

第四章 经典分散运动控制

4.4 集中前馈补偿位置PID控制器

华东理工大学信息科学与工程学院

卿湘运

2024年1月



集中前馈补偿位置PID控制器

● 集中前馈补偿的实现

➤ 通用电机模型

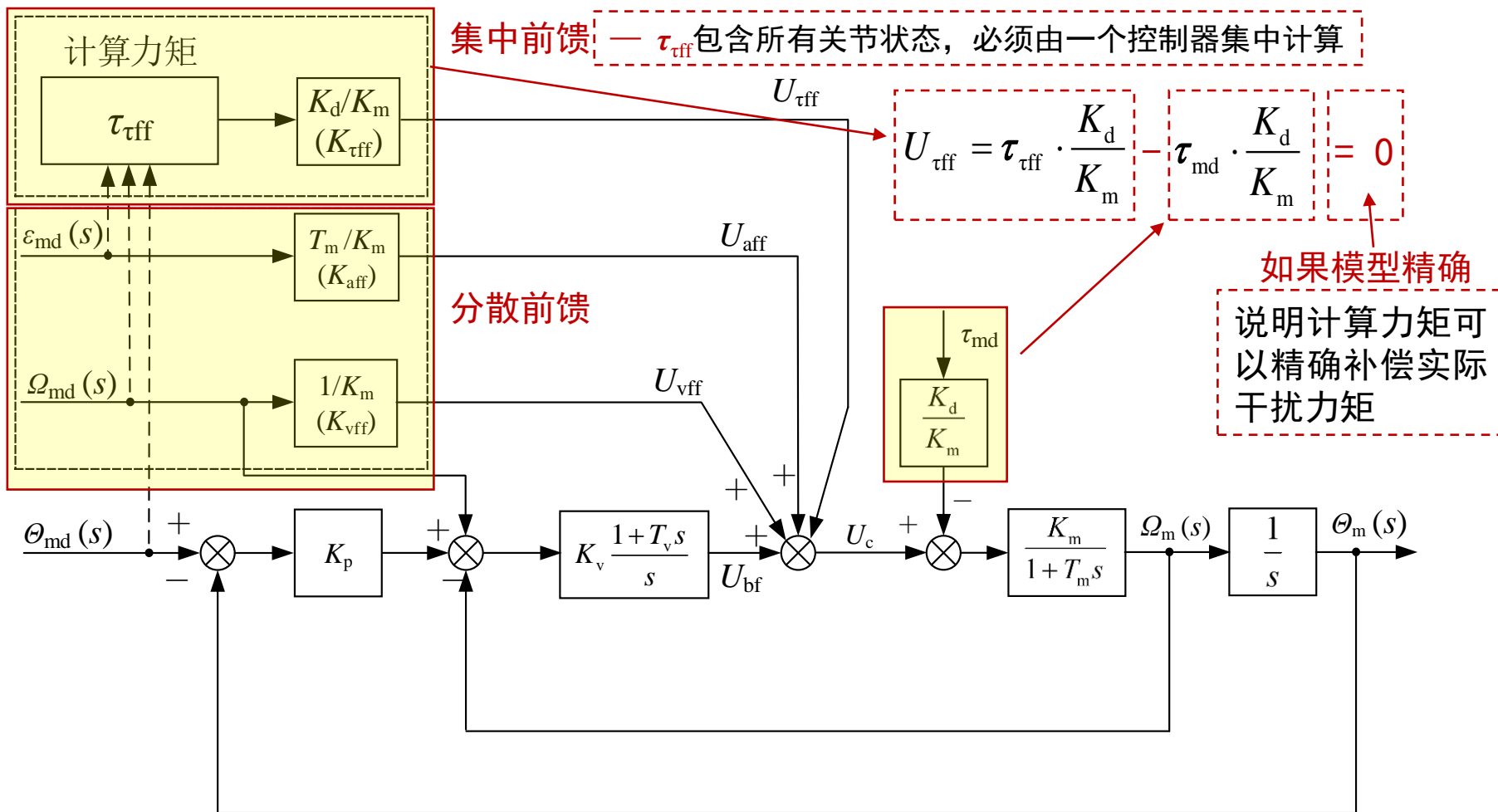
- 理论干扰力矩 $\tau_{\text{tff}} = [\tau_{\text{tff}}]_i = [\Delta \mathbf{M}_m(\theta) \varepsilon_m + \mathbf{V}_m(\theta, \omega) \omega_m + \mathbf{G}_m(\theta)]_i$

下标*i*表示第*i*行，对应被控关节电机

按扰动补偿
的前馈校正

集中前馈 — τ_{tff} 包含所有关节状态，必须由一个控制器集中计算

分散前馈



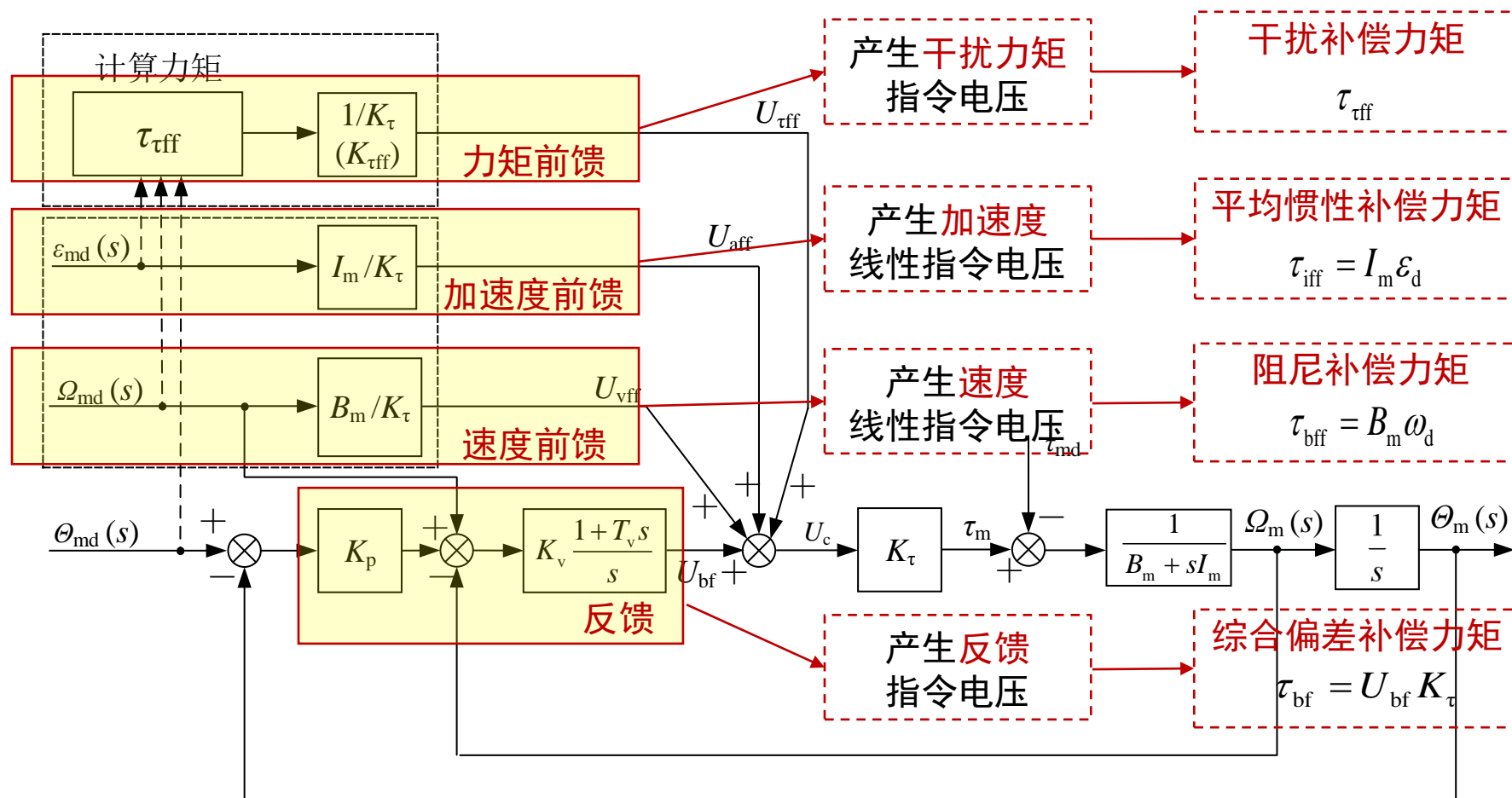
集中前馈补偿位置PID控制器

● 集中前馈补偿的实现

➤ 力矩电机模型

- 理论干扰力矩 $\tau_{\text{tff}} = [\tau_{\text{tff}}]_i = [\Delta M_m(\theta)\varepsilon_m + V_m(\theta, \omega)\omega_m + G_m(\theta)]_i$

