

图解自动化技术丛书

图 解

机械设备 电气控制线路

丁跃尧 编著



中国电力出版社

www.infopower.com.cn

TH-64/5

2008

图解自动化技术丛书

图 解

机械设备 电气控制线路

丁跃尧 编著



中国电力出版社

www.infopower.com.cn

内 容 简 介

本书是《图解自动化技术丛书》之一,采用模块化结构,运用图解的方法,以图、表为主,图、文结合的方式分析解读常用机械设备的电气控制线路图,全书分为七章,内容包括电动机,低压控制电器,电动机的基本控制电路,常用机床控制电路分析,数控机床控制电路分析,起重机械控制电路分析,电气控制线路设计等内容。在第三~五章的读图过程中,先分析机械设备的电气原理总图,再将总图分为若干个小图,进一步解读,以便使读者在阅读本书后,可以尽快地、全面地掌握机械设备的电气原理和维护技术。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程以及相关专业的教材,也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

图解机械设备电气控制线路/丁跃尧编著. —北京:中国电力出版社, 2008.1

(图解自动化技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6375-2

I. 图… II. 丁 III. 机械设备-电气控制-控制电路-图解 IV. TH-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第184016号

责任编辑:王杏芸

责任校对:崔燕菊

责任印制:李文志

书 名:图解机械设备电气控制线路

编 著:丁跃尧

出版发行:中国电力出版社

地址:北京市三里河路6号 邮政编码:100044

电话:(010) 68362602 传真:(010) 68316497

印 刷:汇鑫印务有限公司

开本尺寸:185mm×260mm 印 张:13.75 字 数:332千字

书 号:ISBN 978-7-5083-6375-2

版 次:2008年1月北京第1版

印 次:2008年1月第1次印刷

印 数:0001—4000册

定 价:26.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

机械设备是由电动机拖动运行的,这种拖动方式称之为“电力拖动”。电力拖动系统可以分为两个部分:一个是电力拖动部分,包括电动机以及使电动机和机械相互联系起来的传动机构;另一个是电动机的电气控制部分。电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力的,交流拖动是以交流电动机为动力的。早在19世纪30年代就开始使用直流电动机拖动机械设备。由于直流电动机调速和起动性能优良,在机械设备调速领域里,直流拖动系统长期居于首位。但是,直流电动机结构复杂、维护困难,制造大容量、高转速和高电压的直流电动机也受到限制。交流电动机出现后,其中的三相异步电动机因其结构简单、运行可靠、使用维护方便和价格便宜而被广泛用于各种机械设备中。随着电力电子技术的飞跃发展,交流调速技术也得到迅速发展。目前,三相鼠笼式异步电动机的变频调速、三相绕线式异步电动机的串级调速和无换向器电动机的调速技术在机械设备中获得了广泛应用。由于电动机不同,它们的控制系统也就不同。目前,交流拖动系统在机械中占主导地位。电力拖动系统的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

电气控制系统的发展伴随着控制器件的发展而发展。大功率半导体器件、大规模集成电路、计算机控制技术、检测技术以及现代控制理论的发展,推动了电气控制技术的发展。主要表现为:在控制方法上,从手动操纵发展到自动控制;在控制功能上,从单一功能发展到多种功能;在实际操作上,从紧张繁重发展到轻松自如。机械设备电气控制系统的发展日新月异,它主要经历了继电器—接触器控制系统、连续控制方式及自动控制系统、可编程序控制器、计算机数字控制系统四个阶段。

本书分7章。为了便于学习,书中首先介绍电动机的工作原理、起动、制动、调速的特性及方法,电动机的基本控制电路,再详细分析常用的普通机床、起重机械、数控设备的电气控制线路,同时还介绍了电气控制电路的设计方法以及电器元件的选择方法,最后介绍了数控机床的电气控制电路。

本书采用模块化结构,运用图解的方法,以图、表为主,图、文结合的方式分析解读常用机械设备的电气控制线路图,在第三~五章的读图过程中,先分析机械设备的电气原理总图,再将总图分为若干个小图,进一步解读,以便使读者在阅读本书后,可以尽快地、全面地掌握机械设备的电气控制技术原理和维护知识。

在本书的编撰过程中,参考了大量相关教材和技术资料,在此,对这些教材和资料的作者谨致深切的谢意。在本书的出版过程中,得到了中国电力出版社的大力支持和帮助,在此也一并表示感谢。

