



国家级高技能人才培训基地推荐教材

# 船舶辅机电力拖动

■ 钱德福 主编 ■ 王功明 主审



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

国家级高技能人才培养基地推荐教材

# 船舶辅机电力拖动

主编 钱德福

主审 王功明

 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书共分十章,主要包括:电力拖动基础;机械特性与转速特性;电动机的起动;电动机的电气制动;电动机的转速调节;电动拖动的过渡过程;控制电器与电动机基本控制电路;甲板机械与机舱辅机;起货机、绞缆机与锚机;船舶辅助锅炉的自动控制;制冷与空调;船舶舵机。

本书适用于船厂船舶电工和技师的培训或自学教材,也可用于船员考证培训及其他形式的职业教育和相关技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶辅机电力拖动/钱德福主编. —哈尔滨:哈尔滨  
工程大学出版社,2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0993 - 4

I. ①船… II. ①钱… III. ①船舶 - 电力传动 -  
职业教育 - 教材 IV. ①U664.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 026175 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 24. 25  
插 页 2  
字 数 649 千字  
版 次 2015 年 1 月第 1 版  
印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 50.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# “国家级高技能人才培养基地” 配套教材编审委员会

主 任 秦 蓉

副主任 葛 康 孙志明

委 员 赵继权 杨 捷 朱海波 张翼飞

杨 维 邓 波 应大伟 黄梅蓉

高新春 杨文杰 吉鸿翔

# 序

高技能人才是企业人才队伍的重要组成部分,是建设海洋装备产业大军的优秀代表,是推动技术创新和科技成果转化的核心骨干,高技能人才培养工作一直是公司人才培养工作的重中之重。在我国启动首批建设“国家级高技能人才培训基地”评比中,沪东中华作为船舶行业唯一一家企业获此殊荣。在“国家级高技能人才培训基地”项目建设过程中,我们发现现有的技能人才培养教材重理论、轻实操,内容陈旧,缺少新技术、新工艺的讲解,已经不能满足企业产品升级的需求,公司迫切需要一套能够适应现代造船模式技能人才培养的教材。

本次出版的教材是沪东中华“国家级高技能人才培训基地”的配套教材,也是公司高级技能人才培养体系中的重要组成部分。为此,公司专门成立了教材编审委员会,组织了各领域的专家,结合生产实际情况和行业发展新趋势编写成书,内容涵盖了船舶电焊、船体装配、船舶电工三个专业,今后还将逐步完善其他工种的培训教材。本套教材注重操作和工艺知识的讲解,填补了国内同类技能人才培养教材的空白,主要作为企业相关工种培训的指导用书,也可供高职高专、技工学校等职前教育选用。

教材编写过程中得到了公司生产、技术部门领导和专家的大力支持,谨在此表示感谢!希望沪东中华各领域的精英积极将自己知识和经验的“金矿”“富矿”不断地转化为理论成果,公司也将为大家学习交流打造一个开放的平台。

由于时间比较仓促,教材难免有一些不完善之处,敬请各位读者不吝指正,使本套教材日臻完善。

沪东中华造船(集团)有限公司 副总经理



2014年3月11日

# 编写说明

本书为培训船舶高级电工编写,同时也兼顾有关电气技术人员参考的需要,着重讲述了电力拖动的基础知识和船舶辅机的电路分析,要求船电学员通过适当时间的培训能了解交、直流电动机的基本特性,掌握有关电动机的运行特点,学会阅读与船舶辅机有关的电路图,分析电路各元件的动作情况和元件参数变化的影响,为承担设备操作、调试、维修等工作打下基础。

书中第一部分是电力拖动的基础知识部分,分1至6章。第1至第5章分别叙述生产机械和电动机的机械特性,电动机启动、制动、调速和过渡过程,重点要求学员了解电力拖动的基本特点和工作情况。第6章介绍常用的电路元件和电力拖动的基本控制电路,要求学员掌握常用元件的特性和分析基本控制电路的工作情况。

