

驱动与控制基础

2010 / 01 版



Motion Control

Application

前 言

针对运动控制与伺服驱动器的基础应用，西门子（中国）运动控制应用中心编写了全套共 3 本手册。分别为：

- **应用基础手册 1 —— 驱动与控制基础**
- 应用基础手册 2 —— SINAMICS S120 驱动器基础应用
- 应用基础手册 3 —— SIMOTION 运动控制器基础应用

该手册为全套手册的第一部分，介绍了运动控制、伺服系统、电机、编码器、变频器、通用控制理论等基础知识。

本系列手册仅适用于西门子内部工程师交流学习及相关客户培训之用。由于编者水平有限，手册中难免出现纰漏之处，恳请广大同事能够不吝赐教。

SLC I DT MC APC
Solution Team
2010-01

目 录

1	运动控制系统	1
1.1	运动控制系统概念	1
1.2	运动控制及其相关技术领域	1
1.3	运动控制系统及其组成	4
1.4	运动控制系统的转矩控制规律	5
1.5	静态性能指标	6
1.6	动态性能指标	8
1.7	PID 控制器	10
2	伺服系统	11
2.1	什么是伺服系统	11
2.2	伺服系统的类型	13
2.3	伺服系统的性能分析及调整	13
2.4	伺服系统与变频器的区别	15
3	系统的控制对象——电机	17
3.1	电机原理的基本定律	17
3.2	异步电机原理	20
3.3	同步电机原理	23
3.4	西门子同步伺服电机	27
3.4.1	1FK7 电机	27
3.4.2	1FT6 电机	30
3.4.3	1FT7 电机	33
3.4.4	1FW3 水冷扭矩电机	36
3.5	西门子异步伺服电机	39
3.5.1	1PH7 电机	39
3.5.2	1PL6 电机	42
3.5.3	1PH4 电机	43
4	系统的“眼睛”——编码器	44
4.1	编码器概述	44
4.2	旋转变压器	45
4.3	增量式编码器	46
4.4	绝对式编码器	50

5	系统的执行器——变频器	52
5.1	变频器概述	52
5.2	开关器件	57
5.3	交-直-交变换器	63
5.4	变频器的主要外围部件	64
5.5	变频器的散热问题	66
6	变频器的通用控制理论	68
6.1	传动系统的负载特性	68
6.2	V/F 控制原理分析	70
6.3	矢量控制原理	72
6.4	伺服控制原理	78
7	西门子 SINAMICS S120 高性能伺服驱动系统	79
7.1	SINAMICS S120 驱动器概述	79
7.2	SINAMICS S120 DC/AC 多轴驱动器	82
7.2.1	电源模块——基本型电源模块 BLM	84
7.2.2	电源模块——智能型电源模块 SLM	85
7.2.3	电源模块——主动性电源模块 ALM	87
7.2.4	电机模块——书本型	88
7.2.5	控制单元 CU320	90
7.2.6	编码器接口模块	91
7.2.7	系统附件	92
7.3	SINAMICS S120 AC/AC 单轴驱动器	93
7.3.1	模块型功率模块 PM340	93
7.3.2	控制单元 CU310	95
7.3.3	控制单元适配器 CUA31/CUA32	96
	附录	98

1 运动控制系统

1.1 运动控制系统概念

运动控制系统（Motion Control Systems）——通过对电动机电压、电流、频率等输入电量的控制，来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量，使各种工作机械按人们期望的要求运行，以满足生产工艺及其他应用的需要。工业生产和科学技术的发展对运动控制系统提出了日益复杂的要求，同时也为研制和生产各类新型的控制装置提供了可能。

1.2 运动控制及其相关技术领域

现代运动控制已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多门技术领域相互交叉的综合性控制系统领域。



图 1.1 运动控制相关技术领域

1. 电机学 —— 电动机是运动控制系统的控制对象

电动机的结构和原理决定了运动控制系统的设计方法和运行性能，新型电机的发明就会带出新的运动控制系统。

2. 电力电子技术 —— 以电力电子器件为基础的功率放大与变换装置是弱电控制强电的媒介，是运动控制系统的执行手段。

在运动控制系统中作为电动机的可控电源，其输出电源质量直接影响运动控制系统的运行状态和性能。新型电力电子器件的诞生必将产生新型的功率放大与变换装置，对改善电动机供电电源质量，提高系统运行性能，起到积极的推进作用。

3. 微电子技术 —— 控制基础

微电子技术的快速发展，各种高性能的大规模或超大规模的集成电路层出不穷，方便和简化了运动控制系统的硬件电路设计及调试工作，提高了运动控制系统的可靠性。高速、大内存容量、多功能的微处理器或单片机的问世，使各种复杂的控制算法在运动控制系统中的应用成为可能，并大大提高了控制精度。

4. 计算机控制技术 —— 系统控制核心

(1) 计算机控制

(2) 计算机仿真

(3) 计算机辅助设计

计算机具有强大的逻辑判断、数据计算和处理、信息传输等能力，能进行各种复杂的运算，可以实现不同于一般线性调节的控制规律，达到模拟控制系统难以实现的控制功能和效果。计算机控制技术的应用使对象参数辨识、控制系统的参数自整定和自学习、智能控制、故障诊断等成为可能，大大提高了运动控制系统的智能化和系统的可靠性。

在工程实际中，对于一些难以求得精确解析解的问题，可以通过计算机求得数值解，这就是计算机数字仿真。计算机数字仿真具有成本低，结构灵活，结果直观，便于贮存和进行数据分析等优点。计算机辅助设计(CAD)是在

数字仿真的基础上发展起来的，在系统数学模型基础上进行仿真，按给定指标寻优进行计算机辅助设计，已成为运动控制系统常用的分析和设计工具。

5. 信号检测与处理技术 —— 控制系统的“眼睛”

运动控制系统的本质是反馈控制，即根据给定和输出的偏差实施控制，最终缩小或消除偏差，运动控制系统需通过传感器实时检测系统的运行状态，构成反馈控制，并进行故障分析和故障保护。

由于实际检测信号往往带有随机的扰动，这些扰动信号对控制系统的正常运行产生不利的影晌，严重时甚至会破坏系统的稳定性。为了保证系统安全可靠的运行，必须对实际检测的信号进行滤波等处理，提高系统的抗干扰能力。此外，传感器输出信号的电压、极性和信号类型往往与控制器的需求不相吻合。所以，传感器输出信号一般不能直接用于控制，需要进行信号转换和数据处理。

6. 控制理论 —— 系统分析和设计的依据

控制理论是运动控制系统的理论基础，是指导系统分析和设计的依据。控制系统实际问题的解决常常能推动理论的发展，而新的控制理论的诞生，诸如非线性控制、自适应控制、智能控制等，又为研究和设计各种新型的运动控制系统提供了理论依据。

1.3 运动控制系统及其组成

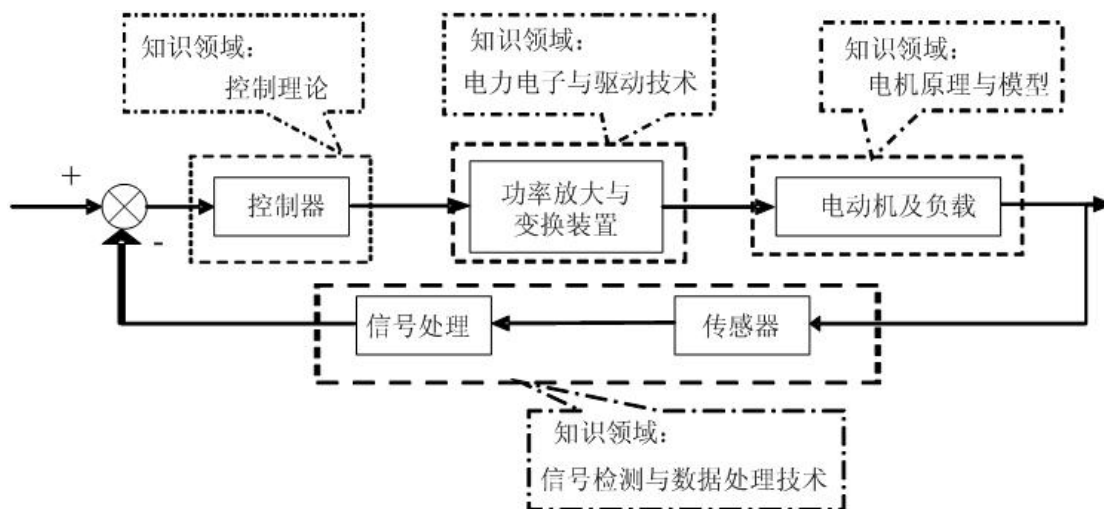


图 1.2 运动控制系统的组成

1. 电机 —— 运动控制系统的控制对象

(1) 直流电机 —— 结构复杂，制造成本高，电刷和换向器限制了它的转速与容量。优点：易于控制。

(2) 交流异步电机 —— 结构简单、制造容易，无需机械换向器，其允许转速与容量均大于直流电动机。

(3) 同步电机 —— 转速等于同步转速，具有机械特性硬，在恒频电源供电时调速较为困难，变频器的诞生不仅解决了同步电动机的调速，还解决了其起动和失步问题，有效地促进了同步电动机在运动控制中的应用。

2. 功率放大与变换装置 —— 执行手段

电力电子器件组成了电力电子装置，电力电子器件：

第一代电力电子器件：半控型器件，如 SCR，方便地应用于相控整流器 (AC→DC)和有源逆变器(DC→AC)，但用于无源逆变(DC→AC)或直流 PWM 方式调压 (DC→DC) 时，必须增加强迫换流回路，使电路结构复杂。

第二代电力电子器件：全控型器件，如 GTO、BJT、IGBT、MOSFET 等。此类器件用于无源逆变(DC→AC)和直流调压 (DC→DC) 时，无须强迫

换流回路，主回路结构简单。另一个特点是可以大大提高开关频率，用脉宽调制（PWM）技术控制功率器件的开通与关断，可大大提高可控电源的质量。

第三代电力电子器件：特点是由单一的器件发展为具有驱动、保护功能的复合功率模块，提高了使用的安全性和可靠性。

3. 控制器

模拟控制器：模拟控制器常用运算放大器及相应的电气元件实现，具有物理概念清晰、控制信号流向直观等优点，其控制规律体现在硬件电路和所用的器件上，因而线路复杂、通用性差，控制效果受到器件性能、温度等因素的影响。

数字控制器：硬件电路标准化程度高、制作成本低、而且不受器件温度漂移的影响。控制规律体现在软件上，修改起来灵活方便。此外，还拥有信息存储、数据通信和故障诊断等模拟控制器无法实现的功能。

4. 信号检测与处理—传感器

运动控制系统中常用的反馈信号是电压、电流、转速和位置，为了真实可靠地得到这些信号，并实现功率电路（强电）和控制器（弱电）之间的电气隔离，需要相应的传感器。

精度——传感器必须有足够高的精度，才能保证控制系统的准确性。

滤波——信号滤波，模拟控制系统常采用模拟器件构成的滤波电路，而计算机数字控制系统往往采用模拟滤波电路和计算机软件数字滤波相结合的方法。

1.4 运动控制系统的转矩控制规律

基本运动方程式：

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

J —— 机械转动惯量

θ_m —— 转子的机械转角 ω_m —— 转子的机械角速度

运动控制的目的：控制电动机的转速和转角，对于机器来说是控制轴速度和位移。

要控制转速和转角，唯一的途径就是控制电动机的电磁转矩：

- 使转速变化率按人们期望的规律变化。因此，转矩控制是运动控制的根本问题。
- 在高性能的运动控制系统中，采用转速闭环控制，用转速偏差来调节系统的动态转矩。

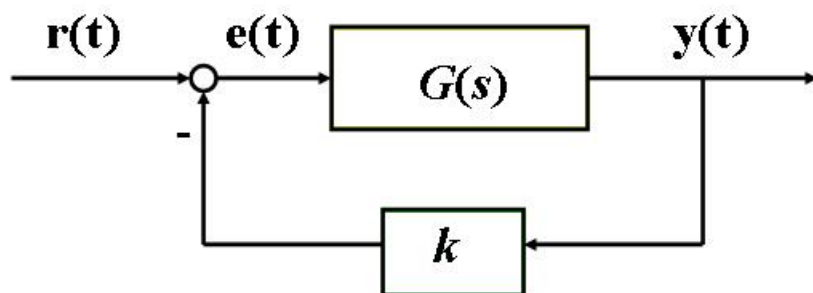
1.5 静态性能指标

稳定性：除给定值之外所有误差之和。

精度：连同给定值在内的所有误差之和。

稳态误差：一个稳定系统在输入量或扰动的作用下，经历过渡过程进入静态后，静态下输出量的要求值和实际值之间的误差。

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} y_{req}(t) - y(t), \quad y_{req}(t) \text{ 为输出要求值}$$



$$r(t) = ky_{req}(t), \quad e(t) = r(t) - ky(t) = k(y_{req}(t) - y(t))$$

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

为计算稳态误差，应用 Laplace 终值定理，当输入信号为以下三种典型信号之一时，稳态误差为：

$$\text{单位阶跃函数: } r(t) = 1, R(s) = \frac{1}{s}, \quad e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + kG(s)}$$

$$\text{单位斜坡函数: } r(t) = t, R(s) = \frac{1}{s^2}, \quad e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{ksG(s)}$$

$$\text{单位加速度函数: } r(t) = \frac{1}{2}t^2, R(s) = \frac{1}{s^3}, \quad e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{ks^2G(s)}$$

$$\text{开环系统的误差为: } e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{1}{1 + G(0)}$$

对单位阶跃输入，开环系统的稳态误差为：

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s(1 - G(s)) \frac{1}{s} = 1 - G(0)$$

对 $k=1$ 的闭环系统，其稳态误差为：

$$E(s) = R(s) - Y(s) = (1 - G(s))R(s)$$

$G(0)$ 常称为系统的直流增益，一般远大于 1。

考虑对象 $G(s)$ 的参数变化对输出的影响，设此时对象为 $G(s) + \Delta G(s)$ ，在开环条件下输出的变化为：

$$\Delta Y(s) = \Delta G(s)R(s)$$

而对闭环系统则有：

$$Y(s) + \Delta Y(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + (G(s) + \Delta G(s))K(s)} R(s)$$

输出的变化为：

$$\Delta Y(s) = \frac{\Delta G(s)}{(1 + GK(s) + \Delta GK(s))(1 + GK(s))} R(s)$$

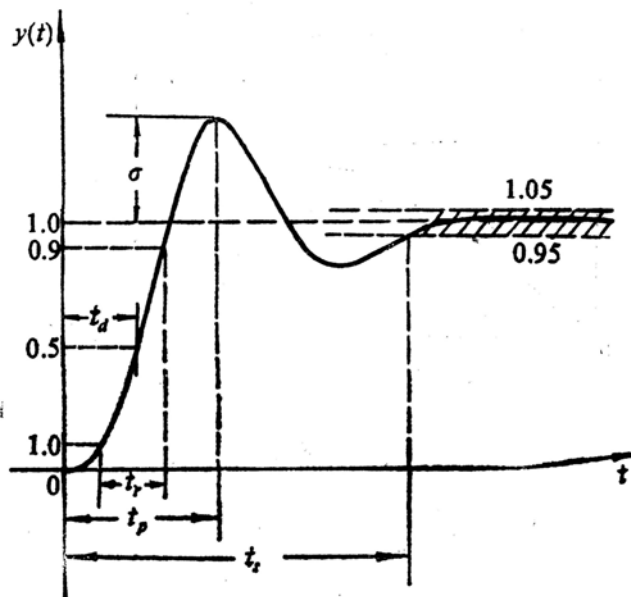
通常 $GK(s) \gg \Delta GK(s)$ ，于是有

$$\Delta Y(s) = \frac{\Delta G(s)}{(1 + GK(s))^2} R(s)$$

又由于 $(1 + GK(s))$ 在所关心的复频率范围内常称是远大于 1 的，因而闭环系统输出的变化减小了。

1.6 动态性能指标

研究线性系统在零初始条件和单位阶跃信号输入下的响应过程曲线，



- 超调量：响应曲线第一次越过静态值达到峰值点时，越过部分的幅度与静态值之比，记为 σ ；
- 调节时间：响应曲线最后进入偏离静态值的误差为 $\pm 5\%$ (或 2%) 的范围并且不再越出这个范围的时间，记为 t_s ；
- 振荡次数：响应曲线在 t_s 之前在静态值上下振荡的次数；
- 延迟时间：响应曲线首次达到静态值的一半所需的时间，记为 t_d ；

- 上升时间：响应曲线首次从静态值的 10% 过渡到 90% 所需的时间，记为 t_r ；
- 峰值时间：响应曲线第一次达到峰值点的时间，记为 t_p 。

系统动态特性可归结为：

- 1、响应的快速性，由上升时间和峰值时间表示；
- 2、对所期望响应的逼近性，由超调量和调节时间表示。

由于这些性能指标常常彼此矛盾，因此必须加以折衷处理。

• 二阶系统的动态性能指标

对二阶系统
$$G(s) = \frac{K}{s^2 + ps + K}$$

可写为
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中 ζ 称作系统的阻尼系数， ω_n 称作固有频率， $T = \frac{1}{\omega_n}$ 称作时间常数。

系统的阶跃响应为：

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\beta} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \beta t + \theta)$$

其中： $\beta = \sqrt{1 - \zeta^2}$, $\theta = \cos^{-1} \zeta$, $0 < \zeta < 1$ 。

峰值时间 t_p :
$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n(1 - \zeta^2)}$$

超调量 σ :
$$\sigma = e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi}$$

调节时间 t_s :
$$t_s \approx \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (5\% \text{ 准则})$$

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2\% \text{ 准则})$$

1.7 PID 控制器

PID 控制器也叫三项控制器，它包括一个比例项，一个积分项和一个微分项，其传递函数为：

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例增益、积分增益和微分增益。

如果令 $K_D=0$ ，就得到比例积分控制器（PI）：

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s}$$

而当 $K_I=0$ 时，则得到比例微分控制器（PD）：

$$G(s) = K_P + K_D s$$

PID 控制器各项的作用：

- 增大比例增益 K_P 一般将加快系统的响应，并有利于减小稳态误差，但是过大的比例系数会使系统有比较大的超调，并产生振荡，使稳定性变坏。
- 增大积分增益 K_I 有利于减小超调，减小稳态误差，但是系统稳态误差消除时间变长。
- 增大微分增益 K_D 有利于加快系统的响应速度，使系统超调量减小，稳定性增加，但系统对扰动的抑制能力减弱。

PID 控制器设计的一般原则：

- 观察系统开环响应，确定待改进之处；
- 加入比例环节缩短系统响应时间；
- 加入积分控制减小系统的稳态误差；
- 加入微分环节改善系统的超调量；
- 调节 K_P 、 K_I 、 K_D ，使系统的响应达到最优。

2 伺服系统

2.1 什么是伺服系统

伺服驱动系统（Servo System）简称伺服¹⁾系统，亦称随动系统，属于自动控制系统中的一种，它用来控制被控对象的转角（或位移），使其能自动地、连续地、精确地复现输入指令的变化规律。它通常是具有负反馈的闭环控制系统，有的场合也可以用开环控制来实现其功能。伺服系统是一种以机械位置或角度作为控制对象的自动控制系统，例如数控机床、生产机械等。

使用在伺服系统中的驱动电机要求具有**响应速度快、定位准确、转动惯量较大²⁾**等特点，这类专用的电机称为伺服电机。当然，**其基本工作原理和普通的交直流电机没有什么不同**。该类电机的专用驱动单元称为伺服驱动单元，有时简称为伺服，一般其内部包括电流（转矩）、速度和/或位置闭环。

以数控机床伺服系统为例，如下图：

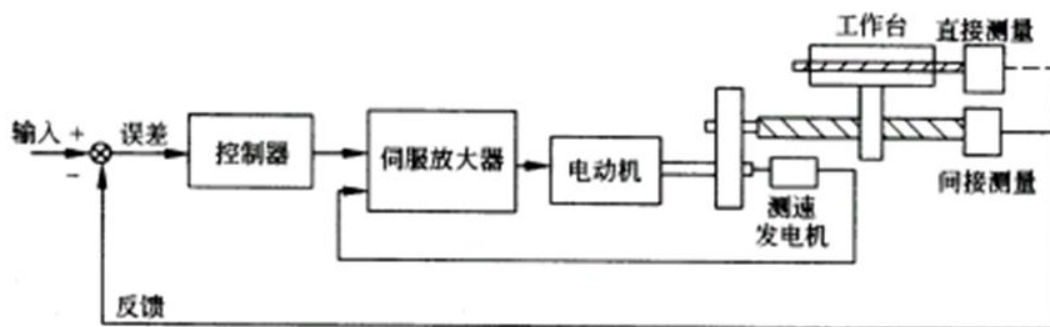


图 2.1 数控机床伺服系统

由图可以看出，它与一般的反馈控制系统一样，也是由控制器、被控对象、反馈测量装置等部分组成。

1) 伺服（Servo）是一个性能上的名词，一般只要主令和控制结果的近似达到了一定高的程度就能称为伺服，这和机器的结构没有直接的关系。例如何伺服系统都没有精确的惯量匹配的范围，这是因为惯量匹配的结果只要不影响控制对象对主令跟随或影响不大就好了，跟具体是 3 还是 3.5 没有关系。伺服系统也不一定是电机系统，有的气动系统就称为气动伺服。

伺服系统本质上是一种随动系统。只不过被控量是位移或是其对时间的导数。如果要问什么是随动系统，就是一个系统的输出尽可能以最快，最精确的方式复现输入信号。其衡量的指标有超调量、延迟。

伺服，顾名思义，就是伺候服务，别人叫干什么就干什么，干的越好就伺服水平就越高，在控制领域也一样，执行输入信号越快越真实，其伺服控制系统的水平也越高。

2) 为了能够和丝杠等机械部件直接相连，使用在机电系统中的伺服电机的转动惯量较大。为了得到极高的响应速度，伺服电机也有专门的小惯量电机，但这类电机的过载能力低，当使用在进给伺服系统中时，必须加减速装置。转动惯量反映了系统的加速度特性，在选择伺服电机时，系统的转动惯量不能大于电机转动惯量的 3 倍。

伺服系统的工作原理：

简单的说，就是在开环控制的交直流电机的基础上将速度和位置信号通过旋转编码器、旋转变压器等反馈给驱动器做闭环负反馈的 PID 调节控制，再加上驱动器内部的电流闭环，通过这 3 个闭环调节，使电机的输出对设定值追随的准确性和时间响应特性都提高很多。**伺服系统是个动态的随动系统**，达到的稳态平衡也是动态的平衡。

全数字伺服系统一般采用位置控制、速度控制和力矩控制的三环结构。系统硬件大致由以下几部分组成：电源单元；功率逆变和保护单元；检测器单元；数字控制器单元；接口单元。相对应伺服系统由外到内的“位置”、“速度”、“转矩”三个闭环，伺服系统一般分为三种控制方式。在使用位置控制方式时，伺服完成所有的三个闭环的控制。在使用速度控制方式时，伺服完成速度和扭矩（电流）两个闭环的控制。一般来讲，我们的需要位置控制的系统，既可以使用伺服的位置控制方式，也可以使用速度控制方式，只是上位机的处理不同。另外，有人认为位置控制方式容易受到干扰。而扭矩控制方式是伺服系统只进行扭矩的闭环控制，即电流控制，只需要发送给伺服单元一个目标扭矩值，多用在单一的扭矩控制场合，比如在小角度裁断机中，一个电机用速度或位置控制方式，用来向前传送材料，另一个电机用作扭矩控制方式，用来形成恒定的张力。

2.2 伺服系统的类型

- 从系统组成元件的性质来看，有电气伺服系统、液压伺服系统和电气—液压伺服系统、电气—气动伺服系统等；
- 从系统输出量的物理性质来看，有速度或加速度伺服系统和位置伺服系统等；
- 从系统中所包含的元件特性和信号作用特点来看，有模拟式伺服系统和数字式伺服系统；
- 从系统结构特点来看，有单回路伺服系统、多回路伺服系统和开环伺服系统、闭环伺服系统。

2.3 伺服系统的性能分析及调整

衡量一个伺服系统的性能主要从以下四个方面来分析：响应速度、刚度、稳定性以及抗噪音能力。

- **响应速度**

伺服系统的响应速度描述了系统响应指令给定的快慢程度，对大部分的伺服系统来说追求较快的响应速度，系统的增益越大，则响应速度快，有助于提高系统的性能。

- **刚度**

伺服系统的刚度描述了系统抗扭矩干扰的能力，系统的刚度比较难于衡量，这是由于系统的干扰往往难于量化，对于一个伺服系统来说，高的刚度能够达到较好的伺服性能。

- **稳定性**

伺服系统的稳定性描述了系统消除自振荡的裕量，任何一个系统都必须有合适的稳定裕量，伺服系统的稳定性一般通过对方波信号响应的过冲量和振荡次数来衡量，伺服增益越高，系统的稳定性将降低。

- **抗噪音能力**

伺服系统的抗噪音能力描述了系统对噪音源的放大程度，噪音干扰会导致系统发热、振荡，扭矩波动和杂音等不良现象。伺服增益越高，系统的抗噪音能力将越低。

伺服系统的调整主要是系统的各项控制增益的调整，通过上述的分析，当增益调整较高时，可以使得系统具有较快的响应速度，提高系统的刚度从而提高系统抗扭矩干扰的能力。然而，另一个方面，过高的增益将使得系统的稳定性和抗噪音能力下降。因此，伺服系统的调整实际上是一个寻求系统各项性能的相互平衡并使整体性能最优的决策过程。

伺服系统的调整过程中，速度环是最难调整的。速度指令来自于位置环，在调整过程中，通常以方波信号作为响应信号，这是由于方波信号的响应对系统要求最为严格。反馈速度与指令速度通过比较环节进行比较得到速度误差，一般来说速度环的控制作用就是为了减小这种误差。比例积分（PI）控制器中的比例增益通常是在高频时起作用，而积分增益通常是在中频时起作用，速度误差经过比例积分控制器后其输出为电流指令。伺服系统的电流环在研究速度环的时候，通常把它当作速度环的一个环节，它的作用就是把电流指令转换成实际电流，此时有可能引起系统的稳定性问题。

伺服系统比例增益的上限通常是由系统内部的各个部件本身决定的，驱动器本身的采样速率、滤波器特性、电流环特性甚至是接线产生的噪音，这些都可能成为限制比例增益的过高调整。同时，伺服系统的反馈环节和机械传动部件也可能成为限制系统比例增益的重要因素。

2.4 变频器与伺服系统的区别

- 变频技术

简单的变频器只能调节交流电机的速度，这时可以开环也可以闭环要视控制方式和变频器而定，这就是传统意义上的 V/F 控制方式。

由于异步电机的动态数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。上世纪 70 年代西门子工程师 **F.Blaschke** 首先提出异步电机矢量控制理论来解决交流电机转矩控制问题。

矢量控制实现的基本原理是通过测量和控制异步电动机定子电流矢量，根据磁场定向原理分别对异步电动机的励磁电流和转矩电流进行控制，从而达到控制异步电动机转矩的目的。具体是将异步电动机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流分量（励磁电流）和产生转矩的电流分量（转矩电流）分别加以控制，并同时控制两分量间的幅值和相位，即控制定子电流矢量，所以称这种控制方式称为矢量控制方式。简单的说，矢量控制就是将磁链与转矩解耦，有利于分别设计两者的调节器，以实现对交流电机的高性能调速。矢量控制方式又有基于转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器的矢量控制方式等。这样就可以将一台三相异步电机等效为直流电机来控制，因而获得与直流调速系统同样的静、动态性能。矢量控制算法已被广泛地应用在 SIEMENS, AB, GE, Fuji 等国际化大公司变频器上。

采用矢量控制方式的通用变频器不仅可在调速范围上与直流电动机相匹配，而且可以控制异步电动机产生的转矩。由于矢量控制方式所依据的是准确的被控异步电动机的参数，有的通用变频器在使用时需要准确地输入异步电动机的参数，有的通用变频器需要使用速度传感器和编码器。鉴于电机参数有可能发生变化，会影响变频器对电机的控制性能，目前新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能，带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前可以自动地对异步电动机的参数进行辨识，并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数，从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

以异步电动机的矢量控制为例：它首先通过电机的等效电路来得出一些磁链方程，包括定子磁链，气隙磁链，转子磁链，其中气隙磁链是连接定子和转

子的。一般的感应电机转子电流不易测量，所以通过气息来中转，把它变成定子电流。然后，有一些坐标变换，首先通过 $3/2$ 变换，变成静止的 $d-q$ 坐标，然后通过前面的磁链方程产生的单位矢量来得到旋转坐标下的类似于直流机的转矩电流分量和磁场电流分量，这样就实现了解耦控制，加快了系统的响应速度。最后再经过 $2/3$ 变换，产生三相交流电去控制电机，这样就获得了良好的性能。

综合以上：矢量控制无非就四个知识：等效电路、磁链方程、转矩方程、坐标变换（包括静止和旋转）。

矢量控制方法的提出具有划时代的意义。然而在实际应用中，由于转子磁链难以准确观测，系统特性受电动机参数的影响较大，且在等效直流电动机控制过程中所用矢量旋转变换较复杂，使得实际的控制效果难以达到理想分析的结果。

• 伺服系统

1、伺服驱动器：在发展了变频技术的前提下，在驱动器内部的电流环，速度环和位置环（变频器没有该环）都进行了比一般变频更精确的控制技术和算法运算，在功能上也比传统的伺服强大很多，主要的一点可以进行精确的位置控制。通过上位控制器发送的脉冲序列来控制速度和位置（当然也有些伺服内部集成了控制单元或通过总线通讯的方式直接将位置和速度等参数设定在驱动器里），驱动器内部的算法和更快更精确的计算以及性能更优良的电子器件使之更优越于变频器。

2、电机方面：伺服电机的材料、结构和加工工艺要远远高于变频器驱动的交流电机（一般交流电机或恒力矩、恒功率等各类变频电机），也就是说当驱动器输出电流、电压、频率变化很快的电源时，伺服电机就能根据电源变化产生响应的动作变化，响应特性和抗过载能力远远高于变频器驱动的交流电机，电机方面的严重差异也是两者性能不同的根本。就是说不是变频器输出不了变化那么快的电源信号，而是电机本身就反应不了，所以在变频的内部算法设定时为了保护电机做了相应的过载设定。当然即使不设定变频器的输出能力还是有限的，有些性能优良的变频器就可以直接驱动伺服电机！

