

全国技工学校电工类通用教材

电机与变压器

(第二版)

中国劳动出版社

全国理工类院校电工类课程教材

电机与变压器

（第二版）

机械工业出版社

全国技工学校电工类通用教材

电机与变压器

(第 二 版)

劳动部培训司组织编写

中国劳动出版社

电机与变压器

(第二版)

劳动部培训司组织编写

责任编辑:张秉淑

中国劳动出版社出版

(北京市惠新东街1号)

北京印刷二厂印刷

新华书店总店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 16印张 388千字

1988年7月北京第1版 1994年2月北京第2版

2000年7月北京第20次印刷 印数 30100册

ISBN 7-5045-1401-2/TM·083(课) 定价:14.40元

本书内容包括：直流电机的基本理论与结构、直流发电机、直流电动机、变压器原理、变压器的联接与并联运行、其它用途的变压器、三相异步电动机、三相异步电动机绕组、单相异步电动机、同步电机、特种电机。

本书主要适用于技工学校维修电工、电机钳工、电工等工种使用，也可供职业中专、职业高中同类工种或中级技术工人培训使用。

本书第一、二、三、七、九章由赵承获编写，第四、五、六章由沈家善编写，第八、十、十一章及实验部分由陈伟编写，赵承获主编；龚如林、朱行南、熊光奎审稿，龚如林主审。

前 言

为了更好地提高技工学校电工类工种(专业)的教学质量,适应生产发展的需要,我们在修订技工学校电工类工种(专业)教学计划教学大纲的基础上,组织修订了技工学校电工类工种(专业)各门课程的教材。修订后的教材从培养目标出发,以中级电工技术等级标准为依据,坚持理论联系实际的原则,突出技能训练,注重针对性、实用性、科学性,并适当增加了新技术、新工艺、新材料、新设备的内容。

这套教材计有:维修电工生产实习、电工生产实习、数学、物理、电工基础、机械知识、机械制图、电气制图、电子技术基础、电机与变压器、电工仪表与测量、电力拖动控制线路、企业供电系统及运行、安全用电、电工材料等 15 种。

组织修订教材的工作得到了黑龙江、山东、上海、江苏、浙江、河南、陕西、四川、江西、湖南、广西、福建、云南及沈阳、大连、重庆等省市自治区及计划单列市劳动厅(局)的大力支持和协助,在此表示衷心的感谢。

由于技工学校教学改革正在研究探索之中,此次修订的教材肯定还会存在一些缺点和不足,恳切希望读者提出宝贵意见,以便在适当时候再次进行修订,使之更加完善。

劳动部培训司

目 录

绪言.....	1
第一章 直流电机的基本理论与结构.....	3
§ 1—1 直流电机的工作原理.....	3
§ 1—2 直流电机的结构.....	7
§ 1—3 直流电机的分类	11
§ 1—4 直流电机的电枢绕组	13
§ 1—5 直流电机的电枢电动势	19
§ 1—6 直流电机的电磁转矩和电磁功率	20
§ 1—7 直流电机的磁场及电枢反应	21
§ 1—8 直流电机的换向	23
第二章 直流发电机	27
§ 2—1 并励发电机的空载特性	27
§ 2—2 并励发电机电势的建立	28
§ 2—3 直流发电机的功率、转矩、电势平衡方程式	29
§ 2—4 并励发电机的外特性	31
§ 2—5 复励发电机	32
§ 2—6 直流电焊机	33
第三章 直流电动机	36
§ 3—1 直流电动机的电势、功率、转矩平衡方程式	36
§ 3—2 直流电动机的机械特性	38
§ 3—3 直流电动机的启动	40
§ 3—4 直流电动机的调速	42
§ 3—5 直流电动机的反转	44
§ 3—6 直流电动机的制动	44
§ 3—7 单相串励电动机	46
§ 3—8 整流电源供电对直流电动机的影响	48
§ 3—9 国产直流电动机简介	49
§ 3—10 直流电动机的一般试验方法.....	50
§ 3—11 直流电动机的使用、维护及故障处理	53
第四章 变压器的原理	58
§ 4—1 变压器的工作原理及分类	58
§ 4—2 变压器的结构	59

