

- 工学结合
- 理实一体
- 侧重技能
- 面向就业

工业和信息化部职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材  
高等职业教育自动化类专业规划教材

# 电机原理 与拖动技术

© 刘丽红 编

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

工业和信息化部职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材  
高等职业教育自动化类专业规划教材

# 电机原理与拖动技术

刘丽红 编

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书的特点为：结合高职教育，将理论与实际相结合，注重实践教学，注重培养学生技能，注重教，更注重学和练；内容翔实，讲述清晰，由浅入深，循序渐进；根据高职教育要求，以理论知识够用为标准，去掉繁杂和高深理论的推导，加强实践，可提高学生的动手能力，使其适应未来岗位的需求。

本书的详细内容有：直流电机，直流电动机的电力拖动基础，变压器，三相异步电动机的工作原理，三相异步电动机的电力拖动，单相异步电动机，同步电机，微特电机，电动机的选择。

本书每章前都有本章要点，供读者参考；每章后有相应的实训项目，供读者实践，还有大量的思考题与习题，供读者使用。

本书适合高职高专的电气自动化技术专业、工业自动化专业、机电一体化专业、供电技术专业的学生阅读，也适合相应专业的电大、夜大学生及相关专业技术人员阅读。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机原理与拖动技术/刘丽红编. —北京：电子工业出版社，2012.4

工业和信息产业职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材

高等职业教育自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-121-16543-6

I. ① 电… II. ① 刘… III. ① 电机—高等职业教育—教材 ② 电力传动—高等职业教育—教材  
IV. ① TM3 ② TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 046463 号

策划编辑：王昭松

责任编辑：谭丽莎

印 刷：北京市李史山胶印厂  
装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：14 字数：358 千字

印 次：2012 年 4 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。



“电机原理与拖动技术”是电气自动化、机电一体化等专业的一门基础课，也是一门实践性较强的课程，其任务是使学生掌握变压器，交、直流电机及微特电机等的基本结构和工作原理，以及运用原理、分析计算等基础知识。

本书结合高职教育特点，以理论知识够用为原则，去掉繁杂和高深理论的推导，加强实际训练教学，旨在提高学生的动手能力和解决实际问题的能力，以适应未来岗位的需求。

本书内容翔实，通俗易懂，循序渐进，深入浅出。

全书共分9章，分别是直流电机、直流电动机的电力拖动基础、变压器、三相异步电动机的工作原理、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机、同步电机、微特电机、电动机的选择。

通过学习，学生应达到以下要求：

- (1) 熟练掌握电机、变压器的拆装、接线、试验及故障处理等技术；
- (2) 能正确使用电动机，包括启动、制动电动机，在电动机正常运行时进行保护等；
- (3) 能够进行各种电动机的维修；
- (4) 能够在实际应用中正确选择电机。

本书每章前都有本章要点，供读者参考；每章后都配有相应的实训内容，以及大量思考题与习题，以供读者使用。本书适合高职高专的电气自动化技术专业、工业自动化专业、机电一体化专业、供电技术专业的学生阅读，也适合相应专业的电大、夜大学生及相应专业技术人员阅读。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请各位读者给予批评指正。

