

2019 《家电科技》学术年会

# 高性能电机系统及其机器人驱动应用

肖曦

清华大学电机系

2019年11月

# 背景

▶ 电能便于**传输、控制和应用**，是现代社会最主要的二次能源，在人类能源中占比超过60%，并将继续提升份额。

▶ **超过50%**以上的电能又是通过**电动机**利用和消耗，用于控制各种工作机构运行。

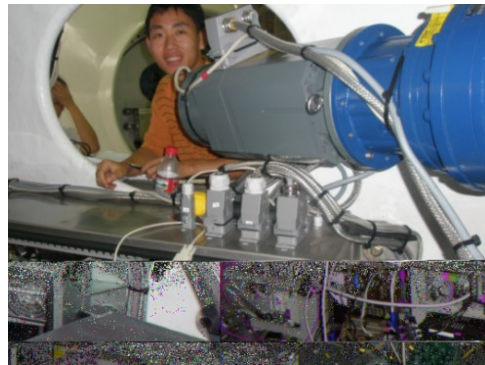


我国电机保有量约17亿kW，年总耗电量约3万亿kWh，占全社会总用电量的64%，其中工业领域电机总用电量为2.6万亿kWh，约占工业用电的75%。

# 背景

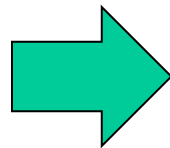
## 电机驱动控制系统应用广泛：

- 家电
- 电气化交通驱动系统
- 数控机床
- 工业机器人
- 工业自动化设备驱动控制系统
- 风机泵机压缩机控制系统
- ...



# 背景

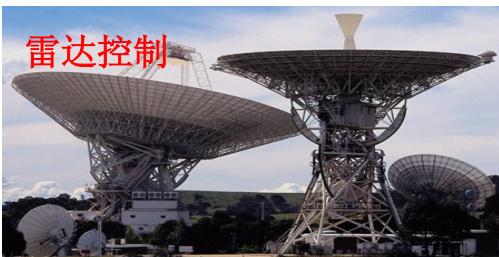
- 中国制造2025、工业4.0 — 对装备制造等行业进一步提高了精度、智能化等要求。
- 电动汽车、轨道交通等对驱动控制性能、效率、可靠性的更高要求。
- 国防、航空航天的高精度、高动态响应、高可靠性需求。



