



# 电力牵引传动与控制

## 第三章 电力牵引异步电机变频调速控制方式

西南交通大学

苟 斌

本科生讲稿





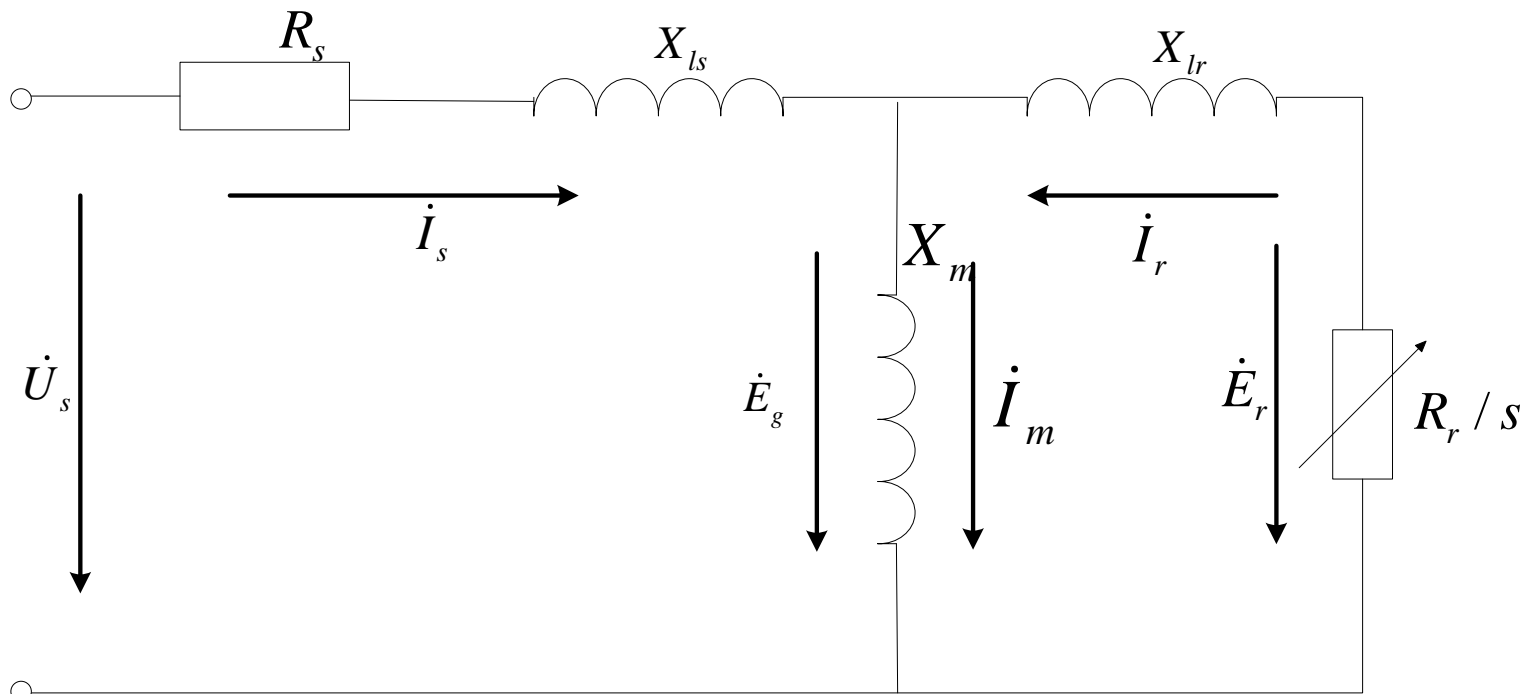
# 本章主要内容

- 频率调节时异步电机的等值电路
- 恒磁通控制
- 恒电压频率比控制
- 恒转子全磁通控制
- 恒功率控制
- 机车牵引中变频调速系统的调节特性



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 频率调节时异步电机的等值电路



Equivalent circuit of induction motor



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 变频调速时异步电机参数的变化

$$E_g = 4.44 N_s k_{Ns} f_s \Phi_m = C_E f_s \Phi_m$$

$$\Phi_m = \frac{E_g}{C_E f_s}$$

$$\Phi_m = \frac{U_s}{C_E f_s}$$

$$X_{ls} = \frac{f_s}{f_{sN}} X_{lsN} = \alpha_f X_{lsN}$$

$$X_m = \frac{f_s}{f_{sN}} X_{mN} = \alpha_f X_{mN}$$

$$X_{lr} = \frac{f_s}{f_{sN}} X_{lrN} = \alpha_f X_{lrN}$$

$$R_m = R_{mN} \left( \frac{f_s}{f_{sN}} \right)^{1.5} = R_{mN} \alpha_f^{1.5}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 转矩公式

电磁功率:  $P_e = mE_g I_r \cos \varphi_r$

电磁转矩:  $T = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{mn_p}{2\pi f_s} E_g I_r \cos \varphi_r$

$$T = C_M \phi_m I_r \cos \varphi_r$$

$$T = \frac{mn_p}{2\pi f_s} I_r^2 R_r / s$$

$$T = \frac{mn_p}{2\pi f_s} \frac{U_s^2 R_r / s}{\left[ \left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2 \right]}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 变频调速时异步电机参数

电磁同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{n_p}$$

转子电流

$$I_r = \frac{E_g}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{lr}^2}}$$

转子功率因数

$$\cos \varphi_r = \frac{R_r / s}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{lr}^2}}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 变频调速时异步电机的转矩公式

$$T = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{U_s}{f_s} \right]^2 \cdot \frac{sf_s R_r}{[sR_s + R_r]^2 + s^2 [X_{ls} + X_{lr}]^2}$$

$$T = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{E_g}{f_s} \right]^2 \left[ \frac{f_{sl} R_r}{R_r^2 + (2\pi f_{sl} L_{lr})^2} \right]$$

$$T = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{E_r}{f_s} \right]^2 \left[ \frac{f_{sl}}{R_r} \right]$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒磁通控制

$$T = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{E_g}{f_s} \right]^2 \left[ \frac{f_{sl} R_r}{R_r^2 + (2\pi f_{sl} L_{lr})^2} \right]$$

$$f_m = \frac{R_r}{2\pi L_{lr}} \quad T_m = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{E_g}{f_s} \right]^2 \frac{1}{4\pi L_{lr}}$$

