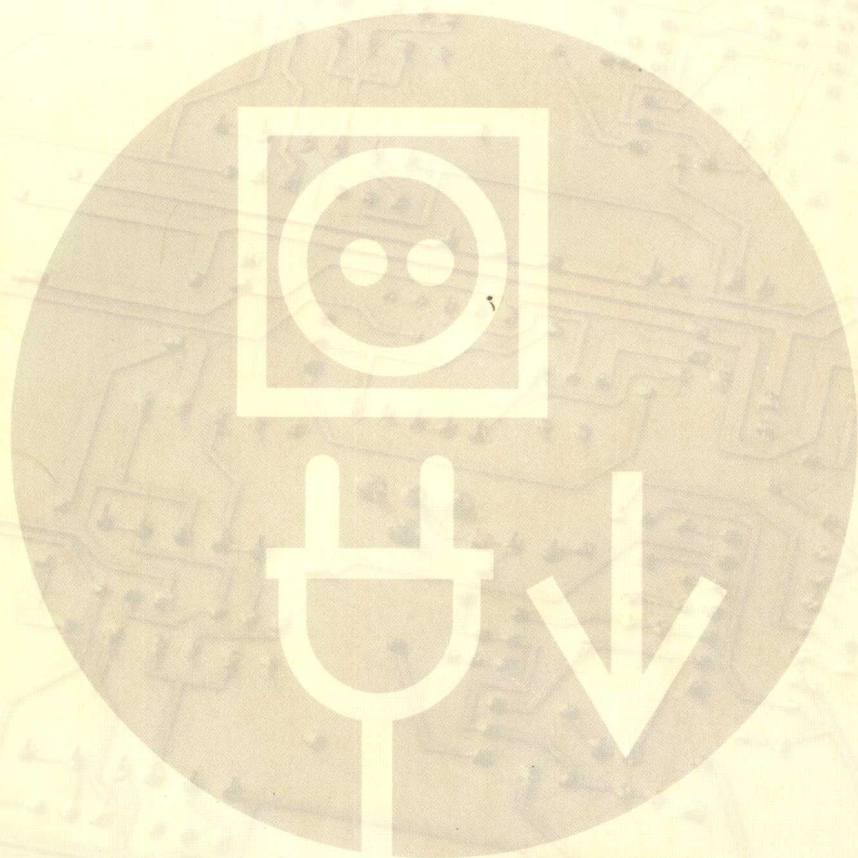


全国高等职业技术学院电工类专业教材

QUANGUO GAODENG ZHIYE JISHU YUANXIAO DIANGONGLEI ZHUANYE JIAOCAI

工厂电气控制技术

GONGCHANG DIANQI KONGZHI JISHU



中国劳动社会保障出版社

1.5
2:1



10

全国高等职业技术学院电工类专业教材

工厂电气控制技术

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工厂电气控制技术/王兵主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2004
全国高等职业技术院校电工类专业教材

ISBN 7-5045-4254-7

I. 工… II. 王… III. 工厂—电气控制 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 016121 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出 版 人: 张梦欣

*

新华书店经销

北京印刷二厂印刷 北京助学印刷厂装订

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 3 插页 426 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印数: 8000 册

定价: 25.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64911190

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64911344

前言

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》，推进高等职业技术教育更好地适应经济结构调整、科技进步和劳动力市场的需要，推动高等职业院校实施职业资格证书制度，加快高技能人才的培养，劳动和社会保障部教材办公室在充分调研和论证的基础上，组织编写了高等职业院校系列教材。从2004年起，陆续推出数控类、电工类、模具设计与制造、电子商务、电子类、烹饪类专业教材，并将根据需要不断开发新的教材，逐步建立起覆盖高等职业院校主要专业的教材体系。

在高等职业院校系列教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则：一是坚持高技能人才的培养方向，从职业（岗位）分析入手，强调教材的实用性；二是紧密结合高职院校、技师学院、高级技校的教学实际情况，同时，坚持以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容覆盖职业技能鉴定的各项要求；三是突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法等方面的内容，较全面地反映行业的技术发展趋势；四是打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，力求教材编写有所创新，使教材易教易学，为师生所乐用。

电工类专业教材主要包括《电工基础》《电子技术》《工程制图》《电气测量》《电气管理知识》《数控技术》《单片机原理与接口技术》《可编程控制技术》《工厂电气控制技术》《自动控制技术》《工厂变配电技术》《电机原理与维修》《变频技术》《高级维修电工基本技能训练》《高级维修电工专业技能训练》《高级维修电工综合技能训练》《高级电工技能训练》《电气设备安装技术》《高电压技术（2005年出版）》等，可供高职院校、技师学院、高级技校电气维修、企业供电等专业使用。教材的编写参照了《维修电工》以及其他相关的国家职业标准，有些教材还配套出版了习题册。

