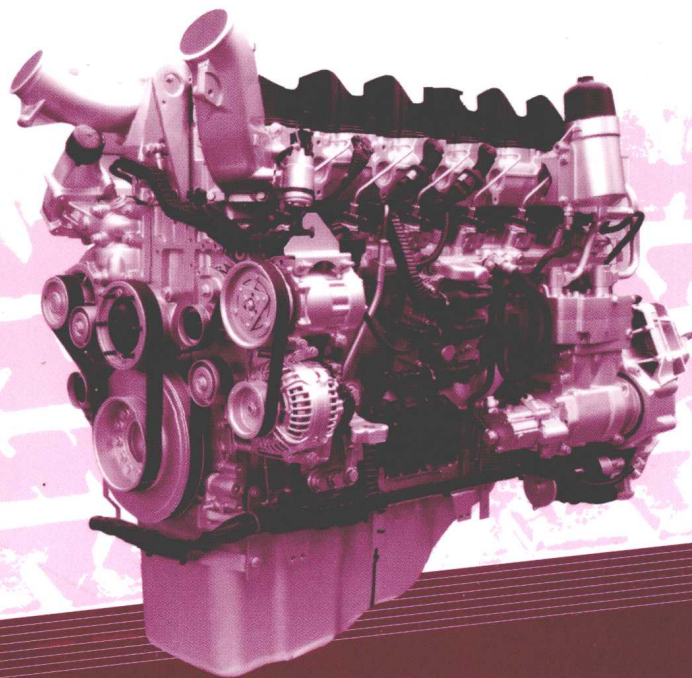


21世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材



电机控制与应用

主 编 魏润仙 孙善君



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材

电机控制与应用

主 编	魏润仙	孙善君	
副主编	张胜云	陈圣林	
参 编	高 健	张 雯	司艳红
	李 莉	宋清龙	
主 审	王 平		



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书的主要内容包括：交、直流电机的拖动控制、应用与维修；伺服电机、步进电机与直线电机的应用与维修；典型生产机械电气控制线路的安装、调试与维修；电气控制系统的设计、安装与调试。

本书改变了传统的编写模式，将电机与电气控制技术相互贯通，使知识结构连贯紧凑。编写时弱化公式的推导，注重知识的实际应用，并引入实例与案例，有助于读者的理解与实践。

本书适合作为高职高专机电一体化、电气自动化、机械制造等机电专业相关课程的教材，也可供自学考试、电气技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机控制与应用/魏润仙, 孙善君主编. —北京: 北京大学出版社, 2010. 8

(21 世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材)

ISBN 978-7-301-17324-4

I. ①电… II. ①魏…②孙… III. ①电机—控制—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 107389 号

书 名: 电机控制与应用

著作责任者: 魏润仙 孙善君 主编

策划编辑: 赖 青 张永见

责任编辑: 李娉婷

标准书号: ISBN 978-7-301-17324-4/TH·0196

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16 开本 19 印张 444 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是“21 世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材”之一，编者总结了多年来的教学和课程改革经验，融入项目导向、任务驱动的教学理念，以“工学结合、项目引导”为编写原则。本书具有以下特点：

1. 遵循学生的认知规律，以任务为引领，培养学生自主学习的能力，力求做到学做合一，理论与实践一体化。
2. 内容强调基本理论的实际应用，能体现高职高专教学以“必需、实用”为度的特点，理论的深度、广度适中，重点培养学生的技术应用能力，力求达到所学即所用的目标。
3. 图文并茂，尽可能使用图片和表格展示知识点，使抽象的内容形象化，提高可读性和可操作性。

本书在内容上以电动机的控制为核心，将“电机学”“电力拖动控制”“机床电气控制”等课程进行了有机整合，主要介绍了直流电机、交流电机、伺服电机、步进电机、直线电机的控制应用与维修，及典型生产机械电气控制线路的安装、调试与维修。本书内容具有通用性、典型性、实用性，可供高职高专自动化、机电类及相关专业师生阅读和参考。本书还提供完备的电子教案、习题参考答案等教学资源，可给教学带来诸多方便。

本书建议学时为 120 学时，各学校可根据具体情况而定，建议学时安排如下：

序号	项目内容	建议学时
1	项目 1 直流电动机的拖动、控制与维修	18
2	项目 2 变压器的应用与维修	12
3	项目 3 三相交流异步电动机的拖动、控制与维修	38
4	项目 4 典型生产机械电气控制线路的安装、调试与维修	30
5	项目 5 其他常用电机的应用与维修	16
6	项目 6 电气控制系统的设计、安装与调试	6
合 计		120

本书由魏润仙、孙善君任主编并负责统稿，编写分工如下：项目 1 由高健编写，项目 2 由陈圣林和宋清龙编写，项目 3 由魏润仙编写，项目 4 由张胜云和李莉编写，项目 5 由孙善君和司艳红编写，项目 6 及附录由张雯编写。

本书承王平副教授仔细审阅，提出了很多宝贵意见和建议，编者谨此表示衷心的感谢。本书编写过程中，得到浙江天煌教仪有限公司的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。联系方式：wanghaiwei0507@163.com。

