

# 自动控制系统

上册

北京工业学院二系 231 教研室

1981.1

## 内 容 简 介

本书主要是讨论自动控制系统的工程设计计算的问题，从执行电机、功率放大装置到系统线路；从调速系统、随动系统、交流载波系统、复合控制系统到最优控制系统和自适应控制系统；从系统原理分析到系统的设计计算和模拟，都一一进行讨论。本书可作为自动控制专业高年级学生教材，也可供从事自动控制工作工程技术人员参考。

# 前 言

本书是为“自动控制”专业“自动控制系统设计”课编写的教材。考虑到与“计算机控制系统”、“制导系统”和“陀螺稳定系统”等课程的分工。照顾与“控制电机”和“自动控制理论”等先修课程的衔接,吸收已有的新技术,全书编写以线性定常连续单输入单输出系统为主,适当编写了非线性系统、最优控制系统和自适应控制系统等内容。结合我们的教学和科研实践,本书的取材和举例均以电气伺服系统(包括速度控制系统和位置控制系统——随动系统)为主要工程背景。

全书共分十一章和若干附录,附录的内容仅仅是为了便于计算时查阅、或帮助复习。

第一章自动控制系统的执行电动机、第二章自动控制系统的功率放大装置,都是从系统出发对执行电机和功率放大器进行的分析,为系统分析和设计打基础。

第三章速度控制系统,主要介绍速度控制系统的类型特点,运用对数频率法进行分析。并介绍一种运用PID调节器的简便工程计算方法。

第四章位置控制系统,即随动系统。介绍了测角原理,跟踪系统的工作原理、线路,以及跟踪系统精度、低速平稳性和机械谐振等技术问题的分析。防摇系统只作了定性分析。介绍了系统灵敏度的概念。

第五章交流载波随动系统,着重讨论了载波信号的特点,交流校正网路实现的条件,以及交流校正网路综合计算的方法。

第六章复合控制系统,介绍了不变性理论,实现不变性的条件,讨论了复合控制和复式反馈的各种结构形式,补偿通道的设计计算和复合控制系统的设计,最后介绍了双传动复合控制系统的原理和结构形式。

以上几章均以线性定常连续单输入单输出系统为对象,采用的方法主要是对数频率法和根轨迹法。

第七章非线性控制系统,讨论了非线性因素的影响、改善非线性因素影响的办法,以及非线性的利用技术,采用的方法是相轨迹法和描述函数法。

第八章自动控制系统设计问题,这一章着重解决自动控制系统设计过程中的静态计算和动态计算、校正装置综合的问题,介绍了工程上常用的对数频率法和根轨迹法。结合线性最优控制介绍一种传递函数综合法,最后简单地讨论了系统的校正形式和结构形式问题。

以上八章作为“自动控制系统设计”课的基本内容,是教学大纲要求必修的。

第九章自动控制系统的模拟,介绍了用模拟计算机模拟和用数字计算机模拟的方法,作为系统设计的辅助手段。

第十章最优控制系统和第十一章自适应控制系统,是应用现代控制理论设计最优和自适应系统的新技术。

后三章内容可作为选修,根据具体情况可以增减,也可以单独设课进行讲授。

这本书是集体完成的。第一章和 § 2-1 节由金钰执笔；§ 2-2、§ 11-3 和 § 11-4 由马润津执笔；§ 2-3 和第三章由施妙和执笔；第四章和第八章由胡祐德执笔；第五章由曾乐生执笔；第六章由许光成执笔；第七章与第十章刘兴良执笔；第九章田介眉执笔；§ 11-1 和 § 11-2 由冯雅君执笔。葛玉明参予了插图的绘制。全书由胡祐德担负主编，请肖春林同志审阅，鉴于我们的水平很低，内容取材和问题的阐述，难免有不当和错误之处，请批评指正。

