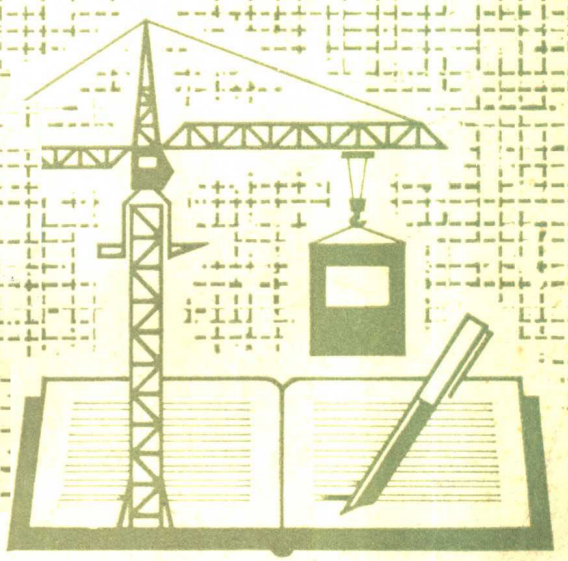
建筑安装技工学校试用教材

电力拖动自动控制电路

陕西省建筑安装技工学校　主编



中国建筑工业出版社

建筑安装技工学校试用教材

电力拖动自动控制电路

陕西省建筑安装技工学校　主编

中国建筑工业出版社

本书是根据一九七九年九月建筑安装技工学校教材编写会议拟定的电力拖动自动控制电路教学大纲，由原国家建筑工程总局委托陕西省建筑安装技工学校组织编写的。

本书详细讲述了电力拖动基础知识与电力拖动自动控制电路的工作原理，介绍了常用机床等电力拖动设备的自动控制电路与磁放大器在自动控制系统中的应用，还介绍了可控硅及其供电的自动控制系统。叙述简明扼要，通俗易懂。

本书除作为技工学校教学用书外，还可供电气专业技工培训及自学使用。

建筑安装技工学校试用教材
电力拖动自动控制电路
陕西省建筑安装技工学校　主编
*
中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）
*
开本：787×1092毫米 1/16 印张：21 插页：2 字数：506千字
1984年12月第一版　1984年12月第一次印刷
印数：1—14,900册　定价：1.75元
统一书号：15040·4674

前　言

本书是根据一九七九年九月建筑安装技工学校教材编写会议拟定的电力拖动自动控制电路教学大纲，由原国家建筑工程总局委托陕西省建筑安装技工学校组织编写的。

本书较详细地讲述了电力拖动基础知识与电力拖动自动控制电路的工作原理，介绍了常用机床等电力拖动设备的自动控制电路与磁放大器在自动控制系统中的应用，还介绍了可控硅及其供电的自动控制系统。叙述简明扼要，通俗易懂。

本书由陕西省建筑安装技工学校花浩元同志编写。湖南省工业设备安装公司黄伟元同志主审，参加审稿的有上海市工业设备安装公司技工学校、广东省建筑工程局技工学校、天津市建筑工程局技工学校、江苏省苏州市建筑技工学校、北京市设备安装公司。

本书除作为技工学校教学用书外，还可供电气专业技工培训及自学使用。

由于编者水平有限，书中定存在不少缺点和错误，诚恳希望读者给予批评指正。

建筑安装技工学校安装教材编写组

一九八三年十一月

目　录

绪　言……1
第一章　电力拖动基础知识……3
第一节　生产机械和电动机的机械特性……3
第二节　他励直流电动机的机械特性……5
第三节　他励直流电动机的起动和反转……11
第四节　他励直流电动机的制动……14
第五节　串励直流电动机的机械特性……19
第六节　串励直流电动机的制动……22
第七节　复励直流电动机的机械特性……22
第八节　三相异步电动机的机械特性……23
第九节　三相异步电动机的制动……29
第十节　同步电动机的机械特性……34
第十一节　电动机的同轴运转……36
第十二节　电动机调速的基本概念和指标……40
第十三节　他励直流电动机的调速……43
第十四节　直流发电机-直流电动机（F-D）系统……48
第十五节　三相异步电动机的调速……50
第二章　低压电器……58
第一节　刀开关和转换开关……58
第二节　熔断器……61
第三节　主令电器……66
第四节　控制器……70
第五节　接触器……72
第六节　继电器……83
第七节　自动开关……98
第八节　电阻器与变阻器……101
第九节　电磁铁……103
第三章　继电器-接触器控制线路的基本环节……107
第一节　电气控制线路的原理图与接线图……107
第二节　三相鼠笼式异步电动机直接起动控制线路……110
第三节　三相鼠笼式异步电动机降压起动控制线路……114
第四节　绕线式异步电动机起动控制线路……121
第五节　三相鼠笼式异步电动机的制动及其自动控制……123
第六节　直流电动机起动控制线路……127
第七节　直流电动机的制动控制线路……128
第八节　同步电动机的控制……128

