

城市轨道交通职业教育系列教材——城市轨道交通车辆

城市轨道交通车辆电机

(第3版)

主编 秦娟兰

主审 李忠国

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

城市轨道交通车辆电机 / 秦娟兰主编. —3 版. —
成都: 西南交通大学出版社, 2016.8
城市轨道交通职业教育系列教材. 城市轨道交通车辆
ISBN 978-7-5643-4913-4

. 城... . 秦... . 城市铁路 - 铁路车辆 -
电机 - 职业教育 - 教材 . U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 194403 号

城市轨道交通职业教育系列教材——城市轨道交通车辆

城市轨道交通车辆电机

(第 3 版)

主编 秦娟兰

责任编辑 穆 丰
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川森林印务有限责任公司
成 品 尺 寸 185 mm × 260 mm
印 张 15
字 数 373 千
版 次 2016 年 8 月第 3 版
印 次 2016 年 8 月第 7 次
书 号 ISBN 978-7-5643-4913-4
定 价 39.80 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



出版说明

城市轨道交通凭借快捷、准时、舒适、运量大、能耗低、污染小、占地少等优点，日益成为城市现代化建设进程中重要的公益性基础设施项目。城市轨道交通涉及面广、综合性很强，其发展状况已被当成一个城市综合实力和现代化程度的重要评判指标。由此，城市轨道交通建设正在我国兴起一个新的浪潮，社会对城市轨道交通专业人才的需求巨大，给城市轨道交通类专业的职业教育发展带来了良好契机。

西南交通大学出版社与国内诸多交通院校一直保持友好往来，并整合他们在轨道交通领域的尖端科技优势和人才集成优势，致力于为国家轨道交通教育事业做出贡献，形成了以“轨道交通”为核心的出版特色，在教育界、学界都拥有良好的口碑和较高的品牌知名度。

本套丛书从满足快速增长的城市轨道交通专业实用型人才培养需求出发，从校企结合教学直接面向岗位需求这一特点出发，精心组织国内相关专业优秀教育工作者或优秀教育工作高校，分“运营管理”“工程技术”“车辆”“控制”“供电技术”五大类，系统地为学生呈现城市轨道交通教育课程全景。在编写时，力求体现如下特点：

适用性

理论知识够用即可，在讲述专业知识的基础上，突出实际操作技能的训练，注重岗位关键能力的培养。

专业性

图书的顶层设计从国家高职高专专业目录规范出发，内容编排紧密结合岗位应用实际，体现专业性和主流设备前沿特征，体现教学实际需求。同时，在编写或修改时，尽可能地让一线用人单位参与进来，根据生产现场实际提出建议。

生动性

在架构设计和版式设计上，力求简洁生动，图文并茂；努力体现二维码技术等移动互联网时代元素在图书中的应用，尽可能把生产实际和研究成果，用立体生动的形式予以表达，便于读者理解掌握。

这套书可作为高等职业院校、中等职业学校城市轨道交通相关专业的教学用书，也可作为城市轨道交通企业新职工的培训教材。有关教材的课件资料等，可以联系我社使用。

联系电话：028-87600533

邮箱：swjtucbsfx@163.com

西南交通大学出版社



前 言

城市轨道交通诞生于 19 世纪中叶的英国伦敦，经历了 150 多年的发展历史。它技术成熟、安全可靠、形式多样、用途广泛，以其大载客量、快捷、准时、环保而成为解决日益严重的城市交通堵塞的最有效手段。

改革开放以来，随着经济的发展，我国内地城市化进程加快，城市交通问题成为制约城市发展的重要因素。为此，国家确立了优先发展城市公共交通的城市发展战略。建立以大容量快速轨道交通为骨干、以公共交通为主体的综合交通体系，解决城市交通拥挤问题，从而实现可持续发展的治本之策。

未来 10 年，我国内地将新建城市轨道交通线路 60 多条，新建线路里程近 1 700 km，北京、上海、广州更是以每年新增线路 30~50 km 的速度在发展。

城市轨道交通迎来了最好的发展时机，抓住这一历史机遇，内地许多城市纷纷开始轨道交通的规划和建设。

城市轨道交通的发展，急需大量德才兼备的各类人才。为了满足对人才特别是高、中级技能型人才培养的迫切需要，武汉铁路司机学校（武汉轨道交通学校）组织编写了适合高、中级职业学校城市轨道交通类专业的系列教学用书。

这套教材，紧扣职业教育的特点，在讲述基本专业知识的基础上，突出了实际操

作技能的培养。内容简洁明了，文字通俗易懂。为配合教学的需要，每章配有适量的练习题。

需要说明的是，由于城市轨道交通线路一般是永久性的结构，建成后几乎无调整的可能性，故各城市在线路开建前都会反复比较和修改方案。书中有关城市轨道交通的规划与建设资料和数据，可能与实际有出入，仅供参考。

本书由秦娟兰主编，应云飞、吴庆国为副主编，李忠国为主审。第三章至第七章由秦娟兰负责，第一章、第二章由应云飞负责，第八章由吴庆国负责，秦娟兰负责全书统稿。本书在编写中，得到上海申通公司培训部、广州地铁运营部等单位及武汉铁路技师学院教授李忠国、谢欢、邓星等同仁的帮助，在此表示由衷感谢。同时，在编写过程中参阅了大量专业书籍和报刊、杂志上的专题文章。书末列出了参考文献目录，在此我们对其作者表示衷心的感谢。

由于编者水平和时间有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。



异步电机小实验

编者
2016年6月

目 录

绪 论.....	1
第一章 直流电机的基础知识.....	6
第一节 电机理论基础知识.....	6
第二节 直流电机基本工作原理.....	11
第三节 直流电机的基本结构.....	14
第四节 直流电机的感应电势和电磁转矩.....	21
第五节 直流电机的电枢反应.....	29
第六节 各种励磁方式直流电动机的运行特性.....	36
第二章 直流牵引电动机.....	47
第一节 牵引电动机的一般概念.....	47
第二节 电动车组的牵引特性.....	50
第三节 直流串励牵引电动机在动车中的运用.....	58
第四节 直流牵引电动机的维护.....	69
第三章 三相交流电机基础知识.....	73
第一节 三相交流异步电动机的基本结构.....	73
第二节 旋转磁场.....	77
第三节 三相交流异步电动机工作原理.....	83
第四节 三相异步电动机的运行特性分析.....	87
第五节 三相异步旋转电动机的转矩特性与机械特性.....	99
第六节 三相异步电动机的启动与运行.....	105
第七节 单相异步电动机.....	113
第四章 三相鼠笼式异步牵引电动机.....	118

第一节	三相异步牵引电动机概述	118
第二节	三相鼠笼式异步牵引电动机的基本结构	119
第三节	三相异步牵引电动机的变频运行方式及其特性	123
第四节	电动车组三相异步牵引电动机的特性调节	131
第五节	异步牵引电动机在地铁动车中的运用	135
第六节	异步牵引电机交流传动系统的控制原理	140
第七节	交流牵引电动机维护及牵引系统辅助电机	151
第五章	永磁同步电机	162
第一节	永磁同步电机的工作原理	162
第二节	永磁同步电机的基本结构及运行特性	165
第三节	永磁同步牵引电动机在轨道交通中的运用	169
第六章	直线感应电机基础知识	175
第一节	直线感应电机的基本结构及分类	175
第二节	直线感应电机工作原理	180
第三节	直线感应电机的边端效应	184
第四节	直线感应电动机的等效电路和基本特性	187
第七章	直线感应电机轮轨交通系统	191
第一节	直线感应电机轮轨交通系统的历史与发展	191
第二节	直线感应电机轮轨交通系统的特点	193
第三节	直线感应电机轨道交通运载系统	195
第四节	轨道交通直线感应电机吊挂技术	202
第五节	直线感应电动机在轨道交通中的应用现状	206
第六节	直线同步电动机 LSM 轨道系统	212
第八章	变压器的基本结构与原理	220
第一节	变压器的基本结构及工作原理	220
第二节	地铁动车车辆上的几种变压器	226
	参考文献	231

第一章 直流电机的基础知识

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。将机械能转换为直流电能的电机称为直流发电机，将直流电能转换为机械能的电机称为直流电动机。

由于直流电动机具有良好的启动性能，能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度，所以它被广泛地用于铁路电力电动车组、城市轨道交通无轨电车、地铁轻轨电动车组中。在地铁门控系统、刮雨器控制系统中，小容量的直流电动机的应用也很广泛。直流发电机则作为各种直流电源，如直流电动机的电源，同步发电机的励磁电源（称为励磁机）等。虽然可控硅整流元件组成的直流电源设备正逐步取代直流发电机，但直流发电机由于其性能优越，在许多场合中仍占很重要的地位，利用可控硅整流器，配合直流电动机组成的调速系统也得到了广泛的应用。

第一节 电机理论知识

一、电机的基本功能与分类

电机是能量转换和信号转换的电磁装置。控制电机用来实现信号的转换，动力电机用来实现能量的转换。动力驱动电机广泛应用于地铁动车车辆中，本书主要介绍动力驱动电机。

电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。其中除变压器外，均为机械能、电能的转换。把机械能转换为电能称为发电机，其逆运行为电动机。变压器的功能是将某个电压的交流电转换成同频率但不同电压的交流电，它是静止不动的，故应称为器，不是机。只因为它的工作原理与分析方法与旋转电机密切相关，故将它列入电机范畴。

动力电机的种类繁多，一般用于轨道交通车辆的电机主要有旋转电机与直线感应电机两类。旋转电机按工作电源分类可分为直流电机和交流电机，直流电动机按结构及工作原理可划分无刷直流电动机和有刷直流电动机。有刷直流电动机可划分为永磁直流电动机和电磁直流电动机。电磁直流电动机划分为串励直流电动机、并励直流电动机、他励直流电动机和复励直流电动机。永磁直流电动机划分稀土永磁直流电动机、铁氧体永磁直流电动机和铝镍钴

永磁直流电动机。

交流电机还可分为同步电机和异步电机。同步电机可划分为永磁同步电动机、磁阻同步电动机和磁滞同步电动机。异步电机可划分为感应电动机和交流换向器电动机。感应电动机可划分为三相异步电动机、单相异步电动机和罩极异步电动机等；交流换向器电动机可划分为单相串励电动机、交直流两用电动机和推斥电动机；按转子的结构可分为笼型感应电动机和绕线转子感应电动机；按用途可分为驱动用牵引电机和车辆辅助电路控制用牵引电机。

直线感应电机也有同步与异步之分。第一章至第五章介绍的电机都是指旋转电机，特此说明。

二、旋转电机的基本作用原理

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的，因此，电和磁是构成电机的两大要素。电在电机中主要是以路的形式出现，即由导体、线圈、绕组构成电机的电路。可以是直流电路，也可以是单相、两相或三相交流电路。动力电机是旋转机械，其固定不动的部分称为定子，带有旋转的转动部分称为转子，二者之间必须有空气隙才能正常工作。因此，定子上的电路属于普通的静止电路，转子上的电路是和转子一起旋转，属于旋转电路。外界的静止电路如何与转子旋转电路连通是电机电路的一个特殊问题，它可通过滑动接触来解决，其基本结构原理如图 1.1 所示。其中图 1.1 (a) 所示为滑环与电刷结构，由石墨-碳导电材料制成的固定电刷与静止的外电路相连接。图 1.1 (b) 中转子上的导体与由导电材料制成的环状集电环随转轴 b_1 在半周中与换向片 A (导体 1) 连通，在另外半周内改为与换向片 B (导体 2) 连通。此类结构除了解决旋转和静止电路的连通外，还起着改换连接关系的作用，称为换向。上述结构中，前者常见于交流电机，后者主要用在直流电机中。

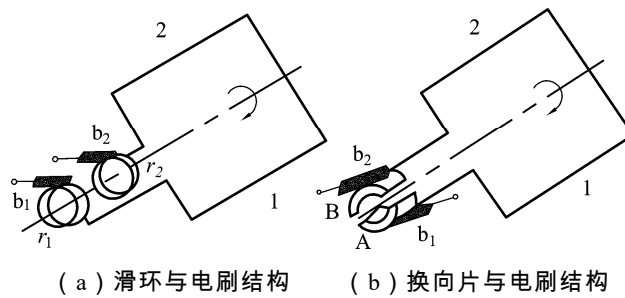


图 1.1 滑动接触示意图

三、分析电机原理常用物理量及常用的基本定律

(一) 常用物理量

1. 磁感应强度 B

描述磁场强弱和磁场方向的物理量。磁力线是闭合曲线，其方向与产生磁场的电流的方向满足右手螺旋关系，如图 1.2 所示。

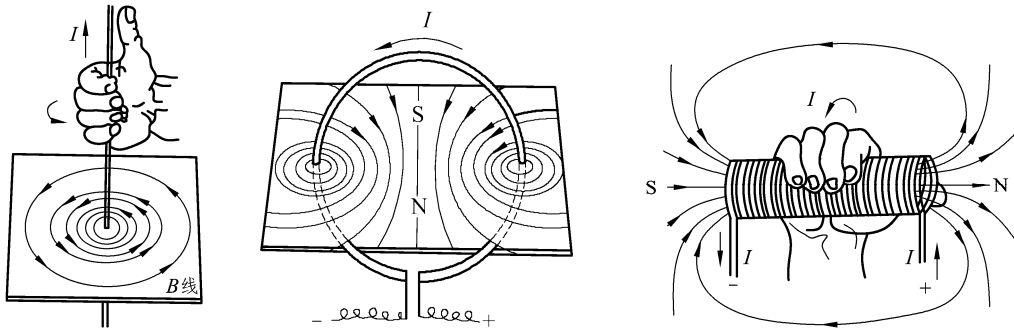


图 1.2 磁感应强度满足右手螺旋关系

2. 磁通 Φ

表征磁介质或真空中磁场分布的物理量，穿过某一截面的磁感应强度 B 的总量。电机的每极磁通，即穿过每个磁极横截面的全部磁通，是设计、计算电机的重要基础数据。

3. 磁场强度 H

是描述磁场强弱和方向的辅助物理量。在电机中常常使用该物理量，它与磁感应强度的关系为

$$B = \mu H \quad (1.1)$$

μ 为磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (真空)，非磁性物质的 μ 为常数；铁磁材料的 μ 比真空的大数十至数千倍。