编者  
2012年1月



|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 直流电机               | 1  |
| 1.1 直流电机的结构及工作原理       | 1  |
| 1.1.1 直流电机的结构          | 1  |
| 1.1.2 直流电机的基本原理        | 3  |
| 1.1.3 直流电机的铭牌数据及主要系列   | 5  |
| 1.2 直流电机的电枢绕组          | 6  |
| 1.2.1 电枢绕组的基本知识        | 6  |
| 1.2.2 单叠绕组             | 8  |
| 1.2.3 单波绕组             | 9  |
| 1.3 直流电机的磁场与电枢反应       | 10 |
| 1.3.1 直流电机的空载磁场        | 11 |
| 1.3.2 直流电机的负载磁场        | 12 |
| 1.3.3 直流电机的电枢反应        | 13 |
| 1.4 直流电机的电磁转矩和感应电动势    | 13 |
| 1.4.1 直流电机的电磁转矩        | 13 |
| 1.4.2 直流电机的感应电动势       | 14 |
| 1.5 直流电机的换向            | 15 |
| 1.5.1 换向过程             | 15 |
| 1.5.2 影响换向的电磁原因        | 15 |
| 1.5.3 改善换向的方法          | 16 |
| 1.6 直流电机的励磁方式及损耗       | 17 |
| 1.6.1 直流电机的励磁方式        | 17 |
| 1.6.2 直流发电机的基本方程式      | 18 |
| 1.6.3 直流电动机的基本方程式      | 19 |
| 1.7 直流发电机特性            | 20 |
| 1.7.1 空载特性             | 21 |
| 1.7.2 外特性              | 22 |
| 1.7.3 调节特性             | 23 |
| 1.8 直流电动机的工作特性         | 23 |
| 1.8.1 他励(并励)直流电动机的工作特性 | 23 |
| 1.8.2 串励直流电动机的工作特性     | 24 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 实训1 直流电动机的拆装 .....            | 25        |
| 实训2 直流电动机换向器的检修 .....         | 27        |
| 思考题与习题 .....                  | 29        |
| <b>第2章 直流电动机的电力拖动基础 .....</b> | <b>32</b> |
| 2.1 电力拖动系统的运动方程式 .....        | 32        |
| 2.1.1 运动方程式 .....             | 32        |
| 2.1.2 运动方程式中转矩方向的确定 .....     | 33        |
| 2.2 工作机构转矩、力、飞轮矩、质量的折算 .....  | 33        |
| 2.2.1 工作机构负载转矩的折算 .....       | 33        |
| 2.2.2 直线工作机构负载力的折算 .....      | 34        |
| 2.2.3 工作机构飞轮矩的折算 .....        | 35        |
| 2.2.4 直线工作机构运动质量的折算 .....     | 36        |
| 2.3 生产机械的负载特性 .....           | 37        |
| 2.3.1 恒转矩负载特性 .....           | 37        |
| 2.3.2 恒功率负载特性 .....           | 38        |
| 2.3.3 通风机类负载特性 .....          | 38        |
| 2.4 直流电动机的机械特性 .....          | 39        |
| 2.4.1 直流电动机机械特性的表达式 .....     | 39        |
| 2.4.2 固有机械特性 .....            | 39        |
| 2.4.3 人为机械特性 .....            | 40        |
| 2.5 电力拖动系统的运行 .....           | 42        |
| 2.5.1 电力拖动系统的稳定运行 .....       | 42        |
| 2.5.2 电力拖动系统的稳定运行条件 .....     | 43        |
| 2.6 他励直流电动机的启动 .....          | 44        |
| 2.6.1 启动过程存在的问题 .....         | 44        |
| 2.6.2 直接启动 .....              | 45        |
| 2.6.3 电枢回路串电阻启动 .....         | 45        |
| 2.6.4 降低电枢电压启动 .....          | 46        |
| 2.7 他励直流电动机的制动 .....          | 46        |
| 2.7.1 能耗制动 .....              | 47        |
| 2.7.2 反接制动 .....              | 48        |
| 2.7.3 回馈制动 .....              | 50        |
| 2.7.4 直流电动机的反转 .....          | 52        |
| 2.8 他励直流电动机的调速 .....          | 52        |
| 2.8.1 调速性能指标 .....            | 52        |
| 2.8.2 调速方法 .....              | 53        |
| 2.9 直流电机的应用 .....             | 55        |
| 2.9.1 直流电机的应用概述 .....         | 55        |
| 2.9.2 直流电机在电动自行车上的应用 .....    | 57        |
| 实训3 测试直流电动机的机械特性和调速方法 .....   | 59        |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 思考题与习题 .....                  | 62  |
| <b>第3章 变压器</b> .....          | 64  |
| 3.1 变压器的基本原理和结构及其额定值 .....    | 64  |
| 3.1.1 变压器的主要用途 .....          | 64  |
| 3.1.2 变压器的工作原理 .....          | 65  |
| 3.1.3 变压器的基本结构 .....          | 65  |
| 3.1.4 变压器的铭牌 .....            | 69  |
| 3.2 单相变压器的空载运行和负载运行 .....     | 70  |
| 3.2.1 单相变压器的空载运行 .....        | 70  |
| 3.2.2 单相变压器的负载运行 .....        | 72  |
| 3.3 变压器的参数测定 .....            | 75  |
| 3.3.1 空载试验 .....              | 75  |
| 3.3.2 短路试验 .....              | 76  |
| 3.4 三相变压器 .....               | 77  |
| 3.4.1 三相变压器组的磁路系统 .....       | 77  |
| 3.4.2 三相变压器的电路系统(连接组别) .....  | 78  |
| 3.5 变压器的应用 .....              | 80  |
| 3.5.1 整流变压器 .....             | 80  |
| 3.5.2 电焊变压器 .....             | 82  |
| 3.5.3 自耦变压器 .....             | 83  |
| 3.5.4 仪用互感器 .....             | 84  |
| 实训4 单相变压器的简单操作使用 .....        | 85  |
| 实训5 测定单相变压器的参数和外特性 .....      | 88  |
| 思考题与习题 .....                  | 92  |
| <b>第4章 三相异步电动机的工作原理</b> ..... | 93  |
| 4.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....     | 93  |
| 4.1.1 三相异步电动机的基本结构 .....      | 93  |
| 4.1.2 三相异步电动机的旋转磁场 .....      | 95  |
| 4.1.3 三相异步电动机的工作原理 .....      | 97  |
| 4.1.4 三相异步电动机的转差率 .....       | 98  |
| 4.1.5 三相异步电动机的铭牌数据 .....      | 98  |
| 4.2 三相异步电动机的三相绕组 .....        | 103 |
| 4.2.1 三相绕组的基本概念 .....         | 103 |
| 4.2.2 三相单层绕组 .....            | 104 |
| 4.2.3 三相双层绕组 .....            | 108 |