高性能电机  
系统



电动汽车



# 背景

## Estimated potential economic impact of technologies from sized applications in 2025, including consumer surplus

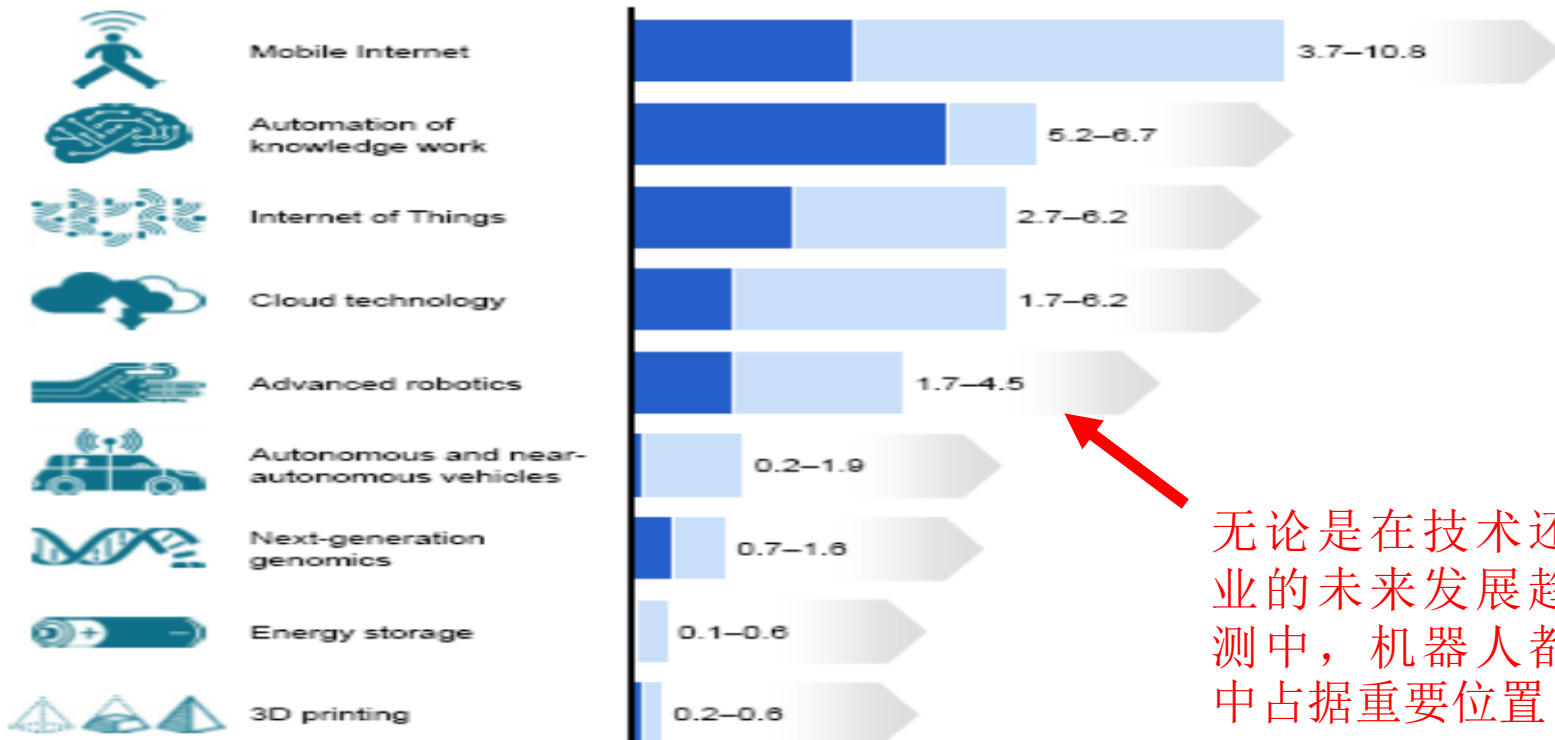
\$ trillion, annual

Range of sized potential economic impacts

Low

High

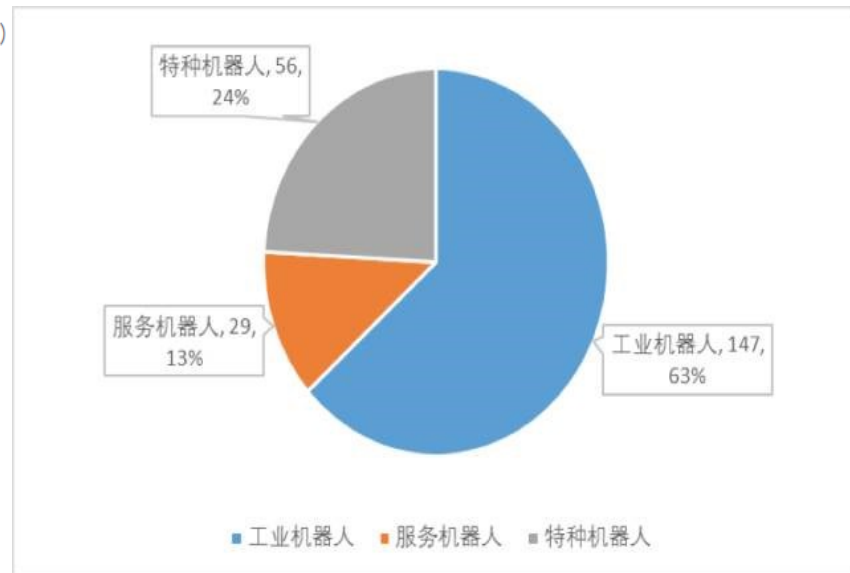
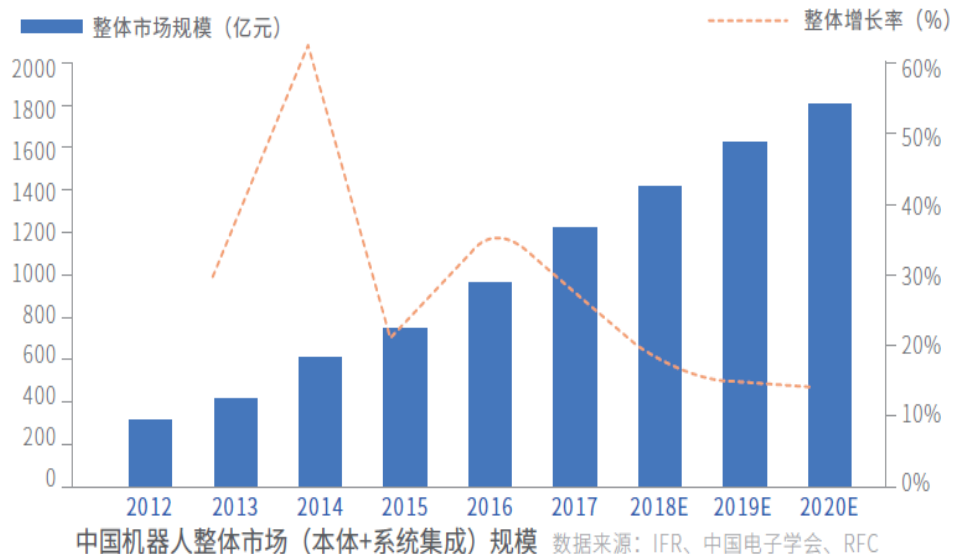
Impact from other potential applications (not sized)



