



21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶电气专业



船舶电力拖动

CHUANBO DIANLITUODONG

主编 祝 福
主审 宋 谦



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶电气专业

船舶电力拖动

CHUANBO DIANLITUODONG

主 编 祝 福

主 审 宋 谦

副主编 冯常奇 徐江陵

 **哈尔滨工程大学出版社**
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书主要阐述了交直流电动机基础及拖动,变压器,同步电机,控制电机,低压电器,基本电气控制环节,船舶甲板机械的电气控制,船舶机舱辅机控制,机舱辅机自动调节系统,船舶舵机装置的自动控制系统等。本书理论部分以够用为原则,删除了繁杂的公式推导,以项目驱动组织教学内容,以培养高技能型人才为重点,突出实用性。

本书适用于船舶电气类专业高职、中职、成人大专、职工培训用教材,也可供船舶电气工程技术人員自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力拖动/祝福主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.8

ISBN 978 -7 -81133 -529 -3

I. 船… II. 祝… III. 船舶-电力拖动-高等学校:技术学校-教材 IV. U665.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151836 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 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 18
字 数 432 千字
版 次 2009 年 9 月第 1 版
印 次 2009 年 9 月第 1 次印刷
定 价 34.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

21 世纪高职船舶系列教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任	孙元政			
副主任	王景代	丛培亭	刘 义	刘 勇
	杨永明	杨泽宇	罗东明	季永青
	施祝斌	康 捷	熊仕涛	
委 员	马瑶珠	王景代	丛培亭	刘 义
	刘 勇	刘义菊	孙元政	闫世杰
	杨永明	杨泽宇	陈良政	沈苏海
	肖锦清	周 涛	罗东明	季永青
	俞舟平	胡适军	施祝斌	徐立华
	唐永刚	郭江平	柴勤芳	康 捷
	熊仕涛	蔡厚平		

前言

船舶电力拖动

CHUANBO TONGXIN YU DAOHANG

为适应我国对高等职业船舶电气自动化专业人才培养的需要,配合各高职院校教学改革的进程,创建一套符合职业教育培养目标和教学改革要求的新型教改教材而编写的。本书为了培养船舶制造企业生产一线的高技能型人才,管理人才,结合我校教—学—做一体化的教改资源,在原来教材的基础上,对教材内容,教学资料,实训资料进行了整合。这是一本基于生产过程,以能力培养为特色的应用型教材。

本教材的特点:以理论够用为原则,删除了繁杂的公式推导过程;以项目驱动组织教学内容,做到教学做一体;以培养高技能型人才为重点,突出实用性。

本书主要阐述了交直流电动机基础及拖动,变压器,同步电机,控制电机,低压电器,基本电气控制环节,船舶甲板机械的电气控制,船舶机舱辅机控制,机舱辅机自动调节系统,船舶舵机装置的自动控制系统等。

本书适用于船舶电气类各专业高职、中职、成人大专、职工培训用教材,注重培养分析和解决问题的能力,掌握基本技能和基本理论知识。

本教材由武汉船舶职业技术学院祝福副教授主编,宋谦副教授主审,冯常奇、徐江陵、李秉玉老师任副主编。冯常奇编写了第一章,徐江陵编写了第八章,李秉玉编写了部分实训项目,宋谦编写了第十一章、其余的章节由祝福编写。在编写的过程中得到了船舶电气自动化教研室王文义、周民、戴雅丽等老师的鼎力帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,经验不足,书中难免存在一些缺点和不足,诚挚地希望广大读者批评指正。

编 者

2009年4月

目 录

21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶电力拖动

第1章 直流电机	1
1.1 直流电动机的结构	1
1.2 直流电机的工作原理	4
1.3 直流电机的分类和铭牌	5
1.4 直流电动机的基本方程	8
1.5 直流电动机的机械特性	9
1.6 直流电动机的启动和反转	11
1.7 直流电动机的调速	13
1.8 直流电动机的制动	16
1.9 直流电机的换向	18
1.10 直流电机常见故障诊断及排除	19
教学项目 船用直流电机的拆卸、修理、装配和试验	20
思考题与习题	26
第2章 变压器	28
2.1 变压器的结构与基本原理	28
2.2 变压器的损耗和效率	33
2.3 变压器的外特性	34
2.4 变压器的主要技术指标和额定值	35
2.5 三相变压器	35
2.6 变压器的并联运行	40
2.7 特殊功能的变压器	40
教学项目一 小型变压器的制作	44
教学项目二 小型变压器故障检修	45
思考题与习题	47
第3章 交流异步电动机	48
3.1 三相异步电动机的结构与基本工作原理	48
3.2 三相异步电动机的功率和电磁转矩	53
3.3 三相异步电动机的运行特性	55
3.4 三相交流异步电动机的启动	58
3.5 三相交流异步电动机的调速	63
3.6 三相异步电动机的制动	67
3.7 单相交流异步电动机	69
3.8 三相异步电动机的维护	72
教学项目 船用交流电机的拆装、修理、装配和试验	74
思考题与习题	78
第4章 同步电动机	80
4.1 同步电机的基本结构与工作原理	80
4.2 同步发电机的基本特性	83
4.3 同步发电机的并联运行	86



