

U655.3

交通系统中等专业学校教材

港口机械电气设备

(港口机械专业用)

上海港湾学校 薛兆沛 编

人民交通出版社

V655-3
9600013

~~93 3826~~

交通系统中等专业学校教材

港口机械电气设备

Gangkou Jixie Dianqi Shebei

(港口机械专业用)

上海港湾学校 薛兆沛 编

交通系统中等专业学校教材

港口机械电气设备

(港口机械专业用)

上海港湾学校 薛兆沛 编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 11.75 插页: 1 字数: 283千

1984年11月 第1版

1989年12月 第1版 第2次印刷

印数: 3,551—5,550册 定价: 2.15元

内 容 提 要

本书共分四篇。第一篇电力拖动理论，概述了直流和交流电动机机械特性曲线的物理意义；电动机的起动、制动、调速原理；电动机与起重机的配合和应用。第二篇常用电器，概述了我国港口机械电气设备中较常见的各种电器及其作用，并对其中有代表性的电器从结构和动作原理以及选用等方面作了说明。第三篇电力拖动自动控制，通过对单元线路的介绍，较详细地分析了起重机四大机构的典型线路，并列举了几种常用港口起重运输机械的电气线路。第四篇汽车电气设备，为了配合港口装卸搬运机械的需要，将部分汽车电气设备作了说明。

本书为水运中等专业学校港口机械专业教材，也可供有关专业人员参考。

前 言

1980年出版的试用教材《港口起重运输机械电气设备》经两年多试用，有关学校于1982年在重庆进行了认真讨论，在此基础上修订成本书。

修订情况是：根据港口装卸机械的专业特点和要求，第一篇内容改动较大；第二篇常用电器稍作删改；对第三篇起重机四大机构电气线路作了适当补充；为了港口装卸搬运机械的需要，将汽车电气设备中有关内容作为本书第四篇。

本书由上海港湾学校薛兆沛编写。上海海运学院郑芳楷主审，南通河运学校王德，上海港湾学校胡桂林参加了审定。重庆河运学校周绍烈、罗贯三参加了修订的讨论。

书中不妥之处，希批评指正。

编 者

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 电力拖动理论基础

第 一 章 电力拖动系统运行基础知识	3
第一节 港口起重机械的机械特性	3
第二节 电动机的机械特性及工作状态	5
第 二 章 直流电动机电力拖动理论基础	6
第一节 他激直流电动机机械特性	6
第二节 串激直流电动机机械特性	14
第三节 复激直流电动机机械特性	17
第四节 发电机—电动机机械特性	18
第 三 章 三相交流异步电动机电力拖动基础	19
第一节 三相交流异步电动机的机械特性	20
第二节 三相交流异步电动机的人为特性	21
第三节 三相交流异步电动机的调速	22
第四节 三相交流异步电动机的制动	24
第 四 章 电动机的选择	27
第一节 电动机的种类选择和结构选择	28
第二节 电动机的电压选择和转速选择	30
第三节 电动机的容量选择	31

第二篇 港口机械常用电器

第 五 章 手动控制电器	38
第一节 闸刀开关和铁壳开关	38
第二节 组合开关和倒顺开关	41
第 六 章 自动控制电器	43
第一节 接触器	43
第二节 按钮	52
第三节 继电器	53
第 七 章 几种常用保护电器	57
第一节 熔断器	58
第二节 热继电器	64

第三节	电流继电器	68
第四节	自动空气断路器	71
第五节	行程开关	76
第六节	制动电磁铁	77
第七节	电动机及各种电器的维护与修理	82
第二篇	附录	87

第三篇 电力拖动控制线路

第八章	电力拖动自动控制线路的基础知识	89
第一节	常用电工系统图形、文字符号和电路简介	89
第二节	鼠笼式异步电动机控制线路	89
第三节	绕线式异步电动机控制线路	103
第四节	直流电动机控制线路简介	118
第五节	电气线路图表示法	120
第九章	起重机械四大机构电气线路分析	126
第一节	港口起重机械的供电	126
第二节	行走机构电气线路分析	129
第三节	旋转机构电气线路分析	132
第四节	变幅机构电气线路分析	133
第五节	起升机构电气线路分析	135
第六节	起重运输机械电气设备维修概述	147
第十章	几种常用港口机械电气设备	149
第一节	1DC型电动叉车电气设备	149
第二节	连续运输机的电气设备	151
第三节	736Z浮式起重机电气设备	154
第四节	3-18浮式起重机电气设备	158
第五节	Q161型全回转臂式轮胎起重机电气设备	161