§ 4-3	变压器的空载及负载运行	63
§ 4-4	变压器的阻抗变换	69
§ 4-5	变压器的外特性	70
§ 4-6	变压器的空载试验及短路试验	71
§ 4-7	变压器的损耗和效率	74
§ 4-8	电力变压器铭牌及国产电力变压器简介	76
§ 4-9	变压器检修及一般试验方法	80
第五章	变压器的联接与并联运行	86
§ 5-1	变压器绕组的极性及其判定	86
§ 5-2	三相变压器的构成	88
§ 5-3	三相变压器的联接组	92
§ 5-4	三相变压器的并联运行	96
第六章	其它用途的变压器	99
§ 6-1	自耦变压器	99
§ 6-2	仪用互感器	101
§ 6-3	电焊变压器	105
§ 6-4	整流变压器	107
§ 6-5	脉冲变压器	109
§ 6-6	小型单相变压器的简单计算	109
第七章	三相异步电动机	117
§ 7-1	旋转磁场	117
§ 7-2	三相异步电动机的工作原理	121
§ 7-3	三相异步电动机的结构	122
§ 7-4	三相异步电动机的运行原理	128
§ 7-5	三相异步电动机的工作特性	132
§ 7-6	三相异步电动机的启动	135
§ 7-7	三相异步电动机的调速	141
§ 7-8	电磁调速异步电动机	143
§ 7-9	三相异步电动机的反转与制动	145
§ 7-10	三相异步电动机的使用、维护及故障处理	148
§ 7-11	三相异步电动机的一般试验方法	150
§ 7-12	国产三相异步电动机简介	154
第八章	三相异步电动机绕组	158
§ 8-1	三相异步电动机绕组概述	158
§ 8-2	三相单层绕组	160
§ 8-3	三相双层绕组	167
§ 8-4	单双层混合绕组	173
§ 8-5	分数槽绕组	174
§ 8-6	三相异步电动机绕组的故障处理	176

§ 8-7 三相变极多速异步电动机原理与接线	181
第九章 单相异步电动机	186
§ 9-1 单相异步电动机的工作原理	186
§ 9-2 单相电容(电阻)异步电动机	187
§ 9-3 单相罩极异步电动机	190
§ 9-4 单相异步电动机定子绕组	191
§ 9-5 单相异步电动机的反转与调速	194
§ 9-6 单相异步电动机的常见故障及处理	196
第十章 同步电机	200
§ 10-1 三相同步发电机的工作原理	200
§ 10-2 同步电机的基本结构	201
§ 10-3 同步发电机的励磁方式	203
§ 10-4 同步发电机的并联运行	204
§ 10-5 同步电动机的工作原理	205
§ 10-6 同步电动机的启动方法	206
§ 10-7 同步电动机功率因数的调整	207
§ 10-8 同步补偿机	208
第十一章 特种电机	210
§ 11-1 伺服电动机	210
§ 11-2 测速发电机	214
§ 11-3 步进电动机	216
§ 11-4 微型同步电动机	219
§ 11-5 交磁电机扩大机	221
§ 11-6 直线电机	224
附录 学生实验	228

绪 言

一、电机在国民经济中的作用

自然界中存在有机械能、化学能、热能、光能、电能、核能等各种能源,而且它们是可以互相转换的。电能则是现代使用最广泛的一种能源,这主要是由于电能的产生、传输、分配、控制等都比较方便。因此,目前世界各国都利用电能作为能量转换的中间环节,即首先将其它形式的能量转换成强大的、集中的电能,随后再将电能根据人们的需要转换成其它形式的能量加以利用。在能量的相互转换过程中目前使用最广泛的是机械能与电能之间的相互转换。

目前获得电能的主要方法是将煤、石油、天然气的燃烧或原子核裂变产生的热能来生产高温高压的蒸汽,再驱动汽轮机旋转并拖动三相同步发电机发出电能。而水力发电则是利用水的位能驱动水轮机再带动发电机发电。

电能最主要的用途是通过电动机转换成机械能来拖动各种机械、电气设备工作。例如在工业部门的各种机床、吊车、鼓风机、空气压缩机、搅拌机、纺织机械、冶金机械等都用电机拖动;农业上的排灌机、碾米机、榨油机等也用电机拖动;交通运输业中的电力机车、城市电车等使用着许多电动机;国防工业、计算技术领域、航天技术领域等也应用着大量的电机;人们日常生活中的风扇、洗衣机、电冰箱、吸尘器、收录机、录放像机等都少不了电动机。