编 者

2010 年 4 月

目 录

项目 1 直流电动机的拖动、控制与维修	1
任务 1.1 直流电动机的结构、原理与维修	2
任务 1.2 直流电动机的起动控制	17
任务 1.3 直流电动机的调速控制	33
任务 1.4 直流电动机的制动控制	38
项目小结	44
思考与练习	44
项目 2 变压器的应用与维修	45
任务 2.1 变压器的分类与结构	46
任务 2.2 变压器的工作原理	52
任务 2.3 三相变压器的应用	59
任务 2.4 特殊变压器的应用	64
任务 2.5 变压器的维修	70
项目小结	76
思考与练习	77
项目 3 三相交流异步电动机的拖动、控制与维修	78
任务 3.1 三相异步电动机的结构、原理与维修	80
任务 3.2 三相异步电动机的起动控制	109
任务 3.3 三相异步电动机的制动控制	142
任务 3.4 三相异步电动机的调速控制	154
项目小结	164
思考与练习	164
项目 4 典型生产机械电气控制线路的安装、调试与维修	166
任务 4.1 CA6140 型普通卧式车床电气控制线路的安装、调试与维修	168
任务 4.2 X62W 型卧式万能铣床电气控制线路的安装、调试与维修	177
任务 4.3 M7130 平面磨床电气控制线路的安装、调试与维修	188
任务 4.4 Z3040B 摇臂钻床电气控制线路的安装、调试与维修	194
任务 4.5 T68 卧式镗床电气控制线路的安装、调试与维修	200
任务 4.6 桥式起重机电气控制线路的故障维修	210
项目小结	221
思考与练习	221

项目 5 其他常用电机的应用与维修	223
任务 5.1 单相交流电动机的应用与维修	224
任务 5.2 步进电动机的应用与维修	232
任务 5.3 伺服电动机的应用与维修	247
任务 5.4 直线电动机	256
项目小结	259
习题与练习	259
项目 6 电气控制系统的设计、安装与调试	261
任务 6.1 电气控制系统设计的基本内容和要求	262
任务 6.2 电动机与电器元件的选用	277
任务 6.3 电气控制系统的安装与调试	286
项目小结	290
思考与练习	291
附录 常用电器图形符号及文字符号	292
参考文献	295

项目1

直流电动机的拖动、 控制与维修

教学目标

1. 认识直流电机的结构、分类和铭牌数据。
2. 熟悉直流电机的工作原理。
3. 熟练掌握直流电机的基本方程及机械特性。
4. 熟练拆装三相异步电动机及对其常见故障进行维修。
5. 熟练掌握常用低压电器的结构、原理及使用。
6. 掌握直流电动机的电气控制。

教学要求

能力要求	知识要点	权重/(%)	自测分数
能够熟练拆装直流电动机	直流电动机的结构	10	
能够识别直流电动机的型号	直流电动机的铭牌参数	10	
掌握直流电动机的拖动方法及故障分析	直流电动机的工作原理及机械特性	30	
学会分析直流电动机的电气控制过程	直流电动机的起动、调速、制动控制线路	50	

项目导读

直流电机是利用电磁感应原理实现直流电能和机械能相互转换的电磁装置,将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机,如图 1.1 所示;反之,则称为直流发电机。直流电动机具有调速范围广且平滑,起、制动转矩大,过载能力强,易于控制的优点,常用于对调速要求较高的场合,如轧钢机、高炉卷扬设备、大型精密机床等。直流发电机主要用做直流电源。此外,小容量直流电机大多在自动控制系统中以伺服电动机、测速发电机等形式作为测量、执行元件使用。

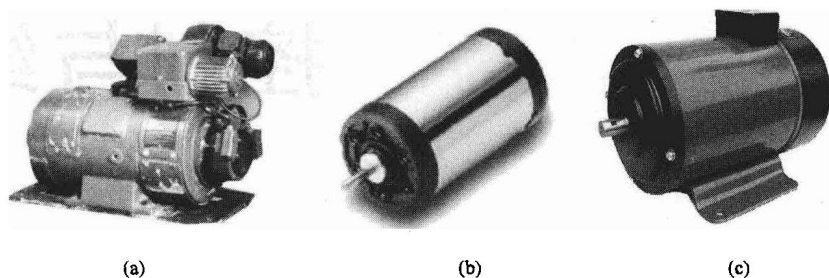


图 1.1 直流电动机实物图

目前,虽然由晶闸管整流元件组成的静止固态直流电源设备已基本上取代了直流发电机,但直流电动机仍以其良好调速性能的优势在许多传动性能要求高的场合占据一定地位。

任务 1.1 直流电动机的结构、原理与维修

1.1.1 任务引入

有一个电吹风机上的小型直流电机,工作时必须用手拧一拧转轴,才能起动,但转动无力。

1.1.2 任务分析

直流电动机在运行过程中会有多种多样的故障发生,产生这些故障的原因也有很多,而且这些故障相互影响。要想能够正确地使用、维修直流电机,就必须掌握直流电机结构、工作原理及机械特性。下文对直流电机的一些基本理论知识进行讲解。

