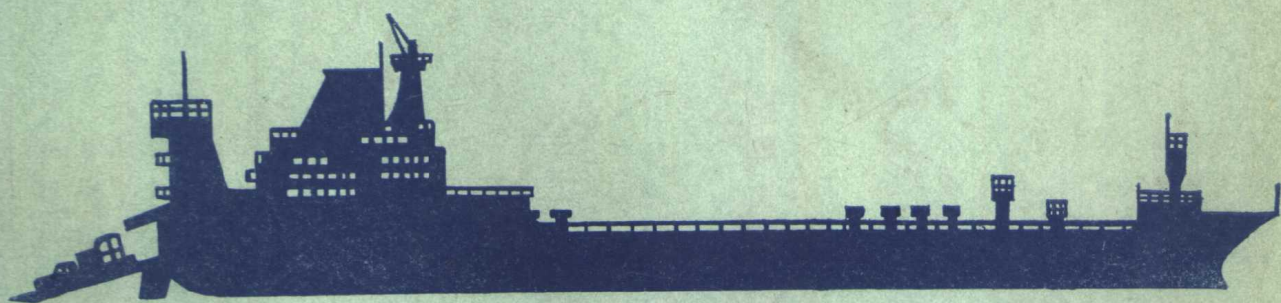


交通系统中等专业学校试用教材

船舶辅机 电力拖动与自动控制

(船舶电工专业用)

孙德裕 张植津 编



人民交通出版社

交通系统中等专业学校试用教材

船舶辅机电力拖动与自动控制

(船舶电工专业用)

孙 德 裕 编
张 植 津

人 民 交 通 出 版 社

交通系统中等专业学校试用教材
船舶辅机电力拖动与自动控制
(船舶电工专业用)

孙德裕
张植津 编

人民交通出版社出版、发行
(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号
人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 19.75 插页: 2 字数: 467 千

1981 年 6 月 第 1 版

1981 年 6 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2,100 册 定价: 1.65 元

内 容 提 要

本书共分三篇。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、制动、转速调节，电力拖动的过渡过程，低压控制电器，电动机自动控制线路等七章；第二篇船舶起货机和锚机的电力拖动与自动控制，包括船舶起货机械，直流电动起货机控制线路，交流电动起货机控制线路，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，包括舵机装置的基础知识，自动操舵仪，机舱辅机自动调节系统等三章。

本书为中等专业学校船舶电工专业的试用教材，也可供具有初中以上文化程度从事船舶电工专业的工人、工程技术人员学习和参考。

该书第一、二篇由孙德裕编写，第三篇由张植津编写。

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	9
§2-1 直流电动机的起动.....	9
§2-2 各级起动电阻的计算.....	12
§2-3 交流异步电动机的起动.....	16
第三章 电动机的电气制动	18
§3-1 制动概述.....	18
§3-2 直流电动机的再生制动.....	19
§3-3 直流电动机的能耗制动.....	20
§3-4 直流电动机的反接制动.....	23
§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.....	27
§3-7 异步电动机的能耗制动.....	28
§3-8 异步电动机的反接制动.....	30
第四章 电动机的转速调节	31
§4-1 概述.....	31
§4-2 直流电动机电枢电路串电阻的调速.....	32
§4-3 直流电动机改变电源电压调速.....	34
§4-4 直流电动机改变激磁调速.....	38
§4-5 直流电动机电枢分路法调速.....	40
§4-6 异步电动机改变磁极对数调速.....	45
§4-7 异步电动机转子电路串电阻调速.....	46
§4-8 电源电压和频率对异步电动机的影响.....	47
第五章 电力拖动的过渡过程	48
§5-1 概述.....	48
§5-2 电力拖动运动方程式.....	49
§5-3 静态阻转矩的折算.....	50
§5-4 飞轮惯量的折算.....	51

