

A large circular logo with a sunburst design. The sunburst consists of a semi-circle at the bottom with lines radiating upwards, forming a fan shape. The lines are white on a dark brown background.

# 仪表电机电器

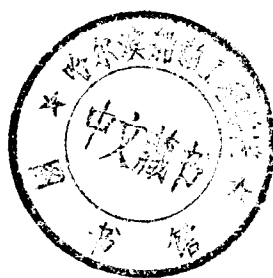
徐延漪 编

上海交通大学出版社



# 仪 表 电 机 电 器

徐 延 漪 编



上海交通大学出版社

### 内 容 提 要

本书主要介绍在自动化仪表及自动控制系统中常用的各种交、直流伺服电动机和测速发电机,同步电机,步进电机,变压器,磁放大器,自整角机,旋转变压器,继电器等电机电器元件。对近年来出现的一些新元件、新技术也作了简要介绍。

本书对上述元件着眼于在仪表中的应用,除阐述它们的基本结构和原理外,着重从信息转换和传递的角度出发研究其技术特性,并相应地联系其控制线路及在仪表或系统中的应用。

本书为自动化仪表专业和自动检测技术与仪器专业的教科书,也可作为电气技术、应用电子技术、家用电器、仪用电子技术与工程等专业的教科书或参考书,还可作为上述专业的工程技术人员的参考书。

### 仪 表 电 机 电 器

出 版: 上海交通大学出版社  
(淮海中路 1984 弄 19 号)

发 行: 新华书店上海发行所

排 版: 浙江上虞科技外文印刷厂

印 刷: 立信常熟印刷联营厂

开 本: 787×1092(毫米) 1/16

印 张: 11.75

字 数: 285,000

版 次: 1992 年 8 月 第 1 版

印 次: 1992 年 10 月 第 1 次

印 数: 1—2,810

科 目: 277—297

ISBN 7—313—01084—2/TP·21

定 价: 3.40 元

沪 新 登 字 205 号

# 前 言

在自动化仪表或自动控制系统中需要应用各种各样的电机电器元件。例如一台普通的自动平衡式记录仪表,就要用到直流或异步伺服电动机、直流或异步测速发电机、同步电动机等微型电机及变压器。近年来一些新型仪表的出现,除了受电子技术的促进之外,另一个重要条件便是采用了新的电器元件。例如 DDZ—Ⅲ 型和  $\phi$  系列的记录单元中采用了脉冲电机(即步进电机)、直流力矩马达和磁平衡器;在 EK 系列记录仪中采用了旋转变压器;在 P 100 S 系列小长图记录仪中采用了直流直线电动机;也有的台式记录中使用了无刷直流电机。无疑,在各种各样的仪表或自控系统中还会遇到更多种类的电机电器元件。

随着电子技术、自控技术和计算机应用的迅猛发展,虽然某些电器元件可能被电子线路所取代,但是前述技术的发展也促进了电机电器元件向着新的领域扩展。它表现在提高元件的性能,生产新型的元件,实现机、电、仪一体化,扩展元件的应用范围等方面。例如步进电机、无刷直流电机、高精度感应同步器等都是随着电子技术的应用而得到迅速发展。另外还有些电器元件有其特殊优点,如磁放大器虽然体积比电子器件大,但在稳定、可靠等方面比电子器件优越得多,因此在某些电动执行机构中至今仍然使用。

仪表电机电器是作为仪表或控制系统中的组成部件,多数由专业化的元件制造厂家生产,就自动化仪表或生产过程自动化类专业的工作者而言,主要是能正确地应用它。因此,本书原则上对元件本体不从设计制造的角度来分析,而是着眼于应用这些元件,一般性地阐述基本结构和原理;从信息的转换和传递的观点着重研究其技术特性;相应地联系其控制线路及在仪表或系统中的应用。

仪表电机电器元件的种类繁多,但限于篇幅只能对于应用面最广且与系统特性密切相关的各种伺服电机及其应用作重点分析;对一些目前尚不多见的元件,如印刷绕组电机、直线电机、平面步进电机等只作简要介绍。还有些元件与自动检测技术等课程重复,在此从略。

考虑到在未学过《电机学》的基础上学习本书内容,本教材的章节原则上按各种元件所从属的基础理论分类,并按由浅入深的顺序编排。本书共分十章。第一章直流电机,以直流伺服电动机为重点,并联系到直流伺服放大器和直流伺服系统。这部分内容占了较大篇幅,将各种执行元件的一些共同性的概念都在这里奠定基础,在以后的章节中则减少重复。第二、三章变压器和磁放大器,都属不含运动部件的电磁元件。第四、五章异步电机和同步电机,都是基于旋转磁场而工作的,以应用面广的两相伺服机为重点。第六章步进电机。第七、八章自整角机和旋转变压器,都是以角位移为输入信号的元件,只作一般介绍。第九、十两章可控硅和继电器控制,对于未学过变流技术和电力拖动课程的学员权作弥补。

本书由重庆大学程立雅副教授主审,并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中,山东工业大学赵秀廷副教授给予了很大帮助。在此谨表衷心感谢。