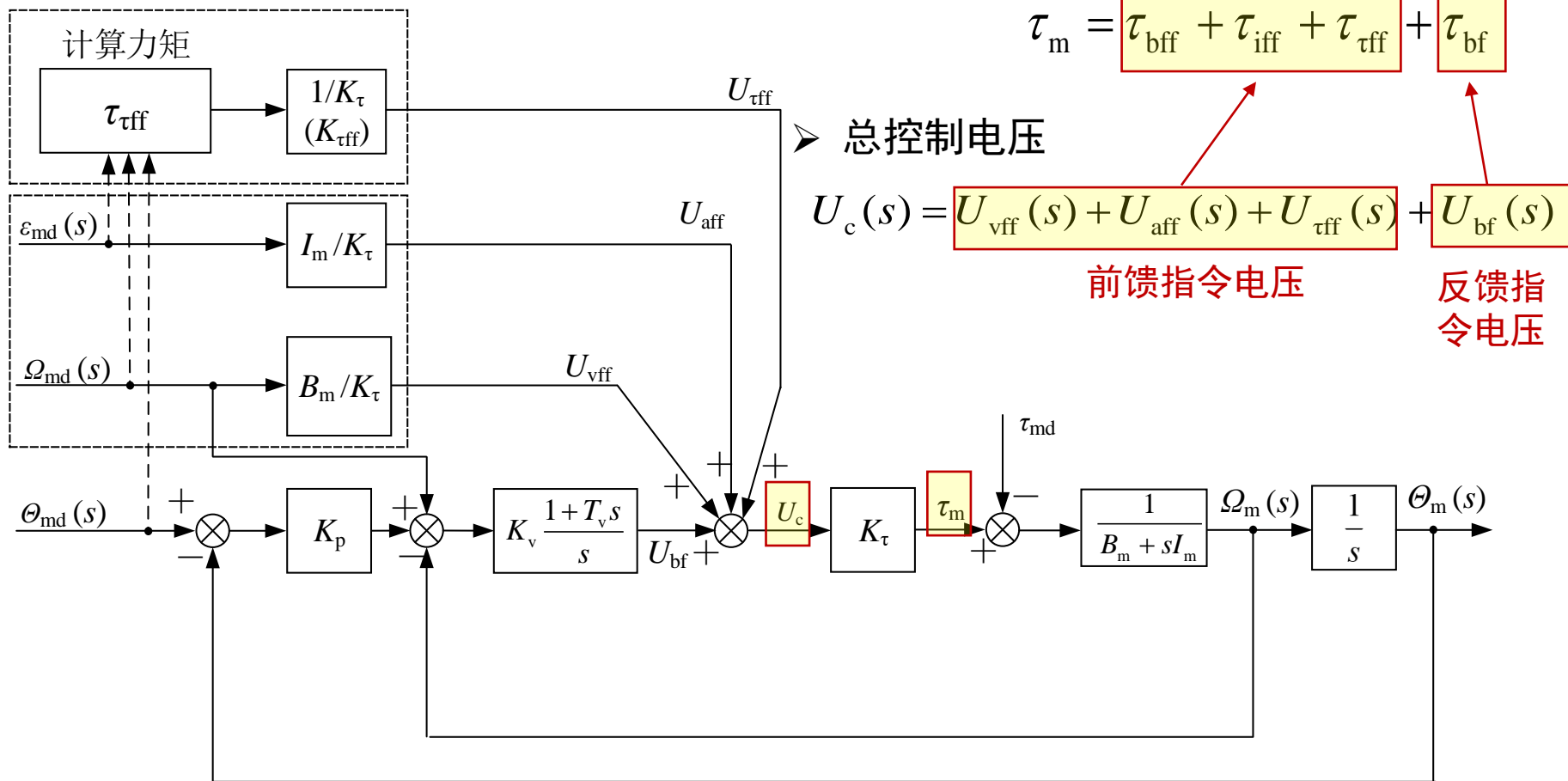
按扰动补偿
的前馈校正



集中前馈补偿位置PID控制器

● 集中前馈补偿的实现

➤ 力矩电机模型

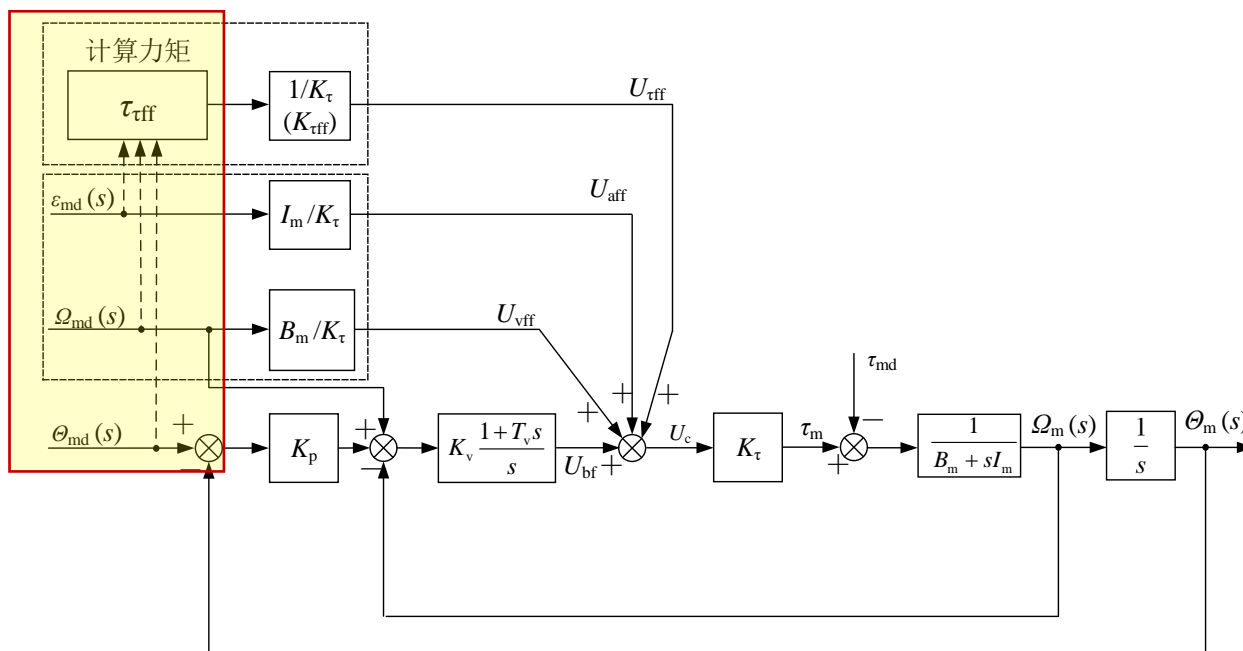


集中前馈补偿位置PID控制器

● 干扰力矩的计算频率

➤ 离线计算

- 上位机（集中控制器）完成轨迹规划后，在启动伺服控制前，计算非线性项
- 关节转角、速度和加速度取期望值
- 按固定的伺服周期，随期望值一同下发给独立关节位置PID控制器
- 问题：机器人实际状态与规划状态不符，计算力矩不精确



