

机
电
工
程
师
继
续
教
育
丛
书

电气传动与调速系统

廖晓钟 编著

中国电力出版社

机电工程师继续教育丛书

电气传动与调速系统

廖晓钟 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是机电工程师继续教育丛书之一。

本书由浅入深地介绍了电气传动及其控制系统的基本原理、分析及设计方法。内容包括：电气传动的基本问题；直流脉冲相位控制和直流脉宽调制传动系统的基本原理及分析设计方法；交流异步电动机变频和串级调速系统及同步电动机调速系统的原理及分析方法。书中还介绍了电气传动系统的计算机控制方法及一些常用的电气传动专用集成控制电路。

本书可作为机电技术人员继续教育的教材，也可作为机电一体化专业本科及大专教材，还可供有关专业的大学生参考。

DY85/10

图书在版编目 (CIP) 数据

电气传动与调速系统/廖晓钟编著. -北京: 中国电力出版社,
1998. 9

(机电工程师继续教育丛书)

ISBN 7-80125-735-9

I. 电… II. 廖… III. ①电力传动②调速系统 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 14726 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10 印张 221 千字

印数 0001—4060 册 定价 12.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《机电工程师继续教育丛书》

编委会名单

名誉主任 丁舜年

主任 赵明生

副主任 刘 恕

委员 (按姓名笔画为序)

万遇良 马 阳 王赞基 吕 森 严陆光

杨竞衡 吴伟文 汪 耕 陈伯时 陈忠信

周鹤良 张林昌 赵长德 郝广发 赖 坚

梁维燕 蔡宣三

主 编 万遇良

副主编 王 忱

序 言

当今世界科技发展的特点之一是新技术不断兴起,而且这些技术之间以及他们与现有技术之间,又互相渗透、彼此结合,形成多种技术的交叉融合,又进一步推动了科技发展不断出现新高潮。机电一体化技术是机械技术与微电子技术、计算机技术和自动控制技术等结合而发展起来的一种高新技术,是这些技术在产品的设计与制造过程中进行最佳协同集成的技术,是先进制造技术的重要组成部分,是制造业的重要发展方向。因此,对在职科技人员实施继续教育,掌握机电一体化技术的最新发展,对提高我国机电产品的技术水平和市场竞争能力,满足各方面的需求,推动科技进步和经济发展具有重要意义。

中国电工技术学会主办的电气工程师进修学院在电气工程师继续教育方面已经开展了十多年的工作,取得了一定成绩,为了在机电工业和国民经济其他部门推广应用机电一体化技术,满足广大工程人员对新技术的渴求,电气工程师进修学院特邀请有关专家编写了这套《机电工程师继续教育丛书》。这套丛书将跟踪高新技术的发展,陆续编写出版,首批编写6种,它们是:《机电一体化系统的设计与分析》、《机电一体化系统的电磁兼容技术》、《机电一体化系统中的计算机控制技术》、《机电一体化系统的软件技术》、《电源技术》、《电气传动与调速系统》。

本丛书将力求达到以下几点要求:

一、力争先进。本丛书的内容将跟踪国内外机电一体化技术的发展与进步,反映其发展趋势。作者均为有关高等院校、科研机构从事相关专业科研、教学和生产多年的专家。

二、力求实用。本丛书主要适用于具有大专以上学历专业的在职科技人员的继续教育和知识更新,也可用作高等院校学生的教材和相关专业研究生的参考书。丛书内容理论联系实际,能够指导读者在需要时运用到实际工作中去。

三、内容简明。每种书集中阐述一个问题,要求内容简明扼要,不包罗万象。

四、学习方式灵活。本丛书既可用于自学,也可用于面授。每种书除包括基本内容外,还包括思考题、练习题,以及深入学习用的参考书目,有助于读者理解掌握和深入钻研。

编写出版这套丛书是一种新的尝试,不可避免地会存在不少问题和缺点,热切希望广大读者给予支持和理解,更欢迎给予批评指正。

《机电工程师继续教育丛书》编委会

1998年7月

前 言

电气传动是实现高效节能、优质高产的现代化生产的重要手段。伴随着微电子技术、电力电子技术及计算机技术的迅速发展,电气传动也发生了巨大的变革。控制手段不断更新,控制方法日趋优化,新的控制理论不断推出。为了帮助工程技术人员及时熟悉和掌握电气传动的新技术,作者根据多年来在电气传动方面的教学和科研实践中的体会,编写了本书。

