



教育部财政部职业院校教师素质提高计划职教师资培养资源开发项目

# 电机与变压器及其应用

魏佩瑜 刘万强 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



教育部财政部职业院校教师素质提高计划职教师资培养资源开发项目

# 电机与变压器及其应用

主 编 魏佩瑜 刘万强  
副主编 赵云伟 韩晓冬



机械工业出版社

本书共分5个项目、36个任务及8个实训内容,主要以稳态运行为主进行分析,重点阐述了各类电机与变压器的基本概念、基本理论和基本分析方法,对新技术和应用以及电机与变压器的常见故障与维修做了介绍,并精选了典型的例题和难易程度不同的思考题及习题,加深学生对重要知识的理解。

本书主要内容包括直流电机、变压器、异步电动机、同步电机和控制电机5个项目。每个项目分为若干个任务,每个项目都有项目能力训练,在内容编排上遵循理论学习的认知规律和操作技能的形成规律,使学生在项目引领下更好地将理论与实践有机地融合为一体,有利于学生良好的职业情感和职业能力的培养。每一章后面都配有思考题与习题供教学使用,为学生自主研究性学习搭建了理想的平台。全书在传统理论教学的基础上,结合生产实际,突出操作技能,重视学生动手能力的培养,提高其职业技能。

本书采用理实一体化(工作过程系统化)教学方法,以培养“高素质劳动者和应用型专门人才”为目标,以能力为本位,把提高学生的职业能力放在首位,本着“必需、够用”的原则,对课程的知识结构做了一定的整合,调整了部分知识点的引入顺序,淡化了理论推导,简化了单纯的数据计算,结合生产实例,以应用为主,力求浅显易懂。通过项目化(工作过程系统化)教学手段,在有限的教学时间内,使学生具备维修电工中级技能型人才所必需的相关知识和技能。

本书主要用于职教师资本科电气工程及其自动化专业,也可以作为电气工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与变压器及其应用/魏佩瑜,刘万强主编. —北京:机械工业出版社,2017.8

教育部财政部职业院校教师素质提高计划职教师资培养资源开发项目  
ISBN 978-7-111-56807-0

I. ①电… II. ①魏… ②刘… III. ①电机-师资培训-教材②变压器-师资培训-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第103900号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 韩静

责任校对:肖琳 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2017年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·499千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56807-0

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 出版说明

《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》颁布实施以来，我国职业教育进入加快构建现代职业教育体系、全面提高技能型人才培养质量的新阶段。加快发展现代职业教育，实现职业教育改革发展新跨越，对职业学校“双师型”教师队伍建设提出了更高的要求。为此，教育部明确提出，要以推动教师专业化为引领，以加强“双师型”教师队伍建设为重点，以创新制度和机制为动力，以完善培养培训体系为保障，以实施素质提高计划为抓手，统筹规划，突出重点，改革创新，狠抓落实，切实提升职业院校教师队伍整体素质和建设水平，加快建成一支师德高尚、素质优良、技艺精湛、结构合理、专兼结合的高素质专业化的“双师型”教师队伍，为建设具有中国特色、世界水平的现代职业教育体系提供强有力的师资保障。

目前，我国共有60余所高校正在开展职教师资培养，但由于教师培养标准的缺失和培养课程资源的匮乏，制约了“双师型”教师培养质量的提高。为完善教师培养标准和课程体系，教育部、财政部在“职业院校教师素质提高计划”框架内专门设置了职教师资培养资源开发项目，中央财政划拨1.5亿元，系统开发用于本科专业职教师资培养标准、培养方案、核心课程和特色教材等系列资源。其中，包括88个专业项目、12个资格考试制度开发等公共项目。该项目由42家开设职业技术师范专业的高等学校牵头，组织近千家科研院所、职业学校、行业企业共同研发，一大批专家学者、优秀校长、一线教师、企业工程技术人员参与其中。

经过三年的努力，培养资源开发项目取得了丰硕成果。一是开发了中等职业学校88个专业（类）职教师资本科培养资源项目，内容包括专业教师标准、专业教师培养标准、评价方案，以及一系列专业课程大纲、主干课程教材及数字化资源；二是取得了6项公共基础研究成果，内容包括职教师资培养模式、国际职教师资培养、教育理论课程、质量保障体系、教学资源中心建设和学习平台开发等；三是完成了18个专业大类职教师资资格标准及认证考试标准开发。上述成果，共计800多本正式出版物。总体来说，培养资源开发项目实现了高效益：形成了一大批资源，填补了相关标准和资源的空白；凝聚了一支研发队伍，强化了教师培养的“校—企—校”协同；引领了一批高校的教学改革，带动了“双师型”教师的专业化培养。职教师资培养资源开发项目是支撑专业化培养的一项系统化、基础性工程，是加强职教师资培养培训一体化建设的关键环节，也是对职教师资培养培训基地教师专业化培养实践、教师教育研究能力的系统检阅。

自2013年项目立项开题以来，各项目承担单位、项目负责人及全体开发人员做了大量深入细致的工作，结合职教教师培养实践，研发出很多填补空白、体现科学性和前瞻性的成果，有力推进了“双师型”教师专门化培养向更深层次发展。同时，专家指导委员会的各位专家以及项目管理办公室的各位同志，克服了许多困难，按照两部对项目开发工作的总体要求，为实施项目管理、研发、检查等投入了大量时间和心血，也为各个项目提供了专业的咨询和指导，有力地保障了项目实施和成果质量。在此，我们一并表示衷心的感谢。