第四章　常用机床控制电路 ……140
第一节　普通车床的电气控制 ……140
第二节　M7130卧轴矩台平面磨床的电气控制 ……145
第三节　Z35型摇臂钻床的电气控制 ……150
第四节　铣床的电气控制 ……154
第五节　T68卧式镗床的电气控制 ……166
第六节　机床控制线路的分析和维修 ……172
第五章　起重机电气控制电路 ……175
第一节　概述 ……175
第二节　电葫芦和梁式起重机的电气控制 ……177
第三节　桥式起重机的电气控制 ……178
第四节　塔式起重机的电气控制 ……191
第五节　电梯的电气控制 ……197
第六章　电机放大机及其控制系统 ……208
第一节　概述 ……208
第二节　电机放大机 ……212
第三节　转速负反馈的自动调速系统 ……221
第四节　电压负反馈和电流正反馈的自动调速系统 ……222
第五节　具有电流截止负反馈环节的自动调速系统 ……225
第六节　稳定环节 ……227
第七节　龙门刨床的电气控制 ……231
第八节　龙门刨床电气设备的安装、试车与调整 ……255
第七章　磁放大器及其在自动控制系统中的应用 ……263
第一节　磁放大器的基本工作原理 ……263
第二节　磁放大器的工作特性 ……265
第三节　磁放大器的反馈 ……266
第四节　磁放大器特性曲线的位移 ……267
第五节　磁放大器在自动控制系统中的应用 ……268
第八章　可控硅及其供电的自动控制系统 ……271
第一节　可控硅元件 ……272
第二节　单相可控整流电路 ……279
第三节　三相可控整流电路 ……288
第四节　整流电路的选用比较 ……297
第五节　可控硅的串并联和保护 ……297
第六节　可控硅的触发电路 ……304
第七节　可控硅在电动机调速系统中的应用 ……318

绪　言

在工业、农业、交通运输等部门中，直接用于拖动生产机械的原动力主要是电力，用电动机来拖动各种生产机械的工作已成为极为普遍的形式。它和其他的原动机如内燃机、蒸汽机等比较不仅效率高、价格低、操作简易、维护方便，而且能实现各种复杂的工艺操作，满足生产自动化提出的要求。这种以电动机为动力拖动生产机械的拖动方式就叫做电力拖动。电力拖动，特别是自动化的电力拖动已成为现代工业生产高度电气化和自动化的基础与核心。采用自动化的电力拖动对改善工人的劳动条件、减轻体力劳动、提高劳动生产率和产品质量、增加工作的可靠性都具有十分重大的意义。

要使电动机能按照生产工艺过程的需要有规律地运转，必须用一定的电器元件通过适当的线路结构对它进行控制。如继电器、接触器、电机放大机、磁放大器、半导体器件等电器元件，它们根据生产工艺的要求按照一定线路组成控制系统，自动控制起动、制动、反转、调速、恒速等，还可以按给定程序或预先不知道的规律改变速度、转向和工作机构的位置，使工作循环自动化。由这些电器元件与线路组成的装置称为控制装置。而电动机及传动机构与生产机械就是被控制对象。其中，电动机是实现电能与机械能相互转换的机械。通常是把电能转换成为机械能，这时电动机处在电动状态下运行，有时也反过来把机械能转换成电能或热能，这时电动机处在制动状态下运行。这两种运行状态都非常重要。传动机构如减速箱、皮带、联轴节等的主要作用是传递动力，并实现速度和运动方式的变换。

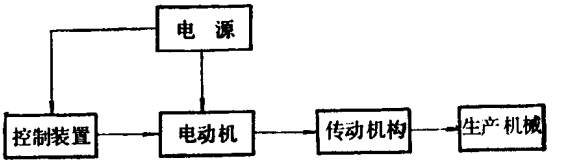


图 0-1　电力拖动的组成

电动机、传动机构和控制装置是组成电力拖动的三个基本环节，如图0-1所示。

电力拖动的范围是十分广泛的，如各种机床、冶金与轧钢设备，农业、医疗与交通运输机械，海陆空机具中的各种传动装置等都离不开电力拖动。所用的电动机少则一台，多则数台或几十台甚至百台以上。因此，所需的电器元件在品种和数量上都不一样，它们所组成的各种控制装置的繁简程度也各不相同。在最简单的情况下（如一台水泵、一台通风机等），可以只用刀开关等简单装置来控制，称为手动控制装置。但目前电力拖动中最普遍、最大量采用的则是继电器、接触器等有接点电器组成的自动控制装置，又称为继电器接触器控制装置。它具有简单经济、容易实现、便于掌握等许多优点，但是也存在寿命短、噪音大、工作频率低的缺点，目前发展的趋势是采用无触点的半导体逻辑元件代替有触点的继电器和接触器。无论是有触点电器还是无接点的逻辑元件，其输入和输出信号只有通或断两种状态，因而这种控制是断续的，不能连续反应信号的变化，故称为断续控制。为了使控制系统完成更复杂的控制任务，还广泛地采用反馈控制系统。反馈控制系统是由连续控制元件组成的，它不仅能够反映信号的通和断，而且能反映信号的数值大小，

这种由连续控制元件组成的反馈控制系统叫作连续控制系统。用作连续控制的元件，过去普遍采用电机放大机和磁放大器。随着半导体器件和可控硅元件的发展，越来越多地采用以可控硅作为控制元件的用途广泛的可控硅控制系统。

