



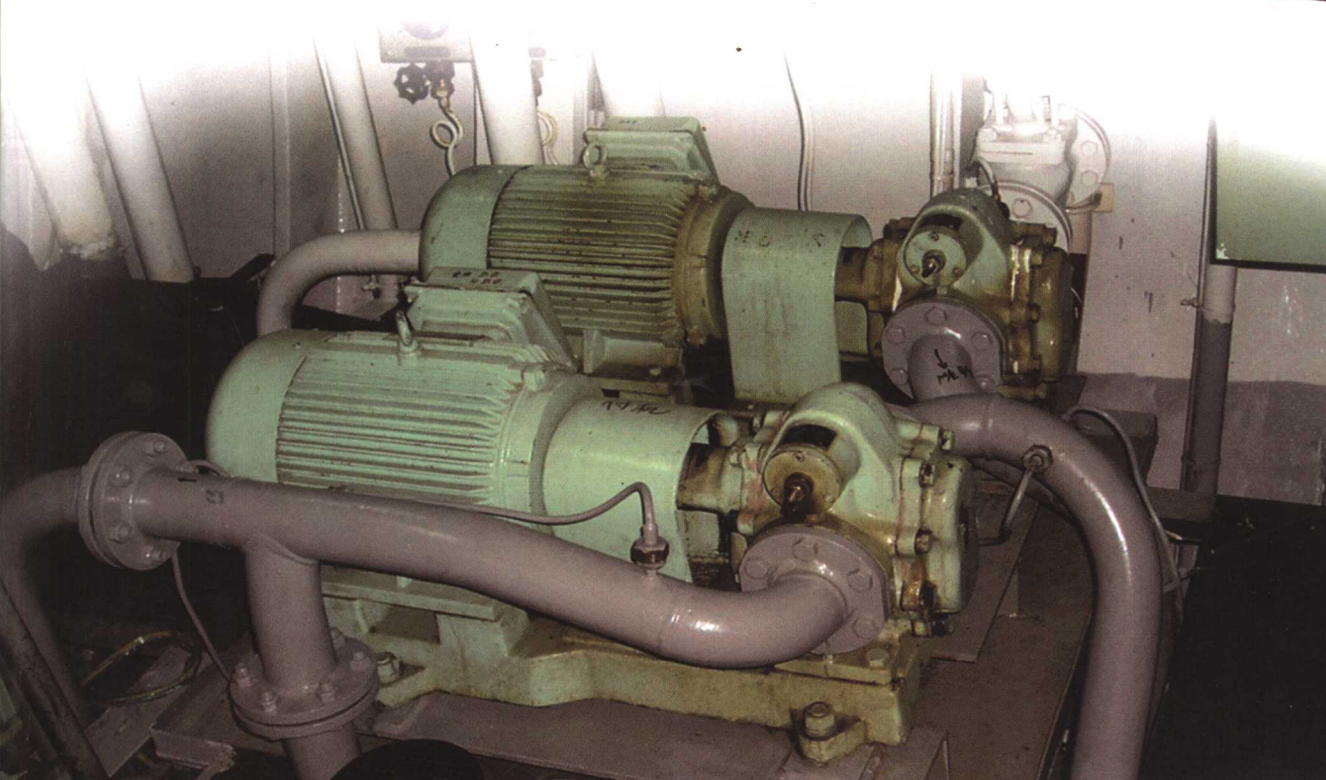
**21世纪高职船舶系列教材**  
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶电气专业

# 船舶电力拖动

CHUANBO DIANLI  
TUODONG

主编 宋 谦  
主审 余 华



哈尔滨工程大学出版社



**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 DIANLI  
TUODONG

主 编 宋 谦  
副主编 王中顺  
主 审 余 华

江苏工业学院图书馆  
藏书章

哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书是一本阐述电机基本原理、常用低压电气线路和船舶电力拖动专业知识的教材。全书共分十三章,第一章至第八章主要阐述直流电机、变压器、三相异步电动机、同步电动机,意在突出交流异步电动机的应用,突出电机的拖动性能主线。第九章至第十章阐述常用低压电器基本知识。第十一章至十三章主要阐述船舶机舱辅机控制、船舶甲板机械电力拖动控制、船舶舵机装置的自动控制系统,对每个控制环节给出具体的控制电路,深入浅出,层次分明,并采用树状形式对电路图进行原理论述。

本书编写时力求实用性,可作为高职高专教材,也可供从事船舶电气工程技术人员的学习和培训教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶电力拖动/宋谦主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006

ISBN 7-81073-866-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079735 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  | 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂    |
| 开 本  | 787mm×1 092mm 1/16 |
| 印 张  | 17.75              |
| 插 页  | 1 张                |
| 字 数  | 400 千字             |
| 版 次  | 2006 年 8 月第 1 版    |
| 印 次  | 2006 年 8 月第 1 次印刷  |
| 印 数  | 1—1 000 册          |
| 定 价  | 28.00 元            |