1.1.3 相关知识

1. 直流电机的工作原理

1) 直流电动机的工作原理

图 1.2 所示为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。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。

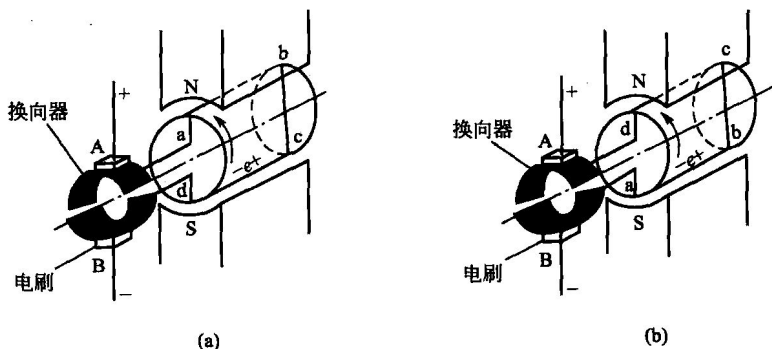


图 1.2 直流电动机模型

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。

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，如图 1.2(a)所示，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。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，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° ，导体 cd 转到 N 极下，ab 转到 S 极下，如图 1.2(b)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，加在直流电动机上的直流电源，通过换向器和电刷，在电枢线圈中流过的电流方向是交变的，而每一极性下的导体中的电流方向始终不变，因而产生单方向的电磁转矩，使电枢向一个方向旋转，这就是直流电动机的工作原理。

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，使电枢线圈所产生总的电磁转矩足够大并且比较均匀，电动机的转速也就比较均匀。

2) 直流发电机的工作原理

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源，而是利用原动机拖动电枢朝某一方旋转。

直流发电机的简化模型如图 1.3 所示。图中 N、S 极为固定不动的定子磁极，用以产生磁场。容量较小的发电机是用永久磁铁做磁极的；容量较大的发电机的磁场是由直流电流通过定子磁极上装有的励磁绕组产生的。用来产生 N、S 极的绕组称为励磁绕组，励磁绕组中通过的电流称为励磁电流。根据右手定则，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° 时，导体 cd 转至 N 极下，感应电动势的方向由 c 指向 d，电刷 A 与 d 所连换向片接触，仍为正极性；导体 ab 转至 S 极下，感应电动势的方向变为由 a 指向 b，电刷 B 与 a 所连换向片接触，仍为负极性。根据以上工作过程可以看出，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

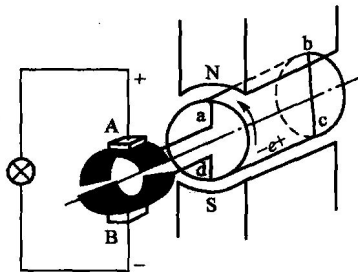


图 1.3 直流发电机模型

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。

由以上分析可知，若在直流电机的电刷上加直流电源，就可以将电能转化成机械能，作为直流电动机使用。若再用原动机拖动电枢铁心旋转，就可以将机械能转换成电能。可见，一台直流电机既可以作为电动机使用，也可以作为发电机使用，只是外界的条件不同而已。所以，电机这种机电双向能量转换的特性称为电机的可逆性。在实际应用中，一般只做一个方面使用。

2. 直流电机的结构

直流电机主要由定子(静止部分)和转子(转动部分)组成，这两部分之间的间隙称为气隙。其中，定子的主要作用是作为电机的机械支撑和产生磁场。转子的主要作用是产生感应电动势和电磁转矩实现能量的转换。直流电机的横剖面示意图及结构如图 1.4 及图 1.5 所示。

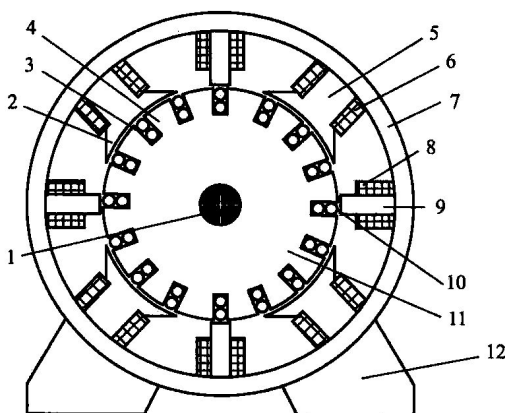


图 1.4 直流电机横剖面示意图

- 1—转轴 2—极靴 3—电枢槽 4—电枢齿
5—主磁极铁心 6—励磁绕组 7—定子磁轭
8—换向极绕组 9—换向极铁心 10—电枢绕组 11—电枢铁心 12—底座

