

电力
电子
技术与
电气
传动

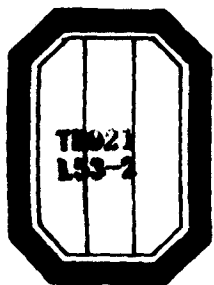
● 廖晓钟 编著 ●
● 北京理工大学出版社 ●

TN921

L53-2

电力电子技术 与电气传动

廖晓钟 编著



北京理工大学出版社

DY3460

内 容 简 介

电力电子技术发展迅速,它已在工业生产中广泛用于电气传动设备,对提高生产率和自动化水平起到了重要的作用。本书有机地将电力电子技术和电气传动技术结合起来,由浅入深地介绍了电力电子器件及其构成的电气传动系统的基本原理、分析和设计方法。

本书主要包括:电气传动的 basic 问题,半控型电力电子器件(晶闸管)及其构成的直流相位控制传动系统的原理、分析和设计方法,全控型电力电子器件(GTR、GTO、Power MOSFET、IGBT、MCT)及其构成的直流脉冲宽度调制传动系统的原理及分析方法,交流异步电动机变频调速系统,绕线式异步电动机串级调速系统及同步电动机调速系统的原理及分析方法。

本书可作为高校自动化、电类及相关专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术与电气传动/廖晓钟编著. —北京:北京理工大学出版社, 2000. 1

北京理工大学“九五”规划教材

ISBN 7-81045-652-0

I. 电… II. 廖… III. ①电力系统-电子技术-高等学校-教材 ②电力传动-高等学校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 68201 号

责任印制: 毋长新 责任校对: 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

北京国马印刷厂印刷

*

850 毫米×1168 毫米 32 开本 11.625 印张 294 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 16.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

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。电气传动的发展对电力电子技术提出了新的要求,又促进了电力电子技术的发展。两者的发展是相辅相成的,两者的内容是密切相关的。作者多年来一直将两部分内容结合在一起组织教学,根据多年的教学和科研体会编写了本书。

本书结合电力电子技术在电气传动中的应用,从使用角度介绍了半控型及各种全控型电力电子器件。在电气传动系统及控制方法的分析中,力求从物理概念出发而尽量避免较深的理论及复杂的数学推导,从而使全书简明易读。本书在有限的篇幅中,对电力电子技术的电气传动作了全面论述,充分体现了少而精的原则。

本书的主要内容包括:电气传动的基本问题,半控型电力电子器件及其构成的直流相位控制传动系统,全控型电力电子器件及其构成的直流脉冲宽度调制传动系统,交流异步电动机变频调速,绕线式异步电动机串级调速及同步电动机调速系统。

本书适应面较广,既适用于电类专业,也适用于电类基础较弱的机电一体化专业。

全书语言通俗,论述清楚,层次分明,内容简洁,重点突出。书中配以适当的例题,每章均附有习题及思考题。既适合课堂教学,也适合自学。

本书在编写过程中得到了许多同仁们的关怀和支持,李鹤轩教授提出了许多宝贵的建议,吕家元教授仔细审阅了全书,在此

一并表示衷心的感谢。

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

1999年8月

目 录

第一章 电气传动基础	(1)
第一节 电气传动的动力学基础	(1)
第二节 直流他励电动机的机械特性及运行方法	(9)
第三节 异步电动机的机械特性及运行方法	(31)
习题与思考题	(44)
第二章 晶闸管及相位控制直流传动系统	(46)
第一节 晶闸管	(46)
第二节 晶闸管相控整流电路	(58)
第三节 晶闸管触发电路及保护	(78)
第四节 相位控制的直流传动系统	(88)
习题与思考题	(109)
第三章 全控型电力电子器件与直流脉宽调制传动系统	(112)
第一节 电力晶体管(GTR)	(112)
第二节 可关断晶闸管(GTO)	(131)
第三节 功率场效应晶体管(Power MOSFET)	(144)
第四节 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(158)
第五节 功率集成电路及 MOS 控制晶闸管	(170)
第六节 直流脉宽调制传动系统	(178)
习题与思考题	(198)
第四章 直流电气传动系统的闭环控制	(199)
第一节 电气传动系统用调节器	(199)
第二节 闭环控制的直流调速系统	(207)
第三节 多环控制的直流调速系统	(221)
第四节 可逆调速系统的控制	(233)
习题与思考题	(247)
第五章 电气传动系统调节器的工程设计	(250)
第一节 典型系统及性能指标	(251)

