

第21篇 直 流 电 机

主编单位:

上海市电机技术研究所

上海南洋电机厂

编写单位:

哈尔滨电机厂 上海电机

厂 上海交通大学 上海

工业大学

主 编:

樊 虎

编 写 人:

林传銮 陈立人 刘嗣裕

凌松年 张孟期 刘行健

周守国 胡鉴清 甘宝泉

陈沛铭 陆宝琦 崔朝宗

8E80/3803

第1章 概述

1 用途和分类

直流电机是将直流电能和机械能相互转换的旋转电机。它可用作电动机或发电机,还可以作其它特殊的用途。

直流电动机具有: (1)优良的调速特性,调速平滑、方便,调速范围 $\ominus$ 宽广。(2)过载能力 $\ominus$ 大,能承受频繁的冲击负载。(3)可实现频繁的无级快速启动、制动和反转。(4)能满足生产过程自动化系统各种不同的特殊运行要求等特点。其制造成本和维护工作量一般来说虽比交流电动机的大,但交流电动机的调速性能至今还不能与直流电动机的相比,因而直流电动机在需要宽广调速的场合和要求有特殊运行性能的自动控制系统中,一直占有突出的地位,,被广泛应用于冶金矿山、交通运输、纺织印染、造纸印刷以及化工和机床等工业。

直流发电机能提供无脉动的电力,其输出电压便于精确地调节和控制,它的主要用途之一是作为某些重要的直流电动机的电源,使其获得较好的换向性能。它还能满足直流和同步电机励磁系统的不同要求,并可用于电化工业中作为电解、电镀的低电压大电流直流电源。随着可控硅整流电源的广泛应用和日益完善,及其在技术和经济上的显著优点,一方面在许多领域中取代了直流发电机,另一方面却进一步扩大了直流电动机的应用范围。但直流发电机在某些领域中如真空冶炼工业和无交流电网且又需要直流电源的场合等,仍有它一定的重要性。

直流电机的特性与其励磁方式有密切联系,按不同的励磁方式,它可分为永磁、并励、串励、复励、稳定并励和他励直流电机六种。不同励磁方式的直流电动机与直流发电机的特性和用途分别见表 21.1-1 和表 21.1-2。直流电机还可以分别按转速、电流、电压、工作定额以及按防护型式、安装结构型式和通风冷却方式等特征来分类。直流电机的派生和专用系列则是按用途分类,如表 21.1-3 所示。

随着国民经济和国防建设的发展,工业生产自动化程度的不断提高,对直流电动机的动态特性、调速范围、运行可靠性和主要技术经济指标提出了更

高的要求。在某些电力传动系统中要求进一步提高大型直流电机的单机功率,发展更多特种用途的专用直流电机。为此,必须积极开展对直流电机换向理论、通风散热、振动噪声和测试技术等方面的理论研究,扩大电子计算技术在设计、制造和科研上的应用,以便多快好省地发展直流电机,适应四个现代化的需要。

2 结构概况

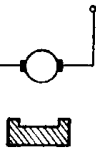
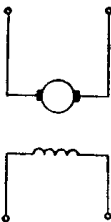
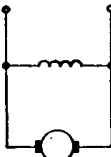
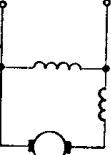
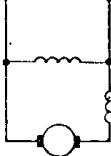
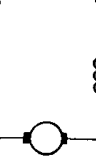
防滴型卧式自扇冷直流电机是中小型直流电机中应用面最广的一种结构型式,它的结构概况见图 21.1-1 和表 21.1-4。为了适应功率大小、运行特性、通风冷却方式和使用环境条件等的不同要求,大、中、小型直流电机的某些零部件的结构有一定的差别。结构设计的质量对提高运行可靠性、节约原材料、提高劳动生产率和便于使用与维护有直接影响。

直流电机的某些结构零部件在运行时要承受相当大的电磁力、机械应力和热负载的综合作用,尤其是组成直流电机电枢的各零部件,除必须有足够的机械强度外,电枢绕组绝缘还应有良好的介电性能、耐热和耐潮性能,能防止碳粉积附的影响,换向器和电刷应能保持良好的滑动接触。直流电机的通风冷却,关系到散热效果以及材料的充分利用和电机的使用寿命。电枢是直流电机损耗发热比较集中、散热比较困难的部件,所以通风冷却系统以及电枢的通风结构的合理布置也是结构设计的重要环节。

改进直流电机结构,不仅决定于电磁与结构设计工作水平的提高,而且还取决于新材料、新工艺和新技术的应用和推广以及系列化、通用化、标准化工作的发展。使其有利于实现机械化、自动化生产,以提高生产效率和产品质量,节约原材料,降低制造成

- ⑤ 调速范围常用直流电动机最低转速与最高转速之比来表示。一般可达 1:200;高精度伺服电动机的调速范围可达 1:10000 及以上。
- ⑥ 短时过载转矩一般中大型轧钢直流电动机可以达到额定转矩的 2.5 倍及以上,特殊要求的可以达到 10 倍。并能在低速下连续输出较大转矩。

表 21-1-1 直流电动机的特性和用途

励磁方式	永磁	他励	并励	稳定并励②	复励	串励
励磁特征图						
起 动 转 矩	起动转矩约为额定转矩的2倍,也可制成额定转矩的4~5倍	由于起动电流一般限制在额定电流的2.5倍以内,起动转矩约为额定转矩的2~2.5倍			起动转矩较大,约可达额定转矩的4倍,由复励程度决定	起动转矩很大,约可达额定转矩的5倍
短时过载转矩	一般为额定转矩的1.5倍,也可制成额定转矩的3.5~4倍	一般为额定转矩的1.5倍。带补偿绕组时,可达额定转矩的2.5~2.8倍			比并励电动机为大,约可达额定转矩的3.5倍	可达额定转矩的4倍左右
转 速 变 化 率	3~15%	5~20%			由复励程度来决定,可达25~30%	转速变化率很大,空载转速极高
调 速 范 围	转速①与电枢电压是线性关系,有较好的调速特性,调速范围较大	削弱磁场恒功率调速,转速比可达1:2至1:4,特殊设计可达1:8,他励时,可调节电枢电压,恒转矩向下调速,范围较宽广			削弱磁场调速,可达额定转速的2倍	用外接电阻与串励绕组串联或并联;或将串励绕组串联或并联连接来实现调速。调速范围较宽
用 途	自动控制系统中作为执行元件及一般传动动力用,如力矩电动机	用于起动转矩稍大的恒速负载,和要求调速的传动系统,如离心泵、风机、金属切削机床、纺织印染、造纸和印刷机械等			用于要求起动转矩较大,转速变化不大的负载,如拖动空气压缩机、冶金辅助传动机械等	用于要求很大的起动转矩、转速允许有较大变化的负载,如蓄电池供电车、起重机械、电车、电力传动机车等

- ① 直流电动机从实际冷却状态下开始运转,到绕组为工作温度时,由于温度变化引起了磁通变化和电枢电阻压降的变化,因此产生直流电动机的转速变化一般约为15~20%,而永磁直流电动机的磁通与温度无关,仅电枢电阻压降随温度变化,所以由于温度变化而产生的转速变化约为1~2%。
- ② 稳定并励直流电动机的主极励磁绕组由并励绕组和稳定绕组组成。稳定绕组实质上是少量匝数的串励绕组。在并励或他励电动机中采用稳定绕组的目的,在于使转速不致于随负载增加而上升,而是略为降低,亦即使电动机运行稳定。

