

第4篇

直流电机

主编单位 哈尔滨大电机研究所

编写单位 哈尔滨大电机研究所

哈尔滨电机厂

上海交通大学

上海电机厂

机械工业部上海电器科学研究所

东方电机厂

上海南洋电机厂

主 编 胡鉴清

副 主 编 王洁民

编 写 人 王洁民 高文英 陈立人 陈永伉

游寿康 郑耀斌 王耀清 忻志正

姚秋亮

主 审 钱振蒙 武会军

第 1 章 概 论

直流电机是一种将直流电能转换成机械能（直流电动机）或将机械能转换成直流电能（直流发电机）的旋转电机。通常所称的直流电机是指磁极极性沿圆周按 N、S 极交替排列，利用换向器和电刷对电枢电路内部电流进行换向的异极直流电机。另一类直流电机是应用单极感应原理，不需要进行换向的单极电机。

1 直流电机的用途和分类

直流电动机具有：(1) 优良的调速特性，调速平滑、精确、方便和范围宽广；(2) 过载能力大，能承受频繁的冲击负载；(3) 可实现频繁的无级快速起动、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。因而特别适用于需要宽广、精确调速的场合和要求有特殊运行性能的自动控制系统，例如冶金矿山、交通运输、纺织印染、造纸印刷以及化工与机床等工业。由于可以用蓄电池电源供电运行，它还可以用作停电时的备用电动机或在特殊环境中使用的电动机。

直流发电机能提供基本无脉动的电源，输出的电压可精确地调节和控制，主要用作各类直流电动机的电源，需要励磁的各类电机的励磁电源，电化学工业中电解、电镀和真空冶炼等的低电压、大电流的直流电源。目前大多数直流发电机已被晶闸管整流电源取代。

直流电机还可用作测功、测速等装置。

直流电机的运行特性与其励磁方式有密切联系。按励磁方式，直流电机可分为并励（图 4·1-1a）、复励（图 4·1-1b 和 c）、串励（图 4·1-1d）和他励（图 4·1-1e）^① 四种。小容量直流电机还有用永久磁钢做磁极的永磁直流电机。

直流电机还可以分别按转速、电流、电压、用途、工作定额以及按防护等级、安装结构型式和通风冷却方式等进行分类。

2 直流电机的功率、电压和转速

直流电机在规定的使用环境、运行条件和绝缘等级下的主要技术数据有：额定功率、额定电压、额定转速和励磁电压等。

直流电机系列的额定功率、电压和转速等级以往常采用硬性等级^②分级。电动机采用晶闸管整流电源供电后，其额定电压不再像用直流发电机供电时那样受到严格限制，同时为了充分发挥直流电动机的潜力，额定功率和转速也不再受硬性等级的约束，基本上可随额定电压成正比变化。这样同一转子可派生出若干电机规格，既扩大了系列的品种规格，方便用户选用，又有利于制造厂组织通用化、标准化零部件生产，此外还能减少备品备件品种、规格。这种软性等级目前已在大中型直流电动机系列中采用。小型系列一般仍用硬性等级。

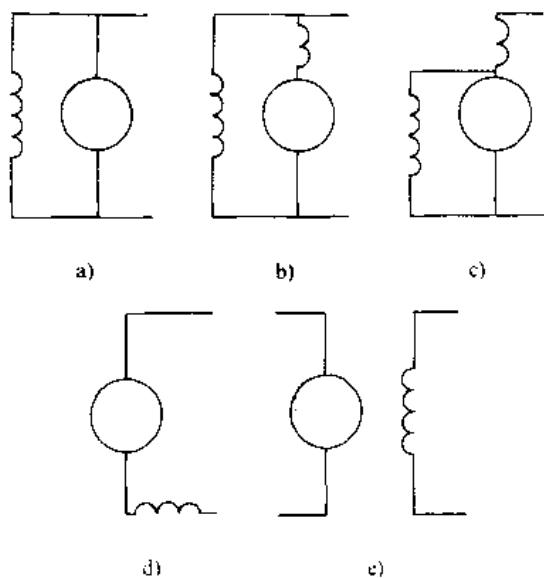


图 4·1-1 励磁方式

① 并励包括带少匝串励稳定绕组的稳定并励；复励按并励绕组接点位置分长并联和短并联（图 4·1-1b 和 c）两种。对于直流电动机，他励是指主极励磁绕组和电枢电路分别由两个电源供电，并励则由一个电源供电。

② 硬性等级是指系列电机的额定功率、电压和转速按规定的规律进行分级，而同一功率数值可应用于不同的额定电压和额定转速。在硬性等级情况下，直流电机的额定功率在 100kW 及以下时，等级一般按比值 1.35 递增；100kW 以上时一般按 R10 数系递增。额定转速在 500r/min 及以上时一般按同步转速分级；在 500r/min 以下时一般按 R10 数系分级。额定电压按 GB156《标准电压》规定分级。

3 直流电机的结构概况

直流电机在结构上的主要特征是电枢上带有换向

器,磁极是静止的。直流电机的结构取决于机械和电磁负载、运行特性、工作方式以及防护、安装、冷却方式和运输等的要求。

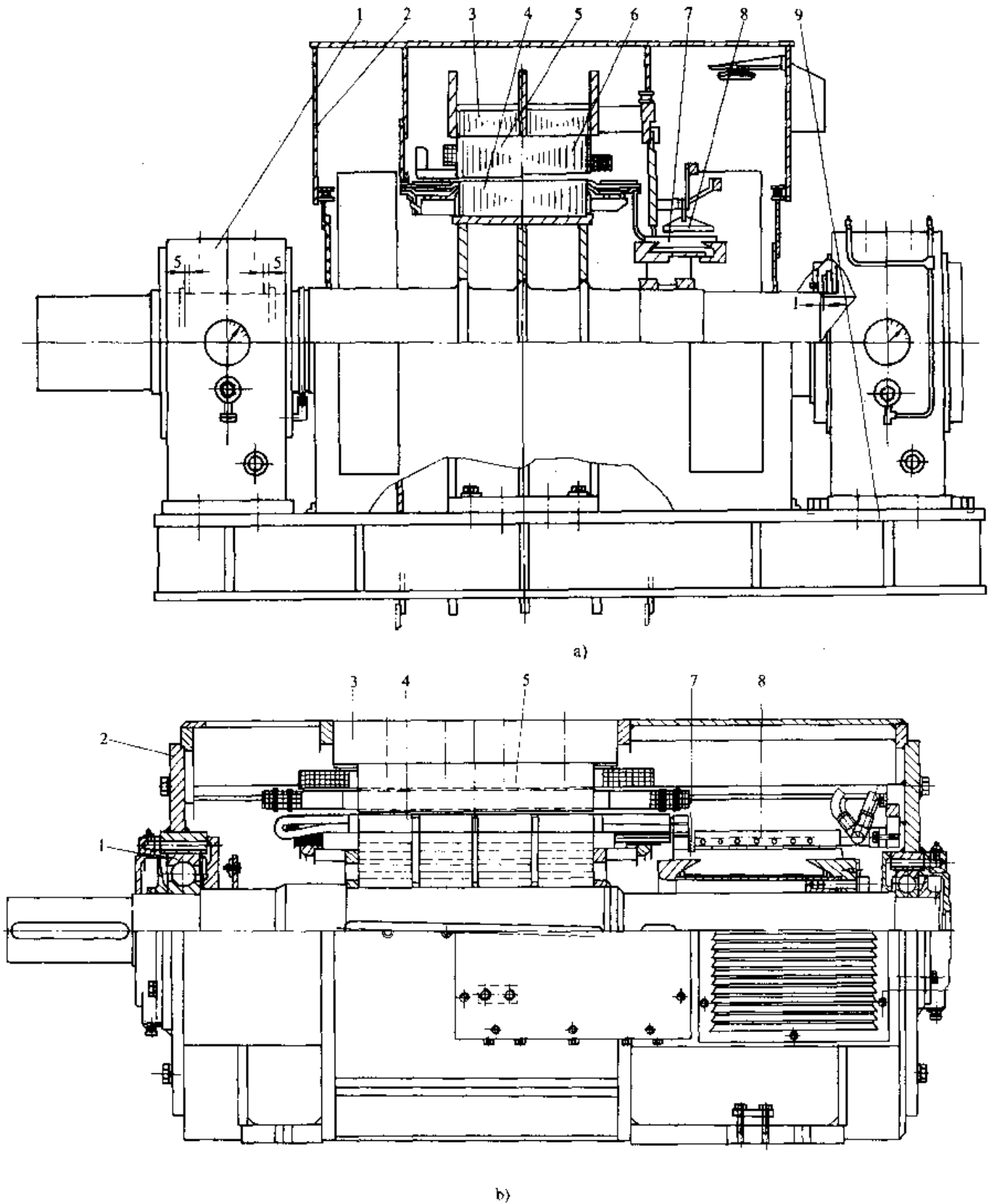


图 4-1-2 直流电机剖面图

a) 大型直流电机 b) 中小型直流电机

1—轴承 2—端盖(罩) 3—定子 4—电枢 5—主极 6—换向极 7—换向器 8—电刷装置 9—底板

直流电机一般由定子、电枢(转子)、端盖或端罩、电刷装置、轴承装置和底板(小型电机无底板)等部件组成。按需要,某些直流电机还应配备鼓风机、冷却器、空气过滤器、测速发电机、转速继电器、制动器及其他监测保护装置。为适应功率大小、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、小直流电机的结构有明显差别,典型结构见图 4·1-2。

结构设计的质量对提高运行可靠性,节约原材料,提高劳动生产率和方便使用与维护有直接影响,具体描述参见本篇第 7 章。

4 直流电机的质量和效率

直流电机的估计质量与额定转矩的关系见图 4·1-3。额定转矩按下式计算:

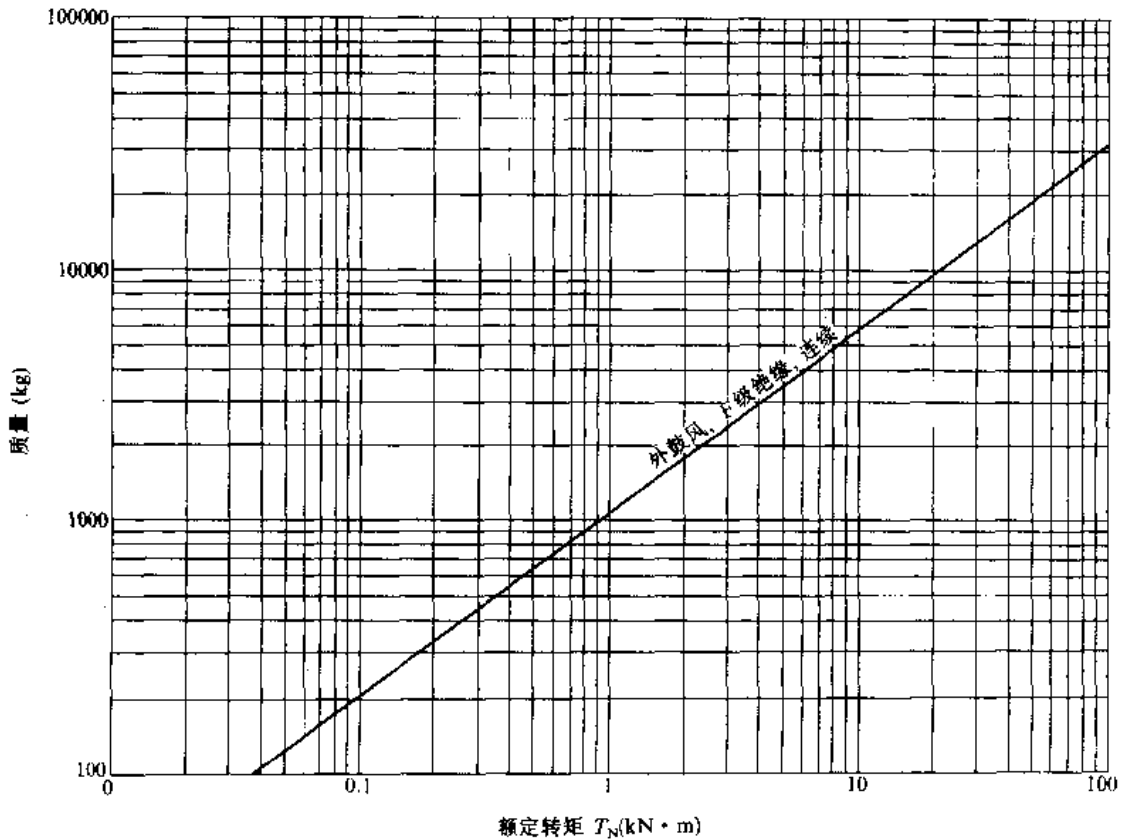


图 4·1-3 直流电机的估计质量

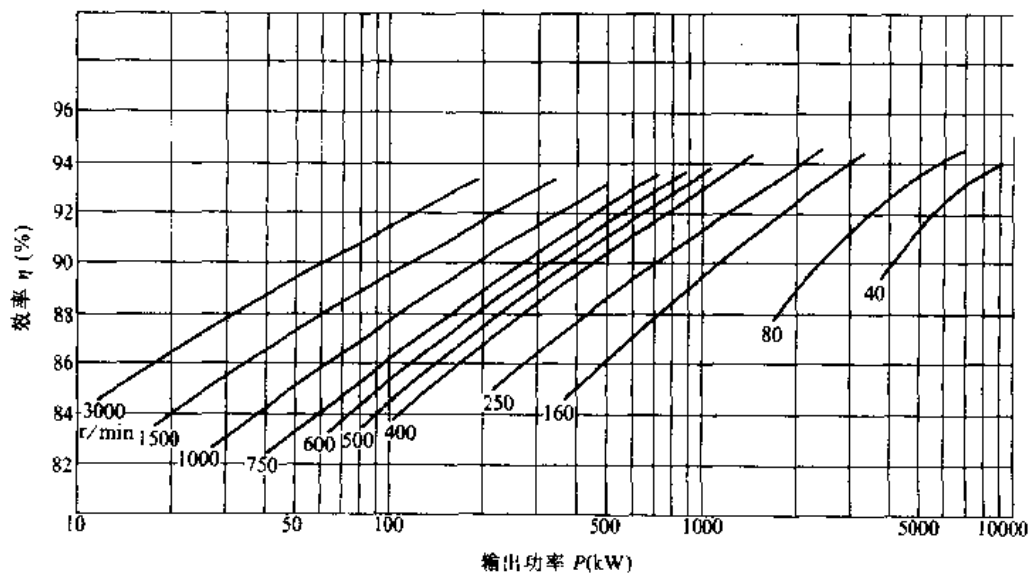


图 4·1-4 F 级绝缘他励直流电动机效率曲线

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4.1-1)$$

式中 P_N ——额定功率 (kW);

n_N ——额定转速 (r/min)。

直流电机的效率随绝缘等级、防护型式、工作方式和结构等因素而异。近年生产的 F 级绝缘他励直流电动机的估计效率如图 4.1-4 的曲线所示。

5 直流电机的发展趋势

随着电力电子技术、微电子技术和交流电动机调速与控制技术的发展,大部分直流发电机已被各式晶闸管整流电源所代替,直流电动机和直流传动系统也正在被效率高、快速性能好、容量不受限制和维护方便的交流调速电动机和交流调速系统所取代,直流电机的应用范围呈缩减趋势。

但是,直流电动机和可以解耦调节的直流传动系统经过长期发展,积累了丰富的运行经验,而调速性能可以达到直流传动系统水平的交流调速电动机和交流调速系统实际运行经验相对较少,会出现一些预料不到的问题。而且交流调速系统在一定容量范围内和一些运行方式中,还存在整个系统的技术经济合理性等问题,在一定时间内还不能或不宜全面代替直流传动系统,在某些领域内直流电动机仍将有所发展。

直流电动机的主要技术发展趋势是:

1. 提高直流电动机设计、制造的技术水平 利用

电子计算机和数值解析技术进行磁场、换向、机械应力、振动以及通风冷却等方面的解析,优选最佳设计;采用 F、H 级绝缘和先进的绝缘结构以及真空压力整浸 (VPI) 工艺,提高电机的绝缘性能和部件整体性;推广钨极惰性气体保护焊 (TIG) 和中频焊等,提高电接触的可靠性,从而提高电磁参数、换向性能和结构可靠性,以缩小尺寸,减轻质量,提高极限容量,适应系统对电机动态性能和运行可靠性的要求。

2. 采用新材料,开发新结构 随着钕铁硼等新型永磁材料的发展,永磁直流电机将从小功率电机向中小型电机扩展,以充分发挥其结构简单、节省原材料和节约能源的优点;不断进行基本系列的结构改型和优化设计,扩大系列的品种规格,发展各种通风冷却结构型式和其他新结构,如无槽电枢结构,最大限度地满足使用要求和提高工程总体合理性。

3. 完善、发展维护监测系统 结构复杂、监测困难和维护工作量大是限制直流电机发展的主要原因之一。采用先进的电机状态监测技术,从局部监测发展到系统监测,开发故障诊断和专家评定系统,进行故障趋势分析,以简化和减少维护工作,保证电机运行可靠。

4. 采用超导技术 在定子励磁绕组上采用超导技术,可制造出不存在换向问题的超导单极电动机和发电机,或换向大为改善的一般超导直流电动机,使直流电机取得新的进展。

第 2 章 直流电机的工作原理 和基本电磁参数^{[2][3][10]}

直流电机的主极与电刷相对静止,借换向器和电刷实现外电路直流电与电枢绕组中交流电之间的相互变换,再借静止气隙磁场实现电枢绕组中的交流电能与转轴上的转矩相互转换。机械功率与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。

1 直流电机的电枢电动势和电磁转矩

1.1 电枢电动势

电枢在磁场中旋转时,绕组各元件边相对气隙磁场运动,根据电磁感应定律 $e = B\dot{\omega}l$,元件电动势为其两元件边电动势之和。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,但由于电刷与换向器相对旋转,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,被电刷短接的元件的轴线应对准主极中心线,即通常所称“电刷应处在中性位置上”。

当电机的主极对数为 p ,电枢绕组元件数为 S ,每个元件的匝数为 N_a ,绕组并联支路对数为 a 和导体总数 $Z = 2SN_a$,则在电刷处于中性位置运行时,其电枢

电动势 E_a 为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (\text{V}) \quad (4\cdot2-1)$$

式中 C_e ——电动势常数, $C_e = pZ / (60a)$;

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。两者改变其一, 电动势极性改变; 两者同时改变, 电动势极性不变。

1.2 电磁转矩

根据电磁力定律 $f = Bli$, 处在气隙磁场中的载流电枢绕组的各元件边都将受到切向电磁力的作用。当电刷处于中性位置, 通过电刷的总电流为 I_a 时, 电磁转矩 T_{em} 可按下式计算:

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4\cdot2-2)$$

式中 C_T ——转矩常数, $C_T = pZ / 2\pi a$ 。

有槽或无槽电枢结构的电磁力作用部位虽有区别, 但它们的电磁转矩均可按式 (4·2-2) 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。

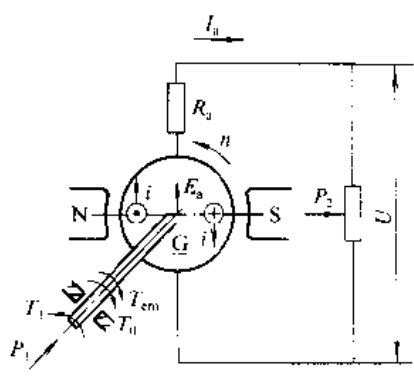
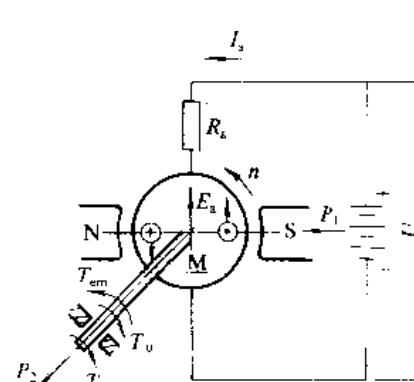
电枢上电磁转矩的方向根据磁场极性与电枢电流方向按左手定则决定。两者改变其一, 转矩方向改变; 两者同时改变, 转矩方向不变。

2 直流电机的电压、转矩和功率平衡

直流电机的能量转换过程是可逆的, 既可作发电机运行, 也可作电动机运行^①。

直流电机稳定运行时的电压、转矩和功率平衡见表 4·2-1。

表 4·2-1 直流电机的电压、转矩和功率平衡

	发电机	电动机
工作原理	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 发电机由原动机拖动, 以转速 n (角速度 ω) 旋转。从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. 旋转后, 发电机电枢绕组感生电动势 E_a, 接负载后输出电流 I_a, 端电压为 U, 发电机输出功率 $P_2 = UI_a$ 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 $T_{em} \omega$ 转换成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 	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 电动机接至端电压为 U 的电源, 通入负载电流 I_a, 输入的电功率 $P_1 = UI_a$ 2. 电动机通电后产生电磁转矩 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 $P_2 = T_2 \omega$ 3. 电动机的感应电动势 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 $E_a I_a$ 转换为轴上所获得的机械功率 $T_{em} \omega$, $P_{em} = E_a I_a = T_{em} \omega$ 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	$P_1 = P_{em} + P_2$ $P_2 = P_{em} - P_3$ $P_1 = P_2 + P_3 + P_2$	$P_1 = P_{em} + P_3$ $P_2 = P_{em} - P_3$ $P_1 = P_2 + P_3 + P_2$

注: ω —电枢角速度, $\omega = 2\pi n / 60$ (rad/s); R_a —电机电枢电路电阻 (Ω); ΔU_b —正负电刷的接触电阻压降 (V); 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 ($\text{N} \cdot \text{m}$); P_3 —电枢回路总损耗, $P_3 = I_a^2 R_a + I_a \Delta U_b$ (W); P_2 —涡流、磁滞与通风摩擦损耗, $P_2 = T_0 \omega$ (W)。

① 发电机作电动机运行时, 为使转速能达到铭牌值, 应适当减弱磁场或提高电源电压, 并适当降低输出功率, 使电枢电流不超过铭牌值; 电动机作发电机运行时, 为使电压能达到铭牌值, 应适当提高转速或增强励磁, 但励磁绕组温升不应超过允许值。对有串励绕组的直流电机, 在改变用途时, 应将串励绕组出线改接。

