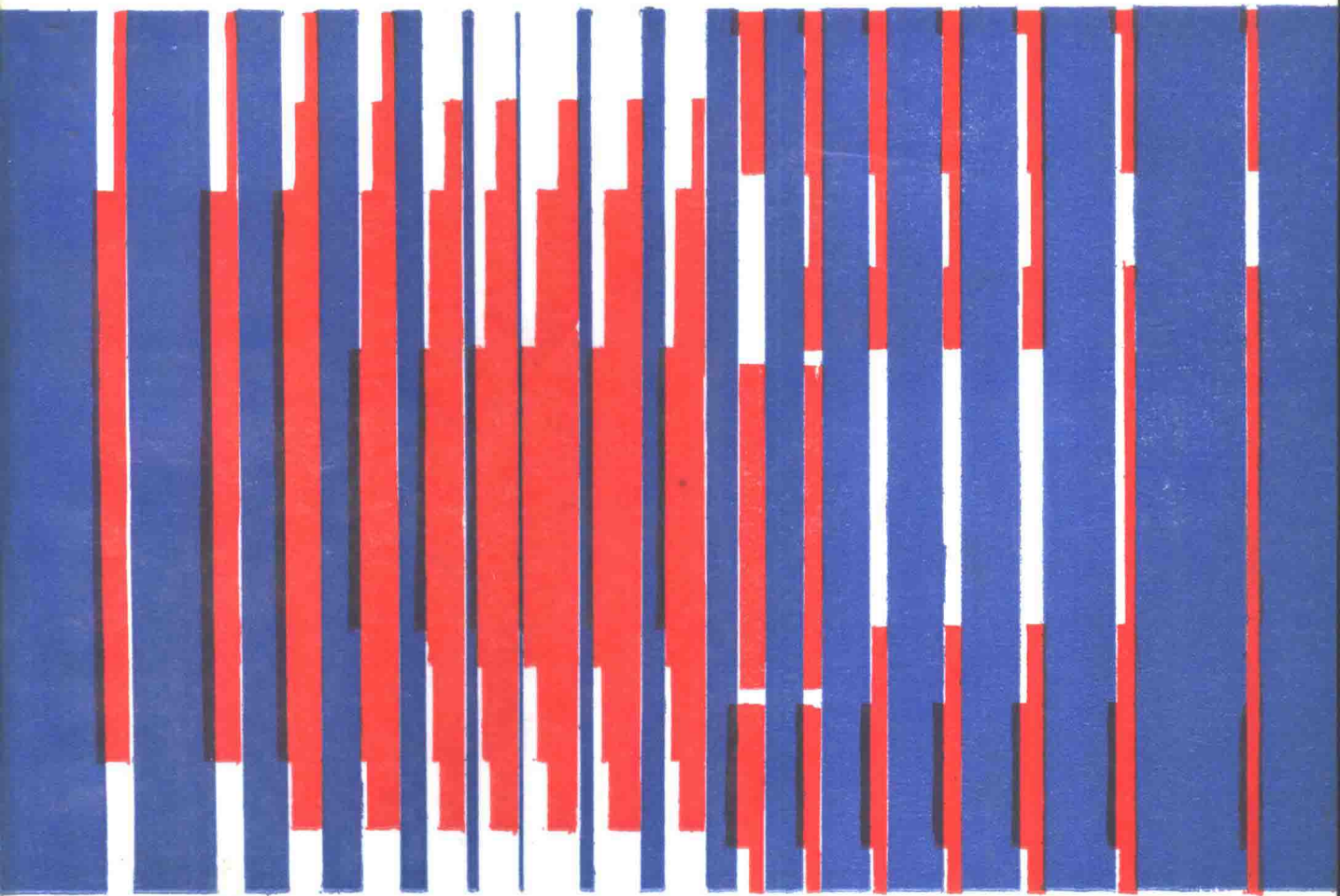


宋世光 刘金琪 编

机床电气自动控制



哈尔滨工业大学出版社

机床电气自动控制

宋世光 刘金琪 编

哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第4号

内 容 简 介

本书主要内容有机床电力拖动的基本规律;机床电气控制线路的基本环节及典型机床的电气控制线路;自动控制调速系统的原理及特性;机床电气设计的原则、规律以及电气元件的选择;可编程序控制器的原理及应用等。

本书可作为高等工科院校机械制造工艺及设备专业的教材,也可供有关专业师生、工程技术人员参考。

机床电气自动控制

宋世光 刘金琪 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
黑龙江省绥棱县印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张11.75 字数270 000

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数1—4 000

ISBN 7-5603-0373-0/TH·27 定价: 3.40元

前 言

本书是根据1984年3月福州会议重新汇总修改的“机床电气自动控制教材编写大纲”编写的。在编写时还参照了1986年国家教育委员会委托机械工业部在哈尔滨工业大学进行机械制造专业评估试点时对本课程制订的教学大纲。