3 系统的控制对象 —— 电机

3.1 电机原理的基本定律

1. 安培环路定律

在磁场中沿任一闭合回路磁场强度的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和，即：

$$\oint \mathbf{LH} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma I$$

其中，电流的正方向与闭合回路的正方向满足右手定则。

2. 电磁感应定律

当通过一个截面的磁通量发生变化时，沿截面的边缘产生感应电势，形成场强为 \mathbf{E} 的电场。

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = e$$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

其中， \mathbf{E} —— 电场强度， e —— 感应电势。

简单的说，电磁感应定律就是变化的电场附近会产生变化的磁场，而变化的磁场附近会产生变化的电场。

根据产生原因的不同，感应电动势 e 可分为以下两类：

- 切割（运动）电动势：指线圈不动，跨接在线圈上的导体运动，使得穿过线圈的磁通随着时间的变化而变化。此时的 e 叫做切割电动势 $e=Blv$ ，方向由右手定则判定。
- 变压器电动势：指线圈不变，穿过线圈的磁通 Φ 发生变化，这样在线圈内将产生感应电动势，其大小与线圈的匝数和磁通变化率成正比，方向由楞次定律决定。

3. 电磁力定律:

载流导体在磁场中要受到力的作用，方向用左手定则判定。

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{i} \cdot \mathbf{l}$$

在旋转电机中，作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩，我们称之为电磁转矩。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

4. 电路定律:

- 欧姆定律: $u=iR$

- 基尔霍夫第一定律（电流定律）:

$$\sum i=0$$

- 基尔霍夫第二定律（电压定律）:

在电路中，对任一回路，沿回路环绕一周，回路内所有电动势的代数和等于所有电压降的代数和，即：

$$\sum e= \sum u$$

5. 磁路及磁路定律:

无论是静止的电机还是旋转的电机，都必须以电磁场作为其耦合场，也就是说，磁场是电机必不可缺的工作环境。电流在它周围的空间建立磁场，磁场的分布常用一些闭合线（磁力线）来描述：

电路：电流流过的路径我们称之为电路。

磁路：磁力线所经过的路径称为磁路。

磁路的材料不同，其导磁性能也不同。铁磁材料的特点：磁导率随着外加磁场的变化而发生相应的变化，存在磁饱和现象；在交变磁场的作用下，存在磁滞和涡流现象，在铁磁物质内产生能量损耗，即铁耗。

- 磁路的欧姆定律:

考虑到磁路和电路在分析思路上基本一直，所以在分析磁路时，可以将全电流定律应用到磁路中来。如图所示，截面相等的无分支闭和磁路上，则有：

$$\oint \mathbf{LH} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = \mathbf{HI} = \mathbf{Ni}$$

由于 $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \Phi / \mathbf{A}$ ，即 $\Phi \cdot L / \mu \cdot \mathbf{A} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{i}$

则：

$$\Phi = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{F}{R_m} = F\Lambda_m$$

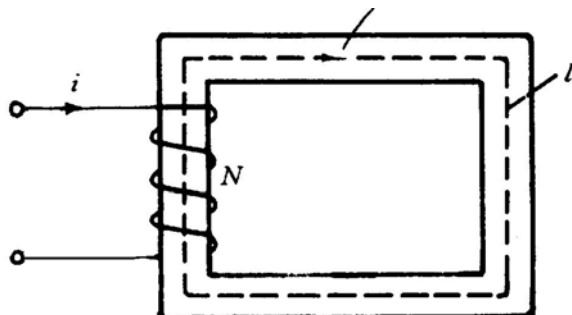


图 3.1 磁路欧姆定律

即磁路中的磁通 Φ 等于作用在该磁路上的磁动势 F 除以磁路的磁阻 R_m 或乘以磁导 Λ_m ，这就是磁路的欧姆定律。

- 磁路的基尔霍夫第一定律

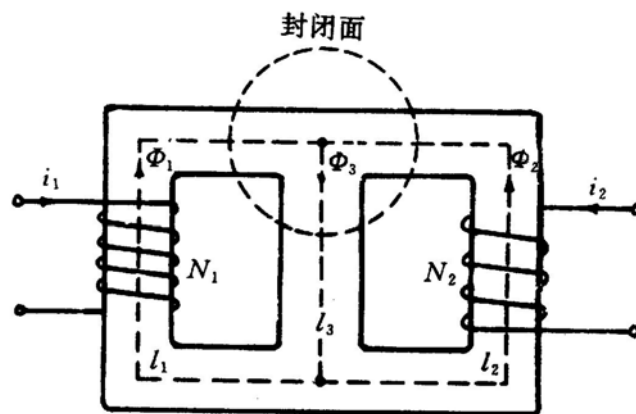


图 3.2 磁路回路

$$\sum \Phi = 0$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

- 磁路的基尔霍夫第二定律

磁路和电路在这里有所不同，在磁路中，构成磁路的各个部分的材料和截面会有所不同，这样在分析时，我们要将磁路进行分段，每段有相同的材料和截面，即 \mathbf{B} 和 μ 要相同。则 $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum Hl = \sum Ni = \sum F = \sum \Phi R_m$

注意：尽管磁路和电路在物理量和基本定律上有一一对应的关系，但是，磁路和电路仍有本质的区别：

- 1) 电路中可以有电动势而无电流，磁路中有磁动势必必有磁通；
- 2) 电路中有电流就有功率损耗，而在恒磁通下，磁路中无损耗；
- 3) 电流只在导体中流过，而磁路中除了主磁通外还要考虑漏磁通的影响；
- 4) 电路中电阻率在一定温度下恒定不变，而由于铁磁材料构成的磁路中，磁导率是随着磁密而变化的，所以磁导率不是一个常数。

3.2 异步电机原理



图 3.3 异步电机

1、异步电动机的旋转原理

当电动机的三相定子绕组（各相差 120 度电角度），通入三相交流电后，将产生一个旋转磁场，该旋转磁场切割转子绕组，从而在转子绕组中产生感应电流（转子绕组是闭合通路），载流的转子导体在定子旋转磁场作用下将产生电磁力，从而在电机转轴上形成电磁转矩，驱动电动机旋转，并且电机旋转方向与旋转磁场方向相同。根据以上电磁感应原理，异步电动机也叫感应电动机。

- 异步电动机的电磁转矩是由定子主磁通和转子电流相互作用产生的。
- 异步电动机的定子主磁通却并不是静止的，而是以一定的转速旋转的。
- 产生转子电流的必要条件是转子绕组切割定子磁场的磁力线。因此，转子转速必须低于定子磁场的转速（即为“异步”）。

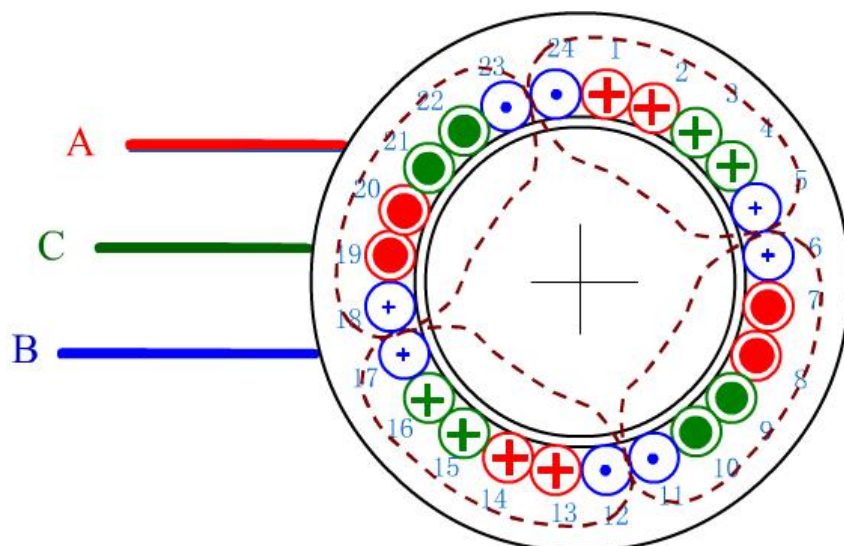


图 3.4 异步电机三相对称交流绕组示意图

2、同步转速、转差与转差率

切割磁力线是产生转子感应电流和电磁转矩的必要条件。转子必须与旋转磁场保持一定的速度差，才可能切割磁力线。旋转磁场的转速用 n_1 表示，称为同步转速；转子的实际转速用 n 表示，转差 $\Delta n = n_1 - n$ 。

$$\text{同步转速: } n_1 = \frac{60f}{p} \quad p \text{ —— 极对数}$$

转差率:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

转差率是异步电动机的一个基本变量，在分析异步电动机运行时有着重要的地位。

调速方法:

- 变频调速（改变 f ）
- 变极对数调速（改变 p 有级调速）
- 变转差率调速

3、电势平衡方程式

- 定子绕组电势平衡方程式

定子绕组接到交流电源上，与电源电压相平衡的电势（压降）包括：

➤ 主电势（感应电势）

定子绕组通入三相对称交流电流时，将会产生旋转的主磁通，同时被定子绕组和转子绕组切割，并在其中产生感应电势。定子绕组感应电势的有效值：

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_1 k_{w1}$$

➤ 漏磁电势（漏抗压降）

定子漏磁通：仅与定子绕组相匝链。漏抗压降：

$$\dot{E}_L = -j I_1 X_L$$

➤ 电阻压降：

$$R_1 I_1$$

➤ 定子电势平衡方程式：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1) I_1 = -\dot{E}_1 + Z_L I_1$$

• 转子绕组的电势及电流

➤ 转子绕组的感应电势

转子绕组切割主磁通的转速，主磁通以同步速度旋转，转子以转速 n 旋转，转子绕组导体切割主磁通的相对转速为 $(n_1 - n) = s n_1$ 。

转子绕组中感应电势的频率：

$$f_2 = \frac{P(n_1 - n)}{60} = \frac{n_1 - n}{n_1} \frac{P n_1}{60} = s f_1$$

由于 s 很小，转子感应电势频率很低，一般为 0.5-3Hz。

转子感应电势的有效值：

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 \Phi_1 k_{w2} = 4.44 s f_1 N_2 \Phi_1 k_{w2} = s (4.44 f_1 N_2 \Phi_1 k_{w2}) = s E_2$$

感应电势与转差率成正比。对绕线式异步电机，转子绕组每相串联匝数，相数计算方法同定子绕组的计算；对笼型转子来说，由于每个导条中电流相位均不一样，所以，每个导条即为一相，可见相数等于导条数即转子槽数；每相串联匝数为半匝即 1/2。注意：转子不动时（ $s=1$ ）时的感应电势与转子旋转是感应电势的关系。

➤ 转子绕组的阻抗

由于转子绕组是闭合的，所以有转子电流流过，同样会产生漏磁电抗压降。漏抗公式：

$$X_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = sX_{2\sigma}$$

漏抗也与转差率成正比。转速越高，漏抗越小。

考虑到转子绕组的相电阻后：

$$Z_{2\sigma} = R_2 + jsX_{2\sigma}$$

➤ 转子绕组中的电流

转子绕组短路，转子电压为 0，感应电势全部加在转子阻抗上，转子回路方程：

$$\dot{E}_2 = jI_2 Z_{2\sigma}$$

转子电流：

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_{2\sigma}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 - jsX_{2\sigma}}, \quad I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\sigma})^2}}$$

3.3 同步电机原理



图 3.5 同步电机

1、同步电动机的旋转原理

同步电机和其它类型的旋转电机一样，由固定的定子和可旋转的转子两大部分组成。一般分为转场式同步电机和转枢式同步电机。图 3.6 给出了最常用

的转场式同步发电机的结构模型，其定子铁心的内圆均匀分布着定子槽，槽内嵌放着按一定规律排列的三相对称交流绕组。这种同步电机的定子又称为电枢，定子铁心和绕组又称为电枢铁心和电枢绕组。

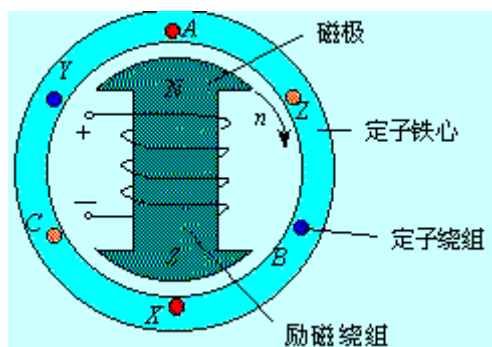


图 3.6 同步电机结构示意图

转子铁心上装有制成一定形状的成对磁极，磁极上绕有励磁绕组，通以直流电流时，将会在电机的气隙中形成极性相间的分布磁场，称为励磁磁场（也称主磁场、转子磁场）。气隙处于电枢内圆和转子磁极之间，气隙层的厚度和形状对电机内部磁场的分布和同步电机的性能有重大影响。

除了转场式同步电机外,还有转枢式同步电机，其磁极安装于定子上，而交流绕组分布于转子表面的槽内，这种同步电机的转子充当了电枢。

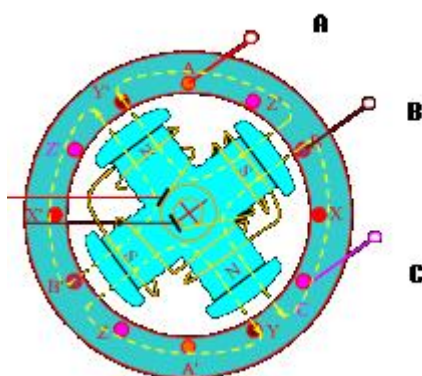


图 3.7 同步电机工作原理示意图

- 主磁场的建立：励磁绕组通以直流励磁电流，建立极性相间的主磁场，即建立起主磁场。
- 载流导体：三相对称的电枢绕组充当功率绕组，成为感应电势或者感应电流的载体。

- 切割运动：原动机拖动转子旋转（给电机输入机械能），极性相间的励磁磁场随轴一起旋转并顺次切割定子各相绕组（相当于绕组的导体反向切割励磁磁场）。
- 交变电势的产生：由于电枢绕组与主磁场之间的相对切割运动，电枢绕组中将会感应出大小和方向按周期性变化的三相对称交变电势。通过引出线，即可提供交流电源。

2、同步电动机的结构形式

- 凸极式转子

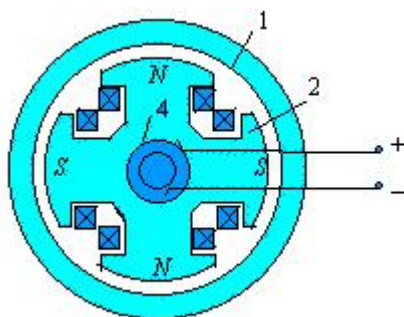


图 3.8 凸极式同步电机结构示意图

凸极式转子上有明显凸出的成对磁极和励磁线圈，如图所示，当励磁线圈中通过直流励磁电流后，每个磁极就出现一定的极性，相邻磁极交替为 N 极和 S 极。对水轮发电机来说，由于水轮机的转速较低，要发出工频电能，发电机的极数就比较多，做成凸极式结构工艺上较为简单。另外，中小型同步电机多半也做成凸极式。

- 隐极式转子

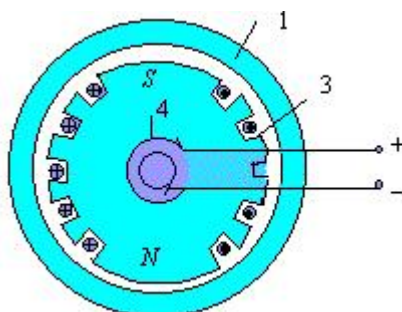


图 3.9 隐极式同步电机结构示意图

隐极式转子上没有凸出的磁极，如图所示，沿着转子本体圆周表面上，开有许多槽，这些槽中嵌放着励磁绕组。在转子表面约 1/3 部分没有开槽，构成所谓大齿，是磁极的中心区。励磁绕组通入励磁电流后，沿转子圆周也会出现 N 极和 S 极。在大容量高转速汽轮发电机中，转子圆周线速度极高。为了减小转子本体及转子上的各部件所承受的巨大离心力，大型汽轮发电机都做成细长的隐极式圆柱体转子。考虑到转子冷却和强度方面的要求，隐极式转子的结构和加工工艺较为复杂。

3、电势方程式

加上负载以后，同步发电机的电枢绕组中存在以下电势：

- 由励磁磁通产生的励磁电势；
- 由电枢反应磁通产生的电枢反应电势；
- 由电枢绕组漏磁通产生的漏磁电势。

由于电枢绕组的电阻很小，如果忽略电阻压降，则每相感应电势总和即为发电机的端电压，用方程式表示为：

$$\dot{E}_D + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U}$$

- 对于凸极式电机

$$\dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = -jX_d \dot{I}_d - jX_q \dot{I}_q$$

其方程式可表示为：

$$\dot{E}_D = \dot{U} + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q$$

- 对于隐极式电机

$$\dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = -jX_s \dot{I}_a$$

其方程式可表示为：

$$\dot{E}_D = \dot{U} + jX_s \dot{I}_a$$

3.4 西门子同步伺服电机

3.4.1 1FK7 电机



图 3.10 1FK7 同步伺服电机

- **描述:** 1FK7 系列集成编码器接口的永磁同步电机具有体积紧凑，高动态响应（基于电机具有很小的转动惯量），高过载能力，极高的能效体积比等特点。由于采用良好的加工工艺，电机表面具有良好的散热性，无需额外的冷却装置，并可以选择集成减速机的电机与光轴电机。
- **功率:** 适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 0.08 ~ 37 Nm。
- **转速:** 2000 ~ 6000rpm。
- **应用范围:**
 - 机床
 - 机器人和机械手
 - 木材、玻璃、陶瓷和石器加工
 - 包装/塑料和纺织机器
 - 辅助轴
- **速度转矩特性曲线:**

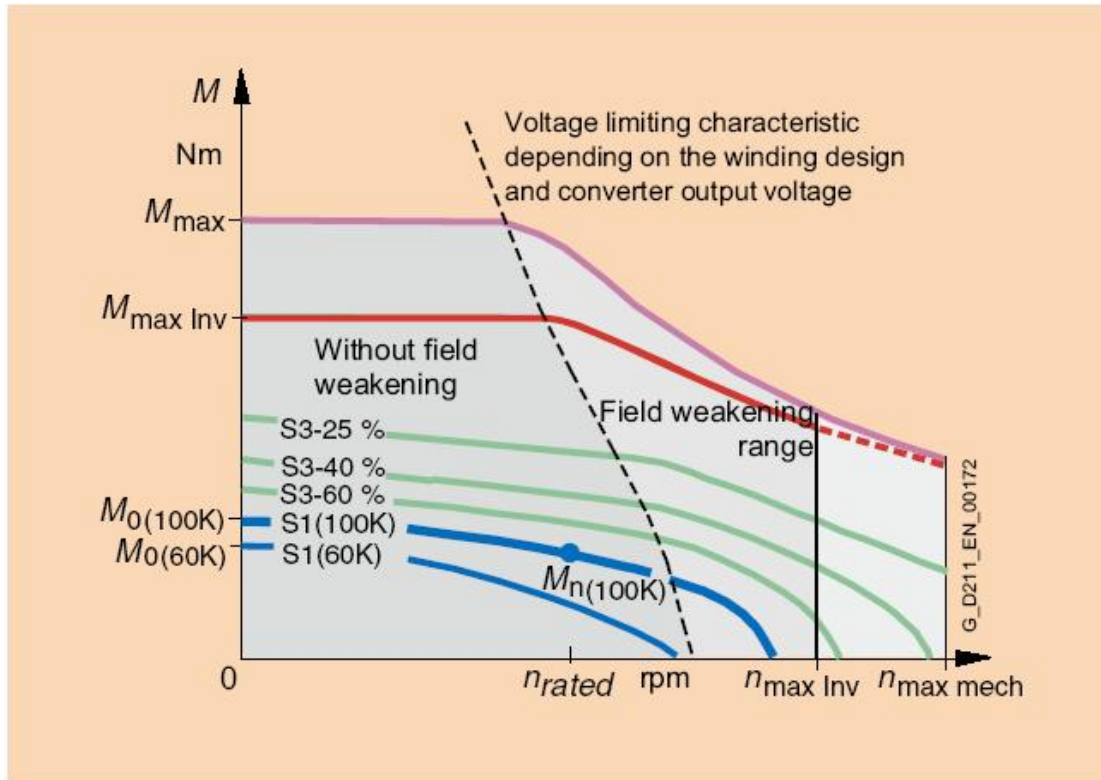


图 3.11 1FK7 同步伺服电机的特性曲线

注意:

- 1) M_0 (静态扭矩): 零速扭矩或称堵转扭矩。为电机使能状态下无运动命令时带负载连续输出的力矩。
- 2) S1: 恒定负载条件下, 连续运行的负载特性。
- 3) S3: 以特定的占空比周期性运行的负载特性。
 - 1 min. cycle duration with 1FK701x to 1FK703x
 - 10 min. cycle duration with 1FK704x to 1FK710x

以 1FK7022-5AK71 电机为例, 技术数据如下表:

技术数据	缩写符号	单位	— 5AK71
额定转速	n_N	rpm	6000
极点数	$2p$		6
额定扭矩 (100K)	$M_N(100\text{ K})$	Nm	0.6
额定电流	I_N	A	1.4
静态扭矩 (60K)	$M_0(60\text{ K})$	Nm	0.7
静态扭矩 (100K)	$M_0(100\text{ K})$	Nm	0.85
最佳转速	$n_{\text{最佳}}$	rpm	6000
最佳功率	$P_{\text{最佳}}$	kW	0.38
最大允许转速 (机械)	$n_{\text{最大}}$	rpm	10000
最大扭矩	$M_{\text{最大}}$	Nm	3.4
峰值电流	$I_{\text{最大}}$	A	7.5

表 3.1 1FK7022-5AK71 电机技术数据

电机在恒定负载连续运行状态和 S3 状态（负载工作周期 1min）下的负载特性曲线，如下图所示：

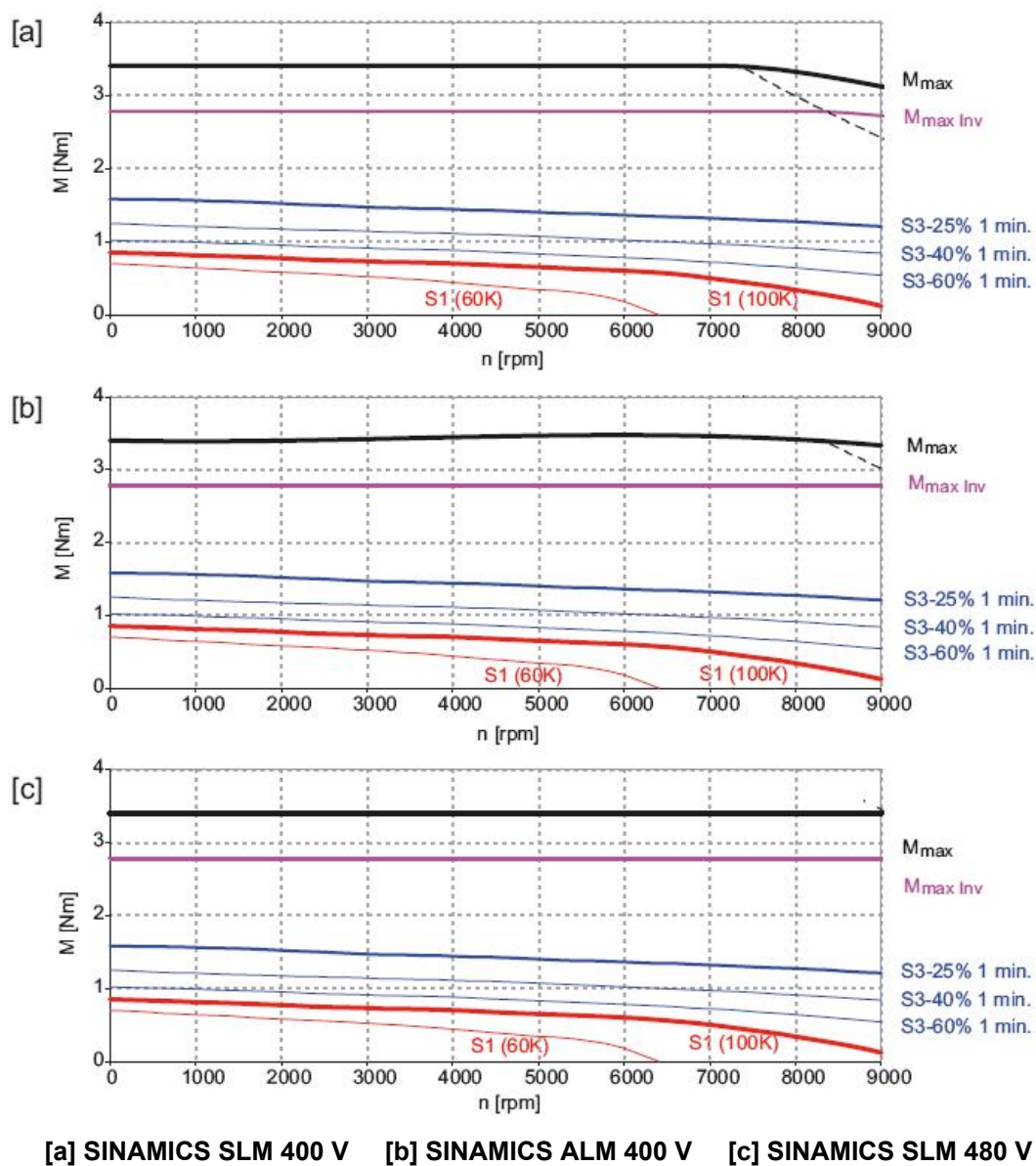


图 3.12 1FK7022-5AK71 同步伺服电机的特性曲线

3.4.2 1FT6 电机

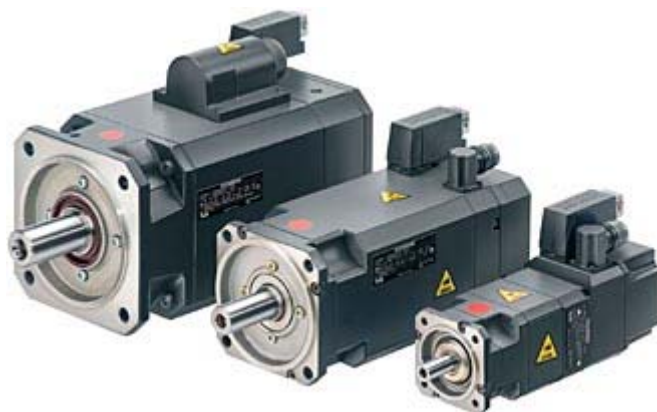


图 3.13 1FT6 同步伺服电机

- **描述：**1FT6 电机为结构极为紧凑的永磁同步电机，安装有内置式编码器的 1FT6 电机可以在 SINAMICS S 驱动系统上工作。SINAMICS S 全数字驱动控制系统和 1FT6 电机全新的编码器技术满足了在动态性能、调速范围以及速度和位置精度等方面的最高要求。其特点：旋转精度高（正弦电流输入）；动态特性高；抗侧面压力能力强；高温情况下不影响电机特性；短时间（50ms）过载能力强；高效；转动惯量小，动态响应好；平均转矩脉动小，1%；保护等级高。1FT6 有自然风冷、强制风冷、水冷三种冷却形式。自然风冷是通过电机表面散发热量，强制风冷通过外装风扇散发热量，而水冷能提高电机的保护等级和功率。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 0.3 ~ 690 Nm。
- **转速：**1500 ~ 6000rpm。
- **应用范围：**
 - 高性能机床
 - 对动态性能和精度有很高要求的生产机器，如包装、塑料、印刷、塑料、冲压、橡胶、玻璃机械等行业

- 速度转矩特性曲线：

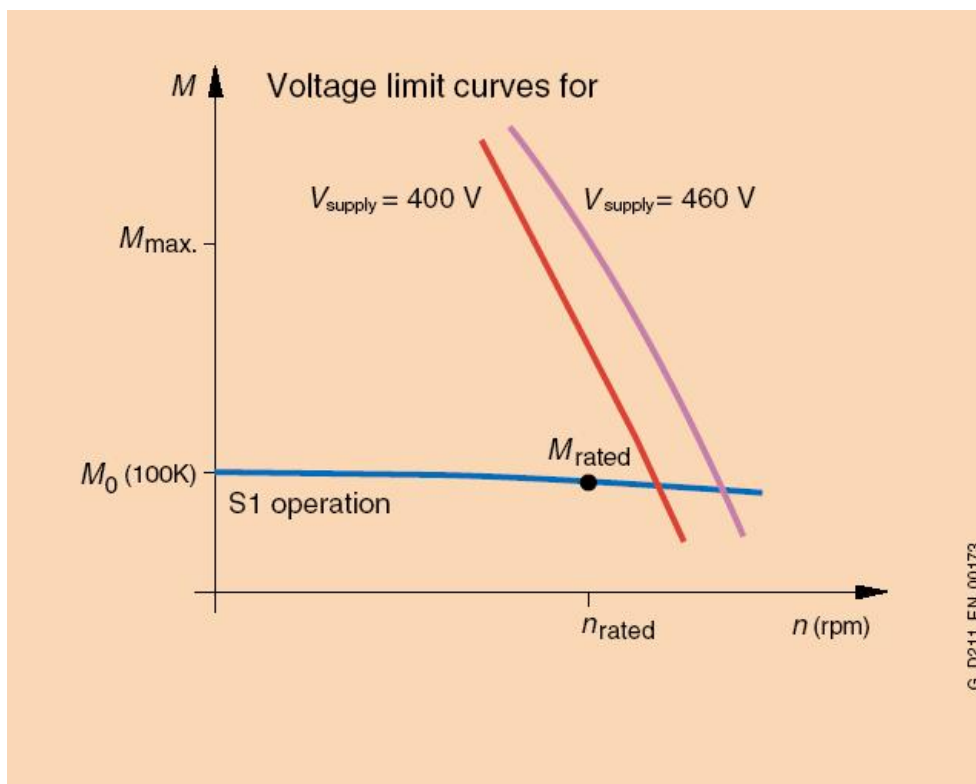


图 3.14 1FT6 同步伺服电机的特性曲线

以 1FT6021-6AK71 电机为例，技术数据如下表：

技术数据	缩写符号	单位	— 6AK71
额定转速	n_N	rpm	6000
极点数	$2p$		6
额定扭矩	M_N	Nm	0.3
额定电流	I_N	A	1.1
静态扭矩（60K）	$M_0 (60 K)$	Nm	0.33
静态扭矩（100K）	$M_0 (100 K)$	Nm	0.40
最佳转速	$n_{最佳}$	rpm	6000
最佳功率	$P_{最佳}$	kW	0.19
最大允许转速（机械）	$n_{最大}$	rpm	12000
最大扭矩	$M_{最大}$	Nm	1.5
峰值电流	$I_{最大}$	A	5