书中第二部分叙述各类有关的船舶辅机,着重分析各控制电路的工作,对各辅机的结构只做简单介绍。要求学员了解辅机拖动电路的工作情况,并通过对典型设备的分析,学会阅读与分析较复杂控制电路的方法。

本书未涉及电动机容量、发热等与系统设计相关的内容,所考虑的阅读对象以操作、调试、维修有关电气设备的人员为主,也兼顾供有关设计人员参考。目前直流电动机在随动系统和较早的调速设备中尚有使用,本书关于直流电动机的有关内容,对这方面的工作人员还是必要的,但一般的电气传动已很少用直流电动机,可在教学中按培训要求予以取舍。

考虑学员的实际水平参差不齐,大多数学员的数学水平和电机学知识不足,在讲解某些电路前需要补充相关内容。为此本书在相应章节以“楷书”形式列入相关内容,建议按学员实际水平,予以补充讲解。

为了满足少数学员的学习要求,和有关设计人员参考需要,本书把较深入的内容以“仿宋体”形式列入。这部分内容对船舶电工可以略去。

对于不同层次电气工作人员培训与参考的需要,可考虑选择其中相关内容,建议:

中级船舶电工培训:

考虑以常用电力拖动设备为主,凡涉及数学推演的内容可从简,有关计算的内容可略去。

第一部分 电力拖动基础

第1章 全部

第2,3,4章 有关交流电动机部分的内容

第5章 第1~5节

第6章 第4节中的实用电路分析部分可从略

第二部分 甲板机械与机舱辅机

选择锚机、辅助锅炉、冷藏和单动操舵等内容。

高级船舶电工培训:

应包括本书所述的全部内容。其中与直流电动机相关内容可省略,若考虑到学员今后可能接触自动随动的拖动装置,也可作为基础知识列入培训范围,但不作为重点。对于书中以“楷书”形式列入的补充内容,若学员的实际水平较高,则可从略;而以“仿宋体”形式列入的内容则可从简或略去。

关于供设计者参考:

编者认为以下内容可供设计参考:

第1章 按电动机的铭牌(样本)数据推算电动机的特性;

交流绕线式电动机转子电阻的计算与误差修正。

第2章 直流电动机启动电阻计算步骤与实例;

交流鼠笼式电动机串电阻或电抗启动的计算;

交流鼠笼式电动机降压启动的电流、转矩与元件容量;

交流绕线式电动机启动电阻和启动电流的计算(转差比例法)。

第4章 交流电动机变极调速;