目录

21

世纪
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI
高职船舶系列教材

船舶电力拖动

4.4 同步电动机的启动	87
4.5 同步调相机	88
教学项目 同步电动机常见故障的检测	88
思考题与习题	90

第5章 控制电机 91

5.1 伺服电动机	91
5.2 测速发电机	95
5.3 步进电动机	97
5.4 自整角机	101
5.5 旋转变压器	103
思考题与习题	104

第6章 常用低压电器 106

6.1 常用低压电器的分类	106
6.2 刀开关	107
6.3 熔断器	111
6.4 断路器	113
6.5 控制器	114
6.6 接触器	114
6.7 启动器	116
6.8 控制继电器	117
6.9 主令电器	124
6.10 电阻器	128
6.11 电磁铁	129
6.12 其他	130
6.13 电器的文字符号和图形符号	130
教学项目 常用低压电器拆装	136
思考题与习题	137

第7章 电气控制电路的基本环节 138

7.1 电气控制系统图的类型及有关规定	138
7.2 三相笼型异步电动机全压启动控制线路	142
7.3 三相笼型异步电动机减压启动控制线路	145
7.4 三相绕线转子异步电动机启动控制线路	150
7.5 三相异步电动机的调速控制线路	153
7.6 三相异步电动机的制动控制线路	155
7.7 直流电动机的控制线路	160
7.8 电气控制线路中的保护措施	166
教学项目 绕线式转子串电阻启动控制电路的安装和检修	168
思考题与习题	170

目 录

21
世纪
高职
船舶
系列
教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶电力拖动

第8章 锚机的电力拖动与控制	173
8.1 锚机的电力拖动与控制要求	173
8.2 交流三速电动锚机控制线路	175
8.3 锚机的调试方法及常见故障	178
教学项目 锚机控制箱的安装与调试	180
思考题与习题	183
第9章 船舶起货机的电力拖动与控制	184
9.1 起货机类型及运行特点	184
9.2 一般发电机 G - M 系统起货机	188
9.3 双输出 G - M 系统起货机	194
9.4 变极调速交流电动起货机	198
9.5 交流电动起货机电气系统的维护与检修	205
教学项目 交流电动起货机控制箱的安装与调试	206
思考题与习题	208
第10章 船舶机舱辅机控制	210
10.1 空压机的电力拖动与控制	210
10.2 船舶辅助锅炉自动控制	216
10.3 船舶分油机电气系统	220
10.4 船舶电动辅机	225
教学项目 船舶辅助锅炉燃烧自动控制的试验与调试	229
思考题与习题	232
第11章 机舱辅机自动调节系统	233
11.1 船舶冷藏装置自动控制	233
11.2 空调设备电气控制	238
教学项目 中央空调控制箱的安装与调试	241
思考题与习题	244
第12章 船舶舵机装置的自动控制系统	245
12.1 舵与舵机装置	245
12.2 操舵方式及基本工作原理	247
12.3 自动舵的基本类型及其基本要求	251
12.4 舵机各主要部件的作用	253
12.5 通电调试	266
教学项目 自动舵机的试验与调试	274
思考题与习题	275



第1章 直流电机

直流电机包括直流电动机(DC motor)和直流发电机(DC generator),与三相交流异步电动机相比,直流电机的主要优点是速度调节范围宽广,调速平滑、启动转矩较大,能适应频繁启动的场所。但是直流电机也有它显著的缺点,结构复杂,价格高,维护不方便,尤其电刷与换向器之间容易产生火花,故障较多,因而运行可靠性较差。目前直流电机主要应用于电力拖动性能要求较高的场合,如起重机械、电力机车、大型可逆轧钢机和龙门刨床等生产机械中。

直流发电机过去是工业用直流电的主要电源之一,广泛应用在电解、电镀、充电等设备中。近年来晶闸管得到日益广泛的应用,有逐步代替直流发电机的趋势。

1.1 直流电动机的结构

直流电机由两个主要部分组成:静止部分和转动部分。静止部分称为定子,由主磁极、换向磁极、机座和电刷等装置组成,主要用来建立磁场。转动部分称为转子或电枢,由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇、转轴等组成,是机械能变为电能或电能变为机械能的枢纽。在静止和转动部分之间,有一定的间隙,称为气隙。图1-1所示为直流电机结构图,图1-2所示为直流电机组部件。