编者 1980 年 12 月

# 目 次

## 前 言

## 第 一 章 自动控制系统中的执行电动机

|                       |    |
|-----------------------|----|
| § 1-1 电枢控制直流电动机       | 1  |
| 一、电枢控制直流电动机的运动方程      | 1  |
| 二、电枢控制直流电动机状态方程和信号流程图 | 2  |
| 三、电枢控制直流电动机的传递函数和结构图  | 4  |
| 四、电枢控制直流电动机的起动        | 6  |
| § 1-2 电枢控制直流电动机的运行    | 6  |
| 一、电枢控制直流电动机的电动运行状态    | 7  |
| 二、直流电动机的制动状态          | 8  |
| 三、同时考虑发电和电动运行状态时的机械特性 | 10 |
| § 1-3 磁场控制直流电动机       | 11 |
| § 1-4 两相异步电动机         | 13 |

## 第 二 章 自动控制系统中的功率放大装置

|                      |    |
|----------------------|----|
| § 2-1 交磁电机放大机        | 18 |
| 一、交磁电机放大机的工作原理       | 18 |
| 二、电机放大机的运行特性         | 19 |
| 1. 空载特性              | 19 |
| 2. 电机放大机的外特性         | 20 |
| 三、电机放大机的动态特性         | 21 |
| 1. 电机放大机空载运行的动态特性    | 21 |
| 2. 电机放大机具有电阻负载时的动态特性 | 25 |
| 3. 电机放大机带电动机负载时的动态特性 | 28 |
| 四、电机放大机——电动机组合的机械特性  | 30 |
| § 2-2 可控硅对直流电动机电枢的控制 | 31 |
| 一、基本整流线路             | 32 |
| 1. 单相半波整流线路          | 32 |
| 2. 单相全波和单相桥式整流线路     | 33 |
| 3. 三相半波整流线路          | 33 |
| 二、SCR——D 的机械特性       | 35 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 三、SCR——D 的逆变状态（有源逆变）        | 38 |
| 四、SCR——D 可逆整流线路             | 39 |
| 1. 电流断续的简单反并联系统             | 39 |
| 2. 环流系统                     | 40 |
| 3. 无环流系统                    | 43 |
| § 2-3 晶体管控制执行电动机            | 44 |
| 一、晶体管线性放大器控制直流电动机电枢         | 45 |
| 1. 互补对称式（亦称 T 型）线路          | 45 |
| 2. 桥式（亦称 H 型）线路             | 45 |
| 3. 晶体管线性放大控制直流电动机电枢时之组合机械特性 | 47 |
| 二、脉冲调宽控制直流电动机电枢             | 48 |
| 三、脉冲调宽控制直流电动机电枢时的机械特性       | 51 |
| 四、晶体管放大器控制两相异步电动机           | 54 |

### 第 三 章 速度控制系统

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| § 3-1 概 述                     | 56 |
| § 3-2 速度控制系统的动态分析             | 59 |
| 一、调速系统的稳态分析                   | 59 |
| 二、调速系统的动态分析                   | 61 |
| 1. 系统的动态指标                    | 64 |
| 2. 调速系统的动态品质与闭环幅频特性的关系        | 67 |
| 3. 调速系统的动态品质与开环对数频率特性的关系      | 68 |
| 三、稳速系统的特点                     | 71 |
| 1. 稳速系统考虑的出发点                 | 71 |
| 2. 锁相原理                       | 72 |
| 3. 锁相系统的组成及其工作                | 72 |
| 四、积分系统的特点                     | 74 |
| 1. 基本原理和分类                    | 74 |
| 2. 积分装置的动态特性及校正               | 75 |
| § 3-3 带有 PID 调节器的速度控制系统及其简便算法 | 77 |
| 一、运算放大器与 PID 调节器              | 78 |
| 二、简便算法                        | 84 |
| 1. 二阶系统标准型式的计算                | 84 |
| 2. 三阶系统标准型式的计算                | 89 |
| § 3-4 调速系统的实际线路举例             | 95 |
| 一、某火炮的半自动瞄准调速系统               | 95 |
| 1. 组成与工作原理                    | 95 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 2. 传递函数及方块图·····          | 99  |
| 3. 系统的传递函数及频率特性·····      | 102 |
| 二、雷达天线控制系统·····           | 106 |
| 1. 各部分的工作原理·····          | 106 |
| 2. 系统的传递函数、频率特性及动态品质····· | 111 |