交流绕线式电动机调速电阻计算

第5章 过渡过程时间计算

第6章 基本控制电路与实用电路分析

以及以“仿宋体”形式列入的相关内容等。

编者

2014年10月

# 目 录

## 第一部分 电力拖动基础

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第1章 机械特性与转速特性 .....      | 1   |
| 1.1 生产机械的机械特性 .....      | 1   |
| 1.2 电动机的机械特性 .....       | 3   |
| 参考习题 .....               | 27  |
| 第2章 电动机的起动 .....         | 31  |
| 2.1 直流电动机的启动 .....       | 31  |
| 2.2 直流电动机分级启动电阻的计算 ..... | 34  |
| 2.3 交流异步电动机的启动 .....     | 40  |
| 2.4 交流同步电动机的启动控制 .....   | 67  |
| 参考习题 .....               | 72  |
| 第3章 电动机的电气制动 .....       | 75  |
| 3.1 制动概述 .....           | 75  |
| 3.2 直流电动机的再生制动 .....     | 75  |
| 3.3 直流电动机的能耗制动 .....     | 78  |
| 3.4 直流电动机的反接制动 .....     | 84  |
| 3.5 直流电动机电气制动小结 .....    | 86  |
| 3.6 异步电动机再生制动 .....      | 87  |
| 3.7 异步电动机能耗制动 .....      | 88  |
| 3.8 异步电动机反接制动 .....      | 91  |
| 3.9 涡流制动器 .....          | 92  |
| 3.10 异步电动机电气制动小结 .....   | 93  |
| 参考习题 .....               | 94  |
| 第4章 电动机的转速调节 .....       | 97  |
| 4.1 电动机调速概述 .....        | 97  |
| 4.2 直流电动机电枢电路串电阻调速 ..... | 99  |
| 4.3 直流电动机变压调速 .....      | 106 |
| 4.4 直流电动机变激磁调速 .....     | 114 |
| 4.5 直流电动机电枢分路调速 .....    | 116 |
| 4.6 电机放大机简介 .....        | 120 |
| 4.7 异步电动机改变磁极对数调速 .....  | 122 |
| 4.8 异步电动机转子电路串电阻调速 ..... | 126 |
| 4.9 交流异步电动机变频调速 .....    | 130 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 4.10 电源电压与频率对交流异步电动机的影响   | 136        |
| 4.11 电磁转差离合器              | 136        |
| 4.12 关于异步电动机变压调速          | 138        |
| 参考习题                      | 139        |
| <b>第5章 电力拖动的过渡过程</b>      | <b>142</b> |
| 5.1 电力拖动概述                | 142        |
| 5.2 电力拖动运动方程式             | 143        |
| 5.3 转矩的折算                 | 144        |
| 5.4 飞轮矩的折算                | 144        |
| 5.5 电力拖动的起动时间和制动时间        | 145        |
| 5.6 直流并(他)激电动机的过渡过程       | 146        |
| 5.7 交流异步电动机的过渡过程(图解法)     | 157        |
| 5.8 用 Excel 计算过渡过程        | 161        |
| 参考习题                      | 167        |
| <b>第6章 控制电器与电动机基本控制电路</b> | <b>169</b> |
| 6.1 接触器                   | 169        |
| 6.2 继电器                   | 176        |
| 6.3 主令电器、开关电器和电磁制动器       | 180        |
| 6.4 电力拖动继电器接触器基本控制电路      | 183        |
| 参考习题                      | 220        |
| <b>第二部分 甲板机械与机舱辅机</b>     |            |
| <b>第7章 起货机、绞缆机与锚机</b>     | <b>223</b> |
| 7.1 船舶起货机类型、结构与工作特点       | 223        |
| 7.2 船舶起货机的运行特点与要求         | 227        |
| 7.3 发电机—电动机系统起货机          | 228        |
| 7.4 交流三速电动起货机             | 234        |
| 7.5 高架门型起重机的起升机构          | 243        |
| 7.6 电动液压起货机               | 259        |
| 7.7 锚机与绞缆机                | 265        |
| 参考习题                      | 269        |
| <b>第8章 船舶辅助锅炉的自动控制</b>    | <b>271</b> |
| 8.1 辅助锅炉概述                | 271        |
| 8.2 辅助锅炉的控制方案             | 278        |
| 8.3 国产 GSL 型辅助锅炉自动控制系统    | 284        |
| 附录 8.1 伺服电动机              | 290        |
| 参考习题                      | 298        |
| <b>第9章 制冷与空调</b>          | <b>299</b> |
| 9.1 制冷装置                  | 299        |
| 9.2 空调                    | 302        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 参考习题 .....                   | 307 |
| 第 10 章 船舶舵机 .....            | 309 |
| 10.1 舵机装置 .....              | 309 |
| 10.2 船舶对舵机装置的要求 .....        | 315 |
| 10.3 操舵控制方式 .....            | 315 |
| 10.4 对自动操舵装置的基本要求 .....      | 322 |
| 10.5 HQ-5 型自动舵机 .....        | 323 |
| 附录 10.1: 自整角机的功用、原理与调试 ..... | 352 |
| 附录 10.2: 旋转变压器 .....         | 358 |
| 参考习题 .....                   | 361 |
| 附录: 鼠笼式异步电动机机械特性的近似推算 .....  | 363 |
| 参考文献 .....                   | 375 |

