

高等学校试用教材

船舶电力拖动 自动控制系统

(船电专业用)

大连海运学院 冒天诚 主编

人民交通出版社

高等学校试用教材

船舶电力拖动自动控制系统

(船电专业用)

大连海运学院 冒天诚 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分十六章。第一章电力拖动系统的稳态和动态特性，第二至第五章为电动机的起动、制动、调速以及容量选择和有关实用计算方法，第六章继电器接触器控制系统，第七章静止元件逻辑控制，第八章磁放大器控制系统，第九至第十三章为可控硅整流、逆变装置的原理、可控硅直流调速系统的静态和动态性能，第十四章可控硅变频装置原理和可控硅交流调速系统，第十五章随动系统，第十六章船舶航向自动调整系统。

本书为海运院校船电专业的试用教材，也可供船舶电机员和有关船舶电气自动化的科研工程技术人员参考。

高等学校试用教材
船舶电力拖动自动控制系统
(船电专业用)

大连海运学院 冒天诚 主编

人民交通出版社出版

(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

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: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 30.75 插页: 4 张 字数: 765千

1981年8月 第1版

1981年8月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,400册 定价: 3.20元

前 言

本书为海运院校船电专业试用教材。在编写过程中，为了加强基础理论，我们以电力拖动自动控制理论和控制系统的主要类型为中心，组织、安排了全书的内容，并结合国内、外船舶机械电力拖动自动控制典型线路予以分析。

为了便于船舶电机员和电工的自学提高，书中对所涉及的专业基础内容做了必要的阐述。

此外，考虑到电力半导体技术（主要是可控硅）和静止元件控制等在船舶电力拖动自动控制中的应用日益广泛，本书比较详细地予以阐述，还介绍了国内、外船舶中应用的几种线路。

本书由冒天诚主编，第一至第七章由陆祥润编写，第八章由鲍廷秀编写，第九至第十五章由冒天诚编写，第十六章由于佑宗、纪瑞才编写。孙力、谭跃、韩运铎等参加了本书的抄写、校订等工作。

编写本书时，远洋运输公司等单位给予大力支持，并提供了资料。特别是上海海运学院船舶电气自动化教研室李杰人、朱纪萱、叶成民、励始民等审阅并提出许多宝贵意见，于此谨致谢意。

由于水平所限，时间仓促，书中一定有不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 船舶电力拖动系统运行的基础知识	1
第一节 电动机的电磁力矩和电动机轴上的负载力矩	1
第二节 电动机的固有机械特性	1
第三节 生产机械的机械特性	12
第四节 电动机的工作状态	14
第五节 负载力矩与旋转方向的关系	15
第六节 动态力矩和电力拖动运动方程式	16
第七节 转动惯量和飞轮惯量的折算	18
第八节 负载力矩的折算	22
第九节 电力拖动系统运行的稳定状态及稳定性	23
第十节 分析电力拖动系统过渡状态的基本方法	24
第十一节 电力拖动系统的转动惯量对电动机在过渡状态中能量消耗的影响	40
第二章 电动机的起动	44
第一节 概述	44
第二节 直流电动机的起动	44
第三节 直流电动机起动的过渡过程	54
第四节 异步电动机的起动	57
第三章 电动机的制动	67
第一节 概述	67
第二节 直流电动机的能耗制动	68
第三节 直流电动机的再生制动	74
第四节 直流电动机的反接制动	75
第五节 异步电动机的再生制动	77
第六节 异步电动机的能耗制动	79
第七节 异步电动机的反接制动	84
第八节 异步电动机制动的过渡过程	86
第四章 电力拖动的转速调节	89
第一节 调速的基本指标	89
第二节 直流电动机转速调节的方法	91
第三节 电枢电路串电阻调速	91
第四节 改变电动机电源电压的调速	92
第五节 电枢分路的调速	99
第六节 改变激磁的调速	102
第七节 异步电动机的调速方法	108