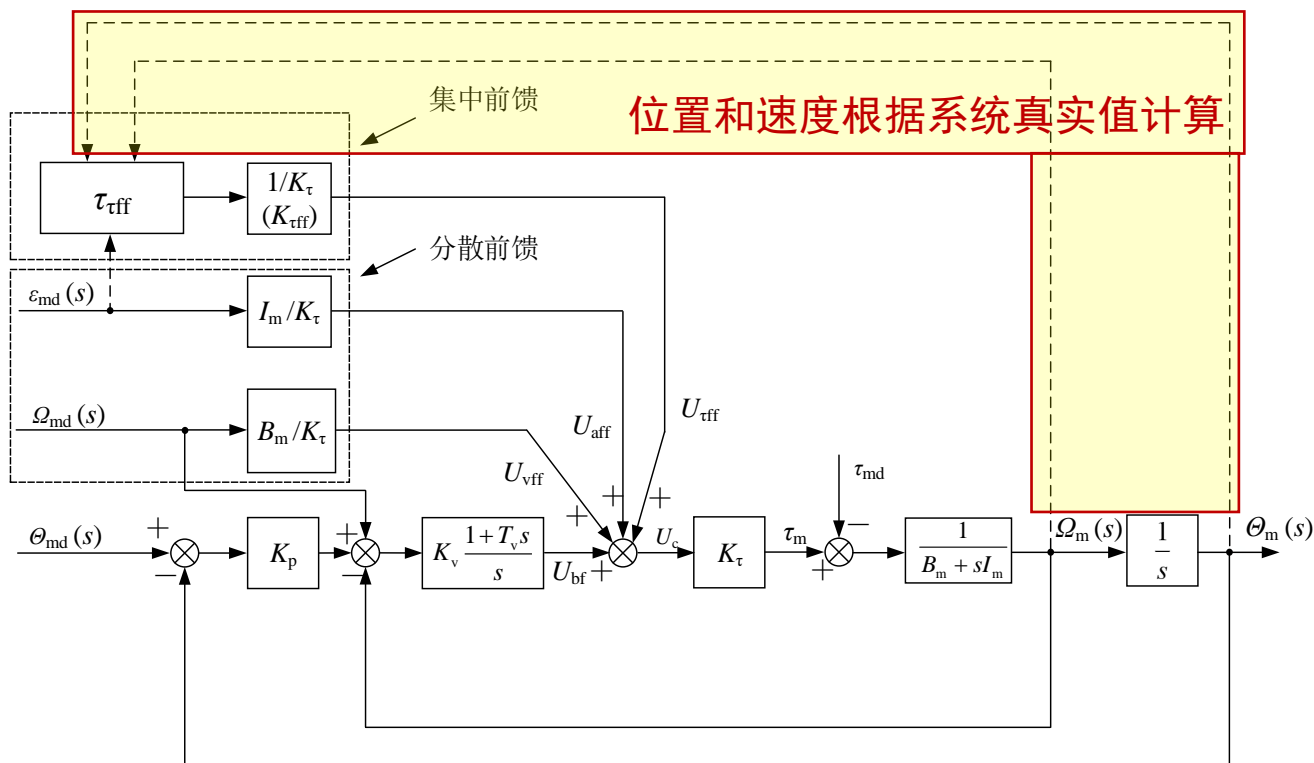


集中前馈补偿位置PID控制器

● 干扰力矩的计算频率

➤ 在线计算

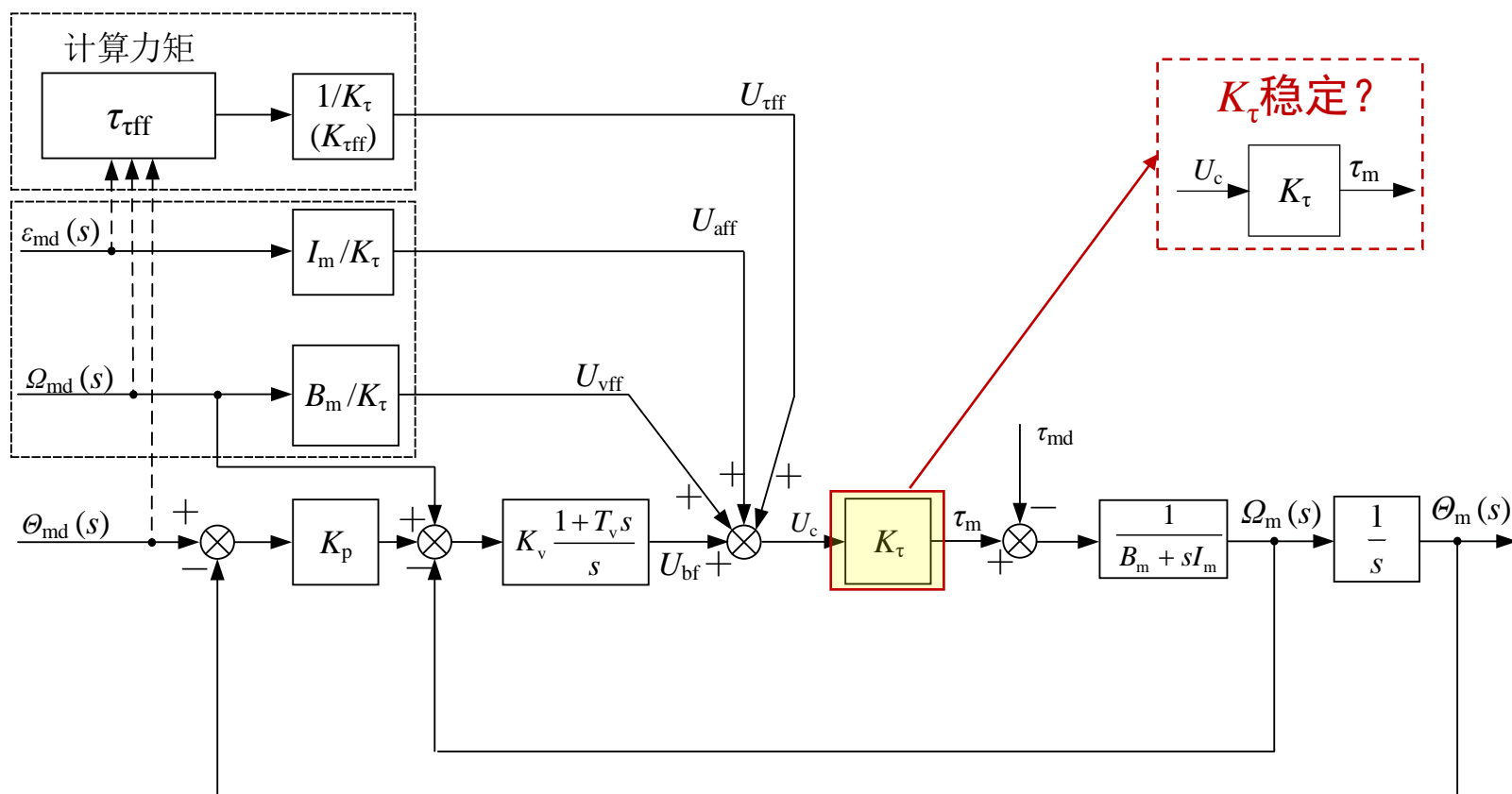
- 集中控制器在线计算理论干扰力矩，各矩阵的位形参数取机器人的实际值
- 为降低对计算性能的要求，计算力矩的更新频率可低于伺服频
- 例如伺服频率的1/10——**双频率控制**