由于数控技术的发展和电子计算机的应用，电力拖动自动控制又发展到一个新的水平，不仅能实现整个生产过程的自动化，而且能实现整个车间乃至整个工厂的自动化，向着生产全过程自动化方向迈进。这是电力拖动自动控制发展的方向。

本课程是电气专业的主要专业课，其主要任务是使学生掌握分析电力拖动自动控制电路所必须的基本理论知识；掌握电力拖动自动控制的基本环节及分析电力拖动自动控制电路工作原理的方法；掌握常用生产机械电力拖动自动控制的工作原理，并能正确地进行安装、调试、使用与维修，初步具有分析较复杂电力拖动自动控制电路的能力。

本课程应在学习电机原理以后，并在进行电工实习的基础上讲授，这样才能保证学生有较巩固的基础理论知识和感性认识。

本课程与生产实际联系紧密，学习时必须理论联系实际，课堂教学与生产实习密切配合，教材中的部分内容，如常用的低压电器、常用生产机械的电气控制电路学，可结合现场实习进行讲授。

第一章　电力拖动基础知识

电力拖动自动控制电路的主要部分是电动机的控制电路。目前生产机械应用各种动力设备，如液压装置、气压装置及电动机等，其中电动机是应用最广泛的一种动力设备。电动机在生产机械上应用的一些问题就是电力拖动的研究内容。

电力拖动所要研究的一个重要问题是电动机的机械特性。所谓机械特性是指电动机的转矩与转速之间的关系。我们知道，电动机接通电源以后就产生一个转矩，这个转矩是由磁场和转子导体中的电流决定的，所以称为电磁转矩。电动机的转矩与转速之间有确定的关系，这个关系用曲线表示出来就是电动机的机械特性。电动机的起动、制动和正反转都与机械特性有关，因此电动机的控制电路也与机械特性有关。

电力拖动研究的另一个重要问题是电动机的调速问题。生产机械的许多运动部件常需要有各种运转速度。我们可以采用机械方法调速，如变速箱，也可以用电控方法调速，就是采用电动机的各种调速方法。例如龙门刨床的工作台主要采用电动机调速，其它一些机械也采用电气调速。因此，生产机械的电气控制电路与电动机的调速方法有密切的关系。

电力拖动还研究电动机的容量选择及过渡过程的分析等问题，但对了解电气控制电路作用的关系不大，所以这里不作介绍。

本章将着重研究直流电动机、交流异步电动机在各种状态下的机械特性、调速方法和调速性能。

第一节　生产机械和电动机的机械特性

电动机带动生产机械，生产机械对电动机来说有一定的阻力或阻转矩。生产机械的阻转矩与转速之间也有一定的关系，这种关系称为生产机械的机械特性。电动机与生产机械紧密组合成一个整体，它们的机械特性必须适当配合，才能得到合理的工作状态。因此，在介绍电动机的机械特性以前，我们先简单介绍生产机械的机械特性。

一、生产机械的机械特性

各种生产机械有不同的机械特性，大致上可以分为三种类型，如图1-1所示。

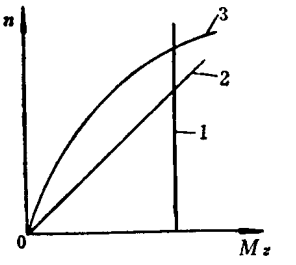


图 1-1　生产机械的机械特性

1.阻转矩与转速无关的机械特性　图1-1 中的 直线 1 代表这种机械特性。n为生产机械的转 速，M_z为生产机械的阻转矩。机床的进给机构、起重机械等的阻转矩可以看作与转速无关，是一种恒转矩负载。

2.阻转矩与转速成正比的机械特性　图1-1中的直线 2 代表这 种机械特性。 例如一台异步电动机拖动一台他励直流发电机，发电机则对一个恒定的电阻元件供电。他励直流发

电机产生一个阻转矩，这个阻转矩与发电机的转速成正比。

3.阻转矩与转速的平方成正比的机械特性　图 1-1 中的曲线 3 代表这一种机械特性。转速升高时，阻转矩增加得很快。通风机是具有这种机械特性的典型机械，所以我们常称这种机械特性为通风机特性。

此外，我们经常看到一些机床被称为恒功率负载。例如车床、镗床的主轴，龙门刨床的工作台等常被称为恒功率负载。当转速不同时，它们消耗的功率是不变的，但是他们的阻转矩却与转速成反比。转速越高，阻转矩越小。应当指出，这些机床之所以有这样的机械特性，是由于加工时的条件发生了变化。例如低速用于粗加工，所以阻转矩大，高速用于精加工，所以阻转矩小。又如车床车削一个零件，要求切削速度、切削深度和进刀量都保持不变，也就是切削速度和切削力保持不变。当工件直径大时，转速应低，工件直径小时转速应当增加。所以低速时的阻转矩大，高速时的阻转矩小，但切削功率则保持不变。

二、电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机的转矩M与转速n的关系，即$n=f(M)$，其中转矩M是指电磁转矩。机械特性将决定电机稳定运行、起动、制动以及转速调节的工作情况。