无论是在技术还是商业的未来发展趋势预测中，机器人都在其中占据重要位置

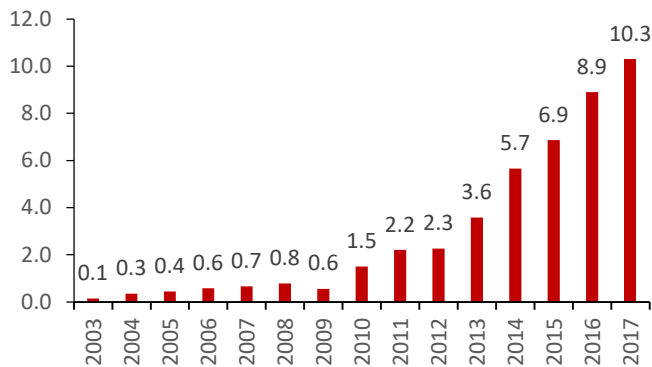
# 背景

## 中国发展现状：

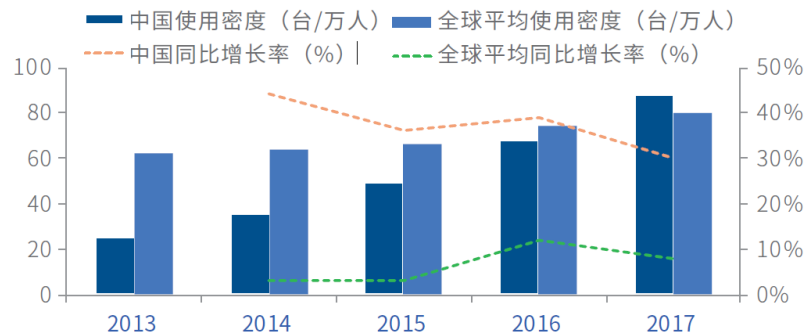


机器人市场结构（来源：IFR）

# 背景

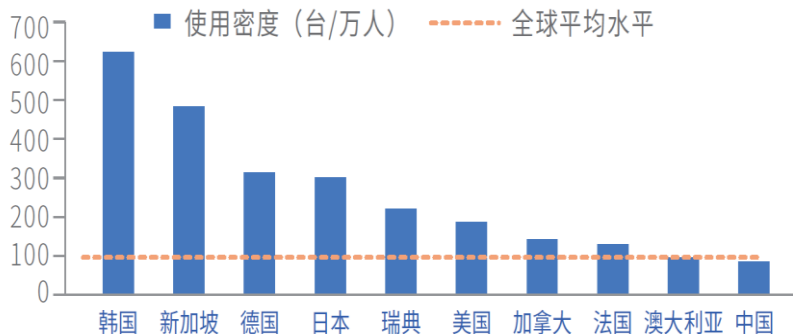


中国工业机器人年安装量

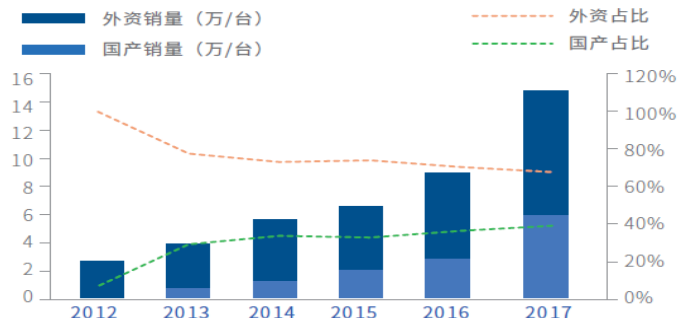


2013~2017年中国工业机器人使用密度及增长率

(来源: IFR)

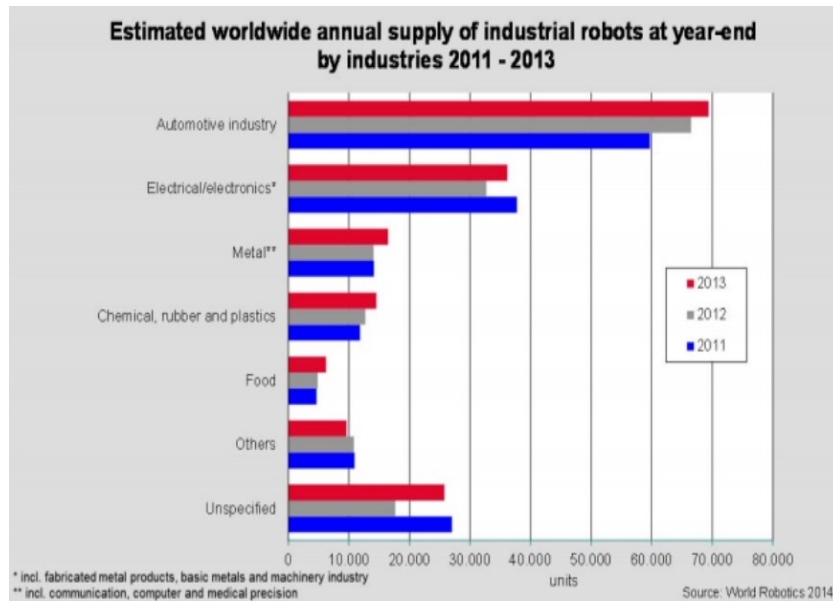
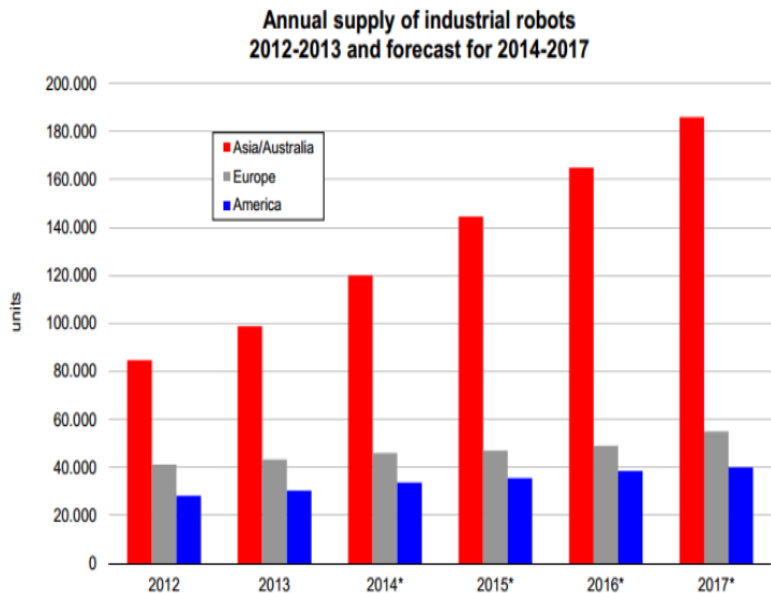


2016年全球主要国家工业机器人使用密度



2012~2017年国内工业机器人销量及占比 数据来源: 国家统计局、CRIA

# 背景



工业机器人装机量与行业应用（来源：IFR）

之前汽车工业是推动机器人产业发展的主要动力，当前电子（半导体）行业中机器人应用发展迅速，由此带动的制造业进一步自动化趋势是机器人的重要发展机会。





# 难点与关键技术问题分析

## 问题1：机器人本体的核心部件缺乏国产化技术

- 国产整机厂商以集成为主，缺乏高端核心技术与零部件供应商，整机成本和性价比难以和国外机器人巨头竞争，因此国产化率偏低，且主要用于搬运、上下料等低端场合，高端焊接/装配等应用偏少。