---

# 高等职业教育系列教材编委会

(按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 主 任 | 孙元政 |     |     |     |  |
| 副主任 | 刘 义 | 刘 勇 | 罗东明 | 季永清 |  |
|     | 施祝斌 | 康 捷 |     |     |  |
| 委 员 | 丛培亭 | 刘 义 | 刘 勇 | 孙元政 |  |
|     | 陈良政 | 肖锦清 | 罗东明 | 季永清 |  |
|     | 俞舟平 | 胡适军 | 施祝斌 | 徐立华 |  |
|     | 康 捷 | 蔡厚平 |     |     |  |

# 前言

船舶电力拖动

CHUANBO DIANSHI TUODONG

随着电机技术的不断发展,近年来电机领域出现了许多新技术、新设备。为适应加入 WTO 后对外开放的深入和国家新近修订的一系列国家标准和设计规范,根据教育部“关于加强高职高专教育人才培养工作的意见”,培养适应社会需要的高等技术应用性专门人才,提高高职高专的办学水平,我们根据多年船舶电力系统和船舶电力拖动课程教学改革经验,对教材体系进行了改革。新的教材体系主要体现以下两个特点:(1)以培养应用型人才为目的,强化实用性与职业技能;(2)加强新知识、新技术的渗透。

本书在论述电机的基本原理、运行基本知识的同时,注重系统的整体性和实用性,并较多地关注电机的应用问题,尽力体现当前电机应用领域中的新技术。对电机拖动的整体功能及相关实用技术进行了系统论述,使这些内容与高等职业教育的方向相吻合。全书主要内容有:直流电机;变压器;三相异步电动机;其他用途的电动机;同步电动机;常用低压电器;继电器—接触器控制电路基本环节;船舶机舱辅机控制;船舶甲板机械电力拖动控制;船舶舵机装置的自动控制系统等。

本书由武汉船舶职业技术学院和浙江交通职业技术学院共同编写完成。其中第一章至第三章由王中顺编写,第四章至第八章由王亚嫔编写,第十章至第十三章由宋谦编写。全书由余华主审,周民、祝福参审。另外,在编写过程中曾得到中船第 701 研究所高级工程师程坤和武昌造船厂陈伟的大力帮助,在此深表感谢。

编 者

2006 年 4 月

# 目 录

21世纪高职船舶系列教材  
SHIJI GAOZHICHUANBOXILIE JIAOCAI

船舶电力拖动

## 第一章 直流电机的原理

- 第一节 直流电机的工作原理
- 第二节 直流电机的基本结构和铭牌数据
- 第三节 直流发电机的运行原理
- 第四节 直流电动机的运行原理
- 第五节 直流电机的换向
- 本章小结
- 思考题与习题

## 第二章 直流电动机的电力拖动

- 第一节 电力拖动系统的运动方程式
- 第二节 生产机械的负载转矩特性
- 第三节 他励直流电动机的机械特性
- 第四节 他励直流电动机的启动和反转
- 第五节 他励直流电动机的制动
- 第六节 他励直流电动机的调速
- 本章小结
- 思考题与习题

## 第三章 变压器

- 第一节 变压器的基本工作原理、用途及结构
- 第二节 变压器的空载运行
- 第三节 变压器的负载运行
- 第四节 变压器参数测定
- 第五节 变压器的运行特性
- 第六节 三相变压器
- 第七节 其他用途的变压器
- 本章小结
- 思考题与习题

## 第四章 三相感应电动机

- 第一节 三相交流绕组
- 第二节 三相交流绕组的磁动势
- 第三节 三相交流绕组的电动势
- 第四节 三相异步电动机的结构与基本工作原理
- 第五节 三相异步电动机的空载运行
- 第六节 三相异步电动机的负载运行
- 第七节 三相异步电动机的功率和电磁转矩
- 第八节 三相异步电动机的工作特性

1  
1  
4  
9  
13  
15  
16  
17  
18  
18  
19  
21  
25  
28  
35  
43  
44  
46  
46  
50  
52  
55  
58  
60  
67  
71  
72  
74  
74  
78  
80  
81  
86  
88  
90  
92

# 目 录

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

船舶电力拖动

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 第九节 三相异步电动机的参数测定           | 94         |
| 本章小结                       | 96         |
| 思考题与习题                     | 97         |
| <b>第五章 三相异步电动机的电力拖动</b>    | <b>98</b>  |
| 第一节 三相异步电动机的电磁转矩           | 98         |
| 第二节 三相异步电动机的机械特性           | 99         |
| 第三节 三相异步电动机的启动             | 102        |
| 第四节 三相异步电动机的调速             | 108        |
| 第五节 三相异步电动机的反转与制动          | 112        |
| 本章小结                       | 117        |
| 思考题与习题                     | 118        |
| <b>第六章 同步电动机</b>           | <b>119</b> |
| 第一节 同步电机的基本结构与工作原理         | 119        |
| 第二节 同步电动机的电动势相量图           | 121        |
| 第三节 同步电动机的功率、转矩和功(矩)角特性    | 124        |
| 第四节 同步电动机的启动               | 127        |
| 本章小结                       | 130        |
| 思考题与习题                     | 131        |
| <b>第七章 其他用途的电动机</b>        | <b>132</b> |
| 第一节 单相异步电动机                | 132        |
| 第二节 其他电动机                  | 135        |
| 本章小结                       | 159        |
| 思考题与习题                     | 159        |
| <b>第八章 电动机的选择</b>          | <b>161</b> |
| 第一节 电动机的一般选择               | 161        |
| 第二节 电动机的发热与温升              | 164        |
| 第三节 电动机额定功率的选择             | 167        |
| 本章小结                       | 177        |
| 思考题与习题                     | 179        |
| <b>第九章 常用低压电器</b>          | <b>181</b> |
| 第一节 电器的作用与分类               | 181        |
| 第二节 低压电器的电磁机构及执行机构         | 181        |
| 第三节 常用控制电器                 | 187        |
| 思考题与习题                     | 192        |
| <b>第十章 继电器—接触器控制电路基本环节</b> | <b>194</b> |
| 第一节 电气图                    | 194        |

