

第三章 机器人常用电机及驱动器

3.2 有刷直流永磁伺服电机及其驱动器

华东理工大学信息科学与工程学院

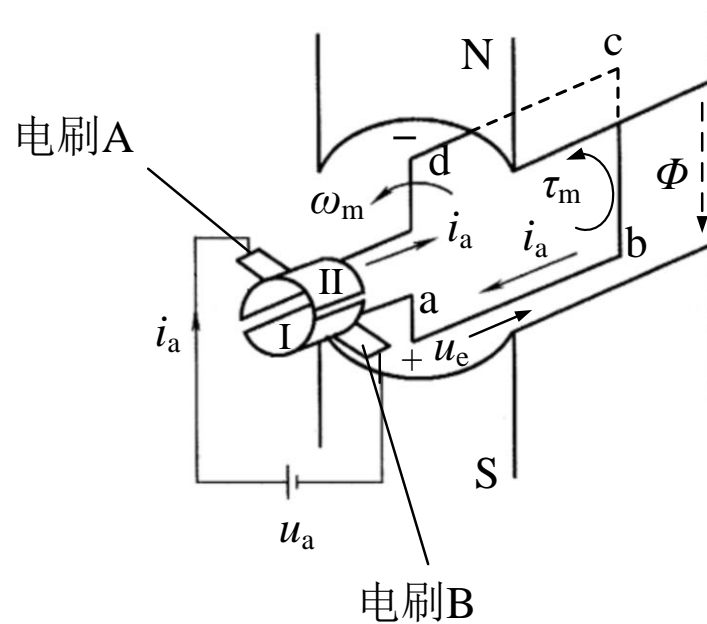
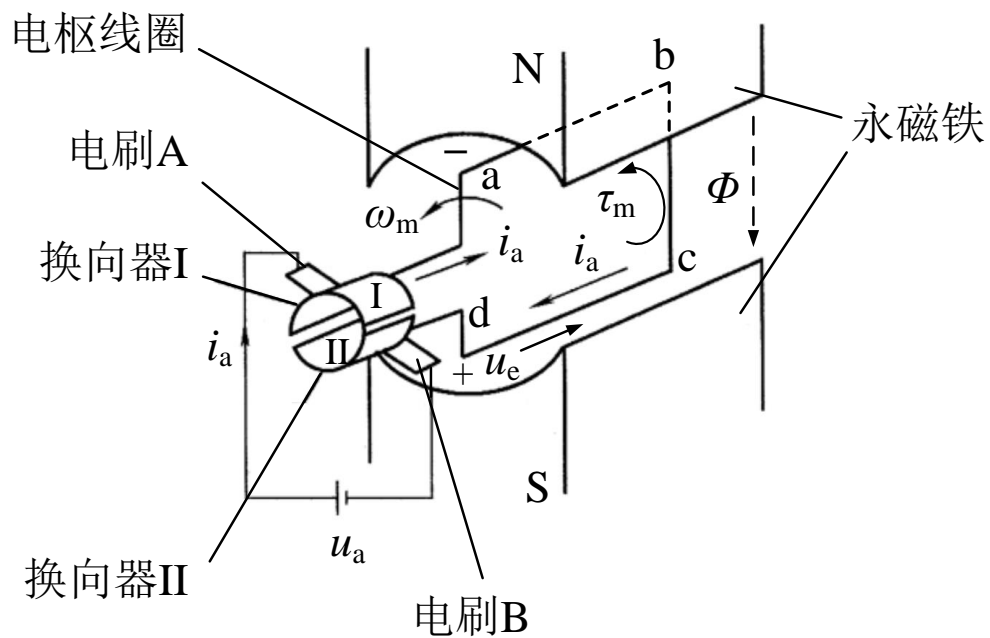
卿湘运