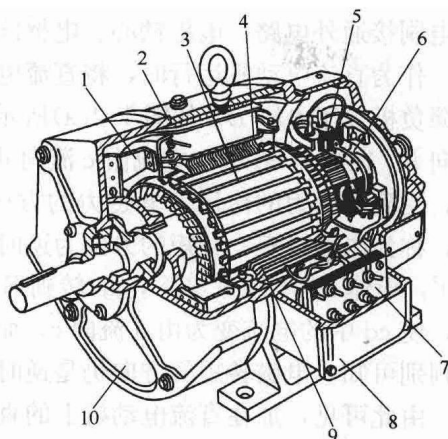


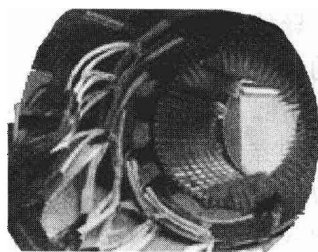
图 1.5 直流电机的结构

- 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

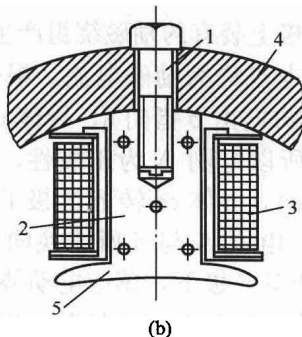
1) 定子部分

直流电机定子部分主要由主磁极、换向极、机座和电刷装置组成。

(1) 主磁极：用来产生气隙磁场，由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成，如图 1.6 所示。



(a)



(b)

图 1.6 主磁极

- 1—固定主磁极的螺钉 2—主磁极铁心 3—励磁绕组 4—机座 5—极靴(极身)



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,既可使气隙中磁场分布比较理想,又便于固定励磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成,套在极身上,再将整个主磁极用螺钉固定在机座上。大的直流电机在极靴上开槽,槽内嵌放补偿绕组,与电枢绕组串联,用以抵消极靴范围内的电枢反应磁动势,从而减少气隙磁场的畸变,改善换向,提高电机运行可靠性。

(2) 换向极:用来改善直流电机的换向,由铁心和套在铁心上的换向极绕组组成,如图 1.7 所示。铁心常用整块钢或厚钢板制成,匝数不多的换向极绕组与电枢绕组串联。换向极的极数一般与主磁极的极数相同。换向极的作用是产生附加磁场,改善电机的换向,减少电刷与换向器之间的火花,避免换向器烧毁。

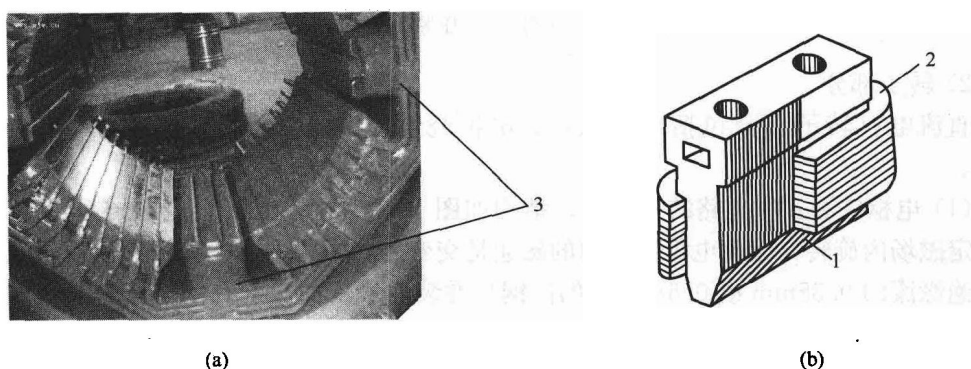


图 1.7 换向磁极

1—换向极铁心 2—换向极绕组 3—换向极

直流电机无论发电机还是电动机,其运行时,转子(即电枢)总是有电流通过建立电枢磁场,该磁场与主磁场(即励磁绕组通电产生的磁场)成垂直正交关系,故称交轴电枢磁场(它使主磁场歪扭,且或多或少对主磁场有削弱作用)。为抵消交轴磁场对主磁场的歪扭及换向元件电抗电势等的影响,在电枢磁场轴线方向的定子内周上装置换向极。经直流电机不同运行方式下电枢磁场的分析,对换向极性作这样的要求:发电机运行时,换向极极性与前方的主极极性相同;电动机运行时,换向极极性与后方的主极极性相同。

(3) 机座:电机定子部分的外壳称为机座。机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖,并起整个电机的支撑和固定作用;另一方面也是磁路的一部分,借以构成磁极之间的通路。磁通通过的部分称为磁轭。为保证机座具有足够的机械强度和良好的导磁性能,一般用低碳钢铸成或用钢板焊接而成。机座的两端有端盖中小型电机前后端盖都装有轴承,用于支撑转轴;大型电机则采用座式滑动轴承。

(4) 电刷装置:使转动部分的电枢绕组与外电路接通,将直流电压、电流引出或引入电枢绕组。电刷装置与换向器相配合,起整流器或逆变器的作用。电刷装置由电刷、刷握、压紧弹簧和铜丝辫等零件组成,如图 1.8 所示。图 1.8(a)所示为电刷,一般采用石墨和铜粉压制焙烧而成,它放置在刷握中,由弹簧将其压在换向器的表面上,电刷个数一般等于主磁极的数目。

