

# 反 饋 控 制 系 统

无锡轻工业学院

一九八〇年八月

# 反饋控制系统

## 目 录

緒 論		1
導 言	机电能量变换的物理过程	3
第一节	电机理论中的两个基本定律及其联系	3
第二节	电力拖动系统的运动平衡方程式	7
第三节	控制系统状态的数学模型	9
第二章	可控硅直流传动系统及其开环机械特性	13
第一节	电流连续时可控硅——电动机系统的机械特性	13
第二节	电流断续时可控硅——电动机系统机械特性	19
第三节	平波电抗器的作用及其选择	21
第三章	反馈控制系统	24
第一节	转速控制系统的静态特性分析	25
第二节	单环转速控制系统动态分析和校正方法	47
第四章	多环转速控制系统	70
第一节	带电流截止负反馈系统的起动过程	70
第二节	带电流负反馈内环的双环转速控制系统	71
第三节	双环控制系统的动态校正和调节四参数设计	76
第四节	带电流变化率负反馈内环的三环转速控制系统	87
第五章	调压调磁的控制系统	91
第一节	单环磁场控制系统	92
第二节	双闭环磁场控制系统	97
第六章	电枢可逆转速控制系统	99

第一节	有环流可逆转速控制系统	99
第二节	可控环流可逆转速控制系统	104
第三节	逻辑无环流可逆转速控制系统	107
第四节	错位无环流可逆转速控制系统	124

第六章 其他调速控制系统 131

第一节	磁方可逆转速控制系统	131
第二节	五流电动机的斩波控制系统	137

# 控制系统

## 绪 论

随着“四个现代化”的建设高潮的展开，我国工农业生产 and 科学技术的迅速发展，“现代工程控制系统”在工程和科学的发展过程中，日益起着重要作用。

除了在空间导航技术、导弹制导和飞机的自动驾驶系统等领域内自动控制系统具有特别的作用外，它在现代机电制造业，工业生产过程控制的过程中也是重要的、不可缺少的组成部分。例如生产过程中对压力、温度、湿度、粘性、流量的控制或机床上零件的加工、装配、处理，或某一生产过程的速度的自动调节，或某一环节或对象的随动控制等。“控制系统”这门科学、技术皆是不可缺少的极其重要部分。

总之，现代控制系统范围包含很广，从各种不同的角度来看，它又可按下列范围划分，如：开环控制系统、闭环反馈控制系统，顺序控制系统，数字（采样）控制系统，自适应控制系统……等等。我们这一专业是工业电气自动化专业为主，所以不能涉及一切方面，而是抓住最基本的、最常用的、具有典型意义的，即反馈控制系统为本门课讲授的主要内容，而且仅对反馈控制系统而言，它所涉及的范围也是很广泛的，如一切自动调节（自动调速）、随动系统，复杂的人的机体的反馈控制系统等等。因此本门课的涉及范围还需适当压缩，即诸如：当自动调节系统的输出量是温度、压力、流量、液位或PH值（氢离子浓度）等这样一些变量时（所属范围为过程控制系统），以及在经济学、生物学、运输系统等这些领域内（均属反馈控制系统范围），皆不是本门课讲授的内容。

而此地只是讲自动调速系统及随动系统，为我们所讨论的范围。具体研究它们的基本原理、典型线路以及静、动态的分析和设计公式。

有关反馈控制的基本理论，系统的分析方法及综合方法都已在“自控理论”这一门课内讲授了，本门课控制系统仅作为

其后续课程，重点是分析实际控制系统的特点，应用“自控理论”解决实际系统中所提出的问题，并在此过程中提高理论。

通过本课程的学习能达到如下的基本要求：

一、从满足生产技术出发，给在控制规律的高度上，遵循由简到繁，由低到高的线索，逐步深入地认识各种系统。

二、对于控制系统的动态过程，学习它的基本分析方法，掌握传递函数、稳定判据、频率特性、描述函数等分析的方法。

三、通过频率法，特别是对幅频法，掌握动态设计的工程设计方法。

四、防止在学习控制系统的过程中，仅仅将控制系统当作“控制理论”的例证的这一错误方式，而是着重学习运用理论解决实践中所遇到的问题。

五、通过对本课程的学习（包括有关实验课）应具有一定的调试自动控制系统能力。

目前，控制系统的领域内，加入了电子计算机，尤其是微处理机，微型计算机的应用，更使控制系统引起了工业性的革命。微型计算机，微处理机是70年代出现和发展的，它具有程序、数据的存贮能力，运用方便，可靠性高，精度高等优点，故在自动控制领域内获得越来越广泛的应用。而且由于UP（微处理机）的应用使自动控制由硬线逻辑向软线逻辑演变，并且将直接影响机械的结构，使原来的机械承担的功能转而由电气元件来承担。