2024年1月



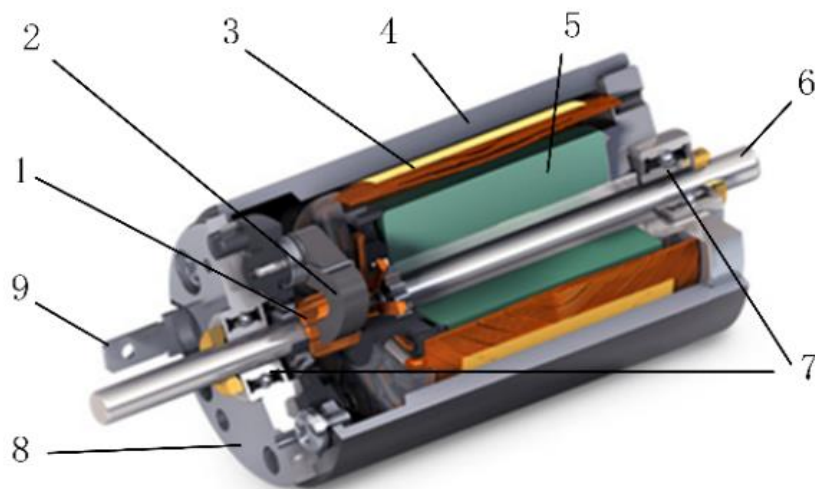
基本原理和结构

● 基本原理

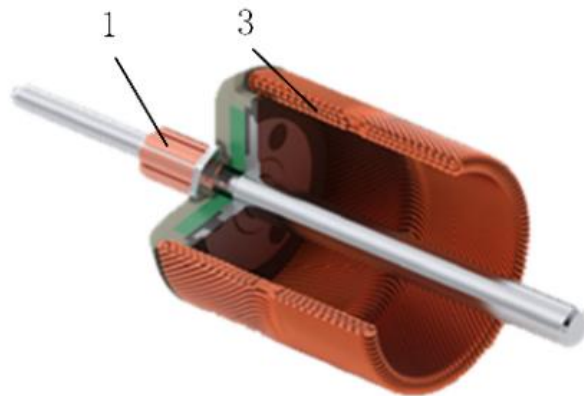


● 电机结构

- 空心杯转子：转子惯量小、响应速度快、力矩-质量比大
- 原理：转子线圈通电，定子永磁励磁，电刷和换向器实现线圈电流换向



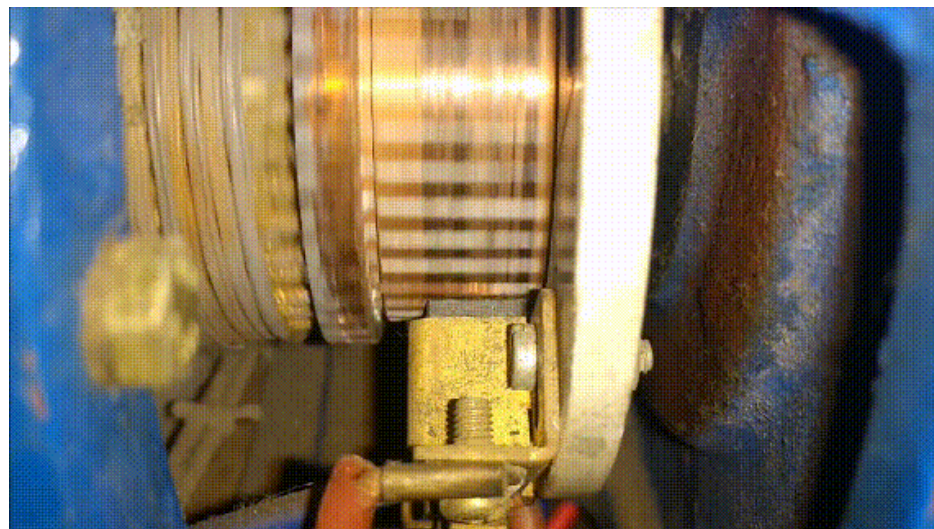
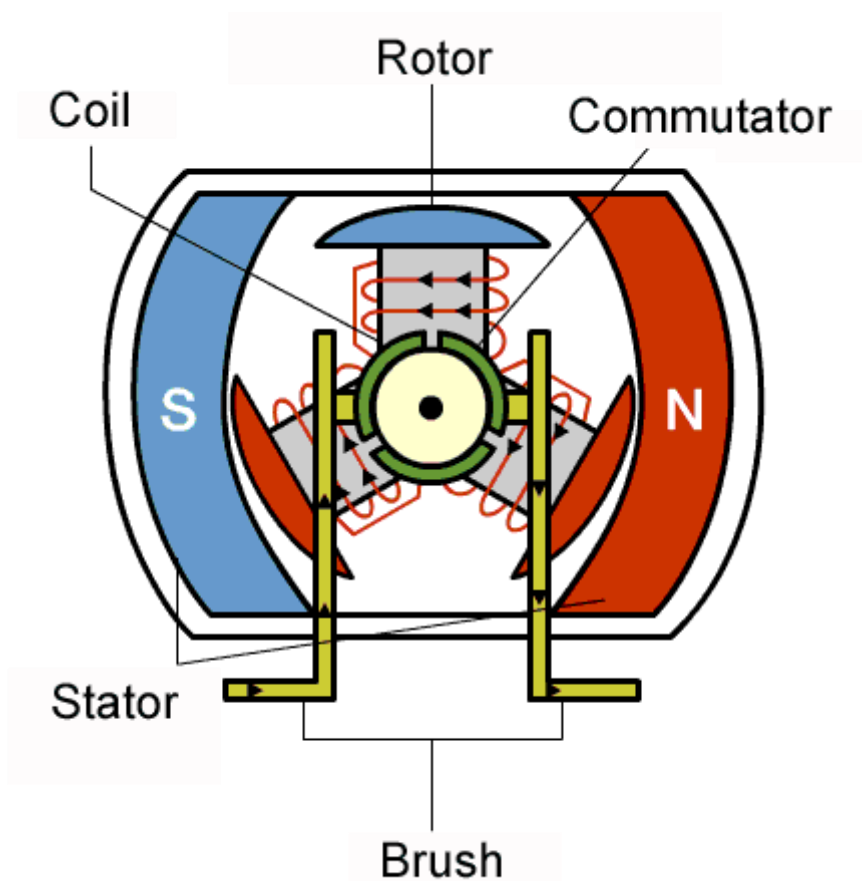
空心杯有刷直流电机剖视图



空心杯转子

1. 换向器 2. 电刷 3. 空心杯电枢 4. 外定子 5. 内定子
6. 转轴 7. 轴承 8. 端盖 9. 接头

● 换向器和电刷



- 机械换向，控制电路简单
- 电刷易磨损，需保养



● 空心杯转子电机

➤ 优点

- 极低的惯量
- 灵敏度高
- 力矩波动小，低速转动平稳，噪声很小
- 换向性能好，寿命长
- 损耗小，效率高



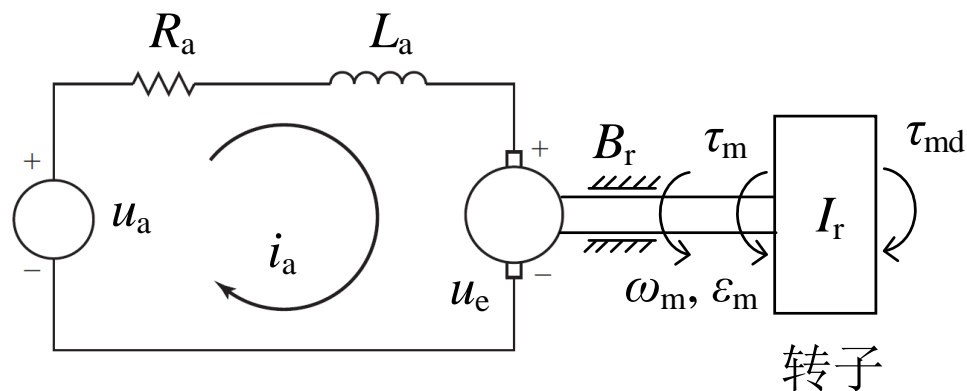
(a) 空心杯转子



(b) 铁芯转子

† 直流伺服电机的特性

● 直流伺服电机模型



特征参数

R_a : 电枢电阻

L_e : 电枢电感

J_r : 转子惯量

B_r : 转子阻尼

K_e : 感应电动势常数

K_a : 转矩常数

电学变量

u_a : 电枢电压

u_e : 感应电动势

i_a : 电枢电流

力学变量

ω_m : 角速度

ϵ_m : 角加速度

τ_m : 电磁转矩

τ_{md} : 负载转矩

直流伺服电机的特性

● 静态特性——电机转子处于受力平衡状态时的运行特性

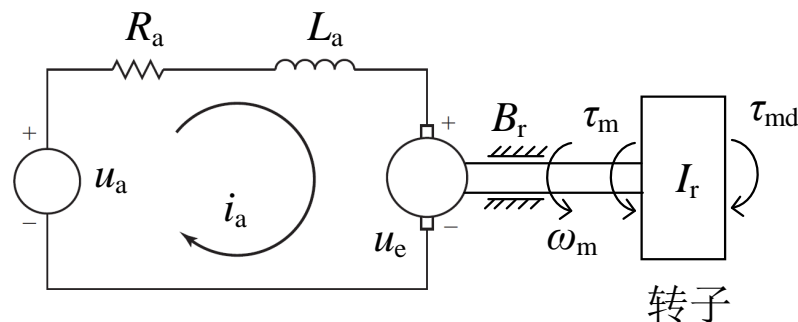
➤ 静态模型

电学模型: $u_a = R_a i_a + u_e$

力学模型: $\tau_m = B_r \omega_m + \tau_{md}$

电磁转矩: $\tau_m = K_a i_a$

感应电动势: $u_e = K_e \omega_m$



转速模型

$$\omega_m = \frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r} u_a - \frac{R_a}{K_e K_a + R_a B_r} \tau_{md}$$

