



# 第十讲

## 机器人运动控制

张 继 文

清华大学 机械工程系  
机械电子所

电话: (010) 62796698

E-mail: [jwzhang@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:jwzhang@mail.tsinghua.edu.cn)



## 后续课程安排

周次	日期	教学内容	备注
1	09.14	绪论	授课
2	09.21	机器人概述	授课
3	09.28	机器人基础知识	授课
4	10.05	实验1：机器人认知实验	实验
5	10.12	机器人运动学1	授课
6	10.19	机器人运动学2	授课
7	10.26	机器人运动学3	授课
8	11.02	机器人运动学4	授课
9	11.09	标定与编程	授课
10	11.16	实验2：工业机器人标定与编程实验	实验
11	11.23	轨迹规划	授课
12	11.30	机器人动力学	授课
13	12.07	运动控制	授课
14	12.14	路径规划	授课
15	12.21	机器人视觉	授课



## 本堂主要内容

- 相关内容回顾
- 机器人驱动器
- 单关节轨迹控制
- 复杂控制策略概述



## (一) 相关内容回顾

### ■ 惯性张量 / 表达了刚体的质量分布

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

### ■ Lagrange动力学方程

Lagrange函数      广义力

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, \dots, n$$

广义坐标



## (一) 相关内容回顾

### ■ 操作臂动力学方程

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

$$\sum_{j=1}^n d_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk}(q)\dot{q}_k\dot{q}_j + g_i(q) = \tau_i \quad i = 1, \dots, n.$$

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F(\dot{q}) + J(q)^T W = \tau$$

摩擦阻力项   外部作用项   输出力矩项

```
>> Q = p560.rne([qn, qz, qz], 'fext', W)
```



## (一) 相关内容回顾

### ■ 正向动力学

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) \left( \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{W} \right)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{k+1} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}_k) \left( \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \dot{\mathbf{q}}_k - \mathbf{g}(\mathbf{q}_k) - \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}_k) - \mathbf{J}(\mathbf{q}_k)^T \mathbf{W} \right)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{k+1} = \dot{\mathbf{q}}_k + \ddot{\mathbf{q}}_{k+1} \cdot \Delta t$$

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \frac{\dot{\mathbf{q}}_k + \dot{\mathbf{q}}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t$$