# 引言：机电能量变换的物理过程

电机是进行电能与机械能变换的机电，而在控制系统的自动调速及随动系统中，其最后的控制对象主要是体现在电能与机械能的转换。这种变换与其他机电如液压机、气动机等能量变换不同，它必须借助一种叫做“场”的特殊物质来实现。我们在分析及使用电机进行调速时必须注意电、磁、机这三方面的问题。

## 第一节 电机理论中的两个基本定律及其联系

### 一、电磁感应定律和电磁力定律

机电能量变换是电动力相互作用的结果，要作出精确而完善的论述，需要研究在电磁场里运动的带电物体。我们在此仅从电机理论中最基本的两个定律出发，进行探讨：

#### 1. 电磁感应定律：

当与某一线圈  $A \times$  交链的磁通量发生变化时，在该线圈中将会产生与磁通对时间变化率成正比的感应电势  $e$ ，当线圈面积为  $S$  时：

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

式中负号表明，感应电势有反抗磁通变化的趋势，一般更是时间  $t$  和线圈与磁场相对位移  $x$  的函数，即  $\phi(t, x)$ ，因此可将式 (1-1) 展开成

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right] \quad (1-2)$$

上式中， $e$  可分为两部分：

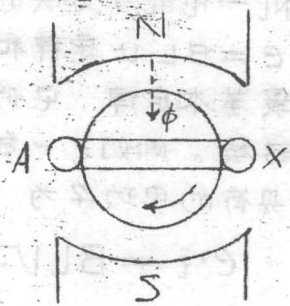


图 1-1

变压电势: 
$$e_T = - \frac{\partial \phi}{\partial t} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-3)$$

速度电势: 
$$e_V = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = - \frac{\partial \phi}{\partial x} v = - \frac{d\phi}{dx} v \quad (1-4)$$

一般工业上应用的电机是直流电机, 异步电机, 同步电机, 它们的共同特点是线圈与磁场要有相对运动, 即式(1-4)中的  $v \neq 0$ 。

为了分析问题方便, 常用一根导线代替图1-1中的线圈, 此时电磁感应定律可表示为:

$$e = BLv \quad \text{〈伏〉} \quad (1-5)$$

式中:  $L$  —— 一根导体的有效长度〈米〉

$B$  —— 磁感应强度〈韦伯/米<sup>2</sup>〉

$v$  —— 导体在垂直于磁力线方向上的运动速度〈米/秒〉

## 2. 电磁力定律:

通以电流为  $i$  (安) 的导体在磁场中将要受到力的作用, 力的大小为

$$f = BLi \quad \text{〈牛顿〉} \quad (1-6)$$

## 二、机—电能量变换的可逆性

$e = BLv$  定律和  $f = BLi$  定律是联系机—电关系的两个最基本定律, 它们共存于机—电能量变换中, 互相联系, 互相转换。例如: 一台电动机输入电能, 其中一根导体在电机内所具有的电功率为

$$e \cdot i = BLv \cdot i = BLi \cdot v = f \cdot v \quad (1-7)$$

即等于该导体所具有的机械功率。同样一台发电机输入机械能, 其中一根导线在电机内所具有的机械功率为

$$f \cdot v = BLi \cdot v = BLv \cdot i = e \cdot i \quad (1-8)$$

即等于该导体所具有的电功率。

由此看来, 在电机内电功率与机械功率是平衡的。功率

流动的方向，取决于外来的作用力。也就是说，一台发电机在一定的外界条件下可以转化为电动机运行。同样，一台电动机在一定的外界条件下也可以转化为发电机运行，这一物理过程称为电机的可逆性原理。

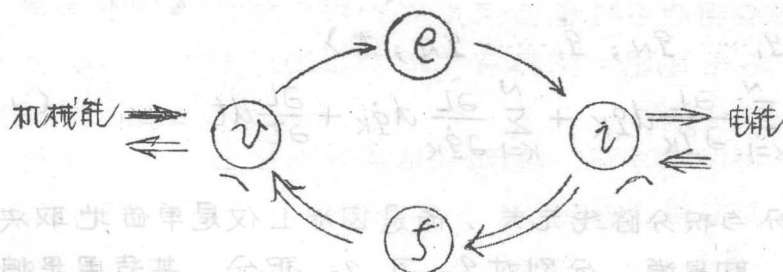


图 1-2

### 三、电机的运动方程

电机的运动物理过程的一般描述是简化到等效参数来进行，即用广义坐标  $q$ ，速度  $\dot{q}$ ，作用力  $F$ ，功率  $f$  这四个等效集合来描述。

