

合肥工业大学智能制造技术研究院

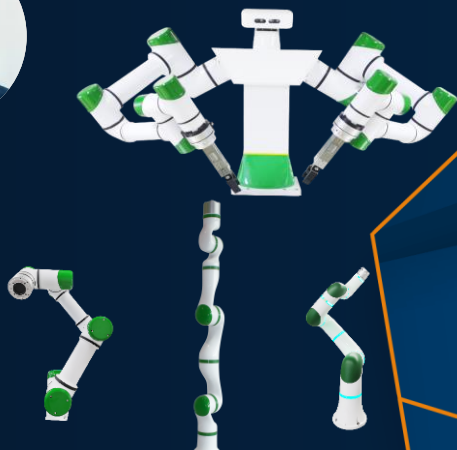
INTELLIGENT MANUFACTURING INSTITUTE OF HFUT

使用MATLAB/Simulink开发协作机器人

周玲, MathWorks



甄圣超, 博士, 合工大智能院机器人平台负责人, 人机协作安徽省重点实验室副主任
电话 (微信) 159 5512 0848



MATLAB EXPO

工业机器人技术的演变

L5	完全自主化	<ul style="list-style-type: none"> 在所有情况下完全自主
L4	高度自主化	<ul style="list-style-type: none"> 在某些情况下或特定区域完全自主
L3	有条件自主化	<ul style="list-style-type: none"> 控制所有环境监控 需要人的关注和干预
L2	部分自主化	<ul style="list-style-type: none"> 使用来自环境的输入来做出决策 需要预先标注和明确的指示
L1	自动化	<ul style="list-style-type: none"> 传统工业机器人 单一自动化操作 以高精度和速度为特定任务重复运动 不使用环境信息 无法感知或适应环境的变化
L0	无自动化	人操作机器;不涉及机器人



协作机器人是工厂自动化的关键



“

AI将允许使用协作机器人实现更高级的应用.*

”

Katja Butterweck (ABB, Global Product Specialist)

“

协作机器人的到来打破传统使用障碍，激励成千上万的中小企业首次部署自动化.*

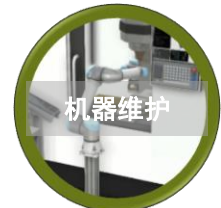
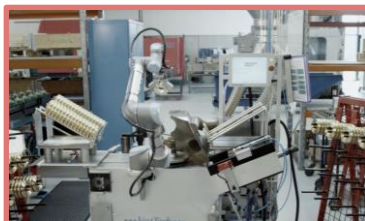
”

Joe Campbell (Universal Robots)

*: source from [“Tech Briefs”](#)



协作机器人的 5 大工业应用*



通过在线编程完成
(示教器)



通过离线
编程完成

*: source from [Universal Robots](https://www.universal-robots.com/)

离线编程

技术编程和仿真

相关技术	70% 协作机器人应用			Top 5				
	分拣	装配	机器维护	焊接	码垛	喷涂	砂光	检测
6-D 姿态估计	典型应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用
关节空间运动规划	典型应用	典型应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用
任务空间运动规划	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用
覆盖范围规划	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用	典型应用	典型应用
任务空间运动控制	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用	典型应用	部分应用
力/阻抗控制	部分应用	典型应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用
视觉伺服	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用
移动机械臂	部分应用	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用	部分应用	部分应用	部分应用
高保真度场景仿真	典型应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用	部分应用	部分应用	典型应用
碰撞/力仿真	部分应用	典型应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用	典型应用	部分应用

典型应用

部分应用

目 录

C O N T E N T S

1

合工大智能制造技术研究院

2

基于模型设计开发电机伺服

3

基于模型设计开发协作机器人

4

场景案例与总结展望

1

合工大智能制造技术研究院

合肥工业大学智能制造技术研究院

中华人民共和国工业和信息化部



中华人民共和国教育部



安徽省人民政府



合肥市人民政府



合肥工业大学



智能制造创新人才
培养引进高地

智能制造科技成果
培育高地

智能制造科技成果
转化高地

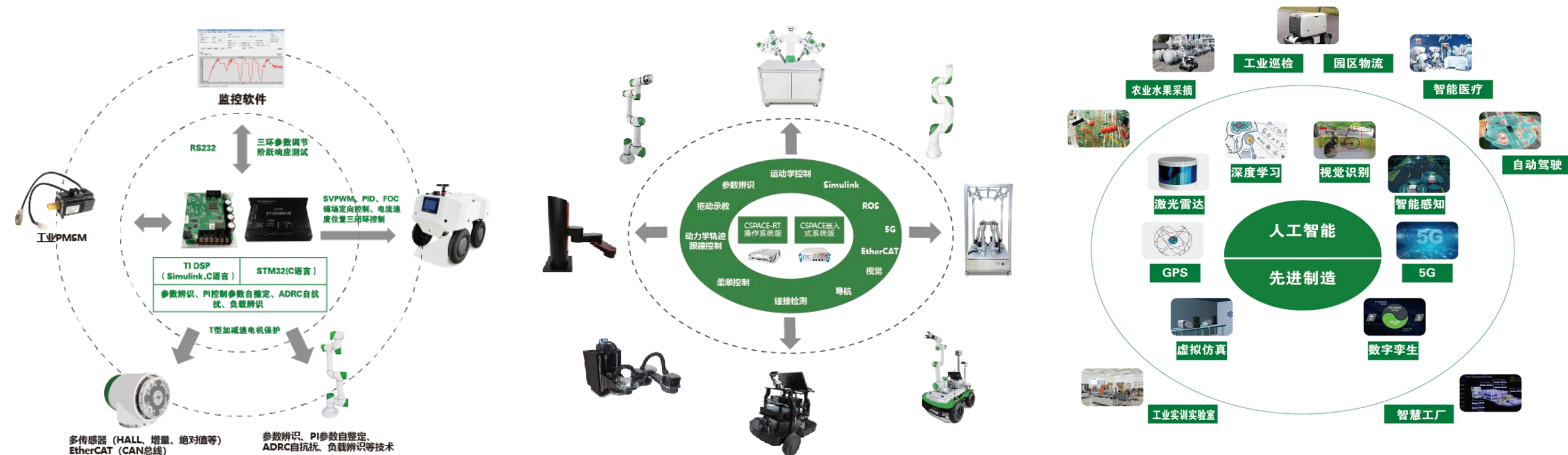
- 集聚一批**一流**人才团队 • 产出一批**高水平**科研成果



机器人公共创新平台介绍

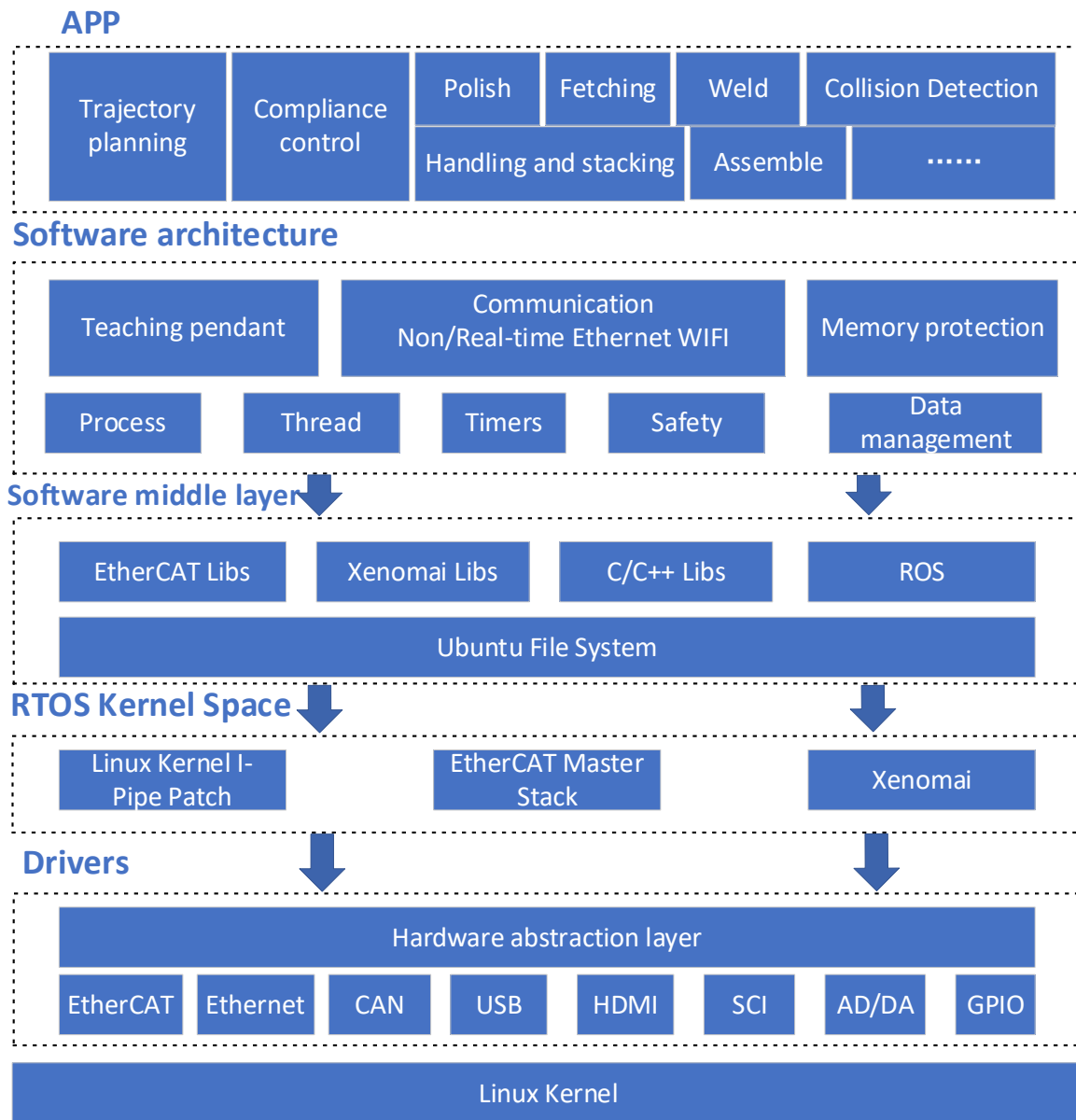
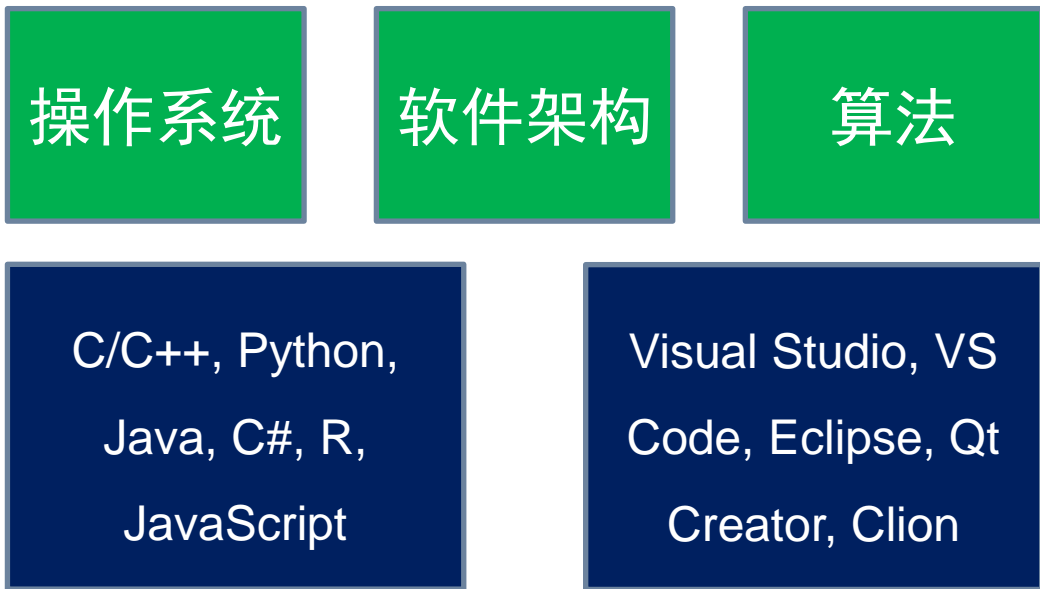
平台团队介绍

平台是以新技术促进工业产业发展和赋能工程人才培养的高科技创新型平台，位于国家科技之城、全球AI产业基地——中国合肥。团队已服务国内外500+企业单位，300+高校院所。平台团队致力于“人工智能”与“机器人/智能制造”深度融合，助力产业发展，通过开源设备装备，赋能人才培养！