限于编者水平,书中错误在所难免,恳请读者朋友批评指正。

作者

2007年9月

目 录

前 言

第一章 电动机	1
第一节 直流电动机的基本结构与工作原理	1
一、直流电动机的结构	1
二、直流电动机的工作原理	2
三、直流电动机的分类	4
第二节 直流电动机的机械特性	4
一、他励电动机机械特性的表达式	4
二、固有机械特性	5
三、人为机械特性	6
四、串励电动机的机械特性	7
第三节 直流他励电动机的起动、制动与调速	8
一、直流他励电动机的起动	8
二、直流他励电动机的制动	10
三、直流他励电动机的调速	13
第四节 三相异步电动机的基本结构与工作原理	14
一、三相异步电动机的基本结构	14
二、三相异步电动机的工作原理	16
第五节 三相异步电动机的电路分析	19
一、定子电路与转子电路分析	19
二、三相异步电动机的功率传递	21
三、三相异步电动机的电磁转矩	22
四、三相异步电动机的额定值	22
第六节 三相异步电动机的机械特性	23
一、固有机械特性	23
二、人为机械特性	24
第七节 三相异步电动机的起动、制动与调速	26
一、三相异步电动机的起动	26
二、三相异步电动机的制动	29
三、三相异步电动机的调速	31
第二章 电动机的基本控制电路	33
第一节 电气原理图	33
一、电气符号	33
二、电气图	35

第二节	三相异步电动机的起动控制线路	37
一、	三相鼠笼式异步电动机直接起动控制电路	37
二、	三相鼠笼式异步电动机降压起动控制电路	44
三、	三相线绕式异步电动机转子电路串电阻起动	45
第三节	三相异步电动机的制动控制线路	46
第四节	三相异步电动机变磁极对数的调速控制线路	48
第五节	液压动力滑台的电气控制电路	49
一、	动力滑台的工作循环	49
二、	具有一次工作进给的液压动力滑台的电气控制线路	50
三、	一次工作进给的液压动力滑台的液压系统与电气控制线路	52
四、	具有带延时的一次工作进给的液压动力滑台	53
第六节	电气保护电路	53

第三章 金属切削机床的电气控制线路 57

第一节	C650 卧式车床的电气控制线路	57
一、	概述	57
二、	机床电气控制线路分析基础	58
三、	C650 卧式车床的电气控制线路分析	60
第二节	钻床的电气控制线路	63
一、	概述	63
二、	Z3040 摇臂钻床的电气控制线路分析	65
第三节	卧式铣床的电气控制线路	71
一、	概述	71
二、	X62W 卧式万能铣床的电气控制线路分析	72
第四节	龙门刨床的电气控制线路	79
一、	龙门刨床工作特点和对电气系统的要求	79
二、	龙门刨床的主传动系统	80
三、	工作台的控制线路	80
四、	横梁升降的控制线路	86
五、	刀架的电气控制	88

第四章 机械加工自动线的电气控制线路 91

第一节	组合机床的液压传动及其电气控制	91
一、	机床中常用的液压元件	91
二、	液压系统基本回路举例	101
第二节	动力滑台概述	102
一、	机械动力滑台控制线路分析	102
二、	液压动力滑台控制线路分析	105
第三节	组合机床电气控制线路	106
一、	主回路	108
二、	液压回转工作台回转控制线路	108
第四节	机械手工作原理	112
一、	概述	112
二、	架空式机械手工作循环中的动作	113
三、	机械手的传动	113

四、机械手的液压传动系统	115
五、机械手的电气控制电路	117
第五章 起重设备的电气控制线路	119
第一节 电动葫芦和梁式起重机的电气控制	119
一、电动葫芦	119
二、梁式起重机	120
第二节 桥式起重机概述	121
一、桥式起重机的结构及运动形式	121
二、桥式起重机对电力拖动的要求	122
三、桥式起重机的供电特点	123
第三节 桥式起重机的电器设备及控制保护装置	123
一、凸轮控制器及其控制线路	123
二、主令控制器及其控制线路	126
三、制动器与制动电磁铁	128
四、电气保护设备	128
第四节 桥式起重机控制电路分析	129
一、主接触器的控制	131
二、凸轮控制器的控制	131
三、主令控制器的控制	132
第六章 电气控制电路设计及元件选择	139
第一节 电气设计的一般原则	139
第二节 电动机的选择	142
一、电动机容量的选择	143
二、电动机的种类、电压、转速和结构形式的选择	146
第三节 电气原理图设计	147
第四节 低压电器的选择	153
第五节 电气控制电路设计举例	162
第七章 数控机床的电气控制	169
第一节 概述	169
一、数控机床的定义	169
二、数控机床的组成	169
第二节 数控机床的分类	170
一、按机械运动轨迹分类	171
二、按伺服系统的类型分类	172
三、按加工方式分类	173
四、CNC 系统的功能和一般工作过程	174
第三节 CNC 系统的硬件结构	178
一、单 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构	178
二、多 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构	179
第四节 数控机床伺服系统	181
一、概述	181