### 机器人核心部件与主要成本部分：

- 伺服电机系统
- 控制器
- 减速机构

亟待高端产品  
国产化！



# 难点与关键技术问题分析

## 问题2：机器人到应用的壁障未消除

- 机器人目前在工业中主要应用于高度程序化流水作业及相对简单的人工服务替代，应用范围相对来说还及其有限。对环境和工况的感知和认知能力缺乏，行为规划和管理智能化水平偏低。

### 机器人应用的关键推动力

- 对环境和工况的先进感知与辨识（图像，语音等）
- 基于AI和大数据的智能控制
- 人机共融与人机协作技术

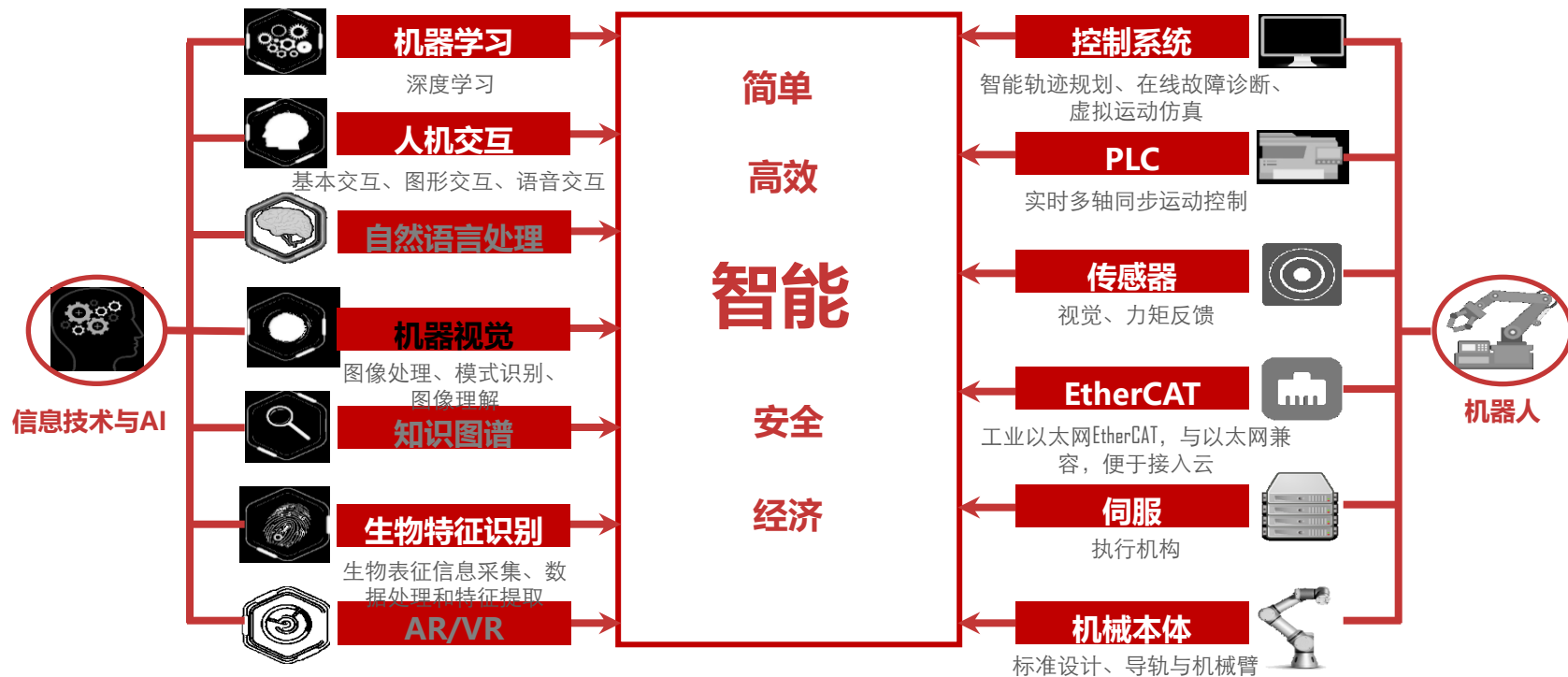
# 难点与关键技术问题分析

R1.0 到 R2.0 的跨越:

复杂计算

先进感知

智能认知





# 难点与关键技术问题分析

伺服电机驱动控制是机器人共性基础技术，主要目标是高性能执行运动控制指令，与此目标相关的关键性能指标主要包括：

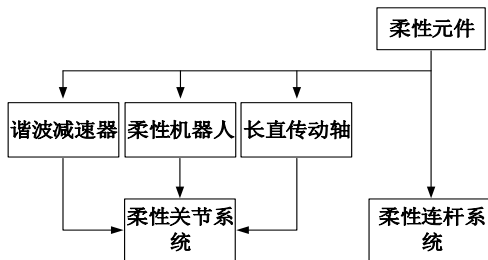
- 控制灵活性
- 高精度
- 高动态响应
- 高效率
- 高功率密度
- 高可靠性，环境适应性

实现方案：电驱、液压、气压、电液及电磁致伸缩等

# 难点与关键技术问题分析

## 机器人伺服驱动系统面临的特殊性问题：

- 机器人是一个典型的多轴运动系统，结构复杂，一般具有多个运动关节和运动臂，在不同伸展状态下系统的转动惯量、摩擦系数等负载参数变化剧烈。
- 柔性关节：谐波减速器、RV减速器的传递环节一般存在明显的柔性、死区、非线性摩擦系数等。
- 柔性臂杆：大尺度驱动连杆，如空间机械臂、柔性机械臂（协作机器人）等存在明显的挠性特征。