| 4.3 三相异步电动机的工作特性 .....        | 110 |
| 4.3.1 电动势和电流 .....            | 110 |
| 4.3.2 转矩特性 .....              | 112 |
| 4.3.3 机械特性 .....              | 113 |
| 4.3.4 运行特性 .....              | 115 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 实训 6 三相异步电动机的简单操作使用 .....        | 116        |
| 实训 7 测定三相异步电动机的参数和工作特性 .....     | 118        |
| 思考题与习题 .....                     | 121        |
| <b>第 5 章 三相异步电动机的电力拖动 .....</b>  | <b>122</b> |
| 5.1 三相异步电动机的启动 .....             | 122        |
| 5.2 三相异步电动机的制动 .....             | 125        |
| 5.3 三相异步电动机的调速和节能运行 .....        | 127        |
| 5.3.1 三相异步电动机的调速 .....           | 127        |
| 5.3.2 三相异步电动机的节能运行 .....         | 130        |
| 实训 8 三相异步电动机的调速 .....            | 131        |
| 实训 9 三相异步电动机的启动和制动 .....         | 133        |
| 思考题与习题 .....                     | 136        |
| <b>第 6 章 单相异步电动机 .....</b>       | <b>138</b> |
| 6.1 单相异步电动机的工作原理 .....           | 138        |
| 6.2 单相异步电动机的类型 .....             | 139        |
| 6.2.1 电阻分相式电动机 .....             | 139        |
| 6.2.2 电容分相式电动机 .....             | 140        |
| 6.2.3 电容启动运转式与电容电动机 .....        | 140        |
| 6.2.4 罩极式电动机 .....               | 141        |
| 6.3 单相异步电动机的应用 .....             | 141        |
| 6.3.1 家用电风扇中的单相异步电动机 .....       | 141        |
| 6.3.2 电冰箱中的单相异步电动机 .....         | 142        |
| 6.3.3 洗衣机中的单相异步电动机 .....         | 142        |
| 6.3.4 电动机在电动工具中的应用 .....         | 142        |
| 实训 10 单相异步电动机绕组的测试与接线 .....      | 143        |
| 实训 11 单相异步电动机的启动与调速 .....        | 144        |
| 思考题与习题 .....                     | 146        |
| <b>第 7 章 同步电机 .....</b>          | <b>147</b> |
| 7.1 同步电动机 .....                  | 147        |
| 7.1.1 三相异步电动机的同步运行 .....         | 147        |
| 7.1.2 三相同步电动机的工作原理 .....         | 148        |
| 7.1.3 同步电动机的电磁功率公式 .....         | 149        |
| 7.1.4 同步电动机的 V 形曲线与功率因数的调整 ..... | 149        |
| 7.1.5 同步电动机的启动 .....             | 151        |
| 7.2 三相永磁同步电动机 .....              | 152        |
| 7.2.1 三相永磁同步电动机的基本结构 .....       | 152        |
| 7.2.2 三相永磁同步电动机的工作原理 .....       | 156        |
| 7.2.3 三相永磁同步电动机的调速方法及运行特性 .....  | 159        |
| 7.2.4 三相永磁同步电动机的特点 .....         | 164        |
| 7.3 同步电机的应用 .....                | 165        |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 实训 12 三相同步电动机的启动 .....        | 166        |
| 思考题与习题 .....                  | 169        |
| <b>第 8 章 微特电机</b> .....       | <b>170</b> |
| 8.1 概述 .....                  | 170        |
| 8.2 直流伺服电动机 .....             | 172        |
| 8.2.1 直流伺服电动机的分类 .....        | 172        |
| 8.2.2 直流伺服电动机的特性 .....        | 174        |
| 8.2.3 直流伺服电动机的应用 .....        | 175        |
| 8.3 步进电动机 .....               | 177        |
| 8.3.1 概述 .....                | 177        |
| 8.3.2 步进电动机的工作原理 .....        | 179        |
| 8.3.3 步进电动机的运行特性 .....        | 182        |
| 8.3.4 步进电动机的驱动电源 .....        | 184        |
| 8.4 测速发电机 .....               | 185        |
| 8.4.1 概述 .....                | 185        |
| 8.4.2 直流测速发电机 .....           | 185        |
| 8.4.3 测速发电机的应用 .....          | 187        |
| 8.5 旋转变压器 .....               | 188        |
| 8.5.1 旋转变压器的结构特点 .....        | 188        |
| 8.5.2 旋转变压器的类型 .....          | 189        |
| 8.5.3 正弦和余弦旋转变压器 .....        | 189        |
| 8.6 自整角机 .....                | 189        |
| 8.6.1 自整角机的类型 .....           | 190        |
| 8.6.2 自整角机的结构 .....           | 190        |
| 8.6.3 自整角机的基本原理 .....         | 191        |
| 8.7 直线电动机简介 .....             | 192        |
| 8.7.1 概述 .....                | 192        |
| 8.7.2 直线步进电动机 .....           | 195        |
| 8.7.3 微动直线电动机 .....           | 195        |
| 8.7.4 超声波电动机 .....            | 196        |
| 实训 13 步进电动机的运行与基本特性的测定 .....  | 197        |
| 实训 14 测试永磁式直流测速发电机的输出特性 ..... | 198        |
| 思考题与习题 .....                  | 199        |
| <b>第 9 章 电动机的选择</b> .....     | <b>201</b> |
| 9.1 电动机种类、电压、转速和结构形式的选择 ..... | 201        |
| 9.1.1 电动机种类的选择 .....          | 201        |
| 9.1.2 电动机电压等级的选择 .....        | 202        |
| 9.1.3 电动机额定转速的选择 .....        | 202        |
| 9.1.4 电动机结构形式的选择 .....        | 202        |
| 9.2 电动机容量的选择 .....            | 203        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 9.2.1 连续工作制电动机容量的选择 .....   | 203 |
| 9.2.2 短时工作制电动机容量的选择 .....   | 208 |
| 9.2.3 断续周期工作制电动机容量的选择 ..... | 210 |
| 9.2.4 统计法选择电动机的容量 .....     | 211 |
| 思考题与习题 .....                | 212 |
| 参考文献 .....                  | 214 |