4. 磁势 F

线圈匝数与励磁电流之积。

$$F = NI \quad (1.2)$$

5. 磁链 ψ

线圈所交链的磁通。

$$\psi = N\Phi \quad (1.3)$$

(二) 常用的基本电磁定律

1. 全电流定律

如图 1.3 所示，任意一个闭合回线上的总磁压等于被这个闭合回线所包围的面内穿过的全部电流的代数和，这个规律称为全电流定律，可表示为

$$\oint H dl = \sum i \quad (1.4)$$

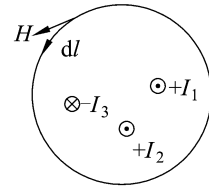


图 1.3 全电流定律

其中电流的正方向与闭合回路的正方向满足右手定则。

2. 电磁感应定律

在本书回顾的所有定律中电磁感应定律将是最重要的一個。简单地说，电磁感应定律就是指变化的电场附近会产生变化的磁场，而变化的磁场附近会产生变化的电场。

电机中的导体都是绕制成各种各样的线圈，线圈中通过电流将建立磁场并产生磁通 Φ ，磁通穿过线圈和线圈匝链形成所谓磁链 ψ 。设线圈有 N 匝，流过电流后产生匝链线圈的磁通为 Φ ，则磁链为 $\psi = N\Phi$ 。大量的实验证实存在着如下的规律：当穿过闭合导体回路的磁通（不论由于什么原因）发生变化时，在导体回路中就会出现电流，这种现象称为电磁感应现象，如图 1.4 所示，电动势产生电流，电流产生磁通。

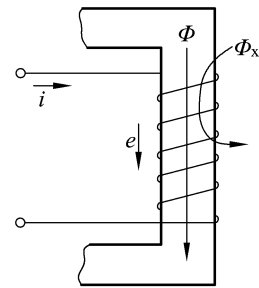


图 1.4 电磁感应定律

闭合回路磁通变化的原因有下面两种：

(1) ψ 随时间变化而闭合回路的任一部分对媒质没有相对运动，即磁通本身就是由交流电流所产生，这样产生的感应电动势叫做感生电动势。变压器就是利用这一原理制成的，所以也称这一感应电动势为变压器电动势（线圈与磁场相对静止）。其大小与线圈的匝数和磁通变化率成正比，方向由楞次定律决定。

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

$$\psi = \Phi \sin \omega t \quad (1.6)$$

式中 ω ——角频率， $\omega = 2\pi f_1 = \frac{2\pi p n_1}{60}$ 。

一个单匝整距线圈中感应的电动势为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\omega \Phi_m \cos \omega t = \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1.7)$$

电动势的有效值为

$$E = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Phi_m = \sqrt{2} \pi f_1 \Phi_m \approx 4.44 f_1 \Phi_m \quad (1.8)$$

电动势和磁通相位关系如图 1.5 所示。

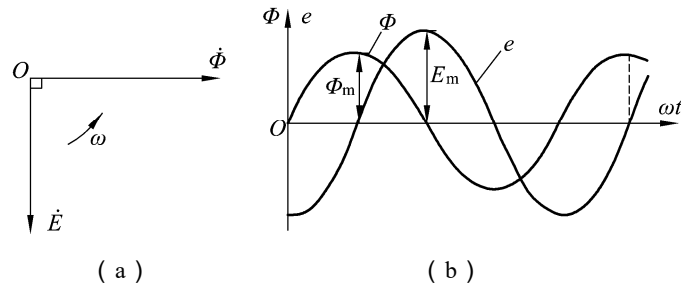


图 1.5 电动势和磁通相位关系

(2) 磁通本身不随时间变化，但由于线圈与磁场间有相对运动而引起线圈中磁链的变化，这样产生的电势称为运动电势或速度电势（切割电动势）。有

$$e = Blv$$

这正是发电机的工作原理，故又称之为发电机电动势。动生电动势的方向可以用右手定则来确定，如图 1.6 所示。

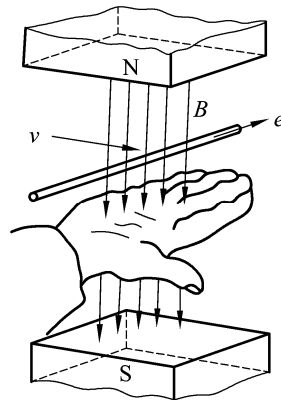


图 1.6 感应电动势的方向（右手定则）

在理解电磁感应现象时，感应电动势是比感应电流更为本质的物理量。感应电动势的大小只与穿过回路磁通随时间的变化率有关，而与构成回路的材料的特性无关。因此，电磁感应定律可以推广到任意媒质内的假想回路中。

3. 电磁力定律

载流导体在磁场中要受到力的作用称为电磁力定律，如果导体与磁场相互垂直，则导体受到的电磁力大小为

$$f = Bli \tag{1.9}$$

电磁力方向用左手定则判定，如图 1.7 所示。在旋转电机中，作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩，称之为电磁转矩（等于力乘转子半径）。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

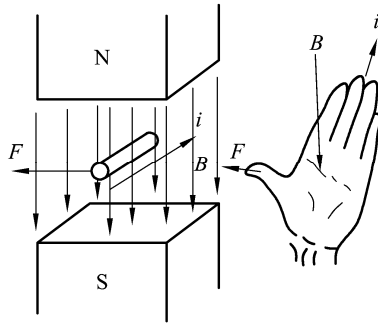


图 1.7 电磁力的方向-左手定则

练习 题

1. 试说明电磁感应定律和电磁力定律。
2. 电机的基本功能是什么？

第二节 直流电机基本工作原理

任何电机的工作原理都是建立在电磁力和电磁感应这个基础上的，直流电机也是如此。为了讨论直流电机的工作原理，可把复杂的直流电机结构进行简化处理。

一、直流发电机工作原理（将机械能转换为电能）

图 1.8 表示一台最简单的两极直流发电机模型。在它的固定部分（定子）装设了一对静止的主磁极 N 和 S（主磁极可以采用永久磁铁，也可以采用电磁铁）；在旋转部分（转子）装设电枢铁芯；定子与转子之间有一气隙，称为空气隙。在电枢铁芯上放置了用绝缘导体 ab 与 cd 构成的电枢线圈，称为电枢绕组。电枢绕组的首端和末端分别连到圆弧形铜片上，此铜片称为换向片。换向片之间互相绝缘，由换向片构成的整体称为换向器。换向器固定在转轴上，换向片与转轴之间也互相绝缘。换向器作用就是使旋转中的电枢线圈中电流换向，从而保证每个磁极下线圈边中的电流始终是一个方向，使电磁转矩的方向不变，电机按一定方向连续旋转。

为了把电枢和外电路接通，特别装置了一对在空间固定不动的电刷 A 和 B，静止的电刷（A 和 B）与换向器滑动接触，将电枢线圈 a-b-c-d 产生的交流电输出，即当电枢旋转时，电枢绕组通过换向片和电刷与外电路接通。因此，从工作原理的角度来看，直流电机主要包括主磁极、电枢、换向器和电刷四大部分。

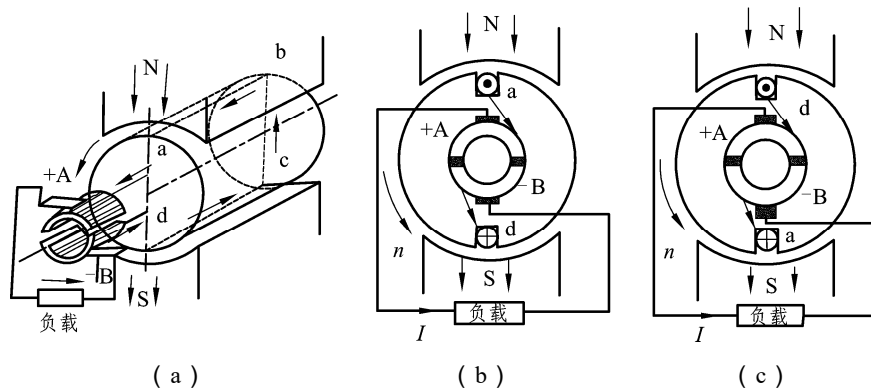


图 1.8 直流发电机基本工作原理

为了实现机械能转换为电能，电枢由原动机驱动而在磁场中以一定的恒定转速 n 逆时针方向旋转。为了便于说明，先做如下规定：

- (1) 在 N 极下的导体称为 N 导体，在 S 极下的导体称为 S 导体。
 - (2) 导体中的电势或电流的方向进入纸面时用符号 \otimes 表示，由纸面出来时用符号 \odot 表示。
- 随着电枢逆时针方向旋转，电枢绕组的导体 ab 和 cd 切割磁通感应出电动势 e ，感应出

电动势的方向由右手定则确定。从图 1.8 (b) 到图 1.8 (c) 中，显然每一导体中的电动势是交变的，即在 N 极下是一个方向，当它转到 S 极下时是另一个方向。由此可见，线圈中的电势方向由于电枢旋转而随时间做正负变化。如果电机气隙磁密 B 在空间的分布是如图 1.9 所示的波形，那么线圈中电势随时间变化的波形如图 1.9 所示。

但是，由于电刷 A 总是同与 N 极下的 N 导体相连的换向片接触，而电刷 B 总是同与 S 极下的 S 导体相连的换向片接触，因此，在电刷 A、B 间就出现一个极性不变的电动势或电压。可见，直流发电机电枢线圈中的感应电动势方向是交变的，而通过换向器和电刷的作用，在电刷 A、B 间两端输出的电动势是直流电动势，这种作用称为整流。这就是说，线圈中的交流电势已变为如图 1.10 所示的刷间直流电势了。

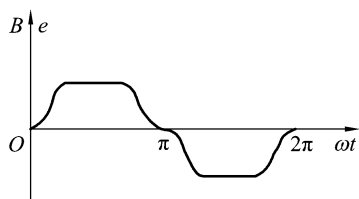


图 1.9 气隙磁密空间的分布和线圈内电势波形

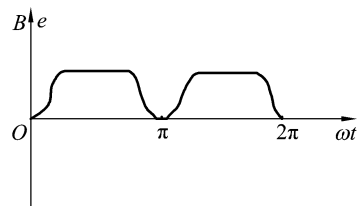


图 1.10 刷间电势波形

对于图 1.8 所示的直流电机简单模型图，由于电枢上只嵌放了一个线圈，所以感应电势数值小，波动大。为了减小电势的脉动，实际电机中，电枢上放置了许多线圈组成电枢绕组，这些线圈均匀分布在电枢表面，并按一定规律连接起来。图 1.11 表示一台两极直流电机，电枢上嵌有在空间互差 90° 的两个线圈产生的电势波形，由图可见，其脉动程度大大减小了。实践证明，若每极下的线圈边数大于 8，电势脉动的幅值将小于 1%，基本是一直流电势，如图 1.12 所示。

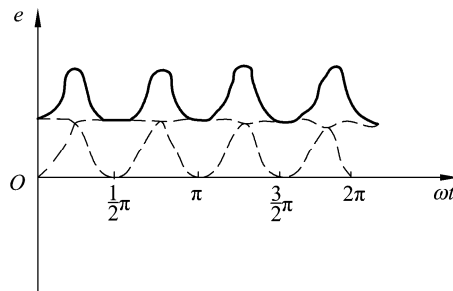


图 1.11 两个线圈换向后的电势波形

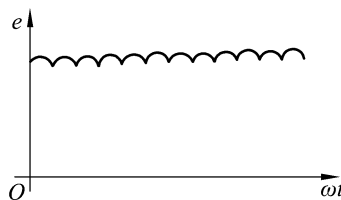


图 1.12 多个线圈电刷两端的电势波形

当电刷之间接有负载时，在电动势的作用下就在电路中产生与电动势的方向相同的电流。

同时，载流导体在磁场中必然产生一个电磁力（方向由左手定则确定），电磁力对转轴形成电磁转矩，因电磁转矩与电枢旋转的方向相反，起制动作用，故称之为制动转矩。直流电动机要维持发电机状态，原动机输入的机械转矩必须克服电磁转矩，方可实现由机械能转换为直流电能。

由上述原理分析可知，直流发电机工作的条件是：电机内部需有（直流励磁或永久磁铁）磁场存在；原动机拖动转子以 n (r/min) 旋转；机械转矩必须大于电磁转矩。

二、直流电动机的工作原理（将电能转换为机械能）

直流电动机的结构，在工作原理上和直流发电机一样。但作为电动机，它是将电能转换为机械能，故轴上应接机械负载，并用一直流电源将直流电送入电枢绕组，如图 1.13 所示。

直流电源接在电刷 A、B 之间而使电流通入电枢线圈。在图 1.13 (a) 中，导体 ab 为 N 导体，输入电流的方向为 \otimes ；导体 cd 为 S 导体，输入电流的方向为 \odot 。由于载流导体在磁场中受到电磁力的作用，根据左手定则，不论导体 cd 还是导体 ab，所受电磁力的方向均为逆时针方向，因而产生逆时针方向的电磁转矩，使电枢按逆时针方向旋转。在图 1.13 (b) 中，ab 变为 S 导体，cd 变为 N 导体，但在导体改变电流方向的同时它所处的磁场方向也改变了，故所受的电磁力及产生的电磁转矩方向并不会改变，即仍为逆时针方向，从而使电枢继续按逆时针方向旋转。

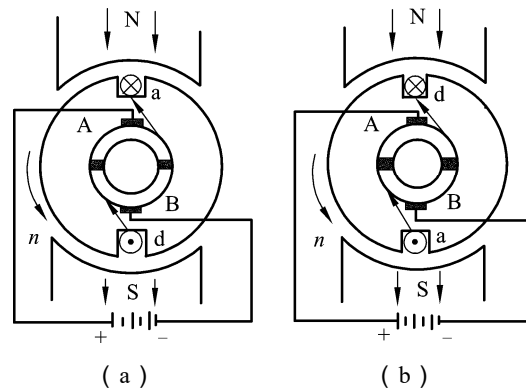


图 1.13 直流电动机的工作原理

由上分析，直流电动机两端的直流电借助于电刷和换向器的作用，变为电枢线圈中交流电，这种作用称为逆变。电刷和换向器保证了同一个极下线圈边中的电流始终是一个方向，继而保证了该极下线圈边所受的电磁力方向恒定，使电动机能连续地旋转。

同时可以看到电枢旋转时，电枢导体在磁场中切割磁感应线产生运动电动势，由右手定则判断电枢导体运动电动势的方向与输入电流的方向相反，为反电动势。

由以上原理分析可知，直流电动机工作的条件是：电机内部有磁场存在；将电枢绕组（通过换向器和电刷端）接通直流电源，电枢导体便有电流流通；外部输入电动势必须大于电枢

内部运动感应电动势。

改变电源正负极或改变磁场方向时，电枢线圈所受的电磁力都将反向，电枢反向旋转。

练习 题

一、填空题

1. 将机械能转换为直流电能的电机称为_____；将直流电能转换为机械能的电机称为_____。
2. 当直流发电机电刷两端获得直流电动势后，若接上负载，载流导体在磁场中产生的电磁转矩与电枢旋转的方向_____，故称为制动转矩。
3. 在直流电动机中，电刷两端加的是_____，在_____和_____的作用下，线圈内部流过的是_____。
4. 在直流电动机中，旋转的线圈中感应产生电动势方向与线圈中电流方向_____，故称为反电动势。
5. 直流发电机电枢绕组元件中的电动势和电流是_____。
6. 直流电动机电枢绕组元件中的电动势和电流是_____。