# 难点与关键技术问题分析

## 针对机器人应用的伺服系统整体设计、分析与验证技术：

- 机器人应用场景下伺服电机及驱动器的系统级设计方法和优化技术，实现机器人整机与伺服系统的性能参数最优匹配。
- 包括伺服系统在内的机器人系统级仿真技术，实现驱动优化设计方案的验证和快速迭代。
- 提升机器人整体安全、健康和智能化水平的伺服系统技术。
- 机器人专用伺服驱动算法测试平台，实现伺服系统与运动控制器、机器人本体的联合测试。



# 难点与关键技术问题分析

## 电机控制策略及电力电子变流技术：

- 机器人关节柔性及变惯量特性建模及分析方法，振动抑制、惯量辨识和参数自整定算法。
- 伺服电机力矩/速度的高动态响应控制方法。
- 模块化、一体化伺服驱动技术，提升电机系统的功率密度、可靠性及网络化、智能化水平。
- 宽禁带功率半导体技术、工业物联网技术、大数据技术的应用。



# 难点与关键技术问题分析

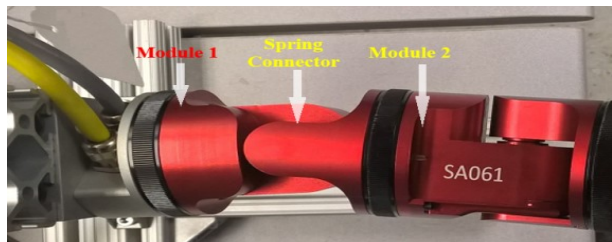
## 电机设计与分析技术：

- 基于伺服电机性能指标、参数与机器人工况特性的相关性分析，提出高可靠性、高性能、对工艺参数具有适应性的电机设计方法。
- 适用于机器人工况特性的高功率密度、高瞬时过载能力、低转矩脉动伺服电机。
- 批量制造条件下伺服电机参数一致性和性能保障技术。
- 伺服电机中传感器、编码器、制动器的集成技术。



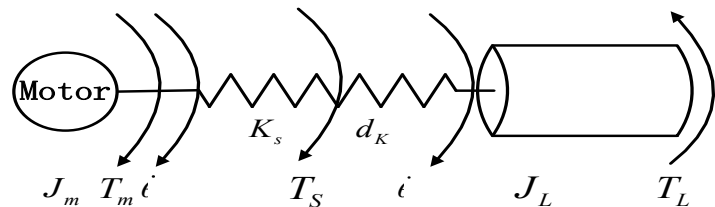
# 柔性负载特性的建模分析

柔性关节驱动系统-减速器柔性联轴系统等



关节机器人

建模



建模

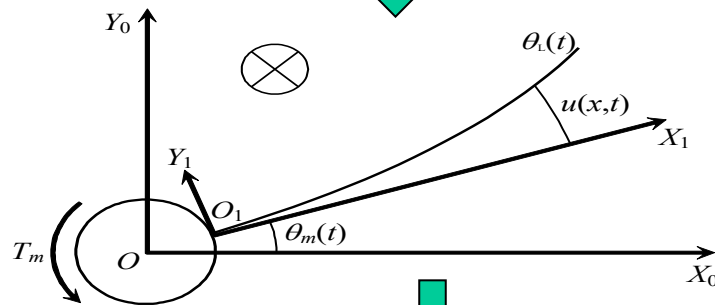
$$\begin{bmatrix} J_m \ddot{\theta} \\ J_L \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_m \\ T_S \\ -T_S \\ T_L \end{bmatrix}$$

柔性连杆驱动系统-柔性机械臂等



太阳翼帆板

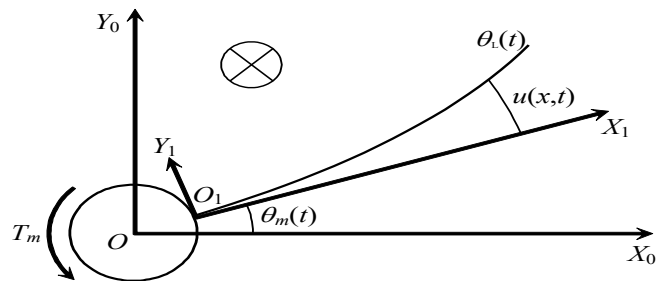
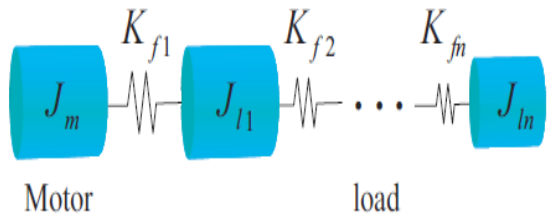
建模



建模

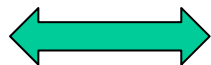
$$\begin{bmatrix} I_a \ddot{\theta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_m \\ \xi \Omega \dot{\eta} \\ \Omega \eta \\ F_a^T \end{bmatrix}$$