一了系统的状态方程可由拉格朗日符号推导出。拉格朗日运动方程，从而给出一般化电机的运动方程，以拉格朗日状态函数来表徵，就是说，一了机电系统应用独立的真坐标和速度来表达，从而可写出拉格朗日函数，把电同机械——拉格朗日方程用在一起，即可得运动方程。

只要决定了坐标集和约束（或选定了独立坐标），就能获得系统的运动方程，如果用变分法原理来求运动方程一般都选用拉格朗日状态函数  $L(q, \dot{q}, t)$  来描述系统的特性。再如上所述将其用于机械——拉格朗日方程的产生运动方程，也可用其他的状态函数，例如汉密尔顿符号  $H(F, q, t)$ ，再加上汉密尔顿运动方程去推导系统的方程。实际上由拉格朗日状态函数给机电网络电学分引出的运动方程，同得自基尔霍夫定律是一致的。拉格朗日状态函数是系统坐标  $q_i$ ，系统速度  $\dot{q}_i$  和时间  $t$  的函数，因而系统的动能  $T$  和势能  $V$  之差即为拉格朗日符号  $L = T - V$

按汉密尔顿原理所下定义： $L(q, \dot{q}, t)$  是坐标  $q$ 、速度



$L$  和时间  $t$  的函数。这样  $L$  既可满足线性情况也可满足非线性情况。

设拉格朗日函数是  $L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t)$  并对非线性情况也有效，则  $L$  的总微分

$$dL(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t) = \sum_{k=1}^N \frac{\partial L}{\partial q_k} dq_k + \sum_{k=1}^N \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} d\dot{q}_k + \frac{\partial L}{\partial t} dt \quad (1-9)$$

对上式积分与积分路线无关，而是因为  $L$  仅是单值地取决于变数的终值，即是说，分别对  $q_k$  及  $\dot{q}_k$  积分，其结果是相同的，即

$$L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t) = \int_0^{q_1, \dots, q_N} \sum_{k=1}^N \frac{\partial L(q_1, \dots, q_N; 0, \dots, 0; t)}{\partial q'_k} dq'_k + \int_0^{\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N} \sum_{k=1}^N \frac{\partial L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t)}{\partial \dot{q}'_k} d\dot{q}'_k \quad (1-10)$$

这样上式第一项与速度无关，而广义力  $f_k$  可解释为

$$f_k(q_1, \dots, q_N; t) = \frac{\partial L(q_1, \dots, q_N; 0, \dots, 0; t)}{\partial q_k} \quad (1-11)$$

势能  $V = \int_0^{q_1, \dots, q_N} \sum_{k=1}^N -f'_k(q_1, \dots, q_N; t) dq'_k \quad (1-12)$

而对  $(1-10)$  式第二项，广义动量  $p_k$  可解释为

$$p_k(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t) = \frac{\partial L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t)}{\partial \dot{q}_k} \quad (1-13)$$

动能  $T = \int_0^{\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N} \sum_{k=1}^N p'_k(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t) d\dot{q}'_k \quad (1-14)$

线性情况时  $T = T$

这样一来，在线性系统情况下，

$$L = T - V \quad (1-15)$$

非线性系统情况下

$$L = T'' - V \quad (1-16)$$

上式就是拉格朗日状态函数：

而欧拉-拉格朗日方程可用下式为

$$\frac{d}{dt} \left\langle \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right\rangle - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} = Q_k \quad (1-17)$$

其中F称为瑞利损耗函数，是随速度 $\dot{q}_k$ 而变，它的物理意义为瞬时损耗功率。

$Q_k$  称为非保守的广义力，其物理意义与力的概念同，从而可导出矩阵形式表达的运动方程。

$$[V] = [R] + [P] \quad (1-18)$$

其中： $V$  — 电压矩阵

$R$  — 电阻矩阵

$P$  — 劲勇矩阵

其物理意义与  $e(t) = Ri + \frac{dL}{dt} i$  相同。(1-18)即为

电机运动方程矩阵式。

## 第二节 电力拖动系统的运动平衡方程式

从力学，我们知道，一个静止的物体在恒力的作用下将作匀加速直线运动，在从0到 $L_n$ 的路程上力所作的功A等于物体最后储存的功能，即

$$\begin{aligned} A &= \int_0^{L_n} f dL = \int_0^{L_n} m \frac{dv}{dt} dL = m \int_0^{v_n} \frac{dL}{dt} \cdot dv = m \int_0^{v_n} v dv \\ &= \frac{1}{2} m v_n^2 \end{aligned} \quad (1-20)$$