全书共七章，主要内容有：电力拖动的基本概念；机床电气控制线路的基本环节及典型机床的电气控制线路；自动控制调速系统的原理及特性；机床电气设计的基本规律与原则，电气元件的选择；可编程序控制器的原理及应用等。考虑到我校和许多其它院校已设立“数控机床”一课，故将“数控机床”部分割弃。

本教材考虑到与前修课程的衔接，既避免了内容的重复，又深入浅出地补充了由电工学向本课过渡的基础理论的空白点，使基础理论系统性为之加强。

教材内容结合我国机床电气自动控制的实际，如有关章节的图例、线路及技术数据尽量贴近生产实践，并对新技术及发展方向给予必要的反映。如增加了交流调速系统及可编程序控制器的内容。

本教材中的术语、项目代号、电气图用“图形符号”以及绘图方法均采用新国标。

本教材经过多年教学实践，不断完善、不断充实，逐渐形成现在的版本。本书由哈尔滨工业大学王炎教授主审，宋世光和刘金琪两人合编。第一、二、五、六章由宋世光编写，第三、四、七章由刘金琪编写。在本书编写的过程中，承蒙北京机床研究所郑甲寅高级工程师提供宝贵资料。在此表示感谢！

本书为高等工科院校机械制造工艺及设备专业教材，也可供有关专业师生、工程技术人员参考。

编者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

1991年3月

目 录

第一章 结 论

§1-1 机床电力拖动系统的组成及其发展·····	1
§1-2 机床电气控制装置的发展·····	2

第二章 电力拖动的基本概念

§2-1 电力拖动系统的运动方程式·····	4
§2-2 电力拖动系统的运动分析·····	6
§2-3 直流他励电动机的制动工作状态·····	8
§2-4 异步电动机的制动工作状态·····	12
§2-5 电力拖动系统的调速及其基本指标·····	15

第三章 机床电气控制线路的基本环节

§3-1 机床电气设备的国家标准简介·····	22
§3-2 机床电气设备原理图的绘制·····	40
§3-3 机床电气控制的基本线路·····	49
§3-4 电气控制线路的几个基本控制环节·····	54
§3-5 机床电气控制系统的保护环节·····	57
§3-6 机床工业的电源系统·····	60

第四章 典型机床的电气控制线路

§4-1 普通车床电气控制线路·····	62
§4-2 钻床电气控制线路·····	67
§4-3 铣床电气控制线路·····	72

第五章 自动控制调速系统

§5-1 直流调速系统的主要方案·····	79
§5-2 反馈控制的基本概念·····	82
§5-3 转速负反馈自动调速系统·····	83
§5-4 电压负反馈、电压负反馈加电流正反馈自动调速系统·····	88
§5-5 转速负反馈加电流截止负反馈的自动调速系统·····	90
§5-6 无静差自动调速系统·····	92
§5-7 转速、电流双闭环调速系统·····	94
§5-8 交流调速系统概述·····	98
§5-9 异步电动机改变定子电压调速·····	99
§5-10 异步电动机的串级调速·····	101
§5-11 异步电动机的变频调速·····	102

第六章 机床的电气设计

§6-1 机床电气设计的依据·····	106
---------------------	-----

§6-2	机床电气设计的内容.....	109
§6-3	电动机的选择.....	119
§6-4	机床常用电器的选择.....	122
§6-5	机床继电器接触器控制线路设计的原则.....	147
第七章 可编程序控制器		
§7-1	可编程序控制器的技术概况.....	149
§7-2	可编程序控制器的基本组成及一般工作原理.....	151
§7-3	几种可编程序控制器的性能简介.....	154
§7-4	可编程序控制器的指令系统.....	158
§7-5	可编程序控制器的程序设计方法.....	168

第一章 绪 论

§ 1-1 机床电力拖动系统的组成及其发展

各个工业部门中所使用的机器，基本上都是通过金属切削机床加工制成的。因此，金属切削机床是机械制造工业中的“工作母机”。显然机床工业的发展与机械工业的发展密切相关，而机床工业的发展水平是一个国家工业水平的一个重要标志。

机床是由电动机拖动运转的，这种拖动方式称之为“电力拖动”。机床即为电力拖动系统，它和其它电力拖动系统一样，是一个机械与电气综合的系统。它的组成也和其它电力拖动系统一样，不外由以下四部分组成：电动机及其供电电源；传动机构；电气控制装置；工作机构。

