

# 异步电机和同步电机控制技术简介

乔雪松 q001242  
2020.7.8

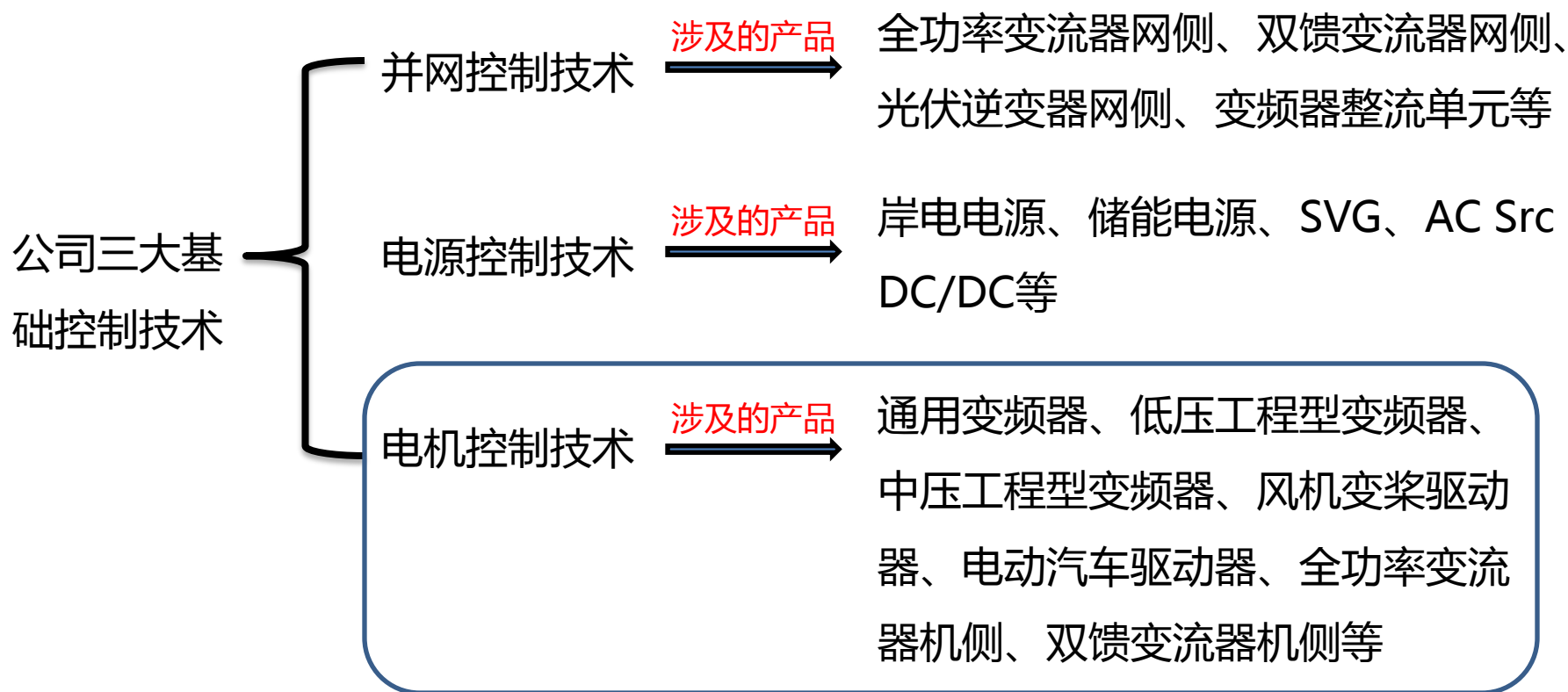
# 目录

# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 电机控制技术的应用范围



功率范围：几百W~几十MW

电压范围：220V~6600V

# 电机控制技术的应用范围

电机控制技术的应用领域：



电机控制

轨道交通、电梯、纺织、  
风机水泵、提升主吊  
工业机器人… …

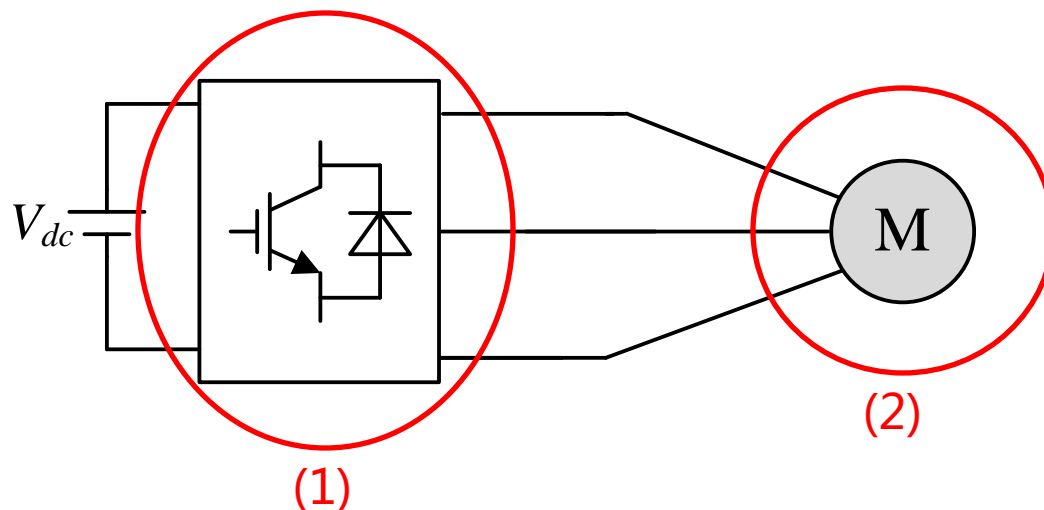
# 目录

# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 电机控制技术的主要内容



本文的电机控制技术指：

利用**半导体开关器件(逆变器)**实时、适式地**控制交流电机**  
**(异步/同步)的转速、力矩**的技术

电机控制的技术基础：

■ 熟悉**逆变器**的特性

■ 熟悉**电机**的特性



■ 电力电子学

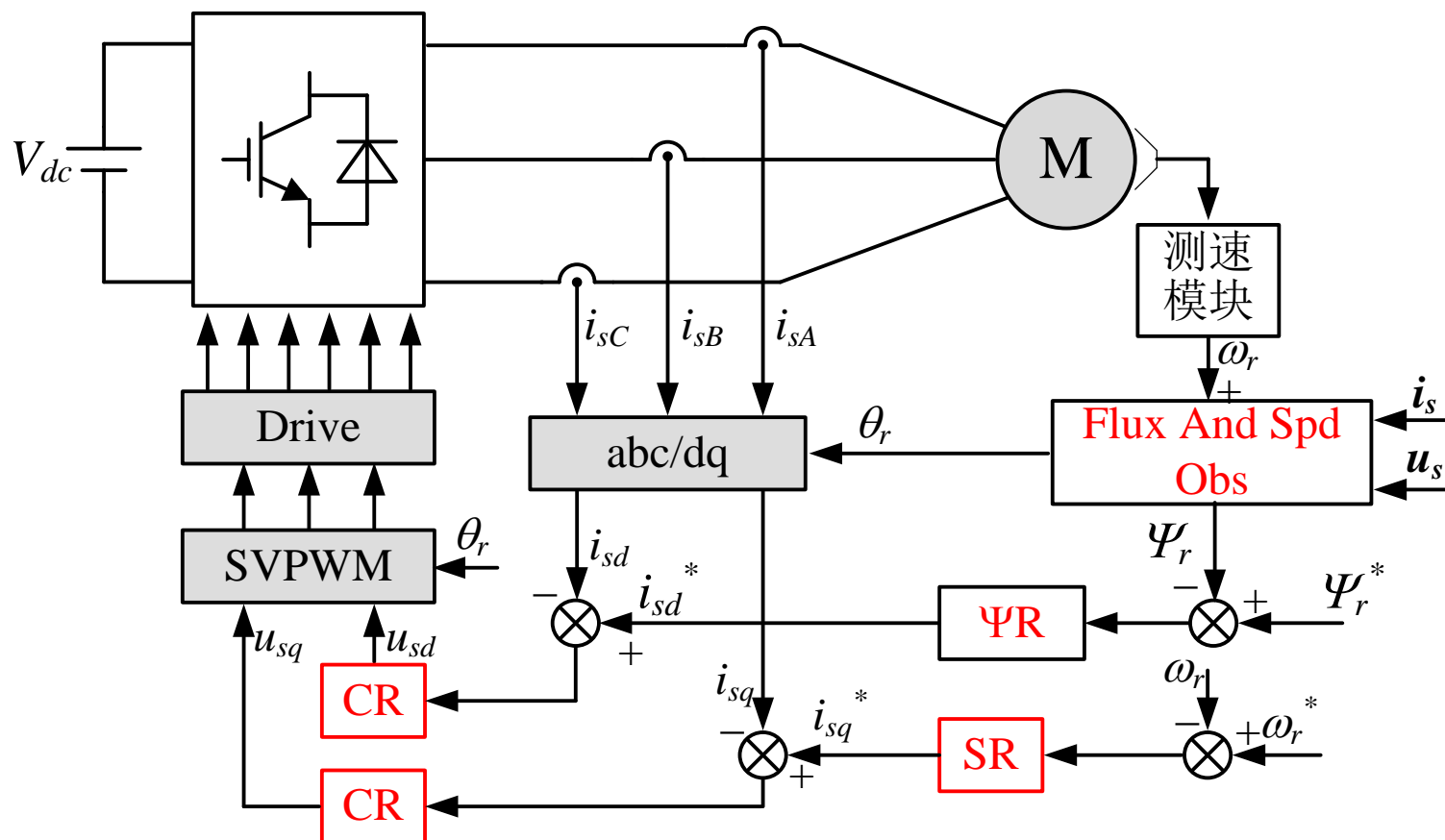
■ 电机学

■ 自动控制原理

■ .....

# 电机控制技术的主要内容

## 电机控制框图示例



# 电机控制技术的主要内容

电机控制技术的主要包括的方面：

- VF控制技术(异步机)

- VC控制技术(有码盘/无码盘)

- 电机参数辨识技术(静止、旋转、在线)

- 磁链幅值/角度及转速观测器技术

- 电流环、转速环、磁链环的设计

- 弱磁控制技术

- 转速跟踪技术

- 切换技术(有码盘/无码盘/OpenLoop的切换、转速跟踪向VC的切换等)

- 无码盘**低速性能优化**技术

- 低载波比控制、同步调制、过调制(方波控制)技术

- 码盘适应性及码盘冗余运行技术

- .....



# 电机控制技术的主要内容

电机控制的重要特性：

T/ω特性：转矩(Torque)和转速能够按照设定的目标响应

$$T_{em\_pu} = \Psi_{r\_pu} i_{sT\_pu} \quad T_{em\_pu} = T_{L\_pu} + J_{pu} \frac{d\omega_{pu}}{dt}$$

技术点



