



全国高职高专“十三五”规划教材 铁道交通类

动车组检修技术专业精品规划教材

全国行业紧缺人才、关键岗位从业人员培训推荐教材

动车组电机与电器

主 编 李 笑
副主编 曲志恒
主 审 高静涛



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

全国高职高专“十三五”规划教材·铁道交通类
动车组检修技术专业精品规划教材
全国行业紧缺人才、关键岗位从业人员培训推荐教材

动车组电机与电器

主 编 李 笑
副主编 曲志恒
主 审 高静涛



北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

《动车组电机与电器》较系统地介绍了 CRH 系列动车组的牵引电动机、低压电器及高压电器的基本理论及应用。全书分为 7 个项目。项目 1 为直流电机基础,介绍了直流电机的工作原理、基本结构及磁场。项目 2 为直流牵引电动机的工作特性,介绍了直流电动机的工作特性及启动、反转、调速和制动的方法。项目 3 为三相异步牵引电动机,介绍了三相异步牵引电动机的基本结构、工作原理及其工作特性,并以 CRH₂ 型车为例介绍了三相异步牵引电动机的应用。项目 4 为电器基本理论,介绍了灭弧的方法及触头和传动装置的类型和工作原理。项目 5 为动车组低压电器,介绍了动车组中用到的接触器及继电器的结构和工作原理。项目 6 为动车组高压电器,介绍了动车组主电路中使用的电器设备结构及工作原理。项目 7 为动车组高低压转换电器,介绍了动车组变压器的结构及工作原理。

本书适合作为高职院校动车组相关专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

动车组电机与电器/李笑主编. —北京:北京交通大学出版社,2016.9

ISBN 978-7-5121-2916-0

I. ①动… II. ①李… III. ①动车-电机 ②动车-电器 IV. ①U266

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 229528 号

动车组电机与电器

DONGCHEZU DIANJI YU DIANJI

策划编辑:刘辉 责任编辑:刘辉 助理编辑:李荣娜 特邀编辑:李晓敏

出版发行:北京交通大学出版社 电话:010-51686414 http://www.bjtu. com. cn

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编:100044

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm × 260 mm 印张:12.5 字数:312 千字

版 次:2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2916-0 / U · 244

印 数:1~1000 册 定价:30.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu. edu. cn。

前 言

我国铁路向现代化技术迈进的标志之一——动车组被广泛运用到各铁路干线。动车组的牵引电机及相关电器作为动车组的核心设备，与列车安全运行息息相关。目前，铁路行业需要大量的动车组设计、制造、运用、维修等方面的高级技术人才和技能人才，为此国内一些高校设置了动车组相关专业。本书针对高等职业技术学院动车组检修技术专业学生编写。

“动车组电机与电器”是动车组检修技术专业的一门核心课程，为适应动车组检修技术专业高技能型人才培养的要求，我们在编写过程中，搜集了大量铁路相关技术文件、书籍及图片，尽量做到图文并茂，较少涉及复杂的理论分析、公式推导，便于读者学习理解。本书主要介绍了动车组的牵引电机、低压电器及高压电器的理论知识，同时又注意反映我国当前动车组运用与检修现状。本书以 CRH₂ 型动车组应用到的各种电机、电器为对象进行介绍。

本书由天津铁道职业技术学院李笑担任主编，兰州铁路局兰州车站曲志恒担任副主编，北京铁路局车辆处高静涛主审。其中项目 1、项目 3 和项目 5 由天津铁道职业技术学院李笑编写。项目 2 的任务 1 由天津铁道职业技术学院李遐编写，项目 2 的任务 2 由天津铁道职业技术学院梁玲坤编写，项目 2 的任务 3 由兰州铁路局兰州车站曲志恒编写。项目 4 由天津铁道职业技术学院张磊编写。项目 6 的任务 1、任务 2 由天津铁道职业技术学院梁炜昭编写，项目 6 的任务 3 由天津铁道职业技术学院罗利锦编写，项目 6 的任务 4、任务 5、任务 6 由天津铁道职业技术学院甄东生编写。项目 7 由天津铁道职业技术学院李飞编写。

鉴于编者水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者
二〇一六年六月

目 录

项目 1 直流电机基础	(1)
任务 1.1 直流电机的工作原理	(2)
任务 1.2 直流电机的基本结构	(4)
任务 1.3 直流电机的磁场	(8)
项目 2 直流牵引电动机的工作特性	(22)
任务 2.1 直流电机的基本方程	(23)
任务 2.2 直流电动机的工作特性	(26)
任务 2.3 直流牵引电动机的启动、反转、调速和制动	(29)
项目 3 三相异步牵引电动机	(39)
任务 3.1 异步电动机的基本结构	(40)
任务 3.2 三相异步电动机的工作原理	(48)
任务 3.3 三相异步电动机的工作特性	(52)
任务 3.4 三相异步电动机的启动、反转、调速和制动	(56)
任务 3.5 CRH ₂ 型动车组牵引电机	(61)
项目 4 电器基本理论	(83)
任务 4.1 电器的发热与电动力	(84)
任务 4.2 电弧的产生和灭弧方法	(87)
任务 4.3 触头及传动装置	(92)
项目 5 动车组低压电器	(107)
任务 5.1 接触器	(108)
任务 5.2 动车组接触器的结构和工作原理	(110)
任务 5.3 继电器	(121)



