

高等院校电气工程系列教材

电机与电力拖动基础

戴文进 肖倩华 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

电机与电力拖动基础

戴文进 肖倩华 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为“电机与拖动”课程的新编教材,主要论述电机原理与电力拖动基础知识。全书涵盖直流电动机、异步电动机、同步电动机、变压器、特种驱动电动机和控制电机等电机学内容,以及电力拖动系统动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机容量的选择等电力拖动的内容。

笔者还撰写并同时出版与之配套的学习指导书,书中除有针对性地对“电机与拖动”课程进行学习指导以及附有全书的习题解答外,还补充了不少课外习题,并附有全部解答。

本书可作为自动化专业内各专业方向的“电机与拖动”课程的教材,也可作为其他相关专业的“电机学”课程以及“电力拖动基础”课程的选用教材,还可供有关技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动基础/戴文进,肖倩华编著. --北京:清华大学出版社,2012.1

(高等院校电气工程系列教材)

ISBN 978-7-302-26581-8

I. ①电… II. ①戴… ②肖… III. ①电机—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第175423号

责任编辑:邹开颜 洪 英

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:17.5

字 数:422千字

版 次:2012年1月第1版

印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00元

产品编号:042281-01

“电机与拖动”是自动化专业领域内各专业方向的一门重要的专业基础课。为了夯实基础,拓宽知识面,目前各专业课的学时数已大幅缩减。这样,便要求教材的篇幅也应进行相应的精简。

“电机与拖动”专业基础课的相关教材虽已有多种版本,但就其中的“电机学”内容而言,一是在编写体系上一直沿用电机本专业教材的编写方法,致使具体的结构介绍过于繁杂,电磁现象的描述过于细致;二是过分强调“电机学”理论上的完整性,致使与“电力拖动”关联不大的内容讲述太多。例如,“变压器”的内容,几乎就是按照电机专业对这部分内容的要求来编写的,因此,它只讲述电力系统中运用的电力变压器,而自动化专业中运用得最多的变压器,如移相变压器、电源变压器、隔离变压器、仪表变压器、整流变压器、电焊变压器、电流变压器、感应变压器和实验变压器等,均未曾论及;三是自动化专业所需要的某些内容(不在电机本专业的“电机学”教学范围之内),例如特种驱动电动机等,在“电机与拖动”的教材中又没有论及。

此外,以往的“电机与拖动”教材,在讲述“电力拖动系统稳定运行的判据”时,均以直流拖动系统为例,由此得出拖动系统稳定运行的判据后,便直接推广至所有的拖动系统。我们认为,这种推论方法是不严谨的,也是不科学的,其结果也是不对的。

正是由于以上种种原因,笔者尝试着撰写了本书。

书中着重论述了直流电动机、异步电动机、同步电动机、变压器、特种驱动电动机,以及控制电机等与电力拖动基础关系紧密的电机学内容。并且对原有的“直流电机”和“变压器”的内容大刀阔斧地进行了删简,一些次要的内容则以“附录”的形式列写在书后。

此外,本书对“电力拖动系统稳定运行的判据”问题给出了全新的论述,以求正本清源。

本书由南昌大学戴文进教授和肖倩华老师共同编著,戴文进教授撰写了绪论和第3~8章,第1、2章和两个附录则由肖倩华老师撰写。

戴文进教授的研究生王凯、陈向杰、赵杰、刘海静、邓志辉、梁玲敏、田存建和梁斌等同学在本书的资料搜集、文字录入、图表和曲线的绘制及扫描等方面做了大量工作,在此一并致谢。

本书作者虽然长期在“电机与拖动”课程的教学第一线,而且对该门课程的教学改革有一定体会。但是毕竟水平有限,加之本书在内容取舍上作了较大的改革,并对某些传统的结论提出了挑战,故书中谬误在所难免,敬请读者不吝赐教。

编著者

2011年12月于南昌大学

第 0 章 绪论	1
0.1 电机与电力拖动史话	1
0.2 电机与电力拖动基础学习方法总览	4
0.2.1 电机学内容的基本要求和学习方法.....	4
0.2.2 电力拖动基础内容的基本要求和学习方法.....	4
第 1 章 直流电动机	5
1.1 概述	5
1.2 直流电动机的运行原理	9
1.2.1 直流电动机的电枢绕组和电枢反应.....	9
1.2.2 直流电动机的感应电动势和电磁转矩	14
1.2.3 直流电动机运行的基本方程式	16
1.2.4 电机的可逆性原理	19
1.3 直流电动机的工作特性.....	20
1.3.1 并励电动机的工作特性	20
1.3.2 串励电动机的工作特性	22
1.3.3 复励电动机的工作特性	23
习题	24
第 2 章 交流电动机	26
2.1 概述.....	26
2.2 三相交流电动机.....	26
2.2.1 三相交流电动机的绕组及电动势和磁动势	26
2.2.2 三相异步电动机概述	35
2.2.3 三相异步电动机的运行分析	38
2.2.4 三相异步电动机的运行特性及参数测定	50
2.2.5 三相同步电动机运行原理	54
2.3 变压器.....	63
2.3.1 单相变压器	63