不难想象现代社会一旦离开了电则国民经济各个部门会是个什么样子,连人们的正常生活也将难以维持。因此发电量已成为衡量一个国家工业化程度及发展水平的重要标志。

二、电机发展简史及趋势

电机的发展史大致可划分为两个时期,第一时期从 1821 年法拉第发表电流在磁场中产生机械力的实验以后,出现了电动机的雏形,1831 年法拉第提出电磁感应定律后又出现了各种各样原始型式的发电机,一直到 19 世纪末期,直流电机、变压器、单相及三相交流电机的基本型式已大体具备为止,可说是电机发展的准备阶段。进入 20 世纪后,随着交流三相制发电厂的迅速建立、交流输电系统的建成及结构简单、价格低廉的三相鼠笼异步电动机的大量生产,把社会生产力迅速推进到电气化时代,在社会进步史上称之为第二次技术革命。电机的近代发展及今后发展的主要趋势有:

1. 单机容量不断提高:随着科学技术水平及人们生活水平的不断提高,对电力工业的需要也更为紧迫,发电机、变压器及电动机的单机容量均在不断增长,这是电机制造工业发展的主要趋势。例如在 20 世纪初发电机的单机容量最大仅 5000 千瓦(千伏安),到 1937 年用氢内冷的发电机单机容量已达 15 万千瓦,而 1960 年则为 32 万千瓦,目前世界上最大的汽轮发电机单机容量已突破 100 万千瓦。

水轮发电机与电力变压器的发展也达到了类似的水平。

2. 中、小型电机技术指标及经济指标不断提高:由于中、小型电机的生产批量大,是整个电力系统中最主要的负荷,因此电机的效率、功率因数、体积、质量、价格等技术经济指标对整个

国民经济都带来一定的影响。例如,采用国产新型的低损耗变压器 S7 或 S9 去替代目前在供电线路上运行的一般电力变压器,所需投资费用可在 4~5 年时间内由节电的费用中回收。因此,我国电力管理部门在 1985 年就规定新生产及投入运行的均应为低损耗变压器。

中、小型电机技术经济指标改进的途径主要是设计技术水平的进一步提高,采用计算机辅助设计,采用新型磁性材料,提高绝缘材料耐热等级,采用新的生产工艺、生产过程的自动化等。

3. 应用范围不断扩大:为了适应国民经济各部门的需要,电机的系列品种规格越来越多,越来越完善,除一般的电机外,还出现了各类特殊用途的电机及特种电机,如防爆电机、潜水电机、牵引电机、矿用电机以及伺服电机、步进电机、自整角机、直线电机、盘形电机等等。此外,一些新型结构的电机如印制绕组电机、无刷电机、永磁电机等也获得了迅速的发展。

三、我国电机制造工业的发展

我国解放前的电机制造工业非常落后,仅有一些装配及修理工厂,生产的最大发电机仅为 200 千瓦,交流电动机 132 千瓦(180 马力)。解放后在党和政府的正确领导下,通过自力更生、艰苦创业及改革开放,我国的电机制造工业发展迅速,技术水平有了很大提高。1958 年我国制成世界上第一台 1.2 万千瓦双水内冷汽轮发电机,一举震动了国际电工界。1974 年制成 30 万千瓦双水内冷汽轮发电机,1987 年制成 60 万千瓦定子水内冷、转子氢内冷大型汽轮发电机,目前正在进行设计及试制 100 万千瓦的巨型发电设备。电力变压器目前已能生产 330 千伏~500 千伏电压等级,单台容量达 55 万千伏安。可以说上述产品均已接近当前世界先进水平。在中小型电机生产方面,直流电动机从 Z2 系列过渡到 Z3 系列,目前已大批量生产适用于整流器供电的 Z4 系列。鼠笼异步电动机也由 J、JO 系列过渡到 J2、JO2 系列,目前已大批量生产 Y 系列。Y 系列和 Z4 系列均符合国际电工委员会标准,技术指标先进,有利于出口及进口设备配套。

第一章 直流电机的基本理论与结构

直流电机是直流发电机与直流电动机的总称。直流电机具有可逆性,既可作直流发电机使用,也可作直流电动机使用。作直流发电机使用时,将机械能转换成直流电能输出;作直流电动机使用时,则将直流电能转换成机械能输出。