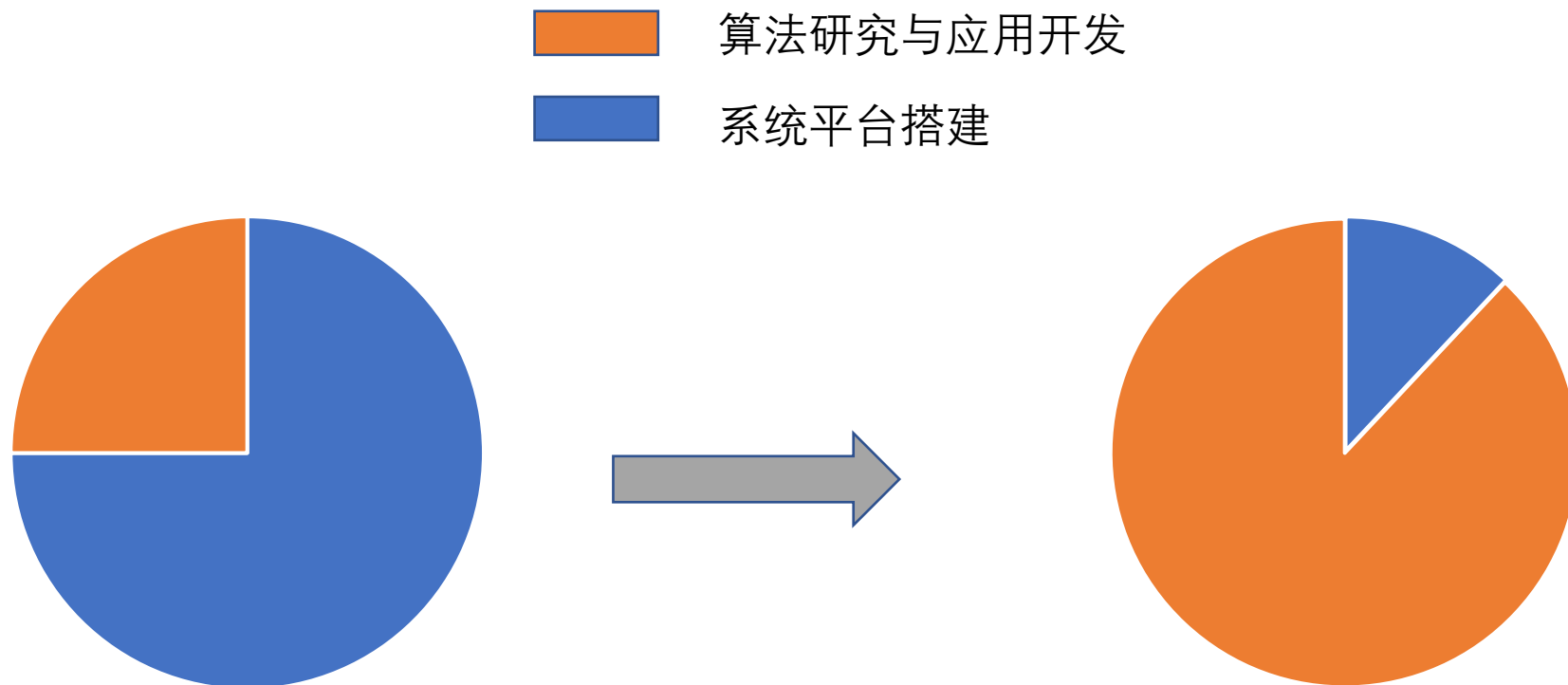


协作机器人开发遇到的挑战

软件系统的规模越来越复杂庞大
提高了机器人开发门槛



协作机器人开发遇到的挑战



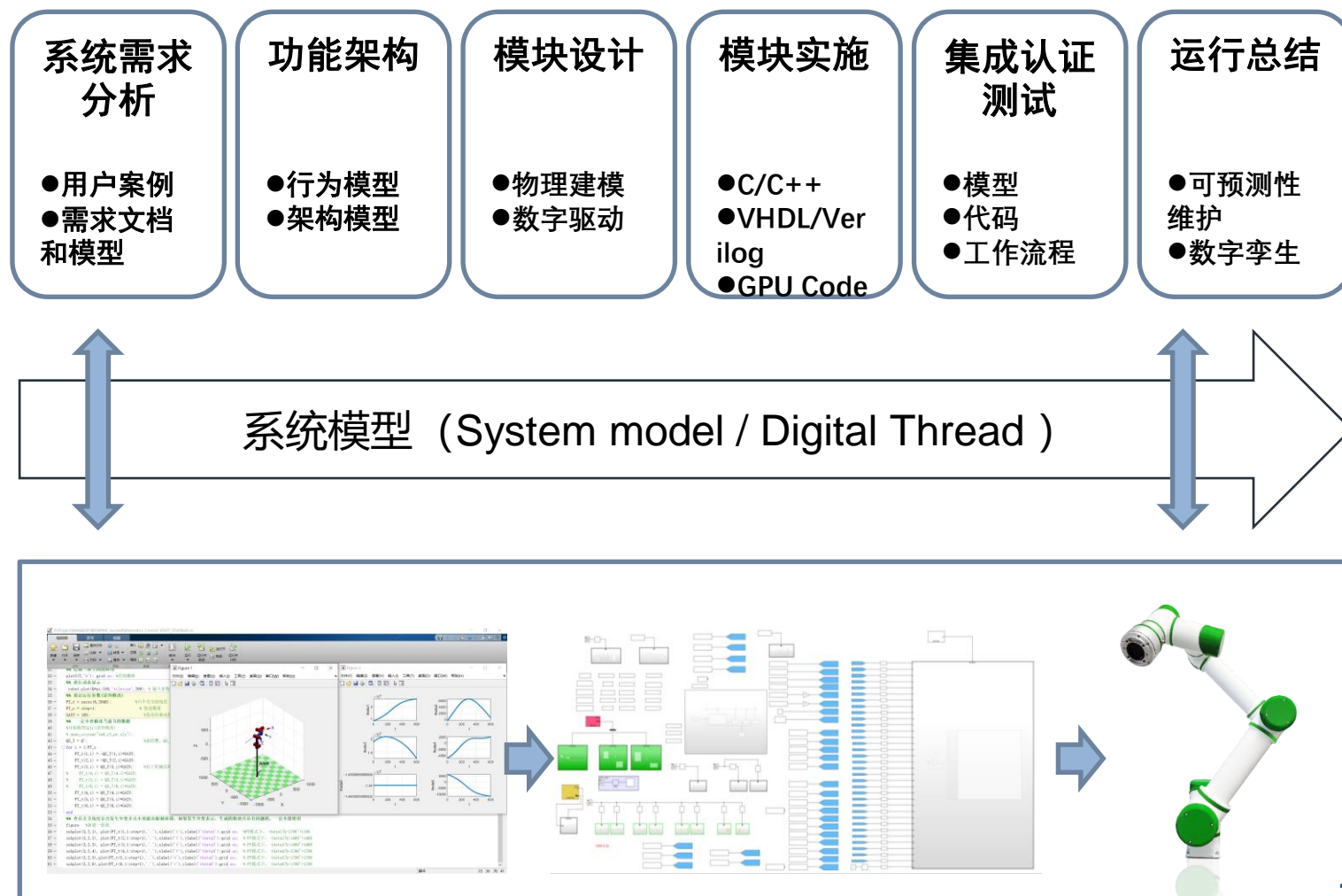
**降低机器人系统开发的门槛，
让更多的人参与，让开发更简单点**

基于模型设计开发流程优势

开发特点:

- ◆ 直接关联设计与需求
- ◆ 在共享设计环境中开展协作
- ◆ 仿真多种假设分析情景
- ◆ 优化系统级性能
- ◆ 自动生成代码、报告和文档
- ◆ 更早测试，从而更早发现错误

支持产品和服务向数字化转型



2

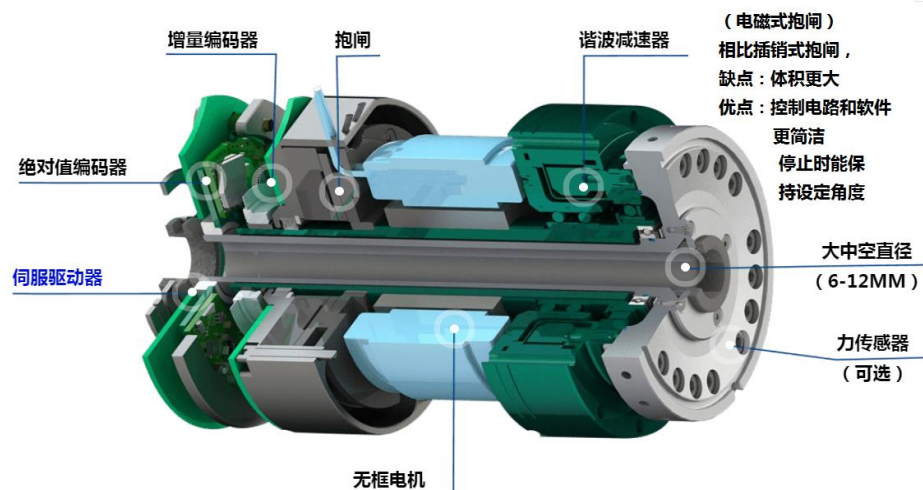
基于模型设计开发协作 机器人电机伺服

2

基于模型设计开发关节模组电机控制



RJSII-17



关节力传感器



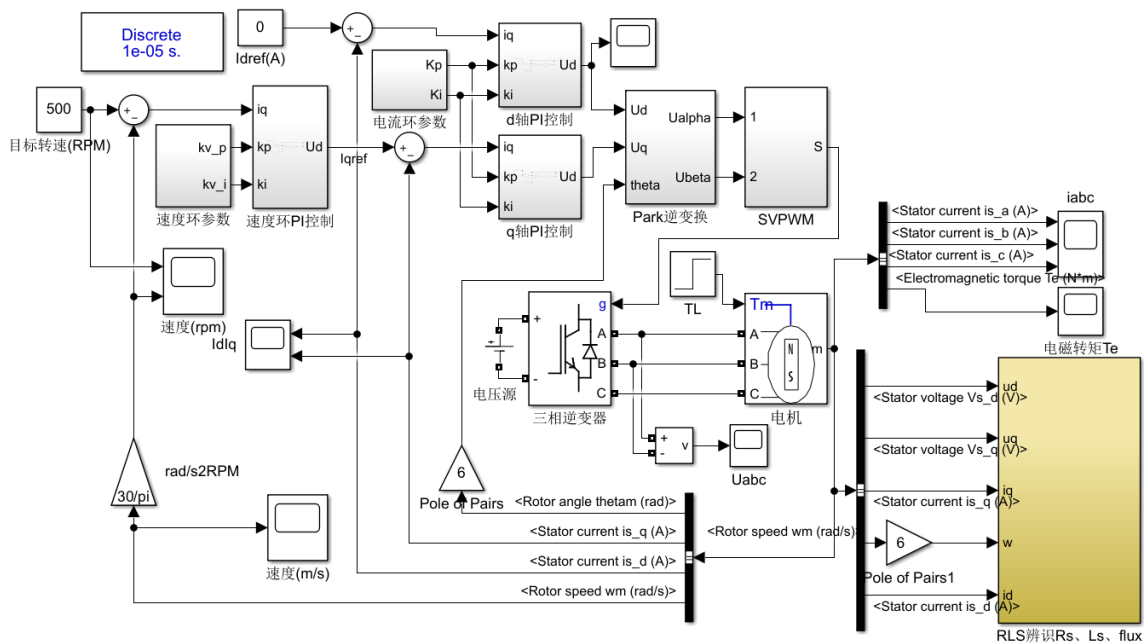
关节伺服驱动器

伺服驱动器

供电电压	DC20V-56V
输出电流	持续4A, 峰值6A
控制方式	串口、CAN总线
异常保护	欠压、过压、过流
编码器	增量式光电编码器、霍尔、BISS绝对式
制动电阻	需在电源处外接
冷却方式	自然冷却或外加散热器
防护等级	IP54 (驱动板带外壳、散热板)
使用场合	无粉尘、油雾及腐蚀性气体
工作温度	-10°C~50°C
保存温度	-20°C~80°C
工作湿度	40%~90%RH
振动	最大5.9m/s ²
重量	约0.1kg

2

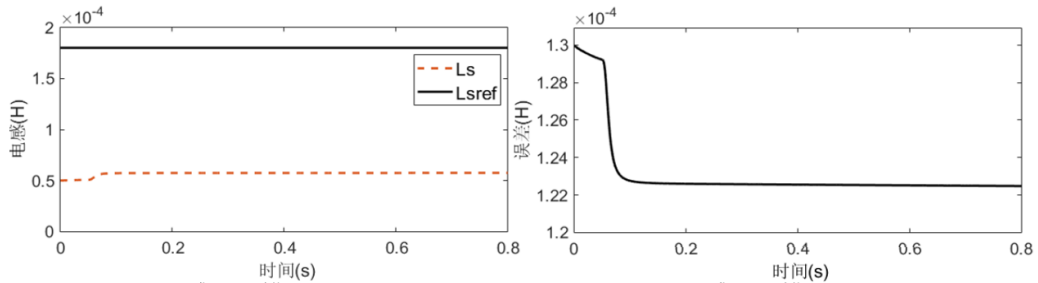
基于模型设计开发关节模组电机控制：参数辨识



无框力矩电机参数辨识的仿真模型

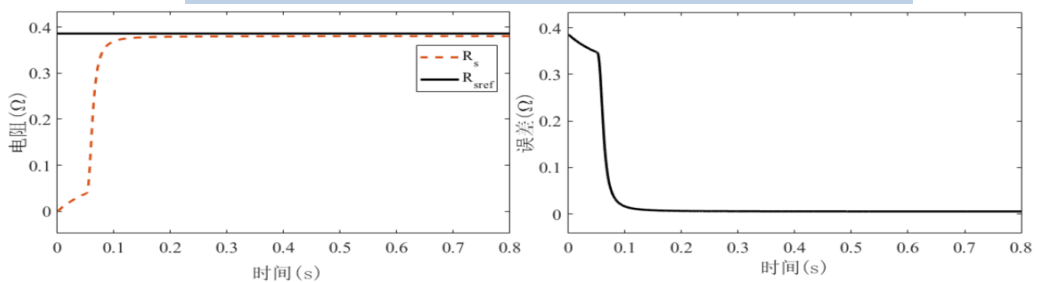
设定目标转速为500rpm，仿真每隔 $10\mu s$ 运行一次，仿真总时间为0.5s，遗忘因子 λ_f 取值为0.999， $\theta(0) = [0,0,20000]$ ， $P(0)$ 取为对角线元素为0.001的单位矩阵。