式中:  $m$  物体的质量

$v_n$  物体的末速度

对于旋转运动的物体, 有和上式类似的关系

$$A = \int_0^{\alpha_n} M d\alpha = \int_0^{\alpha_n} J \frac{d\Omega}{dt} d\alpha = J \int_0^{\Omega_n} \frac{d\alpha}{dt} d\Omega$$

$$= J \int_0^{\Omega_n} \Omega d\Omega = \frac{1}{2} J \Omega_n^2 \quad \langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \rangle \quad (1-21)$$

式中:  $M$  — 转矩  $\langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \rangle$

$\alpha_n$  — 物体在转矩  $M$  作用下的转角  $\langle \text{弧度} \rangle$

$\Omega_n$  — 末角速度  $\langle \text{弧度} / \text{秒} \rangle$

$J$  — 转动惯量  $\langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \cdot \text{秒}^2 \rangle$

我们从图 1-3 的

电力拖动系统为例来推导和讨论系统的运动方程式。

设电动机带动工作机械的角速度  $\Omega$  旋转, 在经过  $dt$  时间以后, 转过了  $d\alpha$  角度, 电动机转矩  $M$  产

生的功率除克服负载转矩  $M_{FZ}$  (包括电动机本身的摩擦, 风阻转矩等), 所作的功率以外, 其余的功率应该等于电动机与工作机械整个系统动能的变化 (能量守恒定律), 即

$$\langle M - M_{FZ} \rangle \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2} J \Omega^2)}{dt} \quad \langle \text{公斤力} \cdot \text{弧度} / \text{秒} \rangle \quad (1-22)$$

式中:  $J$  — 电动机与工作机械的转动惯量  $\langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \cdot \text{秒}^2 \rangle$

$\Omega = \frac{d\alpha}{dt}$  — 电动机的旋转角速度  $\langle \text{弧度} / \text{秒} \rangle$

$M$  — 电动机转矩  $\langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \rangle$

$M_{FZ}$  — 工作机械的负载转矩  $\langle \text{包括电动机的摩擦、风阻转矩} \rangle \langle \text{公斤力} \cdot \text{米} \rangle$

将 (1-22) 展开并除以  $\Omega$  得

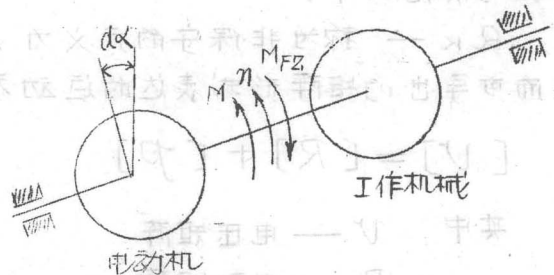


图 1-3 电力拖动系统的运动

$$M - M_{FZ} = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{2} \Omega \frac{dJ}{dt} \quad \langle \text{公斤米} \rangle \quad (1-23)$$

此式即为电力拖动系统的运动方程式，它也反映了机电能量转换物理过程。

## 第二节 控制系统状态的数学模型

### 一、微分方程的描述：

如果我们所考虑的系统自由度是一，那么只用一个变数  $y$  就可描述这个系统的物理状态，把变数  $y$  取作时间  $t$  的函数，也就可描述这个系统在时间过程中的运动状态——即函数  $y(t)$ 。我们首先用常系数线性系统来描述，也就是说一个一阶的常微分线性方程是最简单的系统——一阶系统，其数学表达式为