集中前馈补偿位置PID控制器

● 知识点——力矩增益 K_τ 的线性度

- 普通驱动器依赖电流反馈，力矩增益 K_τ 线性度不佳
- 如果不用线性电流放大器，如何提升力矩增益 K_τ 的线性度

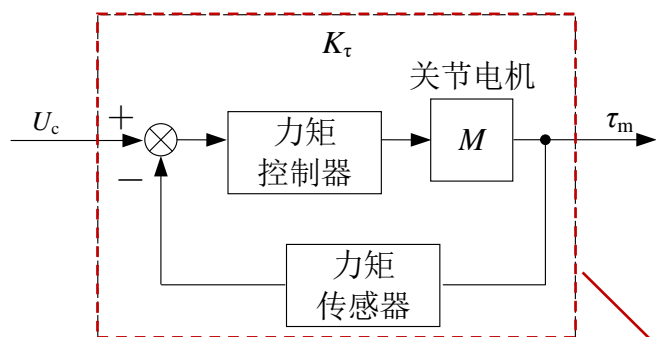


集中前馈补偿位置PID控制器

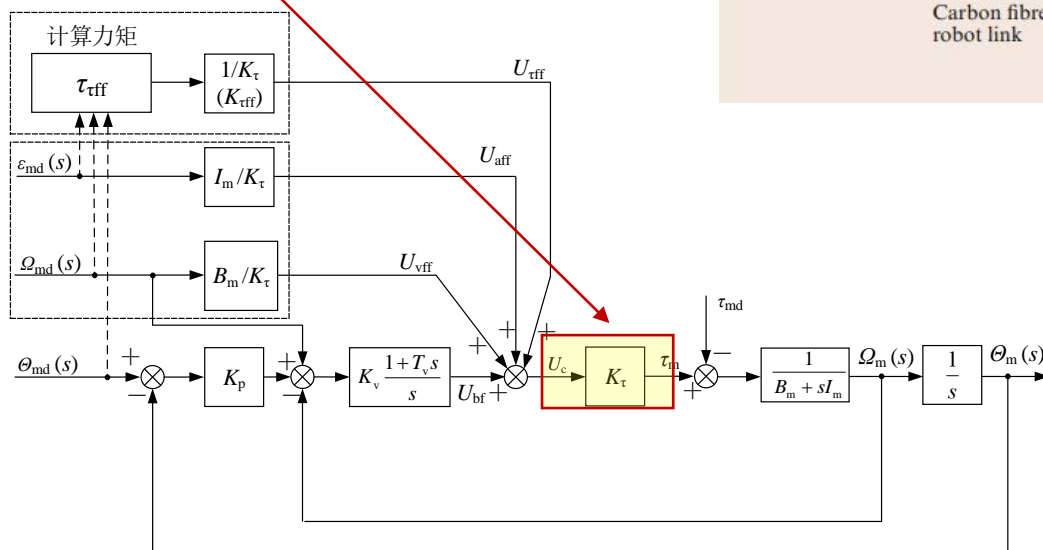
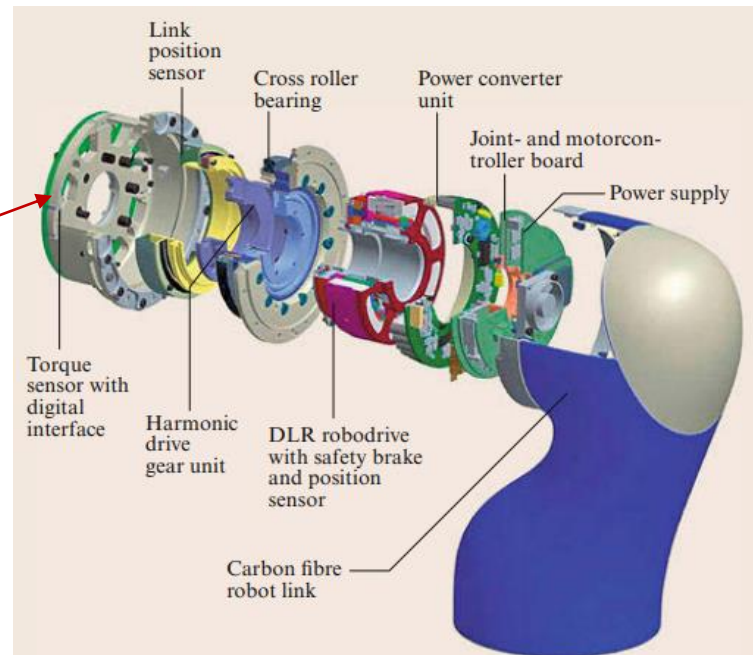
● 知识点——关节力矩的闭环控制