二、选择题

1. 直流电机的工作原理实质上是 ()。
A. 楞次定理 B. 电磁感应原理 C. 基尔霍夫定理
2. 当外接电源向直流电动机供电时，其转动方向由 () 决定。
A. 左手定则 B. 右手定则 C. 右手螺旋定则

三、简答题

1. 判断下列情况下，直流电机电刷两端间的电动势是交流的还是直流的？
(1) 磁极固定，电枢和电刷同时旋转。
(2) 电枢固定，电刷和磁极同时旋转。
(3) 电刷固定，磁极和电枢同时旋转。
2. 电机产生的电动势、电磁转矩对于直流发电机和直流电动机所起的作用有何不同？

第三节 直流电机的基本结构

直流电机，主要由静止的定子 (Stator) 和旋转的转子 (Rotor) 两大部分组成，如图

1.14 所示。

定子由主磁极、换向极、电刷装置、机座、端盖和轴承等部件组成，它的作用是产生磁场，提供磁路和作为电机的机械支撑。转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器和转轴等部件组成，用来产生感应电动势和电磁力矩。转子是实现能量转换的主要部件。此外固定电机用的底脚、吊装用的吊环、引出线端用的出线盒也为电机的一部分。

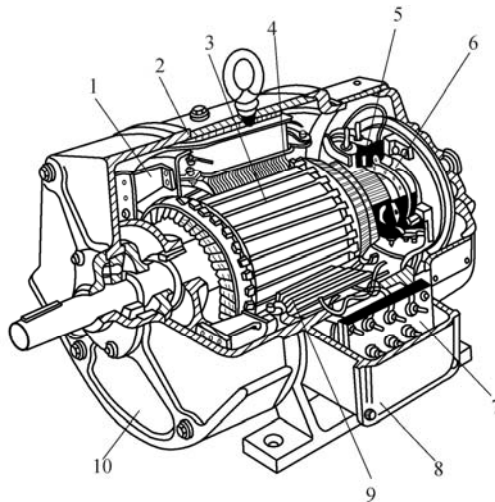


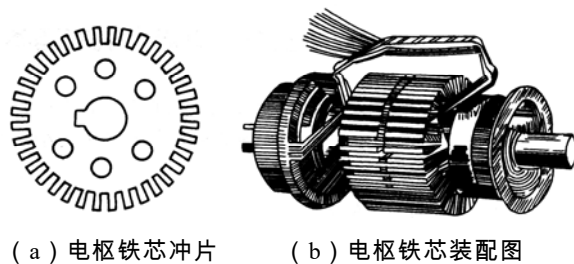
图 1.14 直流电机结构

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

一、转子部分

1. 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。电枢绕组安装在沟槽内，电枢的转矩由载流的电枢绕组与主磁场相互作用而产生的。为了减小铁芯中的涡流损耗，电枢铁芯通常采用彼此绝缘的薄硅钢片叠成。在硅钢片上预先留有轴孔和通风孔。电枢铁芯冲片如图 1.15 (a) 所示。由于电机在运转时发热，故对于容量较大的电机，为了散热和加强冷却，将电枢铁芯沿着轴向方向分成数段，每段 4~10 cm，段与段之间留出 8~10 mm，作为径向通风之用，称为径向通风道，如图 1.15 (b) 所示。



(a) 电枢铁芯冲片

(b) 电枢铁芯装配图

图 1.15 直流电机电枢铁芯

2. 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电势和通过电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。它是直

流电机的主要电路部分。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成，再按一定规律嵌放在电枢槽内，上下层之间以及电枢绕组与铁芯之间都要妥善地进行绝缘处理。为了防止离心力将绕组甩出槽外，槽口处需用槽楔将绕组压紧，伸出槽外的绕组端接部分用无纬玻璃丝带绑紧。

电枢线圈按一定规律和换向器连接起来即构成电枢绕组。各绕组元件的引线焊到换向器上，电枢铁芯和电枢绕组以及换向器三者连成一个整体。电枢绕组由许多绕组元件组成，分单匝元件和多匝元件。在牵引电机中通常采用单匝式绕组元件。

3. 换向器

换向器的作用是机械整流，即在直流电动机中，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势整流成电刷两端的直流电势。换向器的结构如图 1.16 所示。换向器由许多换向片组成，换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称为升高片，用以与电枢绕组端头相连，换向片下部成燕尾形，利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用 V 形云母环绝缘，最后将换向器压装在转轴上。

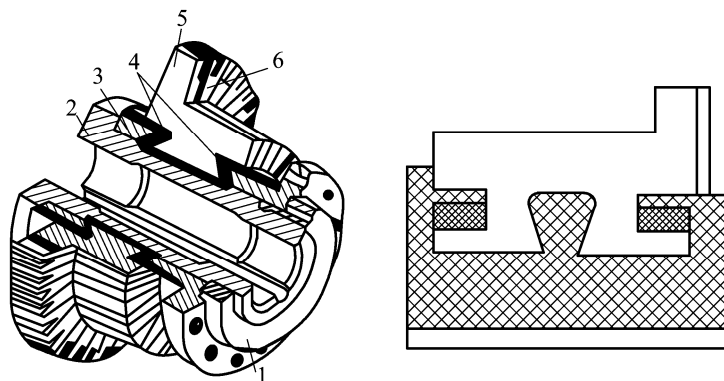


图 1.16 换向器

1—螺旋压圈；2—换向器套筒；3—V 形压圈；4—V 形云母环；5—换向片；6—云母片

二、定子部分

1. 主磁极

主磁极包括主极铁芯和励磁线圈。主磁极通常由钢板叠成，可降低电枢旋转时齿与槽相对磁场移动时引起的磁场脉振在极靴表面的涡流损耗。主磁极铁芯分为极芯和极靴，为了获得较好的换向条件，极靴与电枢表面之间的缝隙（第一气隙）是不均匀的，极芯上套有励磁绕组，各主磁极上的绕组一般都是串联的。直流电机的磁极如图 1.17 所示。极掌的作用是使空气隙中磁感应强度分布最为合适。改变励磁电流的方向，就可改变主磁极极性，也就改变了磁场方向。

2. 换向极

换向极的作用是产生换向磁场用来改善电机的换向。换向极由极芯和换向绕组组成，其结构如图 1.18 所示。极芯的截面呈矩形，用整块锻钢制成，有时也采用电工钢片叠成。换向极极靴的形状和尺寸由电机换向要求所决定，它的形状决定了换向极磁场的波形，对电机性能影响很大。在牵引电机中，为减小换向极的漏磁，通常在换向极极芯和机座之间增加一个气隙（第二气隙）。通过调整气隙，可达到调整电机换向性能的目的。

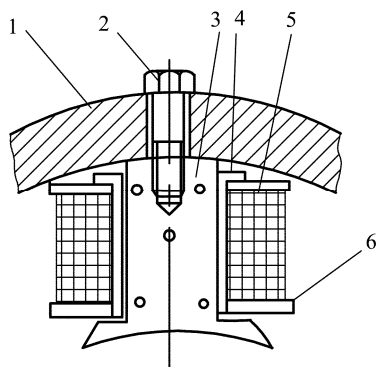


图 1.17 主磁极

1—机座；2—主磁极螺钉；3—主磁极铁芯；4—框架；
5—主磁极绕组；6—绝缘垫衬

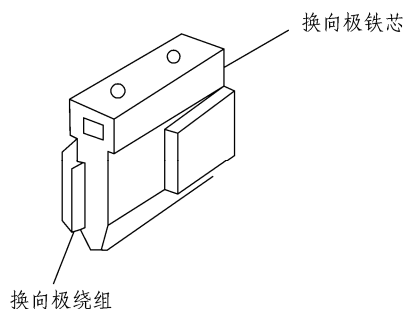


图 1.18 换向极

3. 电刷装置

电刷装置安装在电机换向器端，作用是使转动的电枢绕组与外电路连接起来。电刷装置由电刷、刷握、刷握架和刷杆组成，其结构如图 1.19 所示。刷握装置要求在换向器轴向、径向和切向方向位置都能调节。刷架应具有较高的机械强度，并能承受振动和冲击。刷杆等绝缘零件应有较高的介电强度，不因受潮、受污而造成闪络或飞弧故障。电刷数一般等于主磁极数，各同极性的电刷经软线汇在一起，再引到接线盒内的接线板上，作为电枢绕组的引出端。

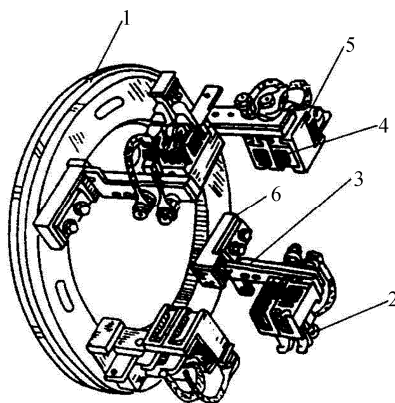


图 1.19 电刷装置

1—刷杆座；2—弹簧；3—刷杆；4—电刷；5—刷握；6—绝缘杆

4. 机 座

机座是用来固定主磁极、换向磁极和端盖，起机械支撑作用，同时也是电机磁路的一部分。机座用铸钢或铸铁制成，机座上的接线盒有励磁绕组和电枢绕组的接线端，用来对外接线。

三、其他部分

1. 气 隙

在小容量电机中，气隙为 1~3 mm；在大容量电机中，可达 10~12 mm。值得注意的是，气隙的长度对电机的性能有很大的影响。

2. 转轴和轴承

转子必须有转轴，以便将电枢和机械设备或原动机联结起来，进行功率和转矩的传递。中小型电机一般采用滚动轴承，装于端盖中。在大容量电机中，因电枢很重，用端盖轴承已不够坚固，电机可采用支架式滚动轴承，用支架将轴承支撑在底板上。

3. 通风装置

对于开启式电机，它的各个部分露在外面，通风情况较好，可以依靠转子本身的转动来冷却电机。在中小型电机中，常采用防护式结构。当电枢旋转时，风扇将较冷的空气吸入电机，使空气经过冷却换向器、励磁绕组、电枢铁芯和电枢绕组，然后再经风扇从出风口排出机外。在端盖的进出风口上都装有风罩，以防止外物进入电机。在灰尘比较多或带有腐蚀性气体的地方，电机做成封闭式，以防止灰尘或有害气体对电机进行破坏。封闭式电机只靠表面散热来进行冷却。对某些低速运行的电机，为了保证足够的通风量，常在管道中另装一鼓风机来加强通风。在空气中含有爆炸性成分的地方，电机必须是防爆式的，这种电机封闭得十分严密，包括轴伸处的轴封部分，都需严密封闭。当电机内部发生偶然性火花引起爆炸时，它能够将爆炸限制在机内而不致漫延到机外，以免引起严重事故。

四、电机的材料

电机的质量及运行中的各种特性，在很大程度上与其制造材料有关。因此要求电机各部件应具有足够的机械强度和绝缘强度。

电机材料的作用，不外乎有以下五种：导电、导磁、绝缘、散热和机械支撑。

1. 导电材料（电-电路-导电材料）

为减小电阻损耗，导电材料必须有良好的导电性能。铜是最常见的导电材料，电机各绕组一般均由含纯铜 99.9% 以上的电解铜线绕制而成。铝也是常用的导电材料，在交流异步电动机中广泛使用铝条作为电机的转子绕组，它的导电作用仅次于铜。碳也是应用于电机的一种导电材料，电机中的一个重要部件电刷就是用碳或碳-石墨制成。

2. 绝缘材料（电-电路-绝缘材料）

电机中使用着多种绝缘材料。由绝缘材料适当加工而成的结构称为绝缘结构。电机中的绝缘材料和绝缘结构有两方面作用：一是将带电部件与机壳、铁芯等接地部件隔开；二是将电位不同的各带电部件隔开。电机中带电部件与机壳、铁芯等对地部件的绝缘状态被破坏，就称为电机“接地”。如果电机中电位不同的带电部件的绝缘状态被破坏，就称为“短路”。接地和短路都是电机的故障状态，严重的绝缘损坏将导致整个电机烧损。

绝缘破坏的另一种故障状态是电晕，电晕是可见的局部放电现象（一般指空气放电）。额定电压超过 6 000 V 时将会出现明显的电晕现象，一般发生在高压交流电机中。电晕对绝缘材料有严重的腐蚀破坏作用。提高电机绝缘的防晕能力，最主要的是要减少绝缘缺陷，提高绝缘结构的整体性，同时要避免导体或铁芯的尖锐边缘。

绝缘材料的种类很多，可分为天然的和人工的、有机的和无机的，有时还用多种不同材料的组合。绝缘材料的寿命和它的工作温度有很大关系。长时间在高温下工作，绝缘材料会逐渐老化，即丧失其机械强度和绝缘强度。为了保证电机在合理的较长的年限内可靠地工作，规定了绝缘材料的极限允许温度。

绝缘材料常分为以下七级，如表 1.1 所示。此外，变压器油是一种特种矿物油，在变压器中同时起绝缘和散热两种作用。

表 1.1 绝缘材料等级

绝缘等级	O	A	E	B	F	H	C
极限允许温度/°C	90	105	120	130	155	180	180 以上
主要材料	棉纱，纸等	经过油或树脂处理的有机材料	环氧树脂聚酯薄膜等有机合成树脂	用有机黏合物制成的云母、石棉、玻璃丝等	B 级中用耐热有机漆，如聚酯漆为黏合剂	B 级中用耐热硅有机树脂，硅有机漆为黏合剂	云母、玻璃、瓷、石英等

3. 导磁材料（磁-磁路-导磁材料）

为了在一定的电流下能产生较强的磁场，电机采用导磁性能较高的铸钢制成磁路。大块导体在磁场中运动或处在变化的磁场中，都要产生感应电动势，从而产生电流（在恒定磁场中的静止导体内是不会引起能量损耗的）。电流在导体中的分布随着导体的表面形状和磁通的分布而不同，其路径往往犹如水中的漩涡，因此称为涡流，如图 1.20（a）所示。涡流在铁芯中流动，如同电流流经电阻一样，也要引起功率损耗，这种功率损耗称为涡流损耗。可以证明涡流损耗与电枢铁芯厚度的平方成正比。为减少涡流损耗，常将铁芯用许多铁磁导体薄片（例如硅钢片）叠成，如图 1.20（b）所示，这些薄片表面涂有薄层绝缘漆或绝缘的氧化物。磁通穿过薄片的狭窄截面时，涡流被限制在沿各片中的某些狭小回路流过，这些回路中的净电动势较小，回路的长度较大，再由于这种薄片材料的电阻率大，这样就可以显著地减小涡流损耗。所以，交流电机、电器中广泛采用叠片铁芯。