- 如何进行电流环、磁链环、转速环的设计？
- 如何适配不同功率等级、频率范围的电机？
- 如何实现磁链和力矩的解耦控制？
- 如何观测/获取电机的角度/转速？
- .....

# 电机控制技术的主要内容

电机控制技术研究、设计方法：

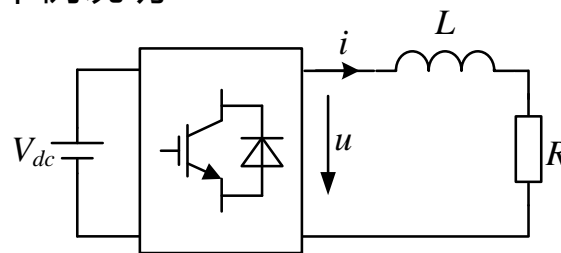
## ■ 数学模型

- 基本模型一般直接从专业书上获得
- 数学模型参数的获取(电机参数的获取)
- 数学模型的分析(模型参数变化的影响)
- .....

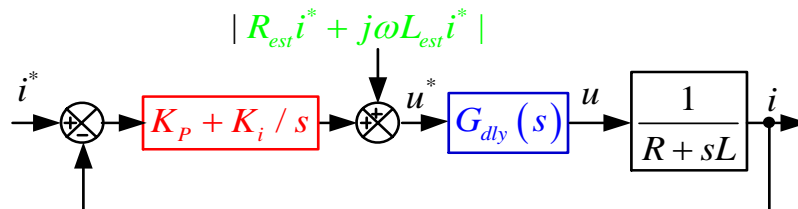
## ■ 根据模型进行控制方法、控制参数的设计

- 控制对象、执行机构的理解
- 控制器参数的基本设计方法(截止频率、相位裕度)
- 数字控制的实现方式及影响分析
- .....

举例说明：



$$u = Ri + j\omega Li$$



# 目录

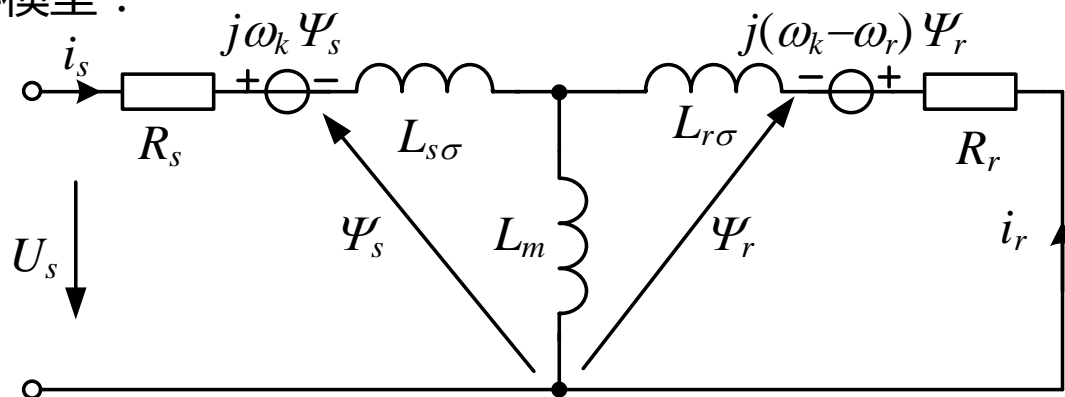
# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 异步电机控制简介

异步电机的数学模型：



电压方程：
$$u_s - i_s R_s = \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s$$

磁链方程：
$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r$$

$$0 - i_r R_r = \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \Psi_r$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_m i_s$$

$\omega_k=0$ ，静止坐标系

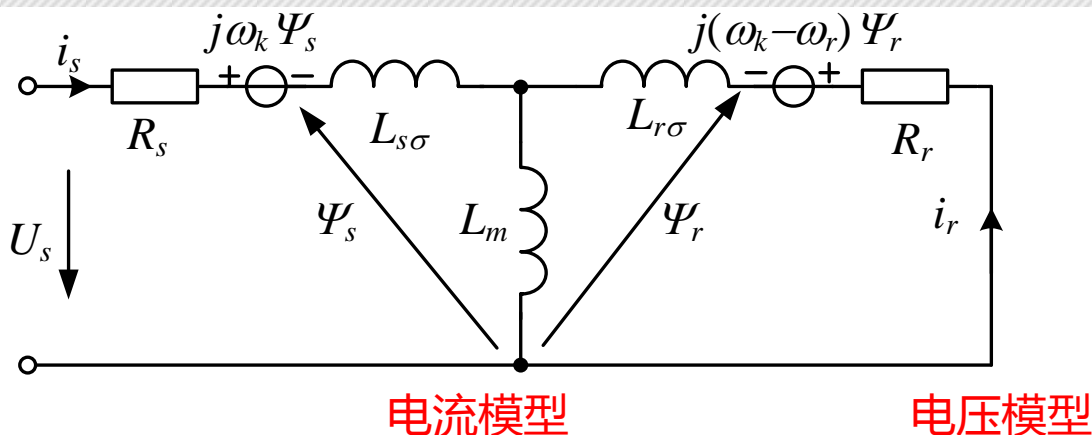
$\omega_k=\omega_s$ ，同步旋转坐标系

转矩及运动方程：

$$T_{em} = \frac{3}{2} n_p (i_{sq} \Psi_{sd} - i_{sd} \Psi_{sq}) = T_L + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt}$$