3 直流电机的电枢反应

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移位而移动,其空间分布为三角形(实际上,电枢电流集中在槽内,其空间分布为阶梯状三角形)。气隙磁场将由励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势决定。电枢磁动势对气隙磁场的影响称为电枢反应。

按其轴线所在空间位置和对气隙磁场的不同影响,电枢磁动势有交轴和直轴两种(直轴与主极中心线重合,交轴与极间几何中心线重合,交轴与直轴间的夹角为 90° 电角度)。交轴和直轴电枢磁动势对主极气隙磁场的影响分别称为交轴和直轴电枢反应。

3.1 交轴电枢反应

电刷处在几何中性位置时,电枢磁动势的轴线在

交轴上,电枢反应磁动势 F_a 全部为交轴电枢磁动势 F_{aq} ,电枢反应为交轴电枢反应,如图4-2-1所示。电枢电流为零,只有主极励磁时的磁场分布如图4-2-1a所示;主极无励磁,只有电枢电流流通时,在交轴上产生最大值为 $ZI_a/(8ap)$ 、按三角形分布的磁动势,此时磁场分布如图4-2-1b所示;既有主极励磁又有负载电流时的合成磁场分布如图4-2-1c所示。

交轴电枢反应的不良影响有:

(1) 使主极气隙磁场发生畸变,磁路饱和时有效磁通减少。在有效磁通随着电枢电流增加而减少时,如果保持励磁电流一定,则随着负载电流的增加,会在发电机中引起电压下降,在电动机中引起转速上升,乃至得不到稳定的运行。

(2) 使局部换向片间电压上升。气隙磁场畸变使得主极下各元件边的感应电动势不等,导致局部换向片片间电压升高,如果电压升高超过一定限值,会引

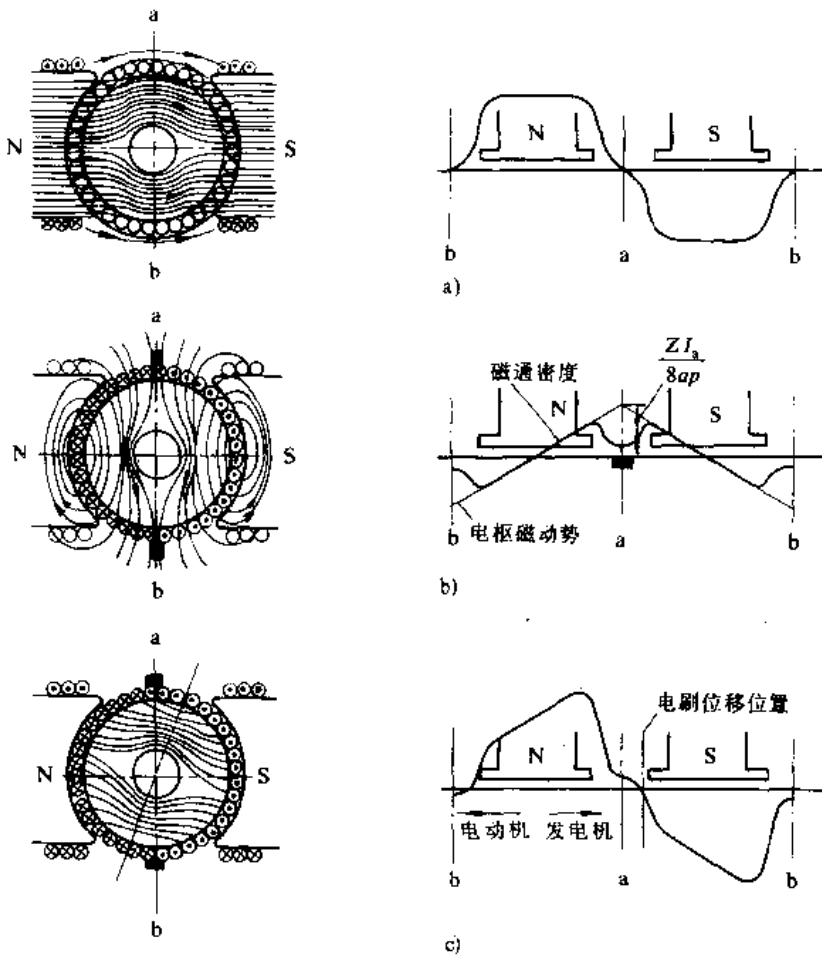


图4-2-1 交轴电枢反应

- a) 主极磁场磁通与磁通密度分布
- b) 电枢磁动势产生的磁通与磁通密度分布
- c) 合成磁场磁通与磁通密度分布

发换向事故。

(3) 使电机的物理中性线从几何中性位置沿电机旋转方向偏移(发电机前移,电动机反之),如图 4-2-1c 所示。如果电刷仍留在几何中性位置上,该处磁通会在被电刷短路的换向元件内感生电动势,从而产生换向火花。因此,在无换向极的电机中,电刷必须随着负载的改变而改变自己的位置。

交轴电枢反应的不良后果可以采取主极极靴削角、偏心气隙等措施(图 4-2-4)加以抑制,或配备换向极、补偿绕组给予补偿(参见本篇第 4 章 2-2 和 2-3 节)

3.2 直轴电枢反应

当电刷偏离几何中性位置 α 角时,电枢磁动势 F_a 可分解为 F_{ad} 和 F_{aq} 两个分量,如图 4-2-2 所示。

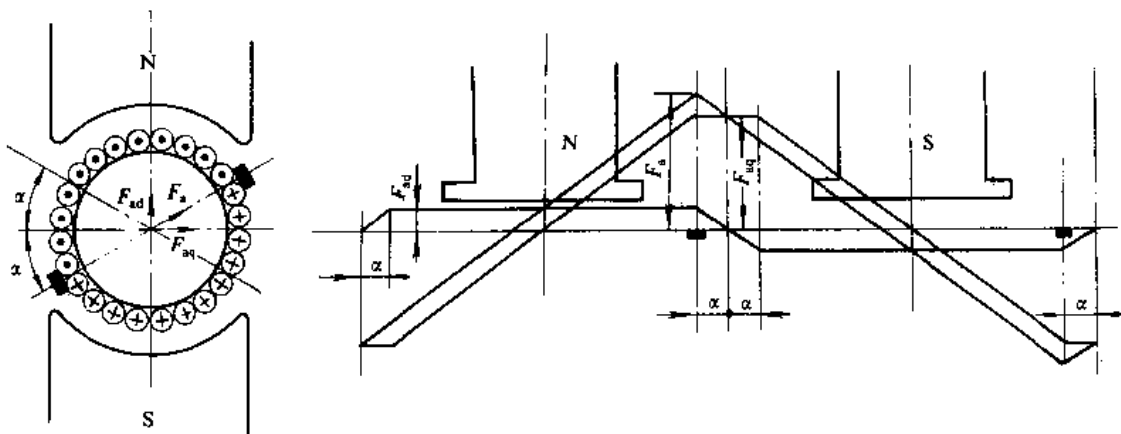


图 4-2-2 电枢磁动势的直轴和交轴分量

4 直流电机的磁路^[4]

直流电机的磁路一般指主极磁通的主磁路,在有换向极的电机中,还有换向极磁通的换向极磁路。

4.1 主磁路

4.1.1 主磁路的组成

主磁路由主极气隙、电枢齿、电枢轭、主极铁心和定子轭组成,如图 4-2-3 所示。

主磁路内由励磁绕组产生的磁通,可分成与电枢绕组相交链的有效磁通 Φ , 和不交链的漏磁通 Φ_1 。漏磁通与有效磁通的和对有效磁通的比,称为漏磁系数 σ , $\sigma = (\Phi + \Phi_1) / \Phi$ 。

由几何中性位置两侧 2α 角度范围内的安匝所产生的分量 $F_{ad} = 2\alpha I_a Z / (360 \times 2a)$ 其轴线在直轴上,称为直轴电枢磁动势(其余部分为交轴电枢磁动势 F_{aq}),在空间按梯形分布。直轴电枢反应不会造成主极气隙磁场的畸变,只会使气隙磁场去磁或增磁,随电机的工作方式和电刷移动的方向而定,见表 4-2-2。

表 4-2-2 移刷与气隙磁场的关系

工作方式	顺转向移刷	逆转向移刷
发电机	去磁	增磁
电动机	增磁	去磁

对于单向旋转的电机,在不影响换向性能的前提下,有时可少量移动电刷,利用其增磁或去磁效应来获得所要求的特性。

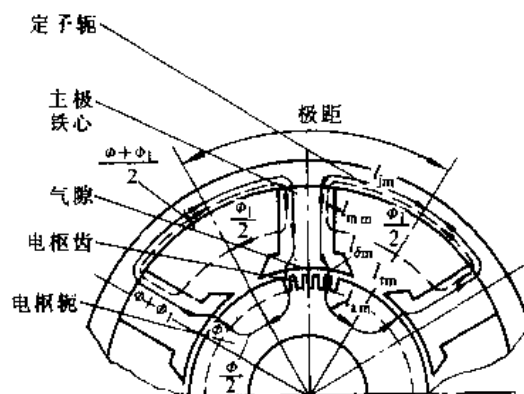


图 4-2-3 直流电机的主磁路

4.1.2 磁化曲线和磁路计算

直流电机的磁化曲线也称空载特性曲线,用每极

励磁磁动势 F 与每极有效磁通 Φ 的关系 $\Phi = f(F)$ 表示;也可用空载电动势 E_0 与励磁电流 i_f 的关系 $E_0 = f(i_f)$ 表示。

关于直流电机的空载气隙磁场和磁路计算的详细说明参见第1篇第2章4.2和4.3节。磁路各部分的磁通密度和磁位降的计算见表4.2-3。

表4.2-3 直流电机磁路计算

磁路段	磁通 Φ_i (Wb)	截面积 A_i (m ²)	磁通密度 B_i (T)	磁场强度 H_i (A/m)	磁路段长度 l_{im} (m)	磁位降 F_i (A)
主极气隙	Φ	A_g	$B_g = \Phi / A_g$		$l_{gm} = \delta$	$F_g = 0.8K_g \delta B_g \times 10^6$
电枢齿	Φ	A_t	$B_t = \Phi / A_t$	H_t	l_{tm}	$F_t = H_t l_{tm}$
电枢轭	$\Phi/2$	A_a	$B_a = \Phi / (2A_a)$	H_a	l_{am}	$F_a = H_a l_{am}$
主极铁心	$\sigma\Phi$	A_m	$B_m = \sigma\Phi / A_m$	H_m	l_{mm}	$F_m = H_m l_{mm}$
主极补偿齿①	$\sigma\Phi$	A_c	$B_c = \sigma\Phi / A_c$	H_c	l_{cm}	$F_c = H_c l_{cm}$
定子轭	$\sigma\Phi/2$	A_j	$B_j = \sigma\Phi / (2A_j)$	H_j	l_{jm}	$F_j = H_j l_{jm}$

每极励磁磁动势 $F = \Sigma F_i = F_g + F_t + F_a + F_m + F_c + F_j$

- 注: 1. 对 $\delta_{max} \leq 3\delta_{min}$ 的偏心气隙, 其等效气隙 $\delta = 0.25\delta_{max} + 0.75\delta_{min}$ 。主极铁心形状和气隙如图4.2-4所示。
 2. 气隙系数 K_g 为电枢槽、补偿槽、径向通风沟和电枢铁心表面绑扎带槽的气隙系数 K_{g1} 、 K_{g2} 、 K_{g3} 和 K_{g4} 的乘积, 即 $K_g = K_{g1}K_{g2}K_{g3}K_{g4}$ 。 K_g 一般在 1.05~1.25 之间。超过上限值时需采取电枢斜槽等措施, 以减少槽脉动的影响。
 3. 电枢直径 $D_a \geq 20cm$ 的直流电机通常采用全开口的矩形槽(平行槽), 如图4.2-5a及4.2-5b所示; $D_a < 20cm$ 时, 通常采用半闭口的梨形槽(平行齿), 如图4.2-5c及4.2-5d所示。
 4. 当电枢齿磁通密度超过 1.8T 时, 齿部磁路比较饱和, 磁通不是全部由齿中通过, 小部分经过槽部进入轭部, 因而齿中实际的磁通密度比计算出的要小, 计算时应对此进行修正。
 ① 无补偿绕组电机无此项。

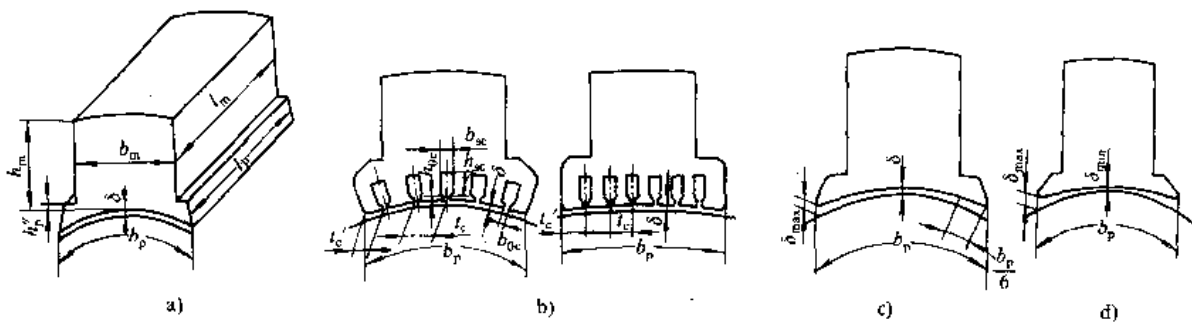


图4.2-4 主极铁心形状和气隙

a) 均匀气隙 b) 带补偿槽的均匀气隙 c) 极尖削角的均匀气隙 d) 偏心气隙

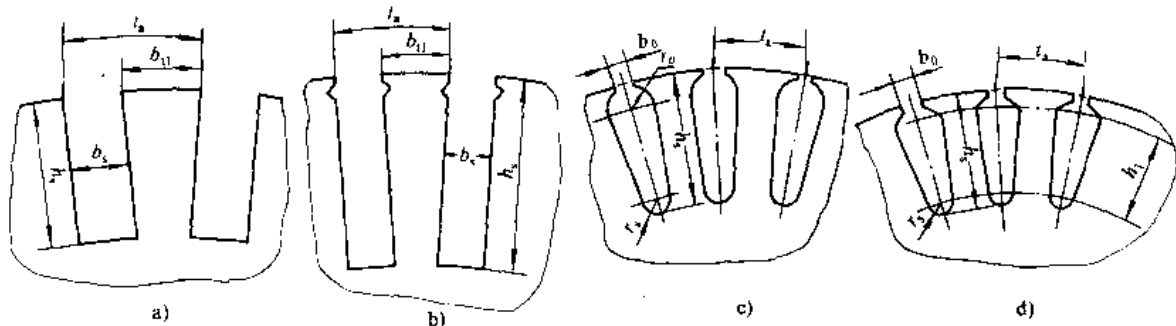


图4.2-5 直流电机的电枢槽形

a) 矩形槽 b) 带槽楔的矩形槽 c) 半圆顶梨形槽 d) 梯形顶梨形槽

4.1.3 电枢反应去磁磁动势

无补偿直流电机在额定运行情况下,每极气隙、电枢齿的磁位降 $F_{\delta N}$ (图 4.2-6) 与电枢反应每极磁动势 $b_p A/2$ 叠加,引起主极下的气隙磁场畸变,而使磁极下平均气隙磁通密度降至 $B'_{\delta N}$, 假设曲线 BGD 为抛物线,其值为

$$B'_{\delta N} = \frac{1}{6} (\overline{AB} + 4\overline{KG} + \overline{JD}) \quad (4.2-3)$$

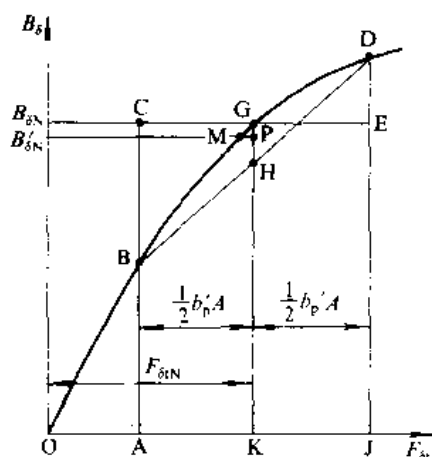


图 4.2-6 交轴电枢反应去磁磁动势

为使直流电机在额定负载时能达到与空载时相同的平均气隙磁通密度和气隙磁通,应适当增加励磁磁动势以补偿交轴电枢反应的去磁作用。交轴电枢反应的每极去磁磁动势 F_{aqN} 可按式计算:

$$F_{aqN} = \frac{1}{6} \frac{\overline{BC} - \overline{ED}}{\overline{BC} + \overline{ED}} b_p A \quad (A) \quad (4.2-4)$$

$$A = \frac{ZI_a}{2\pi r D_a} \quad (A/m) \quad (4.2-5)$$

对一般中小电机

$$b'_p = b_p \quad (m)$$

对带补偿的大中型电机

$$b'_p = b_p + 2\delta \quad (m)$$

$$b_p = a_0 \frac{\pi D_a}{2p} \quad (m)$$

式中 a_0 ——主极极弧系数,有换向极的电机取 $0.6 < a_0 < 0.75$,无换向极的电机取 $0.65 < a_0 < 0.8$ 。

也可用作图法求取,在图 4.2-6 中连接 BD,交 KG 线于 H 点。取 $\overline{PG} = 1/3 \overline{HG}$,过 P 点做水平线,交曲线 BGD 于 M,则交轴电枢反应的每极去磁磁动势为

$$F_{aqN} = \overline{PM} \quad (4.2-6)$$

上述计算法或作图法所使用的 $B_\delta = f(F_{\delta})$ 曲线可近似地用空载特性曲线(磁化曲线) $\Phi = f(F)$ 代替。

4.2 换向极磁路

4.2.1 换向极磁路的组成

与主磁路相类似,换向极磁路由换向极气隙、电枢齿、电枢轭、换向极铁心和定子轭组成。为了保持换向极磁动势(电枢电流)与换向极有效磁通间的正比关系,换向极磁路即使在规定的过载条件下也不应饱和。由于换向极磁路与部分主磁路重合,而且换向极漏磁通很多,设计换向极磁路时磁路的磁通密度应取较低的值。

换向极铁心一般有如图 4.2-7 所示的形状。其极靴宽度 b_{pk} 一般按下式选取:

对中小型电机

$$b_{pk} = (0.6 \sim 0.8) b_k \quad (m)$$

对大型电机

$$b_{pk} = (0.4 \sim 0.65) b_k \quad (m)$$

或 $b_{pk} = b_k - (2 \sim 3) \delta_k \quad (m)$

式中 b_k ——换向区宽度(m)。

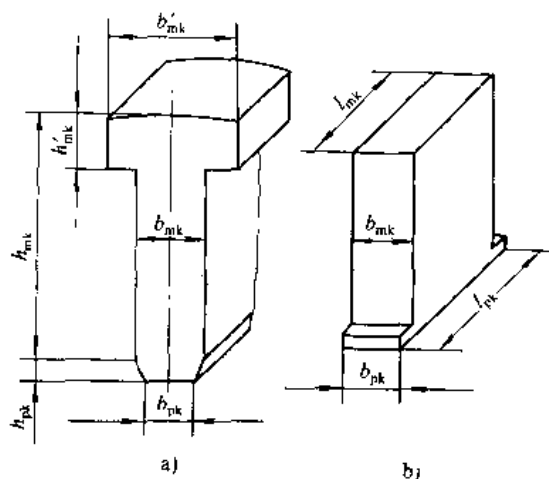


图 4.2-7 换向极铁心形状

a) 大中型电机 b) 中小型电机

4.2.2 换向极气隙与极身磁通密度

换向极气隙 δ_k 一般按下式选取:

对中小型电机

$$\delta_k = (1.5 \sim 2.2) \delta \quad (m)$$

对大型电机

$$\delta_k = (3 \sim 4) \delta \quad (\text{m})$$

大中型电机根据换向性能要求，往往在换向极铁心背部和定子轭之间设置换向极第二气隙 δ_{k2} (参见本篇第4章2·2节)。

为在电枢换向元件中产生换向电动势 e_k 来克服电抗电动势 e_r ，换向极气隙磁通密度 B_k 应为

$$B_k = \xi A \frac{l_s}{l_{pk}} + \frac{1.25 \times 10^{-5}}{1 - \alpha_s} A \frac{l_s - l_{pk}}{l_{pk}} + \frac{a \Delta U}{2 p N_s v_s l_{pk} \beta} \quad (\text{T}) \quad (4.2-7)$$

式中 ξ ——平均比漏磁导；

l_s ——电枢铁心长；

l_{pk} ——换向极极靴长度(m)，如果换向极数仅为
主极数的一半，式中 l_{pk} 应改为 $l_{pk}/2$ ；

ΔU ——超越换向时前后电刷边电压降之差(V)，
石墨电刷时取 0.75V，铜石墨电刷时取
0.25V；

N_s ——电枢元件匝数，波绕组只有正负两刷杆
时，元件匝数还应乘以极对数 p ；

v_s ——电枢圆周速度 (m/s)；

β ——电刷覆盖换向片数的计算值。

额定负载时，换向极每极气隙磁通 Φ_k 为

$$\Phi_k = B_k l_{pk} b_k \quad (\text{Wb}) \quad (4.2-8)$$

换向极极身磁通 Φ_{mk} 和磁通密度 B_{mk} 分别为

$$\Phi_{mk} = \Phi_k + \Phi_{ak} = \left(1 + \frac{\Phi_{ak}}{\Phi_k}\right) \Phi_k = \sigma_k \Phi_k \quad (\text{Wb}) \quad (4.2-9)$$

$$B_{mk} = \frac{\Phi_{mk}}{K_{Fe} b_{mk} l_{mk}} \quad (\text{T}) \quad (4.2-10)$$

式中 Φ_{ak} ——换向极漏磁通 (Wb)；

σ_k ——换向极漏磁系数，一般无补偿绕组电
机， $\sigma_k = 2.5 \sim 3.5$ ，有补偿绕组电机， σ_k
 $= 1.5 \sim 3.0$ ；

