

交通系统中等专业学校用教材

船舶电力拖动与自动控制

(船电专业用)

主编 孙德裕



大连海运学院出版社

交通系统中等专业学校用教材

船舶电力拖动与自动控制

(船电专业用)

主 编 孙德裕

大连海运学院出版社

(辽)新登字 11 号

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力拖动与自动控制/孙德裕主编.-大连:大连
海运学院出版社,1994

ISBN 7-5632-0606-X

I. 船… II. 孙… III. ①船舶-电力拖动 ②船舶-自动
控制 ③电力拖动-船舶 ④自动控制-船舶 IV. U665.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 00062 号

大连海运学院出版社出版

(大 连)

大连海运学院出版社印刷厂印装 大连海运学院出版社发行

1994 年 4 月第 1 版

1994 年 4 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:21.5

字数:537 千

印数:0001~1500

定价:9.85 元

内 容 提 要

本书共分三篇十五章。第一篇电力拖动基础与电动机的自动控制线路,包括机械特性、电动机的起动、电气制动、转速调节、电力拖动的过渡过程、低压控制电器、电动机控制线路等七章;第二篇船舶起货机与锚机的电力拖动自动控制系统,包括船舶起货机械、直流电动起货机、交流电动起货机、电动液压起货机、电动起锚机等五章;第三篇船舶辅机连续控制系统,包括船舶舵机装置的基础知识、自动舵、机舱辅机自动调节系统等三章。

本书为交通系统中等专业学校船电专业的教材,也可供船舶电工、电机员和有关船舶电气自动化的工程技术人员学习和参考。

前 言

本书是根据交通部一九八八年制定的《教学计划与教学大纲》编写的,作为交通系统中等专业学校船电专业用的教材。

一九八一年由人民交通出版社出版的教材《船舶辅机电力拖动与自动控制》一书,获得各校师生和船员的赞扬。为适应船舶电气设备的发展,以满足教学需要,在原教材的基础上重新编写出版。

书中较全面地阐述了电力拖动的的基础理论和各种类型的电动机基本控制线路。对船舶机械电力拖动系统,介绍了国内外较典型的自动控制系统,对其工作原理给以全面系统地分析。为适应船舶自动化程度的提高,书中加强了自动化设备的介绍:自适应操舵装置、自动锅炉、自动排渣分油机、焚化炉、污水处理等自动调节和自动控制系统。

在阅读电气制图方面,为了熟悉国外图纸和我国的新、旧制图标准,书中选用的国外控制线路采用原图,对船舶上原已使用的国产电气产品,其电气制图仍采用1990年前的国家标准,以便了解旧符号,有利于阅读船舶上现有的图纸。

本书由大连海运学校孙德裕主编,并编写第一至第十二章,由大连海运学校张植津编写第十三至第十五章,由上海海运学校瞿绍尧主审。在编写过程,大连海运学校杨宏德等同志提供了许多有益的宝贵意见,在此谨致深切的谢意。

因编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,望使用本教材的师生和读者给予指正。

编 者

1993年5月

目 录

第一篇 电力拖动基础与电动机的自动控制线路

第一章 机械特性.....	(1)
§ 1-1 生产机械的机械特性	(1)
§ 1-2 电动机的机械特性	(3)
§ 1-3 电动机的工作状态及其表示方法	(8)
第二章 电动机的起动	(10)
§ 2-1 直流电动机的起动	(10)
§ 2-2 直流电动机分级起动电阻的计算	(13)
§ 2-3 交流异步电动机的起动	(16)
第三章 电动机的电气制动	(19)
§ 3-1 制动概述	(19)
§ 3-2 直流电动机的再生制动	(20)
§ 3-3 直流电动机的能耗制动	(21)
§ 3-4 直流电动机的反接制动	(25)
§ 3-5 直流电动机电气制动小结	(27)
§ 3-6 异步电动机的再生制动	(29)
§ 3-7 异步电动机的能耗制动	(30)
§ 3-8 异步电动机的反接制动	(31)
第四章 电动机的转速调节	(34)
§ 4-1 概述	(34)
§ 4-2 直流电动机电枢电路串电阻调速	(35)
§ 4-3 直流电动机改变电源电压调速	(37)
§ 4-4 直流电动机改变激磁调速	(41)
§ 4-5 直流电动机电枢分路法调速	(43)
§ 4-6 异步电动机改变磁极对数调速	(48)
§ 4-7 异步电动机转子电路串电阻调速	(50)
§ 4-8 异步电动机的变频调速	(50)
§ 4-9 电源电压和频率对异步电动机的影响	(51)
第五章 电力拖动的过渡过程	(54)
§ 5-1 概述	(54)
§ 5-2 电力拖动运动方程式	(54)
§ 5-3 静态阻转矩的折算	(56)
§ 5-4 飞轮惯量的折算	(57)
§ 5-5 电力拖动的起动时间和制动时间	(57)