# 第一部分 电力拖动基础

拖动系统的构成 包括发动机(原动机)、传动机构和工作机械,其中前两项构成拖动装置。

电力拖动装置 由电动机包括它的控制设备和传动机构组成。

工作机械 工作机械是拖动装置的作用对象,对船舶机械来说主要有泵、通风机、压缩机、冷藏与空调、锅炉、起货机、起锚绞缆机、舵机和其他各特种设备等。

## 第 1 章 机械特性与转速特性

机械特性 机械特性是指转速与转矩之间的关系。

(1) 电动机的机械特性是电动机转速与输出转矩之间的关系。

(2) 生产机械的机械特性则是生产机械的转速与拖动它所需的负载转矩之间的关系。

转速特性 电动机转速与电流之间的关系,仅用于电动机。

### 1.1 生产机械的机械特性

#### 1.1.1 按生产机械负载转矩的性质分

反抗性负载 负载转矩始终与旋转方向相反,即始终阻碍旋转的负载。

位能性负载 负载转矩的方向始终不变,与旋转方向无关的负载。

#### 1.1.2 按负载转矩随转速变化的规律分

恒转矩负载 负载转矩恒定,不随转速变化。

恒功率负载 转速变化功率不变,负载转矩与转速成反比。

通风机型负载 负载转矩与转速的平方成正比,负载功率与转速的三次方成正比。

其他类型负载 不能归入上述典型特性的各种生产机械的机械特性。

#### 1.1.3 各种机械特性举例

起货机 起吊货物属于位能性负载,负载为恒转矩。

各种离心式风机、离心泵、螺旋桨等 属于反抗性负载,负载转矩为通风机型负载。

电缆、纸张卷绕等 要求张力不变,卷绕速度不变,属于恒功率负载,反抗性:

$M_L = FR, Fv = M_L \omega$ ,并要求  $\approx$  常数,即功率不变(图 1-1)。

$$v = R\omega$$

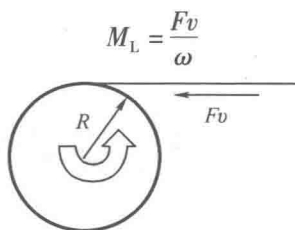


图 1-1 纸张卷绕示意图

拖动直流他激发电机:转矩与转速成正比,归入其他类型,反抗性:

发电机电势

$$E = C_e n \Phi$$

负载电流

$$I_a \approx \frac{C_e n \Phi}{R}$$

拖动转矩

$$M = C_M \Phi I_a = C_e \frac{C_M n \Phi^2}{R}$$

当磁通  $\Phi$  和负载电阻  $R$  不变时

$$M \propto n$$

#### 1.1.4 船舶辅机的基本性能(表 1-1)

表 1-1 船舶辅机的基本性能

| 负载类型                                 | 空载时的负载    | 启动时的负载转矩和负载特点                           |
|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|
| 往复式活塞泵                               | 30% ~ 40% | 重载启动,负载周期性变化且受缸数影响                      |
| 离心泵(不注水)                             | 7% ~ 12%  | 轻载启动,通风机类型                              |
| 离心泵(注水、关阀)                           | 40% ~ 50% | 轻载启动,通风机类型                              |
| 高压活塞式压缩机<br>关闭进气阀(无反压)<br>开启进气阀(有反压) | 60% ~ 70% | 重载启动,负载周期性变化且受缸数影响<br>额定负载的三分之二<br>额定负载 |
| 低压活塞式压缩机<br>关闭进气阀(无反压)<br>开启进气阀(有反压) | 50%       | 重载启动,负载周期性变化且受缸数影响<br>额定负载的二分之一<br>额定负载 |
| 离心式风机                                | 40%       | 轻载启动,通风机类型,关闭出风口则负载减小                   |
| 轴流式风机                                | 40%       | 轻载启动,通风机类型,关闭出风口则负载增大                   |