表 3.2 1FT6021-6AK71 电机技术数据

电机在恒定负载连续运行状态和 S3 状态（负载工作周期 1min）下的负载特性曲线，如下图所示：

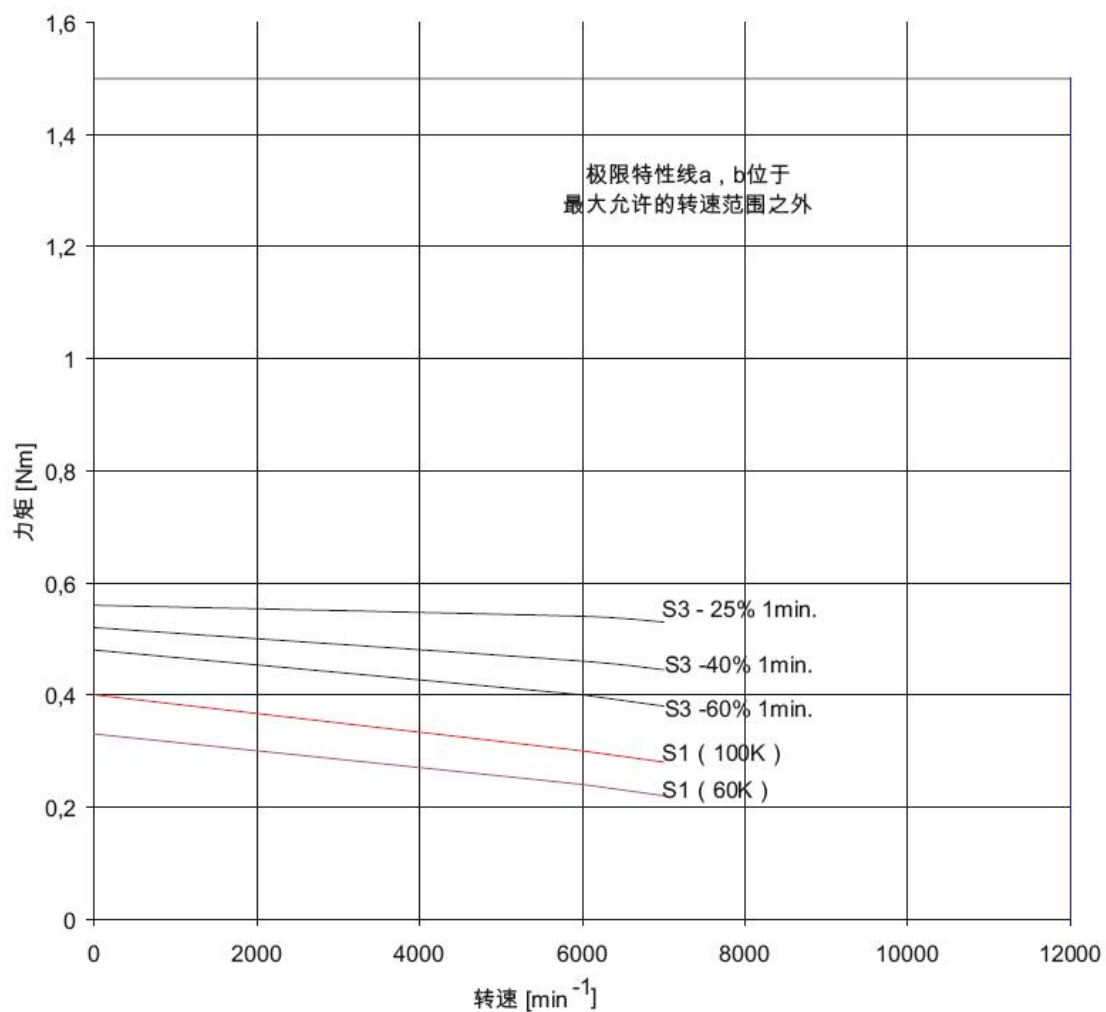


图 3.15 1FT6021-6AK71 同步伺服电机的特性曲线

3.4.3 1FT7 电机

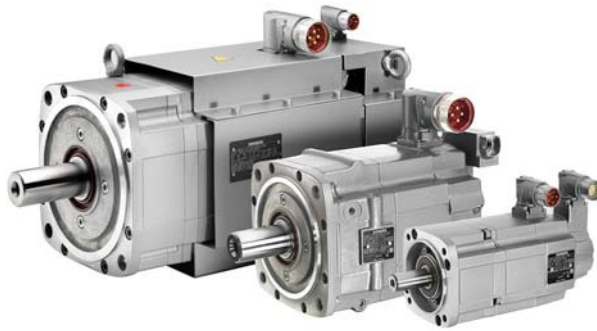


图 3.16 1FT7 同步伺服电机

- **描述：**新型 1FT7 电机是结构非常紧凑的永磁同步伺服电机，具有极为精致的表面设计。由于特殊的横向剖面的设计，使得电机的安装变得极为容易。1FT7 满足了用户对动态性能，调速范围，弱磁，轴和法兰精度以及精确定位的要求。采用最新的编码器技术，经过优化，非常适用于数字控制和驱动系统。其特点：很高的轴和法兰精度；较低转矩脉动（平均值 $<1\%$ ）；高动态性能；很强的过载能力（高达 $4 \cdot M_0$ ）；紧凑型设计（比同一等级的 1FT6 电机短 30%）；高保护等级；采用抗震性能高的编码器安装技术；采用横向剖面技术便于快速安装；可旋转电缆插头；新的法兰设计具有特殊的后置法兰表面，适合于齿型带连接和垂直安装方式（IM V1）。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 1.4~ 61 Nm。
- **转速：**1500 ~ 6000rpm。
- **应用范围：**
 - 高性能机床
 - 对动态响应和精度有严格要求的机床，如包装机，薄膜牵引系统，印刷机以及机械手设备

- 速度转矩特性曲线:

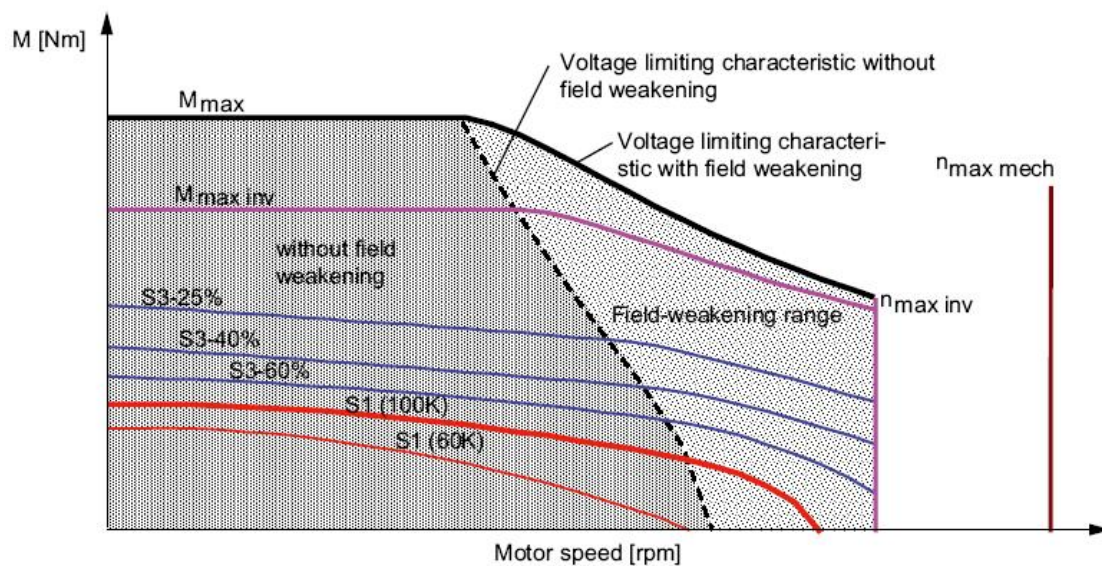


图 3.17 1FT7 同步伺服电机的特性曲线

以 1FT7034-×AK7× 电机为例，技术数据如下表：

技术数据	缩写符号	单位	— 6AK71
额定转速	n_N	rpm	6000
极点数	2p		6
额定扭矩	M_N	Nm	1.4
额定电流	I_N	A	2.1
静态扭矩 (60K)	$M_0 (60 K)$	Nm	1.6
静态扭矩 (100K)	$M_0 (100 K)$	Nm	2.0
最佳转速	$n_{最佳}$	rpm	6000
最佳功率	$P_{最佳}$	kW	0.88
最大允许转速 (机械)	$n_{最大}$	rpm	12000
最大扭矩	$M_{最大}$	Nm	7.7
峰值电流	$I_{最大}$	A	11

表 3.3 1FT7034-×AK7× 电机技术数据

电机在恒定负载连续运行状态和 S3 状态（负载工作周期 1min）下的负载特性曲线，如下图所示：

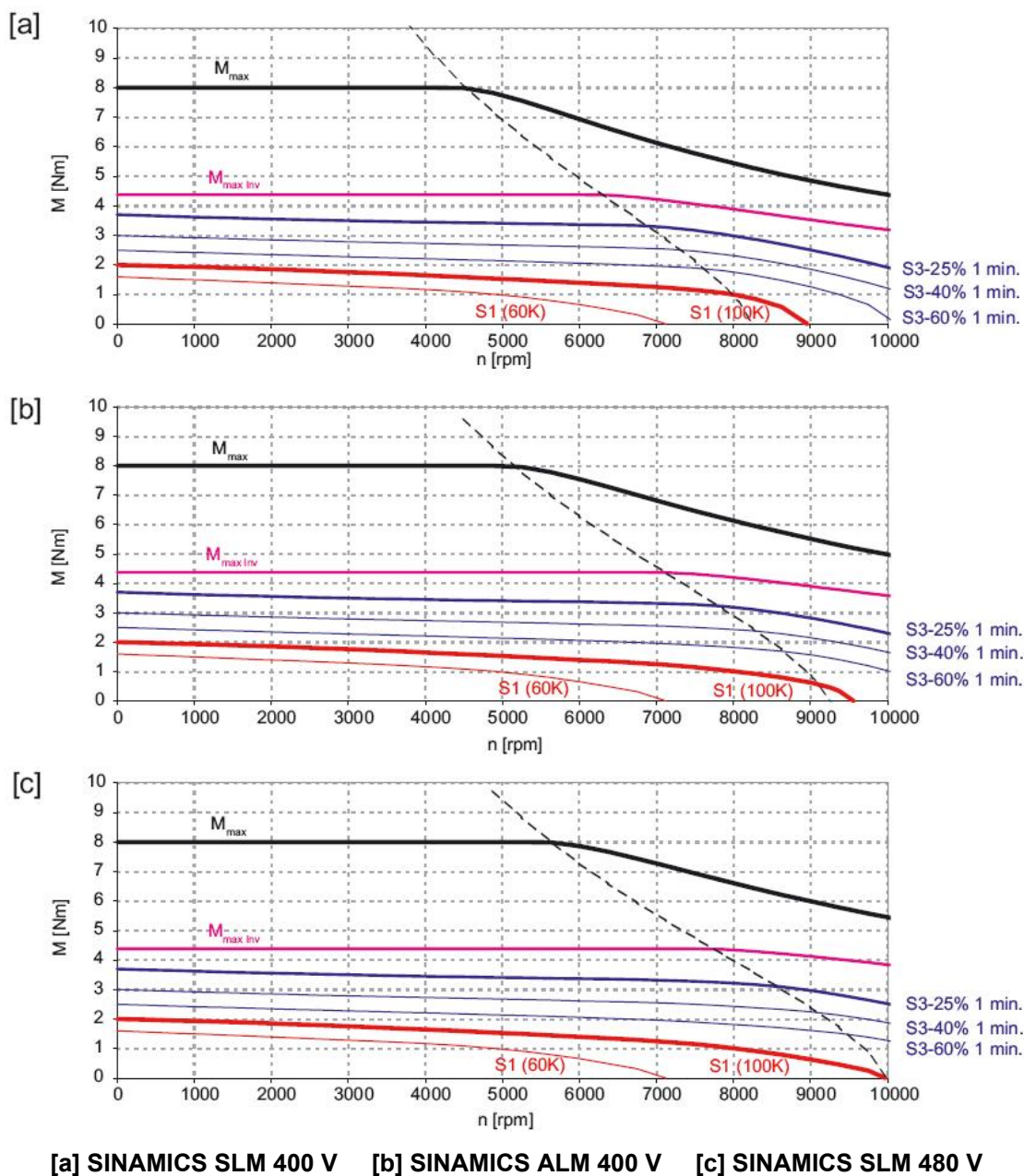


图 3.18 1FT7034-×AK7×同步伺服电机的特性曲线

3.4.4 1FW3 水冷扭矩电机

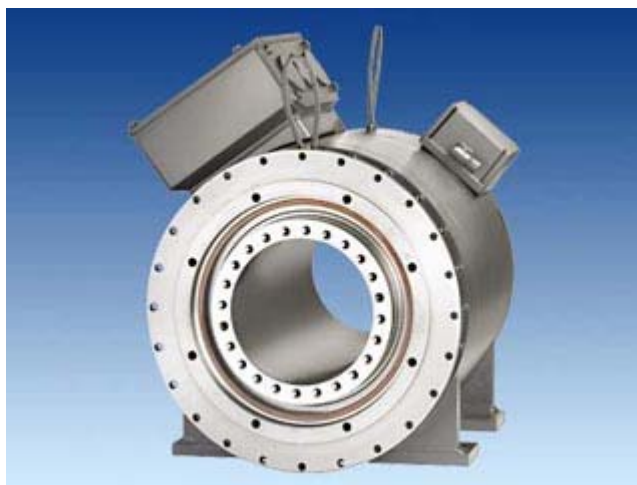


图 3.19 1FW3 水冷扭矩电机

- **描述：**1FW3 水冷扭矩电机采用空轴转子，是多极（转速慢）的永磁同步电机，工作特性与一般同步电机类似。1FW3 扭矩电机出厂时各部件已装配完备，不同轴长的电机有三个外径。轴高为 150 和 200 的电机驱动端（A 端）表面有对中法兰和内螺纹孔（IM B14），便于安装在用户的各种生产机械上。轴高为 80 的电机采用对中法兰和过孔安装（IM B35）。1FW3 电机可以与 SINAMICS S1 0 驱动系统一起组成大功率，高性能的系统，可以根据需要来选择用于速度控制和位置控制的集成编码器系统。其特点：结构精简，扭矩大；过负载能力强；驱动无弹性；无转矩反冲；高效性；转动惯量小；通过法兰直接固定在机器上；转子为中空轴，便于灵活安装；机械损耗小；可以不经任何机械传动设备而直接驱动机器。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 100~ 7000 Nm。
- **转速：**140 ~ 750rpm。
- **应用范围：**
 - 挤压机驱动
 - 注塑机螺杆驱动
 - 金属拉伸机牵引辊驱动
 - 铸造机驱动
 - 动态定位、转盘、旋转传送带

- 纸机的传动辊
- 替代液压驱动
- 切割、裁断机械驱动
- 拉丝机
- 切割机

• 速度转矩特性曲线:

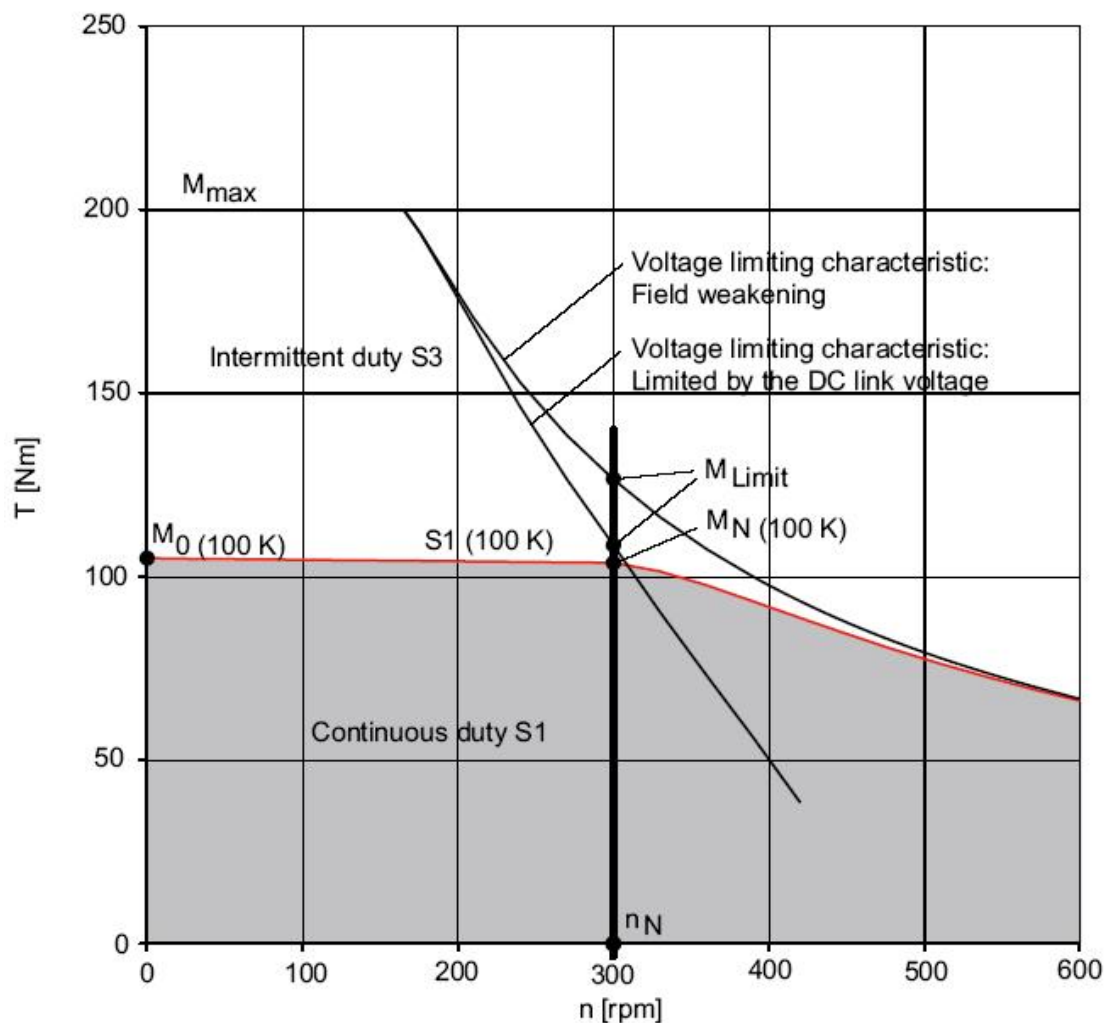


图 3.20 1FW3 水冷扭矩电机的特性曲线

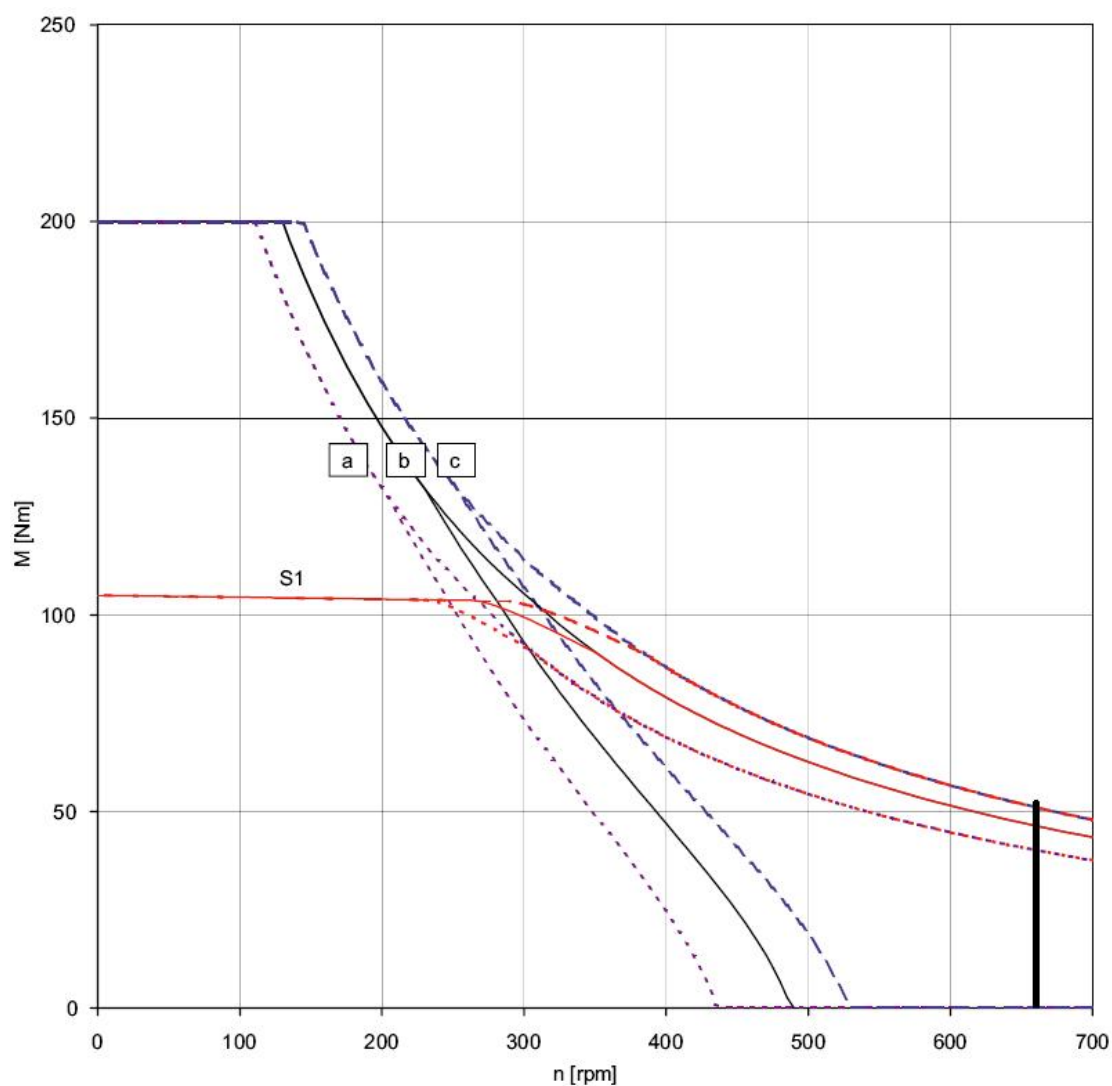
以 1FW3150，额定转速 300 rpm 的电机为例，技术数据如下表：

技术数据	缩写符号	单位	1FW3150-1×H
额定转速	n_N	rpm	300
极点数	2p		14
额定扭矩	M_N	Nm	100

额定功率	P_N	kW	3.1
额定电流	I_N	A	8.0
静态扭矩 (100K)	M_0 (100 K)	Nm	105
最大允许转速 (机械)	$n_{\text{最大}}$	rpm	1700
最大扭矩	$M_{\text{最大}}$	Nm	200
峰值电流	$I_{\text{最大}}$	A	17

表 3.4 1FW3150 (额定转速 300 rpm) 电机技术数据

电机在恒定负载连续运行状态和 S3 状态 (负载工作周期 1min) 下的负载特性曲线, 如下图所示:



[a] SINAMICS S120 SLM / BLM / PM340, $V_{\text{line rms}} = 400 \text{ V}$

[b] SINAMICS S120 ALM, $V_{\text{line rms}} = 400 \text{ V}$

[c] SINAMICS S120 SLM / BLM / PM340, $V_{\text{line rms}} = 480 \text{ V}$

图 3.21 1FW3150 (额定转速 300 rpm) 水冷扭矩电机的特性曲线

3.5 西门子异步伺服电机

3.5.1 1PH7 电机



图 3.22 1PH7 异步伺服电机

- **描述：**1PH7 交流电机是紧凑、强制风冷型鼠笼异步电机，保护等级为 IP55。电机是通过一个独立安装的风扇单元散热。电机订货时可以选择吹风从电机驱动端（DE）到电机非驱动端（NDE）或者相反。1PH7 电机为连接变频器采用了特殊的设计，根据控制要求，可以选择合适的编码器，用于检测电机的速度和位置。其特点：电机尺寸小，功率密度高；保护等级高；调速范围宽；转矩不受速度影响；鲁棒性好；可用于高悬臂力负载；即使在最低速度，也能达到高旋转精度；集成编码器系统来检测电机速度，通过插头或 DRIVE-CLiQ 接口来连接；端子盒连接功率电缆；KTY 84 监测电机温度；多种冷却方式；可选带有多润滑部件的轴承和绝缘轴承（NDE）。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 22~ 2480 Nm。
- **转速：**400 ~ 2900rpm（额定值）
- **应用范围：**
 - 安装于干燥区域（无腐蚀性气体）
 - 起重机系统：起重机启动、停止传动装置；港口的提升和传输装置
 - 印刷行业：印刷机械的单轴或多轴的主驱动

- 橡胶、塑料、金属丝和玻璃制造业：挤压机、压光机和橡胶挤压机驱动；一般应用，如蛇形管和卷纸机驱动

- 速度转矩特性曲线：

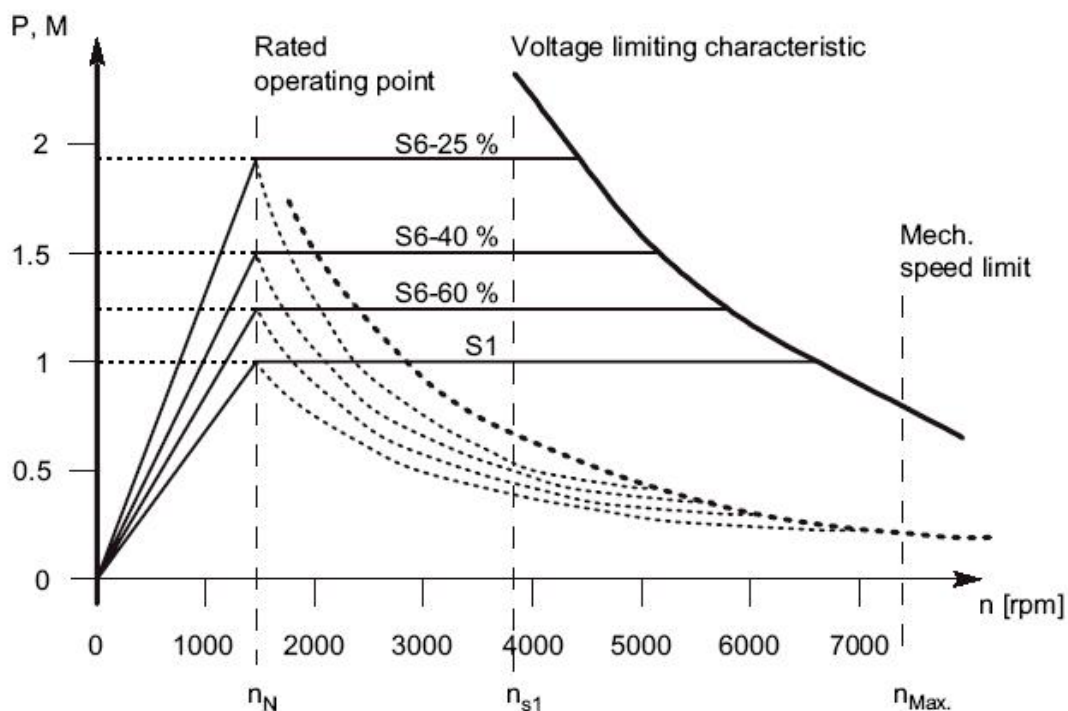


图 3.23 1PH7 异步伺服电机的特性曲线

注意：

- 1) n_2 （弱磁转速）：在弱磁区，恒定负载达到额定功率时，所允许的最大速度。
- 2) S1：恒定负载条件下，连续运行的负载特性。
- 3) S6：以特定的占空比周期性运行的负载特性。

以 1PH7101— $\times\times F\times\times$ 电机为例，电机在恒定负载连续运行状态和 S6 状态（负载工作周期 10min）下的负载特性曲线，如下图所示：

技术数据	缩写符号	单位	— $\times\times F\times\times$
额定转速	n_N	Rpm	1500
极点数	2p		6
额定扭矩	M_N	Nm	23.6
额定电流	I_N	A	10.0
额定频率	f_N	Hz	51.6
弱磁转速	n_2	rpm	5360
最大允许转速	$n_{最大}$	rpm	9000

