

高等学校教学参考书

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE CANKAOSHU

电力拖动与自动控制

沈安俊 編



机械工业出版社

序 言

本书是按 1963 年 6 月审定的“电力拖动与自动控制教学大纲”(试行草案)编写的,作为“电机与电器”专业以及有关专业在学习本门课程的教学参考书。

书中共分五章,计有电力拖动的机械特性,电力拖动的速度调节,电力拖动的过渡过程,电动机容量的选择及负载图,电力拖动的自动控制等。通过这些内容阐述了工农业生产机械所用电动机的种类选择、使用方式以及容量选择的一般理论问题,也阐述了电动机自动控制线路组成的一般理论问题。

为了切实贯彻“少而精”的原则,在教材内容的选择上及问题的论证上作了较大的努力,力求作到主次分明,详略恰当;将基本内容、基本理论与基本概念讲透,在叙述上也力求清楚、确切与简练。在编写中尽量注意结合我国生产实际,反映我国社会主义建设的成就。在各章中附有思考题,供学生思考,以进一步理解基本内容。

在书中尝试采用以汉语拼音为基础的角注符号,这些符号已在陆续公布的我国各种技术标准中有所规定,但是在教学用书上对它的采用仍然少见。编者认为,在教学参考书采用以汉语拼音为基础的角注符号是适宜的。本书中采用的符号主要是以国家标准 GB 315-64“电工设备文字符号编制通则”、电工专业标准电(D)42-60“电气线路图上图形符号”及第一机械工业部电气传动研究所有关规定为基础,进行少部分的补充。

本书在编写过程中得到严峻、郎士俊同志的关心与指导。并由天津大学、东北工学院、南京工学院、北京机械学院及天津工学院工业企业电气化教研室等有关同志提出不少宝贵意见。最后由天津大学吕家元同志进行仔细认真地审阅。编者在此一并致谢。

本书的编写中虽得到不少同志帮助,并且经过试用,但限于编者的理论水平和业务能力,谬误欠妥之处在所难免,希望读者多提出宝贵意见。

沈 安 俊

一九六四年七月于天津工学院

目 次

绪 论	1
第一章 电力拖动的机械特性	5
1-1 电动机的机械特性与生产机械的负载转矩特性	5
1-2 直流他激电动机的固有机械特性与人为机械特性	8
1-3 直流他激电动机的电动与制动运转状态	12
1-4 直流他激电动机机械特性的绘制与电阻的计算	17
1-5 直流串激电动机的机械特性	22
1-6 直流复激电动机的机械特性	25
1-7 异步电动机的固有与人为机械特性	25
1-8 异步电动机的制动运转状态	31
1-9 硬轴联接的双电动机拖动的机械特性	34
第二章 电力拖动的速度调节	37
2-1 速度调节的基本任务与指标	37
2-2 调速范围、调速的级数与平滑性、调速的相对稳定性	38
2-3 电动机调速范围的确定与扩大的方法	39
2-4 速度调节时电机的容许输出与生产机械的负载性质	40
2-5 直流电动机的速度调节	42
2-6 直流他激发电机-电动机组的调速	43
2-7 交流异步电动机的速度调节	45
第三章 电力拖动的过渡过程	52
3-1 概述	52
3-2 电力拖动系统的运动方程式	53
3-3 工作机械转矩、力、飞轮惯量和质量的折算	55
3-4 加速转矩 M_a 为常值的机械过渡过程	57
3-5 直线机械特性恒定负载转矩下的机械过渡过程	59
3-6 他激电动机串多级电阻的起动过程	62
3-7 他激电动机制动的过渡过程	66
3-8 加速转矩 M_a 为非线性变化的机械过渡过程	67
3-9 电力拖动过渡过程中能量的损耗	69
第四章 电动机容量的选择及负载图	74
4-1 概述	74
4-2 电动机的发热与冷却	75
4-3 按发热观点对电动机工作方式进行分类	78
4-4 长时连续工作方式电动机容量的选择	79
4-5 平均损耗法、等效电流法、等效转矩法与等效功率法	81

4-6	短时工作方式电动机容量的选择	85
4-7	断续工作方式电动机容量的选择	87
4-8	电动机负载图的绘制	88
4-9	具有尖峰负载的电力拖动	92
第五章	电力拖动的自动控制	96
5-1	概 述	96
5-2	自动控制系统中元件的符号与线路图	99
5-3	电动机起动自动控制的原则	100
5-4	电动机制动的自动控制	104
5-5	鼠笼异步电动机的自动控制	107
5-6	绕线式异步电动机的自动控制	111
5-7	直流电动机的自动控制	112
5-8	生产机械的自动控制线路举例	114
5-9	使用交磁电机放大机的自动控制系统	117
5-10	离子器件供电的直流电动机自动控制的概念	122
5-11	饱和电抗器交流调速系统自动控制的概念	122
附 1	书中所用汉语拼音角注字母代表名称对照表	124
附 2	主要参考文献	125

緒 論

1 “电力拖动与自动控制”研究的对象与在国民經济中的作用

在工业、农业、交通运输业以及其他国民经济部门中，广泛地应用各种电动机来拖动生产机械进行工作。我们把这种拖动方式称为“电力拖动”。在现代的生产机械上除安装电动机以外，还有其他各种电机与电器，它们按一定规律组成系统，对生产过程进行“自动控制”。

从“电力拖动与自动控制”的角度，可把任何由电动机带动的生产机械区分为四个部分：（1）工作机构；（2）传动机构；（3）电动机；（4）控制设备。工作机构是执行工作的机械部分，例如在机床上是使刀具与工件产生相对运动的机构。传动机构是把电动机运动传给工作机构的中间变速与变换运动方式的部分。电动机是指拖动工作机构所用的各式各样的电动机。控制设备是由各种接触器、继电器、控制器（按钮或主令控制器等）、各种特殊电机以及变流设备等所组成。它的任务是控制与变换由外部送给生产机械电能的形式与供给的时间，使它合于电动机工作的需要。

