

# 电力传动控制系统



## 电力传动控制系统

- 电力传动：实现电能与机械能的能量转换
- 电力传动控制系统是一门综合了自动控制理论、电力电子技术、电机与拖动的专业课程，主要研究电力传动控制系统工作原理和设计方法。

2

- 应用自动控制理论解决电力传动控制系统的问题。

- **电力传动控制系统**：通过控制电动机电压、电流、频率等输入量，来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量，使生产机械按人们期望的要求运行，以满足生产工艺的需要。

3

## 电力传动控制系统及其相关学科

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学科相互交叉的综合性学科。

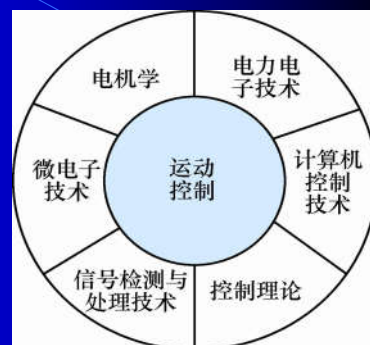


图1 传动控制及其相关学科

## 电力传动控制系统

参考书目：

- 1、《电力拖动自动控制系统》阮毅，陈伯时；机械工业出版社
- 2、《现代交流调速系统》张勇军等；机械工业出版社
- 3、《电力传动控制系统》汤天浩主编，机械工业出版社
- 4、《电力拖动交流调速系统》姜泓等；华中理工大学出版社