§5-5	电力拖动的起动时间和制动时间	52
§5-6	直流并激电动机的过渡过程	53
第六章	低压控制电器	58
§6-1	概述	58
§6-2	接触器	58
§6-3	继电器	64
§6-4	线圈的重绕	67
§6-5	主令电器	69
第七章	电动机自动控制线路	70
§7-1	概述	70
§7-2	控制线路图示法及符号	71
§7-3	鼠笼式异步电动机直接起动控制线路	72
§7-4	交流磁力起动器故障分析	76
§7-5	鼠笼式电动机正、反转控制线路	78
§7-6	电动机自动起动的控制原则	79
§7-7	电动机按电流原则自动起动控制线路	79
§7-8	电动机按时间原则自动起动控制线路	84
§7-9	直流电动机按转速原则控制的起动线路	88
§7-10	鼠笼式异步电动机按转速原则控制的反接制动线路	88
§7-11	船舶电气控制箱的维护与保养	89

第二篇 船舶起货机与锚机的电力拖动与自动控制

第八章	船舶起货机械	91
§8-1	船舶起货机类型	91
§8-2	电动起货机的结构和运行特点	91
第九章	直流电动起货机	97
§9-1	直流起货机控制线路概述	97
§9-2	一般发电机—电动机 ($F-D$) 系统起货机控制线路分析	99
§9-3	双输出直流发电机 $F-D$ 系统起货机控制线路分析	102
§9-4	三输出直流发电机 $F-D$ 系统起货机线路	109
§9-5	带有磁放大器的起货机控制线路	113
§9-6	国产 HZD3.0/10.0 型直流起货机继电—接触器系统控制线路	118
§9-7	AEG 型直流起货机控制线路	125
§9-8	直流起货机电气设备的常见故障及其排除	130
第十章	交流电动起货机	131
§10-1	概述	131
§10-2	国产交流变极变速起货机控制线路分析	132
§10-3	恒功率变极调速起货机的改进	139
§10-4	恒转矩交流三速起货机	142
§10-5	瑞典 BBC 公司起货机控制线路	145

§10-6	交流绕线式电动起货机控制线路	147
第十一章	电动液压起货机	154
§11-1	概述	154
§11-2	液压系统	154
§11-3	电气系统工作原理	160
第十二章	电动起锚机	161
§12-1	起锚机的运行特点	161
§12-2	对锚机电力拖动提出的要求	162
§12-3	锚机控制线路特点	162
§12-4	电动起锚机控制线路	163

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	166
§13-1	概述	166
§13-2	舵和舵柱上的阻力转矩	168
§13-3	电动液压舵机的主要组成和基本工作原理	171
§13-4	变量变向油泵的工作原理	172
§13-5	分配阀式液压舵机	176
§13-6	单动操舵的工作原理	177
§13-7	随动操舵的工作原理	178
§13-8	自动操舵的工作原理	179
§13-9	自动舵装置的结构及各元件的作用	183
§13-10	自动舵的类型	184
§13-11	对自动舵装置的基本要求	186
§13-12	自动操舵的舵角	187
§13-13	信号在游隙元件中的传递	194
§13-14	操舵系统振荡讨论	198
第十四章	自动操舵仪	200
§14-1	红旗-V型(HQ-5型)自动操舵仪	200
§14-2	自动操舵仪的调整	215
§14-3	自动舵的维修	220
§14-4	HD-5L型自动操舵仪	227
§14-5	安休司(ANSCHUTZ)型自动操舵仪	233
§14-6	HSH型自动操舵仪	237
§14-7	SPERRY S.S.C型自动舵	252
§14-8	BROWN G.S型自动舵	262
第十五章	机舱辅机自动调节系统	269
§15-1	冷藏机的自动调节系统	269
§15-2	室内温度自动调节系统(空调)	275
§15-3	船舶辅助锅炉的自动控制	280