## 第 四 章 位置控制系统

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| § 4-1 概 述·····           | 115 |
| § 4-2 测角原理·····          | 116 |
| 一、常用测角元件·····            | 116 |
| 1. 电位计·····              | 116 |
| 2. 自整角机与旋转变压器·····       | 117 |
| 3. 精粗测角线路·····           | 118 |
| 4. 陀螺仪·····              | 121 |
| 二、扫描测角·····              | 121 |
| 三、单脉冲测角·····             | 125 |
| 1. 相位比较法·····            | 125 |
| 2. 幅值比较法·····            | 126 |
| § 4-3 位置控制系统举例·····      | 127 |
| 一、型仿铣床的光电跟踪系统·····       | 127 |
| 二、高射火炮瞄准随动系统·····        | 134 |
| 三、炮瞄雷达天线角度跟踪系统·····      | 139 |
| § 4-4 自动跟踪系统的问题分析·····   | 146 |
| 一、跟踪系统的特性与精度的关系·····     | 147 |
| 二、干扰影响的分析·····           | 153 |
| 三、低速平稳性问题·····           | 155 |
| 四、机械谐振问题·····            | 160 |
| § 4-5 防摇(自动稳定)系统的分析····· | 164 |
| 一、摇摆系统动力学分析·····         | 164 |
| 二、防摇系统的基本类型·····         | 166 |
| 1. 用强力陀螺产生补偿力矩·····      | 166 |
| 2. 混合方式产生补偿力矩·····       | 167 |
| 3. 用控制系统产生补偿力矩·····      | 168 |
| 三、防摇系统的动态分析·····         | 168 |
| § 4-6 系统的灵敏度分析·····      | 176 |
| 一、灵敏度的概念·····            | 176 |
| 二、系统的灵敏度分析·····          | 181 |

## 第五章 交流随动系统

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 5-1 交流随动系统概述                 | 187 |
| § 5-2 交流随动系统的传递函数              | 189 |
| § 5-3 对交流校正网路的要求               | 192 |
| § 5-4 等效传递函数的求取                | 195 |
| § 5-5 交流无源 RC 微分网路             | 198 |
| 一、桥式 T 型微分网路                   | 198 |
| 二、双 T 型微分网路                    | 201 |
| 三、桥式 RC 网路                     | 204 |
| 四、可调整微分时间常数的 RC 网路             | 205 |
| § 5-6 等效网路的变换与 R、L、C 交流微分、积分网路 | 205 |
| 一、纯电阻 R 支路                     | 206 |
| 二、电感 L 支路                      | 206 |
| 三、电容 C 支路                      | 207 |
| 四、等效变换法                        | 207 |
| § 5-7 交流反馈校正网路                 | 208 |
| § 5-8 交流随动系统的综合校正              | 211 |
| 一、交流校正网路的设计计算步骤                | 212 |
| 二、交流校正网路设计计算举例                 | 212 |
| § 5-9 同步开关校正网路                 | 214 |
| 一、同步开关校正网路的基本原理                | 214 |
| 二、同步开关校正网路近似分析计算方法             | 216 |



## 第一章 自动控制系统中的执行电动机

自动控制系统是由若干自动控制元件组成的，图 1-1-1 表示一个简单的位置控制系统框图。其中，直接驱动控制对象的元件称为执行元件。

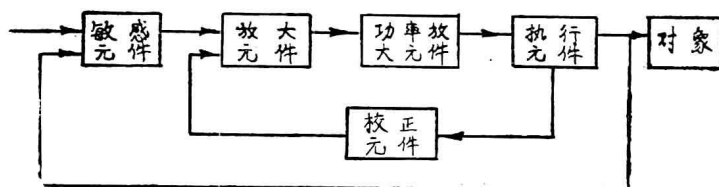


图 1-1-1 位置控制系统框图

执行元件的任务是根据放大的控制信号，来驱动被控制对象，使其按信号变化规律运动。

自动控制系统采用的执行元件有各式各样的，有电气的、液压的，气动的等等。在电气伺服系统中，常用的执行元件是伺服电动机。本章将运用大家已熟知的控制电机和自动控制理论的知识，进一步讨论自动控制系统中常用的直流电动机和两相异步电动机的特性，以加深认识。

### § 1-1 电枢控制直流电动机

直流电动机有串激、并激、复激和它激四种。在自动控制系统中，它激直流电动机（亦称分激直流电动机）用得较多，其它三种的控制特性远不如它，故在此只讨论它激直流电动机的特性。