仿真中，给定 $R_s = 0.386\Omega$ 、 $L_s = 0.18e - 3H$ 、 $\psi_f = 0.0087 V.s$



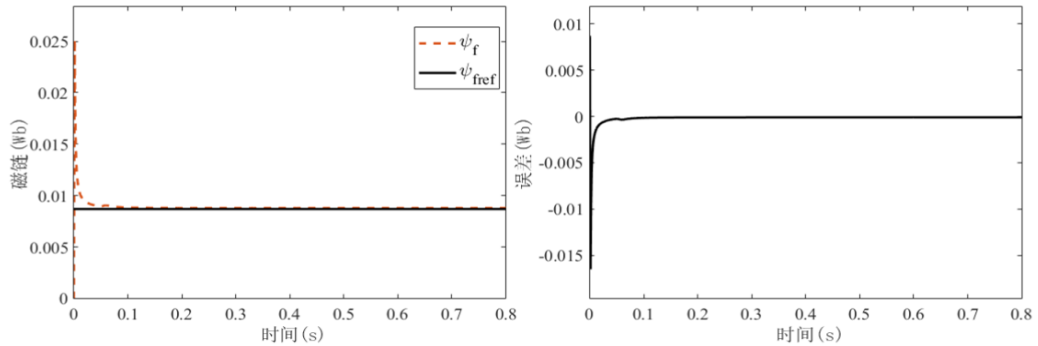
(a) 电感Ls的辨识结果曲线 (b) 电感Ls的辨识误差曲线

电感Ls的辨识结果及误差曲线图



(a) 电阻Rs的辨识结果曲线 (b) 电阻Rs的辨识误差曲线

电阻Rs的辨识结果及误差曲线图



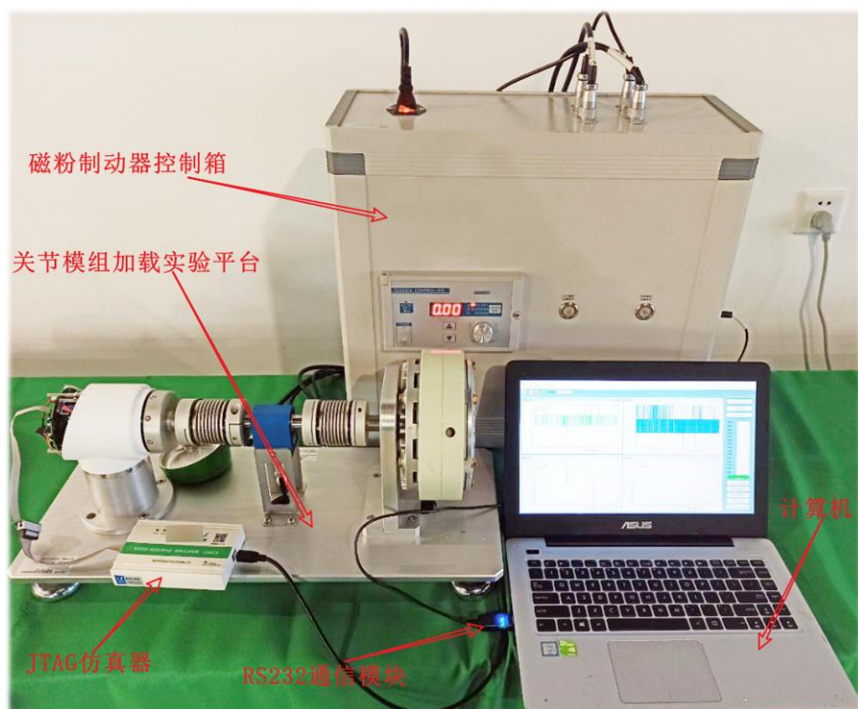
(a) 磁链的辨识结果曲线 (b) 磁链的辨识误差曲线

磁链的辨识结果及误差曲线

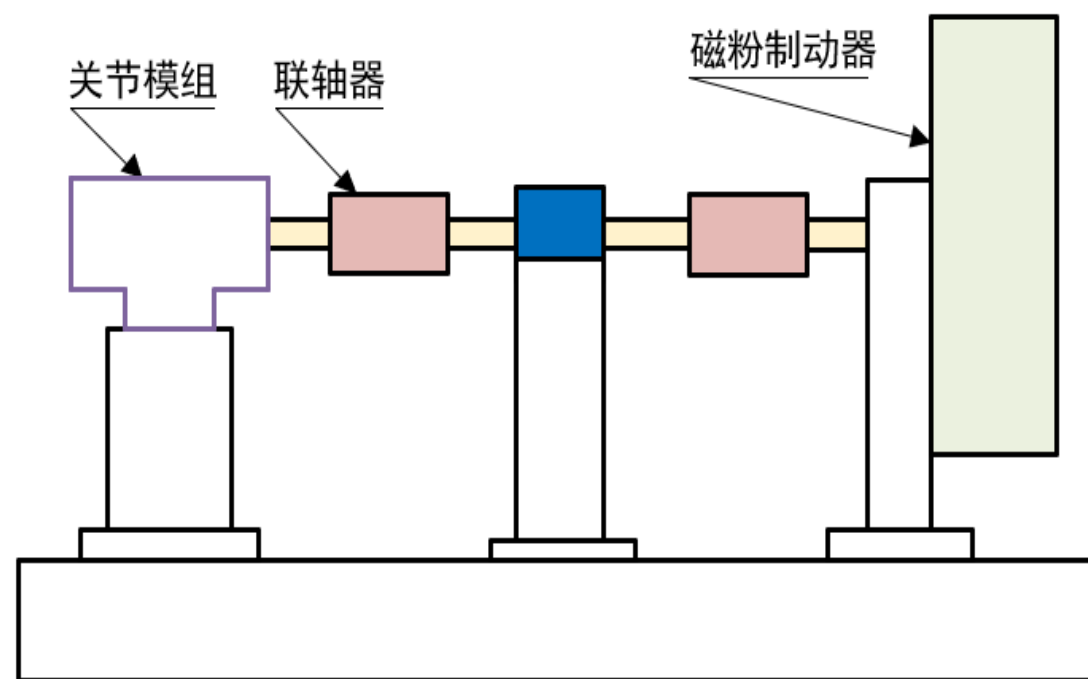
2

基于模型设计开发关节模组电机控制：算法测试

为了测试设计的关节模组三环控制程序以及验证鲁棒控制和导纳控制的实际效果，搭建了关节模组驱动控制实验平台，实验平台主要包含以下模块：关节模组加载实验平台、磁粉制动器控制箱、计算机(包含上位机软件)、仿真器、RS232通信模块等。