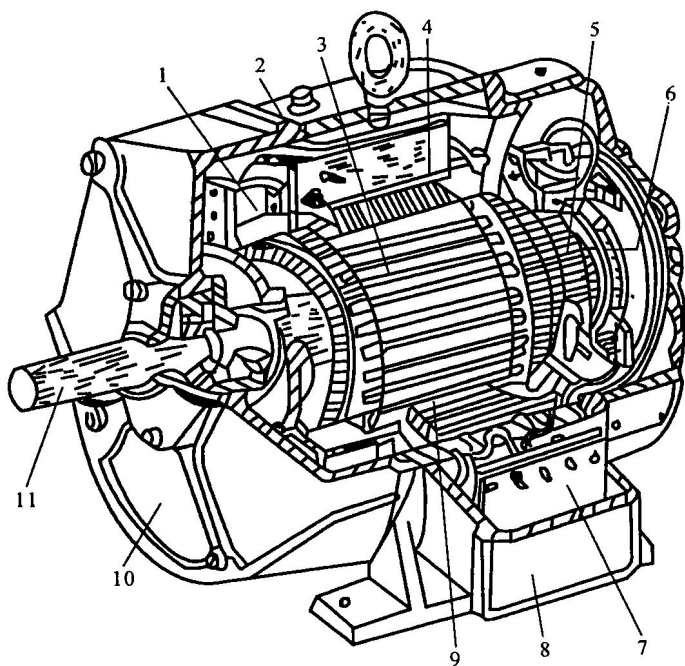


图1-1 直流电机结构图

- 1—风扇;2—机座;3—电枢;4—主磁极;5—电刷架;6—换向器;
7—接线板;8—出线盒;9—换向磁极;10—端盖;11—转轴

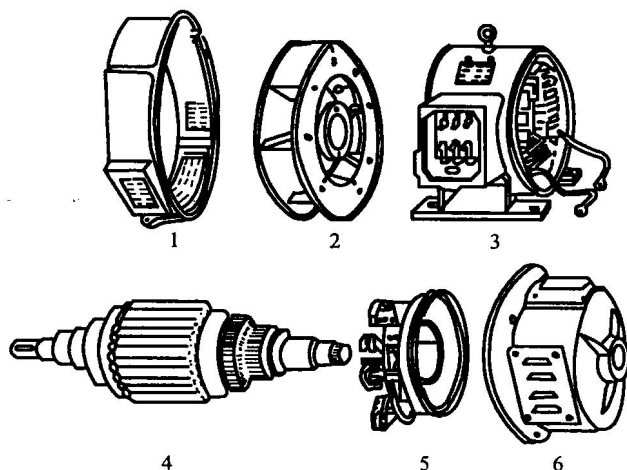


图 1-2 直流电机组成部件

1—前端盖;2—风扇;3—机座;4—电枢;5—电刷架;6—后端盖

1.1.1 静止部分

(1)主磁极 主磁极的作用是产生一个恒定的主磁场,它由铁芯和励磁绕组组成。当励磁绕组中通入直流电流后,铁芯中即产生励磁磁通,并在气隙中建立磁场。励磁绕组是用绝缘铜线绕制的线圈,套在铁芯外面。铁芯一般用硅钢片叠压而成。主磁极总是 N,S 两极成对出现,主磁极的励磁绕组相互串联连接,连接时要能保证相邻磁极的极性按 N,S 交替排列。主磁极的结构如图 1-3 所示。

(2)换向磁极 换向磁极是由铁芯和换向磁极绕组构成的,如图 1-4 所示。其作用是减小电刷与换向器之间的火花。换向磁极安装在相邻两个主磁极的中间线上,当换向磁极绕组通入直流电流时,它所形成的磁场对电枢磁场产生影响。换向磁极绕组一般总是与电枢绕组串联。