## 第1章 绪论

### 内 容 提 要：

- 控制系统及其组成
- 控制系统的控制对象
- 控制系统转矩控制规律
- 生产机械的负载转矩特性

## § 1.1 电力传动控制系统的基本结构

- 运动控制系统由电动机、功率放大与变换装置、控制器及相应的传感器等构成。

### 1 控制系统的组成

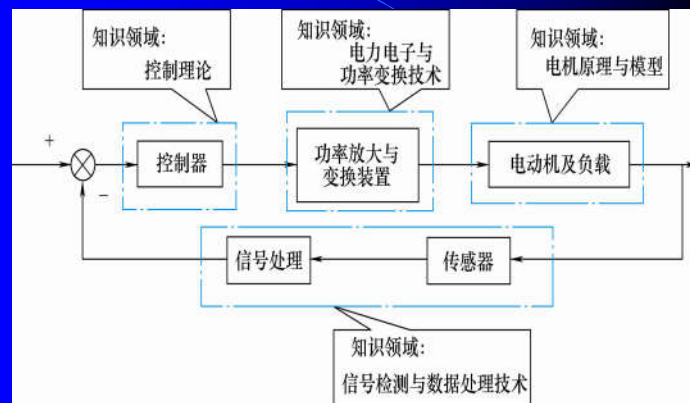


图2 控制系统组成

电力传动是以电动机作为原动机拖动生产机械运动的一种传动方式，由于电力传输和变换的便利，使电力传动成为现代生产机械的主要动力装置；对其控制系统也就提出更高的要求。

电力传动控制系统的基本结构如图2所示，一般由电源、电能变换器、电动机、控制器、传感器和生产机械（负载）组成。

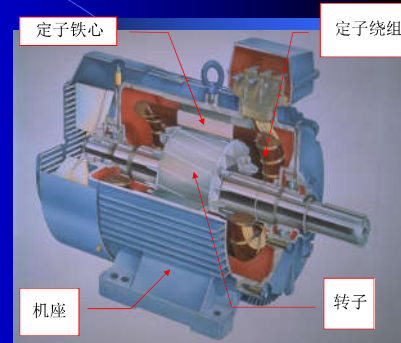
### (1) 控制系统的控制对象——电动机

#### 从类型上分：

直流电动机、交流感应电动机（交流异步电动机）和交流同步电动机。

#### 从用途上分：

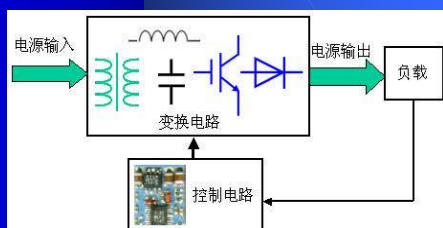
用于调速系统的拖动电动机和用于伺服系统的伺服电动机。



### (2) 功率放大与变换装置

- (1) 由半控型向全控型发展
- (2) 由低频开关向高频开关发展
- (3) 由分立的器件向具有复合功能的功率模块发展，如IPM。

IPM-内含开关器件、驱动电路、保护电路、制动电路等



### (3) 大脑中枢——控制器

#### 由模拟控制器向数字控制器发展

##### 1) 模拟控制器

优点：物理概念清晰、控制信号流向直观

缺点：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。

并行运行，控制器的滞后时间小。

## 2) 以微处理器为核心的数字控制器

硬件电路**标准化程度**高，**控制规律**体现在软件上，修改灵活方便。

拥有信息存储、数据通信和故障诊断等功能。

**串行运行方式**，其滞后时间比模拟控制器大得多，在设计系统时应予以考虑。



## (4) 信号检测与处理

- 信号检测：电压、电流、转速和位置等信号；
- 信号转换：电压匹配、极性转换、脉冲整形等
- 数据处理：信号滤波等。

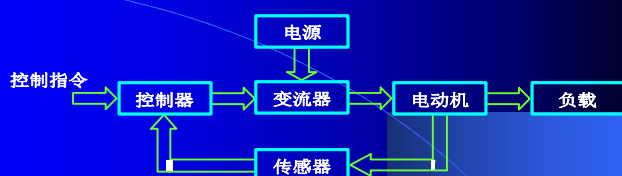
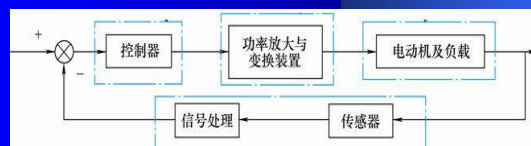


图1-1 电力传动自动控制系统的基本结构

**控制系统的基本工作过程：**控制器根据输入的控制指令（比如：速度或位置指令），由传感器采集的系统检测信号（速度、位置、电流和电压等），经过一定的控制运算给出相应的控制信号，通过变流器改变电动机输入的电源（电压、频率等），从而改变电动机的转速或位置，再由电动机驱动生产机械按照相应的控制要求运动。

## 2、电力传动控制系统的分类

根据生产机械的工艺要求，电力传动控制系统可以分为**调速控制系统**和**位置控制系统**两大类。

### 1) 调速控制系统

这类电力传动控制系统的控制指令为速度给定信号，控制器一般为速度调节器、电流调节器等，系统要求电动机按速度指令保持稳定的转速。

根据所选电动机的不同，调速系统又可分为：

(1) **直流调速系统**——采用直流电动机作为系统驱动设备，相应的电源变换器则需选用直流变换器，比如：可控整流器、直流斩波器等；

(2) **交流调速系统**——采用交流电动机作为系统驱动器，相应的电源变换器则需选用交流变换器，比如：交流调压器、各种变频器等。

### 2) 位置控制系统

这类电力传动控制系统的**控制指令**为**位置给定信号**，控制器由位置控制器、速度控制器等组成，系统要求电动机驱动负载按位置指令准确到达指定的位置或保持所需的状态。

## § 1.2 调速系统分类

自1831年法拉第发现电磁感应定律的100多年来，各种类型的电机不断发明并广泛应用于我们生产和生活的方方面面。目前，按电机供电电源的不同，大致可以分为**直流电机**和**交流电机**两大类，其中：交流电机又可根据其工作方式分为**同步电机**和**异步电机**。

### 一、直流电动机及其调速方法

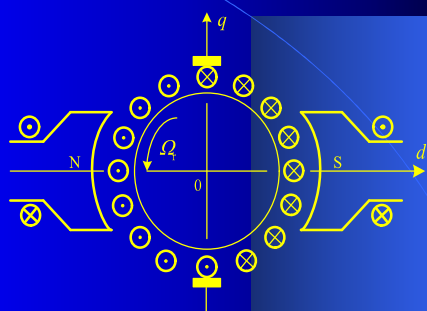
#### 1. 直流电动机

直流电动机是利用电磁感应原理将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机。

按**励磁绕组的供电方式**不同，可把直流电动机分为：

他励直流电机  
并励直流电机  
串励直流电机  
复励直流电机

### 直流电动机的模型及控制



直流电机绕组物理模型

#### ● 直流电动机的特点：

直流电动机的数学模型简单，转矩易于控制。

换向器与电刷的位置保证了**电枢电流与励磁电流的解耦**，使转矩与电枢电流成正比。

1834年直流电动机出现，直流电动机作为**调速**电动机的代表，在工业中得到了广泛的应用。

有哪些调速方法？

#### 2. 直流电动机调速方法

直流电动机转速和其它参量之间的稳态关系：

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi}$$

电动势常数

励磁磁通

由上式可以看出，有**三种方法**可以调节电动机的转速：

- (1) 调节电枢供电电压；
- (2) 减弱励磁磁通；

(3) **直流调速系统以变压调速为主！**

#### ● 直流调速系统的优缺点：

- **主要优点：**调速范围广、静差小、稳定性好，具有良好的动态性能。
- 晶闸管变流装置的应用使直流电力传动发展到了一个很高的水平，在要求**可逆、可调速与高精度**的传动领域中，相当长时期内几乎都采用直流电力传动方式。



