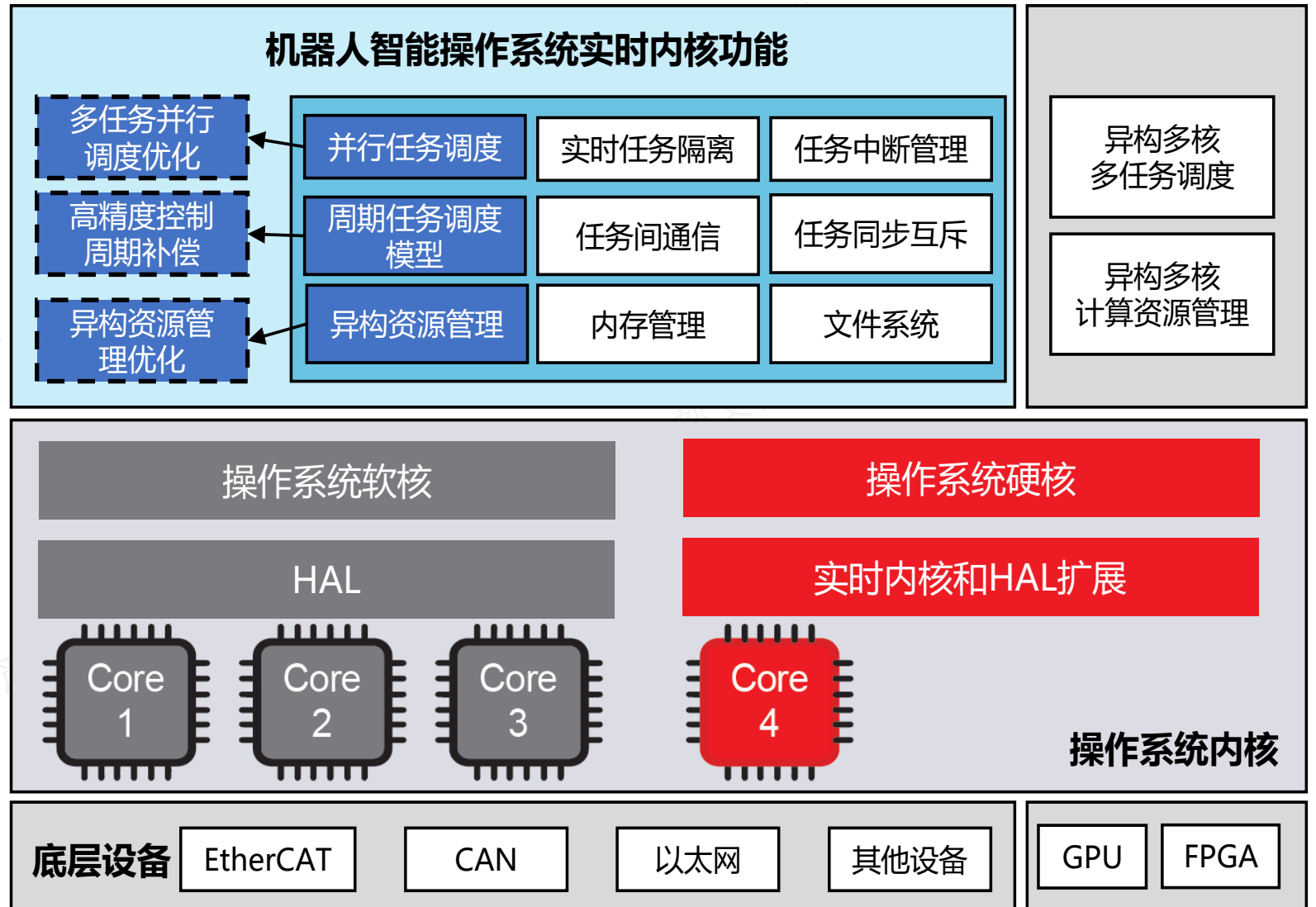
### 3. 高精度控制周期补偿

- 任务周期动态补偿
- 时钟周期闭环调整

### 4. 异构资源管理优化

- 封装异构智能计算资源
- 统一调用接口

## 面向多任务实时调度的软硬实时双OS内核架构图



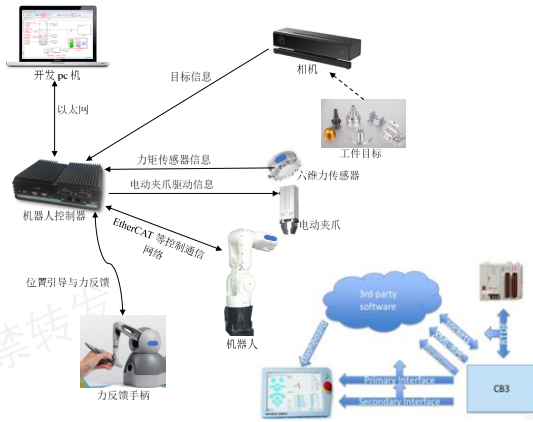


# 对机器人运动控制库的支撑

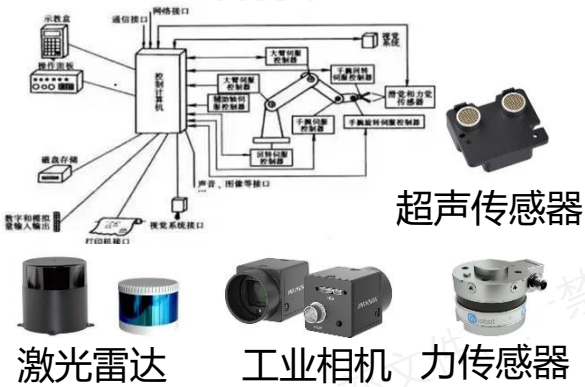
## 面向不同功能的多层面二次开发接口与典型工艺应用二次接口

Meaning	Unit	Number of values	Size in bytes	Comment col.	Notes
Message Size		1	4	Total message length in bytes	
Time					controller was started
g target					
qd target					
qdd target					
t target					
M target					
q					
qd					
qdd					
t					
M					
Tool vector					Tool: (x,y,z,rx,ry,rz), where rx, ry and rz is a rotation matrix in Cartesian coordinates
TCP speed actual					Tool Center Point (TCP)
TCP force					Force of the tool: (x,y,z,rx,ry,rz), where rx, ry and rz is a rotation matrix in Cartesian coordinates
Tool vector target					Tool: (x,y,z,rx,ry,rz), where rx, ry and rz is a rotation matrix in Cartesian coordinates
TCP speed target					Tool Center Point (TCP)
Digital input bits					Digital inputs, NCR inputs, NCR outputs encoded as int8_t, e.g. a bit
Motor temperatures					Motor temperatures