本书在介绍了电气传动的基础知识后,介绍了电气传动系统。直流传动以调压调速为主线,交流传动以变频调速为主线进行分析,并对常用的典型系统作较详细的分析,由此介绍电气传动系统的一般分析和设计方法。本书力求从物理概念出发而尽量避开较深的理论及复杂的数学推导,从而使全书简明易读。书中给出一定的参考文献,对某些需要深入研究的问题,可通过本书提供的参考文献继续深造。本书适应面较广,既可适合电类专业使用,也适合电类基础较弱的机类专业使用。作为继续教育丛书,全书除注意内容的系统性外,注重了内容的实用性与先进性。书中介绍了几种常用的电气传动专用集成器件及由它们构成的电气传动系统,并介绍了电气传动系统的计算机控制方法等。

全书语言通俗,思路清晰,内容简洁,重点突出。书中配以适当的例题,每章后面均附有复习题,既适用于课堂讲授,也适用于自学。

本书在编写过程中得到了万遇良教授及机械电子工程师进修大学电气学院领导的具体指导和帮助,得到了许多同仁们的关怀和支持,在此一并致谢。

吕家元教授仔细审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,特表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,殷切希望广大读者提出宝贵意见。

作 者

1998年3月

目 录

序言

前言

第一章 电气传动基础	1
第一节 概述.....	1
第二节 直流他励电动机的特性及运行方法.....	5
第三节 异步电动机的特性及运行方法	11
复习题	19
第二章 晶闸管直流电气传动系统	21
第一节 晶闸管直流传动系统	21
第二节 晶闸管直流可逆传动系统	27
复习题	33
第三章 直流脉宽调制传动系统	35
第一节 直流脉宽调制传动系统的工作原理	35
第二节 直流脉宽调制传动系统的控制电路	42
复习题	47
第四章 直流电气传动系统的闭环控制	49
第一节 电气传动系统用调节器	49
第二节 闭环控制的直流调速系统	54
第三节 多环控制的直流调速系统	64
第四节 直流可逆调速系统的控制	72
第五节 计算机控制的直流调速系统	80
复习题	89
第五章 电气传动系统调节器的工程设计法	91
第一节 典型系统及性能指标	91
第二节 非典型系统的典型化.....	100
第三节 转速电流双闭环系统的设计.....	104
复习题.....	113
第六章 异步电动机变频调速系统	114
第一节 静止式变频装置.....	114
第二节 异步电动机变频调速时机械特性.....	120
第三节 转差频率控制变频调速系统.....	123
第四节 电流瞬时值控制（电流跟踪）变频调速系统.....	127

第五节 矢量变换控制变频调速系统.....	129
复习题.....	138
第七章 其他交流调速系统.....	139
第一节 绕线型异步电动机的串级调速系统.....	139
第二节 同步电动机变频调速系统.....	145
复习题.....	150
参考文献.....	151

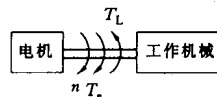
第一章 电气传动基础

应用各种原动机使工作机械产生运动的方式称为电气传动。用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流电气传动,用交流电动机作为原动机的传动方式称为交流电气传动。本章着重介绍各种运行状态下电动机与工作机械之间转矩的关系,以及转矩与转速的关系等电气传动系统的基本问题。

第一节 概 述

一、基本运动方程式

电动机带动工作机械的电气传动系统如图 1-1 所示,其运动规律取决于电动机的输出转矩 T_d 和负载转矩 T_L 之间的关系,并符合刚体旋转的运动定律,即



$$T_d - T_L = d(J\omega)/dt$$

稳态时电动机的电磁转矩 T_e 是电动机输出转矩和空载转矩之和。由于一般情况下空载转矩占电磁转矩 T_e 或输出转矩 T_d 的比例较小,在一般工程计算中可略去空载转矩,而粗略地认为电磁转矩 T_e 与轴上的输出转矩 T_d 相等,那么就有下面的旋转运动方程式

图 1-1 电气传动系统

$$T_e - T_L = d(J\omega)/dt = Jd\omega/dt + \omega dJ/dt \quad (1-1)$$

式中 T_e ——电机电磁转矩, Nm;

T_L ——负载转矩, Nm;

J ——拖动系统折算到电机轴上的总转动惯量, kgm^2 ;