第一篇 电力拖动基础与电动机的自动控制线路

船舶辅机包括泵、通风机、冷藏机、空气压缩机、锅炉、起锚绞缆机、起货机、舵机、特种专用机械和为日常生活服务的机械等。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。电力拖动装置主要是由电动机、传动机构和控制设备三个环节组成的。根据电力拖动装置其操作的自动化程度，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泵和通风机等的电气设备，将讲述电力拖动的基础知识、控制电器及其简单的自动控制原理，着重分析电动机的起动自动控制线路。

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_f （也称生产机械的静态阻转矩）之间的相互作用。当 M 与 M_f 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 $M > M_f$ 或 $M < M_f$ 时，拖动系统产生角加速度，例如电动机在起动、调速、反转等过渡过程中，电动机的转速、电流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_f 相应的变化，直至 M 重新等于 M_f 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_f 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（如泵、通风机、起货机等）是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_f 而工作的。下面通过起货机的电力拖动系统说明电动机轴上的负载转矩 M_f 。

当起货机吊 G 吨货物（包括吊钩）时，在电动机轴上便作用一负载转矩 M_f ，见图1-1。如果已知起货机鼓轮的半径为 R 米，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_f 。

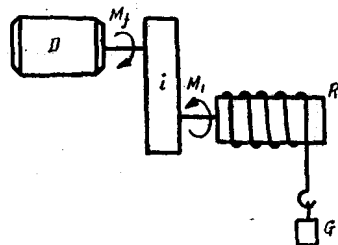


图1-1 起货机的负载转矩

的数值为

$$M_t = \frac{M_1}{\eta_i} = \frac{GR \times 10^3}{\eta_i} \text{ (公斤力} \cdot \text{米)} = 9.8 \times 10^3 \times \frac{GR}{\eta_i} \text{ (牛} \cdot \text{米)}$$

电动机轴上的负载转矩一般是阻碍运动的，但在一定条件下，也能促进运动。根据性质的不同，将电动机轴上的负载转矩分为两类。

1. 反抗性负载转矩

例如电动机轴上的磨擦转矩，泵与通风机在电动机轴上所造成的负载转矩等，都属于反抗性负载转矩。这种转矩的特点是，电动机无论正向旋转或者反向旋转，转矩总是阻碍电动机运转的。也就是说，当电动机转动的方向改变时，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、拉力和扭转等，在电动机轴上所造成的负载转矩，都属于位能性负载转矩。这种转矩的特点是，当电动机旋转方向改变时，转矩总是保持原来的作用方向。如图 1-1 中的 M_t ，当电动机以正方向旋转提升货物时，它起着阻碍电动机运转的作用；而当电动机以反方向下降货物时，它却起着帮助电动机运转的作用。

生产机械的负载转矩 M_t 可能与许多因素有关，在分析拖动系统时，常要了解 M_t 与转速、时间和行程的关系。当生产机械的转速变化时，其负载转矩也随之有规律性的变化。生产机械的转速与加到电动机轴上的负载转矩之间的关系，称为生产机械的机械特性（或称负载特性）。它可以用曲线或数学公式来表示。

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_t 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 1 表示。图 1-2 的横座标为转矩 M ，以牛·米（或公斤力·米）表示，纵座标为转速 n ，以转/分表示。

不同的生产机械，具有不同的机械特性。生产机械的机械特性，大体上可以分为三种主要类型。

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 $M_t = \text{常数}$ ，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以及供水高度不变的活塞泵等。

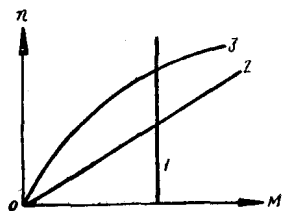


图1-2 生产机械的机械特性

2. 负载转矩与转速成正比变化的机械特性

这种类型的生产机械，负载转矩与转速呈线性关系，如图 1-2 中的特性 2 所示。例如直流他发电机的变流机组，当发电机的外接电阻 R 不变时，便具有这种机械特性。电动机拖动发电机发电时，电动机轴上的负载转矩 M_t 就是发电机的电磁转矩 M_F ，它随转速成比例变化，如图 1-3 所示。因为在这种情况下发电机电枢电流 $I_a = \frac{C_e \phi_F n}{R}$ （假定他发电机的