2.3.2	三相变压器及其二次侧线电压的相位移	65
2.3.3	自耦变压器与互感器	69
	习题	71
第3章	电力拖动系统及其动力学原理	75
3.1	电力拖动系统运动方程	75
3.2	负载转矩和飞轮矩的折算	77
3.2.1	负载转矩的折算	77
3.2.2	飞轮矩的折算	79
3.2.3	位能性负载升降运动的折算问题	81
3.3	典型负载转矩特性	83
3.3.1	恒转矩负载特性	83
3.3.2	恒功率负载特性	84
3.3.3	泵类负载特性	84
3.4	电力拖动系统稳定运行的判据	85
3.4.1	直流电动机拖动系统与三相异步电动机拖动系统	85
3.4.2	三相同步电动机拖动系统	87
	习题	88
第4章	直流电动机的电力拖动	91
4.1	他励直流电动机的机械特性	91
4.1.1	固有机械特性	92
4.1.2	人为机械特性	92
4.1.3	他励直流电动机机械特性的工程计算与绘制	93
4.2	他励直流电动机的起动	95
4.2.1	直接起动	96
4.2.2	降压起动	96
4.2.3	电枢回路串电阻分级起动	97
4.3	他励直流电动机的制动	100
4.3.1	能耗制动	100
4.3.2	反接制动	102
4.3.3	回馈制动	105
4.4	他励直流电动机的调速	107
4.4.1	调速指标	107
4.4.2	他励直流电动机的各种调速方法	108
4.4.3	调速方式及其与负载的合理配合	113
4.5	他励直流电动机的过渡过程	116
4.5.1	机械过渡过程的一般规律	117
4.5.2	他励直流电动机起动时的过渡过程	119

4.5.3	他励直流电动机制动时的过渡过程	121
4.5.4	他励直流电动机过渡过程中的能量损耗	126
4.6	串励与复励直流电动机拖动系统的运行	130
4.6.1	串励直流电动机的机械特性	130
4.6.2	串励直流电动机的起动与调速	131
4.6.3	串励直流电动机的制动	131
4.6.4	复励直流电动机拖动系统的运行	132
	习题	133
第5章	三相异步电动机的电力拖动	137
5.1	三相异步电动机的机械特性	137
5.1.1	三相异步电动机机械特性的三种表达式	137
5.1.2	三相异步电动机机械特性的计算与绘制	140
5.1.3	三相异步电动机的固有机械特性	140
5.1.4	三相异步电动机的人为机械特性	141
5.2	三相异步电动机的起动	143
5.2.1	三相异步电动机的起动问题及直接起动的条件	143
5.2.2	三相笼型异步电动机的降压起动	144
5.2.3	三相绕线型异步电动机的起动	147
5.2.4	改善起动性能的三相笼型异步电动机	149
5.3	三相异步电动机的电气制动	151
5.3.1	能耗制动	151
5.3.2	反接制动	154
5.3.3	回馈制动	156
5.4	三相异步电动机的调速	159
5.4.1	变极调速	159
5.4.2	变频调速	162
5.4.3	变转差率调速	165
5.5	三相异步电动机过渡过程中的能量损耗	171
5.5.1	过渡过程能量损耗的一般表达式	171
5.5.2	各种过渡过程中的能量损耗	172
5.5.3	减少过渡过程能量损耗的方法	173
	习题	173
第6章	电力拖动系统中电动机容量的选择	177
6.1	概述	177
6.1.1	电机的发热与冷却	177
6.1.2	决定电动机容量的主要因素	179
6.1.3	过载能力及起动能力的校验	180