## 1.1.5 生产机械的机械特性图例(图1-2)

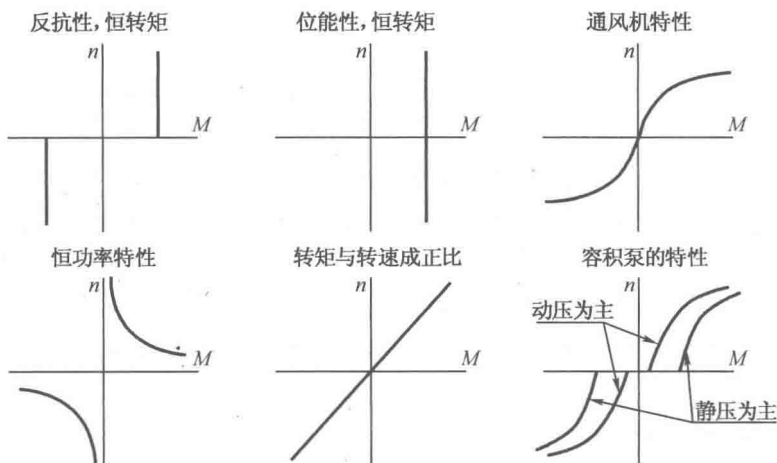


图1-2 机械特性图例

## 1.2 电动机的机械特性

补充内容:复习直流电动机

## 附1 直流电动机的工作原理(图1-3)

接通电源后,通过电刷使电枢导线上通过电流  $I_a$ ,按左手定则导线受力使电动机的电枢按箭头  $n$  方向旋转,即可带动负载。

电枢旋转后,导线切割磁力线产生感应电动势,其方向按右手定则与电源电压相反(抵消),限制电流增大。

电动机的电磁转矩

$$M = C_M \Phi I_a$$

电动机的感应电动势

$$E = C_e \Phi n$$

其中

$$C_e = \frac{PN}{60a}, \quad C_M = \frac{PN}{2\pi a}, \quad C_M = \frac{60}{2\pi} C_e \Phi = 9.55 C_e \Phi$$

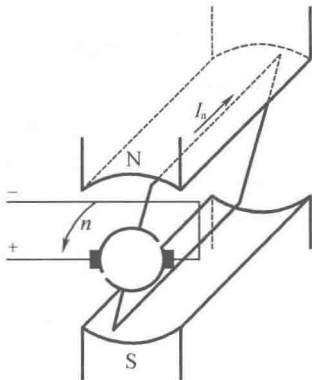


图1-3 直流电机原理示意图

$P$ ——磁极对数;

$N$ ——电枢导线总数;

$a$ ——电枢绕组并联支路数。

实际电动机的磁场由励磁绕组通电产生,按产生磁场的绕组接法不同,直流电动机分为:

他激直流电动机 励磁绕组由独立电源供电,励磁电压固定不变。

并激直流电动机 励磁绕组与电枢绕组并联,由同一电源供电,励磁电压基本固定不变。

串激直流电动机 励磁绕组与电枢绕组串联,励磁电流等于电枢电流。

复激直流电动机 励磁绕组分串励与并励两部分,电机内的主磁场由这两部分绕组的合成磁势产生。

## 附2 直流电动机的运行原理

### 1. 电枢反应

电动机运行时,电枢流过电流,产生电枢磁势,在与主磁通垂直的方向产生磁通  $\Phi_a$  与主磁场  $\Phi$  合成,引起磁场畸变,使合成磁场的物理中性线逆旋转方向移过某一角度,磁极中的磁通一侧增大,另一侧减少。

当电动机负载较大,即电枢电流较大时,磁极一侧饱和,饱和侧磁通的增加较少,而另一侧磁通减少较多,造成合成磁通总量减少。

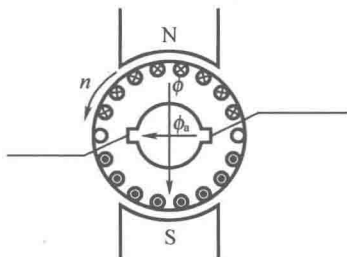
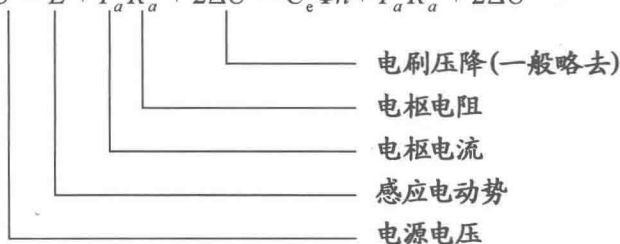