## (一) 相关内容回顾

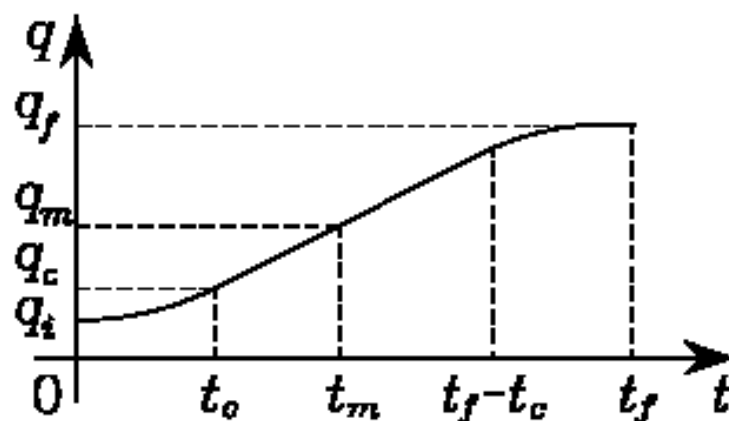
### ■ 单关节运动轨迹规划

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$$

三次多项式

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

五次多项式

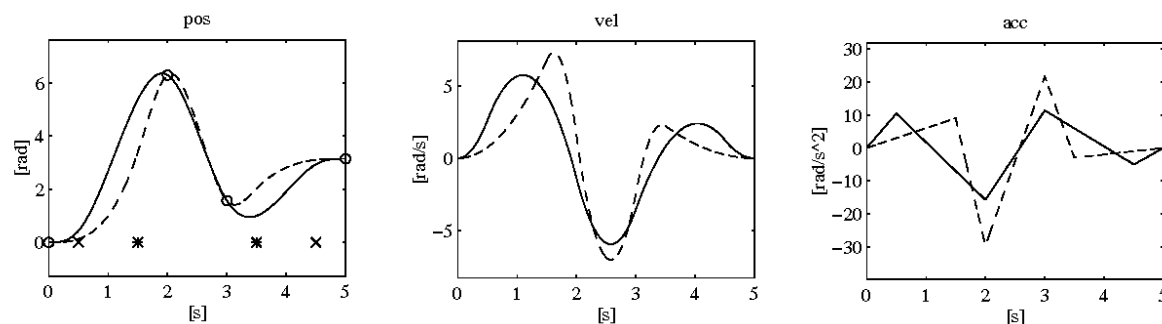


抛物线过渡  
的线性插值

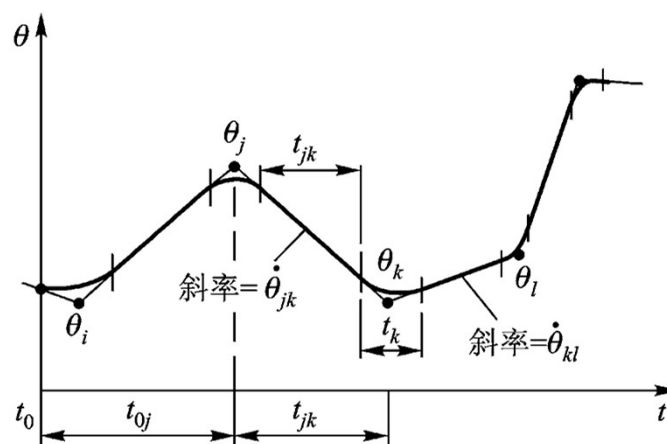


## (一) 相关内容回顾

### ■ 通过一系列点的轨迹



三次样条曲线



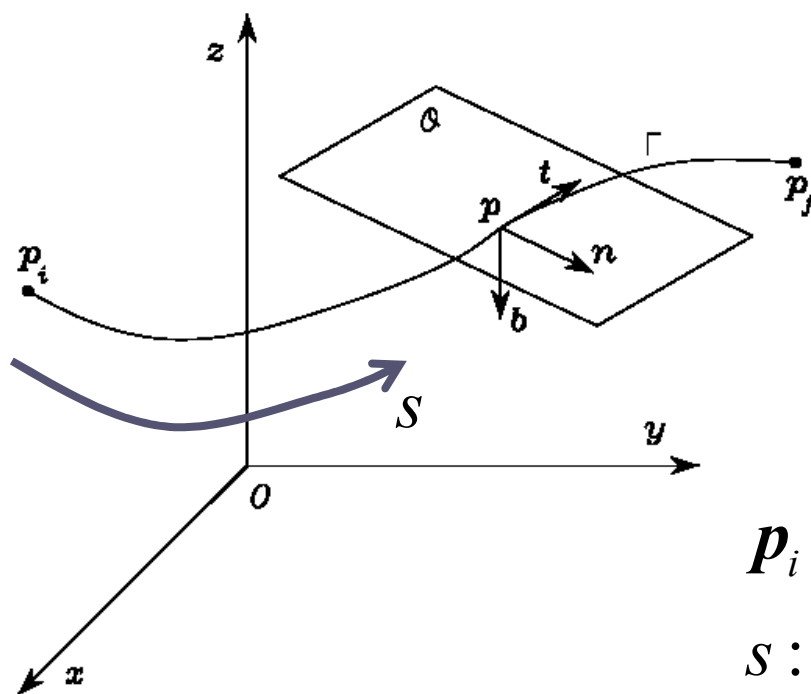
抛物线过渡  
的直线插值





## (一) 相关内容回顾

### ■ 笛卡尔空间轨迹规划——轨迹插补



曲线长度的  
参数方程

自然坐标系

$$p_i \rightarrow p_f$$

$$s : 0 \rightarrow s_f$$

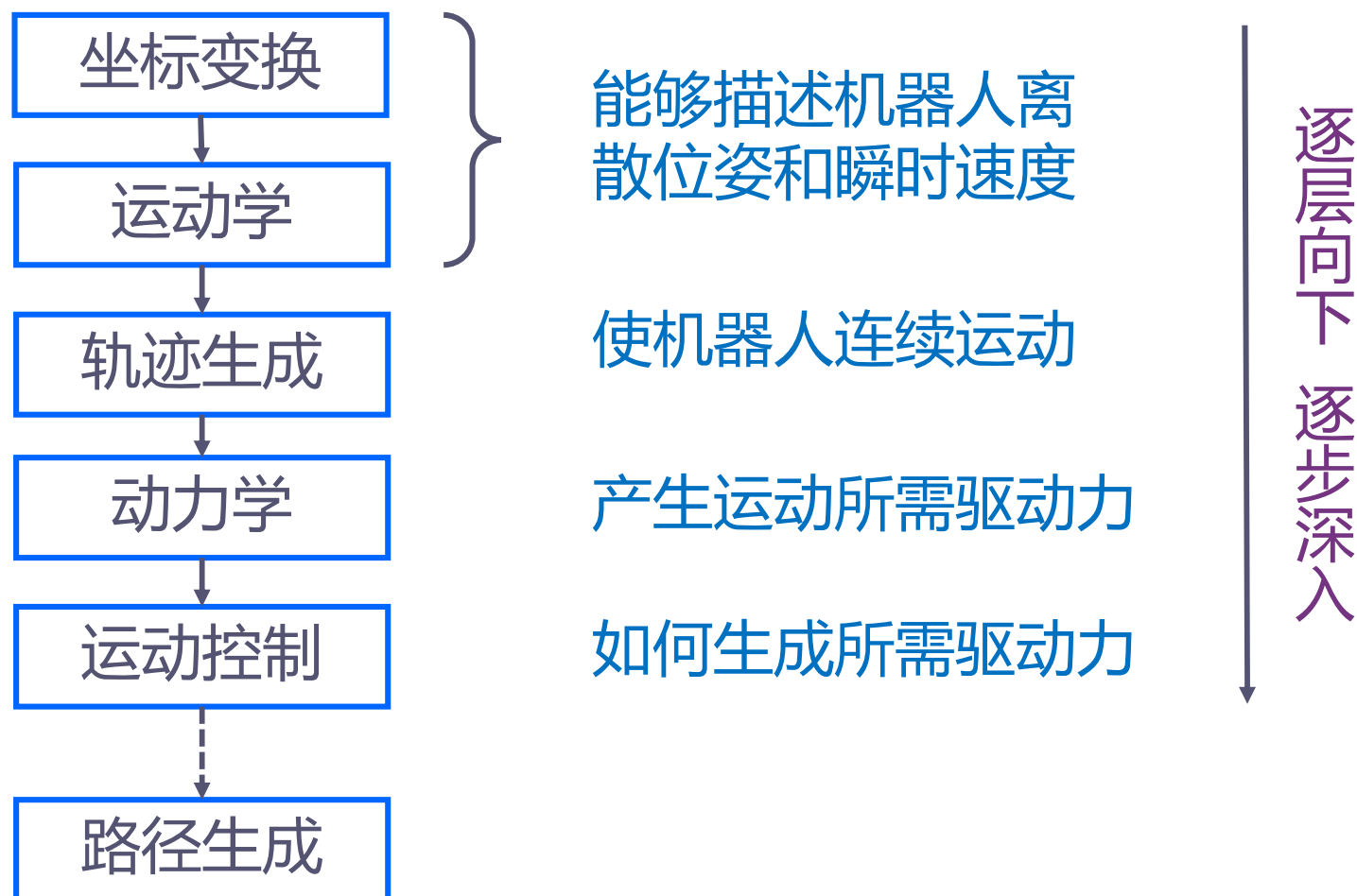
$$t : 0 \rightarrow t_f$$

$$s = s(t)$$



## (一) 相关内容回顾

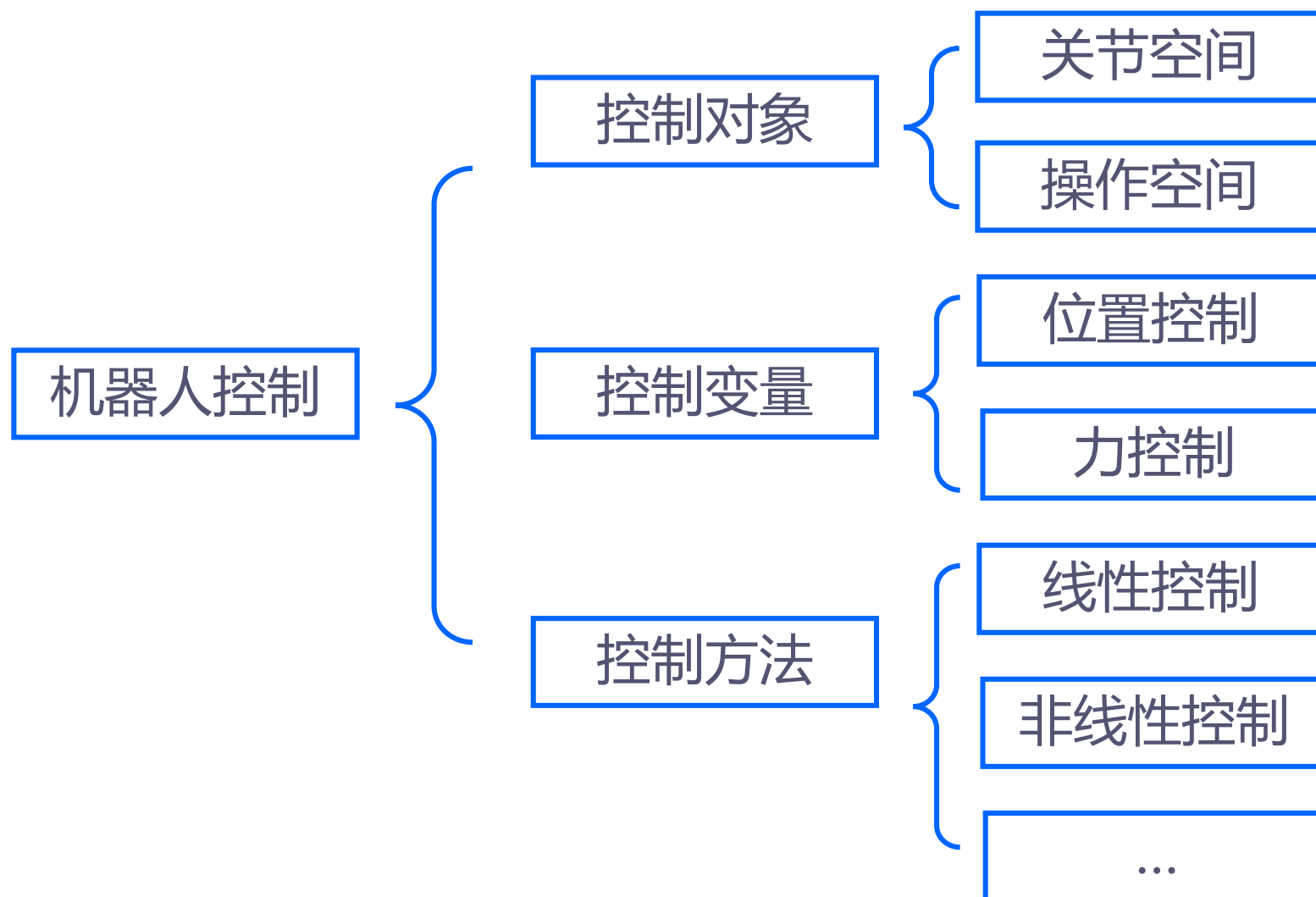
### ■ 机器人学的整体脉络





## (一) 相关内容回顾

### ■ 机器人运动控制问题





## 本堂主要内容

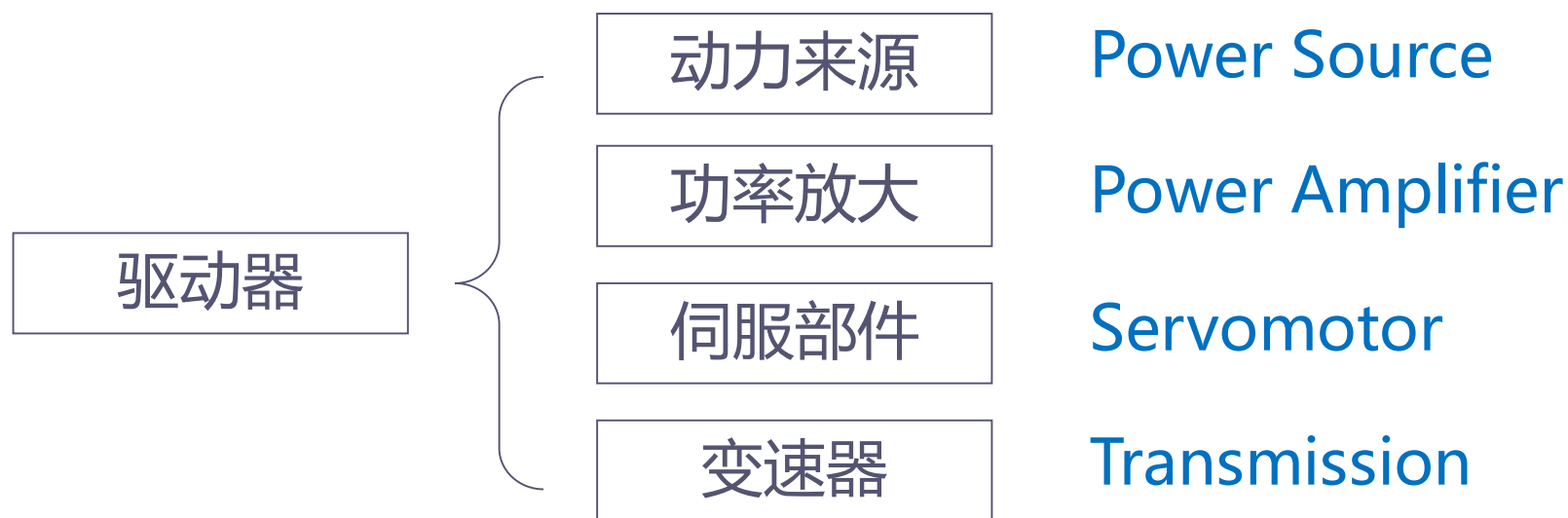
- 相关内容回顾
- 机器人驱动器
- 单关节轨迹控制
- 复杂控制策略概述



## (二) 机器人驱动器

### 2.1 可用的驱动器 (Actuator)

- 电机：伺服电机，步进电机，直驱电机
- 液压驱动器
- 气动驱动器
- 记忆合金、磁致伸缩，新材料驱动器...