第二节	非典型系统的典型化	(265)
第三节	转速电流双闭环系统的设计	(271)
	习题与思考题	(283)
第六章	异步电动机变频调速系统	(284)
第一节	静止式变频装置	(284)
第二节	异步电动机变频调速时的机械特性	(307)
第三节	转差频率控制变频调速系统	(311)
第四节	矢量变换控制变频调速系统	(318)
	习题与思考题	(334)
第七章	其他交流调速系统	(335)
第一节	绕线型异步电动机的串级调速系统	(335)
第二节	同步电动机变频调速系统	(349)
	习题与思考题	(362)
	参考文献	(364)

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 电气传动的动力学基础

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省略掉空载转矩，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

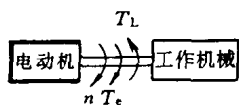


图 1-1 电气传动系统

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

式中 T_e ——电动机的电磁转矩(N·m)；

T_L ——负载转矩(N·m)；

J ——拖动系统折算到电动机轴上的总转动惯量
($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；

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 ω (rad/s)化为每分钟转数 n (r/min)表示, 即 $\omega=2\pi n/60$, 并将式(1-3)代入式(1-2), 即可得式(1-2)的实用表达形式, 即

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式(1-4)中数字 375 是具有加速度量纲的数, $GD^2=4gJ$ 称为飞轮惯量或飞轮矩($\text{N} \cdot \text{m}^2$)。

研究式(1-2)可以看出: 当 $T_e > T_L$ 时, $d\omega/dt > 0$, 系统加速; 当 $T_e < T_L$ 时, $d\omega/dt < 0$, 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 $T_i = Jd\omega/dt$, 该转矩是由于系统转速发生变化时, 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

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

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，电动机的电磁转矩大小由工作机械即电动机的负载转矩所决定。

由于电动机转矩性质及运行状态的不同，以及工作机械负载性质的不同，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。通常以电动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 的规定符号与电磁转矩 T_e 的规定符号相反，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。

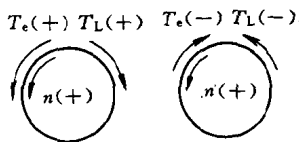


图 1-2 轴端图

二、转矩、飞轮矩的折算及实验测定

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，必须将所有轴的转矩和飞轮矩折算到同一根轴上（通常折算到电动机轴上），将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，其中直线运动的重物质量为 m 、重量为 G ，卷筒

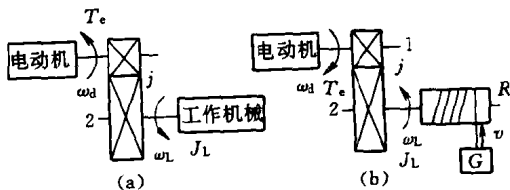


图 1-3 多轴传动系统
(a) 双轴传动；(b) 起重传动

的半径为 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械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 表示折算到电动机轴上的负载转矩，则

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

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

式中 η ——传递效率， $\eta < 1$ 。

两种运动负载折算到电动机轴上的转矩分别为

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

和 $T'_L = GR / j \eta \quad (1-6)$

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

2. 飞轮矩的折算

根据动能守恒定律，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)，电动机轴的转动惯量为 J_d (飞轮矩为 GD_d^2)，负载轴的转动惯量为 J_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

$$J = J_d + J_L / (\omega_d / \omega_L)^2 = J_d + J_L / j^2 \quad (1-7)$$

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(m/s)。

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)系统等效飞轮矩为

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

式中 n_d 为电机的速度(r/min)。

由式(1-9)和式(1-10)可以看出,对减速传动而言($j>1$),电动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动机轴上的只是次要成分。工程上可用近似公式估算,即

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

常取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。

以上介绍了两级传动时的转矩和飞轮矩的折算。对于级数更多的传动,则应按照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。

3. 转动惯量或飞轮矩的实验测定

飞轮矩是研究拖动系统动态过程不可缺少的重要参数。电动机的转动惯量通常在手册或技术说明中给出,而负载的结构却各式各样,简单的几何形体可计算得到,复杂的非匀质的结构计算起来就比较困难。在这种情况下,可以借助于实验手段测定系统的飞轮矩。