由于编者的水平所限,书中错误和不当之处难免,恳请读者批评指正。

编 者  
于 1991 年

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第一章 直流电机</b> .....       | 1   |
| 第一节 直流伺服电动机的工作原理.....       | 1   |
| 第二节 直流伺服电动机的静态特性.....       | 6   |
| 第三节 直流伺服电动机的动态分析.....       | 10  |
| 第四节 直流测速发电机.....            | 15  |
| 第五节 直流伺服电动机的控制.....         | 19  |
| 第六节 直流电机的应用.....            | 25  |
| 第七节 特殊直流电机.....             | 31  |
| 思考与练习.....                  | 39  |
| <b>第二章 变压器</b> .....        | 41  |
| 第一节 变压器的结构和原理.....          | 41  |
| 第二节 变压器应用中的问题.....          | 46  |
| 第三节 特殊变压器.....              | 50  |
| 第四节 小功率电源变压器的设计计算.....      | 53  |
| 思考与练习 .....                 | 58  |
| <b>第三章 磁放大器</b> .....       | 60  |
| 第一节 磁放大器的结构.....            | 60  |
| 第二节 磁放大器的放大原理.....          | 61  |
| 第三节 自饱和磁放大器的控制特性及其校正措施..... | 66  |
| 思考与练习 .....                 | 69  |
| <b>第四章 异步电机</b> .....       | 72  |
| 第一节 两相伺服电动机的工作原理.....       | 72  |
| 第二节 两相伺服电动机的特性.....         | 78  |
| 第三节 应用中的几个问题.....           | 83  |
| 第四节 异步测速发电机.....            | 90  |
| 思考与练习.....                  | 95  |
| <b>第五章 同步电机</b> .....       | 96  |
| 第一节 同步电动机的定子.....           | 96  |
| 第二节 转子的类型和工作原理.....         | 97  |
| 第三节 自动记录仪中常用的同步电动机.....     | 101 |
| 第四节 特殊同步电动机.....            | 105 |
| 思考与练习.....                  | 108 |
| <b>第六章 步进电动机</b> .....      | 110 |
| 第一节 步进电动机的结构及工作原理.....      | 110 |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| 第二节 步进电动机的运行特性     | 116        |
| 第三节 直线和平面步进电机      | 121        |
| 第四节 步进电机的控制        | 125        |
| 思考与练习              | 129        |
| <b>第七章 自整角机</b>    | <b>130</b> |
| 第一节 概述             | 130        |
| 第二节 力矩式自整角机        | 132        |
| 第三节 控制式自整角机        | 135        |
| 思考与练习              | 136        |
| <b>第八章 旋转变压器</b>   | <b>138</b> |
| 第一节 旋转变压器的工作原理及特性  | 138        |
| 第二节 旋转变压器的应用       | 141        |
| 第三节 感应移相器          | 145        |
| 第四节 感应同步器          | 147        |
| 思考与练习              | 153        |
| <b>第九章 晶闸管及其应用</b> | <b>154</b> |
| 第一节 晶闸管的基本知识       | 154        |
| 第二节 晶闸管的触发电路       | 158        |
| 第三节 晶闸管的应用         | 162        |
| 思考与练习              | 169        |
| <b>第十章 继电器及其应用</b> | <b>171</b> |

# 第一章 直流电机

直流电动机和发电机,其基本结构和工作原理本质相同,但两者的能量(信号)转换关系不同。由于它们的用途和性能要求有所区别,因此在具体结构或工艺上也会有所差异。本章着重讲述直流伺服电动机(属于直流电动机)。

## 第一节 直流伺服电动机的工作原理

直流伺服机是直流电动机中的一种特殊类型,它在正常工作中的工况变动更为频繁,其动态响应要求更高。直流伺服机的功率一般较小,仪表用的微型直流伺服机则更小,且其结构和制造工艺尽量简化。伺服机的电枢,通常是由电子式伺服放大器供电(控制)。此外,由于微型伺服机的功率小,便于控制,所以某些特殊结构或工艺也较容易实现,致使直线、无刷、杯形电枢、印刷绕组等新型伺服机不断出现。

由于伺服机的特殊应用,其性能应具有如下特点:调速范围宽;调节特性的线性程度好;响应速度快;无自转现象。

### 一、基本结构和工作原理

直流电机基于以下两条电磁规律而产生电磁转矩和电枢电势,即载流导体在磁场中而产生电磁力;导体与磁场相对运动切割磁力线而产生感应电势。电机要稳定工作则要遵循转矩平衡和电压平衡的规则。下面按直流伺服机的基本结构说明其工作原理。

#### 1. 基本结构

直流伺服机的基本结构如图 1-1 所示,它是由定子、转子和换向器等 3 个主要部分组成。为了便于说明工作原理,将其结构简化为图 1-2(a) 所示的模型机。

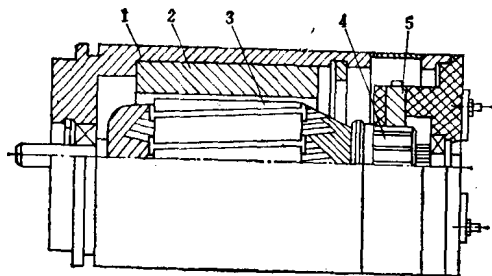


图 1-1 永磁式直流伺服电动机

1—机壳; 2—磁极; 3—电枢; 4—换向片; 5—电刷

(1) 定子。定子的作用是建立主磁场。它可以是电磁式,由绕在定子极靴上的直流绕组激磁;也可以是永磁式,定子磁极为永久磁铁。永磁式只适用于微型直流电机。

定子除了磁极以外还有磁轭、机壳、端盖和轴承等。

(2) 转子。转子的主体是电枢绕组,在此发生电能与机械能两种能量形式的转换或信号的转换。铁心的作用是导磁和支撑电枢绕组。转轴与铁心坚固连结。图 1-2(a) 中的电枢绕组只画出了一个单匝线圈  $a-b-c-d$ , 其中与转轴平行的线段  $a-b$  和  $c-d$  称作有效边。