任务 5.4 动车组继电器的结构和工作原理·····	(123)
项目 6 动车组高压电器 ·····	(135)
任务 6.1 受电弓·····	(136)
任务 6.2 高压设备箱·····	(144)
任务 6.3 真空断路器·····	(144)
任务 6.4 避雷器·····	(149)
任务 6.5 高压互感器·····	(151)
任务 6.6 动车组其他高压电器·····	(153)
项目 7 动车组高低压转换电器 ·····	(161)
任务 7.1 变压器的分类、铭牌及基本结构·····	(162)
任务 7.2 变压器的工作原理及运行分析·····	(167)
任务 7.3 CRH ₂ 型动车组牵引变压器的检查与维护·····	(175)
参考文献 ·····	(192)

项目 1 直流电机基础

项目描述

直流电机具有可逆性，既可以作直流电动机使用，也可以作直流发电机使用。机车在牵引状态时，牵引电机将电能转换成机械能，通过轮对驱动机车运行，此时电机处于电动机状态；机车在电气制动状态时，牵引电机将机械能转化为电能，产生电制动力，此时电机处于发电机状态。

【本项目任务】

- 任务 1.1 直流电机的工作原理
- 任务 1.2 直流电机的基本结构
- 任务 1.3 直流电机的磁场

教学目标

1. 知识目标

- (1) 了解直流电机的工作原理；
- (2) 熟悉直流电机的结构和各部件作用；
- (3) 掌握直流电机的励磁方式，了解电枢反应在直流电机工作中的影响。

2. 能力目标

通过对直流电机的拆装，完成以下任务：

- (1) 独立安装直流电机零部件，并说出各部件的名称；
- (2) 通过对直流电机的拆装，描述直流电机的工作过程；
- (3) 发现并解决直流电机在工作过程中出现的故障。

3. 素质目标

- (1) 培养学生利用网络自学的能力；
- (2) 在项目完成过程中培养学生严谨认真的态度、企业经济效率意识、创新和挑战意识；
- (3) 能客观、公正地进行学习自我评价及对小组成员的评价。

任务 1.1 直流电机的工作原理

1.1.1 直流电机的用途及特点

直流电机具有良好的启动和调速性能，常应用于对启动和调速有较高要求的场合，如宾馆高速电梯、龙门刨床、电力机车、内燃机车、城市电车、地铁列车、电动自行车、造纸和印刷机械、船舶机械、大型精密机床和大型起重机等生产机械中，图 1-1 所示是其应用的几种实例。

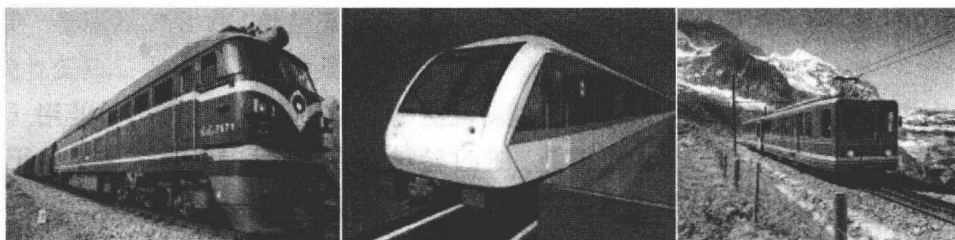


图 1-1 直流电机应用

1.1.2 直流电动机的工作原理

目前，在交-直流电力传动装置中，广泛采用直流串励电动机作为驱动机车车辆的牵引电动机，它的工作原理与一般直流串励电动机相同。在电传动内燃机车上，牵引电动机从牵引发电机输入电能，产生电磁转矩，通过齿轮驱动机车动轮旋转，把电能转变为机械能。

直流电动机工作原理如图 1-2 所示。图中，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。把电刷 A、B 接到直流电源上，电刷 A 接正极，电刷 B 接负极。此时电枢线圈中将有电流流过，电流方向为 $a-b-c-d-a$ 。在磁场作用下，N 极下导体 ab 受力方向从右向左，S 极下导体 cd 受力方向从左向右。该电磁力形成逆时针方向的电磁转矩。当电磁转矩大于阻力转矩时，电动机转子逆时针方向旋转。