第八节	改变磁极对数的调速	109
第九节	改变转差率的调速	110
第十节	异步电动机的变频调速	121
第五章	电动机容量的选择	123
第一节	概述	123
第二节	在长期工作模式下电动机的发热和冷却	125
第三节	短时工作模式下电动机的发热和冷却	127
第四节	重复短期工作模式下电动机的发热和冷却	130
第五节	用等值电流法、等值力矩法和等值功率法选择电动机的容量	131
第六节	用等值效率法选择重复短期运行电动机的容量	134
第七节	船舶机械电动机容量选择举例	138
第六章	电力拖动继电接触器控制系统	176
第一节	概述	176
第二节	控制线路图示法及符号	178
第三节	继电器接触器的触头系统	179
第四节	继电器接触器的电磁机构	183
第五节	鼠笼式异步电动机直接起动控制线路——基本控制线路之一	189
第六节	失压和欠压保护	190
第七节	短路保护	190
第八节	过载保护	192
第九节	多地点控制——基本控制线路之二	193
第十节	水泵的自动控制线路——基本控制线路之三	193
第十一节	电动机正反转控制线路及联锁控制——基本控制线路之四	194
第十二节	电流控制——基本控制线路之五	195
第十三节	延时控制——基本控制线路之六	196
第十四节	转速控制——基本控制线路之七	198
第十五节	主令控制——基本控制线路之八	199
第十六节	行程控制——基本控制线路之九	200
第十七节	船舶继电接触器自动控制线路举例(一)——国产船用交流电动机起货机的控制线路分析	201
第十八节	船舶继电接触器自动控制线路举例(二)——多输出直流 $F-D$ 交流起货机控制线路分析	207
第十九节	船舶继电接触器自动控制线路举例(三)——2吨自动立式燃油锅炉控制线路	209
第二十节	看图查线方法	214
第二十一节	控制线路的测绘	215
第二十二节	船舶电气控制设备的维护与保养	216
第七章	静止元件控制	219
第一节	概述	219
第二节	列写继电接触器控制线路的逻辑函数	219

第三节	静止逻辑元件及其表达式	221
第四节	由继电器逻辑电路转换到静止元件逻辑电路	225
第五节	静止元件控制线路的辅助设备	229
第六节	完整的静止元件控制线路	230
第七节	静止元件控制线路的设计	232
第八章	磁放大器控制系统	237
第一节	磁放大器的工作原理	237
第二节	磁放大器的工作特性及放大倍数	240
第三节	有反馈的磁放大器	241
第四节	带位移绕组的磁放大器	243
第五节	双拍磁放大器	243
第六节	快速磁放大器	246
第七节	磁放大器舵机控制系统	251
第八节	磁放大器起货机控制系统	255
第九节	磁放大器的检查和试验	260
第九章	可控硅电力拖动主电路	263
第一节	可控硅元件的作用和特性	263
第二节	可控硅的基本参数	263
第三节	可控硅的型号和规格	266
第四节	可控硅整流装置	267
第五节	三相零式整流电路	268
第六节	共阳极整流电路	272
第七节	三相全控桥式整流电路	273
第八节	可控硅—电动机拖动系统	276
第九节	可控硅的保护	281
第十节	可控硅的串联和并联	288
第十章	可控硅的触发电路	291
第一节	可控硅对触发电路的要求	291
第二节	同步信号为正弦波的晶体管触发线路	293
第三节	同步信号为锯齿波的触发线路	296
第四节	利用小可控硅触发大可控硅的触发线路	298
第五节	触发电路控制信号与主电路的同步问题	299
第十一章	可控硅不可逆调速系统	301
第一节	反馈控制的基本原理	301
第二节	闭环控制和开环控制	302
第三节	转速负反馈自动调速系统	303
第四节	调速系统静特性的分析	306
第五节	无静差调速系统	313
第六节	电压负反馈自动调速系统	317
第七节	电压负反馈和电流正反馈的自动调速系统	317

第八节	电流负反馈的应用	320
第九节	转速、电流双闭环调速系统	323
第十节	带有激磁控制的自动调速系统	328
第十一节	反馈用检测元件	330
第十二章	可控硅直流可逆调速系统	334
第一节	可控硅可逆电路	334
第二节	可控硅—电动机可逆系统的反向过程	335
第三节	三相零式整流电路的逆变工作状态	336
第四节	可控硅可逆线路的环流	338
第五节	三相桥式可逆电路	344
第六节	有环流反电枢可逆自动调速系统	346
第七节	无环流电枢反向可逆自动调速系统	349
第八节	直流可控硅锚机、绞缆机控制系统	355
第九节	直流可控硅起货机控制系统	358
第十节	可控硅船舶电力推进系统	360
第十三章	可控硅直流调速系统动态分析和动态校正	364
第一节	自动调速系统的过渡过程——动态过程	364
第二节	传递函数和方块图	365
第三节	带比例调节器的可控硅直流调速系统动态性能的分析	366
第四节	二阶系统控制过程的规律	375
第五节	调节器的应用	377
第六节	可控硅—电动机双环控制系统控制过程动态性能分析及校正	385
第七节	扰动过程的动态性能	389
第八节	串联校正和反馈校正	392
第十四章	可控硅交流调速系统	396
第一节	变频调速系统的基本原理	396
第二节	逆变器（交—直—交变频器）的工作原理	396
第三节	间接（交—直—交）变频调速系统	404
第四节	直接（交—交）变频调速系统	406
第五节	船用起重机械可控硅变频控制系统	410
第六节	船用起重机械双速电动机直接变频调速控制系统之二	413
第七节	可控硅交流调压电路	414
第八节	交流异步电动机调压调速系统	418
第九节	线绕式异步电动机可控硅串级调速	419
第十五章	随动系统	422
第一节	随动系统的基本概念	422
第二节	随动系统的输入信号和品质指标	425
第三节	输入典型信号时随动系统的分析	428
第四节	微分、积分装置对随动系统品质的影响	434
第十六章	航向自动调节系统	443