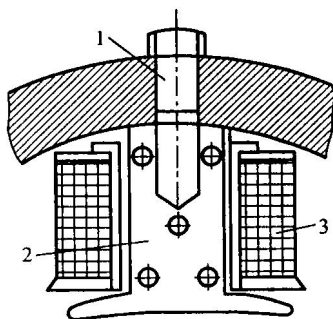


图 1-3 主磁极

1—机座;2—主磁极铁芯;3—励磁绕组

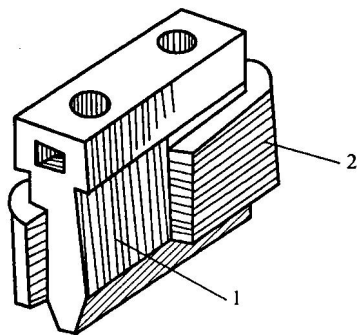


图 1-4 换向磁极

1—换向磁极铁芯;2—换向磁级绕组

(3)机座 机座由铸铁或铸钢制成,是磁路的一部分。它用来固定主磁极、换向磁极和端盖,其结构如图 1-5 所示。



(4)电刷装置 电刷将旋转的电枢绕组电路与静止的外部电路相连接,把直流电流引入或将直流感应电动势引出。直流电机中电刷装置由电刷及刷握、弹簧、刷杆座等部分组成。电刷放置在刷握内,用弹簧压紧在换向器上。一般电刷组数与主磁极极数相等,电刷装置在换向器表面应对称分布,并且可以移动,用以调整电刷在换向器上的位置,其结构如图1-6所示。

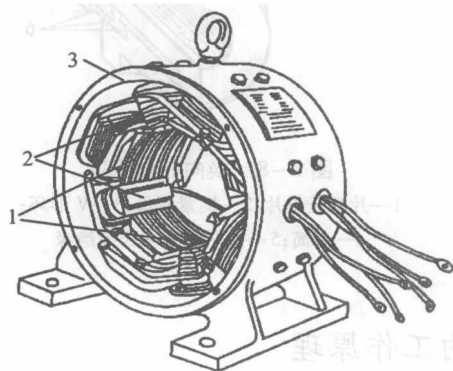


图1-5 机座
1—主磁极;2—换向磁极;3—机座

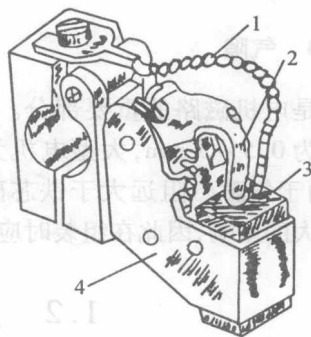


图1-6 电刷装置
1—刷辫;2—压指;3—电刷;4—刷握

1.1.2 转动部分

(1)电枢铁芯 是磁路的一部分,同时对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。电机运行时,交变的磁通会在铁芯中产生涡流和磁滞损耗。为了减少涡流损耗,电枢铁芯通常采用0.5 mm厚且表面涂绝缘漆的硅钢片叠压而成。每片周围均匀分布许多齿和槽,槽内可安放电枢绕组,其结构如图1-7所示。

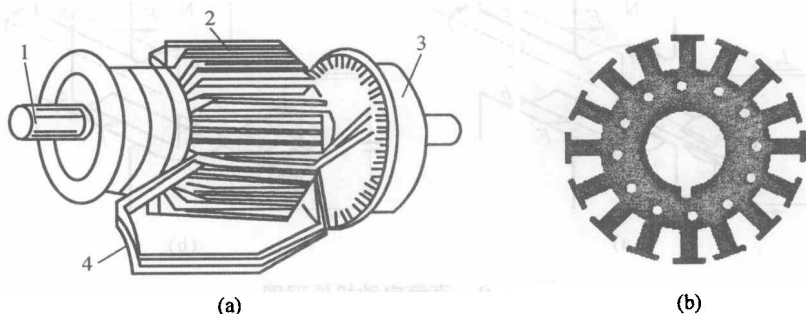


图1-7 电枢铁芯及电枢绕组

1—转轴;2—电枢铁芯;3—换向器;4—电枢绕组
(a)电枢;(b)电枢铁芯冲片

(2)电枢绕组 是直流电机电路的主要组成部分,它是产生感应电动势和电磁转矩,从而实现机、电能量转换的重要部件。电枢绕组通常用绝缘的铜线或扁铜线在模具上绕成线圈后再放置在电枢铁芯槽中,槽口用槽楔压紧,防止旋转时将绕组甩出,其结构如图1-7所示。

(3)换向器 是由许多铜质换向片组成一个圆柱体,换向片之间用云母片绝缘。换向



器装在电枢的一端,电枢绕组的两端分别焊接到两片换向片上,它是直流电机的重要部件。作用是在直流电动机中,将外加的直流电流变为电枢绕组中的交流电流;在直流发电机中,将电枢绕组中的交变电动势变为电刷端点的直流电动势,其结构如图1-8所示。

1.1.3 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。一般小型电机的气隙为0.5~5 mm,大型电机为5~10 mm左右,但由于气隙磁阻远大于铁芯磁阻,对电机性能有很大的影响,因此在组装时应特别注意。