在上述教材编写过程中，我们得到有关省市劳动和社会保障部门、教育部门，以及高等职业院校、技师学院、高级技校的大力支持，在此表示衷心的感谢。同时，我们恳切希望广大读者对教材提出宝贵的意见和建议，以便修订时加以完善。

劳动和社会保障部教材办公室

2004年2月

简介

本书为全国高等职业技术学院电气维修专业教材，供各类高职院校、技师学院、高级技校相关专业使用。主要内容有：直流电动机、交流电动机、控制电机、电力变压器、继电控制电路分析基础、电机扩大机调速系统、变频技术及其应用、同步电机及励磁屏控制电路、直流调速系统、可编程控制器的应用等。

本书为工艺和实训一体化教材，降低了理论难度，突出了技能训练，涵盖了国家职业标准中对高级工的要求，也可用于高级技术人才培养。

本书由王兵主编，彭志红、陈令平、华满香、张文参加编写；刘万钧审稿。

目录

第一章 直流电动机	(1)
§ 1—1 直流电动机的结构与工作原理	(1)
§ 1—2 直流电动机的机械特性	(3)
§ 1—3 直流电动机的启动与制动	(6)
§ 1—4 直流电动机的调速	(10)
试验一 直流电机试验	(14)
习题一	(16)
第二章 交流电动机	(18)
§ 2—1 三相感应电动机的结构与工作原理	(18)
§ 2—2 感应电动机的功率和电磁转矩	(20)
§ 2—3 感应电动机的机械特性	(24)
§ 2—4 三相感应电动机的启动与制动	(26)
§ 2—5 三相感应电动机的调速	(29)
§ 2—6 交流电磁调速电动机	(34)
§ 2—7 三相感应电动机的检修工艺	(36)
试验二 感应电动机试验	(41)
习题二	(44)
第三章 控制电机	(46)
§ 3—1 测速发电机	(46)
§ 3—2 伺服电动机	(50)
§ 3—3 自整角机	(56)
§ 3—4 步进电动机	(59)
§ 3—5 旋转变压器	(64)
§ 3—6 盘式电动机	(67)
习题三	(69)
第四章 电力变压器	(70)
§ 4—1 变压器参数的测定和标么值	(70)
§ 4—2 电力变压器的连接组标号	(73)
§ 4—3 电力变压器的运行与维护	(78)
试验三 电力变压器试验	(83)

习题四	(86)
第五章 继电控制电路分析基础	(87)
§ 5—1 电气图	(87)
§ 5—2 组合机床的电气控制环节	(94)
§ 5—3 立式车床的电气控制	(103)
习题五	(112)
第六章 电机扩大机调速系统	(113)
§ 6—1 自动调速系统的基本概念	(113)
§ 6—2 电机扩大机	(115)
§ 6—3 电机扩大机调速系统的基本环节	(118)
§ 6—4 B2012A 型龙门刨床的电气控制	(123)
习题六	(136)
第七章 变频技术及其应用	(137)
§ 7—1 晶闸管中频电源	(137)
§ 7—2 串级调速系统	(145)
§ 7—3 变频器应用	(151)
习题七	(163)
第八章 同步电机及励磁屏控制电路	(164)
§ 8—1 同步电机的类型与结构	(164)
§ 8—2 同步电机的运行特性	(167)
§ 8—3 同步电机的启动	(172)
§ 8—4 同步发电机的并联运行	(174)
§ 8—5 同步电动机励磁装置	(176)
习题八	(184)
第九章 直流调速系统	(185)
§ 9—1 有静差直流自动调速系统	(185)
§ 9—2 无静差直流自动调速系统	(190)
§ 9—3 晶闸管直流调速装置应用实例	(194)
习题九	(196)
第十章 可编程控制器的应用	(197)
§ 10—1 可编程控制器的结构和工作原理	(197)

§ 10—2	三菱 FX ₂ 可编程控制器的基本指令	(204)
§ 10—3	三菱 FX ₂ 可编程控制器的步进指令	(212)
§ 10—4	三菱 FX ₂ 可编程控制器的功能指令	(219)
§ 10—5	可编程控制器的应用实例	(233)
§ 10—6	可编程控制器的网络技术	(256)
习题十		(259)

第一章

直流电动机

直流电机是直流电动机和直流发电机的总称，是一种实现机电能量变换的电磁装置，将输入的直流电能转换为机械能输出的称为直流电动机，将输入的机械能转换为直流电能输出的称为直流发电机。虽然直流电动机的结构比较复杂，使用和维护较麻烦，但由于它有优良的启动和调速性能，在冶金、电力机车、金属切削、造纸等工业生产中仍有着广泛的应用。