直流电机虽然其结构较复杂,使用、维护较麻烦,价格较贵,但由于其具有可以直接获得恒定的直流电源,调速性能好、启动转矩大等优点,因而在某些领域中仍获得广泛的采用。

§ 1-1 直流电机的工作原理

一、直流发电机工作原理

通过电工基础的学习我们知道:当导体在磁场内作切割磁力线的运动时,在导体中就有感应电动势产生,这就是发电机的基本工作原理,如图 1-1 所示。在静止的磁极 N 及 S 之间安置了一个能绕轴 OO' 旋转的线圈 $abcd$ (称电枢绕组),为了将线圈 $abcd$ 中产生的感应电动势输出到外电路中,采用了滑环和电刷装置,即将线圈的两端分别接到两个铜制的滑环上,每个滑环通过压在它上面的静止不动的电刷与外电路联通,从而将线圈中产生的感应电动势输出到外电路中。感应电动势 e 的大小则用公式 $e = Blv \sin \alpha$ 计算,式中 B 为磁感应强度, l 为切割磁力线的导体的有效长度, v 为导体切割磁力线的速度, α 为导体运动方向与磁力线方向的夹角。

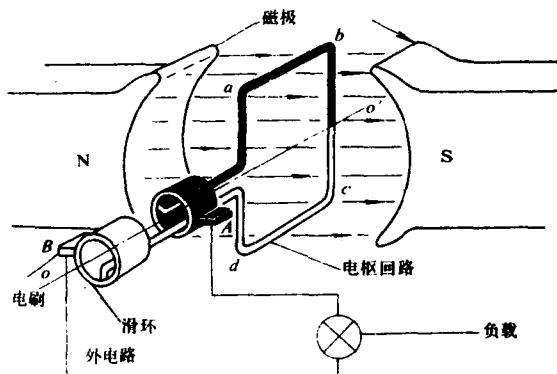


图 1-1 发电机原理结构(发出交流电)

当线圈位于图 1-2(a)的位置时,导体运动方向与磁力线的夹角 $\alpha = 0$,故导体中感应电动势 $e = 0$;当线圈转过 $\alpha = 90^\circ$,位于(b)图位置时, e 为最大;当线圈转过 $\alpha = 180^\circ$,处于(c)图位置时, e 又为零;当 $\alpha = 270^\circ$ 时则对应于(d)图位置, e 又为最大值,但 e 的方向与(b)图位置时正好相反,当线圈转过一圈又回到起始位置后,就重复上述的循环。由此可见:由电刷两端引出向外电路供电的是正弦交流电动势,如图 1-2(e)所示。这显然不符合产生直流

电的要求。分析其原因是由于电刷 A 总是和联接 ab 导体的滑环接触(电刷 B 则总是和联接 cd 导体的滑环接触),这样,当导体 ab 由 N 极转到 S 极下时,导体中的感应电动势方向发生了变化,从而使电刷 A 的极性也跟着发生变化,因此,在电刷 A、B 两端就输出交流电动势。故图 1-1 及图 1-2 是交流发电机的结构及工作原理图。

如果我们能设法让电刷 A 总是与位于 N 极下的导体接触(电刷 B 总是与位于 S 极下的导体相接触),则就可在 A、B 两电刷间输出方向不变的直流电动势。在实际结构中我们是采用换向器来达到上述目的的。如图 1-3 所示为简单的直流发电机结构原理图,导体 ab 及导体 cd 分别与两个互相绝缘的半圆环(称为换向器)相联,再通过电刷 A、B 与外电路接通。下面我们分析图 1-3 的工作原理。

当线圈处于图 1-4(a)所示位置时, $\alpha = 0$,故线圈中感应电动势 $e = 0$;当线圈转过 90° ,处于(b)图位置时,A 电刷与位于 S 极下的导体相联,用右手定则可判定 A 电刷极性为正(B 电刷则为负),此时产生的感应电动势 e 最大,流过外电路中的电流如(b)图中箭头所示;当线圈转过 $\alpha = 180^\circ$ 时, $e = 0$;当线圈转过 270° 时,处于(d)图位置,电刷 A 仍与位于 S 极下的导体相联,因此 A 电刷的极性保持不变仍为正(B 电刷仍为负),从而保证流过外电路中的电流方向不变,在电刷 A、B 两端的输出电压波形如图(f)所示。可以看出输出的电压方向已不再改变,但它的大小仍然是变化的,我们把方向不变但大小在不断变化的电流、电压或电动势称为脉动直流。