# 目 录

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

船舶电力拖动

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| 第二节         | 三相笼型感应电动机全压启动控制电路        | 199        |
| 第三节         | 三相笼型感应电动机减压启动控制电路        | 202        |
| 第四节         | 三相绕线转子感应电动机启动控制电路        | 206        |
| 第五节         | 三相感应电动机电制动控制电路           | 208        |
| 第六节         | 三相感应电动机调速控制电路            | 212        |
|             | 思考题与习题                   | 214        |
| <b>第十一章</b> | <b>船舶甲板机械电力拖动控制</b>      | <b>215</b> |
| 第一节         | 锚机的电力拖动与控制               | 215        |
| 第二节         | 锚机控制线路                   | 217        |
| 第三节         | 直流电动起货机                  | 221        |
| 第四节         | 交流电动起货机                  | 222        |
| 第五节         | 电动液压起货机                  | 229        |
|             | 思考题与习题                   | 232        |
| <b>第十二章</b> | <b>船舶机舱辅机控制</b>          | <b>234</b> |
| 第一节         | 船舶冷藏装置自动控制               | 234        |
| 第二节         | 空调设备电气控制                 | 240        |
| 第三节         | 船舶辅助锅炉自动控制               | 243        |
| 第四节         | 船舶分油机电气系统                | 248        |
|             | 思考题与习题                   | 253        |
| <b>第十三章</b> | <b>船舶舵机装置的自动控制系统</b>     | <b>255</b> |
| 第一节         | 舵与舵机装置                   | 255        |
| 第二节         | 操舵方式及基本工作原理              | 258        |
| 第三节         | 自动舵的基本类型及其基本要求           | 261        |
| 第四节         | 舵机自动控制系统实例               | 264        |
|             | 思考题与习题                   | 268        |
| <b>附录</b>   | <b>电气图常用图形及文字符号新旧对照表</b> | <b>269</b> |



# 第一章 直流电机的原理

本章首先介绍直流电机的工作原理和基本结构,接着分析直流电机的电枢绕组和电枢反应,导出直流电机的电磁转矩和感应电动势公式,然后列出直流电机的基本方程式,并分别分析直流发电机和直流电动机的稳态运行性能,最后简要介绍换向问题。

在电力拖动系统中,将直流电能转换成机械能的旋转电机称为直流电动机,而直流发电机是将机械能转换为直流电能的旋转电机。

直流电动机具有很多优点:过载能力强,启动转矩大,制动转矩大;直流电动机调速性能比交流电动机的调速性能好,调速范围广,调速的平滑性好,调速方式易于控制,调速装置可靠性高,并且调速时损耗小,经济性好。所以,直流电动机被广泛地应用在电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和各种起重设备中。直流发电机供电质量较好,常常作为中小型同步发电机的励磁电源和一些化学工业中的直流电源。但与交流电机相比,直流电机的结构复杂、成本较高、可靠性稍差,使它的应用受到限制。随着电力电子技术的发展,与电力电子装置结合而具有直流电机性能的电机不断涌现,使直流电机有被逐步取代的趋势。尽管如此,研究直流电机仍有一定的理论意义和实用价值。

## 第一节 直流电机的工作原理

直流电机是一种能实现机电能量转换的电磁装置,它能使绕组在气隙磁场中旋转感生出交流电动势,并依靠换向装置,将此交流电变为直流电。其产生交流电的物理根源在于,电机中存在磁场和与之有相对运动的电路,即气隙磁场和绕组。旋转绕组和静止气隙磁场相互作用的关系可通过电磁感应定律和电磁力定律来分析。

根据电磁感应定律,在恒定磁场中,当导体切割磁场磁力线时,导体中将产生感应电动势。如果磁力线、导体及其运动方向三者互相垂直,则导体中产生的感应电动势的大小为

$$e = Blv \quad (1-1)$$

式中  $B$ ——磁感应强度,单位为 T;

$l$ ——导体切割磁力线的有效长度,单位为 m;

$v$ ——导体切割磁场的线速度,单位为 m/s;