§ 5-6 直流并激电动机的过渡过程	(59)
第六章 低压控制电器	(64)
§ 6-1 概述	(64)
§ 6-2 接触器	(64)
§ 6-3 继电器	(70)
§ 6-4 线圈的重绕	(74)
§ 6-5 主令电器	(76)
第七章 电动机自动控制线路	(77)
§ 7-1 概述	(77)
§ 7-2 控制线路图设法及符号	(77)
§ 7-3 鼠笼式异步电动机直接起动控制线路	(80)
§ 7-4 交流磁力起动器故障分析	(83)
§ 7-5 鼠笼式电动机正、反转控制线路	(85)
§ 7-6 电动机自动起动的控制原则	(86)
§ 7-7 电动机按电流原则自动起动控制线路	(87)
§ 7-8 电动机按时间原则自动起动控制线路	(90)
§ 7-9 电动机按转速原则自动控制线路	(94)
§ 7-10 空压机控制线路	(95)
§ 7-11 水泵自动控制线路	(96)
§ 7-12 机组自动切换控制线路	(97)
§ 7-13 船舶电气起吊箱的维护与保养	(100)
第二篇 船舶起货机与锚机的电力拖动自动控制系统	
第八章 船舶起货机械	(102)
§ 8-1 船舶起货机类型	(102)
§ 8-2 电动起货机的结构和运行特点	(103)
第九章 直流电动起货机	(109)
§ 9-1 直流起货机控制系统概述	(109)
§ 9-2 一般发电机 G-M 系统起货机控制线路	(109)
§ 9-3 双输出直流发电机 G-M 系统起货机控制线路	(114)
§ 9-4 三输出直流发电机 G-M 系统起货机控制线路	(121)
§ 9-5 带磁放大器 G-M 系统起货机控制线路	(124)
§ 9-6 直流起货机电气设备的维护保养、常见故障及其排除	(132)
第十章 交流电动起货机	(135)
§ 10-1 概述	(135)
§ 10-2 国产交流变极变速起货机控制线路	(136)
§ 10-3 西门子恒转矩交流三速起货机控制线路	(143)
§ 10-4 交流绕组式电动起货机控制线路	(148)
第十一章 电动液压起货机	(157)

§ 11-1	概述	(157)
§ 11-2	液压系统工作原理	(157)
§ 11-3	电气系统工作原理	(162)
第十二章	电动起锚机	(165)
§ 12-1	起锚机的运行特点	(165)
§ 12-2	锚机电力拖动控制系统的特点和要求	(166)
§ 12-3	电动起锚机控制线路	(167)

第三篇 船舶辅机连续控制系统

第十三章	船舶舵机装置的基础知识	(171)
§ 13-1	概述	(171)
§ 13-2	单动操舵的工作原理	(175)
§ 13-3	随动操舵的工作原理	(176)
§ 13-4	自动操舵的工作原理	(177)
§ 13-5	自动舵的类型	(180)
§ 13-6	对自动舵的基本要求	(181)
§ 13-7	自动操舵的舵角	(183)
§ 13-8	信号在游隙元件中的传递	(190)
§ 13-9	操舵系统振荡讨论	(194)

第十四章	自动舵	(197)
§ 14-1	HQ-5 型自动舵	(197)
§ 14-2	自动操舵仪的调整	(214)
§ 14-3	自动舵的维修	(218)
§ 14-4	HD-5L 型自动舵	(226)
§ 14-5	安休司(ANSCHUTZ)型自动舵	(233)
§ 14-6	HSH 型自动舵	(239)
§ 14-7	SPERRY 型自动舵	(254)
§ 14-8	YEW PT21 型自适应操舵装置	(264)
§ 14-9	自适应操舵仪部件	(277)

第十五章	机舱辅机自动调节系统	(283)
§ 15-1	冷藏机的自动调节系统	(283)
§ 15-2	室内温度自动调节系统(空调)	(289)
§ 15-3	船舶辅助锅炉的自动控制	(294)
§ 15-4	WEST FALIA 型自动排渣分油机工作原理	(320)
§ 15-5	焚化炉自动控制系统	(323)
§ 15-6	污水舱的油含量微机监控系统	(326)