	二、驱动电动机	183
	三、伺服电动机	186
	四、直线电动机	192
第五节	数控机床常用检测装置	193
	一、概述	193
	二、旋转编码器	194
	三、旋转变压器	197
	四、感应同步器	199
	五、光栅尺	202
	六、磁栅	205
第六节	典型数控机床介绍	209
	一、SIMENS 公司数控系统的特点	209
	二、SIMENS 公司的主要数控系统	209
	三、SIMENS 数控系统的构成	209
参考文献		212

第一章

电 动 机

电动机可分为直流电动机和交流电动机两大类。直流电动机虽然结构复杂，维护也不方便，但它的调速性能较好，起动转矩较大，在速度调节要求高，正反转和起制动频繁，或者多单元同步协调运行的机械设备上，仍然采用直流电动机拖动的方式。三相异步电动机结构简单，运行可靠，坚固耐用，维护容易，价格便宜，具有较好的稳态和动态特性，已在工业中得到广泛的应用。本章主要介绍直流电动机和三相异步电动机的工作原理、起动、制动、调速的特性与方法。

第一节 直流电动机的基本结构与工作原理

一、直流电动机的结构

直流电动机由固定不动部分和旋转部分组成，固定部分称为定子（磁极），旋转部分称为转子（电枢），直流电动机结构简图如图 1-1 所示。在直流电动机中，都是将磁极部分放在定子上，将电枢部分放在转子上。下面将介绍直流电动机的具体构造。

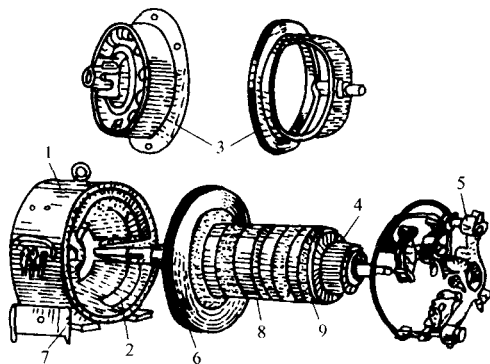


图 1-1 直流电动机结构图

- 1—机座；2—激磁绕组；3—轴承端盖；4—换向器；5—电刷架；
6—风扇；7—主磁极；8—电枢铁芯；9—电枢绕组

1. 定子

定子是电动机固定不动的部分。直流电动机的定子由主磁极、换向磁极、机座和轴承等部分组成。

(1) 主磁极。磁极是用来在电动机中产生磁场的。它分为极心和极掌两部分。极心上放置励磁绕组，极掌的作用是使电动机空气隙中磁感应强度的分布最为合适，并用来挡住励磁绕组。磁极是用钢片叠成的，固定在机座上。改变励磁电流的方向就可以改变主磁极的极性，也就改变了磁场的方向。在小型直流电动机中，也有用永久磁铁作为磁极的。

(2) 换向磁极。简称换向极，它是位于主磁极之间的比较小的磁极，主要是用来改善换向的。

(3) 机座。用于固定主磁极和换向磁极，也是磁路的一部分。

(4) 轴承。用来支撑转子的转轴。

2. 转子

直流电动机的转子包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇等几部分。

(1) 电枢铁芯。由硅钢片叠成，表面有许多均匀分布的槽。

(2) 电枢绕组。它是由许多线圈按一定的规则连接起来的。绕组安放在电枢铁芯槽内，线圈的端部与换向片的楔形铜片相连接。

(3) 换向器。由许多换向片组成，外表呈圆柱形，片与片之间用云母绝缘。

二、直流电动机的工作原理

如图 1-2 所示为直流电动机最简单的模型，电动机具有一对固定的磁极 N 和 S（通常是电磁铁），在两个磁极 N 和 S 之间，有一个可以转动的圆柱铁芯电枢，在电枢上缠有电枢绕组，为简单起见，我们假设绕组只有一匝线圈 $abcd$ 。线圈两端分别连在相互绝缘的换向片 A1 和 A2 上，换向片组成的圆柱体称为换向器，换向器跟随电枢转动。电刷 B1 和 B2 固定不动，紧压在换向片上，与外部电路相连。