(3) 换向器。由于定子磁场的方向恒定,而转子的电枢绕组在旋转,这就要求在任意时刻无论转子的转角位置如何,只要外加电枢电压的极性不变,电枢电流的方向应相对于主磁场的方向不变,才能使电磁转矩维持恒定的方向。例如图 1-2(b) 所示的电机模型,在转子旋转

过程中,无论导线  $a-b$  还是  $c-d$  转至上方(靠近主磁极 N),其电流方向总是进入纸面。同理,无论导线  $c-d$  还是  $a-b$  转至下方,其电流方向应流出纸面。电枢导线中电流方向的转换是靠换向器来实现的。

见图 1-2(a),换向器包括换向片  $A, B$  和电刷  $A', B'$  组成。换向片经绝缘层隔离而包围在转轴上,并分别与电枢线圈的两端  $a$  和  $b$  连接。电刷装在定子的端盖上,靠其弹性与换向片压紧,在电机运转时滑动接触。由此可见,外接电源的正端总是通过电刷  $A'$  及换向片  $A$  或  $B$  与上方(靠近 N 极)的导线相接,电源负端则通过电刷  $B'$  及换向片  $B$  或  $A$  与下方的导线相接。电刷和换向片分别固定在转子和定子上,有些文献把它们分别归属于定子和转子的组成部分。

定子和转子之间有一层很薄的间隙,简称为气隙。恒定主磁场的途径是由磁极 N — 上气隙 — 转子 — 下气隙 — 磁极 S,然后经磁轭到磁极 N 而闭合。磁通穿过气隙的方向,在上气隙是指向轴心,在下气隙是背向轴心。电枢绕组有效边总是位于转子圆柱体的外缘,很薄的气隙层包围着转子圆柱体的表面。因此,在分析时常认为有效边就是在气隙处与磁场相互作用。

## 2. 基本工作原理

当电刷与外接电源  $U_a$  的极性如图 1-2(a)所示,流经电枢线圈有效边  $a-b$  和  $c-d$  的电流  $I_a$  的方向如图 1-2(b)所示( $\otimes$  表示进入纸面, $\odot$  表示流出纸面)。根据左手定则可以判定有效边所受电磁力  $F$  的方向,由此而形成的电磁转矩  $T_m$  驱动转子并牵动负载按逆时针方向转动。

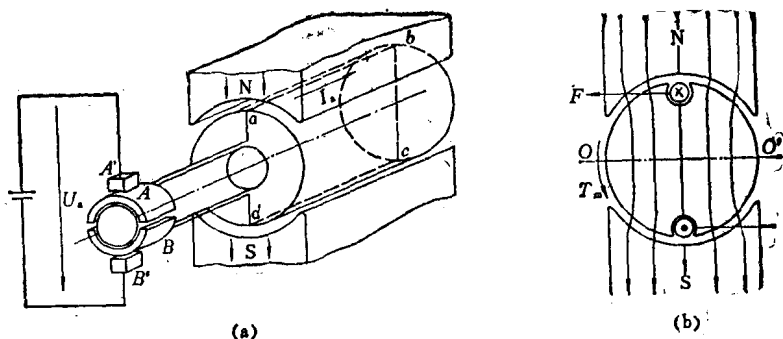


图 1-2 直流电机模型

(a) 结构示意图; (b) 磁场、电流及电磁力的方向

转子逆时针方向转过  $90^\circ$  时,电枢线圈恰好处于主磁极的中性面  $OO'$  位置(即 N 极与 S 极的中间位置),此处气隙径向的磁感应强度为零,电磁转矩  $T_m$  也为零。不过转子将借助惯性而转过此中性面,并且一旦转过之后则两个换向片与电刷的接触便会上下互换。因此在 N 极下的有效边,无论它是  $ab$  还是  $cd$ ,总是通过电刷  $A'$  接到电源  $U_a$  的正端,使电流方向总是进入纸面。同理,靠近 S 极的有效边总是通过电刷  $B'$  接电源负端,电流方向总是流出纸面。由于这种换向作用,使电磁转矩的方向不因转子的转角位置而改变,因此转子能持续地朝一个方向转动。显然,欲改变电磁转矩的方向就得改变电源  $U_a$  或主磁极的极性。直流电动机就

是这样把电能转换成机械能。对伺服机而言,则是把输入的电压信号  $U_a$  (或电流信号  $I_a$ ) 转换成转速信号(或转矩信号、位移信号)输出。

上述模型机的电枢只有一个单匝线圈,难以得到足够大的转矩以牵动负载,并且转子处于不同转角时的电磁转矩也不均匀,所以实用电机的电枢是多线圈均匀分布的。图 1-3(a) 所示的直流电机,转子铁心的外缘有 8 个槽,电枢绕组由 4 个线圈构成,各个线圈的有效边分别嵌在第 1-4、3-6、5-8、7-2 槽内。各个线圈之间的连结点分别接到 4 个换向片上,任意时刻都有 2 个换向片与 2 个电刷接触。