# 柔性负载特性的建模分析



$$I_a = J_m + \sum_{i=1}^n J_{li}, \eta_i = \theta_{li} - \theta_{l(m)}, F_{ai} = J_{li}, \Omega_{i,j} = \sqrt{\frac{K_{fi}}{J_{lj}}}$$

$$\begin{cases} I_a \ddot{\theta} & \dots & \dots & T_L \\ \ddot{\theta} & + \Omega_{21}^2 \eta_1 - \Omega_{21}^2 \eta_2 + \ddot{\theta} & & \\ \ddot{\theta} & \eta_1 + (\Omega_{22}^2 + \Omega_{32}^2) \eta_2 - \Omega_{32}^2 \eta_3 + \ddot{\theta} & & \\ \dots & & & \\ \ddot{\theta} & \eta_{n-1} + \Omega_{nn}^2 \eta_n + \ddot{\theta} & & \end{cases}$$



$$\begin{cases} I_a \ddot{\theta} & \dots & \dots \\ \ddot{\theta} & \eta_1 + \ddot{\theta} & \\ \ddot{\theta} & \eta_2 + \ddot{\theta} & \\ \dots & & \\ \ddot{\theta} & \eta_n + \ddot{\theta} & \end{cases}$$

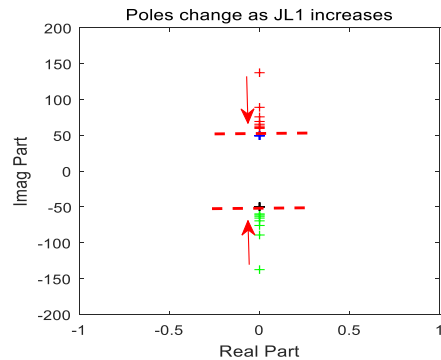
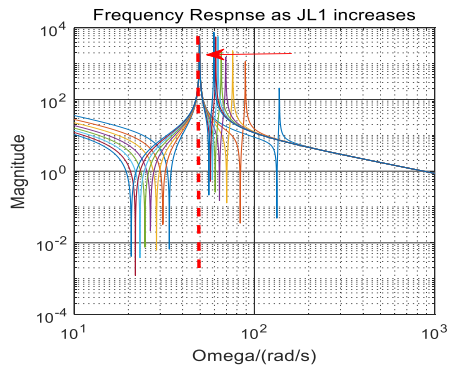
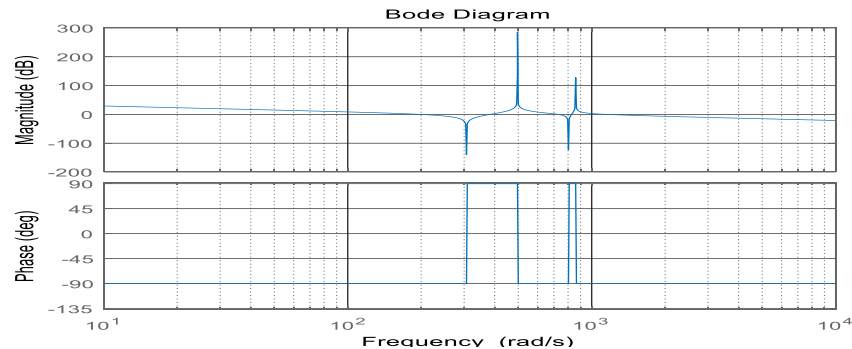
从建模分析角度，柔性关节系统和柔性连杆系统可相互等效。

# 柔性负载特性的建模分析

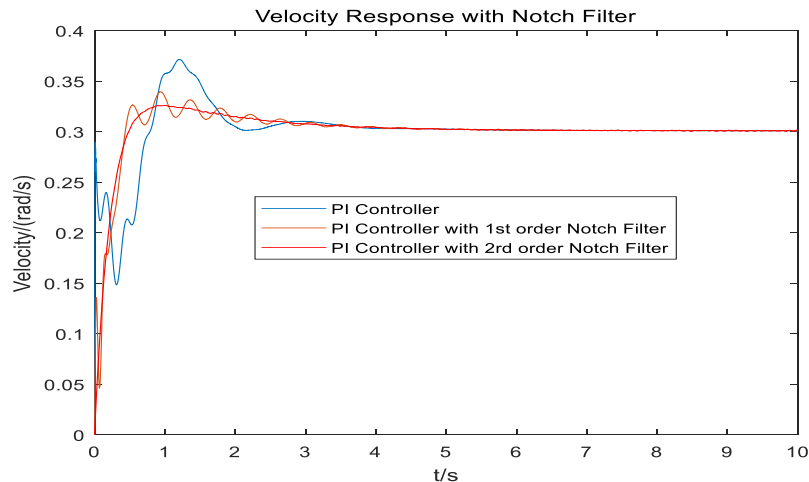
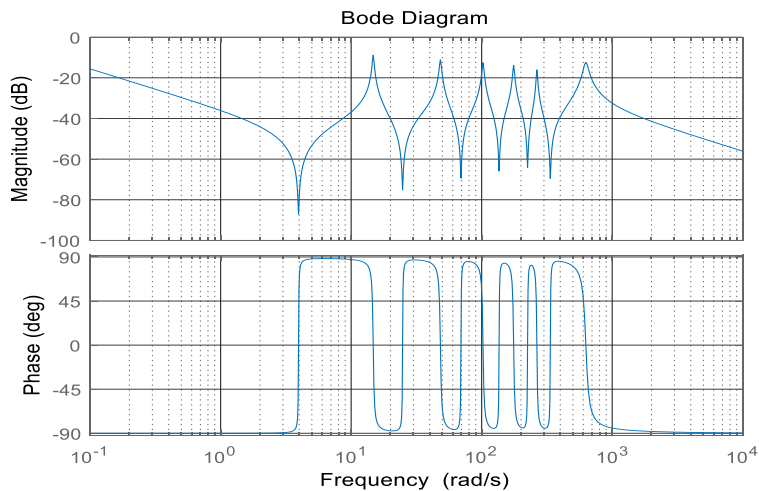
## 柔性关节系统算例分析：

$$\eta_1 = \theta_m - \theta_{l1}, \eta_2 = \theta_{l1} - \theta_{l2}$$

$$\begin{bmatrix} i & & & \\ & i & & \\ & & i & \\ & & & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega & & & \\ & \omega_{l1} & & \\ & & \omega_{l1} & \\ & & & \omega_{l2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\eta_1 + \frac{T_m}{J_m} \\ \eta_1 - \frac{K_{f2}}{J_{l1}} \eta_2 \\ \eta_2 - \frac{T_L}{J_{l2}} \end{bmatrix}$$