§ 1—1 直流电动机的结构与工作原理

一、直流电动机的结构

直流电动机由定子和转子（又称电枢）两大部分组成。定子、转子之间有一定的间隙，称为气隙。直流电动机结构如图 1—1 所示。

1. 定子

定子的主要作用是产生主磁场并作电机的机械支撑，它由主磁极、换向极、电刷装置、机座、端盖等组成。

(1) 主磁极 主磁极简称主极，用来产生主磁通。除个别小型直流电机主磁极采用永久磁铁外，一般直流电机主磁极都是采用电磁铁，它包括主极铁心和套在主极铁心上的励磁绕组。主极铁心靠近电枢较宽的部分称为极靴，绕组所套的部分称为极身。电枢旋转时，在极靴下面，由于齿和槽的影响，使气隙磁阻发生变化，引起磁极表面磁密发生变化，在极靴表面产生涡流损耗。为降低涡流损耗，主磁极铁心用 0.5~3 mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成。主磁极是成对出现的，相邻磁极的极性按 N 极和 S 极交替排列。

(2) 换向极 换向极的作用是产生换向磁场。它由换向极铁心和换向极绕组构成。大容量和换向要求高的电机，换向极铁心用相互绝缘的薄钢片叠成，中小容量直流电机的换向极铁心用整块板制成。换向极绕组与电枢绕组串联，换向极装在相邻两主极之间，换向极数目一般等于主磁极数目，在小容量直流电机中，换向极数目有时只有主磁极的一半，也有少数不装换向极的。

(3) 电刷装置 电刷的作用是将转动的电枢与外电路相连，使电流经电刷输入或输出电枢，并通过电刷与换向器的配合，在电刷两端获得直流电压。电刷装置由电刷、刷握、刷

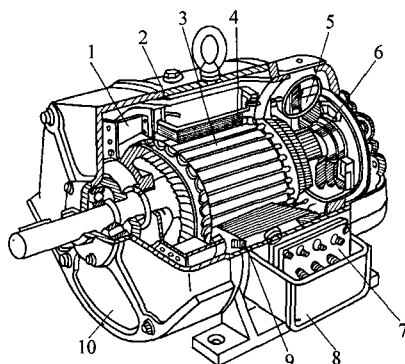


图 1—1 直流电动机的结构

- 1—风扇 2—机座 3—电枢 4—主磁极
5—电刷 6—换向器 7—接线板
8—出线盒 9—换向极 10—端盖

杆、刷辫、弹簧机构等组成。电刷组的数目一般等于主极数，并沿圆周均匀分布。

(4) 机座 机座的作用有两个：一个是用来固定主磁极、换向极和端盖，并借助底脚将电机固定在基础上；另一个是作为电机磁路的一部分。机座由导磁性能较好的材料制成。

2. 转子

机电能量转换的感应电动势和电磁转矩都在转子绕组中产生，是电机的重要部件。转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等组成。

(1) 电枢铁心 电枢铁心是磁路的一个部分，用来嵌放电枢绕组。当转子在主磁场中旋转时，铁心中的磁通方向是不断变化的，为减小涡流及磁滞损耗，铁心采用涂绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成。

(2) 电枢绕组 电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流，使电机实现机电能量的转换。

(3) 换向器 换向器的作用是将电枢绕组中的交流电动势和电流转换成电刷间的直流电动势和电流。它由许多上宽下窄的冷拉梯形铜排叠成圆筒形，片间用云母绝缘，用钢质套筒或塑料紧固。小型电机多采用塑料换向器，大中型电机常采用套筒式的拱形换向器。

二、直流电动机的工作原理

1. 直流电动机的工作原理

在图 1—2 所示的直流电动机工作原理图中，电刷两端加上直流电压，线圈 $abcd$ 内便有电流通过，通电导体 ab 和 cd 在主磁极磁场内受到电磁力的作用（左手定则判断受力方向）产生电磁转矩，若电磁转矩能克服电枢轴上的制动转矩，电动机将旋转起来。由于换向器的作用，使 N 极下导体电流方向和 S 极下导体电流方向不变，它们产生的电磁转矩方向也就不变，电枢沿着逆时针方向持续转动。

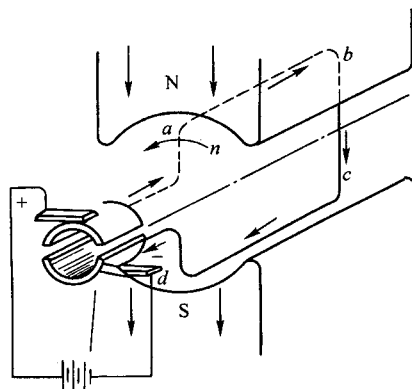


图 1—2 直流电动机工作原理图

电动机转动以后，电枢绕组又切割主磁场而产生感应电动势，其方向可由右手定则判定，正好与通入的电流方向相反，因此，称此产生的感应电动势为反电动势。输入的直流电能必须克服电动机内反电动势的作用，才能产生电磁转矩，使电动机正常工作，从而实现将电源的电功率转换为电动机的机械功率。