编写委员会

2016年3月

## 项目专家指导委员会

主任 刘来泉

副主任 王宪成 郭春鸣

成员 (按姓氏笔画排列)

刁哲军 王乐夫 王继平 邓泽民 石伟平 卢双盈

刘正安 刘君义 米靖 汤生玲 李仲阳 李栋学

李梦卿 吴全全 沈希 张元利 张建荣 周泽扬

孟庆国 姜大源 夏金星 徐朔 徐流 郭杰忠

曹晔 崔世钢 韩亚兰

# 前言

“十二五”期间，教育部、财政部启动了“职业院校教师素质提高计划本科专业职教师资培养资源开发项目”，其指导思想为：以推动教师专业化为引领，以高素质“双师型”师资培养为目标，完善职教师资本科培养标准及课程体系。

本书是“职教师资本科电气工程及其自动化专业培养标准、培养方案、核心课程和特色教材开发项目”的成果之一，是根据电气工程及其自动化专业以及中等职业学校教师岗位的职业性和师范性特点，在现代教育理念指导下，经过广泛的国内调研与国际比较，吸取国内外近年来的研究与改革成果，充分考虑我国职业教育教师培养的现实条件、教师基本素养和专业教学能力，以职教师资人才成长规律与教育教学规律为主线，以中等职业学校“双师型”教师职业生涯可持续发展的实际需求为培养目标，按照开发项目中“电机与变压器及其应用”课程大纲，经过反复讨论编写而成的。

全书共分5部分，包括直流电机、变压器、异步电动机、同步电机和控制电机。本书是在继承传统“电机与变压器”教材特色的基础上，努力适应大众化教育时代的专业设置和课时设置的需要而编写的。本书以直流电机、变压器、异步电动机、同步电机和控制电机作为研究对象，突出基本概念、基本原理和基本分析方法的阐述，注重电机作为系统中控制执行元件的功能，重点分析各类电机的稳态性能并重点介绍了各类电机的具体应用。本书的编写特色是：

(1) 采用理论与实践一体化的结构模式，缩短了理论教学与实践教学之间的距离，加强了内在联系，使前后衔接更为合理，强化了知识性与实践性的统一。

(2) 在保证必要的基础理论知识的前提下，突出和加强实践性环节教学，以能力为本位，以“用”字为核心，以培养综合素质为基础，每个项目都有电机在使用时的常见故障分析和实训。

参加本书编写工作的有：魏佩瑜，全面负责策划、选题、制定编写大纲，并编写了直流电机；刘万强，负责编写了异步电动机；赵云伟，负责编写控制电机；韩晓冬，负责编写变压器；王艳萍和李海涛，编写了同步电机；宋美春，对全书做了全面的校对和修改。

在项目评审过程中，专家指导委员会刘来泉（中国职业教育技术协会）、姜大源（教育部职业技术教育中心研究所）、沈希（浙江农林大学）、吴全全（教育部职业技术教育中心研究所教师资源研究室）、张元利（青岛科技大学）、韩亚兰（佛山市顺德区梁璐职业技术学校）、王继平（同济大学职业技术教育学院）对本书的编写提出了非常宝贵的意见，在此表示最诚挚的敬意和感谢！另外，本书在编写过程中参考了相关资料和教材，在此向这些文献的作者表示衷心的感谢！

限于编写组理论水平和实践经验，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 出版说明

## 前 言

项目 1 直流电机	1
任务 1.1 认识直流电机	2
1.1.1 直流电机简介	2
1.1.2 直流电机的工作原理	2
1.1.3 直流电机的基本结构	4
1.1.4 直流电机的额定值	7
任务 1.2 直流电机的共同理论	8
1.2.1 直流电机的电枢绕组	9
1.2.2 直流电机的磁场	15
1.2.3 直流电机中的换向	19
1.2.4 直流电机的电枢电动势和电磁 转矩	23
任务 1.3 直流发电机的运行分析	24
1.3.1 直流发电机的励磁方式	24
1.3.2 直流发电机的基本方程式	25
1.3.3 他励直流发电机的运行特性	27
1.3.4 并励直流发电机	28
任务 1.4 直流电动机的运行分析	30
1.4.1 直流电动机的励磁方式	31
1.4.2 直流电动机的基本方程式	31
1.4.3 直流电动机的工作特性	33
1.4.4 他励直流电动机的机械特性	35
任务 1.5 直流电动机的应用	38
1.5.1 直流电动机的起动	39
1.5.2 他励直流电动机的调速	41
1.5.3 他励电动机的制动	47
1.5.4 串励直流电动机的调速简介—— PWM 调速器	52
任务 1.6 直流电机常见故障分析	53
1.6.1 直流电动机常见故障及原因 分析	53
1.6.2 直流电动机故障处理方法	54
1.6.3 直流发电机常见故障及其处理 方法	56
实训 1.1 直流电机的拆装	57
实训 1.2 验证直流电动机的起动、调速、 反转和制动	60
思考题与习题 1	63
项目 2 变压器	66
任务 2.1 认识变压器	67
2.1.1 变压器简介	67
2.1.2 变压器的基本结构	68
2.1.3 变压器的分类	74
2.1.4 变压器的额定值	75
任务 2.2 变压器的基本工作原理分析	79
2.2.1 变压器的空载运行	79
2.2.2 变压器的负载运行	86
任务 2.3 变压器的参数测定和标么值	92
2.3.1 变压器的参数测定	92
2.3.2 标么值	94
任务 2.4 变压器的运行特性	98
2.4.1 变压器的外特性和电压变化率	98
2.4.2 效率特性	99
任务 2.5 三相变压器	102
2.5.1 三相变压器的磁路系统	102
2.5.2 三相变压器的电路系统	104
2.5.3 变压器的并联运行	108
任务 2.6 特殊用途的变压器	114
2.6.1 自耦变压器	114
2.6.2 三绕组变压器	117
2.6.3 互感器	119
任务 2.7 配电变压器常见故障分析	121
2.7.1 变压器故障检查	121
2.7.2 变压器的故障处理	122
实训 2.1 变压器的空载实验和短路 试验	123
实训 2.2 变压器绕组同名端的判定	125
思考题与习题 2	126
项目 3 异步电动机	128
任务 3.1 认识三相异步电动机	129