当电枢旋转到图 1-3 所示位置时，原 N 极下导体 ab 转到 S 极下，受力方向从左向右，原 S 极下导体 cd 转到 N 极下，受力方向从右向左。该电磁力形成逆时针方向的电磁转矩。线圈在该电磁力形成的电磁转矩作用下继续逆时针方向旋转。

实际的直流电动机，电枢圆周上均匀地嵌放许多线圈，相应地换向器由许多换向片组成，使电枢线圈所产生的总的电磁转矩足够大且比较均匀，电动机的转速也就比较均匀。

在直流电动机中，电刷两端虽然加的是直流电源，但在电刷和换向器的作用下，线圈内部却变成了交流电，从而产生了单方向的电磁转矩，驱动电动机持续旋转。同时，旋转的线圈中也将产生感应电动势，其方向与线圈中电流方向相反，也称作反电动势。直流电动机若

要维持继续旋转，外加电压就必须高于反电动势，只有这样才能不断克服反电动势而流入电流，将电能转换成机械能。

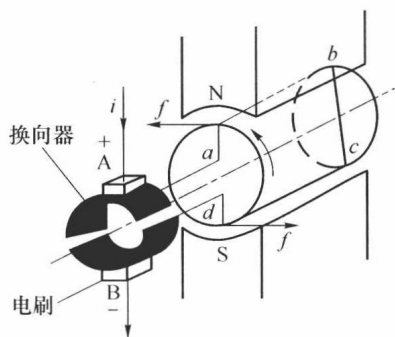


图 1-2 直流电动机工作原理图 1

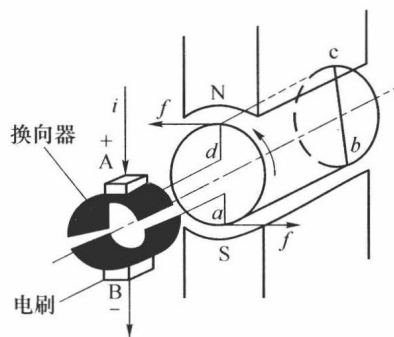


图 1-3 直流电动机工作原理图 2

1.1.3 直流发电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

直流发电机的物理模型如图 1-4 所示。其中 N、S 为定子磁极，abcd 是固定在可旋转导磁圆柱体上的线圈，线圈连同导磁圆柱体称为电机的转子或电枢。线圈的首末端 a、d 连接到两个相互绝缘并可随线圈一同旋转的换向片上。转子线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷进行的。

直流发电机是将机械能转变成电能的旋转机械。

当原动机驱动电机转子逆时针旋转时，线圈 abcd 将产生感应电动势。

如图 1-4 所示，导体 ab 在 N 极下，a 点高电位，b 点低电位；导体 cd 在 S 极下，c 点高电位，d 点低电位；电刷 A 极性为正，电刷 B 极性为负。

当原动机驱动电机转子逆时针旋转 180°后，导体 ab 在 S 极下，a 点低电位，b 点高电位；导体 cd 在 N 极下，c 点低电位，d 点高电位；电刷 A 极性仍为正，电刷 B 极性仍为负。可见，与电刷 A 接触的导体总是位于 N 极下，与电刷 B 接触的导体总是位于 S 极下。

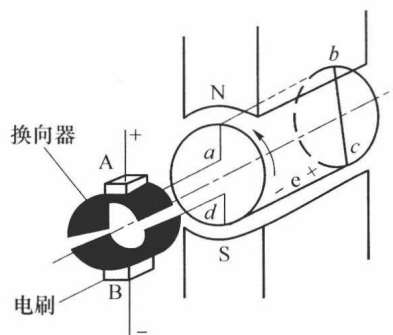


图 1-4 直流发电机的物理模型

2. 电机可逆原理

从上述基本电磁情况来看，一台直流电机原则上既可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行，只是其输入、输出的条件不同而已。例如，用原动机拖动直流电机的电枢，将机械能从电机轴上输入，而电刷上若不加直流电压，则从电刷端可以引出直流电动势作为直流电源，输出电能，电机将机械能转换成电能，称为发电机；若在电刷上加直流电压，将电能输入电枢，则从电机轴上输出机械能，拖动生产机械，将电能转换成机械能，称为电动机。这种同一台电机，既能用作发电机又能用作电动机运行的原理，在电机学理论中称为电机的可逆原理。



任务 1.2 直流电机的基本结构

1.2.1 直流电机的基本结构

直流电机主要由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，在定子和转子之间有一定大小的间隙（称气隙）。定子部分包括机座、主磁极、换向极、电刷装置等，转子部分包括电枢、换向器等部件。其结构如图 1-5 所示。