表 21-1-2 直流发电机的特性和用途

励磁方式	电 压 变 化 率		特 性	用 途
永 磁	1~10%		输出端电压与转速成线性关系	用作测速发电机
他 励	5~10%		输出端电压随负载电流增加而降低,能调节励磁电流使输出端电压有较大幅度的变化	常用于电动机-发电机-电动机系统中,实现直流电动机的恒转矩宽广调速
并 励	20~40%		输出端电压随负载电流增加而降低,降低的幅度较他励时为大,其外特性稍软	充电、电镀、电解、冶炼等用直流电源
复 励 ^①	积复励	不超过 6%	输出端电压在负载变动时变化较小。电压变化率由复励程度即串、并励的安匝比决定	直流电源,如起重轮胎吊和用柴油机带动的独立电源等
	差复励	电压变化率较大	输出端电压随负载电流增加而迅速下降,甚至降为零	如用于自动舵控制系统中作为执行直流电动机的电源
串 励	—		有负载时,发电机才能输出端电压,输出电压随负载电流增大而上升	用作升压机

① 串励绕组和并励绕组的极性同向的,称积复励;极性反向的,称差复励,通常所称复励直流电机是指积复励。在复励直流发电机中,串励绕组使其空载电压和额定电压相等的,称为平复励;使其空载电压低于额定电压的,称为过复励;使其空载电压高于额定电压的,称为欠复励。根据串励绕组在电机接线中连接情况,复励直流电机接线有短复励和长复励之分。

表 21-1-3 直流电机及其派生、专用产品的用途和分类

序 号	产 品 名 称	主 要 用 途	型号 ^①	原 用 型 号
1	直流电动机	一般用途,基本系列	Z	Z、ZD、ZJD
2	直流发电机	一般用途,基本系列	ZF	Z、ZF、ZJF
3	广调速直流电动机	用于恒功率调速范围较大的传动机械	ZT	ZT
4	冶金起重直流电动机	冶金辅助传动机械等用	ZZJ	ZZ、ZZK、ZZY
5	直流牵引电动机	电力传动机车、工矿电机车和蓄电池供电车等用	ZQ	ZQ
6	船用直流电动机	船舶上各种辅助机械用	Z-H	Z ₂ C、ZH
7	船用直流发电机	作船舶上电源用	ZF-H	Z ₂ C、ZH
8	精密机床用直流电动机	磨床、坐标镗床等精密机床用	ZJ	ZJD
9	汽车起动机	汽车、拖拉机、内燃机等用	ST	ST
10	汽车发电机	汽车、拖拉机、内燃机等用	F	F
11	挖掘机用直流电动机	冶金矿山挖掘机用	ZKJ	ZZC
12	龙门刨床用直流电动机	龙门刨床用	ZU	ZBD
13	防爆安全型直流电动机	矿井和有易爆气体的场所用	ZA	Z
14	无槽直流电动机	快速动作伺服系统中用	ZW	ZWC
15	力矩直流电动机	用于位置或速度伺服系统中作为执行元件	ZLJ	
16	直流测功机	测定原动机效率和输出功率用	CZ	ZC

① 参见第一机械工业部标准《电机产品型号》

表 21.1-4 直流电机的主要结构件



- ① 叠片机座时
- ② 外通风及大型直流电机一般不带风扇
- ③ 按使用要求装设
- ④ 大型和部分中型直流电机有底板

本。如为了进一步提高直流电动机的动态特性和技术经济指标,应积极推广采用 F 级、H 级绝缘材料,使电机在保证电机性能要求的基础上,能加大电机电枢铁心长度与直径的比值,进一步缩小电枢直径,减小转动惯量。大型直流电动机还要特别注意发展有利于改善换向性能和降低转动惯量的新型电枢结构。

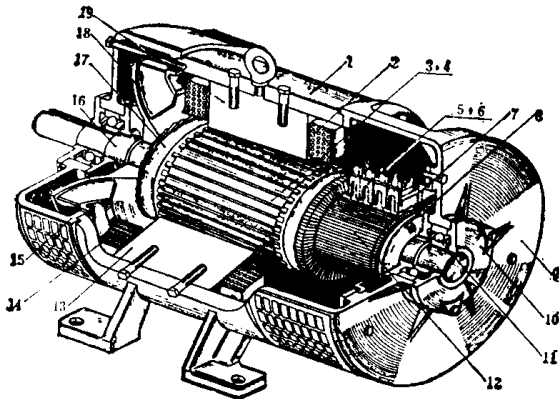


图 21.1-1 防滴型卧式自扇冷直流电机

- 1—机座 2—主极励磁绕组 3—电枢铁心 4—
电枢绕组 5—刷握 6—电刷 7—刷杆 8—平
衡环 9—后端盖 10—轴承盖 11—轴承
12—换向器 13—换向极铁心 14—换向极绕组
15—前端盖 16—轴 17—电枢绕组端部绑扎
18—风扇 19—主极铁心

3 功率、电压和转速等级

直流电机在规定的使用环境和运行条件下，主要技术数据有：额定功率、额定电压、额定转速、额定电流、励磁方式和励磁电压等。

直流电机额定功率和额定转速的比值相当于电机的转矩,电机转矩的大小决定了电机的几何尺寸。所以,通常以额定功率和额定转速来划分直流电机的大小:1500 转/分、功率为 200 千瓦及以下的称为小型直流电动机;1500 转/分、功率为 200 千瓦以上到 1000 转/分、功率为 1250 千瓦及以下的称为中型直流电动机;1000 转/分及以下、功率为 1250 千瓦以上的称为大型直流电动机。直流电机的额定功率、额定电压和额定转速都有规定的标准等级。

3.1 功率等级

直流电机采用的额定功率等级见表 21·1-5。直流电动机采用硬性功率等级, 即同一功率数值应用于不同的额定转速。功率在 100 千瓦以下基本上是

按比值 1.35 递增的; 100 千瓦到 1600 千瓦是按 R10 数系递增的。直流发电机的额定功率等级是从电动机-发电机-电动机控制系统考虑确定的, 在 1450 千瓦以下的直流发电机, 它的额定功率与交流异步电动机的功率相匹配; 在 1450 千瓦以上的则与供电给传动直流电动机的功率相匹配。

表 21.1-5 直流电机的功率等级 kW

直流电动机							
0.37	0.55	0.75	1.1	1.5	2.2	3	4
5.5	7.5	10	13	17	22	30	40
55	75	100	125	160	200	250	320
400	500	630	800	1000	1250	1600	2050
2600	3300	4300	5350	6700			
直流发电机							
0.7	1.0	1.4	1.9	2.5	3.5	4.8	6.5
9	11.5	14	19	26	35	48	67
90	115	145	185	240	300	370	470
580	730	920	1150	1450	1900	2400	3000
3600	4600	5700	7000				

3.2 电压等级

直流电机的额定电压等级见表 21.1-6。一般用途基本系列直流发电机的额定电压在 115 伏以上。

表 21.1-6 直流电机的电压等级 V

直流电动机							
110	160	220	(330)	440	630 (660)	800	1000
直流发电机							
6	12	24	36	48	72	115	230
(330)	460	630 (660)	800	1000			