3.1.1	三相异步电动机的分类	129	3.9.3	单相异步电动机常见故障	189
3.1.2	三相异步电动机的基本结构	129	实训 3.1	三相异步电动机的拆装	189
3.1.3	三相异步电动机的铭牌	131	实训 3.2	三相异步电动机的检测	192
3.1.4	三相异步电动机的定子绕组 接线	133	思考题与习题 3		195
3.1.5	三相异步电动机的工作原理	135	<b>项目 4 同步电机</b>		197
任务 3.2	三相交流电机的绕组	138	任务 4.1	认识同步电机	197
3.2.1	交流绕组的基本概念	138	4.1.1	同步电机的基本类型	198
3.2.2	三相异步电动机绕组展开图 画法	140	4.1.2	同步电机的基本结构	200
任务 3.3	三相交流电机的磁场	145	4.1.3	同步电机的额定值及主要系列	203
3.3.1	单相绕组的磁场	145	任务 4.2	同步电机的电枢反应	204
3.3.2	三相绕组的磁场	150	4.2.1	同步发电机的空载运行	204
任务 3.4	三相异步电动机的运行	151	4.2.2	同步发电机的电枢反应	207
3.4.1	正弦磁场下交流绕组的感应 电动势	151	任务 4.3	三相同步发电机的稳态分析	213
3.4.2	高次谐波磁场下交流绕组的感应 电动势	153	4.3.1	隐极式同步发电机的稳态分析	214
3.4.3	三相异步电动机的电压方程	155	4.3.2	凸极式同步发电机的稳态分析	215
3.4.4	三相异步电动机的等效电路	156	任务 4.4	三相同步发电机的功率和 转矩	218
3.4.5	三相异步电动机的功率和转矩 平衡方程式	159	4.4.1	功率平衡方程式	218
任务 3.5	三相异步电动机的参数测定和 工作特性	160	4.4.2	转矩平衡方程式	219
3.5.1	绝缘电阻测定	160	4.4.3	同步发电机稳态的功角特性	219
3.5.2	绕组直流电阻的测定	160	任务 4.5	三相同步发电机的运行特性	221
3.5.3	转子开路电压的测定	160	4.5.1	空载特性	222
3.5.4	空载试验	161	4.5.2	短路特性	222
3.5.5	堵转试验	162	4.5.3	外特性和调节特性	223
3.5.6	耐压试验	163	任务 4.6	同步发电机的并联运行	224
3.5.7	三相异步电动机的工作特性	163	4.6.1	并联运行的优点	225
任务 3.6	三相异步电动机的机械特性	164	4.6.2	并联运行的条件	225
3.6.1	电磁转矩的表达式	164	4.6.3	并联投入的方法	226
3.6.2	三相异步电动机的机械特性	165	4.6.4	有功功率和无功功率的调节	228
任务 3.7	三相异步电动机的应用	168	任务 4.7	三相同步电动机和同步 调相机	233
3.7.1	三相异步电动机的起动	168	4.7.1	同步电机的可逆性原理	234
3.7.2	三相异步电动机的调速	173	4.7.2	同步电动机	235
3.7.3	三相异步电动机的制动	177	4.7.3	同步调相机	240
任务 3.8	单相异步电动机	179	4.7.4	永磁同步电动机	241
3.8.1	单相异步电动机的结构	180	实训 4.1	三相同步发电机的参数测定	244
3.8.2	单相异步电动机的工作原理	182	实训 4.2	三相同步发电机的并网运行	248
3.8.3	单相异步电动机的分类	183	思考题与习题 4		251
任务 3.9	异步电动机的常见故障分析	185	<b>项目 5 控制电机</b>		253
3.9.1	三相异步电动机常见故障分析	186	任务 5.1	伺服电动机	253
3.9.2	三相异步电动机常见故障现象及 原因	187	5.1.1	直流伺服电动机	254
			5.1.2	交流伺服电动机	260
			任务 5.2	测速发电机	270
			5.2.1	直流测速发电机	271
			5.2.2	交流测速发电机	276
			任务 5.3	步进电动机	280