图 1-4 电枢反应示意图

### 2. 电势平衡

$$U = E + I_a R_a + 2\Delta U = C_e \Phi n + I_a R_a + 2\Delta U$$



### 3. 转矩平衡

$$M = M_2 + M_0 \text{ —— 空载转矩}$$



过渡过程状态

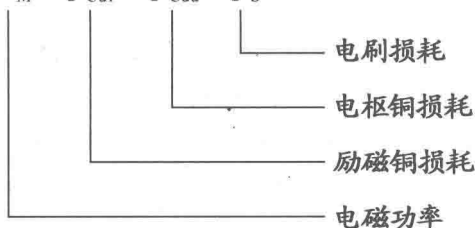
$$M = M_2 + M_0 + M_{dy} = M_2 + M_0 + J \frac{d\omega}{dt}$$

角速度的微分  
时间的微分  
转动惯量  
动态转矩

## 4. 功率平衡

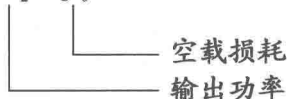
输入功率

$$P_1 = P_M + p_{Cuf} + p_{Cua} + p_s$$



电磁功率

$$P_M = P_2 + p_0$$



## 5. 转矩—功率关系式

$$M = 9550 \frac{P}{n}$$

功率 (kW)  
转速 (r/min)  
转矩 (N·m)

$$M = 974 \frac{P}{n}$$

功率 (kW)  
转速 (r/min)  
转矩 (N·m)

## 附3 直流电动机的铭牌数据

型号; 额定功率; 额定电压; 额定电流; 额定转速;

励磁方式; 励磁电压; 励磁电流; 效率;

以及运行方式, 防护方式, 冷却方式, 绝缘等级等。

## 1.2.1 电动机机械特性分类

电动机机械特性是指电动机转速  $n$  与输出转矩  $M_2$  之间的关系, 即函数  $n = f(M_2)$  其中  $M_2 = M - M_0$ , 由于空载转矩  $M_0$  的比例很小 (约 2% ~ 5%) 常把电动机转速与电磁转矩  $M$  之间的关系  $n = f(M)$  看作电动机的机械特性。

绝对硬特性: 转矩变化转速不变。

硬特性: 转矩增大转速略有下降。

软特性: 转矩增大转速下降很快。

上翘特性: 转速随转矩增大而升高; 此种特性的电动机极少应用, 一般应予以避免。

## 1.2.2 直流并(他)激电动机的特性

(1) 特性表达式

转速特性表达式

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n$$

机械特性表达式

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} M = n_0 - \Delta n$$

由电势平衡方程式  $U = C_e \Phi n + I_a R$  可直接推出转速特性表达式。

由转矩关系式  $M = C_M \Phi I_a$  得到  $I_a = \frac{M}{C_M \Phi}$  代入转速特性即可推得机械特性表达式。

直流并(他)激电动机的机械特性和转速特性都是一条下降的直线,即  $n = n_0 - \Delta n$ , 转速降落  $\Delta n$  与电枢回路的电阻  $R$  成正比。

电枢回路不串外加电阻时  $R = R_a$ , 电阻很小, 转速降少, 转速特性和机械特性都是硬特性。因未串联外加电阻, 不改变电动机本身性能, 称之为“自然特性”或“固有特性”。

电枢回路串外加电阻时  $R$  增大, 转速降增多, 外加电阻大则特性变为软特性; 外加电阻小, 则接近硬特性; 因串入外加电阻, 改变了电动机本身性能, 称之为“人工特性”。