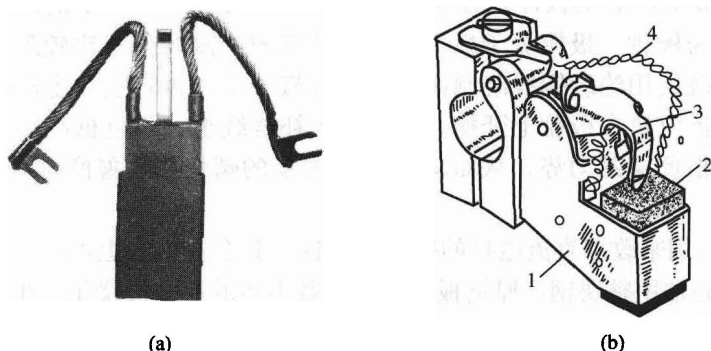


图 1.8 电刷装置

1—刷握 2—电刷 3—压紧弹簧 4—铜丝辫

2) 转子部分

直流电机转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和轴承等，如图 1.9 所示。

(1) 电枢铁心：主磁路的一部分，结构如图 1.10 所示。由于转子在定子主磁极产生的恒定磁场内旋转，因此电枢铁心内的磁通是交变的，为减少涡流和磁滞损耗，通常用两面涂绝缘漆的 0.35mm 或 0.5mm 厚的硅钢片叠装而成。冲片上有均匀分布的嵌放电枢绕组的槽和轴向通风孔。

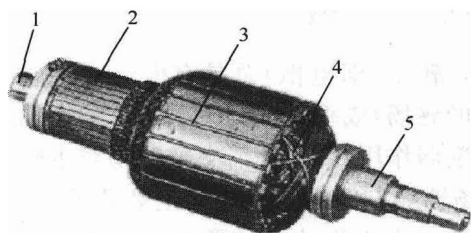
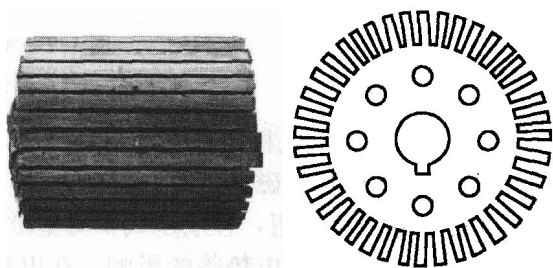


图 1.9 直流电机的转子

1—转轴 2—换向器 3—电枢铁心
4—电枢绕组 5—轴承

(a) 电枢铁心结构

(b) 转子铁心冲片

图 1.10 电枢铁心

(2) 电枢绕组：由许多按一定规律连接的线圈组成，是直流电机的主要电路部分。它的作用是产生感应电动势和电磁转矩，从而实现机电能量的转换。电枢绕组是用绝缘铜线制成元件，然后嵌放在电枢铁心槽内，每个线圈(元件)有两个出线端，分别接到换向器的两个换向片上。所有线圈按一定规律连接成一闭合回路，如图 1.11 所示。

(3) 换向器：直流电机换向的组成部分，是直流电机特有的关键部件，也是最薄弱的一环，它的质量好坏直接影响到直流电机的运行可靠性。换向器由换向器套筒、换向片(铜)、云母片(0.4~1.2mm 厚)和压紧圈等组成紧密整体。小型换向器用热固性环氧树脂热压成整体。换向片数目与元件数目相等。元件首尾端嵌放在换向片端部槽内或升高片上，并焊接在一起。其结构如图 1.12 所示。