第四篇 汽车电气设备

第十一章	电源电路	167
第一节	蓄电池	167
第二节	发电机及调节器	170
第十二章	起动系统及仪表	173
第一节	起动系统	173
第二节	汽车仪表	177

绪 论

《港口机械电气设备》是水运中等专业学校港口机械专业的专业课程之一。它主要研究电力拖动在港口装卸机械中的应用。

港口装卸生产与起重运输机械的发展是分不开的。起重运输机械的发展在很大程度上取决于动力装置性能的改进。因为电能便于控制、传输、分配和使用,所以用电力作为动力主要能源有很大的优越性。电气设备种类、型号的增多,性能的改进,尤其是电子工业的发展,更进一步促进了港口的机械化、电气化。

电气设备的自动控制,主要体现在对电力拖动核心——电动机的控制上,电力拖动已由简单的断续控制发展到复杂的连续控制,由单个电动机的自动控制发展到对多台电动机的联合控制,由单机的自动化发展到整个装卸作业流水线的自动控制。

现就对电动机的控制,说明电气设备在港口机械中的作用:

- 1.对单个电动机的起动、反转、停止是最简单的自动控制,如连续输送机(斗轮机、链板机、皮带机)、气力输送机的电动机;

- 2.对电动机实行电气制动和调速,使起重运输机械在装卸过程中达到理想的工作速度和有效的制动,保证了装卸质量并提高了工作效率;

- 3.加装各种保护性电气元件,如过流继电器、熔断器和限位开关等,可对整个装卸机械进行超载和稳性保护,配用辅助电机,可校正大跨距装卸桥两边支腿间的跑偏等等;

- 4.利用各种电气仪表准确测量各种电量、非电量的数据,如电压、电流、功率、重量、温度和时间等,并能发出相应的信号或报警;

- 5.在一台机械上用几台电动机分别驱动各工作机构时,能协调地配合完成各种装卸动作。将不同的起重运输机械有机地组合,能实行整个作业线或作业区的全面生产自动化。如南京港浦口煤炭作业区,首先用翻车机将煤倒进坑道,再用连续运输机将煤从坑道输送到装船机,最后通过喷煤嘴装舱,完成整个装卸作业区的机械化。

在机械设计或技术改造中,必须熟悉电气设备自动控制,才能更好地做到机电配合。

本课程以“电工学”知识为基础,根据港口装卸机械对电力驱动的要求及操作控制方法、安全保护装置等内容编写而成。

本课程的内容与要求概述如下:

第一篇电力拖动理论基础,介绍直流和交流电动机机械特性曲线的物理意义;电动机的起动、制动和调速知识;电动机的选择。

第二篇港口机械常用电器,介绍我国港口机械电气设备常见的各种电器的特性和作用,并就其中有代表性的电器,从结构及动作原理作了说明,便于选择、使用和维修。

第三篇电力拖动控制线路,使用国家规定的电工系统图形、文字符号,对各种单元线路进行分析,熟悉自动控制线路原理(重点是交流异步电动机的控制)。在此基础上,较详细地分析港口起重运输机械行走、旋转、变幅和起升四大机构的电气线路,并列出了具有典型性的起重运输机械自动控制线路。学习本篇后,除了熟悉单元线路控制原理及对大中型起重

机械电气设备全面了解外，应能独立设计或改进较简单的控制线路。

为配合内燃机课程需要，将汽车电气设备充放电系统、起动系统等，列为本书的第四篇。

本课程理论与实际密切联系，应多采用演示与实物示教，必要时也可结合生产实际进行现场教学。

第一篇 电力拖动理论基础

电力拖动理论主要研究电动机拖动生产机械的运动规律, 电动机的机械特性、工作状态、调速与制动性能, 特别着重研究电动机在各种工作状态下机械特性曲线的物理意义, 和对电动机的选择及发热验算等。

电动机拖动港口装卸机械的运行, 体现了电动机电磁转矩 M 与生产机械加在电动机轴上阻力转矩 M_Z 之间的关系。当 $M = M_Z$ 时, 为稳定状态, 起重机的机械或负荷处于等速运行状态。当 $M > M_Z$ 或 $M < M_Z$ 时, 为起动、制动或调速等过渡状态。研究 M 与 M_Z 这对矛盾双方的特点及其规律, 中心问题是研究电动机转速 n 随电磁转矩 M 变化的规律, 即电动机的机械特性 $n = f(M)$ 。然后再与生产机械的机械特性相配合, 这样才能深刻理解港口机械电气设备线路设计的理论根据, 进一步明确“机”、“电”之间的密切联系, 更好地做到机电配合。