(2) 由铭牌数据估算直流并(他)激电动机的特性

铭牌数据: 额定电压  $U_N$ ; 额定电流  $I_N$ ; 额定转速  $n_N$ ; 额定功率  $P_N$ ; 效率  $\eta$ 。

① 电枢电阻  $R_a$

若有实际电动机, 可做实际测量, 取得准确的电阻值(折算到温度 75 °C 的值)。

在无法取得实际数据时, 可按下列各经验公式估算

直流并(他)激电动机  $R_a = 0.5(1 - \eta) \frac{U_N}{I_N} \quad (\Omega)$

直流串激电动机  $R_a = 0.75(1 - \eta) \frac{U_N}{I_N} \quad (\Omega)$

直流复激电动机  $R_a = 0.6(1 - \eta) \frac{U_N}{I_N} \quad (\Omega)$

② 额定励磁电流  $I_f$  与额定电枢电流  $I_{aN}$

已有实际电动机, 应测量励磁绕组电阻  $R_f$  (折算到温度 75 °C 的值), 求出额定励磁电流

$$I_f = \frac{U_N}{R_f}。$$

额定电枢电流  $I_{aN} = I_N - I_f \quad (\text{A})$

③ 求  $C_e \Phi$  与  $C_M \Phi$  值

$$C_e \Phi = \frac{U_N - I_{aN} R_a}{n_N} \quad C_M \Phi = 9.55 C_e \Phi$$

④ 直流并(他)激电动机的自然特性

转速特性

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (\text{r/min})$$

机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2} M \quad (\text{r/min})$$

把上述求得的数据代入, 就得到电动机的特性表达式, 并可归纳为  $n = n_0 - \Delta n$ 。

⑤ 额定电磁转矩

$$M_N = C_M \Phi I_{aN} = 9.55 C_e \Phi I_{aN} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

## ⑥ 额定转矩(输出转矩)

$$M_{2N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

## ⑦ 空载转矩

$$M_0 = M_N - M_{2N} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

## (3) 求机械特性举例

并激电动机铭牌数据:额定电压  $U_N = 220\text{V}$ ; 额定电流  $I_N = 152\text{A}$ ; 额定转速  $n_N = 1\,000\text{ r/min}$ ; 额定功率  $P_N = 30\text{ kW}$ ; 效率  $\eta = 0.9$ ; 并激绕组电阻  $R_f = 110\ \Omega$ 。

① 估算  $R_a$ 

$$R_a = 0.5(1 - \eta) \frac{U_N}{I_N} = 0.5(1 - 0.9) \frac{220}{152} = 0.072\,4(\Omega)$$

② 额定励磁电流  $I_f$  与电枢电流  $I_{aN}$ 

$$\text{额定励磁电流} \quad I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{220}{110} = 2(\text{A})$$

$$\text{额定电枢电流} \quad I_{aN} = I_N - I_f = 152 - 2 = 150(\text{A})$$

③ 求  $C_e\Phi$  与  $C_M\Phi$  值

$$C_e\Phi = \frac{U_N - I_{aN}R_a}{n_N} = \frac{220 - 150 \times 0.072\,4}{1\,000} = 0.209\,14$$

$$C_M\Phi = 9.55 C_e\Phi = 9.55 \times 0.209\,14 = 1.997\,3$$

## ④ 直流并(他)激电动机的自然特性

转速特性

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e\Phi} = \frac{200 - 0.072\,4 I_a}{0.209\,14} = 1\,052 - 0.346\,2 I_a \quad (\text{r/min})$$

机械特性

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2} M = \frac{200}{0.209\,14} - \frac{0.072\,4}{0.209\,14 \times 1.997\,3} M = 1\,052 - 0.173\,32 M \quad (\text{r/min})$$

## ⑤ 额定电磁转矩

$$M_N = C_M\Phi I_{aN} = 1.997\,3 \times 150 = 299.6(\text{N} \cdot \text{m})$$

## ⑥ 额定转矩(输出转矩)

$$M_N = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 9\,550 \frac{30}{1\,000} = 286.5(\text{N} \cdot \text{m})$$

## ⑦ 空载转矩

$$M_0 = M_N - M_{2N} = 299.6 - 286.5 = 13.1(\text{N} \cdot \text{m})$$

特性曲线:并(他)激电动机的转速特性和机械特性都是直线,只需确定两点即可画出整条曲线。

若要计算电枢串联电阻后的特性(人工特性),只需要把上列各式中的  $R_a$  换成电枢回路的总电阻  $R$  即可。