## (二) 机器人驱动器

### 2.1 可用的驱动器 (Actuator)



伺服电机驱动



气动驱动

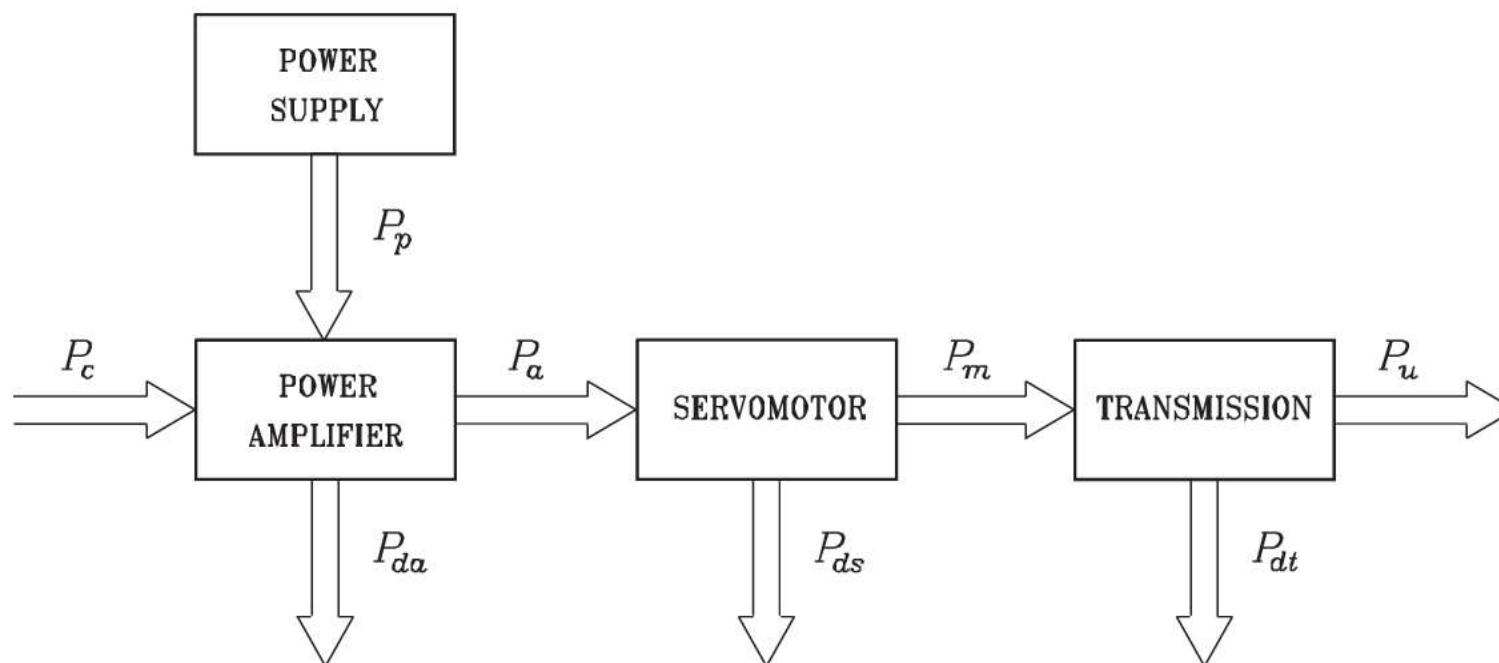


液压驱动



## 2.1 可用的驱动器 (Actuator)

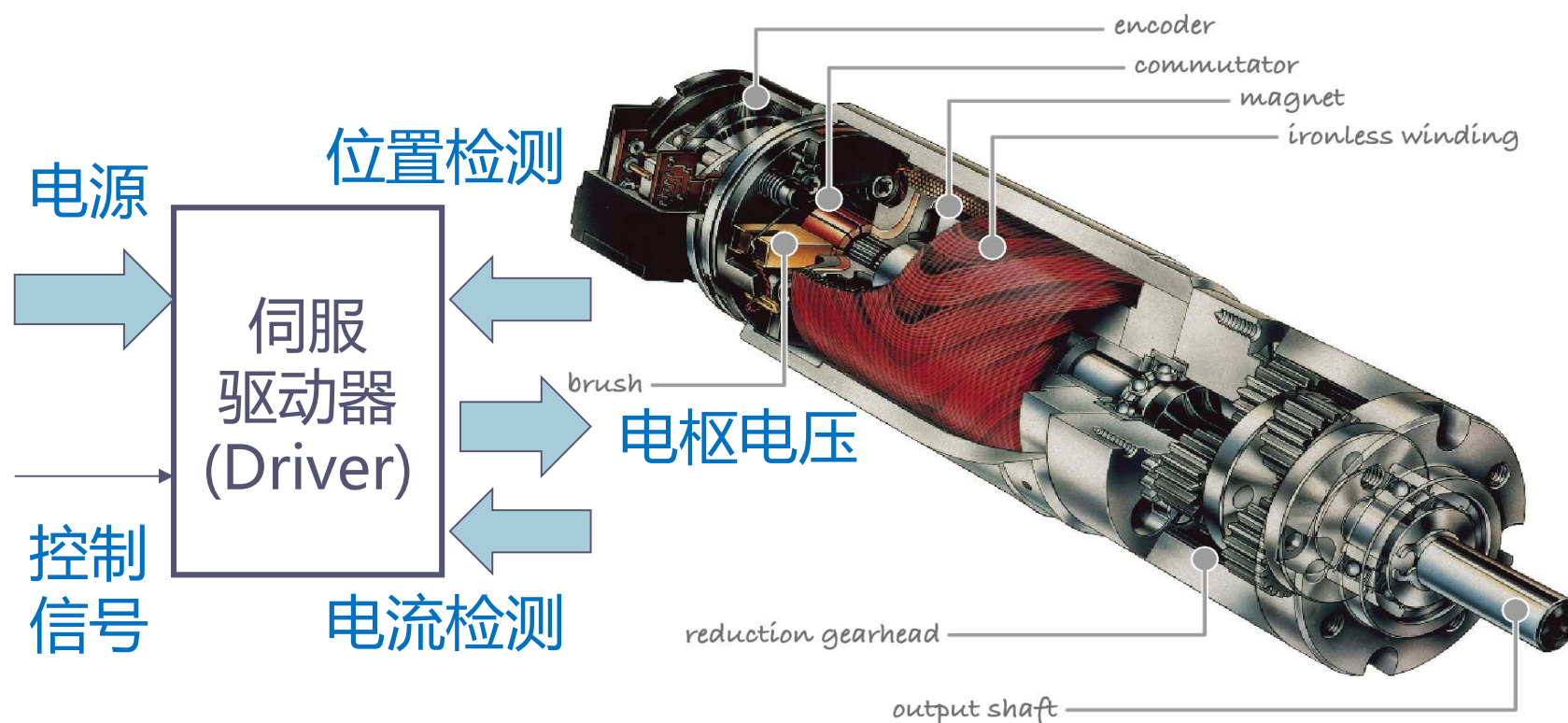
### ■ 驱动器基本工作原理



## (二) 机器人驱动器

### 2.2 电机驱动器 (Actuator)

- 普通直流电机，永磁同步（直流无刷）电机
- 步进电机，交流电机







## (二) 机器人驱动器

# 2.2 电机驱动器 (Actuator)

## ■ 伺服电机系统



### Robots

A robot is required to operate stably despite arm posture and position, workload and other conditions changing from moment to moment.

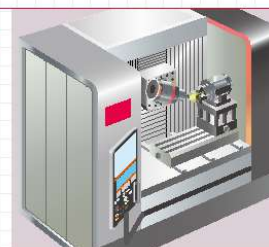
The MINAS A6 family assures stable operation by suppressing effects of load to a minimum using "adaptive load control."



### Processing machinery

With metal processing machine, it is very difficult to render mirror-like finishing on a polygonal body.

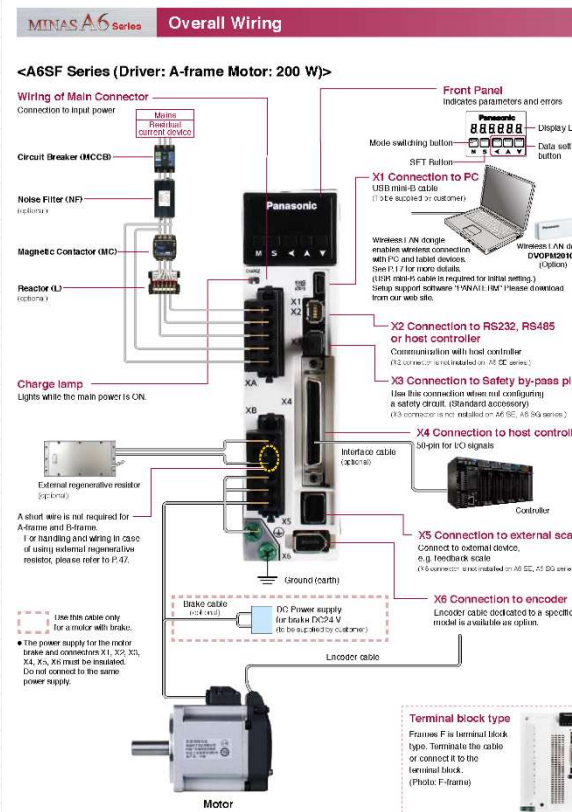
The A6 family realizes "3.2 kHz frequency response" to improve feedback responsiveness, thus enabling mirror surfacing without generating lines or streaks.



### Component mounting machines

The A6 family also shows its versatility when used with a component mounting machine where speed and positional accuracy are demanded.

In addition to high frequency response, it can process accidental disturbances with the help of built-in "adaptive load control," thus maintaining high productivity.