、“电力拖动”是研究电动机以什么规律通过传动机构来带动工作机构运动的问题，这里包括电动机运转的问题，调速的问题，过渡过程的问题以及电动机容量选择的问题。“自动控制”是研究以什么规律组成控制系统来控制电动机的运行，以使生产机械自动进行工作的问题。这里包括研究电动机起动与制动控制的规律，线路保护的规律，各种电动机控制线路组成的规律，不同电机间相联、互锁与实现自动化的规律等问题。

可以把“电力拖动与自动控制”简称为“电力拖动”，在我国工业部门中又名为“电气传动”。

“电力拖动与自动控制”在国民经济中起着十分重要的作用，因为大多数生产机械是用电动机来拖动的，电力拖动是电能的主要消耗者，目前生产的电能中约有三分之二变成机械能来拖动各种机械。电力拖动的自动控制系统是操作和指挥现代生产机械的神经中枢，采用合理的、先进的控制系统与设备，不但可以提高劳动生产率，改善劳动条件，提高产品质量，并为生产过程的连续化和综合自动化创造了必要的条件。

2 电力拖动的发展簡史

电力拖动已成为现代生产机械拖动的主要型式，但是在十九世纪以前还都是采用人力、畜力、水力、风力以及蒸汽机作为动力来源，其中以蒸汽机是当时较先进的动力来源。十九世纪末叶，直流与交流电动机相继出现，电动机就逐步代替了蒸汽机。

最初，电动机安设的方式是通过天轴将能量分配到各台生产机械上，这种拖动方式叫“成组拖动”，如图 0-1 所示。成组拖动的中间机构比较复杂，传动功率小，效率低，传送转速低，生产灵活性小，而且在生产车间中不易采用起重机进行工作。

在二十世纪二十年代,随着电机产量日益增多,开始采用由一台电动机来拖动一台生产机械的“单电机拖动”以代替过去的成组拖动,如图 0-2 所示。这便节省了大量的中间传动机构,提高了传动效率,为生产机械提供更大的动力和更高的速度。

随着生产规模的逐渐扩大,一台生产机械上运动种类相应增多,不同的运动形式都需要由电动机来带动。这时,如仍由一台电动机拖动时,传动机构就会变得十分复杂,而且工作灵活性小,限制了生产效率的提高。因此在二十世纪的三十年代,生产机械的电力拖动方式又有了进一步发展,开始出现在一台生产机械上由多台电动机分别传动不同运动的“多电机拖动”,如图 0-3 所示。

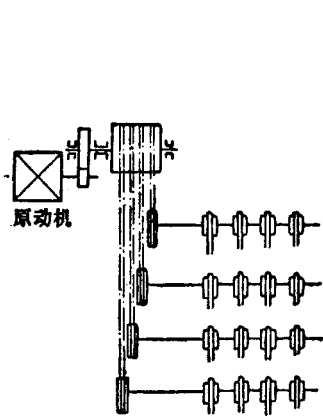


图0-1 成组拖动。

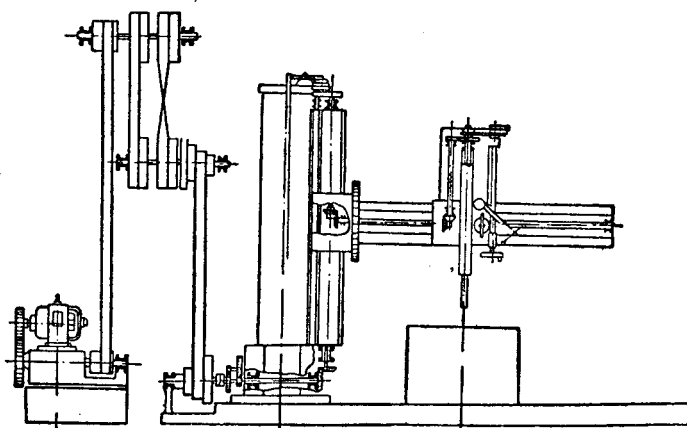


图0-2 单电机拖动(以钻床为例)。

生产机械采用“多电机拖动”后,大大地简化了机械结构,可以使各个工作机构采用最合理的运动速度,缩短机动与辅助工时。“多电机拖动”还便于实现生产机械的自动化,使生产率获得很大地提高。

目前的生产机械上多是采用单电机与多电机拖动的方案。

生产机械采用电力拖动以后,可以采用电气方法来调速,这促使机械结构进一步简化,工作性能大大提高,提高生产率与质量。在二十世纪三十年代,可调速直流电动机、鼠笼式多速异步电动机及发电机-电动机组开始得到较大的推广。以后,在直流发电机-电动机组的基础上发展成为采用电机放大机、电子管放大器等放大元件控制的使用反馈的闭环调速系统。近年来电气调速有较快地发展,表现在磁放大器与半导体放大器在直流调速系统上有了较多的应用;用可控离子变流器来代替直流发电机向直流电动机供电;对实现调速困难的交流异步电动机的调速问题进行了大量的研究工作,使用饱和电抗器交流调速系统已是目前比较实用的一种形式。

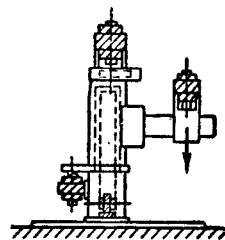


图0-3 多电机拖动
(以钻床为例)。

由电力拖动发展的历史中可以看到,电力拖动的发展与电机及电器制造业的发展是密切相关的。由成组拖动→单电机拖动→多电机拖动的过程中可以看到,在电力拖动上使用电动机的台数日益增多,电机的工作任务日益专门化,要求设计制造出大量的、工作性能不