ω ——电动机的角速度, rad/s。

$d(J\omega)/dt$ 表示动量矩,它包括两部分,其中 $\omega dJ/dt$ 对转动惯量可变的对象是有意义的,例如离心机和卷取机传动,或者具有可变形体的工业机器人传动。大多数情况下可以认为总转动惯量为常数,因此式 (1-1) 可以简化为

$$T_e - T_L = Jd\omega/dt \quad (1-2)$$

式 (1-2) 表明电气传动系统的运动状态是由作用在轴上的所有转矩的代数和决定的。

工程计算中,往往不用转动惯量 J ,而用飞轮惯量 GD^2 ,两者的关系为

$$J = m\rho^2 = mD^2/4 = GD^2/4g \quad (1-3)$$

式中 ρ , D ——惯性半径与直径, m;

m ——旋转部分的质量, kg;

G ——旋转部分的重量, N;

g ——重力加速度, $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

在式(1-2)中,如将角速度 $\omega(\text{rad/s})$ 化为每分钟转数 $n(\text{r/min})$ 表示,即 $\omega=2\pi n/60$,并将式(1-3)代入式(1-2),得式(1-2)的实用形式,即

$$T_e - T_L = (GD^2/375)dn/dt \quad (1-4)$$

式(1-4)中数字 375 是具有加速度量纲的数, $GD^2=4gJ$ 称为飞轮惯量或叫飞轮矩, Nm^2 。

研究式(1-2)可以看出:当 $T_e > T_L$ 时, $d\omega/dt > 0$, 系统加速;当 $d\omega/dt < 0$ 时,系统减速;当 $T_e \neq T_L$ 时,系统处于加速或减速的运动状态(动态),此时,存在一个使系统的运动状态发生变化的动态转矩 T_i , 即 $T_i = Jd\omega/dt$, 该转矩是由于系统速度发生变化时,转动系统需要释放或吸收动能而产生的。式(1-2)也可以写成下述转矩平衡方程式

$$T_e - T_L = T_i \text{ 或 } T_e = T_L + T_i$$

当 $T_e = T_L$ 时,动态转矩 T_i 为零,系统以恒速运动,即稳态运动。稳态时,电机的电磁转矩的大小由工作机械即电动机的负载转矩所决定。

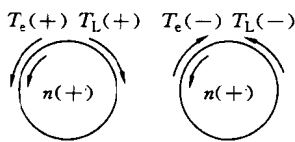


图 1-2 轴端图

由于电动机类型及运行状态的不同,以及生产机械负载类型的不同,电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 不仅大小不同,方向也是变化的。在运动方程式中它们所取的符号也不同。通常以电机轴的旋转方向为参考,来确定转矩的正负。设电动机某一旋转方向为正,则规定电动机电磁转矩 T_e 的方向与所规定的正方向相同时为正,相反时为负。 T_e 为正时是驱动转矩, T_e 为负时是制动转矩。负载转矩 T_L 的规定符号与 T_e 相反,即与所规定的正方向相同时为负,相反时为正。

以上符号关系可以用图 1-2 所示轴端图来表示。图中选择逆时针旋转方向为正。

二、转矩、飞轮矩的折算

实际的电气传动系统,在电动机与工作机构之间往往要经过齿轮减速箱、皮带、联轴结等,这就是常见的多轴传动。在多轴传动中,各轴的转速和飞轮矩各不相同,因此分析和计算这类传动时,必须将所有转矩都折算到同一根轴上(通常折算到电机轴上),将实际系统等效为单轴系统(图 1-1),然后才能使用基本运动方程式(1-2)和式(1-4)。

图 1-3(a)为带减速器的双轴传动,

图 1-3(b)为带减速器的起重传动,其中质量为 m ,重物直线运动的重量为 G ,卷取半径为 R ,惯量为 J_L 。

1. 转矩的折算

按照能量守恒定律,折算至电动机轴上的负载功率应等于工作机构的负载功率加上传动机构中的损耗。设 T_L 表示负载轴上的负载转矩, T'_L 表示折算到电机轴上的负载转矩,则

$$T'_L \omega_d = T_L \omega_L / \eta \text{ (用于旋转运动负载)}$$

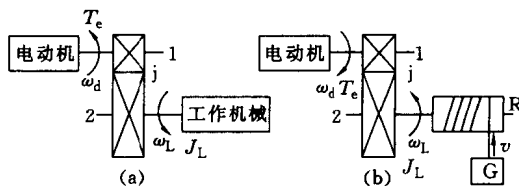


图 1-3 带减速器的多轴传动系统

(a) 双轴传动; (b) 起重传动

和 $T'_L \omega_d = GR \omega_L / \eta$ (用于直线运动负载)