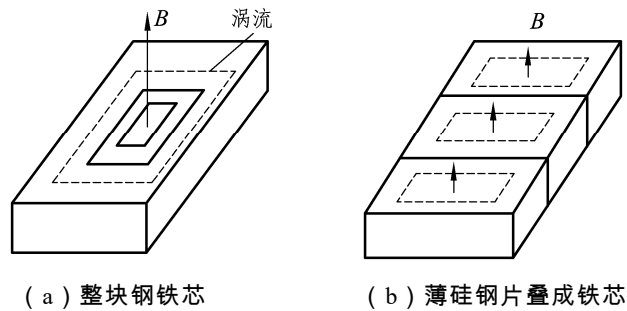


图 1.20 涡流与涡流损耗

4. 散热材料

电机工作时产生的损耗，最后均转化为热能，使电机升温，若不采取措施解决会使电机绝缘老化，缩短使用寿命甚至短时间内烧毁。中小型电机可利用增大机壳的表面积、内轴上装设风叶来散热；大功率电机开设有专门的风道，采用牵引风机强迫通风散热。

5. 机械支撑材料（力-结构材料）

主要是铸钢、铸铁、钢板等制成机座、端盖、转轴和轴承。

五、直流电机的额定值

额定值是制造厂对各种电气设备（本章指直流电机）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的铭牌上，故又叫铭牌值。

（1）额定功率（额定容量） P_N ：指电机在铭牌规定的额定状态下运行时，电机的输出功率。

对于直流发电机， P_N 是指输出的电功率，它等于额定电压和额定电流的乘积，即

$$P_N = U_N I_N \quad (1.10)$$

对于直流电动机， P_N 是指电机长时间正常运行时电机轴输出的机械功率，所以公式中还有效率 η_N 存在，即

$$P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1.11)$$

（2）额定电压 U_N ：指电机正常工作时加在电机两端的输入电压，它是设计电机时的计算电压。在地铁动车车辆中，由直流接触网直接供电的直流牵引电机全部并联运行时，电机的额定电压等于接触网的额定电压；在交流传动动车中，由于采用了逆变装置，牵引电动机的额定电压不受接触网电压的限制，可以根据动车逆变器和牵引电动机在设计和运用方面最可靠、最经济的条件来选择。

（3）额定电流 I_N ：指电机运行时允许从电源输入的电流。

（4）额定转速 n_N ：指额定状态下运行时转子的转速，单位以 r/min 表示。

除上述几项额定数据外，电动机铭牌上还有励磁方式（直流电机）、通风量、绝缘等级等数据。

某直流牵引电机的主要技术参数如表 1.2 所示。

表 1.2 某直流牵引电机的主要技术参数

电网额定电压	750 V	供电方式	三轨上部受流
电机额定功率	86 kW	编组方式	全动车 6 编组
控制方式	凸轮变阻控制	启动加速度	0.86 m/s ²
减速度	1.0 m/s ²	最高速度	80 km/h

练习 题

一、填空题

1. 直流电机由静止的_____和旋转的_____两大部分组成。
2. 直流电机定子的作用是_____和_____，转子的作用是_____和_____。
3. 直流电机定子主要由_____、_____、_____和_____等组成。
4. 直流电机主磁极由_____和_____两部分组成。
5. 电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与_____相连。
6. 直流电机的转子主要由_____、_____、_____和_____等组成。
7. 涡流损耗与电枢铁芯_____的平方成正比，为了减小涡流和磁滞损耗的影响，电枢铁芯通常用_____叠压而成。
8. 直流电机制造材料作用有_____、_____、_____、_____和_____。

二、选择题

直流电动机的额定功率指（ ）。

- | | |
|---------------|---------------|
| A. 转轴上输入的机械功率 | B. 转轴上输出的机械功率 |
| C. 电枢端口输入的电功率 | D. 电枢端口输出的电功率 |

三、简答题

1. 什么是电机的接地？什么是电机的短路？
2. 直流电机定子部分与转子部分各由哪些部件构成？各有何作用？

第四节 直流电机的感应电势和电磁转矩

电枢绕组是实现电能和机械能相互转换的枢纽，为直流电机重要部件之一，绕组的形式与电机的性能、寿命和效率有很大的关系。

一、电枢绕组的构成

直流电机的电枢绕组是双层的，所有绕组元件连接成一闭合回路，按连接规律的不同分为单叠绕组和单波绕组两大类。

直流电枢绕组是由许多形状相同的绕组元件（即线圈）组成，如图 1.21 所示。每个绕组元件的两端头分别与两换向片相连接，而每个换向片也与两个属于不同绕组元件的端头相连接。所以，换向片数 K 与绕组元件数 S 是相等的，即

$$K = S \quad (1.12)$$

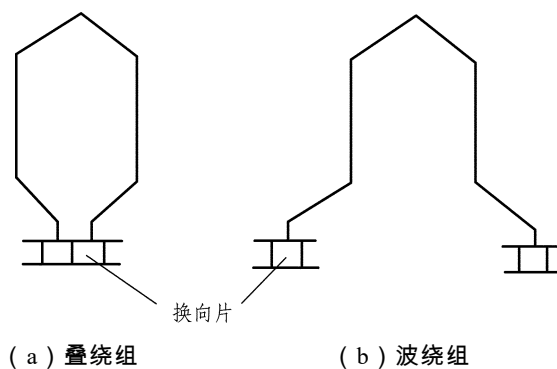


图 1.21 绕组元件

绕组元件放在电枢铁芯槽内，如图 1.22 所示。由于电枢绕组是双层的，每个槽将放置不同绕组元件的上元件边和下元件边，而每个绕组元件有两个元件边，因此绕组元件数等于槽数。实际上，每个槽的上层和下层均放置若干个元件边，习惯上常将槽内每层一个元件边称为一个虚槽，而电枢铁芯表面实际的槽称为实槽。设 Z 为实槽数， Z_u 为虚槽数，每个实槽包含的虚槽数为 u ，如图 1.23 所示，则有

$$Z_u = Z \quad (1.13)$$

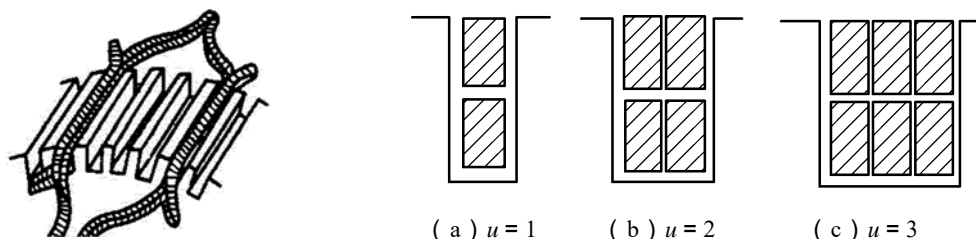


图 1.22 电枢绕组元件在槽中的位置

图 1.23 实槽与虚槽

因为每一虚槽有上下两个有效边，所以绕组元件数 S 应与虚槽数 Z_u 相等，即

$$Z_u = S = K \quad (1.14)$$

为了正确地把电枢绕组安放在电枢槽内并与换向片相连，必须确定电枢绕组和换向器上的极距与各种节距。

1. 极距 τ

极距是指电枢表面圆周上相邻两主磁极之间的距离，以长度表示为

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \quad (1.15)$$

式中 D_a ——电枢外径；

p ——主磁极对数。

以虚槽表示为

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad (1.16)$$

2. 第一节距 y_1

第一节距是指同元件两有效边在电枢表面所跨过的距离，如图 1.24 所示，一般以虚槽数表示。为了使元件感应电动势最大，第一节距 y_1 应等于或接近于一个极距，即

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \mp \varepsilon \quad (1.17)$$

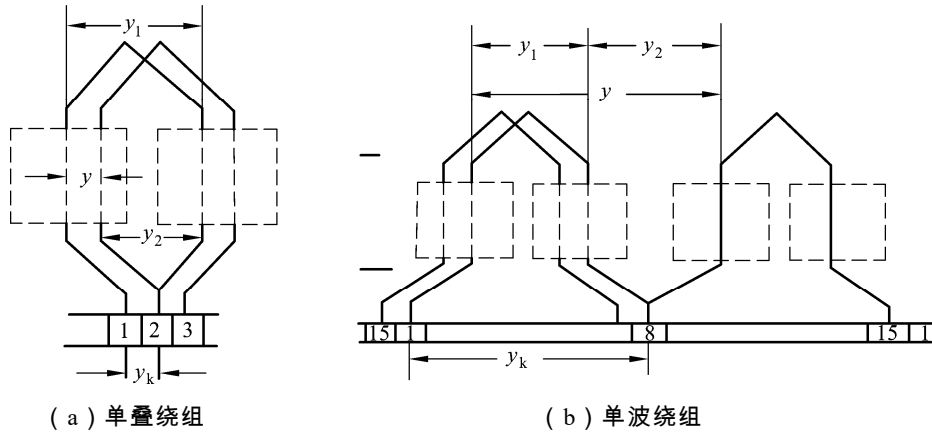


图 1.24 绕组元件的节距

式中 ε 是用来凑成 y_1 为整数的小数。取“-”号为短距元件，取“+”号为长距元件， $\varepsilon = 0$ 时为整距元件。由于短距绕组比长距绕组能节省端部材料，同时短距绕组对换向有利，所以一般采用短距绕组。

3. 第二节距 y_2

第二节距是指同一换向片连接的两个元件边在电枢表面所跨的距离，以虚槽数表示。

4. 合成节距 y

合成节距是指前一绕组元件和后一绕组元件的对应元件边在电枢表面所跨的距离，以虚

槽数表示则有

$$y = y_1 \pm y_2 \quad (1.18)$$

5. 换向器节距 y_k

换向器节距是指同一个绕组元件首末端所连接两换向片之间在换向器表面所跨过的距离，以换向片数表示，则有

$$y_k = y \quad (1.19)$$

以下只分析单叠绕组。

二、单叠绕组

单叠绕组的同一元件首末两端分别与相邻两换向片相接，第一只元件的末端与第二只元件的首端接在同一换向片上。两只相互串联的元件总是后一只紧叠在前一只上面，故称为叠绕组。其特征为

$$y = y_k = \pm 1 \quad (1.20)$$

式中，取“+”为右行绕组，取“-”为左行绕组，左行绕组端部交叉，一般不予采用。下面举例说明单叠绕组的连接方法及其特征。

已知某直流电机极数 $2p = 4$, $S = Z = K = 16$ ，要求绕制一单叠右行整距绕组。

1. 节距计算

取 $y = y_k = 1$ ，为单叠右行绕组

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} \pm 0 = 4，为整距绕组$$

$$y_k = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

2. 绕组展开图

展开图按下列步骤画出，如图 1.25 所示。

(1) 将 16 个槽和 16 个绕组元件编上序号，每个槽画实线的为元件上层边，画虚线的为元件下层边；画出 16 片换向片并编上序号，使绕组元件上层边及其所在的槽，以及元件上层边所接的换向片的序号相同。

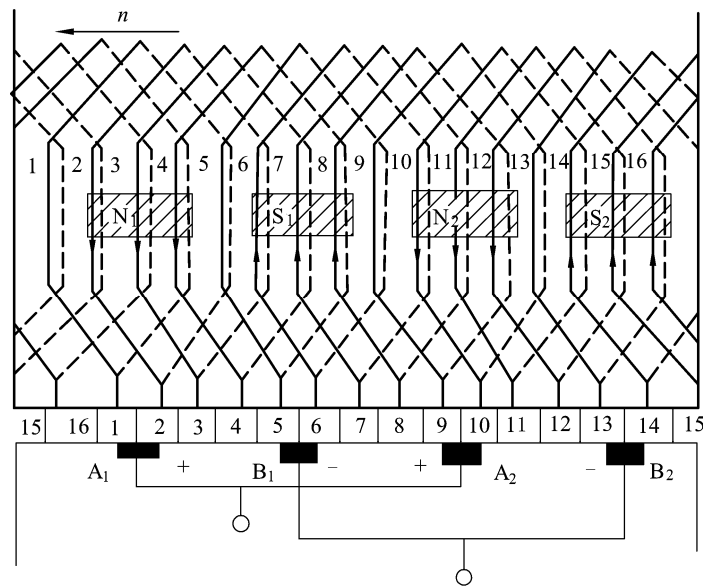


图 1.25 单叠绕组展开图

(2) 根据绕组的节距 $y_1 = 4$ ，作出第一元件的首端接在换向片 1 上，它的一边放在 1 号槽的上层，另一边放在 5 号槽的下层 ($y_1 = 4$)，末端接在换向片 2 上 ($y_k = 1$)；第二元件的首端接到换向片 2 上，它的一边放在 2 号槽的上层，另一边放在 6 号槽的下层，末端接到换向片 3 上；依次连接第三、四，直到第十六元件。第十六元件的末端又接到换向片 1 上，组成一个串联闭合回路。

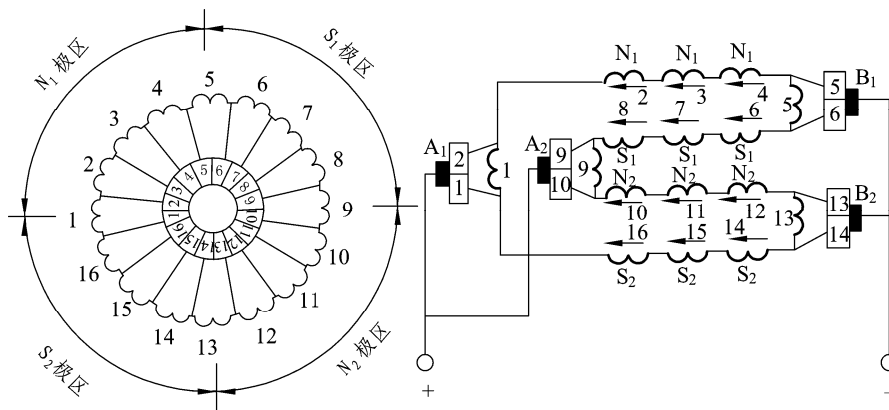
(3) 画出 N、S 极交替均匀分布的四个主磁极。若 S 极磁力线进入纸面，N 极磁力线由纸面穿出，箭头标出了电枢绕组的转向，可用右手定则，标出此瞬间各元件边感应电动势的方向。

(4) 确定电刷位置并标明正负电刷。从展开图中看出，整个闭合绕组中每一极距应为一极区，则相邻极区的绕组元件感应电动势方向不同，如图 1.26 (a) 所示共有 $2p$ 个区域。若要将每个极区内相串联的绕组元件的电动势引出，就需要 $2p$ 个电刷置于换向器上，即电刷数等于极数。由图 1.26 (b) 可以看出，根据绕组元件相串联所构成的支路中电动势的方向可确定电刷的电位。本例中四个电刷均匀地安置在换向器的圆周上，其中两个为正电刷，另两个为负电刷。将同电位的电刷并联，其公共点为电枢绕组的引出端。确定电刷位置的原则应是正、负电刷之间获得最大电动势。为此，电刷应与电动势为零的元件 1、5、9、13 所连接的换向片相接触，即电刷应放在与几何中心线上的元件所连接的换向片相接触的位置。显然，对于端部对称的绕组元件，电刷就应放置在主磁极轴线的位置上。