- 为每个关节增加力矩传感器
- 设计力矩闭环控制器

力矩闭环控制器



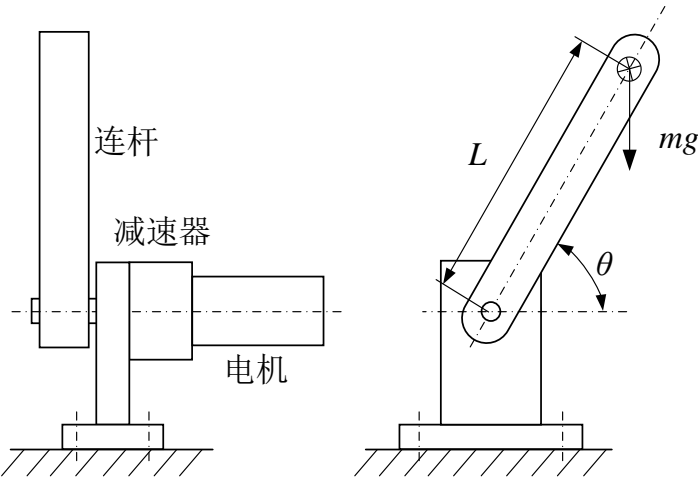
关节力矩传感器



集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例1 — 竖直面单关节机器人的控制

➤ 在前述单关节机器人分散前
馈补偿PID控制器的基础上，
增加集中前馈补偿项，观察
系统跟踪位置S轨迹和速度S
轨迹时的加速度响应曲线



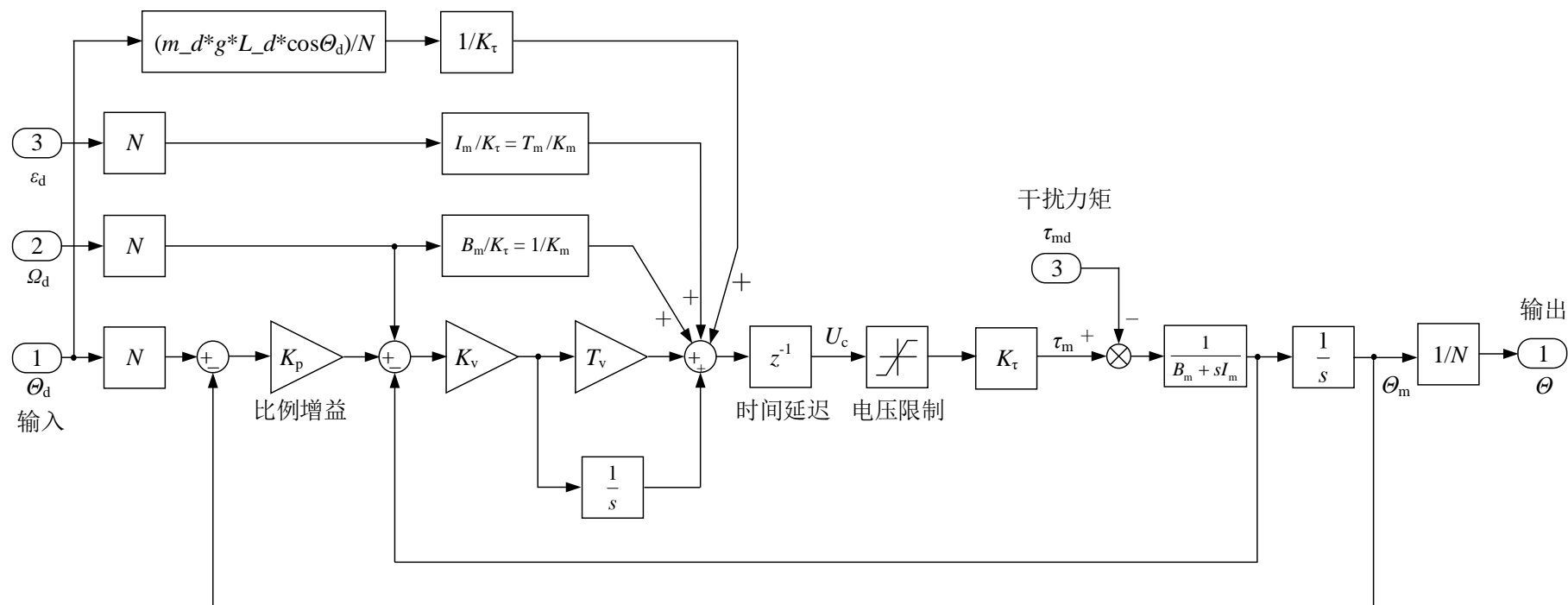
	项目	符号	取值	单位
电机参数	额定电压	u_r	24	V
	额定转速	ω_r	258	rad/s
	额定转矩	τ_r	8.82×10^{-2}	N·m
	额定电流	i_r	1.09	A
	电枢电阻	R_a	2.49	Ω
	电枢电感	L_a	6.10×10^{-4}	H
	转矩常数	K_a	8.22×10^{-2}	(N·m)/A
	感应电动势常数	K_e	8.24×10^{-2}	V/(rad/s)
	转子惯量	I_r	1.19×10^{-5}	Kg·m ²
	转子阻尼	B_r	4.10×10^{-4}	(N·m)/(rad/s)
系统参数	连杆质量	m	0.5	Kg
	连杆质心距转轴距离	l	0.1	m
	负载惯量	I_l	5.0×10^{-3}	Kg·m ²
	关节阻尼	B_l	2.0×10^{-2}	(N·m)/(rad/s)
	跨导增益	K_g	1	A/V
	重力加速度	g	9.8	m/s ²

集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例1 — 竖直面单关节机器人的控制

➤ 利用SIMULINK搭建仿真系统

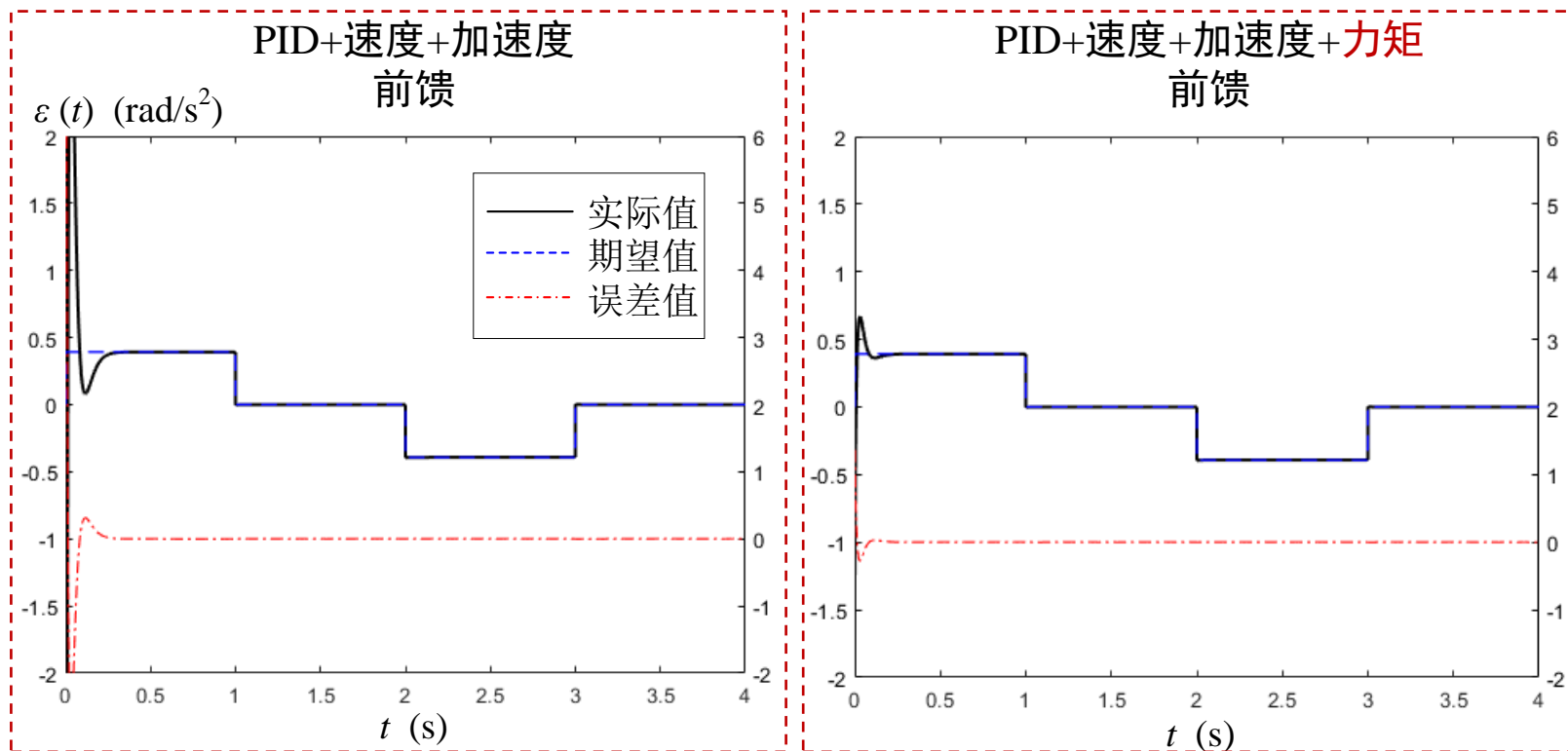
- 用于计算干扰力矩的参数 $m_d = m*(1-5\%)$ 和 $L_d = L*(1-5\%)$ 为理论值