$$\frac{dy}{dt} + Ky = 0 \quad \langle K - \text{弹性常数} \rangle \quad (1-24)$$

此系统的平衡状态为  $y = 0$ ，其解：

$$y = y_0 e^{-Kt} \quad (1-25)$$

$y_0$  —— 初始状态

对  $n$  阶来讲，其微分方程表达式为：

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = 0 \quad (1-26)$$

对实际系统而言，各系数  $a_{n-1}, \dots$

$a_0$  都是实数，则，其解：

$$y = \sum_{i=1}^n y_0^i e^{\alpha_i t} \sin(\beta_i t + \phi_i) \quad (1-27)$$

其中： $\alpha_i, \beta_i$  都是实数，相角  $\phi_i$ ，皆与  $a_{n-1}, \dots, a_0$  系数有关。

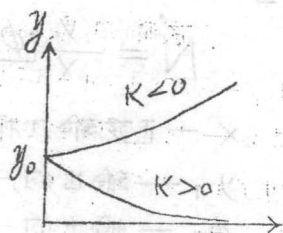


图 1-4

只有当所有的  $\alpha_i$  都是负数时，这系统是稳定的。

当  $K$  是  $y$  的函数，即变为非线性系统，其数学表达式对一般来讲： $\frac{dy}{dt} + f(y) = 0$ ，这样一来，这个简单系统的运动

状态就很复杂了，必须对此方程式进行积分求解，而且这种系统无法确定其是否稳定状态，因为这是无意义的，但我们可在李雅普诺夫意义下讨论此系统的稳定问题。

## 二、控制系统状态方程的表达法

几乎可以肯定说，任何一阶控制系统皆是非线性的，但在一定条件下，在工程上可近似的按线性系统处理，设非线性元件的正弦输入为  $x(t) = X \sin \omega t$  时，非线性元件的输出  $y(t)$  可用傅里叶级数表示。

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

$$= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1-28)$$

式中：

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos n\omega t d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

$$Y_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{A_n}{B_n} \right)$$

而非线性系统的描述函数  $N$  可由下式给出。

$$N = \frac{Y_1}{X} \angle \phi_1$$

$X$  — 正弦输入振幅

$Y_1$  — 输出的一次谐波分量的振幅

$\phi_1$  — 输出的一次谐波相位移

考虑到 (1-28) 得

$$N = \frac{y_1}{x} |\phi_1| = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{x} \left[ \tan \frac{A_1}{B_1} \right] \quad (1-29)$$

对于一个非线性系统来讲，它的描述函数可以如下介绍。

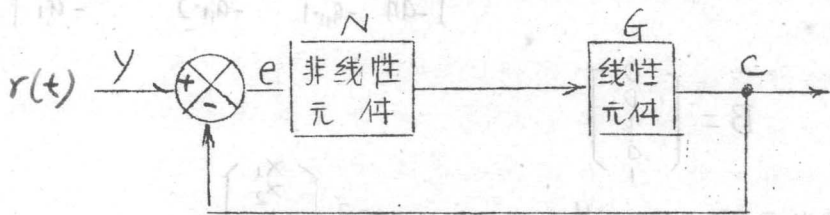


图 1-5 非线性控制系统

在高次谐波被充分地衰减，则描述函数  $N$  可以作为一个实变数或复变数的增益来处理，于是：闭环频率响应为：

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{NG(j\omega)}{1+NG(j\omega)} \quad (1-30)$$

特性方程为： $1+NG(j\omega)=0$  (1-31)

这样就可用上式按频率响应来分析系统的稳定性。

从自控理论课程内我们可知道利用古典控制理论（即根轨迹法及频率响应）对于单输入——单输出系统是完全有效的。借助于开环频率响应就能予知闭环系统的动态性能，但上述仅适用线性定常系统，对于时变系统，非线性系统和多输入——多输出系统却是无能为力的，而必须用状态方程式来表达。

设  $n$  阶系统为：

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = u \quad (1-32)$$

若知道  $y(0), \dot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$  和  $t \geq 0$  时的输入  $u(t)$  就可完全确定系统未来的行为，我们可取  $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$  几个状态变量作为一组变量。

设： $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, \dots, x_n = y^{(n-1)}$

则 (1-32) 可写成  $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dots, \dot{x}_{n-1} = x_n$   
 $\dot{x}_n = -a_1 x_1 - \dots - a_{n-1} x_{n-1} + u$

即  $\dot{X} = AX + BU$  (1-33)

其中:  $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}$

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

输出方程:  $y = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$

或  $y = CX$  (1-34)  
 $C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$

也就是说, 系统的 n 阶微分方程 (1-33) 的矩阵表达式是状态方程, 而代数方程 (1-33) 是输出方程的代数方程。

(1-35)  $y = f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)$

... (1-36) ...