参考文献	(332)
------------	-------

第一篇 电力拖动基础与电动机的自动控制线路

船舶机械包括：泵、通风机、冷藏机、空气调节器、锅炉、起锚绞缆机、起货机、舵机、特种专用机械及为日常生活服务的机械等，统称辅机。船舶辅机有各种拖动形式，目前以电力拖动最为广泛。

机器一般由发动机、传动机构和工作机三部分组成。发动机和传动机构称为拖动装置。电力拖动装置主要由电动机、传动机构和控制设备三个环节组成。根据电力拖动装置中控制设备的自动化程度，分为手动控制、半自动控制和自动控制。在这一篇中，结合船舶上广泛采用的电气设备，讲述电力拖动系统运行的基础知识、控制电器及其基本的自动控制线路，着重分析电动机起动的自动控制线路。

第一章 机械特性

电力拖动系统的运行状态（电动机拖动生产机械的运行状态），反映了电动机的电磁转矩 M 与生产机械加在电动机轴上的负载转矩 M_L （也称生产机械的静态阻转矩）之间的相互作用。当 M 与 M_L 相等时，电动机以恒定的电流、电磁转矩和转速运行或静止不动，即堵转，处于相对稳定状态。当 $M > M_L$ 或 $M < M_L$ 时，拖动系统产生加速度，例如电动机在起动、调速、反转等过渡过程中，电动机的转速和电磁转矩发生变化，处于非稳定状态。随着转速的变化， M 与 M_L 相应的变化，直至 M 重新等于 M_L 时，拖动系统达到新的稳定状态。为了掌握电力拖动系统的运行状态，就必须了解 M 与 M_L 的特点和变化规律。反映转速与转矩之间变化规律的机械特性，是研究和分析电力拖动系统运行的主要特性，对于分析和解决电力拖动系统运行的问题以及船舶电气设备的管用养修都是十分必要的。

§ 1-1 生产机械的机械特性

在电力拖动系统中，电动机拖动生产机械时，依靠电动机产生的电磁转矩 M 克服生产机械运动时加在电动机轴上的负载转矩 M_L 而工作。下面通过起货机的电力拖动说明电动机轴上的负载转矩 M_L 。

当起货机吊 G 吨货物（包括吊钩）时，在电动机轴上便作用一个负载转矩 M_L ，见图 1-1。如果已知起货机鼓轮的半径为 $R(m)$ ，减速齿轮箱的传动比为 i ，传动效率为 η ，则可以计算电动机轴上的负载转矩 M_L 的数值

$$M_L = 9.8 \times 10^3 \times \frac{GR}{\eta i} \quad N \cdot m$$

又如电动机直接拖动高速往复泵，额定数据为：泵的压力 $H_B(N/m^2)$ ——帕斯卡 Pa ，排量为 $V_B(m^3)$ ，总效率为 η_B 。加在电动机轴上的负载转矩 M_L 为：

$$M_L = \frac{V_B H_B}{2\pi\eta_B} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

电动机轴上的负载转矩一般是阻碍运转,但在一定条件下也可能阻碍运转,根据性质不同,将电动机轴上的负载转矩分为两类。

1. 反抗性负载转矩

例如电动机轴上的摩擦转矩,泵与通风机等生产机械加在电动机轴上的负载转矩等都属于反抗性负载转矩。这种转矩的特点是,电动机无论正转或反转,负载转矩总是阻碍电动机运转,即电动机转动方向改变时,反抗性负载转矩的方向也随之改变。

2. 位能性负载转矩

例如重力、弹性体的压力、拉力和扭转力等加在电动机轴上的负载转矩,都属于位能性负载转矩。这种转矩的特点是,当电动机的旋转方向改变时,负载转矩总是保持原来的作用方向。如图 1-1 中的 M_L ,当电动机正转提升货物时,它起着阻碍系统运转的作用,而当电动机反转下降货物时,它却起着帮助系统运转的作用。

各种生产机械的负载转矩具有不同的性质,可能与许多因素有关,在分析电力拖动系统时,常要了解 M_L 与转速、时间和行程的关系。当生产机械的转速变化时,其负载转矩也随着有规律的变化。将加在电动机轴上的负载转矩与转速之间的关系 $n=f(M_L)$ 称为生产机械的机械特性,它可以用曲线或数字解析式来表示。在图 1-1 中,起货机吊 G 吨重物时,无论转速如何变化,电动机轴上的负载转矩基本不变,因为 M_L 的大小与转速 n 无关,因此它的机械特性可用图 1-2 中的特性曲线 1 表示,图中横座标为转矩,以牛·米($\text{N} \cdot \text{m}$)表示,纵座标为转速,以转/分(r/min)表示。