Controller Timer	double	1	8	93	Control system time
Test value	double	1	8	94	A value used by Universal Robots
Robot Mode	double	1	8	95	Robot mode
Joint Modes	double	6	48	96-101	Joint control modes
Safety Mode	double	1	8	102	Safety mode
Tool Accelerometer values	double	3	24	103-111	Tool accelerometer values
Speed scaling	double	6	48	112-117	Speed scaling
Linear momentum norm	double	1	8	118	Linear momentum norm

### 面向多层面的二次开发接口



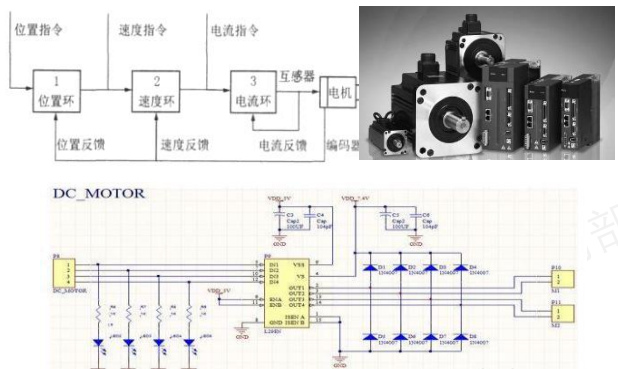
### 通信接口



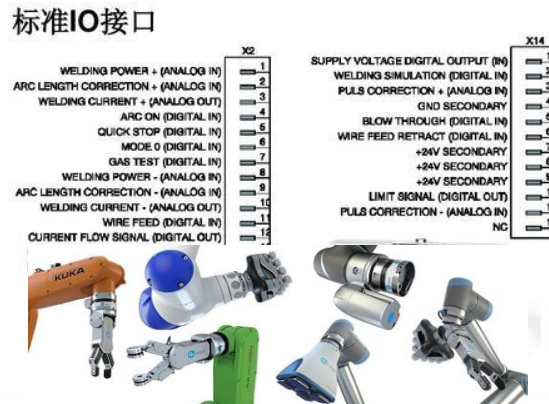
### 传感器接口

Robot1	+	-	设置	六自由度		
轴长/mm	380	340.4	347.4	90	-1.3	31.2
轴径/mm	0.57...	-2.29...	-1.14...	5.15...	-2.29...	3.1
轴径/mm	0	3	3	1	1	0
位置max/mm	-170	-95	-210	-170	-135	-3
位置min/mm	170	135	66	170	135	36
速度max/min	-330	-180	-330	-320	-318	-5
速度max	330	180	330	320	318	34
加速度max	-1800	-1500	-1800	-1800	-1000	-3
加速度min	1800	1500	1800	1800	1000	30
加加速度max/min	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5
加加速度max	5000	5000	5000	5000	5000	34
扭矩限制值	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	3
最大允许速度						
最大允许加速度						
最大允许加加速度						
平均	100000	100000	100000			
峰值	2000	2000	2000			