注 表中有括号的电压不常使用。

3.3 转速等级

直流电机的转速等级见表 21.1-7。直流电动机的转速等级, 500 转/分及以上按同步转速等级; 500 转/分以下按 R10 数系分级。直流发电机按同步转速分级, 也可用与表列转速相应的异步电动机转速。

表 21.1-7 直流电机的转速等级 r/min

直流电动机							
3000	1500	1000	750	600	500	400	320
250	200	160	125	100	80	63	50
40	32	25					
直流发电机							
3000	1500	1000	750	600	500	427	375
333	300						

4 直流电机转矩与重量的关系

200 千瓦以下定子用铝线的系列, 小型直流电机转矩与重量的关系近似曲线见图 21.1-2。

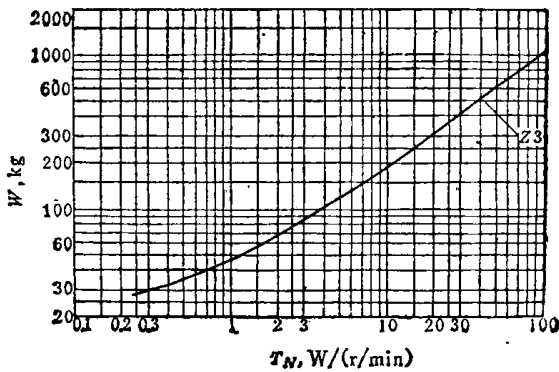


图 21.1-2 200 千瓦以下小型直流电机
转矩与重量关系近似曲线

第2章 工作原理

1 基本工作原理

直流电机是借换向器和电刷以实现外电路的直流电与电枢绕组中交流电之间相互变换并同时借静止气隙磁场以实现电枢绕组中交流电与转轴上机械转矩之间相互变换的电机。直流电机的定子磁轭、主极铁心、气隙和电枢铁心构成磁路,如图21-2-1a所示。励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势在气隙内形成气隙磁场。电枢绕组相对气隙磁场旋转感生电枢电动势;载流电枢绕组与气隙磁场相互作用产生电磁转矩。机械功率和电功率分别通过转轴和电刷输入或输出,从而实现机电能量转换。

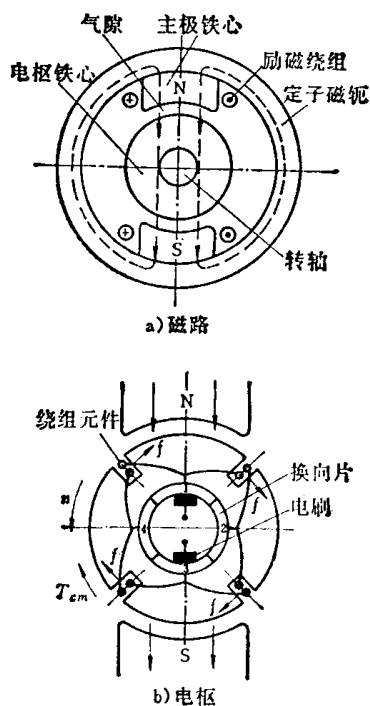


图 21-2-1 直流发电机的磁路与电枢示意图

1.1 电枢电动势

电枢绕组是由绕组元件按一定规律和换向片连接而成,如图21-2-1b所示。电枢旋转时,根据电磁感应定律 $e = Blv$, 绕组各个元件边相对气隙磁场运动而感应出电动势,元件电动势即为其两个元件边

的电动势之和。电枢电动势为电枢绕组正负极性电刷之间任一并联支路内各串联元件电动势的总和。

元件交替通过不同极性磁场所感应的电动势为交变电动势;但由于电刷与换向片相对旋转而与主极相对静止,每条支路内各元件所处的磁场位置维持不变,因此通过电刷与换向片的及时换接,支路电动势(即电枢电动势)为直流电动势。为使支路电动势最大,被电刷所短接的元件的轴线应与主极中心线重合,即通常所称电刷应处于中性位置。

当电机的极对数为 p , 元件数为 S , 每个元件有 W_a 匝, 绕组共有 a 对支路和导体 $N = 2SW_a$ 根, 则在电刷处于中性位置时, 其电枢电动势可按下式计算:

$$E_a = C_e \Phi n \quad (21.2-1)$$

式中 $C_e = \frac{pN}{60a}$ —— 电动势常数

Φ —— 每极气隙磁通 Wb

n —— 电枢转速 r/min

电枢电动势的极性根据磁场极性与旋转方向按右手定则决定, 若二者只变其一, 则电动势极性改变, 若二者同时改变, 则电动势极性不变。

1.2 电磁转矩

根据电磁力定律 $f = Bli$, 处于气隙磁场中的载流电枢绕组的各个元件边都将受到切向电磁力的作用, 如图21-2-1b所示。当电刷处于中性位置时, 通过电刷的总电流为 I_a , 则电磁转矩可按下式计算:

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (21.2-2)$$

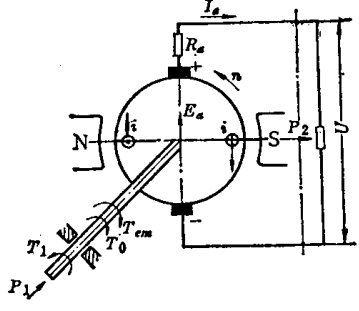
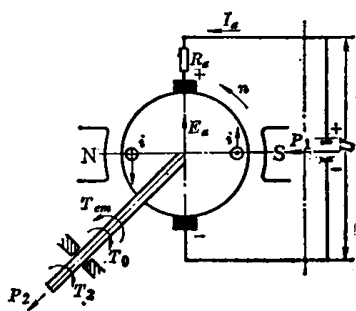
式中 $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ —— 转矩常数

有槽电枢的电磁力为齿部与绕组元件所受力之和, 无槽电枢的电磁力全部作用在绕组元件上, 两种电枢结构的电磁力作用部位虽有区别, 但其电磁转矩相等, 均可按式(21-2-2)计算。电磁转矩同时作用在电枢和主极上, 其大小相等, 方向相反。

$$\ominus \quad 1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$$

$$\ominus \quad 1 \text{ N}\cdot\text{m} = \frac{1}{9.81} \text{ kgf}\cdot\text{m}$$

表 21.2-1 直流电机的电压、转矩和功率平衡

	发 电 机	电 动 机
工 作 原 理	 1 发电机由原动机拖动,以转速 n (角速度 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$) 旋转,原动机输入的转矩为 T_1,输入的机械功率为 $P_1 = T_1\Omega$ 2 发电机旋转后,电枢绕组感生电动势 E_a,接入负载后,输出电流 I_a,发电机端电压为 U,发电机输出的电功率为 $P_2 = UI_a$ 3 发电机电磁转矩 T_{em} 与 n 方向相反,为反转矩。原动机用以克服反转矩所消耗的机械功率 $T_{em}\Omega$ 转换为电枢绕组所获得的电功率 $E_a I_a$, $P_{em} = T_{em}\Omega = E_a I_a$ 称为电磁功率	 1 电动机接至端电压为 U 的电源,通入电流 I_a,输入的电功率为 $P_1 = UI_a$ 2 电动机通以电流后,产生电磁转矩 T_{em},克服负载阻转矩 T_2,以转速 n (角速度 Ω) 旋转。电动机输出的机械功率为 $P_2 = T_2\Omega$ 3 电动机感应电动势 E_a 与 I_a 方向相反,为反电动势。电源用以克服反电动势所消耗的电功率 $E_a I_a$ 转换为轴上获得的机械功率 $T_{em}\Omega$, $P_{em} = E_a I_a = T_{em}\Omega$ 称为电磁功率
电压平衡方程式	$U = E_a - (I_a R_a + \Delta U_b)$	$U = E_a + (I_a R_a + \Delta U_b)$
转矩平衡方程式	$T_1 = T_{em} + T_0$	$T_2 = T_{em} - T_0$
功率平衡方程式	$P_1 = P_{em} + P_0$ $P_2 = P_{em} - P_0$ $P_1 = P_0 + P_a + P_2$	$P_1 = P_{em} + P_a$ $P_2 = P_{em} - P_0$ $P_1 = P_0 + P_a + P_2$