第一节	舵的作用原理.....	443
第二节	自动舵的工作原理.....	444
第三节	自动舵的分类.....	446
第四节	对自动舵的基本要求.....	447
第五节	比例舵.....	448
第六节	比例—制动舵.....	451
第七节	比例—微分舵.....	454
第八节	气候调整.....	459
第九节	“向阳-3”型自动操舵仪.....	461
第十节	“HD-5L”型自动操舵仪.....	472
第十一节	“安修斯 (ANSHÜTZ)”型自动操舵仪.....	474
附录	自动控制线路国内、外常用图形符号对照表.....	477

第一章 船舶电力拖动系统 运行的基础知识

第一节 电动机的电磁力矩和电动机轴上的负载力矩

电动机拖动生产机械运行，不论是怎样千差万别，但归结起来只有两种运行状态：一种是相对的稳定状态，此时电动机以恒定的转速运行或静止不动（堵转）；另一种是过渡状态，如电动机在起动、制动、调速、反向时转速显著变动的状态。产生这两种运行状态的内因是电动机的电磁力矩 M 和加于电动机轴上的负载力矩 M_L （它是由生产机械的负载及拖动系统运动部分的摩擦等阻力而产生的静态阻力矩）。

为了掌握电动机的起动、制动、调速等过程，就有必要深入了解电动机转速 n 随电磁力矩 M 变化的规律，即 $n = f(M)$ 和转速 n 随负载力矩 M_L 变化的规律，即 $n = \varphi(M_L)$ 。前者叫电动机的机械特性，后者叫生产机械的机械特性，此两特性是研究分析电力拖动系统运行的主要特性。为此，研究电力拖动系统的运行就必需抓住对电动机的机械特性和生产机械的机械特性的分析和研究。下面先分析电动机的机械特性和生产机械的机械特性（对船舶来说就是船舶机械的机械特性），然后仍以 M 和 M_L 的矛盾运动来分析研究电力拖动系统的等速运行状态和起动、制动、调速等过渡状态。

第二节 电动机的固有机械特性

各种电动机都有它自己固有的机械特性（也叫自然特性，即在电动机铭牌所标示的额定条件下，转子或定子电路中不串入任何电阻时的机械特性）和无数人为的机械特性（根据运行的要求，改变电动机的参数，如电压、频率、磁通、在转子或定子电路中串入电阻等而得到的机械特性）。本章只讨论电动机的固有机械特性，电动机的人为机械特性将在以后有关章节结合电动机的起动、制动、调速等过程来分析研究。

一、直流并激电动机的固有机械特性

直流电动机的机械特性可从它的电势方程式求得。当电机在稳定状态下运行时，有

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

而
$$E = \frac{pN}{60a} \phi n = C_E \phi n \quad (1-2)$$

式中： U ——电动机的外加电压，伏；

E ——电枢的感应电势，伏；

I_a ——电枢电流，安；

$R = R_a + R_w$ ——电枢电路的总电阻，包括电枢电阻 R_a 和外加电阻 R_w ，欧；

N ——切割磁力线的电枢导体数;
 p ——主磁极对数;
 a ——电枢绕组的并联支路对数;
 ϕ ——一个磁极的磁通, 韦伯 (伏秒);
 n ——转速, 转/分。

将式 (1-2) 代入式 (1-1) 得直流电动机的转速特性方程式

$$n = \frac{U - I_a R}{C_E \phi} \quad (1-3)$$

又因电机的电磁力矩 M 为

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a = C_M \phi I_a \text{ 牛} \cdot \text{米} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-3) 可得直流电动机的机械特性方程式

$$n = \frac{U}{C_E \phi} - \frac{R}{C_E C_M \phi^2} M = n_0 - \Delta n \quad (1-5)$$

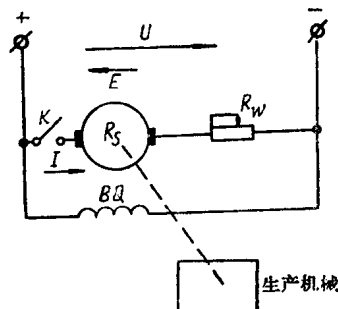


图1-1 直流并激电动机的接线图

并激电动机的接线图如图1-1所示。它的固有机械特性是当外加电压等于额定电压 U_e , 磁通为额定磁通 ϕ_e , 电枢电路中仅有电枢电阻 R_s 时的特性, 此时式 (1-5) 变为

$$n = \frac{U_e}{C_E \phi_e} - \frac{R_s}{C_E C_M \phi_e^2} M = n_{0e} - \Delta n \quad (1-6)$$