# 第1章 直流电机

## 本章要点

- (1) 直流电机的结构及工作原理。
- (2) 直流电机的电枢绕组。
- (3) 直流电机的磁场与电枢反应。
- (4) 直流电机的电磁转矩和感应电动势。
- (5) 直流发电机特性。
- (6) 直流电动机的工作特性。

## 1.1 直流电机的结构及工作原理

直流电机可作为电动机和发电机运行。其中，直流电动机用于将电能转化为机械能，直流发电机用于将机械能转化为电能。两者的结构基本相同，都由可旋转的转子和静止的定子组成，且定、转子之间存在气隙。

### 1.1.1 直流电机的结构

#### 1. 定子

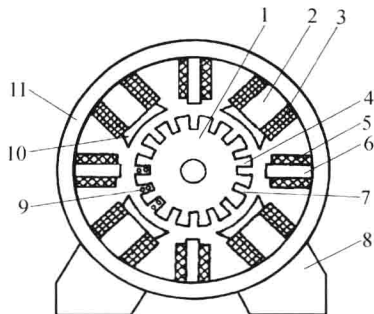
定子主要用来产生磁场。它主要由主磁极、换向极、机座和端盖，以及电刷装置组成。

(1) 主磁极。主磁极包括铁芯和励磁绕组两部分。当励磁绕组中通入直流电流后，铁芯中即产生励磁磁通，并在气隙中建立励磁磁场。励磁绕组通常用圆形或矩形的绝缘导线制成一个集中的线圈，套在铁芯外面。主磁极铁芯一般用 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成，其柱体部分称为极身，靠近气隙一端较宽的部分称为极靴，极靴与极身交接处形成一个突出的肩部，用于支撑励磁绕组。极靴沿气隙表面成弧形，使主磁极下的气隙磁通密度分布更合理。整个主磁极用螺杆固定在机座上。直流电机的结构如图1-1所示，图1-2为其正剖面图。

主磁极总是N、S成对出现。各主磁极的励磁绕组通常为相互串联连接，且连接时要求能保证相邻磁极的极性按N、S交替排列。

(2) 换向极。换向极也由铁芯和绕组构成，其结构如图1-3所示。中、小容量直流电机，其换向极铁芯是用整块钢制成的；大容量直流电机和换向要求高的电机，其换向极铁芯用薄钢片叠成。换向极绕组要与电枢绕组串联，因为其通过的电流大，导线截面积较大，匝