$$\frac{T}{T_m} = \frac{2}{(f_{sl} / f_m) + (f_m / f_{sl})}$$





# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒磁通控制

结论：当

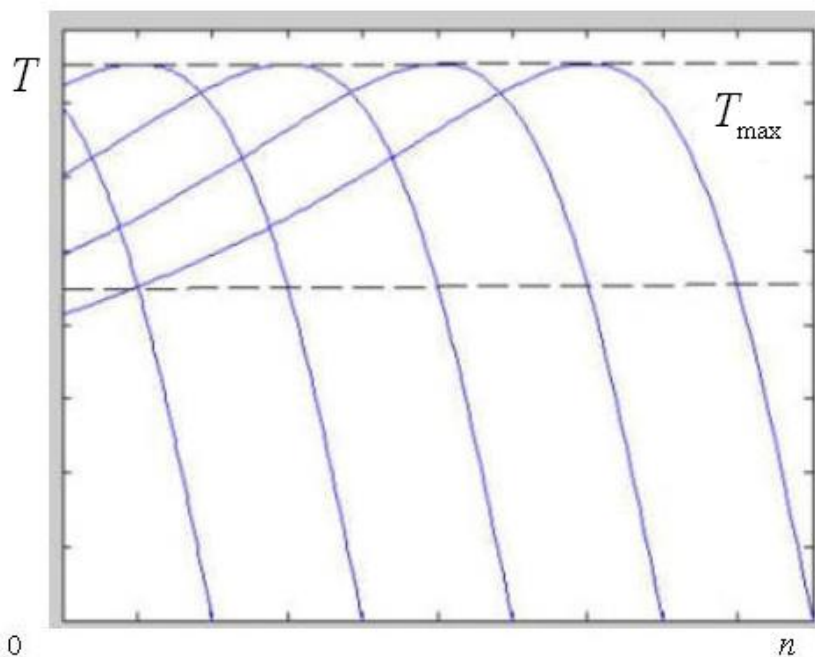
$$\frac{E_g}{f_s} = \text{const}$$

$$T = f(f_{sl})$$

$$f_{sl} = \text{const}, \quad T = \text{const}$$

$$T_{\max} = \text{const}$$

$$f_{\max} = \text{const}$$





# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒压频比控制

$$T = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{U_s}{f_s} \right]^2 \cdot \frac{sf_s R_r}{[sR_s + R_r]^2 + s^2 [X_{ls} + X_{lr}]^2}$$

$$\frac{dT}{df_{sl}} = 0$$

$$s_{\max} = \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + [2\pi f_s (L_{ls} + L_{lr})]^2}}$$

$$T_{\max} = \frac{mn_p}{4\pi} \left[ \frac{U_s}{f_s} \right]^2 \frac{f_s}{R_s + \sqrt{R_s^2 + [2\pi f_s (L_{ls} + L_{lr})]^2}}$$

$$T_{st} = \frac{mn_p}{2\pi} \left[ \frac{U_s}{f_s} \right]^2 \cdot \frac{f_s R_r}{[R_s + R_r]^2 + [2\pi f_s (L_{ls} + L_{lr})]^2}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