当负载变化时, 并激电动机的磁通 ϕ 可近似地看作不变, 因此 $\frac{U_e}{C_E \phi_e}$ 和 $\frac{R_s}{C_E C_M \phi_e^2}$ 可认为是常数。这样并激电动机的固有机械特性是一倾斜度很小的直线。象这样的特性通常叫做硬特性, 如图1-2中的特性1所示。从式 (1-5) 和 (1-6) 可知, 当 $M=0$ 时, 电机的转速为 $\frac{U}{C_E \phi}$ 或 $\frac{U}{C_E \phi_e}$, 称为理想空载转速, 即

$$n_0 = \frac{U}{C_E \phi} \text{ 或 } n_{0e} = \frac{U_e}{C_E \phi_e} \quad (1-7)$$

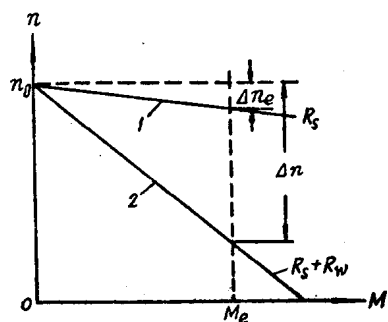


图1-2 直流并激电动机的固有机械特性

从已知并激电动机的铭牌数据可以作出它的固有机械特性。在式 (1-6) 中, 如果缺少 R_s 数据, 可从铜耗求得, 铜耗近似地用电动机额定负载时全部损耗的一半来估算

$$R_s = 0.5(1 - \eta_e) \frac{U_e}{I_e} \quad (1-8)$$

电动机在额定负载时的效率为

$$\eta_e = \frac{1000 P_e}{U_e I_e} \quad (1-9)$$

式中: P_e ——电动机的额定功率, 千瓦;

U_e ——电动机的额定电压, 伏;

I_e ——电动机的额定电流, 安。

$C_E \phi$ 可从式 (1-3) 得

$$C_E \phi = \frac{U - I_a R_a}{n} \quad (1-10)$$

由式(1-2)及(1-4)中的 C_E 及 C_M 值得

$$\frac{C_E}{C_M} = \frac{\frac{pN}{60a}}{\frac{pN}{2\pi a}} = 0.105 \quad (1-11)$$

〔例1-1〕 有一台 ZZ-42型并激电动机，其额定功率 $P_e = 16$ 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，作它的固有特性。

$$\text{解: } R_a = 0.5(1 - \eta_e) \frac{U_e}{I_e} = 0.5 \left(1 - \frac{1000 \times 16}{220 \times 84} \right) \frac{220}{84} = 0.176 \text{ (欧)}$$

$$C_E \phi = \frac{U_e - I_e R_a}{n_e} = \frac{220 - 84 \times 0.176}{700} = 0.293$$

$$\text{由式(1-11)} \quad C_M \phi = \frac{C_E \phi}{0.105} = \frac{0.293}{0.105} = 2.79$$

将所求得的值代入式(1-6)得所求电动机的固有机械特性方程式为

$$n = \frac{220}{0.293} - \frac{0.176}{0.293 \times 2.79} M$$

$$n = 751 - 0.215 M$$

根据上式作并激电动机的固有机械特性，如图1-3所示。

并激电动机的固有机械特性的特点是：(1)机械特性是一直线；(2)机械特性是一硬特性（电动机负载增加时，转速下降较少）。因此，它适用于拖动基本上要求恒速运行的生产机械，如泵与通风机等。

如在并激电动机的电枢电路中串入外接电阻 R_w （图1-1），则它的人为机械特性可按式(1-5)作出，如图1-2中的特性2所示。它的倾斜度比特性1大，故特性较软。现比较式(1-5)和(1-6)，当力矩相同时，人为特性的转速降 Δn 大于固有特性的转速降。

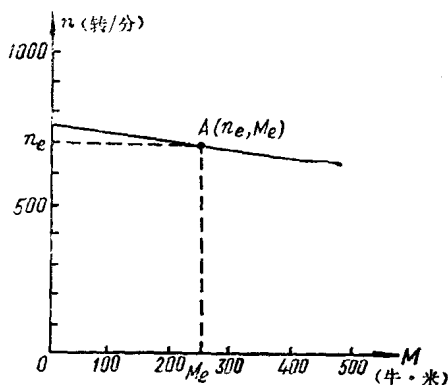


图1-3 并激电动机的固有机械特性的绘制

二、直流串激和复激电动机的固有机械特性

串激电动机的接线图如图1-4所示。与并激机一样，串激电动机也根据电势方程式(1-1)求得转速特性方程式(1-3)及机械特性方程式(1-5)，即

$$n = \frac{U}{C_E \phi} - \frac{R}{C_E C_M \phi^2} M$$

式中： $R = R_a + R_{CQ}$ （ R_{CQ} 为串激绕组的电阻）。

与并激机不同的是串激机的励磁绕组与电枢串联，磁通 ϕ 随电枢电流（负载）的变化与磁化曲线相似。当负载力矩很大时，磁路饱和，此时如负载变动， ϕ 近似不变。因 $M = C_M \phi I$ ，故 $M \propto I$ ，机械特性与并激机的相接近。当负载