式中 $\eta < 1$ —— 传递效率。

折算到电机轴上的转矩为

$$T'_L = T_L / j \eta \quad (1-5)$$

$$T'_L = GR / j \eta \quad (1-6)$$

式中 $j = \omega_d / \omega_L$ —— 主动轴与从动轴的转速比。

2. 飞轮矩的折算

根据动能守恒规律, 折算后等效系统储存的动能应该与实际系统相等。设电动机轴上等效的转动惯量为 J (飞轮矩为 GD^2)。电机轴的转动惯量为 J_d (飞轮矩为 GD_d^2)。负载轴的转动惯量为 T_L (飞轮矩为 GD_L^2)。对图 1-3 (a) 有

$$\frac{1}{2} J \omega_d^2 = \frac{1}{2} J_d \omega_d^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2$$

等效转动惯量 J 为

$$J = J_d + J_L \left(\frac{\omega_d}{\omega_L} \right)^2 = J_d + J_L / j^2 \quad (1-7)$$

同样, 等效的飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 / j^2 \quad (1-8)$$

对图 1-3 (b) 有

$$\frac{1}{2} J \omega_d^2 = \frac{1}{2} J_d \omega_d^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

式中 v —— 直线运动的线速度。

这样等效转动惯量为

$$J = J_d + J_L / j^2 + m v^2 / \omega_d^2 \quad (1-9)$$

图 1-3 (b) 等效飞轮矩为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 / j^2 + 365 (G v^2 / n_d^2) \quad (1-10)$$

式中 n_d —— 电机的转速, r/min。

由式 (1-9) 和式 (1-10) 可以看出, 对减速传动而言 ($j > 1$), 电机轴上的惯量是总惯量的主要成分, 而其他轴上的惯量折算到电机轴上的只占次要成分。工程上可用近似公式估算, 即

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1-11)$$

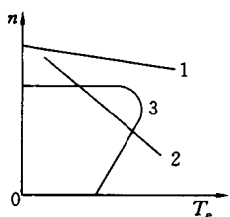
常取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。

传动系统的飞轮矩也可通过实验手段测定。

以上介绍了两级传动时转矩和飞轮矩的折算。对于级数更多的传动, 则应按前述原理一级一级地将转矩和飞轮矩折算到同一轴上, 才能应用基本运动方程式来研究电气传动系统的运动规律, 本书以后只研究等效单轴系统。

三、电机的机械特性和负载转矩特性

1. 电机机械特性



电机的机械特性是指电动机的转速 n 与电磁转矩 T_e 之间的关系, 表示为 $n=f(T_e)$ 。该特性反映了电机本身的特性。不同类型的电动机有不同的机械特性, 典型的机械特性如图 1-4 所示。特性 1 为直流他励电动机和直流并励电动机的机械特性, 特性 2 为直流串励电动机的机械特性, 特性 3 为异步电动机的机械特性。

2. 负载转矩特性

图 1-4 电动机机械特性

工作机械的负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $T_L=f(n)$ 即为负载转矩特性。负载转矩特性因生产机械的不同而不同, 但可归纳为下列三种类型。

(1) 恒转矩负载特性。这种特性的负载转矩 T_L 与转速 n 无关, 即当转速变化时, 负载转矩 T_L 维持恒定。恒转矩负载有反抗性和位能性两种, 如图 1-5 所示。

反抗性恒转矩负载特性的特点是: 恒值转矩 T_L 总是与运动方向相反。因为转速的方向改变, 负载转矩的符号也随之改变, 它们的图像位于第一与第三象限 [图 1-5 (a)]。大多数负载的摩擦阻转矩属于此类。属于此类负载的还有金属的压延、机床的平移机构等。

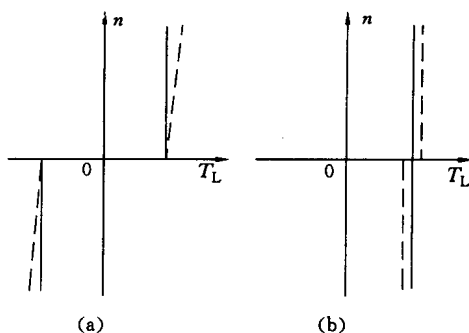


图 1-5 负载转矩特性

(a) 反抗性; (b) 位能性

位能性恒转矩负载特性的特点是: 负载转矩的方向不随转速的方向而改变。最典型的是起重机负载, 不论重物提升 (n 为正) 或下放 (n 为负), 负载转矩方向始终不变。特性位于第一、四象限 [图 1-5 (b)]。