# 异步电机控制简介

异步电机的数学模型：



令： $\omega_k = \omega_s$ ,  $\Psi_r = \Psi_{rd}$

$$u_s = u_{sd} + j u_{sq}, i_s = i_{sd} + j i_{sq}$$

$$\Psi_s = \Psi_{sd} + j \Psi_{sq}, i_r = i_{rd} + j i_{rq}$$



$$\Psi_{rd} = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} i_{sd}$$

$$\Psi_{rq} = \frac{L_r}{L_m} \left( \frac{u_{sq} - R_s i_{sq}}{s} - \sigma L_s i_{sd} \right)$$

$$T_{em} = n_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} i_{sq} \Psi_{rd}$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\tau_r} \frac{i_{sq}}{\Psi_{rd}} \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

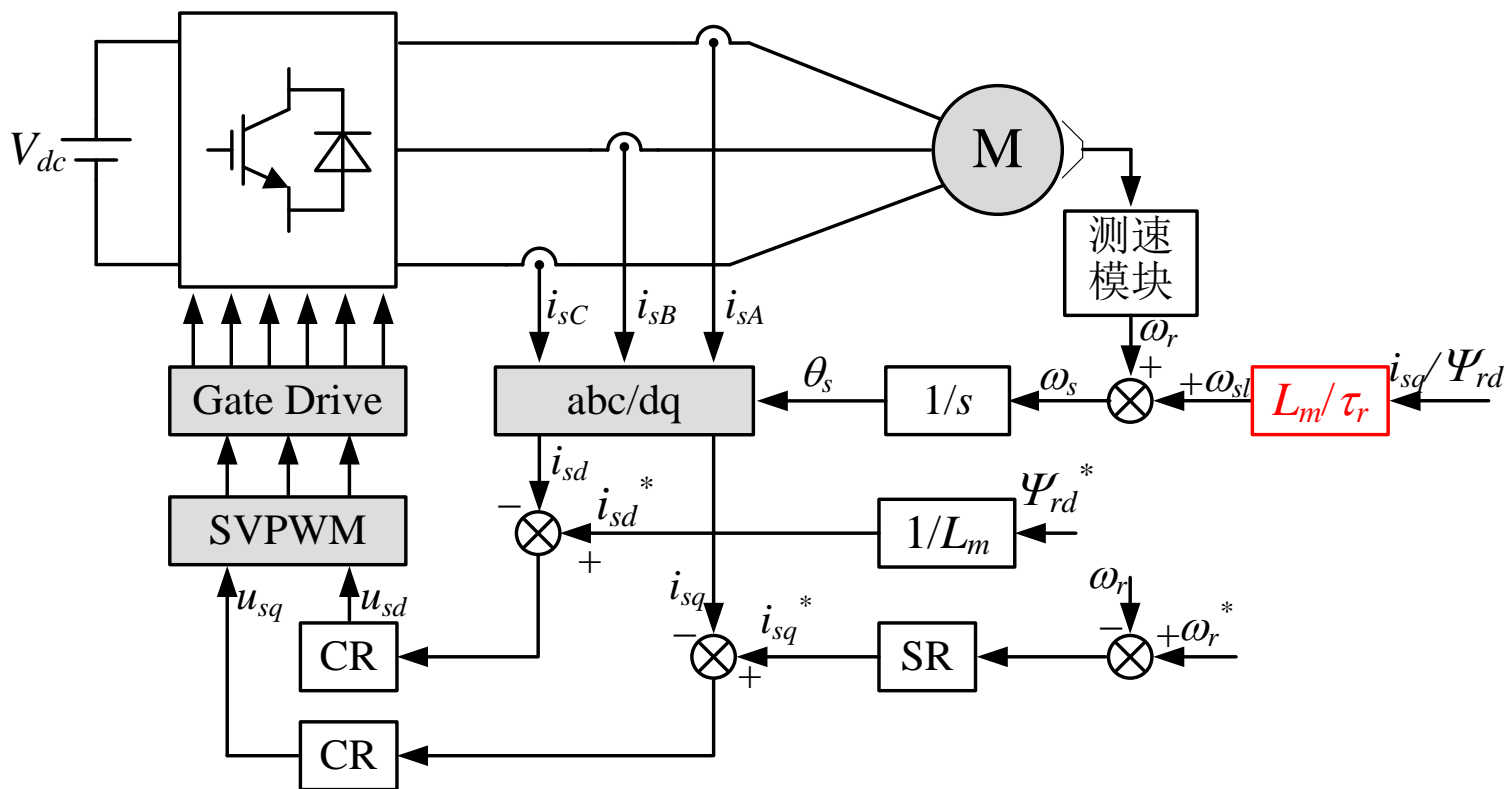
$$\theta_s = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} s \Psi_{rd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s s i_{sq} + \omega_s \left( \frac{L_m}{L_r} \Psi_{rd} + \sigma L_s i_{sd} \right)$$