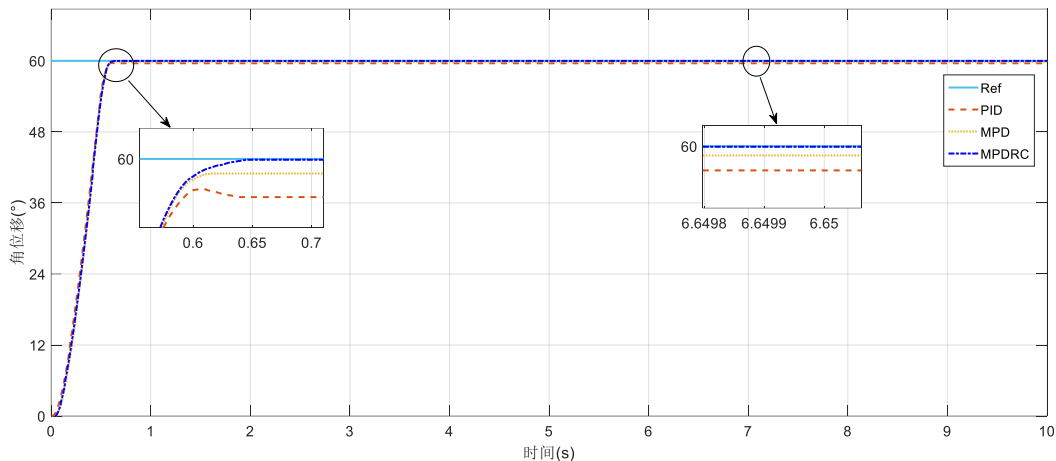
关节模组驱动控制实验平台



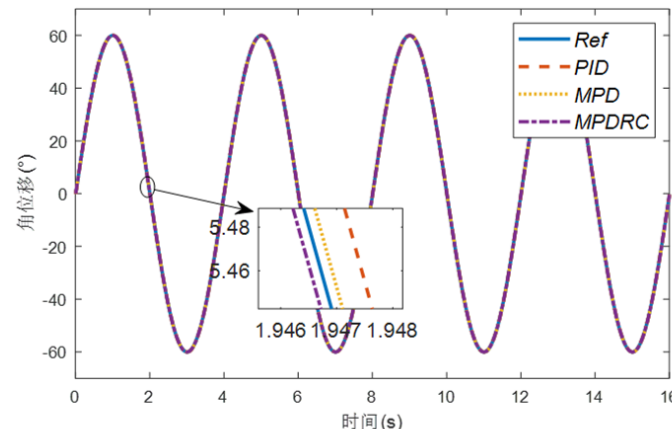
关节模组加载实验平台示意图

2

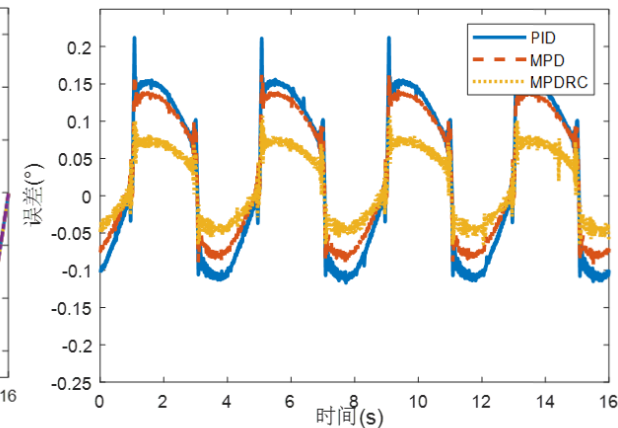
基于模型设计开发关节模组电机控制：算法测试



关节模组的位置阶跃响应实验曲线图

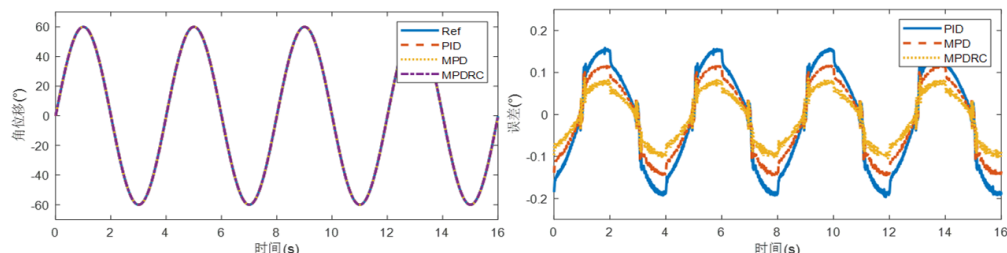


(a) 位置正弦跟踪曲线



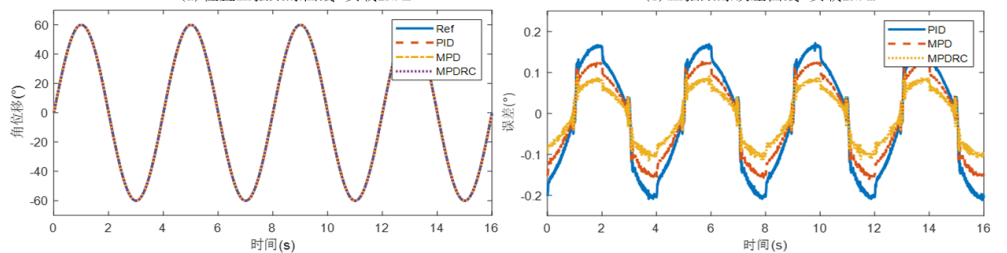
(b) 正弦跟踪误差曲线

空载位置正弦跟踪的实验结果



(a) 位置正弦跟踪曲线-负载2N.m

(b) 正弦跟踪误差曲线-负载2N.m

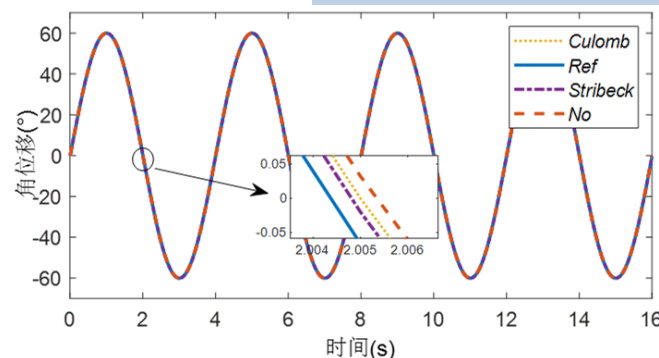


(c) 位置正弦跟踪曲线-负载5N.m

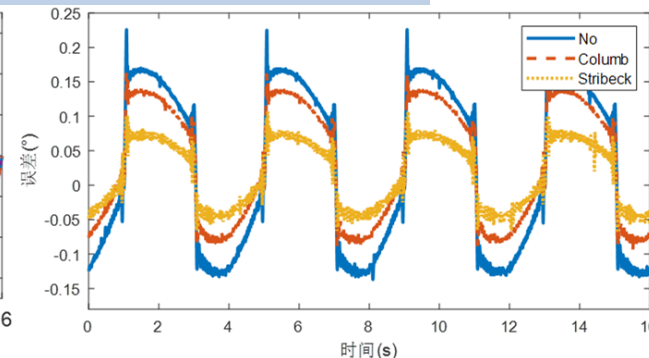
(d) 正弦跟踪误差曲线-负载5N.m

不同负载下位置跟踪正弦的实验结果

不同摩擦模型的位置正弦跟踪实验结果



(a) 不同摩擦模型的位置正弦跟踪曲线

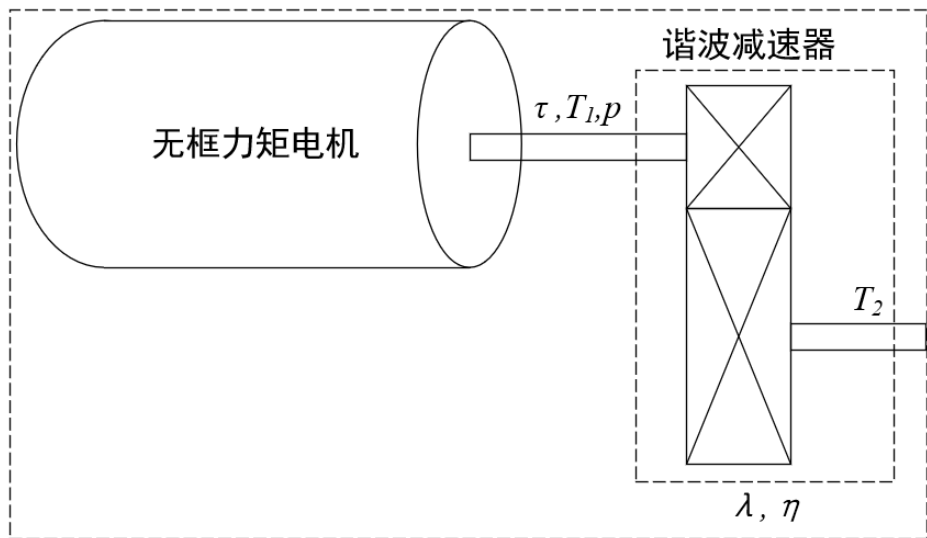


(b) 不同摩擦模型的位置正弦跟踪误差曲线

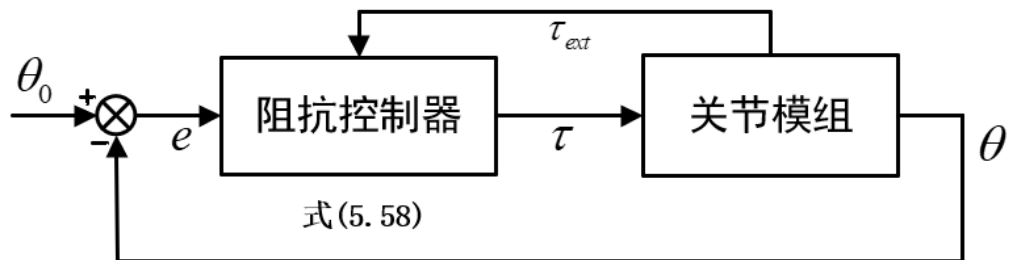
采用MPDRC控制器结合库伦粘滞摩擦力模型和Stribeck摩擦力模型，进行关节模组位置正弦跟踪实验。Stribeck摩擦力模型优于库伦粘滞摩擦力模型，这与仿真基本保持一致。

2

基于模型设计开发关节模组电机控制：阻抗控制动力学建模



关节模组结构简图



关节模组的阻抗控制框图

$$\tau(t) = \bar{H}(\ddot{q}^d - S\dot{e}) + \bar{C}(\dot{q}^d - Se) + \bar{F} - K_p e - K_v \dot{e} + p(e, \dot{e}, t) \quad (5.28)$$

$$p(e, \dot{e}, t) = \begin{cases} -\frac{\varphi(e, \dot{e}, t)}{\varepsilon} \rho(e, \dot{e}, t), & \text{if } \|\varphi(e, \dot{e}, t)\| \leq \varepsilon \\ -\frac{\varphi(e, \dot{e}, t)}{\|\varphi(e, \dot{e}, t)\|} \rho(e, \dot{e}, t), & \text{if } \|\varphi(e, \dot{e}, t)\| > \varepsilon \end{cases} \quad (5.29)$$

$$\varphi(e, \dot{e}, t) = (\dot{e} + Se)\rho(e, \dot{e}, t) \quad (5.30)$$

$$K_p = \text{diag}[k_{pi}]_{n \times n} \quad (5.31)$$

$$K_v = \text{diag}[k_{vi}]_{n \times n} \quad (5.32)$$

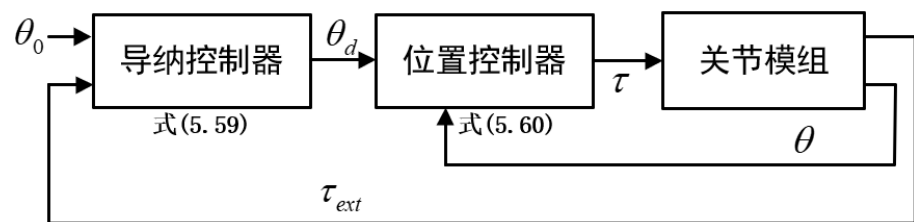
将不含 p 项的 $\tau(t)$ 称为基于模型的PD控制器(MPD)，将含 p 项的 $\tau(t)$ 称为基于模型的PD鲁棒控制器(MPDRC)。

关节模组的阻抗控制律为

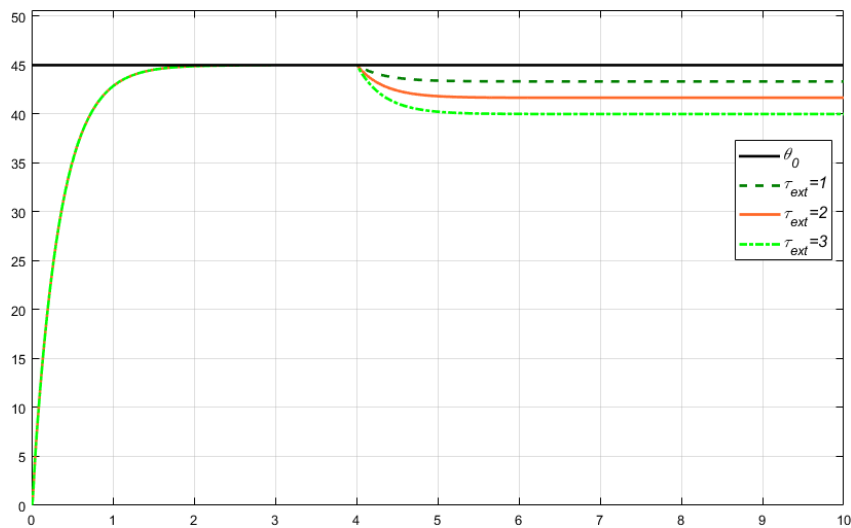
$$\tau = J_\Delta \ddot{\theta}_0 + \left(\frac{J_\Delta}{J_d} - 1\right) \tau_{ext} + \left(B_\Delta - \frac{J_\Delta}{J_d} B_d\right) \dot{e} + \left(K_\Delta - \frac{J_\Delta}{J_d} K_d\right) e + \tau_g \quad (5.58)$$

2

基于模型设计开发关节模组电机控制：阻抗控制仿真测试

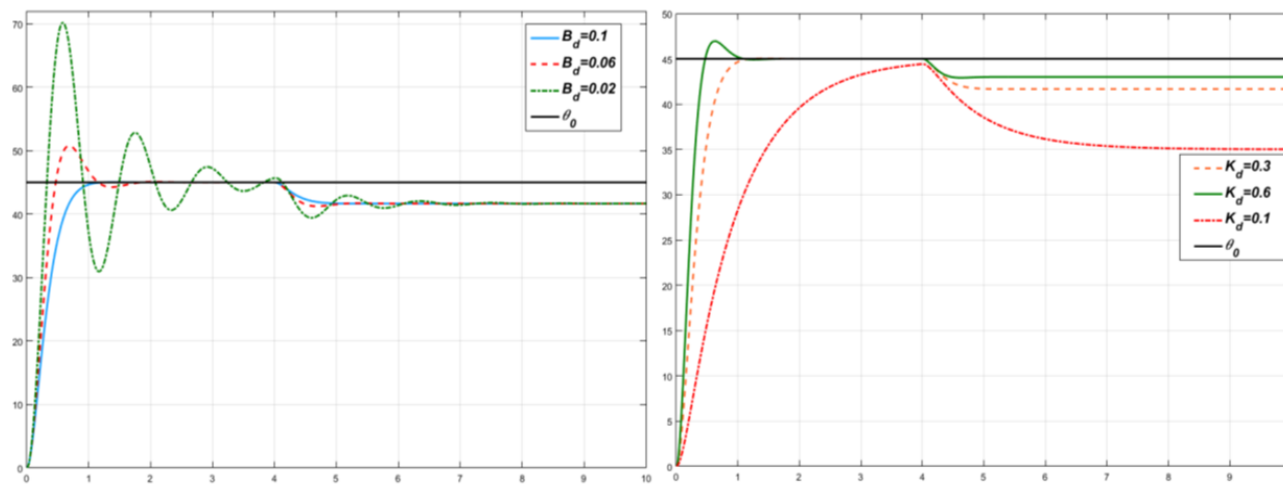
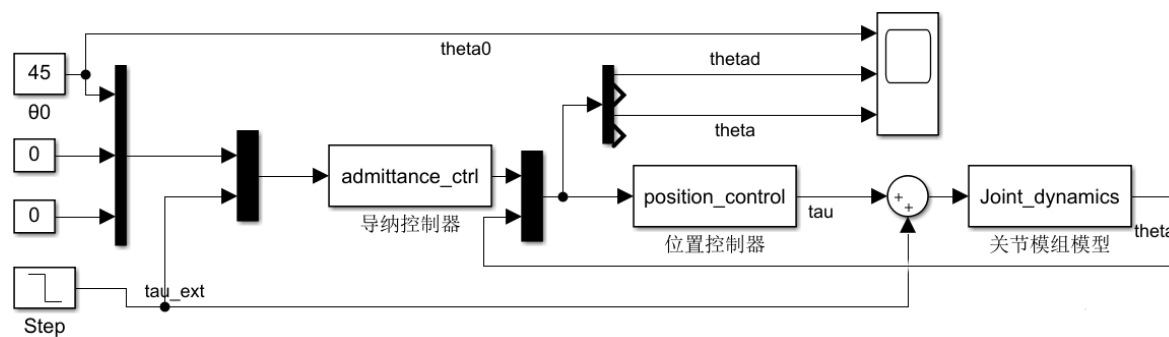


关节模组的导纳控制框图



关节模组导纳控制仿真结果

设置的期望导纳参数 $J_d = 0.001 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $B_d = 0.2 \text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ 和 $K_d = 0.6 \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$



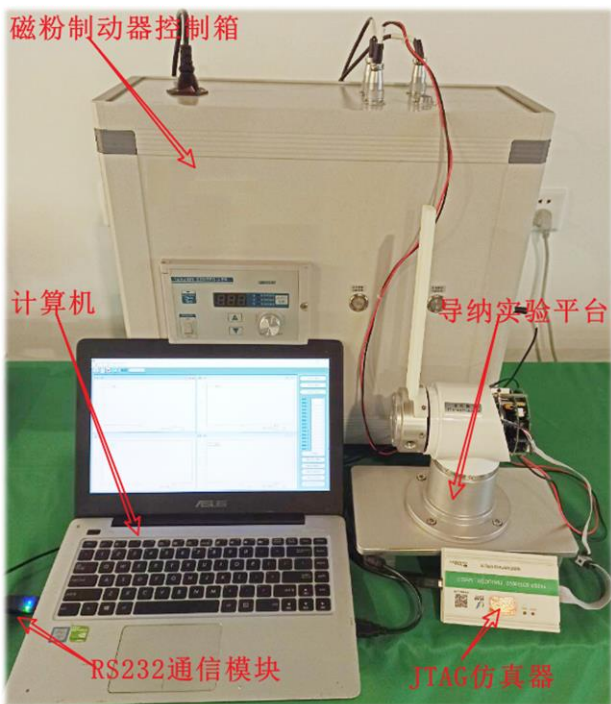
(a) 不同阻尼下的导纳控制仿真曲线

(b) 不同刚度下的导纳控制仿真曲线

不同阻尼、不同刚度下关节模组的导纳控制仿真结果

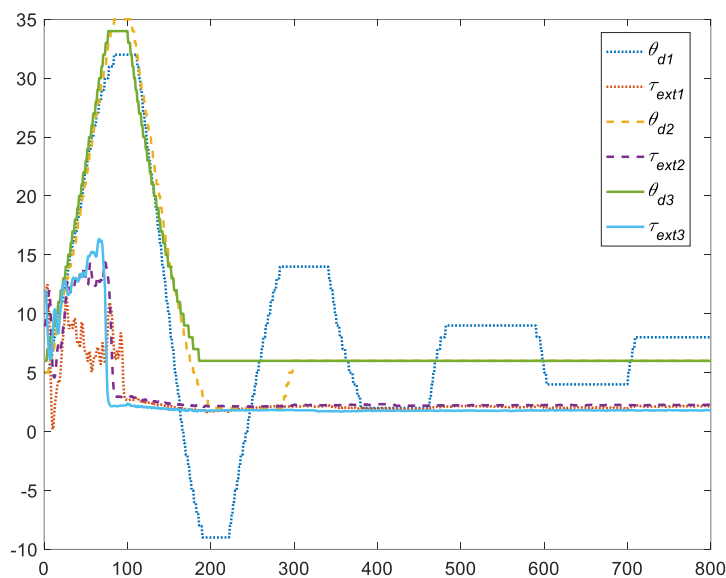
2

基于模型设计开发关节模组电机控制：阻抗控制



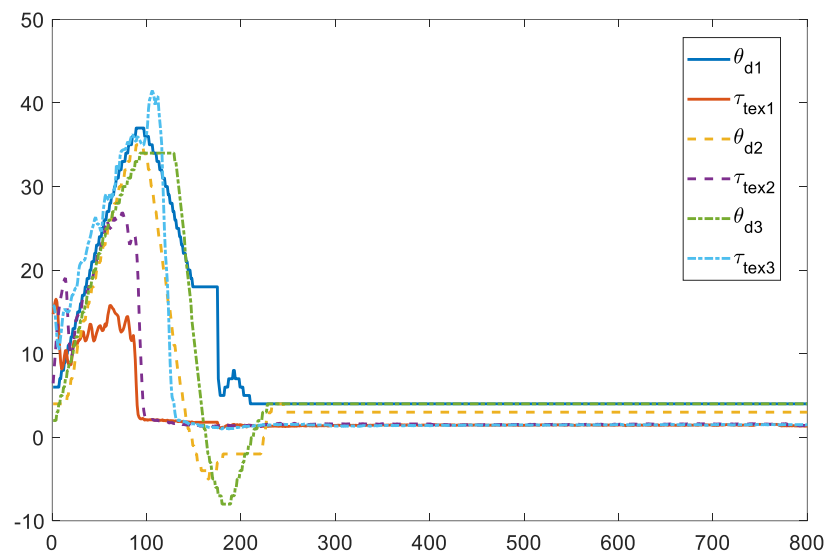
为了验证设计的关节模组的导纳控制器，在关节模组的输出轴安装一个均质连杆，搭建了关节模组导纳控制实验平台。