5.3.1	认识步进电动机	280	5.6.2	无刷直流电动机	306
5.3.2	反应式步进电动机的工作原理	282	5.6.3	直线电机	308
5.3.3	步进电动机的运行特性	282	5.6.4	开关磁阻电动机	310
5.3.4	步进电动机的主要技术指标	283	任务 5.7	控制电机的应用举例	313
5.3.5	步进电动机的驱动控制	284	5.7.1	直流测速发电机的应用	313
任务 5.4	自整角机	288	5.7.2	伺服电动机在数控机床中的 应用	314
5.4.1	认识自整角机	288	5.7.3	力矩式自整角机在位置测量中 的应用	314
5.4.2	控制式自整角机的工作原理	289	5.7.4	控制式自整角机在火炮发射角 控制系统中的应用	315
5.4.3	力矩式自整角机的工作原理	295	5.7.5	旋转变压器的典型应用	316
5.4.4	自整角机的主要技术指标	296	5.7.6	开关磁阻电动机在数控压力机上 的应用	317
任务 5.5	旋转变压器	297	思考题与习题 5	318	
5.5.1	认识旋转变压器	298	参考文献	320	
5.5.2	正余弦旋转变压器的工作原理	301			
5.5.3	旋转变压器的主要技术指标	303			
5.5.4	线性旋转变压器的工作原理	303			
任务 5.6	新型控制电机介绍	304			
5.6.1	超声波电机	304			

## 项目1

# 直流电机

### 【学习目标】

(1) 了解直流电机的主要结构，尤其注意换向器和电刷的作用、电枢绕组排列的规律以及它们在实现机电能量转换中的功用。

(2) 熟悉直流发电机和直流电动机的基本工作原理，熟练掌握感应电动势和电磁转矩这两个机电能量转换要素的物理意义和计算公式。

(3) 掌握直流电机的运行原理，会通过基本方程式来综合分析电机内部的电磁过程，并能运用这些基本方程式去分析各种励磁方式的直流发电机和电动机。

(4) 了解直流电机的电枢反应、换向过程、产生火花的电磁原因、改善直流电机换向的方法。

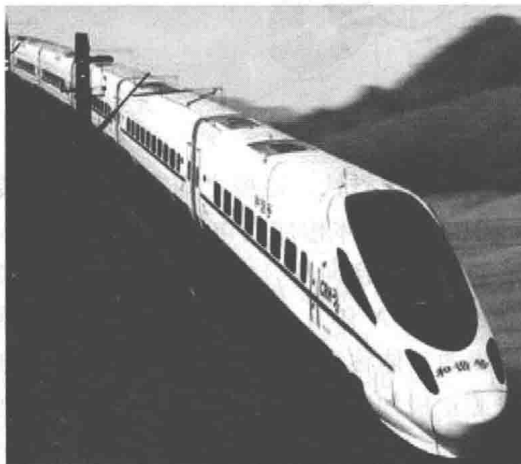
(5) 掌握直流电动机的机械特性，并会利用直流电动机的工作特性和机械特性分析实际问题。

(6) 熟悉直流电动机的起动、调速和制动方法。

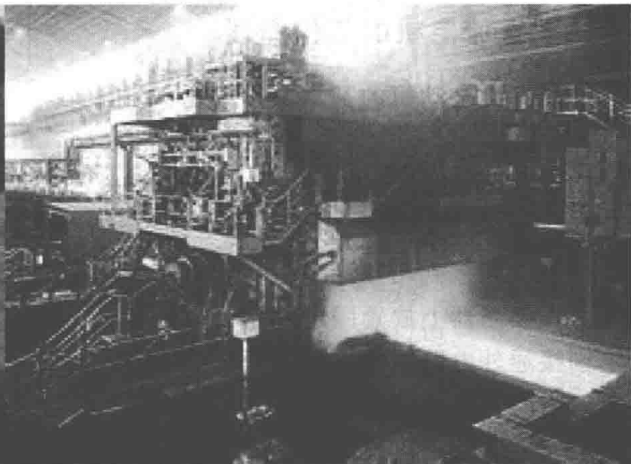
(7) 能分析直流电动机的常见故障，并能进行简单的维护。

### 【项目引入】

在电机的发展史上，直流电动机出现的比较早，它的电源是电池，后来才出现了交流电机。当出现了三相交流电以后，三相交流电动机得到了迅速发展。但是直流电动机有着交流电机无法比拟的优点，直流电动机与交流电动机相比较，具有以下显著优点：具有良好的起动性能，起动转矩较大；能在较宽的范围内进行平滑的无级调速；还适宜于频繁起动。它广泛应用于电力机车、无轨电车、轧钢机、矿井卷扬机、大型机床、起重机等设备中。小容量的直流电动机广泛应用于自动控制系统中。



动车



轧钢机

## 任务 1.1 认识直流电机

### 【任务引入】

在工业企业的生产过程中，所有的生产机床都是由电动机拖动的，直流电动机是其中的一种。对工业生产中的电动机进行定期保养、维护和检修，是保证电力拖动机械设备正常工作的先决条件，为此必须对电机的基本结构和原理进行分析。

### 【任务目标】

- (1) 掌握直流电机的结构及其各组成部分的作用。
- (2) 了解直流电机铭牌中型号和额定值的含义。
- (3) 掌握并能分析直流电机的工作原理。

### 【技能目标】

- (1) 能读懂直流电机的铭牌和额定值。
- (2) 具有进行三相异步电动机的定子绕组星形或三角形连接的能力。
- (3) 掌握三相异步电动机选择的原则，具有初步选用三相异步电动机的能力。
- (4) 能够利用工作原理分析查找直流电动机的故障原因并排除故障。