数较少。换向极装在主磁极之间，换向极的数目一般等于主磁极数。在功率很小的电机中，换向极的数目有时只有主磁极极数的一半，或不装换向极。换向极的作用是改善换向，防止电刷和换向器之间出现过强的火花。



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—极靴；11—机座

图 1-1 直流电机的结构图

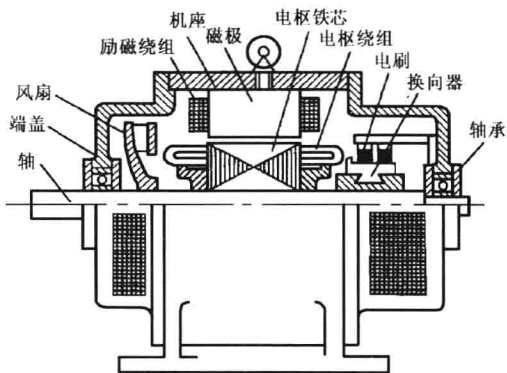


图 1-2 直流电机的正剖面图

(3) 机座和端盖。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成。它用来固定主磁极、换向极及端盖。机座底部焊上或铸上底脚，以便安装直流电机用。机座还是磁路的一部分，其中用于通过磁通的部分称为磁轭。端盖主要起支撑作用，它固定在机座上，其上放置轴承，支撑直流电机的转轴，使直流电机能够旋转。

(4) 电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、压紧弹簧、握杆座和铜丝辫等组成。电刷是用碳-石墨等做成的导电块，电刷装在刷握的盒内，用压紧弹簧把它压紧在换向器的表面上。压紧弹簧的压力可以调整，以保证电刷与换向器表面有良好的滑动接触。刷握固定在刷杆上，刷杆装在握杆座上，彼此之间都绝缘。握杆座装在端盖或轴承盖上，根据电流的大小，每一根刷杆上可以有几个由电刷组成的电刷组，电刷组的数目一般等于主磁极数。电刷的作用是与换向器配合引入、引出电流。电刷盒的装配如图 1-4 所示。

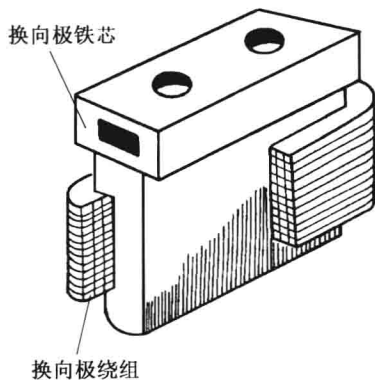
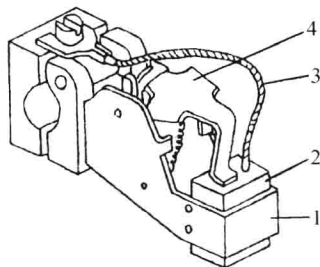


图 1-3 换向极的结构图



1—刷握；2—电刷；3—铜丝辫；4—压紧弹簧

图 1-4 电刷盒的装配

## 2. 转子

直流电机的转子是其转动部分，其主要作用是感应出电动势，产生电磁转矩，使机械能和电能之间相互转换。它主要包括以下几部分。

(1) 电枢。电枢又包括铁芯和绕组两部分。

① 电枢铁芯。电枢铁芯一般用 0.5mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠成，这样铁芯在主磁场中转动时可以减少磁滞和涡流损耗。铁芯表面有均匀分布的齿和槽，槽中嵌放电枢绕组。电枢铁芯构成磁的通路。电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。电枢铁芯冲片如图 1-5 所示。

② 电枢绕组。电枢绕组是将用绝缘铜线绕制成的线圈按一定规律嵌放到电枢铁芯槽中，并与换向器进行相应的连接而制成的。线圈与铁芯之间，以及线圈的上、下层之间均要妥善绝缘，并用槽楔压紧，再用玻璃丝带或钢丝扎紧。电枢绕组是直流电机的核心部件，直流电机工作时在其中产生感应电动势和电磁转矩，从而实现能量的转换。

(2) 换向器。换向器的作用是与电刷配合，将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，或将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔云母片绝缘排列而成的圆柱体，每片换向片的一端有高出的部分，上面铣有线槽，供电枢绕组引出端焊接用。所有换向片均放置在与它配合的具有燕尾状槽的金属套筒内，然后用 V 形钢环和螺钉压圈将换向片和套筒紧固成一体。换向片组与套筒、V 形钢环之间均要用云母环绝缘。换向器的侧剖面如图 1-6 所示。