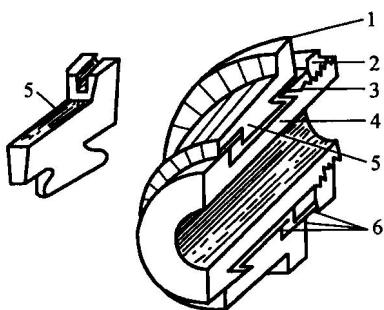


图1-8 换向器结构图

1—片间云母片;2—锁紧螺母;3—V形环;
4—套筒;5—换向片;6—云母绝缘

1.2 直流电机的工作原理

1.2.1 直流电动机工作原理

图1-9所示是一台简单的直流电动机的原理图。图中N和S是一对固定的磁极,用来建立恒定磁场。两磁极之间有一个可以转动的圆柱形铁芯,铁芯上固定着线圈abcd。线圈的ad端接在随电枢一起旋转的两片半圆形铜片上,这两个铜片合称为换向器,换向器固定在转轴上且与转轴绝缘。铁芯、线圈和换向器组合在一起形成电枢。电刷A、B分别与换向片接触而通向外电路。

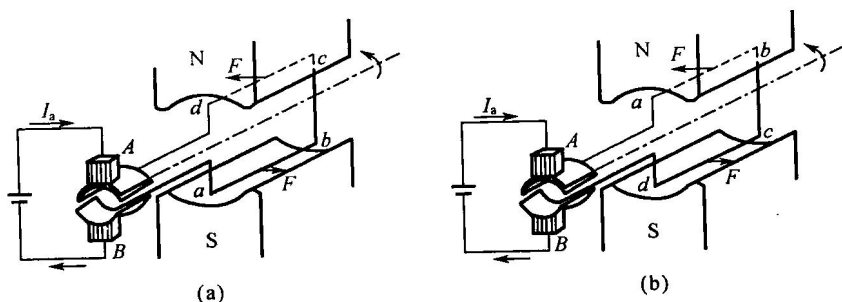


图1-9 直流电动机原理图

(a)起始位置电磁转矩产生原理;(b)转过180°位置时的电磁转矩

通电线圈在磁场中要受到磁场力的作用。假设电刷A与电源的正极相连,电刷B与电源的负极相连,电流经A-d-c-b-a-B形成回路。根据左手定则,线圈ab受力向右,线圈cd受力向左。这样就形成一个转矩,使电枢逆时针方向旋转,如图1-9(a)所示。

当电枢转过90°时,此时通电线圈虽受到电磁力的作用,但转矩为零。由于电枢机械惯性的作用,电枢也能转过一定的角度,这时线圈中电流的方向也改变了。当电枢转过180°时,这时电流经A-a-b-c-d-B形成回路,线圈内部电流的方向发生了改变,根据左手定则,线圈ab受力向左,线圈cd受力向右。仍然形成一个逆时针转动的转矩,电枢按同一方向继续旋转,这样电动机就可以连续旋转。如图1-9(b)所示。



1.2.2 直流发电机的工作原理

图1-10所示是一台简单的直流发电机的原理图。两个磁极用来建立恒定磁场,磁极中间有圆柱形铁芯,铁芯上固定着线圈 $abcd$,其基本结构和电动机完全相同。

当电枢逆时针旋转时,用右手定则可以判定:线圈 ab 和 cd 边切割磁力线,产生感应电动势 e ,其方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$,如图1-10(a)所示。在负载与线圈构成的回路中产生电流 I_a ,其方向与电动势方向相同,电流由电刷 A 流出,由电刷 B 流回。

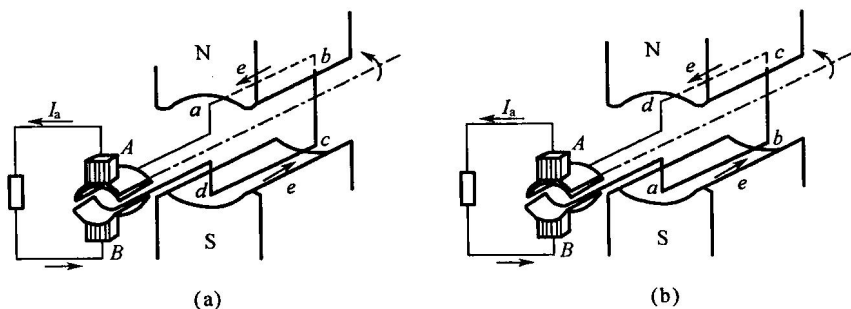


图1-10 直流发电机原理图

(a)起始位置电动势产生原理;(b)转过 180° 位置时的电动势

当电枢转到图1-10(b)所示位置时, ab 边转到了 S 极, cd 边转到了 N 极。这时线圈中感应电动势的方向发生了改变,变成了 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。但由于换向器随同一起旋转,使得电刷 A 总是与 N 极下的导线连接,而电刷 B 总是与 S 极下的导线连接,电流 I_a 仍由 A 流出,由 B 流回,方向不变。