电枢上电磁转矩的方向根据磁场极性与电枢电流的方向按左手定则决定,二者只变其一,转矩方向改变;二者同时改变,转矩方向不变。

1.3 电压、转矩和功率平衡

直流电机的能量转换过程是可逆的,可作发电机运行,也可作电动机运行 $\ominus$ 。

直流电机稳定运行时的电压、转矩和功率平衡如表 21.2-1 所示。

表中 R_a ——电机电枢回路电阻

ΔU_b ——正负电刷的接触电阻压降

T_0 ——涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩,其作用方向与电机转向相反

P_a ——电枢回路总损耗, $P_a = I_a^2 R_a + I_a \Delta U_b$

P_0 ——涡流、磁滞与通风摩擦损耗, $P_0 = T_0 \Omega$

2 电枢反应

负载时,电枢绕组中的电流将产生电枢磁动势。电枢磁动势轴线所在的空间位置随电刷的位移而移动,其空间分布为三角形,实际上,电枢电流集中在槽内,其空间分布为阶梯形,如图 21.2-2 所示。气隙磁场将由励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势所决定。电枢磁动势对气隙磁场的影响称为电枢反应。

$\ominus$ 发电机作电动机使用时,为使转速能达到铭牌值,应适当减少励磁电流或提高电源电压,且适当降低输出功率,使电枢电流不超过铭牌值;电动机作发电机使用时,为使电压能达到铭牌值,应适当提高转速或增大励磁电流,但励磁绕组温升不应超过允许值。对于具有串励绕组的直流电机,在改变用途时,应将串励绕组出线调换改接。

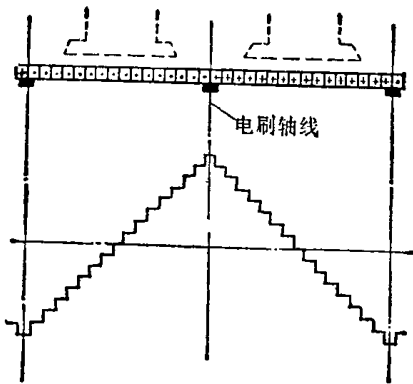


图 21·2-2 电枢磁动势的空间分布

电枢磁动势按其轴线所在空间位置和对气隙磁场影响的不同,有交轴电枢磁动势和直轴电枢磁动势之分。直轴与主极中心线重合,交轴与极间几何中心线重合,交轴与直轴间夹角为 90° 电角度。交轴和直轴电枢磁动势对气隙磁场的影响,分别称为交轴电枢反应和直轴电枢反应。

2.1 交轴电枢反应

当电刷处于几何中性位置时,电枢磁动势的轴线在交轴上,如图 21·2-3 所示,电枢磁动势 F_a 全部为交轴电枢磁动势 F_{aq} ,即 $F_a = F_{aq}$ 。交轴电枢磁动

势对气隙磁场的影响是:

(1) 使主极中心线一侧极靴下的磁场增强,另一侧减弱,从而使气隙磁场发生畸变,如图 21·2-4 所示。气隙磁场畸变后,气隙磁场的零点将从空载时的几何中性线 $n-n'$ 移至负载时的物理中性线 $E-E'$,并使同一主极下各个元件边的感应电动势不等,从而导致换向器片间电压分布不均。

(2) 在磁路不饱和的情况下,主极中心线一侧气隙磁通的增加量与另一侧的减小量相等,每极磁通与空载时仍相等,有效磁通不变。但当磁路饱和时,由于磁密增大的一侧其磁路饱和度提高,磁阻增大,因此主极中心线一侧气隙磁通的增加量将小于另一侧的减少量,从而使负载时每极磁通较空载时为小,呈现去磁效应。交轴电枢反应的去磁效应在发电机中将使电压降低;在电动机中将使转速升高。

交轴电枢反应所造成的不良后果可采用补偿绕组予以补偿,或采用偏心气隙,主极极靴削角等加以抑制,见第 4 章。

2.2 直轴电枢反应

当电刷偏离几何中性线 α 角时,电枢磁动势

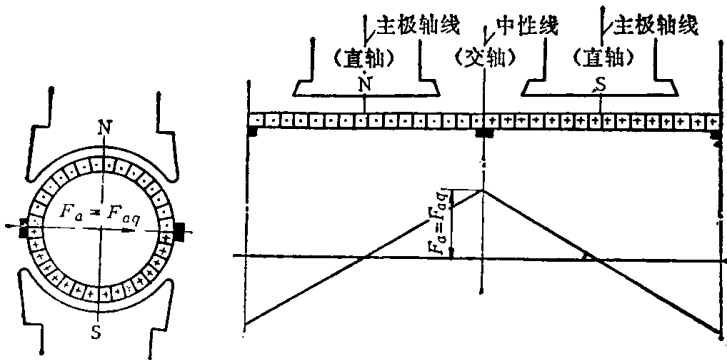


图 21·2-3 交轴电枢磁动势

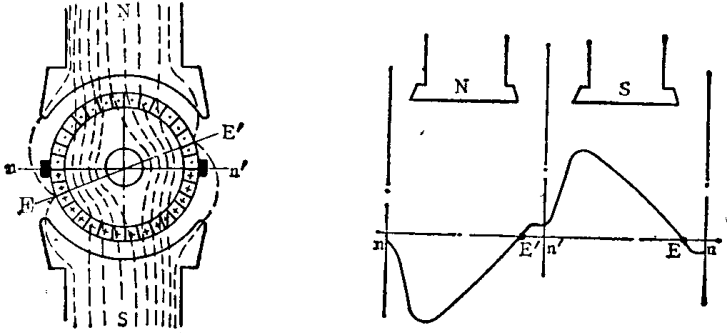


图 21·2-4 负载时的气隙磁密分布

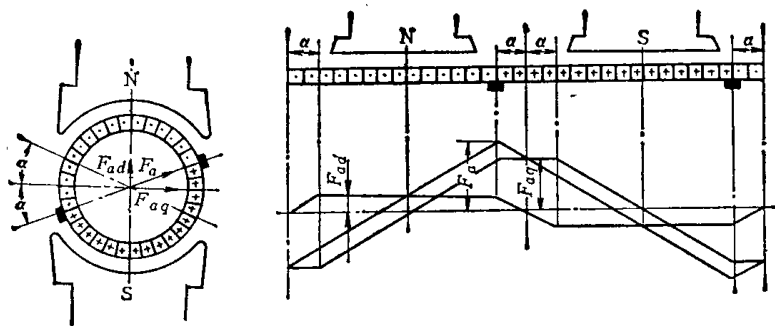


图 21·2-5 电枢磁动势的直轴与交轴分量

F_a 可分解为 F_{ad} 与 F_{aq} 两个分量如图 21·2-5 所示。分量 F_{ad} 由几何中性线两侧 2α 角范围内的安匝所产生，其轴线在直轴上，称为直轴电枢磁动势；其余部分则产生交轴电枢磁动势 F_{aq} 。直轴与交轴电枢磁动势在空间均按梯形规律分布。