表 3.5 1PH7101— $\times\times F\times\times$ 电机技术数据

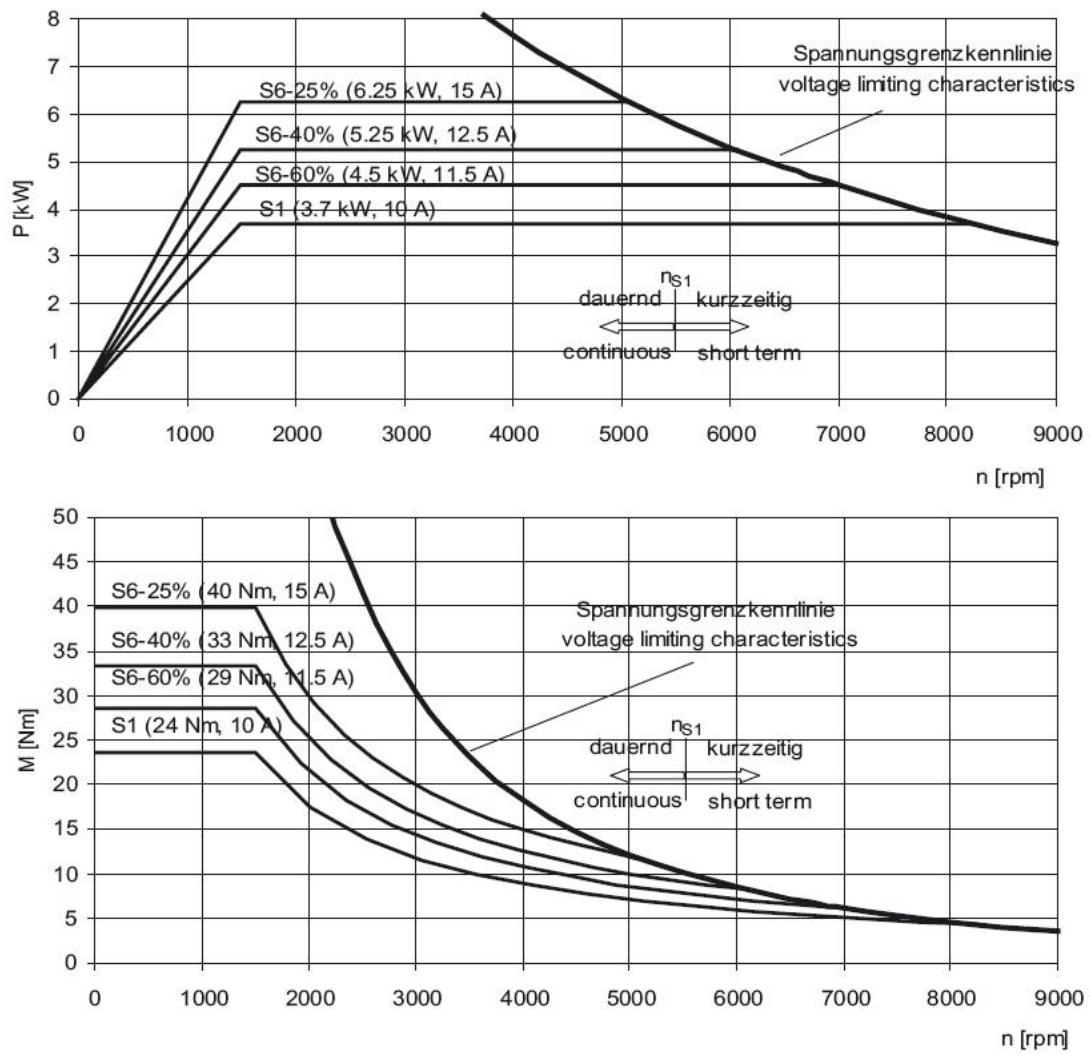


图 3.24 1PH7101— $\times\times F\times\times$ 异步伺服电机的特性曲线

3.5.2 1PL6 电机



图 3.25 1PL6 异步伺服电机

- **描述：**1PL6 交流电机是配有鼠笼式转子的强制或密闭风冷型异步电机，结构紧凑，防护等级 IP23。可使用安装的外置风扇对电机进行冷却。其特点：极高的功率密度，结构紧凑（与防护等级为 IP 55 的 1PH7 电机相比，功率可提高 50% 至 60%）；无需降低转矩，即可减速到零；可靠；轴承可承受大悬臂负荷；极低速度下亦能实现高旋转精度；集成编码器系统，用于检测电机转速，使用连接器或 Drive-CLiQ 接口连接。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 370~ 3600 Nm。
- **转速：**400 ~ 2900rpm（额定值）
- **应用范围：**
 - 用于干燥环境中室内安装（没有腐蚀性空气）；
 - 吊车系统：用于吊车的升降和关闭机构；
 - 印刷行业：用于印刷机的主驱动器；
 - 橡胶、塑料和电线生产：挤出机、压延机、橡胶射出成型机、薄膜加工机、剪羊毛机的；
 - 驱动拉丝机、电缆绞线机等；
 - 一般用途，如绞车和绕线机驱动。

3.5.3 1PH4 电机



图 3.26 1PH4 异步伺服水冷电机

- **描述：**1PH4 系列交流电机是配有鼠笼式转子的水冷型异步电机，结构紧凑，防护等级高。专门设计用于与 SINAMICS S120 变频器配套使用，功率损耗和噪音可降至最低。根据控制要求，可提供相应的电机编码器系统，以检测电机转速和运行位置。其特点：功率密度高，电机尺寸小；高防护等级 IP65（轴输出端 IP55）；无需降低转矩，即可减速到零；噪音低；轴承可承受大悬臂负荷；可靠；转动精度高；集成编码器系统，可检测电机转速，使用连接器连接；最大允许水压 6 bar。
- **功率：**适应通用生产机械领域的功率（扭矩）范围 45~ 330Nm。
- **转速：**1500 ~ 2000rpm（额定值）
- **应用范围：**
 - 用于灰尘、脏污或腐蚀性环境中，不允许采用风冷。

4 系统的“眼睛”——编码器

编码器（Encoder）为传感器（Sensor）类的一种，主要用来检测机械运动的速度、位置、角度、距离或计数，除了应用在产业机械外，许多的电机控制（如伺服电机）均需配备编码器以供电机控制器作为换相、速度及位置的检测，所以应用范围相当广泛。

4.1 编码器概述



图 4.1 编码器

- 基本原理

编码器的原理：编码器是一种将角位移转换成一连串数字脉冲的旋转式传感器，这些脉冲可以用来控制角位移，若编码器与齿条或丝杠结合在一起使用，也可以用来控制直线位移。编码器中角位移的转换采用了光电扫描原理。读数系统是基于径向分度盘的旋转，分度盘是由交替的透光窗口和不透光窗口构成的。系统全部用一个红外光源垂直照射，光就把盘子和图像投射到接收器表面上，接受器覆盖着一层光栅，称为准直仪，它具有和光盘相同的窗口。接收器的工作是感受光盘转动所产生的光变化，然后将光变化转换成相应的电变化。

根据检测原理，编码器可分为光学式、磁式、感应式和电容式。根据其刻度方法及信号输出形式，分为增量式编码器和绝对式编码器。光电编码器是利用光栅衍射原理实现位移—数字变换的，因其结构简单、计量精度高、寿命长等优点，在精确定位、速度、长度、加速度、振动等方面得到广泛的应用。

4.2 旋转变压器

旋转变压器（resolver）是一种输出电信号与转子转角成某种函数关系的电感式角度传感元件。

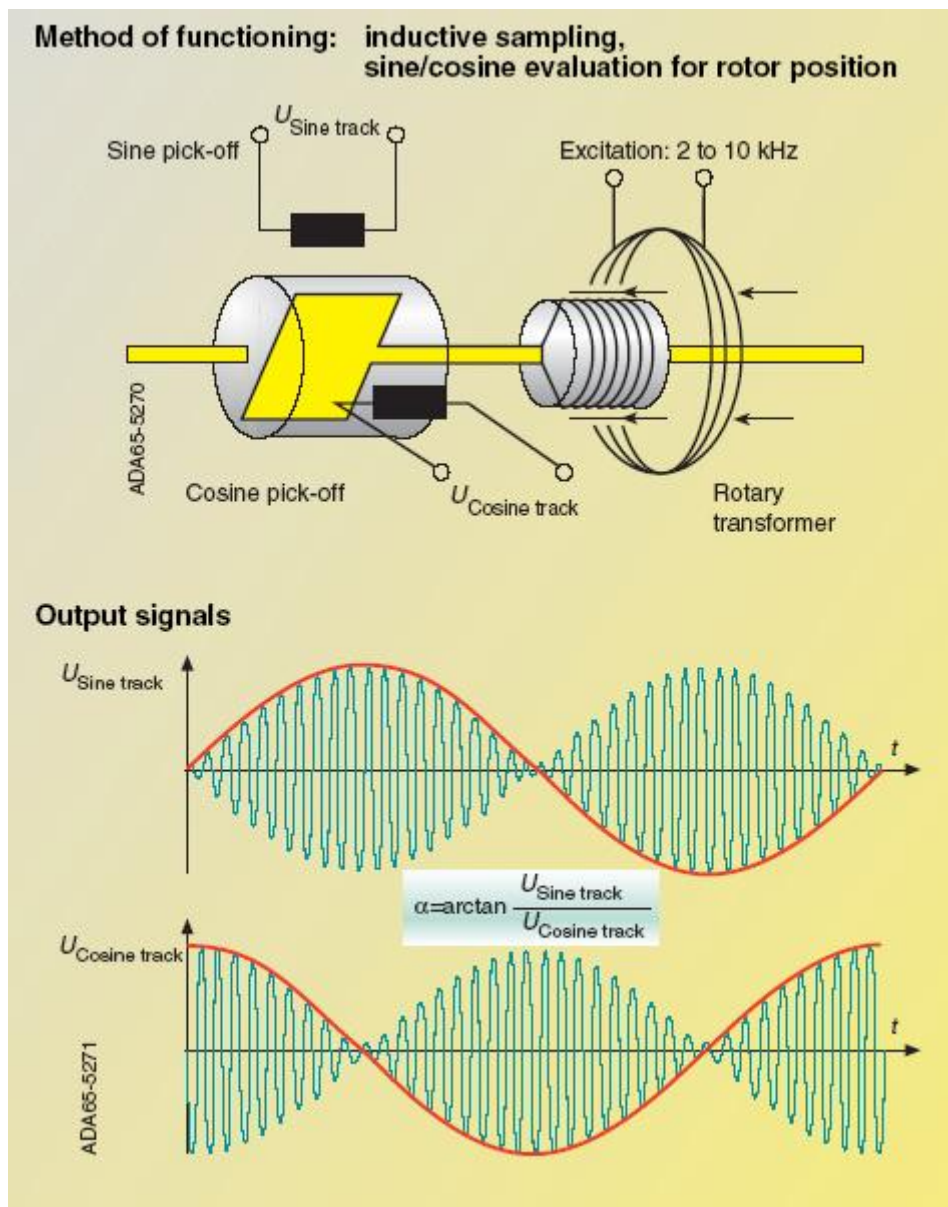


图 4.2 旋转变压器结构与输出信号

如图所示，旋转变压器（resolver）包含三个绕组，即一个转子绕组和两个定子绕组。转子绕组随电机旋转，定子绕组位置固定且两个定子互为 90 度角。这样，绕组形成了一个具有角度依赖系数的变压器。

将施加在转子绕组上的正弦载波耦合至定子绕组，对定子绕组输出进行与转子绕组角度相关的幅度调制。由于安装位置的原因，两个定子绕组的调制输出信号的相位差为 90 度。

通过解调两个信号可以获得电机的角度位置信息，首先要接收纯正弦波及余弦波，然后将其相除得到该角度的正切值，最终通过“反正切”函数求出角度值。由于一般情况下要使用 DSP 进行算术处理，因而需要将正弦及余弦波数字化。

4.3 增量式编码器

增量式编码器是将位移转换成周期性的电信号，再把这个电信号转变成计数脉冲，用脉冲的个数表示位移的大小。

- 特点

增量式编码器转轴旋转时，有相应的脉冲输出，其计数起点任意设定，可实现多圈无限累加和测量。编码器轴转一圈会输出固定的脉冲，脉冲数由编码器光栅的线数决定。需要提高分辨率时，可利用 90 度相位差的 A、B 两路信号进行倍频或更换高分辨率编码器。

旋转增量式编码器以转动时输出脉冲，通过计数设备来知道其位置，当编码器不动或停电时，依靠计数设备的内部记忆来记住位置。这样，当停电后，编码器不能有任何的移动，当来电工作时，编码器输出脉冲过程中，也不能有干扰而丢失脉冲，不然，计数设备记忆的零点就会偏移¹⁾，而且这种偏移的量是无从知道的，只有错误的生产结果出现后才能知道。

1) 解决的方法是增加参考点，编码器每经过参考点，将参考位置修正进计数设备的记忆位置。在参考点以前，是不能保证位置的准确性的。为此，在工控中就有每次操作先找参考点，开机找零等方法。

- 工作原理:

由一个中心有轴的光电码盘¹⁾，其上有环形通、暗的刻线、光电发射和接收器件读取，获得四组正弦波信号组合成A、B、C、D，每个正弦波相差 90 度相位差（相对于一个周波为 360 度），将C、D信号反向，叠加在A、B两相上，可增强稳定信号；另每转输出一个Z相脉冲以代表零位参考位。

由于 A、B 两相相差 90 度，可通过比较 A 相在前还是 B 相在前，以判别编码器的正转与反转，通过零位脉冲，可获得编码器的零位参考位。

分辨率：编码器以每旋转 360 度提供多少的通或暗刻线称为分辨率，也称解析分度、或直接称多少线，一般在每转分度 5~10000 线。

信号输出:

1. 正弦波（电流或电压）
2. 方波（TTL、HTL）²⁾
3. 集电极开路（PNP、NPN）
4. 推拉式

信号连接：编码器的脉冲信号一般连接计数器、PLC、计算机，PLC 和计算机连接的模块有低速模块与高速模块之分，开关频率有低有高。

1. 单相联接，用于单方向计数，单方向测速。
2. A、B 两相联接，用于正反向计数、判断正反向和测速。
3. A、B、Z 三相联接，用于带参考位修正的位置测量。
4. A、A-，B、B-，Z、Z-连接，由于带有对称负信号输出，电流对电缆贡献的电磁场为 0，衰减最小，抗干扰最佳，可远距离传输³⁾。

1) 编码器码盘的材料有玻璃、金属、塑料，玻璃码盘是在玻璃上沉积很薄的刻线，其热稳定性好，精度高，金属码盘直接以通和不通刻线，不易碎，但由于金属有一定的厚度，精度就有限制，其热稳定性就要比玻璃的差一个数量级，塑料码盘是经济型的，其成本低，但精度、热稳定性、寿命均要差一些。

2) 其中，TTL 为长线差分驱动（对称 A、A-、B、B-、Z、Z-），HTL 也称推拉式、推挽式输出，编码器的信号接收设备接口应与编码器对应。

3) 对于 TTL 的带有对称负信号输出的编码器，信号传输距离可达 150 米。

对于 HTL 的带有对称负信号输出的编码器，信号传输距离可达 300 米。

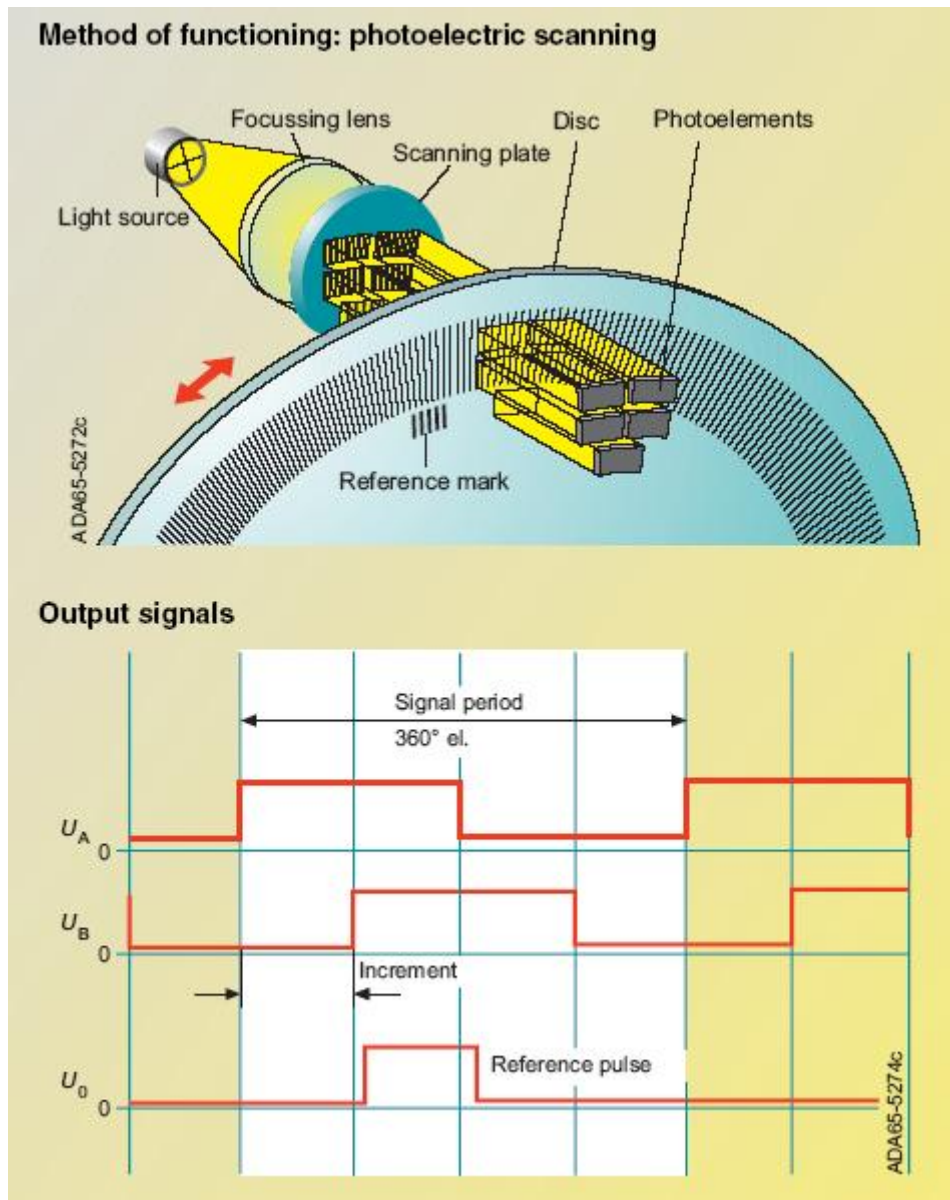


图 4.3 HTL 增量式编码器结构与输出信号

技术参数:

供电电压	+10 ... 30 V
输出信号	HTL track A、track B Zero pulse

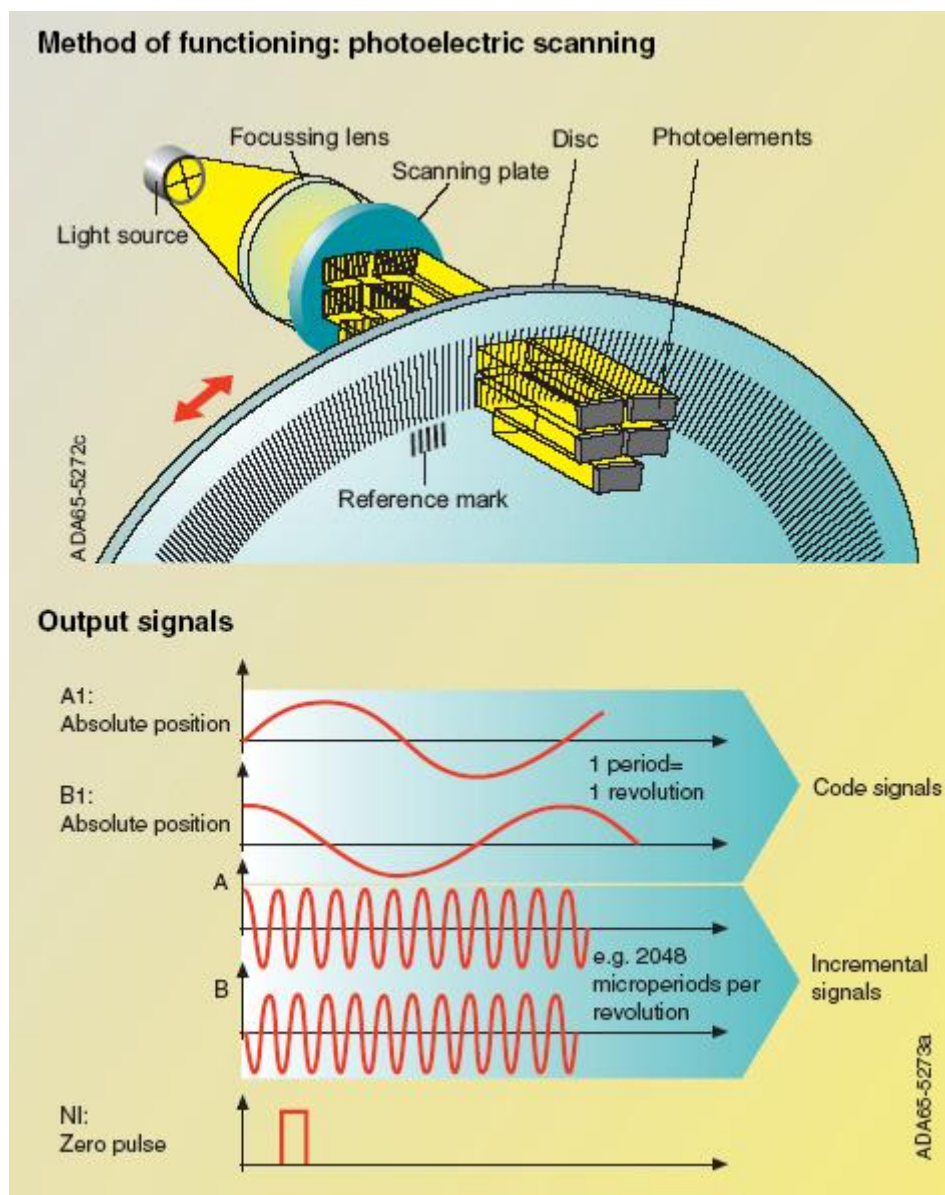


图 4.4 sin/cos $1V_{pp}$ 增量式编码器结构与输出信号

技术参数:

供电电压	+5 V \pm 5%
增量信号	电压: 1 V _{PP} PPR 分辨率: 2048

4.4 绝对式编码器

绝对编码器光码盘上有许多道光通道刻线，每道刻线依次以 2 线、4 线、8 线、16 线.....编排，这样，在编码器的每一个位置，通过读取每道刻线的通、暗，获得一组从 2 的零次方到 2 的 $n-1$ 次方的唯一的 2 进制编码（格雷码），这就称为 n 位绝对编码器。这样的编码器是由光电码盘的机械位置决定的，它不受停电、干扰的影响。

绝对编码器由机械位置决定的每个位置是唯一的，它无需记忆，无需找参考点，而且不用一直计数，什么时候需要知道位置，什么时候就去读取它的位置。这样，编码器的抗干扰特性、数据的可靠性大大提高了。

从单圈绝对值编码器到多圈绝对值编码器。旋转单圈绝对值编码器，以转动中测量光电码盘各道刻线，以获取唯一的编码，当转动超过 360 度时，编码又回到原点，这样就不符合绝对编码唯一的原则，这样的编码只能用于旋转范围 360 度以内的测量，称为单圈绝对值编码器。

如果要测量旋转超过 360 度范围，就要用到多圈绝对值编码器。编码器生产厂家运用钟表齿轮机械的原理，当中心码盘旋转时，通过齿轮传动另一组码盘（或多组齿轮，多组码盘），在单圈编码的基础上再增加圈数的编码，以扩大编码器的测量范围，这样的绝对编码器就称为多圈式绝对编码器，它同样是由机械位置确定编码，每个位置编码唯一不重复，而无需记忆。多圈编码器另一个优点是由于测量范围大，实际使用往往富裕较多，这样在安装¹⁾时不必要费劲找零点，将某一中间位置作为起始点就可以了，而大大简化了安装调试难度。

1) 绝对式（旋转）编码器的机械安装

高速端安装：安装于动力电机转轴端（或齿轮连接），此方法优点是分辨率高，由于多圈编码器有 4096 圈，电机转动圈数在此量程范围内，可充分用足量程而提高分辨率，缺点是运动物体通过减速齿轮后，来回行程有齿轮反向间隙误差，一般用于单向高精度控制定位，例如轧钢的辊缝控制。另外编码器直接安装于高速端，电机抖动须较小，不然易损坏编码器。

低速端安装：安装于减速齿轮后，如卷扬钢丝绳卷筒的轴端或最后一节减速齿轮轴端，此方法已无齿轮来回程间隙，测量较直接，精度较高，此方法一般测量长距离定位，例如各种提升设备，送料小车定位等。

辅助机械安装：常用的有齿轮齿条、链条皮带、摩擦转轮、收绳机械等。

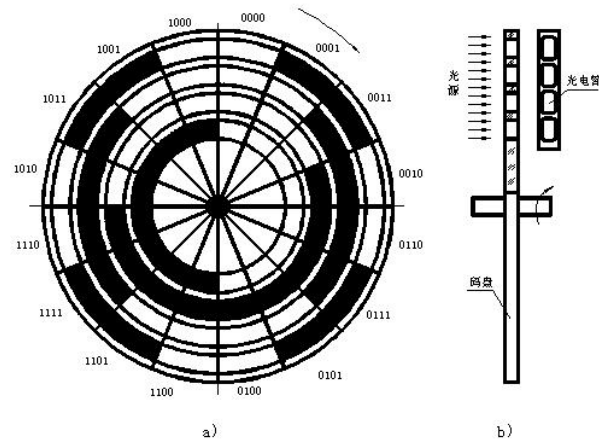


图 4.5 格雷码盘

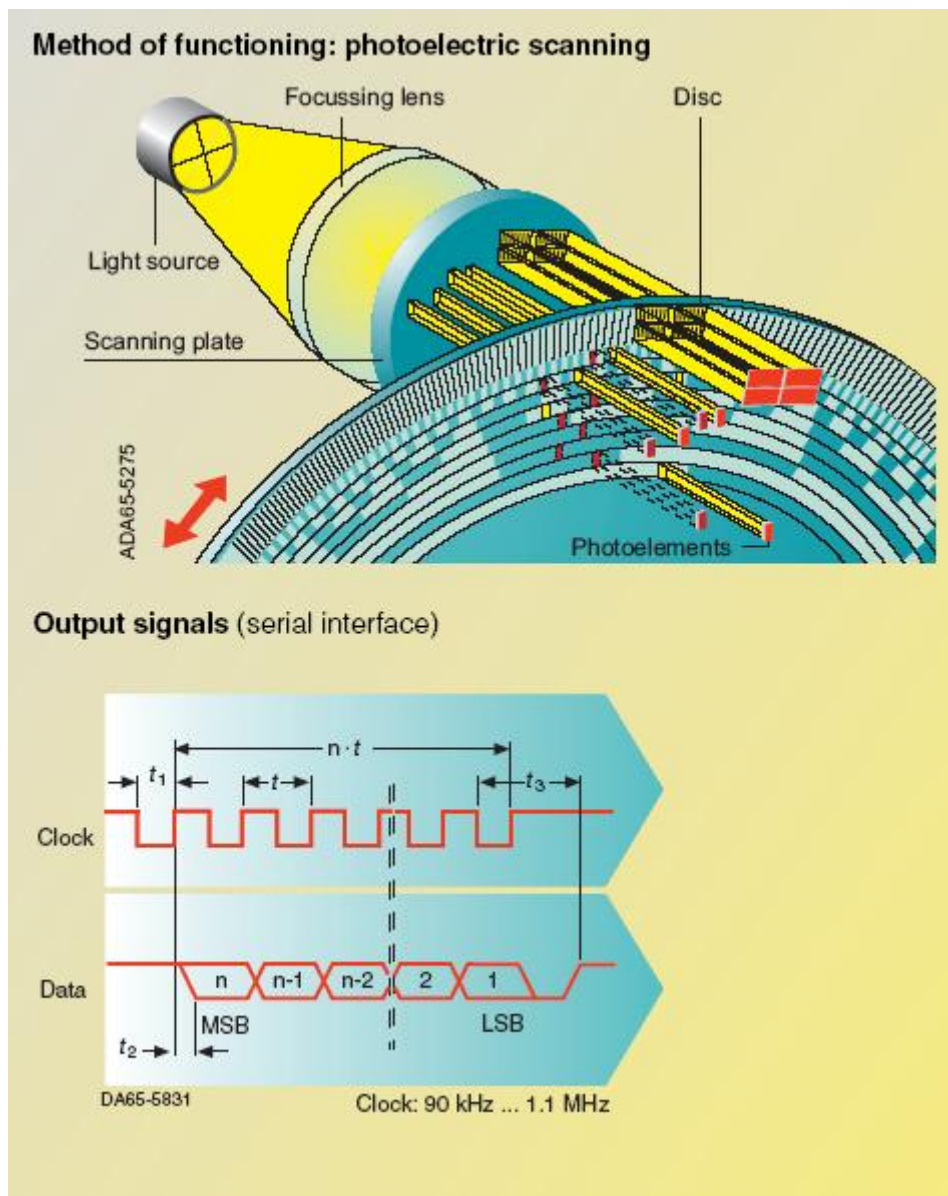


图 4.6 绝对式编码器结构与输出信号

5 系统的执行器——变频器

变频器是利用电力半导体器件的开关通断作用将工频电源变换为另一频率的电能量控制装置。为了产生可变的电压和频率，首先要把三相或单相交流电变换为直流电（DC），再把直流电（DC）变换为三相或单相交流电（AC），我们把实现这种转换的装置称为“变频器”（inverter）。