它激直流电动机依不同控制方式分为电枢控制和磁场控制两种，亦可将两种控制形式结合使用。但用得最多的是电枢控制。

#### 一、电枢控制直流电动机的运动方程

图 1-1-2 为电枢控制直流电动机示意图，为推导它的运动方程，作以下几点假设：

- 1) 磁路不饱和；
- 2) 激磁电流为常数；
- 3) 反电势只与转速成正比。

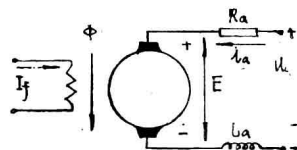


图 1-1-2 电枢控制直流电动机示意图

$$\text{即有} \quad I_j = \text{Const} \quad (1-1-1)$$

$$\phi = \text{Const} \quad (1-1-2)$$

$$e = K_e \Omega(t) \quad (1-1-3)$$

其中:  $I_j$ —激磁电流〔安〕;

$\phi$ —气隙磁通〔韦〕;

$K_e$ —电势系数〔伏·秒〕

$\Omega(t)$ —电机的角速度〔弧度/秒〕。

加到电动机电枢两端的电压,通常是控制系统中功率放大器的输出信号。按照电动机的工作原理、牛顿力学定律和克希荷夫定律,对图 1-1-2 不难写出以下方程组:

$$U_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (1-1-4)$$

$$e(t) = K_e \Omega(t) \quad (1-1-5)$$

$$M(t) = K_m i_a(t) \quad (1-1-6)$$

$$M(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + b\Omega(t) \quad (1-1-7)$$

$$\Omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-1-8)$$

式中  $U_a(t)$ ——电动机电枢电压(一般来自功率放大器输出)〔伏〕;

$i_a(t)$ ——电动机电枢电流〔安〕;

$R_a$ ——电动机电枢回路总电阻〔欧〕;

$L_a$ ——电动机电枢回路总电感〔亨〕;

$e(t)$ ——电动机的反电势〔伏〕;

$K_m$ ——电动机的力矩系数〔牛顿·米/安〕;

$M(t)$ ——电动机的电磁转矩〔牛顿·米〕;

$J$ ——电机电枢及负载折算到电机轴上的总转动惯量〔千克·米<sup>2</sup>〕;

$b$ ——粘性摩擦系数〔牛顿·米·秒〕;

$\theta(t)$ ——电动机转角〔弧度〕。

## 二、电枢控制直流电动机的状态方程和信号流程图

若选  $i_a(t)$ 、 $\Omega(t)$ 、 $\theta(t)$  为状态变量,整理 (1-1-4)–(1-1-8) 式,可得电枢控制直流电动机的状态方程

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{K_e}{L_a} \Omega(t) + \frac{1}{L_a} U(t), \quad (1-1-9)$$

$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{K_m}{J} i_a(t) - \frac{b}{J} \Omega(t) \quad (1-1-10)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \Omega(t) \quad (1-1-11)$$

写成向量的形式为

$$\dot{X} = AX + BV \quad (1-1-12)$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \Omega(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\Omega(t)}{dt} \\ \frac{d\theta(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

$$U = U_a(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} & 0 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

所以(1-1-12)式也可写成

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\Omega(t)}{dt} \\ \frac{d\theta(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} & 0 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \Omega(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_a \quad (1-1-13)$$

这就是电枢控制直流电动机状态方程的矩阵形式。

根据状态方程可画出信号流程图, 图 1-1-3 便是电枢控制直流电动机信号流程图, 其中:  $S^{-1}$  表示积分,  $i_a(t_0^+)$ 、 $\Omega(t_0^+)$ 、 $\theta(t_0^+)$  分别表示  $t_0^+$  时  $i_a$ 、 $\Omega$ 、 $\theta$  的初始值。