从图 1.26 可看出，直流电枢绕组是个闭合绕组，电刷将闭合绕组分割成四条并联支路，故单叠绕组的特点为并联支路数等于电刷数也等于主磁极数，即

$$2a = 2p \quad (1.21)$$

式中 a ——支路对数。



(a) 电枢电路图 (b) 并联支路图
图 1.26 单叠绕组电路图和支路图

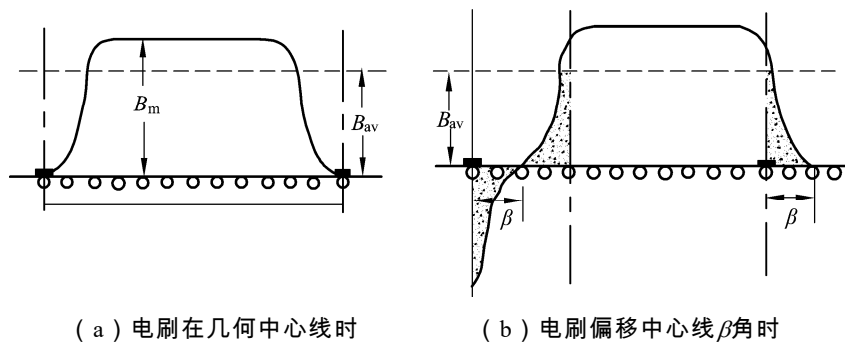
三、电枢绕组的感应电动势

电枢绕组在磁场中旋转将感应出电动势。上述已知，闭合的电枢绕组通过电刷形成 $2a$ 条并联支路，电刷间电势即为一支路电势，而支路电势等于支路中各串联导体的感应电势之和。支路中各导体在磁场中分布于各个不同的位置上，如图 1.27 所示，故各个导体内感应电动势的大小是不同的。所以计算支路电动势时，为简便起见，可先求出一根导体的平均电动势 $e_{av} = B_{av}lv$ ，再乘以一条并联支路中的导体数以求得支路电动势。则电枢电动势为

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} B_{av} lv = \frac{N}{2a} B_{av} l \times \frac{2p\tau n}{60} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1.22)$$

- 式中 N —— 电枢导体总数；
 l —— 导体在磁场中轴向有效长度 (m)；
 v —— 电枢表面线速度 (m/s)；
 n —— 电枢转速 (r/min)；
 Φ —— 每极磁通量 (Wb)；
 C_e —— 电动势常数， $C_e = \frac{pN}{60a}$ 。

式 (1.22) 表明：



(a) 电刷在几何中心线时 (b) 电刷偏移中心线 β 角时

图 1.27 气隙磁密分布

(1) 直流电机的感应电势，是指电枢表面圆周上固定位置（电刷间）的电枢线圈中感应电势之和，仅与电刷间磁通的大小、电枢转速及电机的结构有关。对于已给定的电机， C_e 为常数，则感应电势 E_a 的大小随着磁通和转速的变化而不同。

(2) 感应电势的大小，仅和磁通的大小有关，而和气隙磁密的分布无关。分布形状改变，使每一导体的感应电势大小发生变化，只要保持总磁通量不变，电刷间的电势就不变。

(3) 电刷偏离几何中心线 β 角时，电刷间所包含的总磁通量有所减少，如图 1.27 (b) 所示，使感应电势相应减少。

在直流发电机中，感应电动势的方向总是与电流的方向相同，所以发电机中的感应电动势常称为电源电动势。在直流电动机中，电动势的方向总是与电流的方向相反，所以，直流电动机中的感应电动势常称为反电动势。

四、直流电机的电磁转矩

直流电机的电磁转矩是由载流的电枢导体与气隙磁场相互作用产生的。根据电磁力定律，电枢绕组每一导体在一个极距范围内的气隙磁场中所受到的平均电磁力 $f = B_{av} i_a l$ ，而 $B_{av} = \frac{\Phi}{\tau l}$ ，导体中电流 i_a 与电枢电流 I_a 的关系为

$$i_a = \frac{I_a}{2a} \quad (1.23)$$

电机有 N 根导体，则电机的电磁转矩为

$$T = Nf \frac{D}{2} = N \frac{\Phi}{\tau l} \times \frac{I_a}{2a} l \frac{p\tau}{\pi} = \frac{Np}{2a\pi} I_a \Phi = C_T I_a \Phi \quad (1.24)$$

式中 D ——电枢外径；

C_T ——电磁转矩常数，与电机结构有关， $C_T = \frac{Np}{2a\pi}$ ， $C_T \approx 9.55C_e$ 。

式 (1.24) 表明，电磁转矩与每极磁通和电枢电流乘积成正比。根据左手定则，电磁转矩的方向由每极磁通 Φ 和电枢电流 I_a 的方向共同决定。 Φ 、 I_a 任意一方向的改变，使电磁转矩的方向随之改变。直流发电机和直流电动机的电磁转矩的作用是不同的。在直流电动机中，电磁转矩的方向与转子的旋转方向相同，为驱动转矩；在直流发电机中，电磁转矩的方向与转子的旋转方向相反，为制动转矩。

五、直流电机的可逆原理

我们已经知道，只要导体切割磁力线，导体中便有感应电动势产生；只要位于磁场中的导体有电流流通，导体上便会受到电磁力作用。这样，不论发电机或电动机，对导体同时作用的有感应电动势和电磁转矩。当导体中的感应电动势 E_a 大于外接端电压 U 时，电流 I_a 将

顺 E_a 方向流出。同时，载流导体上将受到电磁转矩 T 的作用，根据左手定则可知 T 的方向与导体运动的方向相反，具有阻力作用，必须由外施机械力来克服，导体才能继续运动以产生感应电动势。显然，这时机械功率由外界电机输入，电机作发电机运行。也就是，发电机作用表现在外，电动机作用隐蔽在内，被掩盖了的电磁转矩称为发电机的制动转矩。反之，若外施端电压 U 大于导体电路的感应电动势 E_a 时，则电流 I_a 逆电动势 E_a 的方向流入，电功率自外电源输入到电机导体电路。载流导体受作用于它的电磁转矩 T 的驱动，顺电磁转矩 T 方向运动，这时电机为电动机运行。电动机作用表现在外，发电机作用隐蔽在内，被掩盖的电动势 E_a 称为电动机的反电动势，如图 1.28 所示。

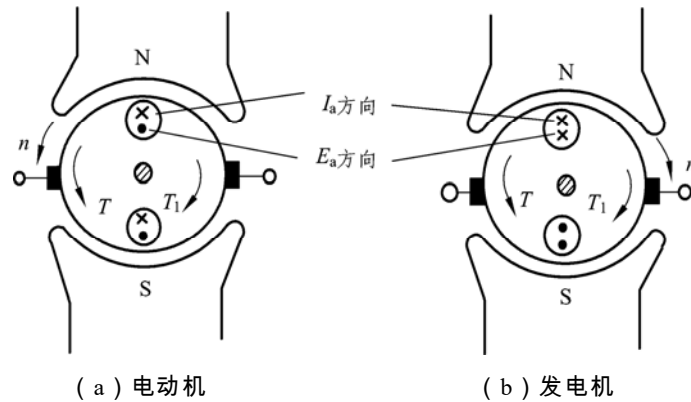


图 1.28 直流电机不同运行方式下的电磁转矩和感应电动势
 T —电磁转矩； T_1 —外部机械阻力转矩； T_1 —外部机械拖动转矩

总而言之，在发电机中也有电磁转矩，在电动机中也有感应电动势。发电机和电动机不应视为两种截然不同的电机，而只是同一电机的两种不同运行方式。一台直流电机原则上既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，取决于外界不同的条件。将直流电源外加于电刷，输入电能，电机能将电能转换为机械能，拖动生产机械旋转，作电动机运行；如用原动机拖动直流电机的电枢旋转，输入机械能，电机能将机械能转换为直流电能，从电刷上引出直流电动势，作发电机运行。同一台电机，既能作为电动机运行，又能作发电机运行的原理，在电机理论中称为可逆原理。由此在一定的条件下，直流电机既可作为电动机运行又可作为发电机运行，应用于动车上的牵引工况和电制动工况。

练习 题

一、填空题

1. 直流电机的电枢绕组按连接规律的不同分为_____绕组和_____绕组两大类。
2. 单叠绕组 $y =$ _____，其特点为并联支路数等于电刷数也等于_____。

3. 直流发电机中的感应电动势常称为_____；直流电动机中的感应电动势常称为_____。

4. 直流电动机中的电磁转矩为_____转矩；直流发电机中的电磁转矩为_____转矩。

5. 一台 4 极直流发电机采用单叠绕组，若取下一支或相邻的两支电刷，其电流和功率_____，而电刷电压_____。

6. 直流电机具有可逆性，既可作_____使用，也可作_____使用。

二、判断题

1. 直流电机的电枢绕组并联支路数等于极数，即 $2a = 2p$ 。()
2. 直流电动机中，电磁转矩的方向与励磁绕组的极性是无关的。()
3. 电磁转矩和负载转矩的大小相等，则直流电机稳定运行。()
4. 直流电动机工作在电动状态下，电磁转矩与转速的方向始终相同。()
5. 直流电机工作在任何运行状态下，感应电动势总是反电动势。()
6. 直流电机稳定运行时，主磁通在励磁绕组中也要感生电动势。()

三、简答题

1. 单叠绕组的特点是什么？
2. 试说明 C_T 与 C_e 的关系。

四、综合题

怎样判别直流电机运行在发电机状态还是电动机状态？它们的 T 、 n 、 E_a 与 I_a 的方向有何不同？

第五节 直流电机的电枢反应

从直流电机基本工作原理的分析可知，发电机将机械能转换为电能，电动机将电能转换为机械能，其必要条件之一是必须具有气隙磁通。因此，必须在直流电机主磁极的励磁绕组中通以励磁电流来产生磁势，以产生气隙磁通，使电枢绕组切割气隙磁通而感应电势；或者由电枢电流与气隙磁通相互作用而产生电磁转矩，从而实现机电能量的转换。

一、直流电机的磁场

电枢反应是指负载运行时电枢绕组中电流产生的电枢磁动势对主磁场的影响。在分析电枢反应前，应先了解主磁场与电枢磁场在气隙中的分布情况。

1. 主磁场

直流电机空载时，电枢电流为零，只有励磁绕组中存在电流，气隙磁场是完全由励磁绕组的电流所产生的，称为主磁极磁场或主磁场。其分布情况如图 1.29 所示。从图中可见，主磁极磁通密度的分布为平顶波，主磁极对称于主磁极 $Y'-Y$ 轴线，相邻两主磁极之间的中心线称为几何中心线，中心线上的主磁极磁通密度为零。

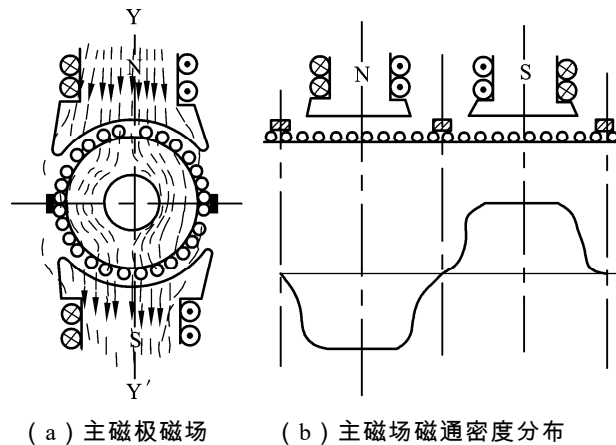


图 1.29 主磁极磁场

2. 电枢磁场

当直流电动机带上负载后，电枢绕组中有一定的电流流过，在电机的磁路中，又产生一个磁势，称为电枢磁势，由电枢磁势建立的磁场称为电枢磁场。电枢本身就构成了一个带铁芯的电磁铁，电枢磁势轴线即电磁铁的轴线位置总是与电刷轴重合，并与主磁场轴线互相垂直相交，所以又称电枢磁场为交轴磁场。

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，电枢电流方向的分界线是电刷，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。如图 1.30 所示是去掉换向器后的直流电机模型。

电刷在几何中心线上，电枢导体中的电流方向是以电刷相连的轴线为界，电枢上半部分和下半部分导体中的电流方向相反。由全电流定律可知，几何中心线上的电枢磁动势最大，主磁极轴线上的电枢磁动势为零，电枢磁动势沿空间呈三角波分布，如图 1.30 (b) 中曲线 1 所示。从电枢磁动势在气隙中的分布，可得电枢磁通密度沿气隙中的分布曲线 2 [见图 1.30 (b)]。由于几何中心线的气隙很大，磁阻也很大，虽然此时几何中心线上磁动势最大，但磁通密度迅速减小，所以电枢磁通密度沿气隙中的分布曲线为马鞍形。

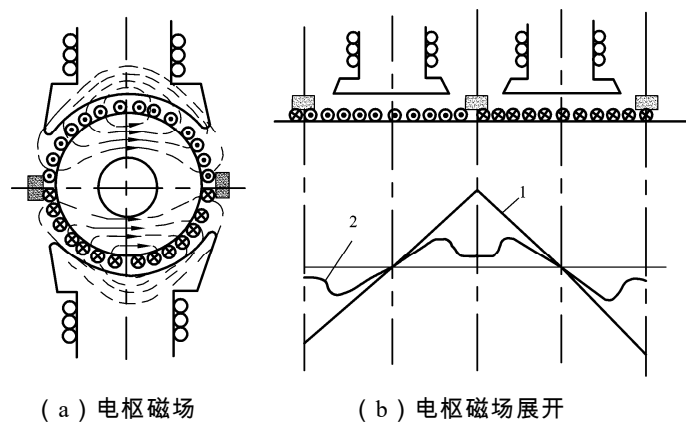


图 1.30 电枢磁场

1—电枢磁动势曲线；2—磁通密度曲线

综上所述，电枢磁动势及其磁场的分布情况是不因电枢旋转而改变的，电枢磁动势及其磁场的轴线就在电刷相连的轴线位置上。

二、电枢反应

电刷位于几何中心线上，电枢磁动势轴线也就在几何中心线上，即位于交轴（直轴为主磁极轴线）位置，若把图 1.30 所示的电枢磁场叠加到图 1.29 所示的主磁场，便可得到直流电机负载时交轴电枢反应的磁场分布情况，如图 1.31 所示。可见，负载时，电机中气隙磁场将由励磁磁势和电枢磁势共同建立。由电枢电流建立的电枢磁场，使主磁场受到影响，故将这种影响称为电枢反应。