考虑到动静摩擦以及油膜的影响, 实际的特性如图 1-5 中虚线所示。

(2) 通风机负载特性。这种特性的负载转矩大致与转速的平方成正比, 即 $T_L=Kn^2$, K 为比例系数。属于这类负载的有通风机、水泵、油泵等, 其中空气、水、油等介质对叶片的阻力基本上和转速的平方成正比。如图 1-6 特性 1 所示。实际上这类负载也存在摩擦, 特性如图 1-6 中虚线所示。

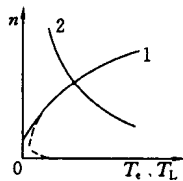


图 1-6 负载转矩特性

(3) 恒功率负载转矩特性。这种特性的负载转矩与转速成反比, 即 $T_L=K/n$, K 为比例系数。特性如图 1-6 曲线 2 所示。例如一些车床, 在粗加工时往往为低转速大切削量, 而精加工时为高速小切削量, 因此不同转速下负载转矩基本上与转速成反比, 因为负载功率 $P_L=T_L\omega=T_L(2\pi n/60)=K\frac{2\pi}{60}$, 可见切削功率基本不变。必须指出的是, 实际负载特性往往是几种典型特性的综合, 所以具体问题应具体分析。

3. 电力拖动系统稳定运行的条件

前面已经分析了电动机的机械特性和工作机械的负载转矩特性, 在工作机械运行时, 这两种特性是同时存在的。为了分析电气传动的运行问题, 可以把两者画在同一个座标图上。

如图 1-7 所示。

在电气传动运动方程式中已指出，当转矩 T_e 与 T_L 方向相反、大小相等而相互平衡时，转速为某一稳定值，传动系统处于稳态。即图 1-8 中两特性的交点 A 点，在 A 点 $T_L = T_e$ 。两特性具有交点是电气传动系统稳定运行的必要条件，但并不是充分条件。电机稳态运行时，若由于某种扰动作用使转速稍有变化，当扰动去除后转速仍能恢复到原来的运行点，这样的稳态运行点才是稳定的。否则，就是不稳定的运行点。

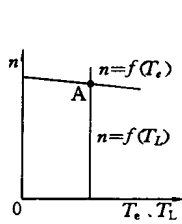


图 1-7 机械特性与负载特性的配合

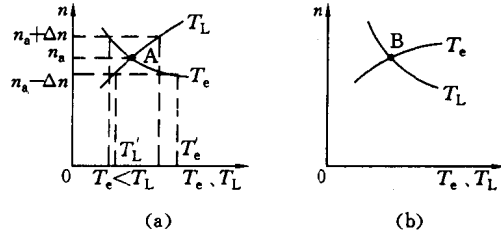


图 1-8 $T_e(n)$ 与 $T_L(n)$ 配合的两种情况
(a) 稳定；(b) 不稳定

图 1-8 在 T_e-n 平面内给出了机械特性 $T_e(n)$ 和负载特性 $T_L(n)$ 在交点处的几种配合。现在分析一下图 1-8 (a) 交点 A 的稳定运行情况。假设出现瞬时扰动（如电枢电压升高）使电枢电流及电磁转矩增大，而使转速稍有增大 $(+\Delta n)$ ，当扰动消除后，由于此时 $T_e < T_L$ ， $dn/dt < 0$ ，迫使转速下降，恢复到原值 n_A ；同理如瞬时扰动引起转速稍有下降 $(-\Delta n)$ ，当扰动消失后，则由于 $T'_e > T'_L$ ，将使转速上升，也会恢复原值 n_A ，所以，系统在 A 点能稳定运行。用同样方法可以分析出，图 1-8 (b) 中交点 B 是不稳定运行点。

综上所述，电气传动系统稳定运行的条件也可写成：特性 $T_e(n)$ 和 $T_L(n)$ 有交点，并且在该交点对应的转速之上保证 $T_e < T_L$ ，而在对应的转速之下则要求 $T_e > T_L$ 。