电枢线圈每转过一圈,其电动势的方向就改变一次,但两电刷之间的电动势方向不变,大小在零与最大值之间变化,用这种直流发电机获得的直流电大小是变化的,而且波动很大,其电动势如图1-11所示。要获得方向和量值上均为恒定的电动势,就应把电枢铁芯上的槽数和线圈匝数增多,同时换向器上的换向片数也要相应地增加。实际应用的直流发电机中线圈有很多,磁极的对数也不只一对,可以使电动势的波动很小。

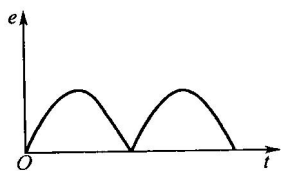


图1-11 单线圈直流发电机中电动势波形

1.3 直流电机的分类和铭牌

1.3.1 直流电机的分类

直流电机一般是根据励磁方式进行分类的,因为它的性能与励磁方式有密切关系,励磁方式不同,电机的运行特性有很大差异。根据励磁绕组与电枢绕组连接的不同,可以分为他励电机、并励电机、串励电机和复励电机。

(1)他励电机 励磁绕组和电枢绕组分别由不同的直流电源供电,即励磁电路与电枢电路没有电的连接,其接线图和原理图如图1-12(a),(b)所示。



(2) 并励电机 励磁绕组和电枢绕组并联,由同一直流电源供电。励磁电压等于电枢电压,励磁绕组匝数多,电阻较大。总电流等于电枢电流和励磁绕组电流之和,即 $I_a = I_f$ 。并励电机的接线图和原理图如图 1-13(a),(b) 所示。

(3) 串励电机 励磁绕组和电枢绕组串联后接于直流电源,励磁电流和电枢电流相等,即 $I = I_a = I_f$ 。其接线图和原理图如图 1-14(a),(b) 所示。