同的、容量大小不同的电动机。要求大量生产可调速的电动机,尤其要求生产价廉、经济、可靠的交流调速电机。要求生产能适应不同工作方式的电动机,如长时连续工作方式、短时工作方式、断续工作方式等。除此以外,还需要研究如何能提高电机的每小时允许接通次数。由于调速系统以及其他电气自动化系统的需要,要求研究、设计与制造各式各样特殊电机与微型电机,如交磁放大机、自整角机、步进电机等。由电力拖动发展上还可以见到电动机与执行工作的机构日益接近,这也促进电机本身结构的变革,如在起重机上用锥形转子的电动机,除作电机用以外还兼作制动抱闸之用。

关于“自动控制”的发展简史将在第五章中另行叙述。

本专业的最新技术领域是采用逻辑元件、半导体元件及计算装置等,并已发展到能接外界因素变化进行自动调节的阶段。目前世界上工业技术先进的国家在“电力拖动与自动控制”方面普遍向着综合自动化方向发展。

3 我国电力拖动事业的发展情况

解放前,由于帝国主义的压榨和掠夺以及国民党反动派的统治,我国电力拖动事业十分落后。在工厂中使用的设备大部分是成组拖动的,控制仅用一些最简单的闸刀开关;有少数的设备是单电机与多电机拖动的,还都是由国外进口的。没有自己的设计、制造与装配力量。解放前我国电力拖动事业基本上是空白的。

我国的电力拖动专业是在解放以后才建立起来的,由于党的正确领导,解放十五年来有了很大的发展。

在1949年到1952年的生产恢复时期,在接收、整顿、改造旧的工厂的同时也积极地开展了新产品试制工作。1952年我国已能生产出采用继电器接触器等自动控制电器来控制的采用单电机与多电机拖动的各种车床、立车、铣床、摇臂钻床等机床。

在1953年到1957年的第一个五年计划期间,电机与电器制造业的发展为电力拖动事业奠定了重要的物质基础。在这期间进行了中型轧钢机与大型高炉电力拖动系统的设计、制造、安装与调整工作,所用元件全部是国内自己制造的。除此之外,在各种机床、矿井卷扬机、造纸机、纺织机的电力拖动上也进行了大量的工作。

1958年我国开始了第二个五年计划的建设。由于党提出了“鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义”的总路线,大大地提高了全国人民加速建设社会主义的积极性。在这期间试制了一些电气化自动化程度较高的机床品种,如电气仿型铣床、仿型立车、重型卧式镗床与重型龙门刨床等。并且开始试制与研究反映现代先进技术的数字程序控制机床等。这期间对于大型轧钢机、高炉、电梯、造纸机、纺织机以及化工机械的电力拖动进行了大量的工作。1963年在武汉重型机床厂试制成功六米三重型立式车床,总重二百多吨,高九米多,共有大小电动机十多个,整个机床的动作完全是通过电钮来控制,工人可以在五个地方对机床进行遥控操作。

1964年6月在首都对我国一千四百多项工业新产品颁发奖励。这件事情证明我国工业生产和科学技术水平的迅速提高。我们依靠自己的力量,生产了一些比较高级的、精密的新产品,其中有不少是电气化自动化水平较高的,它也反映出我国电力拖动事业的成

就。很多新产品的制成，是在帝国主义和现代修正主义对我们实行技术封锁的情况下进行的，这充分显示了党的“奋发图强、自力更生”方针的伟大胜利。

4 本門課程的性质、任务与要求

“电力拖动与自动控制”专门研究用电机与电器组成的系统在生产使用中的规律，它与“电机及电器”专业的关系十分密切。作为一个优秀的电机与电器设计及制造者对这些问题必须详加研究与掌握。

本课是在学过电机学与电器学的基础上再学习的一门专业课。

本课的任务是：使学生初步掌握电力拖动与自动控制的基本理论知识与技能；了解电机与电器在电力拖动系统所处的重要地位以及它们对电力拖动系统工作指标的关系；熟悉电力拖动一般的计算与实验方法。从而使学生在进行电机与电器产品设计与制造时，能从电力拖动与自动控制的观点考虑生产上的各种要求，同时也启发学生去改进与设计新型的电机与电器，并为学习专业知识和从事工程技术工作打好比较宽广的基础。

本课的基本要求是使学生掌握电力拖动与自动控制的一般基础理论，了解各类电机与电器在电力拖动与自动控制领域中的应用，以及如何使用电机与电器组成不同的电力拖动系统。

第一章 电力拖动的机械特性

使用电动机的目的是为了把电能转化成机械能，带动生产机械进行工作。要使生产机械正常、有效而又经济地工作，必须正确地选择电动机。选择电动机要解决一系列问题：选那种电动机？如何用法？多大容量？什么型号？等等。在决定选用那种电动机时，要使电动机输出的机械性能充分满足生产机械提出来的要求。电动机的机械特性 $n = f(M)$ 是其机械性能的主要表现。

1-1 电动机的机械特性与生产机械的负载转矩特性

一、电动机的机械特性

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

在电力拖动中常用的电动机有：在交流方面是异步电动机、整流子电动机与同步电动机，在直流方面是他激电动机、串激电动机及复激电动机。这些电动机的机械特性在有关电机方面教学参考书中已有所阐述，其形状如图1-1(a)与(b)所示。

电动机机械特性分为固有的与人为的两种。电动机固有的机械特性是指电动机工作在额定电压、额定频率、电动机用规定的正常的接线方法、在电路中不另外加电阻(或电感与电容)的情况下，所得到的机械特性曲线。在电机学中，对每种电动机详加分析研究的是这种特性。电动机人为的机械特性是指利用各种方法得到的