6.1.4	电动机的工作方式	181
6.2	连续工作方式下电动机容量的选择	182
6.2.1	连续常值负载下的电动机容量选择	182
6.2.2	连续周期性变化负载的电动机容量选择	186
6.3	短时工作方式下电动机容量的选择	195
6.3.1	短时工作方式下连续工作制电动机的容量选择	195
6.3.2	短时工作方式下短时工作制电动机容量的选择	197
6.4	周期性断续工作方式的电动机容量选择	199
6.5	确定电动机容量的统计法和类比法	201
6.5.1	统计法	201
6.5.2	类比法	202
6.6	由特殊电源供电的电动机选择问题	202
6.6.1	由可控晶闸管供电的直流电动机容量的选择	202
6.6.2	由变频电源供电的三相异步电动机选择问题	203
	习题	204
第7章	特种驱动电动机	208
7.1	概述	208
7.2	中小型特种电动机	208
7.2.1	无换向器电动机	208
7.2.2	转子供电式三相并励交流换向器电动机	214
7.2.3	直线电动机	219
7.2.4	开关磁阻电动机	221
7.3	驱动微电机	225
7.3.1	单相异步电动机	225
7.3.2	单相串励换向器电动机	230
7.3.3	磁阻式及磁滞式同步电动机	232
	习题	236
第8章	控制电机	237
8.1	概述	237
8.1.1	控制电机的特点	237
8.1.2	控制电机的种类	237
8.1.3	控制电机的作用	238
8.2	伺服电动机	238
8.2.1	交流伺服电动机	238
8.2.2	直流伺服电动机	242
8.3	测速发电机	245
8.3.1	交流空心杯转子异步测速发电机	245

8.3.2 直流测速发电机·····	248
8.4 自整角机·····	249
8.4.1 自整角机的种类·····	249
8.4.2 自整角机的基本结构及工作原理·····	250
8.5 旋转变压器·····	254
8.5.1 旋转变压器的种类·····	254
8.5.2 旋转变压器的基本结构和工作原理·····	255
8.6 步进电动机·····	259
8.6.1 步进电动机的工作原理·····	259
8.6.2 步进电动机的特性·····	262
习题·····	264
附录 A 并励直流发电机的自动建压·····	266
附录 B 直流电机的换向·····	268
参考文献·····	270

0.1 电机与电力拖动史话

远古时代,人类以自身的力量为动力来源,人们肩背手提,挥臂而作。由于当时人类的体力有限,所能捕捉猎杀的动物和搬运的物品不多,因而生产力水平极为原始。后来,人类慢慢地学会了饲养动物,利用畜力来节省人力。这样,生产力水平便有所提高。随着人类的进一步进化和发展,人类又学会了利用大自然的动力来帮助人们进行生产。例如运用风力带动风车,运用水力带动水车等。这样,生产力水平便又上了一个台阶。

18 世纪以前,社会生产的原动力仍然停留在人力、畜力、风力和水力等原始动力的水平上。然而,原始的人力、畜力、风力或水力是无法使生产力水平得到更大提高的。因此,人类一直在寻求更加强劲的生产动力。

虽说古人在公元前 2 世纪就已经开始了对蒸汽机的探索,但直至瓦特的蒸汽机面市后,才真正开创了蒸汽机时代。其实,瓦特并不是蒸汽机的原始发明者。在此之前,蒸汽机早已面世,这就是所谓的纽科门蒸汽机。但这种早期的蒸汽机耗煤量极大,效率也相当低。瓦特经过多年研究,逐渐发现了这种蒸汽机的弊病所在。从 1765 年到 1790 年,他进行了一系列技术创新和结构上的改进,使蒸汽机的效率提高了两倍多。这样,第一台现代意义上的蒸汽机终于诞生了。

蒸汽机是第一次工业革命的开创性的发明,它的发明为世界带来了一种更加有效和更加强劲的动力。由于蒸汽机的出现,冶金、煤矿和纺织业等得到了空前的发展;由于蒸汽机的出现,世界(当时主要是英国)的纺织业实现了机械化;由于机械化的不断提高,大大刺激了冶金炼铁技术和煤矿业的发展,加快了工业化的步伐;由于蒸汽机的出现,1804 年和 1807 年先后出现了蒸汽机火车和蒸汽机轮船,大大改善了交通运输条件,促进了工业革命的发展。从此,人类生产和生活中的动力水平迈上了一个新的台阶,人类的工业、现代文明史也大大地向前迈进了一步。

然而,蒸汽机的锅炉需承受重压,必须用结实的材料制造,故而蒸汽机相当笨重;蒸汽机的操纵十分复杂,锅炉的燃烧需有经验的人员专门看管;蒸汽机的起动相当缓慢,又不能随意停机,其操作十分不便;蒸汽机锅炉极易发生爆炸,作业的危险性较大。此外,由于蒸汽机的锅炉和汽缸是分离的,锅炉在工房外面燃烧,将其燃烧的热能传递给蒸汽机,而后再转化为机械能做功。这种外部燃烧方式的热损失相当大,蒸汽机的效率很低,一般只有 5%~8%,最好的也不超过 10%~13%,这是蒸汽机最大的缺点。