集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例1 — 竖直面单关节机器人的控制

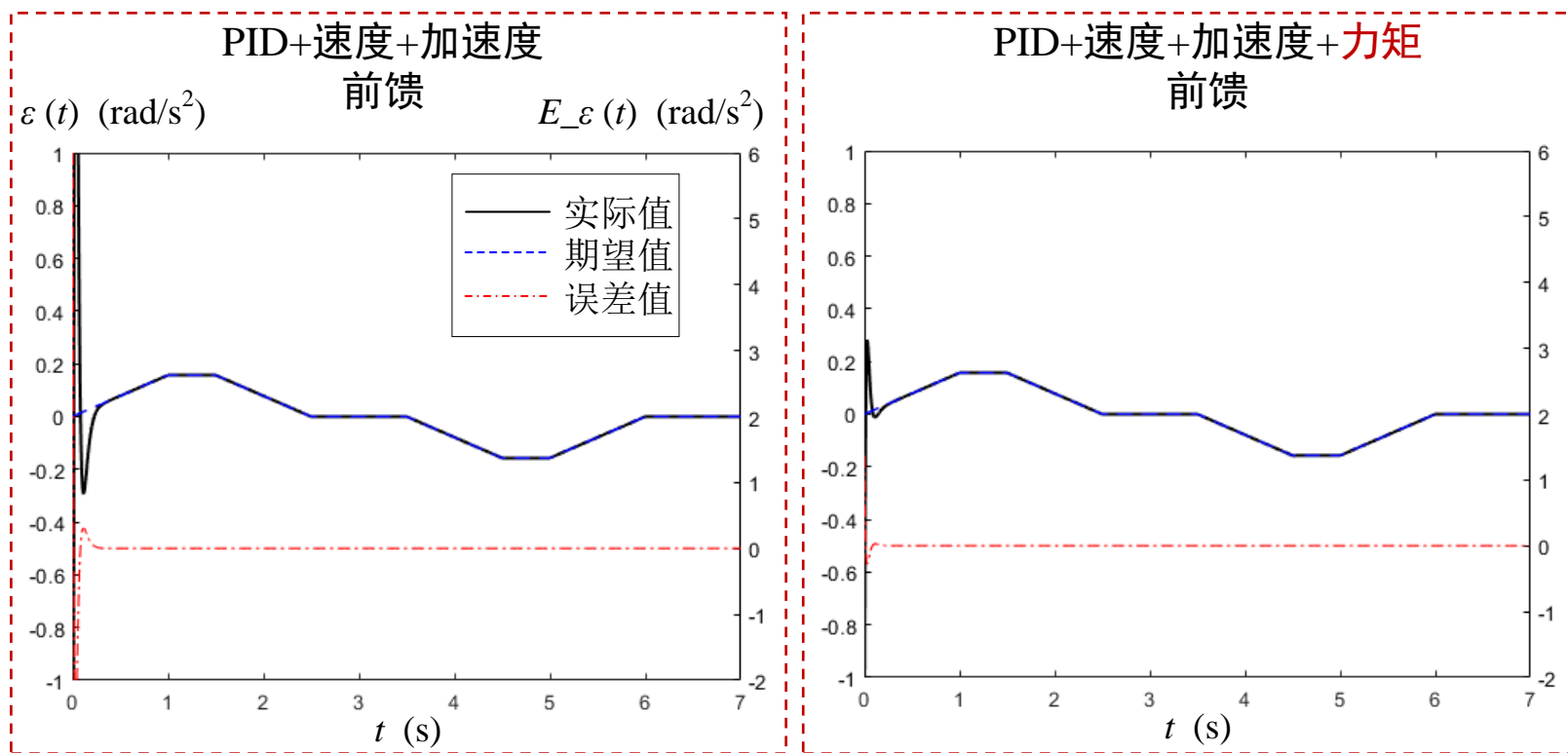
- 跟踪位置S轨迹 —— 通过加速度曲线观察力矩前馈的效果



集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例1 — 竖直面单关节机器人的控制

➤ 跟踪速度S轨迹 —— 通过加速度曲线观察力矩前馈的效果

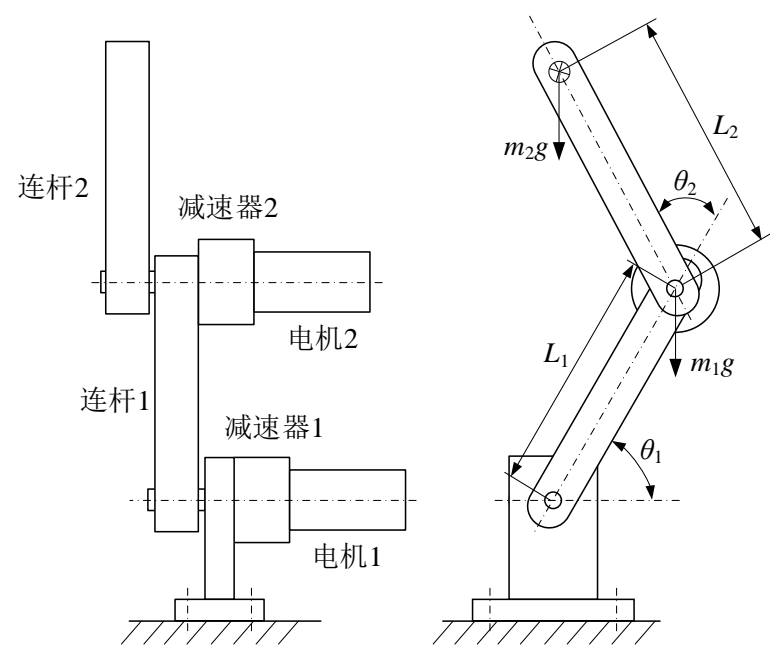


分析

- 引入干扰力矩集中前馈项后，初始时刻的加速度偏差明显减小
- 原因：在产生位置偏差前，干扰力矩补偿预先产生了一个抵抗干扰力矩的控制量，有效降低了跟踪误差

● 实例2 — 竖直面工作的2R机器人位置控制

- 两关节减速器传动比取 $N1=N2=50$ ，两关节均跟踪前述位置S轨迹，以临界阻尼设计PID控制器增益，依次在PID控制器上增加速度、加速度分散前馈和干扰力矩前馈，观察两关节位置、速度和加速度曲线的变化规律



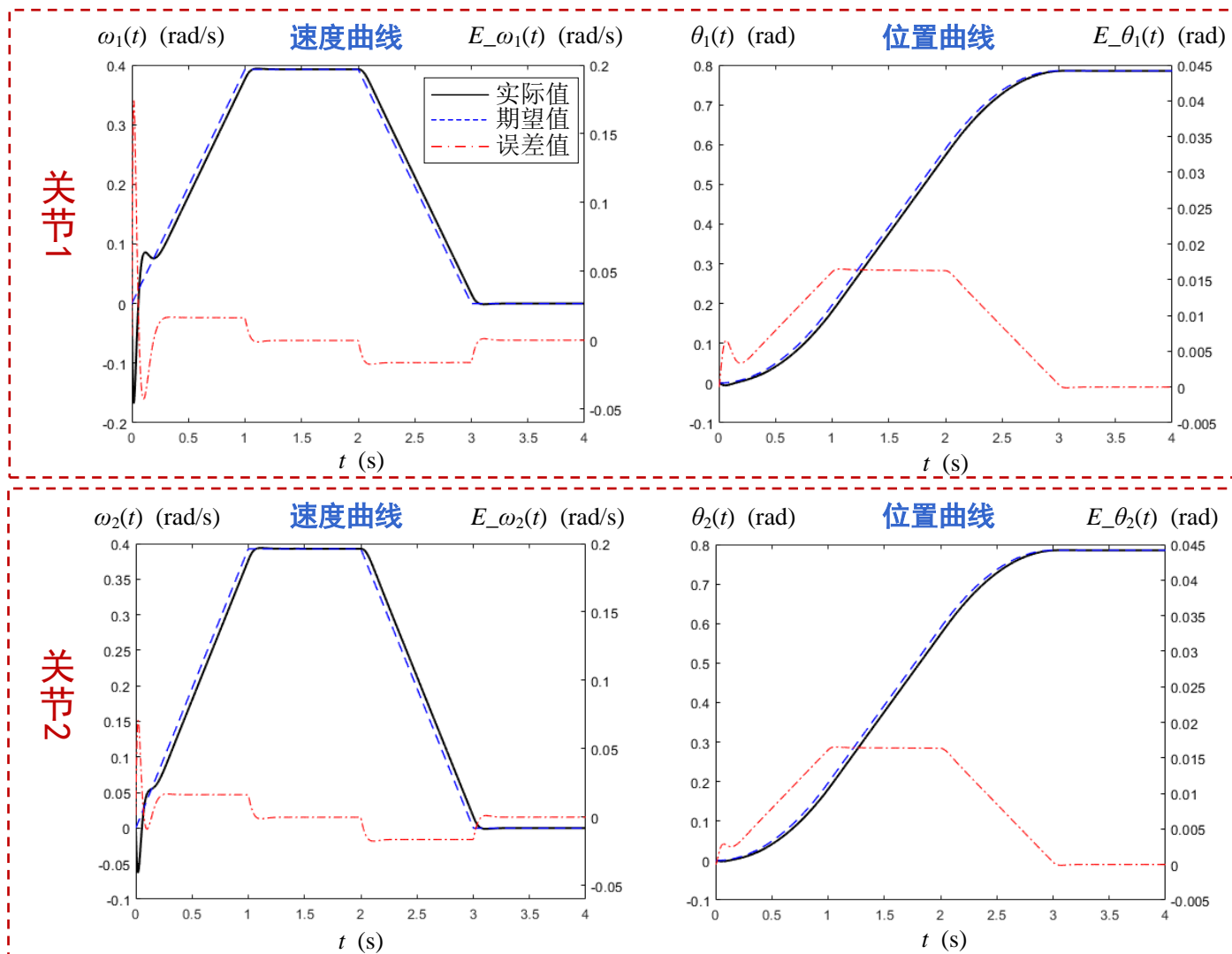
	项目	符号	取值	单位
电机参数	额定电压	u_r	24	V
	额定转速	ω_r	258	rad/s
	额定转矩	τ_r	8.82×10^{-2}	N·m
	额定电流	i_r	1.09	A
	电枢电阻	R_a	2.49	Ω
	电枢电感	L_a	6.10×10^{-4}	H
	转矩常数	K_a	8.22×10^{-2}	(N·m)/A
	感应电动势常数	K_e	8.24×10^{-2}	V/(rad/s)
	转子惯量	I_r	1.19×10^{-5}	Kg·m ²
	转子阻尼	B_r	4.10×10^{-4}	(N·m)/(rad/s)
系统参数	连杆质量	m	0.5	Kg
	连杆质心距转轴距离	l	0.1	m
	负载惯量	I_l	5.0×10^{-3}	Kg·m ²
	关节阻尼	B_l	2.0×10^{-2}	(N·m)/(rad/s)
	跨导增益	K_g	1	A/V
	重力加速度	g	9.8	m/s ²