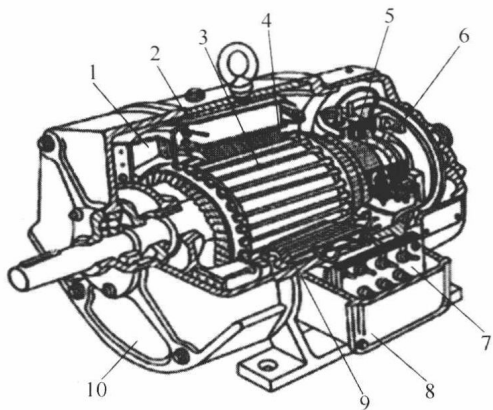


图 1-5 直流电机结构图

1—风扇；2—机座；3—电枢；4—主磁极；5—电刷装置；
6—换向器；7—接线板；8—出线盒；9—换向极；10—端盖

1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场、提供磁路和作为电机的机械支撑，它由机座、主磁极、换向极、电刷装置、端盖及轴承等部件组成。以下介绍主要部件。



图 1-6 机座

1) 机座

机座起到机械支撑和导磁磁路两个作用，机座如图 1-6 所示。它既是安装电机所有零件的外壳，又是联系各磁极的导磁铁轭（简称磁轭，指本身不产生磁场，在磁路中只起磁力线传输作用的软磁材料）。机座通常为铸钢件，也有采用钢板焊接而成的。对于换向要求较高的电机，可采用叠片结构的机座。

2) 主磁极

主磁极（简称主极）如图 1-7 所示，由主极铁芯和主极线圈两部分组成。主极铁芯一般用 1~1.5 mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用螺钉紧成一个整体。小型电机的主极线圈用绝缘铜线（或铝线）绕制而成，大中型电机主极线圈用扁铜线绕制，并进行绝缘处理，然后套在主极铁芯外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。

主磁极的主要作用是建立主磁场。绝大多数直流电机的主磁极不是用永久磁铁而是由励磁绕组通以直流电流来建立磁场的。主磁极由主极铁芯和套装在铁芯上的励磁绕组构成。主极铁芯靠近转子一端的扩大的部分称为极靴，它的作用是使气隙磁阻减小，改善主极磁场分



布，并使励磁绕组容易固定。

3) 换向极

换向极又称为附加极，如图1-8所示。它的主要作用是改善换向，安装在两相邻主磁极之间，由换向极铁芯和套在铁芯上的换向极绕组构成。换向极铁芯大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的功率较大的电机中，为了更好地改善电机换向，换向极铁芯也采用叠片结构。换向极线圈与主极线圈一样，也是用圆铜线或扁铜线绕制而成，经绝缘处理后套在换向极铁芯上，最后用螺钉将换向极固定在机座内壁。

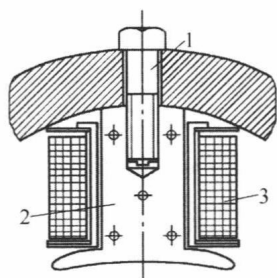


图1-7 主磁极

1—固定主极的螺钉；2—主极铁芯；3—励磁绕组

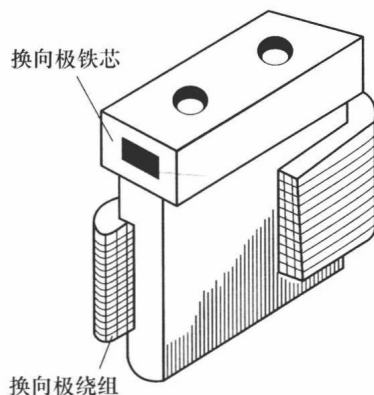


图1-8 换向极

4) 电刷装置

电刷装置是电枢电路的引出（或引入）装置，它由电刷、刷握、刷杆等部分组成，如图1-9所示。它的作用是通过电刷和换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路相连。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内，用弹簧压板压住，刷握固定在座圈上，成为一个整体部件。

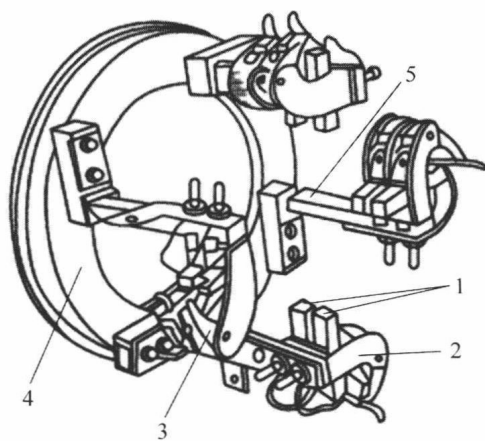


图1-9 电刷装置

1—电刷；2—刷握；3—弹簧压板；4—座圈；5—刷杆

2. 转子

转子又称电枢，是电机的转动部分，其作用是感应电动势和产生电磁转矩，从而实现能量的转换。它主要由转轴、电枢铁芯、电枢绕组和换向器等组成，直流电机转子如图1-10所示。