## (二) 机器人驱动器

# 2.2 电机驱动器 (Actuator)

### ■ 机器人专用伺服系统



输出轴

减速器

电机

编码器

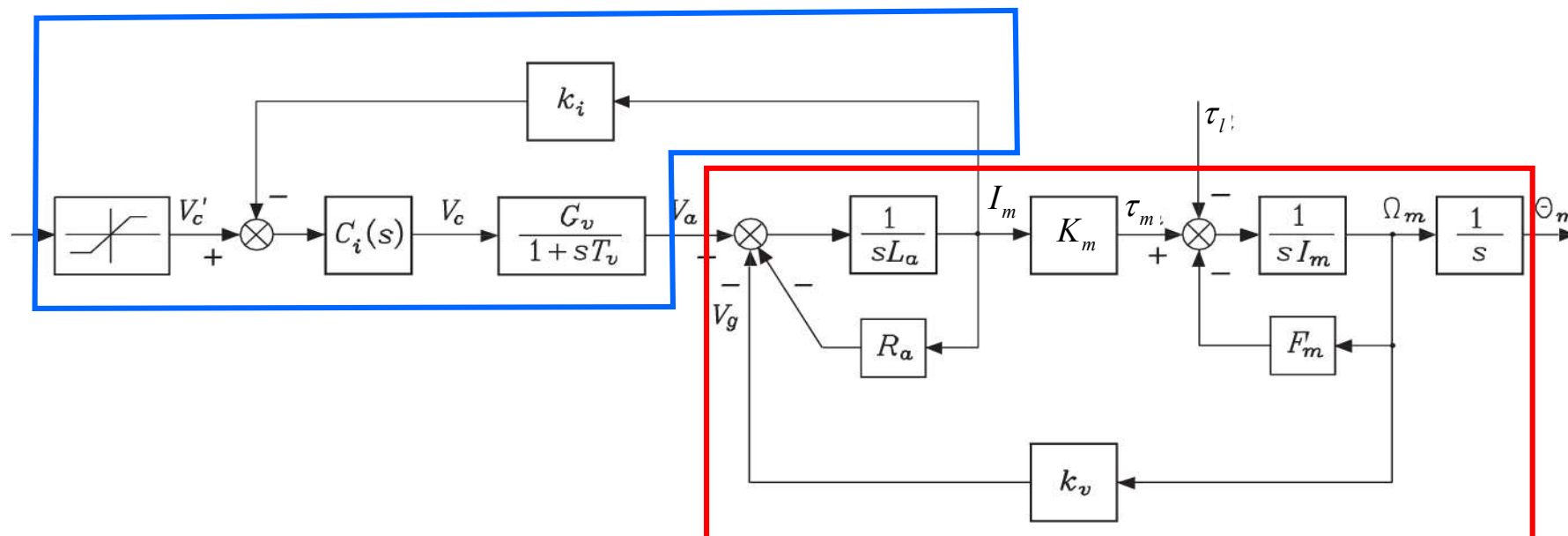
驱动器





## (二) 机器人驱动器

### 2.2 电机驱动器 (Actuator)

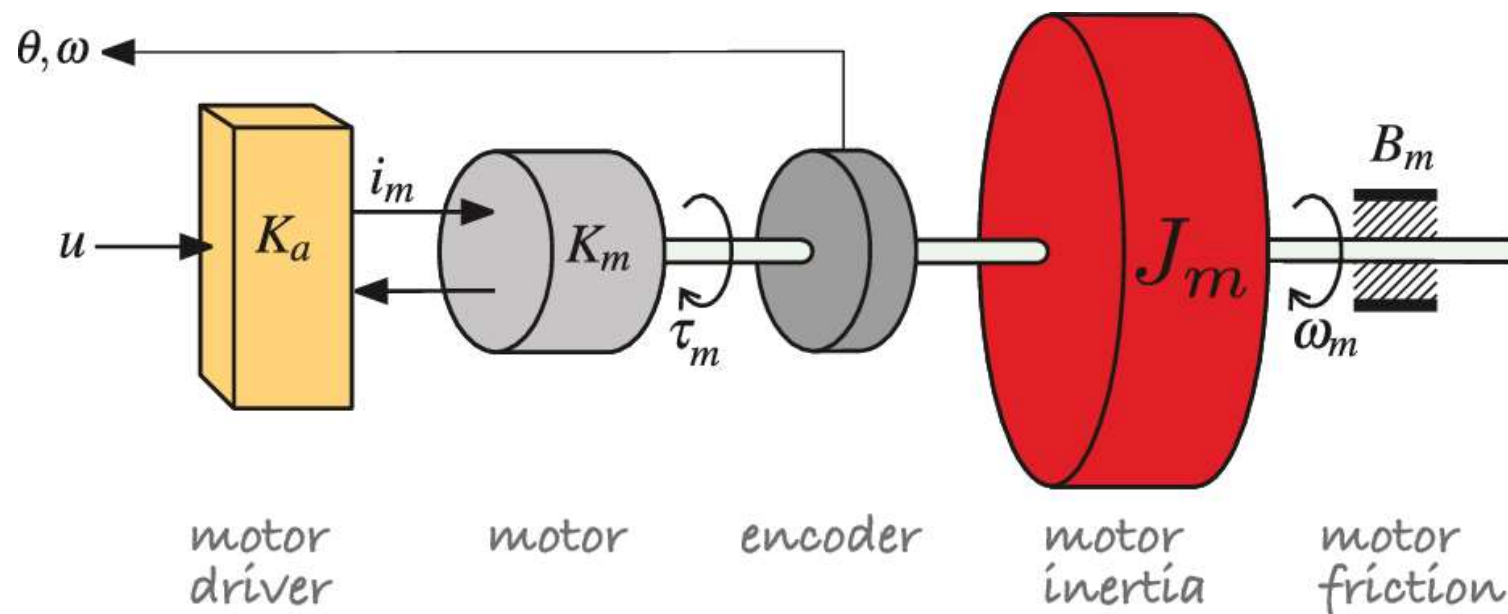


驱动器(Driver)部分

电机减速器部分

伺服电机系统

## 2.2 电机驱动器 (Actuator)



$$i_m = K_a u$$

$$\tau_m = K_m i_m$$



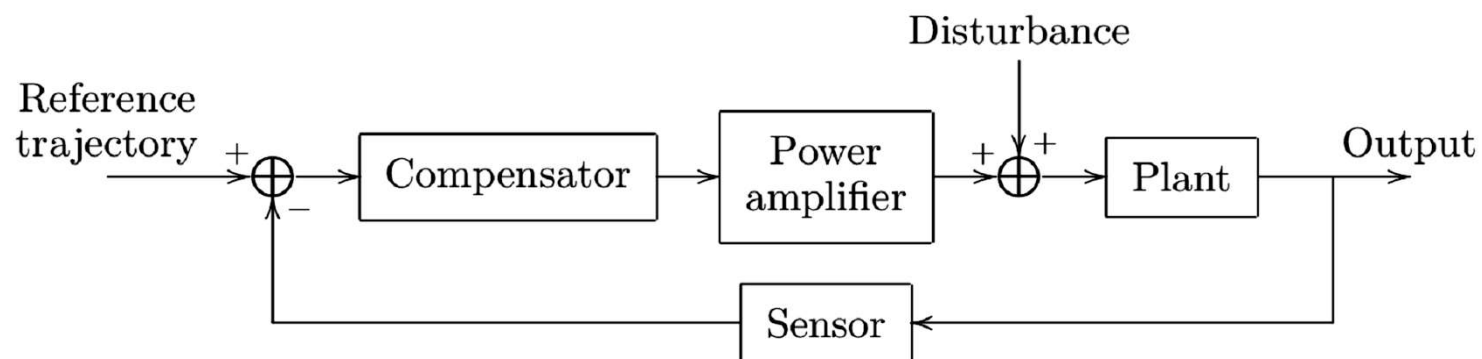
## 本堂主要内容

- 相关内容回顾
- 机器人驱动器
- 单关节轨迹控制
- 复杂控制策略概述

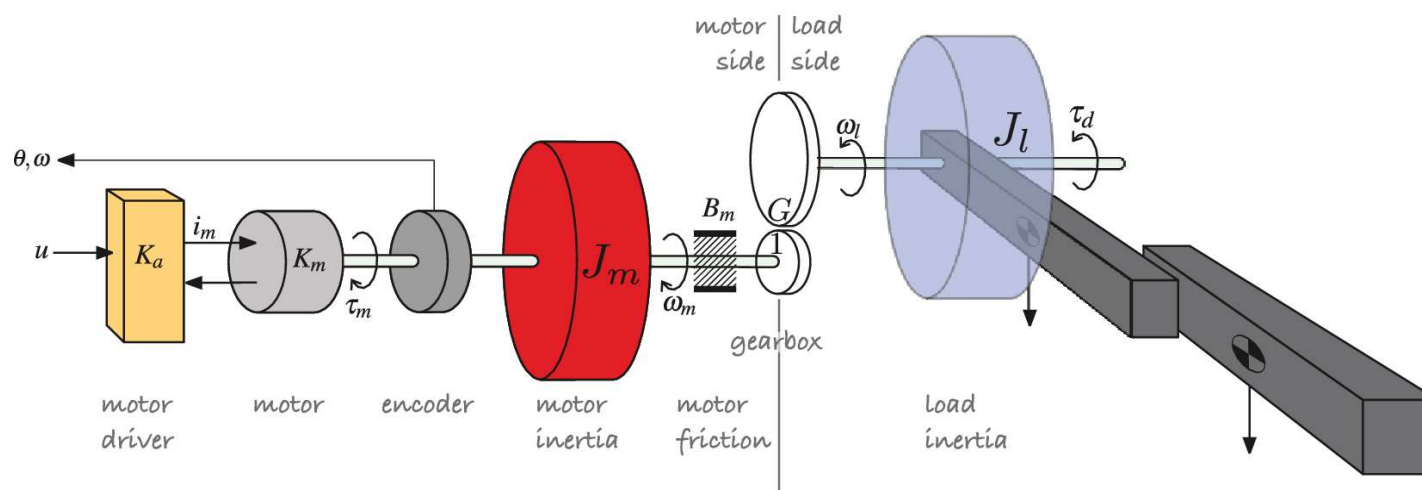


## 3.1 单关节轨迹控制概述

### ■ 输出跟随轨迹



## 3.2 被控对象的模型



$$\tau_m = K_m K_a u$$

$$K_m K_a u - B' \omega - \tau'_C(\omega) - \frac{\tau_d(q)}{G} = J' \dot{\omega}$$

$$B' = B_m + \frac{B_l}{G^2}, \quad \tau'_C = \tau_{C,m} + \frac{\tau'_{C,l}}{G}, \quad J' = J_m + \frac{J_l}{G^2}$$



## 3.2 被控对象的模型

- 线性系统具有线性叠加的性质，因此暂不考虑外部力矩

$$K_m K_a u - B' \omega - \tau'_C(\omega) - \frac{\tau_d(\mathbf{q})}{G} = J' \dot{\omega}$$



$$J' \dot{\omega} + B' \omega = K_m K_a u$$

$$sJ'\Omega(s) + B'\Omega(s) = K_m K_a U(s)$$





### (三) 单关节轨迹控制

## 3.2 被控对象的模型

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m K_a}{J's + B'}$$

$$J' = J_m + \frac{J_l}{G^2}$$

```
>> tf = p560.jointdynamics(qn);  
>> tf(2);  
ans =
```

1

-----

0.0005797 s + 0.000817

当前构型下的各  
驱动器传递函数



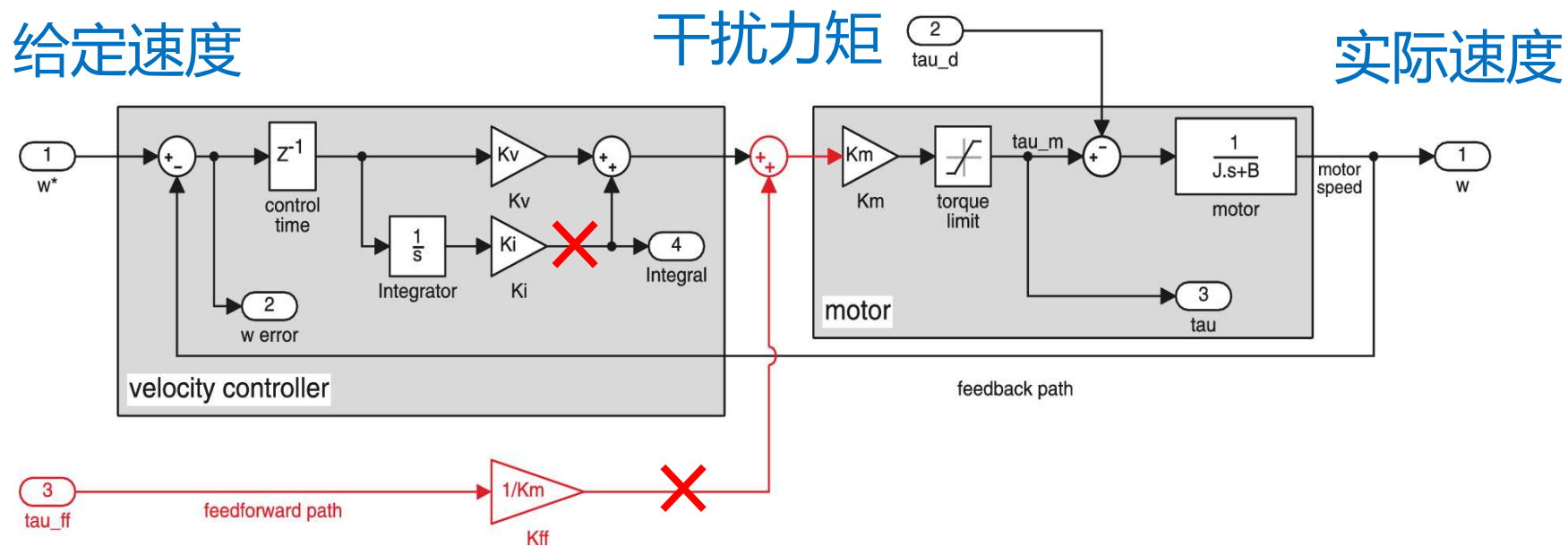
上述系统是否时不变系统?



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制

- 电机位置伺服控制包括内层的电流环，速度环和位置环。电流环已经在伺服电机驱动器中实现，不再考虑





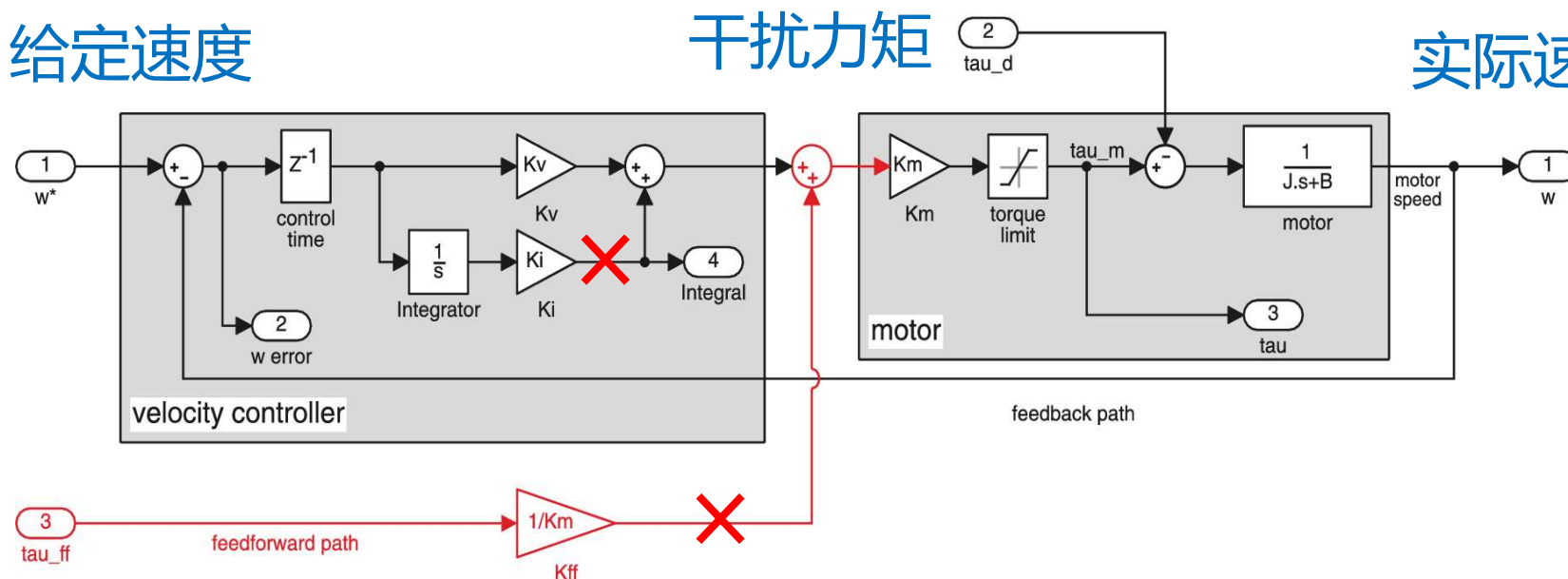
### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制