K_{Fe} ——铁心叠压因数，实心结构时 $K_{Fe} = 1$ ；

b_{mk} 、 l_{mk} ——换向极极身宽度和长度 (m)。

过载时换向极极身磁通密度 B_{mkmax} 为

$$B_{mkmax} = B_{mk} \frac{I_{max}}{I_N} \quad (\text{T}) \quad (4.2-11)$$

式中 I_{max} ——最大负载电流 (A)。

B_{mkmax} 一般不得超过 1.4T。

4.3 磁通密度

额定励磁时主磁路各部分磁通密度的选择范围见
表4-2-4。

表 4-2-4 磁通密度的选择范围

部位	磁通密度 (T)	备注
气隙	0.50~0.70	小型电机 $2p=2$
	0.70~0.90	小型电机 $2p=4$
	0.85~1.10	大中型电机
电枢齿	平行齿	$B_{c1/2}$
	平行槽	B_{imax}
电枢轭	1.20~1.60	小型电机 $2p=2$
	1.10~1.40	小型电机 $2p=4$
	1.10~1.50	大中型电机
主极	极身	1.30~1.70
	补偿齿	1.40~1.80
主极极面至 极靴肩的截 面	$\frac{1}{2} B_s (b_p - b_m) \frac{l_s}{l_p h_p}$ ≤ 2.00	见图 4-2-8
定子轭	0.95~1.30	铸钢或钢板
	1.10~1.50	叠片薄钢板

注： b_p 、 b_m 、 l_p 见图 4-2-4， l_s ——电枢铁心长。

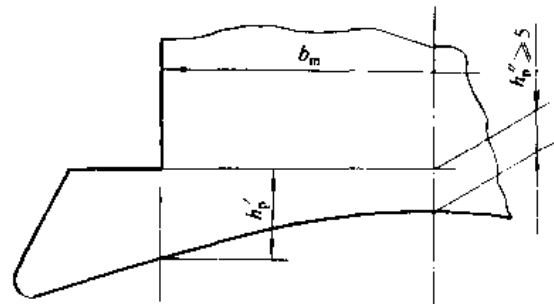


图 4-2-8 主极极身尺寸

5 直流电机的电路^{[5][6][7]}

除串励电机外，直流电机的电路可分为电枢电路
和励磁电路两部分。电路需用绝缘材料与铁磁部分绝
缘。直流电机的绝缘等级多数为 B 级或 F 级，少数为
H 级。根据电机的绝缘等级、工作制和通风方式等选
定的电路热负载，不应使损耗引起的温升超过规定值，
而使绝缘材料的性能和机械强度变坏，导致缩短电机
的正常寿命。

5.1 电枢电路

电枢电路中包括电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组
和串励绕组(根据电机的大小和励磁方式，电枢电路不

一定都有换向极、补偿、串励这三种绕组)、换向器和电刷等。

5.1.1 电枢绕组

电枢绕组是电机感生电动势、产生电磁转矩、实现能量转换的关键部件之一,有波绕组、叠绕组和蛙绕组等型式。在选择绕组型式时,主要应综合考虑下述因素(参见本篇第 5 章):

- (1) 绕组各支路内的电流。
- (2) 平均换向片间电压。
- (3) 换向元件中的电抗电动势。
- (4) 绕组的热负载。

5.1.2 换向极绕组

换向极绕组中通过电枢电流对换向极励磁产生换向极磁场,从而在电枢换向元件中感生抵消电抗电动势 e_r 的换向电动势 e_k (参见本篇第 4 章 1.1 和 2.2 节);其部分磁动势还用来抵消交轴电枢反应磁动势(有补偿绕组时,主极下电枢反应磁动势由补偿绕组抵消)。换向极绕组(有补偿绕组时加上补偿绕组)的磁动势一般应为交轴电枢反应磁动势的 1.05~1.25 倍。

换向极绕组的每极匝数 N_k 包括:

- (1) 产生换向极气隙磁通所需的匝数 N_1

$$N_1 = \frac{1.1 \times 0.8 B_k \delta_k K_a \alpha_k \times 10^6}{I_a} \quad (4.2-12)$$

式中 α_k —— 换向极绕组并联支路数;
 K_a —— 换向极气隙系数。

- (2) 抵消交轴电枢反应所需匝数 N_2

$$N_2 = (Z - 2p\beta N_a) \frac{\frac{K}{2p} - |\epsilon_k|}{4aK} \quad (4.2-13)$$

式中 K —— 换向片数;
 ϵ_k —— 电枢绕组以换向片数表示的短距数。

- (3) 如果有第二气隙 δ_{k2} , 第二气隙所需要的匝数 N_2

$$N_2 = \frac{0.8 B_k \alpha_k \delta_{k2} \alpha_k \times 10^6}{I_a} \frac{b_k}{\delta_{mk}} \quad (4.2-14)$$

式中, δ_{mk} 见图 4.2-7。

$$N_k = N_1 + N_2 + N_3 - N_c \quad (4.2-15)$$

式中 N_c —— 每极补偿绕组匝数,无补偿时 $N_c = 0$ 。

N_k 应是整数或带 0.5 的小数。常常用改变 δ_{k2} 或 δ_k 的方法调节 N_2 或 N_1 的值来满足这个要求。

5.1.3 补偿绕组

为更加有效地抵消电枢反应,大中型电机把(换向

极绕组中)抵消主极下电枢反应所需的匝数分散布置在主极极靴上,组成补偿绕组。补偿绕组内电枢电流的方向应与主极极靴下电枢绕组元件内的电流方向相反。

1. 补偿槽数 补偿槽一般均匀地分布在主极极靴上,槽数的选择应使其槽节距与电枢槽的槽节距至少相差 10%,也不能是电枢槽节距的整数倍,以避免产生额外的振动与噪声。

2. 补偿度 有补偿绕组的电机的补偿度 X_c 一般在 80%~105% 范围内。 X_c 低于 100% 的称为欠补偿,高于 100% 的称为过补偿。

为补偿主极下电枢磁动势所需要的每极补偿绕组磁动势 F_c 和每极补偿导体数 Z'_c 分别为

$$F_c = b_p A \quad (A) \quad (4.2-16)$$

$$Z'_c = \frac{b_p A \alpha_c}{I_a}$$

式中 α_c —— 补偿绕组并联支路数。

在每极补偿槽数为 Q_c 时,要求补偿绕组每槽有效导体数为

$$z'_c = \frac{Z'_c}{Q_c}$$

实际选取的每槽有效导体数 z_c 为接近 z'_c 的整数,则每极实际有效补偿导体数 Z_c 为

$$Z_c = Q_c z_c$$

补偿度 X_c 表示补偿绕组抵消主极极靴下电枢磁动势的程度,它不仅与 Z_c/Z'_c 的比值有关,还与补偿槽在极靴上的位置有关。当极尖到最边沿补偿槽的中心线的距离 t'_c 不等于补偿槽节距 t_c 的一半,即 $t'_c \neq t_c/2$ (图 4.2-4) 时,补偿度 X_c 为

$$X_c = \frac{Z_c}{Z'_c} \left[1 + \frac{2 \left(t'_c - \frac{t_c}{2} \right)}{b_p} \right] \times 100\% \quad (4.2-17)$$

3. 补偿绕组的偏位分布 补偿绕组通常在主极极靴上对主极铁心中心线对称分布。为达到某种性能要求,有时也采用对中心线不对称分布的布置方式,称为补偿绕组的偏位分布。

由于直流电机的换向一般调整为超越换向,此时电动机电枢绕组换向元件中的电流所产生的磁动势有去磁作用(参见本篇第 4 章 1.2.3 节)。假设换向电流按抛物线变化,其每极去磁磁动势约为

$$F'_{ad} = \frac{1}{6} b_k A \quad (4.2-18)$$

对于要求精密调节转速的单方向旋转的直流电动

机(例如轧钢厂连轧机用电动机),为使电动机特性不受换向电流影响,可采用补偿绕组偏位分布的措施,即将补偿绕组的分布中心线逆电动机的旋转方向对主极中心线偏移距离 α 。为了留有调节裕量,偏位所增加的磁动势只抵消 $0.8F'_{ad}$,即

$$\alpha = 0.067b_k \quad (\text{m}) \quad (4\cdot2-19)$$

其余的 $0.2F'_{ad}$ 由设置在主极铁心上的调节绕组进行调节。调节绕组的接线如图4·2-9所示。

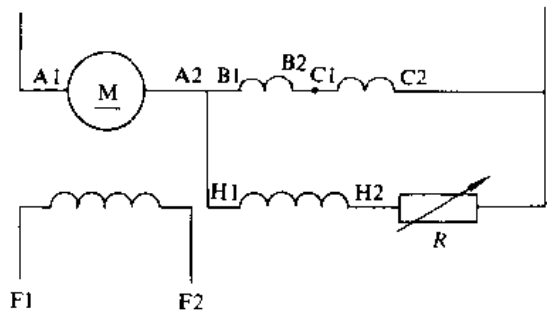


图 4·2-9 带调节绕组的直流电动机接线图
A1、A2—电枢绕组 B1、B2—换向极绕组
C1、C2—补偿绕组 F1、F2—他励绕组
H1、H2—调节绕组 R—变阻器

5·1·4 串励绕组

串接于电枢电路中的串励绕组单独或与并(他)励绕组一起给直流电机的主极励磁,根据串、并励磁动势的方向和所占比重,使电机获得不同的运行特性:串励、稳定并励、差复励和积复励(平复励、过复励、欠复励)(参见本篇第3章1和2节)。其匝数根据电枢反应去磁磁动势和特性要求确定。

5·1·5 换向器和电刷

常规直流电机的特点是通过换向器和电刷进行换向。因此,换向器和电刷是保证直流电机换向性能和运行可靠性的关键部件。除了要求对它们进行精心设计、精心制造外,还应在运行过程中加以精心维护。

换向器温升直接影响电机换向性能和运行可靠性,一般控制在 90K 以下,超过时应特别注意电刷牌号的选择。

电刷性能直接影响电刷—换向器滑动接触性能,电刷牌号的选择是一门专门技术,应给予充分重视(参见本篇第4章2·4节)。

5·2 励磁电路

励磁电路是指主极铁心上(除串励绕组外)给电机

提供所需励磁的并(他)励绕组电路。

额定运行状态下的每极励磁磁动势为每极并(他)励绕组磁动势 F_l 和串励绕组磁动势 F_s (无串励绕组时 $F_s=0$)之和,它应等于对应于额定磁通 Φ_N 所需的每极励磁磁动势 F_N 和交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqN} (有补偿绕组,且补偿度为100%时, $F_{aqN}=0$)之和,即

$$F_l + F_s = F_N + F_{aqN} \quad (\text{A}) \quad (4\cdot2-20)$$

并(他)励绕组的导线截面积为

$$A_l = \frac{2\rho l_{ml} F_l K_e}{U_{IN}} \quad (\text{mm}^2) \quad (4\cdot2-21)$$

式中 l_{ml} —励磁线圈平均匝长(m);

ρ —导线电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),铜导线时

$$\rho_{75^\circ\text{C}} = 0.0217\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m};$$

K_e —励磁裕量,电动机时 $K_e=1.05\sim 1.15$,

发电机时 $K_e=1.2\sim 1.3$;

U_{IN} —额定励磁电压(V)。

并(他)励绕组的额定励磁电流 I_{IN} 为

$$I_{IN} = A_l J_l \quad (\text{A}) \quad (4\cdot2-22)$$

式中 J_l —励磁绕组电流密度(A/mm^2)。

并(他)励绕组的每极匝数 N_l 为

$$N_l = K_e F_l / I_{IN} \quad (4\cdot2-23)$$

5·3 电负荷和电流密度

5·3·1 电枢电负荷

电枢电负荷 A (式(4·2-5))不仅与电机的换向性

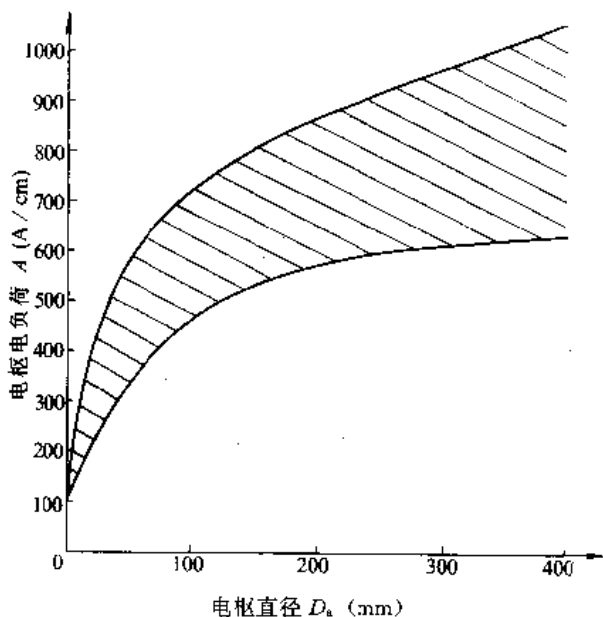


图 4·2-10 直流电机的电枢电负荷

能有关,而且与电枢绕组的发热有关。电枢电负荷与电枢绕组电流密度的积 AJ , 是电枢绕组的热负荷。电负荷的选用范围如图 4·2-10 所示。

5·3·2 电流密度

绕组的电流密度直接与绕组的温升有关, 应根据绝缘等级、通风和运行方式、线圈结构等进行选择, 大致的选用范围见表 4·2-5。

绕组与连接片或换向器升高片在软钎焊时的接触电流密度为 $0.38 \sim 0.5 \text{ A/mm}^2$ 。

表 4·2-5 电流密度的选用范围

绕组种类	电流密度 (A/mm ²)	备注
并(他)励绕组	2.0~3.5	多层线圈
	2.5~5.0	单层线圈
换向极或串励绕组	3.0~4.5	多层线圈
	3.5~6.0	单层线圈
补偿绕组	4.0~6.5	
电枢绕组	5.0~9.0	

第3章 直流电机的运行特性

1 直流发电机的运行特性

1.1 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, 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 4·3-1。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运行时才能求得, 其形状和他励发电机的相同, 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变化, 因此, 实用价值很小, 有时在特殊线路中作升压机用。

表 4·3-1 直流发电机的主要工作特性

名称	特性曲线	他励	并励	复励
空载特性		<p>1. 空载特性曲线是表示电枢电动势 E_a 与励磁电流 I_f, 或空载气隙磁通 Φ 与主极励磁安匝 ΣF 之间关系的曲线, 在他励和空载下测得, 或通过磁路计算求得。它反映电机工作点的饱和程度</p> <p>2. 在 $I_f = 0$ 时磁路中的剩磁仍能建立的电压, 称为剩磁电压 U_R, 其值为额定电压的 2%~5%</p>		
		<p>1. U_R 是自动发电机能自励的必要条件, 它所产生的励磁磁动势应与剩磁极性一致</p> <p>2. 空载特性曲线过原点的切线称为临界电阻线, 励磁电路的电阻小于临界电阻 $R_{cr} = \tan \theta_{cr}$, 才能实现自励并稳定运行</p>		

(续)

名称	特性曲线	他励	并励	复励
负载特性	<p>1. 串励与电枢反应相抵消时的负载特性 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</p>	<p>负载特性表示 I_a 不变时 U 随 I_f 而变化的规律, 可由空载特性和负载特性 $\triangle ABC$ 绘出。 $\triangle ABC$ 的大小决定于 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, 表示电枢电路电阻压降。当 A 在空载特性曲线上, 则 C 在负载特性曲线上。由负载特性可确定运行时所需的 I_f 值</p> <p>I_f 为定值时的直线与空载和负载特性的交点, 分别为 I_f 不变时的空载电压 U_{01} 及负载电压 U_N</p>	<p>并励电路电阻线与空载和负载特性的交点分别为并励电路电阻不变时的空载电压 U_{02} 及负载电压 U_N</p>	<p>U_0 和 U_N 的确定方法与并励电机时相同。特性三角形中 AB 边包括串励效应。当串励增磁效应与电枢反应去磁效应抵消时, 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</p>
外特性	<p>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</p>	<p>外特性表示励磁电路不作调节时 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调整率</p> <p>负载电流增加时, 电枢反应的去磁效应与电枢电路电阻压降相应增大, U 随负载电流增加而降低</p>	<p>由于励磁电路电阻 R_f 不变, I_f 将随 U 的降低而减小。因此, 随着负载电流的增加, U 的降低较他励电机的大, 特性较他励电机的稍软</p>	<p>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, $U_N < U_0$ 为欠复励。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</p>
调整特性	<p>$U = \text{定值时}$ $I_f = f(I)$</p>	<p>1. 负载电流 I 增加时, 为保持 U 不变, 须相应增加 I_f 以补偿电枢反应去磁效应与电枢电路电压降</p> <p>2. 调整特性曲线表示保持 U 恒定所必须的 I_f 调节范围</p>		

1.2 电压调整率

维持额定负载状态下的励磁电路不作调整，转速保持一定，从满载到空载的电压变化，用对额定电压 U_N 的百分率表示，称为直流发电机的固有电压调整率 ΔU_N ，即

$$\Delta U_N = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100 \quad (\%) \quad (4.3-1)$$

式中 U_0 ——在上述条件下的空载电压 (V)。

固有电压调整率可以从外特性曲线求得。

他励直流发电机的固有电压调整率比并励直流发电机的小。复励直流发电机的固有电压调整率取决于串励在励磁磁动势中所占的百分比，平复励发电机的固有电压调整率比他励发电机的更小。

驱动发电机的原动机的转速，往往随负载而变化。包含转速变化在内的电压调整率称为综合电压调整率，它更符合电机的实际运行情况。

1.3 并励发电机的电压稳定

并励直流发电机自励的条件见表 4.3-1 中空载特性部分的说明。

如果并励直流发电机的工作点在空载特性曲线的不饱和部分，经过原点，表示励磁电路电阻 R_f 的伏-安特性的磁场电阻线与空载特性曲线的直线部分不是相交于一点，而是有一段相重合，发电机端电压就不稳定。这种情形容易在有强励要求的并励励磁机低电压运行时发生。为保证并励发电机在工作范围内的电压稳定，可以采用非线性电阻作并励励磁电路中的调节电阻，使磁场电阻线与空载特性曲线有明显的交点；或对部分磁路采用剩磁大的材料，以提高剩磁电压；或在主极上加磁桥，或在主极铁心极身上开槽，使空载特性曲线提前弯曲

1.4 并列运行

当负载大于一台发电机的容量，或者为了在轻载时减少运行台数以提高效率时，可以用几台发电机并列运行。对于不允许停电的重要电源，如果用几台发电机并列运行，不但具有备用电机容量小的优点，而且在其中某台发电机因故障而退出运行时，其余发电机仍可继续运行。

直流发电机投入并列运行时，各台发电机的电压必须相等，接于同一母线的发电机极性必须相同。为保

证并列运行稳定，发电机应具有下降的外特性。因此，其励磁方式一般为他励、并励或欠复励。

并列运行时，各发电机间的负载分配将由它们的外特性决定，外特性下倾较陡的发电机分担的负载较小，如图 4.3-1 所示。

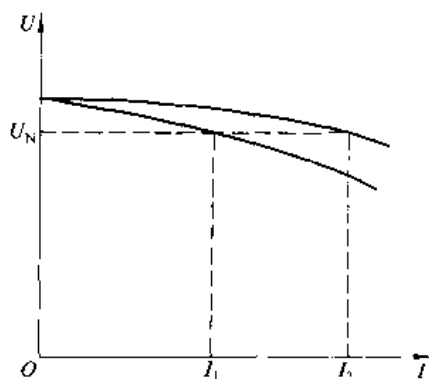


图 4.3-1 发电机并列运行时的负载分配

事实上，两台发电机的外特性不可能做得完全相同。为此可以调节发电机的励磁电流来改变其外特性的相互位置，从而改变它们之间的负载分配；也可增加同样匝数的增磁和去磁串励绕组并交叉连接，如图 4.3-2 所示。如果发电机 G_A 比发电机 G_B 的负载增加得多，则 G_A 因去磁磁动势大使电压下降， G_B 因增磁磁动势大使电压上升，从而使两台发电机的负载平衡。

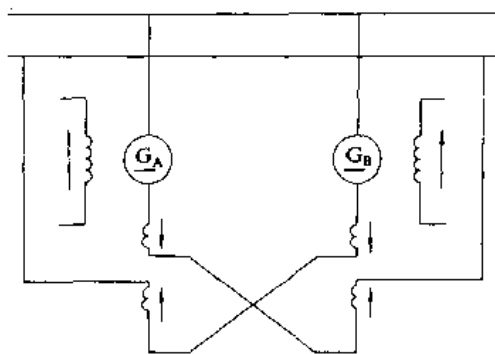


图 4.3-2 串励绕组的交叉连接

复励发电机并列运行时，可能由于负载变动使电流向一方倒流，从而使一台电机变成差复励电动机，造成转速异常上升。为防止产生这种现象，在串励绕组和换向极绕组之间接低电阻的均流线，如图 4.3-3 所示，在发电机 G_A 的负载增加时，发电机 G_B 的串励绕组电流也有相应的增加，从而提高 G_B 的感应电动势，使两台发电机负载平衡。

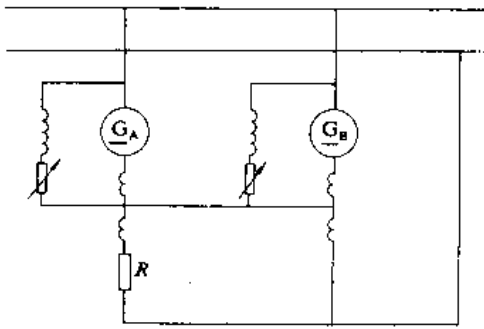


图 4-3-3 复励发电机的并列运行

2 直流电动机的运行特性

2.1 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、并励绕组的励磁电流不变时，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，直流电动机的主要工作特性见表 4-3-2。