因而,几乎在蒸汽机不断发展的同时,便有人开始研究将热机外燃烧方式改为内燃烧方

式。也就是不用蒸汽做工作介质,而是利用燃烧后的烟气直接推动活塞运动,将锅炉和汽缸合为一体,这就是后来的内燃机。

1794年,英国工程师斯垂特在研究瓦特蒸汽机的基础上,制造了第一台内燃机。但是这台内燃机十分笨拙,需要用人力将空气压入汽缸,然后喷入液体燃料(如松节油或板油等),再点火起动。1799年,法国工程师蓝蓬提出了以煤气作为燃料,用电火花来点火的内燃机设计方案。其后,英国工程师赖特设计了爆发式内燃机,意大利工程师巴尔桑第研制出了自由活塞式的内燃机,等等。

直至1860年,法国工程师雷诺终于制成了第一台实用的爆发式内燃机。这是一台单缸双动发动机,以煤气为燃料,活塞在它的前半冲程吸入煤气和空气的混合气,接着用电火花点燃,于是膨胀气体推动活塞完成后半个冲程。汽缸的另半部进行同样的过程,将活塞推回。这台内燃机的热效率只有4%,电火花点火也不可靠,但它第一次成为能带动生产机械的原动机。当时的欧美报刊纷纷报道,这对内燃机的发展起到了巨大的促进作用。雷诺内燃机的运用,使人们开始探索内燃机理论。卡诺在研究热力学的同时开展了内燃机的基本原理的探讨,提出了压缩点火的可能性。

1862年,法国工程师德罗夏发表了内燃机理论,阐述了取得最高效率和最佳经济性所需要的条件。他明确指出,要制造性能好的内燃机,必须使气体尽快膨胀到最大,并尽量提高膨胀的初始压力。如不能很好地满足这些要求,就会浪费大量气体,而得不到最高效率和最佳的经济性。德罗夏提出了实现这些要求的具体步骤,就是把活塞运动分为四个冲程。按这种原理设计的发动机就是四冲程内燃机,这在当时是能最有效地利用气体的内燃机,从此往后的内燃机大都运用这个原理。

1876年,德国的奥古斯特·奥托运用四冲程原理,成功地制造了第一台四冲程内燃机,并取得了专利权,因此通常人们都将内燃机的发明归功于他。

自此,在当时的工业界,越来越多的工厂都开始采用这种发动机来替代蒸汽机。从此,内燃机的时代便开始了。但是奥托煤气内燃机也有许多不便之处,其不能作为船舶和车辆等运输机械的动力。

1859年,美国的宾夕法尼亚州打出了世界上第一口油井。此后,石油产量不断提高,汽油、煤油和柴油逐渐成为广泛应用的新燃料。1883年,德国工程师完成了汽油内燃机的研制。1885年,英国的普雷斯特曼研制出了煤油内燃机。1892年,德国人狄塞尔制造了第一台自动点火式的柴油内燃机。

1903年,美国人莱特兄弟制造的飞机试飞成功,实现了人类翱翔天空的梦想,预告了人类历史上交通运输业的新纪元的来临。

内燃机的发明,产生了动力机械史上的一次新的革命。内燃机不仅效率高,而且种类众多,用途广泛,可运用于船舶、车辆和飞机等运输机械领域,大大地推动了交通运输业的革命,使汽车、轮船和飞机制造业得以迅速发展。此外,它还引起了农业生产的机械化变革等。

几乎就在人类对内燃机的研究开始后不久,人们便注意到了电现象的存在,并开始对其进行研究。19世纪初叶,科学家们研究的重要课题,便是廉价并方便地获取电能的方法。1820年,奥斯特成功地完成了通电导线能使磁针偏转的实验。其后,不少科学家又对其进行了进一步的研究。指出磁针的偏转是因为受到力的作用,这种力便是机械力,其来自于电荷流动的电力。

那么,能否通过磁场的作用使机械力转变成电力呢?著名科学家安培是这项研究的第一人,可惜他的实验并没有成功。1831年,英国科学家法拉第发现了电磁感应现象,提出了电磁感应定律,这便为随后的电机和无线电发明提供了理论依据。1834年,德国人亚哥比制成了第一台可供实用的直流电动机。人们将亚哥比的直流电动机用于拖动轮船试验。小船在涅瓦河上载运11人以4 km/h的速度顺流而下,又逆流而上,大获成功。这是人类制成的最早的直流电动机。值得一提的是,当时还没有可供实用的直流发电机,为其供电的是化学电池。