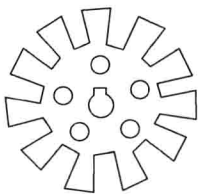


图 1-5 电枢铁芯冲片

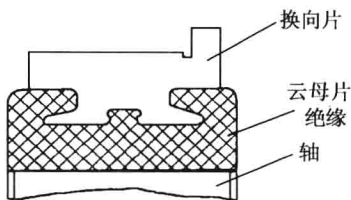


图 1-6 换向器的侧剖面

## 3. 气隙

静止的磁极和旋转的电枢之间的间隙称为气隙。在小容量直流电机中，气隙为 0.5 ~ 3mm。气隙数值虽小，但其磁阻很大，因此它是直流电机磁路的主要组成部分。气隙的大小对直流电机的运行性能有很大影响。

### 1.1.2 直流电机的基本原理

直流电机既可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行，其中发电机和电动机的原理近乎相反，叙述如下。

#### 1. 直流发电机的基本工作原理

如图 1-7 所示为一台两极直流发电机的原理图。图中的 N、S 是静止的主磁极，它们产生磁通。能够在两磁极之间转动的电枢铁芯上装有线圈 abcd。线圈的两个端头接在相互绝

缘的两个铜质的换向片 1、2 上，它们固定于转轴上且与转轴绝缘。在空间静止的电刷 A 和 B 与换向片滑动接触，使旋转的线圈与外面静止的电路相连。

当原动机拖动发电机以恒定转速转动时，线圈的两个边  $ab$  和  $cd$  切割磁力线。根据电磁感应定律可知，在线圈中会产生感应电动势，其方向可用右手定则判定。当电枢沿逆时针方向旋转时，此时  $ab$  中的感应电动势方向为由  $b$  指向  $a$ ；而  $cd$  中的感应电动势的方向为由  $d$  指向  $c$ 。因为电动势是从低电位指向高电位的，所以电刷 A 为正电位，电刷 B 为负电位。外电路中的电流则由电刷 A 经负载流向电刷 B。

当电枢旋转  $180^\circ$  时，线圈的  $ab$  边转至 S 极中心上，线圈的  $cd$  边转到 N 极中心下，它们的感应电动势方向发生改变，即  $ab$  中的感应电动势方向变为由  $a$  指向  $b$ ， $cd$  中的感应电动势方向变为由  $c$  指向  $d$ 。此时， $a$  所接的换向片 1 转至与电刷 B 相接触， $d$  所接的换向片 2 转至与电刷 A 相接触。这样，电刷 A 仍具有正电位，电刷 B 仍具有负电位。外电路中的电流仍是由电刷 A 经负载流向电刷 B。由此可见，当电枢旋转时，会在线圈内部产生交变的电动势，但由于换向器与电刷的配合作用，使电刷 A 总是与位于 N 极下的线圈边接触，电刷 B 总是与位于 S 极上的线圈边接触，所以电刷 A 的极性总为正，电刷 B 的极性总为负，在电刷两端可获得直流电动势。这就是直流发电机的基本工作原理。

## 2. 直流电动机的基本工作原理

如图 1-8 所示是直流电动机的原理图。直流电动机是把电能转换成机械能的装置。直流电动机工作时接于直流电源上，如电刷 A 接电源正极，电刷 B 接电源负极。电流从电刷 A 流入，经线圈  $abcd$ ，再由电刷 B 流出。在图 1-8 所示瞬间，N 极下的线圈边  $ab$  中的电流方向为  $a$  到  $b$ ；S 极上的线圈边  $cd$  中的电流方向为  $c$  到  $d$ 。根据电磁力定律知道，载流导体在磁场中要受力，其方向可由左手定则判定： $ab$  边受力的方向向左， $cd$  边受力的方向向右。两个电磁力对转轴所形成的电磁转矩为逆时针方向，则该电磁转矩会使电枢逆时针旋转。

当线圈转过  $180^\circ$ ，换向片 2 转至与电刷 A 接触，换向片 1 转至与电刷 B 接触，此时电流由正极经换向片 2 流入， $cd$  边的电流方向变为由  $d$  流向  $c$ ， $ab$  边的电流方向变为由  $b$  流向  $a$ ，再由换向片 1 经电刷 B 流回负极。线圈中的电流方向改变了，导体所在磁场的极性也就改变了，但电磁力及电磁力对转轴所形成的电磁转矩的方向未变，仍为逆时针方向，这样可使直流电动机沿一个方向连续旋转下去。