与固有特性不同的机械特性。得到人为机械特性的方法有三种：

(1) 电动机绕组使用正常接法时，变更供电参数或电机参数，如变更供电电压或频率以及变更所用磁通或在电路中加入电阻等；

(2) 电动机绕组使用特殊接法，如三相绕组使用其中两相或变更绕组接法等；

(3) 使用二台电动机共同带动一个机械轴，这样，在输出轴上得到的机械特性是两个电动机机械特性叠加的合成特性。

电动机机械特性的一个重要指标是机械特性的硬度，它表示转速随转矩改变而变化的程度，用硬度系数 β 来表示特性具有硬度的程度。特性曲线上任一点的硬度系数的定义是

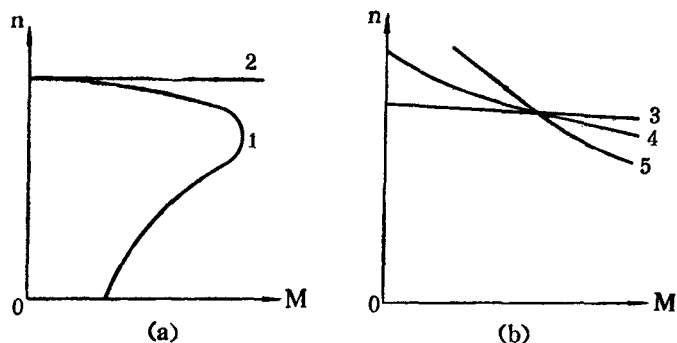


图1-1 某些电动机的机械特性：

a—三相交流异步电动机和同步电动机； b—直流他激、串激及复激电动机。

该点的转矩变化百分数与转速变化百分数之比, 即

$$\beta = \frac{\Delta M\%}{\Delta n\%} \cdot \quad (1-1)$$

由硬度大小的观点来看, 可把电动机的机械特性分成三种类型:

(1) 绝对硬的机械特性, 当转矩改变时转速不变。同步电动机即具有此种特性[图 1-1(a) 直线 2], 它的硬度系数 $\beta = \infty$;

(2) 硬的机械特性, 这种特性的转速随转矩变化而改变, 但改变程度不大。直流他激电动机与异步电动机正常工作部分的特性均属这类, 如图 1-1(a) 线 1 与 (b) 线 3, 其 β 约为 40~10。硬度系数在直线的机械特性上为一常值, 在曲线的机械特性上为一变数;

(3) 软的机械特性, 这种特性的转速随转矩的变化有较大的改变, 其 $\beta < 10$ 。串激电动机即属于这类, 如图 1-1(b) 线 5。复激电动机[图 1-1(b) 线 4]可以属第二或第三类, 要看它机械特性硬度的具体情况而定。

二、生产机械的负载转矩特性

生产机械的负载转矩特性是指生产机械的转速 n 与所相应的负载转矩 M_x (载—zai) 的关系 $n = f(M_x)$ 。它表示带动生产机械在不同转速 n 运转时所必须克服的负载转矩 M_x 的大小。在电力拖动中, 生产机械是作为电动机的负载而出现的, 因此我们常把生产机械的负载转矩特性简称为负载转矩特性, 并且用在电动机轴上所反映出来的 $n = f(M_x)$ 来表示。

生产机械的种类是多种多样的, 对于每种设备都可绘出其相应的负载转矩特性, 它们是各不相同的。图 1-2 中举出几种典型的例子。特性 1 的负载转矩 M_x 大小与转速 n 的变化无关, 例如起重机提升某一定重物或皮带运输机运送一定重量货物时的特性。特性 2 的负载转矩 M_x 与转速 n 呈正比变化, 例如在实验室中作模拟负载的他激发电机供给固定负载 (电阻不变) 的特性。特性 3 的负载转矩 M_x 的变化与转速 n 的二次方成比例, 例如通风机或离心式水泵的特性, 有时把这种特性称为通风机性特性。

负载转矩可分成两类: 反作用转矩与位能转矩。反作用转矩作用的方向总是与运动的方向相反, 例如克服摩擦的转矩, 进行切削、剪切的转矩, 当运动方向改变时, 转矩作用的方向也改变。位能转矩由拖动系统中某些具有位能的元件造成, 例如由起重机的重物所造成的力矩, 它有固定的方向, 不随运动方向改变而变化。

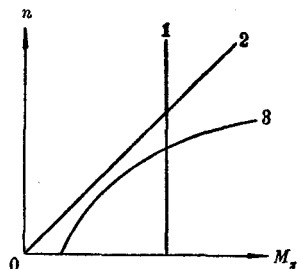


图1-2 生产机械负载转矩特性的典型例子。

三、两种特性的关系与电力拖动稳定运行的条件

在生产机械运行中, 电动机的机械特性与生产机械的负载转矩特性是同时存在的, 例如由他激电动机带动的皮带运输机的两个特性如图 1-3 所示, 线 3 为电动机特性, 线 1 与 2 为生产机械负载转矩特性 (1 与 2 对应不同的负载)。

电动机带动生产机械稳定运行时, 转速为某一定值, 没有变化。这时电动机发出的转矩和机械的负载转矩方向相反, 大小相等而相互平衡。这只有在两个特性的交点上才有这个条件, 如图 1-3 中线 1 与线 3 的交点为 (M_1, n_1) 。

变化负载的大小,如图 1-3 的例中把皮带运输机上所运的物品加多,生产机械的机械特性由 1 变成 2,这时电动机受到制动作用,转速降低,电动机产生的转矩增加,增加到与生产机械转矩平衡(即 $M=M_2$)为止。这个新的运行点(M_2, n_2)就是曲线 2 与 3 的交点。由此可归结出一个重要概念:即稳定工作时电动机所发出的转矩大小是由负载转矩所决定的。

在一定负载情况下(如图 1-3 线 1)要得到另一个稳定转速(也就是说要进行调速),须要改变电动机的机械特性,如图 1-3 中线 4,这可得到新的稳定转速 n'_1 。由此可见:要进行调速必须改变电动机的机械特性。