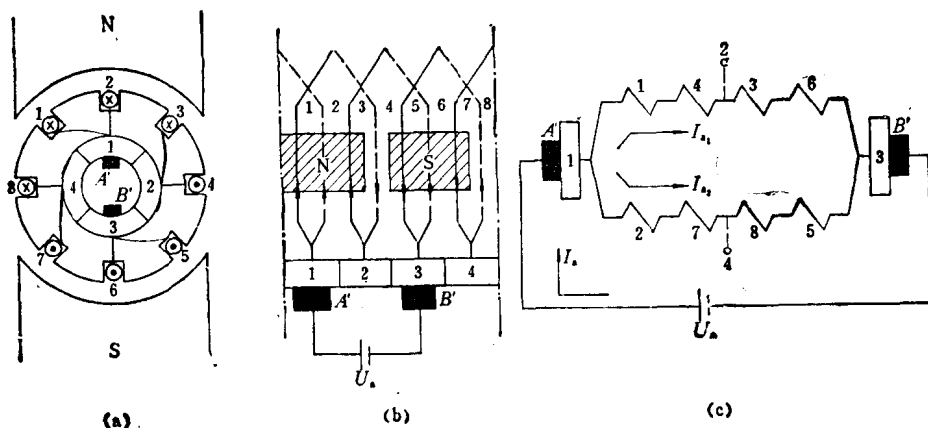


图 1-3 有 4 个线圈的电枢绕组

图 1-3 (b) 所示的展开图表示在某瞬间的主磁极、电枢绕组、换向器的相对位置,此时换向片 1、3 分别与电刷  $A'$ 、 $B'$  接触。图 1-3(c) 是电枢绕组连接图,4 个线圈 (8 个有效边) 构成 2 个并联支路,每条支路中有 4 个有效边顺向串联。实用的电枢绕组及其连接方式较多,可以联成各种串、并联电路,在此不作详述。

## 二、电枢反应

图 1-4 中主磁极的几何对称面  $a-a'$  称作几何中性面。磁场的对称面  $a_1-a'_1$  (此处的场强

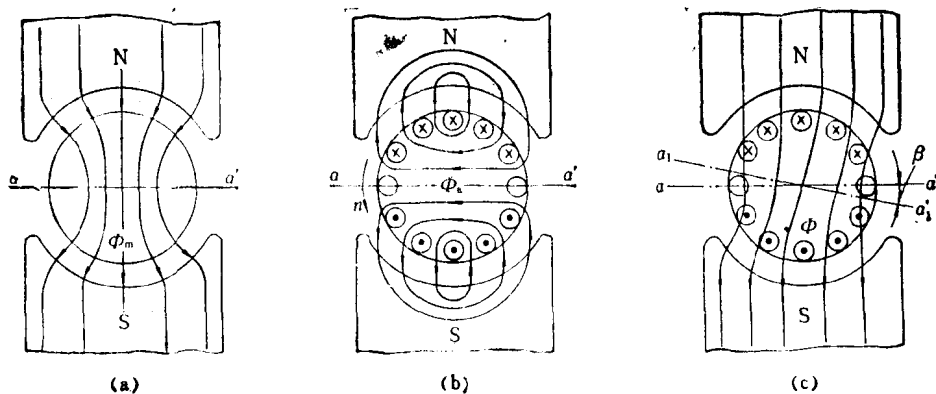


图 1-4 电枢反应

(a) 主磁场; (b) 电枢磁场; (c) 合成磁场

为零)称作物理中性面。定子主磁极产生的磁通  $\Phi_m$  称为主磁通, 见图 1-4 (a)。电机工作时电枢电流还要产生一个与主磁场方向垂直的电枢磁通  $\Phi_a$ , 见图 1-4 (b)。于是电机工作时上述两个磁通同时存在, 二者合成的磁通  $\Phi$  如图 1-4 (c) 所示, 此时合成磁通  $\Phi$  的方向与主磁通相比发生了偏移。由此而产生的影响是: ① 磁通  $\Phi$  穿过气隙的密度不均匀, 使合成磁场的物理中性面  $a_1-a'_1$  在空间转过了  $\beta$  角; ② 因铁心的工作点已选在磁化曲线的近饱和部位, 故磁通密度增大的一侧铁心已经饱和, 其导磁率减小。结果, 使总磁通减少, 这就是电枢磁场的去磁效应。上述现象称为电枢反应, 它对电机的工作和特性都不利, 应当采取相应措施以消除或减小此不利因素。主磁通  $\Phi_m$  是合成磁通的主要成分, 在以后的分析中, 如不特别说明, 皆指忽略了电枢反应的影响。

### 三、电磁转矩

由于近似认为定子与转子之间的气隙层厚度均匀, 若忽略电枢反应则认为主磁通穿过气隙时的方向皆为径向。于是电枢绕组有效边单根导线产生的电磁力为

$$f = BIl = \frac{\Phi}{\pi r} I。$$

式中:  $f$  为单根有效边的电磁力, N;  $\Phi$  为气隙半圆柱面的磁通, Wb;  $r$  为气隙圆柱面的半径, m;  $l$  为电枢有效边长度, m;  $B$  为穿过气隙的平均磁通密度, T;  $I$  为每根导线的电流, A。

若有效边导线总数(匝数的 2 倍)为  $N$ , 电枢绕组连接后的并联支路数为  $a$ , 总电枢电流为  $I_a$ , 则  $I = I_a/a$ , 于是电枢总电磁转矩为

$$T_m = Nfr = N \frac{\Phi I}{\pi r} r = \frac{N}{\pi a} \Phi I_a。$$

令  $\frac{N}{\pi a} = C_m$ , 称  $C_m$  为电机的转矩常数, 只与电机的结构有关, 与工作状态无关。

于是

$$T_m = C_m \Phi I_a。 \quad (1-1)$$

电磁转矩的单位是 N·m。

式 (1-1) 中  $T_m$ 、 $I_a$  和  $\Phi$  的实际方向符合左手定则。当磁通  $\Phi$  恒定时电磁转矩  $T_m$  的大小与电枢电流  $I_a$  成正比关系; 当  $I_a$  恒定时,  $T_m$  的大小与  $\Phi$  成正比。其方向取决于  $\Phi$  和  $I_a$  两者的方向。