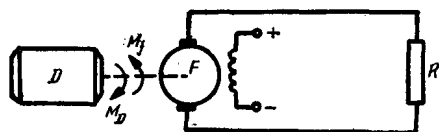


图1-3 直流他发电机组的负载转矩

磁通 ϕ_F 恒定）与转速成正比，因而电磁转矩

$$M_F = C_m \phi_F I_a = \frac{1}{R} C_e C_m \phi_F^2 n \text{ 与转速 } n \text{ 成正比。}$$

3. 负载转矩大致与转速的二次方成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呈抛物线，如图 1-2 中的特性 3 所示。例

如通风机、离心泵、螺旋桨等生产机械具有抛物线式的机械特性，这类机械特性又常叫通风机特性。

§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 变化规律的，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、转子或定子电路中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

如图 1-4 中特性 1 所示，当电动机转矩改变时，其转速不改变，例如同步电动机的机械特性。

2. 硬特性

如图 1-4 中的特性 2 和 4 所示，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以前的固有机械特性。

3. 软特性

如图 1-4 中的特性 3 所示，电动机的转速随着其转矩的增加而下降，而且下降的程度很大。例如串激电动机的固有机械特性。

直流复激电动机的固有机械特性介于第二类和第三类之间。有些电动机的机械特性和上述不同，其转速随转矩的增加而升高。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。无论在稳定运转过程中或在过渡过程中，均需满足生产机械在特性方面对电动机的要求。

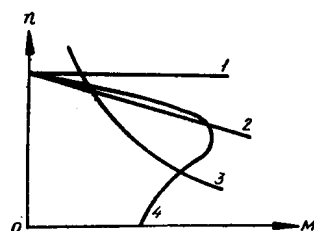


图 1-4 电动机的机械特性

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 之间的关系为 $n = f(M)$ 。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

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

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

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；

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

C_e ——电机的电势常数, $C_e = \frac{PN}{60a}$;

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

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e \phi} I_s = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_m \phi^2} M \\ &= n_0 - \frac{R}{C_e C_m \phi^2} M = n_0 - \Delta n \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中: n_0 ——理想空载转速, 即当 $M=0$, $U=E$ 时, 电动机的转速, $n_0 = \frac{U}{C_e \phi}$;

Δn ——电动机在某一 R 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的, $\Delta n = \frac{R}{C_e \phi} I_s = \frac{R}{C_e C_m \phi^2} M$ 。

如图 1-5 所示, 当电枢电路加额定电压、额定激磁, 但不串外加电阻 R_w 时, 可得固有机械特性 (图 b 中曲线 1); 当电枢电路中串外加电阻 R_w 时, 机械特性曲线斜率增加, 称为“软化”, 其机械特性为人为特性 (图 b 中曲线 2、3、4、5)。

并激电动机当负载变化时, 磁通 ϕ 可近似认为不变, 所以机械特性为一直线。其固有特性是一硬特性, 因此适用于拖动基本恒速运行和需要调速范围广的生产机械。

实际上, 电动机轴上输出的转矩不等于电磁转矩, 在电动状态下, 电动机的电磁转矩大于输出的轴上转矩 M_d 。

$$M - M_d = M_0$$

M_0 称为空载转矩。它是电动机空载运行时, 由电动机本身的风阻摩擦损耗和铁损造成的阻转矩。 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 $M \approx M_0$ 。电动机的理想空载转速 n_0 、额定电磁转矩 M_e 和额定轴上转矩 M_{de} 均可以根据电动机的额定数据求得, 即

$$C_e \phi_e = \frac{U_e - I_e R_s}{n_e}$$

$$M_e = C_m \phi_e I_e = \frac{C_e \phi_e}{1.03} I_e \text{ 公斤力} \cdot \text{米}$$

$$= 9.55 C_e \phi_e I_e \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

R_s 数据缺乏时, 可用估算公式计算 (参见 §2-1), 而额定轴上转矩, 可用下式求出:

$$M_{de} = 975 \frac{P_e}{n_e} \text{ 公斤力} \cdot \text{米}$$

$$= 9.55 \times 10^3 \frac{P_e}{n_e} \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