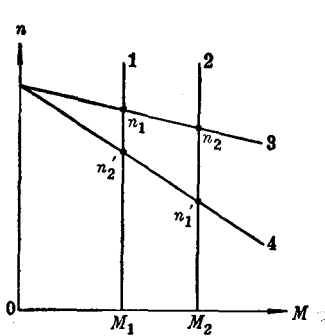


图1-3 他激电动机和它所带机械的机械特性曲线。

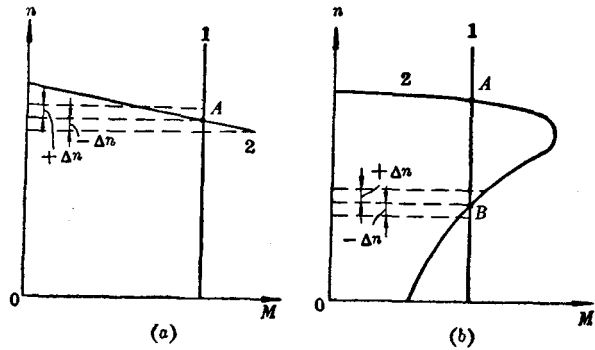


图1-4 电力拖动稳态运行条件:

a—他激电动机所带负载转矩为常值; b—异步电动机所带负载转矩为常值。

两个特性具有交点是电动机及所带动生产机械能稳定运行的必要条件,但并不是充分条件。还需要满足的条件是,电动机稳定运行后,由于某种扰动的作用,使转速稍有变化时,电动机发出的转矩必须能使转速恢复到原值。这种能否使转速恢复的能力是与两个特性交点处二特性相互配合的情况有关。现在用图 1-4 来说明这个问题。图1-4(a)是用他激电动机带动负载转矩为常值的负载,二个特性交点为A,在A点可以得到稳定运行,因为在转速稍有增大时,电动机发出转矩小于负载转矩,两个转矩的合成是负的,具有使电动机转速降低的制动作用,使转速恢复到A点之值;相反,转速稍有减少时,合成转矩是正的,使转速增加,也恢复到原值。图1-4(b)是用异步电动机带动负载转矩为常值的负载,二个特性交点为A与B(在这里假设电动机已经起动起来以后,才把负载加上),交点A的情况与上述情况相同,因而可以得到稳定运行。至于B点情况便有所不同,在转速稍有增大时,电动机发出转矩大于负载转矩,合成转矩是正的,它使转速会继续增加,一直加到A点才能稳定;在转速稍有减少时,合成转矩是负的,它使转速继续降低,一直降到转速为零,电机停止为止。因而在B点是得不到稳定运行的。由这例看到异步电动机带动负载转矩为常值的负载时,在电动机机械特性上临界转差率以上的部分是可以稳定运行的,以下部分是不能稳定运行的。如果用异步电动机来带动一直流他发电机,后者的负载转矩随转速升高而加大,这时在电动机机械特性临界转差率以下的部分也可能稳定运行,如图 1-5所示,其原理与上述相似。

由上面分析,可以得到判定电力拖动能否在特性交点稳定运行的方法是,在交点处取上下两个转速增量 Δn 时,两个特性转矩间的关系应满足:

$$\text{特性交点转速之上} \quad M - M_x < 0; \quad (1-2a)$$

$$\text{特性交点转速之下} \quad M - M_x > 0. \quad (1-2b)$$

在实际使用中,负载转矩不随转速而变的负载较多,这时要得到稳定运行,电动机需要具有向下倾斜的机械特性。如果特性向上弯曲,便不能稳定运行。由电机设计与制造的角度来说,应该使所造出电机的机械特性,在经常工作的部分上,特性应向下倾斜,避免向上弯曲。

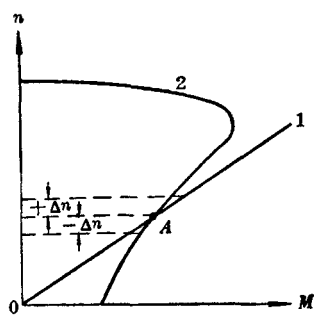


图1-5 异步电动机带动一台他发电机的机械特性。

1-2 直流他激电动机的固有机机械特性与人为机械特性

直流他激电动机多用于需要用电气方法来调节转速的生产设备上,例如在重型车床、重型立车、龙门刨床、大型轧钢机、新型造纸机与印染机等设备的主拖动上。直流他激电动机的接线图通常以图 1-6 的形式表示。由额定(e ding)电压的 U_{ed} 电源供电给励磁绕组 L , 产生磁通 Φ 。起动时,由电压 U 电源供电给电枢,其电路中有电枢(shu)电阻 R_a 及附(fu)加电阻 R_f ,在其中产生电流 I ,由于电流与磁通的相互作用产生转矩使电枢转动起来,并进行加速,出现感应电动势 E ,它使电流 I 下降,降到由负载转矩所决定的电流大小为止,电动机便进入稳定工作状态。

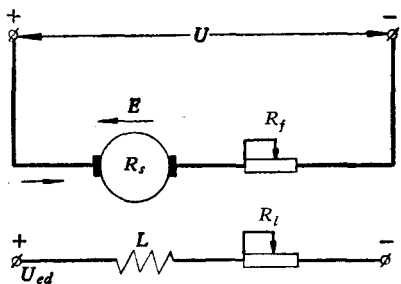


图1-6 直流他激电动机的线路图。

一、机械特性方程式

机械特性方程式可由直流电动机三个基本方程式求得,即

$$\text{转矩方程式} \quad M = C_M \Phi I; \quad (1-3)$$

$$\text{感应电动势方程式} \quad E = C_e \Phi n; \quad (1-4)$$

$$\text{电枢电路电压方程式} \quad U = E + IR; \quad (1-5)$$

式中 C_e, C_M ——电机构造常数;

R ——电枢电路总电阻,包括电机电枢电阻 R_a 和附加电阻 R_f 。

由上面三个式子可以求解出用电流以及转矩表示的机械特性方程式

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - I \frac{R}{C_e \Phi}; \quad (1-6)$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R}{C_e C_M \Phi^2}. \quad (1-7)$$