电动机的发明,实现了电能和机械能的转换,为电能向工业供给动力提供了条件。其后,人们在法拉第电磁感应定律的指导下,研制出了直流发电机,以此替代了价格昂贵的化学电池,为直流电动机的扩大应用提供了电源上的保证。

由此可见,在电机与电力拖动的发展史上,首先得到应用的是直流电动机,直至19世纪70年代,直流电及其电机在应用上还一直占据着主导地位。

后来,随着电动机应用的不断扩大,用电量不断增加,而当时的直流电压又无法提高,因而在远距离输电方面遇到了困难,人们开始认识到交流电的优越性,此后便开始了对交流电的研究。

1871年,凡·麦尔准发明了交流发电机。1878年,亚布洛契可夫运用交流发电机和变压器发明了简单的照明供电装置。1885年,意大利物理学家费拉利斯发现了两相电流可产生旋转磁场。一年后,他与远在美国的垣斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。1888年,多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了三相电制。当年,南斯拉夫裔美国人特斯拉便发明了三相感应电动机,这奠定了现代三相电路和三相电机的基础。随后,三相交流电便迅速发展起来。这时,电灯、电车、电钻、电焊等电气产品如雨后春笋般地涌现。

1902年,瑞典工程师丹尼尔森首先提出同步电动机的构想。同步电动机工作原理同感应电动机一样,由定子产生旋转磁场,转子绕组由直流电供电。其转速固定不变,不受负载影响,因此同步电动机特别适用于钟表、电唱机和磁带录音机。

到20世纪初,各种主要的现代电机均已设计制造成功。

但是,要将电力应用于生产,还必须解决远距离输送的问题。1882年,法国人德普勒发明了远距离送电的方法。美国科学家爱迪生随后建立了美国第一个火力发电站,并将输电线连接成网络,这便是现代电力网络的雏形。

电力是一种优质而价廉的新能源,且特别便于远距离输送,便于控制和调节。它的广泛应用,推动了电力工业和电器制造业等一系列新兴工业的迅速发展,也为其他行业的发展提供了强大的动力。从此,人类历史从“蒸汽时代”跨入了“电气时代”。

在电力拖动方面,尽管上述在人类历史上曾经采用过的人力、畜力、蒸汽、内燃动力和液压等拖动方式至今还仍然或多或少地在沿用,但运用得最为广泛的还是由电动机组成的电力拖动系统。这是因为以下几个原因。

(1) 电能的生产、输送和分配十分方便。

(2) 电动机的种类和规格众多,且具各式各样的工作特性,能最大限度地满足大多数生产机械的不同要求。

(3) 电力拖动系统的操作和控制最为简便,便于实现生产机械的自动化和运动操作。

电力的生产,即电的发、配、输等方面,在随后的一百多年中,又相继出现了许多现代发

电方式,比如风力发电、水力发电、火力发电、原子能发电、磁流体发电、地热发电和潮汐发电等。此外,电力网络的建设也日新月异,电网规模不断扩大,输电距离越来越长,输电电压越来越高,配电网技术越来越先进。

在电机的生产、研究和开发等方面,也取得了令世人瞩目的成就:发电机的构造日臻完善,效率越来越高,单机容量越来越大,电压等级越来越高;电动机的规格越来越多,品种越来越齐全,新型特种高性能的电动机层出不穷。

今天,人类已经置身于高度现代化的电气时代。当今世界,如果离开了电机与现代电力拖动技术,简直无法想象!

回顾了电现象的发现,以及电机与电力拖动的发明史,那么电机和电力拖动对国民经济的重大意义,以及学习电机与电力拖动基础这门课程的重要意义,便不言而喻了。

0.2 电机与电力拖动基础学习方法总览

这门课程分为两部分,一部分为电机学;另一部分为电力拖动基础。

0.2.1 电机学内容的基本要求和学习方法

对于自动化专业来说,对电机学内容的要求以其中的电动机为主。因此,其学习对象主要是直流电动机、异步电动机和同步电动机,此外再加上变压器、特种驱动电动机以及控制电动机等。

对这部分内容的学习方法可概括如下。

- (1) 了解上述电动机的基本结构。
- (2) 掌握上述电动机的运行原理和分析方法。
- (3) 熟练掌握上述电动机的工作特性、外特性、机械特性、调速特性和起动特性等运行特性,熟知其运用场合。