2. 电磁转矩

当电枢绕组受到电磁力作用时，将产生电磁转矩 T ，该电磁转矩为：

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-1)$$

式中 C_T ——转矩常数，与电机构造有关， $C_T = pN/2\pi a$ ；

p ——磁极对数；

N ——电枢绕组总的有效导体根数；

a ——电枢绕组并联支路对数；

Φ ——每极磁通，Wb；

I_a ——电枢电流，A。

电磁转矩对电动机来说是驱动转矩，是由电源供给电动机的电能转换来的，能够拖动负

载运动；对发电机来讲是制动转矩，原动机必须克服电磁转矩才能使电枢转动而发出电能。

3. 电枢电动势

当直流电动机旋转时，电枢绕组中存在感应电动势 E_a ，其大小与电动机的转速和磁通成正比，即：

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (\text{V}) \quad (1-2)$$

式中 C_e ——电动势常数，与电机结构有关， $C_e = pN/60a$ ；

n ——电动机转速，r/min。

电枢电动势在电动机中是个反电动势，而在直流发电机中电枢电动势则是电源电动势。

式 (1-1)、(1-2) 是分析直流电动机工作原理的两个基本公式。

三、直流电动机的分类

根据主磁极励磁绕组与电枢电路之间的连接方式的不同，直流电动机一般分为四种。

1. 他励电动机

励磁绕组与电枢绕组分别由独立的直流电源供电，如图 1—3a 所示。

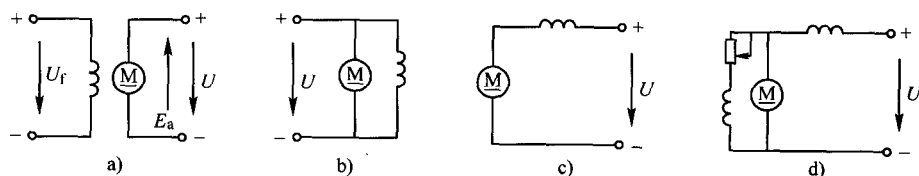


图 1—3 直流电动机的分类

a) 他励电动机 b) 并励电动机 c) 串励电动机 d) 复励电动机

2. 并励电动机

励磁绕组与电枢绕组并联，由同一直流电源供电，如图 1—3b 所示。

3. 串励电动机

励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流等于电枢电流，如图 1—3c 所示。

4. 复励电动机

励磁绕组分成两部分，一部分与电枢并联，另一部分与电枢串联，如图 1—3d 所示。通常采用的是积复励电动机，其两励磁绕组产生的磁通方向一致。

§ 1—2 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性，是指在电源电压 U 、励磁电流 I_f 、电枢电路总电阻 R 均为常数时，转速 n 与转矩 T 之间的关系，即 $n = f(T)$ 。分析电动机的机械特性，有利于合理选用电动机，并控制电动机满足不同负载的需要。

一、机械特性方程式

直流电动机的机械特性方程式可由电枢电路电压平衡方程式推导出，直流电动机励磁方式不同，其机械特性也不尽相同。

1. 他励电动机的机械特性

由图 1—3a 可以列出他励电动机电枢电路的电压平衡方程式：

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-3)$$

式中 U ——电枢电压；

R_a ——电枢总电阻。

将式 (1—2)、(1—1) 带入可得机械特性方程式：

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \\ &= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \end{aligned} \quad (1-4)$$

由式 (1—4) 可知，励磁电压 U_f 固定后， Φ 不变，他励电动机 n 与 T 之间为线性关系，机械特性如图 1—4 中的曲线 1 所示。从图可见，他励电动机的额定负载 T_N 时的转速与空载转速 n_0 相差不大，具有硬的机械特性。这种特性适用于负载变化时要求转速比较稳定的场合，如金属切削机床、造纸机械等要求恒速的地方。并励电动机的机械特性与他励电动机的机械特性类似。

2. 串励电动机的机械特性

由图 1—3c 可写出串励电动机的机械特性方程式：

$$n = \frac{U - (R_a + R_f) I_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-5)$$