绝大部分电动机的转速都是随着转矩的增大而降低的，但转速降低的程度却各不相同。如果电动机的转矩增大时，转速变化的很小，我们说电动机具有硬的机械特性。如果转矩增大时，电动机的转速有很大的降落，我们就说电动机具有软的机械特性。根据软硬的程度，我们可以将电动机的机械特性分为三类。如图1-2所示。

1.绝对硬的机械特性　图中的直线 1 代表绝对硬的机械特性。转矩改变，转速保持不变，所以称为绝对硬的机械特性。同步电动机的转速始终等于同步转速，与转矩的大小无关，所以是绝对硬的机械特性。

2.硬的机械特性　图1-2中的直线 2 代表硬的机械特性。转矩增大时，转速略有降低，他励直流电动机、三相异步电动机都具有硬的机械特性。

三相异步电动机的机械特性是比较特殊的。如图 1-3 所示。三相异步电动机的机械特性有一个转矩最大值M_{max}，称为异步电动机的最大转矩，最大转矩上面的部分是机械特性的正常工作部分，属于硬的机械特性。最大转矩下面的部分是不工作部分。

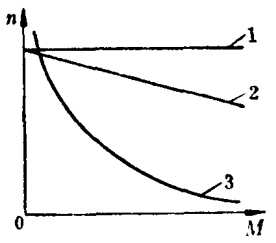


图 1-2　电动机的机械特性

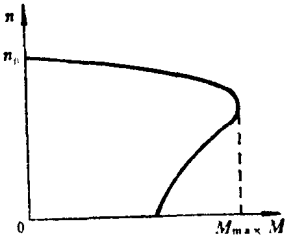


图 1-3　三相异步电动机的机械特性

3.软的机械特性　图1-2的曲线 3 代表软的机械特性，转矩增大时转速有相当大的降落。串励直流电动机的机械特性属于软的一类，特性曲线各部分的硬度是不同的。

应当指出，电动机的机械特性是可以改变的。例如改变电动机的电压、电源频率、接线方式，或在电路中接进电阻、电感、电容等元件，都可以改变电动机的机械特性。

三、电力拖动稳定工作的条件

电动机带动生产机械，以某一稳定速度工作时，电动机的转矩必须等于生产机械的阻转矩，两个转矩的方向则相反。

参看图 1-4。曲线 1 是三相异步电动机的机械特性，直线 2 是生产机械的机械特性。这两根机械特性有两个交点 A 和 B。在 A 点和 B 点，电动机的转矩等于生产机械的阻转矩，两个转矩的方向是相反的。这两点是不是都能够稳定工作呢？

我们先看 A 点。在 A 点，电动机的转矩与阻转矩 M_z 的大小相等，方向相反，转速为 n_A。如果有外加的力或其他因素使工作转速稍微升高（$+\Delta n$），则电动机的转矩就小于阻转矩。外力消除以后，由于阻转矩大于电动机的转矩，所以转速就要降低而回向 A 点的转速。如果外加的力或其它因素使工作转速降低（$-\Delta n$），电动机转矩就大于阻转矩，外力消除后，转速将上升，也恢复到 A 点的转速。可见 A 点是能够稳定工作的。

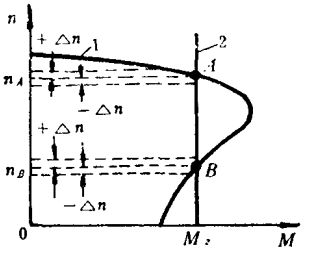


图 1-4　电力拖动的稳定工作

1—电动机机械特性；2—生产机械机械特性

再看另一个交点 B 点。B 点电动机的转矩也等于阻转矩，两个转矩的方向相反，那么这一点能不能稳定工作呢？假定有一个外加的力或其它因素使转速上升（$+\Delta n$），我们从特性上看到，电动机的转矩就大于阻转矩，因此转速就要继续上升。即使外力消除，转速仍将上升，一直达到 A 点，才能稳定工作。又如外力使转速略降低（$-\Delta n$），则电动机的转矩就小于阻转矩，转速就要继续下降，转速越低，电动机的转矩越小，所以即使外力已经消失，转速也要一直下降到零为止。上面的情况说明，如果外界的扰动使转速略有变化，这个拖动系统就不可能再恢复到 B 点的转速。这种外界的扰动是很多的，而且随时可能使转速变动。例如，电源电压有波动，机械摩擦会有变化，电路的参数会有变化，这些波动变化都会影响拖动系统的转速，所以不可能在 B 点维持稳定的工作。

根据上面的分析，我们可以知道，一个拖动系统能否稳定工作，必须满足两个条件。一个条件是电动机的转矩与阻转矩大小相等，方向相反；另一个条件是如果有外界的因素使转速升高或降低，在外加因素消除后，能够恢复到原来的转速。

第二节　他励直流电动机的机械特性

一、直流电动机的工作原理

我们知道，一根导体通有电流时，在磁场中会受到一个力的作用，这是电动机工作的基本原理。而且，作用力的大小与磁场的强弱及导体中电流的大小成比例。力的作用方向则由磁场的方向及电流的方向决定。通过多次实践，总结出一个决定力的作用方向的左手定则。