### 1.1.1 直流电机简介

电机是利用电磁作用原理进行能量转换的机械装置。将直流电能转换为机械能的叫作直流电动机，将机械能转换为直流电能的叫作直流发电机。

直流电动机多用于对调速和起动要求较高的生产机械上；直流发电机则作为各种直流电源，如用于直流电动机的电源，化学工业中电解、电镀的电源，以及作为同步发电机的励磁电源。

直流电机也存在一些缺点，比如制造中消耗金属较多，工艺较复杂，成本较高，运行中电流换向的故障较多，维修比较麻烦。对于粉尘比较大、易燃易爆的场所，直流电机根本无法应用。随着近年电力电子学和微电子学的迅速发展，在很多领域内，直流电动机将逐步为交流调速电动机所取代，直流发电机则正在被电力电子器件整流装置所取代。

### 1.1.2 直流电机的工作原理

#### 一、直流电动机的基本工作原理

图 1-1 是一台最简单的直流电动机的模型。

N 和 S 是一对固定的磁极，可以是电磁铁，也可以是永久磁铁。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体，称为电枢铁心。铁心表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈 abcd，线圈的两端分别接到相互绝缘的两个弧形铜片上，弧形铜片称为换向片，它们的组合体称为换向器。在换向器上放置固定不动而与换向片滑动接触的电刷 A 和 B，线圈 abcd 通过换向器和电刷接通外电路。电枢铁心、电枢线圈和换向器构成的整体称为电枢。此模型作为直流电动机运行时，将直流电源加于电刷 A 和 B，例如将电源正极加于电刷 A，电源负极加于电刷 B，则线圈 abcd 中流过电流，在导体 ab 中，电流由 a 流向 b，在导体 cd 中，电流由 c 流向 d，如图 1-1a 所示。载流导体 ab 和 cd 均处于 N、S 极之间的磁场当中，受到电磁力的作用，

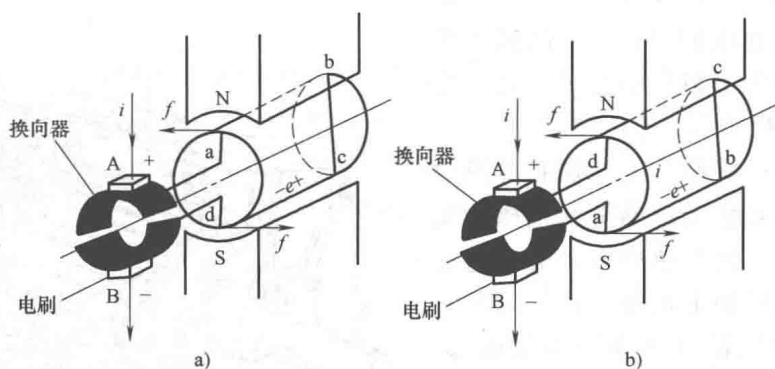


图 1-1 直流电动机的工作原理图

电磁力的方向用左手定则确定,可知这一对电磁力形成一个转矩,称为电磁转矩,转矩的方向为逆时针方向,使整个电枢逆时针方向旋转。当电枢旋转  $180^\circ$  时,导体  $cd$  转到  $N$  极下,  $ab$  转到  $S$  极下,如图 1-1b 所示。由于电流仍从电刷  $A$  流入,使  $cd$  中的电流变为由  $d$  流向  $c$ ,而  $ab$  中的电流变为由  $b$  流向  $a$ ,从电刷  $B$  流出,用左手定则判别可知,电磁转矩的方向仍是逆时针方向。

由此可见,加于直流电动机的直流电源,借助于换向器和电刷的作用,使直流电动机电枢线圈中流过的电流方向是交变的,从而使电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变。确保直流电动机朝着确定的方向连续旋转。这就是直流电动机的基本工作原理。

## 二、直流发电机的基本工作原理

直流发电机的模型与直流电动机相同,不同的是电刷上不加直流电压,而是用原动机拖动电枢朝某一方向(例如朝逆时针方向)旋转。

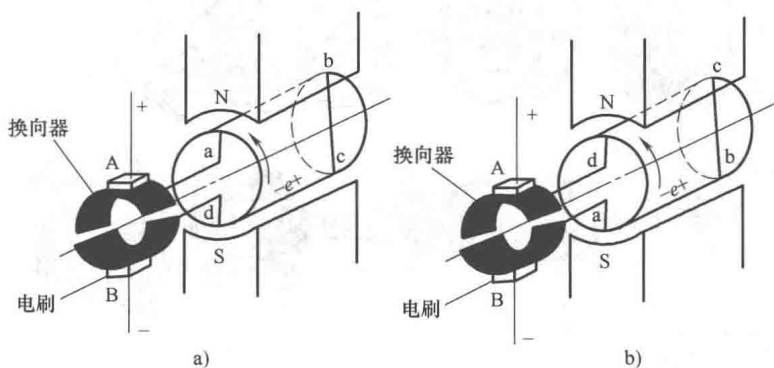


图 1-2 直流发电机的工作原理图

在图 1-2a 中,导体  $ab$  和  $cd$  分别切割  $N$  极和  $S$  极下的磁力线,感应产生电动势,导体  $ab$  中电动势的方向由  $b$  指向  $a$ ,导体  $cd$  中电动势的方向由  $d$  指向  $c$ ,所以电刷  $A$  为正极性,电刷  $B$  为负极性。电枢旋转  $180^\circ$  时,如图 1-2b 所示,导体  $cd$  感应电动势的方向由  $c$  指向  $d$ ,导体  $ab$  感应电动势的方向变为  $a$  指向  $b$ ,所以电刷  $A$  仍为正极性,电刷  $B$  仍为负极性。可见,直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向是交变的,而通过换向器和电刷的作用,在