给定速度

干扰力矩

实际速度



$$u^* = K_v (\omega^d - \omega)$$

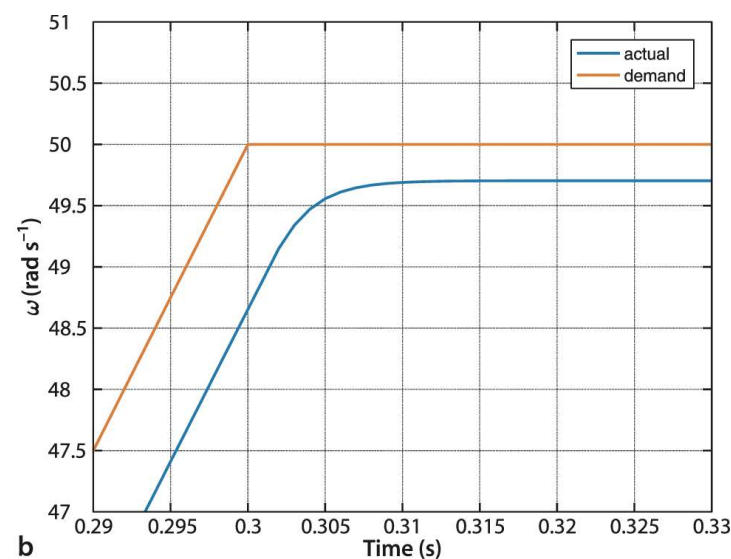
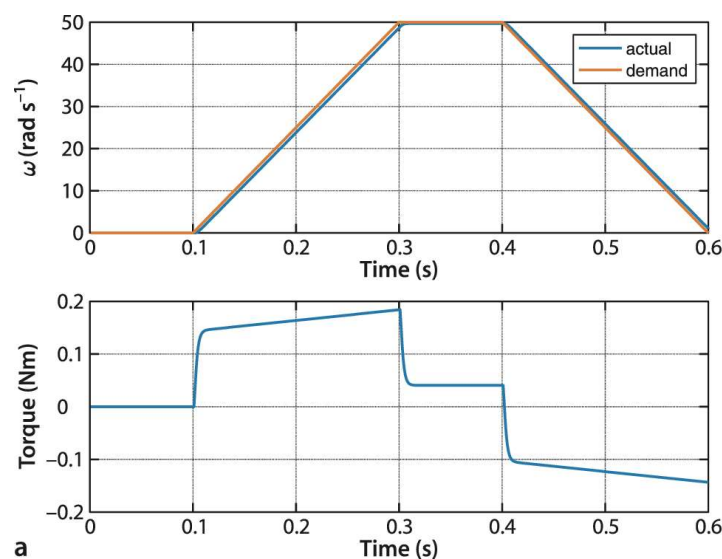
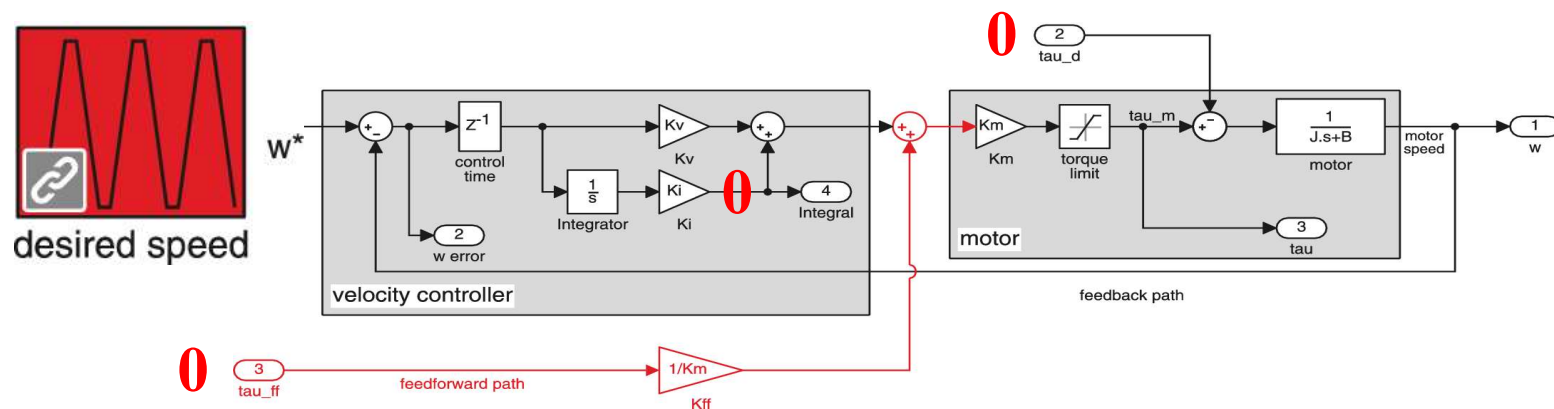
控制规律

```
>>vloop_test;  
>>sim(vloop_test);
```



### (三) 单关节轨迹控制

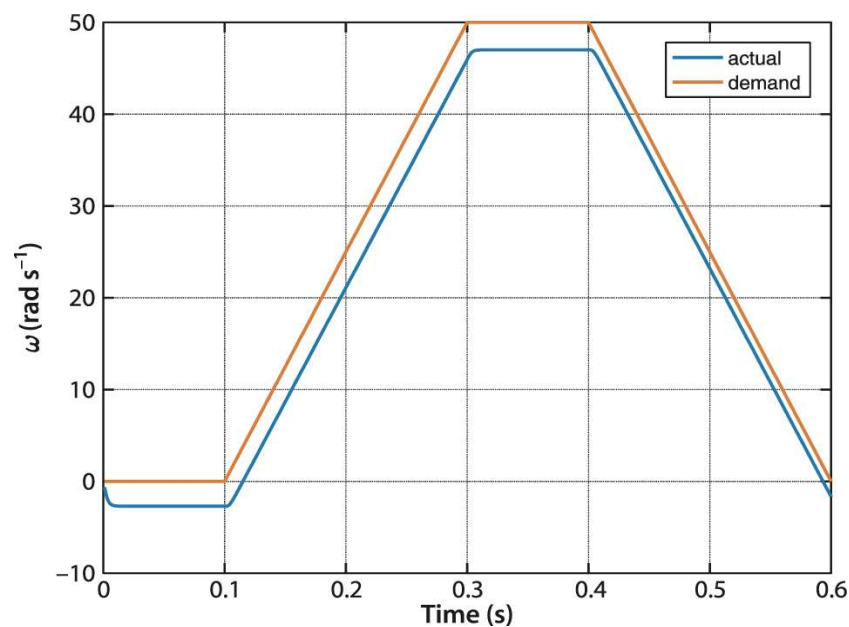
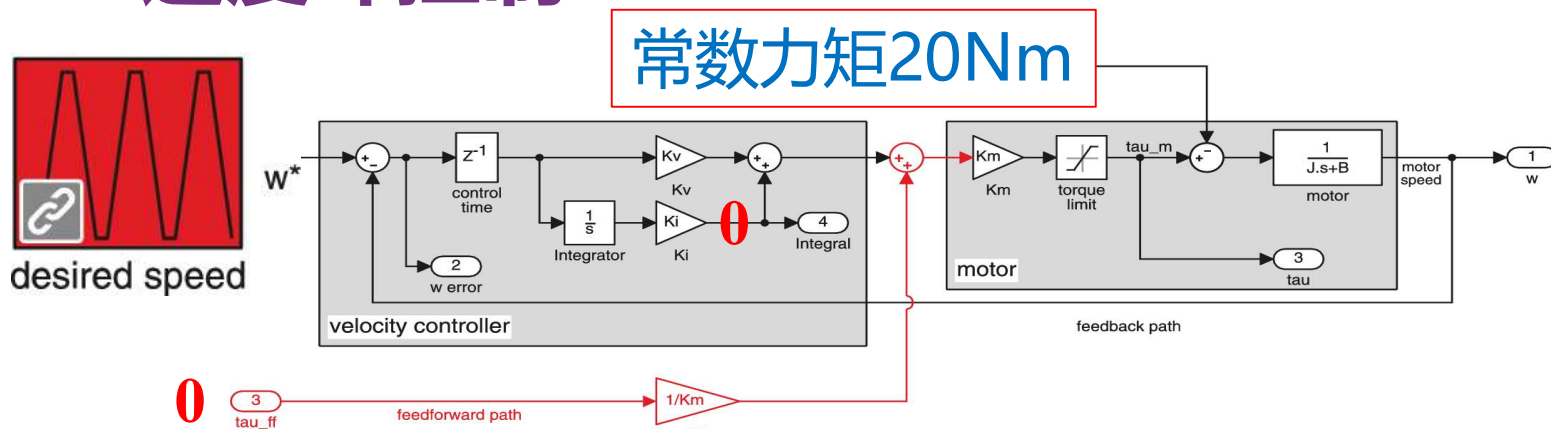
## 3.3 速度环控制



静态误差

### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制



静态误差



## 3.3 速度环控制

### ■ 一阶惯性系统，0-型系统

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m K_a}{J's + B'} = \frac{K_m K_a}{s^0 (J's + B')}$$