简化



$$\omega_m = \omega_0 - k \tau_{md}$$

空载转速

$$\omega_0 = \frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r} u_a$$

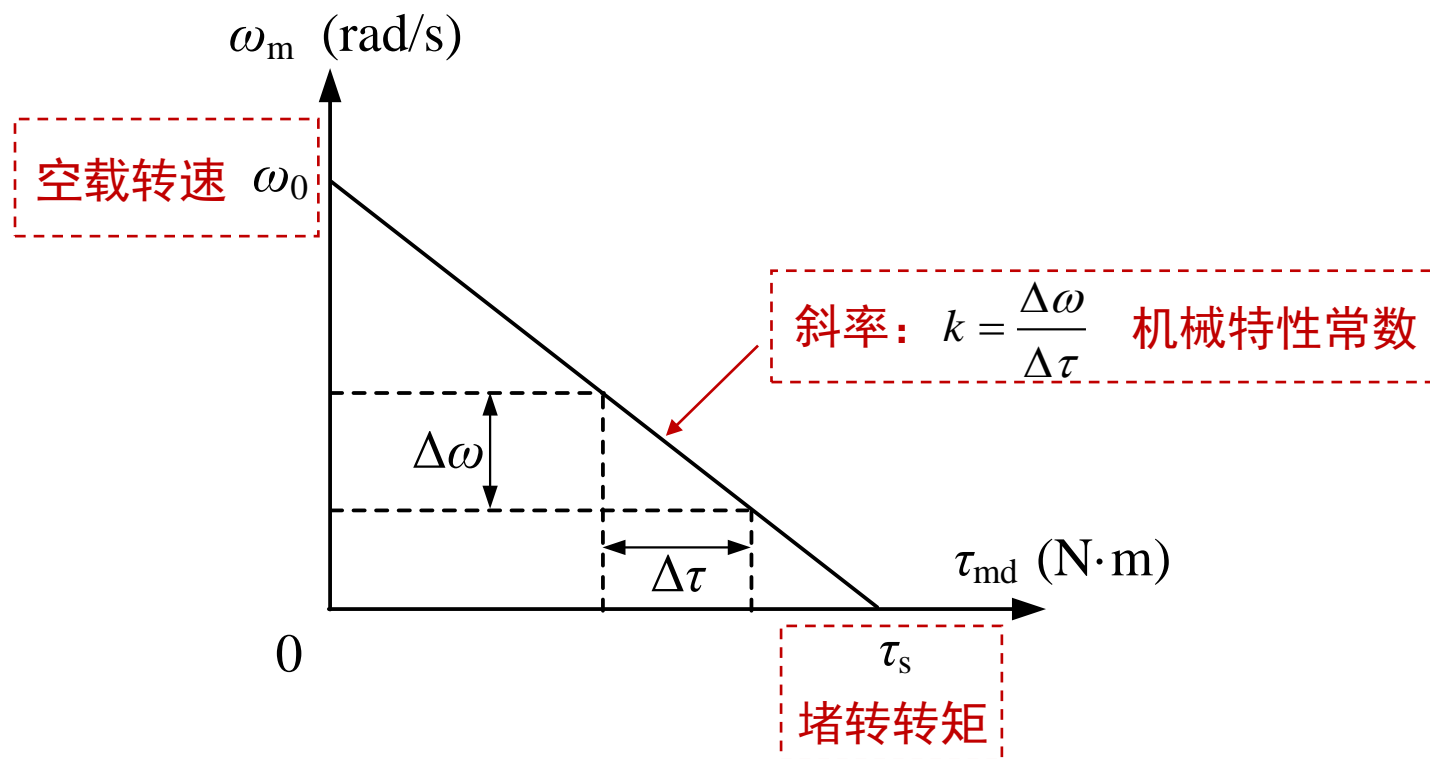
机械特性常数

$$k = \frac{R_a}{K_e K_a + R_a B_r}$$

● 静态特性

——**机械特性**：电枢电压恒定时，电机转速与负载之间的关系

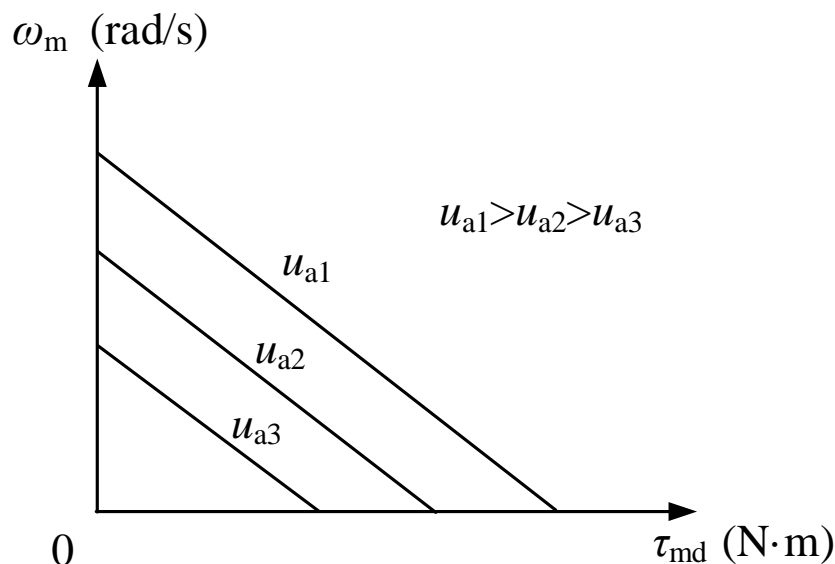
➤ 电枢电压 u_a 恒定



● 机械特性

➤ 不同电枢电压下的机械特性

- 斜率不变
- 电枢电压升高，空载转速和堵转力矩都变大
- 为避免大的感应电动势，电机设计时要求 K_e 小、而 K_a 尽量大



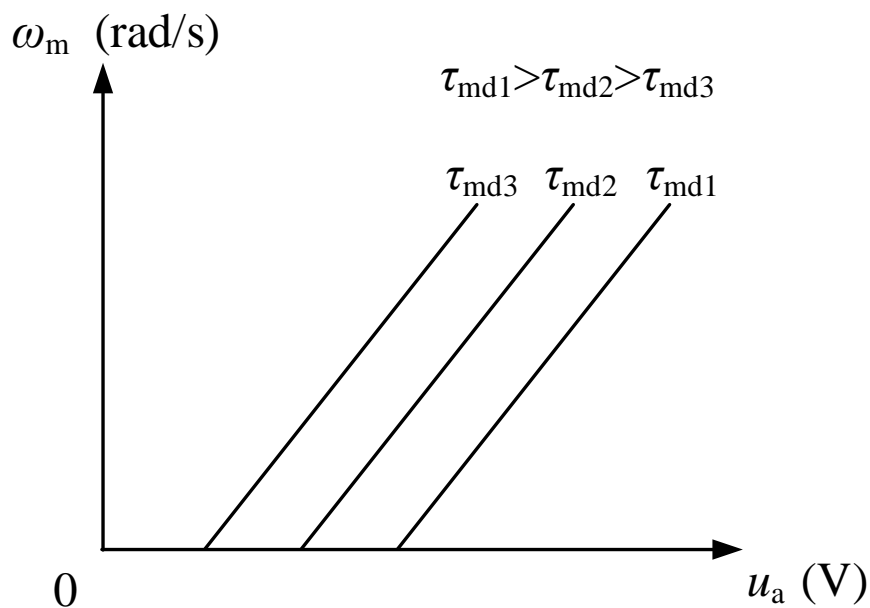
➤ 电枢电压为额定值时的重要指标

- 额定堵转转矩 $\tau_s = u_{ar} \cdot K_a / R_a$
- 额定堵转电流 $i_{as} = u_{ar} / R_a$
- 额定空载转速 $\omega_m = u_{ar} / K_e$
- 额定转矩 τ_r
——额定电压下能长时间输出的最高转矩
- 额定转速 ω_{mr}
——额定电压和额定转矩下的转速