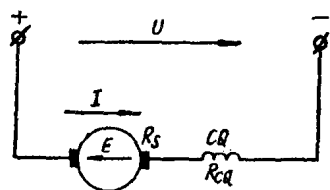


图1-4 直流串激电动机的接线图

力矩较小时，电流也较小，磁路不饱和， $\phi \propto I$ ， $M \propto I^2$ ，机械特性接近于双曲线，串激电动机的固有机械特性如图 1-5 所示。它具有以下特点：

1. 固有特性是一软特性（电动机负载增加时，转速下降较多）

它适用于拖动具有冲击性负载的生产机械，如舵机、锚机、起货机等。当遇到冲击负载时，电枢电流突然猛增，转速也骤然下降，拖动系统转速的下降引起系统的动能减少，放出的动能相对地减少了电能的输入。这样在遇到冲击性负载时，能避免出现大的电流和功率的冲击。

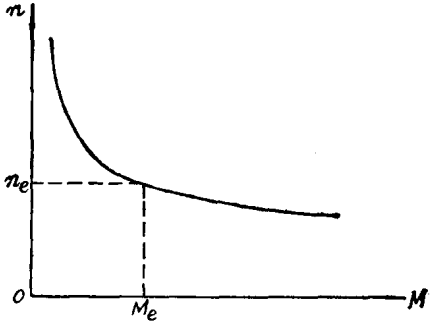


图1-5 串激电动机的固有机械特性

2. 没有理想的空载转速

从式(1-3)可见，当 M 趋近于零时（电动机的理想空载）， ϕ 趋近于零， n 趋近于无穷大。实际上空载时，由于电机存在摩擦损失和风损以及总还有一定的剩磁，因此转速不会是无穷大，但也高达额定转速的5~6倍，这是电动机机械强度所不能允许的。因此，应用串激电动机时，一般不允许用皮带传动，因为皮带断裂或滑脱，会造成串激电动机空载而发生“飞车”事故。

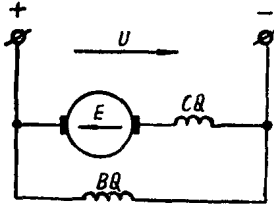


图1-6 直流复激电动机的接线图

现在再来看复激电动机的固有机械特性。从复激电动机的接线图1-6可知，它有并激绕组 BQ 和串激绕组 CQ ，一般接成积复激，所以复激电动机的机械特性介于并激与串激之间，视并激与串激绕组磁势之比的大小而定。表 1-1 为几种国产直流电动机并激与串激绕组磁势之比。

表1-1

电 动 机 型 号	串激绕组占总励磁安匝的百分比	并激绕组占总励磁安匝的百分比
ZZY-H 型船用起重串激电动机 ZZY 型起重冶金用串激电动机 ZZ、ZZK 型起重冶金用串激电动机	90	10
ZZY-H 型船用起重串激电动机	70	30
ZZ、ZZK 型起重冶金用复激电动机	50	50
ZZY-H 型船用起重复激电动机 ZZY 型起重冶金用复激电动机	30	70
ZZY-H 型船用起重并激电动机 ZZY 型起重冶金用并激电动机	10	90

表1-1中电动机有串激、复激、并激之分，但从电力拖动机械特性的角度来看，均属复激电动机的范畴。

复激电动机的固有机械特性如图1-7所示。图中特性 2 是并激为主的，特性 4 是串激为主的，特性 3 是串激和并激并重的。从这些特性可见，与串激机不同之处是它有理想空载转速 n_0 ，此 n_0 仅由并激绕组所产生的磁通 ϕ_0 来决定，即

$$n_0 = \frac{U}{C_E \phi_0} \tag{1-12}$$

串激与复激电动机的机械特性方程式虽也可用式 (1-5) 来表示, 但式中的 ϕ 不是常数而是电枢电流的函数, 此函数关系所表示的曲线就是通常叫的磁化曲线。因为没有准确的代表磁化曲线的分析公式, 所以也很难得到串激电动机机械特性曲线的准确分析式子。在船舶电力拖动的计算中有时采用串激和复激电动机的近似表达式。