通过电刷和换向器，可使每一磁极下的导体中的电流方向始终不变，从而产生单方向的电磁转矩，使电枢始终向一个方向旋转，这就是直流电动机的基本工作原理。

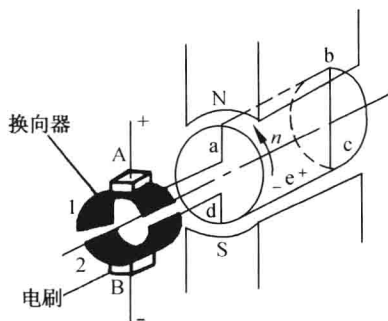


图 1-7 一台两极直流发电机的原理图

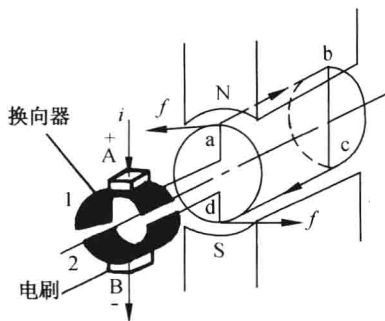


图 1-8 直流电动机的原理图

### 1.1.3 直流电机的铭牌数据及主要系列

#### 1. 直流电机的铭牌数据

电机的铭牌数据是按照国家电机设计标准, 根据实验测定的结果得出的电机正常运行时的技术数据。如果电机运行时的技术数据不为规定值, 则电机将不能正常工作, 甚至会发生损坏。直流电机的铭牌数据主要包括型号、额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁方式、绝缘等级和额定温升等。

(1) 直流电机的型号。国产直流电机的型号一般采用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示, 其格式为: 第一个字符使用大写的汉语拼音, 表示产品系列代号; 第二个字符使用阿拉伯数字, 表示设计序号; 第三个字符使用阿拉伯数字, 表示机座中心高; 第四个字符使用阿拉伯数字, 表示电枢铁芯长度代号; 第五个字符使用阿拉伯数字, 表示端盖的代号。例如, 型号是 Z4-200-21 的直流电机, Z 表示一般用途的直流电动机, 代号 4 是设计序号, 200 是电机中心高 (mm), 21 中的 2 是电枢铁芯长度代号, 1 是端盖的代号。

(2) 额定功率  $P_N$  (kW 或 W): 对于发电机来说, 额定功率是指正、负电刷之间输出的电功率, 有  $P_N = U_N I_N$ ; 对于电动机来说, 额定功率则是指轴上输出的机械功率, 有  $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。

(3) 额定电压  $U_N$  (V): 指额定运行状况下, 直流发电机的输出电压或直流电动机的工作电压。

(4) 额定电流  $I_N$  (A): 指在额定情况下, 直流发电机输出或直流电动机输入的电流。其中直流发电机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} \quad (1-1)$$

直流电动机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{\eta_N U_N} \quad (1-2)$$

(5) 额定效率  $\eta_N$ :

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中,  $P_N$  为额定 (输出) 功率;  $P_1$  为输入功率。

(6) 额定转速  $n_N$  (r/min): 在额定功率、额定电压、额定电流下, 直流电机的转速。

(7) 额定励磁电压  $U_f$  (V): 在额定情况下, 励磁绕组所加的电压。

(8) 额定励磁电流  $I_f$  (A): 在额定情况下, 通过励磁绕组的电流。

在实际运行时, 由于负载的变化, 所以直流电机经常不在额定状态下运行。直流电机在接近额定的状态下运行才是最经济的。

#### 2. 直流电机的主要系列

所谓系列电机, 就是指在应用范围、结构形式、性能水平、生产工艺等方面有共同性, 功率按某一系数递增的成批生产的电机。搞系列化的目的是为了产品的标准化和通用化。我

国直流电机的主要系列有以下一些。

(1) Z 和 ZF 系列：一般用途的中、大型直流电机，其中“Z”为直流电动机系列，“ZF”为直流发电机系列。

(2) ZT 系列：恒功率且调速范围较宽的宽调速直流发电机。

(3) ZZJ 系列：冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机，它具有快速启动和承受较大过载能力的特性。

(4) ZQ 系列：电力机车、工矿电机车和蓄电池供电的电车用的直流牵引电动机。

(5) Z-H 系列：船舶上的各种辅机船用直流电动机。

(6) ZA 系列：矿井和易爆气体场合的防爆安全型直流电机。

(7) ZU 系列：龙门刨床的直流电动机。

(8) ZW 系列：是无槽直流电动机，在快速响应的伺服系统中作为执行元件使用。

(9) ZLJ 系列：是力矩直流电动机，在伺服系统中作为执行元件使用。

(10) BFG 系列：是直流三换向片永磁电动机，用于盒式录音机、电动玩具等。

还有许多系列，请参阅电机手册。

## 1.2 直流电机的电枢绕组

### 1.2.1 电枢绕组的基本知识

电枢绕组是直流电机的核心部分。它是按一定的规律缠绕在定子上的多个绕组线圈。在直流电机中，它的作用是产生感应电动势和电磁转矩，实现机电能量的转换。没有电枢绕组，直流电机就不能工作，它因此而得名，并且人们把直流电机的转子称为电枢。根据连接规律的不同，电枢绕组可分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组及混合绕组五种形式。这里只分析单叠绕组和单波绕组。