左手定则——伸直左手掌，四指合在一起，大拇指与手掌在同一个平面上，但与四指垂直。使掌心对着磁场的 N 极，四指指向电流的方向，大拇指所指的就是力的方向。

图 1-5 是直流电动机的工作原理图。N 和 S 是一对磁极，中间的电动机电枢就是转动部分。电枢周围绕有许多线圈，图中只画出一个线圈的两根有效导体 A 和 B。如果在线圈

里面通以直流电流，符号⊗表示电流的方向为进入纸面，⊙表示电流的方向为离开纸面。应用左手定则决定作用在A、B两导体上的力的方向，就可以知道，这两个力组成的转矩方向是使电枢朝逆时针的方向旋转。

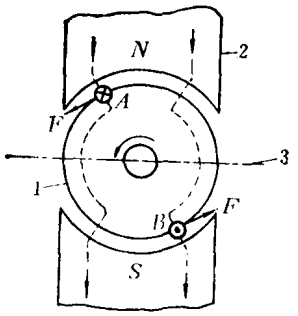


图 1-5 直流电动机工作原理
1—电枢；2—磁极；3—中性线

电枢转动以后能不能继续不断地朝一个方向旋转呢？从图上可以看出来，如果导体A和B中的电流方向不变，则当导体A转到S极下面以及导体B转到N极下面时，转矩的方向将改变，而与原来的转矩方向相反，因此电枢将朝反方向旋转起来。这样，电枢将反正向摆动而不总是朝着一个方向连续旋转。为了使电动机能朝着一个方向不停地转动，必须保持转矩的方向不变，这就是应当在适当的时候改变电流的方向。例如导体A中的电流，在N极下面时为流入纸面，导体A越过中性线进入S极下面时，电流的方向应变为流出纸面。同理，导体B中的电流方向也应当作相应的改变。这样，由作用力组成的转矩的方向就保持不变，电动机能够顺着一个方向不停地转动。

从电动机的作用原理，我们就可以知道，直流电动机应当有一个换向器（整流子），换向器的作用就是在电枢导体从N极到S极或从S极到N极的时候，改变导体中电流的方向，使电动机的转矩保持一定的方向。

电动机的旋转方向由转矩的方向决定，而转矩的方向则由磁场和导体电流的方向所决定。

改变磁场的方向或改变电枢电流的方向，都可以改变电动机的旋转方向。如果磁场方向和电枢电流的方向同时改变，则转矩的方向将不变。

我们知道，导体在磁场中运动时，要感应产生电势，这就是电磁感应现象。直流电动机的电枢转动起来以后，电枢上的导体就切割磁场，因此就必然要出现感应电势。感应电势的方向可以用右手定则来确定。

右手定则——伸直右手掌，四指合在一起，大拇指与手掌在同一个平面上，但与四指垂直。使掌心对着磁场的N极，大拇指指向导体运动的方向，四指所指的就是感应电势的方向。

根据右手定则，我们可以看到，电动机电枢导体中的感应电势的方向恰好与原来的电流方向相反，也就是与外加电枢电压的极性相反，有阻止原有电流流通的作用，所以我们常称这个感应电势为电动机的反电势，用符号E_a代表。

电动机电枢感应电势的大小与磁场的强弱及导体运动的速度成正比，也就是与磁场磁通Φ及电枢转速n成正比，如下式所示：

$$E_a=C_e\Phi n\text{（伏）} \qquad (1\text{-}1)$$

式中 $C_e=\dfrac{PN}{60a}$——电势常数，由电动机结构（磁极对数P，并联支路对数a以及有效导体总数N）决定（伏·分/转·韦伯）；

Φ——磁场的磁通量（韦伯）；

n——电枢转速（转/分）。

二、他励直流电动机的机械特性

1.机械特性方程式

他励直流电动机的电路原理图如图1-6所示。电枢和励磁绕组由分别的电源供电。接通励磁绕组和电枢电源，电动机就开始转动。电枢转动以后，电枢中有一个反电势E_a，电枢电流I_a在电枢电阻R_a及附加电阻R_f上产生电压降$I_a(R_a+R_f)$。根据电势平衡的原理，外加电枢电压U应等于反电势及电阻压降$I_a(R_a+R_f)$之和，可以得到电枢电路电势平衡方程式

$$U=E_a+I_a(R_a+R_f)=E_a+I_aR \qquad (1\text{-}2)$$

式中 $R=R_a+R_f$——电枢电路总电阻，它包括电枢电阻R_a及电枢串接电阻R_f。

根据公式（1-1），我们知道反电势E_a与电动机转速n成正比。当转速为零时，E_a为零，所以电枢电流$I_a=U/R$，这就是电动机起动时的最大电流。电动机转速逐渐上升，E_a逐渐增加，电枢电流I_a就逐渐减小。