电刷 A、B 两端输出的电动势是方向不变的直流电动势。若在电刷 A、B 之间接上负载，发电机就能向负载供给直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理。

前面为了分析简便，电枢铁心上只放置了一个线圈，其感应电动势和电磁转矩的脉动较大。为了减少感应电动势和电磁转矩的脉动，实际的电枢绕组由均匀分布在电枢铁心圆周上的许多线圈串联而成。这时换向片的个数也随线圈的增加而增加，由这些换向片组成的部件称为换向器。磁极 N、S 也可根据需要交替放置多对。

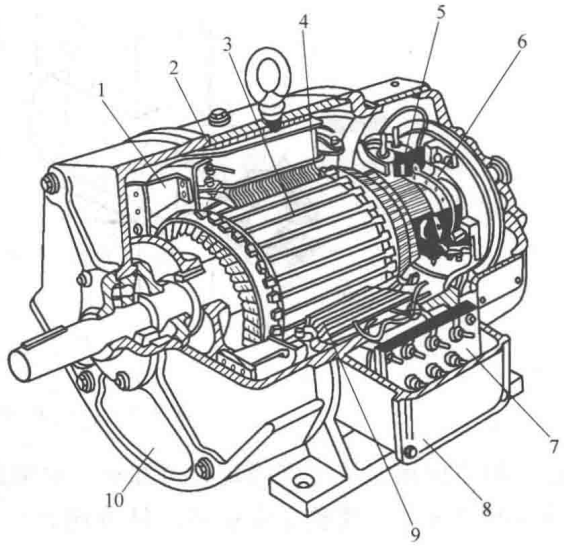


图 1-3 直流电机的结构

直流电机的所有部件可分为固定的和转动的两大部分。固定不动的部分叫定子，包括主磁极、换向磁极、机座、端盖、电刷装置等部件。转动的部分叫转子，通常称为电枢，包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇、转轴等部件。定、转子之间的间隙称为气隙。直流电机的结构如图 1-3 所示，直流电机的组成部件如图 1-4 所示。

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—换向极 10—端盖

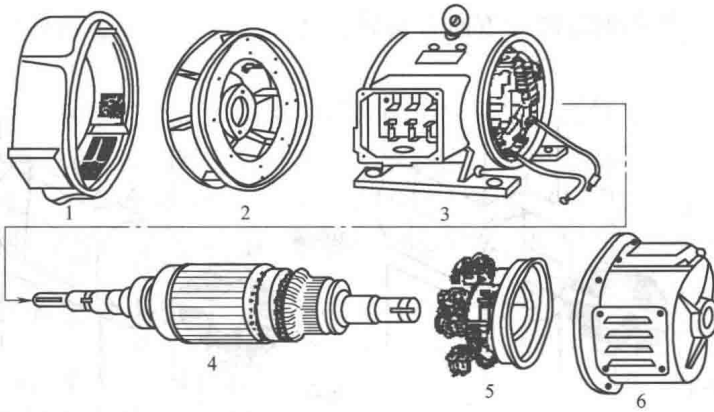


图 1-4 直流电机的组成部件

1—前端盖 2—风扇 3—机座 4—电枢 5—电刷架 6—后端盖

## 一、定子部分

### 1. 主磁极

主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成，如图 1-5 所示。铁心用 0.5~1.5mm 厚的钢板冲片叠压铆紧而成，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴。极靴宽于极身，既可以使气隙中磁场分布比较均匀，又便于固定

励磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成，励磁绕组套在极身上，再将整个主磁极用螺钉固定在机座上。

套在主磁极铁心上的励磁线圈有并励和串励两种。并励线圈的匝数多、导线细；串励线圈的匝数少、导线粗。直流电机中分别把各个主磁极上的并励或串励励磁线圈连接起来，称为励磁绕组。当给励磁绕组通入直流电流时，各主磁极都产生一定的极性。直流电机中相邻主磁极的极性应为 N、S 交替出现。为此，在连接各主磁极上的励磁线圈时，应注意它们的极性问题。