对串激电动机可根据铭牌数据近似地用下式表达其机械特性:

$$Mn^x = M_c n_c^x = C \quad (1-13)$$

式中: $x \approx 2.5 \sim 3.3$, 低限对功率较小电机, (其额定力矩在 $60 \text{ 牛} \cdot \text{米}$ 左右) 高限对功率较大电机 ($M_c \approx 500 \text{ 牛} \cdot \text{米}$ 左右)。

若 P 、 M 、 n 分别以千瓦、牛·米、转/分表示, 则

$$M = \frac{1000P}{\omega} = \frac{1000P}{\frac{2\pi n}{60}} = 9550 \frac{P}{n} \quad \text{牛} \cdot \text{米} \quad (1-14)$$

或

$$P = \frac{Mn^{\text{①}}}{9550} \quad \text{千瓦} \quad (1-15)$$

由产品目录得

$$M_c = 9550 \frac{P_c}{n_c} \quad \text{牛} \cdot \text{米}$$

所以

$$C = M_c n_c^x$$

〔例1-2〕 今有一台 ZZ-41型直流串激电动机, 其额定功率 $P_c = 16 \text{ 千瓦}$, 额定电流 $I_c = 86 \text{ 安}$, 额定电压 $U_c = 220 \text{ 伏}$, 额定转速 $n_c = 650 \text{ 转/分}$ 。试用近似解析式作它的固有机械特性。

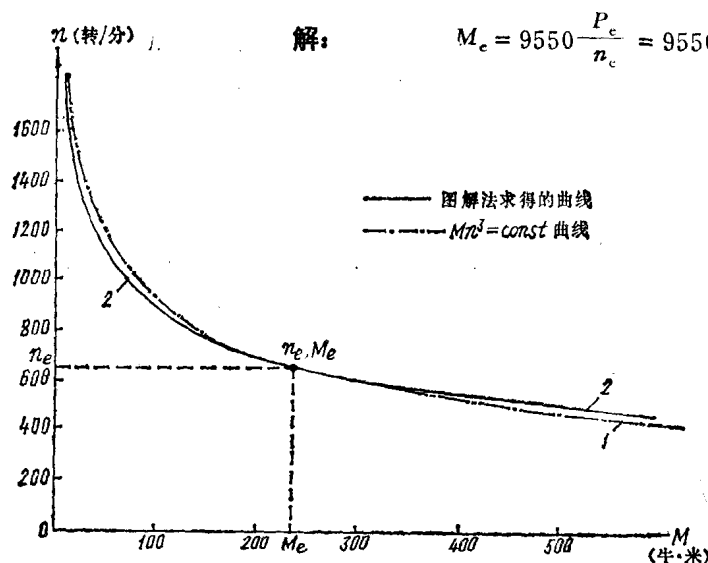


图1-8 求作串激电动机的固有特性

取 $x = 3$, 则所求串激机固有特性由式 (1-13) 为

$$Mn^3 = 235 \times 650^3 = 6.45 \times 10^{10}$$

根据上式取一系列 n_i 值得相应的 M_i 值填入表 1-2, 且绘出所求串激机的固有特性如图 1-8 所示, 图中曲线 2 是实测特性, 可见若 x 值取得恰当, 用近似解析式所作的固有机机械特性与实测特性比较接近。

复激电动机也可根据铭牌数据近似地用下式表达其机械特性:

① 如 M 以公斤力·米, n 以转/分计 则 $P = \frac{Mn}{975} \text{ 千瓦}$

表1-2

n, 转/分	400	500	600	650 (n_c)	700	800	900	1000	1200	1500	1650	1800
M, 牛·米	1007.8	516	298.6	235 (M_c)	180	125.9	88.5	64.5	37.3	19.1	14.4	11.0

$$M = \frac{\beta^2 M_c n_c^2}{(\beta^2 - 1)n^3} - \frac{M_c n_c}{(\beta^2 - 1)n} \quad (1-16)$$

式中, $\beta = \frac{n_0}{n_c} = 2 \sim 3$ (n_0 ——复激电动机的空载转速), 视复激程度大小而定, 串激程度高的取高限。

式(1-16)推导如下。假定复激电动机运行于磁化曲线的饱和部分, 它的总安匝与磁通的平方成正比例, 即

$$\Phi^2 = KAW_{\Sigma} = K(AW_p + AW_c)$$

式中: AW_p ——并激绕组的安匝数;

AW_c ——串激绕组的安匝数。

在空载时

$$\Phi_0^2 = KAW_p$$

则

$$\Phi^2 = \Phi_0^2 + KW_c I_s = \Phi_0^2 + b_1 I_s = a_0 + b_1 I_s \quad (1-17)$$