1) 转轴

转轴的作用是用来传递转矩的，所以要求转轴有一定的机械强度和刚度，一般是用合金钢锻压而成。

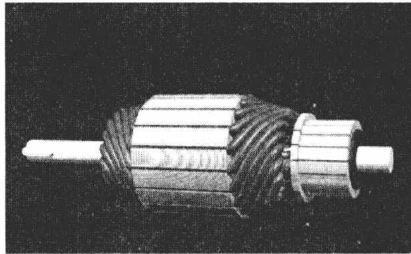


图 1-10 直流电机转子

2) 电枢铁芯

电枢铁芯是电机磁路的一部分，也是承受电磁力作用的部件。它的作用是通过磁通和嵌放电枢绕组。当电枢在磁场中旋转时，在电枢铁芯中将产生涡流和磁滞损耗，为了减小这些损耗的影响，电枢铁芯通常用 0.35 ~ 0.5 mm 厚的电工钢冲片叠压而成，电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。电枢铁芯如图 1-11 所示，沿铁芯外圈均匀分布有槽，在槽内嵌放电枢绕组。

3) 电枢绕组

电枢绕组由一定数目的电枢线圈按一定的规律连接组成，是直流电机的电路部分，也是产生感应电动势、电磁转矩进行机电能量转换的部分。线圈用绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成，分上下两层嵌放在电枢铁芯槽内，上下层及线圈与电枢铁芯之间都要妥善地绝缘，并用槽楔压紧，如图 1-12 所示。为了防止离心力将绕组甩出槽外，槽口处需要用槽楔将绕组压紧。电枢绕组端头则按一定规律嵌放在换向器铜片的片槽内，并用锡焊或氩弧焊焊接。

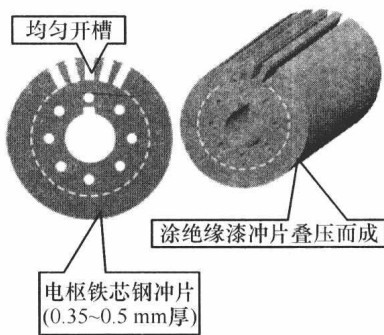


图 1-11 电枢铁芯

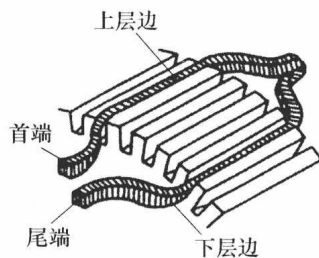


图 1-12 电枢绕组

4) 换向器

在直流电机中，换向器起逆变作用，即在直流电动机中，它将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流；在直流发电机中，它将绕组内的交流电动势整流成电刷两端的直流电动势。因此换向器是直流电机的关键部件之一。如图 1-13 所示，换向器由许多换向片排成一个圆筒，其间用云母片绝缘，两端再用 V 形云母环和 V 形钢环夹紧而构成。

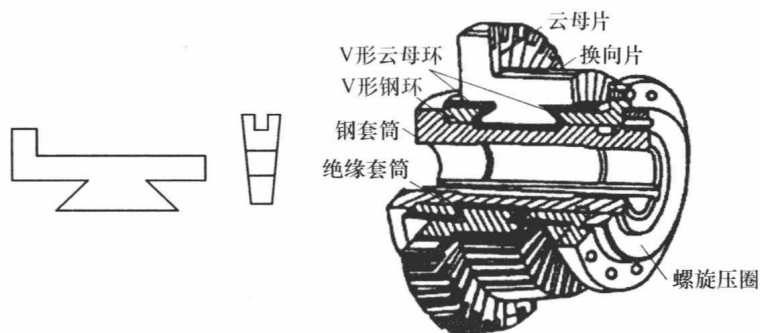


图 1-13 换向器

3. 气隙

在主极极靴和电枢间的间隙称为气隙。它的作用是保证电机的安全运行，同时又是磁路的重要组成部分。小型电机气隙为 1~3 mm；大型电机气隙可达 10~12 mm。

1.2.2 直流电机的铭牌及额定值

电机的铭牌上标明了电机的型号及额定数据，这里简要介绍图 1-14 所示的电机的型号、规格、性能，以供用户选择和使用参考。

额定值是制造厂对各种电气设备在指定工作条件下运行时所规定的一些量值。在额定状态下运行时，可以保证各电气设备长期可靠地工作，并具有优良的性能。额定值也是制造厂和用户进行产品设计或试验的依据。额定值通常标在各电气设备的铭牌上，故又叫铭牌值。

直流牵引电动机			
电机型号	ZD105	额定功率	530kW
额定电压	680V	额定电流	835A
额定转速	955r/min	绝缘等级	H
电机编号		出厂日期	
中国南车集团戚墅堰机车车辆厂			