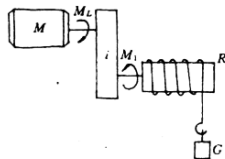


图 1-1 起货机的负载转矩

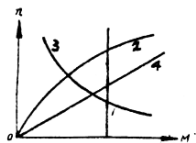


图 1-2 典型生产机械的机械特性

$$1-M_L=\text{const}; 2-M_L=Cn^2; 3-M_L=\frac{C}{n};$$

$$4-M_L=Cn$$

生产机械的机械特性一般可分为四种主要类型。

1. 负载转矩与转速无关的机械特性

这种类型生产机械的负载转矩不随转速变化而变化,即 $M_L=\text{常数}$,如图 1-2 中的特性 1 所示。例如起货机、运输一定重量的皮带运输机或张力和导辊直径不变的导辊传动机械等。这类机械特性可称为恒转矩特性或导辊特性。

2. 负载转矩大致与转速的二次方成正比例变化的机械特性。

这种类型的生产机械,负载转矩与转速的关系曲线呈抛物线,如图 1-2 中的特性 2 所示。例如通风机、离心泵、螺旋桨等生产机械便具有抛物线式的机械特性,这类机械特性通常称为通风机特性。

3. 负载转矩与转速成反比例变化的机械特性

这类生产机械,负载转矩 M_L 与转速 n 的关系曲线呈双曲线,如图 1-2 图中的特性 3 所示。例如造纸、电缆等生产机械中,需将产品卷绕在辊筒上,随卷绕物加厚其直径逐渐增大的全过程中,张力 F 和线速度 v 要求基本不变,则功率 $P=Fv=\text{常数}$,形成 $M_L=\frac{P}{\omega}=\frac{C}{n}$ 的关系,式中 ω 为角速度 rad/s 。这类特性称为卷绕特性,属于恒功率特性。

4. 负载转矩与转速成正比变化的机械特性

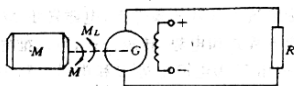


图 1-3 直流他励发电机的交流机组

这类生产机械，负载转矩与转速呈线性关系，如图 1-2 中的特性 4 所示。例如直流他励发电机的交流机组，电动机拖动发电机如图 1-3 所示。当发电机的外接电阻 R 不变时，电动机轴上负载转矩 M_L 近似等于发电机的电磁转矩 M_G 。而发电机的电枢电流 $I_a \approx \frac{C_e \Phi_G n}{R}$ ，如发电机

激磁 Φ_G 恒定，则 $M_L = M_G = C_m \Phi_G I_a = \frac{C_e C_m \Phi_G^2}{R} n \propto n$ 。

某些生产机械的机械特性难以归类于上述典型特性中某一类，例如船舶上应用广泛的往复泵和各种类型回转泵等容积泵类型，其机械特性的形状大致与管路特性相似。图 1-4 中的曲线 1 是静压头为主的管路中容积泵（如锅炉给水泵）机械特性，曲线 2 是动压头为主的管路中容积泵（如主机海水泵）机械特性。

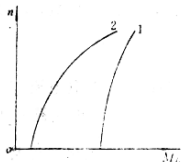


图 1-4 容积泵的机械特性

§ 1-2 电动机的机械特性

电动机的机械特性是反映转速 n 随电磁转矩 M 变化的规律，其函数关系为 $n = f(M)$ ，可以用公式、表格和曲线等形式表示。

电动机在正常运转条件下，即在铭牌所标明的额定条件下，转子和定子电路中不串任何电阻时的机械特性，称为固有机械特性，也称自然特性。根据运行的需要改变电动机的电参数，如电压、频率、磁通、转子或定子电路串电阻等而得到的机械特性，称为人为的机械特性。

船舶及一般工业上通用的电动机，均有转速随电磁转矩的增加而降低的特性，按变化的程度，电动机的机械特性主要分为三类。

1. 绝对硬的特性

当电动机的转矩改变时，其转速不改变，例如同步电动机的机械特性，如图 1-5 中特性 1 所示。

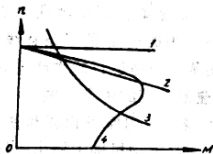


图 1-5 电动机的机械特性

2. 硬特性

电动机转速虽然随其转矩的增加而下降，但下降的程度不大。例如直流并激电动机的固有机械特性和交流感应电动机在临界转差率 S_K 以前（转差率由零至 S_K ）的固有机械特性，如图 1-5 中的特性 2 和 4 所示。