● 调节特性

——电机负载不变的情况下，电枢电压与转速的关系

➤ 不同负载时的调节特性



- 斜率: $\frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r}$

- 忽略阻尼时 B_r , 斜率为

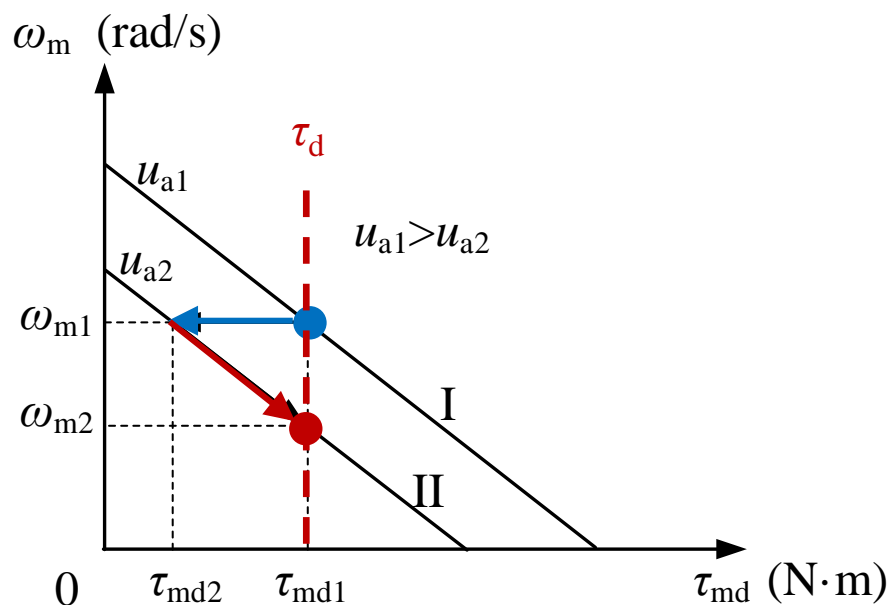
$$\frac{1}{K_e}$$

转速电压系数

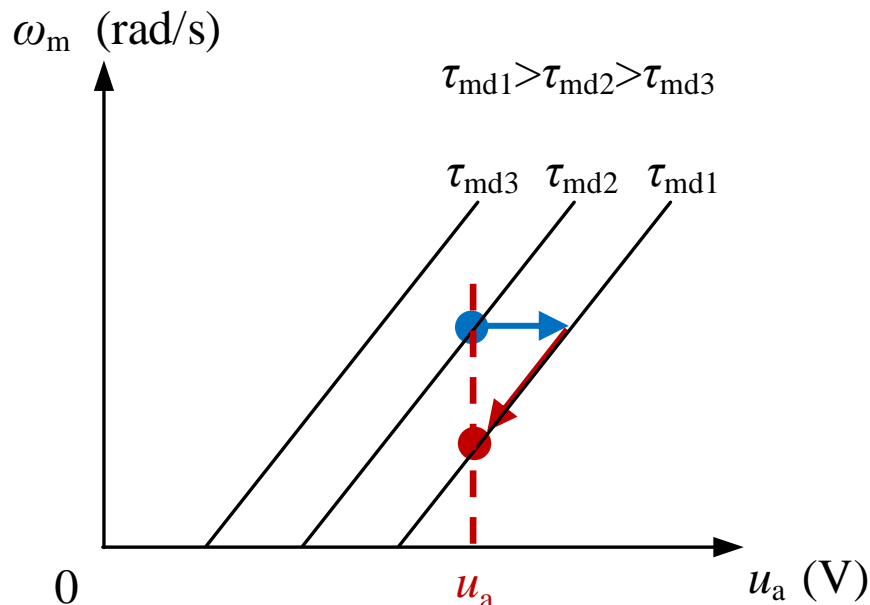
● 动态特性

——电枢电压波动或负载变化时，电机的电流、转速和转矩的变化过程

➤ 降压调速的机械特征曲线
(负载不变)



➤ 负载增大的调速过程
(电压不变)



● 动态特性

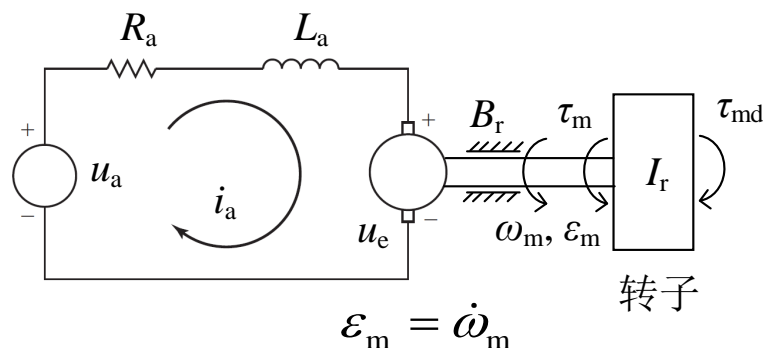
——直流伺服电机是自稳定系统，不会因电压和负载的波动而失稳

电学模型： $u_a = L_a \dot{i}_a + R_a i_a + u_e$

动力学模型： $\tau_m = I_r \dot{\omega}_m + B_r \omega_m + \tau_{md}$

电磁转矩： $\tau_m = K_a i_a$

感应电动势： $u_e = K_e \omega_m$



↓ 拉氏变换

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} [U_a(s) - U_e(s)]$$

$$\tau_m(s) = K_a I_a(s)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{B_r + I_r s} [\tau_m(s) - \tau_{md}(s)]$$

$$U_e(s) = K_e \Omega_m(s)$$

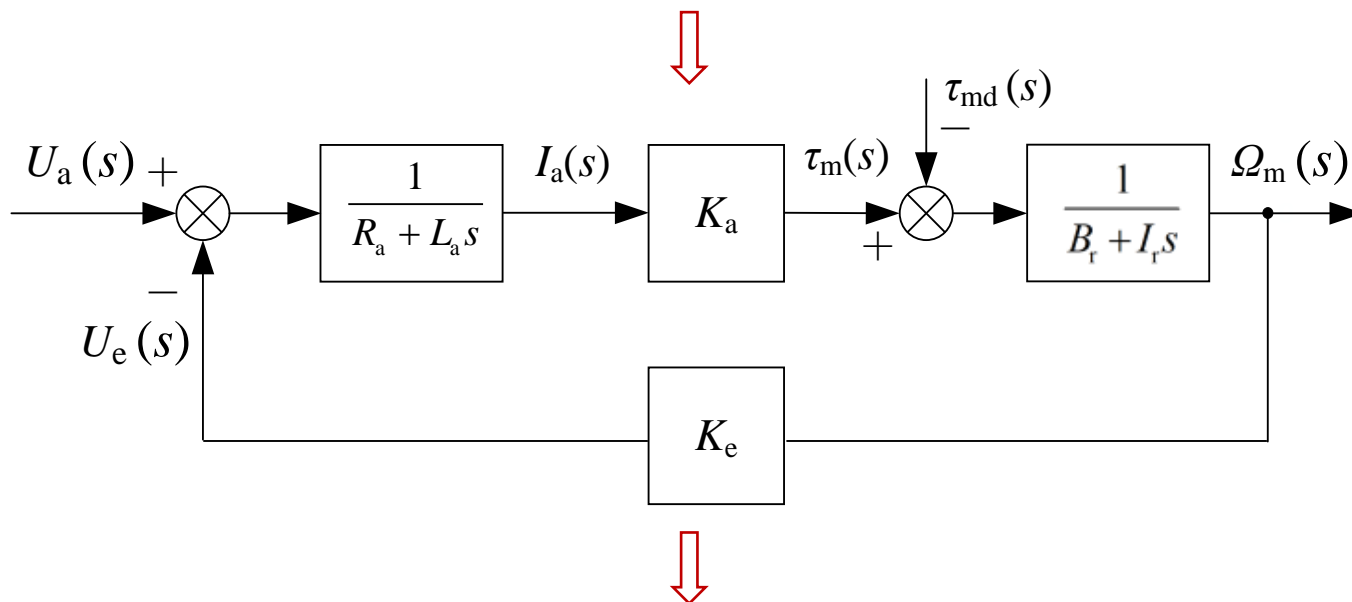
● 动态特性——转速与电枢电压和负载力矩

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} [U_a(s) - U_e(s)]$$

$$\tau_m(s) = K_a I_a(s)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{B_r + I_r s} [\tau_m(s) - \tau_{md}(s)]$$

$$U_e(s) = K_e \Omega_m(s)$$



$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(R_a + L_a s)(B_r + I_r s) + K_a K_e} [K_a U_a(s) - (R_a + L_a s) \tau_{md}(s)]$$