$e$ ——导体感应电动势,单位为 V。

依据电磁力定律,当磁场与载流导体相互垂直时,如图 1-1(a)所示,作用在载流导体

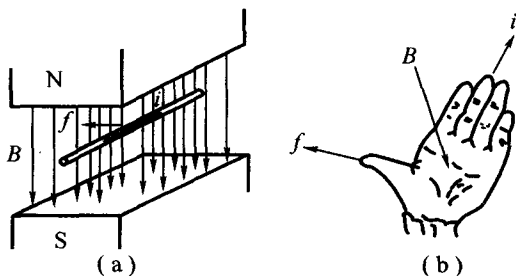


图 1-1 载流导体在磁场内  
受到的电磁力及左手定则



上的电磁力为

$$f = Bil \quad (1-2)$$

式中  $i$ ——载流导体中的电流,单位为 A;

$f$ ——电磁力,单位为 N。

电磁力的方向用左手定则确定,如图 1-1(b)所示。

### 一、直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理是基于导体切割磁力线产生感应电动势的基本原理。但要将绕组中感应的交流电动势变为外电路的直流电动势,则需要经过一套机械整流装置,即换向片和电刷。

直流发电机的工作原理如图 1-2 所示。图中 N、S 是固定的磁极,  $abcd$  是旋转电枢铁芯上的某个线圈,线圈的两个出线端分别接到互相绝缘的两个换向片 1、2 上,换向片固定在转轴上,随转轴一起转动,电刷 A、B 固定不动,并与换向片接触将线圈与外电路的负载接通。

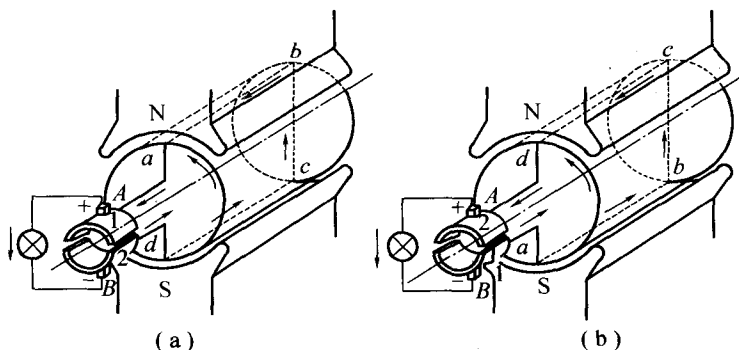


图 1-2 直流发电机工作原理

(a) 导体  $ab$  和  $cd$  分别处在 N 极和 S 极下时; (b) 导体  $cd$  和  $ab$  分别处在 N 极和 S 极下时

当原动机拖动发电机的电枢线圈按逆时针方向旋转时,即线圈  $abcd$  按逆时针方向旋转,此时线圈将切割磁场感应电动势,根据右手定则,可确定  $ab$  导体中感应的电动势方向为由  $b$  指向  $a$ ,  $dc$  导体中感应电动势的方向为由  $d$  指向  $c$ ,于是,在外电路闭合的情况下,电流将沿  $a-1-A-灯-B-2-d-c-b-a$  的方向流通,如图 1-2(a)所示。

当线圈  $abcd$  随电枢转过半周时,如图 1-2(b)所示,此时  $dc$  处于 N 极下,  $ab$  处于 S 极下,则  $dc$  导体中感应电动势的方向变为由  $c$  指向  $d$ ,  $ab$  导体中感应电动势的方向变为由  $a$  指向  $b$ ;并且此时电刷 A 将与换向片 2 接触,而电刷 B 将与换向片 1 接触。于是,此时电流的通路为  $d-2-A-灯-B-1-a-b-c-d$ 。

由此可见,电枢线圈  $abcd$  旋转半周,线圈中的感应电动势就改变一次方向,但由电刷 AB 导出的电动势仍保持原来的方向。这说明直流电机的内部虽然是交流,但对外电路而言是直流。

只有一个线圈的直流发电机,电刷间所得的电动势是脉动电动势。实际上直流电机的电枢上有许多线圈,这样,由电刷导出的电动势的脉动情况会缓和许多,从而得到脉动较小



的直流电动势。

总之,在直流发电机的上述工作过程中,电刷  $A$  所引出的电动势始终是切割  $N$  极磁场导体的电动势,它始终具有正极性;而电刷  $B$  所引出的电动势始终是切割  $S$  极磁场导体的电动势,它始终具有负极性。因此,在电刷两端可获得直流电动势。这就是直流发电机的工作原理。

## 二、直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于载流导体在磁场中受力产生电磁力形成电磁转矩的基本原理。但要获得恒定方向的转矩,需将其外电路的直流电流变为绕组中的交流电流,即同样需要机械整流装置。