5.1 变频器概述

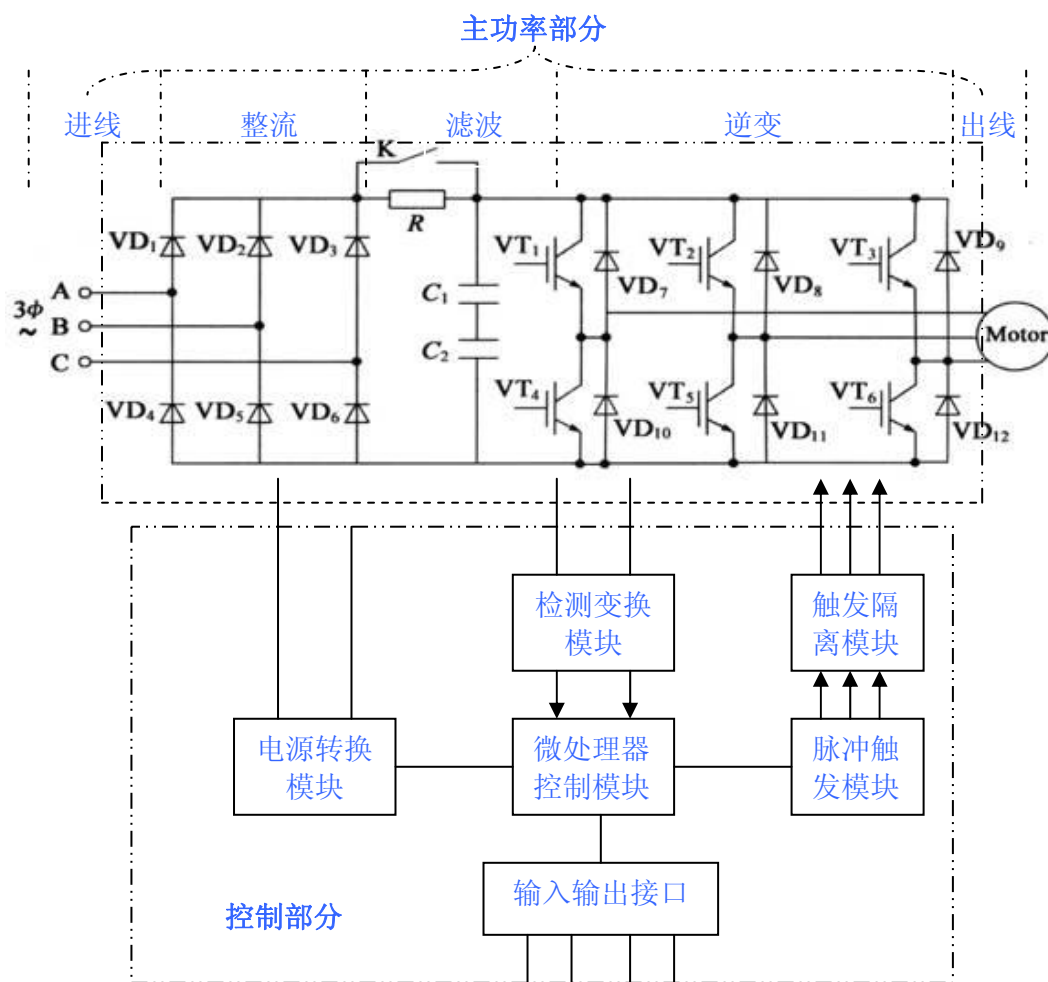


图 5.1 变频器的基本结构

变频器的结构主要包括主功率部分和控制部分。主功率电路大体上又可分为电压型和电流型两类：电压型是将电压源的直流变换为交流的变频器，直流

回路的滤波是电容；电流型是将电流源的直流变换为交流的变频器，其直流回路滤波是电感。目前应用最多是电压型变频器。

1. 整流电路

整流电路 (Rectifying Circuit)，把交流电能转换为直流电能的电路。大多数整流电路由整流主电路、电抗器和滤波器等组成。主电路多用硅整流二极管和晶闸管组成；滤波器接在主电路与负载之间，用于滤除脉动直流电压中的交流成分；电抗器的作用是实现交流输入电压与直流输出电压间的匹配以及交流电网与整流电路之间的电隔离（可以减小电网与电路间的电干扰和故障影响）。

整流电路按其组成器件可分为**不控整流电路**、**半控整流电路**和**全控整流电路**。后两种电路按其控制方式又可分为**相控整流电路**和**斩波整流电路**。

相控整流电路由于采用电网换相方式，不需要专门的换相电路，因而电路简单、工作可靠，得到广泛应用。但相控整流电路在控制角 α 较大时，功率因数较低，网侧电流谐波含量较大。因而在大功率调速传动中，低速运行时，采用斩控整流电路可解决功率因数变坏的问题。

2. 逆变电路

逆变电路，将直流电能变换为交流电能的变换电路。逆变电路是通用变频器核心部件之一，起着非常重要的作用。它的基本作用是在控制电路的控制下将直流母线上输出的直流电转换为频率和电压都任意可调的交流电。

为了满足不同用电设备对交流电源性能参数的不同要求，目前已发展了多种逆变电路，并大致可按以下方式分类：

- 按输出电能的去向
 - 有源逆变，将直流电变成和电网同频率的交流电反送到电网中。
 - 无源逆变，将直流电变成为某一频率或可变频率的交流电直接供负载使用。

- 按直流电源的性质
 - 电压型逆变电路，又叫电压源型逆变电路（Voltage Source Type Inverter），其特点：直流侧为电压源或并联大电容，直流侧电压基本无脉动；输出电压为矩形波，输出电流因负载阻抗不同而不同；阻感负载时需要提供无功功率，为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通路，逆变桥各臂开关器件需并联反馈二极管。
 - 电流型逆变电路，又叫电流源型逆变电路（Current Source Type Inverter），其特点：直流侧串有大电感，电流基本无脉动，相当于电流源；交流侧输出电流为矩形波，与负载阻抗角无关，输出电压波形和相位因负载不同而不同；直流侧电感起缓冲无功能量的作用，不必给开关器件反并联二极管；多采用半控型器件，换向方式有负载换向、强迫换向。
- 按主电路的器件
 - 全控型逆变电路，具有自关断能力的全控型器件组成的逆变电路。
 - 半控型逆变电路，由无关断能力的半控型器件组成的逆变电路，必须利用换流电压以关断导通的器件。若换流电压取自逆变的负载端，称为负载换流式逆变电路，仅适用于容性负载；对于非容性负载，换流电压由辅助的专门换流电路产生，称自换流式逆变电路。
- 按电流波形
 - 正弦逆变电路，开关器件中的电流为正弦波，其开关损耗较小，宜工作于较高频率。
 - 非正弦逆变电路，开关器件中的电流为非正弦波，因其开关损耗较大，故工作频率比正弦逆变电路低。
- 按输出相数
 - 单相逆变电路
 - 多相逆变电路

目前，应用最广的逆变电路是**三相桥式电压源型逆变电路**。

3. PWM 控制技术

PWM 控制技术一直是变频技术的核心技术之一。1964 年 A.Schonung 和 H.stemmler 首先提出把这项通讯技术应用到交流传动中，从此为交流传动的推广应用开辟了新的局面。从最初采用模拟电路完成三角调制波和参考正弦波比较，产生正弦脉宽调制 SPWM 信号以控制功率器件的开关开始，到目前采用全数字化方案，完成优化的实时在线的 PWM 信号输出，可以说到目前为止，PWM 在各种应用场合仍在主导地位，并一直是人们研究的热点。

脉宽调制 PWM 技术 (Pulse Width Modulation) 是利用微处理器的数字输出来对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术，广泛应用在从测量、通信到功率控制与变换的诸多领域中。简言之，PWM 是一种对模拟信号电平进行数字编码的方法。

通过高分辨率计数器的使用，方波的占空比被调制用来对一个具体模拟信号的电平进行编码。PWM 信号仍然是数字的，因为在给定的任何时刻，满幅值的直流供电要么完全高电平 (ON)，要么完全抵电平 (OFF)。电压或电流源是以一种通 (ON) 或断 (OFF) 的重复脉冲序列被加到模拟负载上去的。只要带宽足够，任何模拟值都可以使用 PWM 进行编码。

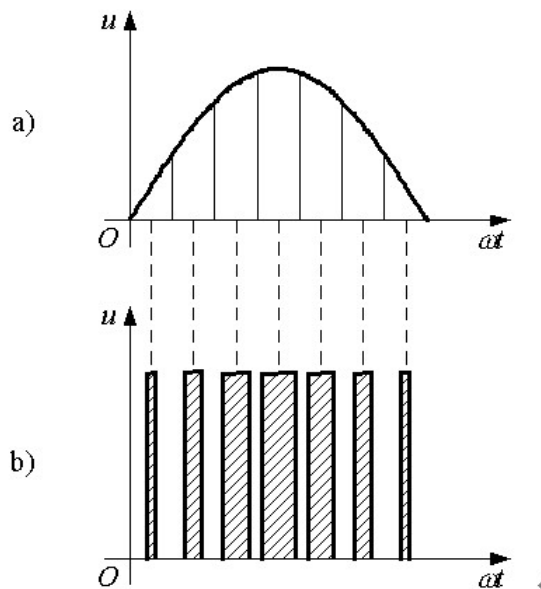


图 5.2 PWM 脉宽调制技术

采样控制理论中有一个重要结论：**冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。**PWM 控制技术就是以该结论为理论基

础，对半导体开关器件的导通和关断进行控制，使输出端得到一系列幅值相等而宽度不相等的脉冲，用这些脉冲来代替正弦波或其他所需要的波形。按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制，既可改变逆变电路输出电压的大小，也可改变输出频率。

PWM 控制技术的优点：

- 使用PWM控制，从处理器到被控系统信号都是数字形式的，无需进行数模转换，使信号保持为数字形式可将噪声¹⁾影响降到最小。
- 对噪声抵抗能力的增强，是 PWM 控制技术相对于模拟控制的另外一个优点。从模拟信号转向 PWM 可以延长数据通信的距离，在接收端通过适当的 RC、LC 网络可以滤除调制高频方波并将信号还原为模拟形式。

4. 开关频率

变频器大多是采用 PWM 调制的形式工作的，也就是说变频器输出的电压其实是一系列的脉冲，脉冲的宽度和间隔均不相等，其大小就取决于调制波和载波的交点，也就是开关频率。

开关频率越高，一个周期内脉冲的个数就越多，电流波形的平滑性就越好，但是对其它设备的干扰也越大。载波频率越低或者设置的不好，电机就会发出难听的噪音。

- 提高开关频率对电机噪声的影响

在PWM变频器工作时，会产生电磁噪声²⁾，这是由电压脉冲造成的附加电压/电流谐波。实际噪声取决于PWM调制方式、开关频率、电机极对数等。

在 SINAMICS 系列的工厂设置下，附加噪声处于 5dB，最高至 10dB。一个 2kHz 开关频率的变频器产生的噪声要比 1.25kHz 的变频器产生的小一些。噪声到达 15dB 是很少发生的，除非与外部设备发生机械共振。

通过提升开关频率降低电机噪声。在提升开关频率的同时，电流要降容，同时对输出侧元件有影响，比如滤波器，dv/dt 滤波器（VPL，Voltage Peak Limiter，电压尖端限幅），正弦波滤波器等。

1) 噪声只有在强到足以将逻辑电平 1 改变为逻辑电平 0 或将逻辑电平 0 改变为逻辑电平 1 时，也才能对数字信号产生影响。

2) 根据 DIN VDE 0530 或 IEC 60034-17，A 级噪声压力等级增加应在 5dB 至 15dB。

5.2 开关器件

1. 开关器件分类

- 按其开关控制性能分类：
 - 不控型器件 —— 不能用控制信号控制其通断的器件，不需要驱动电路，如（Power Diode）电力二极管。
 - 半控型器件 —— 通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的器件，如（Thyristor）晶闸管。
 - 全控型器件 —— 通过控制信号既可以控制其导通又可以控制其关断德器件，又称自关断器件，如 GTO、GTR、IGBT、MOSFET。
- 按器件内载流子参与与导电的种类分类：
 - 单极型器件 —— 开关时间短、输入阻抗高（电压型控制），电流具有负的温度特性，二次击穿的可能小。通态压升高、电压和电流定额较小，如MOSFET、SIT¹⁾。
 - 双极型器件 —— 通态压降低、阻断电压高、电流容量大，如 SCR、GTO、GTR、SITH²⁾ 等。
 - 复合型器件 —— 既有电流密度高、导通压降低的优点，又又输入阻抗高、响应速度快的优点，如 IGBT、MCT 等。
- 按驱动电路信号的性质分类：
 - 电流驱动型 —— 通过从控制端注入或抽出电流来实现导通和关断的器件，如 GTO、GTR。其特点：具有电导调制效应，通态压降低，导通损耗小，但工作频率较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂。
 - 电压驱动型 —— 通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可以实现导通或关断的控制，如 IGBT、MOSFET 等。其特点：输入阻抗高，所需的驱动功率小，驱动电路简单，工作频率高。

1) SIT 为静电感应晶体管，截至频率可达成 30-50MHz，耗散功率可达几千瓦，适用于高音质音频放大器。

2) SITH 为静电感应晶闸管也称为场控晶闸管，是目前开发研究的速度最快的晶闸管，在交流调速和开关电源等均有广泛应用，但工艺比较复杂。

2. 电力二极管

主要类型：普通二极管、快恢复二极管 FRD (Fast Recover Diode) 和肖特基二极管 SDB (Schottky Barrier Diode)。

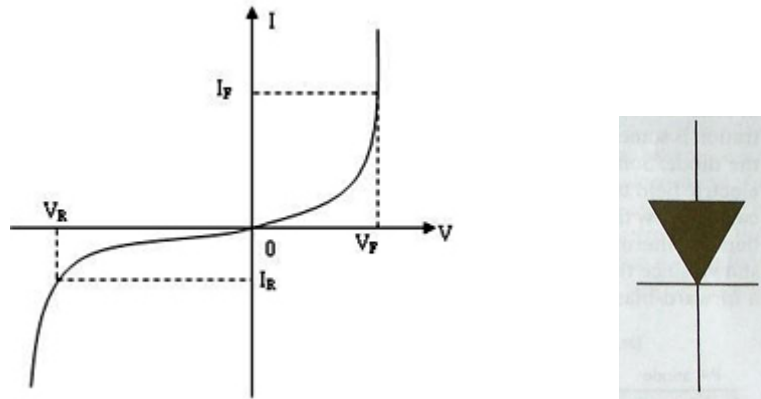


图 5.3 二极管的伏安特性曲线及符号

- 正向特性

在电子电路中，将二极管的正极接在高电位端，负极接在低电位端，二极管就会导通，这种连接方式，称为正向偏置。当加在二极管两端的正向电压很小时，二极管仍然不能导通，流过二极管的正向电流十分微弱。只有当正向电压达到某一数值（这一数值称为“门槛电压”，锗管约为 0.2V，硅管约为 0.6V）以后，二极管才能真正导通。导通后二极管两端的电压基本上保持不变（锗管约为 0.3V，硅管约为 0.7V），称为二极管的“正向压降”。

- 反向特性

在电子电路中，二极管的正极接在低电位端，负极接在高电位端，此时二极管中几乎没有电流流过，此时二极管处于截止状态，这种连接方式，称为反向偏置。二极管处于反向偏置时，仍然会有微弱的反向电流流过二极管，称为漏电流。当二极管两端的反向电压增大到某一数值，反向电流会急剧增大，二极管将失去单方向导电特性，这种状态称为二极管的击穿。

Power Diode 结构和原理简单，工作可靠，其中快恢复二极管和肖特基二极管，分别在中、高频整流和逆变以及低压高频整流的场合，具有不可替代的地位。

3. 晶闸管

晶闸管（Thyristor），又叫作可控硅整流器（Silicon Controlled Rectifier —— SCR）。其外形有螺栓型、平板型、盘式晶闸管。螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密联接且安装方便。平板型晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。

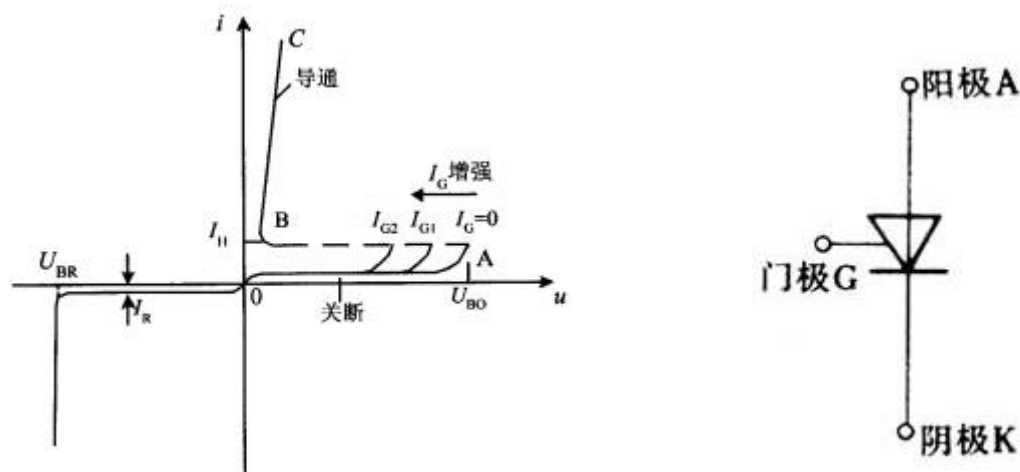


图 5.4 晶闸管的伏安特性曲线及符号

晶闸管的正向特性：

- $I_G = 0$ 时，器件两端施加正向电压，只有很小的正向漏电流，为正向阻断状态；
- 正向电压超过正向转折电压 U_{BO} ，则漏电流急剧增大，器件导通；
- 随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低；
- 晶闸管本身的压降很小，在 1V 左右。

晶闸管的反向特性：

- 反向特性类似二极管的反向特性；
- 反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流流过；
- 当反向电压达到反向击穿电压后，可能导致晶闸管发热损坏。

晶闸管的派生器件有：

- 快速晶闸管（开关频率高，电压电流定额不易做高）
- 双向晶闸管（反并联的普通晶闸管的集成，一、三象限伏安特性对称）
- 逆导晶闸管（正向压降小、关断时间短、高温特性好、定额结温高）
- 光控晶闸管（利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管，绝缘好）

总体来说，晶闸管的优点：能够承受的电压和电流容量高，工作可靠，在大容量的场合具有重要地位。

4. 门极可关断晶闸管

门极可关断晶闸管 GTO (Gate-Turn-Off Thyristor) 是晶闸管的一种派生器件，与普通的晶闸管在结构上相同，都是 PNP 四层半导体结构，外部引出阳极、阴极和门极，所不同的是 GTO 是一种多元的功率集成器件。其特点：可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断，GTO 的电压、电流容量较大，与普通晶闸管接近，因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。

5. 电力晶体管

电力晶体管 GTR (Giant Transistor)，直译为巨型晶体管，与普通的双极结型晶体管基本原理是一样的，主要特性是耐压高、电流大、开关特性好，通常采用至少由两个晶体管按达林顿接法组成的单元结构。在应用中，GTR 一般采用共发射极接法。

6. 电力场效应晶体管

电力场效应晶体管分为结型和绝缘栅型，通常主要指绝缘栅型中的 MOS 型（Metal Oxide Semiconductor FET），简称电力 MOSFET（Power MOSFET），而结型电力场效应晶体管一般称作静电感应晶体管（Static Induction Transistor——SIT）。

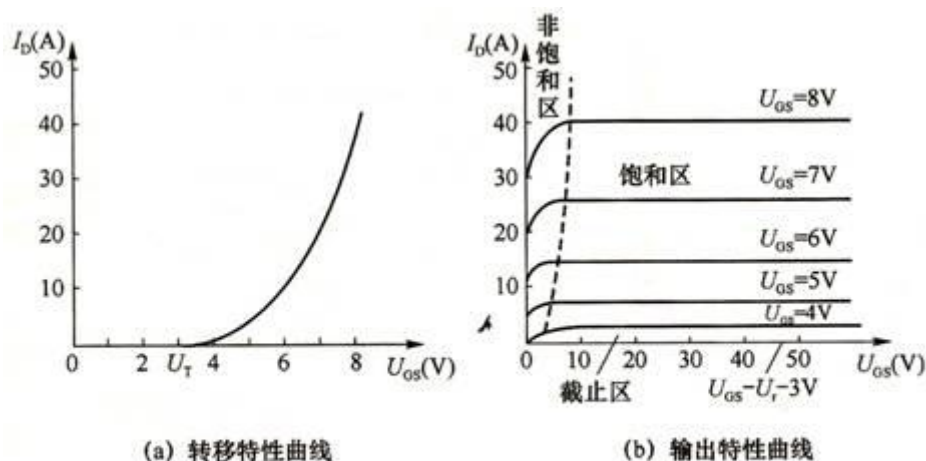


图 5.5 电力场效应管的特性曲线及符号

其特点：

- 用栅极电压来控制漏极电流；
- 驱动电路简单，所需的驱动功率小；
- 开关速度快，工作频率高；
- 热稳定性优于 GTR；
- 电流容量小，耐压低，适用于功率不超过 10kW 的电力电子装置。

导电机理与小功率 MOS 管相同，但结构上有较大区别。开关频率越高，所需的驱动功率就越大，按导电沟道分为 N 型和 P 型，电力 MOSFET 主要是 N 沟道增强型。

7. 绝缘栅双极晶体管

绝缘栅双极晶体管 IGBT (Insulated-gate Bipolar Transistor), 属于 MOSFET 和 GTR 相结合的产物, 兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点。由于 GTR 饱和压降低, 载流密度大, 但驱动电流较大; 而 MOSFET 驱动功率很小, 开关速度快, 但导通压降大, 载流密度小。IGBT 综合了以上两种器件的优点, 开关速度快, 开关损耗小, 通态压降低, 输入阻抗高, 驱动功率小而饱和压降低, 非常适合应用于直流电压为 600V 及以上的变流系统如交流电机、变频器、开关电源、牵引传动等领域。

IGBT 的三个极分别是集电极(C)、发射极(E)和栅极(G)。其特点: 击穿电压可达 1200V, 集电极最大饱和电流已超过 1500A。由 IGBT 作为逆变器件的变频器的容量达 250kVA 以上, 工作频率可达 20kHz。驱动原理与电力 MOSFET 基本相同, 场控器件, 通断由栅极电压决定。

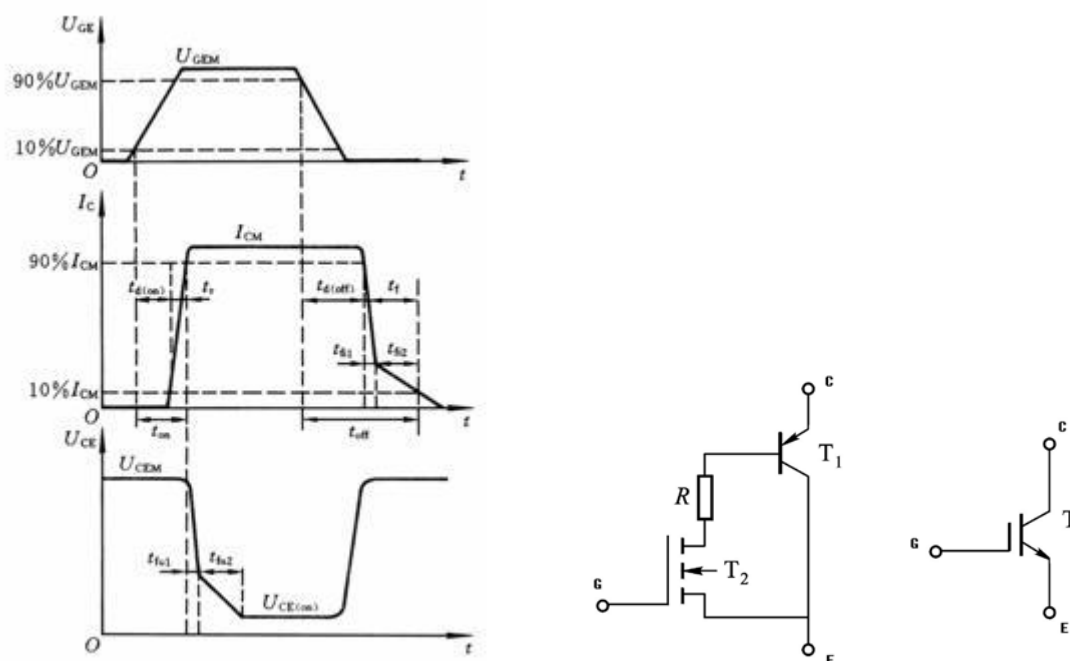


图 5.6 绝缘栅双极晶体管的动态特性曲线及符号

IGBT 模块由于具有多种优良的特性, 使它得到了快速的发展和普及, 已应用到电力电子的各方各面。例如, 西门子 SINAMICS S120 系列伺服驱动器中的整流单元电源模块 SLM 和 ALM 的主功率开关使用的就是 IGBT。

8. 其他新型电力电子器件与功率模块

- 集成门极换流晶闸管 IGCT (Integrated Gated-Commutated Thyristor)，结合了 IGBT 和 GTO 的优点，容量与 GTO 相当，开关速度快 10 倍，可省去 GTO 复杂的缓冲电路，驱动功率大。
- MOS 控制晶闸管 MCT (MOS Control Thyristor)
- 智能功率模块 IPM (Intelligent Power Module)

5.3 交-直-交变换器

变频器的基本结构有直-直变换器、交-交变换器和交-直-交变换器，其中最为常用的是交-直-交变换器，为了针对学习西门子的 SINAMICS S120 驱动器，本手册只介绍交-直-交变换器。

交-直-交变频器，是先把交流电经整流器整流成直流电，直流中间电路对整流电路的输出进行平滑滤波，再经过逆变器把这个直流电变成频率和电压都可变的交流电。交-直-交变频器又叫做间接交流变换器。

间接交流变换电路的逆变部分多采用 PWM 控制。当负载为电机时，通常要求电机能够四象限运行，要求间接交流变换器具有再生反馈电网的能力，要求输出电压的大小和频率可调。

如图 5.7 (a) 所示，不能再生反馈的电压型间接变换器的整流部分采用的是不可控整流，它只能由电源向直流电路输送功率，而不能反馈电网。图中逆变电路的能量是可以双向流动的，若负载能量反馈到中间直流电路，将导致电容电压升高，成为泵升电压。带有泵升电压限制电路的电压型间接交流变换电路，在实际应用中要接入制动单元和制动电阻，如图 5.7 (b) 所示，带有制动回馈的电路，当泵升电压超过一定数值时，使 V_o 导通，把从负载反馈的能量消耗在电阻 R_o 上。在西门子变频器应用中， V_o 为制动单元， R_o 为制动电阻， V_o 与 R_o 构成了制动部分。如图 5.7 (c) 所示的电路，整流和逆变构成完全相同，均采用 PWM 控制，能量可双向流动。输入输出电流均为正弦波，输入功率因数高，可实现电机的四象限运行。如图 5.7 (d) 所示的电路，利用可控变流

器实现再生反馈，增加有晶闸管构成的可控变流电路，当负载回馈能量时，可控变流器工作于有源逆变状态，将电能反馈回电网。

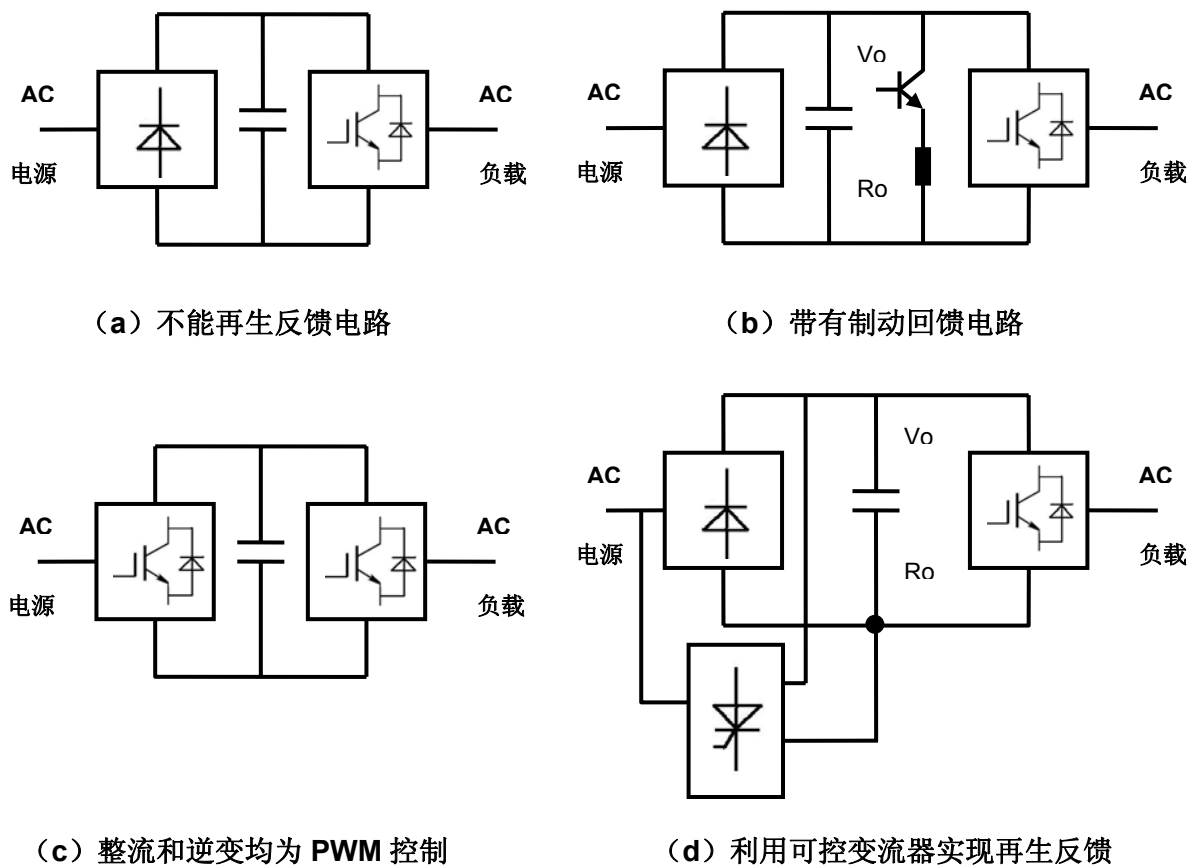


图 5.7 电压型交-直-交变换电路

5.4 变频器的主要外围部件

1. 网侧进线滤波器

网侧进线滤波器，其作用是减小了将用于工业电网的较大容量的变频器、整流单元和整流/回馈单元所出现的无线电干扰电压，主要抑制高频（10K~10MHz）谐波干扰。应用于 EMC 要求比较高的场合，如海上平台或变频器置于住宅环境中。其功率等级为 200-1600Kw，只能用于 TN 网络，防护等级为 IP00。



图 5.8 网侧进线滤波器

2. 网侧进线电抗器

网侧进线电抗器减小了变频器、整流单元和整流/回馈单元的低频谐波电流进入电网，也减小了换向缺口。电抗器的作用同电网短路功率和传动装置功率之比有关。电网短路功率同传动装置功率之比推荐) **33: 1**。进线电抗器也能抑制由于电源电势的突降（如由于补偿设备或接地故障）而产生的电流冲击。