● 动态特性

➤ 某真实电机性能参数

项目	符号	取值	单位
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)

- 伺服电机电感很小，可忽略
- 拖动负载时，转子阻尼影响很小，可忽略

● 动态特性——转速与电枢电压和负载力矩

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(R_a + L_a s)(B_r + I_r s) + K_a K_e} [K_a U_a(s) - (R_a + L_a s)\tau_{md}(s)]$$

令 $L_a=0, B_r=0$ ↓

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{R_a I_r s + K_a K_e} [K_a U_a(s) - R_a \tau_{md}(s)]$$

↓

$$\Omega_m(s) = \frac{1/K_e}{T_m s + 1} [U_a(s) - \frac{R_a}{K_a} \tau_{md}(s)]$$

$$T_m = \frac{R_a I_r}{K_a K_e} \quad \text{电机的机电时间常数}$$

● 动态特性

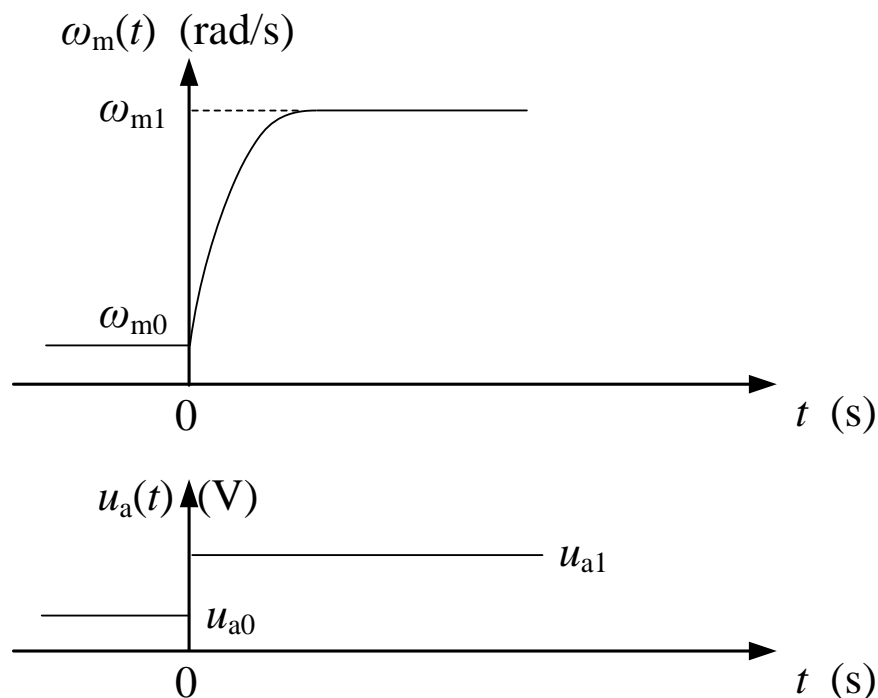
➤ 时域表达式——电枢电压阶跃变化

拉氏反变换

$$\omega_m(t) = \frac{1}{K_e} \left(u_{a1} - \frac{R_a}{K_a} \tau_{md} - \Delta u_a e^{-\frac{t}{T_m}} \right)$$

T_m ——上升时间

$\Delta u_a = u_{a1} - u_{a0}$ ——电压阶跃值



● 动态特性

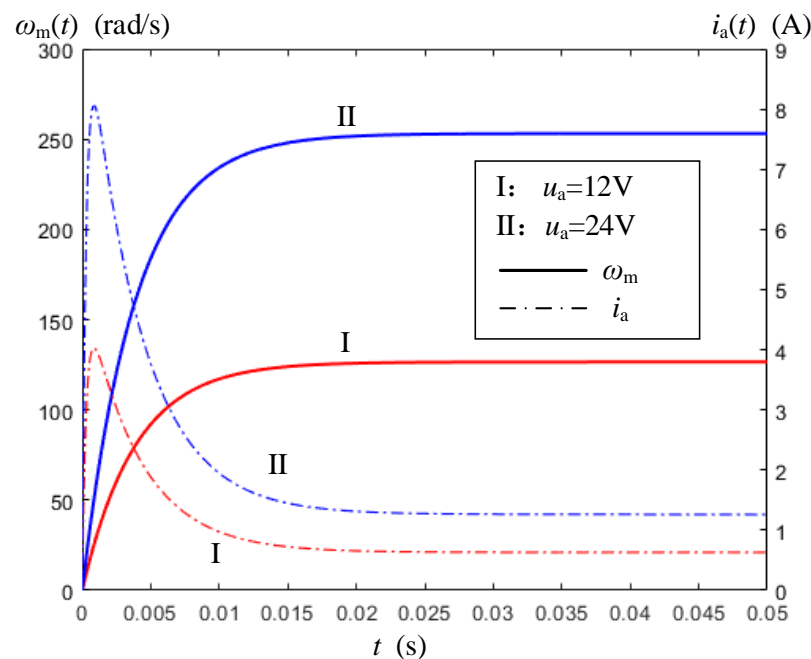
➤ 空载零速启动模型

$$\omega_m(t) = \frac{u_a}{K_e} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}})$$

$$T_m = \frac{R_a I_r}{K_a K_e}$$

- $t = \infty$ 时: $\omega_{max} = \frac{u_a}{K_e}$
——空载稳定转速
- $t = T_m$ 时: $\omega_m = 63\% \omega_{max}$
——上升时间
- $t = 3T_m$ 时: $\omega_m = 95\% \omega_{max}$
——空载稳定时间
- 电枢电压 $u_a = 12V$ 或 $u_a = 24V$

项目	符号	取值	单位
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	3.10×10^{-4}	(N·m)/(rad/s)



● 主要性能参数

项目	名称	常用单位	定义和说明
1	额定电压	V	电机最佳工作状态下的电枢电压
2	额定转矩	mN·m	额定电压下，电机能够持续运转，并连续输出的最高转矩
3	额定转速	rpm	额定电压和额定转矩下的电机转速
4	额定电流	mA	额定电压和额定转矩下的电枢电流
5	堵转转矩	mN·m	额定电压下，电机堵转时的转矩，也是电机的最大转矩，电机不能长时间工作在此状态。
6	堵转电流	mA	额定电压下，电机堵转时的电枢电流
7	空载转速	rpm	负载为零时，额定电压下的电机最高转速，越大越好
8	空载电流	mA	负载为零时，额定电压下的电枢电流，越小越好
9	最大效率	W	额定电压下的最大效率
10	电枢电阻	Ω	伺服电机的电枢电阻通常小于5Ω
11	电枢电感	mH	伺服电机的电枢电感通常小于0.1mH
12	转矩常数	mN·m/A	重要参数，可据此计算电机在任意电压下的堵转力矩
13	转速常数	rpm/V	重要参数，是感应电动势常数的倒数，可以据此计算任意转速下的电机感应电动势
14	转速/转矩斜率	rpm/mN·m	电压不变时，转速随负载力矩变化的程度
15	机电时间常数	ms	反应了电机的动态特性，越小越好， 伺服电机的机电时间常数通常不大于10ms
16	转子惯量	g·cm ²	越小越好