该图还表示了发电机和电动机两种运行方式的电枢反应。由于已确定了图示主磁场方向和电枢电流方向，所以两种运行方式的电枢旋转方向应相反。从图 1.31 (b) 中可见，每个主极下的磁场，一半被削弱，另一半被加强（图中面积 S_1 和 S_2 ）。作发电机运行时，主磁极的前极尖（迎着电枢进入）的气隙被削弱，后极尖（电枢退出）被加强，物理中性线（负载时沿电枢表面的磁场等于零处所连接的直线）顺转向移过 α 角；而作电动机运行时情况正好相反，即主磁极的前极尖气隙磁场被加强，后极尖被削弱，物理中性线则逆向移过 α 角。

当电机磁路未饱和时，每个磁极的前后极尖的磁通增加和减少相等，每极的磁通量保持不变，但是电机正常运行时磁路常接近饱和，主磁的极尖更趋饱和，于是半个磁极内磁通的增加不足以补偿另半个磁极磁通的减少，如图 1.31 (b) 曲线 3 上的阴影部分，因此交轴电枢磁动势不仅使气隙磁场发生畸变，而且对主磁极起一定的去磁作用。

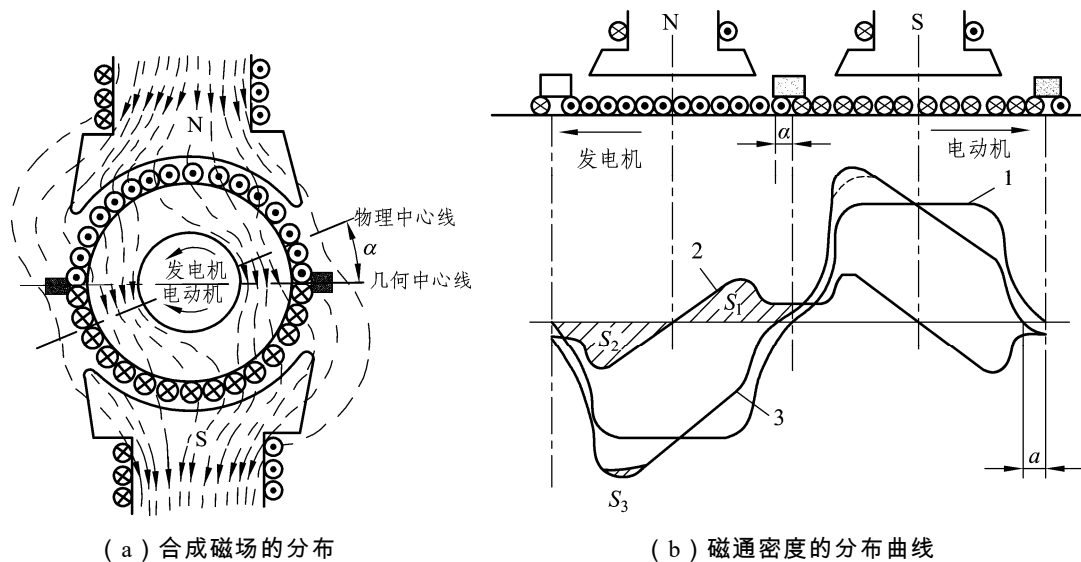


图 1.31 交轴电枢反应

1—主磁场磁通密度分布曲线；2—电枢反应磁场磁通密度分布曲线；3—合成磁场磁通密度分布曲线

因此，电枢反应引起的结果是：

- (1) 电机气隙中的合成磁场发生畸变；
- (2) 电机气隙中的合成磁场有所削弱。

电枢反应的去磁作用影响电机的转速和转矩，但是在一般情况下这种影响并不很大。严重的问题是：由于磁场的畸变使电机换向条件恶化，电刷与换向器之间容易产生火花，甚至引起“环火”，造成电机严重损坏。

三、直流电机的换向

(一) 直流电机的换向概念

在分析电枢绕组时知道，电枢绕组连接构成一个闭合绕组。当电枢旋转时，组成电枢绕组每条支路的绕组元件，在依次循环地轮换，即绕组元件从一条支路经过电刷时被短路，随后将转入另一条支路。由于被电刷分割的相邻支路中绕组元件的电流方向是相反的，因此在绕组元件由一条支路经电刷短路后转入另一条支路的短暂过程中，绕组元件里的电流就要改变一次方向，被电刷短路的绕组元件内电流改变方向的过程称之为换向。

换向是直流电机运行的关键问题，换向不良，将在换向器与电刷之间产生有害火花，甚至使电机不能正常运行。

改善电机换向的措施：装设换向极是改善电机换向的最有效的措施，如图 1.32 所示。换

向极应该在换向区域内建一个适当的磁场，该磁场用来抵消交轴电枢反应磁场。

(1) 换向极必须装在电机的几何中性线上。

(2) 换向极必须有正确的极性，它的磁场方向一定要与交轴电枢反应磁场相反。

(3) 换向极励磁线圈必须与电枢绕组串联。以保证在整个负载范围内换向电势随电枢电流成正比的变化，都能抵消电枢反应电势。

(4) 换向极的磁路应处于低饱和状态。即在换向极铁芯和机座之间加入非磁性垫片形成所谓的第二气隙，如图 1.33 所示。

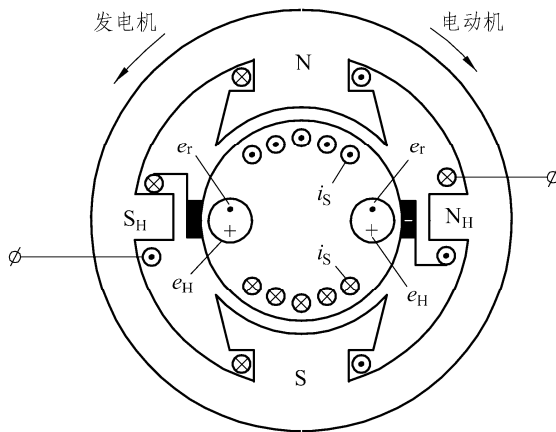


图 1.32 用换向极改善换向
N 与 S—主磁极；N_H 与 S_H—换向极

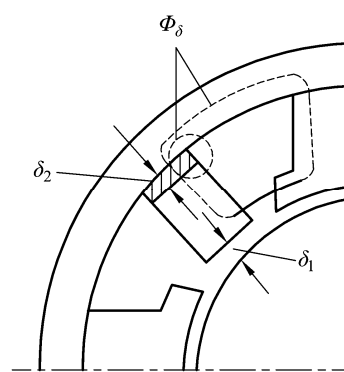


图 1.33 换向极的气隙
δ₁—第一气隙；δ₂—第二气隙；Φ_δ—漏磁通

(二) 火花现象和火花等级

直流电机运行时，其电刷与换向器之间常常伴有火花。火花通常出现在电刷的后刷边，发生火花是直流电机换向不良的直接表现。如果火花在电刷上范围很小，亮度微弱，呈浅蓝色，它对电机运行并无危害，不必要求绝对没有火花。但当火花在电刷上范围较大，比较明亮，呈白色或红色，就会灼伤换向器及电刷，影响电机的正常运行。因此，火花的大小直接反映了直流电机换向性能的好坏。

直流电机换向器上的火花等级分 5 级，分别是 1 级、 $1\frac{1}{4}$ 级、 $1\frac{1}{2}$ 级、2 级和 3 级。1 级、 $1\frac{1}{4}$ 级和 $1\frac{1}{2}$ 级均为无害火花，允许电机在这些火花等级下长期运行，即在额定磁场和各削弱磁场级位上正常运行时，火花不应超过 $1\frac{1}{2}$ 级；在 2 级火花作用下，换向器上会出现灰渣和黑色的痕迹，随着运行时间的延长，黑色痕迹将逐渐扩展，电刷和换向器磨损也显著增加，因此，2 级火花只允许短时出现；电机运行时绝不允许出现 3 级火花。

直流电机在运行过程中的火花情况，除使用专门仪器测量外，很难直接观察。因此，通常以换向器及电刷表面状态作为确定火花等级的主要依据。

(三) 直流电机环火

电机因某些换向片电压过高而发生的火花称为电位火花。在最不利的情况下，例如电机

负荷剧烈变化、负载短路时，换向火花和电位火花连成一片，使换向器表面正、负电刷间产生电弧而短路，这种现象称为环火。环火瞬间电机发出巨大响声，所以环火又被形象地称为电机“放炮”。

产生环火原因一是由于电刷磨下来的炭粉或电刷碎片，以及换向器磨损下来的铜粉聚积在换向片的云母槽内，加之油泥从电机外部飞溅到换向器上，这些脏物在两换向片间形成“导电桥”。当这两换向片转至磁通密度大、片间电压高的空间位置时，若该片间电压足以使导电桥燃烧，则形成了电位火花。电位火花产生的电弧使周围的空气游离，并使铜粉气化。随着换向器的转动，此电弧逐渐拉长。如果沿换向器圆周单位长度的电位差足够大，则电弧将维持不灭，继续扩展下去即形成环火。实践证明，电位火花即导电桥燃烧是引起环火的主要原因。

产生环火的另一原因是由于电磁或机械方面的原因引起较强烈的换向火花扩展开来造成环火。当换向器转动时，换向火花使电刷与换向片之间产生的小电弧称为原始火花。随着电枢的转动电弧被拉长，电弧长度增加，电弧两端的电位差增大，一旦该电压足以维持电弧燃烧时，由于高温和被游离的导电气体扩散，将使电弧迅速向前发展产生环火。

环火具有很大的破坏力：轻则烧伤换向器和电刷，或使换向器升高片线槽中焊锡熔化，造成“甩锡”和电枢绕组匝间短路，以至于击穿绝缘而接地；严重时会把电枢绕组导线烧毁，电刷装置烧熔。环火时外加电压直接通过电刷给励磁绕组提供励磁（以串励牵引电动机为例），使牵引电机转换为发电工况，此时牵引电动机励磁电流与电枢电流（电枢经电弧短路）均相当大，对列车产生强大电磁制动转矩，造成列车动轮踏面与钢轨擦伤。

防止环火是设计、使用部门都应重视的问题。在设计电机时，一般采用的措施除加装换向极或补偿绕组外，还有限制换向片间的最大片间电压，采用适当的主磁极靴形状（轴线气隙小、两极尖气隙大），使片间电压最大值处远离换向区。在电机运用中，应经常吹扫电刷装置及换向器表面，清除换向片两边的毛刺，保持电机气密性，以防导电桥燃烧形成环火。合理操纵列车，避免电机过载，防止过大的电磁火花。经常检修电刷、换向器，使之状态良好，用以减小机械火花。此外，能对电机环火执行快速切断电源的保护也是一种补救措施。

四、直流电机的通风冷却

直流电机在实现能量转换过程中，总有一部分能量不能被有效地利用，而以热能的形态散失到周围的大气中，这部分能量的损耗称为直流电机的损耗。这些损耗一方面使电机的输出功率减小、效率降低；另一方面，损耗最终都变为热能，使电机各部分温度升高，引起电机发热。电机的发热对电机运行性能有很大的影响，过高的温度将使绝缘材料损坏而丧失绝缘性能，以至影响电机的使用寿命。为了降低电机的温升，除了在设计电机时降低电机的电磁负载，减小电机损耗外，更重要的是提高电机的散热能力，即增强电机内部的传热能力和表面散热能力。电机最常用的有效方法是通风冷却，通风冷却就是通过电机外部（或内部）的鼓风作用，使电机发出的热量很快地排到周围空气中去，使电机保持一定的温升值，长期可靠地运行。

（一）直流电机的通风方式

(1) 根据冷却空气进入电机内部所依靠的力量, 分为自通风和独立通风。

自通风——由装在电机转轴上的离心式风扇鼓风。这种通风方式的优点是不需要附加设备, 缺点是风量和风压随电机转速而变化, 如图 1.34 (a)、1.35 (a) 所示。

独立通风——由单独设置的通风机给电机鼓风。这种通风方式的优点是送入电机的风量和风压与电机运行情况无关; 缺点是需要增设通风机、拖动机械、管道等辅助设备, 如图 1.34 (b)、1.35 (b) 所示。

(2) 根据通风器 (如通风机、风扇) 安装位置不同, 分为强迫通风和诱导通风。

强迫通风——通风器装在空气的入口端, 由通风器将空气压入电机内部, 如图 1.34 所示。这时电机内部的空气压力一般大于大气压力。

诱导通风——通风器装在空气的出口端, 由通风器将电机内部的空气抽出, 如图 1.35 所示。

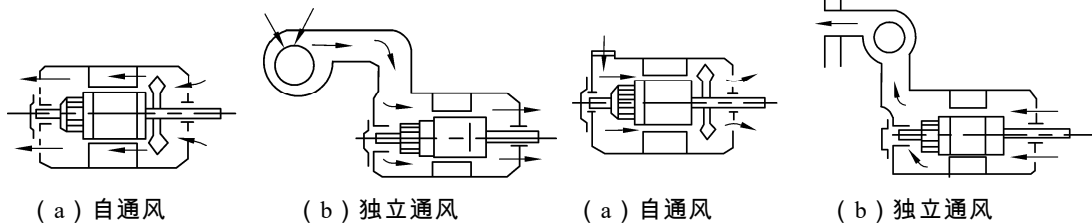


图 1.34 强迫通风示意图

图 1.35 诱导通风示意图

(3) 根据冷却空气在电机中的主要流通方向, 分为轴向通风、径向通风和轴向-径向复合通风。

轴向通风——冷却空气由电机的一端进入, 另一端排出, 在电枢内部沿转子铁芯的轴向通风道流通。这种通风方式的优点是铁芯结构紧凑; 缺点是通风损耗较大, 沿电机轴向的温度不够均匀。

径向通风——空气进入电机内部, 沿着电枢内的径向风道流通。这种径向风道是在压装电枢铁芯时, 每隔一定距离放置一片风道齿构成的。这种通风方式的优点是通风损耗小, 散热面积较大, 沿电机轴向的温度较均匀; 缺点是径向通风槽使电机的轴向尺寸增大。

轴向-径向复合通风——电机既有轴向风道也有径向风道, 结合二者的特点设计, 具有良好的通风效果, 但结构复杂。

(二) 直流电机的通风结构

采用强迫通风电机的通风系统, 如图 1.36 所示。冷却空气由换向器端上部进风口进入换向器室, 然后分成两路: 一路经换向器表面、电枢和磁极之间空气隙及主极、换向器之间的间隙到非换向器端; 另一路经换向器套筒的内孔道、电枢铁芯内部通风孔道和电枢后支架到非换向器端。两路汇合后, 由后端盖的排风孔排出。

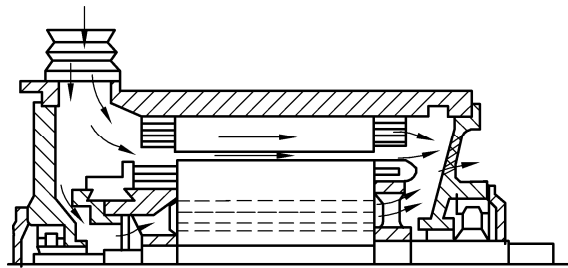


图 1.36 强迫通风电机的通风系统示意图

这种通风结构，进风口开在换向器端，以利用换向器处的空间，使进入电机内部的平行气流分布均匀。但是，由电刷磨下的碳粉容易堆积在电机各线圈的缝隙里，使线圈的绝缘电阻降低。