### 四、转矩平衡

电磁转矩  $T_m$  是驱动转矩, 其方向与转子的转向一致。它克服电机本身的空载转矩  $T_0$ 、静负载转矩  $T_L$  和惯性转矩  $T_J$ , 而使转子转动。在任意工况下转矩平衡式为

$$T_m = T_0 + T_L + T_J$$

即

$$T_m = T_0 + T_L + J \frac{d\omega_r}{dt}。 \quad (1-2)$$

式中:  $J$  为转子及负载折合到转轴处的转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;  $\omega_r$  为转子的旋转角速度,  $\text{rad/s}$ 。在稳速运转时,  $T_J = 0$ , 故

$$T_m = T_0 + T_L \quad (1-3)$$

$T_0$  和  $T_L$  都属静态反力矩或称制动力矩, 可用一个总静态反力矩  $T_0 = T_0 + T_L$  来表示。在额定状况下,  $T_0$  比额定负载小得多, 通常忽略不计。

## 五、电枢电势

电动机运转时, 电枢有效边切割磁力线而产生感应电势, 称为电枢电势。每根导线的感应电势为

$$e_a = Blv。$$

式中:  $B$  为磁通密度,  $\text{T}$ ;  $l$  为导线有效边长度,  $\text{m}$ ;  $v$  为导线切割磁力线的线速度,  $\text{m/s}$ , 它与转速  $n(\text{r/min})$  的关系是

$$v = \frac{2\pi r}{60} n。$$

若电枢绕组连接的并联支路数为  $a$ , 总导线数为  $N$ , 则每支路内串联导线数为  $N/a$ 。于是电枢总电势为

$$E_a = \frac{N}{30a} \Phi n = C_e \Phi n。 \quad (1-4)$$

式中:  $C_e = N/(30a)$ , 称为电机的电势常数, 只与结构有关, 与工作状态无关。

式(1-4)表明, 当磁通恒定时电枢电势  $E_a$  与转子的转速  $n$  成正比。电枢电势的方向可用右手定则判断, 在稳态时  $E_a$  的极性与电枢电流  $I_a$  相反, 故称电枢反电势。

## 六、电压平衡式及电枢电流

电动机在稳态运转时, 外加的电枢电压  $U_a$  由电枢绕组的电阻压降  $I_a R_a$  和电枢反电势  $E_a$  来平衡, 如图 1-5 所示。图中, 电机用符号表示,  $R_a$  是电枢绕组的电阻。电压平衡式表达为

$$U_a = I_a R_a + E_a。 \quad (1-5)$$

由上式可求得电枢电流为

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a}。 \quad (1-6)$$

将式(1-4)代入式(1-6)后可得

$$I_a = \frac{U_a - C_e \Phi n}{R_a}。 \quad (1-7)$$

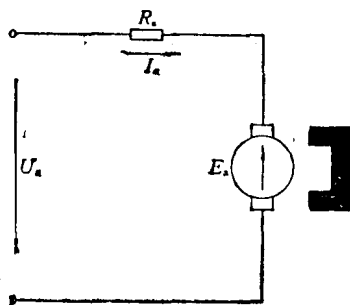


图 1-5 电压平衡关系

由此可见, 当电枢电压一定时, 转速越低则电枢电流越大。在电机开始启动的瞬间或堵转状态,  $n = 0$ , 电枢电流为最大, 称为启动电流或堵转电流, 即

$$I_{st} = \frac{U_a}{R_a}。 \quad (1-8)$$

由于电枢电阻  $R_a$  很小, 所以启动电流  $I_{st}$  就很大, 可以比电枢电流的额定值大若干倍。大功率的直流电动机更为明显, 可达额定电流的 10~20 倍。这是在使用直流电动机时应注意

的问题。

## 七、 $C_m$ 与 $C_e$ 的换算

如前所述,  $C_m$  和  $C_e$  都是只与电机本身结构有关的常数, 对同一台电机而言, 两者有着固定的对应关系, 即

$$C_m = \frac{30}{\pi} C_e = 9.55 C_e. \quad (1-9)$$

这一关系, 在进行电磁转矩与电枢电势之间的计算时, 经常用到它。

**例 1-1** 已知直流伺服机的电枢电阻为  $R_a = 30 \Omega$ , 当外加电压  $U_a = 24 \text{ V}$  时, 电枢电流  $I_a = 0.5 \text{ A}$ , 转速  $n = 4500 \text{ r/min}$ , 求电磁转矩。

**解** 根据式(1-7)可得

$$C_e \Phi = \frac{U_a - I_a R_a}{n} = \frac{24 - 0.5 \times 30}{4500} = 0.002,$$

由式(1-9)得

$$C_m \Phi = \frac{30}{\pi} C_e \Phi = 9.55 \times 0.002 = 0.0191,$$

所以电磁转矩为

$$T_m = C_m \Phi I_a = 0.0191 \times 0.5 = 9.6 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}.$$

## 第二节 直流伺服电动机的静态特性

### 一、直流伺服电动机的控制方法

根据式(1-7)和式(1-1), 可以求得如下关系:

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_m R_a}{C_e C_m \Phi^2}. \quad (1-10)$$

式中:  $C_e$ 、 $C_m$  及  $R_a$  都是由电机结构所确定的常数; 电磁转矩  $T_m$  需随时适应负载力矩的要求以达到转矩平衡, 也是不能人为地改变; 只有  $U_a$  或  $\Phi$  可以当作输入变量用来控制转速。因此, 直流伺服机就可能有以下两种控制方法。