第一章 电力拖动系统运行基础知识

第一节 港口起重机械的机械特性

一、一般生产机械的机械特性

转速 n 与生产机械的阻力转矩 M_Z 之间的关系 $n = f(M_Z)$ 称为生产机械的机械特性。由于各种不同生产机械运行要求及工艺过程的不同 (如转速、行程、负载时间等), 机械特性大致可归纳为以下几种:

(一) 阻力转矩与转速无关 (M_Z 为恒量的机械特性)

这类生产机械的阻力转矩不随转速变化而改变, M_Z 恒定。负载功率 $P_Z = K M_Z n$, 与转速成正比。属于这类的生产机械如起重机、运输量恒定的皮带机等。机械特性见图1-1。

(二) 阻力转矩 M_Z 与转速 n 成反比变化的机械特性

这类机械的阻力转矩 M_Z 与转速 n 成反比, 负载功率 P_Z 恒定, 机械特性如图1-2所示。

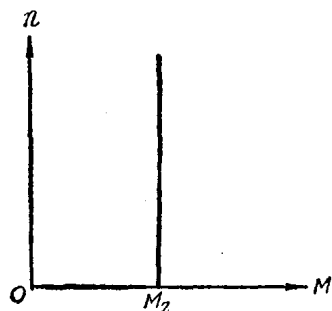


图1-1 恒转矩负载特性图



图1-2 恒功率负载 M_Z 特性图

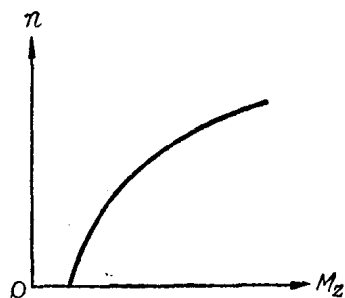


图1-3 阻力转矩与转速平方成正比的机械特性图

属该类生产机械的如车床切削精加工时，转速高进刀量小，粗加工时，转速低进刀量大，而其功率 P_Z 近似为恒量。

(三)阻力转矩大致与转速的平方成正比变化的机械特性

这类机械属反抗性负载，如离心式鼓风机、离心泵、螺旋桨等。它们的特点是随着 n 的增加，阻力转矩 M_Z 呈抛物线，即阻力与转速的平方成正比， $M_Z = Kn^2$ ，其机械特性见图 1-3。

二、起重运输机械的机械特性

(一)运行机构的机械特性

运行机构属摩擦转矩或称反作用转矩。其特点是阻力转矩方向与运动方向相反，当运动方向改变时，阻力方向也随之改变。其机械特性如图 1-4 所示，图中阴影部分为负载变化范围。

图中 M_0 为运行机构传动装置中的损耗转矩， $M_Z \sim M_0$ 为整个机构正压力产生摩擦阻力转矩的变化范围。在整个机构的起动过程中，电动机发出的转矩大部分用作加速，小部分用于克服阻力负载。

安装在室外的起重机械除摩擦阻力外，还有风阻力，此项阻力有时可能占最大摩擦力的 60%，顺风时，又可能从阻力负载转为动力负载。

在该机构中，最大阻力转矩一般为电动机额定转矩的 70%。

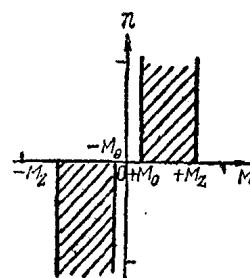


图1-4 运行与旋转机构的机械特性图

(二)旋转机构的机械特性

旋转机构的负载包括摩擦阻力、滚道坡度阻力、旋转中心偏心阻力与风阻力等。除摩擦阻力为阻力转矩外，其它属于阻力还是动力，与外界条件（风向、位置）有关。其机械特性如图 1-4 所示。

(三)变幅机构的机械特性

门式起重机或中小型电吊的变幅机构负载为幅度的函数，它是随变幅的平衡机构类型而变。一般当变幅到最大幅度时（即变幅机构伸至最大距离时），为最大动力负载，当变幅到最小幅度时，为最大阻力负载。图 1-5 为变幅机构较理想的机械特性图， n 与 M_Z 呈准正弦曲线关系。

(四)起升机构的机械特性

起升机构是起重机械最主要的机构。在起升或下放过程中，重力作用的影响很大，上升时重力作用为阻力负载，下降时则转变为动力负载。空钩或轻载下降时是动力负载还是阻力负载，则要由电动机及全部传动系统损耗转矩的大小和空钩轻载的比值来确定。起升机构负载属恒转矩负载，其值不随速度的变化而变化。不同的负荷有不同的转矩，如图 1-6 所示。图中阴影部分为负载变化范围。