第二节 直流他励电动机的特性及运行方法

一、直流他励电动机的机械特性

从励磁方法上看，直流电动机有他励式、并励式、串励式、复励式。他励式和并励式电动机性能相近，由于这一类电机具有良好的控制性能，故在电气传动中应用最广。

在稳态运行下，直流电动机（见图 1-9）有下列方程式：

$$\text{电枢电动势 } E = C_e \Phi n$$

$$\text{电磁转矩 } T_e = C_m \Phi I$$

$$\text{电压平衡 } U = E + IR$$

联立求解上述方程式，可以得到电机的机械特性方程式为

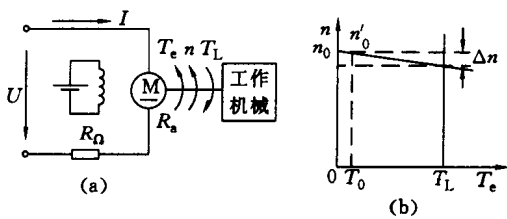


图 1-9 直流电动机线路及特性
(a) 他励线路；(b) 机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} T_e = n_0 - \Delta n \quad (1-12)$$

式中 R ——电枢回路总电阻；

Φ ——励磁磁通；

I ——电枢电流；

$C_e = \frac{pN}{60a}$ ——电动势常数（极对数 p ，并联支路对数 a 、有效导线总数 N ）；

$C_m = \frac{pN}{2\pi a}$ ——转矩常数， $C_m = 9.55 C_e$ ；

$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ ——理想空载转速；

$\Delta n = \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} T_e$ ——转速降。

图 1-9 示出他励直流电动机的线路及机械特性曲线。

在机械特性方程式 (1-12) 中，当电枢电压和励磁磁通为额定值 U_{nom} 和 Φ_{nom} ，电枢回路电阻为电枢电阻 R_a 时，对应的特性为固有特性。改变这些参量时，对应的特性为人为特性。

必须指出，电动机实际的空载转速 n'_0 比 n_0 略低，如图 1-9 所示。这是因为电机空转时必须克服空载损耗转矩 T_0 ，此时实际空载转速 n'_0 为

$$n'_0 = n_0 - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} T_0$$

转速降 Δn 可以表示为 $\Delta n = \beta T_e$ ，其中 $\beta = \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$ 为机械特性的斜率。 β 越大，机械特性越软。

需要指出的是，当他励电机励磁恒定时，电枢电流 I 正比于电磁转矩 T_e ，此时可用转速特性 $n = f(I)$ ，即

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表示他励电机的机械特性 $n = f(T_e)$ 。

【例 1-1】 一台他励直流电动机的铭牌数据为 2.2kW、220V、12.35A、3000r/min。试求：

(1) 电动机的固有机械特性，并绘制特性曲线；

(2) 当电枢回路串接附加电阻 $R_a = 3\Omega$ 时，求人为特性并绘制特性曲线。

解 (1) 计算固有特性：

根据经验公式（认为在额定负载下，电枢铜耗约占总损耗的一半）有

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{nom}} I_{\text{nom}} - P_{\text{nom}}}{I_{\text{nom}}^2} = \frac{220 \times 12.35 - 2200}{2 \times 12.35^2} = 1.695(\Omega)$$

$$\text{而 } C_e \Phi_{\text{nom}} = \frac{U_{\text{nom}} - I_{\text{nom}} R_a}{n_{\text{nom}}} = \frac{220 - 12.35 \times 1.695}{3000} = 0.066(\text{V/r/min})$$

固有特性为

$$n = \frac{U_{\text{nom}}}{C_e \Phi_{\text{nom}}} - \frac{R_a}{C_e \Phi_{\text{nom}} C_m \Phi_{\text{nom}}} T_e = 3330 - 40.75 T_e$$

(2) 计算人为特性:

$$n = \frac{U_{\text{nom}}}{C_e \Phi_{\text{nom}}} - \frac{R_a + R_{\Omega}}{C_e \Phi_{\text{nom}} C_m \Phi_{\text{nom}}} T_e = 3330 - 112.9 T_e$$

固有特性和人为特性见图 1-10 中曲线 1 和 2。

二、直流他励电动机的调速

大量的工作机械要求在不同情况下以不同的速度工作,以使工作机械工作的最合理,这就要求以一定的方法来改变工作机械的速度,这种方法称为调速。

(一) 调速的性能指标

为了从技术和经济两方面比较各种调速方法,便于生产机械选择调速方案,对调速提出了一些性能指标,主要有:静差率、调速范围和调速的平滑性等。

1. 静差率

电机运行在某一机械特性上时,额定负载下的转速降 Δn_{nom} 与理想空载转速 n_0 之比,称为静差率,常用百分数表示,即

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\%$$

静差率表示系统运行的相对稳定性程度。显然,电动机的机械特性越硬,则静差率越小,相对稳定性就越高。不同的生产机械对静差率的要求也不同,例如普通车床可允许 $s \leq 30\%$,而精度要求高的造纸机则要求 $s \leq 0.1\%$ 。