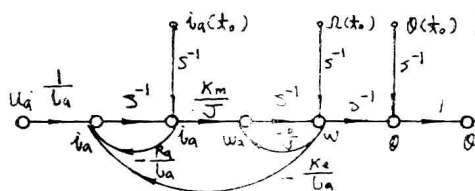


图 1-1-3 电枢控制直流电动机的信号流程图

### 三、电枢控制直流电动机的传递函数和结构图

求电枢控制直流电动机的传递函数,是在初始条件为零的条件下,对它的运动微分方程进行拉氏变换,用输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比,即得传递函数。先对(1-1-4) - (1-1-8)式进行拉氏变换,得

$$U_a(S) = L_a S I_a(S) + R_a I_a(S) + E(S) \quad (1-1-14)$$

$$E(S) = K_e \Omega(S) \quad (1-1-15)$$

$$M(S) = K_m I_a(S) \quad (1-1-16)$$

$$M(S) = JS\Omega(S) + b\Omega(S) \quad (1-1-17)$$

输入的拉氏变换是  $U_a(S)$ , 当以角速度  $\Omega(S)$  作为输出变量时, 它的传递函数是

$$\begin{aligned} \frac{\Omega(S)}{U_a(S)} &= \frac{\frac{K_m}{(JS+b)(L_a S + R_a)}}{1 + \frac{K_m K_e}{(JS+b)(L_a S + R_a)}} \\ &= \frac{K_m}{L_a JS^2 + (R_a J + L_a b)S + K_e K_m + R_a b} \quad (1-1-19) \end{aligned}$$

当以角度  $\theta(s)$  为输出时, 传递函数应是

$$\frac{\theta(S)}{U_a(S)} = \frac{K_m}{S[L_a JS^2 + (R_a J + L_a b)S + K_e K_m + R_a b]} \quad (1-1-20)$$

令:

$$\frac{L_a}{R_a} = T_a \text{——电枢回路电磁时间常数(秒),}$$

$$\frac{J}{b} = T_j \text{——电动机机械时间常数(秒),}$$

则

$$\frac{\Omega(S)}{U_a(S)} = \frac{\frac{K_m}{R_a b}}{T_a T_j S^2 + (T_a T_j)S + \left(1 + \frac{K_e K_m}{R_a b}\right)} \quad (1-1-21)$$

图 1-1-4 表示电枢控制直流电动机的动态结构图。从传递函数和结构图可以看出: 反电势的作用相当于速度负反馈。对电动机的运动起阻尼作用, 从而提高了电动机速度的稳定性。

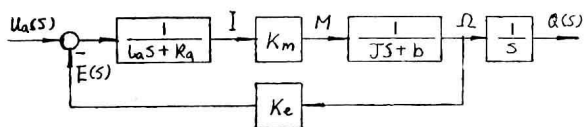


图 1-1-4 电枢控制直流电动机动态结构图

通常情况下, 粘性摩擦系数  $b$  很小, 可以忽略, 或加在负载力矩中考虑, 并将负载力矩  $M_f$  视为外加干扰。在不考虑  $M_f$  时, 以上关系式可以简化成

$$U_a(S) = I_a(S)(R_a + L_a S) + E(S) \quad (1-1-22)$$

$$E(S) = K_e \Omega(S) \quad (1-1-23)$$

$$M(S) = K_m I(S) = JS\Omega(S) \quad (1-1-24)$$

$$\Omega(S) = S\theta(S) \quad (1-1-25)$$

则传递函数为

$$\frac{\Omega(S)}{U_a(S)} = \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{JR_a}{K_e K_m} S (T_a S + 1) + 1} = \frac{K}{T_m T_a S^2 + T_m S + 1} \quad (1-1-26)$$