直流电动机的基本结构与直流发电机相同,如图 1-3 所示,此时  $A$ 、 $B$  电刷接在直流电源上,电机的轴上带着被拖动的负载。

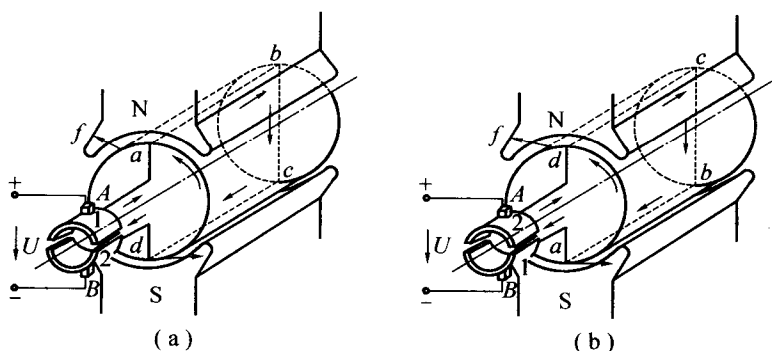


图 1-3 直流电动机的工作原理

(a)起始位置;(b)转过半周时的位置

当直流电流从电刷  $A$  流入,经换向片 1、线圈  $abcd$ 、换向片 2,由电刷  $B$  流出时,如图 1-3(a)所示,载流导体在磁场中将受到电磁力的作用,据左手定则,线圈沿逆时针方向转动。当电枢转过半周时,如图 1-3(b)所示, $dc$  处于  $N$  极下, $ab$  处于  $S$  极下,此时电流仍从电刷  $A$  流入,经换向片 2、线圈  $dcba$ 、换向片 1,最后由电刷  $B$  流出,据左手定则,此时线圈仍然沿逆时针方向转动。因此,电枢将沿一个恒定方向转动。

实际上,直流电动机的电枢上有许多线圈,这些线圈产生的电磁转矩合成为一个总的电磁转矩,拖动负载转动。

总之,在上述直流电动机的工作过程中,单从电枢线圈的角度看,每个导体中的电流方向是交变的;但从磁极看,每个磁极下导体中电流的方向是固定的,即不管是哪个导体运行到该极下,其中的电流方向总是相同的。因此,直流电动机可获得恒定方向的电磁转矩,使电机持续旋转。这就是直流电动机的工作原理。

## 三、电机的可逆性原理

从上述直流发电机和直流电动机工作原理的分析可知,一台直流电机既可作为电动机



运行,也可作为发电机运行,只是外界的约束条件不同而已。

当在直流电机的两电刷端外加直流电压时,电能将通过电刷和换向片输入到电枢线圈中,载流的电枢线圈在磁场中受到电磁力的作用,产生恒定方向的电磁转矩,此时,直流电机可作为拖动生产机械的电动机运行,将电能转换为机械能。

若用原动机拖动直流电机的电枢旋转,那么旋转的电枢线圈在磁场中将产生感应电动势,此感应电动势的方向是交变的,但通过换向片和电刷的作用,能够在电刷端引出直流电动势,即输出电能,从而作为发电机运行,此时,直流电机将机械能转换为电能。

同一台电机,既能作为电动机运行又能作为发电机运行的这种原理,在电机理论中称为电机的可逆性原理。

## 第二节 直流电机的基本结构和铭牌数据

### 一、直流电机的结构

在电机中,要实现机电能量的转换,电路和磁路之间必须有相对运动。所以旋转电机必须具备静止的和旋转的两大部分,而且这两部分之间有一定大小的间隙(称为气隙),以便储存磁能。

静止的部分称为定子。直流电机定子起的作用是产生磁场并作为电机的机械支撑。它包括主磁极、换向极、机座、端盖、轴承和电刷装置等。

旋转部分称为转子。直流电机转子又称为电枢,其作用是感应电动势产生电磁转矩,以实现能量转换。它包括电枢铁芯,电枢绕组,换向器、轴和风扇等。图1-4是直流电机的主要部件图,图1-5是直流电机的径向剖面图。

下面简要介绍直流电机的主要结构部件的基本结构及其作用。

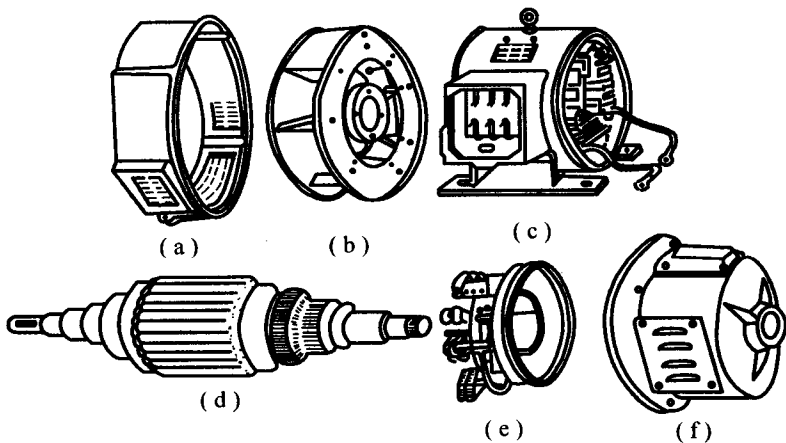


图1-4 直流电机主要部件图

(a)前端盖;(b)风扇;(c)定子;(d)转子;(e)电刷装置;(f)后端盖

#### (一)定子部分

##### 1. 主磁极



主磁极也称为主极,其作用是产生主磁场。在一般的大中型直流电机中,主磁极一般是一种电磁铁,由主极铁芯和励磁绕组组成。主极铁芯通常用 $1 \sim 1.5$  mm厚的钢板冲片叠压紧固而成。绕制好的励磁绕组套在铁芯外面,整个主磁极用螺钉固定在机座上。各主磁极上的励磁绕组的连接必须使其通过励磁电流时,相邻磁极的极性呈N极、S极交替排列。主磁极铁芯的下部(称为极靴)比套绕组的部分(称为极身)宽,这样可以使励磁绕组牢固地套在主磁极铁芯上。