C_e 与 C_M 大小可以表示为:

$$C_e = \frac{PN}{a \times 60} \times 10^{-8}, \quad (1-8)$$

$$C_M = \frac{PN}{a \times 2\pi \times 9.81} \times 10^{-8}, \quad (1-9)$$

式中 P ——电机的磁极对数；

N ——电枢绕组有效导线的数目；

a ——电枢绕组并联支路的对数。

由 (1-8) 和 (1-9) 两式可以导出 C_e 和 C_M 的关系为：

$$C_e \approx 1.03 C_M. \quad (1-10)$$

现在看看机械特性曲线的形状，当参数 U 、 R 及 Φ 都不变时，电动机的机械特性曲线 (1-6)(1-7) 是条直线，如图 1-7 线 1。一般情况下，向电枢供电的电源电压 U 是固定不变的；电枢电路电阻 R 虽然会因电机与附加电阻的温度升高而略有加大，但因它的变化比较缓慢，在某一段时间内还是可以看成不变的。磁通 Φ 在忽略电枢反应的情况下可以认为是不变的。

需要研究，在他激电动机运行中，电枢反应是否能够忽略？如果不加其他装置，电枢反应对电机总的磁通 Φ 的大小会发生影响，在电刷位于两个磁极间的中心面上时，产生的是去磁效应这样磁通 Φ 在负载变化时，不再是一个常数，因而机械特性线便不是一条直线了。图 1-7 线 2 表示他激电动机不加其他装置来改善电枢反应

作用的机械特性是向上弯曲的。具有这种特性的电动机在带动一个恒定负载转矩的负载时（如图 1-7 线 3）不能得到稳定运行，应该避免这种情况的发生。电机制造厂在设计制造电动机时，设法考虑了提高电动机运转稳定的问题，其方法是在他激电动机主磁极上加上一个具有少量匝数的绕组，叫稳定绕组，它与电枢回路串联起来，通过全部电枢电流，所产生的磁化力方向与他激磁相同，称为稳定磁化力，其值不超过激磁总安匝的 10%。我国出产的 Z 与 Z₂ 系列直流他激电动机（又名并励电动机）中大多数电机均有少量匝数稳定绕组。加上稳定绕组

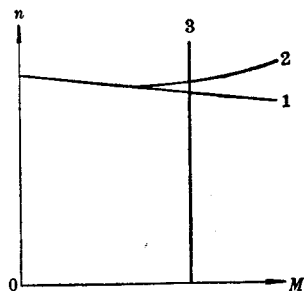


图1-7 电枢反应对直流他激电动机机械特性的影响。

后，磁通基本上不因电枢反应而变化。在某些专用电机上与中、大容量他激电动机上（额定容量 $P_{ed} > 800 \sim 1000$ 千瓦）采用补偿绕组以消除电枢反应的影响，其效果当然更好，但电机制造成本是较高的。可见电枢反应问题已在电机设计及制造上考虑过了，在电力拖动的研究与计算中便可以忽略电枢反应，即认为直流他激电动机的机械特性是直线特性，如图 1-7 中线 1，它与实际运行情况基本上是相符的。

机械特性的表示形式有几种，我们研究其中常用的两种，一种用电源及电机参数表示，另一种用电机的堵转数据来表示（堵转是指电动机不转动， $n = 0$ 的情况）。

用电源及电机参数表示的如式 (1-6) 及 (1-7)，如果令

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}; \quad (1-11)$$

$$\Delta n = I \frac{R}{C_e \Phi} = M \frac{R}{C_e C_M \Phi^2}, \quad (1-12)$$

则可写成

$$n = n_0 - \Delta n \quad (1-13)$$

我们称 n_0 为理想空载转速。其物理意义是当电机理想空载时，不需要电机发出转矩使它维持转动，这时所需的 I 与 M 均为零， $\Delta n = 0$ ，电机所具有转速为 $n = n_0$ 。此时电枢中的感

应电动势等于外加电压的大小。我们称 Δn 为转速降落，它与负载 I 、 M 电阻 R 及磁通 Φ 的大小有关。

用堵转数据表示的机械特性形式的推导如下。令堵转电流〔又称为短路(duanlu)电流〕 I_{dl} 为

$$I_{dl} = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_s + R_f} \quad (1-14)$$

它代表电动机电枢不转动时 ($n = 0$, $E = 0$) 在电枢电路中所通过的电流。由这电流所产生的转矩叫作堵转(短路)转矩。

$$M_{dl} = C_M \Phi I_{dl} \quad (1-15)$$

把式(1-6)及(1-7)加以变换后，并利用式(1-11)、(1-14)及(1-15)的关系，可得用堵转(短路)数据表示的机械特性：

$$n = n_0 \left(1 - \frac{I}{I_{dl}} \right); \quad (1-16)$$

$$n = n_0 \left(1 - \frac{M}{M_{dl}} \right). \quad (1-17)$$

用这种表示方式绘制某些直线的特性线比较方便，只要取纵坐标 $n = n_0$ 及横坐标 $I = I_{dl}$ 或 $M = M_{dl}$ 两点联一直线即可得出，如图 1-8。

绘制机械特性线时，一般均绘于第一象限及相邻的第二象限与第四象限中，通常这种特性是对应于电动机正转情况；如果同时要研究对应的反转情况，这时转速与转矩方向都与上述情况相反，可把特性线绘于第三象限及相邻的第四与第二象限中，如图 1-8 中虚线所示。

二、他激电动机的固有机械特性与人为机械特性

固有机特性就是当电枢电路中没有外加电阻，并且电动机的工作电压和磁通为额定值时所得到的特性曲线。令式(1-6)及(1-7)中 $U = U_{ed}$, $\Phi = \Phi_{ed}$ 及 $R = R_s$ ，得到

$$n = \frac{U_{ed}}{C_e \Phi_{ed}} - I \frac{R_s}{C_e \Phi}; \quad (1-18)$$

$$n = \frac{U_{ed}}{C_e \Phi_{ed}} - M \frac{R_s}{C_e C_M \Phi_{ed}^2}. \quad (1-19)$$