其中

$$\frac{JR_a}{K_e K_m} = T_m \text{——电动机机电时间常数(秒)}$$

$$\frac{1}{K_e} = K \text{——电枢控制电动机传递系数。}$$

与其对应的动态结构图如图 1-1-5 所示。

将负载力矩作为干扰作用考虑时, 可采用图 1-1-6 a 的形式, 将负载力矩等效成电流干扰时, 如图 1-1-6 b 所示。

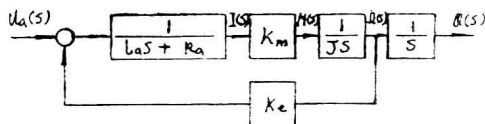


图 1-1-5 不考虑干扰力矩时的结构图

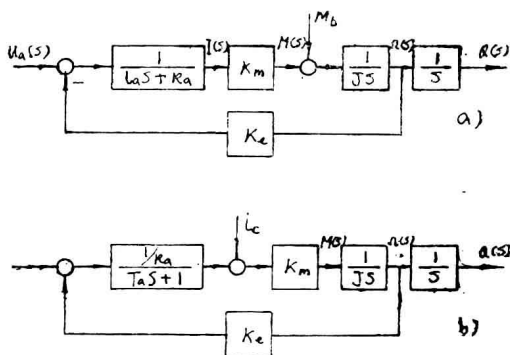


图 1-1-6 将负载力矩当作干扰作用时的结构图

考虑负载力矩时, 电动机的角速度可以运用叠加原理求得

$$\Omega(S) = \frac{K}{T_m T_a S^2 + T_m S + 1} U_a(S) + \frac{(T_a S + 1) K'}{T_m T_a S^2 + T_m S + 1} M_f \quad (1-1-27)$$

式中  $K' = \frac{R_a}{K_e K_m}$ 。

倘若电动机电枢电感很小,  $T_a$  很小可以忽略时, 则(1-1-4)式可简化成

$$U_a(t) = i_a(t)R_a + e(t) \quad (1-1-28)$$

传递函数为

$$\frac{\Omega(S)}{U_a(S)} = \frac{K}{T_m S + 1} \quad (1-1-29)$$

$$\frac{\theta(S)}{U_a(S)} = \frac{K}{S(T_m S + 1)} \quad (1-1-30)$$

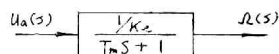


图 1-1-7 简化后的电动机结构图

可得简化后的结构图 1-1-7。

#### 四、电枢控制直流电动机的起动

电枢控制直流电动机的激磁电流  $I_f$  是常值, 并认定激磁磁通亦为常值。初始状态均为零时即  $\Omega(0) = 0$ ,  $i_a(0) = 0$ ,  $U_a(0) = 0$ 。加入阶跃控制电压,

$$U_a(t) = \begin{cases} U_a & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1-1-31)$$

时, 电动机角速度从  $\Omega(0) = 0$  到  $\Omega(t) = \Omega$ , 所经历的过渡过程称为起动,

电动机的起动过程, 可通过(1-1-21)式传递函数解得, 将输入  $U(S) = \frac{1}{S}$  代入, 再通过拉氏反变换, 即得起动过程的时间特性。

实际电动机的电枢回路之电磁时间常数, 远小于机电时间常数, 将  $T_a$  忽略, 则传递函数简化成一阶惯性环节, 所得起动过程是按指数曲线单调上升的, 如图 1-1-8 曲线 a,。它在原点处的切线与  $\Omega(\infty)$  的交点所对应的时间坐标, 即电动机的机电时间常数  $T_m$ 。

若考虑电枢回路时间常数的影响, 传递函数是二阶的。所得起动特性如图 1-1-8 中曲线 b, 电枢回路的电感只影响电枢开始的生长, 即影响起动过程的起始段。

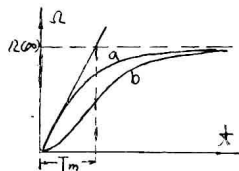


图 1-1-8 电动机的起动过程

### § 1-2 电枢控制直流电动机的运行

上一节讨论了电枢控制直流电动机的动态结构和起动特性, 本节着重讨论电动机的运行状态, 主要是通过运动方程和机械特性, 讨论它的电动机运行状态和制动运行状态。

### 一、电枢控制直流电动机的电动运行状态

电动机的运行状态可通过它的机械特性来说明,电枢控制直流电动机的机械特性,是在控制电压为常值的条件下,电动机的角速度  $\Omega$  随电磁转矩  $M$  变化的关系曲线。它反映电机稳态运行的特性,可通过它的运动方程求取机械特性。

在稳态运行时,运动方程式中所有包含  $\frac{d}{dt}$  的项均为零。

$$U_a = \text{Const}$$

$$I_j = \text{Const}$$

$$U_a = e + i_a R_a \quad (1-2-1)$$

$$e = K_e \Omega \quad (1-2-2)$$

则

$$\Omega = \frac{U_a - i_a R_a}{K_e} \quad (1-2-3)$$

$$M = K_m i_a$$

$\therefore$

$$\Omega = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_m} M = \Omega_0 - \frac{R_a}{K_e K_m} M \quad (1-2-4)$$