1、不同阻尼下的导纳控制实验结果——给定位置 $\theta_0 = 0^\circ$ ，期望惯量 $J_d = 1$ ，期望刚度 $K_d = 2$ ， $B_d = 0.4、1.5、2$



不同阻尼下的导纳控制实验结果

2、不同刚度下的导纳控制实验结果——给定位置 $\theta_0 = 0^\circ$ ，期望惯量 $J_d = 1$ ，期望刚度 $B_d = 2$ ， $K_d = 2、5、7$



不同刚度下的导纳控制实验结果

通过调节设计的导纳控制器的相关参数，就可以使关节模组变现出不同的刚度、阻尼和惯量特性，从实验上验证了设计的导纳控制器是有效的。实际使用中，可以在不改变关节模组结构的前提下，根据不同的应用场景，调节导纳控制器的参数，从而获得期望的刚度、阻尼和惯量特性。

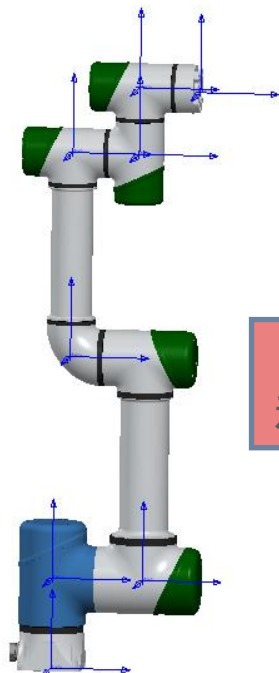
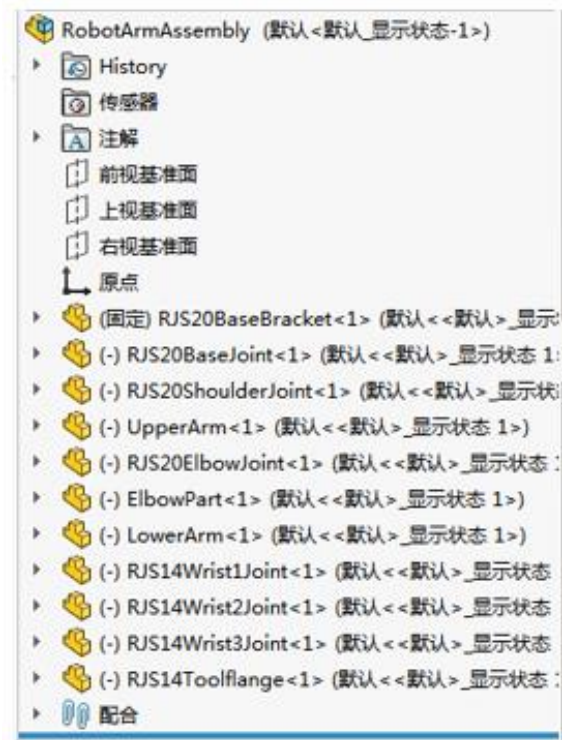
3

基于模型设计开发协作 机器人

3

机械设计与物理建模

机械模型

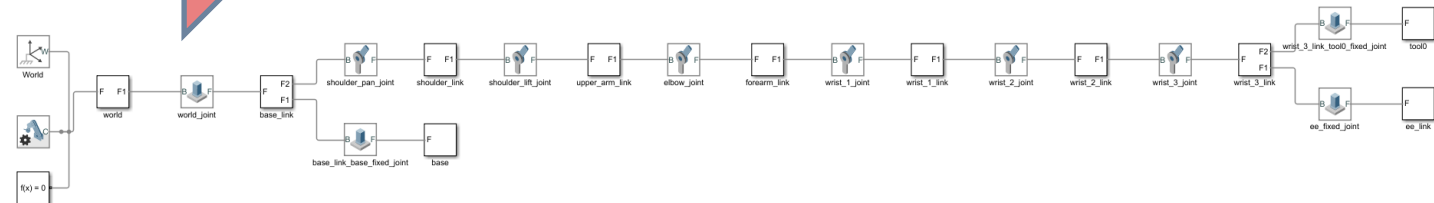


Body Name	Joint Name
base_link	world_joint
base	base_link-base_fixed_joint
shoulder_link	shoulder_pan_joint
forearm_link	shoulder_lift_joint
wrist_1_link	elbow_joint
wrist_2_link	wrist_1_joint
wrist_3_link	wrist_2_joint
ee_link	wrist_3_joint
tool0	ee_fixed_joint
	wrist_3_link-tool0_fixed_joint

物理模型

Joint Type	Parent Name (Idx)	Children Name(s)
fixed	world(0)	base(2) shoulder_link(3)
fixed	base_link(1)	
revolute	base_link(1)	upper_arm_link(4)
revolute	shoulder_link(3)	forearm_link(5)
revolute	upper_arm_link(4)	wrist_1_link(6)
revolute	forearm_link(5)	wrist_2_link(7)
revolute	wrist_1_link(6)	wrist_3_link(8)
revolute	wrist_2_link(7)	
revolute	wrist_3_link(8)	ee_link(9) tool0(10)
fixed	wrist_3_link(8)	
fixed	wrist_3_link(8)	

SW导出step和xml格式文件



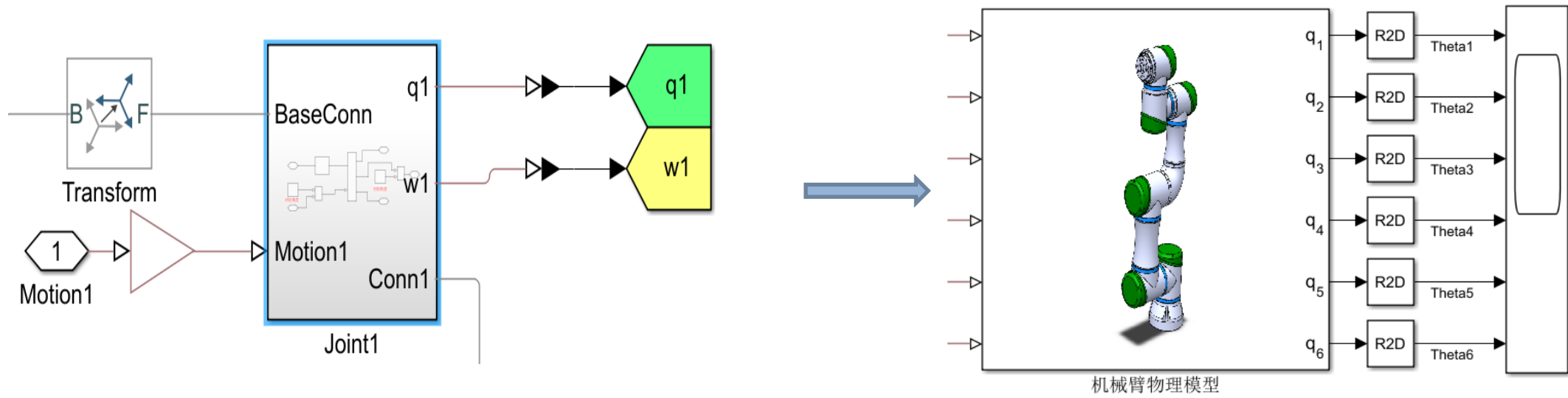
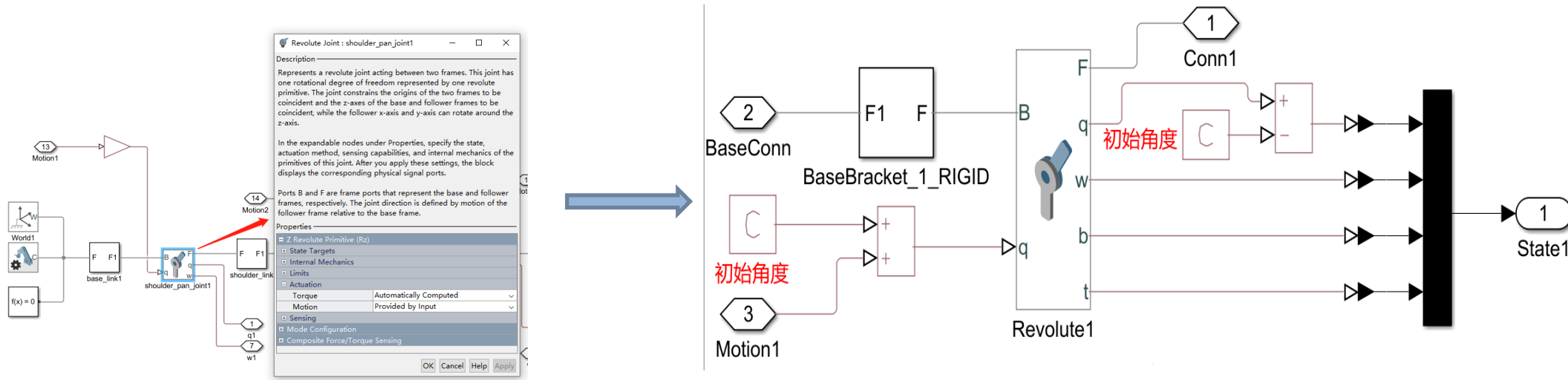
Solidworks
三维建模



Simscape
物理模型

3

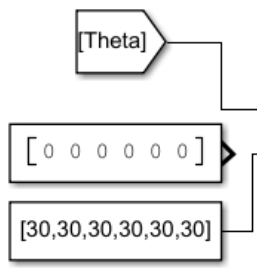
基于 Simscape 仿真建模



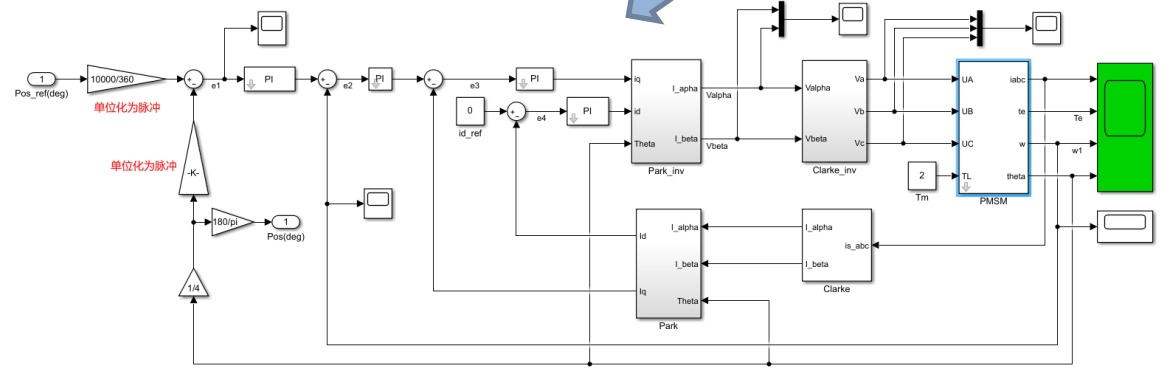
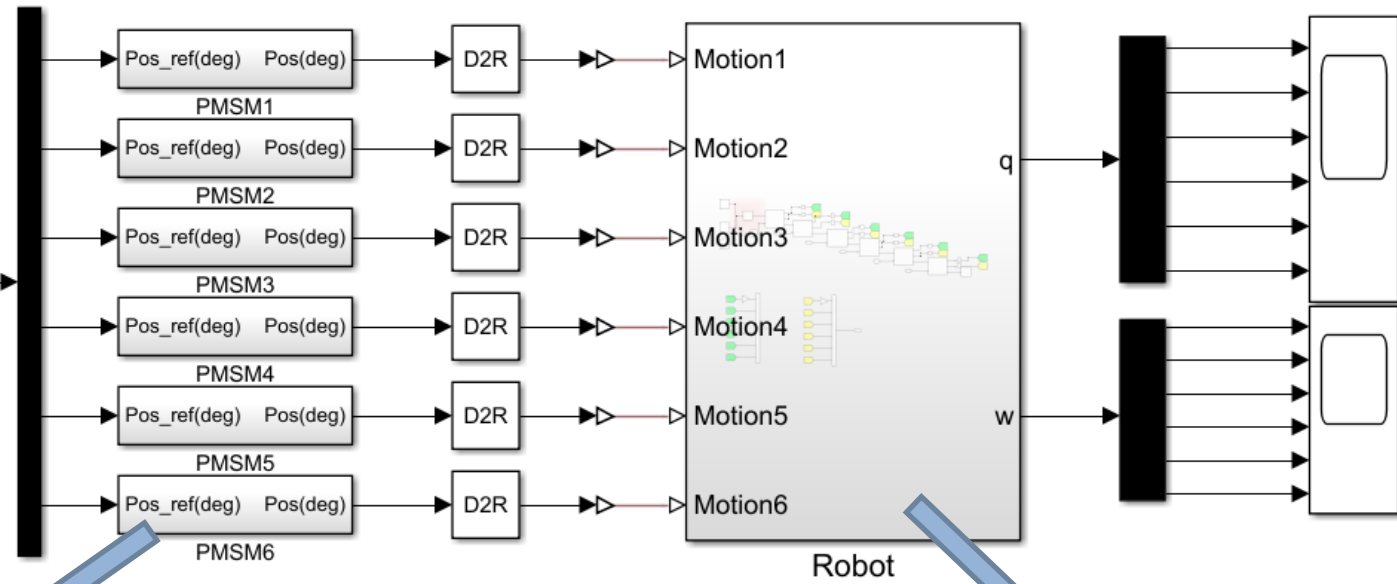
3