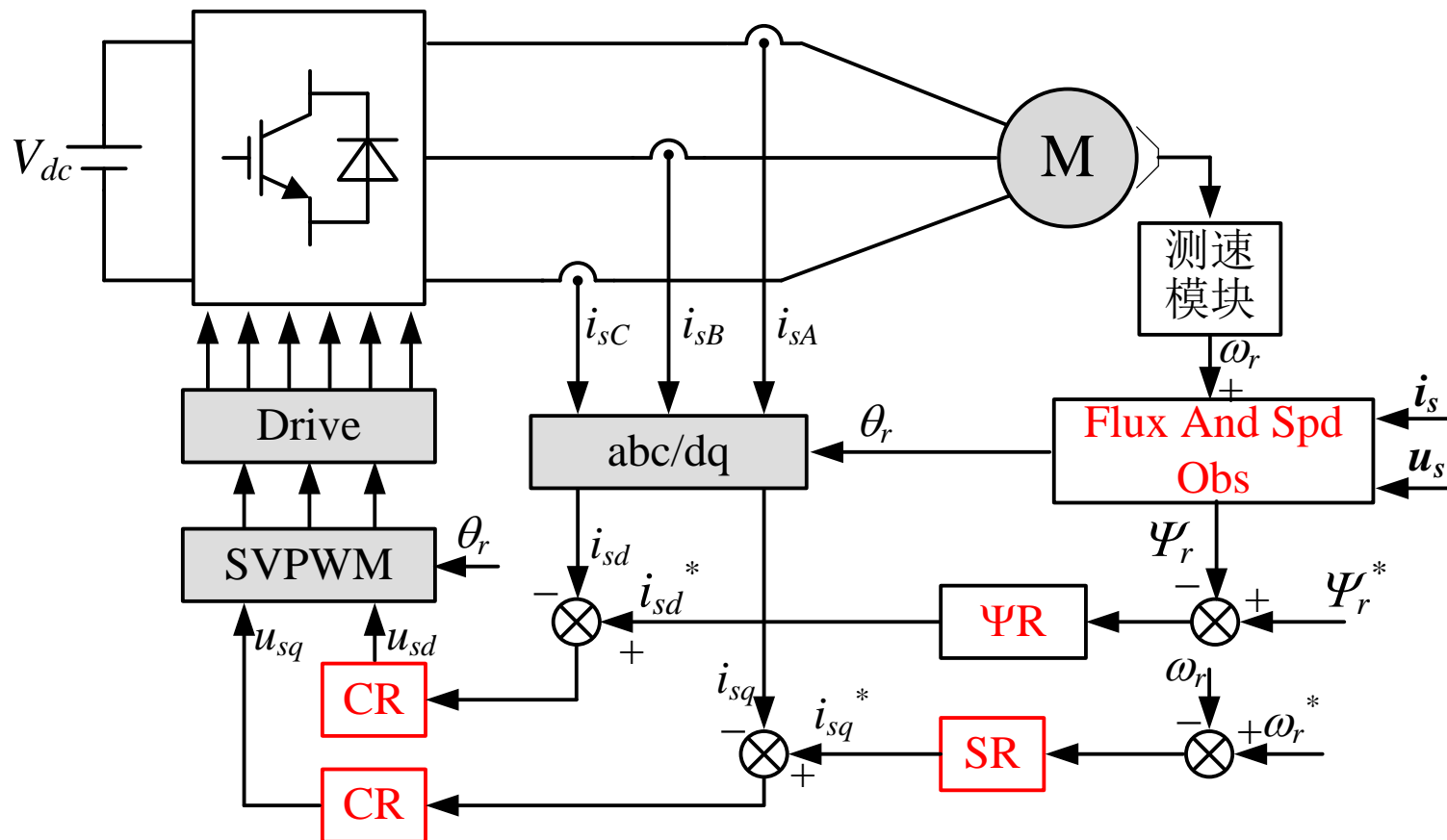
## 异步电机控制简介

异步电机的有码盘矢量控制(CLVC, Close Loop Vector Control)简图：



# 异步电机控制简介

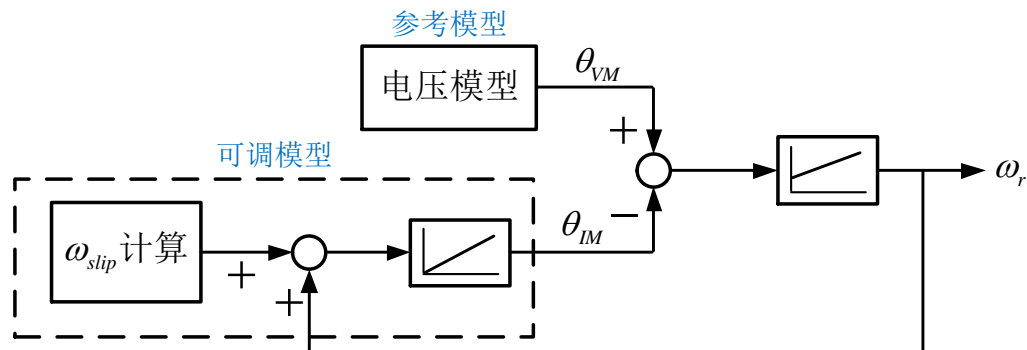
## 电机控制框图示例



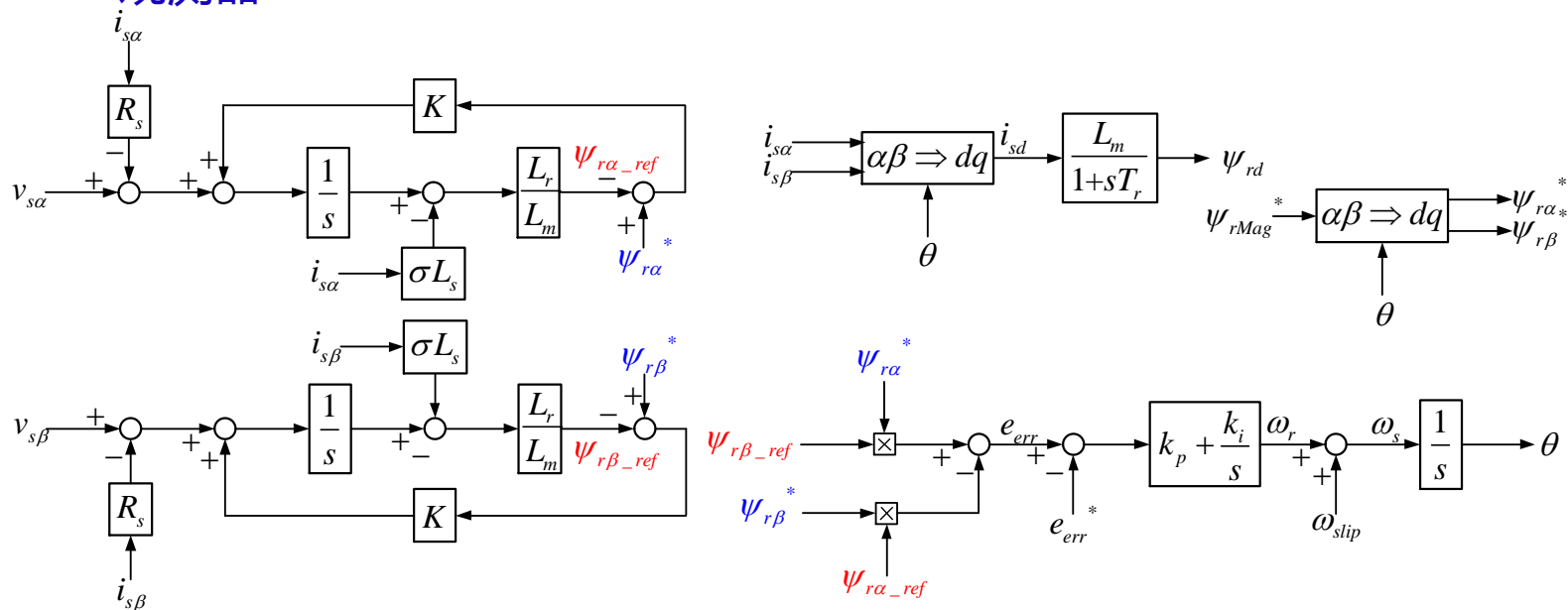
# 异步电机控制简介

## 观测器

### MRAS原理：



### MRAS观测器：

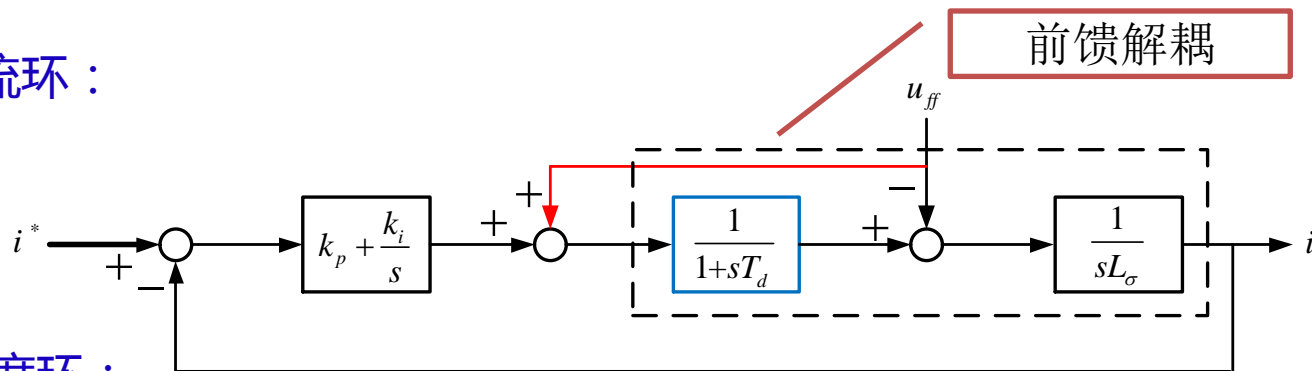




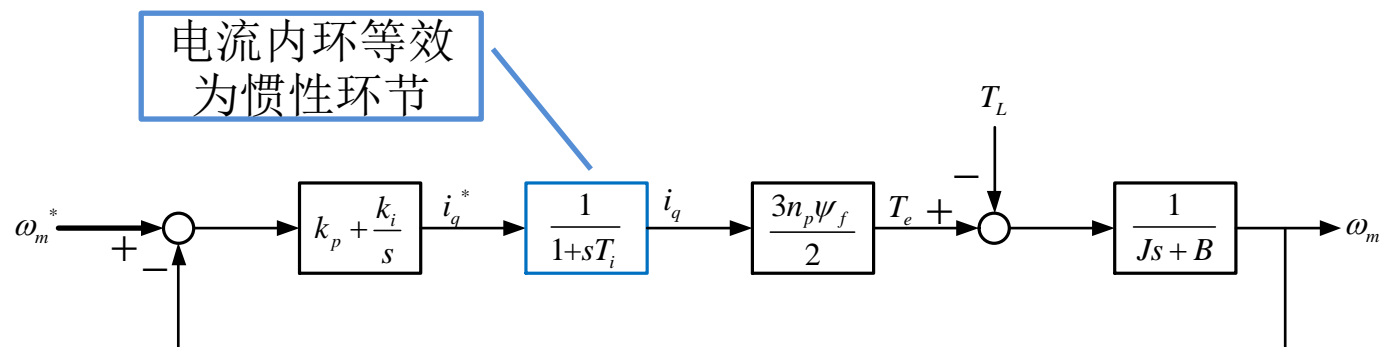
# 异步电机控制简介

## 电流环与速度环设计

电流环：



速度环：



速度环与电流环性能系数：

26:频率给定限制  
27:频率给定选择  
28:频率给定方式

W	S - 57.20	速度环自动响应系数	30	0	100	0
W	S - 57.40	电流环自动响应系数	30	0	100	0

# 目录

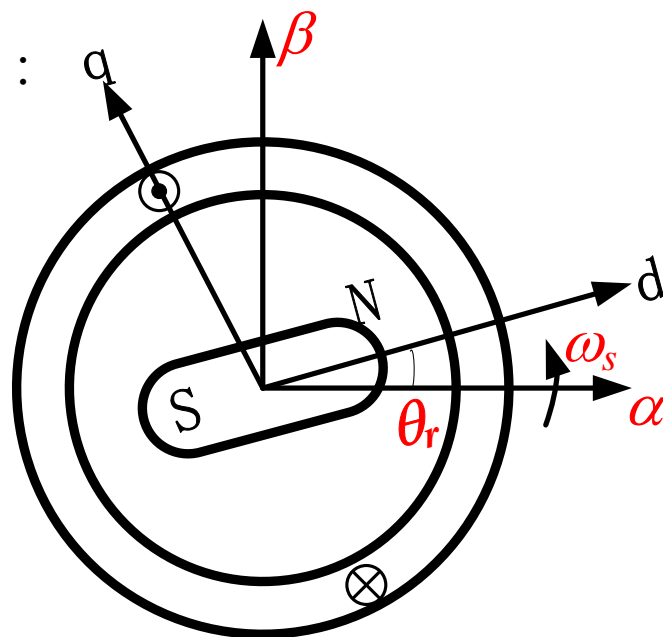
# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 永磁同步电机控制简介

永磁同步电机的数学模型：



电压方程：  $u_{sd} = R_s i_{sd} + s L_d i_{sd} - \omega_s L_q i_{sq}$       磁链方程：  $\Psi_{sd} = L_d i_{sd} + \Psi_M$

$u_{sq} = R_s i_{sq} + s L_q i_{sq} + \omega_s L_d i_{sd} + \omega_s \Psi_M$        $\Psi_{sq} = L_q i_{sq}$

转矩及运动方程：

同步旋转坐标系       $\theta_r = \int \omega_s dt$

$$T_{em} = \frac{3}{2} n_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd})$$