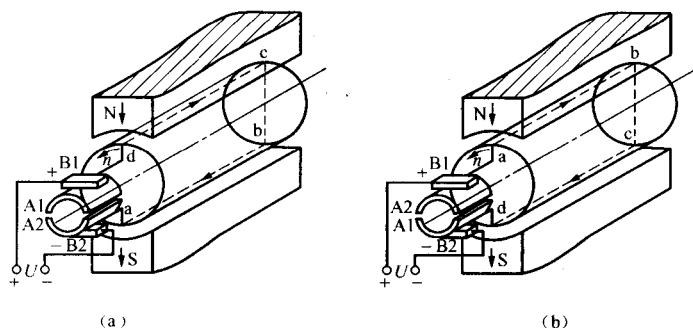


图 1-2 直流电动机工作原理图

下面简单介绍直流电动机的工作原理。如图 1-2 (a) 所示，将直流电源接入电刷 B1 和 B2 之间，在 N 极下的导体电流方向为 $d \rightarrow c$ ，在 S 极上的导体电流方向为 $b \rightarrow a$ 。对于导体 dc 来说，通电导体处于磁场中，会受到电磁力的作用，根据电磁力定律，导体上的力的

大小为 $f = Bli$ ，其方向由左手定则确定，可知在图示位置时，电磁力的方向为水平向左。同理，对于导体 ab 来说，也受到电磁力的作用，大小也为 $f = Bli$ ，方向为水平向右。因此，线圈 $abcd$ 受到逆时针方向的转矩作用，使电枢绕逆时针方向转动。当电动机转过 90° 时，线圈处于水平位置，线圈受到的转矩为零，但是，电动机有一定的转速，在惯性的作用下，电动机可以转过这个位置。当电动机转过 180° 时，如图 1-2 (b) 所示，在 N 极下的导体为 ab ，在 S 极上的导体为 cd ，在换向器的作用下，线圈中的电流换向。对于导体 ab 来说，电流方向为 $a \rightarrow b$ ，受到的电磁力方向为水平向左；对于导体 cd 来说，电流方向为 $c \rightarrow d$ ，受到的电磁力方向为水平向右。因此，线圈仍受到逆时针方向的转矩作用，使电枢沿逆时针方向旋转。由此可看出，换向器的作用是相当重要的，它改变线圈中的电流方向，从而保持线圈所受到的转矩方向不变，从而使电枢能连续旋转。

当电枢在磁场中旋转，切割磁力线时，根据电磁感应定律，在电枢中会产生感应电动势，其大小为 $\varepsilon = -Nd\Phi/dt$ 。方向由右手定则判断，它与外加电压或电流的方向相反，因此，通常称为反电动势 E 。在不同时刻，当线圈处于不同位置时，所通过的磁通 Φ 是不同的，磁通的变化率也是不同的。因此，反电动势 E 的大小是变化的，通常用它的平均值来表示，即

$$E = C_e \Phi n \quad (1-1)$$

式中 E ——反电动势，V；

C_e ——电动势常数，由电动机结构决定；

Φ ——一对磁极的磁通，Wb；

n ——电动机的转速，r/min。

电磁转矩 T 是指电动机正常运行时，带电的电枢绕组在磁场中受到电磁力作用所形成的总转矩。在不同位置，电枢绕组所受的电磁转矩方向相同，大小不同，通常用电磁转矩的平均值来进行计算，即

$$T = C_t \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中 T ——电磁转矩，N·m；

C_t ——转矩常数，由电动机的结构决定， $C_t = 9.55 C_e$ ；

I_a ——电枢电流，A。

对于直流电动机来说，稳态运行时，作用在电动机轴上的转矩有三个：即电磁转矩 T 、空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L ，电磁转矩 T 是驱动转矩，使电动机旋转，电磁转矩 T 应等于空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L 之和，即