式中 R_f ——励磁绕组电阻。

式 (1—5) 与式 (1—4) 相似，但本质是有区别的。串励电动机的电枢电流就是它的励磁电流，因此，磁通 Φ 是随着电枢电流 I_a 的变化而变化的， Φ 不是常数。磁极未饱和时， Φ 与 I_a 成正比，串励电动机的机械特性方程亦可写为：

$$n = C_1 \frac{U}{\sqrt{T}} - C_2 R_a \quad (1-6)$$

从式 (1—6) 可以看到，串励电动机的机械特性是一条双曲线。负载增大时，速度下降的幅度比他励（并励）电动机要大，具有较软的机械特性，如图 1—4 曲线 2 所示。这种特性使串励电动机适用于要求有较大启动转矩或负载变化较大，且不可能空转的场合，如电动机车、起重机等设备。

3. 复励电动机

复励电动机的机械特性介于并励与串励电动机之间，如图 1—4 曲线 3 所示。复励电动机兼有并励和串励电动机的优点，可用于负载转矩变化较大，需较软的机械特性设备中，也可像并励电动机那样在空载和轻载下运行。

二、他励电动机固有机械特性和人为机械特性

固有机械特性是指电动机的工作电压和磁通均为额定值，电枢电路中没有串入附加电阻时的机械特性。人为机械特性是人为改变电动机参数或电枢电压而得到的机械特性，他励电动机有下列三种人为机械特性：

1. 电枢串入电阻时的人为机械特性

此时 $U = U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$ 、 $R = R_a + R_{pa}$ ，人为机械特性方程式为：

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-7)$$

与固有机械特性相比,理想空载转速不变,但转速将增大,机械特性变软。 R_{pa} 越大, Δn 也越大,如图1—5所示。这种人为机械特性是一组通过 n_0 但具有不同斜率的直线。

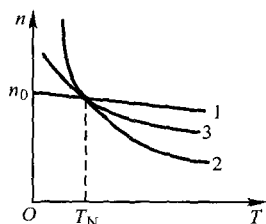


图 1—4 直流电动机的机械特性
1—他（并）励电动机的机械特性 2—串励电动机的机械特性
3—积复励电动机的机械特性

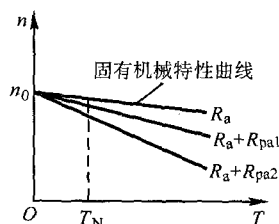


图 1—5 他励电动机电枢串入电阻时的人为机械特性

2. 改变电枢电压时的人为机械特性

此时 $R_{pa}=0$ 、 $\Phi=\Phi_N$, 特性方程式为:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-8)$$

与固有机械特性相比,特性曲线的斜率不变,是一组低于固有机械特性而与之平行的直线,如图1—6所示。

3. 减弱磁通时的人为机械特性

减弱磁通可以在励磁回路串入电阻或降低励磁电压,此时 $U=U_N$ 、 $R_{pa}=0$, 特性方程式为:

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-9)$$

在一般情况下,减弱磁通可以使转速升高,但当负载转矩特别大或工作磁通特别小时,如再减弱磁通,反而会使转速下降,如图1—7所示。

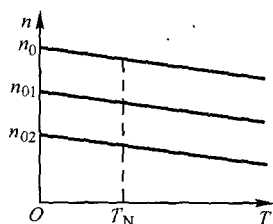


图 1—6 他励电动机改变电枢电压时的人为机械特性

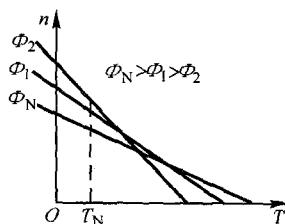


图 1—7 他励电动机减弱磁通时的人为机械特性

三、电力拖动系统稳定运行的重要条件

电力拖动系统由于受到外界某种扰动（负载的突然变化、电源的波动），会使电动机的转速发生变化，离开原平衡状态。如果系统在新的条件下仍能达到平衡状态，或外界扰动消失后，系统能恢复原来的转速，则该系统能稳定运行；否则该系统为不稳定运行，这时尽管外界扰动消失，系统的速度也会一直上升或一直下降。

为使系统能稳定运行，电动机的机械特性和负载的转矩特性必须配合得当。图1—8绘出了两种电动机不同的机械特性 $n=f(T)$ 与负载转矩特性 $n=f(T_L)$ 相配合的情况。