3. 软特性

电动机的转速随转矩的增加而下降的程度很大，例如直流串激电动机的固有机械特性，如图 1-5 中的特性 3 所示。

直流复激电动机的固有机械特性介于第二和第三类之间。有的电动机，也有其转速随转矩的增加而升高的机械特性，例如直流差复激电动机的特性，但这种电动机应用极少。电动机的机械特性决定着电力拖动系统稳定运行的性能和过渡过程的特征，无论在稳定运行或在过渡过程中，均需满足生产机械在特性方面对电动机的要求。

一、直流并激电动机的机械特性

直流并激电动机的机械特性是在电源电压和激磁电流为常数的条件下,电磁转矩 M 与转速 n 之间的关系 $n=f(M)$ 。根据直流电机的电势平衡方程式和电势、转矩公式,可以推导出机械特性方程式。当电动机在稳定状态运行时,其外加电压 U 为电枢电势 E 和电枢电路中的电压降 $I_a R$ 所平衡,即

$$U = E + I_a R \quad V \quad (1-1)$$

$$E = C_e \Phi n \quad V \quad (1-2)$$

由转矩公式 $M = C_m \Phi I_a$ 得

$$I_a = \frac{M}{C_m \Phi} \quad (1-3)$$

式中: I_a ——电枢电流, A;

R ——电枢电路总电阻, $R = R_a + R_c$, 其中 R_a 为电枢电阻, R_c 为外加电阻, Ω ;

C_e ——电机的电势常数, $C_e = \frac{pN}{60a}$, 其中 N 为电枢导体数, p 为主磁极对数, a 为电枢绕组并联支路对数;

C_m ——电机的转矩常数, $C_m = \frac{pN}{2\pi a}$ 。将式(1-2)、(1-3)代入式(1-1)可得机械特性方程式

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I_a = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M$$

$$= n_0 - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M = n_0 - \Delta n \quad \text{r/min} \quad (1-4)$$

式中 n_0 是理想空载转速, 即当 $M=0$ 时, $U=E$ 时电机的转速。 Δn 为电动机在一定 R 下和某一 M 时的转速降, 它是由负载电流在电枢电路中产生的电压降所造成。

并激电动机的电路图如图 1-6a) 所示。当电枢电路加额定电压 U_N , 额定磁通 Φ_N 而不串外加电阻 R_c 时, 可得固有机械特性, 如图 1-6b) 的特性 1 所示。当电枢电路中接电阻 R_c 时, n_0 不变而 Δn 增大, 机械特性曲线斜率增加, 即软化, 其特性称为人为特性, 如图 1-6b) 中的 2、3、4、5 特性曲线。

并激电动机当负载变化时, 磁通 Φ 可近似地认为不变, 所以理想空载转速不变, 机械特性为通过 n_0 的一条直线。固有特性是一硬特性, 适用于拖动基本恒速运行的生产机械。直流并激电动机也适用于要求调速范围广的生产机械。

电动机空载运行时, 由于本身的风阻摩擦损耗和铁损造成的阻转矩称为空载转矩 M_0 。因此电动机轴上输出的转矩, 实际上不等于电磁转矩, 在电动状态下, 电磁转矩大于输出的轴上转矩 M_d , $M - M_d = M_0$ 。 M_0 一般为电动机额定转矩的 2~5%, 许多场合可略去不计, 认为 $M \approx M_d$ 。

根据并激电动机的铭牌数据可求得额定电磁转矩 M_N 、额定轴上转矩 M_{dN} 和固有特性的理想空载转速, 并可绘制出固有特性曲线,

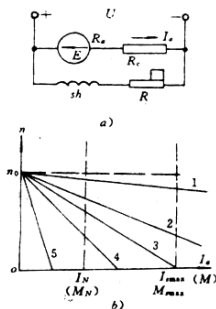


图 1-6 直流并激电动机电路图和机械特性

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N}$$

$$M_N = C_m \Phi_N I_N = 9.55 C_e \Phi_N I_N \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-5)$$

R_a 数据缺乏时,可用估算公式计算(参见 §2-1)。

而额定轴上转矩,可用下式计算

$$M_{dN} = 9.55 \times 10^3 \frac{P_N}{n_N} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-6)$$

式中, P_N ——电动机额定功率,千瓦(kw)

由额定电磁转矩 M_N 和额定轴上转矩 M_{dN} 便可计算空载转矩 M_0 。理想空载转速可由下式计算:

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{U_N n_N}{U_N - I_N R_a} \quad \text{r/min} \quad (1-7)$$

利用 $M=M_N, n=n_N$ 和 $M=0, n=n_0$ 两点,便可绘制出并激电动机的固有机械特性。

二、直流串激电动机的机械特性

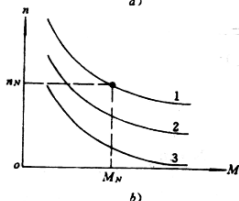
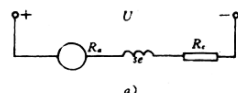


图 1-7 直流串激电动机电路图和机械特性

直流串激电动机的磁通随电枢电流(负载)而变化,同时由于磁路的饱和, Φ 的变化是非线性的,因此机械特性不能用简单的数学公式计算。可根据产品目录供给的每种型号串激电动机以相对单位描绘的 $M=\varphi(I)$ 和 $n=f(I)$ 万用特性曲线,利用图解法分析。也可根据铭牌数据,近似地用解析式表达。根据电动机额定数据和万用特性曲线,可以换算和绘出以绝对值表示的固有机特性,如图 1-7 中的特性 1,特性 2、3 为电枢电路串电阻的人为特性。

直流串激电动机的固有特性是一软特性,可以满足轻载快速的要求,另外过载能力强,适用于拖动要求有较大的过载能力和起动转矩以及具有冲击性负载的生产机械,如舵机、锚机、起货机等。

直流串激电动机无理想空载转速,不允许空载运行。因为空载时电流很小,磁通 Φ 很小,其转速 n 可达额定转速的 5~6 倍,即发生“飞车”事故,所以串激电动机与工作机之间一般不允许用皮带传动,防止皮带断裂或滑脱而造成空载。

三、直流复激电动机的机械特性

直流复激电动机的磁场由并激绕组和串激绕组的磁势共同产生,机械特性为一曲线,难以取得机械特性的准确分析式,求法同直流串激电动机,利用万用特性曲线进行图解分析或采用近似表达式计算。

复激电动机一般采用积复激的形式,即两激磁绕组接成磁势相加(同方向)。其固有机特性如图 1-8 所示,介于并激与串激电动机固有机特性之间。由于并激与串激绕组磁势之比的大小不同,当并激磁势为主时,特性接近并激电动机的特性,如图 1-8 中的特性 1;当串激磁势为主时,特性接近串激电动机的特性,如图 1-8 中的特性 2。船舶起重用电动机,并激与串激磁

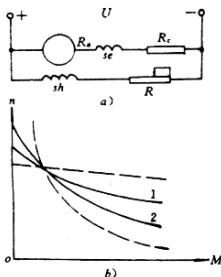


图 1-8 直流复激电动机电路图和机械特性

势之比一般为 2 : 1, 例如国产 ZZY-H 型船用起重复激电动机, 并、串激磁势之比为 7 : 3。

由复激电动机的机械特性可见, 与串激电动机不同之处是复激电动机有理想空载转速 n_0 , 因为理想空载时, 即 $I_a = 0$ 时, 并激磁场存在。

四、异步电动机的机械特性

由电机学可知, 交流异步电动机的电磁转矩可由电功率平衡或者电磁力 Bl_i 的原理导出:

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-8)$$

由上式可知电磁转矩 M 与转子电流的有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 及电机气隙磁通 Φ 成正比。用式(1-8)计算不方便, 也不能直接表达转矩 M 与转差率 S 的关系, 因此在实际计算中, 可以直接利用等值电路的参数求得机械特性的解析

式。图 1-9 为异步电动机的简化等值电路。

由电机学推导的转矩公式和图 1-9 可知:

$$M = \frac{P_M}{\omega_1} = \frac{3I_2^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1}$$

且

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

所以

$$M = \frac{3U^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

式中: P_M ——三相电磁功率

ω_1 ——电动机的同步角速度, $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ rad/s, 其中 n_1 为同步转速 r/min;

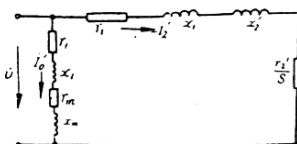


图 1-9 异步电动机的简化等值电路

$\dot{U}$ —定子相电压; $\dot{I}_0$ —每相励磁电流; $\dot{I}_2$ —折算到定子侧的转子每相电流; r_1 —定子每相电阻与电抗; r_2' —折算到定子侧的转子每相电阻与电抗; x_1 —定子每相电抗与电抗; x_2' —折算到定子侧的转子每相电抗与电抗