一般最大负载转矩为电动机额定转矩的 70~140%。

图中 M_0 为起升机构传动装置中的损耗转矩，起升时负荷最大 $M_{Z最大} = M_0 + M_{Z负荷}$ ，下放时的负荷应为 $M_{Z下放} = M_{Z负荷} - M_0$ ，因而下放转矩的绝对值比上升转矩的绝对值小，这时应采取限速方法，控制下降速度。空钩或轻载时，如全部重量仍不足以克服传动装置总损耗，虽为下放但仍属阻力转矩。其机械特性如图 1-7 所示。

起重机各机构阻力转矩变化范围都较宽，进行电气调速时需要较硬特性。

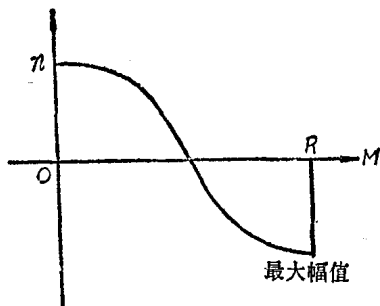


图1-5 变幅机构的机械特性图

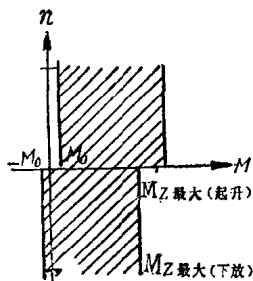


图1-6 起升机构的机械特性图

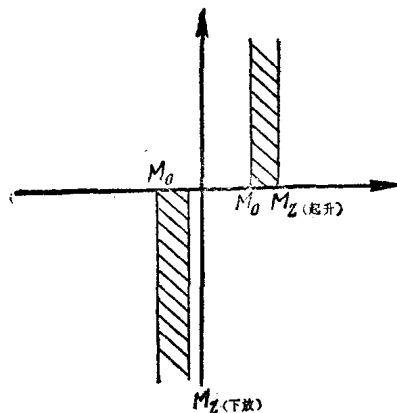


图1-7 空钩或轻载起升机构机械特性图

第二节 电动机的机械特性及工作状态

一、电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机转速 n 随电磁转矩 M 变化的规律。

电动机在额定条件下,即 $U = U_n, \phi = \phi_n$ 。定子和转子电路中不串电阻或其它起动变速装置时的机械特性,称固有特性,或自然特性。为了适应生产需要,人为的改变电压、频率、磁通,或在定子、转子中串接部分电阻,改变了的机械特性称人为机械特性。

不同的电动机有不同的自然特性,电动机的自然机械特性主要分为以下三类:

(一)绝对硬的机械特性

这种机械特性如图 1-8 中的特性曲线 1 所示。当电动机力矩改变时,其转速不变,例如同步电动机的机械特性。

(二)硬特性

这种机械特性如图 1-8 中的特性曲线 2 和 4 所示,电动机的转速虽然随着力矩增大而下降,但下降陡度不大,例如直流并激电动机及交流异步电动机在临界转差率以上的机械特性。

(三)软特性

这种机械特性如图 1-8 中特性曲线 3 所示,电动机的转速随其转矩的增加而下降,下降的陡度很大,例如直流串激电动机的机械特性。

电力拖动系统稳定运转的性能和过渡过程的特征,全部由电动机的机械特性决定,因而在配用电动机时必需首先注意电动机的机械特性,以满足生产机械的需要。

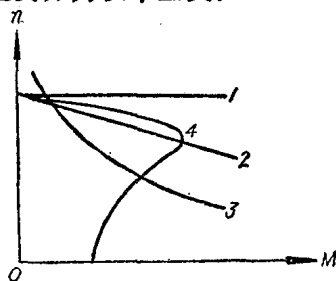


图1-8 电动机的机械特性

1-同步电动机特性; 2-他(并)激电动机特性;
3-串激电动机特性; 4-交流异步电动机特性

二、电动机的工作状态

电动机既可作为电动机工作,在一定的条件下又可作为发电机工作。当电机电磁转矩方向与其旋转方向相同时,电动机处于电动状态。当电磁转矩方向与其旋转方向相反时,电动机处于制动状态。