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

由于空载损耗转矩很小，电动机在稳定运行时，为简单起见，通常可以忽略不计，这时认为电磁转矩与负载转矩相等。当负载转矩发生波动时，电动机的转速 n 、反电动势 E 、电枢电流 I_a 以及电磁转矩 T 能自动进行调整，达到新的平衡。当负载减小时，电磁转矩大于负载转矩，转速上升，反电动势随着转速的上升而增大，电枢电流减小，电磁转矩也减小。当电磁转矩减小到与负载转矩相等时，电动机达到新的平衡状态，此时，电动机以高于原来的速度稳定运行。

三、直流电动机的分类

直流电动机的磁极一般是由磁极铁芯和励磁绕组组成的。励磁绕组上通以直流电流时会产生励磁电动势，励磁电动势所形成的磁场就是直流电动机的磁场，也称为励磁磁场。按照励磁方式的不同，直流电动机可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机四种，如图 1-3 所示。

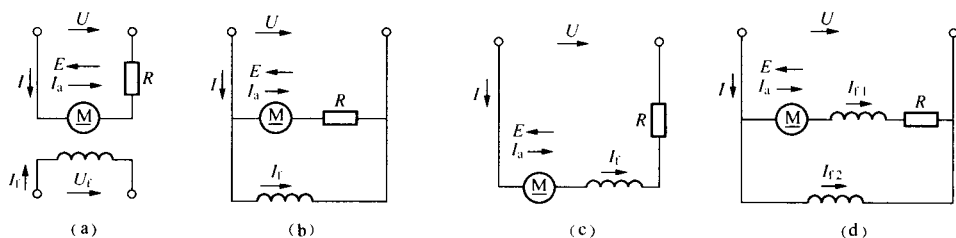


图 1-3 直流电动机的分类

(a) 他励电动机；(b) 并励电动机；(c) 串励电动机；(d) 复励电动机

他励电动机的励磁绕组由外电源 U_f 供电，励磁电流 I_f 不受电枢端电压 U 或电枢电流 I_a 的影响。并励电动机的励磁绕组与电枢绕组并联，由电枢端电压 U 供电，负载电流 I 分为励磁电流 I_f 和电枢电流 I_a ；串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流 I_f 即为电枢电流 I_a ；复励电动机的磁极上有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，一个与电枢绕组并联。

第二节 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是指当电动机的电枢端电压 U 、电枢电阻 R_a 、电枢上的外串电阻 R 及励磁电流 I_f 不变时，电动机的转速 n 与转矩 T 之间的关系，曲线 $n=f(T)$ 称为电动机的机械特性曲线。

直流电动机的机械特性与励磁方式有关，励磁方式不同的电动机，其机械特性是有区别的。他励电动机和并励电动机比较常用，当他励电动机的励磁电源电压 U_f 为电动机的电枢端电压 U 时，就成了一台并励电动机。也可以说并励电动机是他励电动机的一种特例，两者的机械特性是相同的。下面以他励电动机为例来分析他励电动机和并励电动机的机械特性。

一、他励电动机机械特性的表达式

由图 1-3 (a) 可以看出，他励电动机电枢回路的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a(R_a + R) \quad (1-4)$$

由式 (1-2) 得

$$I_a = T / C_t \Phi \quad (1-5)$$

将式 (1-1) 和式 (1-5) 代入式 (1-4) 中并整理, 得出他励电动机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-6)$$

电枢端电压 U 、励磁电阻、励磁电流一定时, 磁通 Φ 也为一常数。由式 (1-6) 可以看出, 电动机的机械特性曲线为一条斜直线。随着电磁转矩 T 的增大, 转速将会降低, 如图 1-4 所示。

当电磁转矩 $T=0$ 、电枢端电压和励磁电流不变时, 磁通 Φ 为一定值。 $n=n_0=U/C_e \Phi$ 电动机空载时的转速。事实上, 对于电动机来说, 即使负载转矩为零, 但由于空载损耗转矩的存在, 电磁转矩 T 也不可能为零, 因此, 通常将 n_0 称为理想空载转速, 点 $A(0, n_0)$ 就称为理想空载点。

当 $\Delta n=(R_a+R)T/C_e C_t \Phi^2$ 增加时, 电磁转矩增大, 电枢电流 $I_a=(U-E)/(R_a+R)$ 增大, 在电阻 (R_a+R) 上引起的压降增大, 而电源电枢端电压不变, 因此, 反电动势 E 减小, 所以, 转速 $n=E/C_e \Phi$ 降低。