$$= \frac{3}{2} n_p (\Psi_M i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) = T_L + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_s}{dt}$$

# 永磁同步电机控制简介

永磁同步电机需解决的问题：

- 1、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 如何获取？ →  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $\theta_r$ 坐标变换获得
- 2、 $\omega_s$ 、 $\theta_r$ 如何获取？ → 有码盘控制(CLVC)：码盘直接测得  
无码盘控制(OLVC)：观测器观测获得
- 3、 $R_s$ 、 $L_d$ 、 $L_q$ 、 $\Psi_M$ 如何获取？ → 电机参数辨识(静止、旋转、在线)
- 4、电流环的控制对象？ →  $1/(sL_d)$ 、 $1/(sL_q)$
- 5、转速环的控制对象？ →  $n_p/(Js)$
- 6、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 如何分配？ →  $i_{sd}=0$ 控制或MTPA(Max Torque Per Amp)控制
- 7、电压限制后如何控制？ → 通过控 $i_{sd}$ 弱磁控制

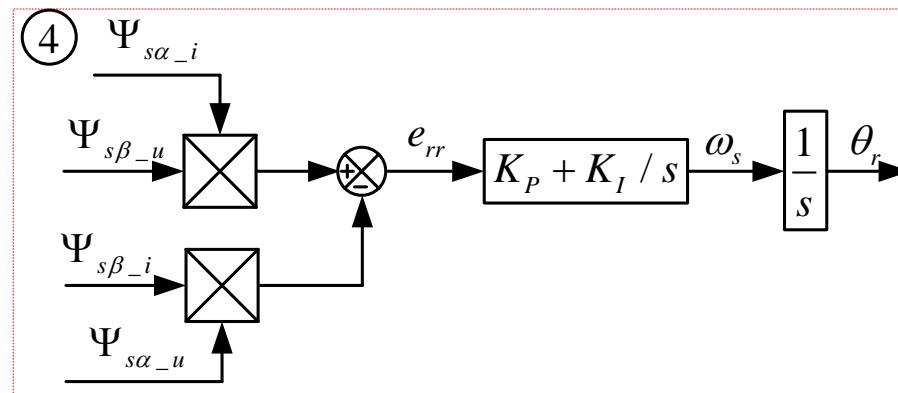
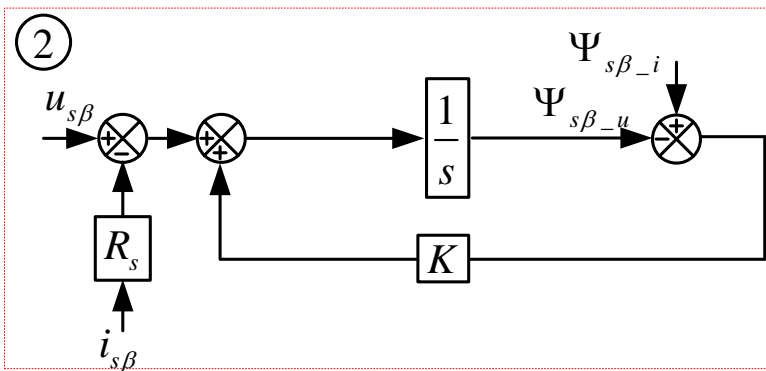
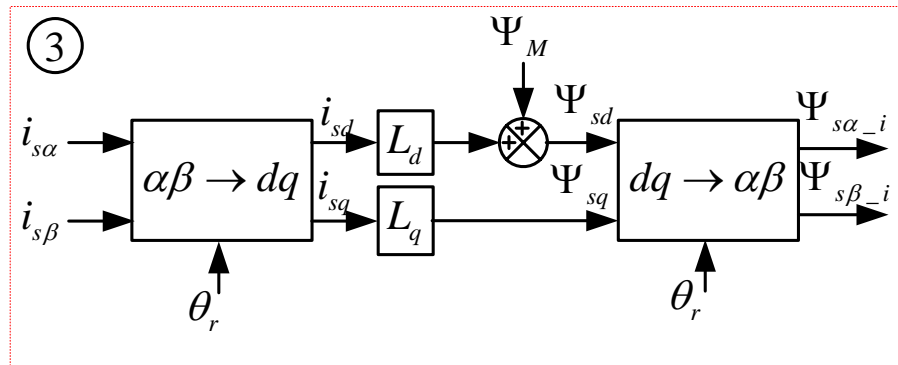
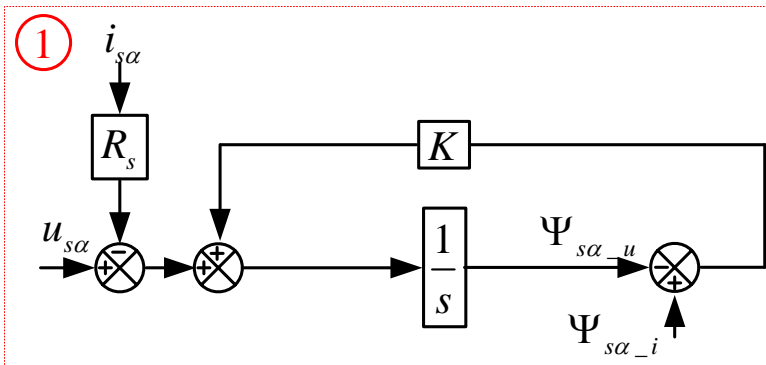
# 永磁同步电机控制简介

永磁同步电机相关的控制技术：

- 电机参数辨识技术( $R_s$ 、 $L_d$ 、 $L_q$ 、 $\Psi_M$ 、 $\theta_{\text{roffset}}$ 、 $L_q$ 曲线)
- 基波模型观测转子位置技术
- 高频注入法观测转子位置技术
- 初始位置辨识技术
- 弱磁控制技术、方波控制技术
- MTPA控制技术
- 电流控制、转速控制(电流环、转速环设计)
- .....