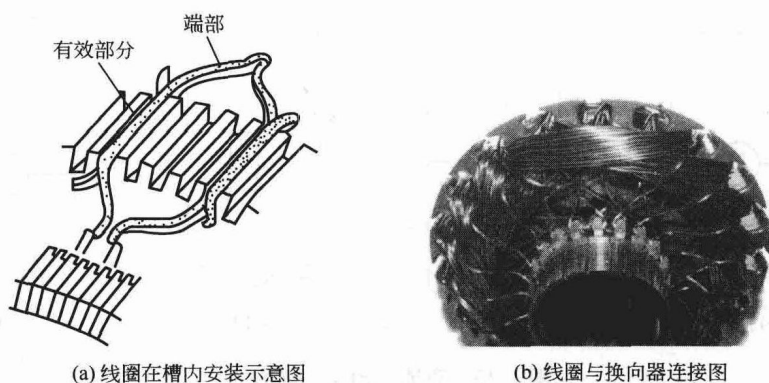


图 1.11 电枢绕组

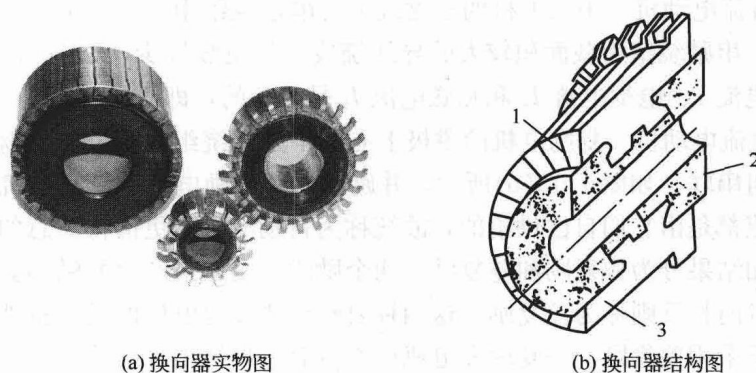


图 1.12 换向器

1—云母片 2—V 型套筒 3—换向片

(4) 转轴：转轴用来传递转矩。为了使直流电动机能安全、可靠地运行，转轴一般用合金钢锻压加工而成。

3. 直流电动机的励磁方式及铭牌

1) 直流电动机的励磁方式

励磁方式是指励磁绕组中励磁电流获得的方式。直流电动机的运行特性与它的励磁方式有很大的关系。直流电动机按励磁方式不同可分为他励、并励、串励和复励，复励又分为积复励和差复励。

(1) 他励直流电动机：励磁绕组与电枢绕组在电路上互不相连，由两个相互独立的直流电源分别向励磁绕组和电枢绕组供电，如图 1.13(a) 所示。它的励磁电流仅取决于励磁电源的电压和励磁回路的电阻，与电枢端电压无关。由永磁体做成主磁极的亦可看作他励的一种。由于励磁电流 I_f 的大小与电枢端电压 U 和电枢电流 I_a 无关，所以为便于控制， I_f 相对于 I_a 来说，要小得多，所以励磁绕组的匝数较多，截面积较小。

(2) 并励直流电动机：并励电机的励磁绕组与电枢绕组并联，如图 1.13(b) 所示。并励电机的励磁电流不仅与励磁回路的电阻有关，而且还受电枢端电压的影响。由于并励绕组承受着电枢两端的全部电压，其值较高。为了减小绕组的铜损耗，并励绕组的匝数较

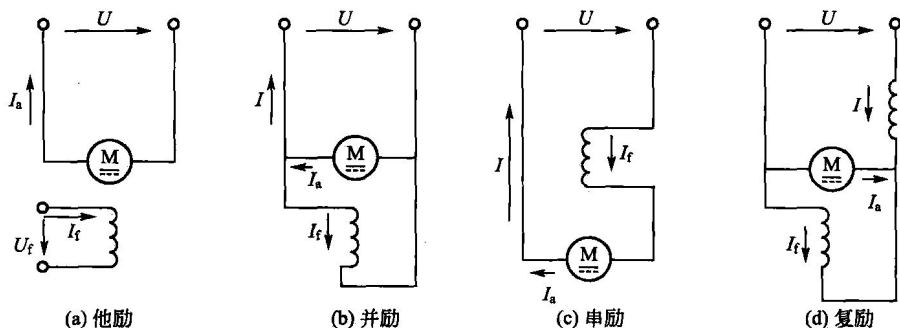


图 1.13 直流电动机励磁方式

多,并且用较细的导线绕成。对并励直流电动机来说:电源提供的线路电流 $I = I_a + I_f$ 。

(3) 串励直流电动机:串励电机的励磁绕组与电枢绕组串联。为了减小串励绕组的电压降及铜损耗,串励绕组用截面积较大的导线绕成,且匝数较少,如图 1.13(c)所示。电源提供的线路电流 I 、电枢电流 I_a 和励磁电流 I_f 是相等的,即 $I = I_a = I_f$ 。

(4) 复励直流电动机:复励电机的磁极上有两个励磁绕组,一个与电枢绕组并联,另一个与电枢绕组串联,如图 1.13(d)所示。并励电机、串励电机、复励电机在用做发电机时,其励磁电流都是由它们自己供给的,故统称为自励电机。更值得注意的是:按产生的磁动势相互叠加结果分为积复励和差复励。两个励磁绕组如果产生的磁动势方向相同称为积复励,如果方向相反则称为差复励。这两种复励形式直流电机的运行特性差别很大,直流电动机根本不采用差复励,差复励发电机则作直流电焊机用。

2) 直流电动机的铭牌

每台直流电机的机座外表面上都钉有一块铭牌,上面标注着一些称为额定值的铭牌数据,它是正确选择和合理使用电机的依据。额定值是电机生产标准对产品在规定工作条件下(即额定工作条件)所规定的一些量值。主要额定值通常标在电机的铭牌上。直流电动机的主要额定值有如下几项:

- (1) 额定功率 P_N :指直流电动机转轴上输出的机械功率,单位为 W 或 kW;
- (2) 额定电压 U_N :指额定状态下电动机出线端的电压,即电源的输入电压,单位为 V;
- (3) 额定电流 I_N :指额定状态下电动机出线端的电流,即电源输入的总电流,单位为 A;
- (4) 额定转速 n_N :指直流电动机转轴上输出的转速,单位为 r/min。

此外,直流电动机铭牌上还标有电动机型号、绝缘等级、额定励磁电压 U_m 、额定励磁电流 I_m 等说明电动机特点的内容。而额定效率 η_N 、额定转矩 T_N 等通常不标注在铭牌上。显然,直流电动机的 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。在实际运行时,如果电流恰好等于额定电流,就称为额定运行或满载运行;如果电流小于额定电流,就称为欠载或轻载;如果电流大于额定电流就称为过载或超载。长期过载不仅使电机过热,降低电机的使用寿命,甚至损坏电机。长期轻载不仅不能充分利用电机的设备容量,而且会降低电机的效率。