# 柔性负载特性的建模分析



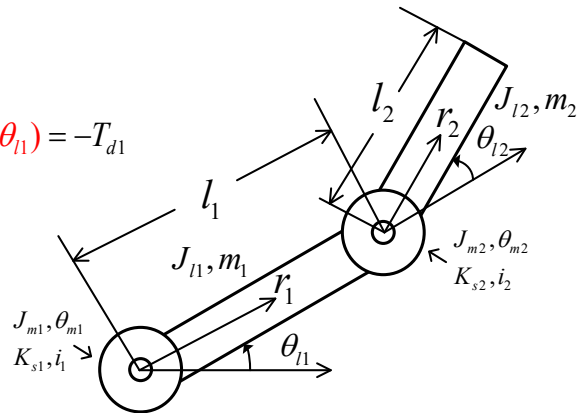
- 包含高阶柔性谐振模态的柔性关节和柔性臂杆系统，其谐振都可以通过高阶谐振滤波器进行抑制；
- 在系统中存在多阶柔性模态情况下，若仅考虑低阶系统模态，容易造成系统不稳定。

# 关节建模与优化控制

除柔性特征外，机器人不同关节的运动彼此有相互影响、存在复杂的耦合和非线性特征，如负载惯量变化、扭矩变化（离心力、科氏力、重力），同样会引起定位精度降低、振动等不良后果。

$$\begin{cases}
 J_{m1} \ddot{\theta}_{11} - l_1 \left( \frac{\theta_{m1}}{i_1} - \theta_{11} \right) = T_{e1} - T_{dm1} \\
 (J_{l1} + J_{l2} + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 r_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_{11} + m_2 l_1 r_2 \cos \theta_{12} \ddot{\theta}_{12} + \dots \\
 J_{m2} \ddot{\theta}_{12} - l_2 \left( \frac{\theta_{m2}}{i_2} - \theta_{12} \right) = T_{e2} - T_{dm2} \\
 (J_{l2} + m_2 l_1 r_2 \cos \theta_{12}) \ddot{\theta}_{12} + m_2 l_1 r_2 \ddot{\theta}_{11} + K_{s2} \left( \frac{\theta_{m2}}{i_2} - \theta_{12} \right) = -T_{d2}
 \end{cases}$$

$$-K_{s1} \left( \frac{\theta_{m1}}{i_1} - \theta_{11} \right) = -T_{d1}$$



**难点：**多阶柔性；相互作用力矩耦合；惯量、刚性等参数变化。

# 关节建模与优化控制

由两连杆机械臂的动力学方程构建状态空间模型：

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau$$

$q = [\theta_{m1}, \theta_1, \theta_{m2}, \theta_2]^T$ ;  $M(q)$ : 惯量矩阵;  $C(q, \dot{q})$ : 科里奥利力及离心力矩阵;  $B$ : 阻尼矩阵;  
 $K$ : 弹性矩阵;  $G(q)$ : 重力矩向量;  $Q = [T_1 \ 0 \ T_2 \ 0]^T$ : 控制输入向量;  
 $J^T(q)$ : 雅各比矩阵;  $F = [F_x \ F_y]^T$ : 负载向量

$$\dot{x} = g(x)u$$

$$x = [q \ \dot{q}]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -M(q)^{-1}(C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -M(q)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- B、K为常数矩阵，其他几个矩阵均有非线性项，主要表现为三角函数关系和转速的乘积项
- 耦合强度同速度（C矩阵）、加速度（M矩阵）相关，在速度快、加速度快的情况下传统PI控制没有考虑两轴之间的耦合因此对非线性项的抑制能力非常弱
- 耦合因素作用在机械臂连杆，伺服控制为电机扭矩，两者中间存在弹性环节，增大了控制难度



# 关节建模与优化控制

## 机械谐振抑制方案：

### 被动方式

- 滤波算法：在速度环输出与电流环给定加入低通滤波器或陷波滤波器来抑制机械谐振；频率设定选取困难
- 谐振比例控制：将扭转转矩引入控制环等效改变系统的机械谐振点来避免振荡；谐振点依然存在