由于车床是一个比较简单的电力拖动系统，所以我们以车床为例，讨论机床电力拖动系统的组成。如图1-1所示。

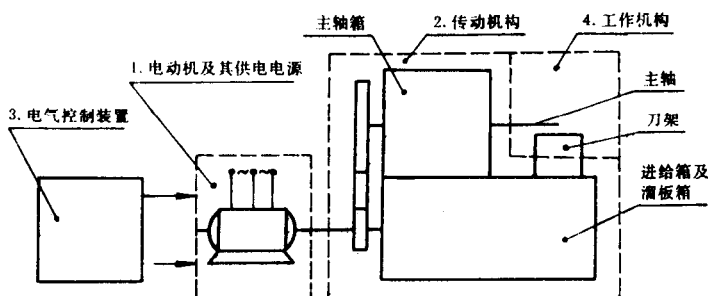


图 1-1 车床组成的示意图

电动机及其供电电源的作用是把电能转换成机械能；传动机构是皮带轮、齿轮箱（主轴箱、进给箱、溜板箱）等。其作用是将机械能传送到所需要的地方，并且转化为需要的运动形式而进行分配；电气控制装置是由控制线路及控制元件等组成的，它的作用是控制电动机，使其按着生产工艺的要求来动作（如：起动、正转、反转、制动、停车等），并对系统进行保护，从而对工作机构的运动实现自动控制；工作机构是主轴、刀架，作用是完成生产的工艺动作。对车床而言，即是完成对工件的车削。

通过对车床组成的讨论，可以看出它是一个电气与机械的综合系统，其它机床电力拖动系统也是一样，此处不再一一赘述。

随着生产的发展，电力拖动系统的水平也在不断提高，日趋完善，并从低级到高级。最初是成组拖动，即用一台电动机带动多台机床。通过“天轴”实现能量的传递与分配。此种方式传动效率低，劳动条件差，自动化水平低，不适合生产的需要和发展。现已基本被淘汰。后来出现了单电机拖动的方式，即用一台电动机带动一台机床。它相

对于成组拖动,无疑进了一大步。主要表现在简化了传动机构,提高了传动效率,可以为机床提供更大的动力和较高的速度,使之成为现代机床的雏形。由于生产的发展,机床结构的改进,运动的增多,单电机拖动也已不能满足生产工艺的要求,进而出现了多电机拖动的方式。

多电机拖动是用多台电动机带动一台机床。采用该拖动方式不但简化了机床的结构,提高了传动效率,而且使各运动部分能够选择最合理的运动参数,提高了生产率和机床自动化水平。因而多电机拖动方式是现代机床最基本的拖动方式。

电力拖动系统按拖动元件(即电动机)的种类还可以分为直流拖动系统(拖动元件为直流电动机)和交流拖动系统(拖动元件为交流电动机)。

在电力拖动的发展史上,交流、直流两种拖动方式是相辅相成、交替发展的。由于直流拖动系统的起动、调速性能好,所以在调速指标要求高的场合,都广泛采用直流调速系统。在20世纪中期以前一直是如此。但是,直流电机的单机容量、电压等级、转速等指标不如交流电机高,在某些场合对缩小电机体积以及减少成本、简化维护等方面呼声亦很高;再者直流电机的设置环境受到限制,易燃易爆等恶劣场合不能适用。以此为动力,以新型电子器件的出现为技术基础,促使了交流系统的迅速发展。近几十年来国际电工会议、动力变流会议的中心议题,已从直流系统向交流系统转移。在某些先进的国家中,交流调速系统的研究,已突破关键技术问题,进入了扩大应用、系列化的新阶段。我国对交流系统的研究也非常重视,并取得了一定的成绩。这一动向必将对机床制造业产生一定的影响,我们必须重视。

§ 1-2 机床电气控制装置的发展

机床电气控制装置是机床电力拖动系统四大组成部分之一,它的发展对机床的发展有着非常重要的作用。随着生产的发展,机床电气控制装置也在不断地改进。

新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路、电子计算技术及现代控制理论的发展,推动着机床电气自动控制的变革。

机床的自动控制,最初采用手动控制。后来,由于切削刀具的改进使切削功率增大,机床运动增多,手动控制不能满足要求,即出现了继电接触器的控制。它是由继电器及接触器为主的控制电器所组成的控制装置和系统。通过该控制方式可以实现对机床各种运动的控制,如起动、调速、反转、自动循环以及保护设备安全、正常运行等等。由于它所用的控制器件结构简单、制造方便、经济,控制方式直接、简单、工作可靠,使机床在自动化的方向上迈进了一大步。

随着生产的发展,机床对加工精度、生产率等提出更高的要求。继电接触器的断续控制方式,不能连续、准确地反映信号,因此就达不到精度的要求。在20世纪30年代后相继出现了各种连续动作的控制元件,如电机放大机、磁放大器、电子管及半导体放大器件。与之相应地出现了连续控制的自动控制方式及自动控制系统,如电机放大机的控制系统以及磁放大器系统、晶闸管控制系统等。

另一方面,由于继电接触器控制接线固定,通用性不强,难以适应复杂和程序可变

的控制对象的需要。所以，在60年代，出现了顺序控制器。它是以继电器或触发器作为记忆元件的控制器，即通过编码、逻辑组合来改变程序，该控制具有通用性强、程序可变、编程容易、价格低廉、维护方便等一系列优点，已广泛应用于机械手、组合机床及自动线的电气控制上，大大提高了机床自动化水平。