集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例2 — 竖直面工作的2R机器人位置控制

➤ 跟踪位置S轨迹 —— 无前馈PID控制器控制效果

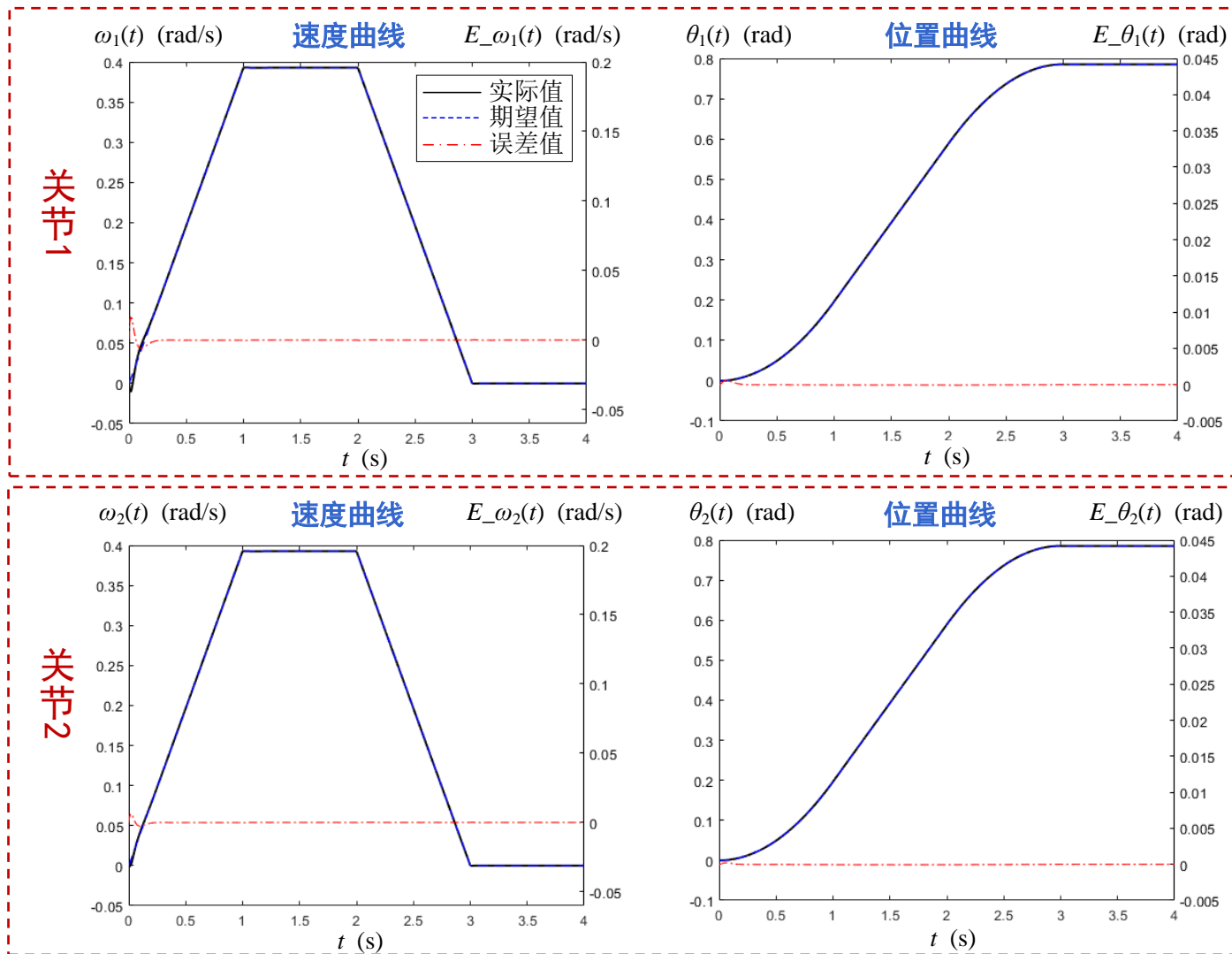




集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例2 — 竖直面工作的2R机器人位置控制

➤ 跟踪位置S轨迹 —— 增加了速度、加速度和力矩前馈后的控制效果



分析

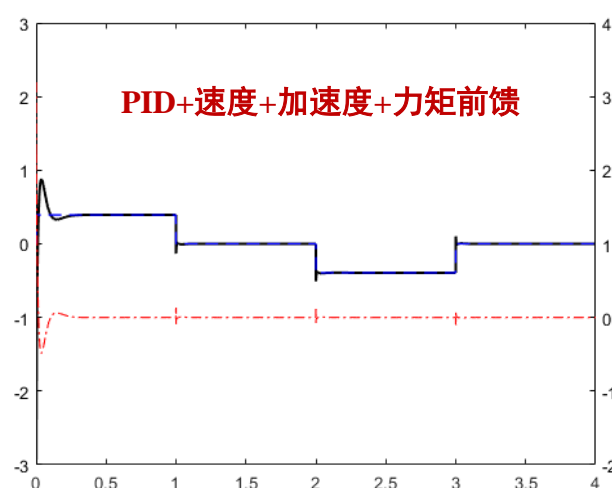
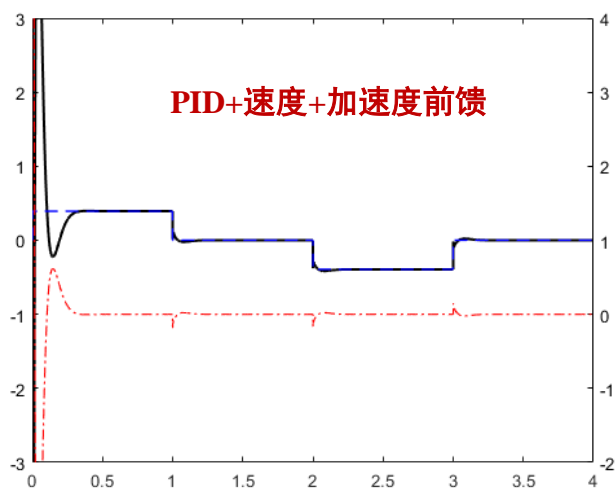
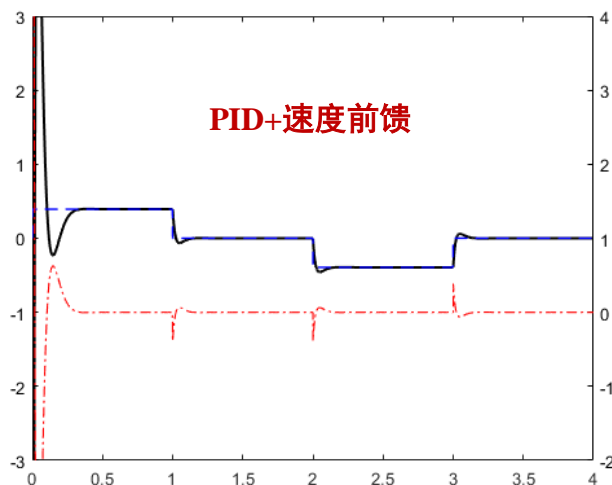
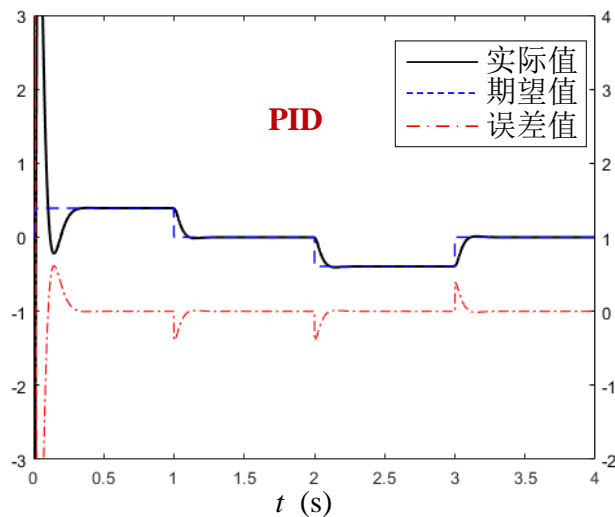
1. 增加前馈后，从位置曲线基本看不出误差
2. 从速度曲线可以看出关节1误差更大，这与干扰力矩更大有关

集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例2 — 竖直面工作的2R机器人位置控制

➤ 跟踪位置S轨迹 —— 通过加速度曲线比较前馈的效果

关节1 $\varepsilon_1(t)$ (rad/s²) $E_{\varepsilon_1}(t)$ (rad/s²)



分析