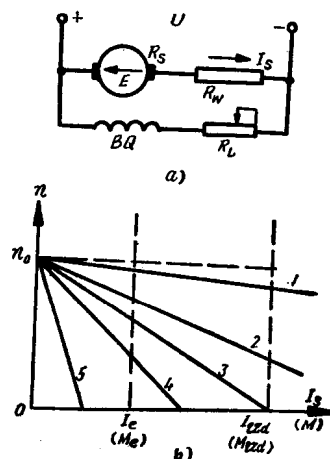


图1-5 直流并激电动机接线和机械特性

式中: P_e ——电动机额定功率, 千瓦。

由 M_e 和 M_{de} 可求出 M_0 。 n_0 可由下式计算:

$$n_0 = \frac{U_e}{C_e \phi_e} = \frac{U_e}{U_e - I_e R_s} n_e$$

利用 $M = M_e$, $n = n_e$ 和 $M = 0$, $n = n_0$ 两点, 便可绘制出并激电动机的固有特性。

二、直流串激电动机的机械特性

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表达。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。根据电动机额定数据和万用特性曲线, 便可换算和绘出以绝对值表示的固有特性, 如图 1-6 中特性 1。

串激电动机的固有特性是一软特性, 可以自动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。

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。

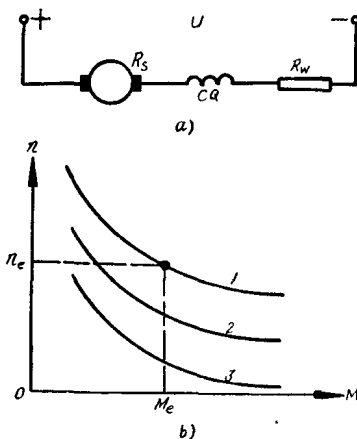


图 1-6 直流串激电动机接线和机械特性

三、直流复激电动机的机械特性

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, 求法同串激电动机, 利用万用特性曲线进行图解分析。

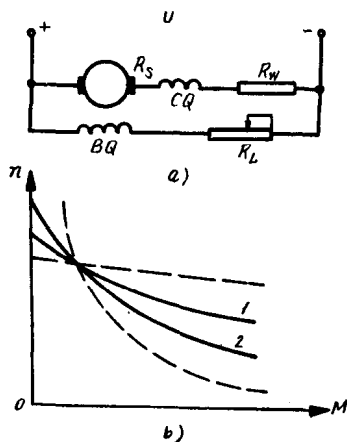


图 1-7 直流复激电动机接线和机械特性

一般采用积复激的形式, 即两激磁绕组接成磁势为相加 (同方向) 的形式。其固有机械特性如图 1-7 所示, 介于并激与串激电动机之间。以并激磁势为主时, 特性接近并激电动机的特性, 如特性 1; 以串激磁势为主时, 特性接近串激电动机的特性, 如特性 2。船舶辅机拖动用的复激电动机, 并激与串激磁势之比一般为 2:1。

复激电动机有理想空载转速 n_0 , 因为理想空载时, 有并激磁场存在。

四、异步电动机的机械特性

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

$$M = C_m \phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-5)$$

由上式可知电磁转矩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 (1-5) 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进行计算。图 1-8 为异步电机的简化等值电路。根据电机学推导出的转矩公式为

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

因为

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

所以

$$M = \frac{m_1 U^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

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

$$M = \frac{m_1 U^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega_1 \left[\left(\frac{r_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \text{ 牛} \cdot \text{米} \quad (1-6)$$