在分析电力拖动的一般问题时, 可将定子绕组电阻 r_1 略去, 即

$$M = \frac{3U^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1 [(\frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

(1-9)

根据式(1-9), 令其导数 $\frac{dM}{dS} = 0$, 可求得产生最大转矩的临界转差率为

$$S_k = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (1-10)$$

将式(1-10)代入(1-9)式可得最大转矩(又称临界电磁转矩)为

$$M_k = \pm \frac{3U^2}{2\omega_1(x_1 + x_2)} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-11)$$

由式(1-11),当电源频率 f_1 一定时, M_k 与电源电压 U^2 成正比,而与转子电阻 r_2 无关。

在上述两式中,正号适用于电动状态和反接制动状态,负号适用于再生制动状态。由于 r_1 的存在,再生制动状态的 M_k 略大。

由式(1-9)可见,当电源电压 U 和频率 f_1 一定时,电磁转矩 M 是转差率 S 的函数。 M 随 S 的变化规律称 M - S 特性。因转差率 $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ 或 $n = n_1(1 - S)$,如将转矩公式中的 S 换成转速 n ,则 n - M 关系曲线便为异步电动机的机械特性,如图 1-10 中特性 2 所示。

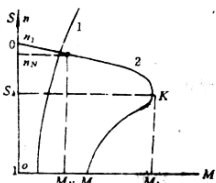


图 1-10 异步电动机的机械特性

异步电动机的机械特性在临界点 K , 转矩出现最大值,即最大转矩 M_k ,其转差率为临界转差率 S_k 。机械特性由临界点 K 分成两部分,电动机通常运行在 S 由零至 S_k 一段,称为稳定运行区。另一段为非稳定运行区,能否稳定运行与负载性质有关。机械特性在稳定运行区为硬特性,普通的异步电动机额定转差率 $S_N = 0.01 \sim 0.06$,临界转差率 $S_k = 0.15 \sim 0.20$,所以转速基本恒定。

电动机最大转矩与额定转矩之比称为过载能力,即

$$\lambda = \frac{M_k}{M_N} = 1.8 \sim 2.4$$

过载能力 λ 表明异步电动机短时过载的本领。运行中当负载转矩大于 M_k 时,电动机将会减速至堵转。

当电源电压和频率保持额定值,电动机的转子回路不外加电阻,磁极对数不改变时,其机械特性为固有机械特性。绕线式异步电动机当转子电路外接电阻时, M_k 不变,而 S_k 变化,其特性是人为机械特性,如图 1-11 所示。

在电力拖动计算中,一般不采用(1-9)式进行较烦琐的计算,并且需要产品目录未说明的一些参数。实际上往往采用实用公式,即用手册或产品目录中所供给的数据计算。将(1-9)、(1-11)两式相比,并将(1-10)式代入整理可得下面的实用转矩公式,又称机械特性简化方程式,即

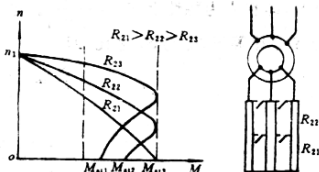


图 1-11 绕线式异步电动机电路图及机械特性

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2(x_1 + x_2) \frac{r_2}{S}}{(\frac{r_2}{S})^2 + (x_1 + x_2)^2} = \frac{2}{\frac{r_2/S}{x_1 + x_2} + \frac{x_1 + x_2}{r_2/S}} = \frac{2}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k}}$$

因而

$$M = \frac{2M_K}{\frac{S_K}{S} + \frac{S}{S_K}} \quad (1-12)$$

根据产品目录供给的额定数据可计算 M_K 和 S_K ：

因为 $M_N = 9.55 \times 10^3 \frac{P_N}{n_N} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-13)$

而

$$M_K = \lambda_m M_N \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-14)$$

(当 $M = M_N$ 时, $S = S_N$, 代入(1-9)式可求得下式:

$$S_K^2 - 2\lambda_m S_N S_K + S_N^2 = 0$$

求解

$$S_K = S_N(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \quad (1-15)$$

式中: $S_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1}$ 为额定转差率。

将所得的 M_K 、 S_K 值代入(1-12)式, 便可得到固有机械特性方程式。

如将实用转矩公式(1-12)变换一下, 可得下式:

$$S = S_K(\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 1}) \quad (1-16)$$

式中 $\alpha = \frac{M_K}{M}$; 正、负号分别表示 S 在特性不稳定部分和稳定部分的两个数值。

利用(1-16)式变换后可取得以 $n = f(M)$ 表达的机械特性方程式:

$$n = n_1(1 - S) = n_1[1 - S_K(\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 1})] \quad (1-17)$$