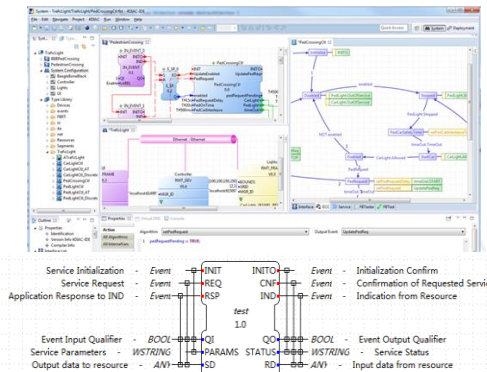
### 运动接口



### 伺服接口



### 外部IO接口



### 工艺模块定制接口封装



### 典型工艺包应用设置



码垛



打磨



## 机器人可视化集成开发环境架构

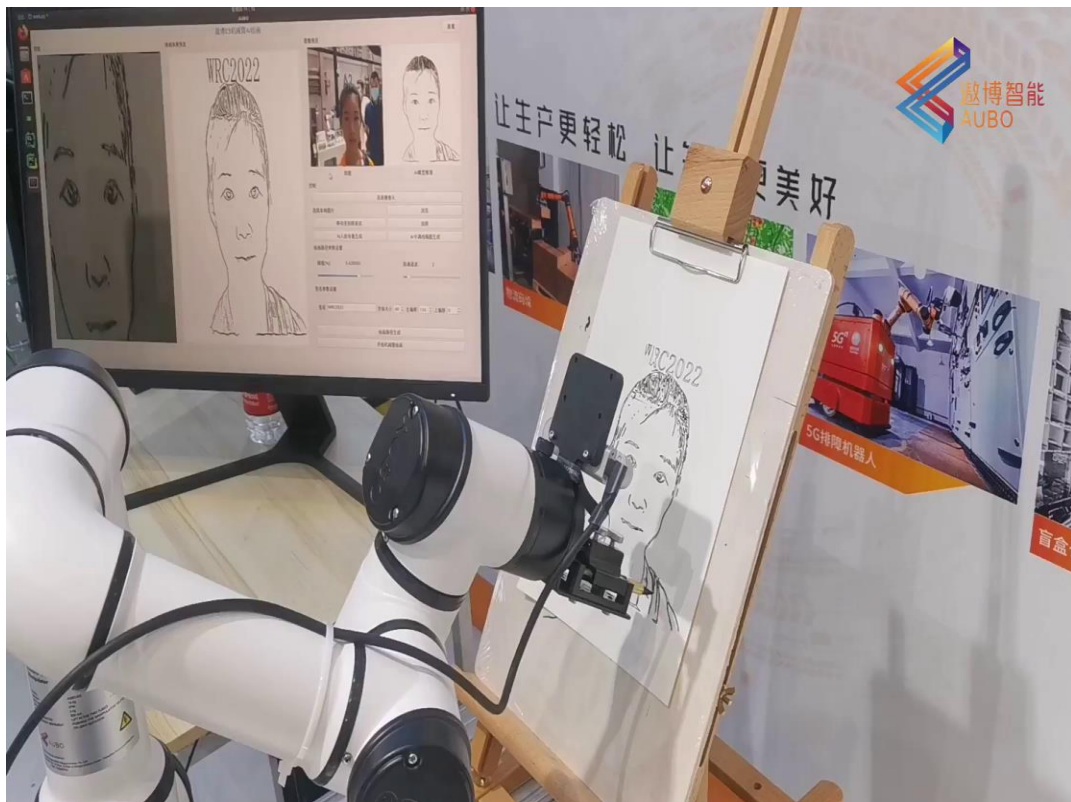
### 开发环境框架

- 文本编程
- 图形化编程
- 调试仿真
- 编译部署
- 机器人功能组件
- 工艺开发
- 离线编程接口