为了能输出恒定不变的直流电,实际上使用的直流发电机的转子上安置有

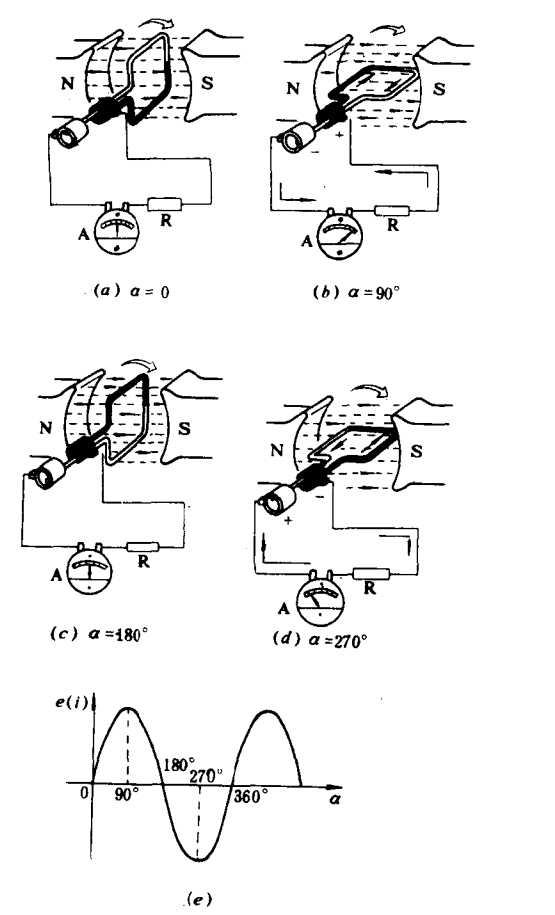


图 1-2 发电机工作原理(发出交流电)

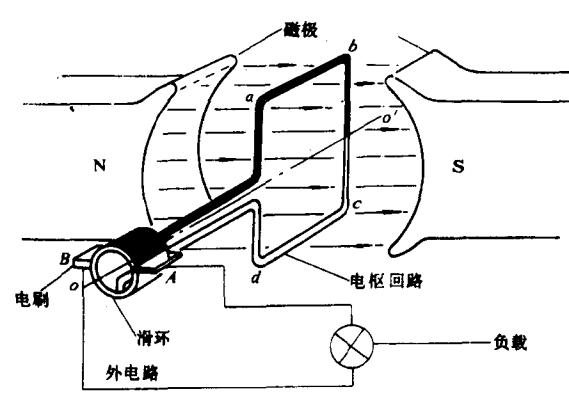


图 1-3 直流发电机结构原理

许多导体和换向片,它们在空间都相隔一定的角度,可参看图 1-3 直流电机的结构图,当转子旋转时,各导体中产生的感应电动势分别相差一定的角度,再将各导体中的感应电动势按一定的规则叠加起来,从两电刷间输出,就可得到平直的直流输出。图 1-5 所示是两组互相垂直的线圈(对应有四片换向片)A 和 B 所产生的电动势叠加后在两电刷端输出的电压波形,可见输出电压的脉动程度已大为减小。

由此我们可以归纳出直流发电机的工作原理:直流发电机在原动机的拖动下旋转,电枢上的导体切割磁力线产生交变的感应电动势,再通过换向器的作用在电刷间获得直流电压输出,从而实现了将机械能转换成直流电能的目的。

二、直流电动机工作原理

直流电动机是依据通电流的导体在磁场内将受力而运动的原理制造的。它的结构与直流发电机一样,即在固定的磁极 N 和 S 之间,放置有一个能绕轴 OO' 旋转的线圈 $abcd$ (称电枢绕组),并借助于换向片及电刷将外面直流电源加到线圈上,则通电流的线圈就在磁场内受力而绕轴 OO' 旋转。下面我们来具体分析其转动原理,如图 1-6(a)所示,电流由 A 电刷流入, B 电刷流出。线圈 $abcd$ 中的电流方向如图中箭头所示,用左手定则可判定出线圈受力后将绕 OO' 轴以顺时针方向旋转。当线圈转到位置 2(对应于(b)图)时,电刷 A 及 B 被换向器直接短接,线圈中没有电流,故不受力的作用,但线圈由于惯性原理仍将继续转动一个位置,当处于(c)图的位置 3 时,虽然线圈中的导体在磁极中所处的位置正好与(a)图时相反,但由于换向器的作用,仍能保持在 N 极下的导体中的电流方向不变(在 S 极下导体中的电流方向也不变),从而保持线圈的受力方向与旋转方向不变,电动机就能继续旋转。由此我们可以归纳