电机的通风风量和进风口风压，常常以制成的实际电机的风量和风压为参考加以确定。

练习 题

一、填空题

1. 电枢磁场是_____。
2. 直流电动机电刷放置的原则是_____。
3. 电刷在几何中性线上时直流电动机电枢反应性质为：使气隙合成磁场产生_____，使磁极的前半部磁场_____，后半部磁场_____，在考虑磁路饱和的情况下，电枢反应的影响将使总的磁通量_____。
4. 在额定磁场和各削弱磁场级位上正常运行时，火花不应超过_____级；_____级火花只允许短时出现；电机运行时绝不允许出现_____级火花。
5. 在换向极铁芯和机座之间加入_____形成所谓的第二气隙。
6. 根据冷却空气进入电机内部所依靠力量的不同，直流电机通风方式可分为_____和_____。

二、判断题

1. 直流电机主磁通既连着电枢绕组又连着励磁绕组，因此这两个绕组中都存在着感应电动势。()
2. 直流发电机中的电刷间感应电动势和导体中的感应电动势均为直流电动势。()
3. 直流电机稳定运行时，主磁通在励磁绕组中也要感生电动势。()
4. 直流电机在负载运行时，电枢反应将直接对主磁场有去磁的作用。()
5. 换向极绕组必须与电枢绕组_____，同时换向极磁路通常处于_____状态。

三、选择题

1. 直流电机的感应电动势 $E_a = C_e \Phi n$ ，这里的 Φ 是指 ()。
 - A. 励磁磁动势产生的主磁通
 - B. 漏磁通
 - C. 气隙中合成磁通
 - D. 由电枢磁动势产生的磁通
2. 假定电刷位于几何中心线上，并且磁路不饱和，则直流电机的电枢反应的性质是 ()。
 - A. 纯去磁
 - B. 一半磁极下增磁，一半磁极下去磁
 - C. 纯增磁
 - D. 不确定
3. 所谓环火是指牵引电动机正负电刷之间被强烈的大电弧所 ()。
 - A. 短路
 - B. 断路
 - C. 接地
4. 环火或飞弧发生时，相当于电枢绕组处于 () 状态，而电动机继续转动切割磁力线后将处于发电状态，因而会伴有很大的响声，俗称“放炮”，并会产生巨大的冲击振动。
 - A. 短路
 - B. 断路
 - C. 接地

四、简答题

1. 什么叫电枢反应？电枢反应的结果是什么？
2. 什么叫换向？如何改善电机的换向？
3. 电机产生环火的原因有哪些？
4. 电机的冷却通风方式有哪些？

第六节 各种励磁方式直流电动机的运行特性

一、直流电机励磁方式

励磁绕组和电枢绕组的连接方式称为励磁方式。励磁方式不同的电动机具有不同的特性。直流电动机按励磁方式的不同可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机，如图 1.37 所示。他励电动机特性和并励电动机相同，因此只需分析他励、串励和复励三种电动机的特性。

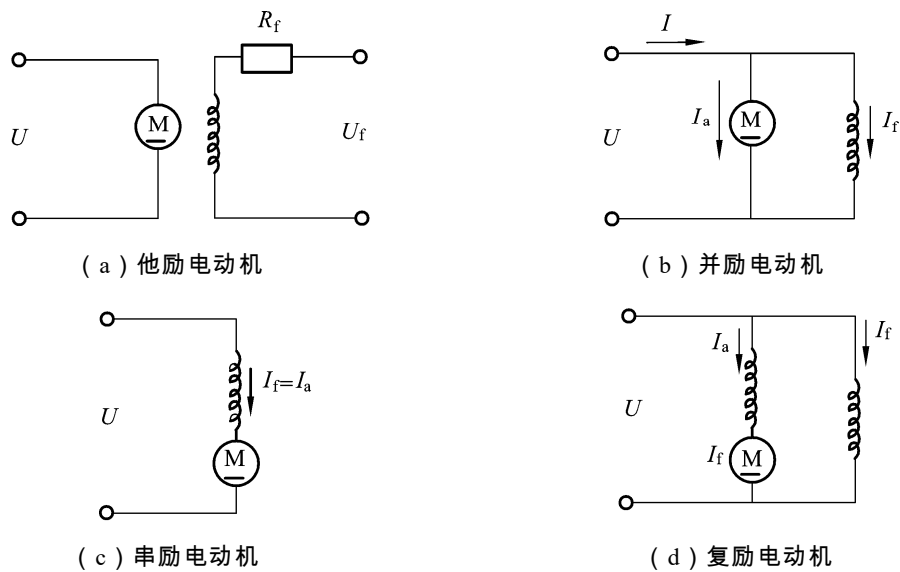


图 1.37 直流电动机励磁方式

并励电动机：励磁绕组与电枢绕组并联连接，由外部电源一起供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。

他励电动机：励磁绕组由外加电源单独供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小无关。

串励电动机：励磁绕组与电枢绕组串联连接，由外部电源一起供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。

复励电动机：励磁绕组分为两部分，一部分与电枢绕组串联连接，另一部分与电枢绕组并联连接，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。

在地铁电动车组、城市现代有轨电车上采用最多的是串励电动机。

二、直流电动机的基本方程式

直流电机是传动系统中进行机电能量变换的元件。直流电机的基本方程式是指直流电机电系统中的电压平衡方程式、机械系统中的转矩平衡方程式以及功率平衡方程式。这些方程式综合了电机内部的电磁过程，同时也表达了电机外部的运行特性及功率平衡关系。

(一) 电压平衡方程式

图 1.38 为直流串励电机与他励电动机的电路图，其中 U 为电源电压 (V)， U_f 为励磁绕组的端电压 (V)， E_a 为电枢反电势 (V)， I_a 为电枢电流 (A)， I_f 为励磁电流 (A)， R_s 为电枢绕组电阻 (Ω)， R_f 为励磁绕组电阻 (Ω)， L_s 为电枢绕组电感系数， L_f 为励磁绕组电感系数。

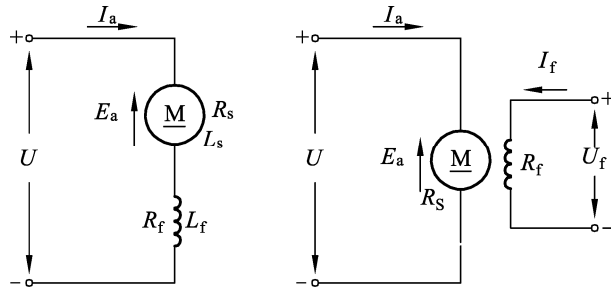


图 1.38 直流电动机的电路图

根据基尔霍夫定律，可以列出电动机电路的电压平衡方程式。

1. 串励电动机

$$U = C_e \Phi n + i_a (R_s + R_f) + (L_s + L_f) \frac{di_a}{dt} \quad (1.25)$$

当电机稳定运行时， $di_a/dt = 0$ 则

$$U = U_s = C_e \Phi n + I_a R_a \quad (1.26)$$

其中 $R_a = R_s + R_f$ 。

2. 他励电动机

$$U = U_a = C_e \Phi n + i_a R_s + L_s \frac{di_a}{dt} \quad (1.27)$$

稳态时：

$$U = U_a = C_e \Phi n + I_a R_s \quad (1.28)$$

(二) 转矩平衡方程式

根据牛顿定律，直流电机的机械系统中，任何瞬间都必须保持转矩平衡。

电动机瞬态的转矩平衡方程式为

$$T = T_z + T_0 + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.29)$$

式中， T 为电磁转矩， T_z 为负载阻力转矩， T_0 为空载阻力转矩， $J \frac{d\omega}{dt}$ 为惯性转矩。

电动机稳态下的转矩平衡方程式：

$$T = T_z + T_0 \quad (1.30)$$

一般 T_0 （由摩擦损耗和铁磁损耗等引起）较小，故

$$T = T_z \quad (1.31)$$

(三) 功率平衡方程式和电机效率

电磁功率为

$$P = E_a \cdot I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \cdot \omega = T\omega \quad (1.32)$$

式(1.32)表明,从电磁的观点看,电动机(或发电机)通过电磁感应作用,从电源吸取(或发出)电功率 $E_a I_a$ 。从机械的观点看,在电动机中, $T\omega$ 为电动机的电磁转矩对机械负载所做的机械功率,而在发电机中, $T\omega$ 为原动机克服制动转矩所需输入电机的机械功率。

所以无论是电动机还是发电机,在电功率 $E_a I_a$ 与机械功率 $T\omega$ 能量变换过程中,能量守恒。

在能量转换过程中,不可避免地会伴随着各种各样的损耗。

机械损耗 $\Delta P_{机}$ 是指电机轴承,电刷与换向器之间,旋转部分与空气之间存在的摩擦损耗。

铁损耗 $\Delta P_{铁}$ 是指电枢铁芯中由磁滞和涡流所引起的能量损耗。

一旦电机旋转,不管它是否带负载,机械损耗和铁损耗就会存在,因此通常把这两项损耗合起来叫做空载损耗 $\Delta P_{空}$,即 $\Delta P_{空} = \Delta P_{机} + \Delta P_{铁}$ 。

此外还有铜损耗 $\Delta P_{铜}$,因为电枢绕组、励磁绕组、电刷、电刷和换向器接触处都存在电阻,合为 R_D ,近似为铜导体电阻,当有电流流过时,就会产生铜损耗 $\Delta P_{铜} = I^2 R_D$ 。

根据能量守恒定律,电机的输入、输出和损耗之间存在一定的平衡关系。对于直流电动机,电源输入的功率为

$$P_1 = P + \Delta P_{铜} \quad (1.33)$$

式中, P 为电机吸收的电磁功率。

输出给负载的机械功率为

$$P_2 = P - \Delta P_{空} \quad (1.34)$$

功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{空} + \Delta P_{铜} \quad (1.35)$$

则电动机效率 η 为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1.36)$$

电动机效率 η 是衡量电机内部损耗的大小的参数。

三、直流电动机的运行特性

直流电动机的运行特性表示当不对电源电压及励磁电流进行人为调节时的转速特性(转速 n 随电枢电流 I_a 变化的关系)、转矩特性(电磁转矩 T 随电枢电流 I_a 变化的关系)、机械特

性（转速 n 随电磁转矩 T 变化的关系）。电机的工作特性因励磁方式不同差别很大，所以讨论时，既要应用综合电磁过程的有关方程式，又要注意到不同励磁方式的特点。

（一）转速特性

直流电动机的转速对电枢电流的变化关系可根据直流电动机电压平衡方程式求得，即

$$U = E_a + I_a R_a = C_e \Phi n + I_a R_a \quad (1.37)$$

由式（1.37）可解得

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1.38)$$

式（1.38）是直流电动机的自然转速特性。

从式（1.38）可以看出，当 U 为常值时，影响电动机转速的因素有两个：一是电枢回路电阻压降 $I_a R_a$ 的变化；二是磁通 Φ 的变化。

1. 他励电动机转速特性

他励电动机空载时 $I_a = 0$ ，此时转速为空载，转速 $n_0 = U / C_e \Phi$ 。随着 I_a 的增加，电阻压降增加，使转速趋于下降；电枢反应的去磁作用使磁通略为减少，又使转速趋于上升。由于两种因素对转速的影响部分地互相抵消，所以电动机转速变化很小。转速特性可能是略为下垂，也可能是略为上翘。工程实用中，为保证电动机稳定运行，常使他励电动机具有略为下降的转速特性，如图 1.39 所示。

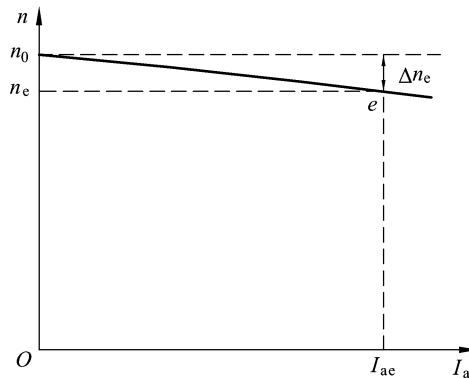


图 1.39 他励电动机转速特性

他励电动机在负载变化时转速变化很小，即转速硬特性，其转速变化率只有 2% ~ 8%，所以基本上是一种恒速电动机。

2. 串励电动机转速特性

在直流串励电动机中，励磁电流等于电枢电流。故当电枢电流随负载发生变化时，励

磁电流也发生变化，即使不考虑电枢反应的去磁作用，气隙磁通也随着负载转矩的变化而变化。

气隙磁通 Φ 和励磁电流 I_f 间的关系是电机的磁化曲线，如图 1.40 所示。图中 A 点是额定磁通点，磁路已经有了一定程度的饱和，处于磁化曲线的膝部。和磁化曲线相切且过零点的直线 1 是气隙线，它代表磁化曲线的不饱和部分，和磁化曲线相切的直线 2 代表磁化曲线的高饱和部分。

当磁路不饱和时，磁化曲线用直线方程式表示，即令

$$\Phi = K_1 I_f \quad (1.39)$$

将式 (1.39) 及 $I_a = I_f$ 代入式 (1.38) 得

$$n = \frac{U}{C_e K_1 I_a} - \frac{R_a}{C_e K_1} \quad (1.40)$$

式 (1.40) 中等号右边第二项是一个常数，第一项与 I_a 成反比，因此转速和电枢电流间的函数关系是一条双曲线，转速 n 随电枢电流 I_a 的增大而急剧下降。如图 1.41 所示，当电机磁路未饱和时，即当 $I_a < I_c$ (I_c 为额定电流) 范围内，转速特性 $1e$ 段是一个双曲线函数，转速随电流的减小而急剧上升，当 $I = 0$ 时， n 。