直流电机对电枢绕组的要求是：在保证产生足够大的感应电动势和电磁转矩的前提下，尽可能地节约有色金属和绝缘材料，并且要求结构简单，运行可靠，散热良好。

#### 1. 极距

极距就是一个磁极在电枢表面的空间距离，即

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (1-4)$$

式中， $\tau$  表示极距； $D$  表示电枢直径； $p$  表示磁极对数（又称极数）。

实际上，常用一个磁极表面所占的虚槽  $Z_u$  来计算极距，即

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad (1-5)$$

#### 2. 绕组元件

构成绕组的线圈称为绕组元件（以下简称元件），它的两端分别与换向片相连接，有单匝或多匝的。直流电机的电枢绕组是双层的，即每个槽分上、下两层嵌放元件的有效边。每



个元件的一个边嵌放在一个槽子的上层，另一个边嵌放在另一个槽子的下层，如图 1-9 所示。

一个元件有两个边，而一个槽的上、下层可以嵌放不同元件的两个边，因此元件数和槽数相等。一个元件有两个端头，分别连到两个不同的换向片上，而每一个换向片上接两个不同元件的两个端头，因此元件数和换向片数相等。由此可见，元件数 = 换向片数 = 槽数。

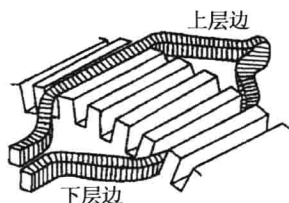


图 1-9 绕组元件的安放示意

### 3. 叠绕组和波绕组

叠绕组是指相串联的后一个元件端接部分紧叠在前一个元件端接部分的上面，整个绕组成折叠式前进；波绕组是指相串联的两个元件像波浪式前进，如图 1-10 所示。

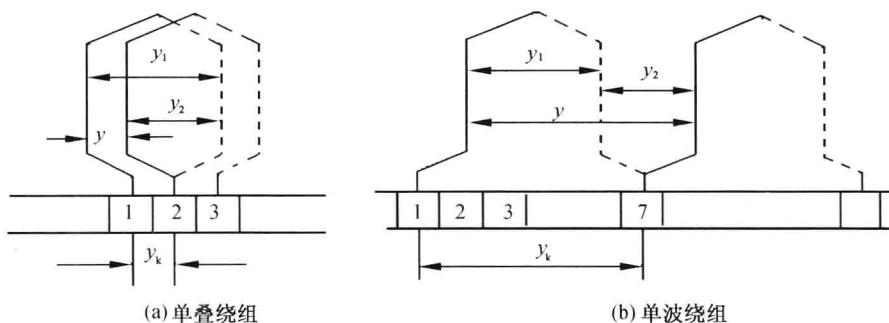


图 1-10 电枢绕组和节距

### 4. 绕组的节距

为了正确地把各元件安放入电枢槽内，并且和相应的换向片按一定规律连接起来，就必须先了解电枢绕组的节距。

(1) 第一节距  $y_1$ 。第一节距是指一个线圈的两个有效边之间在电枢表面上的跨距，用虚槽数表示，如图 1-10 所示。由于线圈边要放入槽内，所以  $y_1$  应是整数。而为了让绕组能感应出最大的电动势，应使  $y_1$  接近或等于极距，即

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \mp \varepsilon \quad (1-6)$$

式中， $\varepsilon$  为正分数，是将  $y_1$  补成整数的一个正分数。若  $\varepsilon = 0$ ，则  $y_1 = \tau$ ，称为整距绕组；若取正号，则  $y_1 > \tau$ ，称为长距绕组；若取负号，则  $y_1 < \tau$ ，称为短距绕组。为了节省铜线及某些工艺要求，一般采用短距或整距绕组。

(2) 第二节距  $y_2$ 。第二节距是指相串联的两个相邻线圈中，第一个线圈的下层边与相邻的第二个线圈的上层边之间的距离，用虚槽数表示。

(3) 换向片节距  $y_k$ 。换向片节距是指线圈的两端所连接的换向片之间的距离，用该线圈跨过的换向片数来表示。

(4) 合成节距  $y$ 。它是指相串联的两个相邻线圈对应的有效边之间的距离，用虚槽数表示。合成节距与第一和第二节距的关系为  $y = y_1 + y_2$ 。