近年来，可编程序控制器（PC）在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程序控制器从它一问世就是以最基层、最第一线的工业自动化环境及任务为前提的，它具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、梯形图式编程、工作可靠等优点，工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统，是专为在工业环境下应用而设计的。它采用一类可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令；并通过数字式或者模拟式的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。可编程序控制器及其有关外部设备，都按既易于与工业控制系统联成一体，又易于扩充其功能的原则设计。近年来，PC的一个发展方向是向微型、简易、价廉方面发展，以图占领一向以继电器系统为主流的（诸如一般机床、包装机、传送带等）控制领域；另一发展方向是向大型高功能方面延伸。PC应用广泛，很有发展前途。

用数字程序控制（NC）的机床，即数字控制机床。它综合了现代新技术及控制理论（计算技术、自动控制理论等），具有通用性强、灵活及自动化程度高等特点。

由于生产的需要，出现了数控加工中心机床（MC）。它可以自动选刀、换刀，自动连续地对各个面完成多种加工，如铣、镗、钻、铰、攻丝等工序，提高了生产率、精度及自动化程度。

从现代控制理论中的“最优控制理论”出发，研制了自适应数控机床（AC），可以自动适应多种条件的随机变化而选择最优的加工方案。

前面提到的NC数控装置，其控制是由硬件逻辑电路而组成。这种控制灵活性差，因此出现了用计算机代替硬件逻辑电路的计算机数控（CNC）。由于这种控制灵活、可靠，因此而成为现代数控的基本形式。

随着生产的发展，由单个机床的自动化发展成为生产过程的综合自动化，出现了计算机群控系统（DNC）。它是由一台过程计算机直接控制很多台（一群）数控机床，亦称直接数控系统。

经过多年的努力，现在已经找到了一条机械工业小批量、多品种、连续自动化生产的路子，这就是柔性制造系统（FMS）。它是机械与电气自动化技术高度结合的产物，是数控机床、数控加工中心、智能机器人、自动化仓库、自动化检测与运输技术等新型机电一体化高技术产品以及计算机辅助设计、辅助制造、生产管理控制等软件技术高度发展、综合利用的结晶。该系统的出现把机床自动化程度推向一个更高峰。

“机床电气自动控制”课程的主要任务，是分析机床电力拖动的基本规律，研究机床电气控制的基本原理，了解国内外机床电气自动化的新技术、新动向。

第二章 电力拖动的基本概念

在学习机床电气控制线路之前，有必要把在“电工学”中所学过的电力拖动的基本概念加以扩展。与本课程内容密切相关的概念有：电力拖动系统的运动方程式及其运动分析；电动机的各种工作状态；电力拖动系统调速的基本概念。

§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统是电气与机械综合的系统，既有电气部分，又有机械部分。当机器运转时，它们的运动都服从动力学的基本规律。在讨论其运动情况时，所使用的重要工具即是运动方程式。该运动方程式，在讨论机床电力拖动系统的运动情况及动态过程时都是离不开的。

机器工作机构的运动具有各种不同的形式。如车床的主轴做旋转运动；刨床的工作台做水平的直线往复运动；吊车的卷扬机构是做上、下的直线运动；冲、剪床的执行机构是做简谐运动等等。在电力拖动系统中，原动机为电动机，它是做旋转运动的。为了获得工作机构的各种不同形式的运动，采用了各种形式的传动机构。如齿轮、齿条、曲柄连杆机构等。这就使得电力拖动系统成为一个多轴系统。在研究其运动规律时，希望有一个具有普遍意义的研究工具。可以把千变万化的工作机构的运动形式概括起来。这就需要将多轴系统等效成为一个单轴系统。如图2-1所示。一个与电机同轴连接的等效负载综合传动机构及工作机构，无论为何种运动形式，均可如此等效。

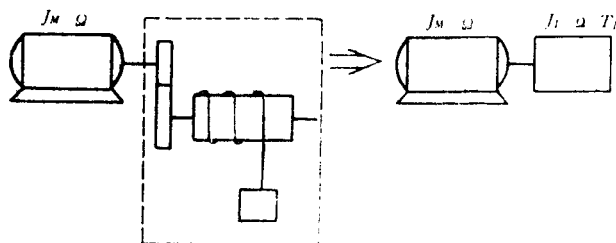


图 2-1 以单轴系统等效多轴系统的示意图

以 T_L 、 J_L 、 Ω 几个参量综合传动机构及工作机构的力学效果。即 T_L 表示其折算到电机轴上的静态转矩。折算原则是单轴系统与它所代替的多轴系统传递的功率不变。 J_L 表示传动机构及工作机构各部件折算到电机轴上的转动惯量之总和。折算原则是单轴系统与它所代替的多轴系统所储存的动能不变。 Ω 表示单轴系统中负载的转动角速度。因与电机同轴，所以它与电机转动的角速度相同。