#### 1. 电枢控制

主磁通  $\Phi$  为恒定不变, 通过调节电枢电压  $U_a$  来控制伺服机的工作状态, 此时电枢电压也称控制电压。从式(1-10)可得  $n = f(U_a)$  是线性关系。

#### 2. 磁场控制

磁场控制也叫激磁控制, 它是通过调节主磁极的磁通  $\Phi$  来控制电机的工作状态。由式(1-10)可见  $n = f(\Phi)$  是非线性关系。

由于伺服电动机需根据伺服系统的要求而频繁地调节其工作状态, 并保证系统的控制品质, 故伺服机应有较理想的特性。电枢控制方式对满足上述要求是有利的, 因此微型直流伺服机常用电枢控制方式。以后的分析除非另加说明, 皆指电枢控制。

## 二、电枢控制时的机械特性

机械特性是指电枢电压不变时,转速与电磁转矩的关系,即

$$n = f(T_m) \Big|_{U_a = \text{const}}$$

从式(1-10)可知

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_m$$

令

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi} \quad (1-11)$$

$$K_m = \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} \quad (1-12)$$

则

$$n = n_0 - K_m T_m \quad (1-13)$$

式中:  $K_m$  为常数,是机械特性斜率的绝对值。显然上式所表达的是一条向下倾斜的直线,如图 1-6 所示。

当  $T_m = 0$  时的转速  $n_0$  称为理想空载转速。不过这是假定电机的空载转矩  $T_0$  为零时定义的,实际上空载转矩  $T_0$  总是存在,实际转速也就达不到这种理想程度,只能接近而已。

当  $n = 0$  时的电磁转矩  $T_{st}$  称为启动转矩或堵转转矩。从图 1-6 或式(1-10)可得

$$T_{st} = \frac{n_0}{K_m} = \frac{U_a C_m \Phi}{R_a} \quad (1-14)$$

从图 1-6 中还可直观地求得机械特性的斜率,

即

$$\frac{\Delta n}{\Delta T_m} = \frac{-n_0}{T_{st}} = -K_m \quad (1-15)$$

它是与电枢电压无关的常数,其绝对值的大小表示机械特性的软、硬程度。 $K_m$  值越大,机械特性越软;反之, $K_m$  值越小则特性越硬。

斜率为负值表明当转矩增大时转速降低,这种下降的特性说明电动机具有自动调整稳定状态的能力。例如图 1-6 所示的特性,本来反力矩为  $T_{C1}$ ,电磁转矩  $T_{m1} = T_{C1}$ ,稳定转速为  $n_1$ 。如果由于某种外界原因使反力矩增大为  $T_{C2}$ ,静转矩失去平衡,因  $T_m < T_{C2}$ ,故实际转速便要降低。由于机械特性的斜率为负值,电磁转矩  $T_m$  将随着转速的减小而增大,当它增大到  $T_{m2} = T_{C2}$  时,便又建立起转矩平衡关系,电机也就以相应的转速  $n_2$  稳定运转。用同样的方法可以分析得知,无论是由于反力矩的波动还是由于控制电压的变化,电机都能自动地调整工作点而稳定运转。所以,直流伺服机在全部转速范围内都能稳定运转。

对于电枢控制方式,  $U_a$  作为控制信号是可以人为调节的。一定的控制电压  $U_a$  对应着一定的理想空载转速  $n_0$  和启动转矩  $T_{st}$ ,但斜率  $K_m$  不随  $U_a$  而改变,因此不同的控制电压对应

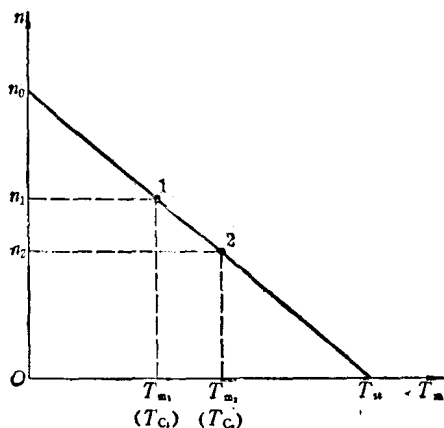


图 1-6 电枢控制时的机械特性

一族互相平行的特性曲线,如图 1-7 所示。每一条曲线都反映了对应控制电压下,转速与转矩之间的对应关系。根据特性曲线簇可以知道,当转矩不变,不同的控制电压  $U_{a1}$ 、 $U_{a2}$ ……所对应的转速  $n_1$ 、 $n_2$ ……;同理也可知道,对于某一选定的转速,在各种不同的负载转矩情况下所需要的控制电压。