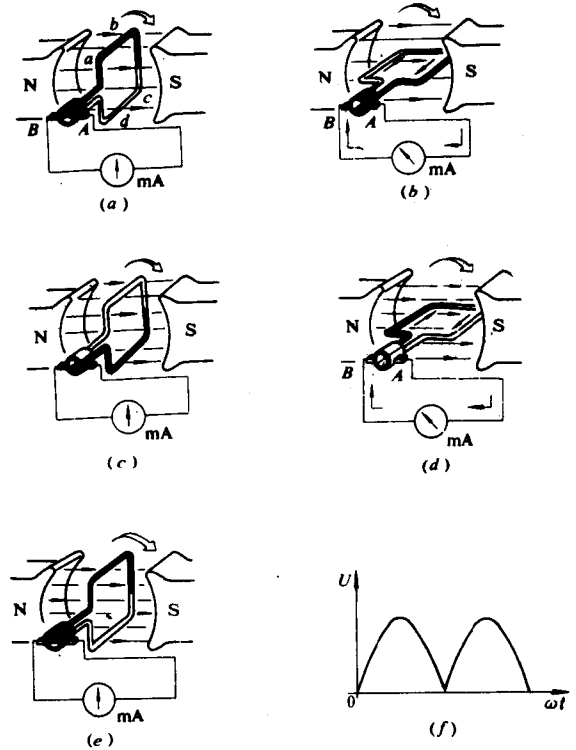


图 1-4 直流发电机的工作原理

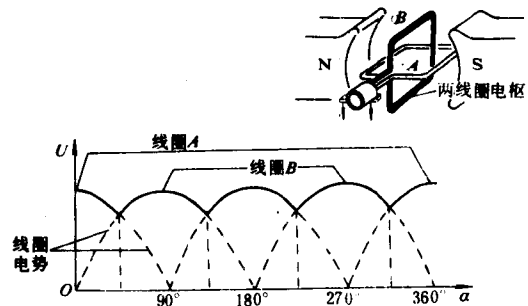


图 1-5 两组线圈的输出电压

出直流电动机的工作原理：直流电动机在外加直流电压的作用下，在导体中形成电流，载流导体在磁场中将受电磁力的作用，通过换向器使导体进入异性磁极时，导体中的电流方向也相应改变，以维持转矩方向不变，从而使直流电动机能连续旋转，把直流电能转换成机械能输出。

进一步观察由(a)图到(c)图时，导体ab(导体cd也一样)中的电流方向发生了变化，而变化的转折点是在(b)图位置，我们把该位置称为直流电机的换向。同样(d)图也是导体中电流的换向位置。换向是一个相当复杂的物理过程，对直流电机的性能及运行影响也很大，我们将在后面进行专门的讨论。

三、直流电机工作的可逆性

当直流电机作发电机运行时，由原动机供给机械转矩使电机旋转，于是导体便切割磁力线而产生感应电动势，当与负载接通后，即形成电流，该电流方向与感应电动势的方向是一致的。图 1-7 中画出了原动机拖动直流发电机以转速 n 顺时针旋转及导体 ab、cd 中感应电动势和电流方向。我们知道，通电流的导体在磁场内将受到力 F 的作用，其方向用左手定则判定如图中所示。可知此力 F 产生的转矩(称电磁转矩)方向与发电机的旋转方向正好相反，故电磁转矩是一个制动转矩，它与原动机的拖动转矩相平衡。发电机输出的负载电流越大，则电磁转矩也越大，于是原动机拖动发电机所需的机械转矩也必须增大，以克服电磁转矩，使发电机继续稳定运行。