4. 直流电动机的机械特性

1) 直流电动机的基本方程

直流电动机按励磁方式分为4种形式,以并励电动机的应用最为广泛,下面以并励电动机为例进行讨论。

(1) 电动势平衡方程。并励直流电动机各物理量的参考方向如图1.14所示。

根据基尔霍夫定律,可以列出直流电动机的电动势平衡方程式为

$$U = E + I_a(R_a + R_j) \quad (1-1)$$

式中, I_a 是电枢电流; R_a 为电枢回路总电阻,包括电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组电阻和电刷接触电阻; R_j 是电枢回路中的外接电阻,用于起动、调速和制动。由于电动势 E 与电枢电流方向相反,故称 E 为“反电动势”,电源电压 U 是用来克服反电动势 E 及电枢回路总电阻压降 $I_a R_a$ 的。直流电动机的 $U < E$, 这是判断直流电机运行在电动机状态的依据。

而励磁回路中的电压平衡方程式为

$$U = I_f(r_f + r_j) = I_f R_f \quad (1-2)$$

式中, r_f 为励磁绕组的电阻; r_j 是励磁回路中的外接电阻,用于调节励磁电流; R_f 是励磁回路总电阻。

由于 $E = C_e \Phi n$, 所以

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_j)}{C_e \Phi}$$

称为直流电动机的转速公式,其中 Φ 是电动机的每极磁通, C_e 是转子电动势系数,与电动机的结构有关。

(2) 功率平衡方程。图1.15为并励直流电动机的功率流程图。直流电动机工作时,从电网吸取 P_1 ,除去电枢回路的铜损耗 P_{Cu1} 及励磁回路铜耗 P_{Cu2} ,其余部分转变为电枢上的电磁功率 P_{em} 。电磁功率并不能全部用来输出,它的一部分是运行时的机械损耗 P_{mec} 、铁损 P_{Fe} 和附加损耗 P_{ad} ,剩下的部分才是轴上对外输出的机械功率 P_2 。

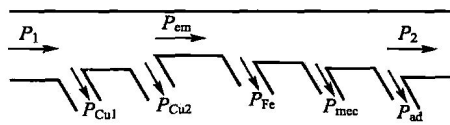


图1.15 并励直流电动机功率流程图

故功率方程为

$$P_{em} = P_1 - (P_{Cu1} + P_{Cu2}) \quad (1-3)$$

$$P_2 = P_{em} - (P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad}) = P_{em} - P_0 \quad (1-4)$$

$$P_2 = P_1 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad}) = P_1 - \sum P \quad (1-5)$$

式中, P_0 为空载损耗; $\sum P$ 为电机的总损耗; 电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}\right) \times 100\%$$

(3) 转矩平衡方程。将式 $P_2 = P_{em} - P_0$ 除以电动机的角速度 Ω , 可得转矩方程式为

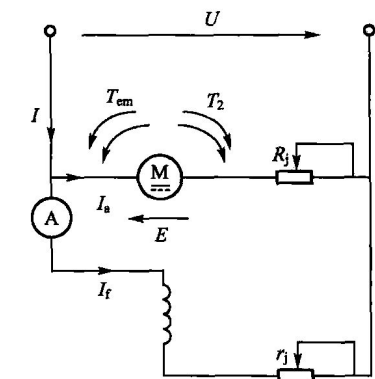


图1.14 并励直流电动机运行原理图

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_0}{\Omega}$$

即

$$T_{em} = T_2 - T_0 = T_c \quad (1-6)$$

式中, T_c 称为总负载转矩。

理想空载运行时, $T_c = 0$, $I_a = 0$, 此时所对应的转速 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$, 称为理想空载转速。

2) 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是在稳定运行情况下, 电动机的转速与电磁转矩之间的关系, 即 $n = f(T)$ 。机械特性是电动机的主要特性, 是分析电动机起动、调速、制动的重要工具。机械特性可分为固有机械特性和人为机械特性。它的机械特性可以通过前面所讲的基本公式推导出来。

电压平衡方程为

$$U = E + I_a(R_a + R_j) \quad (1-7)$$

把 $E = C_e \Phi n$ 代入上式可得

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_j)}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a(R_a + R_j)}{C_e \Phi} \quad (1-8)$$

由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$, 可得 $I_a = \frac{T_{em}}{C_T \Phi}$, 代入上式可以推导出并励直流电机机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_j)}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = n_0 - \beta T_{em} \quad (1-9)$$

式中, C_T 为电磁转矩系数, 与电动机结构有关; n_0 为电动机的理想空载转速, $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$; β 为机械特性斜率, $\beta = \frac{(R_a + R_j)}{C_e C_T \Phi^2}$ 。