### 三、电枢控制时的调节特性

调节特性也叫控制特性,是指在电磁转矩一定时控制电压与转速的关系,即

$$n = f(U_a) \Big|_{T_m} \quad (1-16)$$

这一关系仍可由式(1-10)得出,此时以  $U_a$  为变量,  $T_m$  为参变量。其斜率

$$\frac{\Delta n}{\Delta U_a} = \frac{1}{C_e \Phi} = K_n \quad (1-17)$$

也是常数,所以调节特性也是线性的。当转矩  $T_m$  为不同的定值时,调节特性是互相平行的曲线簇,如图 1-8 所示。由图可见

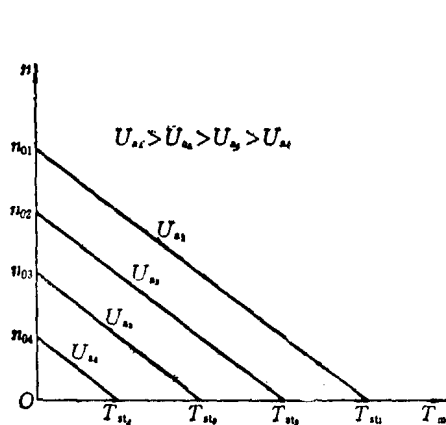


图 1-7 机械特性曲线簇

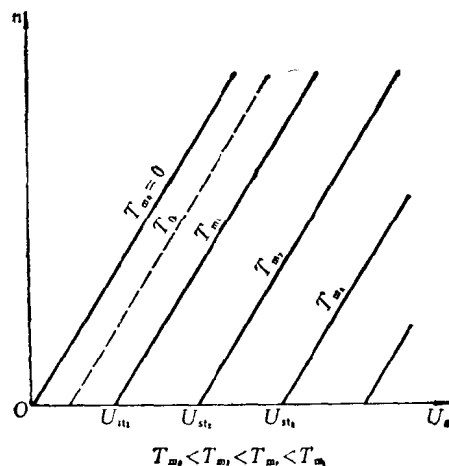


图 1-8 调节特性曲线簇

- (1) 每一给定的电磁转矩对应一条特性曲线,转速与控制电压成线性关系;
- (2) 每条曲线的起点,也即当  $n=0$  时的控制电压,就是这一给定转矩所对应的最小启动电压,即

$$U_{st} = \frac{T_m R_a}{C_m \Phi}; \quad (1-18)$$

- (3) 启动状态的电枢电势为零,由此可求得启动电流

$$I_{st} = \frac{U_{st}}{R_a} = \frac{T_m}{C_m \Phi} \quad (1-19)$$

上述机械特性和调节特性曲线,所谓转矩皆指电磁转矩。实际上在许多工程手册中常指电动机的输出转矩,即真正带动外部负载的静转矩。用以表征电动机静态特性,除上述两种特

性外还有其它若干种特性,在此只介绍了与系统特性最密切相关的以上两种。

#### 四、串激式电动机的机械特性

较大功率的直流电动机其定子主磁极采用电磁式,按励磁绕组供电方式的不同可分为它激式、并激式、串激式和复激式,见图 1-9。由于串激式电动机的机械特性比较特殊,更适合于某些特殊场合的应用,在此仅讨论串激式电动机的机械特性。