表 4-3-2 直流电动机的主要工作特性

名称	特性曲线	他、并励	串励	复励	
转速特性		<p>转速 $n = [U - (I_a R_a + \Delta U_b)] / C_e \Phi$。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电路电阻压降与气隙磁通的变化</p>	<p>$I_f = \text{定值}$，气隙磁通 Φ 只受电枢反应的影响。I_a 增大时，电枢电路电阻压降使转速下降，电枢反应去磁效应使转速上升，因而转速变化较小，为硬转速特性。通常电阻压降影响较大，转速略为下倾。过载时，电枢反应影响增大，转速曲线上翘</p>	<p>$I_f = I_a$，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</p>	<p>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电动机转速特性之间</p>
转矩特性		<p>输出转矩 $T_2 = C_T \Phi I_a - T_0$。空载时，$I_a = I_0 = T_0 / (C_T \Phi)$；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</p>	<p>$I_f = \text{定值}$，轻载时，转矩特性基本上是通过 I_0 点的直线；过载时，电枢反应去磁作用增强，特性偏离直线，略为向下弯曲</p>	<p>磁通随电流的增加而增大，I_a 较小时磁路未饱和，转矩按 I_a^2 的关系增大；I_a 增大时，由于磁路逐渐饱和及电枢反应的影响，转矩增大变慢</p>	<p>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</p>

(续)

名称	特性曲线	他、并励	串励	复励
机械特性		<p>从转速—转矩公式 $n = (U - \Delta U_b) / C_e \Phi - R_a T_{em} / C_e C_T \Phi^2$ 可见, 机械特性具有与转速特性相似的形状。电枢电路接入外接电阻后, 其机械特性将变软</p>		
效率特性		<p>效率 $\eta = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P / (P_2 + \Sigma P)$。总损耗 ΣP 主要包括铁损耗、铜损耗和机械损耗等。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, 当铜损耗接近或等于铁损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, 一般应使铜损耗大于铁损耗与机械损耗之和; 经常过载的电动机则应尽量减小铜损耗</p>		

2.2 转速调整率

维持额定负载状态下的励磁电路不做调整, 保持端电压一定, 从满载到空载的转速变化, 用对额定转速 n_N 的百分率表示, 称为直流电动机的固有转速调整率 Δn_N , 即

$$\Delta n_N = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100 (\%) \quad (4.3-2)$$

式中 n_0 ——在上述条件下的空载转速 (r/min)。

他励和并励电动机的固有转速调整率较小, 一般小容量电动机为 10%~20%, 中等容量以上电动机为 10% 以下, 因此称为“恒速”电动机。串励电动机用负载电流励磁, 不允许空载运行, 在确定转速调整率时, 以 1/4 负载电流时的转速作为空载转速 n_0 进行计算。串励电动机的转速调整率很大, 称为变速电动机。复励电动机的转速调整率随串励绕组磁动势所占总励磁磁动势的比率而有很大变化, 大多在 20% 以上。

2.3 他励及并励电动机的稳定运行

电动机的稳定运行是指由于电源、负载等外部条件发生变化而使其转速随着发生变化时, 不产生振荡

或转速不稳定等不正常现象。这与负载特性、电动机的各种参数和调节性能等有关。当电动机的转速特性因受电枢反应去磁作用的影响而上升时, 通常运行就不稳定, 必须采取相应措施。主要措施有:

(1) 加装少匝串励稳定绕组。在不用补偿绕组的中小型电机中, 以及只靠补偿绕组尚得不到充分改善的大中型电机中, 可加少匝增磁的串励绕组, 以抵消部分电枢反应的去磁作用。在大型电机中, 当直接用负载电流给串励绕组励磁而增磁过大时, 可以用换向极或补偿绕组的分流电流给串励绕组励磁, 但应注意避免由于两条电路时间常数的不同, 引起瞬态电流分配发生变化而导致特性的恶化。加装串励绕组后, 在电动机反转时要改接串励绕组的接线。

(2) 加装补偿绕组。在大中型电机中, 或在调速范围大的小型电机中, 可加装补偿绕组以补偿电枢反应的影响。但单独采用此措施有时也可能得不到充分的改善。

(3) 补偿绕组偏位分布 (参见本篇第 2 章 5.1.3 节)。

(4) 电枢电路内加接电阻。利用电枢电路电阻降压抵消电枢反应引起的转速上升。但是, 由于它的损耗

大、效率下降,这种方法只适用于小型电机。

(5) 使用具有下降特性的电源。利用电源的电压变化率来遏制转速上升。此方法只适用于单独供电的电动机。

(6) 其他方法。顺电动机旋转方向移动电刷位置,利用直轴电枢反应的增磁作用;调节减弱换向极磁场强度,利用换向电流产生的直轴磁动势的增磁作用等方法。这些方法都直接影响电动机的换向性能,使用时应十分慎重。

2.4 直流电动机的起动、调速和制动

2.4.1 起动

在直流电动机起动过程中,其电枢电流、电磁转矩和转速将随时间而变化,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。为及时获得尽可能大的起动转矩和限制起动电流,除串励电动机外,应先励磁并使磁通 Φ 达到最大,然后再施加电枢电压。

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, $T_{st}/T_N \approx I_{st}/I_N$; 串励电动机的 Φ 随 I_a 的增加而增加, $T_{st}/T_N > I_{st}/I_N$ 。因此,当 I_{st}/I_N 值相同时,串励电动机可获得比并、他励电动机大得多的 T_{st}/T_N 值,具有更为优良的起动特性。复励电动机的起动特性介于并、他励电动机和串励电动机之间。

直流电动机有以下三种起动方法:

1. **直接起动** 电源直接加到电动机上,不需附加起动设备,操作简便。但由于电机内阻很小,电枢仍处于静止状态,反电动势为零,起动电流极大,有时可达额定电流的 10~20 倍,对电动机和电源都会造成不良影响。因此,它只适用于功率不超过 4kW、 $I_{st}/I_N = 6 \sim 8$ 的小型电动机。

2. **电枢电路串电阻起动** 起动时,电枢电路内串入多级的起动电阻,以限制起动电流,开始时接入全部电阻,随后逐级切除电阻,直至起动结束全部切除起动电阻。这种方法广泛应用于各种中小型直流电动机,但因起动过程中能量消耗大,不适用于大中型和经常起动的直流电动机。

3. **减压起动** 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。减压起动时,起动电流将随电枢电压的降低程度按正比减少。为使电动机能在最强磁场情况下起动,电动机应采用他励,使起动过程中励磁不受电源电压的影响。起动后,随着转速的上升,相应提高电压,以获得所需要的加速转矩。

这种方法在起动过程中能量消耗小,起动平滑,但需专用电源,多数用于要求经常起动的小型电动机和一般大中型电动机。

2.4.2 调速

直流电动机可以在广泛的范围内平滑地调速。当电枢电路内接入调节电阻 R 时

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R) - \Delta U_b}{C_e \Phi} \quad (\text{r/min}) \quad (4.3-3)$$

从上式可看出,直流电动机可以采用调节励磁电流、电枢端电压和电枢电路电阻等方法进行调速。

1. **他(并)励电动机的调速** 这类电动机的不同调速方法的主要特点、性能和适用范围见表 4.3-3。

有独立可变电源的他励电动机,常在额定转速以上作弱磁恒功率调速,并在额定转速以下作调压恒转矩调速,以扩大调速范围;通过电压(或磁场)正反变化,使电动机正反向旋转,还能进行能量反馈。

2. 串励电动机的调速

a. **调磁调速** 通过调节磁场进行调速,可分为:

(1) **分磁调速**。在串励绕组两端并联分流调节器,通过分流励磁电流来调节转速。分流调节器还应串接电抗器,以防止由于串励绕组与分流支路时间常数不同而在电流剧变时动态分流率相对稳态分流率发生变化,使电动机性能恶化。

(2) **切换串励绕组分接头调速**。在串励绕组上设分接头,通过分接头切换进行调速。由于分接头数有限,这种方式只能分级调速。

(3) **串励绕组串、并联调速**。把串励绕组一分为二,通过两种绕组接线方式的串、并联变换进行调速。这种方式的最大弱磁率为全励磁的 25%~30%。

b. **调压调速** 通过调节端电压进行调速,可分为:

(1) **斩波调速**。常在牵引电动机中采用。这种方式电流脉动很大,必须注意换向和温升,但这种方式能无级调速,运行效率高,能进行回馈制动。

(2) **串、并联调速**。由几台规格相同的电动机驱动同一负载,通过把电动机的电枢电路接成串联或并联,

表 4-3-3 他（并）励电动机的调速方法

调速方法	调节励磁电流 (弱磁调速)	调节电枢端电压 (调压调速)	调节电枢电路电阻 (串联电阻调速)
线路图及 特性曲线			
主要特点	<p>1. $U = \text{常值}$, n 随 I_f 和 Φ 的减小而升高</p> <p>2. n 越高, 换向越困难, 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越大。最高转速受机械因素、换向和运行稳定性的限制</p> <p>3. I_a 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</p>	<p>1. $\Phi = \text{常值}$, n 随 U 的减小而降低</p> <p>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</p> <p>3. I_a 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</p>	<p>1. $U = \text{常值}$, n 随 R 的增加而降低</p> <p>2. 转速越低机械特性越软。调速变阻器可兼作起动变阻器用</p> <p>3. I_a 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 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</p>
适用范围	具有运行效率高、磁场变阻器外形尺寸小、调速方便等优点。适用于额定转速以上的恒功率调速	具有起动平滑、运行效率高, 可进行回馈制动等优点。适用于额定转速以下的恒转矩调速	不需起动器, 但效率低, 失去恒速特性, 只适用于额定转速以下、不经常调速及机械特性要求较软的调速

以改变电动机的外施电压进行调速。在电力牵引电动机中, 串、并联调速结合串联电阻调速, 具有运行效率高、变速范围宽等优点。

c. 串联电阻调速 通过调节串联在电枢电路中的电阻进行调速。与在他励电动机中一样, 这种方式有效率低的缺点, 但串联电阻可以兼作起动器用, 且调速范围比调磁调速的宽, 调节较精细, 在电力牵引中广泛采用这种调速方式。

3. 复励电动机的调速 可以和他励电动机一样

进行调磁调速、调压调速。但在串励绕组励磁磁动势起主要作用的电机中, 不能用调磁进行范围宽广的调速。

2-4-3 制动

为使电动机迅速停转、减速或限制其转速过分升高, 除手动、气压、液压等机械制动外, 通常采用使电磁转矩反向的方法进行电磁制动。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 4-3-4。

表 4-3-4 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	$I_a = -\frac{E_a}{R_a + R}$	$I_a = -\frac{U + E_a}{R_a + R}$	$I_a = -\frac{E_a - U}{R_a}$
原理说明	<ol style="list-style-type: none"> 保持励磁不变, 电枢电路从电源切断, 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 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 转速越低, 制动效果越差, 因此, 转速降低到一定程度后, 如有必要, 常兼用机械制动加强制动效果 	<ol style="list-style-type: none"> 保持励磁不变, 电枢电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 制动时, 电机作发电机运行, 与电源串接向限流电阻供电。电源电能与机组的惯性动能转化为限流电阻与机组本身的损耗 转速降低后仍有良好的制动效果, 但消耗电源一定的电能。用此法使机组停转时, 应及时切断电源, 防止发生反向再启动 	<ol style="list-style-type: none"> 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 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 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	除用于旋转部件的减速制动外, 还用于限速制动, 如电力机车下坡、升降机下降等

注: 1. 在复励或串励电动机中, 制动时应反接串励绕组或使之他励。

2. 采用回馈制动时, 应对电动机进行过电压保护, 防止不能回馈时电压升高的危害。

2.5 直流电动机的供电

直流电动机历来采用由交流电动机驱动直流发电机的直流发电机组作供电电源。随着主机对电动机快速性能要求的提高和电力电子技术、微电子技术的发展, 大部分直流发电机组已被各种晶闸管整流电源取代。晶闸管整流电源调节响应快、系统内部压降小, 没有旋转体, 因而噪声小, 日常维护工作量少, 但其功率因数低, 对电网干扰大, 且在直流侧含有相当大的脉动分量, 不利于直流电动机的正常运行, 必须对系统和电动机本身采取相应的措施 (对电动机采取的措施参见本篇第 6 和 7 章)。

2.6 直流电动机的同轴运行

为减小传动系统的转动惯量, 有时用两台或两台以上相同规格的电动机同轴传动。同轴运行时各台电动机的负载分配按其机械特性而定。

同轴传动的两台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, 负载分配均匀。为降低线路对地电压, 多采用双发电机-双电动机接线 (图 4-3-4), 使线路各段对地电压均不高于单机电压。

并联接线时, 为使两台电动机的负载均匀分配, 通

常在电枢电路内串接差动平衡绕组，平衡绕组分成两半装在主极铁心上，并在两台电动机之间交叉连接，如图4-3-5所示。当负载分配均匀时，平衡绕组的磁动势互相抵消；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磁作用，从而减小两电动机负载分配的不均匀程度。但这种接法只适用于单向旋转的电动机，因为电动机反转时，平衡绕组将起反作用。

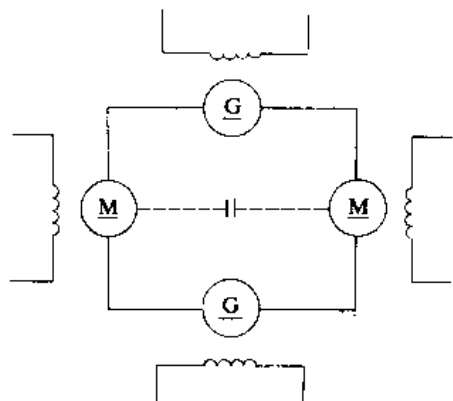


图 4-3-4 双发电机-双电动机串联接线

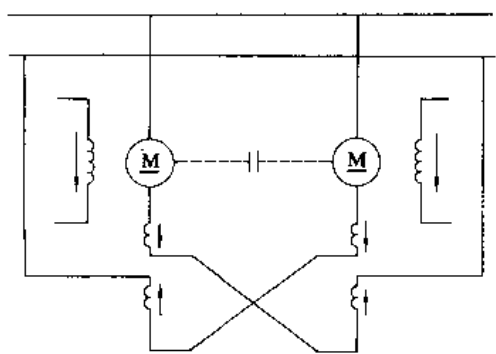


图 4-3-5 具有平衡绕组的电动机并联接线

3 直流电机的动态特性^[1]

动态特性是指电机从一个稳定状态变化到另一个稳定状态时在过渡过程中的特性。对变化快速性和过渡过程品质有较高要求的某些应用场合，电机的动态特性是很重要的技术指标。

3.1 时间常数

3.1.1 励磁电路时间常数

励磁电路时间常数 T_f 反映励磁电压变化时，励磁电流随之变化的快慢程度，是主极励磁绕组的电感与

励磁电路总电阻的比值，即

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (\text{s}) \quad (4.3-4)$$

$$L_f = L_{f0} \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} \quad (\text{H}) \quad (4.3-5)$$

$$L_{f0} = 2p\sigma N_f^2 \frac{\Phi}{AN_s} \quad (\text{H}) \quad (4.3-6)$$

- 式中 L_f ——主极励磁绕组电感 (H)；
 L_{f0} ——主极励磁绕组不饱和电感 (H)；
 R_f ——包括主极励磁绕组电阻和外接附加电阻在内的励磁电路总电阻 (Ω)；
 $\tan\alpha$ ——空载特性曲线上某一工作点的切线的斜率 (图 4-3-6)；
 $\tan\beta$ ——空载特性曲线直线部分的斜率 (图 4-3-6)；
 σ ——漏磁系数；
 N_f ——主极励磁绕组每极匝数；
 Φ ——空载特性曲线上某一工作点的磁通量 (Wb)；
 AN_s ——对应于上述 Φ 的每极气隙磁动势 (A)。

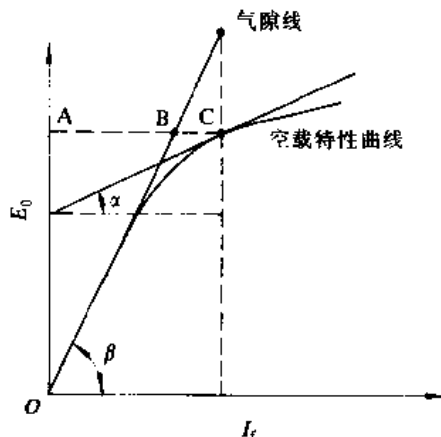


图 4-3-6 空载特性曲线的斜率比

若主极上还有其他相当于短路的绕组，而绕组间又相互耦合，则励磁电路时间常数会受这些因素的影响而增大。

3.1.2 电枢电路时间常数

电枢电路时间常数 T_a 反映电枢电压 (或电动势) 变化时，电枢电流随之变化的快慢程度，是电枢电路总电感 ΣL_a 与电枢电路总电阻 ΣR_a 的比值，即

$$T_a = \frac{\Sigma L_a}{\Sigma R_a} \quad (\text{s}) \quad (4.3-7)$$

$$\Sigma L_a = L_a + L_{ad} \quad (\text{H})$$

$$\Sigma R_a = R_a + R_{ad} \quad (\Omega)$$

式中 L_a ——电枢电路绕组电感 (H);
 L_{ad} ——电枢电路中的附加电感, 如平波电抗器的电感 (H);
 R_a ——电枢电路绕组电阻 (Ω);
 R_{ad} ——电枢电路中的附加电阻 (Ω).

电枢电路绕组电感 L_a 可根据电机各部分尺寸, 由导体的磁链数求得, 或根据电机试验实测值归纳出的经验公式求得

$$L_a = 19.1 C_x \frac{U_N}{2 p n_N I_N} \quad (\text{H}) \quad (4.3-8)$$

式中 C_x ——电感系数, 无补偿绕组发电机时取 0.6, 有补偿绕组发电机时取 0.2, 无补偿绕组电动机时取 0.3~0.4, 有补偿绕组电动机时取 0.1~0.15;
 U_N ——电机额定电压 (V);
 n_N ——电机额定转速 (r/min);
 I_N ——电机额定电流 (A).

3.1.3 电动机的机电时间常数和加速时间常数

电动机的机电时间常数 T_m 是电动机在额定磁场下, 以额定转矩从静止加速到额定转速降 Δn_N ($\Delta n_N = I_N \Sigma R_a n_N / U_N$) 所需的时间, 按下式计算:

$$T_m = \frac{\Sigma G D^2}{375} \frac{\Sigma R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} \quad (\text{s}) \quad (4.3-9)$$

式中 $\Sigma G D^2$ ——包括电动机飞轮力矩和折算到电动机轴上的负载飞轮力矩之和 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$);
 C_e ——电动势常数;
 C_T ——转矩常数;
 Φ_N ——电动机每极额定磁通量 (Wb).

电动机的加速时间常数 (或称积分时间常数) T_i 是电动机在额定磁场下, 以额定转矩从静止加速到额定转速 n_N 所需的时间, 按下式计算:

$$T_i = \frac{\Sigma G D^2}{375} \frac{n_N}{T_N} \quad (\text{s}) \quad (4.3-10)$$

式中 T_N ——电动机额定转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$).
 T_m 和 T_i 都反映电动机的加速性能, 它们之间的关系是

$$T_m = T_i \frac{I_N \Sigma R_a}{U_N} \quad (\text{s}) \quad (4.3-11)$$

T_m 和 T_i 都和 $\Sigma G D^2$ 有关, 而 $\Sigma G D^2$ 中主要是电动机本身的 $G D^2$, 电动机的 $G D^2$ 与 $D^2 l$ 成正比。因此, 为了减小 T_m 和 T_i , 得到良好的动态响应性能, 在选择电枢直径 D_a 和铁心长度 l 时, 应尽量选择小直径和

长铁心, 必要时采用多电枢电动机代替单电枢电动机, 以减小电动机本身的 $G D^2$ 。

3.2 动态响应

3.2.1 直流发电机的电压响应

保持直流发电机的转速不变, 当其励磁电压变化时, 其电枢感应电动势的变化称为直流发电机的电压响应。

直流发电机的框图如图 4.3-7 所示。

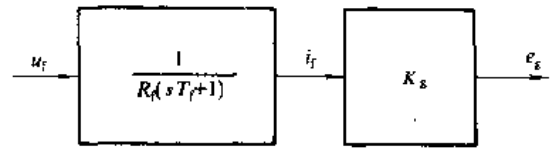


图 4.3-7 直流发电机框图

由图 4.3-7 得直流发电机的传递函数为

$$\frac{e_g}{u_f} = \frac{1}{R_f (s T_f + 1)} K_g \quad (4.3-12)$$

式中 e_g ——发电机电动势 (V);
 u_f ——发电机励磁电压 (V);
 K_g ——发电机转换系数 (Ω).