实验测定飞轮矩的方法有多种,这里只介绍整机滑行试验法。

测试原理是将电力拖动系统加速到某个转速,达到稳态后突然切断电源,使系统在负载阻转矩作用下自由滑行减速。此时电磁转矩 T_e 为零,运动方程式(1-4)为

$$-T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-12)$$

只要测得负载转矩 T_L 和转速变化率 dn/dt ,就可测得飞轮矩 GD^2 。

具体步骤如下:

首先,测出不同转速下电力拖动系统的稳态输入功率,再扣除电动机的铜耗后,即可得到负载损耗曲线 $P_L(\omega)$ (忽略空载损

耗，稳态时电磁功率与负载损耗相等)。

其次，算出不同转速下的稳态负载转矩

$$T_L = 9.55P_L/n \quad (1-13)$$

式中各量的单位为 $T_L(\text{N} \cdot \text{m})$, $P_L(\text{W})$, $n(\text{r}/\text{min})$ 。

用图解插值法可以得到 $T_L(n)$ 曲线,如图 1-4 所示。然后,测出电力拖动系统自由滑行减速的转速下降曲线 $n(t)$,并绘于 $n-t$ 坐标系中,分段求得 $\Delta n/\Delta t$ 和 T_L ,以 $\Delta n/\Delta t$ 代替 dn/dt ,由式(1-12)求得各段的 $375 \times T_L/(\Delta n/\Delta t)$,作平均后即得系统的飞轮矩 GD^2 ,而转动惯量 $J=GD^2/4g$ 。

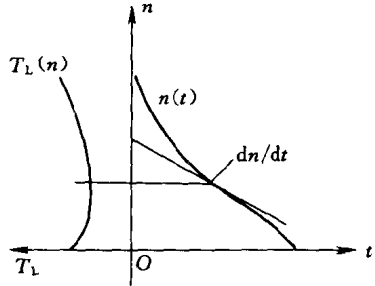


图 1-4 自由滑行曲线

三、电动机的机械特性和负载转矩特性

1. 电动机机械特性

电动机的机械特性是指电动机的转速 n 和电磁转矩 T_e 之间的关系,表示为 $n=f(T_e)$ 。该特性反映了电动机本身的特性。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 1-5 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

工作机械的负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $n=f(T_L)$ 即为负载转矩特性。负载转矩特性因工作机械的不同而不同,但是负载转矩特性可被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 1-6 所示。

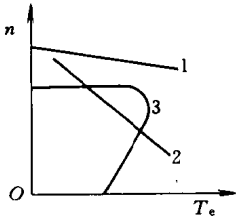


图 1-5 电动机的机械特性

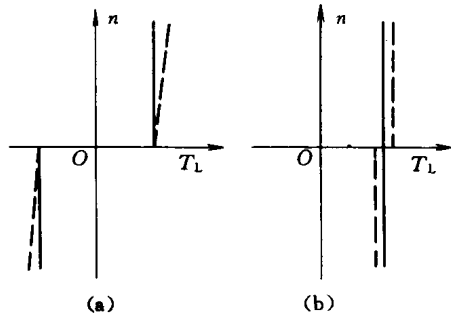


图 1-6 恒转矩负载转矩特性
(a) 反抗性；(b) 位能性

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。因为转速的方向的改变，负载转矩的方向也随之改变，它们的图像位于第一与第三象限(图 1-6(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。

位能性恒转矩负载的特点是：负载转矩的方向不随转速的方向而改变。最典型的位能性恒转矩负载是起重机负载，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、第四象限(图 1-6(b))。

考虑到动静摩擦以及油膜的影响，实际的特性如图 1-6 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 1-7 特性 1 所示。实际上这类负载也存在干摩擦，特性如图 1-7 中虚线所示。

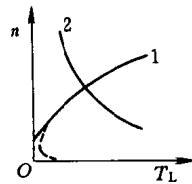


图 1-7 负载转矩特性

(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 1-7 曲线 2 所示。例如一些车床, 在粗加工时往往为低速大切削量, 而精加工时为高速小切削量, 因此在不同转速下负载转矩基本上与转速成反比, 因为负载功率 $P_L = T_L \omega = T_L (2\pi n/60) = K (2\pi/60)$, ω 为电动机的角速率, 可见, 这种机床的切削功率基本不变。