静差率和机械特性硬度又是有区别的。对于两条平行的机械特性,两者的硬度相同,但由于两者的理想空载转速不同,两者的静差率是不同的。显然,同样硬度的特性,转速越低,静差率越大,越难满足工作机械对静差率的要求。

2. 调速范围

调速范围指生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{max} 和最低转速 n_{min} 之比,用字母 D 表示,即

$$D = n_{\text{max}} / n_{\text{min}}$$

其中 n_{max} 和 n_{min} 一般都指电机额定负载时的转速,对于少数轻载的机械,也可用实际负载时的转速。

应该指出,调速范围和静差率这两个指标是有联系的。比如一个调速系统,在 1000r/min 时,转速降落 10r/min,静差率为 1%;在 100r/min 时,转速降落 10r/min,此时静差率为 10%。所以静差率和调速范围两项指标必须同时提才有意义。一个调速系统的调速范围,是指在最低速时还能满足所提静差率要求的转速可调范围。脱离了对静差率的要求,任何调速系统都可以得到极高调速范围;反过来,脱离了调速范围,要求的静差率也就容易满足多了。

调速系统最低速时的静差率为

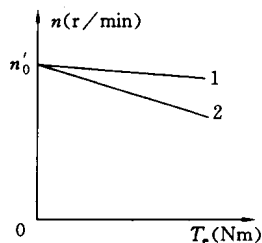


图 1-10 机械特性绘制

$$s = \Delta n_{\text{nom}} / n_{\text{omin}}$$

而

$$\begin{aligned} n_{\text{min}} &= n_{\text{omin}} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{s} - \Delta n_{\text{nom}} \\ &= (1 - s) \Delta n_{\text{nom}} / s \end{aligned}$$

所以

$$D = n_{\text{max}} / n_{\text{min}} = n_{\text{max}} s / \Delta n_{\text{nom}} (1 - s)$$

上式表示了调速范围、静差率和额定速降之间所应满足的关系。对于一个调速系统，由于电机的最高转速受机械强度的限制不能太大，所以要想扩大调速范围，就需设法减小 Δn_{nom} ，这将在本书以后的章节中详细介绍。

3. 调速的平滑性

通常用两个相邻调速级的转速比来衡量。在一定调速范围内，调速级数越多，则平滑性越好；当级数无穷多时，称为无级调速，即速度连续可调。

关于调速方案的经济指标，决定于调速系统的设备投资费、设备的运行效率、维护费等，选择调速方案时应综合考虑。

(二) 调速方法

由式 (1-12) 可知，改变直流电动机的转速亦即调速有三种方法：调节电枢电压 U 、调节励磁磁通 Φ 和改变电枢附加电阻 R_{Ω} 。三种调速方法的机械特性如图 1-11 所示。

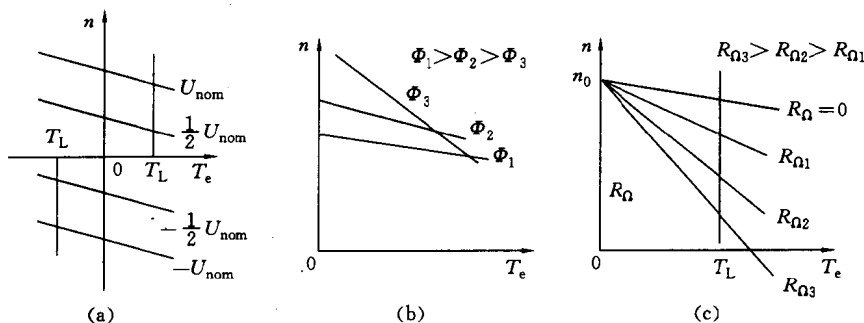


图 1-11 直流电动机的人为特性

(a) 调节电枢电压 U ；(b) 调节励磁磁通 Φ ；(c) 改变电枢附加电阻 R_{Ω}

改变电枢电压 U 时的机械特性是平行变化的 [图 1-11 (a)]，电压反向时电机运行在第三象限，亦即反转。采用这种调速方法，最高转速一般取决于额定转速，最低转速取决于低速时的稳定性。这种调速方法的调速范围宽，动态性能好，因此得到广泛的应用。