0.2.2 电力拖动基础内容的基本要求和学习方法

对这部分内容的学习方法可概括如下。

- (1) 熟练掌握电力拖动系统及其动力学原理。
- (2) 熟练掌握由直流电动机和异步电动机分别组成的直流和交流拖动系统的分析方法,以及系统的运行特性。
- (3) 熟练掌握电力拖动系统中电动机容量选择的方法。

1.1 概述

对于直流电动机,需要基本了解和掌握的内容如下。

1. 直流电动机的用途

直流电动机具有良好的起动机性能,能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度,适用于对电动机的调速性能和起动机性能要求较高的生产机械。例如在电力机车、无轨电车、轧钢机和起重机等设备中,就广泛采用直流电动机来拖动。此外,起重电动机、挡风玻璃擦拭电动机、电动窗用电动机,以及吹风机电动机等,都是直流电动机在工业自动控制中最为经济的选择。

2. 直流电动机的基本工作原理

图 1-1 所示为直流电动机的工作原理示意图。直流电动机定子上的励磁绕组通以直流电流励磁,产生恒定磁场。旋转的电枢绕组和旋转的换向器与静止的电刷相连,电机转轴与机械负载相连。

电刷两端接入直流电压,转子电枢绕组中就有电流流过。电流从电源的正极流出,经电刷 A 流入电枢绕组,然后经电刷 B 流回电源的负极。

当线圈的 ab 边在 N 极下、cd 边在 S 极下时,电枢绕组中的电流沿着 a—b—c—d 的方向流动。电枢电流与磁场相互作用产生电磁力 f ,其方向可用左手定则来判断。由此电磁力所形成的电磁转矩,使电机逆时针方向旋转。当电枢绕组的 ab 边转到 S 极下、cd 边转到 N 极下时,通过换向器的作用,原来与电刷 A 相接触的线圈 a 端的铜片,现已变成与电刷 B 接触,因而电枢绕组中的电流变成沿 d—c—b—a 的方向流动。运用左手定则判断出,电磁力及电磁转矩的方向仍然使电动机逆时针旋转。

在同一方向的电磁转矩作用下,电动机拖动生产机械沿着与电磁转矩相同的方向旋转,向负载输出机械功率,电动机完成将电能转换成机械能输出的功能。这就是直流电动机的基本工作原理。

与此同时,由于电枢绕组旋转,线圈 ab 和 cd 边切割磁场产生了感应电动势。根据右手定则,其方向与电枢电流的方向相反,故称为反电动势。电源只有克服这一反电动势才能向电机输出电功率。

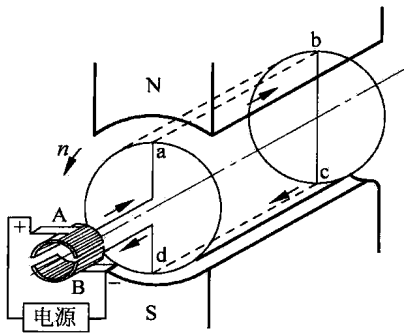


图 1-1 直流电动机的工作原理示意图

3. 直流电动机的基本结构

直流电动机主要由定子和转子两大基本结构部件组成。定子用来固定磁极和作为电机的机械支撑。转子中用来感应电动势从而实现能量转换的部件称为电枢,转子中的换向器可以实现外电路的直流电与绕组内的交流电之间的连接与转换。

1) 定子部分

直流电动机的静止部分称为定子,它的主要作用是产生磁场。直流电动机的定子由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成,各部分结构如图 1-2、图 1-3 所示。图 1-2 所示为一台直流电动机的剖面结构示意图。图 1-3 则为一台 4 极直流电动机的横截面图。