直轴电枢磁动势不会造成气隙磁场的畸变，它对气隙磁场的影响是去磁或增磁，视电刷的位移方向和电机的工作状况而定，见下表：

	顺转向移刷	逆转向移刷
发 电 机	去 磁	增 磁
电 动 机	增 磁	去 磁

在直流电机中，有时适当少量移动电刷，利用其增磁或去磁效应以获得所要求的性能。

3 运行特性

3.1 直流发电机的主要工作特性

直流发电机的端电压 U ，电枢电流 I_a 和励磁电流 I_f 三者之间的关系，表征着它的工作特性。直流发电机经常是恒转速运行的，所以其工作特性都是以转速 n 为常数作基础。在这三个物理量中，最重要的是端电压。直流发电机的主要工作特性有空载特性、负载特性、外特性和调整特性等，其中以负载特性和外特性更为重要。不同励磁方式的直流发电机有不同的工作特性。他励、并励和复励直流发电机的工作特性见表 21·2-2。串励发电机中 $I_f = I_a = I$ ，其空载特性，负载特性曲线仅能按他励方式时才

表 21·2-2 直流发电机的主要工作特性

特 性 名 称	特 性 类 别	他 励	并 励	复 励
空 载 特 性		1 空载特性曲线表示电枢电动势 E_a 与励磁电流 I_f 之间的关系，也是空载气隙磁通 Φ 与主极励磁安匝 ΣF 之间的关系曲线，它反映了电机工作点的饱和程度，可由磁路计算绘出，或在他励、空载时测得 2 在 $I_f=0$ 时，磁路中的剩磁仍能建立电压，称剩磁电压 (U_R)，其值约为额定电压的 2~5%		
		1 剩磁电压 U_R 是自励发电机能够自励的必要条件。自励时剩磁电压所产生的励磁磁动势必须与剩磁的极性一致 2 空载特性曲线通过原点的切线，称励磁回路临界电阻线，励磁回路的电阻小于临界电阻 $R_{cr} = \frac{U_R}{I_{f0}}$，方能实现自励并稳定运行		

(续)

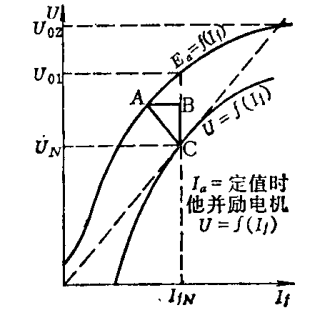
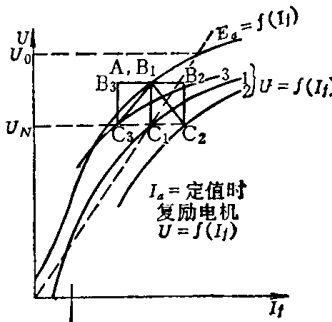
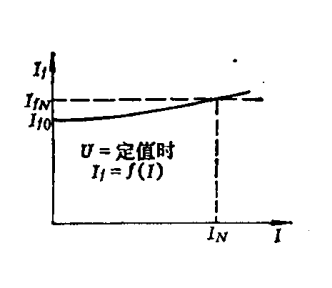
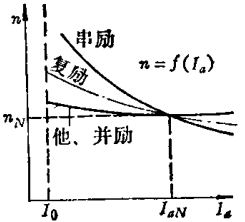
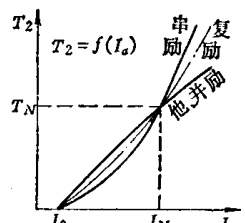
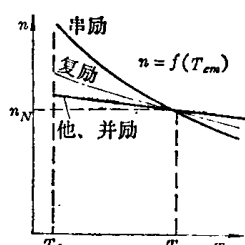
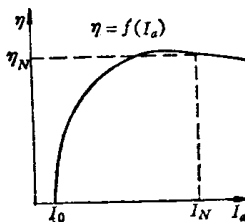
	特性类别	他励	并励	复励
负载特性	 1 串励与电枢反应抵消时的负载特性 2 串励相对偏弱时的负载特性 3 串励相对偏强时的负载特性	负载特性表示电枢电流 I_a 不变时,端电压 U 随励磁电流 I_f 而变化的规律,可由空载特性和负载特性三角形 $\triangle ABC$ 绘出。$\triangle ABC$ 的大小决定于电枢电流 I_a 值, AB 边平行于 I_f 轴,表示电枢反应与串励效应之和; BC 边平行于 U 轴,表示电枢回路电阻压降。当 A 点在空载特性曲线上,则 C 点在负载特性曲线上。负载特性三角形是分析直流电机各种特性之间关系的一个有用工具。由负载特性可以确定运行时所需的励磁电流值		
		I_f = 定值的直线与空载特性和负载特性的交点,分别为励磁电流不变时的空载电压 U_{01} 及负载电压 U_N	并励回路电阻线与空载特性和负载特性的交点分别为并励回路电阻不变时的空载电压 U_{02} 及负载电压 U_N	U_0 及 U_N 的确定方法与并励电机相同。特性三角形 AB 边包括串励效应。当串励的增磁效应与电枢反应去磁效应抵消时,则 A、B_1 点重合,负载特性如曲线 1; 若串励相对偏弱,则 B_2 在 A 右侧,负载特性如曲线 2; 若串励相对偏强,则 B_3 在 A 左侧,负载特性如曲线 3
外特性	 1—他励 2—并励 3—平复励 4—过复励 5—欠复励 6—差复励 7—串励	外特性表示励磁回路不作调节时端电压 U 随负载电流 I 而变化的规律,由外特性可以确定不同负载时的电压变化率		
		负载电流增加时,电枢反应的去磁效应与电枢回路电阻压降相应增大,端电压随负载电流增加而降低	由于励磁回路电阻 R_f 不变;励磁电流将随端电压的降低而减小,因此随着负载电流的增加,其端电压的降低较他励电机为大,特性较他励电机稍软	负载电流增加时,其端电压的变化取决于串励绕组的接法和串、并励的安匝比。$U_N = U_0$ 为平复励; $U_N > U_0$ 为过复励; 欠复励时 $U_N < U_0$, 外特性比并励为软; 差复励时 U 随 I 的增加而迅速下降
调整特性		1 负载电流 I 增加时,为保持端电压 U 不变,须相应增加励磁电流 I_f,以补偿电枢反应的去磁效应与电枢回路电压降 2 调整特性曲线表示保持端电压 U 恒定所必须的励磁电流调节范围		