有刷直流伺服电机的驱动

● 驱动器类型

控制器



嵌入式系统



工控机

控制电压

u_c
(PWM)

控制信号
(mA)

• 开关型放大器 —— PWM放大器



电枢电压

u_a

功率信号

(A)

➤ 电压型放大器



速度模式

$$u_c \propto \omega_m$$

• 线性放大器

➤ 电流型放大器



电枢电流

i_a

功率信号

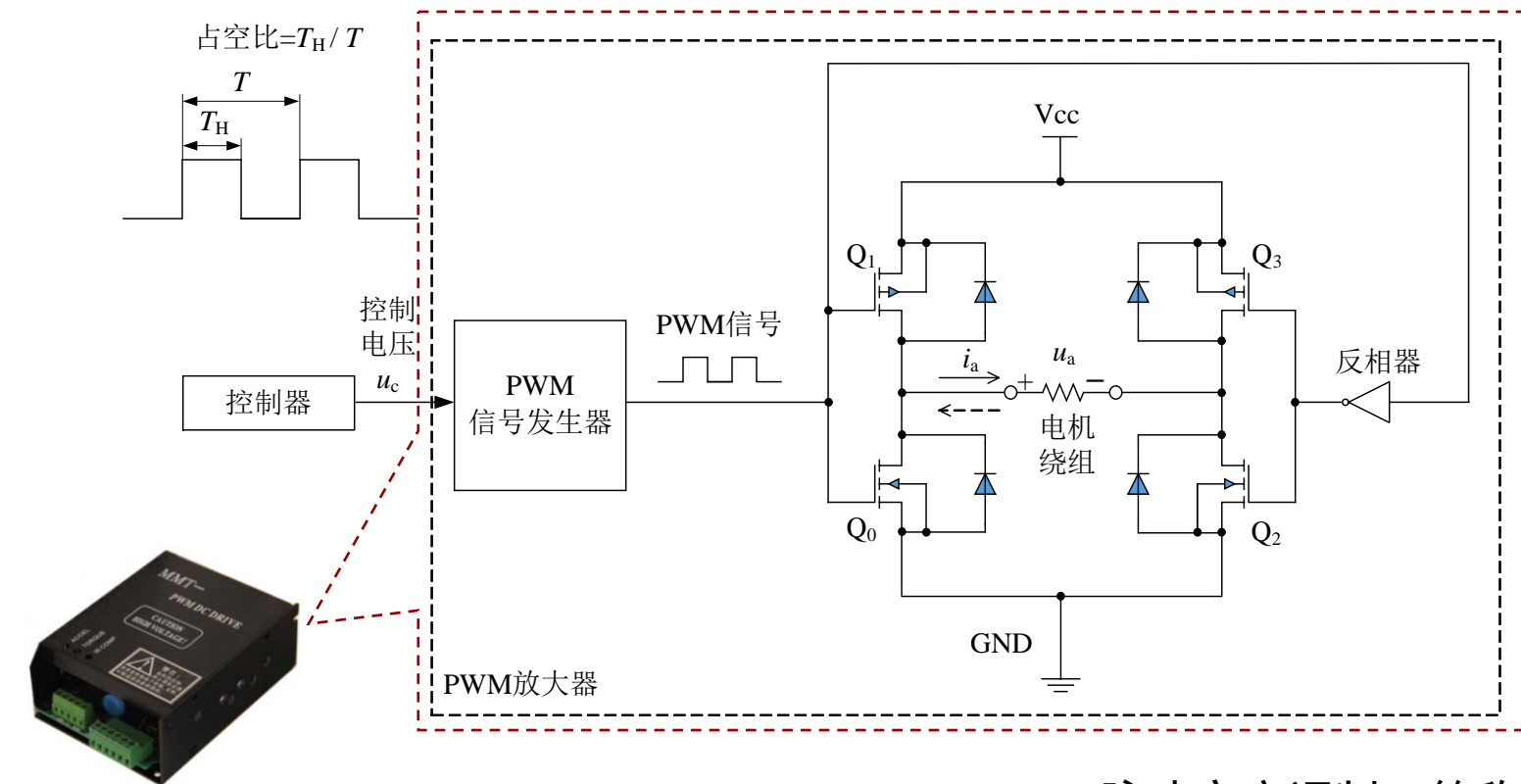
(A)