绕线式异步电动机在固有特性上 $S_K = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}$, 当转子电路外加电阻时, 临界转差率由 S

变化为 S' , 即在人为特性上 $S_K = \frac{R_2'}{x_1 + x_2'}$ 。当电动机在同一转矩下运行时, $\alpha = \text{常数}$, 据(1-16)式, S 与 S' 之比等于 S_K 与 S_K' 之比, 即

$$\frac{S}{S'} = \frac{S_K}{S_K'} = \frac{r_2'}{R_2'} = \frac{r_2}{R_2}$$

或者

$$\frac{r_2}{S} = \frac{R_2}{S'} = \text{常数}$$

转子每相绕组电阻 r_2 可用下式求得:

$$r_2 = \frac{1000 P_N S_N}{3 I_{2N} (1 - S_N)} = \frac{E_{2N} S_N}{\sqrt{3} I_{2N}} \quad \Omega \quad (1-18)$$

式中: P_N ——电动机额定功率, kW;

I_{2N} ——转子额定电流, A;

E_{2N} ——额定转子开路电压(转子堵转时), V。

由以上分析可见, 当转子电路电阻增加时, 其转差率随着转子电路电阻成比例的增加。

§ 1-3 电动机的工作状态及其表示方法

电机具有可逆性, 它既可以作为电动机工作, 也可作为发电机工作。当电机作为电动机拖

动生产机械工作时,其电磁转矩方向与旋转方向相同,电磁转矩是拖动转矩;当电机作为发电机工作时,其电磁转矩方向与旋转方向相反,电磁转矩是制动转矩。

在电力拖动系统中,电动机也具有两种工作状态,即电动状态和制动状态。电动机通常是作为拖动生产机械的原动机,即用它所产生的电磁转矩来拖动其轴上的负载而运行,这种工作状态是电动状态。但有时电动机也用在相反的情况,即用电动机产生电磁转矩来阻止其轴上的负载运行,这种工作状态为制动状态。

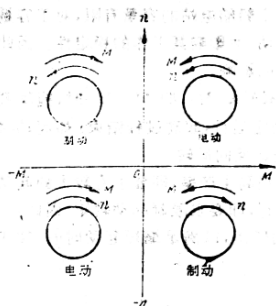


图 1-12 电动机工作状态的表示方法

为了分析方便,把电动机的全部工作状态用机械特性表示在以 $n-M$ 为座标的四个象限中,如图 1-12 所示。

现假定逆时针方向为正方向,顺时针方向为负方向。从图中可见,在第一象限中,电磁转矩 M 与转速 n 均为正;在第三象限中,电磁转矩 M 与转速 n 均为负,所以在第一和第三象限中, M 与 n 方向相同,电动机工作于电动状态。在第二象限中电磁转矩 M 为负,转速为正;在第四象限中,电磁转矩 M 为正,转速为负,所以在第二和第四象限中, M 与 n 方向相反,电动机工作在制动状态。

在以后章节中将结合具体的电力拖动系统,根据电动机的不同工作状态,在 $n-M$ 座标的四个象限中作出电动机的机械特性来分析电力拖动系统的运行。

生产机械的机械特性同样用座标的四个象限表示,但必须与电动机的 $n-M$ 座标相配合。在图 1-12 中,如已假定电动机转速 n 的正方向,电磁转矩 M 的正方向与 n 所规定的正方向相同,而生产机械加在电动机轴上的负载转矩 M_L 的正方向与 n 的正方向相反。即 n 以逆时针为正方向时,以此为根据,规定负载转矩 M_L 以顺时针为正方向,以逆时针为负方向。

图 1-13a) 表示了恒定反抗性负载的机械特性,当旋转方向改变时,反抗性负载转矩的方向也随之改变。在图 1-13b) 中表示了恒定位能性负载的机械特性,当旋转方向改变时,位能性负载转矩的作用方向不变。

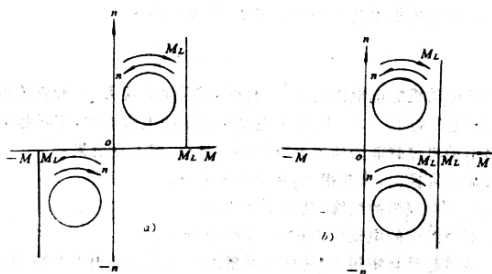


图 1-13 负载转矩与旋转方向的表示方法

a) 反抗性负载的机械特性; b) 位能性负载的机械特性