表 21-2-3 直流电动机的主要工作特性

特性名称	特性类别	他、并励	串励	复励
转速特性		转速 $n = \frac{U - (I_a R_a + \Delta U_b)}{C_e \Phi}$。当 U 为常数, 电枢电流 I_a 变化时, 影响转速特性的因素是电枢回路电阻压降与气隙磁通的变化 $I_f = \text{定值}$, 气隙磁通 Φ 只受电枢反应的影响。I_a 增大时, 电枢回路电阻压降使转速趋于下降, 电枢反应去磁效应使转速趋于上升, 因而转速变化较小, 故有硬转速特性。通常电枢回路电阻压降影响较大, 转速略为下倾。过载时, 电枢反应影响增大, 转速曲线上翘	$I_f = I_a$, 气隙磁通 Φ 主要取决于负载电流的大小, 转速随负载的增加而迅速下降, 具有软的转速特性。轻载时, 励磁电流很小, 转速很高。因此, 不容许空载运行	通常采用积复励接法, 使运行稳定。并励绕组决定空载转速; 串励绕组使它的转速特性较软, 其转速特性介于并励与串励之间
转矩特性		输出转矩 $T_2 = C_T \Phi I_a - T_0$。空载时, $I_a = I_0 = \frac{T_0}{C_T \Phi}$。负载时, T_2 随 I_a 的增加而增加, 并与 Φ 随 I_a 而变的情况有关 $I_f = \text{定值}$, 轻载时, 转矩特性基本上是通过空载电流 I_0 点的直线; 过载时, 电枢反应的去磁作用增强, 特性偏离直线, 略为向下弯曲如左图	磁通随电流的增加而增大, 电枢电流较小而磁路未饱和时, 转矩按负载电流的平方关系增大; 电枢电流增大时, 由于磁路逐渐饱和, 加之电枢反应的影响, 转矩增大相对变慢	转矩特性取决于并励安匝与串励安匝之比, 介于并励与串励电动机转矩特性之间
机械特性		从转速-转矩公式 $n = \frac{U - \Delta U_b}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em}$ 可见, 机械特性具有与转速特性相似的形状。电枢回路串入外接电阻后, 其外特性将变软		
效率特性		效率 $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}$。总损耗 $\sum P$ 主要包括铜耗、铁耗和机械损耗等。空载时, $P_2 = 0$, 电枢电流为空载电流 I_0, 输入功率全部供给空载损耗, $\eta = 0$; 负载时, 当铜耗接近等于铁耗与机械损耗之和时, 效率最高。对于经常工作于轻载状态下的电动机, 一般应使铜耗大于铁耗与机械损耗之和; 经常过载的电动机则应尽量减小铜耗		

能求得,其形状与他励发电机相同,这种发电机只有 U 和 I 两个变量,即只有一种 $U=f(I)$ 外特性。串励发电机的端电压随负载而有很大的变化,因此实用价值很小,有时在特殊线路中作升压机用。

3.2 直流电动机的主要工作特性

直流电动机端电压保持恒定,他、并励的励磁电流不变时,其转速 n 、电磁转矩 T_{em} 、效率 η 与电枢电流 I_a 之间的关系,表示直流电动机的工作特性。其中,转速 n 和电磁转矩 T_{em} 是最重要的物理量。按励磁方式的不同,其工作特性如表 21.2-3 所示。

3.3 直流电动机稳定运行的条件

直流电动机的稳定运行是指当电网电压或轴上机械负载波动而使电动机转速发生变化时,电动机具有能恢复到原工作状态的能力。电动机的运行点为其机械特性 $n=f(T_d)$ 与被驱动机械负载的阻转矩特性 $n=f(T_c)$ 的交点,电动机能否稳定运行取决于这两条特性曲线是否配合恰当。

图 21.2-6 表示电动机稳定运行与不稳定运行两种状态。当外界条件变化使电动机转速增加时,在图 21.2-6a 所示的情况下电动机转矩 T_d 小于负载阻转矩 T_c ,即 $T_d < T_c$,而使电动机趋于降速,运行将是稳定的;而在图 21.2-6b 所示的情况下,则 $T_d > T_c$,将使电动机趋于继续升速,运行将是不稳定的。同样,当外界条件变化使电动机转速减小时,在图 21.2-6a 中, $T_d > T_c$,电动机趋于升速,运行是稳定的;而在图 21.2-6b 中, $T_d < T_c$,电动机趋于继续减速,运行是不稳定的。由此可见,若以 Δn 表示转速的增量, ΔT_d 与 ΔT_c 分别为转速增加 Δn 后电动机转矩与负载阻转矩的增量,则当

$$\frac{\Delta T_d}{\Delta n} < \frac{\Delta T_c}{\Delta n} \text{ 时电动机能稳定运行;}$$

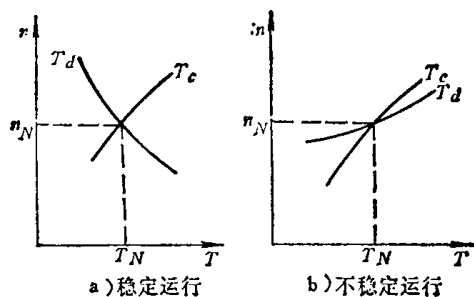


图 21.2-6 电动机运行的稳定与不稳定条件

$$\frac{\Delta T_d}{\Delta n} > \frac{\Delta T_c}{\Delta n} \text{ 时,电动机不能稳定运行。}$$

3.4 直流电动机的起动

在电动机的起动过程中,其电枢电流、电磁转矩和转速将随时间而变。电流和电磁转矩的最大值通常称为起动电流 I_{st} 和起动转矩 T_{st} 。起动电流倍数 I_{st}/I_N 和起动转矩倍数 T_{st}/T_N 是衡量起动性能的两项重要指标。直流电动机起动时,应具有足够的起动转矩,但起动电流不宜过大,应限制在容许范围内。在起动电流不超过容许值的情况下,为及时获得尽可能大的起动转矩。他、并励电动机起动时,应先励磁,并使磁通 Φ 达到最大,然后施加电枢电压。

直流电动机的起动特性与励磁方式有关。他、并励电动机的磁通 Φ 基本不变,故 $T_{st}/T_N \approx I_{st}/I_N$; 串励电动机的 Φ 随 I_a 增加而增加,故 $T_{st}/T_N > I_{st}/I_N$,因此,当 I_{st}/I_N 值相同时,串励电动机与并励电动机相比可获得更大的 T_{st}/T_N ,即具有更为优良的起动特性;复励电动机的起动特性则介于并励电动机与串励电动机之间。

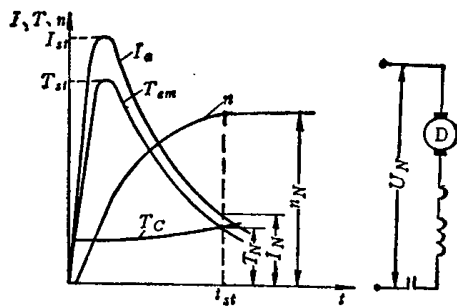


图 21.2-7 直接起动时 I_a 、 T_{em} 和 n 的变化

直流电动机有以下三种起动方法。

3.4.1 直接起动

电动机直接起动时,其电枢电流 I_a , 电磁转矩 T_{em} 和转速 n 的变化情况如图 21.2-7 所示。由于电枢回路的电感一般很小,而机组具有一定的机械惯性,因此,当电枢回路投入电网的瞬间,电枢仍处于静止状态,反电动势为零,电枢电流 I_a 将迅速上升至最大值 $I_{st} \approx \frac{U}{R_a}$,并产生相应的转矩 $T_{st} = C_T \Phi I_{st}$ 。若电磁转矩 T_{em} 大于阻转矩 T_c ,则在加速转矩 $(T_{em} - T_c)$ 的作用下,机组将开始转动并加速。