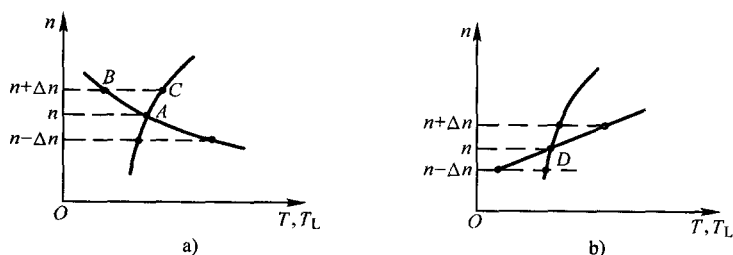


图 1—8 电力拖动系统稳定运行的条件

a) 稳定运行 b) 不稳定运行

在图 1—8a 中, 设系统运行于曲线的交点 A, 由于外界的扰动, A 点对应的转速增加了 Δn , 电磁转矩将减小到 B 点所对应的转矩, 而此时负载转矩将上升到 C 点所对应的转矩, 使得负载转矩大于电磁转矩, 导致电动机减速, 直至恢复到原来的转速 n 为止; 同理可知, 若外界扰动使转速减小了 Δn , 电磁转矩将大于负载转矩, 电动机将加速, 直至电磁转矩与负载转矩相平衡, 转速重新回到 n 为止。可下结论, 系统能在 A 点稳定运行。

在图 1—8b 中, 设系统运行于曲线交点 D, 若外界的扰动使转速增加 Δn , 则对应的电磁转矩将大于负载转矩, 电动机将继续升速; 若外界扰动使转速减小 Δn , 对应的电磁转矩将小于负载转矩, 电动机将继续减速直至停车。因此, 系统不能在 D 点稳定运行。

一般负载制动转矩 T_L 多为随转速升高而增大, 或保持常数而与转速无关。只要电动机具有下降的机械特性, 就能满足稳定运行的条件, 具有上升的机械特性的电动机一般是不能稳定运行的。上述稳定运行条件, 对于交流和直流电动机均具有普遍意义。

§ 1—3 直流电动机的启动与制动

电动机从静止到稳定运行必须经过启动过程。对启动的基本要求是: 第一, 要有足够大的启动转矩; 第二, 启动电流限制在允许的范围内; 第三, 启动时间短; 第四, 启动设备简单、可靠。为了满足生产技术或安全的要求, 把运行的电动机迅速停车, 或由高速运行快速转为低速运行, 为此需要对电动机进行制动。

一、直流电动机的启动

直流电动机在启动的瞬间, 由于 $n=0$, 电枢电动势 $E_a = C_e \Phi_n = 0$, 故其启动电流 $I_{st} = (U - E_a) / R_a = U / R_a$ 将达到额定电流的 10~20 倍。过大的启动电流会烧坏电动机的换向器而造成换向困难; 会对机组的传动机构产生很大的机械冲击; 同时还会引起电网电压的波动, 影响电网上其他用户的正常用电。这种不采取任何措施就直接把电动机加上额定电压的启动方法, 称为直接启动。除个别小容量的电动机采用外, 一般直流电动机是不容许直接启动的。常用的启动方法有: 电枢串电阻启动和降压启动。

1. 电枢串电阻启动

在电枢电路中串入启动变阻器, 通常按把启动电流限制在 $(1.5 \sim 2.5) I_N$ 范围内选择启动电阻。启动电流产生的启动转矩使电动机开始转动并逐渐加速, 随着转速的升高, 电枢

反电动势 E_a 逐渐增大, 使电枢电流逐渐减小, 电磁转矩也随之减小, 这样转速的上升就逐渐缓慢下来。为了缩短启动时间, 保证电动机在启动过程中的加速度不变, 就要求在启动过程中电枢电流维持不变, 因此随着电动机转速的增加, 应将启动电阻平滑地切除, 最后调节电动机转速达到额定值。一般启动级数分为 2~5 级, 利用接触器来切除逐段启动电阻。串接电阻二级启动的机械特性如图 1—9a 所示, 电动机在 a 点开始启动, 先后在 b 、 d 点将电枢电路的总电阻 R_2 逐级切换 (减小) 为 R_1 、 R_a , 到达 f 点启动结束, 从而将整个启动过程中的电枢电流限制在一定范围内。电枢串启动变阻器启动方法简单, 但在启动过程中能量损耗大, 且串接的电阻越大, 机械特性越软。

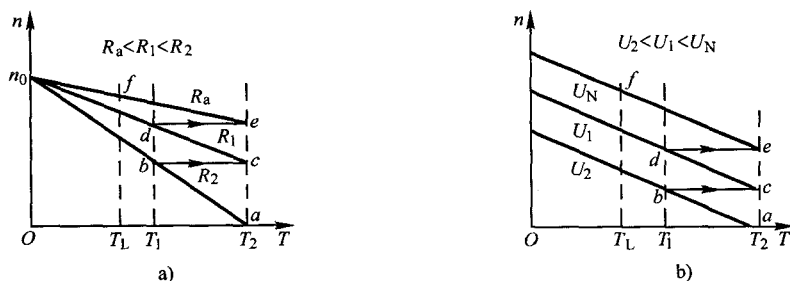


图 1—9 启动机械特性
a) 电枢串电阻启动 b) 降压启动

2. 降压启动

保证励磁电压为额定值条件下, 降低电枢端电压, 随转速的上升逐步提高电压并使电枢电流在整个启动过程中限制在一定范围内。降压启动的机械特性如图 1—9b 所示, 电动机从 a 点开始启动, 先后在 b 、 d 点将电枢电压从 U_2 逐级切换 (升高) 为 U_1 、 U_N , 以限制启动过程的电枢电流, 到 f 点时启动结束, 电动机稳定运行。