Simscape 建模与仿真测试

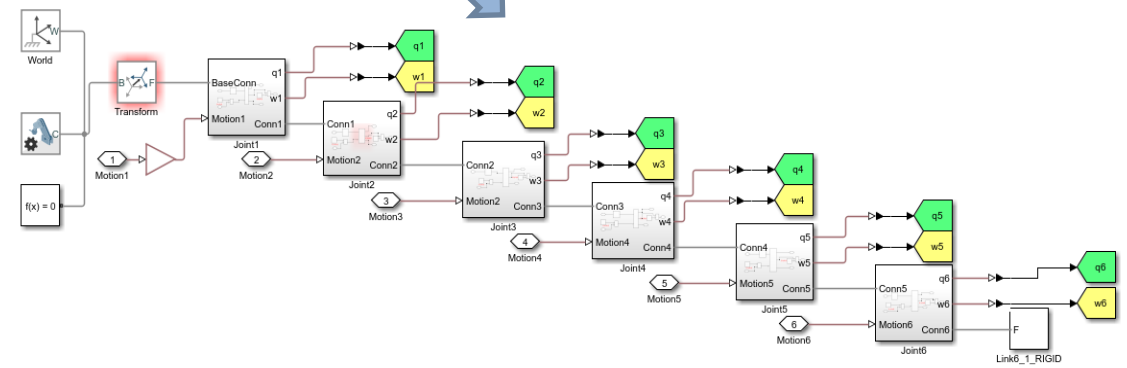
给定末端位姿
逆解得到的角度



正解角度



关节PMSM电机建模控制



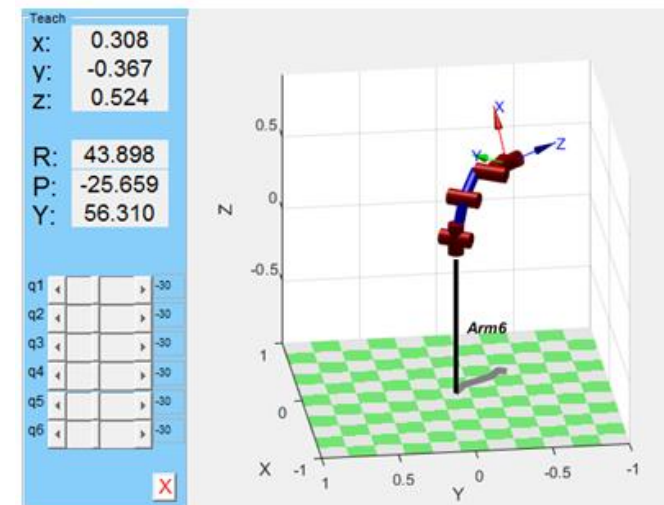
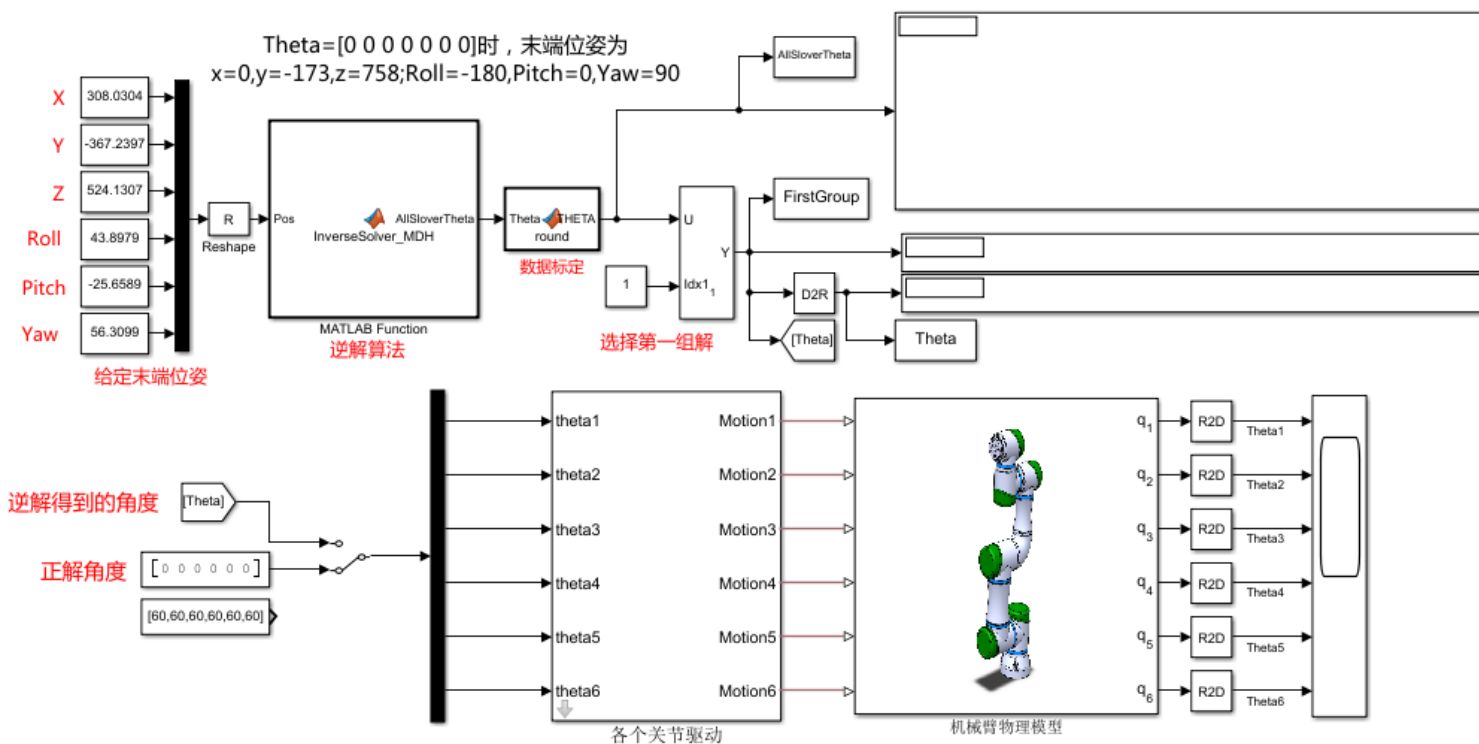
机械臂控制

3

Simscape 建模与仿真测试

加入逆解算法完成整体仿真模型

Kinematics algorithm for Six-axis Robot Arm —— Modified DH



机器人工具箱仿真结果



Simscape仿真结果

适用于各种运动学、动力学算法学习与验证

3

实时仿真与控制系统

自定义编译器工具链，算法部署到机器人，或直接部署到微控制器、CPU、FPGA和 GPU，实现一键下载运行。

名称	修改日期	类型	大小
arm64.m	2022/9/20 13:19	MATLAB Code	9 KB
arm64.mat	2022/9/20 13:20	MATLAB Data	15 KB
rtwTargetInfo.m	2022/9/14 10:03	MATLAB Code	2 KB
x86_64_linux.m	2022/9/20 14:02	MATLAB Code	9 KB
x86_64_linux.mat	2022/9/20 14:02	MATLAB Data	15 KB

Hardware board: None

Code Generation system target file: [ert.tlc](#)

Device vendor: Intel Device type: x86-64 (Linux 64)

▼ Device details

Number of bits

char:	8	short:	16	int:	32
long:	64	long long:	64	float:	32
double:	64	native:	64	pointer:	64
size_t:	64	ptrdiff_t:	64		

Largest atomic size

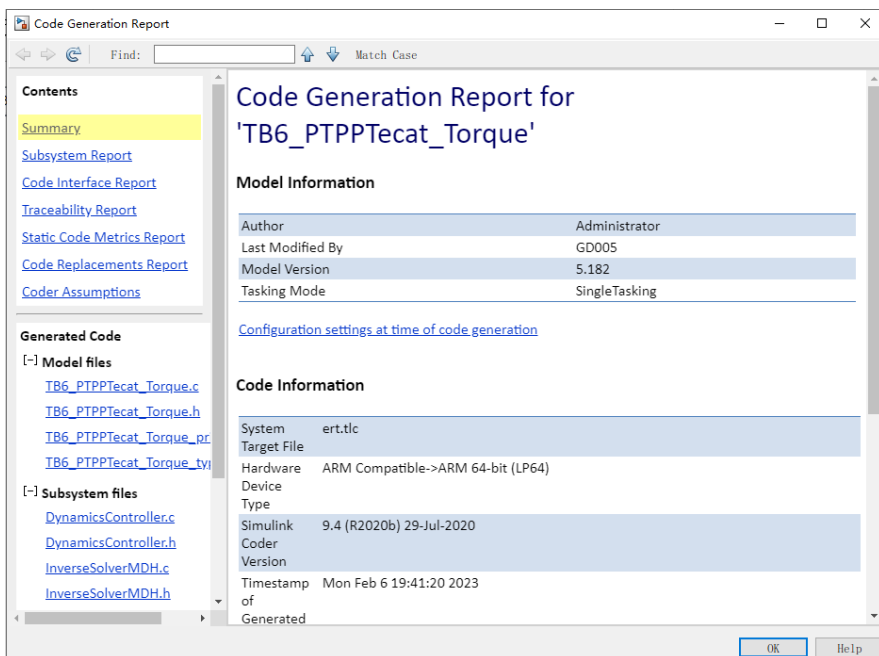
integer: Char

floating-point: Float

Byte ordering: Little Endian Signed integer division rounds to: Zero

Shift right on a signed integer as arithmetic shift

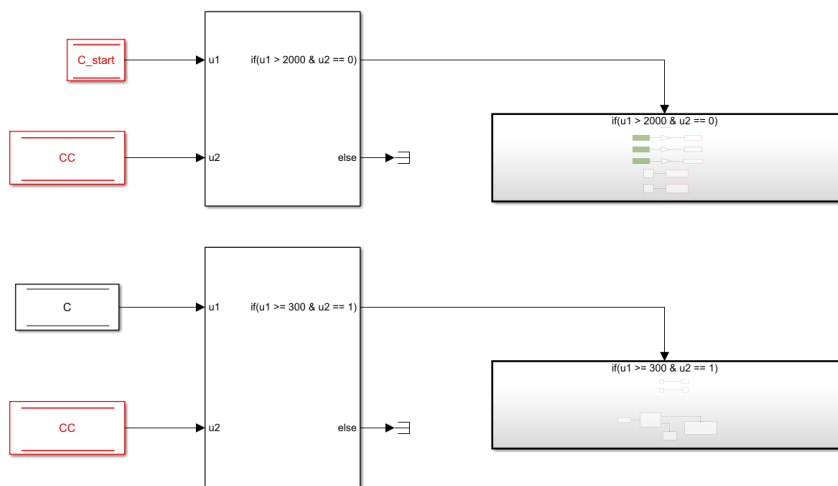
Support long long



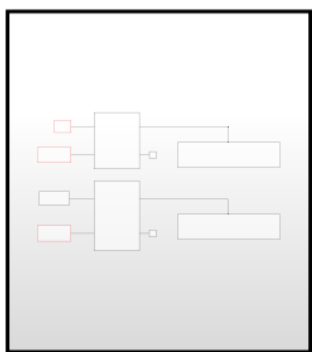
高效一键部署

3

模块化开发与应用



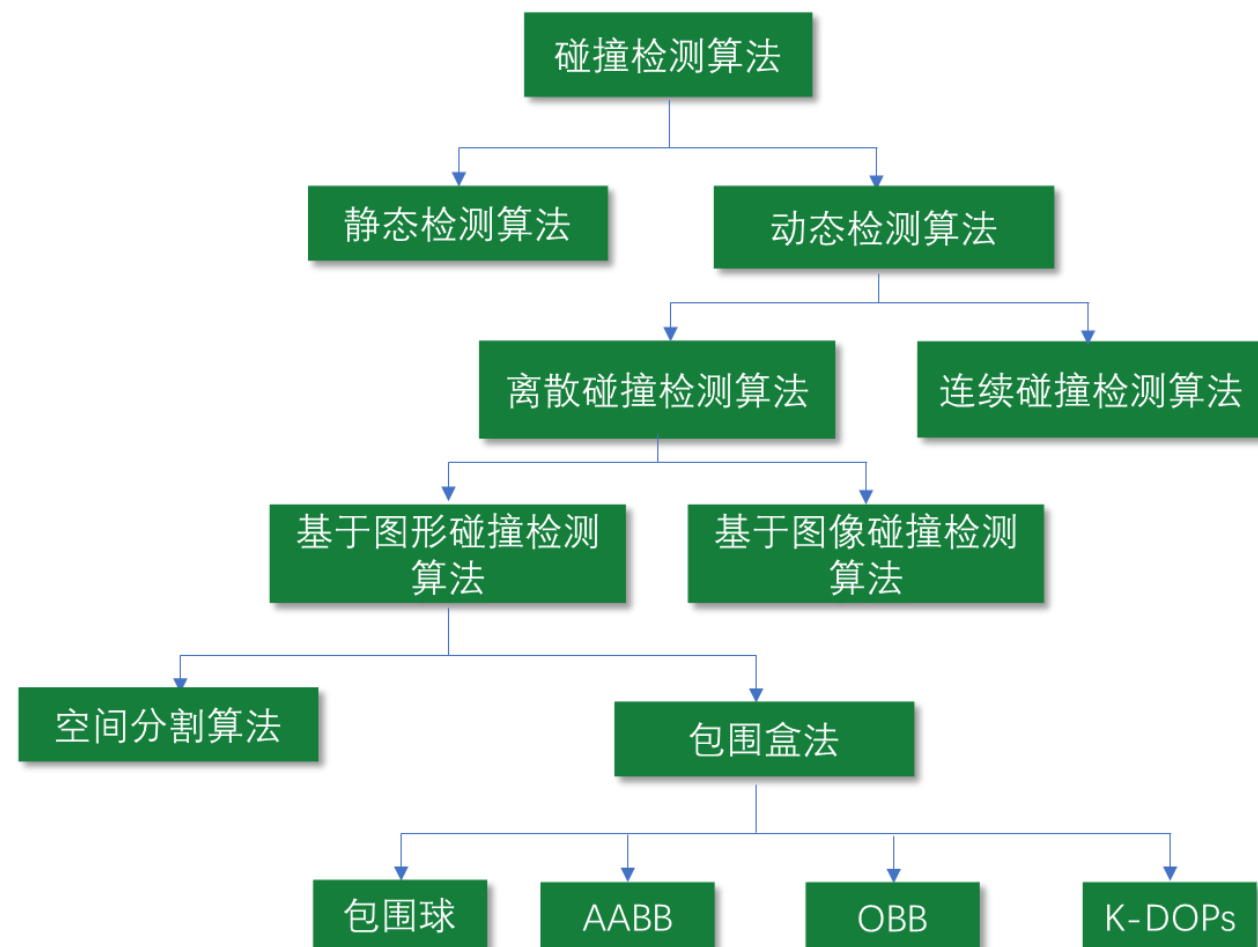
碰撞检测算法实现



Collision

集成应用:

- 1、调用便捷
- 2、模块化
- 3、敏捷化



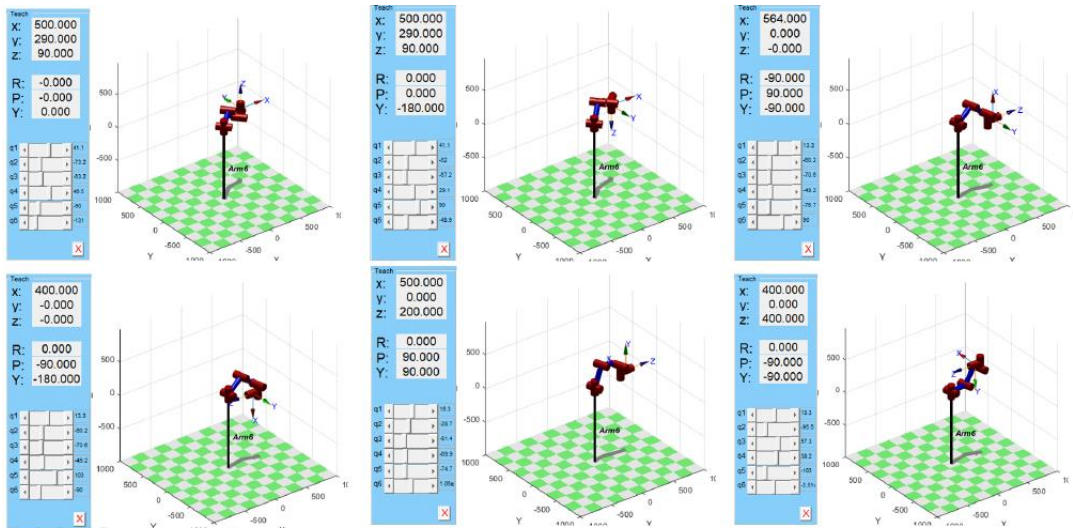
3

基于六维力传感器的恒力曲面打磨（一）

六维力传感器重力补偿与初始值补偿实验

六维力传感器测量姿态与测量值

标号	姿态			测量值					
	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
1	0	0	0	F_{x1}	F_{y1}	F_{z1}	M_{x1}	M_{y1}	M_{z1}
2	0	0	-180	F_{x2}	F_{y2}	F_{z2}	M_{x2}	M_{y2}	M_{z2}
3	-90	90	-90	F_{x3}	F_{y3}	F_{z3}	M_{x3}	M_{y3}	M_{z3}
4	0	-90	-180	F_{x4}	F_{y4}	F_{z4}	M_{x4}	M_{y4}	M_{z4}
5	0	90	90	F_{x5}	F_{y5}	F_{z5}	M_{x5}	M_{y5}	M_{z5}
6	0	-90	-90	F_{x6}	F_{y6}	F_{z6}	M_{x6}	M_{y6}	M_{z6}



六维力传感器测量姿态仿真

补偿未知量计算

$$\begin{cases} F_{x0} = (F_{x3} + F_{x4})/2 \\ F_{y0} = (F_{y5} + F_{y6})/2 \\ F_{z0} = (F_{z1} + F_{z2})/2 \\ M_{x0} = (M_{x1} + M_{x2} + M_{x5} + M_{x6})/4 \\ M_{y0} = (M_{y1} + M_{y2} + M_{y3} + M_{y4})/4 \\ M_{z0} = (M_{z3} + M_{z4} + T_{z5} + M_{z6})/4 \\ G = (F_{z2} - F_{z1} + F_{x4} - F_{x3} + F_{y6} - F_{y5})/6 \\ \begin{cases} L_x = (T_{y1} - T_{y2} + T_{z6} - T_{z5})/(4 \cdot G) \\ L_y = (T_{x2} - T_{x1} + T_{z3} - T_{z4})/(4 \cdot G) \\ L_z = (T_{y4} - T_{y3} + T_{x5} - T_{x6})/(4 \cdot G) \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \{F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}\} &= \{0.4719, 1.0226, 0.1666\}N \\ \{M_{x0}, M_{y0}, M_{z0}\} &= \{0.0151, 0.0034, -0.0206\}Nm \\ G &= 0.1526N \\ \{L_x, L_y, L_z\} &= \{-0.0020, 0.0034, -0.0087\}m \end{aligned}$$

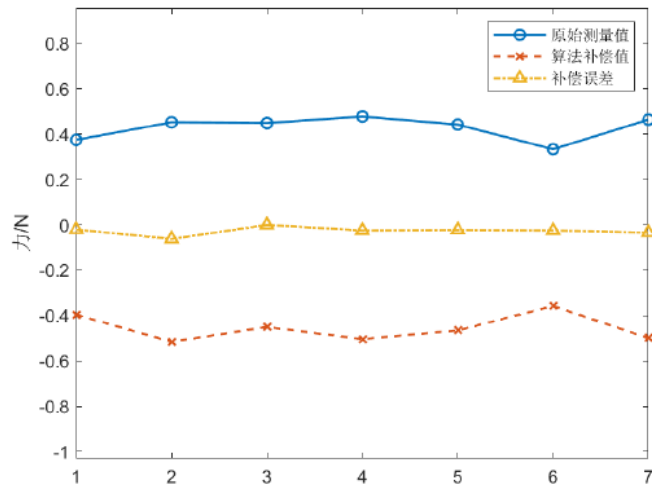
补偿未知量计算结果

3

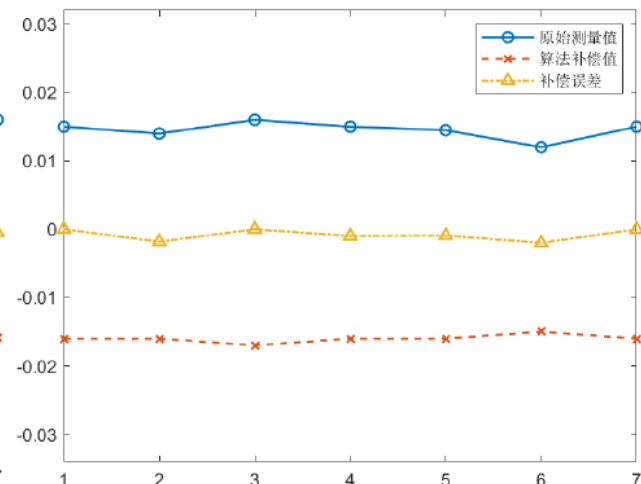
基于六维力传感器的恒力曲面打磨（二）

六维力传感器重力补偿
测试姿态

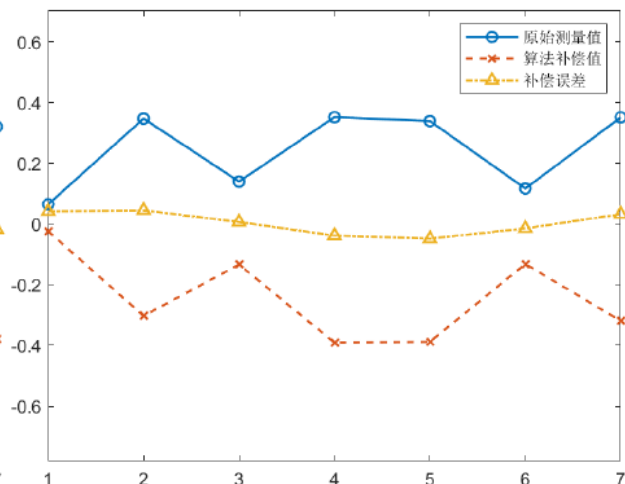
测量姿态	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$
1	67	-6	-170
2	76	-21	172
3	80	46	56
4	90	0	-170
5	114	-5	-160
6	159	-36	70
7	-45	0	-45