我们知道通有电流的导体在磁场中要受到力的作用，力的大小与磁场强弱及导体电流成正比例，所以电动机的转矩M与磁场的磁通Φ及电枢电流I_a成正比，可得到下列关系

$$M=C_M\Phi I_a \qquad (1\text{-}3)$$

式中 $C_M=\dfrac{1}{9.8}\cdot\dfrac{PN}{2\pi a}$——转矩常数，由电机结构决定（公斤力·米/安·韦伯）。

公式（1-3）也可写成

$$I_a=\frac{M}{C_M\Phi} \qquad (1\text{-}4)$$

将公式（1-1）及（1-4）的关系代入公式（1-2），可得到下列两个公式

$$U=C_e\Phi n+I_aR \qquad (1\text{-}5)$$

及

$$U=C_e\Phi n+\frac{M}{C_M\Phi}R \qquad (1\text{-}6)$$

经过移项及变换，可得到

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_e\Phi}I_a \qquad (1\text{-}7)$$

及

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_eC_M\Phi^2}M \qquad (1\text{-}8)$$

公式（1-7）表示转速与电枢电流的关系，称为电动机的速度特性或电流特性，公式（1-8）表示转速与转矩的关系，称为电动机的机械特性。

当电源电压U=常数，电枢电路总电阻R=常数、磁通Φ=常数（忽略电枢反应去磁的影响）时，电动机转速n和转矩M的关系$n=f(M)$如图1-7所示。

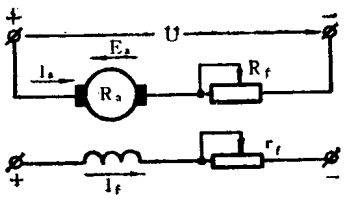


图 1-6 他励直流电动机的电路原理图

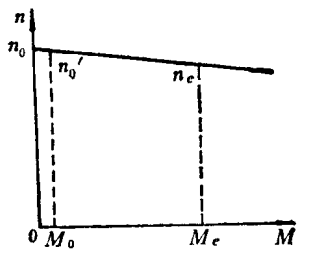


图 1-7 他励直流电动机的机械特性

如果保持电动机的励磁磁通Φ不变，转矩减小，则转速上升，电枢反电势增加。当转矩等于零，也就是电枢电流等于零时，电枢反电势应等于外加电压U，这时候的电动机转速称为理想空载转速，常用符号n_0代表，从公式（1-7）或（1-8）可得

$$n_0=\frac{U}{C_e\Phi} \tag{1-9}$$

这相当于图1-7中直线交于纵轴的转速。

由公式（1-9）可见，调节U或Φ，可以改变理想空载转速n_0的大小。

必须指出，电动机的实际空载转速n_0'比n_0略低，如图1-7所示。这时因为电动机空载转起来后，电磁转矩M不可能为零，必须等于M_0，即电动机必须克服空载损耗转矩M_0，此时电动机实际空载转速n_0'为：

$$n_0'=n_0-\frac{R}{C_eC_M\Phi^2}M_0 \tag{1-10}$$

公式（1-8）右边第二项表示电动机带负载后转速降，如用Δn表示，则

$$\Delta n=\frac{R}{C_eC_M\Phi^2}M=\beta M \tag{1-11}$$

式中$\beta=\frac{R}{C_eC_M\Phi^2}$表示机械特性的斜率。$\beta$愈大、$\Delta n$愈大，机械特性愈软。通常称$\beta$小的机械特性为硬特性，而$\beta$大的为软特性，一般他励电动机当没有电枢外接电阻时机械特性都比较硬。

将公式（1-9）及（1-11）代入（1-8）式，可得机械特性方程式的简单形式：

$$n=n_0-\beta M \tag{1-12}$$

2.固有机械特性和人为机械特性

当他励电动机电压U及磁通Φ均为额定值U_e及Φ_e，电枢没有串接电阻时的机械特性称为固有机械特性，其方程式为

$$n=\frac{U_e}{C_e\Phi_e}-\frac{R_a}{C_eC_M\Phi_e^2}M \tag{1-13}$$

按公式（1-13）绘出固有机械特性如图1-8中的直线1。由于R_a较小，他励直流电动机的固有机械特性较硬。

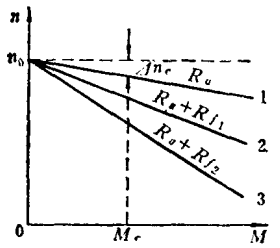


图 1-8 他励直流电动机的固有机械特性及电枢串接电阻时的人为机械特性（$R_{f_2}>R_{f_1}$）

1—固有机械特性；2及3—电枢串接电阻为R_{f_1}及R_{f_2}（$R_{f_2}>R_{f_1}$）时的人为机械特性

人为机械特性是人为地改变电路参数或电源参数而得到的电动机的机械特性。他励直流电动机一般可得到下列三种人为机械特性。

（1）电枢串接电阻时的人为机械特性

电源电压与磁通均为额定值，在电枢电路中串入电阻R_f时的机械特性方程式为

$$n=\frac{U_e}{C_e\Phi_e}-\frac{R_a+R_f}{C_eC_M\Phi_e^2}M \tag{1-14}$$

与固有机械特性比较，理想空载转速n_0不变，而其斜率β则随串接电阻R_f之增大而加大，人为机械特性的硬度降低。图1-8中的曲线2与3为串入不同的R_{f_1}和R_{f_2}时的人为机械特性曲线。从图中可以看出，当负载转矩保持不变，在电枢电路中串入附加电阻R_f后，他励