直流电动机			
型号		励磁方式	
容量	kW	励磁电压	V
电压	V	定额	
电流	A	绝缘等级	
转速	r/min	质量	kg
技术条件		出厂日期	
出厂编号		励磁电流	A
×××电机厂			

图 1-14 直流电动机铭牌

1. 额定功率 P_N

额定功率 P_N 是指电机在铭牌规定的额定状态下运行时，电机的输出功率，以“W”为量纲单位。若大于 1 kW 或 1 MW 时，则用 kW 或 MW 表示。

对于直流发电机， P_N 是指发电机带额定负载时，电刷输出的功率，它等于额定电压和额定电流的乘积，即

$$P_N = U_N I_N$$

对于直流电动机， P_N 是指电动机带额定负载时，转轴上输出的机械功率，故公式中还应存在额定效率 η_N ，即

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$



2. 额定电压 U_N

额定电压 U_N 是指额定状态下电枢出线端的电压，以“V”为单位。

3. 额定电流 I_N

额定电流 I_N 是指电机在额定电压、额定功率时的电枢电流值，以“A”为单位。

4. 额定转速 n_N

额定转速 n_N 是指额定状态下运行时转子的转速，以“r/min”为单位。

5. 额定励磁电流 I_f

额定励磁电流 I_f 是指电机在额定状态时的励磁电流值。

此外，还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升、额定效率等。额定值是选用或使用电机的主要依据，人们一般希望电机按额定值运行。但实际上，电机运行时的各种数据可能与额定值不同，它们由负载的大小来确定。若电机的电流正好等于额定值，称为满载运行；若电机的电流超过额定值，称为过载运行；若电机的电流比额定值小得多，称为轻载运行。长期过载运行将使得电机过热，降低电机寿命，甚至造成损坏；长期轻载运行又使得电机的容量不能得到充分利用。这两种情况都将降低电机的效率，都是不经济的。故在选择电机时，应根据负载情况尽可能使电机运行在额定值附近。

任务 1.3 直流电机的磁场

1.3.1 直流电机的励磁方式

直流电机的性能与它的励磁方式有密切的关系，励磁方式是指对主磁极励磁绕组的供电方式。不同励磁方式的直流电机，其特性有很大的差异，因此励磁方式是选择直流电机的重要依据。按照励磁绕组和电枢绕组连接方式的不同，可分为他励、并励、串励和复励等励磁方式，如图 1-15 所示。

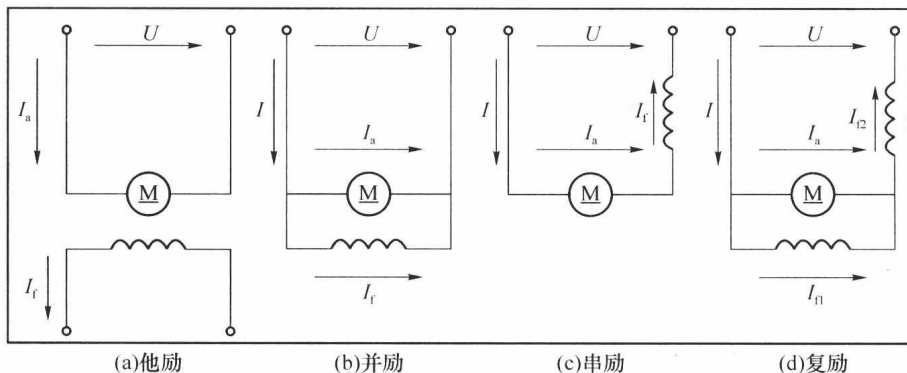


图 1-15 直流电机的励磁方式



1. 他励电机

励磁绕组和电枢绕组无关，励磁绕组由独立的直流电源供电，如图 1-15 (a) 所示。励磁电流 I_f 的大小只取决于励磁电源的电压和励磁回路的电阻，而与电机电枢电流 I_a 的大小及负载无关。用永久磁铁作主磁极的电机可当作他励电机。

2. 并励电机

励磁绕组和电枢绕组并联，如图 1-15 (b) 所示。励磁绕组与电枢绕组由同一电源供电，励磁电流 I_f 一般为额定电流的 5%，要产生足够大的磁通，需要有较多的匝数，所以并励绕组匝数多，导线较细，主要用作发电机。

3. 串励电机

励磁绕组与电枢绕组串联，如图 1-15 (c) 所示。励磁绕组与电枢绕组由同一电源供电，且励磁电流 I_f 和电枢电流 I_a 相同，所以励磁电流较大，励磁绕组的匝数很少，导线较粗。