## 2. 换向极

换向极也称为附加极或间极,其作用是改善换向。它装在两个主磁极之间,也是由铁芯和绕组构成的。换向极铁芯一般用整块钢或钢板加工而成,换向极绕组与电枢绕组串联。

## 3. 机座

机座通常用铸钢或厚钢板焊接而成,它是电机的机械支撑,用来固定主磁极、换向极和端盖;同时它也是电机磁路的一部分,在磁路中,机座部分的磁路常称为磁轭。

## 4. 电刷装置

电刷装置的作用是将直流电压、直流电流引入或引出电枢绕组。它由电刷、刷握、压紧弹簧和铜丝辫构成,如图1-6所示。电刷由石墨制成,固定在刷握内,用弹簧压紧在换向器上,刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷架上,彼此之间绝缘。整个电刷装置的位置调整好后,将其固定。一般电刷装置的组数与电机的主磁极极数相等。

## (二) 转子部分

### 1. 电枢铁芯

电枢铁芯是电机主磁路的主要部分。为减小电机内的铁芯损耗,电枢铁芯常采用 $0.5$  mm厚的硅钢片冲压叠装而成,冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽,槽内安放着电枢绕组。有的冲片上还冲有许多圆孔,以形成改善散热的轴向通风孔。

### 2. 电枢绕组

电枢绕组是由一定数目按一定规律连接的线圈组成的。它是用来感应电动势和通过电流的,是直流电机电路的主要部分。线圈一般用带绝缘的圆形或矩形截面导线绕制而成,嵌放在电枢铁芯槽中,线圈的一条有效边嵌放在某个槽的上层,另一条有效边则嵌放在另一槽的下层,如图1-7所示。

### 3. 换向器

换向器是由许多彼此绝缘的换向片构成的。其作用是将电刷上通过的直流电流转换为绕组内的交变电流,或将绕组内的交变电动势转换为电刷端上的直流电动势。电枢绕组的每个线圈两端分别焊接在两个换向片上,换向片之间用云母绝缘,换向器结构如图1-8所示。

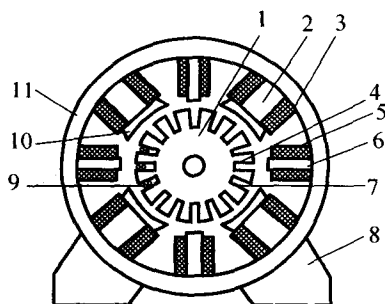


图1-5 直流电机的径向剖面示意图

1—电枢铁芯;2—主磁极;3—励磁绕组;  
4—电枢齿;5—换向极绕组;6—换向极铁芯;  
7—电枢槽;8—底座;9—电枢绕组;  
10—极掌(极靴);11—磁轭(机座)

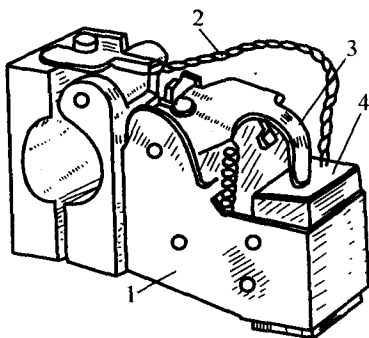


图1-6 电刷装置

1—刷握;2—铜丝辫;3—压紧弹簧;4—电刷

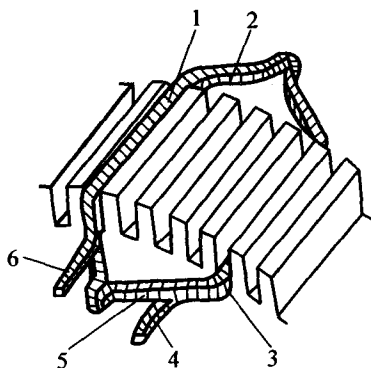


图 1-7 线圈在槽内安放示意图

1—上层有效边;2,5—端接部分;3—下层有效边;4—线圈尾端;6—线圈首端

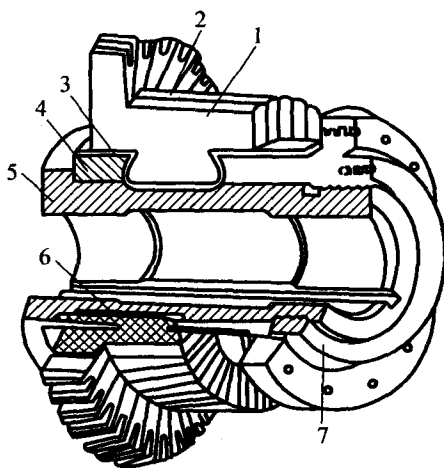


图 1-8 直流电机换向器

1—换向片;2—云母片;3—V形云母型钢环;5—钢套;6—绝缘套筒;7—螺旋压圈

## 二、直流电机的铭牌数据

每台直流电机的机座上都钉有一个铭牌,如图 1-9 所示。铭牌上面标注着额定数据和使用条件。额定数据是电机制造厂按照国家标准的要求,对电机的一些电量或机械量所规定的数值。当电机运行时,如果其电量和机械量均符合所规定的要求,则称电机运行于额定工况。