由于电机的磁化曲线的非线性, K_g 不是常数。但当 u_f 在某一工作点附近变化时, 可以认为 K_g 是常数。这样, 当 u_f 是阶跃函数时, 发电机电动势对励磁电压变化的响应如图 4.3-8 所示。

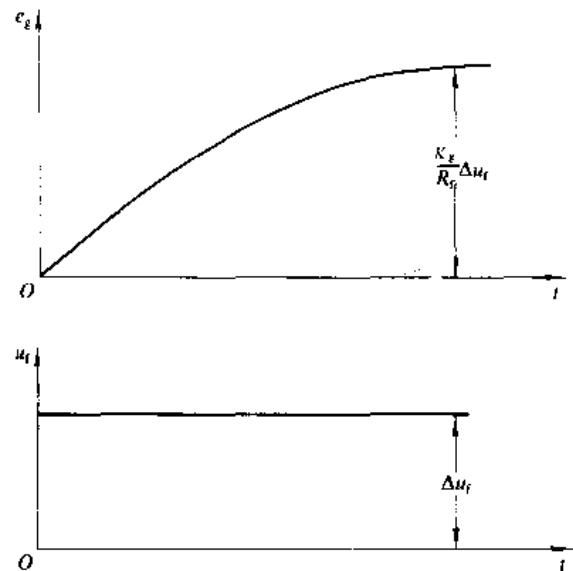


图 4.3-8 直流发电机的电压响应

3.2.2 直流电动机的励磁响应

当直流电动机励磁电压变化时, 电动机磁通的变

化称为直流电动机的励磁响应。

直流电动机的励磁框图如图4-3-9所示。

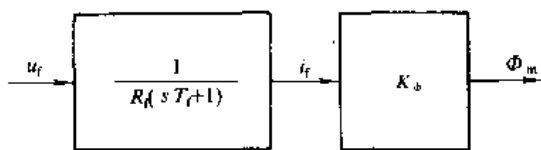


图4-3-9 直流电动机的励磁框图

直流电动机励磁的传递函数为

$$\frac{\Phi_m}{u_f} = \frac{1}{R_f(sT_f + 1)} K_e \quad (4-3-13)$$

式中 Φ_m ——电动机磁通量 (Wb)；

K_e ——电动机励磁转换系数 (Wb/A)。

同样原因, K_e 也不是常数。比较式 (4-3-12) 与式 (4-3-13) 可知, 电动机励磁传递函数与发电机传递函数在形式上完全一样, 因此, 它们的响应特性也是一样。当 u_f 是阶跃函数时, 电动机磁通对励磁电压变化的响应类似图 4-3-8, 只要把 Y 轴由 e_g 改换成 Φ_m 。

3-2-3 直流电动机的转速响应

直流电动机的框图见图 4-3-10。图中有两个输入量: 电动机电枢电压 u_m 和电动机的负载转矩 T_L 。下面分别说明它们的作用。

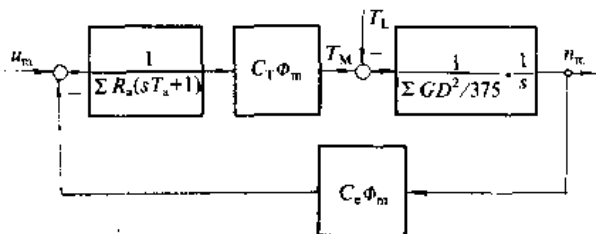


图4-3-10 直流电动机框图

1. 电压波动时的转速响应 保持负载转矩不变, 电枢电压 u_m 发生变化时电动机转速 n_m 的变化称为电压波动时的转速响应。此时电动机的传递函数为

$$\frac{n_m}{u_m} = \frac{1}{C_e \Phi_m} \frac{1}{s^2 T_m T_a + s T_m + 1} \quad (4-3-14)$$

式中 n_m ——电动机转速 (r/min)。

当 u_m 是阶跃函数时, 电动机的转速响应如图 4-3-11 所示。当 $T_m < 4T_a$ 时, 转速响应出现振荡, 对很多应用场合这是不希望的。然而大多数电动机的 $T_m < 4T_a$, 所以往往需要采用调节系统加以校正, 以期得到所需要的响应特性。

2. 负载波动时的转速响应 保持电动机电枢电

压 u_m 不变, 负载转矩 T_L 变化时电动机转速 n_m 的变化称为负载波动时的转速响应。此时电动机的传递函数为

$$\frac{n_m}{T_L} = - \frac{\Sigma R_a}{C_e C_T \Phi_m^2} \frac{s T_a + 1}{s^2 T_m T_a + s T_m + 1} \quad (4-3-15)$$

传递函数前的负号表示当负载转矩 T_L 增加时, 电动机的转速 n_m 下降。

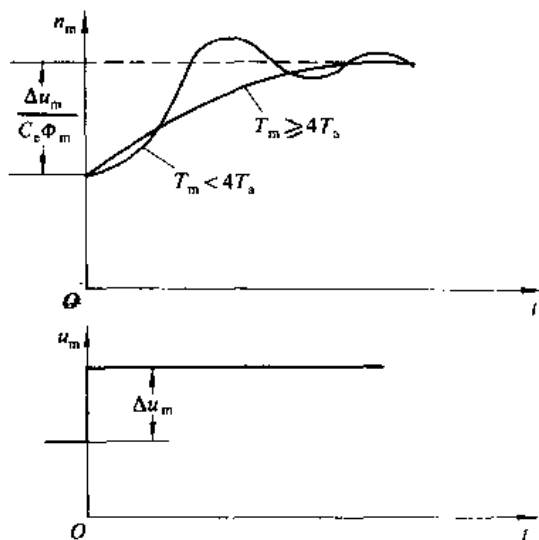


图4-3-11 电压波动时的转速响应

当 T_L 是阶跃函数时, 电动机的转速响应如图 4-3-12 所示。与电压波动时的转速响应相似, 在 $T_m < 4T_a$ 时, 转速响应出现振荡, 也要考虑予以校正。

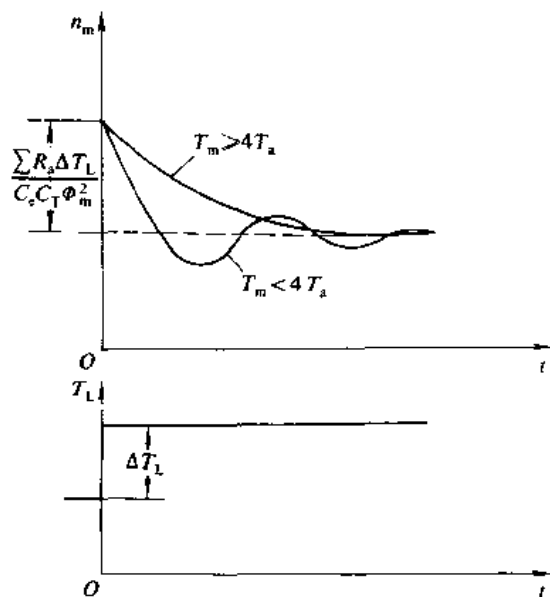


图4-3-12 负载转矩波动时的转速响应

3.3 短路电流

直流电机电枢电路两端发生短路时，在电枢电路内流过如图 4-3-13 所示的电流。此电流可以用电机的详细设计数据计算。

短路后瞬间的电流上升率是选择保护回路中的断路器、熔断器等容量的依据，可按下式计算：

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{U_N e_0}{L'_a} \quad (\text{A/s}) \quad (4.3-16)$$

式中 U_N ——电机额定电压 (V)；

e_0 ——短路前瞬间感应电动势标么值 (在额定电压下短路时，发电机为 1.03，电动机为 0.97)；

L'_a ——电枢电路不饱和电感 (H)。

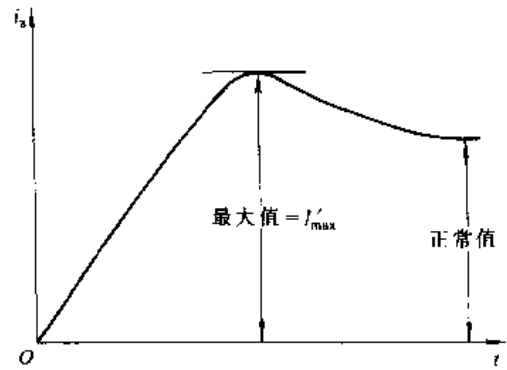


图 4-3-13 短路电流的变化

第4章 换 向 [8][9][17]

换向是指旋转着的电枢绕组元件从一个支路进入另一个支路时，在被电刷短接的过程中，元件内电流发生改变方向的变化。

换向过程十分复杂，它不仅是电磁的变化过程，同时还受到负载、电刷材质、机械、化学和环境等各种因素的影响。目前所掌握的关于换向的理论分析和计算已能近似地反映这个过程的物理本质，并能指导实践。

换向不良时将会出现强烈火花，造成换向器表面和电刷损坏，进而使电机不能继续运行。因此，换向性能是直流电机运行品质的重要指标。对换向理论和改善换向的措施仍在进一步研究。

1 换向过程的基本概念

在换向过程中，被电刷短接的绕组元件称为换向元件。稳定运行时，换向元件中电流换向的过程如图 4-4-1 所示。电枢旋转时，当电刷与换向器的相对位置为刷位 (1) 时，元件开始换向，换向元件中的电流为 $i = i_a$ ；至刷位 (3) 时，元件换向结束， $i = -i_a$ ；在刷位 (2) 时，元件正在换向， i 随时间而变。换向元件从开始换向到换向结束所经历的时间称为换向周期 T_k ，历时甚短。在此期间电刷与换向器的相对位移称为电刷计算宽度

$$b'_b = b_b + \left(1 - \frac{a}{p}\right) t_k \quad (\text{m}) \quad (4.4-1)$$

式中 b_b ——电刷宽度 (m)；
 a ——电枢绕组支路对数；
 p ——极对数；
 t_k ——换向片距 (m)。

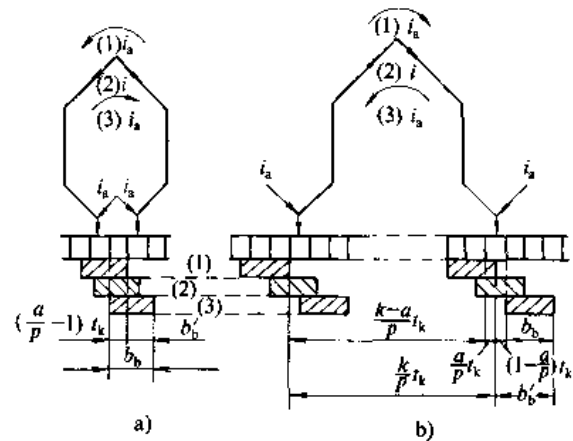


图 4-4-1 换向过程

a) 叠绕组 b) 波绕组

若换向器表面线速度为 v_k (m/s)，则

$$T_k = \frac{b'_b}{v_k} \quad (\text{s}) \quad (4.4-2)$$

叠绕组和波绕组 (参见本篇第 5 章) 的换向过程在本质上并无区别，在叠绕组中，换向元件被同一块电刷短接；而在波绕组中，当刷杆数等于极数时，被两块相同极性的电刷所短接。

在换向过程中，有时会在电刷下出现换向火花。电刷下的微弱火花对电机运行并无危害；但强烈的火花

将使电机不能正常工作,尤其在某些不利条件下,在正负电刷间形成的环火,将使电机受到严重损坏。

换向火花主要是由于换向元件与电刷所组成的回路中的电磁原因造成的。某些机械因素,如电机振动、换向器偏心或凸片、刷握弹簧压力不当、电刷在刷握中不正常跳动等,以及电刷与换向器滑动接触受化学与电离作用的影响,对形成换向火花也有密切的关系。

1.1 换向元件中的电动势

在换向过程中,由换向元件与电刷所组成的闭合回路中存在三种不同性质的电动势,即电抗电动势、旋转电动势和变压器电动势。

1.1.1 电抗电动势

绕组元件中通过电流时,在元件的槽部、端部和齿顶将产生漏磁通。换向元件中的电流变化时,漏磁通也随之变化。由于漏磁通的变化在换向元件中所感生的电动势称为电抗电动势 e_r 。电抗电动势包括换向元件本身的漏磁自感电动势 e_l 和同时进行换向的其他同槽元件通过互感在该元件中所产生的漏磁互感电动势 e_M , 即 $e_r = e_l + \sum e_M$ 。根据电磁感应定律,电抗电动势的方向与其换向前的电流方向相同,它阻碍换向元件中电流的变化,不利于换向。

电抗电动势与换向元件中的电流变化率和同槽各元件开始及结束换向的时刻错开情况有关。因此,就某一换向元件而言,在换向周期内其 e_r 值一般并不是常数,且同槽各换向元件的 e_r 变化情况也各不相同。工程上通常用平均电抗电动势 e_{rK} 来衡量电抗电动势的大小。所谓平均电抗电动势,是指在换向元件中的电流按直线规律变化情况下,同槽各个换向元件平均电抗电动势的平均值,其值可按式计算:

$$e_{rK} = 2N_s v_s A l_s \xi \quad (4.4-3)$$

- 式中 N_s ——电枢绕组每元件匝数;
- v_s ——电枢圆周线速度 (m/s);
- A ——电枢电负荷 (A/m);
- l_s ——电枢铁心有效长度 (m);
- ξ ——表征换向元件平均比漏磁导的平均值大小的系数 (H/m)。

系数 ξ 的值与绕组元件的比漏磁导、每槽并列元件边数、元件节距缩短或伸长的换向片数以及电刷计算宽度与换向片距之比有关。减小槽形尺寸的高宽比和增加电刷的覆盖片数可使 ξ 的计算值减小。

1.1.2 旋转电动势

换向元件相对换向区内的外磁场旋转时所感生的电动势称为旋转电动势 e_w 。旋转电动势的方向取决于外磁场的极性与电机的旋转方向。旋转电动势的方向与电抗电动势的方向相反时,将加速电流的变化,有利于换向。不同结构的直流电机其换向区内的外磁场和换向元件中旋转电动势的性质和方向见表 4.4-1。

表 4.4-1 外磁场与旋转电动势的性质

电机结构	换向区内的外磁场	换向元件中的旋转电动势
有换向极①	换向极磁场 B_k	换向电动势 e_k , 方向与 e_r 相反
无换向极	电刷在中性位置	交轴电枢反应电动势 e_{aq} , 方向与 e_r 相同
	电刷偏离①中性位置	气隙合成磁场 B_g 气隙磁场电动势 e_g , 方向与 e_r 相反

① 换向极的极性与电刷偏离的方向可参见本章 2.1 和 2.2 节。

1.1.3 变压器电动势

电枢绕组元件在被电刷短接的过程中,其轴线基本上与主极同轴。由于主极磁通随时间而变,在换向元件中所感生的电动势称为变压器电动势。开槽电枢旋转时所引起的主极磁路磁导脉动,脉动电流励磁时主极磁动势的脉动,特别是强行励磁时主极磁通的快速变化,均将在换向元件中引起变压器电动势。脉动的变压器电动势对电机的换向性能影响不大,高励磁倍数的强励将使电机的动态换向性能恶化。

若取元件换向前的电流方向为换向元件回路的参考方向,与回路参考方向相同的电动势为正值,相反的为负值,则在稳态运行且不计变压器电动势时,换向元件回路内的合成电动势为

$$\sum e = e_r + e_w \quad (4.4-4)$$

1.2 换向元件中的电流

换向元件中的电流可通过相互间存在电磁耦合关系,且同时换向的各换向元件回路的电压方程联立求

包凡 1-1-1

解获得,对于单叠绕组,且电刷只覆盖一片换向片的最简单情况,若不计元件及引线电阻,并假定电刷接触电阻与接触面积成反比,则换向元件中电流*i*的变化规律为

$$i = i_1 + i_k \quad (\text{A}) \quad (4\cdot4-5)$$

$$i_1 = \left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) i_a \quad (\text{A})$$

$$i_k = \frac{\Sigma e}{R\left(\frac{T_k}{t} + \frac{T_k}{T_k - t}\right)} \quad (\text{A})$$

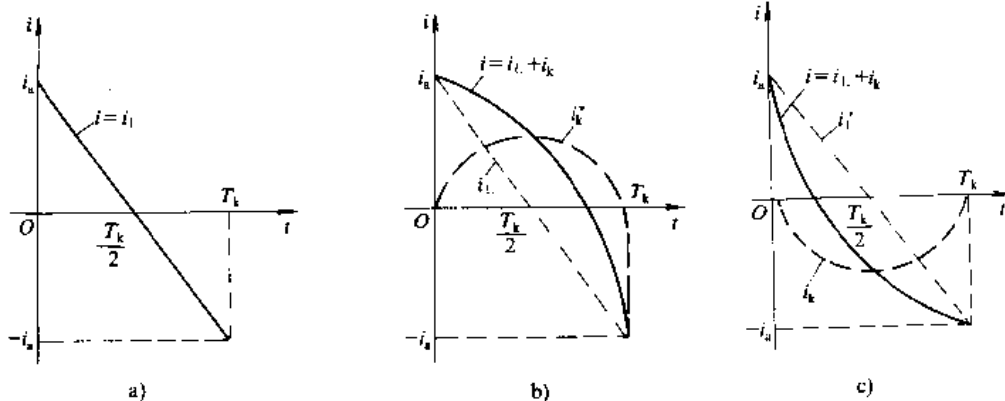


图 4·4-2 换向元件中的电流变化

a) 直线换向 b) 延迟换向 c) 超越换向

1·2·1 直线换向

$\Sigma e = 0$ 时, $i_k = 0$, $i = i_1$, 换向元件中的电流按直线规律变化,如图 4·4-2a 所示,这种换向称为直线换向。直线换向时,电流*i*在 $t = T_k/2$ 时改变方向;前、后刷边电流密度相等;换向元件的电流仅产生交轴磁动势。

1·2·2 延迟换向

$\Sigma e > 0$ 时, $i = i_1 + i_k$, $i_k > 0$, 电流*i*改变方向的时刻比直线换向的迟,如图 4·4-2b 所示,这种换向称为延迟换向。延迟换向时,后刷边电流密度大于前刷边电流密度;换向元件中的电流所产生的磁动势有直轴分量,使发电机去磁、电动机增磁。

1·2·3 超越换向

$\Sigma e < 0$ 时, $i = i_1 + i_k$, $i_k < 0$, 电流*i*改变方向的时刻比直线换向的早,如图 4·4-2c 所示,这种换向称为超越换向。超越换向时,前刷边电流密度大于后刷边电流密度;换向元件中的电流所产生的磁动势有直轴分量,使发电机增磁、电动机去磁。

换向火花与换向元件回路中的电磁变化过程有密切关系,通常直线换向时电刷下不易出现火花;超越换

式中 i_1 ——直线换向电流 (A);

i_k ——附加换向电流 (A);

i_a ——电枢绕组支路电流 (A);

R ——换向片被电刷全部覆盖时的接触电阻 (Ω)。

在换向过程中,换向元件中电流*i*的变化情况,按其中 Σe 的不同,有直线换向、延迟换向和超越换向三种基本类型,其特征如图 4·4-2 所示。

向时前刷边可能出现火花;延迟换向时后刷边常出现火花。特别是当换向接近终了 ($t = T_k$) 时,由于电刷和与其即将脱离接触的换向片之间的接触电阻值 $RT_k/(T_k - t)$ 实际上并不趋于无穷大,换向元件中的电流还来不及变化到将要进入的支路所应有的电流 $-i_a$, 回路中将留有如图 4·4-3 所示的剩余换向电流 i_k 。因而在换向元件回路断开时,尚需释放出相应的电磁能量,当 i_k 较大,此能量达到一定限度时,将在后刷边出现火花。这一剩余换向电流是由电抗电动势造成的,应在设计及换向调整时予以补偿。

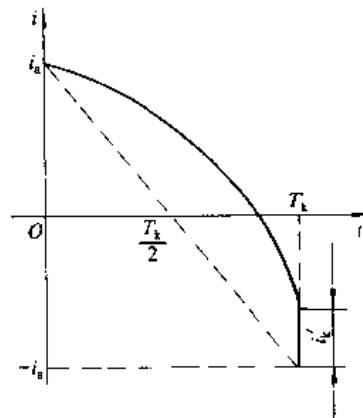


图 4·4-3 剩余换向电流

200
电

1.3 换向区

从槽内最先换向的元件边开始换向起到最后换向的元件边换向结束止,该槽在电枢表面所转过的区域称为换向区。电枢绕组的元件在换向区内进行换向。对于有换向极的电机,为排除主极磁场对换向元件中电流变化的影响,换向区应位于相邻主极之间的中性区域内,且换向区宽度与中性区宽度之比应不超过0.75。

换向区宽度 b_k 可按下式计算:

$$b_k = \frac{D_1}{D_2} \left[b_0 + \left(u + \epsilon_k - \frac{a}{p} \right) l_k \right] \quad (\text{m}) \quad (4.4-6)$$

式中 D_1 、 D_2 ——电枢、换向器直径 (m);

u ——每槽并列元件边数;

ϵ_k ——绕组节距缩短或伸长的换向片数。

1.4 片间电压

换向器上任意相邻两换向片之间的电压称为片间电压,其值与连接到换向片的电枢绕组元件所感生的电动势及绕组型式有关。不计绕组节距缩短和波绕组串联元件在各个极对下磁场位置相对位移的影响,片间电压为

$$U_{kx} = 2 \frac{p}{a} l_a v_a N_a B_{ax} \quad (\text{V}) \quad (4.4-7)$$

式中 l_a ——电枢计算长度 (m);

B_{ax} ——与换向片相连元件所处位置的气隙磁通密度 (T)。

因而气隙磁通密度的分布曲线在另一比例尺下即为换向器片间电压的分布曲线。

电机空载时,主极极靴范围内的气隙磁通密度 $B_{ax} = B_0$ 几乎不变。因此,空载时的最大片间电压为

$$U_{k0} = \frac{2pE_0}{aK} \approx \frac{2pU}{aK} \quad (\text{V}) \quad (4.4-8)$$

式中 E_0 ——空载时电枢绕组的电动势 (V);

a ——计算极弧系数;

U ——电枢绕组的端电压 (V);

K ——换向片数。

负载时,交轴电枢反应使气隙磁场畸变的结果将使某些换向片之间的片间电压升高。此时的最大片间电压

$$U_{k\max} = U_{k0} K_d \quad (\text{V}) \quad (4.4-9)$$

$$K_d = \frac{B_{d\max}}{B_0}$$

式中 K_d ——气隙磁场畸变系数;

$B_{d\max}$ ——负载时的最大气隙磁通密度 (T)。

对于无补偿绕组电机,其 K_d 值约在 1.3~1.5 之间;对于有补偿绕组电机,其 K_d 值随补偿度而异,一般很小。气隙磁场畸变越大,最大片间电压越高。无补偿绕组电机弱磁运行时,其 $U_{k\max}$ 最大。片间电压过高将在换向片之间产生电位差火花,易于与电刷下的换向火花汇合在一起扩展成环火,造成严重后果。为防止电位差火花及环火,一般应使 $U_{k\max} \leq 40\text{V}$ 。

为简化计算,工程上通常只核算平均片间电压

$$U_{kav} = \frac{2pU}{K} \quad (4.4-10)$$

并按电机的所属类型及运行特点,控制其平均片间电压不超过下列限值:无补偿绕组电机时为 18V,有补偿绕组电机时为 22V,大功率轧钢电机时为 17~20V。

2 改善换向的方法

换向元件中由合成电动势 Σe 所产生的附加换向电流 i_k 是引起电刷火花的主要原因。减小 Σe 和增加换向元件回路内的电阻值,是限制 i_k 从而改善换向的有效方法。

2.1 移刷

在无换向极电机中,可借电刷移位使换向区随电刷自几何中性线移至某一极性气隙磁场内适当的位置,利用该处气隙磁场在换向元件中产生的旋转电动势来抵偿电抗电动势,从而达到改善换向的目的,如图 4.4-4 所示。