图 5.9 网侧进线电抗器

3. 输出侧滤波器

输出滤波器用于补偿长导线时的容性再充电电流，及限制在相应电机导线长度下在电机端子上的 dv/dt 。电压限制滤波器（输出 dv/dt 滤波器）用于未知

或未达到绝缘系统电压强度的电机，可用于最大频率为 300Hz。dv/dt 滤波器只能用来与电机连接。



图 5.10 输出侧 dv/dt 滤波器

4. 输出侧正弦滤波器

输出侧正弦滤波器的作用是使流过所供电的电机的电压和电流近似于正弦波。在电机电压为 50Hz 时使用正弦滤波器其畸变系数约为 5%。当使用正弦波滤波器时，电机可以获得近似正弦电压和正弦电流。



图 5.11 输出侧正弦滤波器

5.5 变频器的散热问题

要正确的使用变频器，必须认真地考虑散热的问题。变频器的故障率随温度升高而成指数的上升，使用寿命随温度升高而成指数的下降，环境温度升高

10 度，变频器使用寿命减半。在变频器工作时，流过变频器的电流很大，变频器产生的热量也是非常大，不能忽视其发热所产生的影响。

通常情况下，变频器安装在控制柜中，要了解一台变频器的发热量大概是多少，可以用以下公式估算：

$$\text{发热量的近似值} = \text{变频器容量 (KW)} \times 55 \text{ [W]}$$

- 如变频器带有直流电抗器或交流电抗器，并且也在柜子里面，这时发热量会更大一些，电抗器安装在变频器侧面或侧上方比较好。
- 如带有制动电阻，因为制动电阻的散热量很大，因此最好安装位置最好和变频器隔离开，如装在柜子上面或旁边等。
- 如对于安装在机柜中的变频器，建议在控制柜上出风口安装冷却风扇，进风口要加滤网以防止灰尘进入控制柜，注意控制柜和变频器上的风扇都是需要的。

另外，散热问题还要注意以下两个问题：

- 在海拔高于 1000m 的地方，因为空气密度降低，应加大控制柜的冷却风量以改善冷却效果。理论上，变频器应考虑降容，每 1000 米降容 5%。但由于实际设计中，变频器的负载能力和散热能力一般比实际使用的要高，所以也要看具体应用。例如，在海拔 1500 米的地方，对于周期性负载，如电梯，就不必要降容。
- 开关频率——变频器的发热主要来自于 IGBT，IGBT 的发热集中在器件的开和关的瞬间。因此开关频率高时，变频器的发热量变大，降低开关频率可以扩容。工厂设置中开关频率设得很小，是为了减小开关损耗。如果开关频率增加，开关损耗也会相应增加。在满负载工作时，会引起变频器过热。在高开关频率下，变频器要降容，减小输出电流。降容因子与变频器型号有关。

6 变频器的通用控制理论

6.1 传动系统的负载特性

负载转矩随转速变化的曲线取决于工艺过程，其典型特性为下图：

1. 恒功率负载特性 ($T \propto 1/n$, $P = \text{Const}$)

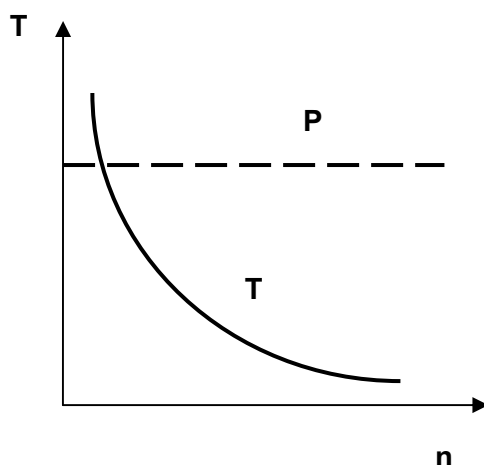


图 6.1 恒功率负载特性

恒功率负载特性常见于绕线机、端面车床、圆平面铣床。

2. 恒转矩负载特性 ($T = \text{Const}$, $P \propto n$)

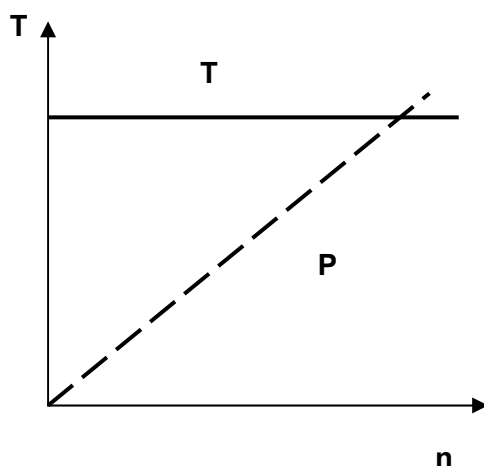
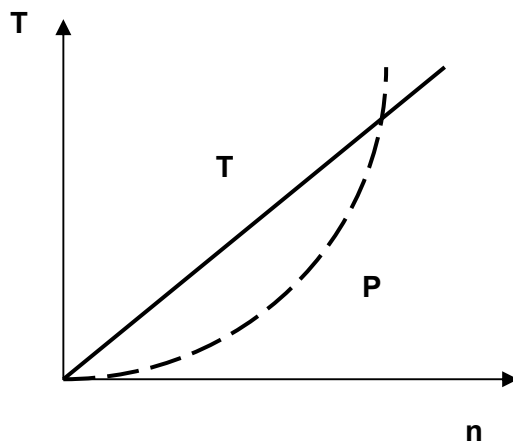
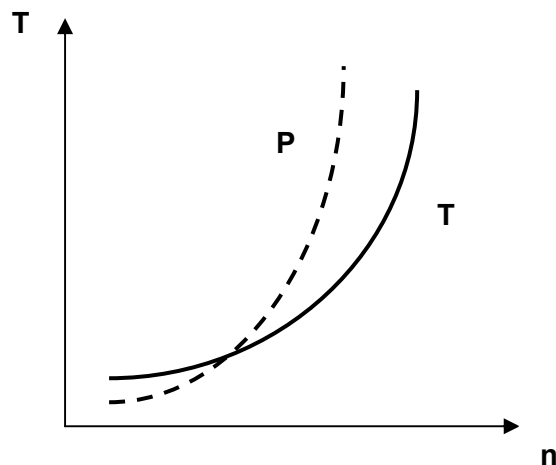


图 6.2 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性常见于提升机、流水线、成型加工机床、轧钢机、刨床。

3. $T \propto n$, $P \propto n^2$ 负载特性图 6.3 $T \propto n$, $P \propto n^2$ 负载特性

$T \propto n$, $P \propto n^2$ 负载特性常见于带粘性阻力的压光机、涡流制动。

4. $T \propto n^2$, $P \propto n^3$ 负载特性图 6.4 $T \propto n^2$, $P \propto n^3$ 负载特性

$T \propto n^2$, $P \propto n^3$ 负载特性常见于泵、通风机、搅拌机、离心机。

相关公式，即转矩、功率和转速三者之间的关系：

$$T = 9550 * P / n$$

6.2 V/F 控制原理分析

异步电机的变频调速系统，由于在调速时转差功率不随转速而变化，调速范围宽，无论是高速还是低速时效率都较高，在采取一定的技术措施后能实现高动态性能，可与直流调速相媲美。

在进行电机调速时，常须考虑的一个重要因素是：希望保持电机中每极磁通量 Φ_m 为额定值不变。如果磁通太弱，没有充分利用电机的铁心，是一种浪费；如果过分增大磁通，又会使铁心饱和，从而导致过大的励磁电流，严重时会使绕组过热而损坏电机。控制好感应电动势 E_1 和频率 f_1 ，便可达到控制磁通 Φ_m 的目的，对此，需要考虑基频（额定频率）以下和基频以上两种情况。

感应电动势：

$$E_1 = 4.44 f_1 N_s k_{Ns} \Phi_m$$

V/F 控制就是保证输出电压跟频率成正比的控制，这样可以使电机的磁通保持一定，避免弱磁和磁饱和现象的产生，多用于风机、泵类节能型变频器用压控振荡器实现。

V/F 控制的原理是产生一个震荡频率的电路叫做压控震荡器，是一个压敏电容，当受到一个变化的电压时候它的容量会变化，变化的电容引起震荡频率的变化，产生变频。把这个受控的频率用于控制输出电压的频率，使得受控的电机的转速变化。

异步电动机的转矩是电机的定子主磁通与转子内流过电流之间相互作用而产生的，在额定频率下，如果电压一定而只降低频率，那么磁通就过大，磁回路饱和，严重时将烧毁电机。因此，频率与电压要成比例地改变，即改变频率的同时控制变频器输出电压，使电动机的磁通保持一定，避免弱磁和磁饱和现象的产生。V/F 控制方式多用于风机、泵类节能型变频器。

- 基频以下调速

要保持 Φ_m 不变，当频率 f_1 从额定值向下调节时，必须同时降低 E_1 ，使 Φ_m 不变。但电机绕组中的感应电动势是难以直接控制的，当电动势值较高时，可以忽略定子绕组的漏磁阻抗压降，而认定相电压约等于 E_1 ；在低频时 U_s 和 E_1

都较小，定子绕组的漏磁阻抗压降不能忽略，则需要人为地把电压 U_s 抬高一些，以近似地补偿定子压降。如果电机在不同转速时所带的负载都能使电流达到额定值，即能在允许温升下长期运行，则转矩基本上随着磁通变化，按照电力拖动原理，在基频以下，磁通恒定时转矩也恒定，属于“恒转矩调速”。

- 基频以上调速：

在基频以上调速时，频率向上升高，但定子电压 U_s 却不可能超过额定电压 U_{sN} ，最多只能保持 $U_s=U_{sN}$ ，这将迫使磁通与频率成反比降低，相当于直流电机弱磁升速的情况。在基频以上，转速升高时转矩降低，所以在基频以上调速属于弱磁恒功率调速。

以 SINAMICS S120 驱动器为例，其 V/F 开环控制如下图所示，具有滑差补偿，用于异步电机的单电机传动和多电机传动，无高动态性能要求。

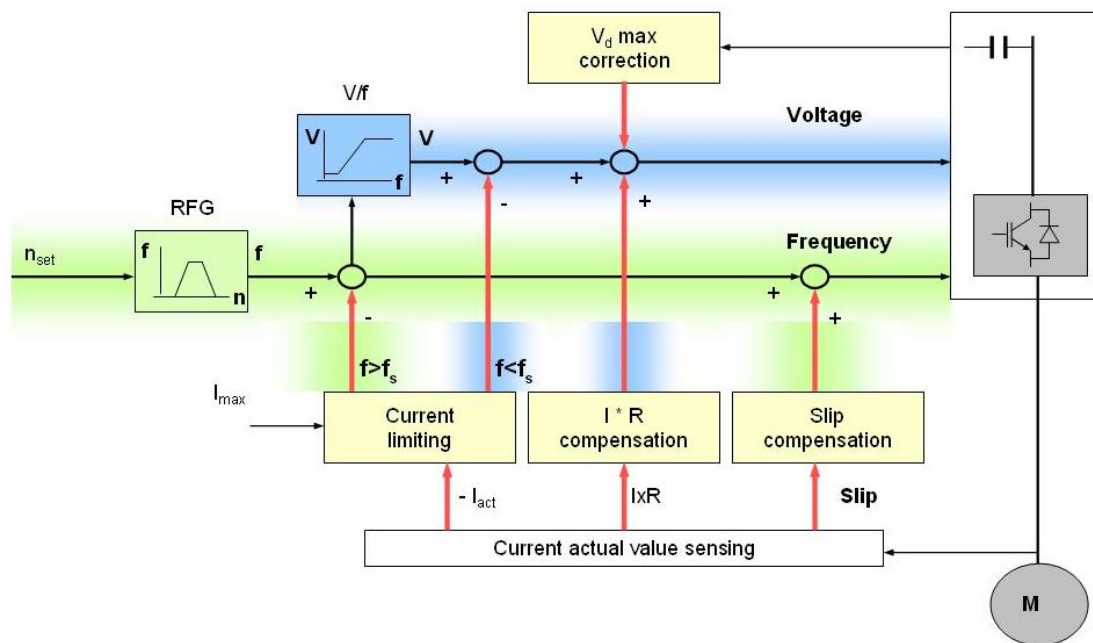


图 6.5 SINAMICS S120 变频器转速开环 V/F 控制原理图

6.3 矢量控制原理

在介绍矢量控制之前，先介绍一下直流电机的调速特性。直流电机是一种控制性能非常优越的电机，因为在直流电机调速系统中，由励磁电流所产生的主磁通与电枢电流产生的电枢磁势在空间上是互相垂直的，两者之间没有耦合关系。在正常运行条件下，励磁电流维持电机的磁场磁通，电枢电流来改变转矩，由于两者是相互解耦的，所以在静态和动态两种情况下，都能保持转矩的调节具有很高的灵敏度，使系统的动态特性得以优化。

直流电机的电磁转矩公式：

$$T = C_M \cdot \Phi \cdot I_a \propto I_f \cdot I_a$$

其中， I_f 和 I_a 是控制标量，也可看作是正交的或解耦的矢量。

异步电机的情况比直流电机要复杂的多，异步电机中定子电流并不知电磁转矩成正比，它既有产生转矩的有功分量，又有产生磁场的励磁分量。

异步电机的电磁转矩公式：

$$T = C_M \cdot \Phi_m \cdot I_r \cdot \cos\varphi_r = C_M \cdot \psi_r \cdot I_r$$

异步电机的电磁转矩，是由气隙磁通 Φ_m 和转子电流有功分量 $I_r \cdot \cos\varphi_r$ 相互作用产生的。即使气隙磁通保持恒定，电机的转矩不但和转子电流有关，还取决于功率因数角，即取决于电机的转差率。因此，在动态过程中要快速精确地控制电机的转矩就显得比较困难。从异步电机的电磁转矩公式可以看出，其在形式上与直流电机的转矩特性十分相似，即如果设法保持转子磁链恒定，则控制转子电流就能控制电机转矩。而在实际使用中，只能检测和控制定子相关的电机转速、位置，所以需要借助坐标转换。

矢量控制系统的核心问题：

- 采用坐标变换，将执行机构的交流信号变化为控制系统的直流信号，然后再进行直流信号到交流量的调制。
- 在同步旋转坐标下，用磁场定向德方法，使非线性强耦合交流电机的力矩和磁链解耦，得到类似于直流电机的调速系统。

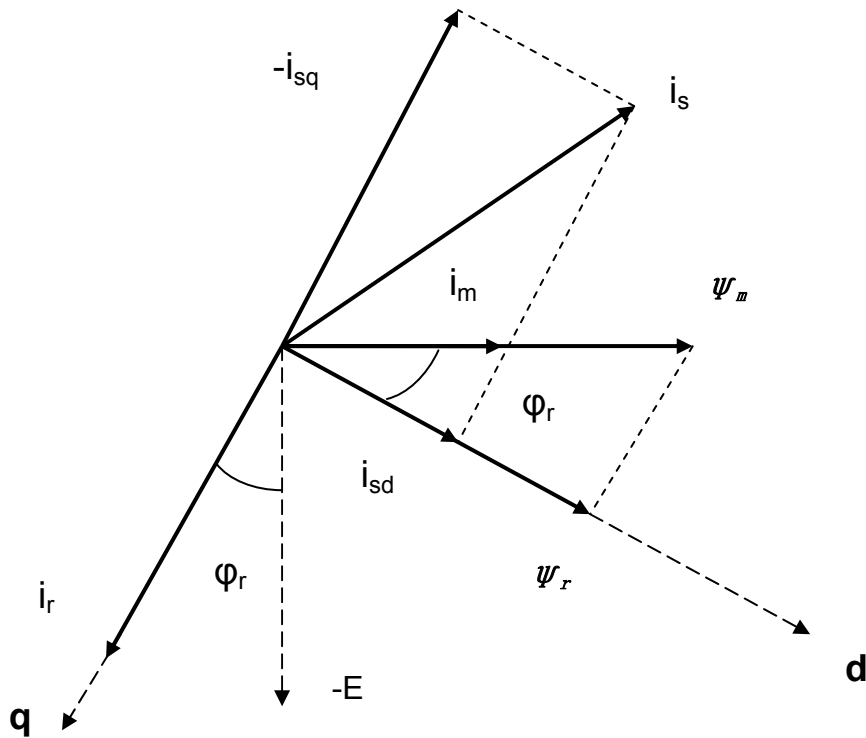


图 6.6 矢量控制相量图

研究上图的矢量图可知，转子磁链 ψ_r 和转子电流 i_r 在相位上是相互垂直，如果进一步把异步电机的矢量关系变换到同步旋转 dq 两相坐标系上，并将坐标系的 d 轴沿着转子磁链方向定向，则异步电机的定子电流可以沿 d 轴和 q 轴分解为电流 i_{sd} 和 i_{sq} ，其矢量关系为： $i_s = i_{sd} - i_{sq}$ ，其中 i_{sd} 用来产生转子磁链的励磁电流， i_{sq} 代表了电机的转矩。如果在电机的调速过程中维持定子电流的磁分化量不变，而控制转矩分量，由于两者互相解耦，所以使系统具有较好的动态特性。

矢量控制的基本思路：三相异步电机在系统中实现 $d-q$ 同步坐标轴系，并使励磁 d 轴在转子磁链方向定向，即可实现磁场电流和转矩电流的独立控制，使非线性耦合解耦。

异步电机经过坐标变换可以等效成直流电机，即可模仿直流电机的控制策略，得到直流电机的控制量，经过相应的坐标反变换，就能够控制异步电机。由于进行坐标变换的是电流（代表磁动势）的空间矢量，所以这样通过坐标变换实现的控制系统叫做矢量控制系统（Vector Control System）。

- 坐标变换



图中给出了ABC和 $\alpha\beta$ 两个坐标系，为方便理解，取A轴和 α 重合。设三相绕组每相有效匝数为 N_3 ，两相绕组每相有效匝数为 N_2 ，各相磁动势为有效匝数与电流的乘积，其空间矢量均位于有关相的坐标轴上。由于交流磁动势的大小随着时间变化，图中的磁动势矢量的长度是随意的。设磁动势波形是正弦分布的，当三相总磁动势与两相总磁动势相等时，两套绕组瞬时磁动势在 α 、 β 上的投影都应相等，即：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

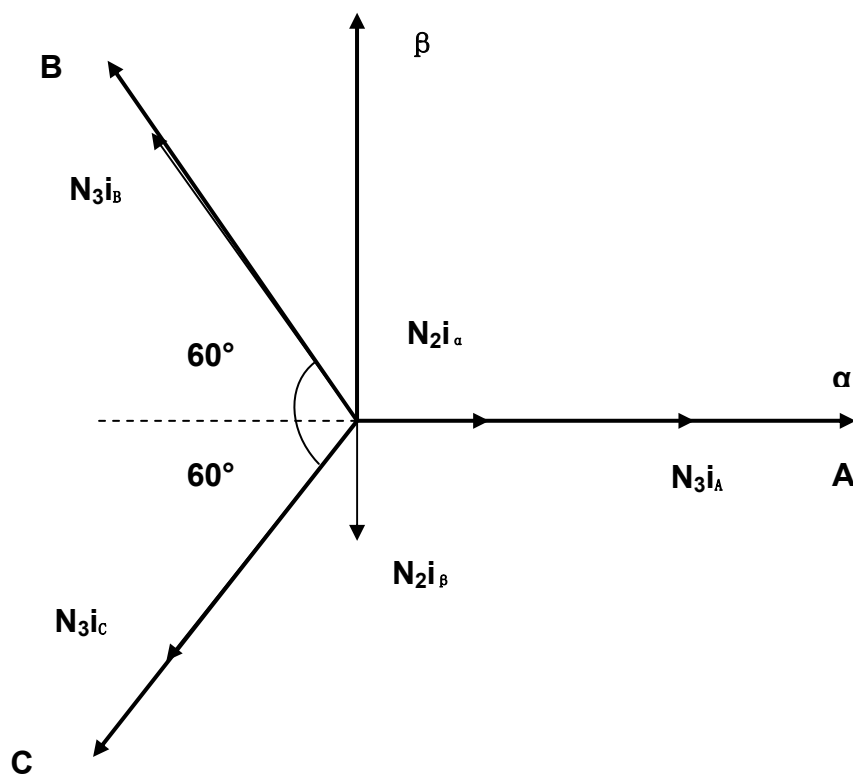


图 6.7 ABC 和 α - β 坐标系下的坐标变换矢量图

如下图，两相交流电流 i_α 、 i_β 和两个直流电流 i_d 、 i_q 产生同样的以同步转速 ω_1 旋转的合成磁动势 F_s ，由于各绕组匝数都相等，可以消去磁动势中的匝数，直接用电流表示，如 F_s 可以直接标成 i_s 。这里需要注意的是电流都是空间矢量，而不是时间相量。

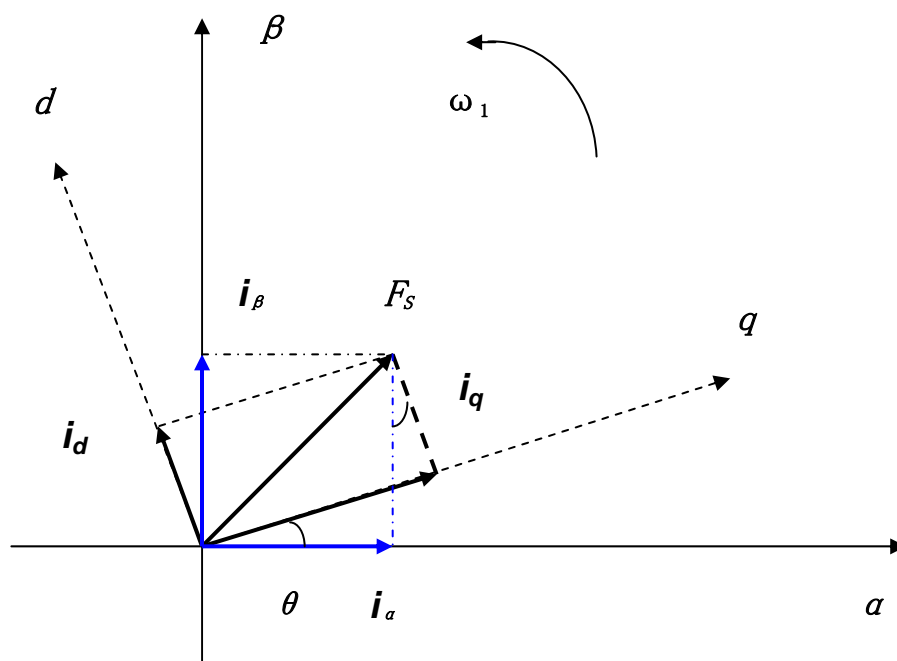


图 6.8 α - β 和 d - q 坐标系下的坐标变换矢量图

如图所示， d - q 轴和矢量 F_s (i_s) 都以转速 ω_1 旋转，分量 i_d 和 i_q 的长短不变，由于 α - β 轴是静止的， α 轴与 β 轴的夹角 θ 随着时间变化，因此 i_s 在 α - β 轴上的分量的长短也是随着时间变化，相当于绕组交流磁动势的瞬时值。由相量图可以得出以下公式：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

- 磁场定向

转子磁场定向的作用是使耦合非线性的异步电机实现解耦，以实现系统采用直流电机的控制思路。在控制系统中，为了对运行参数的指令值和实际检测值进行数学运算，还需要知道转子磁链的大小，转子磁链准确的检测与运算，是矢量变换控制的前提。

检测运算转子磁链的方法可分为两类：直接检测法与间接运算法。

直接检测法由于受到传感器放置问题、气隙齿谐波的影响，导致测量误差比较大，而且在电机中置入传感器会破坏异步电机的坚固性，所以在实际控制系统中应有较少。

间接运算法主要采用以下两种方法：电压法、电流法。在实际应用中，电压法存在初始值设定、漂移及低速误差大的问题，在低速时（小于 0.1 倍的额定转速）以电流模型为主，在高速时（大于 0.1 倍的额定转速）以电压模型为主。

电压法：根据定子和定子电流的检测值运算磁通，实际上是通过电机反电势进行积分，以求得电机的转子磁链。

电流法：三相定子电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过 3/2 坐标变换变成两相静止坐标系电流 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ ，再经过同步旋转变换并按转子磁链定向，得到d-q坐标系下的 i_{sd} 、 i_{sq} ，利用矢量控制方程式可以获得 ψ_r 和 ω_s 信号，由 ω_s 与实际转速 ω 相加得到定子频率信号 ω_1 ，再经过积分即为转子磁链的相位角 θ ，即同步旋转变换的旋转相位角。该方法中用到转子时间常数，随着转子绕组的温度而变化，尤其是在转子频率变化时，由于集肤效应¹⁾，转子电感和电阻朝着不同的方向变化，转子时间常数的变化更大，从而影响磁链观测器的准确性，甚至影响整个矢量控制系统的性能。

1) 集肤效应 (skin effect)，当交变电流通过导体时，电流将集中在导体表面流过，这种现象叫集肤效应。电流或电压以频率较高的电子在导体中传导时，会聚集于导体表层，而非平均分布于整个导体的截面积中。频率越高，趋肤效用越显著。集肤效应是电磁学，涡流学（涡旋电流）的术语。这种现象是由通电铁磁性材料，靠近未通电的铁磁性材料，在未通电的铁磁性材料表面产生方向相反的磁场，有了磁场就会产生切割磁力线的电流，这个电流就是所谓的涡旋电流，这个现象就是集肤效应。

以 SINAMICS S120 驱动器为例，其矢量控制如下图所示，给定转速与实际转速之差进行 PI 调节。定子电压和定子电流的检测值经过坐标变换转换为磁通、转矩电流和励磁电流的实际值。内环电流控制采用类似直流调速系统的控制方式。控制输出信号经过坐标反变换，到触发装置产生控制 IGBT 的触发信号。

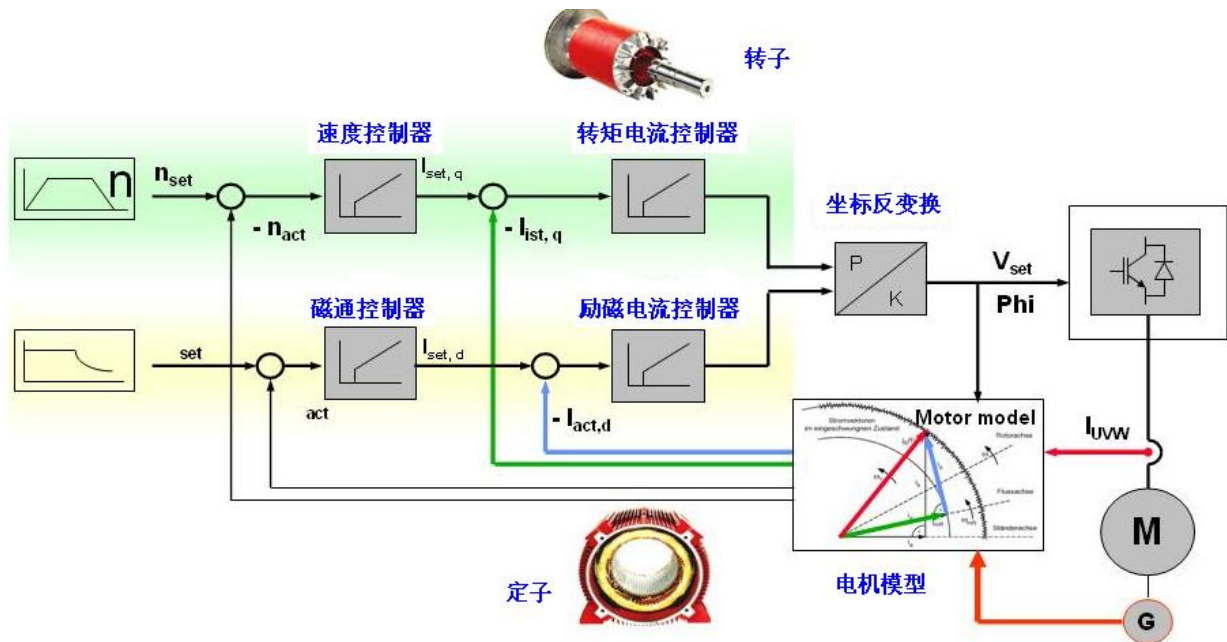


图 6.9 SINAMICS S120 驱动器的矢量控制原理图

转矩提升：

在矢量控制下，增加变频器的输出电压，以使电机的输出转矩和电压的平方成正比的关系增加，从而改善电机的输出转矩。改善电机低速输出转矩不足的技术，使用“矢量控制”，可以使电机在低速，如（无速度传感器时）1Hz（对于 4 极电机，其转速大约为 30r/min）时，输出转矩可以达到电机在 50Hz 供电输出的转矩（最大约为额定转矩的 150%）。对于常规的 V/F 控制，电机的电压降随着电机速度的降低而相对增加，这就导致由于励磁不足，而使电机不能获得足够的旋转力。为了补偿这个不足，变频器中需要通过提高电压，来补偿电机速度降低而引起的电压降。变频器的这个功能叫做“转矩提升”。

转矩提升功能是提高变频器的输出电压。然而即使提高很多输出电压，电机转矩并不能和其电流相对应的提高。因为电机电流包含电机产生的转矩分量和其它分量（如励磁分量）。“矢量控制”把电机的电流值进行分配，从而确定产生转矩的电机电流分量和其它电流分量（如励磁分量）的数值。“矢量控制”可以通过对电机端的电压降的响应，进行优化补偿，在不增加电流的情况下，允许电机产出大的转矩，此功能对改善电机低速时温升也有效。