降压启动方法的电源可由发电机—电动机组 (G—M 系统) 提供, 或由可控整流电源提供。这种启动方法可使启动电流按正比例减小, 平滑启动, 并且减小能量损耗。

例 1—1 一台他励电动机, $P_N = 10 \text{ kW}$, $U_N = U_{fN} = 220 \text{ V}$, $I_N = 52.6 \text{ A}$, $n_N = 1500 \text{ r/min}$, $R_a = 0.3 \Omega$, 试求: (1) 直接启动时启动电流为额定电枢电流的几倍; (2) 启动电流限制在额定电枢电流 2 倍时的启动电阻值; (3) 启动电流限制在额定电枢电流 2 倍时的初始启动电压。

解: (1) 直接启动时启动电流为:

$$I_a = \frac{U}{R_a} = \frac{220}{0.3} = 733 \text{ A}$$

启动电流为额定电流的倍数:

$$\frac{I_a}{I_N} = \frac{733}{52.6} = 13.9$$

(2) 若将启动电流限制为额定电流的 2 倍, 则:

$$\frac{U}{R_a + R_s} = 2I_N$$

$$R_s = \frac{U - 2I_N R_a}{2I_N} = \frac{220 - 2 \times 52.6 \times 0.3}{2 \times 52.6} = 1.79 \Omega$$

(3) 将启动电流限制为额定电流的 2 倍时的初始电压为:

$$\frac{U_{st}}{R_a} = 2I_N$$

$$U_{st} = 2I_N \times R_a = 2 \times 52.6 \times 0.3 \approx 31.6 \text{ V}$$

二、直流电动机的制动

直流电动机的制动有机械制动和电气制动两大类。凡电动机的电磁转矩方向与旋转方向相反时，就称电动机处于制动运行状态。直流电动机采用的电气制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动（也称再生制动）。

1. 能耗制动

制动时，保持励磁电流不变，将电枢两端从电网断开，并立即把它接到一个制动电阻 R_Z 上，在这一瞬间，由于磁通 Φ 和转速都未变，因此电枢电动势 E_a 也未变，因 $U = 0$ ， $I_a = -\frac{E_a}{R_a + R_Z}$ ，电枢电流为负值，表示它的方向与电动状态时的方向相反，由此而产生的电磁转矩 T 也随之反向成为制动转矩。能耗制动时的机械特性方程式为：

$$n = -\frac{R_a + R_Z}{C_e \Phi} I_a = -\frac{R_a + R_Z}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-10)$$

由此可见，能耗制动的机械特性为一通过原点的直线，位于第二象限，如图 1—10 所示。制动开始时，电动机立即从 a 点跃到 b 点，并沿 bo 线迅速减速，电动机的动能消耗在 R_Z 上，到达 O 点制动结束。制动电阻 R_Z 越小，机械特性越平，制动力矩越大，但 I_a 也越大。为了避免过大的制动转矩和制动电流对系统带来的不利影响，通常限制最大制动电流不超过 $2 \sim 2.5$ 倍的额定电流，在选择 R_Z 时，应使

$$R_a + R_Z \geq \frac{E_a}{(2 \sim 2.5) I_N} \approx \frac{U_N}{(2 \sim 2.5) I_N} \quad (1-11)$$

如果电动机拖动的是位能性负载，当转速制动到零时，在位能负载的作用下，电动机将反方向加速。此时 n 、 E_a 的方向与电动状态时相反，而 I_a 与 T 的方向与电动状态时相同，因此， T 与 n 反向，仍对电动机起制动作用，特性曲线位于第四象限。随着反向转速的增加，制动转矩也不断增大，当制动转矩与负载转矩平衡时，电动机便在某一转速下稳定运行（如图 1—10 中的 c 点），制动电阻越大，稳定的转速就越高，这种能耗制动属于稳定的制动运转状态。如电力机车下坡时，可采取能耗制动来实现等速运行。