串激式电动机的励磁绕组与电枢绕组相串联,两者的总电压为  $U$ ,励磁电流  $I_t$ 、电枢电流  $I_a$  和电源电流  $I$  相等,即

$$I_t = I_a = I。$$

若磁路未饱和,则主磁通  $\Phi$  与励磁电流  $I_t$  近似为比例关系,设比例系数为  $k$ ,则

$$\Phi = kI_t。$$

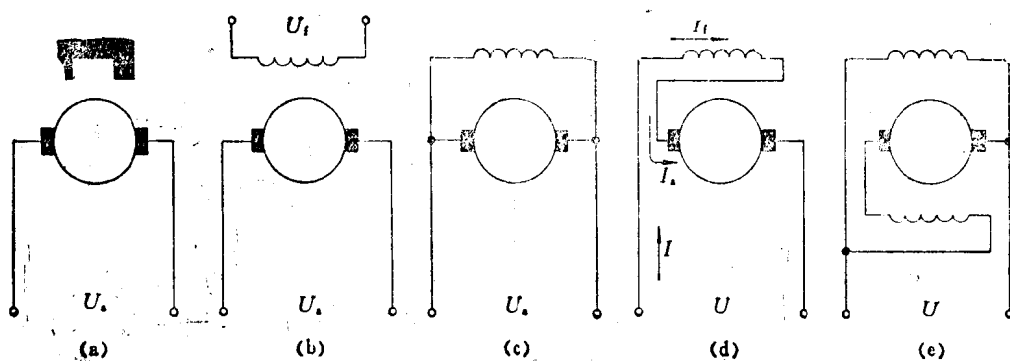


图 1-9 直流电动机的励磁方式

(a) 永磁式 (b) 它激式; (c) 并激式; (d) 串激式; (e) 复激式

##### 1. 电磁转矩与电流

由式(1-1),并将上述磁通代入,即

$$T_m = C_m \Phi I_a = C_m k I_t I_a,$$

所以

$$T_m = k C_m I^2,$$

或者表达为

$$I = \sqrt{\frac{T_m}{k C_m}}。 \quad (1-20)$$

可见,此时电流与电磁转矩的平方根成正比关系,即是说电流并不随转矩的增大而按比例增大。这一点对某些应用场合,尤其在低速运转时具有特殊意义。

##### 2. 机械特性

励磁绕组(电阻为  $R_t$ )与电枢绕组串联,电压平衡式为

$$U = I_a(R_a + R_t) + E_a = I(R_a + R_t) + C_e k I n,$$

故

$$n = \frac{U}{kC_e I} - \frac{(R_a + R_t)}{kC_e},$$

将式(1-20)代入,得

$$n = \frac{U}{kC_e} \sqrt{\frac{kC_m}{T_m}} - \frac{R_a + R_t}{kC_e},$$

令常数

$$\frac{1}{C_e} \sqrt{\frac{C_m}{k}} = A,$$

$$\frac{R_a + R_t}{kC_e} = B,$$

则机械特性可表达为

$$n = A \frac{U}{\sqrt{T_m}} - B. \quad (1-21)$$

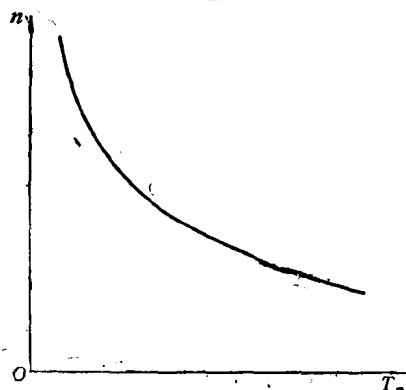


图 1-10 串激电动机的机械特性

显然,它是非线性曲线,如图 1-10 所示。

根据上述分析,可以归结出串激式电动机的如下特点:① 在转速较低时机械特性很硬,启动转矩很大;② 轻载时机械特性很软,可能得到很高的转速。理想空载转速为无穷大,称为“飞车”现象,这是机械强度所不允许的,所以在应用中不允许空载运转;③ 电机的过载能力很强。当转速很低甚至堵转时的转矩很大,但由于电流与转矩的平方根成正比关系,所以不

致使电流过大。因此,在某些像交通工具、起吊设备等场合使用,具有特殊意义。

### 第三节 直流伺服电动机的动态分析

前述静态特性只反映电动机在稳定状态下  $U_a$ 、 $T_m$ 、 $n$  等参量的对应关系。由于电枢绕组存在电磁惯性,转动部分存在机械惯性,所以本节将讨论在工况变动过程中的一些规律。

#### 一、直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态

直流伺服机在稳定状态是工作在电动机状态,但在过渡过程中就不一定是电动机状态,还可能工作于发电机、动能制动或反接制动等状态。电动机在不同的工作状态,其转矩和转向、电枢电流和电枢电势的方向、能量转换等都会有不同的关系。

##### 1. 电动机工作状态

电动机在启动时,由外电源向电枢供电,电机将加速直至达到稳定运转。其加速过程及稳定后的运转都是电动机状态,此时控制电压  $U_a$  克服电枢电势而使电流  $I_a$  流向电枢,电磁转矩是驱动力矩。见图 1-11(a),  $R_s$  是电源内阻。

##### 2. 发电机工作状态

当控制电压  $U_a$  突然降低时,由于存在机械惯性,转速及电枢电势还来不及随即降低,有可能  $U_a < E_a$ ,使电枢电流成为

$$I_a = \frac{E_a - U_a}{R_a + R_s}$$

此时  $I_a$  与  $T_m$  的方向都发生了变化, $I_a$  与  $E_a$  的方向相同,向电源充电;电磁转矩的方向与转速的方向相反,使转速降低,如图 1-11(b) 所示。在此过程中电动机工作于发电机状态,一部分机械能转换为电能,除消耗于电枢绕组外便回授电源。考虑到这种工作状态,电源(即伺服放大器)应有回授能力。

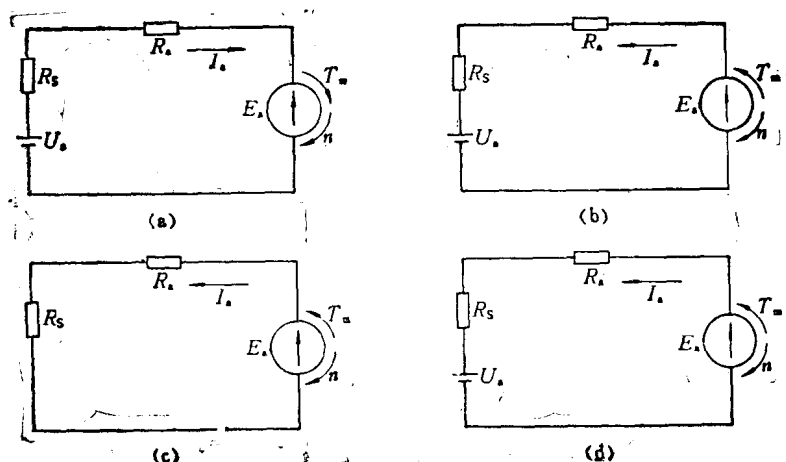


图 1-11 电动机的工作状态

(a) 电动机状态; (b) 发电机状态; (c) 动能制动状态; (d) 反接制动状态

### 3. 动能制动工作状态

运转中的电动机需停机时,突然停止供电使  $U_a = 0$ ,需经历一段减速过程才能停转。在减速过程中电动机工作于动能制动状态。这种状态与发电机状态相似,只是  $U_a = 0$ ,电动机所储存的动能转换为电能而消耗于电枢电阻,如图 1-11(c) 所示。

### 4. 反接制动工作状态

正在运转的伺服电动机,当需要迅速改为反转时,用改变控制电压极性的办法可以加速过渡过程。当控制电压极性突然改变时,电机将由原来的稳定转速降为零,然后再反向加速至反向的稳速。在电压反极性时,其转速和电枢电势的方向来不及改变, $U_a$  和  $E_a$  同向;电流的方向已经改变,所以电磁转矩的方向也变为与转速相反而成为制动转矩,如图 1-11(d) 所示。此时电流为

$$I_a = \frac{U_a + E_a}{R_a + R_s}$$

此时电枢电流很大,它一方面产生较大的制动转矩加快制动过程;另一方面对电枢绕组和电源来说是一种最恶劣的工作状态,在设计伺服放大器的功率级时应予以考虑。

## 二、过渡过程的动态特性

伺服电动机作为信号转换元件,其输入信号是控制电压  $U_a$  或控制电流  $I_a$ ; 输出信号是转