电动机的机械特性有固有机机械特性和人为机械特性两种。固有机机械特性是指在额定条件下, 即电枢端电压为额定电压 ($U=U_N$), 励磁电流为额定励磁电流 ($I_f=I_N$ 即磁通 $\Phi=\Phi_N$), 电枢电路中不外接任何电阻 ($R=0$) 时的转速与转矩之间的关系。而人为机械特性则指改变电枢端电压 U 、励磁电流 I_f (即磁通 Φ) 和电枢电路中的电阻 R 时所得到的转速与转矩之间的关系。

二、固有机机械特性

当 $I_f=I_N$ 、 $U=U_N$ 、 $R=0$ 时, $\Phi=\Phi_N$, 由式 (1-6) 得他励电动机的固有机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n_N \quad (1-7)$$

他励电动机的固有机机械特性曲线是一条直线, 只需要确定其中的两个点即可确定这条直线。电动机的电枢电阻 R_a 可根据电动机的损耗来估算, 通常认为电动机在额定负载下的铜耗 $I_a^2 R_a$ 为总损耗的 50% ~ 75%。电动机铭牌上给出了电动机的额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定转速 n_N 等, 根据这些数据就能求出电动机的理想空载转速 n_0 、额定转矩 T_N 等。因此, 他励电动机的固有机机械特性曲线可根据电动机的铭牌数据来绘制, 一般用理想空载点 $(0, n_0)$ 和额定运行点 (T_N, n_N) 来确定。

【例 1-1】一台他励电动机, 其铭牌数据为 $P_N=12\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=65\text{A}$, $n_N=1000\text{ r/min}$ 。试计算此电动机的固有机机械特性。

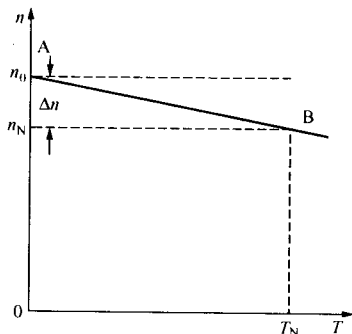


图 1-4 他励电动机机械特性曲线

解：估算电枢电阻 R_a ：

$$\begin{aligned} I_a^2 R_a &= (I_N U_N - P_N)(0.5 \sim 0.75) \\ R_a &= \frac{(65 \times 220 - 12000)(0.5 \sim 0.75)}{65^2} \\ &= (0.272 \sim 0.41) \Omega \\ \text{取 } R_a &= 0.35 \Omega \end{aligned}$$

求 $C_e \Phi_N$ ：

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{(220 - 65 \times 0.35)}{1000} = 0.197$$

求理想空载转速 n_0 ：

$$n_0 = U_N / C_e \Phi_N = 220 / 0.197 = 1116.8 \text{ r/min}$$

求额定转矩 T_N ：

$$T_N = 9.550 P_N / n_N = 9550 \times 12 / 1000 = 114.6 (\text{N} \cdot \text{m})$$

绘出电动机的固有机械特性曲线如图 1-4 所示。其中，理想空载点坐标为 $(0, 1116.8)$ ，额定工作点坐标为 $(114.6, 1000)$ 。

三、人为机械特性

人为机械特性就是指式 (1-6) 中他励电动机机械特性中电枢端电压 U 、磁通 Φ 不是额定值或电枢电路中接有外加电阻 R 时的机械特性。因此，他励电动机有三种人为机械特性。

1. 改变电枢电压 U 时的人为机械特性

当 $I_f = I_{fN}$ ， $R=0$ ，改变电枢端电压 U 时，由式 (1-6) 可得改变电枢端电压 U 时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_0 - \Delta n_N \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可以看出，理想空载转速 n_0 与电枢端电压 U 成正比，转速降 Δn_N 与电枢端电压 U 无关。因此，改变电枢端电压 U 时的人为机械特性与固有机械特性相比，是一些理想空载点不同，而斜率相同的平行的直线，并且随着电压的降低，理想空载转速也降低。另外，由于电动机电压不能超过额定电压，只能在额定值以下改变电压的大小，因此，改变电枢端电压 U 的人为机械特性是一簇在固有机械特性以下并与之平行的直线，如图 1-5 所示。