$$C = K_v + \frac{K_i}{s} \quad \text{比例-积分控制器}$$

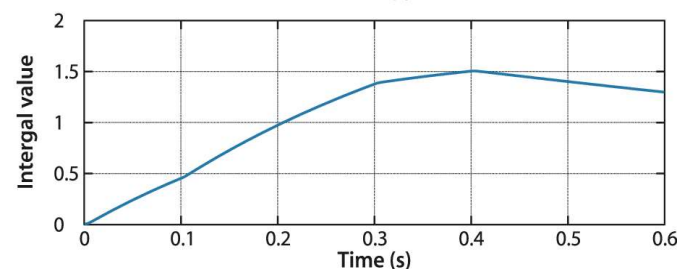
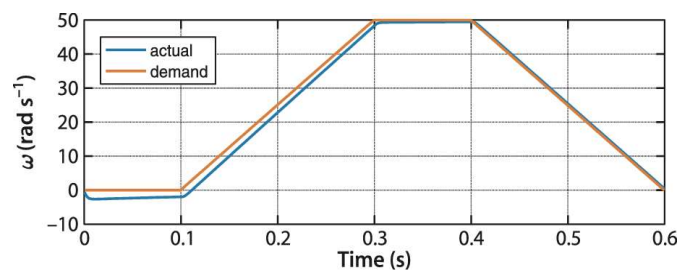
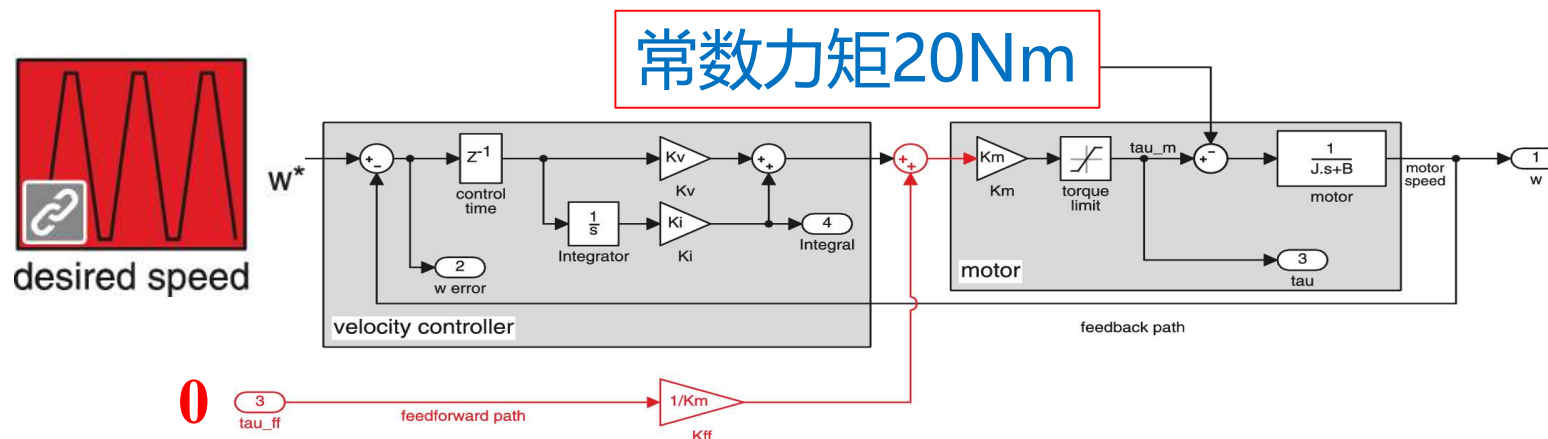
$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m K_a (K_v s + K_i)}{s^1 (J's + B')}$$