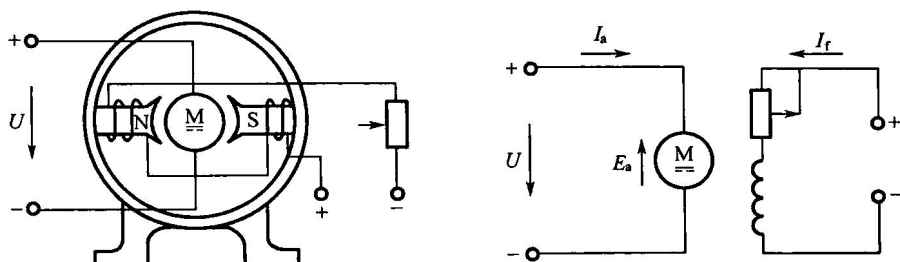


图 1-12 他励电机

(a) 接线示意图; (b) 原理线路图

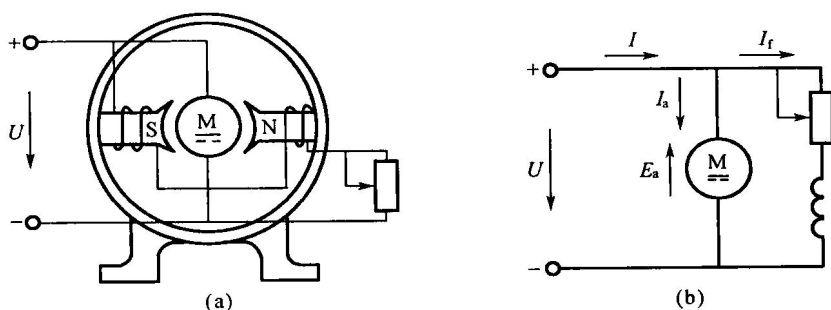


图 1-13 并励电机

(a) 接线示意图; (b) 原理线路图

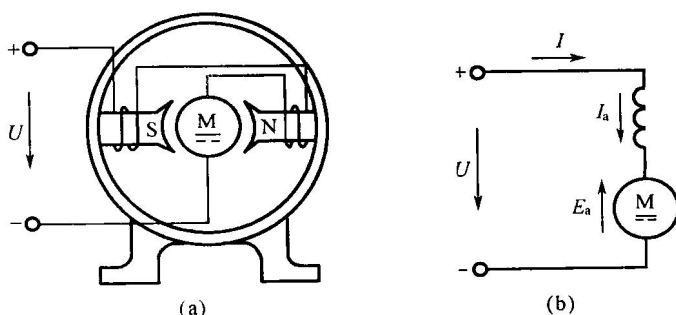


图 1-14 串励电机

(a) 接线示意图; (b) 原理线路图

(4) 复励电机 有两个励磁绕组,一个与电枢并联,一个与电枢串联。并励绕组匝数多线径细,串励绕组匝数少线径粗,如图 1-15 所示。

在一些小型直流电机中,也有用永久磁铁产生磁场的,这种电机称为永磁式电机。由于其体积小、结构简单、效率高、损耗低、可靠性高等特点,因而应用越来越广泛。例如,兆欧



表中的手摇发电机和测速发电机、汽车用永磁电机等等。

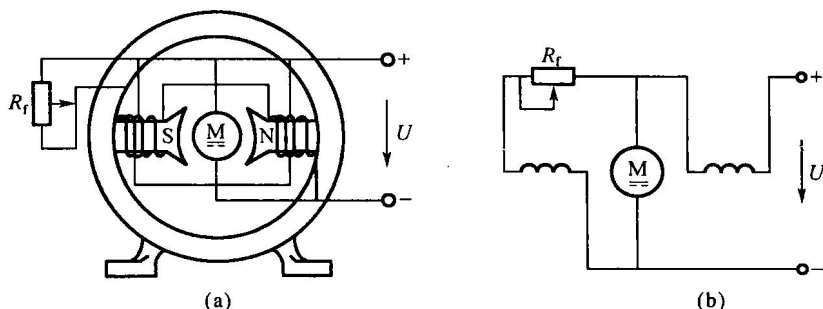


图 1-15 复励电机
(a)接线示意图;(b)原理线路图

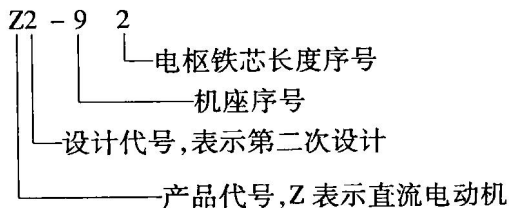
1.3.2 直流电机的铭牌

每一台电机的机座上都有一块铭牌,标明这台电机额定运行情况的各种数据。这些数据是正确、合理使用电动机的依据,所以也称为铭牌数据。表 1-1 是一台直流电动机的铭牌,其额定值的意义介绍如下。

表 1-1 直流电动机的铭牌

型 号	Z ₂ -72	励磁方式	并 励
额定功率	22 kW	励磁电压	220 V
额定电压	220 V	励磁电流	2.06 A
额定电流	110 A	定 额	连续
额定转速	1 500 r/min	温 升	80 ℃
出厂编号	× × × × × ×	出厂日期	× × × × 年 × ×
× × × × 电机厂			

(1) 型号 国产电动机的型号一般采用大写的汉语拼音字母和数字表示电动机的结构和使用特点。例如 Z2-92,其说明如下:



产品代号的含义如下:

- ① Z 系列 一般用途直流电动机,如 Z₂, Z₃, Z₄ 等系列; ZJ 系列,精密机床用直流电动机; ZT 系列,广调速直流电动机; ZQ 系列,牵引直流电动机; ZH 系列,船用直流电动机;
- ② ZA 系列 防爆安全型直流电动机; ZKJ 系列,挖掘机用直流电动机;



③ZZJ 系列 冶金起重机用直流电动机。

(2) 额定功率 P_N 电机在额定情况下允许输出的功率,对于发电机,是指向负载输出的电功率;对于电动机,是指轴上输出的机械功率,单位是 W 或 kW。

(3) 额定电压 U_N 在额定情况下,对于电动机,是指直流电源的电压;对于发电机,是指额定功率时的输出电压,单位是 V。

(4) 额定电流 I_N 电机在额定负载时允许电机长期流出或流入的电流,单位是 A。

(5) 额定转速 n_N 电机运行在额定电压、额定电流、额定功率时所对应的转速,单位是 r/min。

(6) 励磁 指电机的励磁方式,包含他励、并励、串励、复励等。

(7) 励磁电压 电机在额定状态下励磁绕组两端所加的电压,对于自励、并励电机,励磁电压等于电机的额定电压;对于他励电机,励磁电压要根据情况来定,单位是 V。

(8) 励磁电流 电机产生主磁通所需要的励磁电流,单位是 A。

(9) 定额 指电机在额定状态下可以持续运行的时间和顺序。定额分为连续定额、短时定额、断续定额三种。例如标有“连续”,则表示电机可以不受时间限制连续运行,标有“25%”,则表示电机在一个周期内工作 25% 的时间,休息 75% 的时间。