把多轴系统折算成单轴系统之后，我们就可以很方便地将单轴系统的运动方程式列

写出来。该运动方程式可以描述该单轴系统的运动规律。当然,与单轴系统等效的多轴系统的运动规律亦可通过这个运动方程式来描述。下面分两种情况讨论运动方程式。

一 稳态的运动方程式

系统保持运动状态不变(即速度不变),即处于稳态。从牛顿第一定律可知,系统(或物体)所受合外力(或合外力矩)为零时,即保持运动状态不变。

在这个单轴系统中(如图2-1),电动机轴上所受的合外力矩,有电动机的转矩 T ,还有负载矩 T_L 。此处的 T_L 应理解为,反映在电动机轴上的负载转矩,包括摩擦损耗及机器完成有效工作需要的转矩。如图2-2所示。

当电动机的转矩 T 与负载转矩 T_L 大小相等、方向相反时,即有

$$T = T_L \quad (2-1)$$

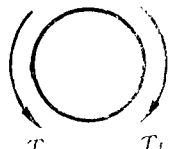


图 2-2 电动机轴上所受的合外力矩

满足电动机轴上合外力矩为零的条件,从而系统处于稳态。那么,式(2-1)就是电力拖动系统的稳态运动方程式。它所描述的运动状态是恒速运转状态。

二 动态的运动方程式

当电动机转矩 T 与负载转矩 T_L 不相等时,二者产生了差值,我们把此差值称为“动态转矩”,以 T_{dy} 表示之。这个动态转矩就是合外力矩,有了它,系统就不再保持恒速了。由牛顿第二定律可知,外力是改变运动状态的原因,也就是改变运动速度的原因。因为机械系统具有质量,为了改变运动系统的速度,克服惯性,就需要有外力(或外力矩)。

对直线运动而言,它的表达式为

$$F = ma \quad (2-2)$$

对于旋转运动而言,可根据在物理中学过的转动定律,即刚体所受合外力矩等于刚体的转动惯量和角加速度的乘积。即

$$T = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-3)$$

对于电力拖动系统,这一定律亦适用。图2-1所示的单轴系统,电机轴上的合外力矩为

$(T - T_L)$ 。当 $(T - T_L) \neq 0$ 时,就要产生角加速度 $\frac{d\Omega}{dt}$ 。那么,可以写出

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-4)$$

这就是系统的动态运动方程式。

式中 T ——电动机的转矩, $N \cdot m$;

T_L ——负载转矩, $N \cdot m$;

J ——转动惯量, $kg \cdot m^2$;

Ω ——角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由物理学可知, 转动惯量的公式为

$$J = m\rho^2 \quad (2-5)$$

式中 m ——质量, kg ;

ρ ——惯性半径, m 。

如果我们将 $m = \frac{G}{g}$ 和 $\rho = \frac{D}{2}$ 代入上式, 则有

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (2-6)$$

或 $GD^2 = 4gJ \quad (2-7)$

式中 G ——旋转部分的重力, N ;

g ——重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$;

D ——惯性直径, m ;

GD^2 ——飞轮惯量, $\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。

GD^2 是一个统一量的符号, 称为飞轮惯量, 与转动惯量具有相同的物理意义。

角速度 $\Omega(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ 与转速 $n(\text{r}/\text{min})$ 之间的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-8)$$

将式(2-6)、式(2-8)代入式(2-4)中, 我们可以得到工程计算中常用的运动方程式, 即

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2-9)$$

但是要注意上式中的数值375具有加速度的量纲。该式在工程中应用和计算是方便的。

目前电机产品目录中给出的飞轮惯量大多采用 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 作单位, 为了换算为 $\text{N}\cdot\text{m}^2$, 需乘以9.81。

§ 2-2 电力拖动系统的运动分析

运动方程式是研究电力拖动系统运动状态的有效工具。本节在研究电机转矩和负载转矩性质的基础之上, 用运动方程式来分析系统的运动规律。

一、电动机的转矩

电动机的电磁转矩 T 与转速 n 的关系, 即 $T = f(n)$ 。实际上常用 $n = f(T)$, 即机械特性的形式表示二者的关系。电动机的机械特性已在电工学中学过了, 这里不再重复。

在应用运动方程式时, 必须注意各个量的正、负号。首先, 规定某一旋转方向为正, 与此相反的方向即为负。电机的转矩 T , 如果与正的旋转方向一致时, 则该电机转矩 T 为正号; 反之, 则为负号。

二、负载转矩

如前所述，机器工作时，反映在电动机轴上的转矩称为负载转矩，它包括了机器的损耗转矩和有效工作转矩。

负载转矩的性质因生产机械的不同而不同，其分类也有不同的方法。可按工艺参数分类；可按力学性质分类；……。在这里是按负载转矩与转速之间的关系分类的。

1. 恒转矩负载

所谓恒转矩负载，就是指负载转矩 T_L 与转速无关的负载，即当转速变化时，负载转矩为定值。负载转矩可分为反抗性恒转矩（阻力转矩）和位能性恒转矩。

转矩的作用方向总是与运动方向相反。当运动方向改变时，其作用方向也改变，这种性质的转矩称为反抗性转矩，亦称为阻力转矩。例如摩擦转矩、金属切削的阻力转矩等。反抗性恒转矩的特性如图2-3所示。