随着转速的升高,反电动势将随之增大而使电枢电流和电磁转矩相应减小,直至 T_{em} 与 T_c 相等,加速转矩为零,转速稳定。

直接起动不需附加起动设备,操作简便。但主要缺点是起动电流甚大,最大冲击电流可达额定电流的 15~20 倍,因此将使电网受到电流冲击,机组受到机械冲击,电动机换向恶化。直接起动只适用于功率不大于 4 千瓦,起动电流为额定电流的 6~8 倍的电动机。

3.4.2 电枢回路串电阻起动

起动时,电枢回路内串入起动电阻,以限制起动电流。起动电阻为一可变电阻,在起动过程中可及时逐级短接如图 21-2-8 所示。在 $t=0$,电枢回路投入电网时,串入全部电阻 r_{st} ,使起动电流 I_{st1} 不超过允许值。

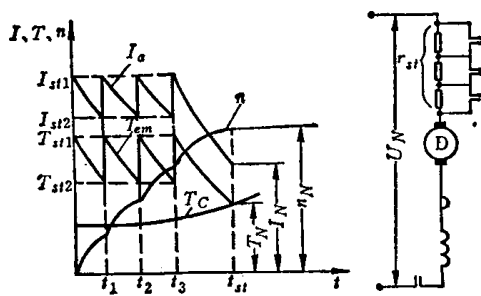


图 21-2-8 电枢回路串电阻起动时 I_a 、 T_{em} 和 n 的变化

$$I_{st1} = \frac{U}{R_a + r_{st}} \quad (21.2-3)$$

对应于 I_{st1} 的起动转矩为 T_{st1} 。这时转速上升,反电动势增加,电流和转矩下降,至 $t=t_1$ 时,降到 I_{st2} 和 T_{st2} ,切除部分电阻,使电流和转矩回升到接近 I_{st1} 和 T_{st1} ,这样继续升速,再切除部分电阻,如此进行直至 r_{st} 全部切除,机组达稳定运行点。在起动过程中, I_a 、 T_{em} 及 n 的变化情况见图 21-2-8。

这种起动方法广泛应用于各种中小型直流电动机。起动过程中能量消耗较大,不适用于经常起动的和中大型直流电动机。

3.4.3 降压起动

由单独的电源供电,用降低电源电压的方法来限制起动电流。降压起动时起动电流将随电枢电压的降低程度按正比地减少。为使电机能在最大磁场

情况下起动,在起动过程中励磁应不受电源电压的影响,故电动机应采用他励。电动机起动后,随着转速的上升,可相应提高电压,以获得所需要的加速转矩。

用这种方法起动时,起动过程中消耗能量少,起动平滑,但需专用电源设备,多数用于要求经常起动的和中大型直流电动机。

3.5 直流电动机的调速

直流电动机可以在宽广范围内平滑地调速。当电枢回路内接入调节电阻 r 时,

$$n = \frac{U - I_a(R_a + r) - \Delta U_b}{C_\phi \Phi} \quad (21.2-4)$$

从上式可看出,直流电动机可采用调节励磁电流、电枢端电压和电枢回路电阻等方法进行调速。不同调速方法的主要特点、性能和适用范围见表 21-2-4。

3.6 直流电动机的制动

为使电动机迅速停转、迅速减速或限制其转速过分升高,通常采用使电磁转矩反向的方法来进行电磁制动。直流电动机的电磁制动有能耗制动、反接制动和回馈制动三种,其制动原理与特点见表 21-2-5。

3.7 直流发电机的并联运行

直流发电机投入并联运行时必须使各台发电机的电压相等,接于同一汇流排的各台发电机的极性必须相同。

a. 他励、并励发电机并联运行时的负载分配

并联运行时,各发电机组间的负载分配将由它们的外特性决定,见图 21-2-9。外特性下倾较陡的发电机分担的负载较小。可以调节发电机的励磁电流或转速来改变其外特性的相互位置从而改变它们之间

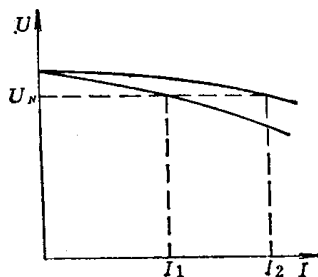


图 21-2-9 他励、并励发电机并联运行时的负载分配

表 21.2-4 直流电动机不同调速方法的主要特点、性能和适用范围

调速方法	调节励磁电流	调节电枢端电压	调节电枢回路电阻
线路图及特性曲线			
主要特点	1 $U = \text{常值}$, 转速 n 随励磁电流 I_f 和磁通 Φ 的减小而升高 2 转速愈高, 换向愈困难, 电枢反应和换向元件中电流的去磁效应对电动机运行稳定性的影响愈大。最高转速受机械因素、换向和运行稳定性的限制 3 电枢电流保持额定值不变时, T 与 Φ 成正比, n 与 Φ 成反比, 输入、输出功率及效率基本不变	1 $\phi = \text{常值}$, 转速 n 随电枢端电压 U 的减少而降低 2 低速时, 机械特性的斜率不变, 稳定性好。由发电机组供电时, 最低转速受发电机剩磁的限制 3 电枢电流保持额定值不变时, T 保持不变, n 与 U 成正比, 输入、输出功率随 U 和 n 的降低而减小, 效率基本不变	1 $U = \text{常值}$, 转速 n 随电枢回路电阻 r 的增加而降低 2 转速愈低, 机械特性愈软。采用此法调速时, 调速变阻器可作起动变阻器用 3 电枢电流保持额定值不变时, T 保持不变, 可作恒转矩调速, 但低速时, 输出功率随 n 的降低而减小, 而输入功率不变, 效率将随 n 的降低而降低, 经济性很差
适用范围	适用于额定转速以上的恒功率调速	适用于额定转速以下的恒转矩调速	只适用于额定转速以下, 不需经常调速, 且机械特性要求较软的调速

的负载分配。由于他励、并励发电机具有下倾的外特性, 因此它们的并联运行是稳定的。

b. 积复励发电机并联运行时的均衡联接 积复励发电机若由于串励绕组的增磁作用而使外特性上翘, 则其电压将随负载的增加而增大。在这种情况下, 当某台发电机发生负载变动时, 它们之间的负载分配可能出现自动转移的不稳定现象。为使积复励发电机能稳定地并联运行, 通常将它们的串励绕组在近电枢端用低电阻的均流线连接起来, 如图 21.2-10 所示。均流线的作用是使两台发电机电串励绕组中的电流按其电阻成反比分配, 而与负载电流