### ■ I-型系统



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制



静态偏差被消除

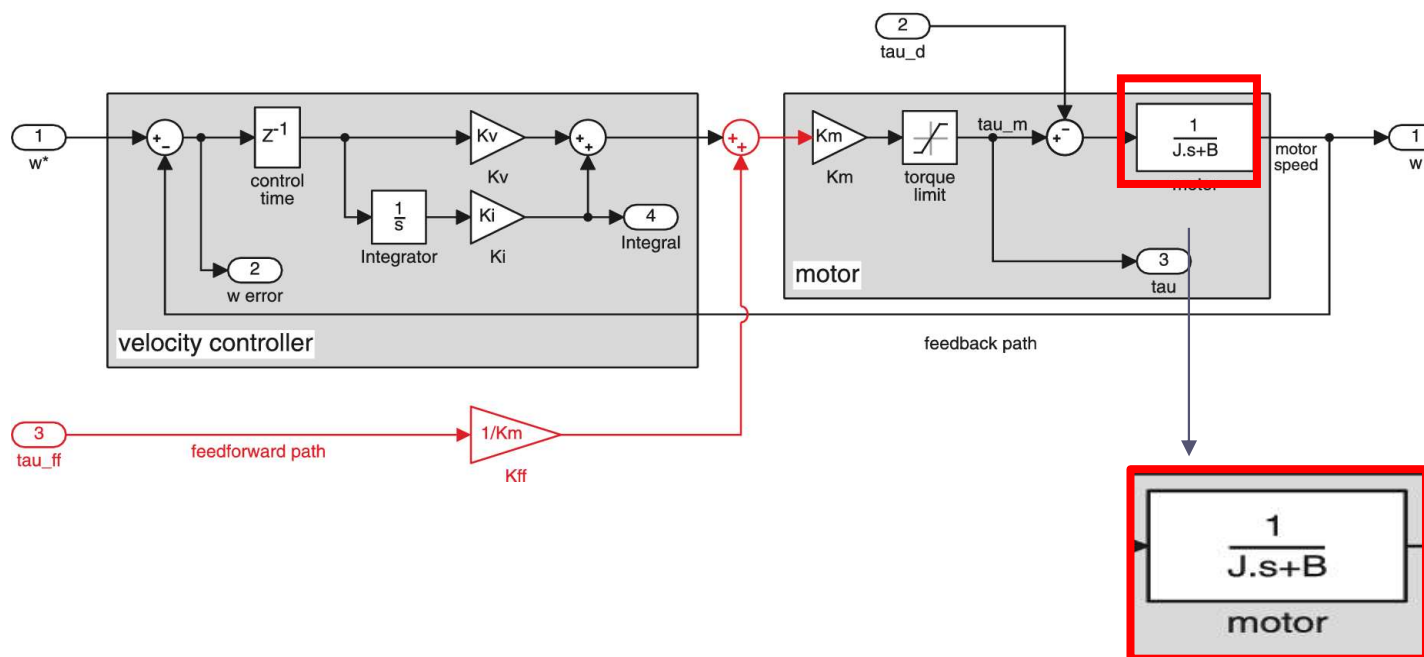
积分器工作输出



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制

- PI控制器的参数 $K_v$ 和 $K_i$ 如何确定?
- 时域的方法（根轨迹），频域的方法（伯德图）



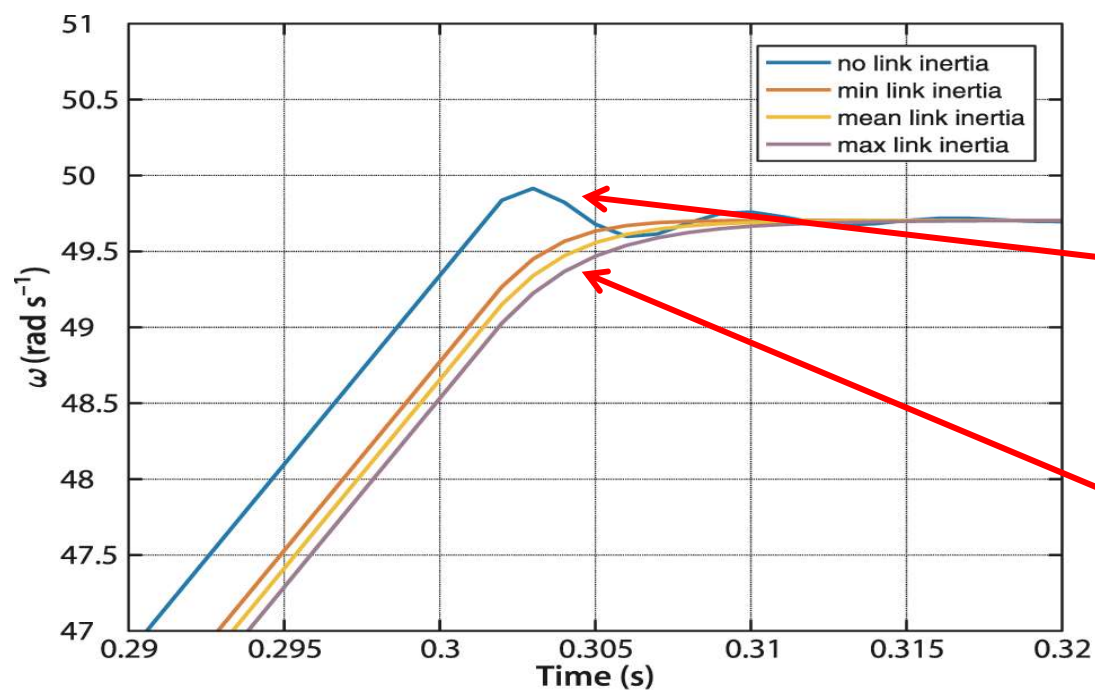




### (三) 单关节轨迹控制

## 3.3 速度环控制

- 相同的PI参数，由于转动惯量的改变，响应效果也不同



超调  
震荡  
失稳

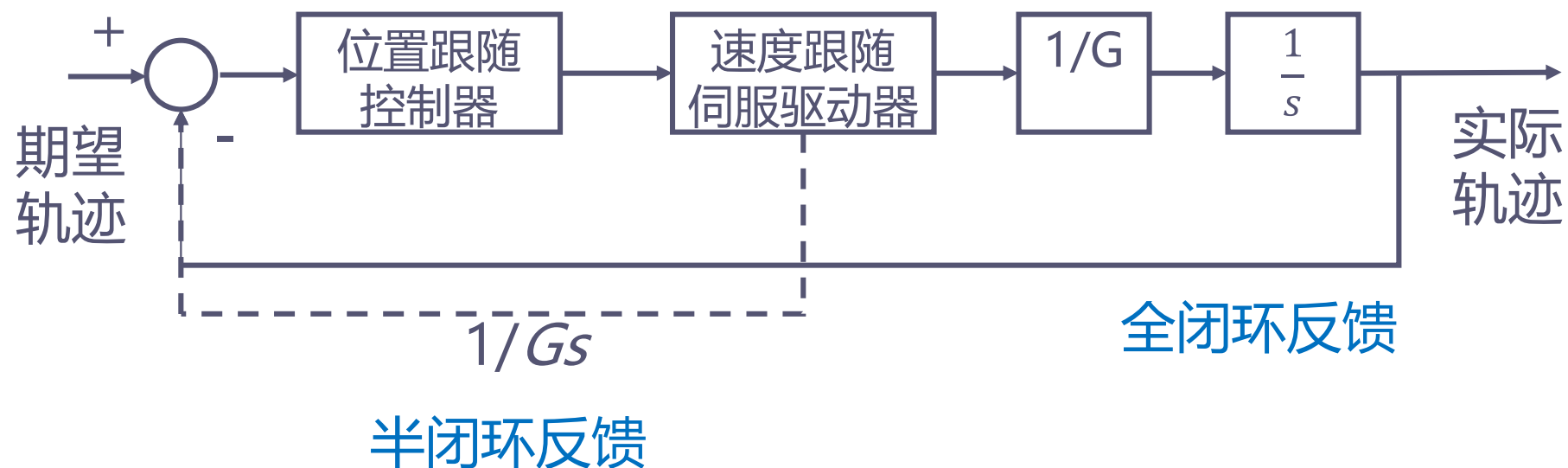
延时长  
精度差



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.4 位置环控制

### ■ 带有速度跟随的驱动器作为被控对象





### (三) 单关节轨迹控制

## 3.4 位置环控制

- 相同的PI参数，由于转动惯量的改变，响应效果也不同

$$\omega^* = K_p (\theta^* - \theta)$$

比例控制器

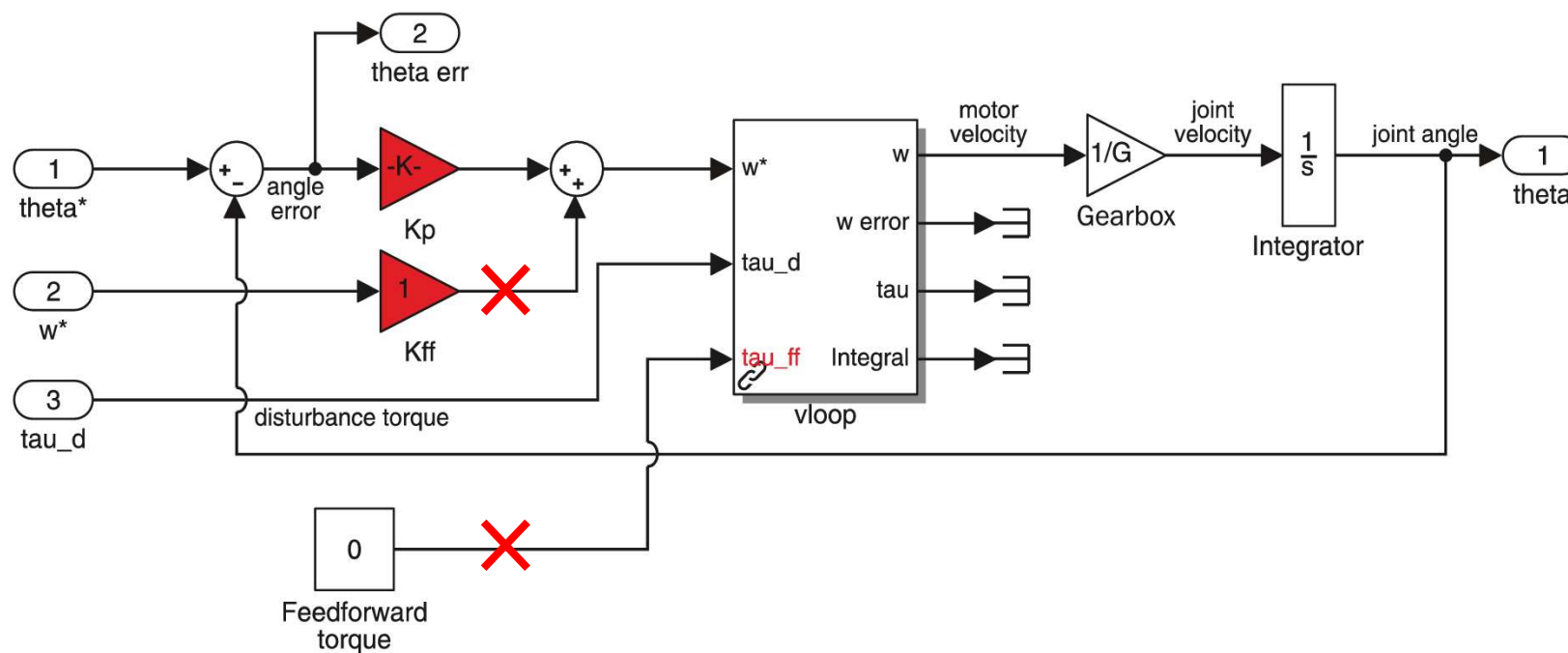


? 不需要积分控制器?



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.4 位置环控制

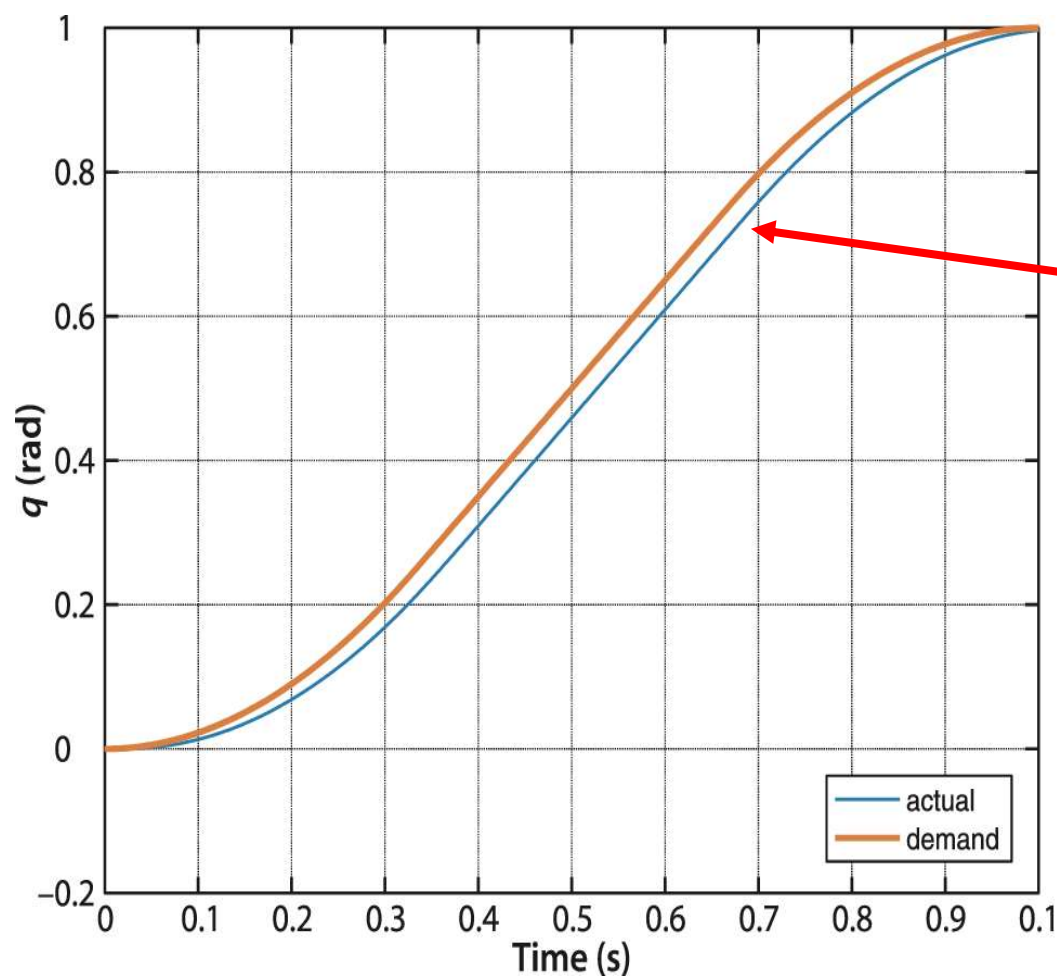


```
>>ploop_test  
>>sim(ploop_test);
```



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.4 位置环控制



斜坡函数  
存在误差

$$\frac{\Theta(s)}{Q(s)} = \frac{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}{s^1(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

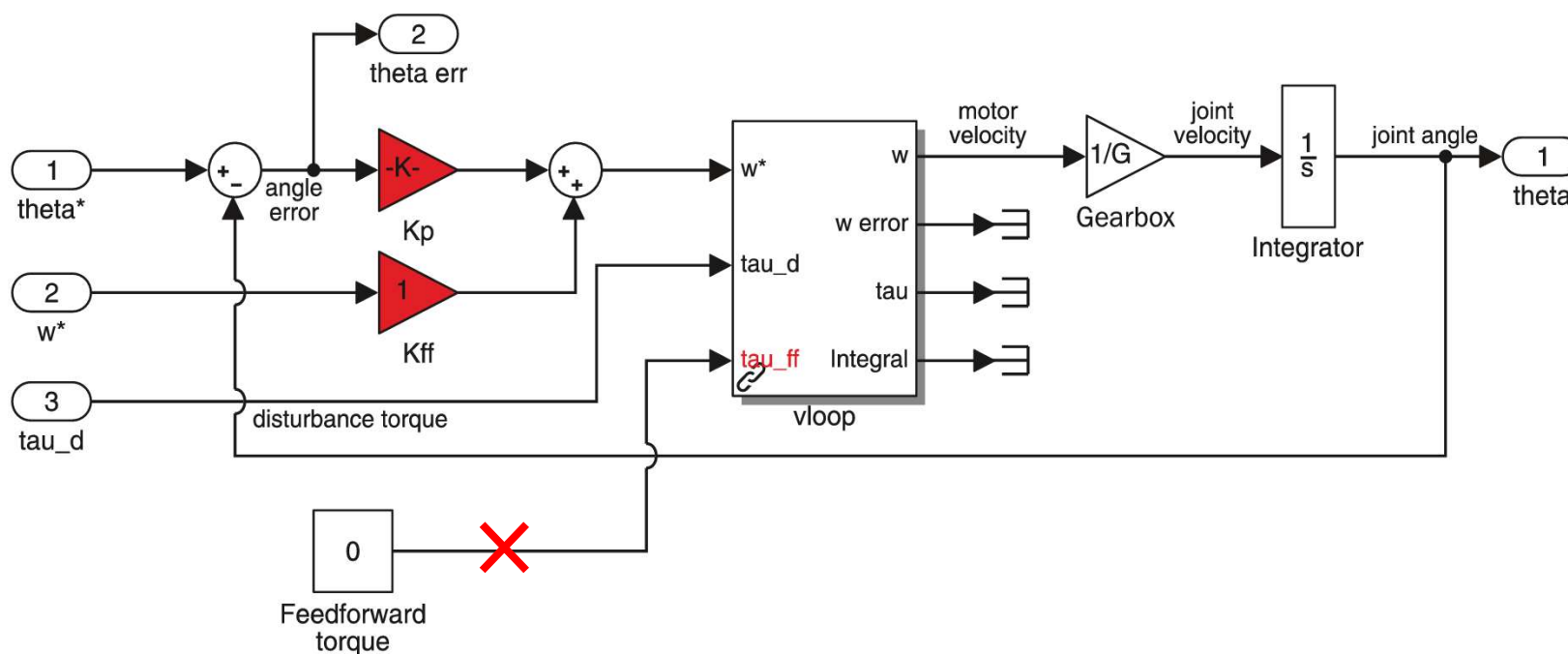
I型系统对  
斜坡函数  
存在静差



### (三) 单关节轨迹控制

## 3.4 位置环控制

- 加入速度前馈环节，避免通过反馈环节传递信号
- 速度信息来源于轨迹规划的结果





## 3.5 单关节控制总结

- 单关节控制通过嵌套式的结构，包括电流环，速度环，位置环三层结构
- 电流环一般由伺服电机驱动器实现，被控系统简化为一个一阶惯性环节
- 速度环通过比例-积分控制器实现速度指令的精确跟随，积分环节用于解决0型系统的静差问题
- 位置环综合应用反馈和速度前馈实现轨迹的跟踪
- 由于机器人构型的变化，被控对象非定常系统，PID参数只能折中选取，平衡全域内的控制性能