### 主动方式

- 极点配置：理想的极点配置很难实现
- 最优控制：依赖模型参数，容易产生稳态误差
- 滑模控制：抖振问题



# 关节力检测与柔顺控制

**背景：**随着机器人的大量使用及生产流程的柔性化要求提升，在生产制造中，许多工序对机器人提出了与人或环境协调合作的需求，成为近年来机器人领域的热点问题。

**目标：**机器人具备“感知能力”和“反应能力”，根据环境的变化改变自身的行为。

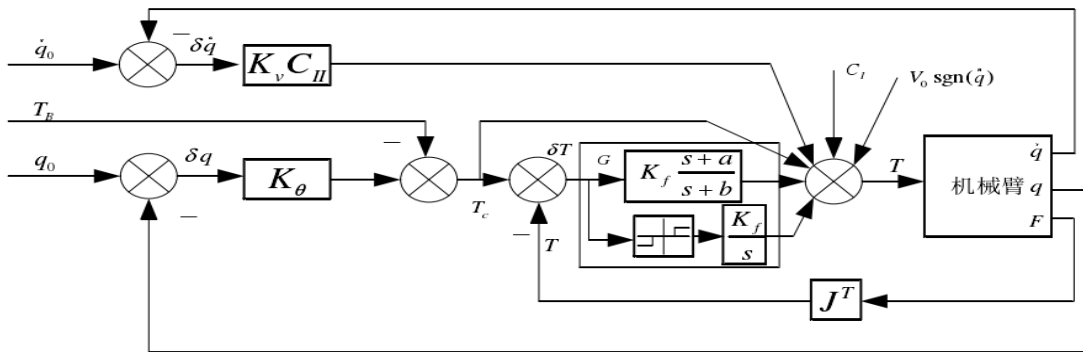
- **场景一、**人机协作安全性，机器人接触到人时应能及时感知并控制输出力幅度，避免人可能受到的伤害，在此基础上由人进行协调指挥和控制。
- **场景二、**某些与环境需要进行刚性接触的任务，在其刚性接触的自由度上需要保持一定的接触力且接触力不对机械臂输出机械功，而在其他的自由度上需要进行轨迹规划的位置控制。



# 关节力检测与柔顺控制

## ➤ 力位混合控制

引入一个柔顺选择矩阵，区分需要进行力控制的自由度和需要进行位置控制的自由度，从而实现位置和力的分别独立控制。



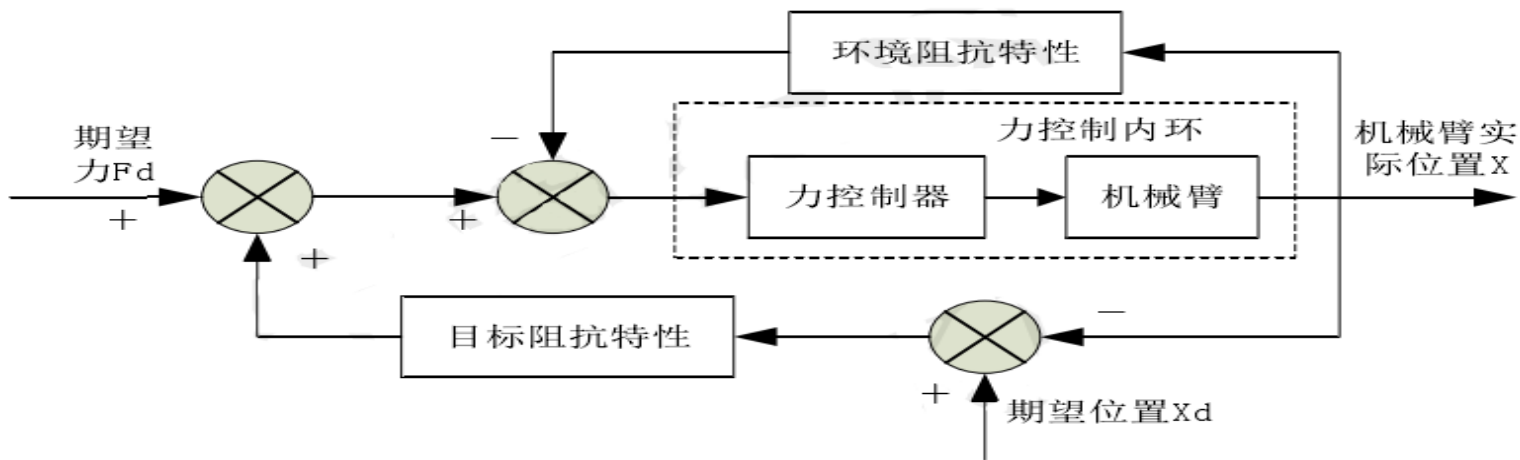
一种主动刚度控制(Active Stiffness Control)

**局限性:** 1) 选择正确该矩阵依赖于环境和具体任务，未知的工作环境中此种方法的使用受到了限制。2) 位置控制和力控制对于刚度参数的要求不同，前者期望高的刚度，后者期望低的刚度，控制的鲁棒适应性差。

# 关节力检测与柔顺控制

## ➤ 阻抗控制

阻抗控制根据外环和内环控制量的不同可以分为基于位置的阻抗控制和基于力的阻抗控制两种。



基于力控制的阻抗控制策略



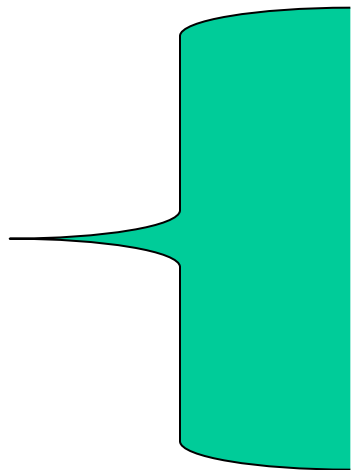
# 关节力检测与柔顺控制

根据力传感器位置区分阻抗控制的三种情况：

- **末端力传感器方案**，能够测量执行器末端接触力，从而对末端在笛卡尔空间内实施准确的阻抗控制，具有较好的精确性，但是无法反馈臂体受力，测控范围有局限性。
- **关节力矩传感器方案**，可测量整个机械臂上的受力，能够通过关节空间到笛卡尔空间的转化实现末端在笛卡尔空间中的阻抗控制，但需要考虑动力学因素的影响，计算复杂。
- **基座六维力传感器方案**，测量范围可覆盖整个机械臂，末端执行器上的受力测量精度较差，也不能区分臂体受力位置，需要考虑动力学因素的影响。

# 小结

交叉与结合



电机+电力电子

驱动控制+运动控制

互联网+感知

大数据+人工智能

谢谢！