把固有特性曲线绘出，如图 1-9 中 $R = R_s$ 线。

人为特性可由变化电路参数和电源参数的方法得到：

1. 在电枢电路中串进附加电阻 R_f 。此时加在电枢上电源电压与磁通均为额定值，由式(1-7)得

$$n = \frac{U_{ed}}{C_e \Phi_{ed}} - M \frac{R_s + R_f}{C_e C_M \Phi_{ed}^2}. \quad (1-20)$$

与固有特性式(1-19)相比，它具有与固有特性相同的理想空载转速 n_0 ，不同的只是速度

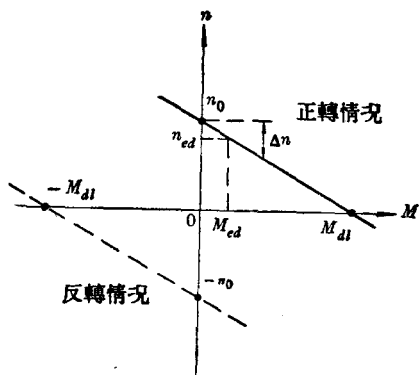


图1-8 用堵轉数据繪制的机械特性。

降落 Δn 项, 在一定负载的情况下随所串附加电阻 R_f 之加大而增大, 机械特性硬度降低, 如图 1-9 中 $R_s + R_1$ 与 $R_s + R_2$ 线。此时磁通不变, M 与 I 有正比关系, 可用同一个图形来表示 $n = f(M)$ 与 $n = f(I)$ 的关系, 如图 1-9 横座标所示。

2. 改变供给电枢的电压 U 。此时 $R_f = 0$, 激磁绕组上所加电压仍为额定值, 因之 $\Phi = \Phi_{ed}$, 由式 (1-7) 可得

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_{ed}} - M \frac{R_s}{C_e C_M \Phi_{ed}^2}, \quad (1-21)$$

与固有特性式 (1-19) 相比, Δn 相同, n_0 不同。由于电动机工作电压一般以额定值 U_{ed} 为上限, 因而供电电压一般只能在 $U < U_{ed}$ 范围中变化, 特性线是与低于固有特性而相平行的各个直线, 如图 1-10, 在这也可用一图形同时表示 $n = f(M)$ 与 $n = f(I)$ 的关系。这种人为特性的硬度较串附加电阻的要好。

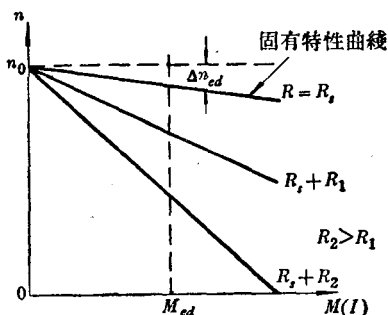


图1-9 他激电动机固有及串附加电阻人为特性曲线。

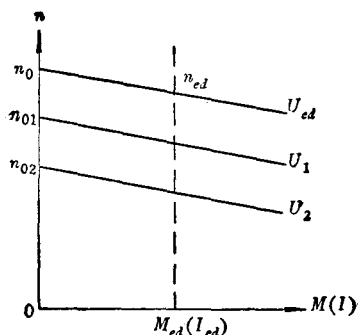


图1-10 他激电动机降低供电电压下的人为特性曲线。

3. 减弱电动机的磁通。在激磁回路中串进电阻 R_f , 并变化其大小使磁通 Φ 减弱 (图 1-6), 此时电枢所加电压不变: 为额定值 U_{ed} , 电枢电路中附加电阻 $R_f = 0$ 。

减弱磁通的人为机械特性用堵转数据表示比较方便, 见式 (1-16) 及 (1-17)。式中的三个系数为:

$$n_0 = \frac{U_{ed}}{C_e \Phi},$$

$$I_{d1} = \frac{U_{ed}}{R_s},$$

$$M_{d1} = C_M \Phi \frac{U_{ed}}{R_s}.$$

当磁通 Φ 减弱时, 理想空载转速 n_0 加大, 短路电流 I_{d1} 不变, 短路转矩 M_{d1} 降低。由于 Φ 变化, 电动机转矩 M 与电枢电流 I 不再是线性正比关系, 用电流表示的 $n = f(I)$ 与用转矩表示的 $n = f(M)$ 要分别在两个图上绘制。由式 (1-16) 表示的机械特性如图 1-11 (a), 减弱磁通时 I_{d1} 不变, n_0 增大, 得到的特性不是平行移动而是逐渐向下倾斜的, 磁通愈小特性硬度愈降低。由式 (1-17) 表示的机械特性如图 1-11 (b), 减弱磁通时, M_{d1} 逐渐变小, 而 n_0 逐渐增大, 不同的特性线具有交叉的形式, 特性硬度也是在磁通愈小时愈降低。一般运行情况下, 电动机负载转矩 $M_s \leq M_{ed} \ll M_{d1}$, 这对应于图 1-11 (b) 特性线偏左部分,

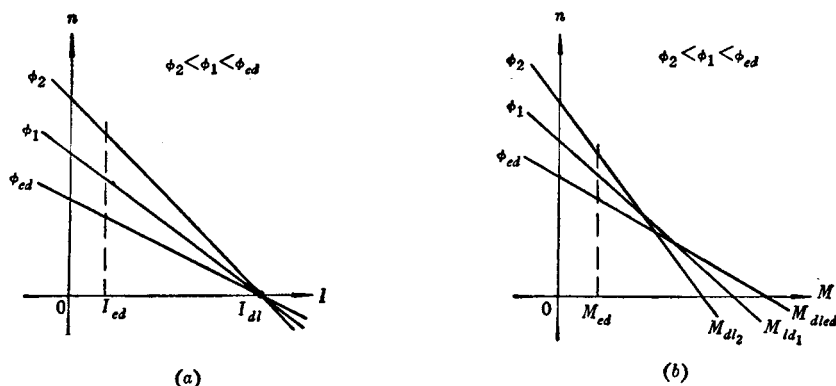


图1-11 他激电动机减弱磁通下的人为特性曲线。

因而减弱磁通一般的是使电动机转速升高，在额定负载情况下， $n > n_{ed}$ 。只有当负载转矩特别大或工作磁通特别小的时候，再减弱磁通，转速才会发生反而下降的现象。