的分配无关。
具有均流线的积复励发电机并联运行时, 其负

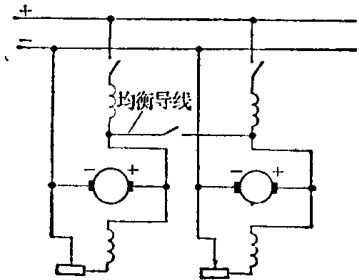


图 21.2-10 积复励发电机的并联运行

表 21-2-5 直流电动机不同制动方式的原理和特点

制动方式	能耗制动	反接制动	回馈制动
原理图			
原理说明	1 保持励磁不变,电枢回路从电源切断,接入制动电阻,从而电枢电流反向,电磁转矩与电机转向相反 2 制动时,电机作发电机运行,向制动电阻供电。机组的惯性动能转化为制动电阻与机组本身的损耗 3 转速愈低,制动效果愈差。因此,当转速降低到一定程度后,如有必要,往往起用机械制动来加强制动效果	1 保持励磁不变,电枢回路与电源经一限流电阻作反极性串接,使电枢电流反向,电磁转矩与转向相反 2 制动时,电动机作发电机运行,与电源串接向限流电阻供电。电源电能与机组惯性动能转化为限流电阻与机组本身的损耗 3 转速降低后,仍有良好的制动效果,但须消耗电源一定的电能。采用此法使机组停转时,应及时切断电源,防止发生反向再起	1 保持励磁不变,当转速升高到一定程度时, $U < E_a$, 电枢电流反向,电磁转矩与转向相反 2 制动时,电机作发电机运行,使电机加速的位能转化为电能向电网回馈 3 制动过程中,不消耗电网能量,且可回收电能
适用范围	用于使机组停转	用于要求迅速制动停转并反转	只能用于限制转速过分升高,如电力机车下坡、竖井升降机下降等

载分配与并励发电机并联运行时的相似。负载的转移可借调节并励绕组电流来进行。

磁作用,从而降低两电动机负载分配的不均匀程度。

3.8 直流电动机的同轴运行

为减小拖动系统的转动惯量,有时用二台或二台以上相同规格的电动机同轴拖动。同轴运行时各台电动机的负载分配按其机械特性而定。

同轴拖动的两电动机其主电路可串联接线也可并联接线。

串联接线时两电动机具有相同的负载电流,负载分配平均。为降低线路对地电压,多采用双发电机-双电动机接线如图 21-2-11 所示,使线路各段对地电压均不高于单机电压。

并联接线时,为使两电动机的负载均匀分配,通常在电枢回路内串接差动平衡绕组,平衡绕组分成两半并在两电动机之间作交叉连接,如图 21-2-12。当负载分配均匀时,平衡绕组的磁动势相互抵消;当负载分配不均匀时,负载大的电动机其平衡绕组将起增磁作用,而负载小的电动机其平衡绕组则起去

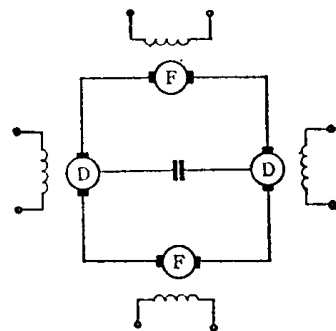


图 21-2-11 双发电机-双电动机串联接线

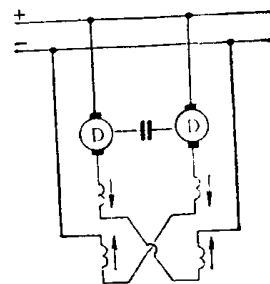


图 21-2-12 具有平衡绕组的电动机并联接线

第3章 电枢绕组

1 一般特征

直流电机的电枢绕组是感生电动势、产生电磁转矩、实现能量转换的关键部件之一。

1.1 绕组构成

电枢绕组由多个元件构成, 绕组元件一般安放在电枢槽内, 并以一定的规律与换向片连接形成闭合回路。由元件所组成的闭合回路通过换向器被正、负电刷截分成若干并联支路, 并通过正、负电刷与外电路相连。每一支路各元件的对应边一般均应处于相同极性的磁场下, 以获得最大的支路电动势和电磁转矩。电枢绕组每个元件的匝数 W_a 可以是单匝、多匝或分数匝, 如图 21.3-1 所示。

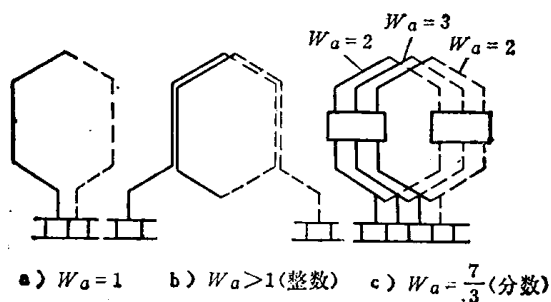


图 21.3-1 单匝和多匝元件

绕组元件的两个边分别置于不同槽的上、下层内, 每槽每层并列的元件边数 u 通常为 1~5 个, 如图 21.3-2 所示。当 u 大于 1 时, 并列的元件可以布置为同槽式或异槽式, 如图 21.3-3 所示。

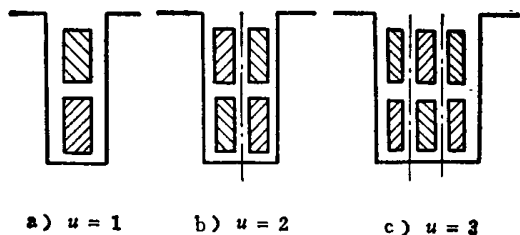


图 21.3-2 槽内各元件边的安置

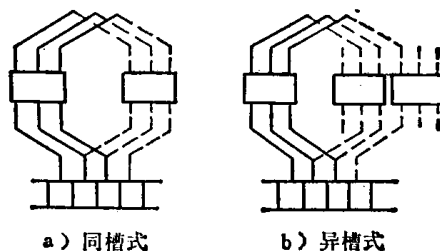


图 21.3-3 元件在槽内的布置

电机的元件总数 S 为电枢槽数 Z 与 u 的乘积, 且与换向片数 K 相等, $S=K=Zu$ 。绕组总导体数 N 为 W_a 与 S 乘积的两倍, $N=2SW_a$ 。 Z 、 u 、 S 、 K 、 W_a 、 N 等为绕组的基本数据。

1.2 绕组节距

绕组元件在槽内的安放位置, 及其与换向片之间的连接规律由下列五种节距确定:

a. 槽节距 y_s 为一个元件的两个边在电枢圆周上的跨距, 用槽数表示。 y_s 值应等于或接近于一个极距内的槽数。

$$y_s = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon_s \quad (21.3-1)$$

式中, $\epsilon_s \leq 1$, 取“-”号时, 为短距绕组; 取“+”号时, 为长距绕组; $\epsilon_s=0$ 时, 为整距绕组。

整距绕组的感应电动势和电磁转矩最大, 短距与长距绕组对换向有利, 通常采用短距绕组。

b. 第一节距 y_1 为一个元件的两个元件边在电枢圆周上的跨距, 用换向片数表示。

$$y_1 = \frac{K}{2p} \mp \epsilon_K = u \left(\frac{Z}{2p} \mp \epsilon_s \right) \quad (21.3-2)$$

c. 换向器节距 y_K 为一个元件的两个出线端在换向器上的跨距, 用换向片数表示。 y_K 值取决于绕组的类型。

d. 合成节距 y 为两个串联元件的对应边在电枢圆周上的跨距, 用换向片数表示, 其值与 y_K 相等。

e. 第二节距 y_2 为接在同一换向片上的两个