# 永磁同步电机控制简介

基波模型法确定转子位置框图：



由 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 积分得到 $\Psi_{s\alpha\_u}$ 、 $\Psi_{s\beta\_u}$ ， $\Psi_{sd}$ 、 $\Psi_{sq}$ 和 $\theta_r$ 得到 $\Psi_{s\alpha\_i}$ 、 $\Psi_{s\beta\_i}$ ，通过PI闭环控制使

$$\Psi_{s\alpha\_i} \Psi_{s\beta\_u} - \Psi_{s\beta\_i} \Psi_{s\alpha\_u} = 0, \text{ 得到 } \theta_r, \omega_s$$

# 目录

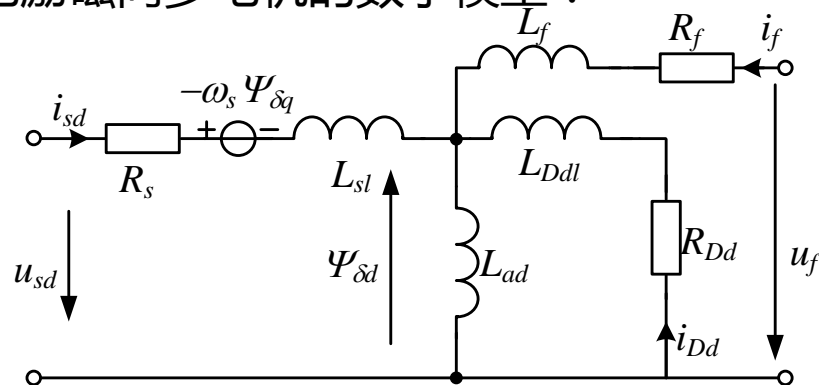
# CONTENTS



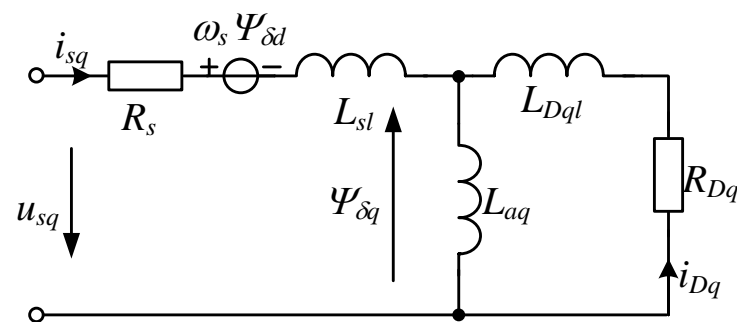
- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 电励磁同步电机控制简介

电励磁同步电机的数学模型：



(a) d轴



(b) q轴

电压方程：
$$u_{sd} = R_s i_{sd} + sL_{sl} i_{sd} + s\Psi_{\delta d} - \omega_s \Psi_{\delta q}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + sL_{sl} i_{sq} + s\Psi_{\delta q} + \omega_s \Psi_{\delta d}$$

磁链方程：
$$\Psi_{\delta d} = \frac{L_{ad}(i_{sd} + i_f)}{1 + sT_d}$$

$$\Psi_{\delta q} = \frac{L_{aq} i_{sq}}{1 + sT_q}$$

$$\Psi_s = \Psi_{\delta} + L_{sl} \mathbf{i}_s \quad \Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}$$

$$\Psi_s = \int (\mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt \quad \cos \theta_L = \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}}, \sin \theta_L = \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}}$$

$$i_{sq} = i_{sM} \sin \theta_L + i_{sT} \cos \theta_L$$

$$i_{sd} = i_{sM} \cos \theta_L - i_{sT} \sin \theta_L$$

转矩及运动方程：

$$T_e = \Psi_{\delta} i_{sT}$$

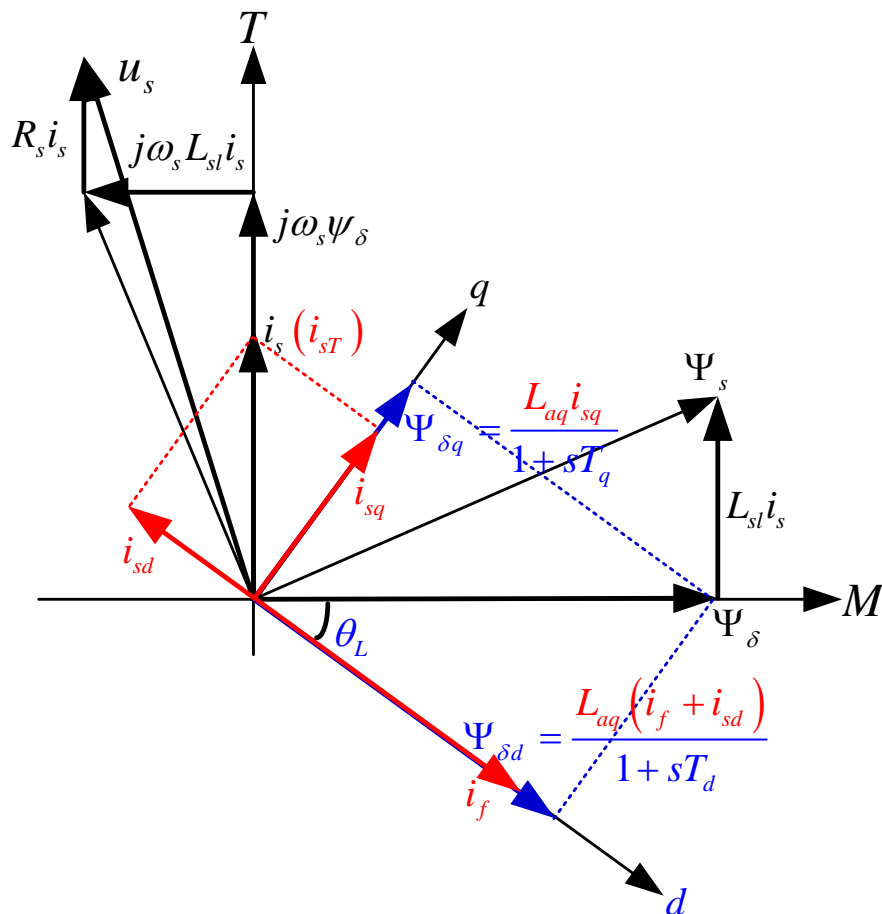
$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_s}{dt}$$

$$T_e = \Psi_f i_{sq} + (L_{ad} - L_{aq}) i_{sd} i_{sq}$$



# 电励磁同步电机控制简介

电励磁同步电机的矢量关系图( $i_{sM}=0$ ) :



- 力矩电流  $i_{sT}$  和气隙磁链  $\Psi_{\delta}$  解耦
- 功率因数接近1，且可通过  $I_{sM}$  控制

磁链方程：

$$\Psi_{\delta d} = \frac{L_{ad}(i_{sd} + i_f)}{1 + sT_d}$$

$$\Psi_{\delta q} = \frac{L_{aq} i_{sq}}{1 + sT_q}$$

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}$$

$$\cos \theta_L = \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}}, \sin \theta_L = \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}}$$

$$i_{sq} = i_{sM} \sin \theta_L + i_{sT} \cos \theta_L$$

$$i_{sd} = i_{sM} \cos \theta_L - i_{sT} \sin \theta_L$$

$$\Psi_s = \Psi_{\delta} + L_{sl} i_s$$

$$\Psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt$$

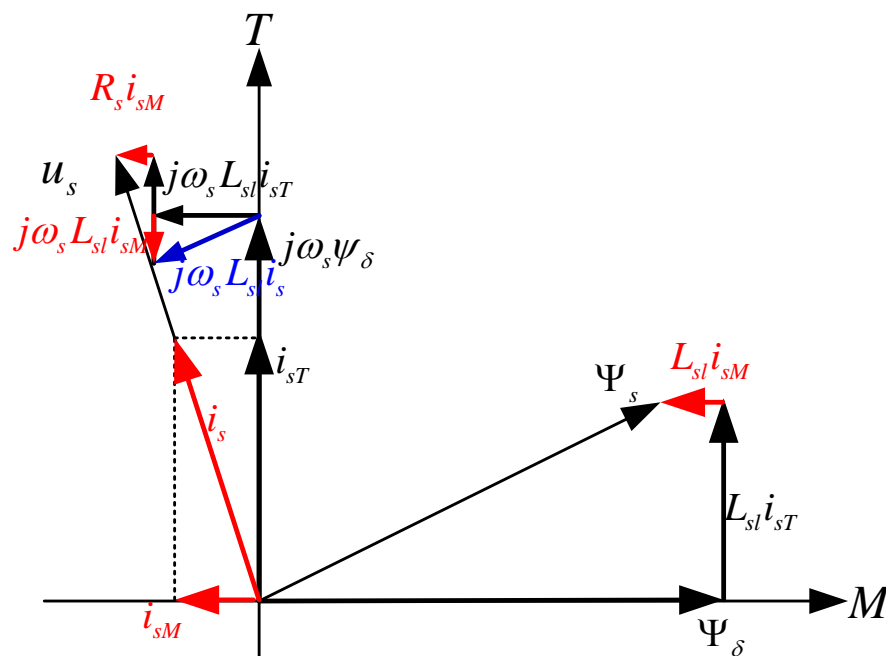
转矩方程：

$$T_e = \Psi_{\delta} i_{sT}$$

$$T_e = \Psi_f i_{sq} + (L_{ad} - L_{aq}) i_{sd} i_{sq}$$

# 电励磁同步电机控制简介

电励磁同步电机的矢量关系图( $\cos \phi=1$ ) :



$$i_{sM} \approx -\left(\frac{L_{sl} |i_{sT}|}{\Psi_{\delta}} + \tan \varphi\right) \cdot |i_{sT}|$$