1-3 直流他激电动机的电动与制动运转状态

一、电动运转状态

电动运转状态是电动机最基本的工作状态，它的特点是电动机所发出转矩 M 的方向与旋转的方向 n 相同，如图 1-12 (a) 所举起重机的例子所示，此时由电源向电动机输入电能变成机械能来使重物 G 以速度 v 向上提升。电动机在大多数工作情况是属于电动运转状态。在电机学及本书前面章节中研究的问题基本上都属于电动状态。

但是，电动机也会工作在发出转矩 M 与转速 n 方向相反的状态，图 1-12 (b) 上起重机的运行便是一个例子，此时重物 G 以不大的稳定速度 v 下降，电动机发出的转矩 M 与转速 n 方向相反，其作用是来克服由重物 G 产生的向下加速力矩。这也是电动机的一种运转状态，但已不属电动而属于制动运转状态了。

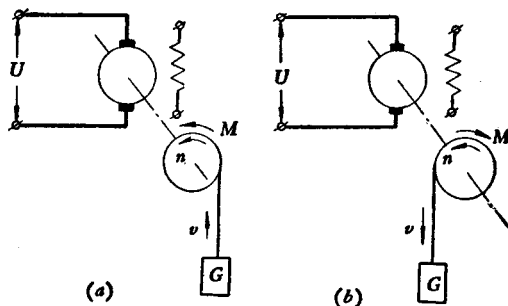


图1-12 他激电动机的电动与制动状态举例：

a—电动状态；b—制动状态。

二、制动运转状态的概念

制动运转状态的概念是：电动机所发出转矩 M 的方向与转速 n 的方向相反。

在那些情况下要求电动机工作在制动状态呢？起重机吊重物以稳速下降时，如图1-12 (b)所示，不用电动机，重物靠自己重力的作用也会下降，但其速度将愈来愈快。如果把电动机接上电源，它发出与转速方向相反的转矩，可使下降速度减慢到适合工作的需要程度。这时电动机被重物所带动，逐步消耗重物的机械位能。重物下降时电动机运转的转速 n 基

本上是不变的,它属于稳定的制动运转状态。生产机械由高速迅速地降到低速时,也需要用电动机来进行制动。假定机械原来具有转速 n_1 ,有较大的动能,要求迅速降到 n_2 ,而 $n_2 < n_1$,要使动能迅速减少,这需要电动机发出与旋转方向相反的转矩使它迅速制动,并由电动机来消耗这部分需要减少的动能。再有,生产机械要求迅速停车或迅速反向时,要求电动机发出与转速方向相反的转矩使转速很快的制动到零(如果须要反向运转,转速再由零起动到反向),用电动机来把动能迅速消耗掉。降速与停车制动时电动机转速是变化的,我们称它为过渡的制动运转状态。稳定的制动运转与过渡的制动运转状态的区别在转速是否变化,相同处是电动机转矩 M 与转速 n 相反。

制动运转状态的基本物理现象是:电动机所发出的转矩 M 与转速 n 方向相反;用电动机来吸收机械能(位能或动能),并转化成电能。

在他激电动机的运行中可以用三种方法得到制动运转状态,即:再生发电制动、能耗制动及反接制动。

三、再生发电制动

这种制动状态发生在电动机用正常接法,而转速 n 大于理想空载转速 n_0 的时候。只靠电动机自己本身的电磁作用是不会得到这个转速的。因为转速升到 $n = n_0$ 时, $E = U$,由式(1-5), (1-3)知 $I = 0$, $M = 0$,电动机不能发出使转速继续上升的转矩。因而必然要由电动机以外的外部原因来作用,使它运行到这种状态。

现在看看 $n > n_0$ 时的基本物理现象。关键在感应电动势 E 上, $E = C_e \Phi n$,当 $n > n_0$ 时它高于电源电压 U 。在电枢中所流电流 I 的方向决定于

$$I = \frac{U - E}{R} = -\left(\frac{E - U}{R}\right),$$

其方向与电动运转状态相反,是由电动机流向电源,具有发电向电源馈送的性质,如图1-13所示。电动机所发出转矩的方向由电流 I 与磁通 Φ 的方向而定;而 Φ 的方向由电源方向决定,这时并未改变;因而转矩方向由于电流方向的改变而变得与电动运转状态相反,即转矩 M 的方向与转速 n 转动的方向相反。这时工作机械带动电动机发电,把机械能再生变成电能,向电源馈送。发电反馈制动的基本物理现象是三点: $n > n_0$, M 与 n 方向相反及电动机再生发电供给电源设备。

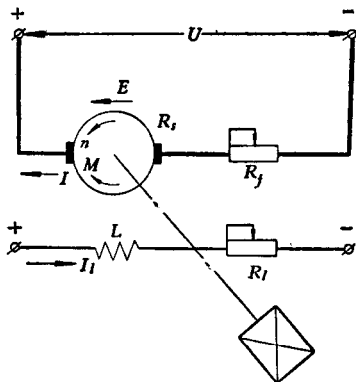


图1-13 他激电动机发电反馈制动状态电流方向。

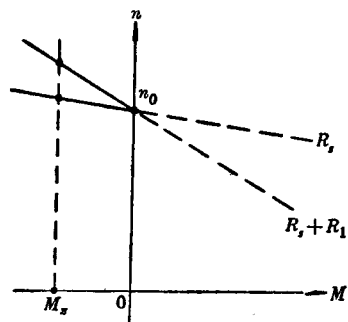


图1-14 他激电动机再生发电制动状态的机械特性。