在电力拖动系统中,可利用电机具有的可逆性——电动状态和制动状态。当电机处于电动状态运行时,电磁转矩为驱动生产机械的原动力,即驱动负载运行。反之,电机的电磁转

矩阻碍生产机械的运动，即阻止负载的运行，称制动状态。例如当起重机下放负荷时，为了防止重力加速度作用而产生越来越快的下降速度，必须采用各种制动方法，获得匀速下降速度，保证起重机下放负荷时的装卸质量及安全生产。

图 1-9 为电动机各种不同工作状态的坐标图。

在第一象限中，电磁转矩 M 与转速 n 均为正，电动机正转，处于电动状态。如起重机运行机构向前运行时，电磁转矩 M 克服负载转矩 M_Z ，使起重机向前移动。

在第二象限中，电磁转矩 M 为负，转速 n 为正，电动机正转，但处于制动状态。如港口流动吊车下坡运行时，为了防止运行机构因重力加速度以过大的速度冲下坡，这时电磁转矩成为制动力矩。

在第三象限中，电磁转矩 M 和转速 n 均为负，电动机反转，处于电动状态。如起重机运行机构向后运行时，电磁转矩 M 及转速 n 均反向。

在第四象限中，电磁转矩 M 为正，转速 n 为负，电动机反转，处于制动状态。如起重机起升机构下放重载时，为了防止负载转矩 M_Z 在重力加速度的作用下，产生过大的加速而使重载急速下降，必须使电磁转矩 M 反抗负载转矩 M_Z 并获得适当的匀速下降速度，这时电磁转矩与转速方向相反，起制动作用。

无论电动机处于电动状态或处于制动状态，在电力拖动系统中都起着应有的作用。在后续章节中，将结合港口机械的具体机构，分析电动机的不同工作状态和电力拖动系统的运行原理。

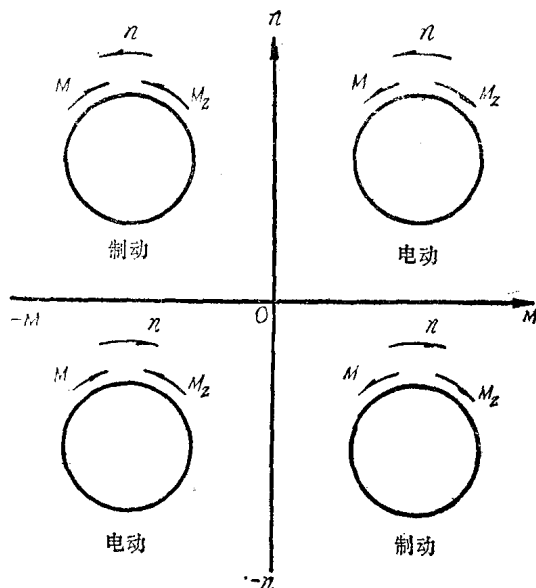


图1-9 电动机工作状态坐标图

第二章 直流电动机电力拖动理论基础

根据激磁绕组和电枢的不同联结方式，直流电动机可分为他激、并激、串激和复激几种。他激电动机的电枢和激磁绕组分别由两个直流电源供电；并激电动机的电枢和激磁绕组并联；串激电动机电枢与激磁绕组串联后接至电源；复激则是并激和串激的组合，它有一个并激绕组和一个串激绕组。由于他激电动机在直流电动机中较为典型，因此作重点介绍。

第一节 他激直流电动机机械特性

一、他激直流电动机的自然机械特性

他激直流电动机电气原理如图2-1所示。 DQ 为激磁绕组，它与电枢分别由两个不同的直流电源供电。

从电磁感应定律可知,载流导体在磁场中受到电磁力的作用,通电电枢在磁场中产生电磁转矩,其转矩 M 的大小与电枢电流 I_a 和每极的磁通 ϕ 的乘积成正比,即

$$M = C_m \phi I_a$$

式中 C_m 为电机的转矩常数,它与电机的结构有关,每一台电机的 C_m 为一定值。

电枢旋转切割激磁磁场,产生了反电动势 E_a ,它的大小与转速 n 及磁极磁通 ϕ 的乘积成正比,即

$$E_a = C_e \phi n$$

式中 C_e 是电机电动势结构常数,它与电机的结构有关, C_e 为一常量。电枢电路中存在的电阻值用 R_a 表示,外加电压用 U 表示,则电枢电路的电势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R_a$$

将 E_a 代入上式则电动机的转速特性公式为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \phi}$$

再将电磁转矩公式代入,则他激直流电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \phi^2} M$$