### (一)直流电机的型号和主要系列

电机的铭牌上都标有电机的型号。直流电机的型号很多,各有其不同的结构特点和使用范围。一般用途的直流发电机的类型代号为 ZF,直流电动机的类型代号为 Z(或 ZD);电机类型代号后面的数字表示电机的尺寸和规格。如图 1-9 所示直流电机的型号为 Z<sub>3</sub>-95,其中 Z 表示直流电动机,注脚 3 表示第三次改型设计,后面的第一个数字 9 表示机座号,第二个数字 5 表示铁芯长度。

| 直流电动机                 |                |
|-----------------------|----------------|
| 型号 Z <sub>3</sub> -95 | 产品编号 7001      |
| 结构类型                  | 励磁方式 他励        |
| 功率 30 kW              | 励磁电压 220 V     |
| 电压 220V               | 工作方式 连续        |
| 电流 160.5 A            | 绝缘等级 定子 B 转子 B |
| 转速 750 r/min          | 重量 685 kg      |
| 标准编号 JB1104-68        | 出厂日期 年 月       |

图 1-9 直流电动机的铭牌举例

直流电机常用系列如下。

1. Z、ZF、ZD 系列。此系列是电磁式小型直流发电机和电动机,其额定功率在 25 ~ 400



W 范围内,额定转速在 1 500 ~ 4 000 r/min 范围内。此系列适合于小型机械传动。

2. Z<sub>4</sub>、Z02 系列。此系列一般为中型电动机,适合于机床、造纸、冶金等行业。其额定转速在 320 ~ 1 500 r/min 范围内。

3. ZJF、ZJD 系列。此系列一般为大型直流发电机和电动机,适合于大型轧钢机、卷扬机等重型机械设备,其额定功率在 1 000 ~ 5 350 kW 范围内。

## (二) 额定值

### 1. 额定功率 $P_N$ (单位为 kW 或 W)

额定功率是指电机在额定条件下运行时的输出功率。对于发电机是指电枢端输出的电功率,有

$$P_N = U_N I_N \quad (1-3)$$

对于电动机是指轴上输出的机械功率,有

$$P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1-4)$$

式中  $\eta_N$  为电机的额定效率。

### 2. 额定电压 $U_N$ (单位为 V)

额定电压是指电机在额定条件下运行时,直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压。

### 3. 额定电流 $I_N$ (单位为 A)

额定电流是指在额定电压和额定负载时允许直流电动机长期输入的电流或允许直流发电机长期输出的电流。

### 4. 额定转速 $n_N$ (单位为 r/min)

额定转速是指电机在额定电压和额定负载时的转速。

此外,铭牌上还标有额定励磁电压  $U_N$  (单位为 V)、额定励磁电流  $I_N$  (单位为 A)、额定效率  $\eta_N$ 、极对数  $p$  和励磁方式等。

电机在实际应用时,是否处于额定运行状态,要由负载大小来决定。一般不允许电机超过额定值运行,因为这会降低电机的使用寿命,甚至损坏电机;但电机长期处于低负载下工作,就不能得到充分利用,效率降低、不经济,所以应根据负载情况选用电机,使电机接近于额定状态运行,才是经济合理的。

## 三、直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式,也称为激磁方式,是指电机励磁电流的供给方式。按照励磁方式,直流电机可分成他励和自励两大类。直流电机的运行特性随励磁方式的不同有很大差别。