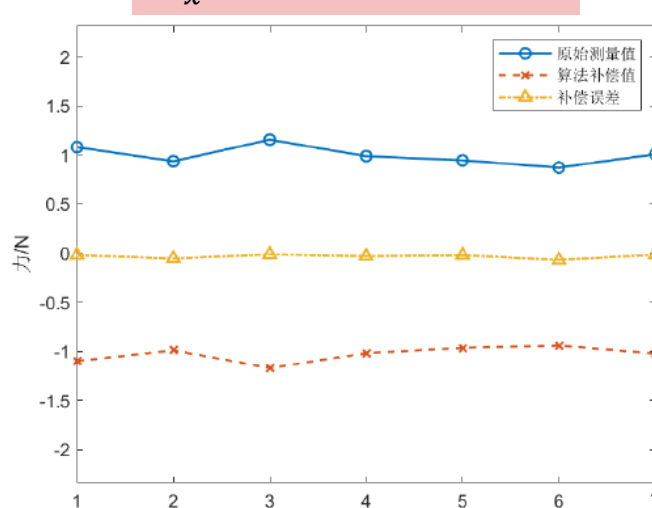
F_x 补偿实验结果验证



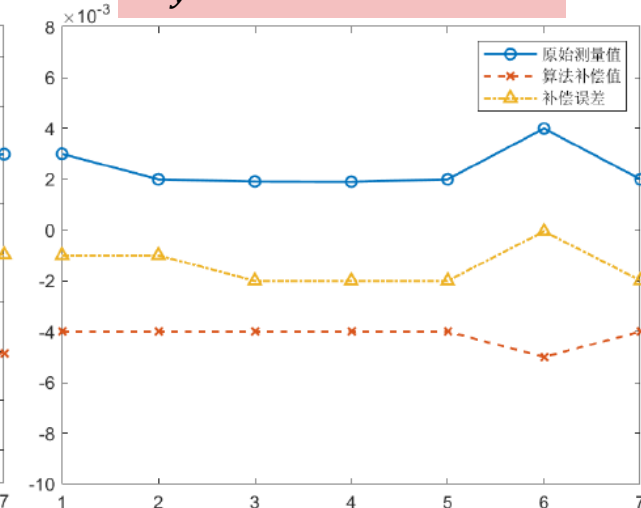
F_y 补偿实验结果验证



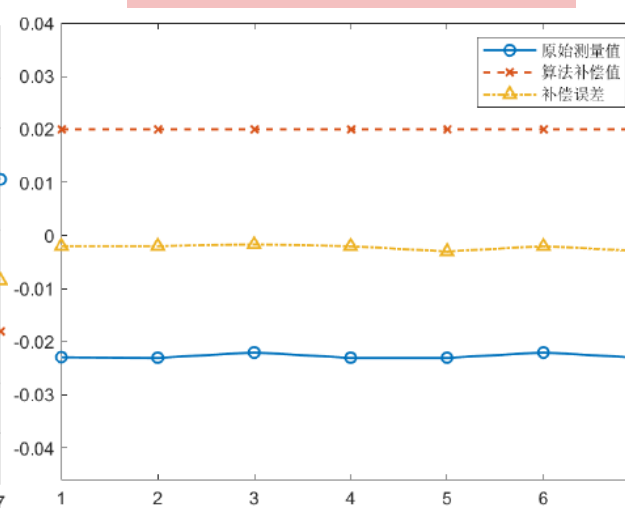
F_z 补偿实验结果验证



M_x 补偿实验结果验证



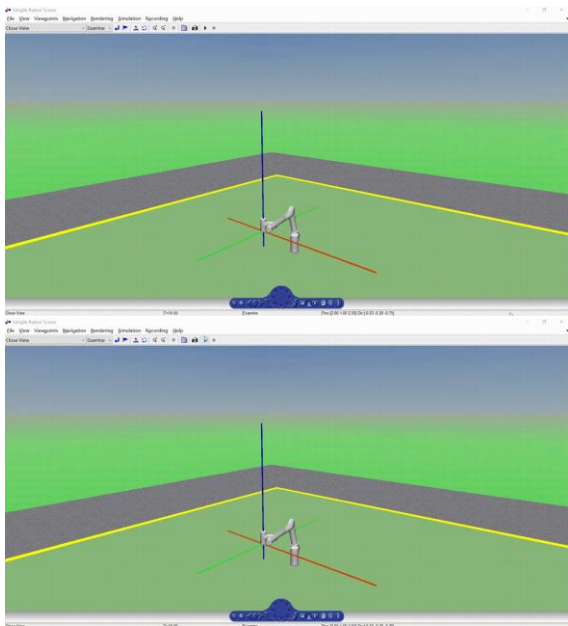
M_y 补偿实验结果验证



M_z 补偿实验结果验证

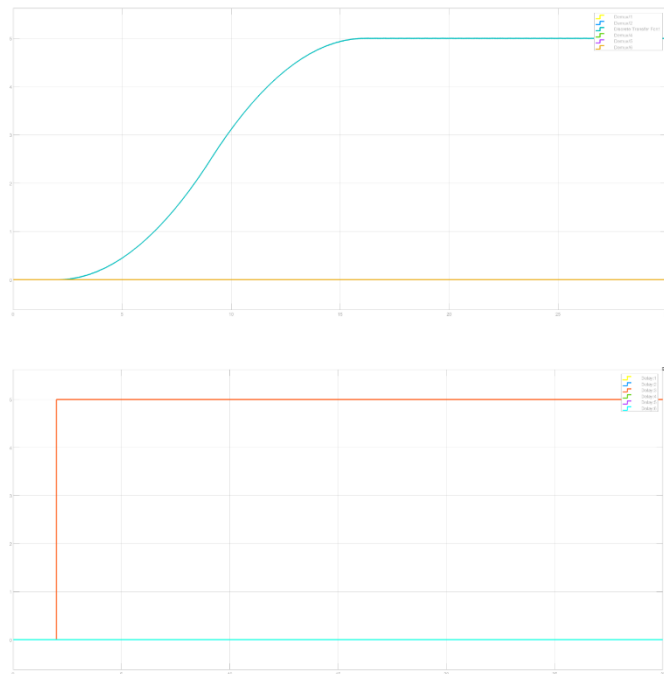
3

基于六维力传感器的恒力曲面打磨（三）



过渡环节仿真

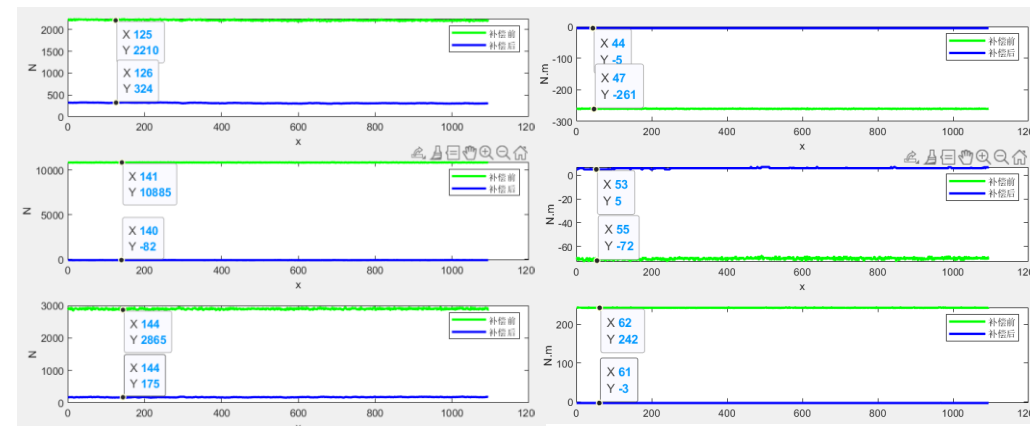
无过渡环节仿真



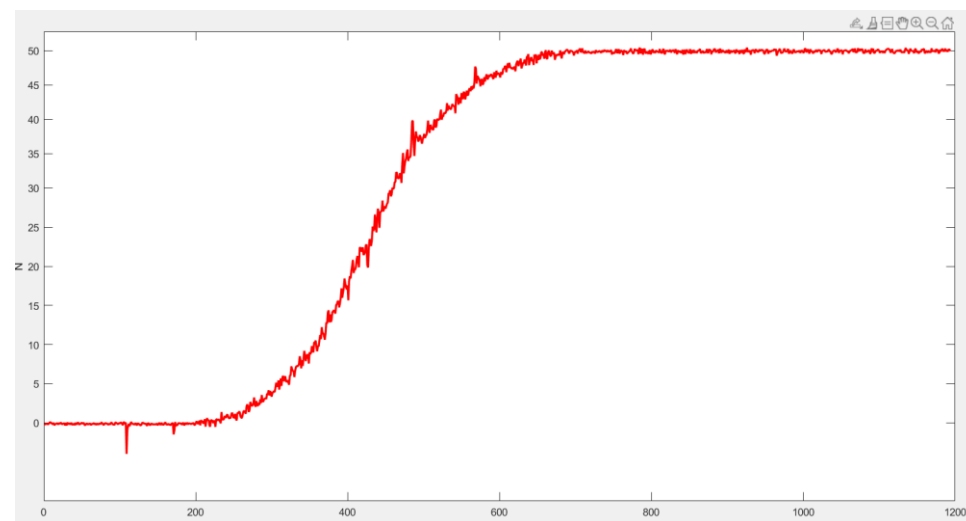
六轴协作机械臂恒力曲面打磨模型

仿真：验证算法

建立模型



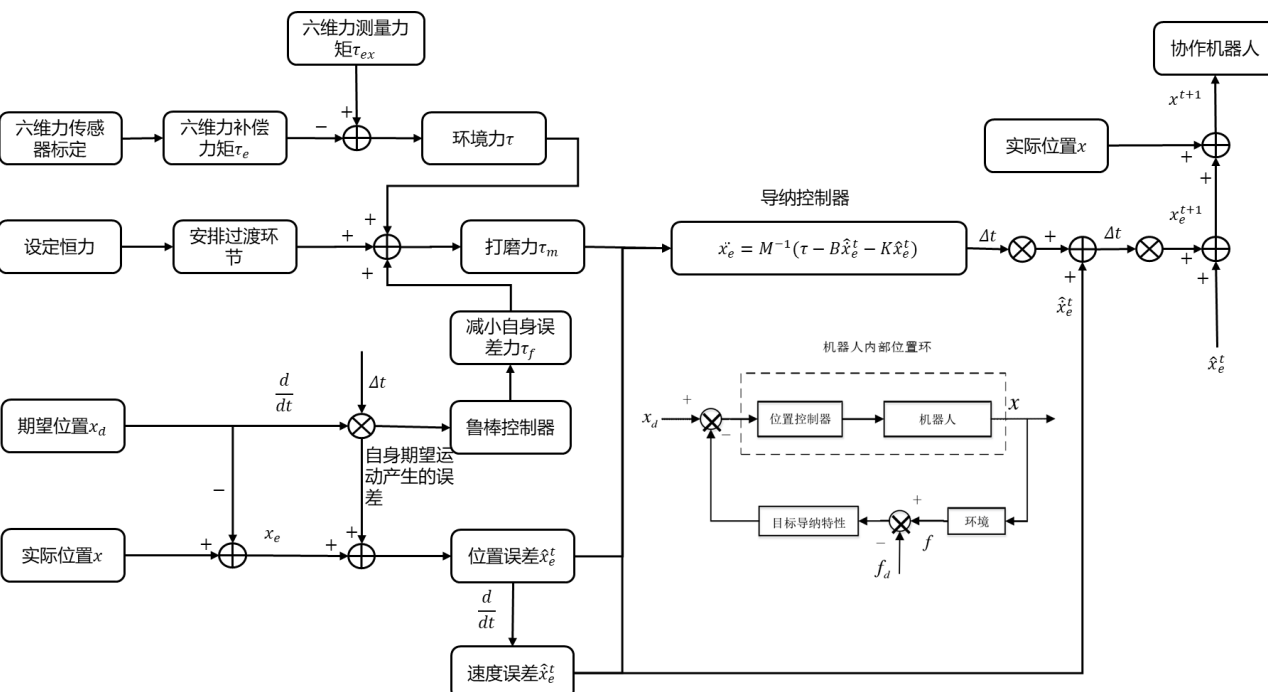
测试验证



最终效果

3

基于六维力传感器的恒力曲面打磨（四）



$$F_{x0} = \frac{F_{x3} + F_{x4}}{2}$$

$$F_{y0} = \frac{F_{y5} + F_{y6}}{2}$$

$$F_{z0} = \frac{F_{z1} + F_{z2}}{2}$$

$$T_{x0} = \frac{T_{x1} + T_{x2} + T_{x5} + T_{x6}}{4}$$

$$T_{y0} = \frac{T_{y1} + T_{y2} + T_{y3} + T_{y4}}{4}$$

$$T_{z0} = \frac{T_{z3} + T_{z4} + T_{z5} + T_{z6}}{4}$$

初始值计算

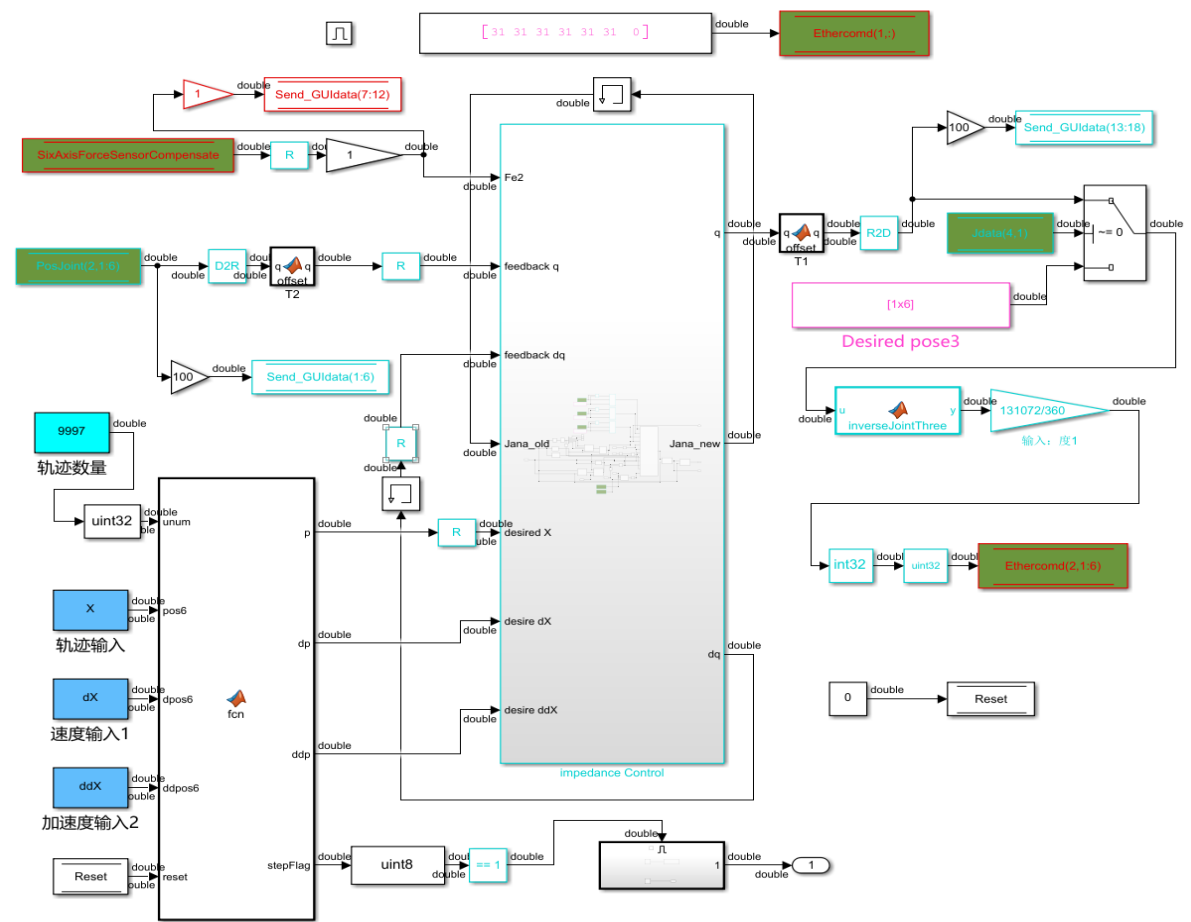
$$G = \frac{F_{z2} - F_{z1} + F_{x4} - F_{x3} + F_{y6} - F_{y5}}{6}$$

$$L_x = \frac{T_{y1} - T_{y2} + T_{z6} - T_{z5}}{4G}$$

$$L_y = \frac{T_{x2} - T_{x1} + T_{z3} - T_{z4}}{4G}$$

$$L_z = \frac{T_{y4} - T_{y3} + T_{x5} - T_{x6}}{4G}$$

工具质心及重力计算



模型 = 算法公式 + 程序代码

3

基于六维力传感器的恒力曲面打磨（五）



六维力传感器



打磨头



4

总 结 展 望

4

未来展望

目标：设计、仿真和验证机器人控制系统，涵盖从感知到运动的各个方面。

建立精确的模型

将模型精细化分割建模，包括传感器噪声和电机振动等，做好机电一体化集成，提供数字孪生和可预测性维护等解决方案。

感知环境，规划和决策

强化感知环境能力，构建分布式网络架构，为控制系统提供规划和决策选择，实现更加高级分布式多机协作共融



继续完善RCP和HIL

从仿真到硬件在环 (HIL) 测试，逐步验证机器人设计或算法，仿真具有精确的运动学、动力学和接触属性的机器人系统，。

更加开源、开放

提供丰富的开源控制算法模型，支撑行业应用，共建生态圈，立足教育，服务工业，创新发展。

MATLAB EXPO

基于模型设计赋能机器人研发与产业化

甄圣超, 博士, 合工大智能院机器人平台负责人, 人机协作安徽省重点实验室副主任
电话 (微信) 159 5512 0848



© 2023 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc.
See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.