其中  $\frac{U_a}{K_e} = \Omega_0$  —— 理想空载角速度。

(1-2-4)式是一直线方程。表示随电磁转矩  $M$  的增加,电动机转速  $\Omega$  下降,二者成线性关系。令

$$\frac{R_a}{K_e K_m} = k = \tan \alpha \quad (1-2-5)$$

表示机械特性的斜率,其中  $\alpha$  为机械特性与  $M$  轴的夹角,得到图 1-2-1 所示机械特性曲线。

当  $\Omega = 0$  时,

$$M_1 = \frac{K_m U_a}{R_a} \quad (1-2-6)$$

称为起动力矩。

机械特性还可以表示为

$$\Omega = \Omega_0 - kM$$

机械特性斜率亦可写成

$$K = \frac{\Omega_0}{M_1} \quad (1-2-7)$$

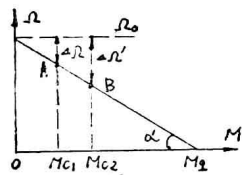


图 1-2-1 电枢控制直流电动机的机械特性

$K$  愈小、即  $\alpha$  角小, 机械特性愈硬, 在自动控制系统中使用的执行电机, 一般希望具有较硬的机械特性。

若电动机轴上的负载为  $M_{c1}$ , 稳态运行时,  $M=M_{c1}$  对应于机械特性的 A 点, 这时速度

$$\Omega = \Omega_0 - M_{c1} t_g \alpha$$

令  $\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega = M_{c1} t_g \alpha$

称为速度降落。显然, 机械特性越硬, 在同一负载下速度降落越小。当负载变为  $M_{c2}$  时, 电动机稳定在 B 点 (见图 1-2-1), 对应的速度降落为  $\Delta\Omega'$ 。

对于不同的控制电压  $U_a$ , 空载速度和起动转矩均不同, 但机

械特性斜率  $k = t_g \alpha = \frac{R_a}{K_e K_m}$  是不变的。因此, 不同的  $U_a$  值对

应的机械特性, 如图 1-2-2 所示的平行直线族。 $U_a$  反极性, 电动机反转, 电动机运行于图 1-2-2 第 III 象限所示特性上。

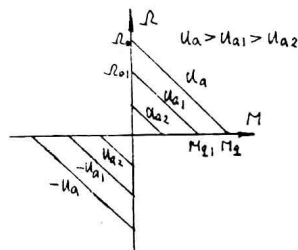


图 1-2-2 电枢控制直流电动机特性可逆运行机械特性

## 二、直流电动机的制动状态

在自动控制系统中, 执行电动机的运动应反应控制信号的变化。从图 1-2-2 可以看出: 当电机的负载一定时, 电枢电压  $U_a$  高, 电动机输出角速度  $\Omega$  高,  $U_a$  低则  $\Omega$  也低。当控制电压  $U_a$  由高突然降低时, 电动机的转速有一个由高降低的过程, 这种减速过程一般称为制动过程。

直流电动机制动方式很多, 仅从它的制动运行状态看, 分为发电制动 (又称再生制动), 反接制动和能耗制动三种。

### 1. 发电制动

从原理上讲, 一台直流电机既可作发电机又可作电动机用。在自动控制系统中的直流执行电动机, 通常均有电动和发电两种运行状态出现。在许多系统中, 当电枢电压  $U_{a1}$  突然降低到  $U_{a2}$  时, 电机的速度应从  $\Omega_1$  降到  $\Omega_2$ , 但因电动机转子和负载的机械惯性, 速度不可能随  $U_a$  立即变化, 则可能出现

$$U_{a2} - K_e \Omega_1 = i_a R_a < 0$$

换句话说: 电机的反电势  $K_e \Omega_1$  比控制电压  $U_{a2}$  大时, 电枢电流  $i_a$  要反向。

电枢电流  $i_a$  反向, 必然使电磁转矩  $M = K_m i_a$  亦反向。如图 1-2-3b, 所示, 这时电磁转矩  $M$  的方向与电动机旋转方向相反, 电磁转矩变成制动转矩, 使电机减速。这种电磁转矩与转速相反的状态, 就是发电系统。