4. 复励电机

复励绕组既有并励绕组又有串励绕组。若串励绕组和并励绕组所产生的磁势方向相同，称为积复励；若串励绕组和并励绕组所产生的磁势方向相反，称为差复励。

直流电机各类绕组接线后，其引出线的端头要加以标记，根据 IEC 国际标准规定，直流电机各绕组线端符号见表 1-1。

表 1-1 直流电机各绕组线端符号表

绕组名称	电枢绕组	换向极绕组	补偿绕组	串励绕组	并励绕组	他励绕组
线端名称	$A_1 A_2$	$B_1 B_2$	$C_1 C_2$	$D_1 D_2$	$E_1 E_2$	$F_1 F_2$

1.3.2 空载时直流电机的磁场

空载就是指电机作为发电机，电源输出端不接任何电负载；作为电动机，机械输出端不接任何机械负载。

直流电机空载时，电枢电流为零，只有励磁绕组中存在电流。因此，空载时电机的气隙磁场完全由励磁绕组的电流所产生。

1. 空载时的主磁场

直流电机工作中，主极产生主磁场，电枢电流产生电枢磁场。这两个磁场在气隙中相互影响、相互叠加，合成了气隙磁场。图 1-16 所示是一台四极直流电机空载时的磁场示意图。

(1) 主磁通：经过主磁极、气隙、电枢铁芯及机座构成磁回路。它同时与励磁绕组及电枢绕组交链，能在电枢绕组中产生感应电动势和电磁转矩，称为主磁通。

(2) 漏磁通：仅交链励磁绕组本身，不进入电枢铁芯，不和电枢绕组相交链，不能在电枢绕组中产生感应电动势及电磁转矩，称为漏磁通。

(3) 主磁通路径：磁力线由 N 极出来，经气隙、电枢齿部、电枢铁芯的铁轭、电枢齿部、气隙进入 S 极，再经定子铁轭回到 N 极。

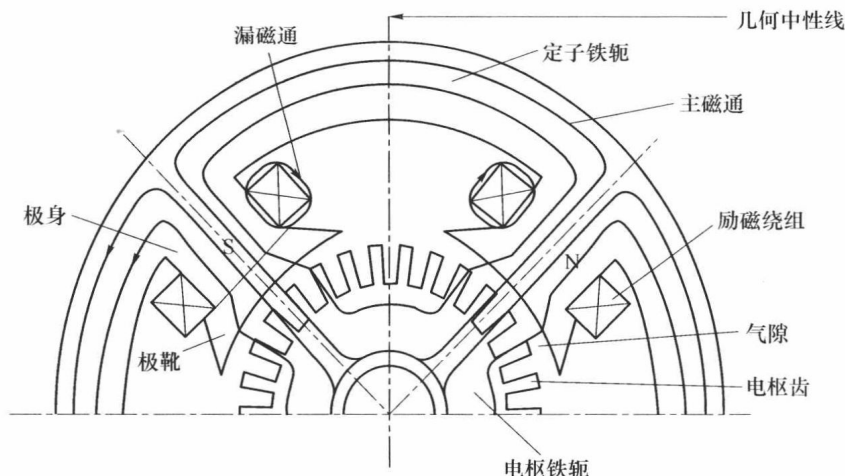


图 1-16 四极直流电机空载时的磁场示意图

(4) 漏磁通路径：磁力线不进入电枢铁芯，直接经过气隙、相邻磁极或定子铁轭形成闭合回路。

直流电机中，主磁通是主要的，它能在电枢绕组中产生感应电动势或电磁转矩，而漏磁通没有这个作用，它只是增加主磁极磁路的饱和程度。在数量上，漏磁通比主磁通小得多，是主磁通的 15% ~ 20%。

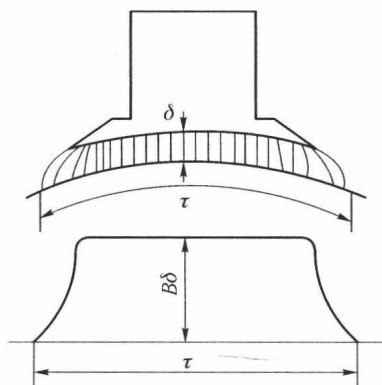


图 1-17 气隙磁通密度分布图

δ —有效气隙长度； τ —极距； B —磁通密度

空载时，励磁磁动势主要消耗在气隙上。当忽略铁磁材料的磁阻时，主磁极下气隙磁通密度的分布就取决于气隙的大小和形状。磁极中心及附近的气隙小且均匀，磁通密度较大且基本为常数，靠近极尖处，气隙逐渐变大，磁通密度减小；极尖以外，气隙明显增大，磁通密度显著减少，在磁极之间的几何中性线处，气隙磁通密度为零。