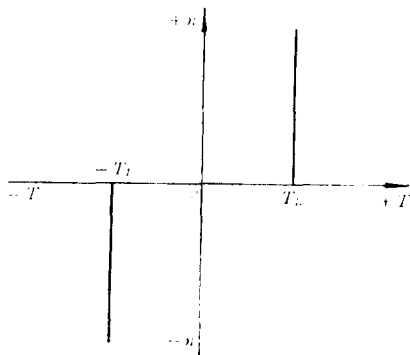


图 2-3 反抗性恒转矩的负载特性

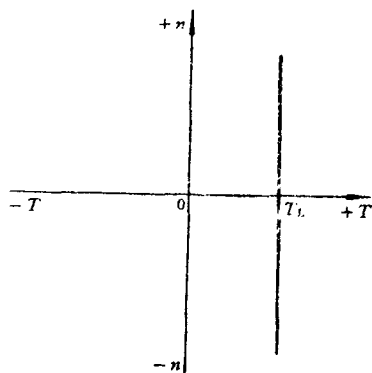


图 2-4 位能性恒转矩负载特性

与反抗性恒转矩相反，位能性恒转矩负载有固定的作用方向，与运动方向无关。位能性恒转矩负载的实例有：起重机的提升机构，卷扬机构等。位能性恒转矩负载的特性如图2-4所示。

2. 通风机负载特性

转矩与速度的平方成正比，即

$$T_L = Kn^2 \quad (2-10)$$

式中 K ——为比例系数。

通风机负载特性如图2-5所示。属于通风机负载的生产机械有：通风机、水泵、油泵等。

3. 恒功率负载

恒功率负载的负载转矩与转速成反比。即

$$T_L = \frac{K}{n} \quad (2-11)$$

则负载功率为

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} =$$

$$= \frac{T_L n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K' \quad (2-12)$$

即转速变化时，负载功率不变。一些机床，如车床在粗加工时，切削量大，切削阻力大，应采用低速运行。在精加工时，切削量小，切削阻力小，往往采用高速运行。在不同转速下，负载转矩基本与转速成反比，负载功率基本是常数。恒功率的负载特性如图2-6所示。

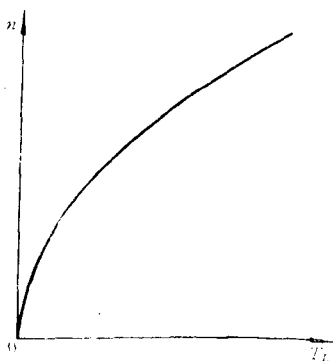


图 2-5 通风机负载特性

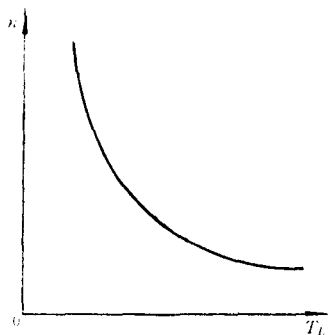


图 2-6 恒功率负载特性

按转矩与转速的关系，除有以上三种类型的负载外，还有很多种类型的负载，这里不一一赘述。必须指出，实际的负载特性，可能是几种典型负载的综合。要根据具体情况来确定。

三、动态转矩

动态转矩是电动机转矩 T 与负载转矩 T_L 共同作用的结果。根据动态转矩的不同，电力拖动系统的运动情况有以下三种可能性。

当 $T = T_L$ 时，动态转矩 $T_{dy} = 0$ ， $\frac{dn}{dt} = 0$ ， $n = \text{常数}$ （或 $n = 0$ ），电力拖动系统处于稳态运转；

当 $T > T_L$ 时，动态转矩 $T_{dy} > 0$ ， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，电力拖动系统处于加速运转状态；

当 $T < T_L$ 时，动态转矩 $T_{dy} < 0$ ， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，电力拖动系统处于减速运转状态。

§ 2-3 直流他励电动机的制动工作状态

电动机的工作状态，按拖动性能分为两大类，即电动状态和制动状态。

电动状态是电机由电网取得电能而变成机械能，并且电机发出与系统运动方向一致的转矩；制动状态是电机把系统的机械能转变成电能，并且发出与系统运动方向相反的转矩。

电动机有时要在制动状态下工作,是为了满足生产机械对它提出的要求。在电力拖动系统中,为了达到迅速、准确、平稳地停车和反转,为了在位能负载转矩作用下获得稳定的下放速度等目的,常需要电机工作在制动状态。

根据不同情况,直流他励电动机有三种制动状态,即回馈制动(亦称再生发电制动)、反接制动和能耗制动状态。

一、回馈制动状态

按上节规定,在分析电机工作状态之前,首先要规定电机某一旋转方向为正,这里我们规定电机逆时针方向旋转为正。那么电机转矩 T 的正方向应与电机正旋转方向一致,而负载转矩 T_L 的正方向应与电机正旋转方向相反。如图2-7所示。