力矩模式

$$u_c \propto i_m \propto \tau_m$$



● 电压型放大器——PWM放大器



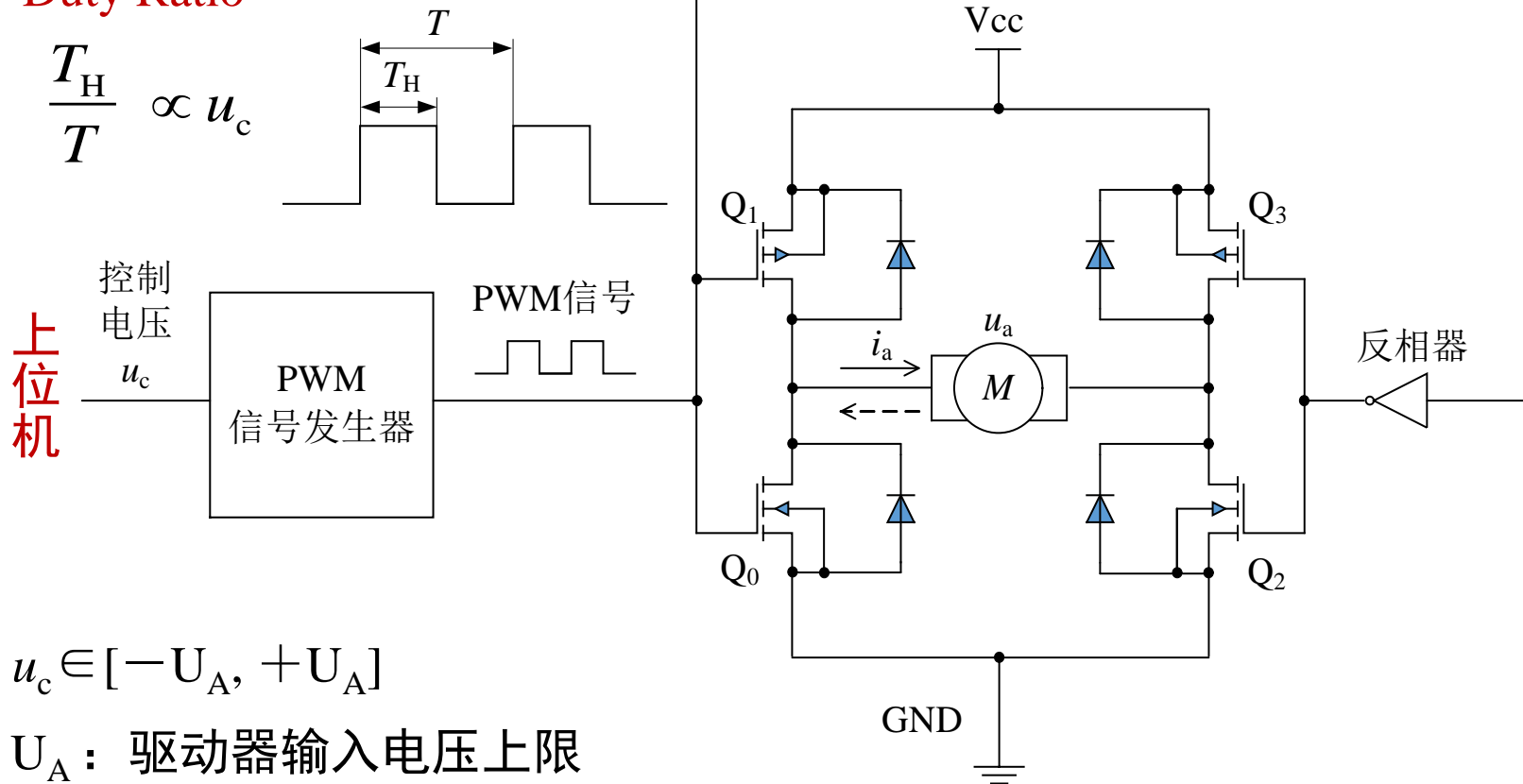
PWM放大器

- PWM——Pulse Width Modulation脉冲宽度调制，简称脉宽调制
- 根据输入PWM信号的**占空比 (T_H/T)**（和方向信号）改变电机线圈两端电压大小和方向
- 电枢电压与控制电压成正比

● 电压型放大器——PWM放大器

占空比
Duty Ratio

$$\frac{T_H}{T} \propto u_c$$

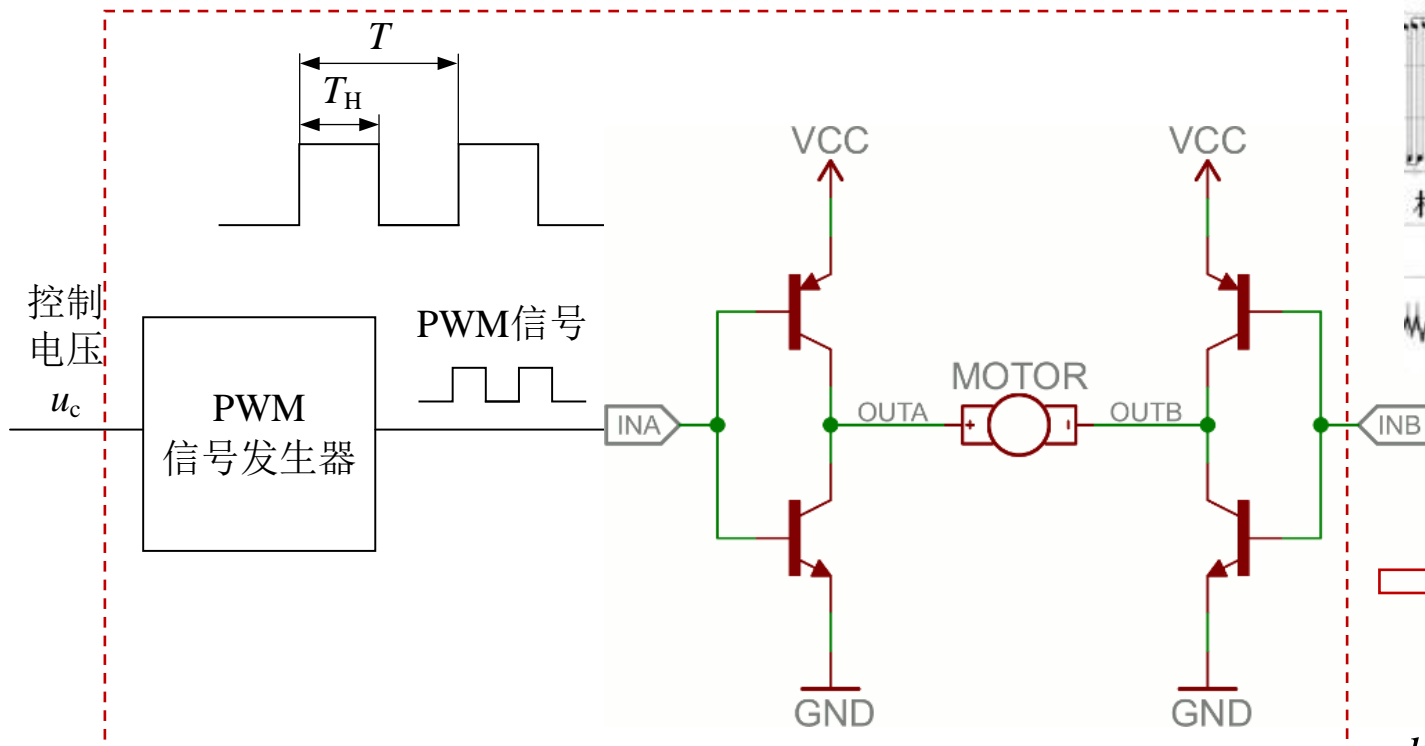


$$u_c \in [-U_A, +U_A]$$

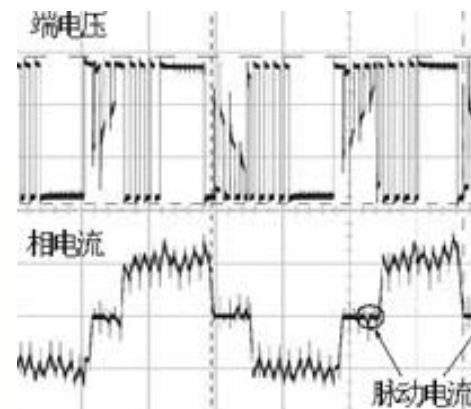
U_A ：驱动器输入电压上限

$|u_c| > U_A$ ：驱动器输入饱和

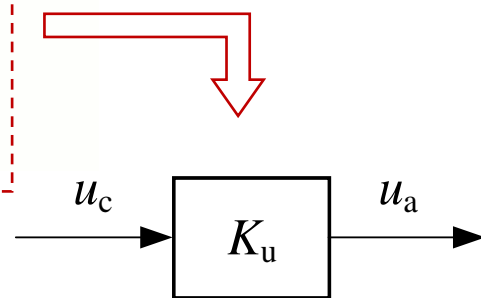
● 电压型放大器——PWM放大器



电枢电压和电流波形



- $u_c = +U_A \rightarrow TH/T = 1 \rightarrow u_a = +V_{cc}$
- $u_c = -U_A \rightarrow TH/T = 0 \rightarrow u_a = -V_{cc}$
- $u_c = 0 \rightarrow TH/T = 0.5 \rightarrow u_a = 0$
- $u_c = +0.5U_A \rightarrow TH/T = 0.75 \rightarrow u_a = +0.5V_{cc}$