若不考虑电枢表面齿和槽的影响，在一个极距范围内，气隙磁通密度分布图如图 1-17 所示。

2. 电机的磁化曲线

电机的磁化曲线是指电机主磁通 Φ_0 与励磁磁动势 F_f 的关系曲线 $\Phi_0 = f(F_f)$ 。

电机运行时，要求每一个磁极下应具有一定的磁通

量，这就要求有一定的励磁磁动势 $F_f = I_f N_f$ ，而在实际电机中，励磁磁动势与励磁电流成正比，故磁化曲线又可表示 $\Phi_0 = f(I_f)$ 。而电机中主磁通 Φ_0 所经过的路径大部分由铁磁材料构成，当铁磁材料磁化时具有饱和现象，磁导率不为常数，磁阻是非线性的，如图 1-18 所示。

当磁通较小时，铁磁部分没有饱和，磁压降很小，整个磁路的磁动势几乎全部消耗在气隙上，而气隙的磁导率是一个常数，因此曲线近似为一直线；当

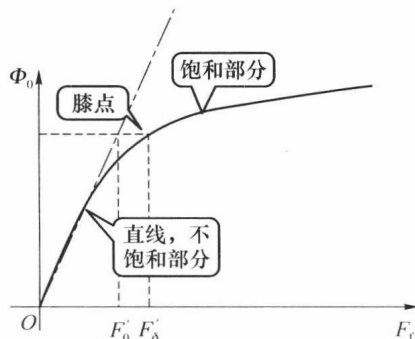


图 1-18 电机的磁化曲线

磁通增大时，曲线逐渐弯曲，磁通很大时，呈饱和特性。为了经济、合理地利用材料，一般直流电机额定运行时，额定磁通设定在图 1-18 中的膝点，即在磁化曲线开始进入饱和区的位置。

1.3.3 负载时直流电机的磁场

直流电机带上负载后，电枢绕组中有电流流过，它将产生一个电枢磁场。电枢电流产生的磁动势称为电枢磁动势。电枢磁动势的出现使电机的磁场发生变化。

电枢磁场沿电枢表面的分布情况，与电枢电流的分布情况有关。在直流电机中，电枢电流的分界线是电刷，在电刷轴线两侧对称分布，所以电枢磁场的分布情况与电刷的位置有关。

1. 电刷在几何中心线上

电刷的正常位置应在主极轴线下的换向片上，这时与电刷相连接的电枢元件位于几何中心线上或者附近。此时，电枢电流的方向以电刷为分界线，相邻两电刷间的电枢圆周上的导体电流方向都相同，而每一电刷两侧的导体电流方向相反。因此，只要电刷不动，无论电枢是静止还是旋转，电枢表面电流分布总是不变的，所以电枢电流产生的电枢磁场在空间上总是静止的。例如，图 1-19 所示为两极电机的电枢电流方向和电枢磁场分布情况。

电枢磁通的方向与电枢导体电流方向间符合右手螺旋定则，这时电枢可以看成是一个电磁铁，它的 N 极和 S 极位于电刷轴线上，因此电枢磁场的轴线与电刷轴线重合。它与主极磁场轴线在空间垂直，称之为交轴电枢磁场。

如果认为直流电机电枢上有无穷多整距元件分布，则电枢磁动势 F_{ax} 在气隙圆周方向空间呈三角波分布，如图 1-20 所示。

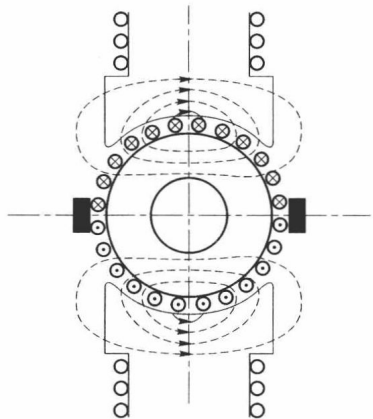


图 1-19 两极电机的电枢电流方向和电枢磁场分布情况

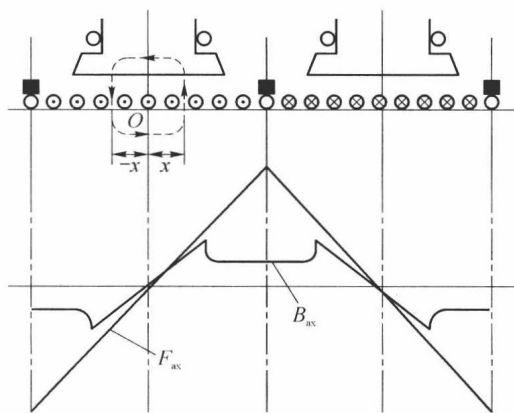


图 1-20 电枢磁动势和气隙磁通密度分布

由于主磁极下气隙长度基本不变，而在两个主磁极之间气隙长度增加得很快，使得电枢磁动势产生的气隙磁通密度 B_{ax} 为对称的马鞍形，如图 1-20 所示。

综上所述，当电刷在几何中心线上时，电枢磁场有以下特点：

- ① 在空间静止不动；