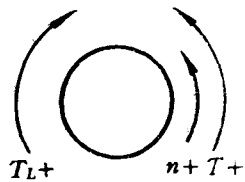


图 2-7 电机转速、转矩和负载转矩的正方向

现有一直流他励电动机,旋转方向为正,电机转矩 T 亦为正,处于电动状态运行。如果这时在电动机轴上加一外力矩 T_L (即负载转矩),使之与电动机转矩 T 方向相同。如图2-8(a)所示。

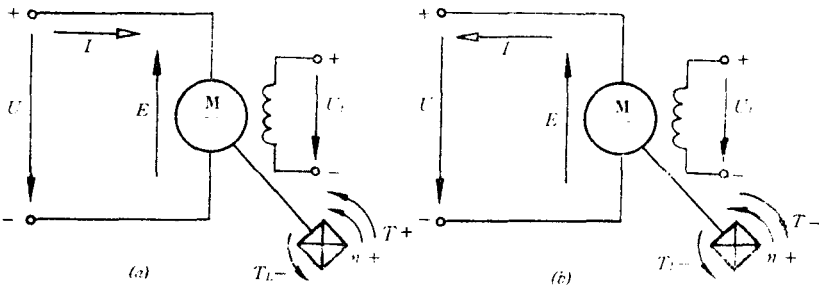


图 2-8 由电动状态过渡为回馈制动状态的示意图
(a) 电动状态 (b) 回馈制动状态

由于电动机转矩 T 与负载转矩 T_L 方向相同,二者共同作用使电动机转速 n 不断升高,电枢电势 $E(=C_e\Phi n)$ 亦不断升高。当 $n=n_0$ 时, $E=C_e\Phi n_0$,电枢电势刚好等于电枢电压,则电枢电流 $I=\frac{U-E}{R_a}=0$,电动机转矩 T 亦为零。但这时电动机轴上还有外力矩

(负载转矩 T_L)作用,所以转速还要继续升高。使电动机转速超过理想空载转速,即 n

$>n_0$ 。那么,电枢电势 E 也就高于电枢电压 U 。使电枢电流 I 方向反过来,电动机的转矩 T 方向也随着反过来如图2-8(b)所示。电动机转矩与转速 n 的方向相反,起制动作用。电机向电网输送电流,也就是电机向电网回馈(反馈)电能,因此称这种制动为回馈制动(亦称再生发电制动)。回馈制动机械特性如图2-9所示。

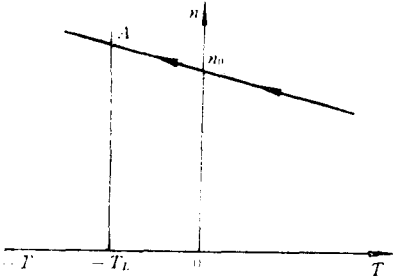


图 2-9 回馈制动的机械特性

电机的转速是否会无限地增高呢?不会的。当

电机的机械特性与负载的机械特性相交于A点时,电机转矩与负载转矩相平衡 ($T = T_L$),系统以稳定速度 n_A 运转。转速就不再升高了。

回馈制动把能量送回电网,是经济的制动手段。但是由于只能在 $n > n_0$ 时才有制动作用,所以应用范围受到限制。

回馈制动既可以出现在位能负载下放重物的过程中,还可以出现在电动机由高速变为低速的过程中,如直流他励电动机由弱磁工作恢复励磁时,或迅速降低电网电压时,均会产生回馈制动过程。

二、反接制动

反接制动有以下两种情况。

1. 转速反向的反接制动

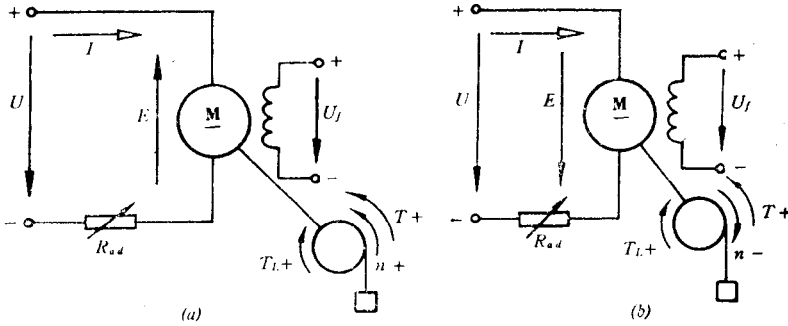


图 2-10 转速反向的反接制动的示意图

(a) 电动状态 (b) 转速反向的反接制动

这种制动发生于位能负载的情况下。

电动机带一位能负载,处于电动状态。电动机转矩 T 、负载转矩 T_L 和转速 n 的方向如图2-10(a)所示。电枢回路串一附加电阻 R_{ad} ,逐渐加大电阻 R_{ad} ,电动机的机械特性如图2-11所示。