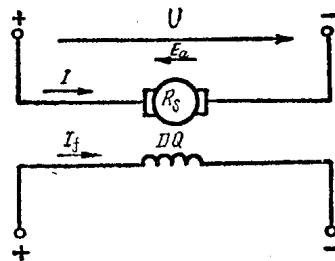


图2-1 他激直流电动机原理图

由上式作出他激电动机的转速 n 与转矩 M 之间关系的 $n = f(M)$ 曲线,称为机械特性曲线,如图2-2所示。当输出转矩 M 为0时, $n_0 = \frac{U}{C_e \phi}$,该点即为 n 轴上的截距,因 M 等于0,所以称 n_0 为理想空载转速。第二项 $-\frac{R_a}{C_e C_m \phi^2} M$ 为斜率,由于他激电动机特性较硬,即

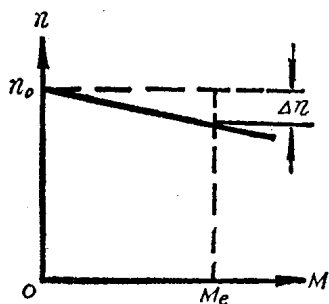


图2-2 他激直流电动机的自然机械特性

当负载增大时电动机的转速略有下降, M 从0增至额定转矩 M_e 时,其转速变化 Δn 只限在额定转速的5~10%之内。它适合拖动负载变化时,转速变化不大的生产机械,如大型起重机械、矿井卷扬机和大型机床等。

为了适应生产机械对速度调节的要求,在激磁绕组或电枢电路中,串接电阻以改变其特性曲线的斜率,称为人为特性曲线,这将于续章介绍。

二、他激直流电动机的起动

电动机从静止状态到稳定运行,称为起动过程。刚接通电源瞬间,因为 n 为0,所以反电势 $E_a = C_e \phi n = 0$,根据

$$I = \frac{U - E_a}{R_a}$$

$$\text{则 } I_0 \approx \frac{U}{R_a}$$

式中 I_0 为起动电流,因为电动机电枢电阻 R_a 很小,所以起动电流 I_0 将达到额定电流的10~20倍,这是不允许的。这样大的起动电流将会在电刷与换向器的接触处产生强烈火花,

使它们烧损。同时，对电机绕组的绝缘材料也是有害的。另一方面，直接起动时的转矩也相应增大，这将使电动机及传动机构受到很大的机械冲击。为了获得足够的起动转矩，同时又要将 I_0 限制在一定的范围内，必须在电路中串加适当的起动电阻，电气原理如图2-3a)所示。起动后随着电动机转速 n 的不断升高，反电势 E_a 也逐渐增大，电枢电流 I_a 逐渐减小，直到电动机的转速达到额定转速，电动机的电流也为额定值。通常起动电阻分成若干段逐段切除，最后电动机按自然特性稳定运行。

图2-3为三级起动他激电动机原理及特性曲线图。其起动电流为

$$I_0 = \frac{U}{R_s + R_{Q1} + R_{Q2} + R_{Q3}}$$

技术规定：在150千瓦以下的直流电动机起动电流 $I_0 \leq 2.5I_e$ (I_e 为额定电流)；150千瓦以上的直流电动机则应取 $I_0 \leq 2I_e$ 。

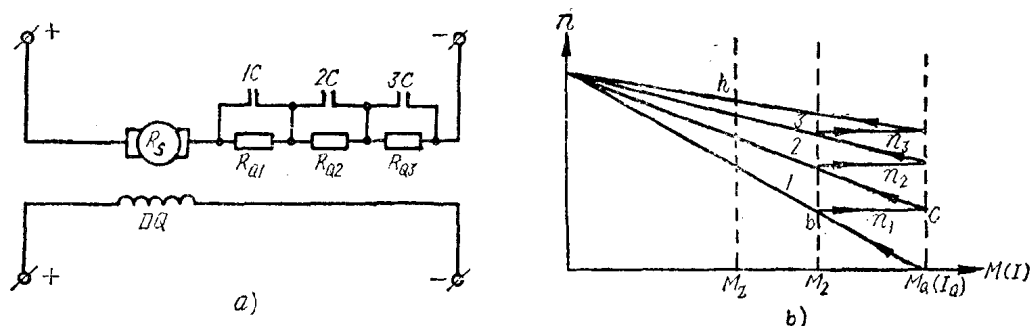


图2-3 分三级起动的他激电动机原理及特性曲线图
a)原理图；b)特性曲线图

直流电动机在起动时，电枢串入全部起动电阻的人为特性如图2-3b)中的曲线1所示。与 I_0 相应的转矩 M_0 称起动转矩，当 $M_0 > M_z$ 时，电动机开始起动， n 逐渐增加，这时转矩及电流逐渐减小，沿曲线1的箭头方向变化。为了进一步加速，当到b点时由接触器1C将第一段电阻 R_{Q1} 短接，该点 M_2 称切换转矩。由于惯性，电动机转速不能突变，仍暂以 n_1 运行，而电流及转矩由于 R 的减小而突增，从图中可知它从b点沿水平方向过渡到曲线2的C点。电动机又进一步加速运行，同理从曲线2过渡到曲线3，将第二、第三段电阻先后短接，最后到达自然特性曲线上与负载转矩 M_z 相应的h点稳定运行，完成起动的全过程。