电动机的稳定转速将降低下来，串入的电阻愈大，稳定转速减低愈多。

（2）改变电源电压时的人为机械特性

磁通为额定值，电枢电路中没有串入电阻，改变电源电压的机械特性方程式为

$$n=\frac{U}{C_e\Phi_e}-\frac{R_a}{C_eC_M\Phi_e^2}M \qquad (1\text{-}15)$$

由于电动机的工作电压一般以额定电压U_e为上限，因而改变电源电压通常只能在$U<U_e$范围中变化。

比较公式（1-13）及（1-15）可见，改变电压时，理想空载转速n_0与电源电压成比例减小，特性的斜率β则保持不变。这种人为机械特性曲线是一组低于固有机械特性曲线而与之平行的直线，如图1-9所示。从图中可以看出，当负载转矩保持不变而降低电源电压后，他励电动机的稳定转速随之降低，但这种人为机械特性的硬度较电枢电路中串入电阻的为好。

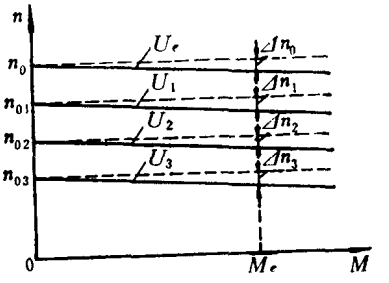


图 1-9 他励电动机改变电源电压时的人为机械特性（$U_e>U_1>U_2>U_3$）

（3）减弱磁通时的人为机械特性

一般他励直流电动机在额定磁通下运行时，电机磁路已接近饱和。改变磁通实际上是减弱励磁。电源电压为额定值，电枢电路中没有串入电阻，在励磁回路中串入电阻r_f，使磁通Φ减弱的机械特性方程式为

$$n=\frac{U_e}{C_e\Phi}-\frac{R_a}{C_eC_M\Phi^2}M \qquad (1\text{-}16)$$

由式（1-16）可见，理想空载转速n_0与磁通Φ成反比，Φ越小，n_0越高。在转矩M为恒值时，转速降Δn与Φ的平方成反比。可见Φ越小，电动机的机械特性越软。

Φ为不同数值时的人为机械特性$n=f(M)$绘于图1-10上，从图中可以看到，改变磁通Φ所得到的各条机械特性，互相之间有交点存在，这说明在负载转矩不大时，减弱励磁可以使转速升高，但在负载转矩过大时，减弱磁通可能使工作转速降低。

值得注意的是：当他励直流电动机的励磁回路断开时，励磁电流为零，由励磁电流产生的磁通为零。以$n=\frac{U-I_aR_a}{C_e\Phi}$中可以看出，当磁通趋近于零时，电动机转速趋近于无穷大。如果磁通确实为零的话，电机中不产生电磁力和电磁转矩，电动机的转速将由于阻转矩的作用逐渐减慢下来。但是，由于电机尚有数值很小的剩余磁通存在，因而转速将升高到为电动机机械强度所不能允许的数值。因此，直流电动机在运行过程中，绝对不允许励磁回路断开而导致励磁电流为零的情况出现。

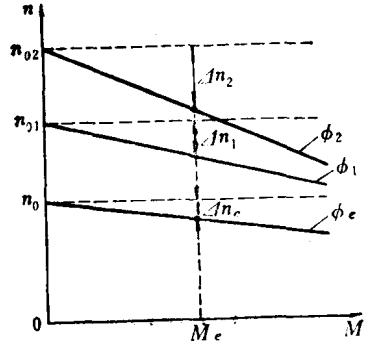


图 1-10 他励直流电动机减弱磁通时的人为机械特性（$\phi_e>\phi_1>\phi_2$）

3.固有机械特性曲线和人为机械特性曲线的绘制

特性曲线的绘制是电力拖动中的一个重要问题，电动机的运转方式要通过它来分析研究。计算

特性的方法不是由电机内部结构参数来进行，而是用电动机的铭牌数据、产品样本数据或实测数据来进行。他励电动机由铭牌或样本上可得到的数据是额定功率P_e、额定电压U_e、额定转速n_e与额定电流I_e。

（1）固有机械特性曲线绘制

他励电动机机械特性是一条直线，只要求得两点的数据，即可把机械特性曲线绘出。一般求出理想空载点（$M=0$、n_0）及额定运行点（M_e、n_e）。

理想空载点（$M=0$、n_0）

$$n_0=\frac{U_e}{C_e\Phi_e}$$

式中额定电压U_e已知，$C_e\Phi_e$可由额定数据求得。应用电枢回路电势方程式

$$C_e\Phi_e n_e=E_{ae}=U_e-I_eR_a$$

整理后得

$$C_e\Phi_e=\frac{U_e-I_eR_a}{n_e} \qquad (1\text{-}17)$$

式中额定电压U_e、额定电流I_e和额定转速n_e均已知，只有电枢电阻R_a要设法求得。

电枢电阻R_a的数据在电枢铭牌上与产品样本中通常是不注明的。一般可以通过实验进行测量，也可以应用近似法进行计算。近似计算可以从电机额定运行损耗着手。假设在电机全部损耗中不变损耗与可变损耗各占一半，而可变损耗就是电枢中的铜损耗$I_e^2R_a$，由此来求得R_a。