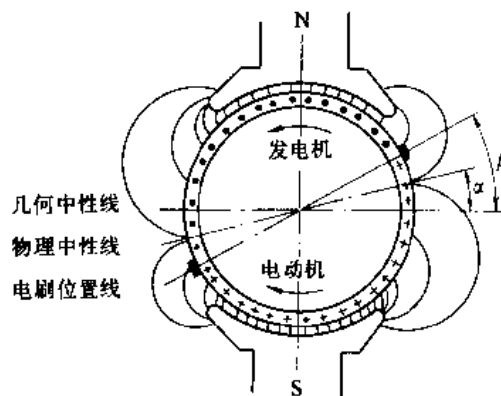


图 4.4-4 移刷

由图可见,发电机应顺转向移刷,电动机应逆转向移刷,且电刷偏离几何中性线的角度 β 应大于物理中性线的偏移角 α 。采用移刷改善换向时,换向区内的气

隙磁场将随电枢电流的增加而减弱，某一刷位只能在某一特定负载的情况下才能获得较好的换向。因此，这种方法只适用于换向不困难的小型不逆转直流电机。

2.2 换向极

装置换向极是广泛采用的改善直流电机换向的有效措施。换向极装在主极之间的交轴上，与主极成 90° 电角度，极数一般与主极极数相同。在发电机中，换向极的极性应与沿旋转方向前面即将进入的主极的极性相同，在电动机中则相反。换向极的作用在于抵消交轴电枢反应磁动势，并在换向区内建立与交轴电枢反应磁动势方向相反、磁通密度为 B_k 的换向极磁场，使换向元件旋转时能产生换向电势 e_k (表 4.4-1)，以抵消电抗电势 e_r ，并形成适当的超越换向，见图 4.4-5。

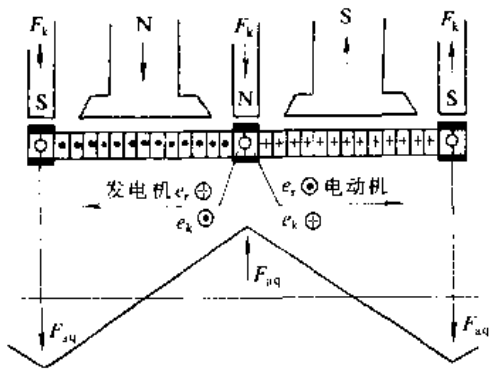


图 4.4-5 换向极的极性与换向电势的方向

对于无补偿绕组电机，换向极绕组磁动势 F_k 为

$$F_k = F_{aq} - F_{k0} \quad (4.4-11)$$

式中 F_{aq} ——交轴电枢反应磁动势；

F_{k0} ——换向极磁路磁位降，在换向磁路未饱和时，主要是 B_k 所引起的气隙磁位降。

若换向极的计算长度 l_{pk} 等于电枢铁心有效长度 l_a ，则 $B_k = \xi A$ 时， $e_k = e_r$ ，为直线换向； $B_k > \xi A$ 时， $e_k > e_r$ ，为超越换向； $B_k < \xi A$ 时， $e_k < e_r$ ，为延迟换向。在换向极磁动势已确定的情况下，可以通过调整换向极气隙以获得所必需的 B_k ，从而调整换向。

为保持 B_k 与电枢电负荷 A 在不同负载时都成正比，换向极磁动势的大小应与电枢电流成正比，同时换向极磁路应处于低饱和状态。因此，换向极绕组必须和电枢绕组串联，换向极气隙应较大，换向极磁路磁通密度应较低，以提高磁路的线性度。

但随着负载电流的增大，即使采用了较大的气隙，

换向极磁路仍将逐渐趋于饱和， B_k 的增长将逐渐缓慢；当负载电流超过一定限度，磁路过度饱和后， B_k 反将逐渐变小，如图 4.4-6 所示，此时 e_k 将不足以补偿 e_r 而呈现延迟换向。

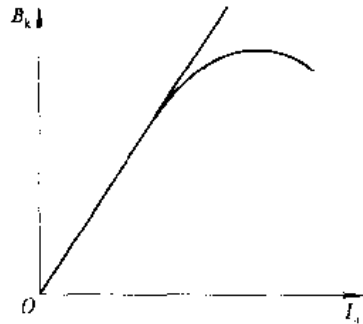


图 4.4-6 换向极气隙磁通密度与电流的关系

比换向极气隙磁通大得多的换向极漏磁通 ϕ_k 是造成换向极磁路饱和的重要因素。采用换向极第二气隙 δ_{k2} 可以增加漏磁磁路磁阻，减小换向极漏磁，从而改善电机过载时的换向性能。换向极第二气隙是在换向极极身与机座之间垫以非磁性垫片而形成的，见图 4.4-7。

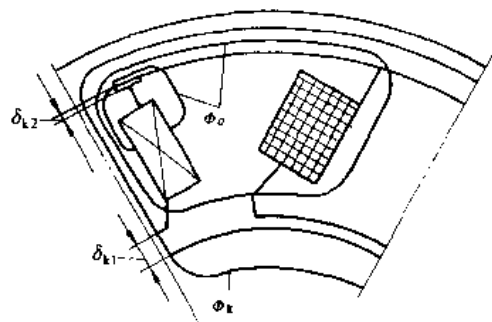


图 4.4-7 换向极第二气隙

装置换向极只能在换向周期内使 e_k 和 e_r 的平均值相抵消，而不能使它们在换向周期内任一瞬间均相互抵消，这是因为 e_k 与 e_r 瞬时值随时间而变化的波形不同，前者决定于 B_k 在换向区内的空间分布，后者则与电枢绕组型式、电刷覆盖片数及换向元件中电流的变化规律等因素有关。电抗电势的平均值 e_r 越大， e_k 与 e_r 的瞬时值之差也越大。因此，改善换向除了应使 e_k 与 e_r 的波形尽量接近，以获得较好的瞬时补偿度之外，还应应对 e_r 的值加以限制。一般 e_r 应小于 $5 \sim 8V$ ，冲击负载时应小于 $8 \sim 14V$ ，高圆周速度时应取低值。

2.3 补偿绕组

补偿绕组分布于主极极靴的补偿槽内，与电枢绕

组串联，其中通以与同一主极下电枢绕组电流方向相反的电流，且其电负荷与电枢电负荷相接近，因而它所建立的磁动势与电枢磁动势方向相反，在主极极靴范围内两者的大小也相近，如图4-4-8所示。补偿绕组的作用在于补偿电枢磁动势，从而基本消除电枢反应引起的气隙磁场畸变，使片间的最大峰值电压降低，以减小产生换向器电位差火花的可能性。

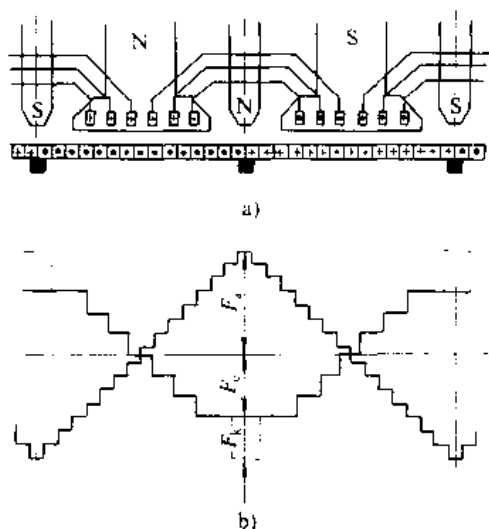


图4-4-8 补偿绕组

a) 补偿绕组布置 b) 补偿绕组磁动势分布

采用补偿绕组的电机毫无例外地都装有换向极。由于补偿绕组与换向极绕组同轴，两者在交轴所建立的磁动势方向相同，因此，采用补偿绕组后换向极绕组磁动势 F_x 为

$$F_x = F_{aq} - F_c - F_k \quad (4-4-12)$$

式中 F_c —— 补偿绕组磁动势。

比较式(4-4-12)与式(4-4-11)可见，采用补偿绕组后可减小换向极所需的安匝数，从而可使换向极的漏磁通减小，提高换向极磁路的线性度，以改善电机过载和承受冲击负载时的换向性能。

2.4 电刷与滑动接触

选用接触电压降较大，特别是伏安特性较陡的电刷，可有效地改善换向。换向器表面的薄膜——换向器氧化膜，对换向也很有影响。

电机正常运行时，换向器表面将形成一层适当厚度的薄膜，它是由氧化亚铜以及吸附的石墨屑和水分等组成。这层薄膜能增大换向元件回路的接触电阻，薄膜中的石墨屑与水分还能对滑动接触起润滑作用，以保持良好而稳定的滑动接触，对换向有利。薄膜在电

机运行中不断地被电刷的研磨作用所破坏，同时当电流通过滑动接触层时，由于滑动接触面的温度较高，接触层中含有氧气和水分，正电刷又不断分离出石墨屑和碳的结晶体，所以又不断形成新的薄膜。当这种破坏和重新形成处于平衡时，薄膜便达到稳定的正常运行状态。如果滑动接触面温度过低或周围环境存在缺氧、干燥等情况，薄膜被破坏后就不易重新形成，将引起电刷振动，噪声增大，同时换向变坏，产生火花。在相反的情况下，薄膜生成过厚而厚薄不均，容易引起刷杆上电刷间电流分配不均，而使火花集中到某几个电刷上。

为获得良好的滑动接触特性，电刷的材质一般应是：电阻率、接触电阻大；粘性系数大、弹性系数小；摩擦系数小，而且变化少；生成氧化膜能力强，研磨性适当，能生成坚韧而不过厚的氧化膜；材质均匀、颗粒粘结力大、石墨化程度和灰分适当等。电刷的结构应与刷握结构相匹配；大截面电刷宜采用双子电刷或串列电刷；电刷顶部采用防振橡皮吸收振动，并防止各并联电刷间电流分配不均等。

影响电刷和换向器滑动接触特性的因素很多，除与电刷的材质及其理化特性有关外，还与换向器的圆周速度、电刷的电流密度、刷握的结构和施加于电刷上的单位压力、换向片的材质以及周围介质的情况等有关，它们之间往往又是相互关联的，关系错综复杂。因此，在选择电刷时，应综合考虑电机的特性、使用状态和安装场所的环境条件。选用电刷的实践经验也十分重要。

2.5 叠片机座与电感分路

当电机负载突变时，在换向极磁路中的机座、换向极铁心以及换向极垫片等零部件内将产生涡流。涡流的阻尼作用将使换向极磁通的变化滞后于电枢负载电流的变化，从而造成在负载突加或突卸时分别出现换向过分延迟或过分超越，使电机换向性能较稳态时恶化。机座、换向极铁心为整体结构时，情况更为严重。为改善突变负载时的换向性能，可采取如下措施：

(1) 机座与换向极铁心采用叠片结构，换向极垫片应开槽或采用高电阻材料冲制，以减少其中有害的涡流阻尼作用。

(2) 采用与换向极绕组并联的电感分路，如图4-4-9所示。电感分路的时间常数应较换向极绕组的大，在电枢电流急剧变化时，可以使换向极绕组的电流 I_k 和换向极磁通 Φ_k 有更快速的变化。

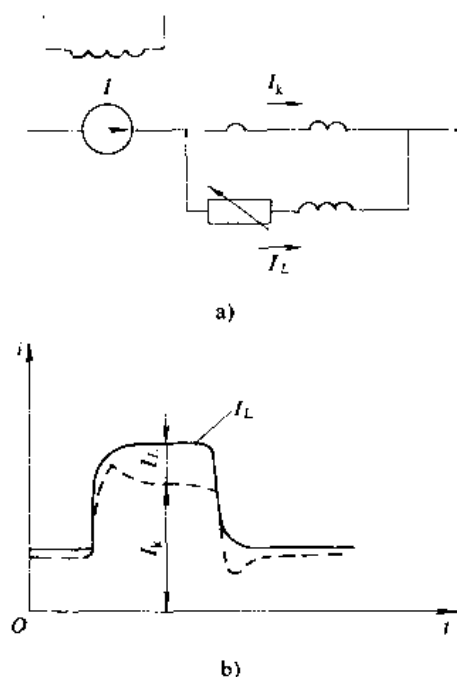


图 4-4-9 换向极绕组的电感分路

a) 接线图 b) 负载突变时的电流变化

2.6 其他

除以上各项改善换向的措施外,设计电机时设法降低电枢槽的槽深与槽宽之比(如取消槽楔代之以无纬带绑扎,采用变断面电枢绕组),增加电刷覆盖片数(刷杆上半数电刷在换向器上做切向位移),采用短距、异槽式或拉图尔式电枢绕组(参见本篇第5章)等,都是行之有效的改善换向的措施。它们或者可降低平均电抗电动势 e_R ,使电抗电动势波形平坦,易于获得较好的瞬时补偿度;或者可使任一元件在换向结束时均存在同槽短路元件,后者既可对槽漏磁进行阻尼,使换向元件漏磁电感减小,又可吸收换向元件回路断开时,因存在剩余换向电流所必须释放的电磁能量,有利于抑制电刷火花。

3 换向火花

良好的换向是直流电机正常运行的必要条件。换向不良时,在电刷下会出现火花。微弱的火花对电机的正常运行并无妨碍,还有助于生成适当的换向器氧化膜,但当火花超过一定级别时,将引起换向器和电刷的电腐蚀和机械磨损,从而使电机不能正常运行,严重时可使电机损坏。

3.1 火花等级

按火花的强烈程度及其对换向器和电刷所造成的后果,换向火花分为1, $1\frac{1}{4}$, $1\frac{1}{2}$, 2和3等五级(见国标GB755《旋转电机基本技术要求》)。如无特殊要求,电机在从空载到额定负载的情况下,火花不应超过 $1\frac{1}{2}$ 级;短时过载时,火花不应超过2级。

3.2 火花评定

换向火花等级迄今仍由有经验人员用肉眼观察评定。为避免肉眼观察的主观性,曾试图发展客观评定火花等级的新方法,但都尚未达到实用阶段,这些方法有:

(1) 光谱分析 根据火花发光光谱中各谱线的波长(即颜色)及其相对强度来判别火花的等级。采用此法进行判别时需考虑电刷牌号、刷握压力和换向器表面温度不同时其火花光谱的差异。

(2) 高通滤波 在正负刷杆间接高通滤波器将直流电压隔开,滤去电枢电动势中的低频脉动分量,根据通过滤波器的高频火花电压来判别火花的等级。采用此法时,对高通滤波器有较高的设计要求。

(3) 光电测量 用光电元件将火花发出的光能转变为电信号,根据该电信号的大小来判别火花的等级。测量时必须遮蔽其他光源。

(4) 无线电磁波测试 根据换向火花向空间所发射的电磁波的强弱来判别火花等级。此法易受外界电磁场的干扰。

3.3 无火花换向区

无火花换向区(简称无火花区)是指电机在规定负载范围内能保持无火花换向所允许的换向极磁场强度变化范围,通过无火花区试验求得。试验时用其他直流电源在换向极绕组中附加正向和反向励磁电流,对应于不同负载电流求出电刷下火花发生或熄灭时所添加的上、下限电流值,用负载电流为横坐标、附加电流为纵坐标作图,连接对应于各负载电流的上限附加电流各点成一曲线,连接对应于各负载电流的下限附加电流各点成另一曲线,两曲线所包围的区域即为无火花区,如图4-4-10所示。

无火花区中相应于某电枢电流的上、下限附加电流之差为电机在该负载情况下的无火花区宽度;不同负载时各宽度中点的连线为无火花区的中心线。无火花区的宽窄及其中心线的走向是衡量电机换向能力和

换向极磁场强弱的标志,也是分析电机换向性能和进行换向调整的根据。

由于换向元件中的 e_x 与 e_r 很难在任一瞬间均能相互完全抵消,无火花区的宽度一般将随负载的增加而变窄,直至最终消失。无火花区在空载至过载的范围内均具有足够的宽度,且其中心线与横坐标基本重合(图 4·4-10a),表示电机有较强的换向能力。中心线偏离横坐标上翘或下垂(图 4·4-10b、c),表示换向极磁场偏弱或偏强,此时可改变换向极绕组的匝数或换向极气隙进行换向调整。若在电枢电流超过某值后无火花区中心线突然上翘(图 4·4-10d),则多半是换向极磁路饱和所致,这种现象往往出现在无补偿绕组的电机中。无火花区的其他异常现象,如无火花区过早闭合,空载点正、负附加电流不对称,无火花区中心线弯曲,乃至上或下限曲线两次通过横坐标轴等,一般与电刷跳动、接线错误或存在内部故障、电刷不在几何中性线上以及补偿作用不良等种种原因有关,可根据不同情况做出判断,采取相应措施。

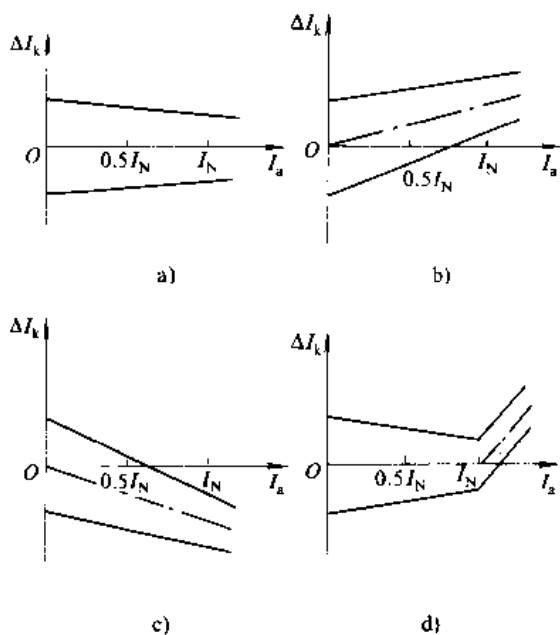


图 4·4-10 无火花区

- a) 换向极合适 b) 换向极偏弱
- c) 换向极偏强 d) 换向极磁路饱和

由于主极磁场对换向的影响,换向元件有效电阻和电抗又随转速而变化,调速电机低速和高速时的无火花区因此发生很大偏移(图 4·4-11),所以调速范围宽的电动机容易发生换向困难。弱磁调速比超过 1:3 时,常采用辅助换向极绕组等措施,来缓解无火花区随转速而偏移的问题。

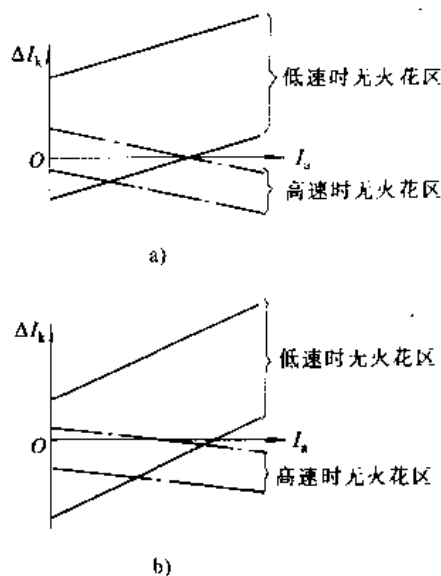


图 4·4-11 无火花区随转速的偏移

- a) 电动机方式运行 b) 发电机方式运行

3·4 换向调整

电机换向性能不良时,可根据无火花区的不同形状做适当调整。

3·4·1 换向极气隙调整

换向偏强或偏弱常通过调节换向极气隙来调整。调整后的气隙 δ'_k 为

$$\delta'_k = \delta_k \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta I_k}{I_N} \frac{\theta}{\theta - 1}} \quad (4\cdot4-13)$$

式中 δ_k ——调整前的换向极气隙 (m);
 θ ——换向极与补偿绕组安匝之和与电枢安匝之比,一般 $\theta=1.05\sim 1.3$;

ΔI_k ——无火花区中心线对应于额定电流 I_N 的附加电流值 (A),见图 4·4-10。

上式中 (+) 号用于换向偏弱, (-) 号用于换向偏强。根据实践,若电动机的换向偏强,其换向极气隙的实际调整量应比按式 (4·4-13) 计算值小些;对发电机来说,换向极气隙的实际调整量应比计算值大些。

对具有第二气隙的电机,上式中的 δ'_k 与 δ_k 分别为调整后和调整前的等效气隙。等效气隙可由第一气隙 δ_{k1} 和第二气隙 δ_{k2} 算得,其计算式为

$$\delta_k = \delta_{k1} + (0.8 \sim 1.0)\delta_{k2} \quad (4\cdot4-14)$$

当 δ_k 值确定后,可根据不同情况确定第一气隙和

第二气隙。对换向极较饱和的电机， δ_{k2} 常不小于 δ_{k1} ；对主极极弧系数较大的电机， δ'_{k1} 常不大于 δ_{k1} 。

3.4.2 电刷（换向器切向）错位调整

当无火花区显示换向极磁场偏弱时，可增加电刷错位量，使平均电抗电动势减小而与之相适应；偏强时则减少错位量。错位调整量根据偏弱或偏强程度确定。但错位不能过大，否则换向区太宽，换向会受到主极磁场的影响。

3.4.3 电感分路调整

在有电感分路的电机上，可根据换向极磁场强弱程度确定合适的分路电流大小而进行调整。

4 环火

电机在某些恶劣的负载条件下运行时，正、负极性电刷之间可能形成一股强烈的环形电弧，同时伴有闪光与巨响，这种现象称为环火。环火相当于电枢绕组通过电刷直接短路，具有很大的破坏性。它会灼伤换向器表面与电刷，甚至烧坏电枢绕组；电弧还可能由换向器表面飞越到换向器前压圈、机壳而造成电机接地；电弧强烈闪光也会伤害运行人员。