如果设计恰当，可将每一级的 M_0 (或 I_0) 与 M_2 (或 I_2) 取得大小一致，使加速均匀，改善切换，减少转矩对拖动机械的冲击。

鉴于本专业要求，起动电阻的计算不作介绍。

三、他激直流电动机的反转

在港口装卸机械中，经常需要改变电动机的旋转方向，由式 $M = C_m \phi I_a$ 可知，若要改变电磁转矩的方向，只要改变磁通 ϕ 或电枢电流 I_a 的方向即可。前者是保持电动机电枢两端电压极性不变，将激磁绕组反接。后者是不改变 ϕ 的方向，而将电枢绕组两端反接。由于电动机激磁绕组匝数很多，电感较大，如改变激磁绕组的电流方向，除了进行过程较慢外，还能产生比额定电压大得多的感生电压而击穿绕组绝缘。当 ϕ 值很小并接近0值时，还可能引起电动机超高速运转的危险事故。所以，在实际应用中一般都是改变电枢两端电压的极性来实

现电动机的反转，如图2-4所示。接触器ZC闭合，电动机正转，接触器FC闭合，电动机反转。

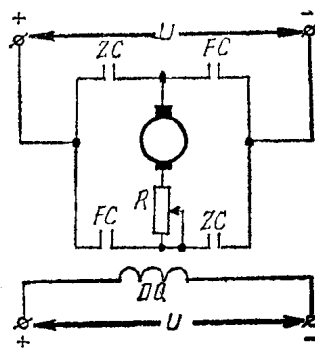


图2-4 他激直流电动机反转原理图

四、他激直流电动机的调速

起重机械在运行中，应按不同需要用多种速度进行操作。由于电气调速比机械调速便于控制，而且还大大地简化了机械结构，一般首先考虑电气调速

从直流电动机的机械方程式

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \phi^2} M$$

中可知调速方法有三种：（1）改变激磁电流从而改变磁极的主磁通 ϕ ；（2）改变电枢电路中的电阻 R ；（3）改变电源电压 U 。以上三个参数中任何一个的改变，都能使自然机械特性改变，得到相应的人为机械特性。现将三种调速方法分别讨论如下。

（一）改变磁通 ϕ 调速

在额定电压下运行的直流他激电动机，其磁通 ϕ 已趋饱和，即使再增大激磁电流， ϕ 也不可能改变，所以一般都是将激磁电路的电阻 R_ϕ 增大，减小电流，使 ϕ 减弱来改变速度，称弱磁调速，见图2-5a）。

由转速公式可知，磁通改变不仅改变了理想空载转速，同时由于 ϕ 的减小， $\frac{R_a}{C_e C_m \phi^2} M$ 的值将增大，特性曲线的斜率也增大，见图2-5b），其中1为自然特性曲线，2、3分别为减小 ϕ 后的人为机械特性曲线，其中 $\phi' > \phi''$ ，理想空载转速随 ϕ 的减小而增大。