式中: $a_0 = \Phi_0^2$; $b_1 = KW_c$ 。

电动机的电磁力矩 $M = C_M \Phi I_s$, 转速 $n = \frac{E}{C_E \Phi}$, 则

$$M = C_M I_s \sqrt{a_0 + b_1 I_s}$$

$$n = \frac{E}{C_E \sqrt{a_0 + b_1 I_s}}$$

$$\therefore M = C_M \left(\frac{E^2}{C_E^2 b_1 n^2} - \frac{a_0}{b_1} \right) \sqrt{a_0 + \frac{E^2}{C_E^2 n^2} - a_0} = \frac{A}{n^3} - \frac{B}{n} \quad (1-18)$$

$$\text{式中: } A = \frac{C_M E^3}{C_E^2}, \quad B = \frac{C_M E a_0}{C_E b_1}。$$

当 $M = 0$ 时, $n = n_0$, 代入式(1-18)得 $B = \frac{A}{n_0^2}$; 当 $M = M_c$ 时, $n = n_c$, 代入式(1-18)得

$$A = \frac{\beta^2 M_c n_c^2}{\beta^2 - 1}, \quad B = \frac{M_c n_c}{\beta^2 - 1} \left(\beta = \frac{n_0}{n_c} \right), \text{ 最后得式(1-16)。}$$

〔例1-3〕今有一ZZ-41型复激电动机, 其铭牌数据为: $P_c = 16$ 千瓦, $U_c = 220$ 伏, $I_c = 86$ 安, $n_c = 700$ 转/分, 试用铭牌数据计算它的机械特性。

解: 取 $\beta = 2.5$ 。 $M_c = 9550 \frac{P_c}{n_c} = 9550 \frac{16}{700} = 218.3$ 牛·米

$$M = \frac{\beta^2 M_c n_c^2}{(\beta^2 - 1)n^3} - \frac{M_c n_c}{(\beta^2 - 1)n} = \frac{2.5^2 \times 218.3 \times 700^3}{(2.5^2 - 1)n^3} - \frac{218.3 \times 700}{(2.5^2 - 1)n}$$

所以

$$M = \frac{8.91 \times 10^{10}}{n^3} - \frac{29107}{n}$$

由上式取一系列 n_i 值, 得相应的 M_i 值填入表1-3得复激电动机的固有机械特性如图 1-9 所示。

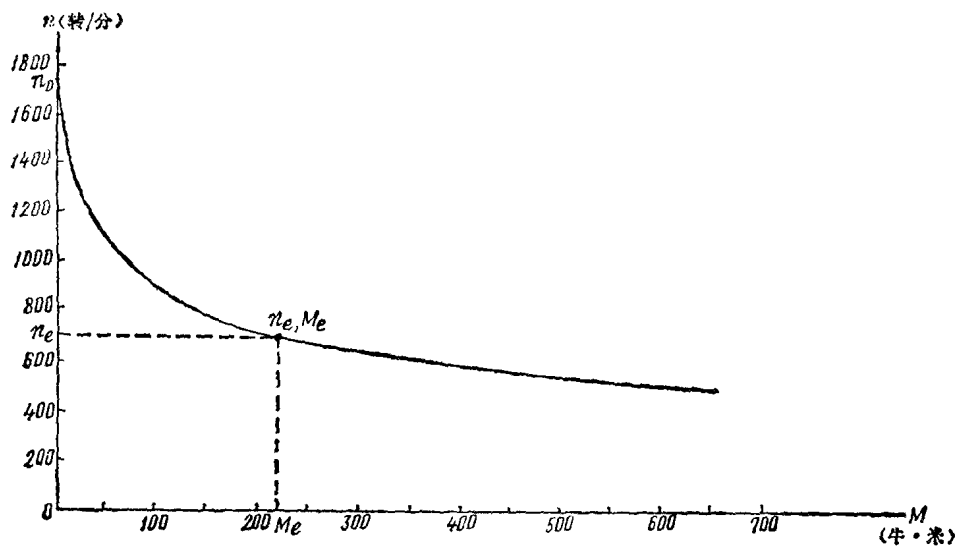


图1-9 求作复激电动机的固有机械特性

表1-3

n_i 转/分	500	600	700	800	900	1200	1500	1600	1750	
M_i 牛·米	655	366	217	137	90	27	6.9	3.4	0	

要准确作出串激和复激电动机的固有机械特性可用图解法。在产品目录上, 每种型号的直流电动机常给出用标么值表示的力矩曲线 $\mu = f(\iota)$ 和转速曲线 $\nu = f(\iota)$ ($\mu = \frac{M}{M_c}$, $\iota = \frac{I}{I_c}$, $\nu = \frac{n}{n_c}$), 现用例1-4说明之。