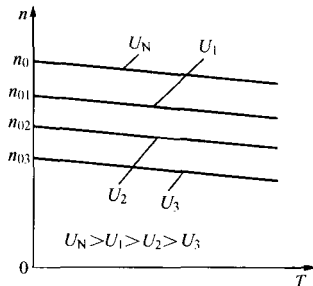


图 1-5 改变电枢电压 U 时的人为机械特性

2. 电枢回路中串附加电阻 R 时的人为机械特性

当保持 $I_f = I_{fN}$, $U = U_N$, 在电枢回路中串入附加电阻 R 时, 由式 (1-6) 可得电枢回路中串附加电阻时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n \quad (1-9)$$

它与固有机机械特性相比, 理想空载转速 n_0 不变, 而转速降随着附加电阻的增大而增大。因此, 它是一簇过点 $(0, n_{0N})$ 的射线, 附加电阻 R 越大, 则直线的斜率越大, 转速下降越大, 如图 1-6 所示。

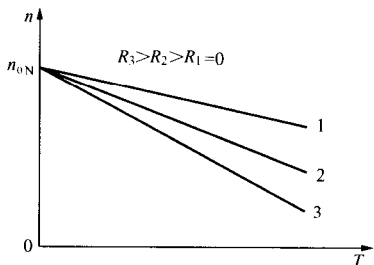


图 1-6 电枢回路串电阻时的人为机械特性

3. 改变磁通 Φ 时的人为机械特性

在保持电枢端电压为额定电压 U_N , 电枢回路中不串入任何外接电阻 ($R=0$) 的情况下, 改变励磁电流 I_f , 则磁通 Φ 也随之发生改变。由式 (1-6) 可得改变磁通时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可看出, 改变磁通 Φ 时, 理想空载转速和转速降都随着磁通的减小而增大, 如图 1-7 所示, 每条人为机械特性都与固有机机械特性相交。一般来说, 受励磁线圈发热和电动机磁饱和的限制, 电动机的磁通 Φ 只能在额定磁通以下进行调节, 因此, 人为机械特性的理想空载点总在固有机机械特性的理想空载点之上。如果励磁电流为零, 从而导致磁通 Φ 为零, 电动机的速度将会非常高, 理论上可趋于无穷大, 这种现象称为“飞车”, 在实际应用中是绝对不允许的。

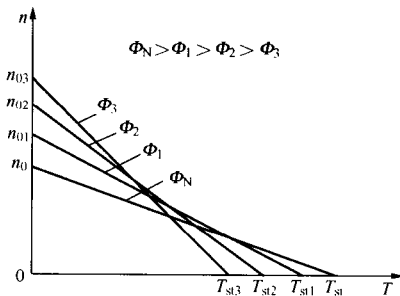


图 1-7 改变磁通 Φ 时的人为机械特性

因此, 他励电动机在起动前必须先通励磁电流, 并且保证在运转过程中, 励磁电流不为零, 一般在运转过程中都设有“失磁”保护。

四、串励电动机的机械特性

如图 1-3 (c) 所示, 串励电动机的电压平衡方程式为:

$$U = E + I_a R_0 \quad (1-11)$$

式中 R_0 ——总电阻, 包括电枢电阻 R_a 、励磁绕组 R_f 和附加电阻 R 。

将式 (1-1) 和式 (1-5) 代入式 (1-11), 并整理得到串励电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_0}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-12)$$

串励电动机的励磁电流 I_f 就是它的电枢电流 I_a ，而电枢电流随着负载的变化而变化，因此，磁通 Φ 也会随着电枢电流 I_a 的变化而变化。串励电动机的机械特性可分两段来进行分析。

当负载较轻时，电枢电流较小，此时，可近似认为磁通 Φ 与电枢电流成正比，即 $\Phi = KI_a$ ，其中， K 为比例常数，所以有

$$T = C_t \Phi I_a = C_t \Phi^2 / K$$

即

$$\Phi = \sqrt{TK / C_t} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 得

$$n = \frac{U}{C_e \sqrt{TK / C_t}} - \frac{R_0}{C_e K} = \frac{U}{K_1 \sqrt{T}} - \frac{R_0}{K_2} \quad (1-14)$$

式中 K_1 、 K_2 ——常数。

由此可看出，在负载较轻的情况下，当电枢端电压 U 不变时，串励电动机的转速 n 与 $\sqrt{T}$ 成反比，其机械特性曲线如图 1-8 所示，近似为一条双曲线。当负载转矩增加时，转速下降很快，转速 n 轴是它的渐近线，它的理想空载转速 n_0 趋向于无穷大。当串励电动机空载时，转速相当高，这也可能造成“飞车”。因此，串励电动机绝不允许空载运行，也不允许用皮带传动，以防皮带脱落。