(1) 固有机械特性。当电枢两端加额定电压、气隙每极磁通量为额定值、电枢回路不串电阻时, 即 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, $R_j = 0$ 这种情况下的机械特性, 称为固有机械特性, 其表达式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \quad (1-10)$$

通过公式不难看出它的固有机械特性曲线为一条略微向下倾斜的直线, 如图 1.16 所示。

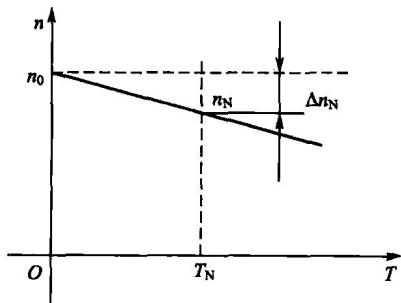


图 1.16 并励直流电动机固有机械特性曲线

并励直流电动机固有特性具有如下几个特点:

① 当 $T_{em} = 0$ 时, $n = n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}$, 为理想空载转速。

② 斜率 $\beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2}$, 其值很小, 特性曲线较平, 习惯上称为硬特性, 转矩变化时, 转速变化较小。斜率 β 大时的特性则称为软特性。

③ 当 $T_{em} = T_N$ 额定值时, $n = n_N$, 转差 $\Delta n = n_0 - n_N = \beta T_N$, 称为额定转差。一般来说, $n_N \approx 0.95 n_0$, 而 $\Delta n_N \approx 0.05 n_0$ 。



④ $n=0$, 即电动机起动时, $E=C_e\Phi n=0$, 此时电枢电流 $I_a=\frac{U}{R_a}=I_s$, 称为起动电流。

电磁转矩 $T_{em}=C_T\Phi I_a=T_s$, 称为起动转矩。由于电枢电阻 R_a 很小, I_s 和 T_s 都比额定值大很多(可以达到几十倍)。这样大的起动电流和起动转矩会给电机和传动机构带来非常大的危险。



应用实例 1-1

某他励直流电动机额定功率 $P_N=22\text{kW}$, 额定电压 $U_N=220\text{V}$, 额定电流 $I_N=115\text{A}$, 额定转速 $n_N=1500\text{r/min}$, 电枢回路总电阻 $R_a=0.1\Omega$, 忽略空载转矩 T_0 , 电动机拖动恒转矩负载 $T_L=0.85T_N$ (T_N 为额定电磁转矩)运行, 稳定运行时电动机转速、电枢电流及电动势多大?

解: 电动机的

$$C_e\Phi_N=\frac{U_N-I_N R_a}{n_N}=\frac{220-115\times 0.1}{1500}=0.139\text{V}\cdot\text{min/r}$$

理想空载转速为

$$n_0=\frac{U_N}{C_e\Phi_N}=\frac{220}{0.139}\text{r/min}=1582.7\text{r/min}$$

额定转速降为

$$\Delta n_N=n_0-n_N=(1582.7-1500)\text{r/min}=82.7\text{r/min}$$

负载时转速降为

$$\Delta n=\beta T_L=\beta\times 0.85T_N=0.85\Delta n_N=(0.85\times 82.7)\text{r/min}=70.3\text{r/min}$$

电动机运行转速为

$$n=n_0-\Delta n=(1582.7-70.3)\text{r/min}=1512.4\text{r/min}$$

电枢电流为

$$I_a=\frac{T_L}{C_T\Phi_N}=\frac{0.85T_N}{C_T\Phi_N}=0.85I_N=0.85\times 115\text{A}=97.75\text{A}$$

电枢电动势为

$$E_s=C_e\Phi_N n=(0.139\times 1512.4)\text{V}=210.2\text{V}$$

(2) 人为机械特性。为了满足生产工艺的要求, 需要人为的改变直流电动机的参数如电压、励磁电流、电枢回路电阻大小等, 以获得不同的转速和转矩, 相应得到的机械特性称为人为机械特性。主要人为机械特性有三种。

① 电枢回路串电阻的人为机械特性。保持电枢端电压 U 和励磁电流(即磁通 Φ) 不变, 仅改变电枢回路外接电阻 R_j 的机械特性。其表达式为

$$n=\frac{U_N}{C_e\Phi_N}-\frac{(R_a+R_j)}{C_eC_T\Phi_N^2}T_{em}=n_0-\beta T_{em} \quad (1-11)$$

显然, 对应于每一个不同的 R_j 值, 就有一条特性曲线, 但理想空载转速 n_0 与固有机特性曲线所对应的 n_0 值不变, 随着 R_j 的增大, β 值增大, 特性曲线变软。所以, 此时的人为机械特性是一组通过 n_0 点的放射形曲线, 如图 1.17 所示。

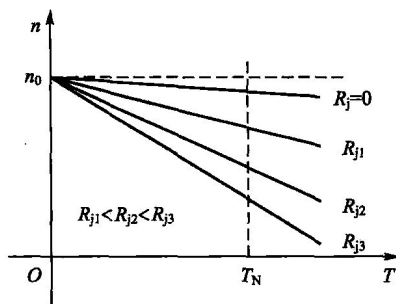


图 1.17 电枢串电阻后的人为机械特性曲线