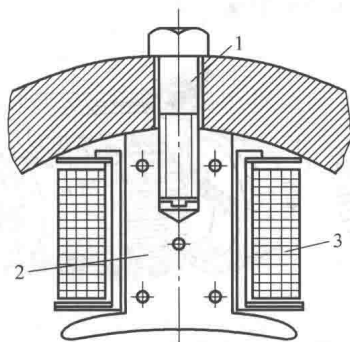


图 1-5 直流电机的主磁极

1—固定主磁极的螺钉 2—主磁极铁心 3—励磁绕组

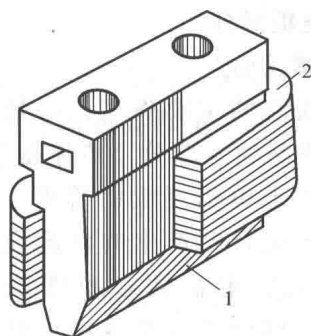


图 1-6 直流电机的换向极

1—换向极铁心 2—换向极绕组

## 2. 换向极

两相邻主磁极之间的小磁极叫换向极，也叫附加极或间极。换向极的作用是改善换向，减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极由换向极铁心和换向极绕组组成，如图 1-6 所示。换向极铁心一般用整块钢制成，对换向性能要求较高的直流电机，换向极铁心可用 1.0~1.5mm 厚的钢板冲制叠压而成。换向极绕组用绝缘导线绕制而成，套在换向极铁心上。换向极绕组总是和电枢绕组相串联的，流过的是电枢电流，所以换向极绕组的匝数少而导线较粗。整个换向极用螺钉固定于机座上，一般，换向极的数目与主磁极相等。

## 3. 机座

机座通常用铸铁、铸钢或钢板焊接而成。机座的主要作用有三个：一是作为磁轭传导磁通，它是电机磁路的一部分；二是用来固定主磁极、换向磁极和端盖等部件；三是借用机座的底脚把电机固定在基础上。所以机座必须具有足够的机械强度和良好的导磁性能。

## 4. 电刷装置

电刷装置主要由电刷、刷握、刷杆、刷杆座、刷辫及压紧弹簧等零件构成，如图 1-7 所示。电刷是石墨或金属石墨做成的导电块，放在刷握内用弹簧以一定的压力压在换向器表面，旋转时与换向器表面形成滑动接触。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，借

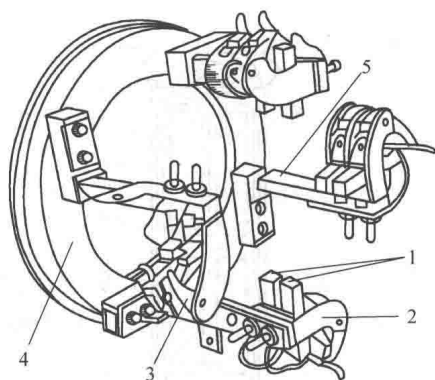


图 1-7 直流电机的电刷装置

1—电刷 2—刷握 3—弹簧  
4—压板 4—座圈 5—刷杆

刷辫将电流从电刷引入或引出。根据电流的大小，每一刷杆上可安装一至数只刷握组成电刷组，同极性的各刷杆用连接线连在一起，再引到出线盒。电刷组的数目一般等于主磁极的数目。刷杆装在可移动的刷杆座上，以便于调整电刷在换向器表面上的位置。

电刷装置的作用是通过固定的电刷和旋转的换向器之间的滑动接触，使转动的电枢绕组电路与静止的外部电路相连接，并实现交、直流电能的转换。

### 5. 端盖

端盖一般用铸铁制成，固定于机座两端，其作用是：装有轴承，支撑电枢转动；保护电机，避免外界杂物落进；维护人身安全，防止接触电机内部器件。

## 二、电枢部分

### 1. 电枢铁心

电枢铁心的主要作用：一是作为电机主磁路的一部分，传导磁通；二是作为嵌放电枢绕组的骨架。为了降低电机运行时产生的涡流损耗和磁滞损耗，电枢铁心通常采用 0.5mm 厚、两面涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成，冲片的形状如图 1-8 所示。叠成的铁心固定在转轴或转子支架上。铁心的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组。

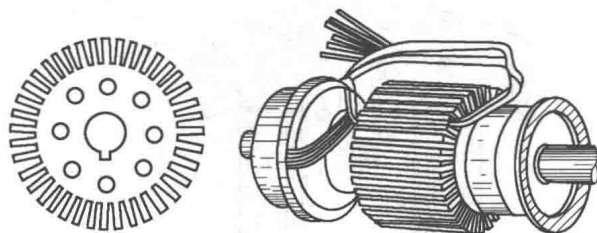


图 1-8 电枢铁心

叠成的铁心固定在转轴或转子支架上。铁心的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组。

### 2. 电枢绕组

电枢绕组由许多线圈按一定规律连接而成，线圈用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成。不同线圈的线圈边分上、下两层嵌放在电枢槽中，线圈与铁心之间和上、下层线圈边之间都必须妥善绝缘，为防止离心力将线圈边甩出槽外，槽口用槽楔固定，如图 1-9 所示。线圈伸出槽外的端接部分用热固性无纬玻璃带进行绑扎。