磁链方程：

$$\Psi_{\delta d} = \frac{L_{ad}(i_{sd} + i_f)}{1 + sT_d}$$

$$\Psi_{\delta q} = \frac{L_{aq}i_{sq}}{1 + sT_q}$$

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}$$

$$\cos \theta_L = \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}}, \sin \theta_L = \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}}$$

$$i_{sq} = i_{sM} \sin \theta_L + i_{sT} \cos \theta_L$$

$$i_{sd} = i_{sM} \cos \theta_L - i_{sT} \sin \theta_L$$

$$\Psi_s = \Psi_{\delta} + L_{sl}i_s$$

$$\Psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt$$

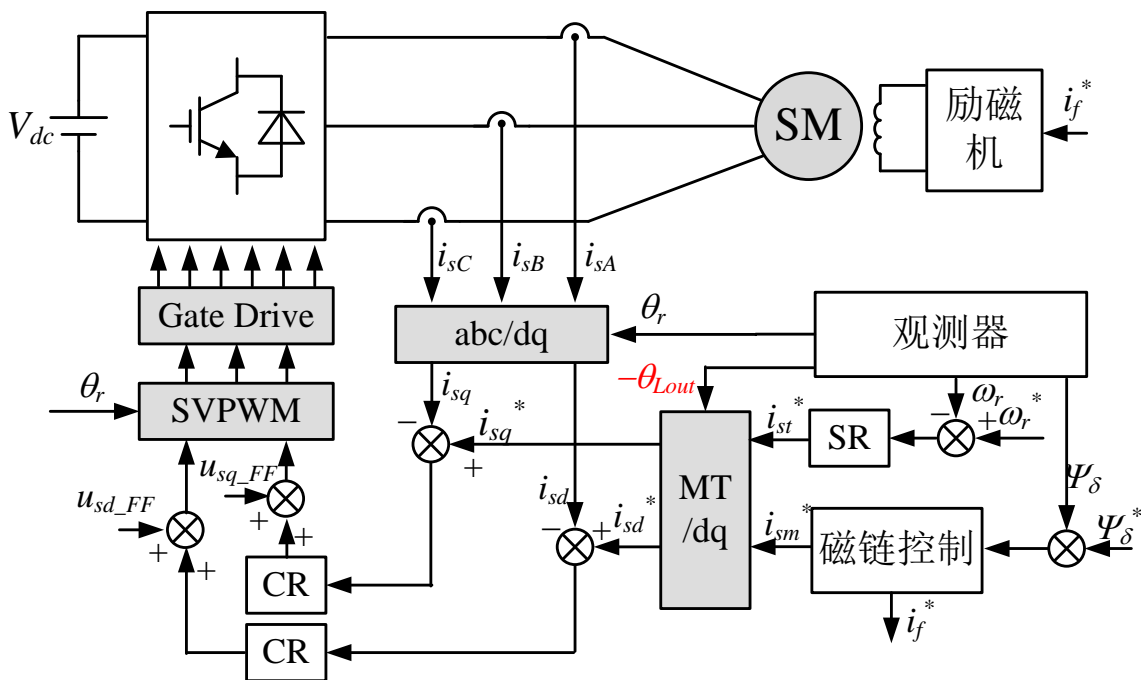
转矩方程：

$$T_e = \Psi_{\delta} i_{sT}$$

$$T_e = \Psi_f i_{sq} + (L_{ad} - L_{aq}) i_{sd} i_{sq}$$

# 电励磁同步电机控制简介

电励磁同步电机的控制框图简图：



相比与永磁同步电机，电励磁同步电机控制的新增/不同点：

- 功率因数控制
- 励磁电流 $i_f$ 控制
- 磁链控制、弱磁控制
- MT轴给定控制
- 初始位置辨识
- .....

# 目录

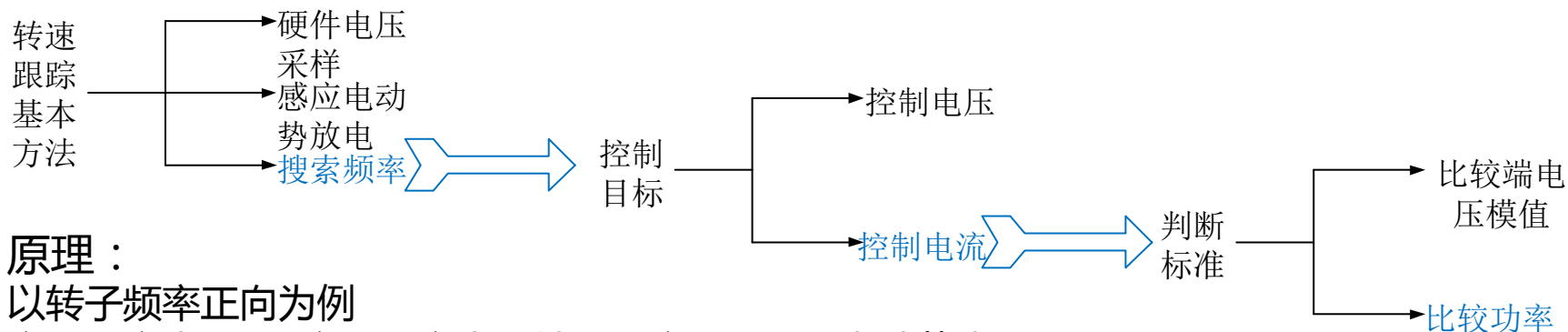
# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