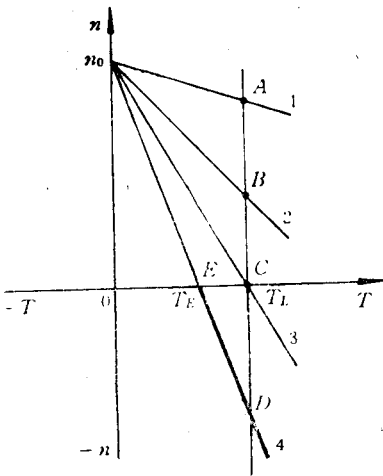


图 2-11 转速反向反接制动的机械特性

当电枢回路所串的附加电阻 R_{ad} 加大时,电动机的机械特性的斜率加大,但理想空载转速不变。随着 R_{ad} 的增大,电动机的转速不断下降。由特性1上的 n_A 降到特性2上的 n_B ,以至降到特性3上的 n_C ,电机停转。再增大 R_{ad} ,使电动机的起动转矩 T_E 小于负载转矩 T_L 。这时电动机的转矩不足以带动负载,以致电动机被负载带动反转,产生了所谓的“倒拉”现象。使转速 n 反向,与转矩 T 方向相反。如图2-10(b)所示,电动机处于制动状态。

位能负载为获得稳定下放速度时,常用此制动。

2. 电枢反接的反接制动

当系统原来处于电动状态,电动机转矩 T 、负载转矩 T_L 和转速 n 的方向如图2-12(a)所示。

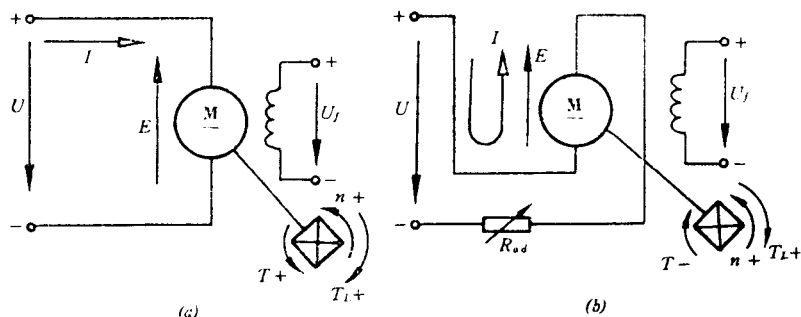


图 2-12 电枢反接的反接制动

(a) 电动状态

(b) 电枢反接的反接制动

电动机处于电动状态时,其机械特性如图2-13所示,电动机工作在机械特性的 A 点。突然把电枢电压反接,同时在电枢回路中串入一个较大的电阻 R_{ad} ,如图2-12(b)所示。由于系统的机械惯性,转速 n 的大小和方向都不能立刻改变,电枢电势亦不能改变,电动机由 A 点水平过渡到反接后的机械特性上的 B 点。由于这时电枢电压反接,所以 U 为负,电枢电流为

$$I = \frac{-U - E}{r_a + R_{ad}} = -\frac{U + E}{r_a + R_{ad}} \quad (2-13)$$

为了限制电枢电流,在反接电枢电压的同时,并在电枢回路中串入一个附加电阻 R_{ad} 。由于电枢电流反向,电动机的转矩 T 亦反向。 T 与 n 的方向相反, T 为制动转矩,系统即减速。由图2-13中反接制动机械特性上的 B 点向 C 点变化,到 C 点如不切除电枢电源,系统将会自行反转而进入反向电动状态。如为阻力负载即稳在 D 点。如为位能负载即稳在第四象限的 E 点。

反接制动经常用于反转拖动系统中,制动特性陡峭(如图2-13),制动效果好,制动过程与反向起动过程合二为一。用直流电动机拖动龙门刨床的工作台时,就是利用电枢反接的反接制动来获得正向行程和返回行程的。反接制动也可作为位能负载下放重物,以获得稳定的下放速度。

三、能耗制动

电动机原来处于电动状态下运行,工作情况如图2-14(a)所示。若突然把其电枢从电源上拉下而投到制动电阻 R_{ad} 上去,如图2-14(b),由于机械惯性,转速 n 不变,从而电势 E 亦不变。在电枢回路中靠 E 产生电枢电流 I ,其

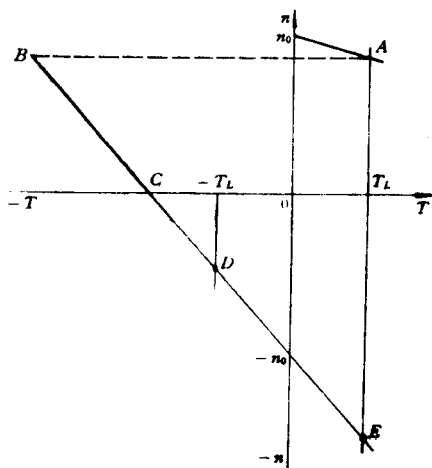


图 2-13 电枢反接的反接制动机械特性