(1-37)  $\dot{X} = AX + BU$

# 第一章 可控硅直流传动系统及其开环机械特性

在电力拖动自动控制系统中应用得最普遍的是自动调速系统。按照拖动电动机的类型分，自动调速系统又有直流调速系统和交流调速系统两大类，我们在这里是讲述应用范围较广的直流调速系统，这是由于直流电动机具有良好的制动性能，宜于在广范围内平滑调速，在轧钢机及其辅助机构矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、大型起重机、造纸机、金属切削机床等领域内得到了广泛的应用。

鉴于直流调速系统的理论和实践都比较成熟，而且从闭环的反馈控制角度上看，交流和直流调速系统之间的共性成份很大，关于交流调速的各种方法又都在《电机及拖动基础》教材中叙述了，所以本章将着重讨论直流调速系统，仅在本讲义后几章再介绍交流调速系统。

电力拖动中常遇到的是带电机负载，电动机由可控整流器供电，我们就在这里开始分析可控硅直流传动系统及其开环机械特性。

## 第一节 电流连续时可控硅—电动机系统的机械特性

图 1-1 是三相半波零式整流电路供电给电动机线路图，通常称为可控〈硅〉整流—电动机系统。为了减小电流的脉冲，电枢回路串接一个平波电抗器  $L_d$ 。电动机转动起来以后，产生反电势  $E$ 。由于电动机有较大的机械惯性，虽然整流电压是脉动的，但是电动机的转速和反电势  $E$  基本上是平稳的常数，（见图 1-1(b)）。在控制角  $\alpha$  处  $a$  相被触发，电流由  $c$  相换到  $a$  相，当  $a$  相电压的瞬时值小于反电势  $E$  时，由于平波电抗器  $L_d$  的续流作用， $a$  相继续导通，直到  $b$  相被触发导通将  $a$  相



关断为止，这时电流由a相换到b相。在这段时间内直流电压波形与a相相电压相同，所以说只要电流是连续的，不管什么负载，直流电压波形完全相同，在电流连续条件下，直流电压平均值为：

$$U_d = 1.17 E_2 \cos \alpha$$

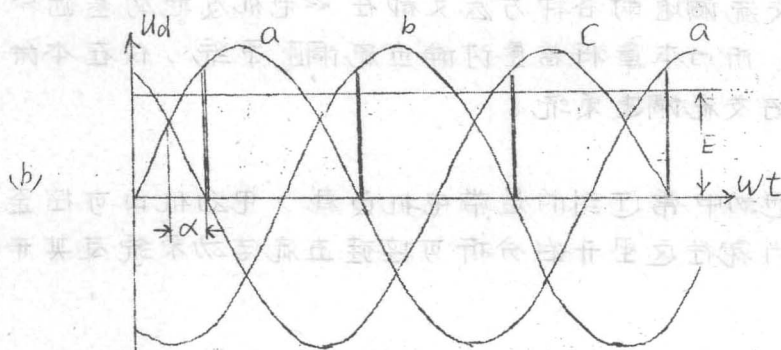
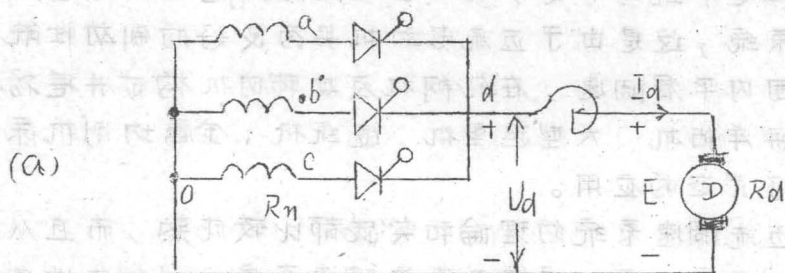


图 1-1 电机负载时整流电压波形

生产实际中对直流电动机的机械特性有一定的要求，机械特性就是电动机转速  $n$  和负载流  $I_d$  的关系。由于  $E = C_e n$ ，因此研究  $E$  与  $I_d$  的关系也就代表了  $n$  与  $I_d$  的关系。根据电路规律有：

$$E = U_d - I_d (R_n + R_d) = 1.17 E_2 \cos \alpha - I_d (R_n + R_d)$$

式中  $R_d$  为电动机电枢回路电阻（包括电枢绕组、换向绕组补偿绕组的电阻）， $R_n$  为整流装置的内阻。 $I_d R_n$  为整流电流的内阻压降，显然引压口绕组的电阻  $R_b$  会产生直流电流的内阻压降。变压器的漏感  $L_l$  也会引起压降，叫做换相压