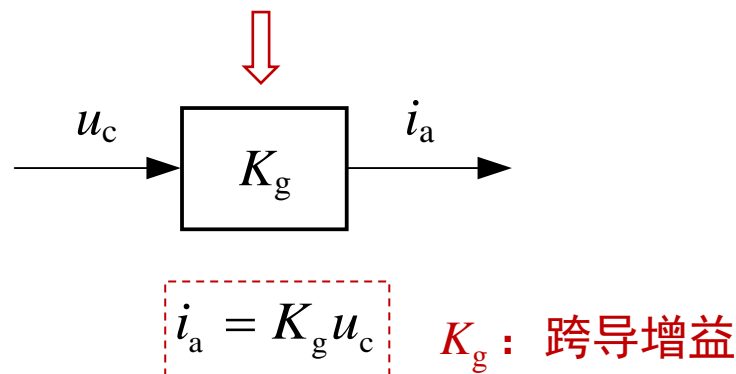


$$u_a = K_u u_c$$

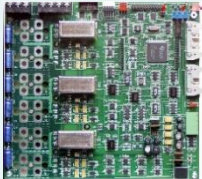

$K_u = V_{cc}/U_A$: 电压增益

● 电流型放大器——线性放大器

- 采用晶体管作为功率放大器件
- 晶体管始终工作在线性放大区
- 把基极控制电压 u_c 等比例地变换为集电极输出的电枢电流 i_a

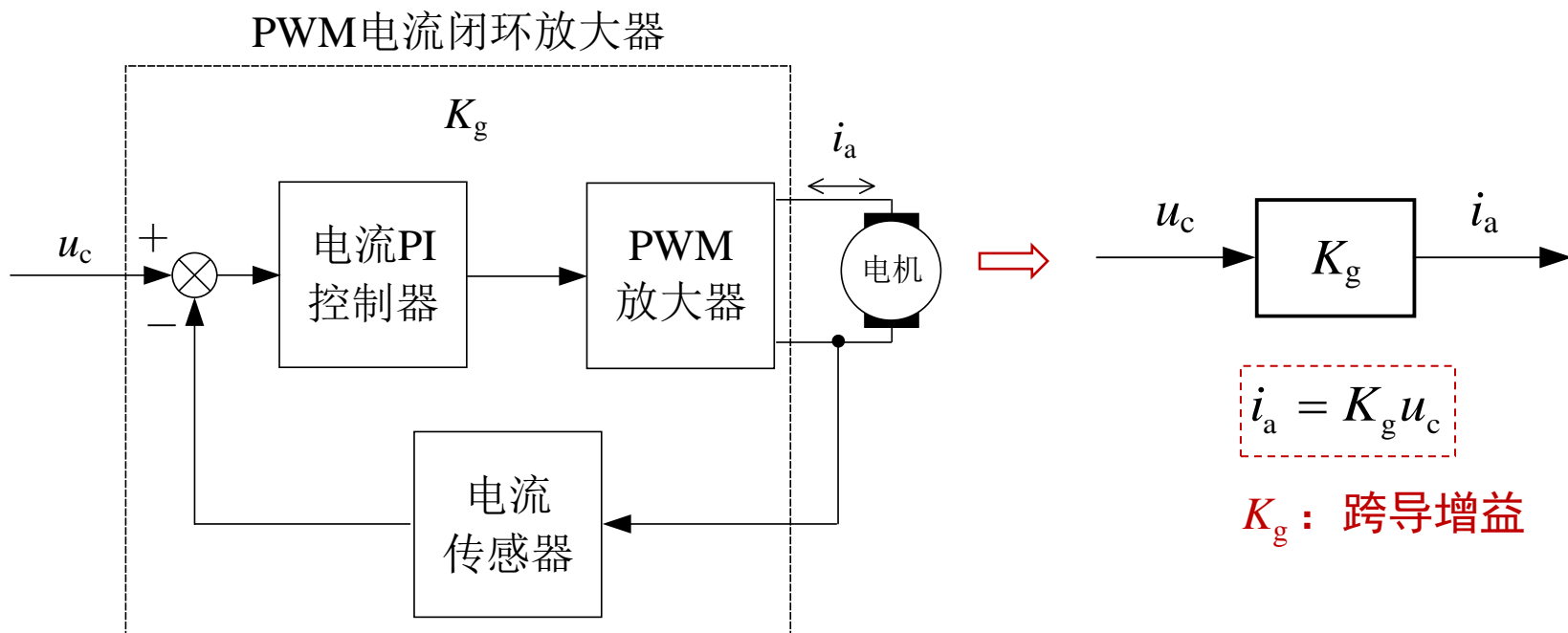


● 线性放大器与PWM放大器的对比

项目		线性放大器	PWM放大器
功率器件工作状态		线性放大状态	导通-截止状态
优点		线路简单，电磁干扰小，电流波动小，调速范围宽	调速范围宽，效率高
缺点		发热严重、效率低、体积大	电磁干扰大，输出电流波动大
适用场合		适用于小功率电机，力矩控制精度要求高，或对电磁干扰敏感的场所	适用功率范围大，对电磁干扰不敏感，可以采用速度控制的场合
实例	照片		
	最大连续输出功率（W）	200	250
	最大连续输出电流（A）	5	5
	尺寸（mm ³ ）	203×190×37	43×28×13
	质量（g）	900	9

● 电流型放大器——PWM电流闭环放大器

- PWM放大器+电流PI控制器
- 把控制电压 u_c 等比例地变换为电枢电流 i_a
- 体积小、功耗低
- 有电磁噪声、电流波动比线性放大器大
- 商用伺服驱动器中常用

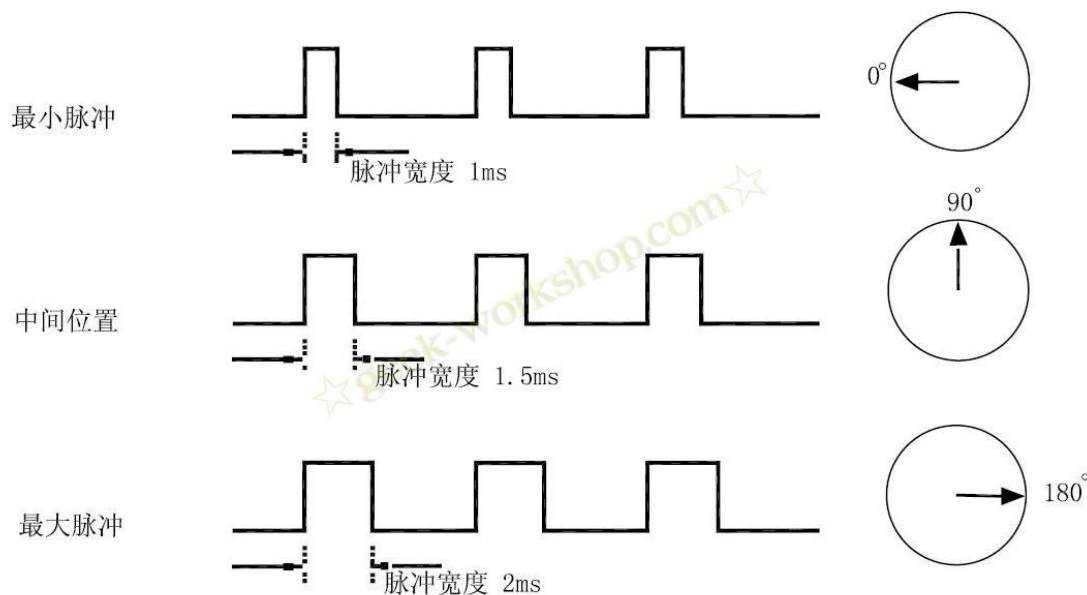


- 成套的直流电机系统



● 延伸——舵机（Servo Motor）

- 内部封装了电机、减速器、旋转电阻、控制电路
- 可由PWM信号直接控制输出轴转角或速度
- 可用于小型机器人，航模



作业

- 1、有刷直流伺服电机的机械特性和调节特性分别是什么？
- 2、有刷直流伺服电机负载不变，且在某电枢电压作用下稳定运行，此时，如果升高电枢电压，试绘制升压调速机械特性曲线，结合曲线图简述电机输出力矩、转速的变化过程。