● **问题：**直流电动机本身存在机械式换向器和电刷这一固有的结构性缺陷，给直流电力传动系统的发展及应用带来了一系列的限制：

● (1) 直流电动机不能在恶劣环境下运行；

● (2) 机械式换向器表面线速度及换向电压和电流都有极限容许值，限制了电动机的转速及功率；其极限容量与转速乘积被限制在  $10^6 \text{KW.r/min}$ ；

● (3) 制造大容量、高转速及高压直流电动机十分困难；且其调速系统也更加复杂。

目前主要的电力传动设备，特别是在大容量电力传动控制系统中大都采用交流电动机。

## 小结

直流电动机的**优点：**

(1) 数学模型简单， (2) 转矩易于控制，

(3) 具有良好的起、制动性能，

(4) 宜于在大范围内平滑调速，

在许多需要调速和快速正反向的电力拖动领域中得到了广泛的应用。

换向器与电刷的位置保证了电枢电流与励磁电流的解耦，使转矩与电枢电流成正比。

$$T = C_T \Phi I$$

**缺点：**结构复杂，带负载的能力差。

由于直流拖动控制系统在理论上和实践上都比较成熟，而且从控制的角度来看，它又是交流拖动控制系统的基础。因此，为了保持**由浅入深**的教学顺序，应该首先很好地掌握直流拖动控制系统。

## 二、交流电动机及调速方法

交流电动机有异步电动机（即感应电动机）和同步电动机两大类：

### 1. 异步电动机及调速方法

异步电动机是由定子绕组接交流电源后在电机气隙中形成圆形旋转磁场，由此产生感应电动势  $e$  和电磁转矩  $T_e$ ，旋转磁场的转速为

$$n_1 = \frac{60 f_1}{n_p}$$

电源频率  
极对数

异步电动机运行时总是有  $n \neq n_1$ ，“异步”的名称由此而来。通常把同步转速  $n_1$  和转子转速  $n$  之差称为转差，用**转差率**  $s$  表示为

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

转子转速  
同步转速

异步电动机的转速表达式：

$$n = \frac{60f_1}{n_p}(1-s)$$

异步电动机的调速可以从改变交流电源频率  $f_1$ 、改变定子绕组的极对数  $n_p$  和改变转差率  $s$  三个方面入手。

异步电动机调速系统分类：

由交流电动机的速度表达式：

$$n = \frac{60f_1}{n_p}(1-s) \quad n_1 = \frac{60f_1}{n_p}$$

调速方案：

- 1) 变极对数调速 (改变  $n_p$ ) ----- 双速电机, 两档速度
- 2) 变转差率调速 (改变  $s$ )
  - (1) 绕线型异步电动机转子回路串电阻调速
  - (2) 绕线型异步电动机串级调速
  - (3) 笼型异步电动机改变定子端电压调速
- 3) 变频调速 (改变  $f_1$ ) ----- 全控型电力电子器件宽范围无级变速。

32

## 2. 同步电动机及其调速方法

同步电动机的定子与三相异步电动机的定子基本相同，但是其转子为磁极，需要由直流电源提供励磁电流。同步电动机按转子结构可分为凸极式和隐极式两种。

同步电动机又可分为：

- (1) 直流励磁同步电动机
- (2) 永磁同步电动机
- (3) 磁阻同步电动机
- (4) 直线同步电动机

三相同步电动机的工作原理是：

当定子对称绕组通以三相对称电流时，定子绕组就会产生圆形旋转磁场，其旋转速度为同步转速  $n_1$ 。如果转子励磁绕组也通以直流励磁电流，就在转子中产生相应的磁极，其极对数与定子旋转磁场的极对数相同，且保持磁场恒定不变。在两个磁场的共同作用下，转子被定子旋转磁场牵引着以同步转速一起旋转，此时，转子转速为  $n=n_1$ ，即转子以同步转速运行，同步电动机由此而得名。