## 本堂主要内容

- 机器人动力学回顾
- 机器人驱动器模型
- 单关节轨迹控制
- 复杂控制策略概述



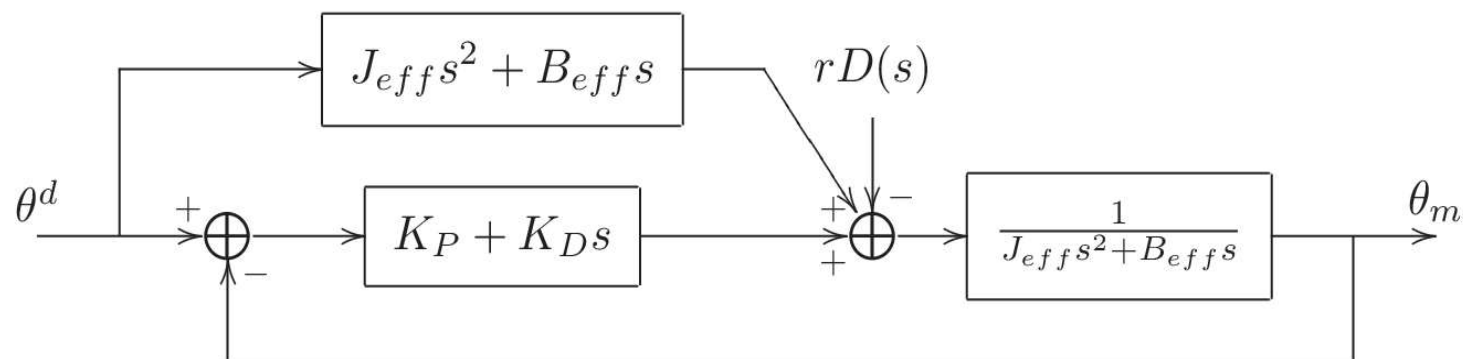
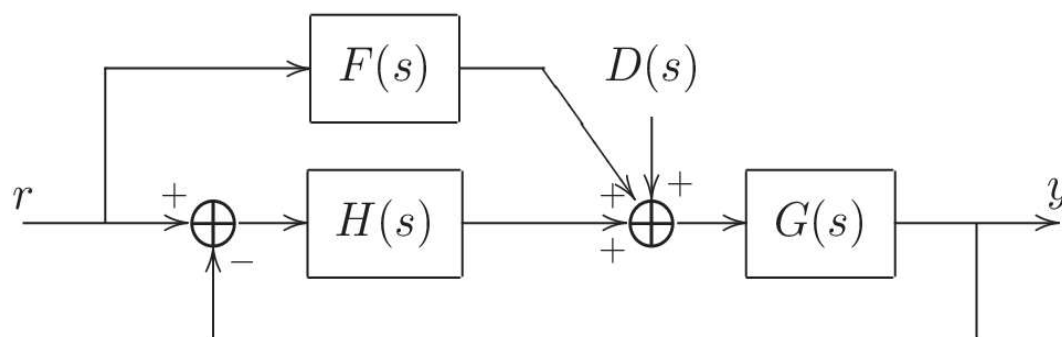


## 4.1 力矩前馈控制方法

- 单关节控制策略中，负载力矩，摩擦阻力等都建模为一种外部干扰，通过反馈控制策略消除，但事实上，负载力矩可以通过动力学进行建模计算
- 通过前馈回路，直接将计算结果输出给驱动器，从而避免通过反馈回路传递控制信号



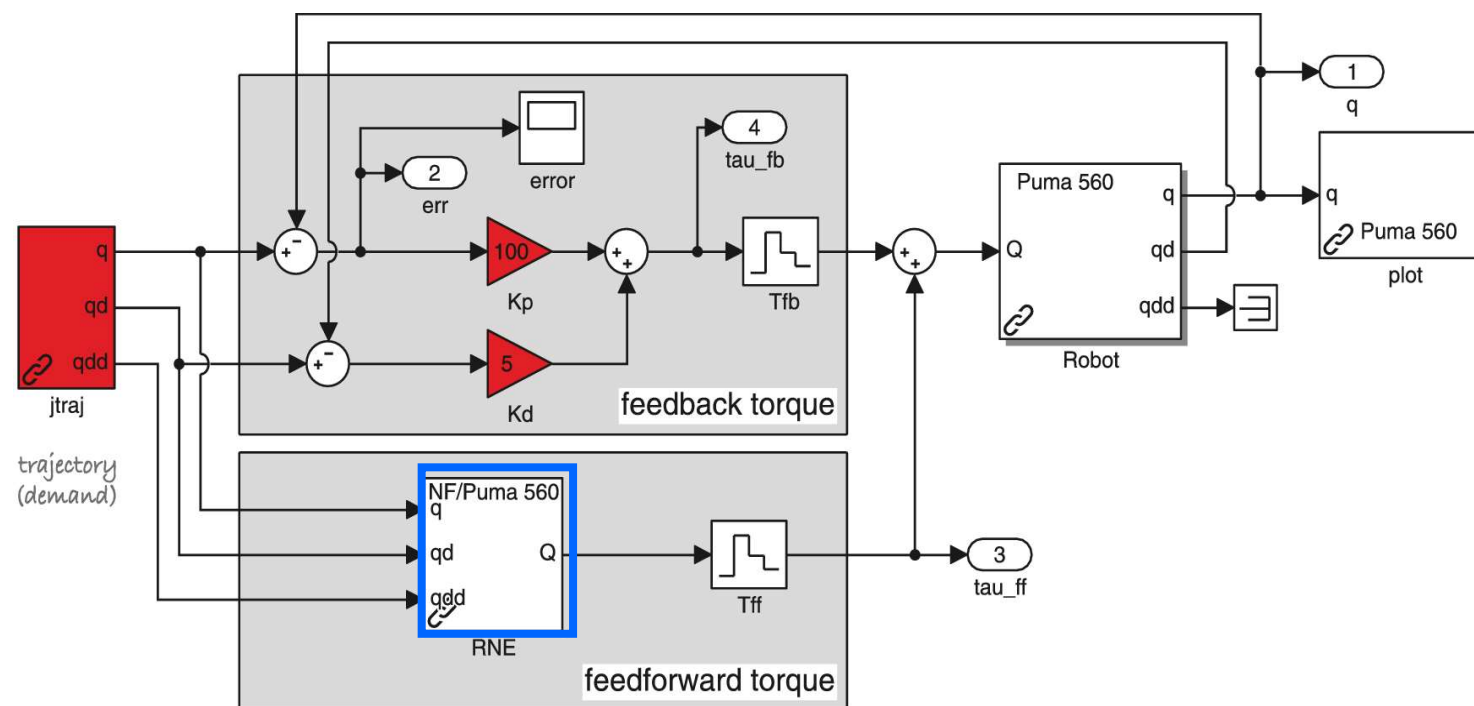
## 4.1 力矩前馈控制方法





## (四) 复杂控制策略概述

### 4.1 力矩前馈控制方法

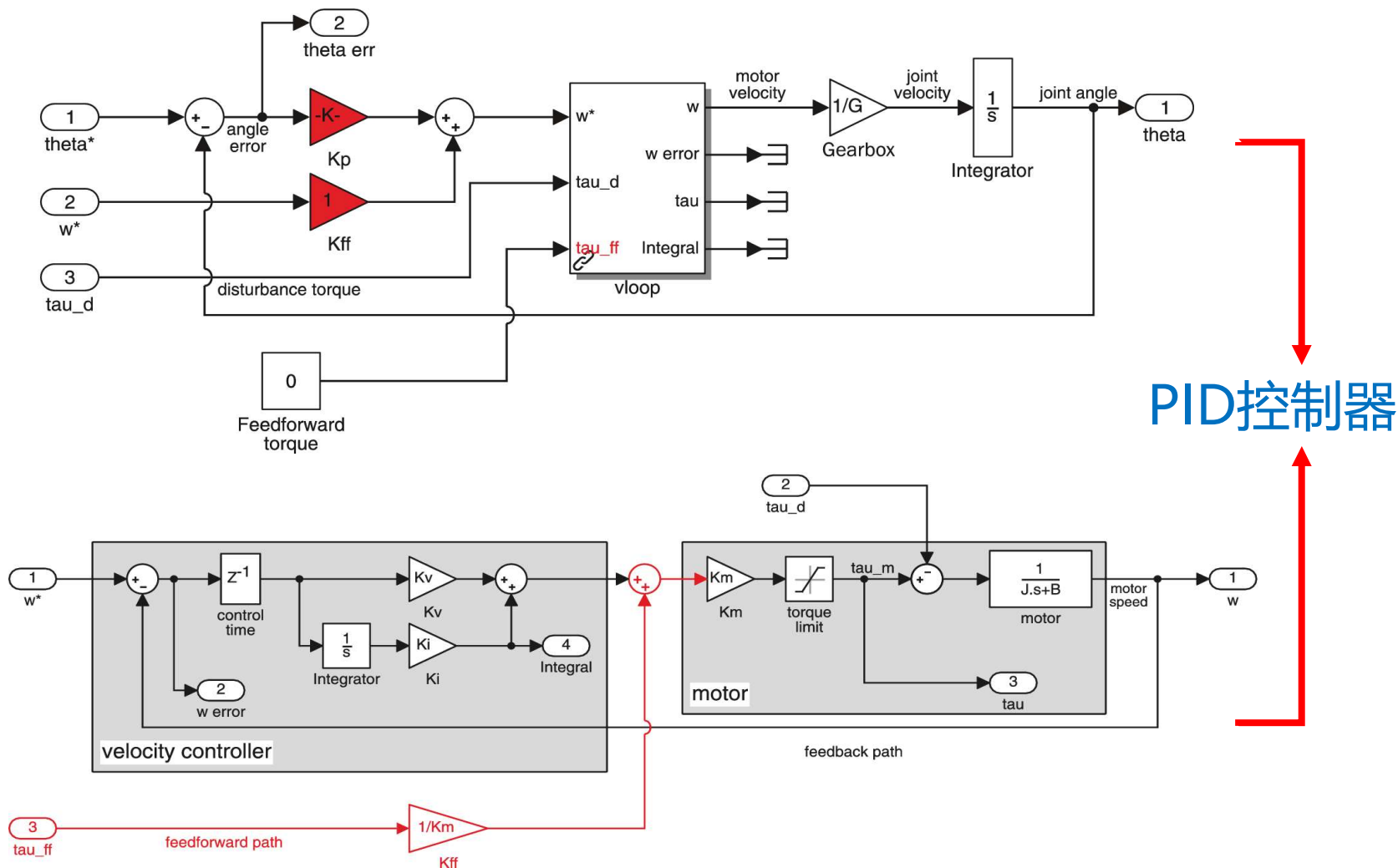


$$\begin{aligned}
 Q^* &= \underbrace{M(q^*)\ddot{q}^* + C(q^*, \dot{q}^*)\dot{q}^* + F(\dot{q}^*) + G(q^*)}_{\text{feedforward}} + \underbrace{\left\{ K_v(\dot{q}^* - \dot{q}^\#) + K_p(q^* - q^\#) \right\}}_{\text{feedback}} \\
 &= \mathcal{D}^{-1}(q^*, \dot{q}^*, \ddot{q}^*) + \left\{ K_v(\dot{q}^* - \dot{q}^\#) + K_p(q^* - q^\#) \right\}
 \end{aligned}$$



## (四) 复杂控制策略概述

### 4.1 力矩前馈控制方法



## 4.2 计算力矩控制方法



$$\begin{aligned} Q &= M(q) \left\{ \ddot{q}^* + K_v (\dot{q}^* - \dot{q}^\#) + K_p (q^* - q^\#) \right\} + C(q^*, \dot{q}^*) \dot{q}^* + F(\dot{q}^*) + G(q^*) \\ &= \mathcal{D}^{-1} \left( q^*, \dot{q}^*, \left( \ddot{q}^* + K_v (\dot{q}^* - \dot{q}^\#) + K_p (q^* - q^\#) \right) \right) \end{aligned}$$



# 机器人运动控制

- 机器人关节驱动器
  - 伺服电机、步进电机
  - 液压、气动驱动器
  - 伺服电机驱动器
- 运动控制系统设计
  - 单关节线形控制：电流环，速度环，位置环
  - 复杂控制策略：力矩前馈控制方法，计算力矩控制方法



## 作业1

为Matlab的单关节控制系统调节PID参数，并分析轨迹跟随特性

## 作业2

为Matlab的计算力矩控制方法和力矩前馈控制方法调节PID参数，并分析轨迹跟随特性



本次授课的PPT和作业均可在在网络学堂上下载。

作业截止日期: 12月21日之前