当负载较重时，电枢电流较大，此时，可认为磁路已经趋向饱和，近似认为磁通 Φ 为常数，此时的机械特性曲线近似为一条直线，如图 1-8 所示。

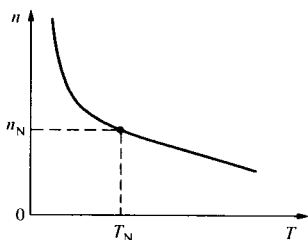


图 1-8 串励直流电动机的机械特性

第三节 直流他励电动机的起动、制动与调速

一、直流他励电动机的起动

电动机接上电源，从静止状态转动后，达到稳态运行状态的过程就是电动机的起动过程。对于电动机的起动一般有两个要求：一是起动转矩能够克服起动时的摩擦转矩和负载转矩，使电动机能转动起来；二是起动电流不能太大，以免对电源、电动机及生产机械产生有害的影响。

电动机刚启动时, 转速为零, 反电动势 E_a 为零, 电枢回路中的外串电阻 R 也为零。由式 (1-1) 和式 (1-4) 可知, 启动电流 I_{st} 为

$$I_{st} = U / R_a \quad (1-15)$$

电枢电阻 R_a 一般很小, 因此启动电流 I_{st} 相当大, 可达到额定电流的 $10 \sim 20$ 倍。因此, 除了小容量的他励电动机外, 一般是不允许将电动机直接接到额定电压的电源上启动的。他励电动机的启动方法有电枢回路中串电阻分级启动和降压启动两种。

1. 电枢回路中串电阻分级启动

在电枢回路中串入启动电阻 R_{st} 时, 电动机启动电流 I_{st} 和启动转矩 T_{st} 分别为

$$I_{st} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \quad (1-16)$$

$$T_{st} = C_t \Phi I_{st} \quad (1-17)$$

启动电阻 R_{st} 越大, 则启动电流越小。但启动电阻也不是越大越好, 如图 1-9 所示为他励电动机电枢回路中串入电阻后的机械特性, 启动电阻越大, 启动转矩就越小, 带负载能力越弱。当启动电阻为图 1-9 (a) 中的 R_{st2} 或图 1-9 (b) 中的 R_{st4} 时, 电动机的启动转矩小于负载转矩 T_L , 电动机无法启动。在图 1-9 (a) 中, 当电动机中串一级启动电阻 R_{st1} 时, 电动机从 A 点启动, 沿机械特性曲线向 B 点移动, 速度不断上升。随着转速的升高, 反电动势 E_a 不断增大, 启动电流 I_{st} 逐步减小到 I_N , 启动转矩也逐步减小到额定转矩 T_N 。在 B 点时, 切除启动电阻 R_{st1} , 机械特性由曲线 2 过渡到曲线 1 上, 由于机械惯性的作用转速不能突变, 因此, 工作点由 B 点平移到 C 点, 然后再沿着固有机机械特性曲线 1 移动, 最后稳定运行在额定工作点 D。这种方法能限制启动电流, 但是在从 B 点向 C 点切换的过程中, 冲击电流相当大, 另外, 在启动过程中, 启动转矩不断减小, 整个启动过程中的平均启动转矩不大, 启动快速性不好。

为了避免上述缺点, 可以将启动电阻分级切除。如图 1-9 (b) 所示, 分三级切除启动电阻。电动机从 A 点启动, 沿着 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H$ 移动, 最后稳定运行在 H 点。这种启动方法冲击电流小且平均启动转矩大, 启动过程快而平稳, 但是所需要的控制设备也相应地增多, 一般采用三级或四级分级启动。

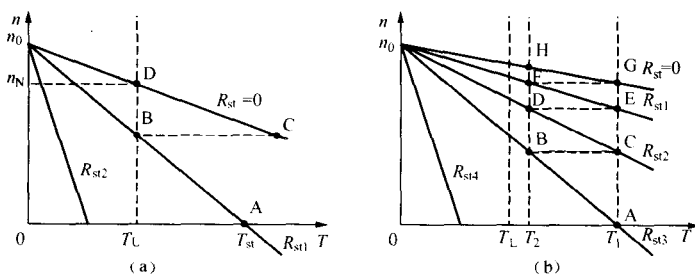


图 1-9 他励电动机电枢回路串电阻分级启动

(a) 一级启动电阻; (b) 三级启动电阻