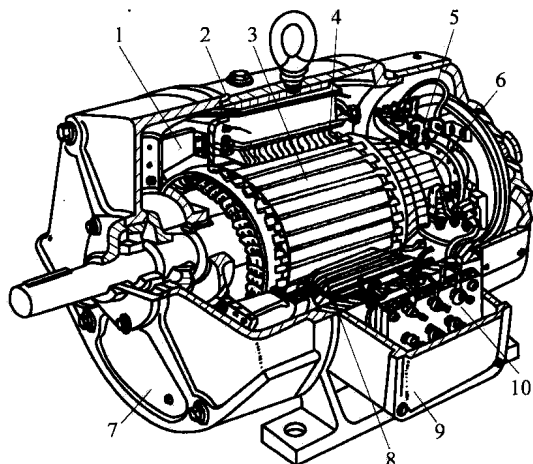


图 1-2 直流电动机剖面结构示意图

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

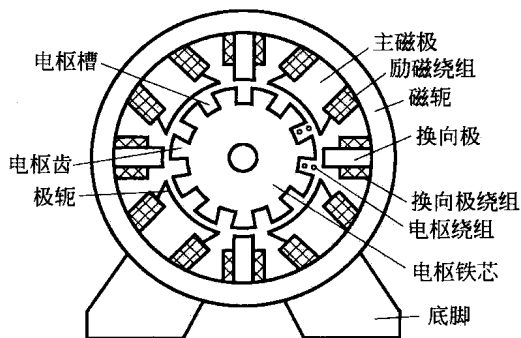


图 1-3 4极($2p=4$)直流电动机的横截面图

(1) 主磁极

主磁极简称主极,用来产生气隙磁场。主极都是成对出现的,主极数用 $2p$ 表示。主极包括主极铁芯和套在铁芯上的励磁绕组两部分。主极铁芯一般用 $1\sim 1.5\text{ mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压而成,励磁绕组用导线制成集中绕组。

(2) 换向极

容量大于 1 kW 的直流电动机,在相邻两主极之间装设换向极(也称为附加极),其作用是用来改善换向。换向极铁芯一般用整块钢制成,换向极绕组与电枢绕组串联。换向极的数量一般与主极数相等。

(3) 机座

机座的主体部分作为磁极间的磁路,该部分称为磁轭。机座同时又用来固定主极、换向极和端盖,并通过底脚将电机固定在基础上。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成,以保证良好的导磁性能和机械性能。

(4) 电刷装置

直流电动机的电枢电流由旋转的换向器通过静止的电刷与外电路接通。电刷装置由电刷、刷握、刷杆座和铜丝辫组成,如图 1-4 所示。电刷一般用石墨制成,放在刷握中,刷握再

装于刷架上。电刷顶部有细铜丝编织成的引线(称为铜丝辫),以便引出电流。电刷装于刷握中时,还须有弹簧压住,以保证电枢转动时电刷与换向器表面有良好的接触。

2) 转子部分

直流电动机的转动部分称为转子,通常也称为电枢,其作用是产生电磁转矩和感应电动势。转子部分由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇、转轴和轴承等组成。直流电动机的转子如图 1-5 所示。

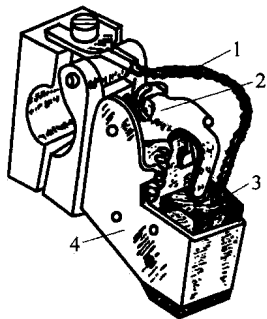


图 1-4 电刷装置

1—铜丝辫; 2—压紧弹簧; 3—电刷; 4—刷盒

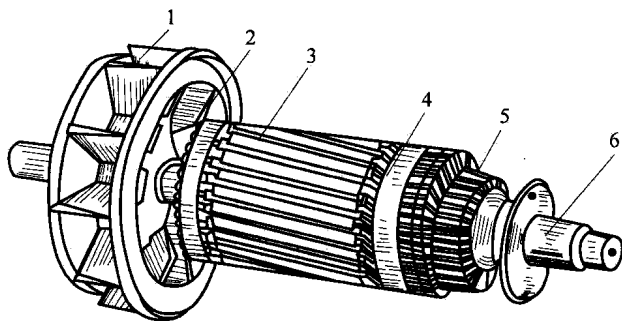


图 1-5 直流电动机的转子

1—风扇; 2—绕组; 3—电枢铁芯; 4—绑带; 5—换向器; 6—转轴

(1) 电枢铁芯

电枢铁芯是主磁路的主要部分,由于电枢铁芯与主磁场之间有相对运动,为了减少涡流损耗,一般用 0.5 mm(或 0.35 mm)厚的涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。电枢表面有许多均匀分布的槽,用以嵌放绕组。为了利于电机的冷却,电枢铁芯上开有轴向通风孔,较大容量的电机有径向通风道,这时电枢铁芯沿轴向分数段,每段长约 4~10 cm,段间空出 10 mm 作为通风道。电枢铁芯冲片结构如图 1-6 所示。

(2) 电枢绕组

电枢绕组由绝缘导线绕成一个个的线圈,嵌放在电枢铁芯槽中,各线圈按一定规律连接到相应的换向片上,全部线圈组成一个闭合的电枢绕组。电枢绕组的作用是通过电流和感应电动势,并产生电磁转矩,从而实现机电能量转换。电枢绕组的具体连接规律将在后续内容中介绍。