6.4 伺服控制原理

请参考本书第 2 章介绍的伺服控制器的工作原理，本节主要针对 SINAMICS S120 驱动器的伺服控制器，介绍其伺服控制的拓扑结构图。

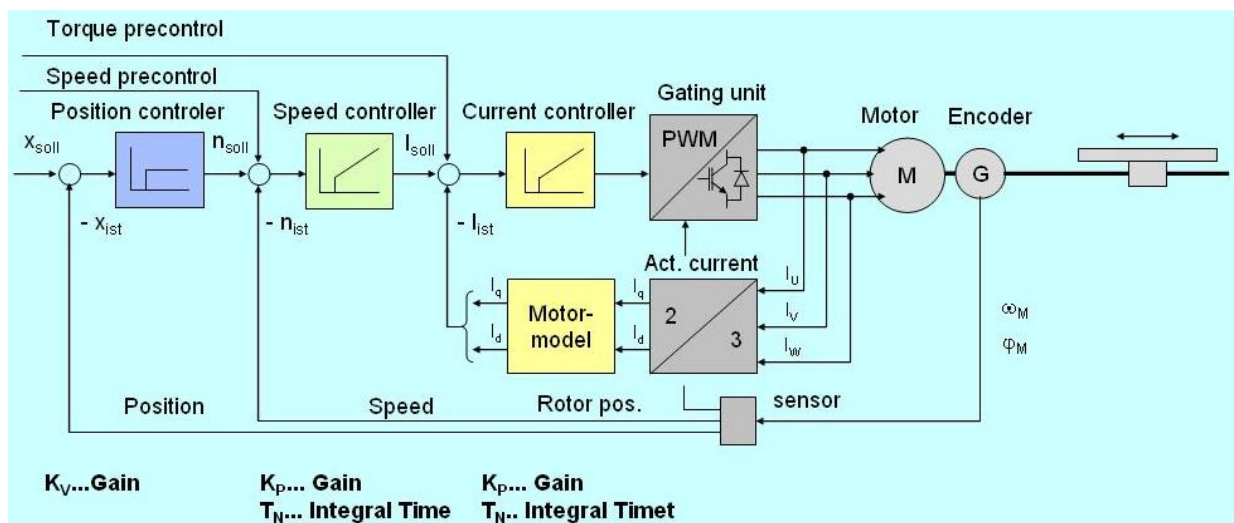


图 6.10 SINAMICS S120 驱动器的伺服闭环控制原理图

7 西门子 SINAMICS S120 高性能伺服驱动系统

7.1 SINAMICS S120 驱动器概述

SINAMICS 是由西门子公司推出的全新驱动系列，设计用于机器制造和工厂工程应用。**SINAMICS** 可为所有驱动任务提供解决方案：

- 过程工业中的泵及风机应用
- 离心机、压机、挤出机、升降机、输送和运输设备中要求苛刻的独立驱动装置
- 纺织机械、塑料薄膜和造纸机械以及轧钢设备中的组合驱动装置
- 机床、包装和印刷机械使用的高动态伺服驱动装置产品类型



图 7.1 SINAMICS S120 驱动器的原因场合

根据使用领域的不同，在 **SINAMICS** 系列中，用于每种驱动任务的产品均具有切合实际用途的特点：

- **SINAMICS G** 用于驱动异步电机，是为标准用途而设计的。这些用途的特点是电机转速的动态特性和精度要求比较低。

- **SINAMICS S** 用于驱动同步电机，可完成要求苛刻的驱动任务，并且能满足：对动态特性和精度的较高要求，将扩展的技术功能集成于驱动控制系统中的要求。

SINAMICS 的所有型号都基于相同的技术平台。共同的硬件和软件部件以及标准的设计、组态和调试工具可保证所有部件之间的高度集成。**SINAMICS** 可以完成所有不同类型的驱动任务。**SINAMICS** 的各种型号可以方便地相互组合。

- **SINAMICS S120 硬件结构**

SINAMICS 分为 **AC/AC 单轴驱动**和 **DC/AC 共直流母线**两种类型：

1. **DC/AC 共直流母线**驱动器有单独的整流单元和逆变单元，外加 **CU320** 控制单元组成一个完整的多轴控制驱动系统。**DC/AC 共直流母线**形式主要用于多轴应用的场合，根据应用要求可以选择带能量回馈功能的电源模块，利于节能。
2. **AC/AC 单轴驱动**的整流和逆变集成在一个单元（功率模块）中，外加一个 **CU310** 控制单元组成一个完整的单轴伺服驱动器。主要应用于单轴应用的场合，无法作能量回馈，需要快速制动或者系统有再生能量时，必须选择相应的制动模块和制动电阻（模块型 **AC/AC 单机传动**已经内置了制动模块）。

- **控制模式**

SINAMICS S120 支持多种速度控制模式：**伺服控制**、**矢量控制**（带 / 不带编码器）、**V/F 控制**。**AC/AC 单轴驱动**器的控制单元可以选择任意一种速度控制模式，**DC/AC 多轴驱动**系统中，在一个 **CU320** 中，伺服控制与 **V/F 控制** 可以混合使用，矢量模式与 **V/F 模式** 也可以混合使用，伺服模式与矢量模式不能混合配置。**SINAMICS S120** 是集 **V/F 控制**、**矢量控制**、**伺服控制**为一体的多轴驱动系统，具有模块化的设计。各模块间（包括控制单元模块、整流/回馈

模块、电机模块、传感器模块和电机编码器等)通过高速驱动接口 DRIVE-CLiQ 相互连接。以 SINAMICS S120 多轴驱动器为例,其核心控制单元 CU320 在速度控制模式下最多能控制 4 个矢量轴或 6 个伺服轴,可以完成简单的工艺任务。

- **所能驱动的电机**

SINAMICS S120 可以驱动所有的交流电机:同步伺服电机、异步伺服电机、感应电机、扭矩电机、直线电机。

- **冷却方式:**

SINAMICS S120 有多种冷却方式:内部风冷,外部风冷,水冷。不同的功率段产品有不同的冷却方式。

- **控制功能:**

SINAMICS S120 的控制单元内部集成了多种控制功能: BICO 技术¹⁾、自由功能块、DCC 功能、PID、Safety 功能、位控功能。集成的控制功能能在 SINAMICS 内部实现编程,同时 SINAMICS 能实现简单定位功能,如点-点的定位 MDI。Safety 功能分为基本安全功能和扩展安全功能,基本安全功能不需要授权,扩展的安全功能需要购买授权。

1) BICO 技术:

BICO 功能是一种很灵活的把输入和输出功能联系在一起的设置方法。同时,它也是西门子变频器特有的功能,可以根据实际工艺需求来灵活定义端口。在参数列表中,有些参数名称的前面冠有以下的字样:“BI:”、“BO:”、“CI:”、“CO:”、“CO/BO”。其中:

BI: 二进制互联输入,参数可以选择和定义输入的二进制信号,常与“P 参数”相对应。

BO: 二进制互联输出,参数可以选择输出的二进制信号,或作为用户定义的二进制,常与“r 参数”相对应。BI 参数可以与 BO 参数相连接,将 BO 参数值添写到 BI 参数中即可。

CI: 模拟量互联输入,参数可以选择和定义输入量的信号源,通常与“P 参数”相对应。

CO: 模拟互联输出,即参数可以选择输出量的功能,或作为用户定义的信号输出,常与“r 参数”相对应。CI 参数可以与 CO 参数相连接,将 CO 参数值添写到 CI 参数中即可。

CO/BO: 模拟量/二进制互联输出。CO/BO 可以作为模拟量信号和/或二进制信号输出。

7.2 SINAMICS S120 DC/AC 多轴驱动器

公共直流母线的 DC/AC 逆变器：通常又称为 SINAMICS S120 多轴驱动器，其结构形式为电源模块和电机模块分开，如图 1.1 所示，一个电源模块将 3 相交流电整流成 540V 或 600V 的直流电，将电机模块（一个或多个）都连接到该直流母线上，特别适用于多轴控制，尤其是造纸、包装、纺织、印刷、钢铁等行业。优点是各电机轴之间的能量共享，接线方便、简单。



图 7.2 SINAMICS S120 多轴驱动器（DC/AC 型）

SINAMICS S120 的多轴驱动系统的主要组成部分：

- 控制单元：整个驱动系统的控制部分；
- 电源模块：将交流转变成直流，并能实现能量回馈；
- 电机模块（也称功率模块）：单轴或双轴模块，作为电机的供电电源；
- 传感器模块：将编码器信号转换成 DRIVE-CLiQ 可识别的信号，若电机含有 DRIVE-CLiQ 接口，则不需要此模块；
- 直流+24V 电源模块：用于系统的控制部分的供电；
- 端子模块和选件板：根据需要可连接或插入 I/O 板和通讯板。

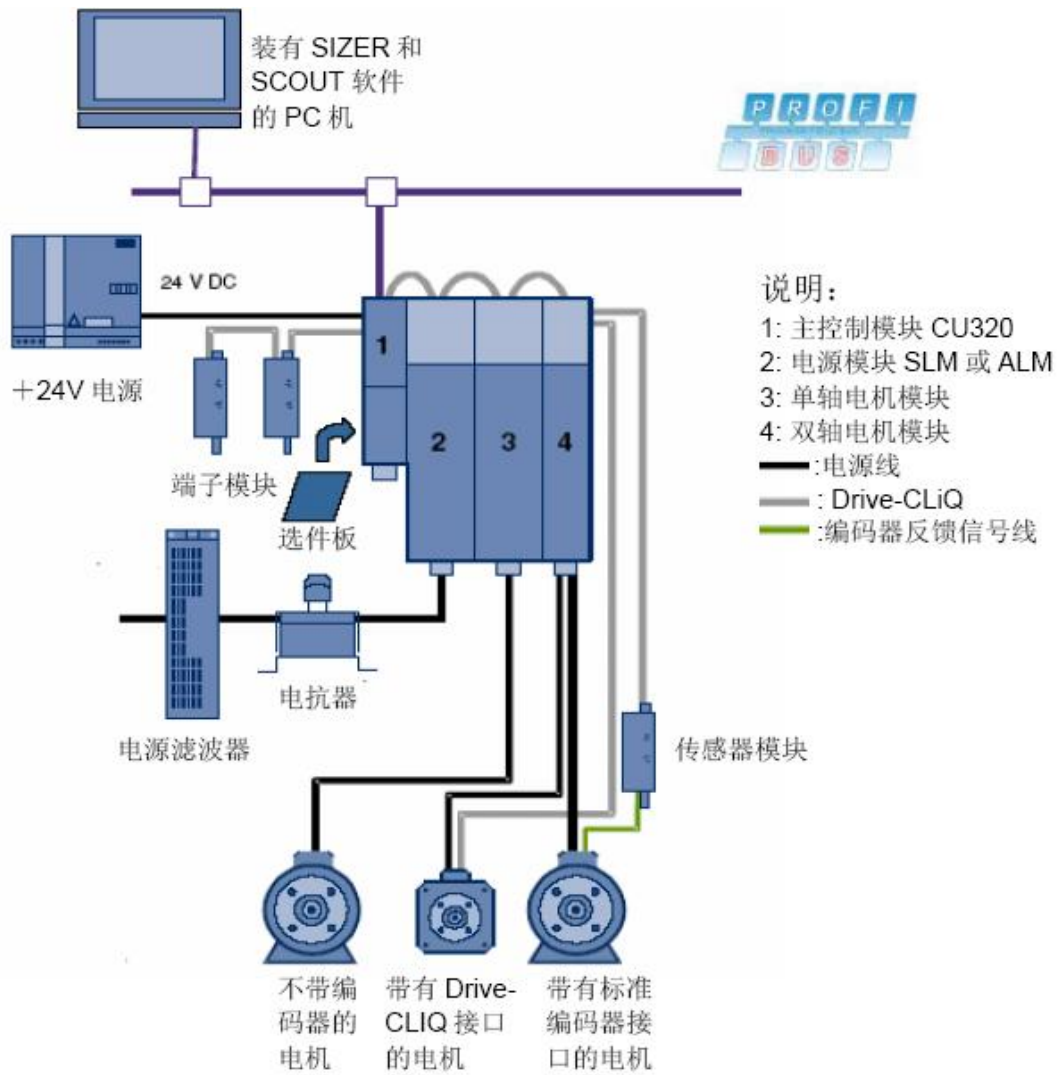


图 7.3 SINAMICS S120 多轴驱动系统

7.2.1 电源模块 —— 基本型电源模块 BLM

BLM 基本型电源模块 (Basic Line Module) 是将三相交流电整流为 1.35 倍线电压的直流电的整流单元。BLM 用在不需要能量回馈，各个电机轴之间需要能量共享应用中。它只能将电能从供电系统传送到直流母线，再生电能不能回馈到电网。BLM 电源模块既可以用在中性点接地的 TN, TT 系统，也可以用在中性点不接地的 IT 供电系统。20kW 和 40kW 的 BLM 通过集成的预充电电阻进行预充电，100kW 的 BLM 通过激活半导体晶闸管进行预充电。20kW 和 40kW 的 BLM 集成了制动模块，加上制动电阻就可以应用在再生制动场合中。100kW 的 BLM 需要外接制动模块和制动电阻，来进行再生运行。

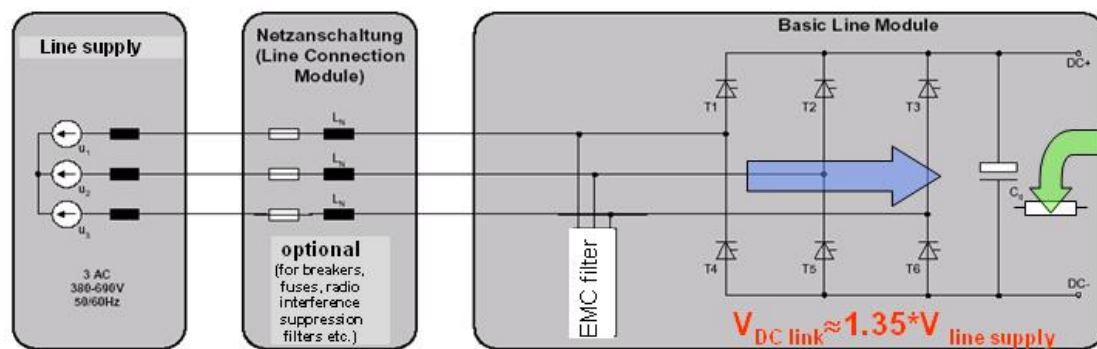


图 7.4 BLM 基本型电源模块的电路图



图 7.5 BLM 基本型电源模块

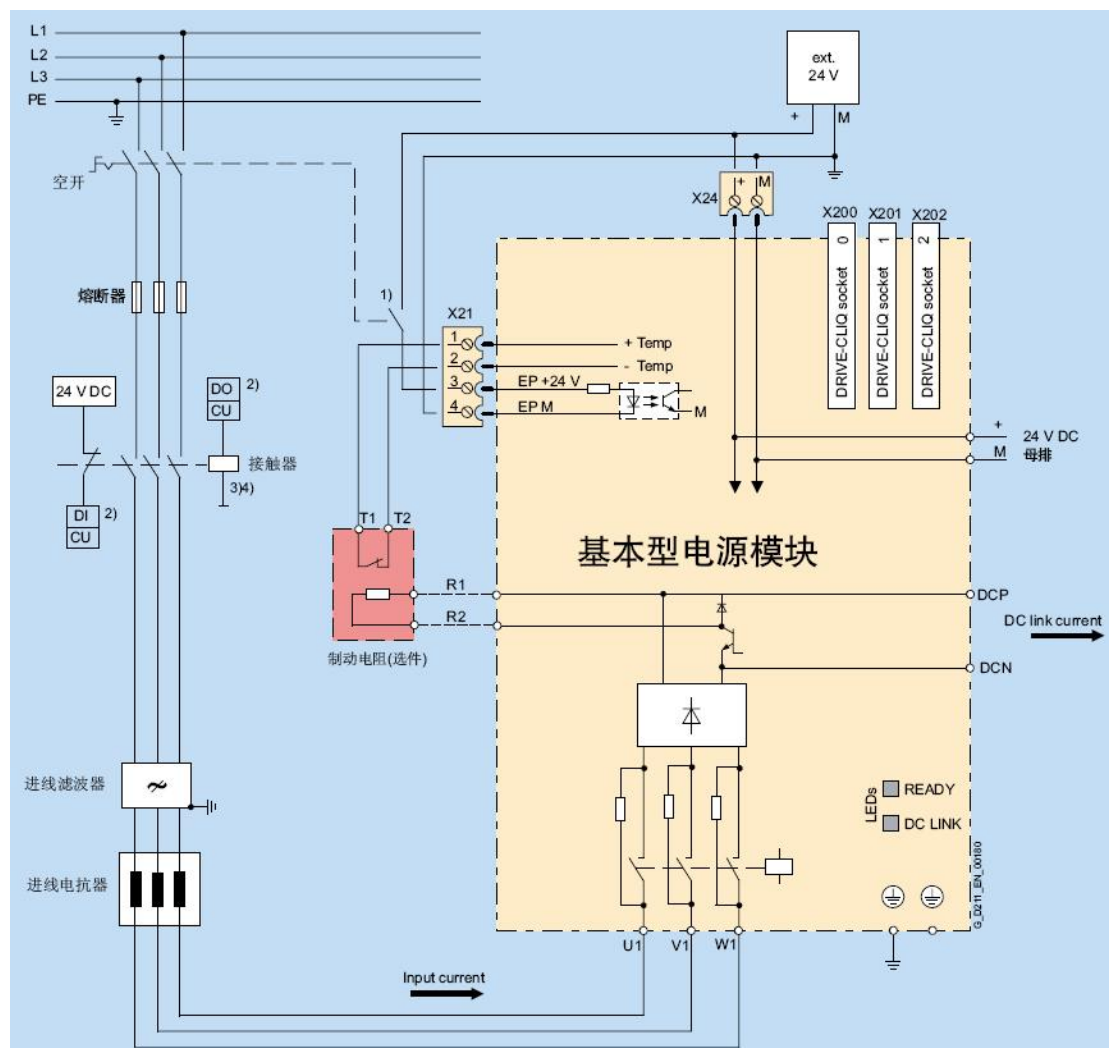


图 7.6 BLM 基本型电源模块的典型接线图

7.2.2 电源模块 —— 智能型电源模块 SLM

SLM 智能型电源模块（Smart Line Module）是不可控的整流/回馈单元（二极管整流，IGBT 回馈），具有能量回馈的功能。再生回馈功能可以通过数字量输入（5kW 和 10kW 的 SLM）或者设置参数来激活或取消。SLM 既可以用在中性点接地的 TN, TT 系统，也可以在中性点不接地的 IT 供电系统。直流母线通过集成的预充电电阻进行预充电。在电网和非调节型电源模块（SLM）之间必须安装与其功率相应的进线电抗器。

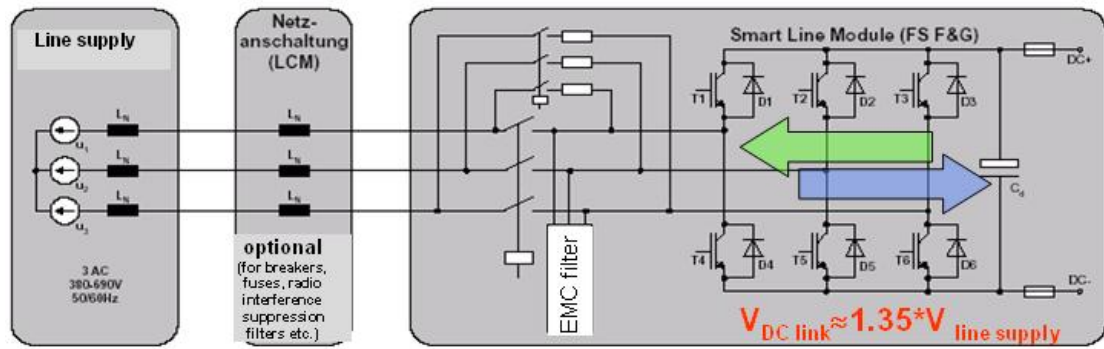


图 7.7 SLM 智能型电源模块的电路图

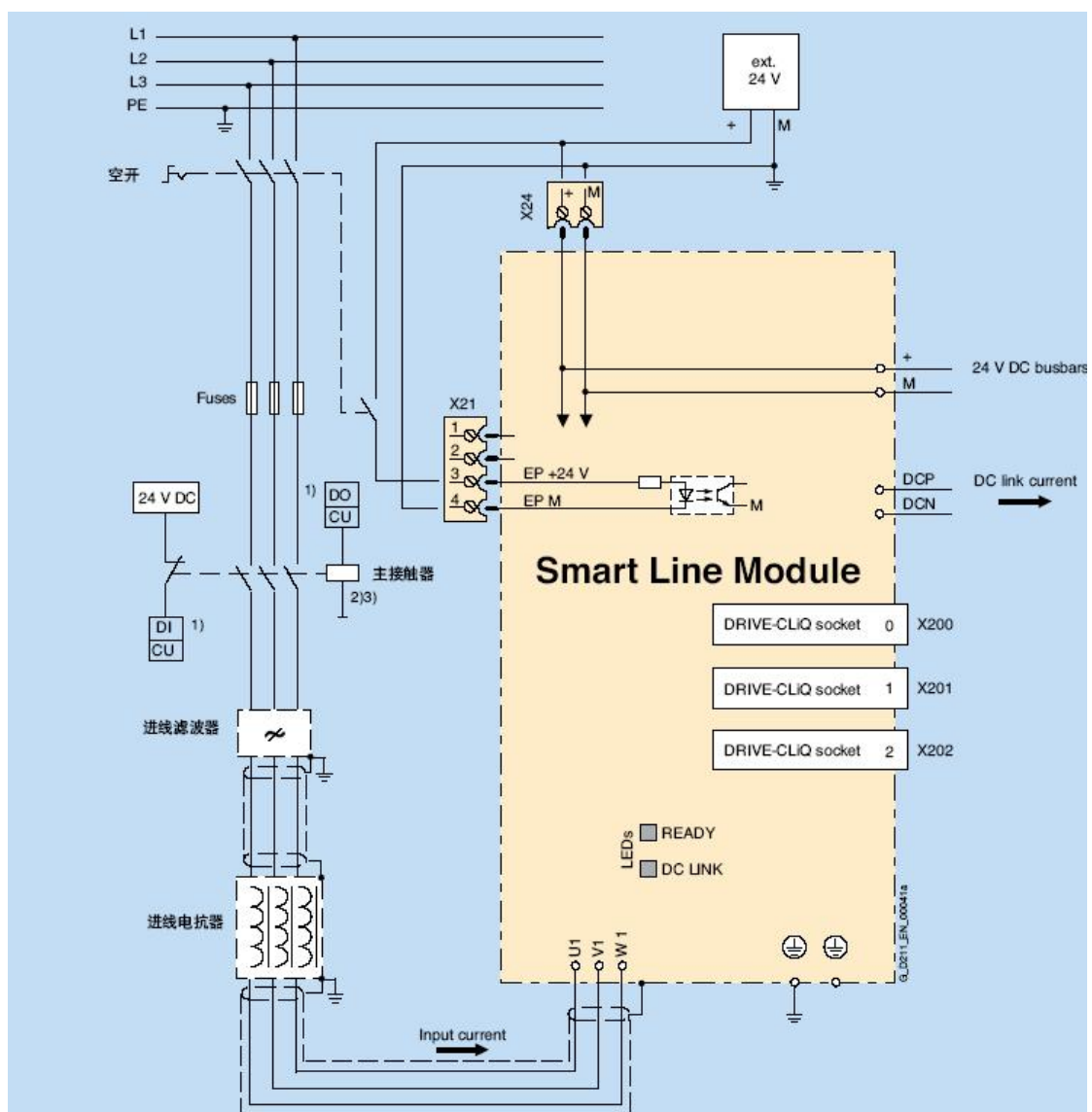


图 7.8 SLM 智能型电源模块的典型接线图

7.2.3 电源模块 —— 主动性电源模块 ALM

ALM 主动型电源模块 (Active Line Module) 是自换相整流/ 回馈单元 (整流和回馈均为 IGBT) 产生一个可调节的直流母线电压, 电网电压在允许范围内的波动不会影响到电机侧。ALM 既可以用在中性点接地的 TN, TT 系统, 也可以用在中性点不接地的 IT 供电系统。直流母线通过集成的预充电电阻进行预充电。在电网和 ALM 之间必须安装与其功率对应的 AIM 模块。

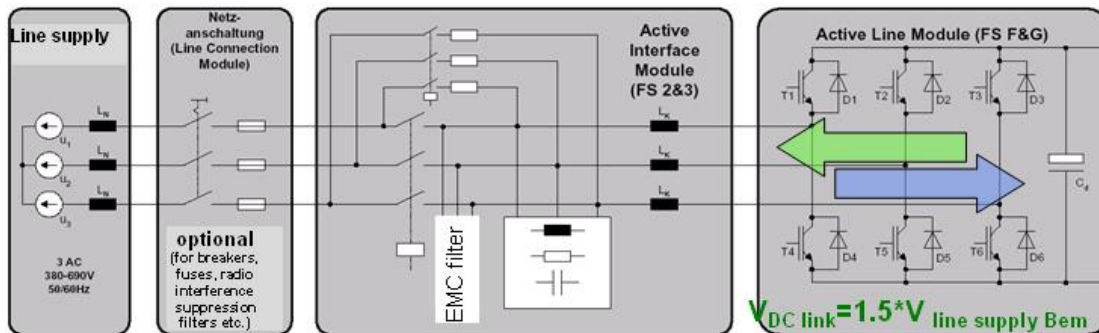


图 7.9 ALM 主动型电源模块的电路图

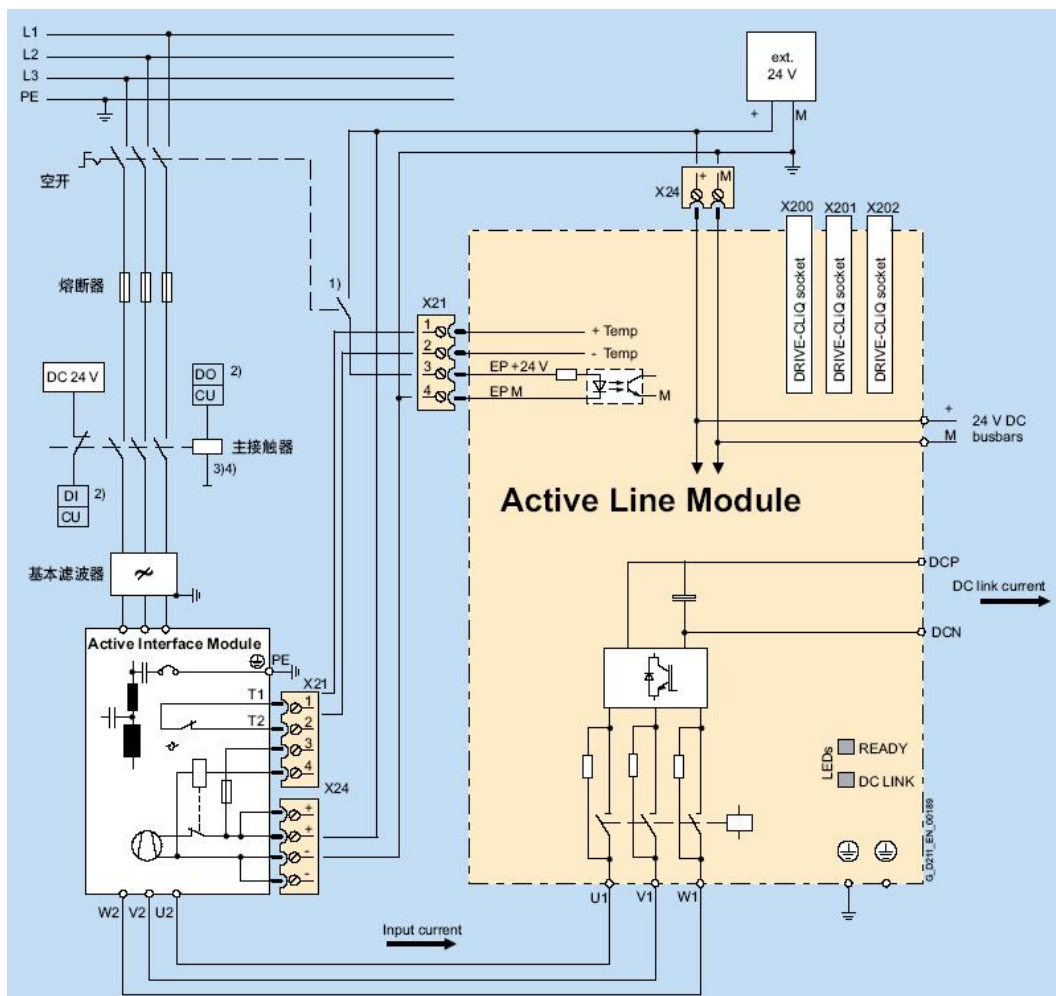


图 7.10 ALM 主动型电源模块的典型接线图

7.2.4 电机模块——书本型

电机模块，即逆变单元，将直流电逆变成交流电供给电机，书本型电机模块分为单轴电机模块（Single Motor Module）和双轴电机模块（Double Motor Module）。

1 单轴电机模块

- 2 个直流链路接口，通过集成直流链路母排连接；
- 1 个电子装置电源接口，通过集成 24 V DC 母排连接；
- 3 个 DRIVE-CLIQ 接口；
- 1 个电机功率电缆接口，插头（不包括在配件中）或螺钉连接，取决于额定输出电流值；
- 1 个安全停车输入接口（脉冲使能）；
- 1 个安全抱闸控制接口；
- 1 个温度传感器输入接口（KTY84-130 或 PTC）；
- 2 个 PE 保护地连接。