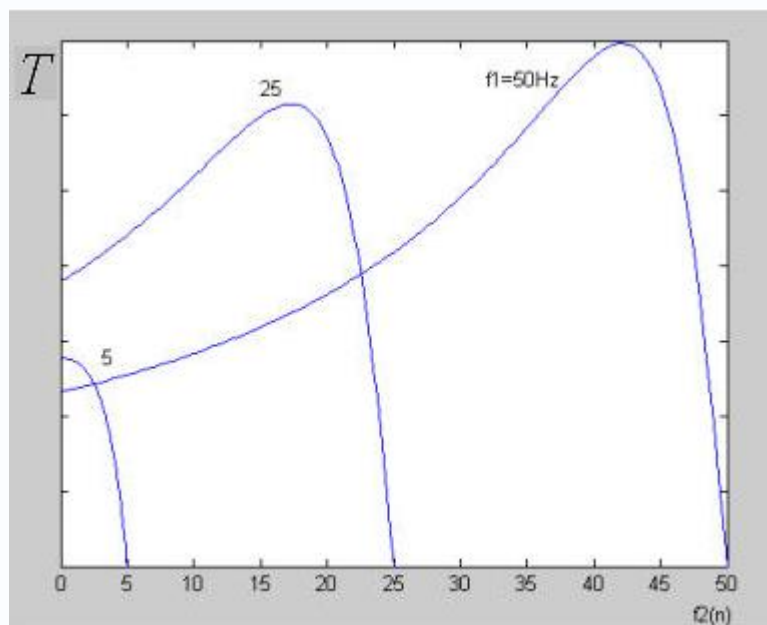
## □ 恒压频比控制

$$U_s / f_s = \text{const}$$

$$f_m = f(f_s)$$

$$T = f(f_s, f_{sl})$$

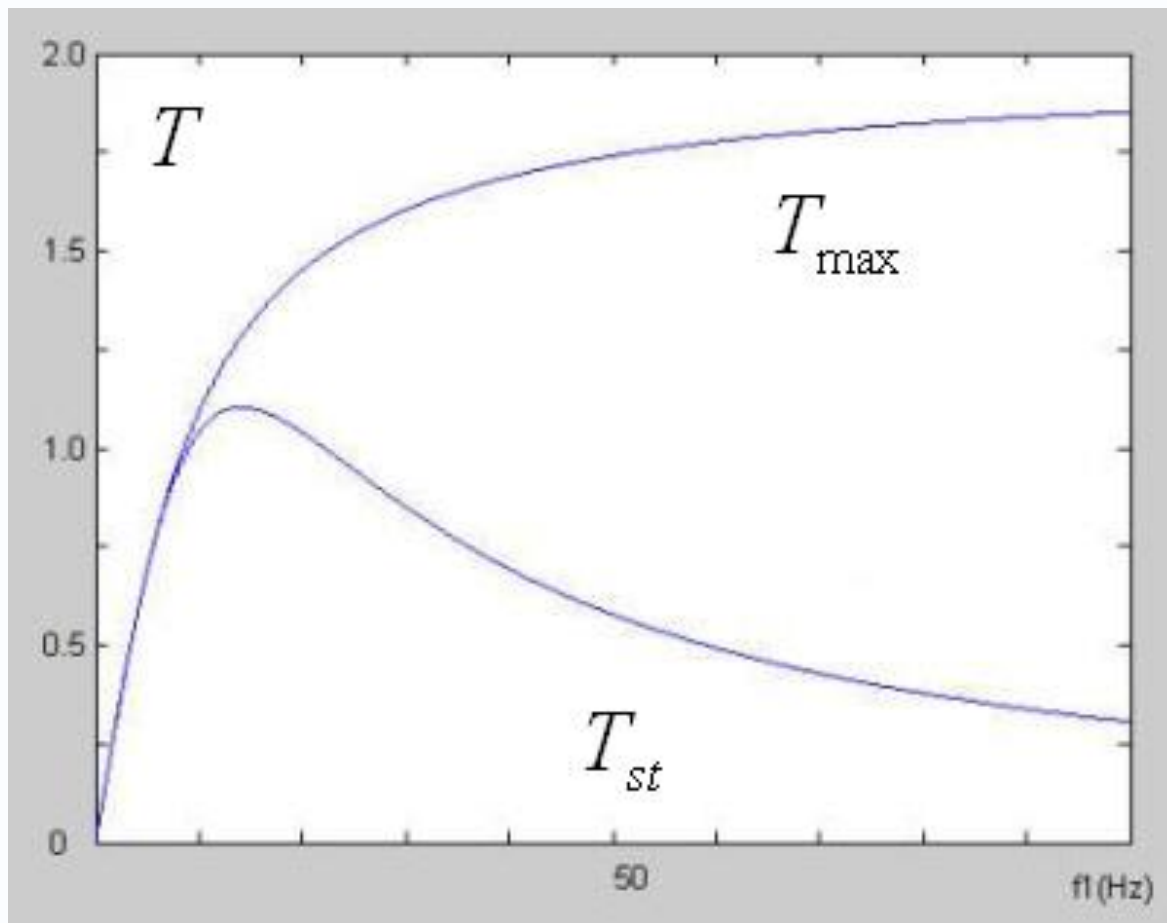
$$T_{\max} = f(f_s)$$





# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒压频比控制



恒压频比时最大转矩和起动转矩与频率的关系曲线



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒压频比控制带来的问题

- 低频时，恒电压频率比控制方式受定子电阻压降的影响较大而不能保持气隙磁通不变，其最大力矩和起动力矩都急剧下降，限制了传动系统的带负载能力。
- 解决方法：在低频范围内提高逆变器的输出电压以补偿定子压降下降的影响。