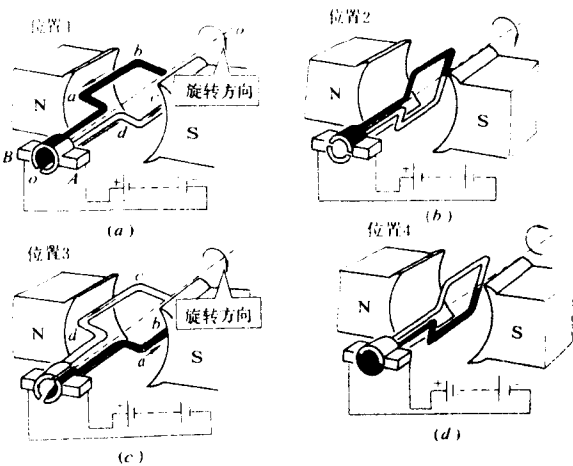


图 1-6 直流电动机工作原理

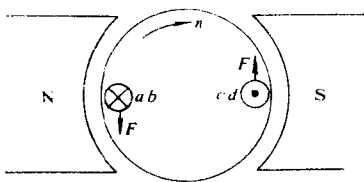


图 1-7 直流发电机的转矩平衡

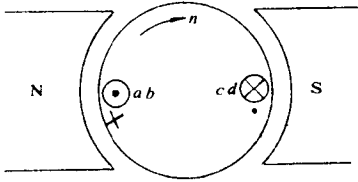


图 1-8 直流电动机中的反电动势

当直流电机作电动机运行时，由电源供给直流电，电流通过电枢绕组后，载流导体便在磁场内受作用力而形成电磁转矩，使电动机旋转，并拖动机械负载。电动机转动后，电枢绕组又切割主磁场而产生感应电动势，其方向用右手定则判定，如图 1-8 的小圆圈内为通入的电流方向，小圆圈外的符号为感应电动势方向，可见两者正好相反，因此称为反电动势，用来与外加电源电压相平衡。

由上分析可见,直流电机的运行是可逆的,即一台直流电机既可作发电机运行,也可作电动机运行。当输入机械转矩并克服电机内产生的电磁转矩,从而将机械能转变为电能时,则作发电机运行。反之当输入直流电能并克服电机内的反电动势而产生电磁转矩时,则将电能转变成机械能,此时作电动机运行。电传动机车、地下铁道的电动车组等采用直流电机牵引的运输机械(及起重机械),在牵引状态时,电机作电动机运行,从而产生牵引力。在制动状态时,电机可以作发电机运行,将机车和列车的动能转变为电能,产生制动力对机车进行电制动。

§ 1-2 直流电机的结构

直流电机主要由定子(固定不动的部分)和转子(转动的部分——又称电枢)两部分组成。图 1-9 为国产直流电动机外形图;而图 1-10 则为 Z3 系列直流电动机的部件图。对直流电动机结构上的要求是:能产生足够强的磁场;能承受额定电压和通过额定电流;能保持良好的绝缘性能;电机温升不允许超过规定值;运转灵活正常,有一定的机械强度;使用及维护较方便,寿命较长;所需材料力求节省,价格较低;制造工艺力求简单等。

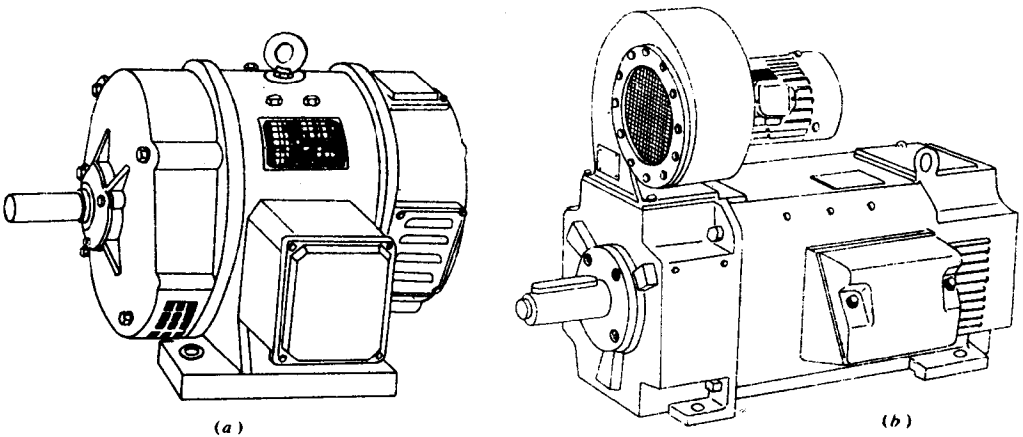


图 1-9 直流电动机外形
(a) Z2 系列直流电动机 (b) Z4 系列直流电动机

一、定子

直流电机的定子主要由以下部件组成:机座、前端盖、后端盖、主磁极、换向极、电刷装置等。

1. 机座

机座的作用:一方面作为电机磁路的一部分;另一方面则在其上安装主磁极、换向极,并通过端盖支承转子部分。机座通常为铸钢件经机械加工而成,也有采用钢板焊接成,或直接用无缝钢管加工而成。