- 第三方开发环境
- 项目管理

### 机器人集成开发环境







协作机器人智能应用

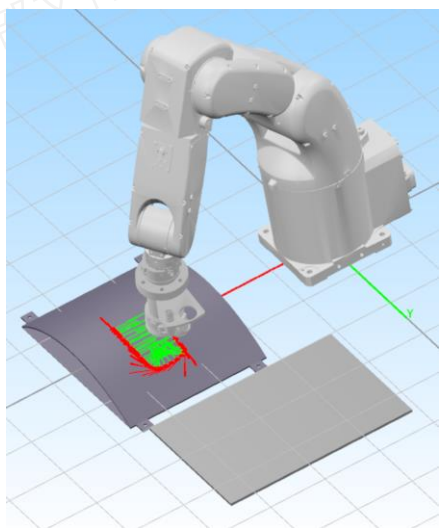
将**智能化技术与机器人控制技术**深度融合，采用轻量化的协作臂完成同时完成任务



复合服务机器人搬运展示

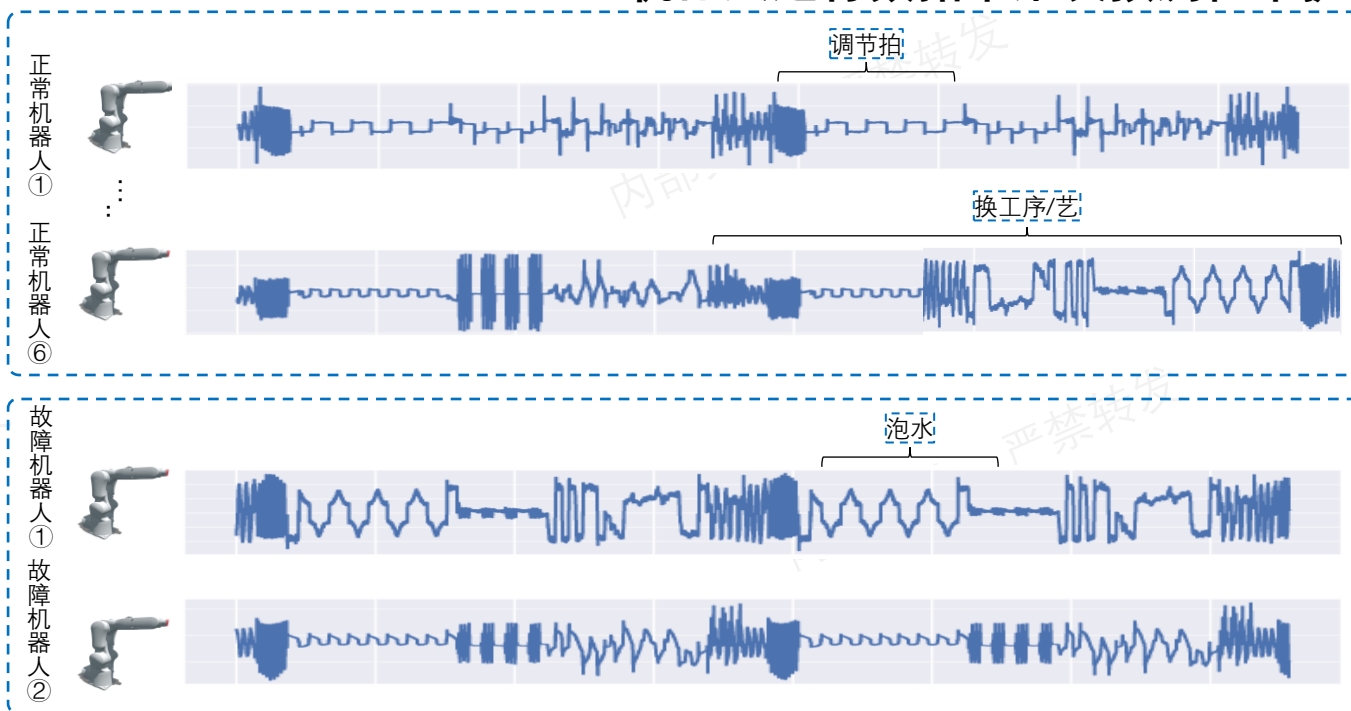
用一个控制板卡同时完成**移动机器人**（视觉算法、雷达点云处理、导航规划等）和**机械臂**的控制（实时通信、运动差补等）