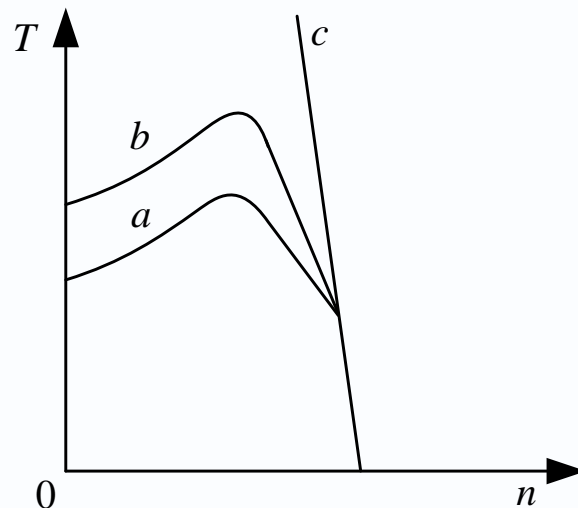


# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒转子全磁通控制

$$E_r = 4.44 f_s N_s k_{Ns} \Phi_{rm}$$

$$\frac{E_r}{f_s} = const$$



- a - 恒电压频率比控制    b - 恒磁通控制  
c - 恒转子全磁通控制



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒功率运行方式

### ■ 引用前述转矩公式

$$T = \frac{mn_p}{2\pi f_s} \frac{E_g^2 R_r}{\frac{R_r^2}{s} + sX_{lr}^2}$$

### ■ 基频以上时，转差率s很小， $X_{lr} \ll \frac{R_r}{s}$

### ■ $X_{lr}$ 与 $\frac{R_r}{s}$ 相比可忽略，转矩公式可以写为

$$T = \frac{mn_p}{2\pi R_r} \frac{E_g^2}{f_s^2} f_{sl}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒功率运行方式

- 因为高频时,  $E_g \approx U_s$  所以

$$T = \frac{mn_p}{2\pi R_r} \left( \frac{U_s}{f_s} \right)^2 f_{sl} \quad P = T\Omega = \frac{m}{R_r} \frac{U_s^2}{f_s} f_{sl}$$