4.1 产生环火的原因

当电机承受剧烈的冲击负载或发生突然短路故障时，换向极磁路饱和加上在暂态过程中的涡流阻尼效应将使换向处于严重延迟状态，后刷边可能出现电弧，并由于换向器的旋转和电动力的作用而机械地被拉长，如图4-4-12a所示。当电弧被拉长到一定的长度 l_g 达某换向片K时，若该换向片与电刷间的电位差 V_k 小于为维持该长度电弧不熄灭所必需的电弧电压 U_g ，则电弧将自行熄灭；但若一次熄灭后，由于附近空气已被电离，接着产生的电弧将更为强烈，为维持该长度电弧不熄所需的电弧电压值也将随之降低，从而使电弧有继续被拉长的可能。另一方面，电枢电流的急剧增加使气隙磁场畸变更严重，换向器片间电压的最大值也将显著增大，若片间积有碳粉和金属粉末，将在某些换向片间产生电位差火花或小电弧放电，如图4-4-12b所示。由于电弧放电使周围空气电离，可能使已经通过最大片间电压区的小电弧维持不熄灭，若电弧扩展所及的两换向片N和K之间的电位差 U_{nk} 足以维持电弧不熄灭，则它有可能继续扩展并与其后续形成的小电弧进一步扩展成长弧。在一定条件下，电刷火花与

电位差火花可能汇合在一起，发展成一股跨越正、负极性电刷之间的电弧，形成环火。

产生环火的原因及其形成过程比较复杂，在某些情况下，即使负载稳定，换向良好，仅由于片间电压过高也可能形成环火；甚至在空载情况下，由于换向器表面不干净，换向片边缘存在毛刺或倒角不良引起尖端放电而出现环火。

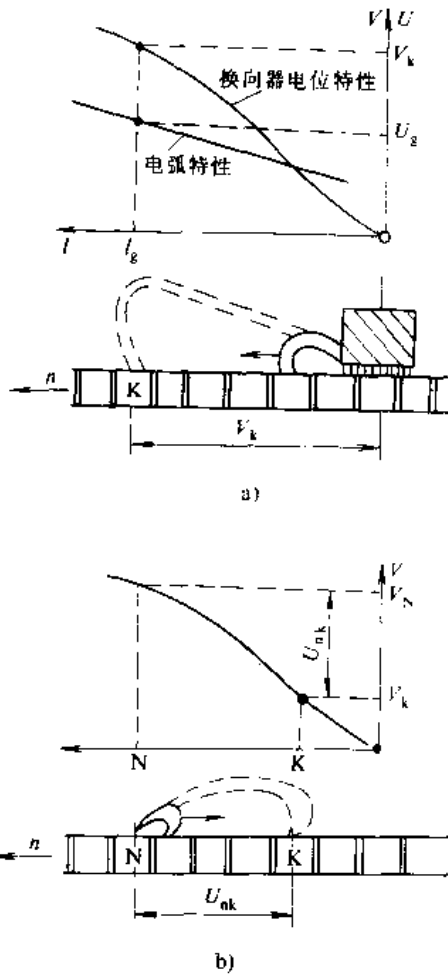


图4-4-12 环火的形成

a) 电刷火花的扩展 b) 电位差火花的扩展

4.2 防止环火的措施

1. 装置补偿绕组 利用补偿绕组对电枢磁动势进行补偿以消除气隙磁场的过度畸变，从而使片间电压的最大值降低，可减少产生电位差火花的可能性，有利于抑制电位差火花和电刷火花的扩展。这是防止环火的有效措施之一。

2. 采用偏心气隙 空气隙由主极中心线向两侧逐渐增大，使电枢磁动势较大处相应具有较大的气隙，

可降低由电枢反应所引起的气隙磁场畸变程度，使片间电压的最大值减小。

3. 设置隔弧装置 在不同极性的电刷之间装置由耐弧材料制成的绝缘隔板(图4-4-13)，构成机械性障碍，以限制电弧的扩展。此外，增大换向器对地绝缘距离，在换向器外侧装设绝缘隔板以防止对地产生电弧，也能减轻环火造成的后果。

4. 采用快速动作断路器 当电机的电流达到危险值时，用快速动作断路器切断外电路。如快速断路器能在电弧扩展到相邻电刷之前断开，可起防止环火的作用；即使在环火发生后断开，也能减小电机的损坏程度。

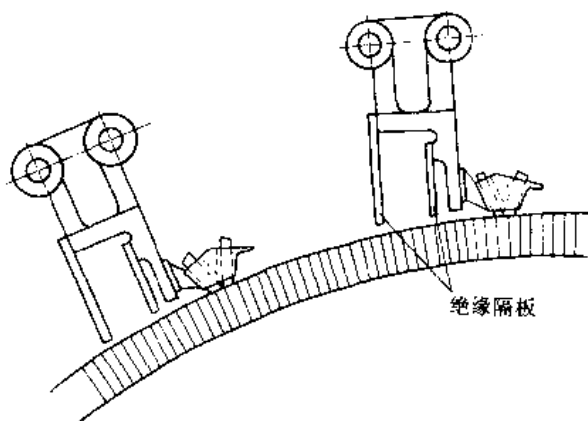


图4-4-13 隔弧装置

第5章 电枢绕组^{[6][7]}

1 电枢绕组的构成和参数

1.1 绕组构成

电枢绕组由若干绕组元件组成，除无槽电枢外，元件一般安放在电枢槽内，并以一定规律与换向片接成闭合回路。由元件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，再由电刷与外电路相连。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。电枢绕组每个元件可以是单匝、多匝或分数匝，即元件匝数 $N_s \geq 1$ ，如图4-5-1所示。

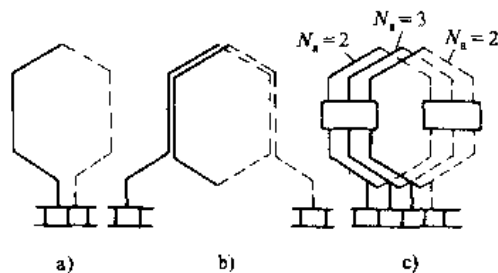


图4-5-1 单匝和多匝元件

a) $N_s=1$ b) $N_s > 1$ (整数) c) $N_s=7/3$ (分数)

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4-5-2所示。当 u 大于1时，并列的元件可以布置成同槽式或异槽式，如图4-5-3所示。

电枢元件总数 S 为电枢槽数 Q 和 u 的乘积，一般

与换向片数 K 相等，即 $S=K=Q_u$ 。绕组总导体数 $Z=2SN_s$ 。有些绕组还需要连接绕组内等电位点的均压线。

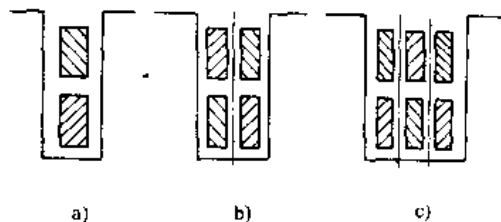


图4-5-2 槽内各元件边的安置

a) $u=1$ b) $u=2$ c) $u=3$

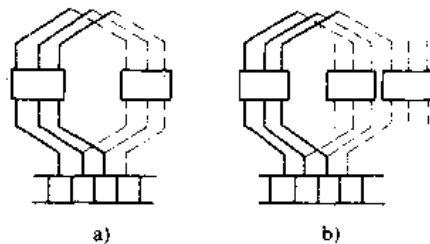


图4-5-3 元件上、下层边的布置方式

a) 同槽式 b) 异槽式

1.2 绕组参数

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绕组节距和参数确定：

1. 槽节距 Y 它是一个元件的两个边在电枢圆周上用槽数表示的跨距。 Y 值应等于或接近于一个极

距内的槽数,即

$$Y_k = \frac{Q}{2p} \mp \epsilon_s \quad (4.5-1)$$

式中 ϵ_s ——以槽数表示的短距数, $\epsilon_s \leq 1$, 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,但换向性能稍差。短距或长距绕组对换向有利,通常采用短距绕组。

2. 第一节距 Y_1 它是一个元件的两个元件边在电枢圆周上用换向片数表示的跨距,也称为后节距,即

$$Y_1 = \frac{K}{2p} \mp \epsilon_k = u \left(\frac{Q}{2p} \mp \epsilon_s \right) \quad (4.5-2)$$

式中 ϵ_k ——以换向片数表示的短距数。

3. 第二节距 Y_2 它是接在同一换向片上的两个元件边在电枢圆周上用换向片数表示的跨距,也称为前节距。

4. 换向器节距 Y_k 它是一个元件的两个出线端在换向器上用换向片数表示的跨距。

5. 合成节距 Y 它是两个相邻串联元件的对应边在电枢圆周上用换向片数表示的跨距,其值等于 Y_k 。

6. 均压线节距 Y_m 它是需接均压线的绕组内相邻等电位点在电枢圆周上用换向片数表示的跨距。

7. 重路数 m 它是绕组的并联支路数对其相应单重绕组并联支路数的倍数。

8. 闭路数 t 它是所有绕组元件与换向片连接后所形成的闭合回路数。 t 为换向片数 K 与 Y_k 的最大公约数。

不同类型绕组的各种节距如图 4.5-4 所示。

2 绕组的对称条件

在磁场对称分布和电刷接触良好的情况下,为使电机空载时绕组内部无环流,负载时各并联支路电流均匀分配,绕组各对支路的元件数应相等,其对应元件或元件边应处于相同的磁场位置,使绕组在运行时,绕组各并联支路具有相同的电动势和电阻。符合上述要求的绕组为对称绕组,它应该满足下列对称条件:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad u &= \text{整数} \\ (2) \quad \frac{Q}{a} &= \text{整数} \\ (3) \quad \frac{p}{a} &= \text{整数} \end{aligned} \right\} \quad (4.5-3)$$

这些条件合称为第一种对称条件。如果不能满足第一种对称条件,可退而满足下列第二种对称条件:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad u &= \text{整数} \\ (2) \quad \frac{Q}{a} &= \text{整数} \\ (3) \quad \frac{2p}{a} &= \text{整数} \end{aligned} \right\} \quad (4.5-4)$$

3 常规电枢绕组

直流电机的常规电枢绕组有同槽式的叠绕组、波绕组和蛙绕组。它们的展开图如图 4.5-5 所示,主要特点和应用范围见表 4.5-1,各式线圈的结构参见本篇第 7 章 3.4 节。

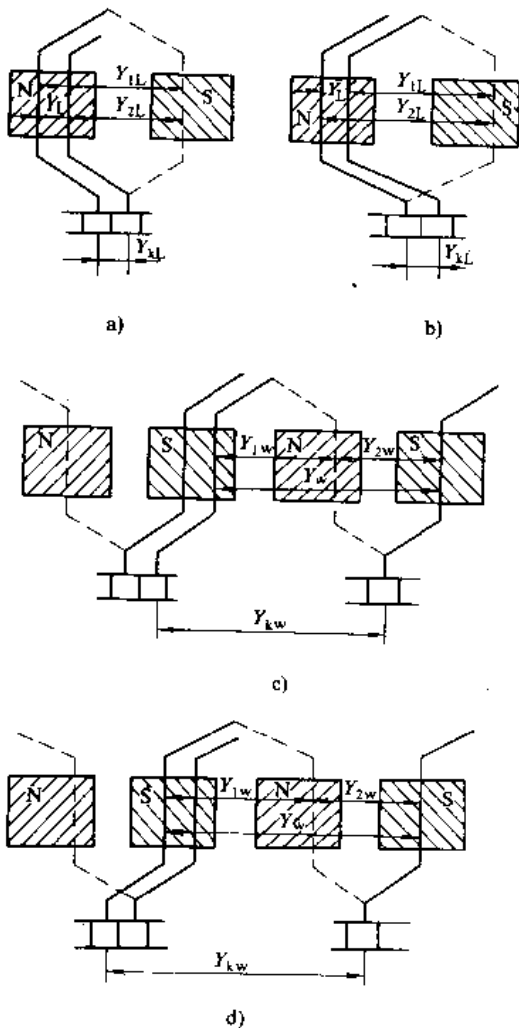


图 4.5-4 不同类型绕组的节距

- a) 叠绕开口式 (前进) b) 叠绕交叉式 (后退)
c) 波绕开口式 (后退) d) 波绕交叉式 (前进)

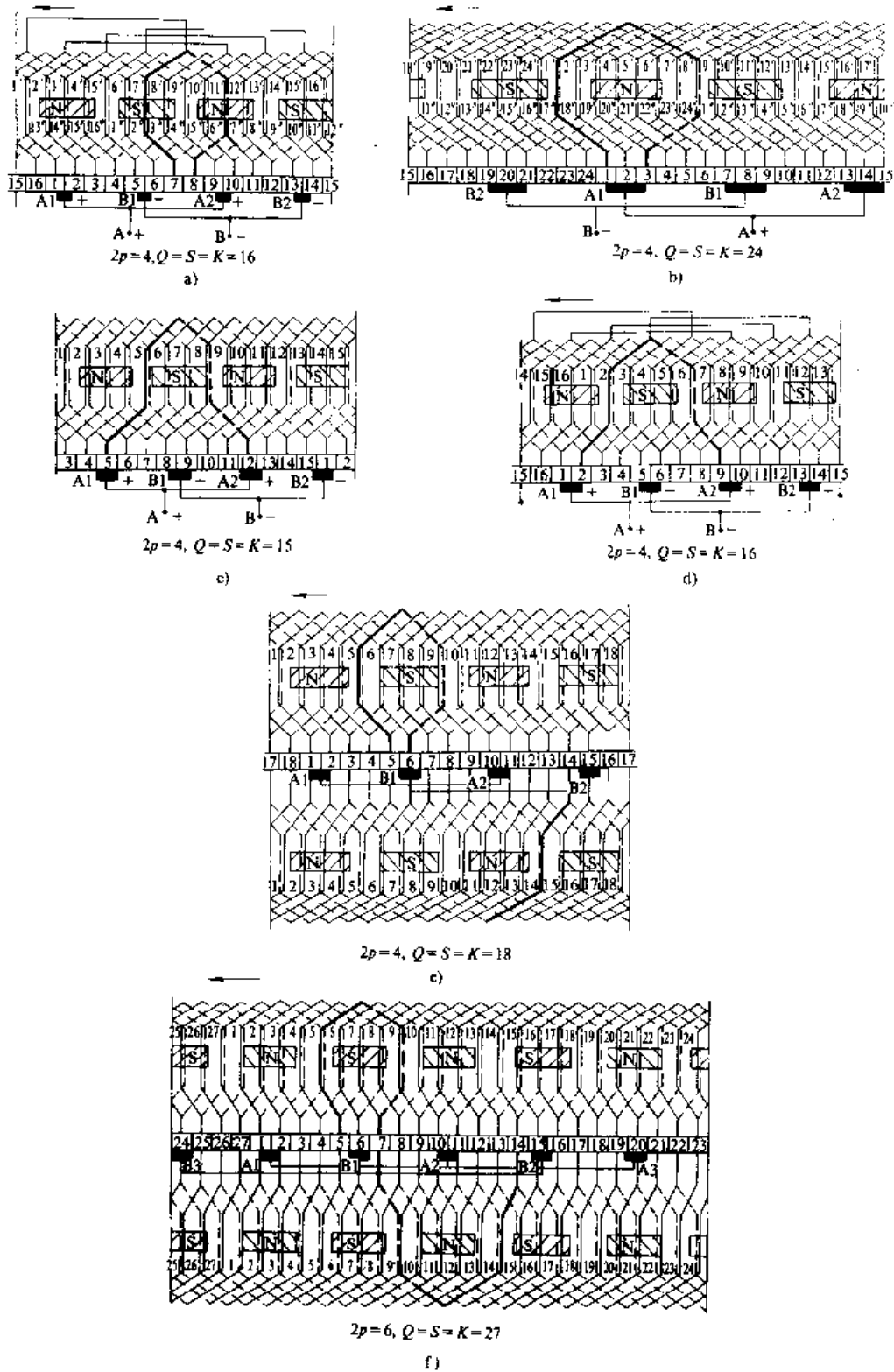


图 4-5-5 不同类型绕组的展开图

- a) 单叠绕组
- b) 复叠绕组
- c) 单波绕组
- d) 复波绕组
- e) 单蛙绕组
- f) 复蛙绕组

表 4.5-1 常规电枢绕组的主要特点和应用范围

绕组型式	叠绕组		波绕组		蛙绕组	
	单	复	单	复	单	复
元件布置特点	组成一条支路的各个串联元件, 其对应边处于同一主极下。元件前后相叠。槽内元件边按双层布置		组成一条支路的各个串联元件, 其对应边处于所有相同极性的主极下。元件展开呈波浪形。槽内元件边按双层布置		由单(或复)叠绕组与复波绕组组成。波、叠绕组元件互起均压作用, 不必另接均压线。叠绕组为其基本绕组, 由单叠绕组组成单蛙绕组, 复叠绕组组成复蛙绕组。槽内元件边一般按四层布置, 由上而下第一和四层为波绕组, 第二和三层为叠绕组	
重路数	m	$m_L=1$	$m_L>1$	$m_w=1$	$1<m_w\leq p$	$m_L=1$ $m_L>1$ $m_w=pm_L$
支路对数	a	$a=pm_L$		$a=m_w$		$a=pm_L+m_w=2pm_L$
绕组	Y_s	$Y_s=Q/2p\pm\epsilon_s$				$Y_{sL}=Q/2p\pm\epsilon_s$ $Y_{sw}=Q/2p\pm\epsilon_s$
	Y_1	$Y_1=K/2p\pm\epsilon_k$				$Y_{1L}=K/2p\pm\epsilon_k$ $Y_{1w}=K/2p\pm\epsilon_k$
节距	Y_k ①	$Y_k=\pm m_L$		$Y_k=(K\pm m_w)/p$ ②		$Y_{kL}=\pm m$ $Y_{kw}=K/p\pm m_L$
	Y	$Y=Y_k$				
	Y_2	$Y_2=Y_1-Y_k=Y_1\pm m_L$		$Y_2=Y_k-Y_1$		$Y_{2L}=Y_{1L}-Y_{kL}=Y_{1L}\pm m_L$ $Y_{2w}=Y_{kw}-Y_{1w}=Y_{2L}$
闭路数	t	$t=1$	t 为 K 与 Y_k 的最大公约数	$t=1$	t 为 K 与 Y_k 的最大公约数	$t_L=1$ t_w 为 K 与 Y_{kw} 、 K 与 Y_{kL} 或 Y_{kw} 的最大公约数 t_L 或 t_w 分别为 K 与 Y_{kL} 或 Y_{kw} 的最大公约数
电刷宽度	b_b	$b_b > (m_L+1)\epsilon_k$		$b_b > (m_w+1)\epsilon_k$		$b_b > (m_L+1)\epsilon_k$
刷杆数	N_b	$N_b=2p$		$N_b=2x$ $1\leq x\leq p$	$N_b=2p$	$N_b=2p$
均压线	甲种	甲种加乙种或丙种		不需要	乙种或丙种	不需要
应用范围	支路数比波绕组多, 用于正常电压和转速的各种容量电机	支路数比单叠绕组多, 适用于大中型或低电压大电流电机		支路数最少, 不需均压线, 制造方便。适用于小容量及电压较高或低速电机	支路数比单波绕组多, 比单叠绕组少, 可用于多极数的低速大中型电机	应用范围与单叠绕组相同, 不必另接均压线 应用范围与复叠绕组相同, 不必另接均压线

注: 下角标 L 代表叠绕组, w 代表波绕组。

① 公式中取“+”号时, 叠绕组为开口绕组, 波绕组为交叉绕组; 取“-”号时, 叠绕组为交叉绕组, 波绕组为开口绕组。主极极性和转向相同时, 开口与交叉绕组各刷杆的极性相反。改变接法, 由交叉改为开口或开口改为交叉, 可改变复绕组的闭路数。

② 对于 p 为偶数的单波绕组, K 必须是奇数, 即 Q 和 a 都应是奇数, 但有时 a 仍可取偶数, 则应取 $K=Qu-1=S-1$, 并使一个元件不与换向器连接。不与换向器连接的元件称为伪元件或死线圈。

4 特殊电枢绕组

常用各类特殊电枢绕组在电枢上的连接如图 4-5-6 所示, 其构成和特点见表 4-5-2。

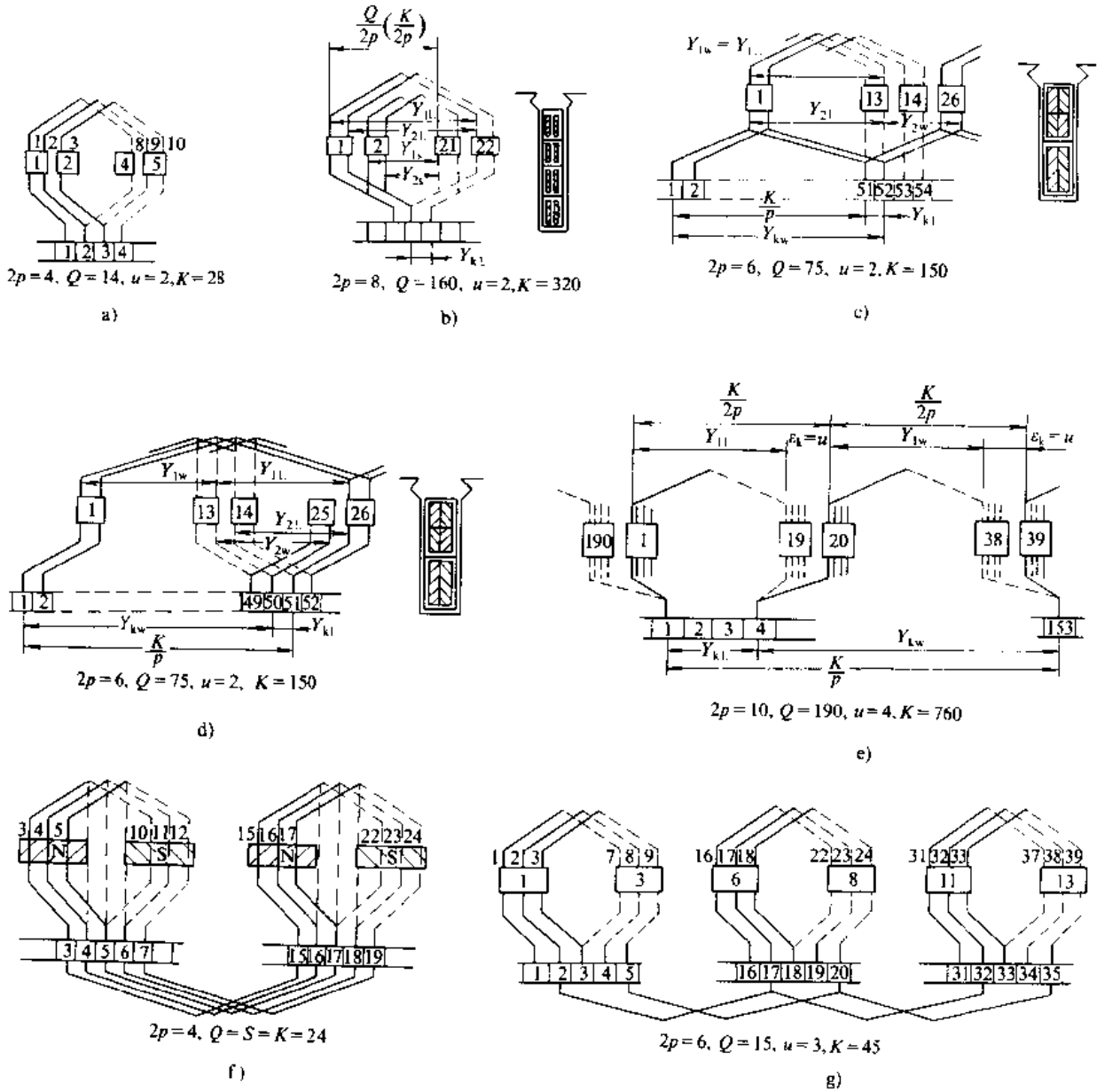


图 4-5-6 常用各类特殊绕组的元件在电枢上的连接

- a) 异槽式叠绕组 b) 拉图尔叠绕组 c) 甲种异槽式蛙绕组 d) 乙种异槽式蛙绕组
 e) 拉图尔蛙绕组 f) 对称双叠绕组 g) 不对称双叠绕组

表 4-5-2 常用各类特殊电枢绕组的构成和特点

类型	绕组节距	构成与特点	适用范围
异槽式叠绕组	$Y_s = b \pm \frac{c}{u}$ 式中 b —整数, 且 $b \approx Q/2p$ c —整数, 且 $0 < c < u$ 其他节距与同槽式叠绕组相同	1. 上层边并列安置在同一槽内的 u 个元件, 其下层边分别置于相邻两槽内 2. 换向元件上层边间的互感与下层边间的互感波形不同, 电抗电动势波形较平坦, 任一元件换向结束时, 均存在同槽短路元件的阻尼作用, 换向性能较好 3. 线圈为半匝式, 鼻端由并头套连接 4. 需连一定份额数的均压线	换向困难的电机