### (一) 他励式

他励式直流电机励磁绕组的电流由其他电源供给,励磁绕组与电枢绕组不连接,如图 1-10(a)所示。

### (二) 自励式

自励式发电机利用自身发出的电流励磁,自励式电动机的励磁绕组和电枢绕组由同一电源供电。自励式直流电机又可分为并励、串励和复励三种。

#### 1. 并励式

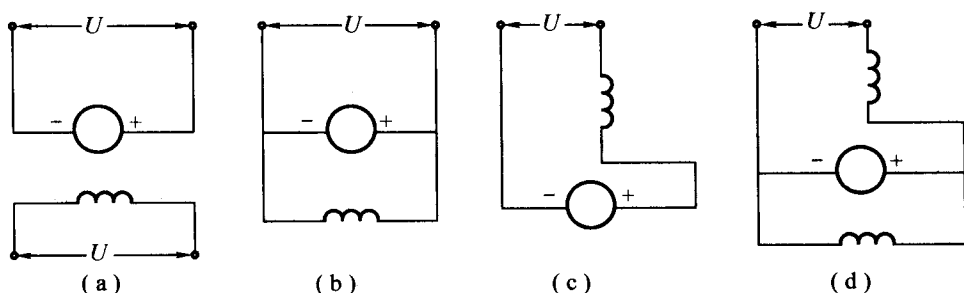


图 1-10 直流电机各种励磁方式接线图

(a)他励式;(b)并励式;(c)串励式;(d)复励式

并励式直流电机的励磁绕组与电枢绕组是并联的,如图 1-10(b)所示。

## 2. 串励式

串励式直流电机的励磁绕组与电枢绕组是串联的,如图 1-10(c)所示。

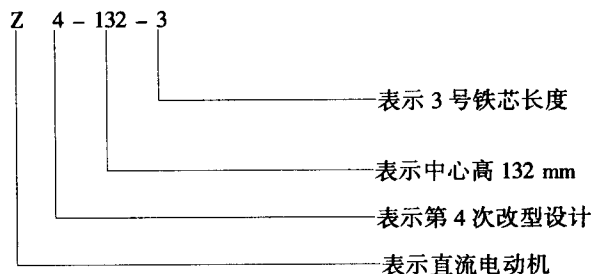
## 3. 复励式

复励式直流电机的主极上有两个励磁绕组,其中一个与电枢绕组并联,另一个和电枢绕组串联,如图 1-10(d)所示。当串励绕组与并励绕组产生的磁动势方向相同时,称为积复励;当两者所产生的磁动势方向相反时,称为差复励。

# 四、国产直流电机的型号及主要产品系列简介

## (一)型号

铭牌上的型号可表明每一种产品的性能、用途和结构特点。国产直流电机的型号采用汉语拼音大写字母和阿拉伯数字的组合来表示。其中汉语拼音大写字母表示电机的结构特点和用途等,阿拉伯数字则表示电机的尺寸及规格。如:



## (二)国产直流电机主要产品系列简介

为了使产品标准化和通用化,电机制造厂生产的产品有很多是系列电机。国产直流电机的系列很多,现介绍几种主要系列。

(1)  $Z_4$  系列:  $Z_4$  系列为 1986 年设计定型的一般用途小型直流电动机,用以逐步取代  $Z_2$ 、 $Z_3$  老系列小型直流电动机,其最大功率可达 480 kW,电压等级有 160 V 和 440 V 两种,转速范围为 400 ~ 3 000 r/min,该系列电机适用于静止整流装置供电,广泛用于轻工、纺织、造



纸、冶金、金属切削机床等作直流传动用。

(2)ZF 和 ZD 系列:一般用途的中型直流发电机和电动机系列。

(3)ZJF、和 ZJD 系列:大型直流发电机和电动机系列。

(4)ZT 系列:广调速直流电动机,适用于转速调节范围在 1:3 及 1:4 的电力拖动系统。

(5)ZZJ—800 系列:轧钢机辅助传动用直流电动机。

(6)ZKJ 系列:冶金、矿山挖掘机用直流电动机。

(7)ZQ 系列:电力机车、工矿电机车和蓄电池供电车等用直流牵引电动机。

(8)ZA 系列:防爆安全型直流电动机,适用于矿井和有易爆气体的场所。

### 第三节 直流发电机的运行原理

#### 一、直流发电机的基本方程式

直流发电机稳态运行时,其电压、电流、转速、转矩、功率等物理量都保持不变且相互制约,其制约关系与电机的励磁方式有关,本节以他励直流发电机为例介绍直流发电机的电动势平衡方程式、转矩平衡方程式和功率平衡方程式。

##### (一)电动势平衡方程式

###### 1. 发电机空载运行时的电动势平衡方程式

他励直流发电机空载运行时,电枢电流  $I_a = 0$ , 则电枢绕组的感应电动势  $E_a$  等于端电压  $U$ 。

###### 2. 发电机负载运行时的电动势平衡方程式

他励直流发电机负载运行时,原动机带动电枢旋转,电枢绕组切割气隙磁场产生感应电动势  $E_a$ , 在感应电动势  $E_a$  的作用下形成电枢电流  $I_a$ , 其方向与感应电动势  $E_a$  相同。电枢电流流过电枢绕组时,形成电枢压降  $I_a r_a$ ; 由于电刷与换向器之间存在接触电阻,电枢电流流过时,形成接触压降  $\Delta U$ 。各物理量的正方向如图 1-11 所示,则直流发电机的电动势平衡方程式为

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U = U + I_a R_a \quad (1-5)$$

式中  $r_a$ ——电枢电阻;

$2\Delta U$ ——正负电刷的总接触压降;

$R_a$ ——电枢电阻和电刷接触电阻之和。

由直流发电机的基本工作原理知,  $E_a > U$ 。

##### (二)转矩平衡方程式

原动机带动电动机的电枢旋转,提供给电动机的转矩为  $T_1$  (称为输入转矩),该转矩是拖动性质的转矩,其方向与电机旋转方向相同,它克服电磁转矩  $T$  (制动性质的转矩)和机械摩擦等引起的制动性转矩  $T_0$  (称为空载转矩),使电机以某一转速稳定运行,因此

$$T_1 = T + T_0 \quad (1-6)$$

##### (三)功率平衡方程式

直流发电机是把机械能转变成直流电能的装置。原动机拖动发电机的电枢旋转,输入机械能;电枢绕组切割磁力线,在绕组中产生交变的感应电动势,通过换向器与电刷的配合