当电流接近额定电流 I_c 时，磁路已经相当饱和，磁化曲线已经进入图 1.40 中直线 2 所代表的部分。直线 2 是一条和横坐标接近平行的直线，它所代表的区域气隙磁通基本上是一个常数。为了方便，通常把高饱和后的气隙磁通看成一个常数，令 $\Phi = K_2$ ，于是得图 1.41 中特性曲线 $e2$ 段的近似方程为

$$n = \frac{U}{C_e K_2} - \frac{R_a}{C_e K_2} I_a \quad (1.41)$$

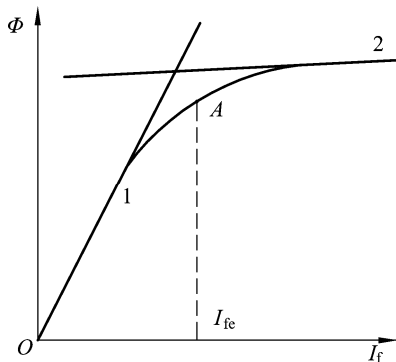


图 1.40 直流电机的磁化曲线

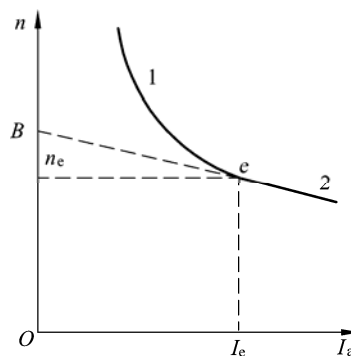


图 1.41 直流串励电动机转速特性

式 (1.41) 和他励电动机的转速特性方程完全一样，等号右边第一项是一个常数，相当于他励电动机的理想空载转速，即图 1.41 中的交点 B 。等号右边第二项相当于他励电动机的转速降落，这里虽然多了一个串励绕组电阻但转速降落仍然是相当小的。因此， $I_a > I_c$ 后串励电动机的转速特性和他励电动机相当接近，是一根比较硬的特性曲线。

总之，当串励电动机的电枢电流 I_a 由大向小逐渐减小但仍大于额定电流时，转速随电流的减小逐渐增加，但转速的变化比较小，电机具有较硬的特性。当电流小于额定电流以后，气隙磁通随电枢电流线性减少，转速和电枢电流间的关系呈双曲线型，转速随电枢电流的减少急剧上升。理论上当电枢电流等于零时转速将上升为无穷大。事实上电机中存在着剩磁，气隙磁通在电枢电流等于零时也不会完全消失。但是超速是不允许的，工程上对串励电动机规定有最高允许转速，超过了允许的最高转速就叫发生了“飞车”事故。“飞车”事故是一种重大的恶性事故，可能发生电枢绑线断裂，电枢绕组从槽中甩出，或者换向片松散等情况，使电机遭到严重破坏。因此，串励电动机在自然转速特性上运行时，负载不允许小于额定负载的 15%~20%，不允许用链条或皮带轮传动，以防止在链条或皮带断裂、滑脱时发生飞车事故。因此，串励电动机不允许空载运行。

3. 复励电动机转速特性

复励电动机具有并励和串励两套绕组，两套绕组的磁势比例不同，可得到不同的特性，复励电动机转速特性是介于他励和串励电动机特性之间。各种励磁方式电动机的转速特性如图 1.42 所示。

(二) 转矩特性

根据直流电动机的电磁转矩 $T = C_T I_a \Phi$ ，我们把电磁转矩 T 随电枢电流 I_a 变化的函数关系称为转矩特性。

1. 他励电动机转矩特性

他励电动机，磁通不随电枢电流变化，转矩与电枢电流成正比， $T = f(I_a)$ 为一直线，如图 1.43 所示。实际上，由于电枢反应的去磁作用，使电动机的转矩在电枢电流较大时，稍有下降。

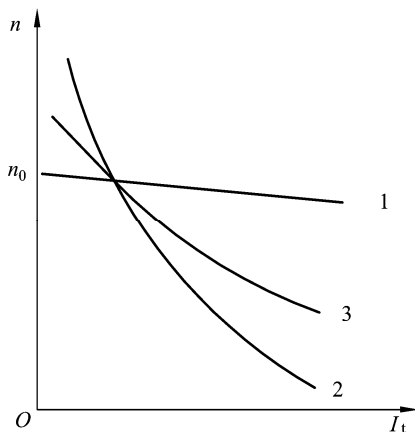


图 1.42 直流电动机的转速特性

1—他励；2—串励；3—复励

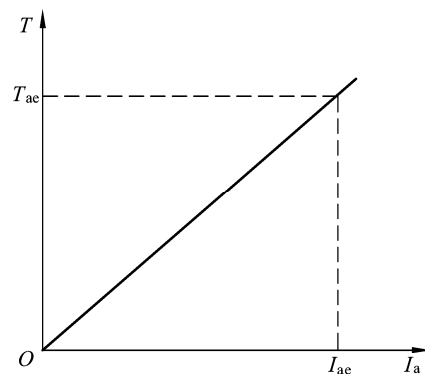


图 1.43 他励电动机的转矩特性

他励电动机到现在仍然在工业中得到广泛应用的一个十分重要的原因就是它的电磁转矩

和电枢电流成正比，便于调节，响应迅速，使得他励电动机具有其他电动机无可比拟的优良特性。大型的直流电动机多半装有改善换向的补偿绕组，因此电枢反应的去磁作用是微不足道的，具有接近理想的直线转矩特性。

2. 串励电动机转矩特性

串励电动机，主磁通 Φ 不再是一个常数，在磁路未饱和部分将 $\Phi = K_1 I_a$ 代入转矩方程 $T = C_T I_a \Phi$ ，得

$$T = C_T I_a \Phi = C_T K_1 I_a^2 \quad (1.42)$$

式 (1.42) 表明当磁路未饱和时，电磁转矩与电枢电流的平方成正比，转矩特性是一条抛物线，电磁转矩随电枢电流的加大而迅速上升，如图 1.44 所示。

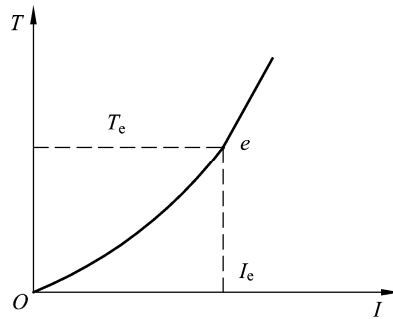


图 1.44 串励电动机转矩特性

当 $I_a > I_e$ 时，磁路进入高饱和状态，气隙磁通是一个常数，将 $\Phi = K_2$ 代入 $T = C_T I_a \Phi$ 中，得

$$T = C_T K_2 I_a \quad (1.43)$$

式 (1.43) 表明当磁路饱和后，电磁转矩与电枢电流成正比，串励电动机和他励电动机一样，转矩随电枢电流线性增加，如图 1.44 所示。

总之，串励电动机电磁转矩随电枢电流的变化情况是非线性的。当 $I_a < I_e$ 时， T 和 I_a^2 成正比，转矩随电流的增加迅猛上升；当 $I_a > I_e$ 时， Φ 差不多恒定不变， T 差不多和 I_a 成正比，特性曲线的这一段近似直线。串励电动机的这种转矩特性具有以下两个特点：

(1) 有较大的启动转矩。

两台额定电枢电流和额定主磁通都完全相同的直流电动机，一台为他励，另一台为串励，两者的励磁方式不同，但材料的利用情况相同，现比较这两台直流电动机的启动能力。启动时为了迫使电枢尽快升速，通常根据换向火花的限制将启动时的最大电流倍数选作 2 倍，亦即启动电流 $I_q = 2I_e$ 。对于他励电动机，即使不考虑电枢反应的去磁作用，认为主磁通恒定不变，启动转矩 T_q 也只能和电枢电流成正比，达到额定转矩的两倍。对于串励电动机，由图 1.41 的磁化曲线看出，当励磁电流增大为 $2I_e$ 时，虽然受到磁路的高饱和作用，磁通不会增大为 $2\Phi_e$ ，但磁通不会保持恒定不变，增加 20% ~ 30% 还是可能的。因此，对于串励电动机，如果取启动时的磁通 $\Phi_q = 1.2\Phi_e$ 则启动转矩 T_q 在 $I_q = 2I_e$ 时应为 $2.4T_e$ ，即比他励电动机的启动转矩大得多。

(2) 有较大的过载能力。

过载能力 λ 定义为电机的最大转矩 T_{\max} 和额定转矩 T_e 的比值，即

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_e} \quad (1.44)$$

一台直流电机，如果制造条件和使用条件相同，不管是他励还是串励，额定电流和额定磁通都是相同的。当然这台直流机的短时允许最大电流也由于受到换向条件的限制而只有一个，不会因为励磁绕组由他励换成串励而发生变化。但是制成他励电动机后，由于主磁通是个常数，所以电机的过载能力也就是电枢电流的短时允许过载倍数，不得超过 2 倍。如果制成串励电动机，即使高饱和主磁通也会随电枢电流增加，所以串励电动机的转矩过载倍数或者说过载能力，大于他励电动机的转矩过载倍数。

3. 复励电动机转矩特性

复励电动机转矩特性介于他励和串励之间，如图 1.45 曲线 3 所示。当电枢电流 I_a 很小时，可以略去串励绕组的作用，复励电动机具有并励电动机的特点，气隙磁通基本不变，转矩随电枢电流线性增加；当电枢电流 I_a 很大时，可以看成串励绕组起主导作用，复励电动机具有串励电动机的特性。由于磁通随电枢电流的增加而增加，转矩比线性增加要更快一些，因此复励电动机具有较大的启动转矩和过载能力。

各种励磁方式电动机的转矩特性，如图 1.45 所示。

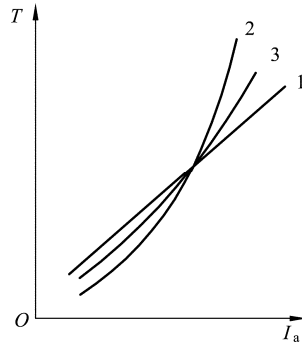


图 1.45 直流电动机的转矩特性
1—他励；2—串励；3—复励

(三) 机械特性

电动机是用来拖动生产机械的，生产机械对电动机提出的主要要求是转矩与转速。生产机械的转矩和转速的关系是生产机械的机械特性。

1. 他励电动机的机械特性

将式 (1.38) 转速特性中 I_a 用转矩特性 $T = C_T I_a \Phi$ 中的 T 代换，得电动机的机械特性方程：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1.45)$$

对于一台给定的他励电机，上式中 C_e 和 C_T 是结构常数，恒定不变。若不考虑电枢反应的去磁作用，主磁通 Φ 在励磁电流恒定时也是一个常数。如果将端电压 U 和电枢回路总电阻 R_a 保持恒定，则他励电动机的机械特性是一条直线。

理论上他励电动机的机械特性是一条直线，但实际上端电压、主磁通和电枢回路总电阻

很难完全保持恒定，所以实际的机械特性是一条微微向下倾斜的曲线，如图 1.46 所示。

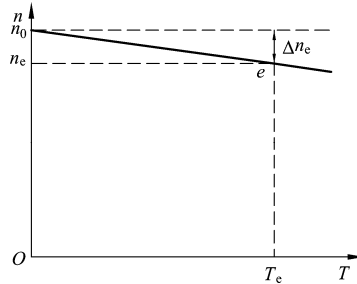


图 1.46 他励电动机的机械特性

2. 串励电动机的机械特性

串励电动机的机械特性是指转速与电磁转矩之间的函数关系。根据式 (1.45)，当电枢电流 I_a 或电磁转矩 T 较小时，电机的磁路尚未饱和，取 $\Phi = K_1 I_a$ ，代入电磁转矩公式 $T = C_T I_a \Phi$ 得

$$\Phi = \sqrt{\frac{K_1}{C_T} T} = K_3 \sqrt{T} \quad (1.46)$$

式中， $K_3 = \sqrt{\frac{K_1}{C_T}}$ 是一个常数。

将式 (1.46) 代入式 (1.45) 得

$$n = \frac{U}{C_e K_3 \sqrt{T}} - \frac{R_a}{C_e C_T K_3^2} \quad (1.47)$$

式 (1.47) 中等号右边第二项为常数，第一项随 T 的增加而减小，因此式 (1.47) 表示的曲线是一条双曲线，如图 1.47 所示。

当电枢电流 I_a 或电磁转矩 T 较大时，例如 $T > T_c$ ，电机的磁路已经饱和，取 $\Phi = K_2$ ，代入式 (1.45) 得高饱和段的机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e K_2} - \frac{R_a}{C_e C_T K_2^2} T \quad (1.48)$$

式 (1.48) 说明高饱和后串励电动机的机械特性和他励电动机的机械特性十分接近，是一条微微向下倾斜的直线，有较大的硬度，如图 1.47 所示。

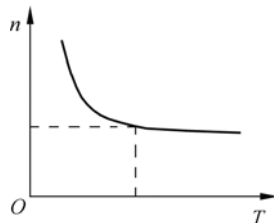


图 1.47 串励电动机的机械特性

综上所述，直流串励电动机在 $T > T_c$ 后有一条较硬的机械特性，转速随负载波动甚少。但是 $T < T_c$ 时，机械特性转入双曲线，转速随转矩大幅度波动，特性变得很软。如果出现空载现象，串励电动机就会产生危险性很大的“飞车”现象，是不允许的。串励电动机用来拖动城市轨道交通电动车辆或干线铁路电动车组比较合适，因为这种设备不存在空载现象，光拖动车体差不多就是半载了，而串励电动机的大启动转矩对动车组或电动车组是有利的。

3. 复励电动机机械特性

由于磁化曲线的非线性，复励电动机的机械特性很难用数学方程式去求解，往往需要由制造厂去提供或者用实验方法去测定。



一、填空题

- 当 U 和励磁电流 I_f 都为常值时，影响电动机转速的两个因素是电枢回路_____变化和磁通_____的变化。
- 他励电动机在负载变化时转速变化很小，基本上是一种_____电动机。
- 串励电动机当电机磁路未饱和时，转速特性是一个_____函数，转速随电流的_____而急剧_____。
- 当磁路未饱和时，电磁转矩与电枢电流的平方成正比，转矩特性是一条_____，电磁转矩随电枢电流的加大而_____。
- 在地铁电动车、电传动电动车组、城市电车及电瓶车上采用最多的是_____。
- 串励电动机的转速随着转矩的增加而迅速下降，这种特性为_____。

二、判断题

- 磁路饱和后串励电动机的转速特性，是一根比较硬的特性曲线。()
- 复励电动机转速特性是介于他励电动机和串励电动机特性之间。()
- 他励电动机有较大的过载能力和启动转矩。()
- 他励电动机实际的机械特性是一条微微向下倾斜的曲线。()

三、选择题

- 在相同的启动电流下，串励电动机的启动转矩比并励电机 ()。

A. 大	B. 小
C. 一样大	D. 无法确定

2. 当负载发生变化时, () 电机的转速将在很大范围内变化。
- A. 并励 B. 串励
- C. 复励 D. 他励
3. 直流电机励磁绕组与电枢绕组不相连, 励磁电流由另一个独立电源供电的电机为()。
- A. 并励电机 B. 他励电机 C. 串励电机
4. 他(并)励电动机的转速随着所需电磁转矩的增加而稍有变化, 这种特性称为()。
- A. 软特性 B. 硬特性
- C. 牛马特性 D. 跟随特性
5. 在相同的启动电流下, 串励电动机的启动转矩比并励电机 ()。
- A. 大 B. 小
- C. 一样大 D. 无法确定

四、简答题

1. 直流电机的励磁方式有哪几种? 各有何特点?
2. 串励电动机为什么不允许在轻载或空载下运行?
3. 直流他励电动机因何优良转矩特性而得到广泛的运用?