表1-4

$\iota = \frac{I}{I_c}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.6
$\nu = \frac{n}{n_c}$	1.9	1.45	1.20	1.0	0.94	0.85	0.78	0.68	0.55
$\mu = \frac{M}{M_c}$	0.2	0.4	0.65	1.0	1.2	1.50	1.8	2.45	3.20
$n = \nu n_c$ 转/分	1233	942	780	650	610	552	506	441	358
$I = \iota I_c$ 安	34.4	51.6	68.8	86	103.3	120.5	137.6	172	223.5
$M = \mu M_c$ 牛·米	47	94	152.8	235	282	352.5	423	575.8	752

〔例1-4〕 在例1-2中用图解法求作 ZZ-41型串激电动机的机械特性。

解：利用国产 ZZ 和 ZZK 系列直流串激电动机的万能特性（图1-10）和铭牌数据标出固有特性曲线的一组数据填入表1-4。

根据表1-4中 n 及 M 的数据点绘出 ZZ-41 型直流串激电动机的固有特性曲线如图 1-8 的曲线 2 所示。

三、异步电动机的机械特性

异步机机械特性的解析式可以从它的等值电路求得，如图1-11a)所示。

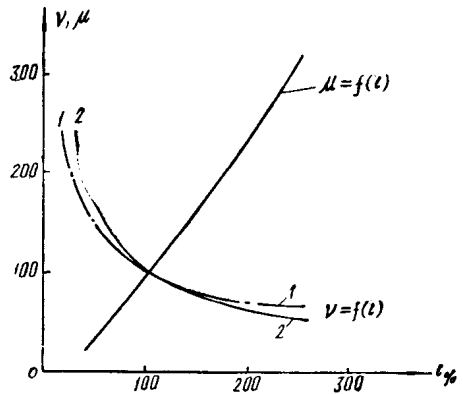


图1-10 国产ZZ、ZZK系列直流串激电动机的万能特性

1为5号机座及以上的特性；2为4号机座及以下的特性

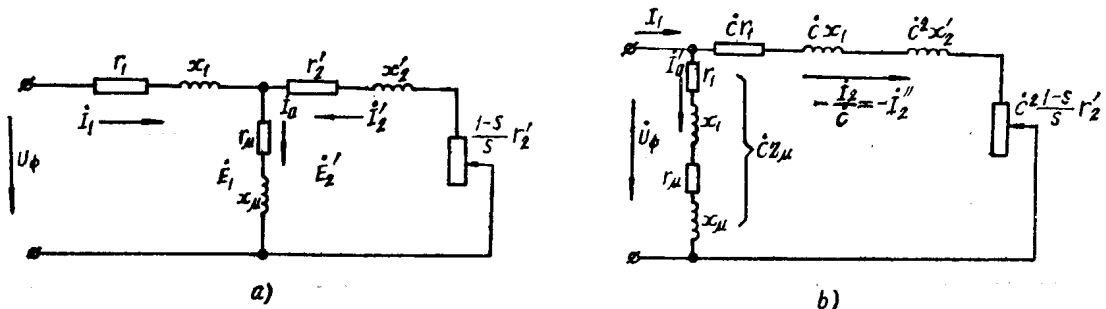


图1-11 异步电动机的等值电路

$\dot{U}_\phi$ -定子相电压； $\dot{I}_1$ -定子相电流； $\dot{I}_0$ -每相励磁电流； r_1 、 x_1 -每相定子电阻与电抗； r_2' 、 x_2' -折算到定子侧的转子每相电阻和电抗； r_μ 、 x_μ 、 Z_μ -每相励磁电阻、电抗与阻抗； S -异步机的转差率； $\dot{I}_2'$ -折算到定子侧的转子每相电流

由图1-11可见：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' = \frac{-\dot{E}_1}{Z_\mu} + \frac{-\dot{E}_1}{Z_2'} \quad (1-19)$$

式中： $Z_\mu = r_\mu + jx_\mu$ ， $Z_2' = r_2' + jx_2'$ 。

$$\text{又} \quad -\dot{E}_1 = \dot{U}_\phi - I_1 Z_1 = \dot{U}_\phi + \dot{E}_1 \left(\frac{Z_1}{Z_\mu} + \frac{Z_1}{Z_2'} \right) \quad (1-20)$$

式中： $Z_1 = r_1 + jx_1$ 。

所以

$$-\dot{E}_1 = \frac{\dot{U}_\phi}{1 + \frac{Z_1}{Z_\mu} + \frac{Z_1}{Z_2'}} = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{C} + \frac{Z_1}{Z_2'}} \quad (1-21)$$

式中： $\dot{C} = 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu}$ 。

由式(1-19)至(1-21)得：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{C} Z_\mu} + \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{C}^2 Z_2' + \dot{C} Z_1} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \frac{\dot{I}_2'}{\dot{C}}$$