据式 (1-6), 令其导数 $\frac{dM}{dS} = 0$, 可求得产生最大转矩的临界转差率为

$$S_k = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (1-7)$$

将 (1-7) 式代入 (1-6) 式可得最大转矩为

$$M_k = \pm \frac{m_1 U^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2')} \text{ 牛} \cdot \text{米} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可见, 当频率 f_1 一定时, M_k 与 U^2 成正比, 而与转子电阻 r_2 无关。

上两式中, 正号为电动状态, 负号为再生制动状态。式中 ω_1 为同步角速度。

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{P}$$

由式 (1-6) 可见, 当电源电压 U 和频率 f_1 不变时, 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 $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$, n_1 是异步电机的同步转速, 如将转矩

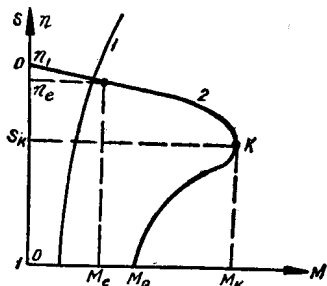


图1-9 异步电动机机械特性

1-生产机械的机械特性; 2-电动机的机械特性

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 1-9 特性 2 所示。

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, 能否稳定运行则与负载性质有关。

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 $S_e = 0.01 \sim 0.06$ ，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

$$\lambda_m = \frac{M_k}{M_e} = 1.8 \sim 2.4$$

过载能力 λ_m 表明异步电动机短时过载的本领。当负载转矩大于 M_k 时，电动机将拖不动而停转。

在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。当转子电路外接电阻时， M_k 不变，而 S_k 变化，其特性为人为机械特性，如图 1-10 所示。

在电力拖动的实际计算中，一般不用电机的参数进行繁琐的计算，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 $M = f(S)$ 。将 (1-6)、(1-8) 两式相比，并将 (1-7) 式代入可得实用转矩公式，又称机械特性简化方程式，即

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2(x_1 + x'_2) \frac{r'_2}{S}}{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} = \frac{2}{\frac{r'_2/S}{x_1 + x'_2} + \frac{x_1 + x'_2}{r'_2/S}} = \frac{2}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k}}$$

因而

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k}} \quad (1-9)$$

根据产品目录供给的额定数据可计算 M_k 和 S_k ：

$$M_e = 975 \frac{P_e}{n_e} \text{ 公斤力} \cdot \text{米} = 9.55 \times 10^3 \frac{P_e}{n_e} \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

$$M_k = \lambda_m M_e$$

当 $M = M_e$ 时， $S = S_e$ ，由式 (1-9) 可得下式：

$$S_k = S_e (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \quad (1-10)$$

$$\text{式中： } S_e = \frac{n_1 - n_e}{n_1}。$$

将所得的 M_k 、 S_k 值代入 (1-9) 式，便得固有的机械特性方程式。

如将实用转矩公式 (1-9) 变换一下，可得下式：

$$S = S_k (\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 1}) \quad (1-11)$$

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。

由式 (1-11) 可得下面的机械特性方程式：

$$n = n_1(1 - S) = n_1[1 - S_k(\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 1})] \quad (1-12)$$

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，临界转差率发生变化，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转时， $\alpha =$ 常数，据式 (1-11) S 与 S_k

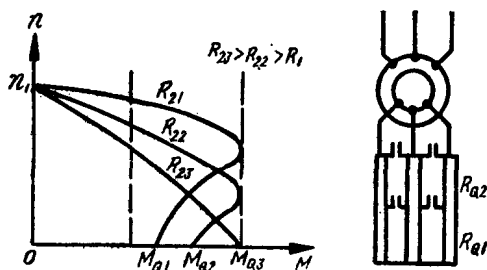


图1-10 绕线式异步电动机转子串电阻的人为机械特性

成比例, 即

$$\frac{S}{S'} = \frac{S_k}{S'_k} = \frac{r'_2}{R'_2} = \frac{r_2}{R_2}$$

或者

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

转子绕组电阻 r_2 可用下式求得:

$$r_2 = \frac{1000 P_e S_c}{3 I_0^2 (1 - S_c)} \quad (1-13)$$

由以上分析可见, 当转子电路电阻增加时, 其转差率随着成比例的增加。

§1-3 电动机的工作状态及其表示方法

电机具有可逆性, 它既可作为电动机工作, 也可以作为发电机工作。当电机作为电动机工作时, 其电磁转矩方向与旋转方向相同, 电磁转矩是驱动转矩; 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。