在自动控制系统中, 直流执行电动机主要依靠功率放大器提供电能, 执行电动机将电能转换成机械能, 这是电动状态。发电状态是电机将贮蓄的动能转换成电能, 回馈给功率放大器, 电动机能否工作于发电状态, 与功

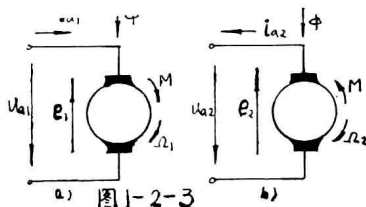


图 1-2-3 电动机的发电制动



率放大器的线路特征有关，特别是用可控硅或大功率晶体管作功率放大器控制电机电枢时，必须具备一定的线路条件，才可能使电机工作于发电制动状态，这些问题将在下一章讨论。

若用机械特性来表示发电制动过程，如图 1-2-4 所示。当电枢电压  $U_a = U_{a1}$  时，电动机稳态工作于 A 点。一旦  $U_a$  下降至  $U_{a2}$ ，由于机械惯性，转速不能突变，工作点从 A → C 点，进入机械特性第 II 象限。电枢电流  $i_a$  和转矩  $M$  均为负值， $M$  的方向与  $\Omega$  方向相反，起制动作用。速度  $\Omega$  沿着  $U_a = U_{a2}$  对应的机械特性下降，直到运行至 B 点，电磁力矩  $M = M_f$  负载力矩，电动机又处于新的平衡。这就是整个制动过程。

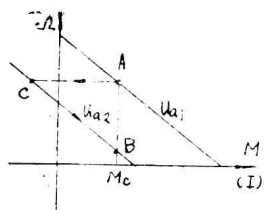


图 1-2-4 发电制动过程

## 2. 反接制动

设原有的电枢电压  $U_a$ ，使电动机正向旋转，如图 1-2-5(a)，当需要电机反转，在突然改变电枢电压的极性时，由于电机转子和负载的机械惯性，仍维持原转动方向，这时电机反电势  $E$  的极性，与外加电压  $U_a$  的极性相同，即产生很大的反向电枢电流，

$$i_a = \frac{-U_a - E}{R_a}$$

$i_a$  的方向与  $E$  方向相同，因而有与转速  $\Omega$  方向相反的电磁力矩。这个力矩称为反接制动力矩，它使电动机迅速减速、直至  $\Omega = 0$ ，然后进入反向起动，反接制动状态如图 1-2-5(b)，所示。

反接制动过程在机械特性上的表示，可由图 1-2-6 来说明。当  $U_a$  为正时电动机运行在图中的 A 点，一旦电枢电压改变极性，由于机械惯性，转速不会突变，电机由 A 点变成运行于 B 点，在很强的反接制动力矩作用下，电机沿  $-U_a$  对应的机械特性迅速减速到零，并反向起动，一直运行到 C 点，此时电磁力矩  $M = M_f$  负载力矩，电机达到新的稳态。

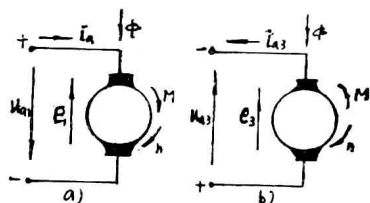


图 1-2-5 反接制动状态

在自动控制系统中，控制信号的变化一般是连续的，当电枢电压从较大的  $U_a$  值很快变到  $-U_a$  时，反接制动过程的电枢电流是很大的，如果它的峰值超出了电动机或功率放大器的容限，则应当采取保护性措施，以免造成损坏。

## 3. 能耗制动（亦称动能制动）。

当电枢控制直流电动机正常运转时，若电枢电压突然降为零，  
由于旋转部分贮存的动能维持原方向旋转，电枢仍有感应电势  $e$  产生，只要电枢回路仍形成通路，则有电枢电流

$$i_a = \frac{-e}{R_a}。$$

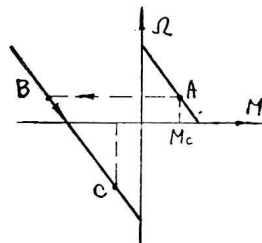


图 1-2-6 反接制动时的机械特性