必须指出的是, 实际负载特性往往是几种典型特性的综合, 所以具体问题应该具体分析。

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, 在电气传动系统运行时, 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坐标图上。如图 1-8 所示。

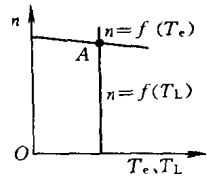


图 1-8 机械特性与负载特性的配合

在电气传动运动方程式中已指出, 当电磁转矩 T_e 与 T_L 方向相反, 大小相等而相互平衡时, 电动机轴的转速为某一稳定值, 传动系统处于稳态。即图 1-9 中机械特性和负载转矩特性的交点 A 点, 在 A 点处 $T_L = T_e$ 。机械特性和负载转矩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。电动机稳定运行时, 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 1-9 在 $T_e - n$ 平面上给出了机械特性 $T_e(n)$ 和负载特性 $T_L(n)$ 在交点处的几种配合。现在分析一下图 1-9 (a) 交点 A 的稳定运行情况。假设出现某种瞬时扰动 (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, 如果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图 1-9 (b) 中交点 B 是不稳定运行点。

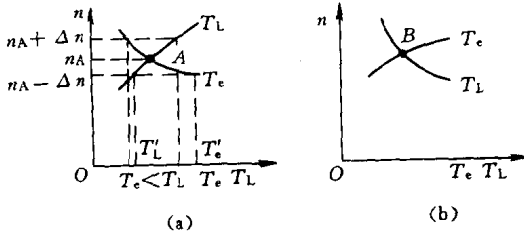


图 1-9 $T_e(n)$ 与 $T_L(n)$ 配合的两种情况
(a) 稳定; (b) 不稳定

综上所述, 电气传动系统稳定运行的条件也可写成: 特性 $T_e(n)$ 和特性 $T_L(n)$ 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 直流他励电动机的机械特性及运行方法

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、串励式和复励式(图 1-10)。他励式和并励式电动机的性能相近, 故可归并为一类。他励式又分永磁励磁和励磁绕组励磁。后者由于具有良

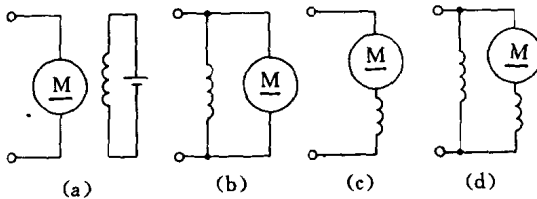


图 1-10 直流电动机按励磁方式分类
(a) 他励式; (b) 并励式; (c) 串励式; (d) 复励式

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 1-11)有下列方程式：

$$\text{电枢电动势} \quad E = C_e \Phi n$$

$$\text{电磁转矩} \quad T_e = C_m \Phi I$$

$$\text{电压平衡方程} \quad U = E + IR$$

联立求解上述方程式，可以得到电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} T_e = n_0 - \Delta n \quad (1-14)$$

式中 R ——电枢回路总电阻；

Φ ——励磁磁通；

I ——电枢电流；

C_e ——电动势常数， $C_e = p_M N / 60a$ (极对数 p_M ，并联支路对数 a ，有效导线总数 N)；

C_m ——转矩常数， $C_m = p_M N / 2\pi a = 9.55 C_e$ ；

n_0 ——理想空载转速； $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ ；

Δn ——转速降， $\Delta n = (R / C_e C_m \Phi^2) T_e$ 。

图 1-11 示出直流他励电动机的线路及机械特性曲线。

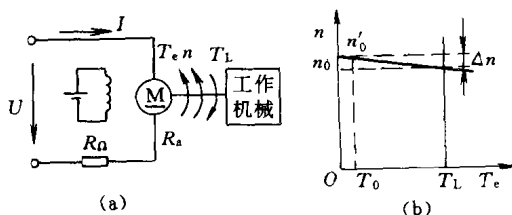


图 1-11 直流他励电动机线路及特性

(a) 他励线路；(b) 机械特性

在机械特性方程式(1-14)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。