作为电力拖动系统的电动机也有两种工作状态, 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, 这种工作状态为电动状态; 但有时电动机也用在相反的情况, 即用它所产生的电磁转矩来阻止其轴上的负载运动, 这种工作状态为制动状态。

为了分析方便, 把电动机的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 1-11 所示。现假定逆时针方向为正方向, 顺时针方向为负方向。从图中可以看出, 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 n 为正; 在第四象限中, 电磁转矩 M 为正, 转速 n 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。

在以后的章节中将结合具体的电力拖动机械, 根据电动机的不同工作状态, 在 $n-M$ 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可以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 1-11 中, 已假定了电动机的转速 n 的正方向, 现必须以此为根据, 规定负载转矩 M_f 的方向, M_f 以顺时针为正方向, 而以逆时针为负方向, 即在 $n-M$ 座标中, 电动机的 M 与 n 所规定的正方向相同, 而生产机械的 M_f 与 n 所规定的正方向相反。

图 1-12 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 1-13 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。

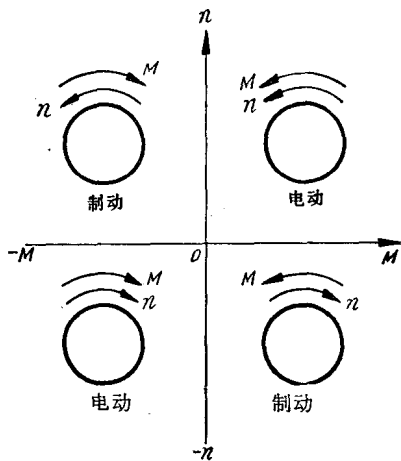


图1-11 电动机两种工作状态的表示方法

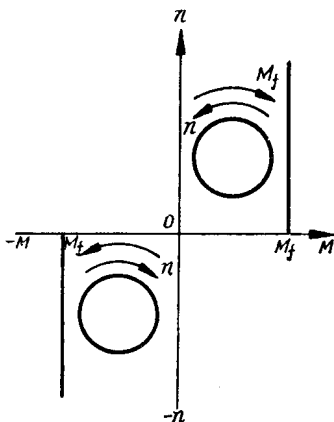


图1-12 反抗性负载的机械特性

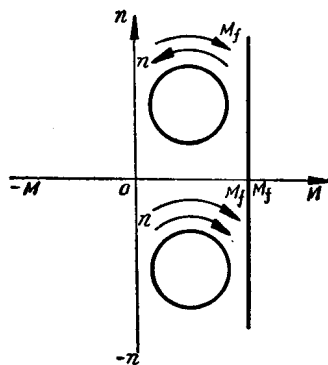


图1-13 位能性负载的机械特性

第二章 电动机的起动

电动机的起动，是指电动机接通电源后，转速由零上升到稳定转速的全部过程。虽然起动时间不长，但对电机本身和电力系统的影响却很大。

起动时，电动机的电磁转矩 M 大于负载转矩 M_f ，拖动系统加速；当转速升到一定程度使 $M = M_f$ 时，拖动系统稳定运行，起动过程结束。如起动时 $M < M_f$ ，则起动不起来，或者电动机反被生产机械的 M_f 拖动运转。