2. 主磁极

简称主极,其作用是通入直流励磁电流,产生主磁场。它由主极铁心和主极绕组两部分组成。

(1) 主极铁心 作为电机磁路的一部分。由于电枢旋转时,电枢铁心上的槽与齿相对于主极铁心在不断地变动,即磁路的磁阻在不断变化,从而在主极铁心中将引起涡流损耗,为

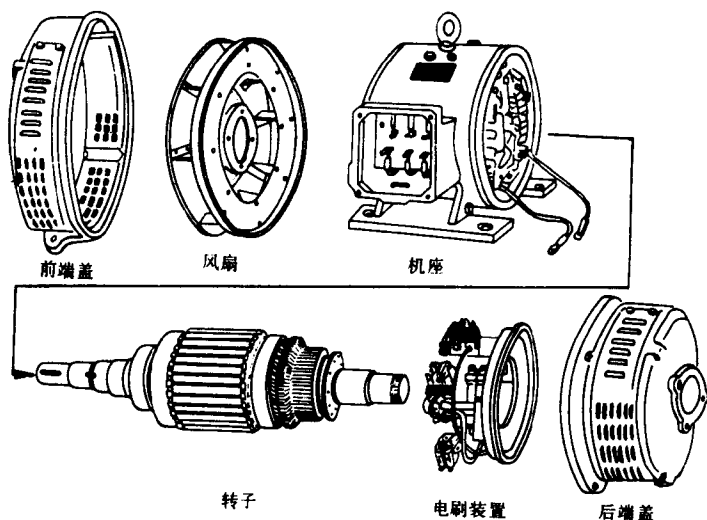


图 1-10 Z3 系列直流电动机的组成部件

减小此损耗,主极铁心一般用薄钢板冲制成型后再用铆钉铆紧成为一个整体,最后用螺钉固定于机座上,如图 1-11 所示。

(2) 主极绕组 其作用是通入直流电,产生励磁磁势。小型电机用绝缘铜线(或铝线)绕制而成;大、中型电机则用扁铜线制造。绕组在专用设备上绕好后必须进行绝缘处理,然后借助于主极框架安装在主极铁心上。

3. 换向极

又称附加极,用以产生换向磁场,以改善电机的换向。它由换向极铁心和换向极绕组组成。

(1) 换向极铁心 由于换向极与电枢之间的空气隙比较大,因此一般电机的换向极铁心大多用整块的钢板加工而成,以简化加工工艺。但在大型电机和用晶闸管供电的功率较大的电机中,为了更好地改善电机的换向,换向极铁心也采用叠片结构。

(2) 换向极绕组 与主极绕组一样也是用铜线或扁铜线绕制而成,再经过绝缘处理后,套装在换向极铁心中,最后用螺钉固定在机座上。

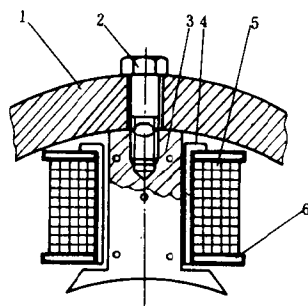


图 1-11 主磁极结构

1—机座 2—主极螺钉 3—主极铁心
4—框架 5—主极绕组 6—绝缘垫衬

4. 前、后端盖

用以安装轴承和支承电枢,一般均为铸钢件。

5. 电刷装置

通过电刷与换向器表面的滑动接触,把电枢绕组中的电动势(电流)引入与引出。

电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等部分组成,如图 1-12 所示。对电刷的要求是既要有良好的导电性能,又要有好的耐磨性,因此电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放置在电刷盒内,并用弹簧把电刷压紧在换向器上。电刷盒是刷握的主要部分,刷握 5 固定在刷杆 3 上,刷