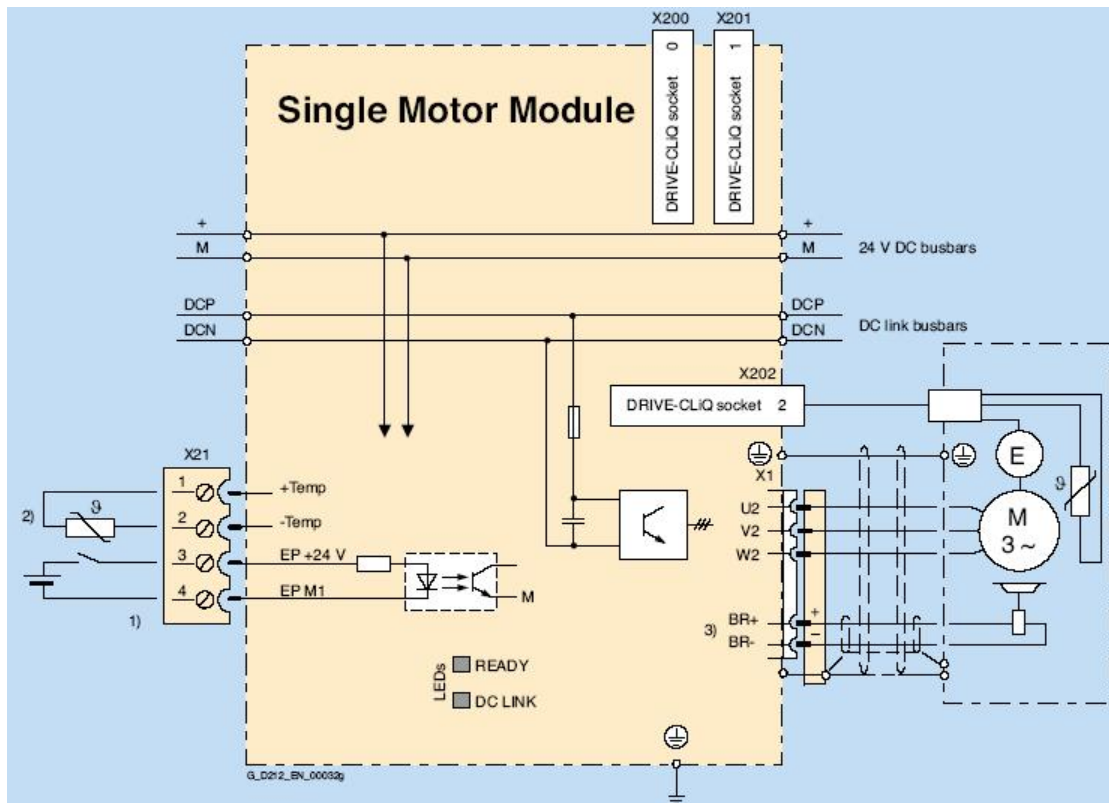


图 7.11 书本型单轴电机模块的典型接线图（3A~30A）

2 双轴电机模块

- 1 个直流母排，2 个 24VDC 电源接口；
- 4 个 DRIVE-CLIQ 接口；
- 2 个电机功率电缆接口（连接头不包含在内）；
- 2 个安全停车输入接口（每轴一个）；
- 2 个安全停车输入接口（每轴一个）；
- 2 个电机抱闸控制器；
- 2 路温度传感器输入接口（KTY84-130 或 PTC）；
- 3 个 PE 接地接口。

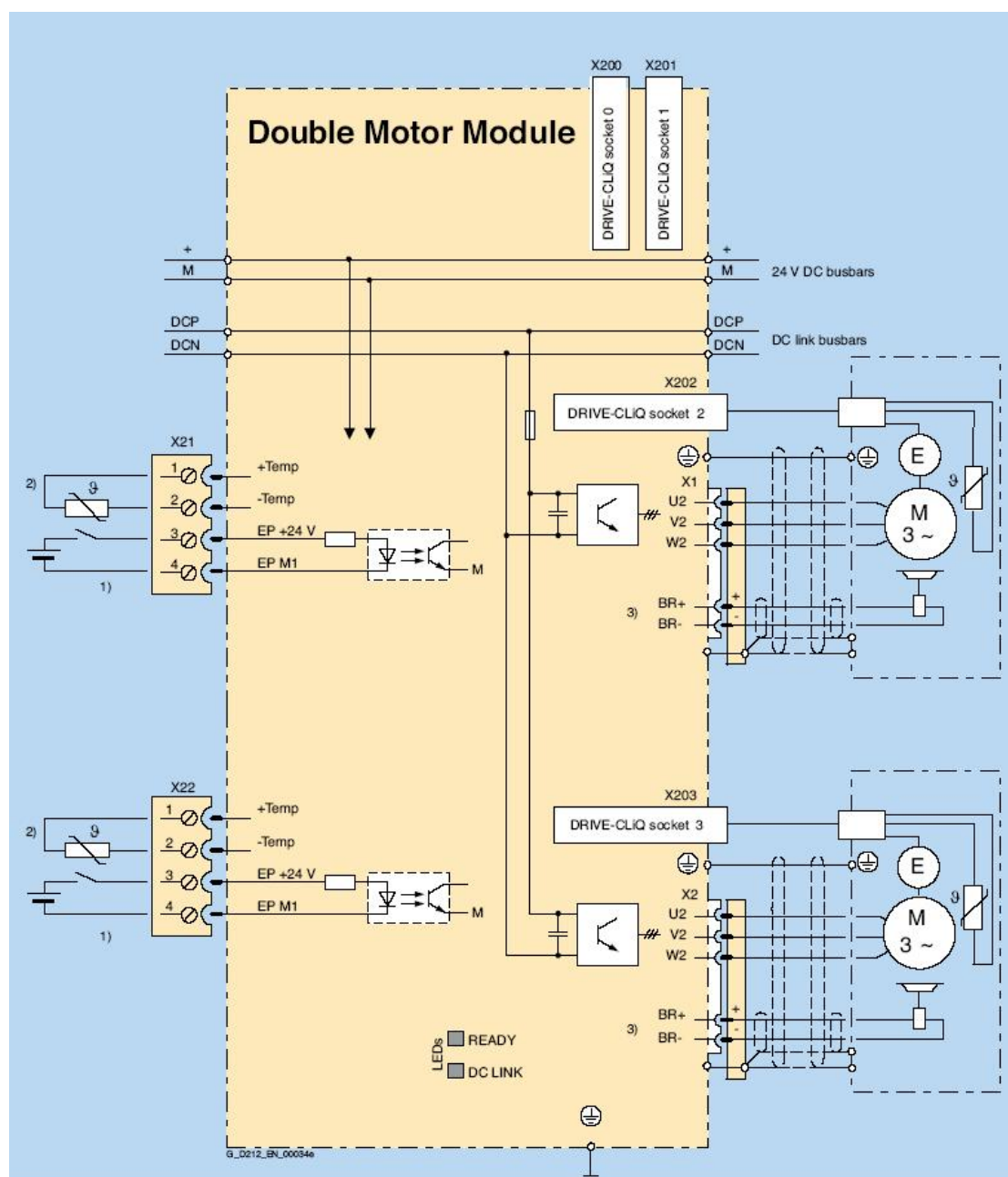


图 7.12 书本型双轴电机模块的典型接线图（2×3A ~ 2×18A）

7.2.5 控制单元 CU320

作为 SINAMICS S120 多轴驱动器的控制单元，CU320 负责控制和协调系统中所有的模块，完成各轴的电流环、速度环甚至是位置环的控制，并且同一块 CU320 控制的各轴之间能相互交换数据，即任意一根轴可以读取控制单元上其它轴的数据，这一特征广泛被用作各轴之间的简单同步。CU320 的硬件结构如图 7.13 所示。

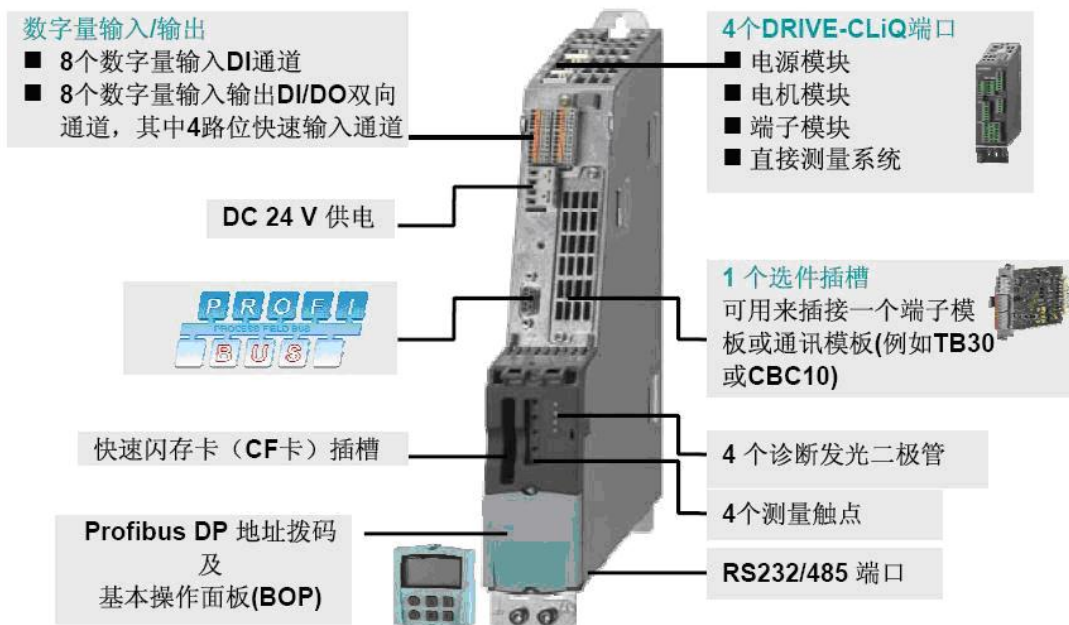


图 7.13 CU320 硬件结构图

根据所连接外围 I/O 模块的数量、轴控制模式、所需功能及 CF 卡的不同，1 个 CU320 可控制的轴数量也不同。

- 用作速度控制：最大控制轴数为 6 个伺服轴、4 个矢量轴和 8 个 V/F 轴。实际控制轴数与 CU320 的负荷（即所选功能）有关。伺服轴和矢量轴不能用同一个 CU320 来控制，但伺服轴和矢量轴都可以与 V/F 轴混合搭配；
- 用作位置控制：最大控制轴数为 4 个伺服轴或 2 个矢量轴。控制的轴数不是绝对的，与 CU320 的负荷有关。

7.2.6 编码器接口模块

1 SMC10 编码器转换模块

当电机不待 DRIVE-CLIQ 接口，编码器采用 Resolver 时，需要配 SMC10 模块，SMC10 可以对下列编码器信号进行处理：

- 极旋转变压器
- 多极旋转变压器



图 7.14 SMC10 编码器转换模块

2 SMC20 编码器转换模块

当电机不待 DRIVE-CLIQ 接口，使用 SMC20 模块可以连接以下编码器：

- 增量式编码器 sin/cos 1 Vpp
- 绝对值编码器 EnDat
- 带增量信号 sin/cos 1 Vpp 的 SSI 编码器（固件版本 2.4 以上）



图 7.15 SMC20 编码器转换模块

3 SMC30 编码器转换模块

当电机不待 DRIVE-CLiQ 接口，使用 SMC30 模块可以连接以下编码器：

- 有/无开路检测的 TTL/HTL 增量式编码器（开路检测只适用于双极信号）
- 带有 TTL/HTL 增量信号的 SSI 编码器
- 无增量信号的 SSI 编码器

此外，还可以借助温度传感器 KTY84-130 来检测电机温度信号。



图 7.16 SMC30 编码器转换模块

7.2.7 系统附件

- BOP20 基本操作面板
- CBC10 通讯模板（CAN 总线接口板）
- CBE20 通讯模板（PROFINET 通讯扩展板）
- DMC20 模块（DRIVE-CLiQ 网络集线器）
- TB30 模板（端子扩展板）
- TM15 端子模块
- TM31 端子模块
- TM41 端子模块
- TM54F 端子模块（安全集成功能）
- VSM10 电压检测模块

详细内容见 PM21 样本。

7.3 SINAMICS S120 AC/AC 单轴驱动器

单轴控制的 AC/AC 变频器：通常又称为 SINAMICS S120 单轴交流驱动器，其结构形式为电源模块和电机模块集成在一起，特别适用于单轴的速度和定位控制。



图 7.17 SINAMICS S120 单轴驱动器（AC/AC 型）

7.3.1 模块型功率模块 PM340

模块型功率模块 PM340 将整流与逆变集于一体，具有以下标准接口：

- 1 个电源进线连接；
- PM-IF 接口用于模块型 PM340CU310/SIMOTION D410 控制单元或 CUA31 / CUA32 控制单元适配器进行连接。模块型 PM340 同时通过一个集成的电源接口为控制单元供电；
- 连接外部制动电阻的接口 DCP/R1 和 R2；
- 通过螺钉端子或螺栓的电机连接；
- 用于控制抱闸的安全抱闸输出继电器和抱闸继电器的驱动电路；
- 2 个 PE（保护地）连接。



图 7.18 模块型功率模块 PM340

模块型功率模块 PM340 是通过 PM-IF 接口与 CU310/SIMOTION D410 控制单元或 CUA31/CUA32 控制单元适配器进行通讯的。

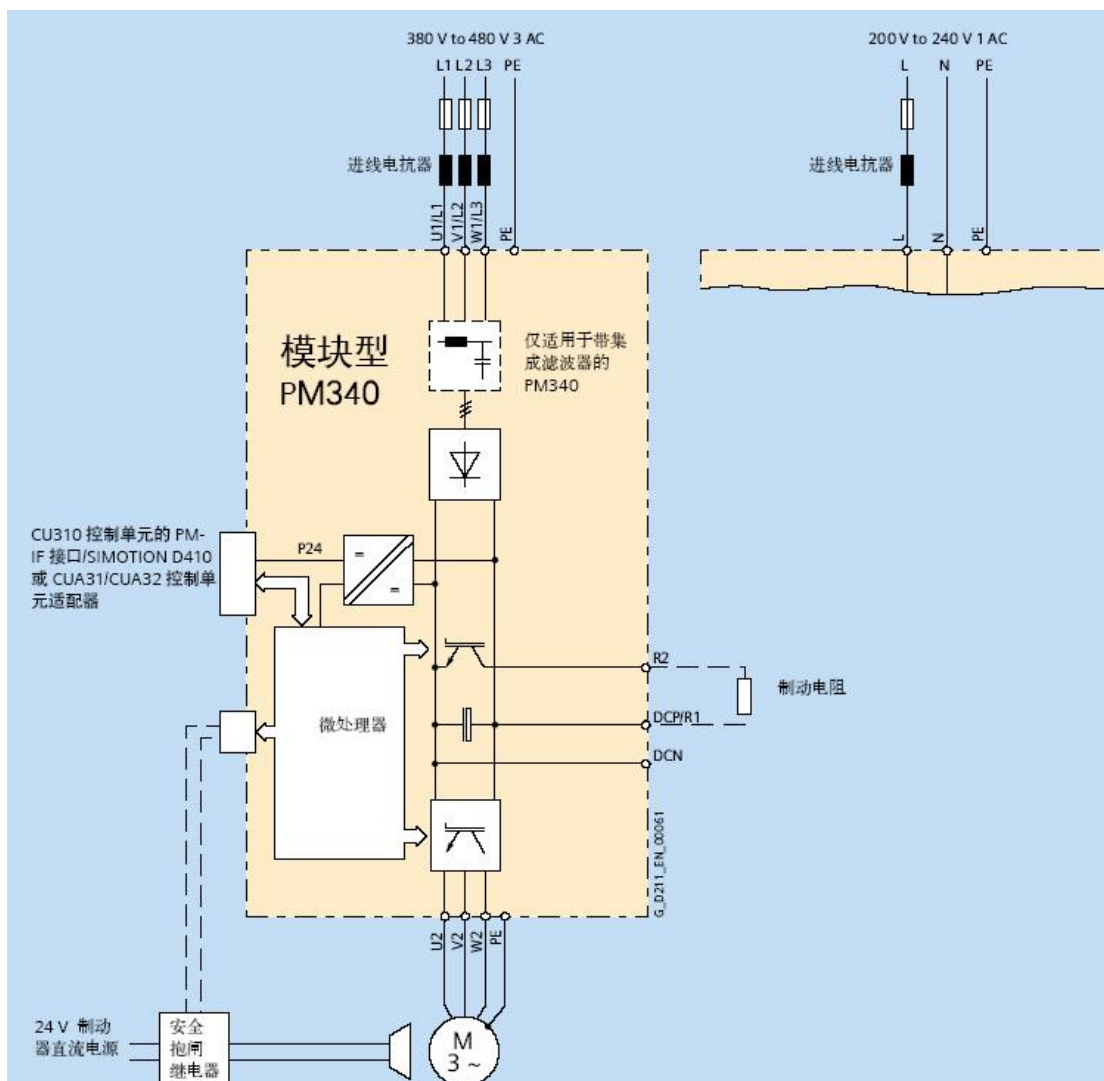


图 7.19 模块型功率模块 PM340 的典型接线图

7.3.2 控制单元 CU310

SINAMICS S120 单轴伺服驱动器的控制单元有 CU310 DP 和 CU310 PN 两种形式。

以 CU310 DP 控制器为例子，CU310 DP 控制单元通过 PM-IF 接口连接模块型 PM340，其它 DRIVE-CLiQ 组件（如传感器接口模块或端子扩展模块）通过 DRIVE-CLiQ 连接。可使用 BOP20 基本型操作面板更改参数设置，在操作过程中，还可将 BOP20 面板安装到 CU310 DP 控制单元上进行诊断。

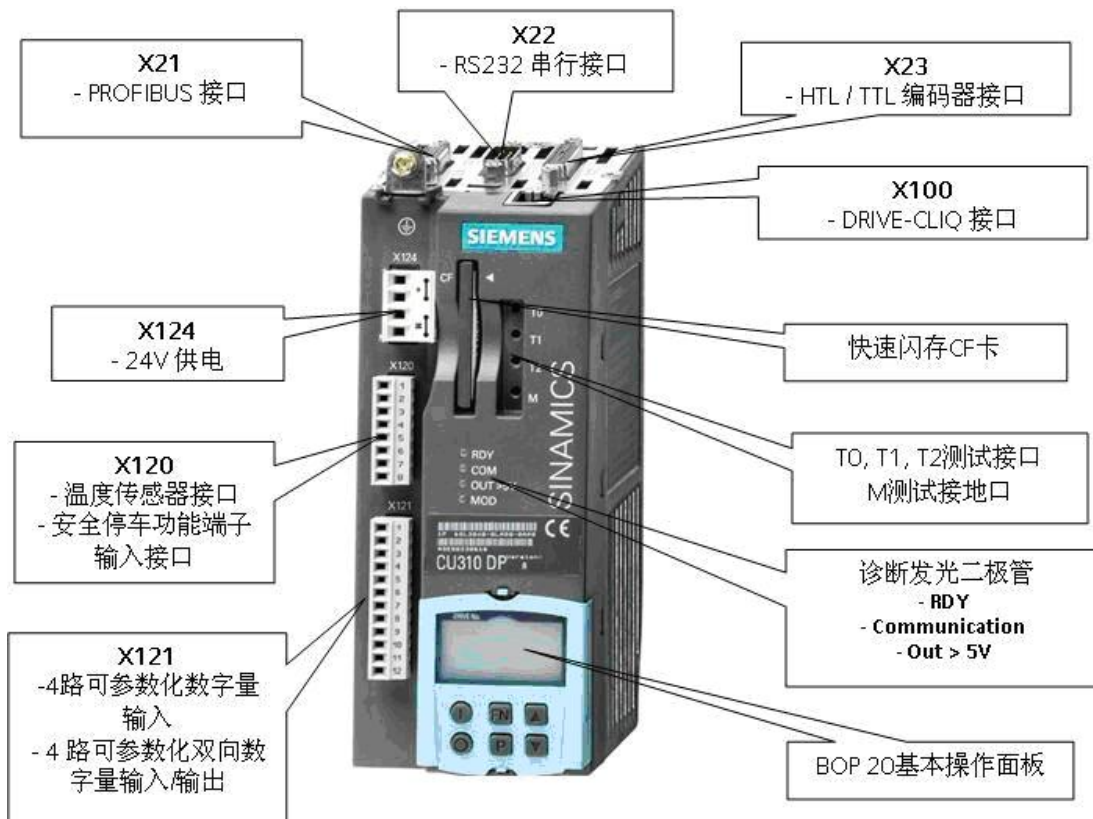


图 7.20 CU310 DP 硬件结构图

CU310 DP 的主要接口：

- CU310 DP 通过 PM-IF 接口直接插到功率模块 PM340 上；
- 如果编码器是 HTL 或 TTL 信号，则可直接插接到 X23 上，
- X100 Drive-CLiQ 接口，接带 Drive-CLiQ 的编码器、传感器、端子模块等。
- X21 Profibus-DP 接口，与 Profibus-DP 网络相连。

7.3.3 控制单元适配器 CUA31/CUA32

• CUA31

CUA31 是控制单元的适配器，通过集成的 Drive-CLiQ 接口，将模块式的功率模块连接到控制单元或 SIMOTION D 模块上，来完成运动控制功能。CUA31 控制单元适配器的供电通过功率模块上的 PM-IF 接口提供，当 CUA31 控制单元适配器需要在功率模块断电的情况下进行通讯，需要外接直流 24V 供电。



图 7.21 CUA 31 控制单元适配器

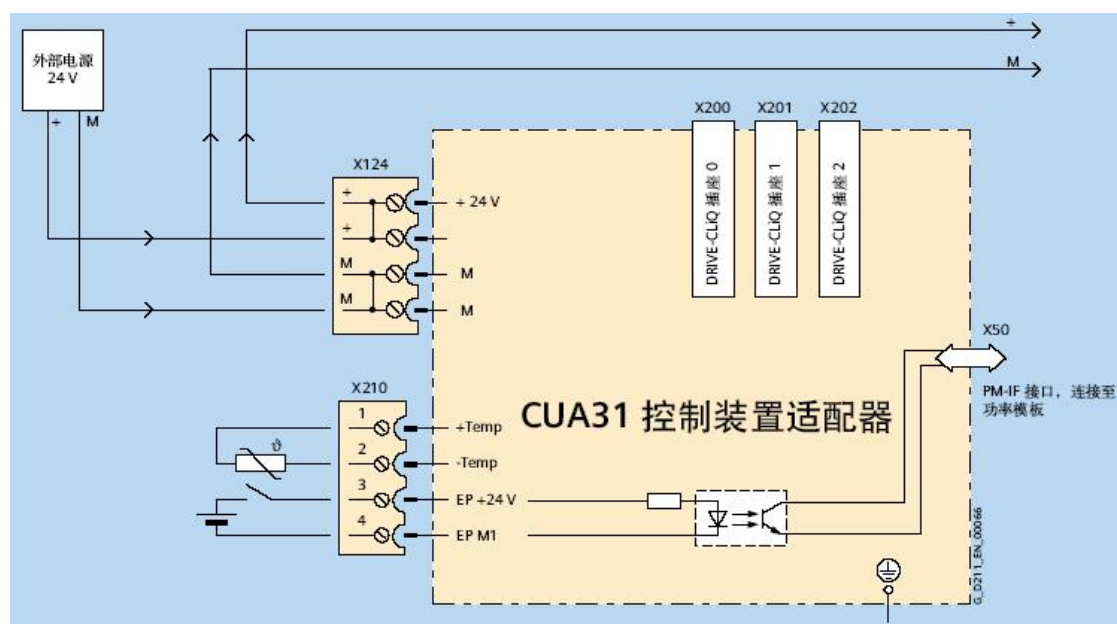


图 7.22 CUA 31 控制单元适配器的接线图

- **CUA32**

CUA32 是控制单元的适配器，与 CUA31 功能类似，与 CUA31 相比，CUA32 多了 1 个集成的 HTL/TTL 编码器接口。



图 7.23 CUA 32 控制单元适配器

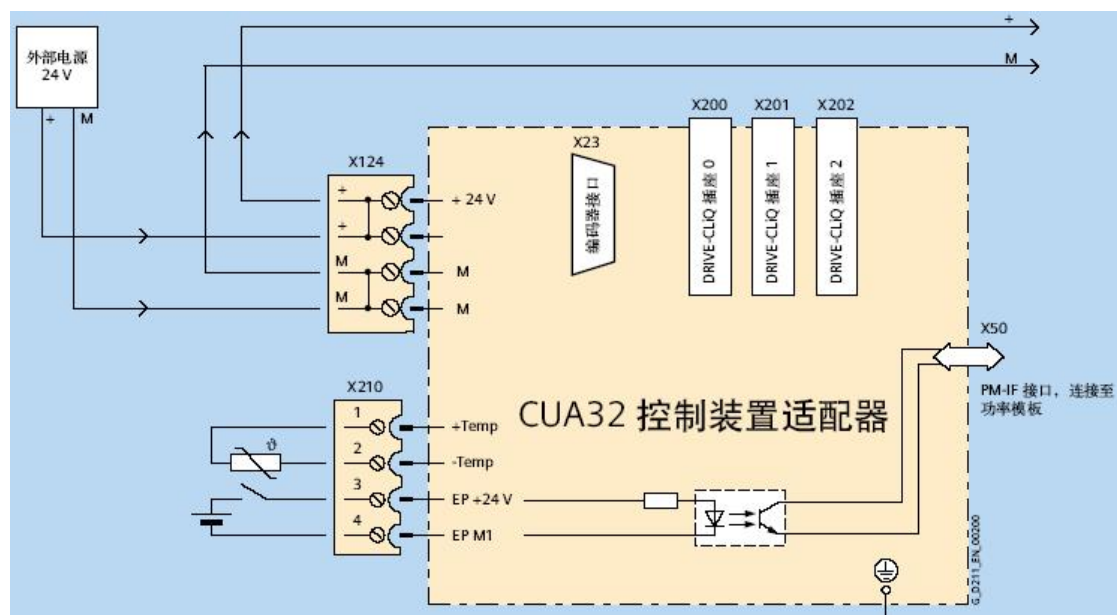


图 7.24 CUA 32 控制单元适配器的接线图

附录——练习题

1. 运动控制系统是通过对电机的（_____）等输入电量的控制，来改变生产机械的（_____）等机械量，使各种生产机械按人们期望的要求运行，以满足生产工艺的需要。
A. 转速、功率、频率 B. 电压、电流、频率
C. 转矩、速度、位移 D. 电压、功率、位移
2. 运动控制系统的本质是（_____），即根据给定和输出的偏差实施控制，最终缩小或消除偏差。
A. 转矩控制 B. 反馈控制 C. 位置控制 D. 矢量控制
3. 开环、闭环和半闭环控制是按（_____）的不同分类的。
A. 机床的加工功能 B. 进给伺服系统类型
C. NC 装置的构成方式 D. 主轴系统的类型
4. 电力电子器件中，（_____）叫做绝缘栅双极晶体管。
A. GTR B. MOSFET C. IGBT D. GTO
5. 异步电机的电磁转矩是由（_____）和转子电流相互作用产生的。
A. 定子电流 B. 定子电势 C. 定子磁链 D. 定子主磁通
6. 同步电机的转子转速（_____）旋转磁场的转速，机械特性硬，变频器的诞生解决了同步电机调速、起动及失步问题，有效促进了同步电机在运动控制中的应用。
A. 小于 B. 等于 C. 大于
7. 在系统的动态特性中，响应的快速性由（_____）表示。
A. 调节时间和峰值时间 B. 调节时间和超调量
C. 上升时间和峰值时间 D. 上升时间和超调量
8. 调节 PID 控制器时，增大（_____），有利于减小超调，减小稳态误差。
A. 比例增益 B. 积分增益 C. 微分增益

9. 一种使物体产生旋转运动的扭曲或转向的力是（_____）。
- A. 转矩 B. 惯量 C. 摩擦力 D. 加速度
10. 电机在使能状态下并无运动命令时，带负载连续输出的力矩是（_____）。
- A. 额定转矩 B. 最大转矩 C. 静态转矩 D. 最佳转矩
11. 一台三相异步电机的铭牌上标明额定电压为 220/380 V，其接法是（_____）。
- A. Y / Δ B. Δ / Y C. Δ / Δ D. Y / Y
12. 系统断电后，（_____）的位置信息是不会丢失的。
- A. TTL 编码器 B. 增量编码器 C. 绝对值编码器 D. 旋转变压器
13. 一台 4 极电机运行在 50Hz 的频率下，其同步转速为（_____）RPM。
- A. 1500 B. 1800 C. 3000 D. 3600
14. 系统的转动惯量为 0.010 kgm²，要求电机在 0.1s 内从静止加速到 2500 RPM 所需的转矩为（_____）Nm。
- A. 7.85 B. 26.17 C. 13.08 D. 32.56
15. 变频器上电时要对直流母线上的电容充电，使用带有预充电电阻的预充电回路可以在上电瞬间起到（_____）的作用。
- A. 稳压 B. 续流 C. 滤波 D. 限流
16. SINAMICS S120 可以控制的类型有（_____）。
- A. V/F 控制 B. 矢量控制 C. 伺服控制 D. DTC
17. SINAMICS S120 目前可以驱动的电机有（_____）。
- A. 伺服电机 B. 异步电机 C. 扭矩电机 D. 步进电机
18. 1FT6 电机的最高额定转速为（_____）RPM。
- A. 1500 B. 3000 C. 4500 D. 6000

19. SINAMICS S120 驱动器各部分组件之间采用（_____）通讯连接。
- A. RS232 B. SIMOLINK C. Drive-CLiQ D. PROFIBUS
20. SINAMICS S120 伺服器与通用型变频器的主要区别在于（_____）功能。
- A. 速度控制 B. 位置控制 C. 矢量控制 D. 扭矩控制
21. SINAMICS S120 的固件从版本（_____）开始可以实现定位功能。
- A. V 2.2 B. V 2.3 C. V 2.4 D. V 2.5
22. S120 驱动器的进线电抗器主要作用是（_____）。
- A. 增加变频器的容量 B. 减小纹波
C. 提高电网质量 D. 提高电机转速
23. SINAMICS S120 外接不带有 Drive-CLiQ 的 TTL 信号的编码器需要使用（_____）编码器转换接口模块将信号转换成 Drive-CLiQ 信号。
- A. SMC10 B. SMC20 C. SMC30 D. DMC20
24. SINAMICS S120 用作矢量控制时，最多可以能控制个（_____）轴。
- A. 4 B. 6 C. 8 D. 10
25. DCC 编写程序时，下列（_____）表示可以 BICO 互连的参数。
- A. @3 cosinus B. 3@ cosinus
C. @*3 cosinus D. 3*@ cosinus

参考文献及联系人

[1] 电力拖动自动控制系统	机械工业出版社	2000
[2] SINAMICS S120 及伺服电机选型手册	MC BU	2007
[3] PM21 Catalog	MC BU	2008

如有任何问题，请联系：

西门子（中国）有限公司
工业业务领域，驱动技术集团
运动控制部，应用中心
解决方案小组

地址：北京市朝阳区望京中环南路 7 号
电话：010 - 64765630，传真：010 - 64764973
电子信箱：qinglin.wang@siemens.com
公司网址：www.siemens.com.cn