- 为使电机恒功率运行, 等号的右边说明电压和频率的调节方式有两种

一)  $U_s$  不变,  $s = \frac{f_{sl}}{f_s} = \text{const}$  的调节方式

二)  $f_{sl}$  不变,  $\frac{U_s^2}{f_s} = \text{const}$  的调节方式

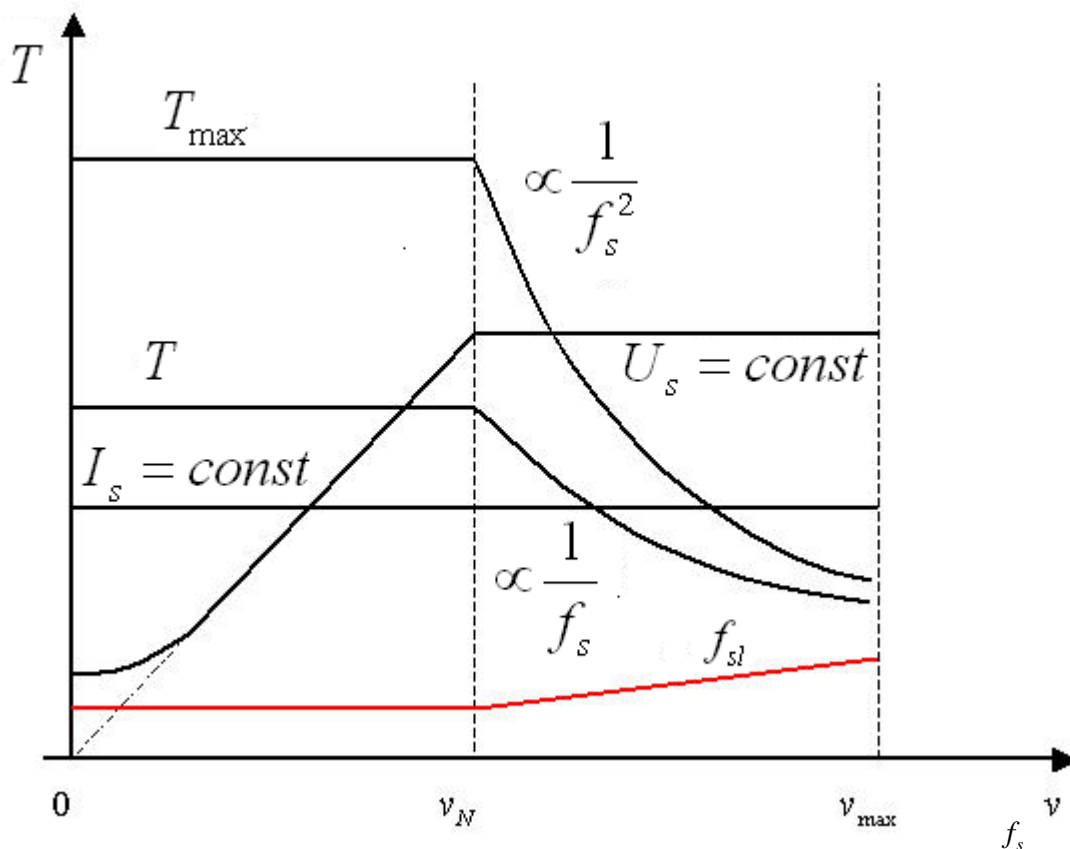




# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒功率运行方式

### ■ $U_s$ 不变, $s=\text{const}$ 的调节方式



$$T \propto \frac{1}{f_s}$$