- 边缘端数据采集程序能否与控制系统进行强隔离，**避免因网络安全问题影响机器人控制**
- 数据采集及控制等操作，在同一块板卡中可降低数据跨板卡传输带来的延迟

## 机器人运行数据采集及预测性维护



# 汇报内容

- 机器人操作系统发展及背景
- 机器人+多核系统面临的挑战
- 机器人智能操作系统构建及应用
- **下一代机器人操作系统展望**

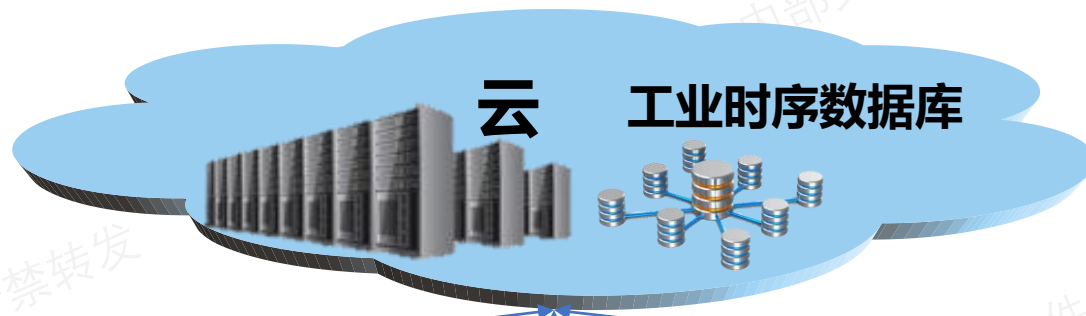


# 下一代工业机器人操作系统形态

工业互联网技术&工业机器人技术加速融合，网络化、智能化等新需求，带给工业操作系统升级新挑战。

**云-边-端系统平台：云平台-应用级运维、边缘云-任务级编排、端系统：控制级解算**

高可靠、强实时、  
跨平台、组件化、  
开放式、智能化、  
安全性



**端：单机部署，多机协同难**



**边：互不兼容，统一管理难**



**云：业务云化、智能化程度低**





# 下一代工业机器人操作系统形态

## 大模型技术加持下的垂直行业发展，会为机器人带来新的交互方式革新

### RT-2横空出世！谷歌：让我们更接近机器人的未来

🔗 播报文章



创业天下官方平台

2023-07-31 14:01 陕西 | 西安创业天下网络科技有限公司官方账号

关注

还记得2022年年底谷歌机器人团队公开了一款名为Robotics Transformer 1 (RT-1) 的多任务模型。该模型可以实现高效推理，为机器人实时输入和输出动作。比如命令机器人拾取和放置物品、打开和关闭抽屉、将物品放入和取出抽屉、将细长的物品直立放置、敲倒物体、拉出餐巾纸和打开罐子。700多项动作指令配合97%的成功率让人们切实地体验到了机器人的强大，并对未来智能有了更美好的设想。

### 阿里云正在实验将千问大模型接入工业机器人，可以用钉钉远程指挥机器人工作

🔗 播报文章



鞭牛士

2023-04-27 17:47 | 鲲鹏计划获奖作者

关注

鞭牛士 4月27日消息，据科创板日报消息，在第六届数字中国建设峰会上，阿里巴巴董事会主席兼CEO、阿里云智能集团CEO张勇透露，阿里云工程师正在实验将千问大模型接入工业机器人，在钉钉对话框输入一句人类语言，可远程指挥机器人工作。

### 华创派 | 梅卡曼德与汉堡大学张建伟院士实验室携手探索机器人多模态大模型



华创资本

2023-06-03 10:49:17 发布于北京 华创资本官方账号

关注

梅卡曼德与汉堡大学张建伟院士实验室达成合作协议，共同致力于机器人多模态大模型的研究与创新。在当今大模型技术迅猛发展的时代，具身智能正逐渐成为人们关注的焦点。梅卡曼德始终致力于研发最先进的智能机器人技术，深知实现真正智能化的关键在于机器人的多模态能力。



- 复杂语义理解
- 开放环境感知
- 动态任务规划

### 华为盘古大模型演示Demo

机器人对开放环境的适应能力将大幅度提升





## 持续研发机器人套件

持续探索研发新一代工业机器人操作系统内核、控制算法、以及开发工具，形成Robot Kernel/Brain/Studio/Admin/Cloud系列产品。

## 持续完善机器人OS生态

继续推动机器人操作系统开源社区建设，推动相关代码、文档开放，完善机器人操作系统生态建设

## 协同并进推动产业发展工作

协同零部件及底层技术供应商，协同推动国内机器人技术产业链生长，推动国内机器人产业发展。

持续推动建设**我国开源开放的机器人软件技术生态链**，推动国内机器人厂商底层基础软件开放共享

敬请批评指正



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

牛建伟  
李青锋（助理）

[niujianwei@buaa.edu.cn](mailto:niujianwei@buaa.edu.cn)  
[liqingfeng@buaa.edu.cn](mailto:liqingfeng@buaa.edu.cn)