### 同步电动机的优点

由于同步电动机转速与电源频率保持严格同步，则只要电源频率保持恒定，同步电动机的转速就绝对不变，不会随负载转矩而变化。因此，同步电动机的机械特性具有恒转速特性。

除此以外，同步电动机还有一个突出的优点，就是可以控制励磁来调节它的功率因数，可使功率因数提高到1.0，甚至超前。

随着电力电子变压变频技术的发展和运用，采用同步电动机的变压变频调速系统具有与异步电动机一样优良的控制性能。

与异步电动机相比，同步电动机具有：

功率因数可调、变频器容量小、调速比宽、控制精度高、抗负载扰动能力强和动态转矩响应快等优点。

目前，已在许多电力传动场合逐步取代异步电动机，因而同步电动机调速技术成为研究的新方向。

### 同步电动机的调速方法？

在同步电动机的变压变频调速方法中，从**频率控制**的方式来看，可分为：

(1) 他控变频调速；

(2) 自控变频调速。

自控变频调速是利用转子磁极位置的检测信号来控制变压变频装置换相，类似于直流电动机中电刷和换向器的作用，因此有时又称作**无换向器电动机调速**，或**无刷直流电动机调速**。

### § 1.3 电力传动控制系统的控制规律

#### ➤ 基本运动方程式

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

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$$

转动惯量  $J$     电磁转矩  $T_e$     负载转矩  $T_L$     弹性转矩系数  $K$     阻尼转矩系数  $D$     机械转角  $\theta_m$     机械角速度  $\omega_m$

➤ 忽略阻尼转矩和扭转弹性转矩，简化运动方程式：

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

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$$

39

➤ 将转动惯量（飞轮力矩） $GD^2$ 、转速  $n$

$$GD^2 = 4gJ \quad n = \frac{60\omega_m}{2\pi}$$

➤ 代入，得工程单位制运动方程式

$$\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = T_e - T_L$$

40

➤ 电力传动系统的转速变化  $dn/dt$ （即加速度）由电动机的电磁转矩  $T_e$  与负载转矩  $T_L$  决定

1) 当  $T_e = T_L$  时， $dn/dt = 0$ ，表示电动机以恒定转速旋转或静止不动，电力传动系统的这种运动状态被称为**静态或稳态**；

41

2) 若  $T_e > T_L$  时， $dn/dt > 0$ ，系统处于加速状态；

3) 若  $T_e < T_L$  时， $dn/dt < 0$ ，系统处于减速状态。

一旦  $dn/dt \neq 0$ ，则转速将发生变化，我们把这种运动状态称为**动态或过渡状态**。

42

## ➤ 转矩控制是电力传动控制的根本问题

- ✓要控制转速和转角，最终要控制的就是电动机的电磁转矩，使转速变化率按人们期望的规律变化。

43

## ➤ 磁链控制同样重要

- ✓为了有效地控制电磁转矩，充分利用电机铁芯，在一定的电流作用下尽可能产生最大的电磁转矩，必须在控制转矩的同时也控制磁通（或磁链）。

44

## § 1.4 生产机械的负载转矩特性

### ➤ 运动方程式

$$\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = T_e - T_L$$

- 生产机械的负载转矩是一个必然存在的不可控扰动输入。

### 1、恒转矩负载

- 负载转矩的大小恒定，称作恒转矩负载
  - a) 位能性恒转矩负载
  - b) 反抗性恒转矩负载

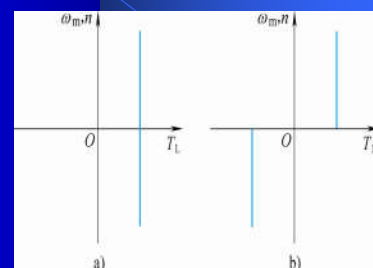


图1-3 恒转矩负载

$$T_L = \text{常数}$$

### 2、恒功率负载

- 负载转矩与转速成反比，而功率为常数，称作恒功率负载

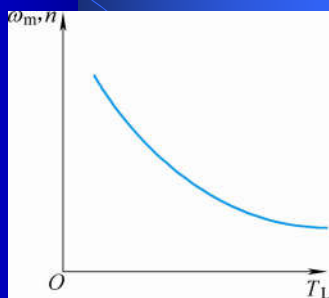


图1-4 恒功率转矩负载

$$T_L = \frac{P_L}{\omega_m} = \frac{\text{常数}}{\omega_m}$$

### 3、风机、泵类负载

- 负载转矩与转速的平方成正比，称作风机、泵类负载

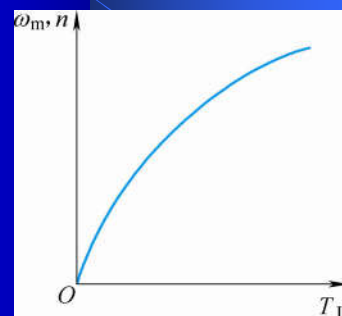


图1-5 风机、泵类负载

$$T_L \propto \omega_m^2 \propto n^2$$