$$T_{\max} \propto \frac{1}{f_s^2}$$
$$I_s = \text{const}$$
$$U_s = \text{const}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒功率运行方式

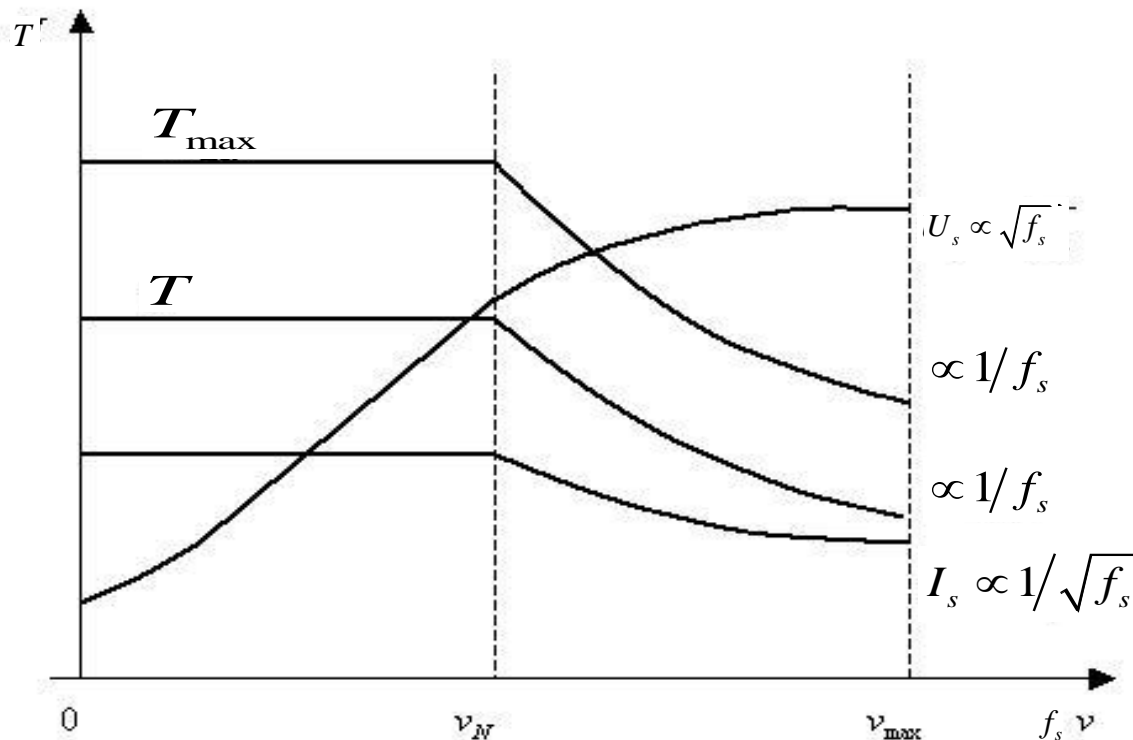
- 该恒功调节方式属于恒电压调节，为保证电动机在全部恒功调速范围内能稳定运行，系统工作点选取为在最高转速时，保证有最低的过载能力，于是在恒功范围的低速点内，电机过载能力就出现了不必要的裕度。电动机有较大的设计尺寸，但逆变器在恒压恒流下工作，称为最大电动机和最小逆变器方案。



# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 恒功率运行方式

- $f_{sl}$  不变,  $U_s^2/f_s = \text{const}$  的调节方式



$$T \propto \frac{1}{f_s}$$

$$T_{\max} \propto \frac{1}{f_s}$$

$$U_s \propto \sqrt{f_s}$$

$$I_s \propto \frac{1}{\sqrt{f_s}}$$



# 3 牵引电机变频调速方式

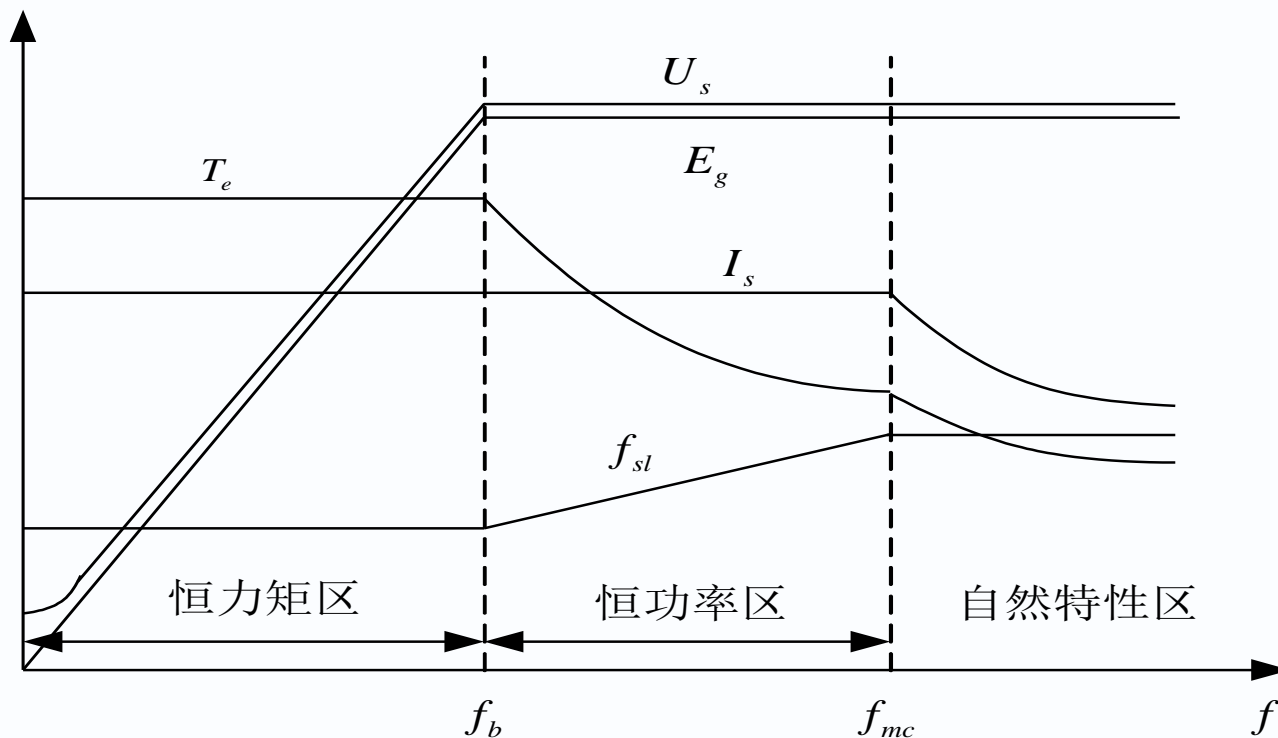
## □ 恒功率运行方式

- 这种恒功调节方式具有不变的过载系数，电机的设计工作点可以选择在恒功范围的最低转速时有最小允许的过载能力，这样在高速时仍然有适度的转矩裕量，使在整个恒功调速范围内稳定运行，并能充分地利用电机的功率，电机设计尺寸较小。
- 由调节特性图可知，逆变器在整个恒功范围内需要满足最高电压和最大电流的要求，因而有较大的设计容量和尺寸，该恒功运行方式称为最小电动机和最大逆变器方案。