电枢绕组的作用是：作为发电机运行时，产生感应电动势和感应电流；作为电动机运行时，通电后受到电磁力的作用，产生电磁转矩。

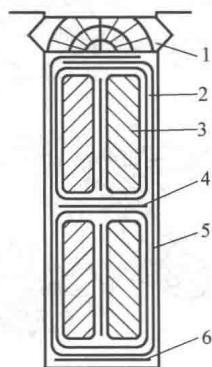


图 1-9 电枢槽内绝缘

- 1—槽楔 2—线圈绝缘 3—导体  
4—层间绝缘 5—槽绝缘 6—槽底绝缘

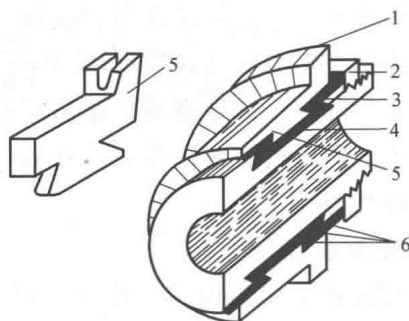


图 1-10 换向器结构图

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

### 3. 换向器

换向器由许多楔形铜片组装而成，形成一个圆柱体，片与片之间用厚 0.4~1.2mm 的云母隔开，所有换向片与轴也是绝缘的，它装在电枢的一端。每一个换向片按一定规律与电枢线圈连接。换向器的结构通常如图 1-10 所示。换向片的下部做成鸽尾形，两端用钢制 V 形套筒和 V 形云母环固定，再用螺母锁紧。

换向器的作用是与电刷配合，实现交、直流能量的转换。

### 4. 转轴

转轴起电枢旋转的支撑作用，需有一定的机械强度和刚度，一般用圆钢加工而成。

## 三、气隙

气隙是电机主磁极与电枢之间的间隙，小型电机气隙约为 1~3mm，大型电机气隙约为 10~12mm。气隙虽小，因空气磁阻较大，在电机磁路系统中有重要作用，其大小、形状对电机性能有显著影响。

### 1.1.4 直流电机的额定值

电机制造厂按照国家标准，根据电机的设计和试验数据而规定的每台电机的主要数据称为电机的额定值。额定值一般标在电机的铭牌上或产品说明书上，如图 1-11 所示。

型号	Z <sub>2</sub> —31	励磁	并励
功率	1.1kW	励磁电压	110 V
电压	110 V	励磁电流	0.895 A
电流	13.3 A	定额	连续
转速	1000 r/min	温升	75℃
出厂编号—XXXXXXXX		出厂日期	× 年 × 月
中华人民共和国 XXX 电机厂			

图 1-11 直流电机铭牌

#### 1. 型号

图 1-11 中给出的电机型号各部分的含义如下：

一般用途的中小型直流电机——  
 第二次改型设计——  
 Z<sub>2</sub>—31  
 ——表示机座号(1~9, 号数越大, 电机直径越大)  
 ——表示铁心长度顺序号(1—短铁心, 2—长铁心)

#### 2. 额定功率 $P_N$

额定功率是指电机在额定运行时的输出功率。对电动机来说，是指轴上输出的机械功率；对发电机来说，是指电枢输出的电功率。单位为 kW（千瓦）。

#### 3. 额定电压 $U_N$

额定电压是指电枢绕组能够安全工作的最大输入电压（电动机）或输出电压（发电机）。单位为 V（伏）。

#### 4. 额定电流 $I_N$

额定电流是指电机在额定运行时，电枢绕组允许流过的最大电流。单位为 A（安）。

### 5. 额定转速 $n_N$

额定转速是指电机在额定电压、额定电流和额定功率下运行时，电机的旋转速度。单位为  $r/min$ （转/分）。

### 6. 励磁电压 $U_f$

对并励电机来说，励磁电压就等于电机的额定电压；对他励电机来说，励磁电压要根据使用情况决定。

### 7. 励磁电流 $I_f$

励磁电流指电机产生主磁通所需要的最大允许电流。

### 8. 定额

定额指电机按铭牌数值工作时可以连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，铭牌上标有“连续”，表示电机可不受时间限制连续运行。

### 9. 温升 $\tau_N$

温升表示电机允许发热的限度。一般将环境温度定为  $40^\circ\text{C}$ 。例如温升  $80^\circ\text{C}$ ，则电机温度不可超过  $80^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C} = 120^\circ\text{C}$ ，否则，电机就要缩短使用寿命。温升限度取决于电机采用的绝缘材料。

### 10. 额定效率 $\eta_N$

电机在额定状态工作时，输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  的百分比值。

额定功率与额定电压和额定电流的关系为

$$\text{直流电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \times 10^{-3} \quad (\text{单位为 kW}) \quad (1-1)$$

$$\text{直流发电机} \quad P_N = U_N I_N \times 10^{-3} \quad (\text{单位为 kW}) \quad (1-2)$$

国产电动机出线端标记见表 1-1。

表 1-1 国产电动机出线端标记

绕组名称	出线端标记	
	始端	末端
电枢绕组	A1 或 S1	A2 或 S2
换向极绕组	B1 或 H1	B2 或 H2
串励绕组	D1 或 C1	D2 或 C2
并励绕组	E1 或 B1	E2 或 B2
他励绕组	F1 或 T1	F2 或 T2

直流电机运行时，是否处于额定运行状态，是由负载大小来决定的。当电机的电流等于额定电流时，称为额定运行，也称为满载运行；在额定运行状态下，电机利用充分，运行可靠，并具有良好的性能。当电机的电流小于额定电流时，称为欠载运行；在欠载运行状态下，电机利用不充分、效率低。当电机的电流大于额定电流时，称为过载运行；在过载运行状态下，易引起电机过热损坏。根据负载选择电机时，最好使电机接近于额定运行。

## 任务 1.2 直流电机的共同理论

### 【任务引入】

电枢绕组是直流电机的电路部分，且电枢绕组是直流电机的核心部分，因此必须对电枢