直流他励电动机在额定磁通下运行时，电机的磁路一般已接近饱和，所以，通常采用减弱磁通 Φ 来实现升速，如图 1-11 (b) 所示。改变磁通的方向也可以使电机反转。一般最低速为电机的额定转速，最高速受电机换向条件和电枢机械强度的限制，调速范围较小。调节励磁磁通的调速方法常与调节电枢电压的调速方法结合，以扩大调速范围。

前两种调速方法，效率都比较高。与此相反，改变电枢电阻的调速方法，得到的是一组交于一点的倾斜直线，如图 1-11 (c) 所示。附加电阻 R_{Ω} 越大，特性曲线越倾斜，稳定性越差，电机的铜损耗越大。因此这种调速方法在实际中应用较少。

三、直流他励电动机的起动

直流他励电动机起动时应该先建立磁场,再加电枢电压。当忽略电感时,电枢电流 $I = (U - E) / R$ 。起动瞬间 $n = 0$, $E = 0$, 而电枢绕组 R_a 很小,如直接加额定电压起动,电枢电流可突增到额定电流的十多倍。这不仅使换向恶化,甚至会烧坏电机,而且与电流成比例的转矩将损坏拖动系统的传动机械。

对于采用改变电枢电压的可调电气传动,可通过逐渐增加电压的方法起动。这一般是在控制系统输入信号处接入给定积分器等装置以实现软起动。起动过程可以保持电枢电流或转矩有最大值(通过限幅装置),从而缩短起动时间。

对于不可调电气传动,可采用外接附加电阻 R_Ω 来限制起动电流。如图 1-12 中,起动时逐渐切除附加电阻 $R_{\Omega 3}$, $R_{\Omega 2}$, $R_{\Omega 1}$, 即可使电机在电枢电流不超过允许值的情况下逐渐加速,直至全部附加电阻均切除,电机起动完毕。

四、直流他励电动机的制动

直流他励电动机有两种运行状态。当电动机电磁转矩 T_e 的方向与转速 n 的方向相同时是电动运行状态,此时电网向电机输入电能,并变为机械能以带动负载。当电动机的转矩 T_e 与转速 n 的方向相反时为制动运行状态,此时电机吸收机械能,并转化为电能。

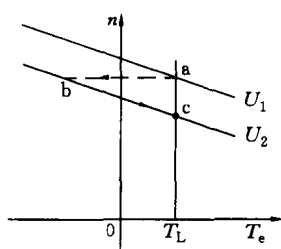


图 1-13 再生发电制动特性

直流他励电动机的电气制动方法有三种,即再生发电制动、电阻能耗制动和反接制动。

1. 再生发电制动

为了实现电气制动就要求电机的电磁转矩和转速两者之中有一个要与电动运行状态时相反。改变转矩方向就是要改变电枢电流或励磁磁通的方向。比如突然降低电枢电压 U 使之小于 E (由于机械惯性,转速不能突变,而 $E = C_e \Phi n$), 则电流反向,转矩反向,电机运行在第二象限(图 1-13),处于发电制动状态,把系统的动能转变为电能回送电网,因此这种制动方法最为经济。

2. 能耗制动

电阻能耗制动方法是切除外界供电电压 U 而用附加电阻 R_b 将电枢端子短接,由反电动势 E 产生的电流方向与电动状态时相反,处于制动状态。

此时机械特性由式 (1-12) 有

$$n = -\frac{R_a + R_b}{C_e \Phi C_m \Phi} T_e \quad (1-14)$$

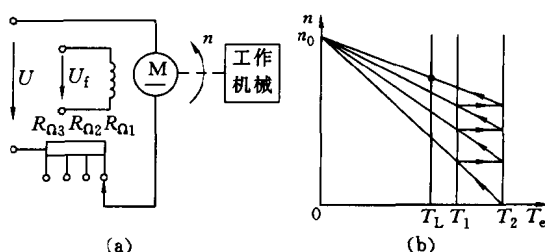


图 1-12 电枢串电阻起动

(a) 线路; (b) 机械特性

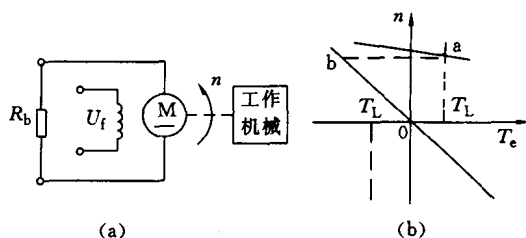


图 1-14 电阻能耗制动

(a) 线路; (b) 机械特性