电机的额定效率η_e是额定输出功率P_e与额定输入功率U_eI_e之比，即

$$\eta_e=\frac{P_e}{U_eI_e}=\frac{U_eI_e-\Sigma P_e}{U_eI_e}$$

式中 ΣP_e——电动机额定运行时的全部损耗。从上式可解得

$$\Sigma P_e=U_eI_e(1-\eta_e)$$

根据上述假定，铜损占全部额定损耗的一半，即

$$I_e^2R_a\approx\frac{1}{2}\Sigma P_e=0.5U_eI_e(1-\eta_e)$$

因而解得

$$R_a=0.5(1-\eta_e)\frac{U_e}{I_e}=0.5(1-\eta_e)R_e \qquad (1\text{-}18)$$

式中 $R_e=\frac{U_e}{I_e}$——他励直流电动机的电枢额定电阻，它的物理意义是当$U=U_e$，电动机堵转$n=0$时，限制电枢电流为额定电流I_e的电枢电阻值。

额定运行点（M_e、n_e），其中额定转速n_e是已知的，额定电磁转矩

$$M_e=C_M\Phi_eI_e$$

式中额定电流I_e是已知的，根据$C_e=\frac{PN}{60a}$和$C_M=\frac{1}{9.8}\cdot\frac{PN}{2\pi a}$，可导出$C_e=1.03C_M$，则$C_M\Phi_e=\frac{C_e\Phi_e}{1.03}$也可求出。于是特性曲线上的两点均已求出，将这两点绘在座标图上联成一直线即得固有机械特性曲线。

（2）人为机械特性曲线的绘制

各种人为机械特性的计算较为简单，只要把相应的参数值代入相应的人为机械特性方程式即可。例如，电枢串接电阻R_f的人为机械特性可用公式（1-14）求得，式中U_e为已知，R_a、$C_e\Phi_e$与$C_M\Phi_e$的计算方法与前相同。根据串接电阻R_f的数值，假定一个转矩M值（一般用M_e），用公式（1-14）求出n值。这样得出人为机械特性上的一点（M_e、n），连接这点与理想空载点，即得电枢串接电阻的人为机械特性。

用类似的方法，可绘出改变电压U及减弱磁通Φ时的人为机械特性。

例 1-1 Z68型他励直流电动机铭牌数据如下：P_e=10千瓦、U_e=220伏、I_e=52.9安、n_e=2250转/分。求：（1）该电动机的机械特性曲线；（2）该电动机的额定输出转矩和空载转矩。

解：（1）Z68型他励直流电动机的机械特性是一直线，所以只要找到一个额定点（n_e、M_e）和一个理想空载点（n_0、0），就可以画出整个直线。

先求电枢电阻R_a，按公式（1-18）

$$R_a=0.5(1-\eta_e)R_e=0.5\left(1-\frac{10\times1000}{220\times52.9}\right)\cdot\frac{220}{52.9}=0.29\text{（欧）}$$

$$C_e\Phi_e=\frac{E_a}{n_e}=\frac{U_e-I_eR_a}{n_e}=\frac{220-52.9\times0.29}{2250}=0.091\text{（伏·分/转）}$$

理想空载转速

$$n_0=\frac{U_e}{C_e\Phi_e}=\frac{220}{0.091}=2420\text{（转/分）}$$

额定电磁转矩 $M_e=C_M\Phi_eI_e$

因为 $$C_M\Phi_e=\frac{C_e\Phi_e}{1.03}=\frac{0.091}{1.03}=0.0884\text{（公斤力·米/安）}$$

所以 $M_e=0.0884\times52.9=4.67$（公斤力·米）

因此，固有机械特性是通过理想空载点（n_0=2420转/分，M=0）和额定点（n_e=2250转/分，M_e=4.67公斤力·米）连接起来的直线，如图1-11所示。

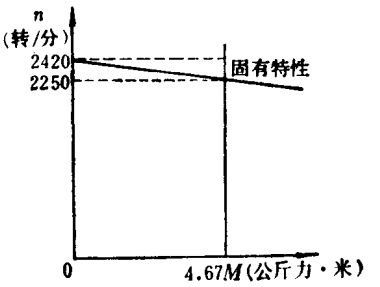


图 1-11 他励直流电动机机械特性曲线绘制

（2）额定输出转矩

$$M_{2e}=\frac{975P_e}{n_e}=\frac{975\times10}{2250}=4.33\text{（公斤力·米）}$$

空载损耗转矩

$$M_0=M_e-M_{2e}=4.67-4.33=0.34\text{（公斤力·米）}$$

必须指出：机械特性曲线也可以通过实验测出，但此时的转矩为电动机轴上输出转矩M_2，它与前述的计算值相差一个M_0。

第三节 他励直流电动机的起动和反转

电动机从静止状态到稳定运行状态的过程，称为起动过程或称起动，为了克服静摩擦转矩和负载转矩，缩短起动时间，提高生产率，要求电动机有足够大的起动转矩M_Q。通常电动机在起动瞬间（n=0）的电磁转矩称为起动转矩（M_Q）。