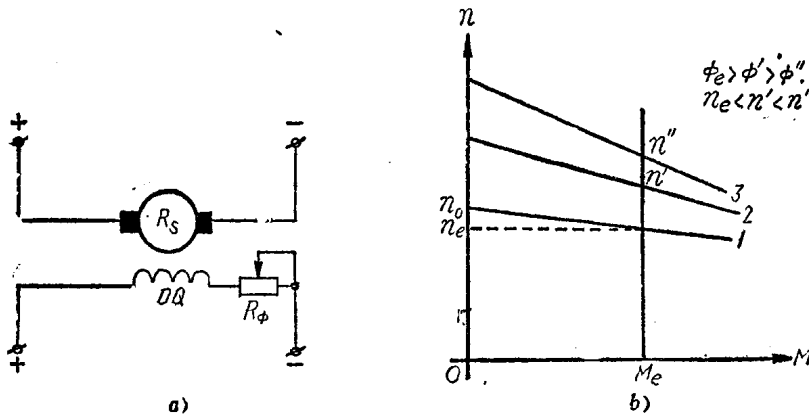


图2-5 他激直流电动机改变磁通 ϕ 调速
a) 原理图，b) 机械特性图

当增大激磁电路电阻 R_ϕ 时，激磁电流 I 减小，磁通 ϕ 也随之减小，由于 $E_a = C_e \phi n$ ，电动机的反电势 E_a 也减小，电枢电流 $I = \frac{U - E_a}{R_a}$ 增大，一般电流增大的影响大大超过 ϕ 减小的作用，这样电磁转矩 $M = C_m \phi I_a$ 比原来增大，使电动机的转速上升。随着 n 的升高，反电势 E_a 也增大，电枢电流 I 及电磁转矩 M 随之减小，待电磁转矩恢复到原有值，即 $M = M_z$ 时，电动机便在较高的速度 n' 、 n'' 稳定运行， M_e 为额定转矩。

电动机转速改变的近似值为

$$n_1 = n_2 \frac{\phi_2}{\phi_1}$$

式中： n_1 、 ϕ_1 ——原转速、原磁通值；

n_2 、 ϕ_2 ——增大了的转速、减小了的磁通值。

这种调速方法优点是：随着磁通的减弱，电流也相应减小，较为经济，设备也较简单，同时通过对 ϕ 的均匀调节能得到接近于无级调速的效果。但转速不能无止境的升高，因为要受到电枢机械强度和换向条件的限制，调速范围不广，通常为额定转速的两倍，即1~2。

这种调速方法缺点是机械特性被软化，电动机运行不够稳定。转速调节只能高于自然特性，不能调低。

(二) 电枢电路中串接电阻调速

从转速公式可知，电枢电路中串接附加电阻，理想空载转速不变，而转速降与所串电阻成正比，使特性同样变软。串入不同的电阻值可得到不同的人为特性曲线，阻值越大，特性越软，见图2-6。

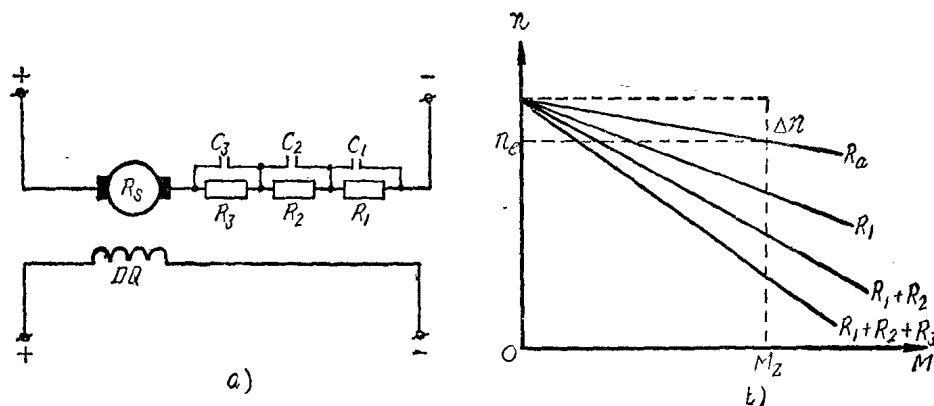


图2-6 他激直流电动机电枢电路串接电阻调速
a) 原理图；b) 特性曲线图

保持端电压和磁通都为额定，将电枢电路电阻逐渐增大，由于转动部分的惯性作用，转速 n 不会突变， $E_a = C_e n \phi$ 不变，此时电枢电流 $I = \frac{U - E_a}{R_a + R}$ 减小，以致 M 减小，迫使转速下降，反电势 E_a 随之减小，电枢电流和电磁转矩增加，直至 $M = M_z$ 时转速趋于稳定。在同一负载转矩 M_z 下，电枢电路中串接的电阻越多转速越低，这种调速方法只能使电动机转速低于自然特性曲线。

电枢电路串接电阻调速，使电动机特性软化，稳定性较差，因而不宜将转速调得太低。这种方法比较简便，适于短调速，在起重和运输牵引中都较常用。其缺点是电阻上热损耗较大，不经济。

(三) 改变电枢端电压调速

从转速公式中可知，当电枢电压 U 增加时，转速 n 相应增加， U 减小时 n 下降。负载 M_z 不变，逐渐改变电枢电压，可以得到无级调速的效果，但由于受电动机绝缘性能的限制，改变电压的调速方法也只能将转速调低。

图2-7为在电枢电压调低时的机械特性曲线，其中 $U_1 > U_2 > U_3$ ，它们相互平行，斜率相