# 异步转速跟踪功能设计

## 文献及专利调研：



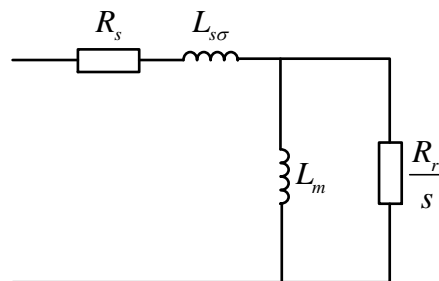
## 原理：

以转子频率正向为例

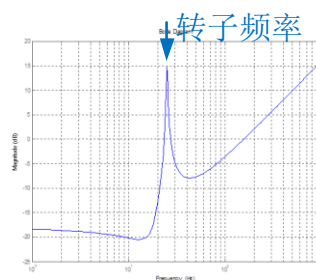
定子频率大于0，定子频率大于转子频率， $S > 0$ ，电动状态；

定子频率大于0，定子频率小于转子频率， $S < 0$ ，发电状态；

定子频率小于0， $S > 0$ ，电动状态；



(a).异步机等效电路



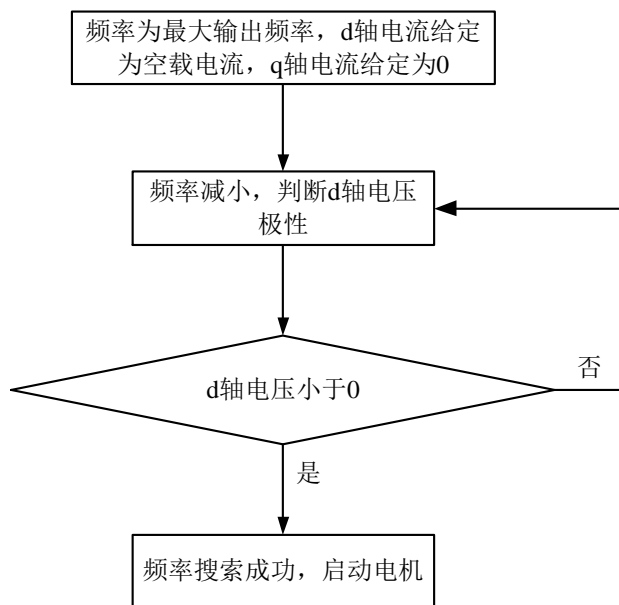
(b).阻抗特性



# 异步转速跟踪功能设计

功能逻辑：

有功功率公式： $P = u_d i_d + u_q i_q$



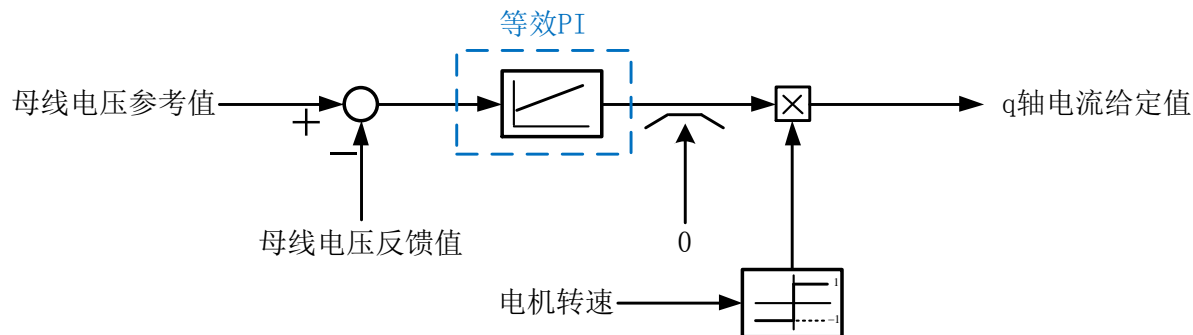
存在问题

- 前端不控整流时转速跟踪过压；
- 转矩控制时转速跟踪方向；
- 电机未完全去磁时，过流或误判断；
- 转速跟踪如何切换至VF控制

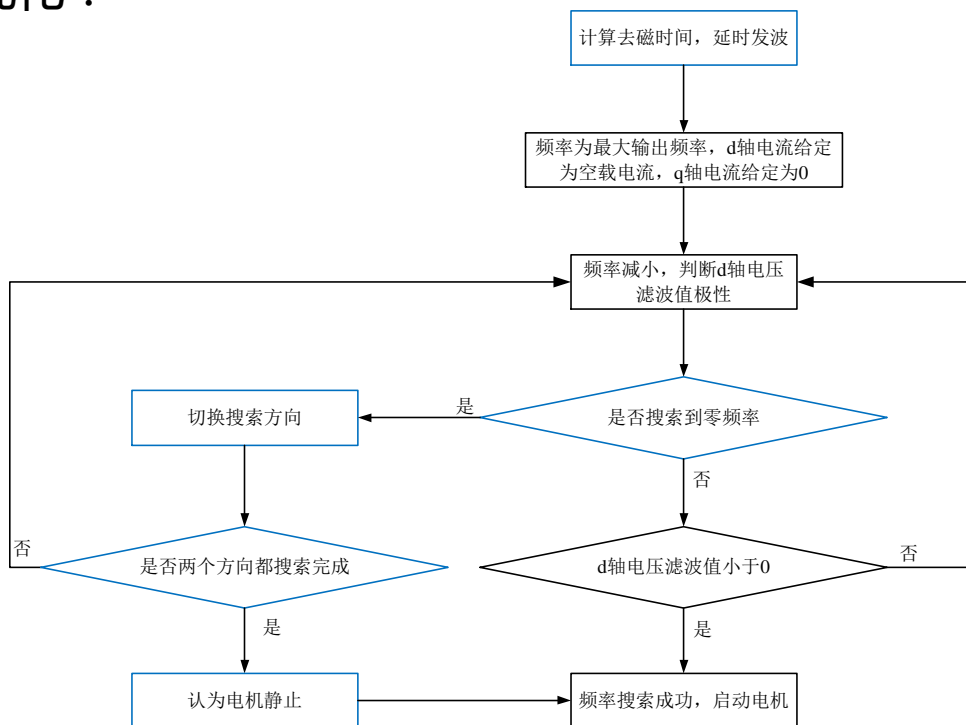
.....

# 异步转速跟踪功能设计

防过压处理：



功能逻辑优化：



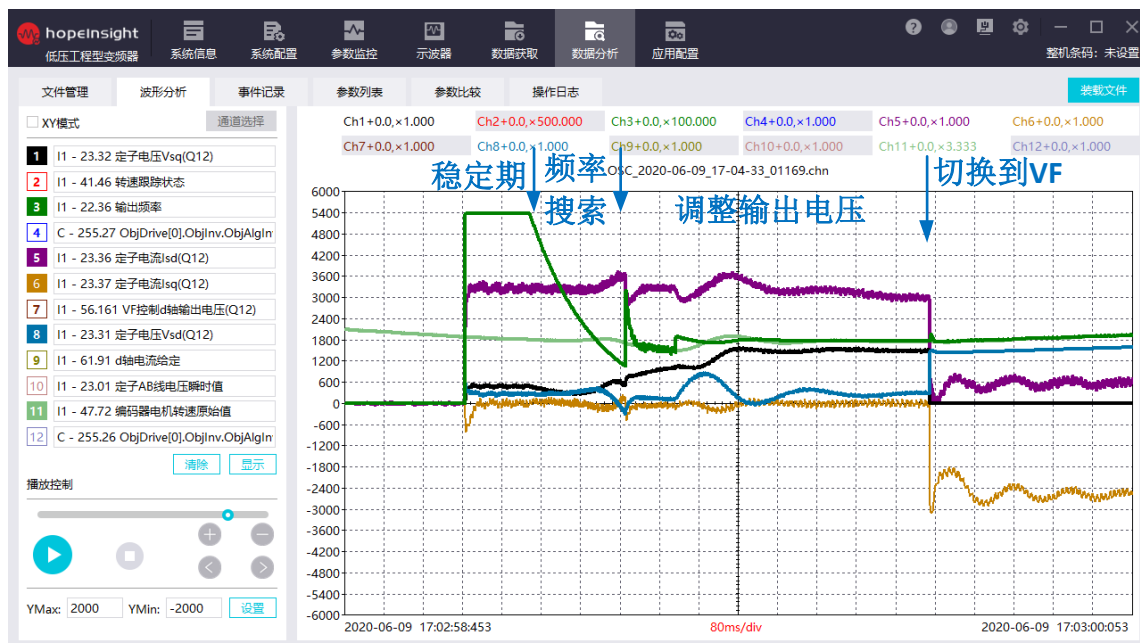
# 异步转速跟踪功能设计

其他细节：

转速跟踪切换至VF时，如何平滑切换

... ..

实验波形：





# 目录

# CONTENTS



- 1 电机控制技术的应用范围
- 2 电机控制技术的主要内容
- 3 异步电机控制简介
- 4 永磁同步电机控制简介
- 5 电励磁同步电机控制简介
- 6 实际算法设计，以异步机转速跟踪为例
- 7 总结

- 1、电机控制技术为**公司产品的基础技术**，应用范围广泛；
- 2、介绍了电机控制技术**的主要内容、特点及研究分析的方法**；
- 3、介绍了异步电机的**数学模型及利用数学模型进行控制的原理、方法**；
- 4、介绍了永磁同步电机和电励磁同步电机的**数学模型及利用数学模型进行控制的原理、方法**；
- 5、以**转速跟踪功能**为例，介绍了实际的功能设计过程。

A close-up photograph of two hands shaking in a firm grip. The hands are wearing white dress shirts and dark brown suit jackets. The background is a blurred blue sky with white clouds. The text "谢谢" and "THANK YOU" is overlaid in the center of the image.

谢谢  
THANK YOU

——● 风禾尽起 志望千里 HOPE WITH THE WIND ●——