(10) 温升 表示电机允许发热的一个限度。温升限度取决于电机所使用的绝缘材料。

1.4 直流电动机的基本方程

1.4.1 电动势平衡方程式

当电枢两端外加电压为 U 时,电枢电流为 I_a ,电枢绕组产生感应电动势 E 。根据电动机的工作原理,电枢电流方向和电源电压一致,感应电动势 E 和电枢电流是反向的,所以 E 也称为反电动势,则直流电动机的电动势平衡方程为

$$U = E + RI_a + 2\Delta U_b \quad (1-1)$$

式中, R 为电枢回路总电阻,包括电枢电阻和电枢串联附加电阻; $2\Delta U_b$ 为一对电刷上的接触压降,一般为 0.6 ~ 1.2 V。

在一般定性分析中,可以将电刷接触压降计入电枢回路压降中去,电动势平衡方程简化为

$$U = E + RI_a \quad (1-2)$$

1.4.2 转矩平衡方程式

电动机的电磁转矩 T 是一个驱动转矩,当电动机恒速运行时,它必须与轴上的负载制动转矩 T_2 和空载制动转矩 T_0 平衡,故

$$T = T_2 + T_0 \quad (1-3)$$

由于空载转矩 T_0 的数值仅为电动机额定转矩的 2% ~ 5%,因此在重载和额定负载下常忽略不计,即 $T \approx T_2$ 。

1.4.3 功率平衡方程式

电动机将电能转变成机械能输出,不能将输入的电功率全部转换成机械功率,在转换过



程中总有一部分能量消耗在电机内部,称为电机损耗。它包括机械损耗、铁芯损耗、铜损耗和附加损耗。

根据电压平衡方程(1-2),两边同乘以 I_a , 即

$$UI_a = EI_a + RI_a^2 \quad (1-4)$$

式中, UI_a 为电源输入功率, EI_a 为电动机电磁功率, RI_a^2 为电枢绕组上的铜损。可以写成下式

$$P_1 = P_M + P_{Cu} \quad (1-5)$$

其中, P_1 为电源输入功率; P_M 为电动机电磁功率; P_{Cu} 为电枢绕组上的铜损。对于并励电动机来讲,励磁回路消耗的功率也来自电源, 因此,根据式(1-5),其功率关系为

$$P_1 = P_M + P_{Cu} + P'_0 \quad (1-6)$$

其中, P'_0 为励磁回路消耗的功率。

电磁功率并不能全部用来输出,它必须克服机械损耗(即摩擦损耗)、铁损耗(即磁滞和涡流损耗)和附加损耗(产生的原因复杂,难以准确计算,一般取额定功率的 0.5% ~ 1%)。这部分损耗不论电动机是否有负载,始终存在,合称为空载损耗,以 P_0 表示。

$$P_M = P_2 + P_0 \quad (1-7)$$

其中, P_2 为电动机轴上的输出功率。

根据式(1-7),可得

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{Cu} + P'_0 \quad (1-8)$$

$$\text{即} \quad P_1 = P_2 + \sum P \quad (1-9)$$

其中, $\sum P$ 为电动机的总损耗功率。

这就是电动机的功率方程,由式(1-9)绘出的电动机功率流程图如图 1-16 所示,该图可以形象地说明各功率之间的关系。

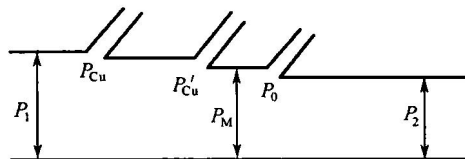


图 1-16 直流电动机功率流程图

1.5 直流电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机稳定运行时,电动机转速 n 与转矩 T 的关系, $n = f(T)$ 。机械特性可分为固有(自然)机械特性和人为机械特性。当电动机的外加电压和励磁电流为额定值时,电枢回路没有串联附加电阻的机械特性为固有机械特性。人为机械特性是指改变电动机一种或几种参数,使之不等于其额定值时的机械特性。从空载到额定负载,转速下降不多,称为硬机械特性。负载增大时,转速下降较快,这时的机械特性为软机械特性。

1.5.1 并励电动机的机械特性

并励电动机的接线示意图和原理图如图 1-13 所示,根据公式 $U = E + RI_a$, $E = C_e n \Phi$ 可以得出

$$U = C_e n \Phi + R_a I_a \quad (1-10)$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \quad (1-11)$$

又因为转矩 $T = C_T \Phi I_a$, 则