# 3 牵引电机变频调速方式

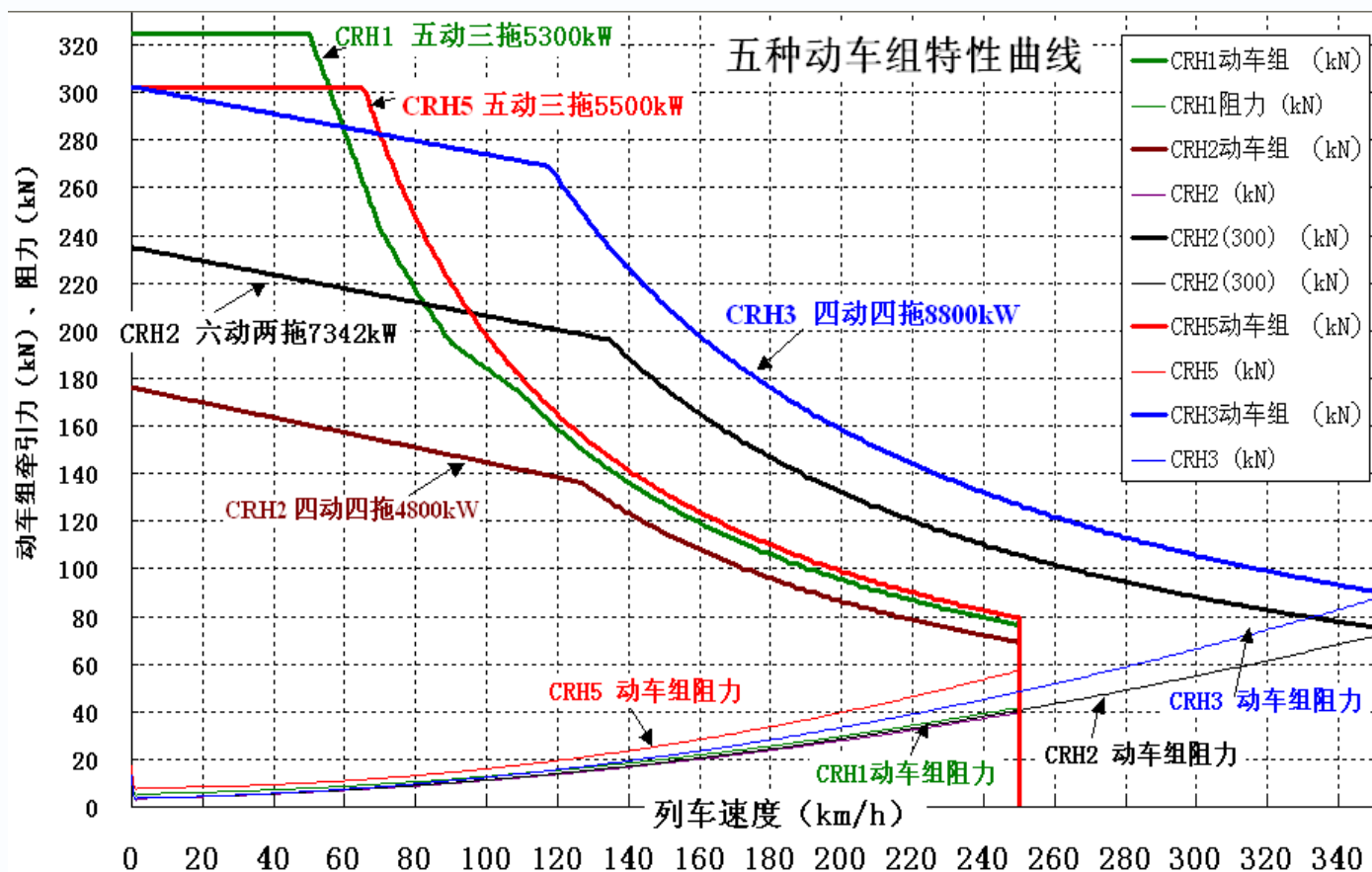
## □ 列车牵引中变频调速系统调节特性





# 3 牵引电机变频调速方式

## □ 列车牵引中变频调速系统调节特性





**本章结束！**