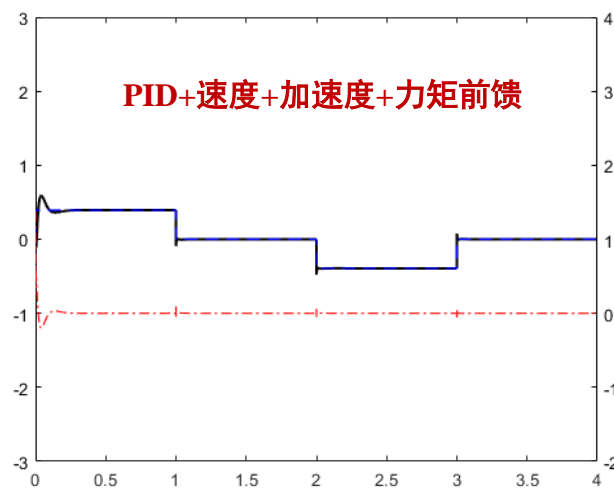
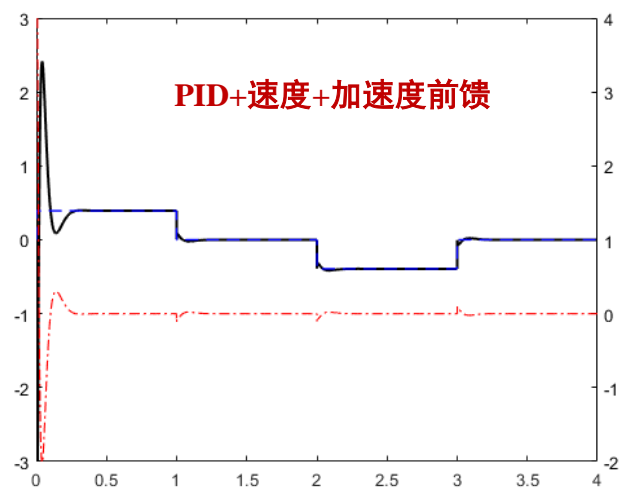
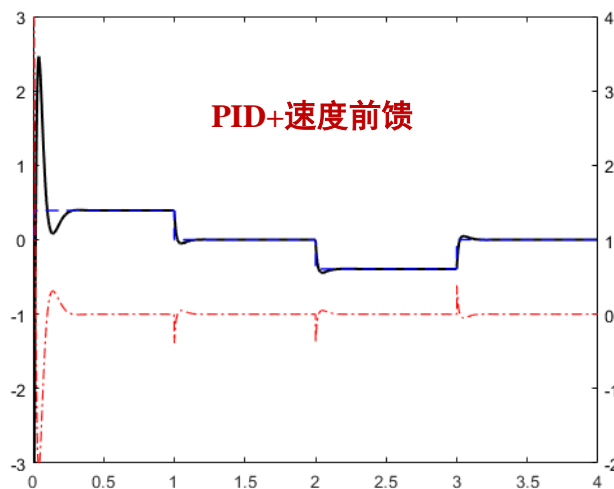
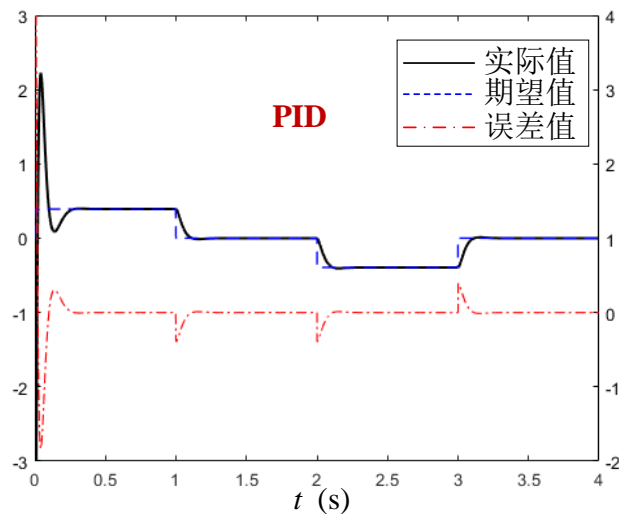
1. 随着前馈项的增加，加速度曲线逐渐接近理想的矩形曲线
2. 力矩前馈能有效减小系统初始时刻的加速度偏差

集中前馈补偿位置PID控制器

● 实例2 — 竖直面工作的2R机器人位置控制

➤ 跟踪位置S轨迹 —— 通过加速度曲线比较前馈的效果

关节2 $\varepsilon_2(t)$ (rad/s²) $E_{\varepsilon_2}(t)$ (rad/s²)



分析

1. 与关节1效果类似
2. 由于干扰力矩更小，误差更小

● 总结

- 基于模型的控制方法，严格根据机器人动力学模型计算各关节控制力矩，可有效提高系统的动态稳定性
- 理论上，如果机器人动力学模型完全准确，三个前馈项将驱动机器人严格跟踪期望轨迹
- 真实系统中必然存在模型误差和未建模干扰，仅依靠前馈控制一定存在偏差
- 前馈的引入能大幅减小反馈误差，使各关节的闭环PID控制器仅需克服因模型偏差和其他干扰引起的控制误差，允许控制系统采用较小的反馈增益，有利于提高系统稳定性
- 对于大多数工业机器人应用场景，力矩前馈控制已经足够满足需求，并且，大多数机器人仅补偿了重力项
- 集中前馈补偿控制并没有实现系统的线性化，控制器增益在全工作空间的有效性难以保证