(3) 换向器

换向器的作用是通过与电刷的配合,实现电枢绕组内部的交流电与电刷端的直流电之间的转换。转动的换向器与静止的电刷通过滑动接触,将旋转的电枢电路和静止的外电路相连接。换向器由许多互相绝缘的换向片组成,如图 1-7 所示。

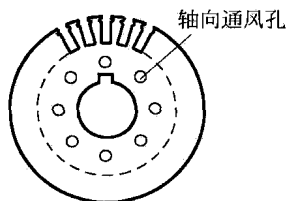


图 1-6 电枢铁芯冲片

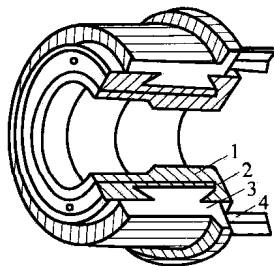


图 1-7 换向器

1—V形套管; 2—云母环; 3—换向片; 4—连接片

3) 气隙

气隙是电机定子主极和电枢之间的间隙,是主磁路的重要组成部分。气隙磁场是电机进行能量转换的媒介。气隙的大小和气隙磁场的分布及其变化对电机的运行影响极大。在小容量直流电动机中,气隙约 $1\sim 3\text{ mm}$;在大容量直流电动机中,气隙可达 $10\sim 12\text{ mm}$ 。

4. 直流电动机的额定值

每一台电动机上都有一块铭牌,上面标明了电动机的一些额定值。额定值是电动机运行的基本依据,一般希望电动机按额定值运行。若运行时的出力超过额定功率,称为超负载或过载;反之,若小于额定功率称为轻载;恰好运行于额定功率时称为满载。

直流电动机的主要额定值如下。

(1) 额定电压 U_N : 在额定工作条件下电动机输入电压的额定值,单位为 V。

(2) 额定电流 I_N : 在额定工作条件下电动机输入电流的额定值,单位为 A。

(3) 额定容量 P_N : 直流电动机在额定工作条件下运行时,电动机转轴上输出的机械功率,单位为 W 或 kW。它等于额定电压 U_N 和额定电流 I_N 的乘积,再乘以电动机的效率,即 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。

(4) 额定转速 n_N : 额定转速是指电动机在额定工作条件下运行时的转子转速,单位为 r/min。

(5) 额定效率 η_N : 在额定工作条件下,电动机输出功率与输入功率的百分比。

(6) 额定励磁电压 U_{fN} : 在额定工作条件下,电动机励磁绕组两端的电压。

(7) 额定励磁电流 I_{fN} : 在额定工作条件下,电动机励磁绕组上的电流。

5. 直流电动机的励磁方式

直流电动机工作时,由其励磁绕组中流过的直流励磁电流产生电动机的工作磁场。直流电动机的励磁方式是指励磁绕组和电枢绕组间的连接方式。不同的励磁方式使电动机具有不同的运行特性。

按励磁方式不同,直流电动机可分为他励和自励两大类,自励式又可分为并励、串励和复励三大类。图 1-8 分别给出了直流电动机不同励磁方式的接线图。

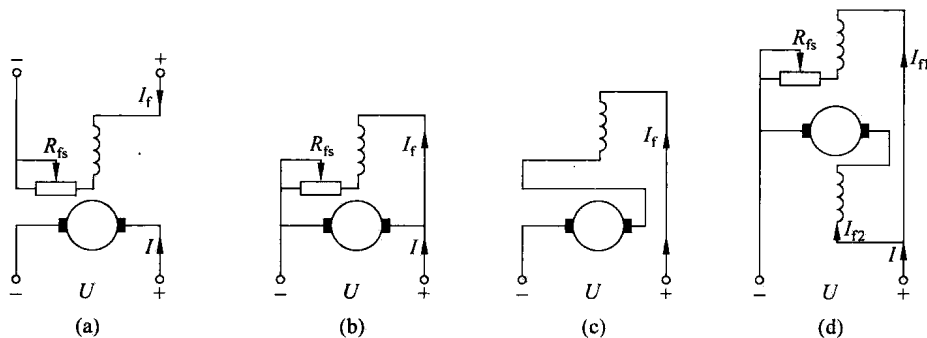


图 1-8 直流电动机按励磁分类接线图

(1) 他励(见图 1-8(a))

励磁绕组与电枢绕组不连接,由一个独立的直流电源提供励磁电流。