能耗制动操作简便，制动平稳，但制动转矩在转速降到较低时变得很小。若为了使电动机更快地停转，可以在转速降到较低时，再加上机械制动。

例 1—2 例 1—1 的电动机在额定工作状态下进行能耗制动，取最大制动电流 $I_Z = 2I_N$ ，试求电枢电路中应串入的电阻 R_Z 。

$$\text{解：} \quad C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 52.6 \times 0.3}{1500} \approx 0.136 \text{ V} \cdot \text{min/r}$$

能耗制动时最大电流出现在制动开始瞬间，此时感应电动势为：

$$E_a = C_e \Phi_N n_N = 0.136 \times 1500 = 204 \text{ V}$$

$$\text{电枢电路中应串入的电阻 } R_Z = \frac{E_a}{I_Z} - R_a = \frac{204}{2 \times 52.6} - 0.3 \approx 1.64 \Omega$$

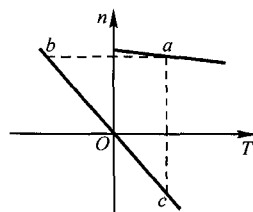


图 1—10 他励电动机能耗制动机械特性

2. 反接制动

(1) 电枢反接制动 保持励磁电流的大小和方向不变, 将电枢电源反接, 并同时在电枢回路串入附加电阻 R_Z , 在这一瞬间, 由于磁通 Φ 和转速都未变, 因此电枢电动势 E_a 也未变, 因 U 反向, 则 $I_a = -\frac{U + E_a}{R_a + R_Z}$, 电枢电流为负值, 由此而产生的电磁转矩 T 也随之反向成为制动转矩。反接制动时的电枢电流很大, 制动作用强烈, 可使电枢迅速停转。为避免产生过大的冲击电流, R_Z 的选取应使 $I_a \leq 2.5 I_N$ 。反接制动时的机械特性方程式为:

$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_Z}{C_e \Phi_N} I_a = -n_0 - \frac{R_a + R_Z}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-12)$$

特性曲线如图 1—11 中的直线 bc 所示。制动开始时, 电动机立即从 a 点跃到 b 点, 并沿 bc 线迅速减速, 速度接近零时, 应切断电源停止制动, 否则电动机将自行进入反向启动运行状态。

(2) 倒拉反接制动 制动特性曲线如图 1—12 中直线 cd 所示。运行中的电动机在电枢回路串入较大电阻 R_Z , 工作点将由 a 点移到 b 点, 此时的电磁转矩 T_b 小于负载力矩 T_L , 电动机沿曲线 bc 减速, 到达 c 点 $n=0$, 但 $T_c < T_L$, 所以在重物重力的作用下, 电动机从 c 点反向启动, 沿直线运行到 d 点 $T = T_L$ 为止, 电动机由原来的提升重物转为以较低的速度 $-n_d$ 平稳下放重物。由于磁通未变、电枢电流的方向未变, 所以电磁转矩方向未变, 与电动机转向相反。这时电枢电流 $I_a = \frac{U - (-E_a)}{R_a + R_Z} = \frac{U + E_a}{R_a + R_Z}$ 和电枢反接制动相似, 因此称为倒拉反接制动。实际运用中, 是从静止状态串入电阻后再加上电枢电压, 即直接从堵转点 (c 点) 开始下放重物运行。若电枢回路串入的电阻越大, 最后稳定下放重物的速度就越高。

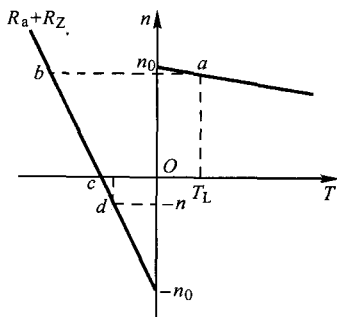


图 1—11 他励电动机电枢反接制动机械特性

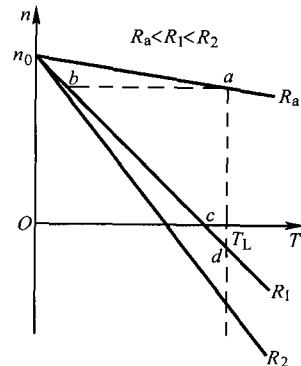


图 1—12 他励电动机倒拉反接制动机械特性

倒拉反接制动的机械特性方程式和电动运转时相同, 由于电枢电路中串入了较大电阻, 转速为负值, 机械特性是电动状态时机械特性在第四象限的延伸。

3. 回馈制动

运行中的电动机, 由于某种原因, 使电动机的转速高于理想空载转速, 电动机便处于回馈制动状态。由于 $n > n_0$, $E_a > U$, $I_a = -\frac{E_a - U}{R}$ 与原来方向相反, 产生的电磁转矩随 I_a 而反向, 对电动机起制动作用。回馈制动的机械特性方程式与电动状态时一样, 机械特性是