生产中要在保证电机安全与电力系统正常运行的前提下，充分利用拖动系统的过载能力，使电动机产生足够大的起动转矩，以满足缩短起动时间，提高生产率的要求。

§2-1 直流电动机的起动

一、直流电动机串起动电阻起动

直流电动机在全电压下起动时，通常在电枢电路中串入起动电阻。直流电动机无外加电阻时，电枢电流 I_s 为

$$I_s = \frac{U - C_e \phi n}{R_s}$$

电动机起动瞬间，因惯性缘故，电动机转子不能立即转动，转速 $n = 0$ ，所以反电势 $E = C_e \phi n = 0$ ，此时的电枢电流为起动电流 I_q ，即堵转电流

$$I_q = \frac{U}{R_s}$$

因直流电动机的电枢内阻 R_s 一般很小，因此 I_q 很大。一般直流电动机全电压直接起动时， I_q 可达额定电流的 10~20 倍。

例如直流并激电动机，额定功率 $P_e = 16$ 千瓦，额定电压 $U_e = 220$ 伏，额定电流 $I_e = 84$ 安，额定转速 $n_e = 700$ 转/分，电枢内阻 $R_s = 0.175$ 欧，在全电压下直接起动时，其起动电流为

$$I_q = \frac{U_c}{I_s} = \frac{220}{0.175} = 1257 \text{ (安)}$$

起动电流与额定电流的比值为

$$\frac{I_q}{I_c} = \frac{1257}{84} \approx 15$$

由于电枢绕组的自感作用, 实际起动电流要略小一些。这样巨大的起动电流是电动机过载能力所不允许的, 它可能引起以下不良后果;

- (1) 破坏正常换向, 火花很大, 烧坏换向器;
- (2) 破坏电枢绕组的绝缘, 甚至烧断绕组;
- (3) 电枢绕组中电动应力很大, 使绕组崩裂;
- (4) 电动机起动转矩很大, 将使拖动装置的运动机件受到严重的冲击;
- (5) 船舶电网电压过分降低, 影响其它用电设备的正常工作。

因此, 一般直流电动机在全电压下起动时, 都必须串入起动电阻, 以限制起动电流和相应的起动转矩, 使它们限制在允许的范围内。例如船舶上动力用直流电动机, 一般都不能直接起动, 但对于容量小于 0.5 千瓦的直流电动机, 由于其电枢内阻 R_s 比较大, 且转子惯性比较小, 转速上升得很快, 因而可以直接起动。

二、串起动电阻的特性

电动机电枢电路中串入电阻 R_w 后, 其转速特性和机械特性也就随之改变, 其转速方程为

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_s + R_w}{C_e \phi} I_a$$

机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_s + R_w}{C_e C_m \phi^2} M = n_0 - \Delta n$$

以直流并激电动机为例, 如图 1-5 所示, 特性倾斜的程度和电枢电路内的电阻值有关, 当 R_w 增加时, Δn 增加, 特性倾斜程度增大。图中特性 1 是固有特性, 其他特性是电枢电路串电阻的人为特性。电动机理想空载时, 无论 R_w 多大, Δn 均为零, 因此固有特性和人为特性都相交于一点 n_0 。

图 1-6 和图 2-1 为串激电动机和复激电动机的固有特性与电枢电路内串电阻的人为特性。串激和复激电动机的起动特性比并激电动机好, 起动转矩倍数大。

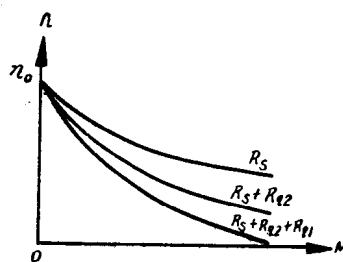


图2-1 复激电动机固有特性与人为特性

三、起动电阻计算

起动电阻的大小将决定电动机的起动电流 I_q 和起动转矩的数值。起动电流或起动转矩不能取得过大, 但也不能取得过小, 过小了起动不起来或起动时间过长, 不能满足生产上的需要。因此决定起动电阻的大小时, 必须考虑充分利用拖动装置的过载能力, 使电动机产生尽可能大的起动转矩。一般情况下, 取最大的起动电流 I_{qzd} 为额定电流 I_c 的 2~2.5 倍。