(续)

类型	绕组节距	构成与特点	适用范围
异槽式蛙绕组	甲种 $Y_{1L} = Y_{1W}$ $Y_{kL} = \pm 1$ $Y_{kW} = \frac{K}{p} \pm 1$ $Y_{kL} - Y_{kL} = \frac{K}{p}$ $Y_{2L} + Y_{2W} = \frac{K}{p}$	1. 波、叠绕组第一节距相等 2. 同槽波、叠绕组元件上层边分别接在相距 K/p 片的两等电位换向片上, 其间只需包匝间绝缘	高速中型电机
	乙种 $Y_{2L} = Y_{2W}$ $Y_{kL} = \pm 1$ $Y_{kW} = \frac{K}{p} \mp 1$ $Y_{kL} + Y_{kW} = \frac{K}{p}$ $Y_{1L} + Y_{1W} = \frac{K}{p}$	1. 波、叠绕组第二节距相等 2. 同槽波、叠绕组元件上层边接在同一换向片上, 其间只需包匝间绝缘	
拉图尔叠绕组	$\frac{Q}{2p} = \text{整数}$ $s_k = u$ $Y_{1L} = \frac{K}{2p} + u$ $Y_{1S} = \frac{K}{2p} - u$ $Y_{2L} = Y_{1L} - m_L$ $Y_{2S} = Y_{1S} - m_L$	1. 由接在同一换向器上的两套叠绕组所组成, 其一为长距 (l), 另一为短距 (s), $m_L = 2$ 时, 均为双闭路, 通常做成单叠绕组 2. 接在相同两换向片上的两长、短距元件轴线重合, 电动势相等 3. 同槽长、短距元件的相应边接在互相隔开的两换向片上, 为异槽式, 不同时换向, 互感小, 电抗电动势波形较平坦, 但换向区较宽 4. 需连接节距为 K/p 的甲种均压线, 均压线在换向器端	转速较高的大中型电机
拉图尔蛙绕组	$\frac{Q}{2p} = \text{整数}, s_k = u$ $Y_{1L} = Y_{1W} = \frac{K}{2p} - u$ $Y_{kL} = \pm m_L$ $Y_{kW} = \frac{K}{p} \mp m_L$ $Y_{kL} + Y_{kW} = \frac{K}{p}$ $Y_{2L} = \frac{K}{2p} - u \mp m_L$ $Y_{2W} = \frac{K}{2p} + u \mp m_L$	1. 是将整距蛙绕组所有下层或上层元件边移过一槽所得的短距绕组 2. 同槽波、叠元件相应边接在互相隔开的两换向片上, 为异槽式, 不同时换向, 互感小, 电抗电动势波形较平坦, 但换向区较宽 3. $m = 2$ 时叠绕组为双闭路, 故通常做成单蛙或三蛙绕组	转速较高的大容量电机
对称双叠绕组	$\frac{Q}{p} = \text{偶数}$ $\frac{K}{p} = \text{偶数}$ $Y_1 = \frac{K}{2p} \pm 1$ $Y_2 = \frac{K}{2p} \mp 1$ $Y_k = \pm 2$	1. 是接有全额甲种均压线和全额丙种均压线的双叠双闭路绕组 2. 为使两个闭路间有等电位点, $u = 1$ 时, 应取 $s_k = 1$; $u > 1$ 时, 必须为异槽式 3. 被电刷短接的回路只有元件匝数的一半, 换向性能大为改善 4. 结构、工艺复杂, 电枢通风较困难	换向特别困难的大容量、宽调速比的高速电动机和大容量高速发电机
不对称双叠、双蛙绕组	$\frac{K}{p} = \text{奇数}$ $\frac{Q}{p} = \text{奇数}$ 节距同一般双叠绕组	1. 不满足对称条件, 同一对极下重路间存在不对称电动势, 但在电枢一端有等电位点, $p \geq 3$ 时可连兼起甲、乙种作用的均压线 2. 配以多重波绕组可组成不对称双蛙绕组, 为减少其中波绕组的闭路数, 必要时可将开口绕组改接成交叉绕组 3. 高速时电刷滑动接触的变化对换向影响较显著 4. 为减小绕组不对称性对换向的影响, 高速中型电机以 $Q/2p \geq 16.5$, 大型电机以 $Q/2p \geq 19.5$ 为宜。为获得单闭路, 尽可能选用 p 为奇数	大中型电机

5 均压线

在多级叠绕组中,即使绕组满足对称条件,各极磁路的不对称仍将导致各并联支路的感应电动势不等,从而在绕组内部产生环流。环流通过电刷将使换向恶化,并使各支路的电流分配不均,绕组铜损耗增加。在多重路绕组中,各个重路的电刷接触电阻不等将使各并联支路的电阻不等,从而使各支路的电流分配不均,导致换向片间电压分布不正常。为此,不论绕组是否满足对称条件,均需用低电阻导线将各对支路在理论上的等电位点连接起来,以消除或减轻上述不良影响。连接等电位点的导线称为均压线。

对所有 $a > 1$ 的绕组,除蛙绕组外,均需采用均压线,以获得满意的换向条件。

5.1 分类

均压线按其所起的作用不同,一般分为甲、乙、丙三种。

(1) 甲种均压线。用以改善电机磁场不对称的,称

为甲种均压线,或第一种均压线。一般用于多级单叠绕组或多叠绕组的各个重路内。

(2) 乙种均压线。用以保证绕组各并联支路电阻相等,并使换向片间的电压保持均等,而等电位点在电枢铁心同一端的,称为乙种均压线,或第二种均压线。一般用于多重路绕组的各个重路之间。

(3) 丙种均压线。用以使换向片间电压均等而等电位点在电枢铁心两端的,称为丙种均压线,或第三种均压线,也称为 Punga 连接线。丙种均压线要在铁心和轴之间穿过,一般用于对称双叠绕组两独立的重路之间,或 $2p/a$ 为奇数的双波绕组。

5.2 根数

全额均压连接时,均压线的根数为 N_{eqm} ,见表 4-5-3。全额均压连接只用在某些大型和换向困难的电机中。一般中小型电机通常每槽只接一根均压线,转速低的电机还可再少接一些。采用的均压线根数 N_{eq} 与 N_{eqm} 之比称为均压线的份额,份额数越大,均衡效果越好。

表 4-5-3 常用绕组的均压连接特点

绕组型式	均压线节距 y_{eq}	全额根数 N_{eqm}	均压线种类
单叠	满足第一种对称条件	$\frac{K}{p}$	甲种
双波	满足第一种对称条件,且 $\frac{2p}{a}$ = 偶数	$\frac{K}{a}$	乙种
	满足第二种对称条件,且 $\frac{2p}{a}$ = 奇数	$\frac{K - Y_k}{a}$	丙种
双叠	满足第二种对称条件,且 $\frac{K}{p}$ = 偶数, $t = 2$	$\frac{K}{p}$	全额甲种,接电路内各等电位点
	见图 4-5-6f	K	全额丙种,接重路间各等电位点
	不满足对称条件,且 $\frac{K}{p}$ = 奇数, p = 奇数, $t = 1$	$\frac{K}{p}$	$p \geq 3$ 时均压线兼起甲、乙种的作用,接重路内各等电位点

5.3 截面积

均压线的截面通常为电枢绕组导体截面积的 20%~50%,均压线份额数高时,其截面积可取得小一些。截面积过小将降低均压效果,截面积过大,不但增

加用铜量,还将导致均压线布置困难。

5.4 连接

常用绕组均压连接的特点见表 4-5-3,接线如图 4-5-7 和图 4-5-6f、g 所示。

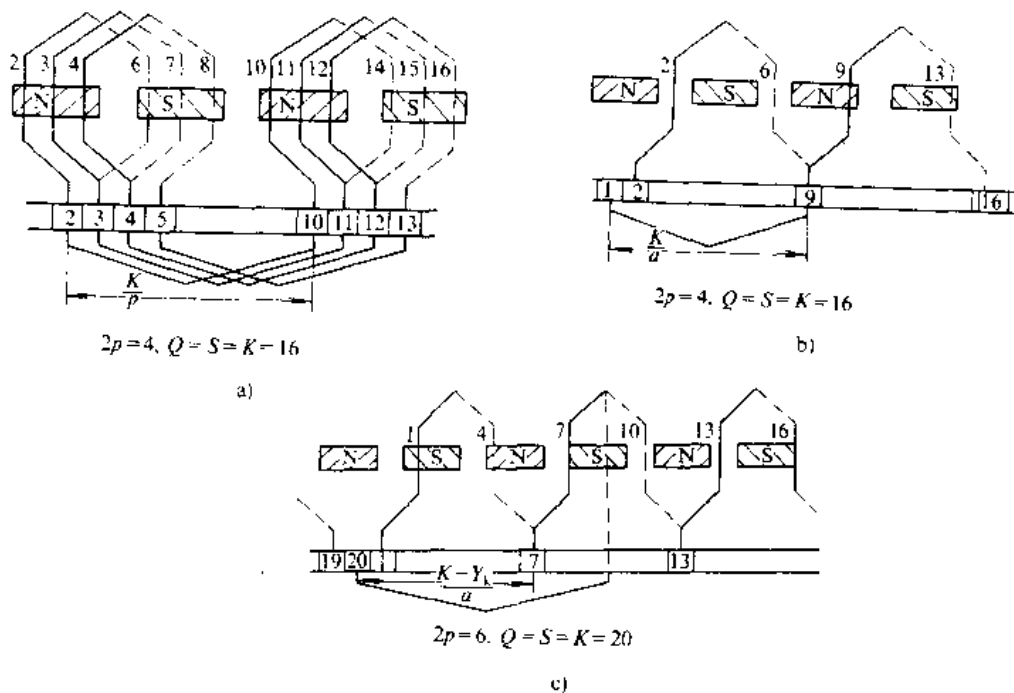


图 4-5-7 常用绕组的均压连接

a) 单叠绕组甲种均压连接 b) 双波绕组乙种均压连接 c) 双波绕组丙种均压连接

第 6 章 整流电源供电对直流电动机性能的影响^{[11][12][13]}

为提高技术经济指标,维护方便和设备小型化,随着大功率晶闸管的出现和自动控制技术的提高,晶闸管变流器电源(以后简称整流电源)在电气传动系统中已基本代替直流发电机组(以后简称机组)作直流电动机的供电电源。但是,整流电源输出的是含有脉动分量的电压和电流,这会对电动机的运行性能带来不良影响,如换向性能恶化、发热增加、振动噪声增大,还对电动机绝缘提出新的要求和产生高频轴电压等,必须分别采取相应的措施。

1 脉动电流

整流电源输出的电流是脉动的,如图 4-6-1 所示。其电流波形的品质一般可用电流波形因数 K_{wi} 或电流脉动率 μ 来表示。

脉动电流波形因数为其有效值 I_{ei} 与平均值 I_{av} 之比,即

$$K_{wi} = I_{ei}/I_{av} \quad (4-6-1)$$

脉动电流的脉动率是一个周期内电流最大值与最

小值之差与平均值之比,以百分数表示,即

$$\mu = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{av}} \times 100 \quad (\%) \quad (4-6-2)$$

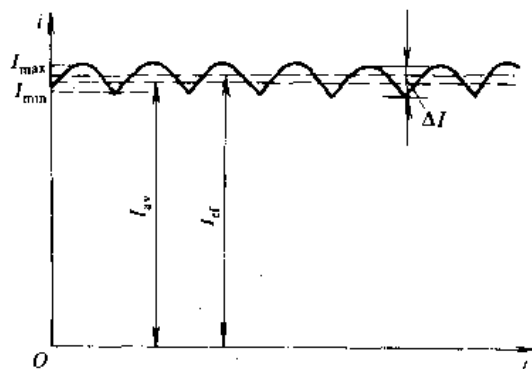


图 4-6-1 脉动电流波形

为降低电流脉动,常在整流电源的直流侧串接平波电抗器。这样,不但可以降低电流脉动率,而且在轻载时还能防止电流不连续,以免引起回路时间常数变化而影响电动机的动态特性。此外,采用较多的整流相数,增加外接电抗器的电感量或改进电动机设计以增

大电机的电感值，均可改善电流波形的品质。

2 整流电源供电对直流电动机换向的影响

2.1 脉动电流对直流电动机换向的影响

整流电源作为直流电动机电枢电路的供电电源在正常状态下运行时，电枢电流是个周期性的脉动变量。由于磁路内涡流的阻尼作用，换向极磁通滞后于脉动电流的变化，使电机的换向恶化。由磁路时间常数确定的换向极磁通与电枢电流之间的相位差的周期性变化，可以用 Lissajou 图形来描述。图 4·6-2 是用换向极磁通变化表示的无火花区与 Lissajou 图形（图中的椭圆）的组合，图中 $\overline{mm'}$ 与 $\overline{nn'}$ 之间表示无火花区。如果换向极磁通不滞后，即使电枢电流脉动，Lissajou 图形是条直线，只能在无火花区中心线 \overline{OA} 上移动，不会出现火花；如果换向极磁通滞后，Lissajou 图形变成椭圆形，此椭圆超出无火花区的部分就会有火花发生。

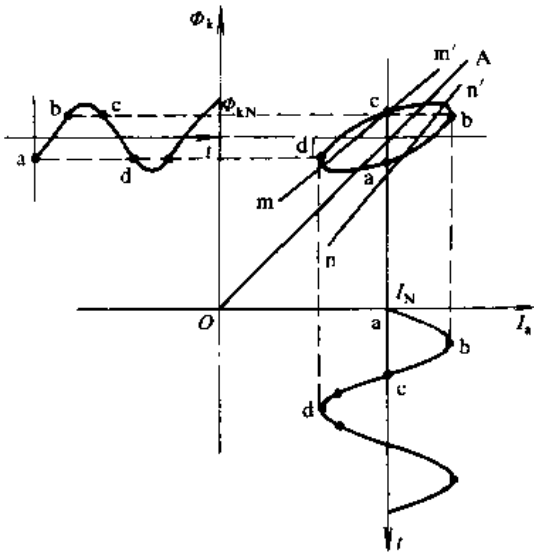


图 4·6-2 整流电源供电时换向极磁化特性与无火花区之间的关系

换向允许的电流脉动率随机组供电时的无火花区宽度、换向极磁路的时间常数及脉动频率而变化。一般，容量大、弱磁调速范围宽、最高转速高的电动机，其换向允许的电流脉动率较小。图 4·6-3 是三相六脉波整流电源供电时他励直流电动机允许的电流脉动率范围。

整流电源作直流电动机励磁电源在正常状态下工作时，励磁电流是周期性的脉动变量，使主极磁通随着脉动，从而在电枢绕组换向元件内产生变压器电动势，加重了电动机换向的负担和复杂性。但是，主极绕组的

电感一般很大，因而励磁电流脉动率较小，可以忽略它的影响（参见本篇第 4 章 1·1·3 节）。

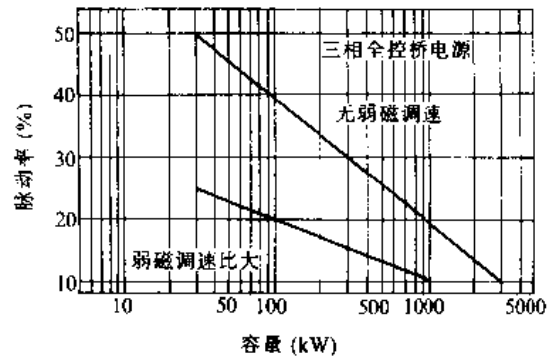


图 4·6-3 允许的电流脉动率

2.2 动态过程中的换向

2.2.1 电枢电流快速变化时的换向

直流电动机在动态过程中电枢电流发生急剧变化时，由于换向极磁路中涡流的阻尼作用，使换向极磁通的变化远远落后于电流变化，造成换向失调而可能发生强烈火花，其程度取决于电流变化率和电流增量。在整流电源供电的传动系统中，由于电源具备极高的快速反应性能，因而在缩短电机过渡过程的同时，对电动机在动态过程中的换向能力提出了更高的要求，以免因而发生电动机的换向故障。

电动机动态换向允许的电流变化率 di/dt ，取决于它在稳态时的无火花区宽度和换向极磁路的响应性能，在磁路全部采用叠片结构情况下，电流变化率最大可达每秒 $(200 \sim 300) I_N$ 。一般，小型电机较大，大型电机较小，高速时较小，低速时较大。

2.2.2 强行励磁对换向的影响

直流电动机往往采用强励来加速其过渡过程，强励电压倍数越大，每极磁通量变化越大，过渡过程就越短。但是，主磁通的快速变化将在换向元件中产生变压器电动势，其值与每极磁通的变化率成正比，远远大于脉动励磁电流引起的变压器电动势。

整流电源能提供比直流励磁机大得多的强励电压，强励时往往因变压器电动势过大而产生强烈火花，成为电机换向故障的一个原因。

为减小强励过程中的变压器电动势，对于强励倍数高的电动机，在设计时可增加极数，减少每极磁通量；在电动机电抗电动势允许的前提下，减少电刷覆盖换向片数；最有效的是根据电动机的实际运行情况适

当降低强励时的磁通变化率 $d\Phi/dt$ 。

3 整流电源供电对电动机发热的影响

整流电源供电时会引起电动机发热增加,其主要原因是绕组铜损耗增大。绕组铜损耗与电流有效值的二次方成正比,由于整流电源输出电流的波形因数 K_{w1} 大于 1,因此,电动机的铜损耗将为机组供电时的 K_{w1}^2 倍。电流脉动率越大,波形因数随之增大,对电动机发热的影响也越大。

除直流铜损耗外,整流电源供电时还有交流电流分量在绕组中所产生的附加铜损耗,及主极和电枢反应磁通的交变分量在铁磁回路中所引起的附加铁损耗。这些损耗的总和将增加电动机的发热量,因而在相同的冷却条件下,电动机的温升将比机组供电时的高。

如维持相同的温升,整流电源供电时的电动机输出功率应比机组供电时的小,若忽略附加损耗,则其输出功率将约随电流波形因数的增大而反比地减小。若计及附加损耗,电动机的输出功率还要降低一些。在电枢电路不外接电抗器的条件下,小型直流电动机由三相全控桥式整流电源供电时,其电流脉动率约为 30%~40%,此时电动机的输出功率为机组供电时的 95%左右;由单相桥式整流电源供电时,电流波形因数在 1.3~1.5 范围内,此时电动机的输出功率约为机组供电时的 50%~60%。对于功率较大的大中型直流电动机,由于采用六相、十二相整流供电,电流波形品质较好,其对电动机温升的影响可忽略不计。

4 整流电源供电对电动机振动和噪声的影响

电动机由整流电源供电时,铁心的高频交变磁化力和转矩脉动会使电动机在运行中的振动和噪声增大。脉动量越大,振动和噪声也越大。在电动机变速运行时,还可能诱发机械共振。此外,脉动电流还会引起绕组及其连接线上电磁力的脉动,从而使它们发生高频颤动,引起绝缘损伤,甚至造成疲劳性绝缘破坏。在电枢电流经常处在断续状态及在整流电源励磁可逆系统的电动机中,电磁力的脉动振幅更大。

选用脉动量小的整流电源,电路内串接平波电抗器,增加电动机机壳刚度,进行真空压力整浸绝缘处理以增强绕组和铁心的整体性,电枢采用斜槽及加强所有绕组和连接线的紧固措施,均有助于减小振动和噪声,提高电动机的运行可靠性。

5 整流电源供电对电动机绕组绝缘的要求

绕组的电感与匝间电容组成一个分布参数电路。

当电源电压的高次谐波分量或系统的开关浪涌电压作用于绕组两端时,将使绕组匝间电压分布不均,绕组首末几匝的匝间电压较高,应加强绝缘。

为使电枢绕组免受此类影响,当系统采用外接电抗器时,把电抗器与换向极、补偿绕组分别接在电枢两端;当系统不接电抗器时,将换向极、补偿绕组分成两组,分别接到电枢两端,以保护电枢绕组,如图 4-6-4。

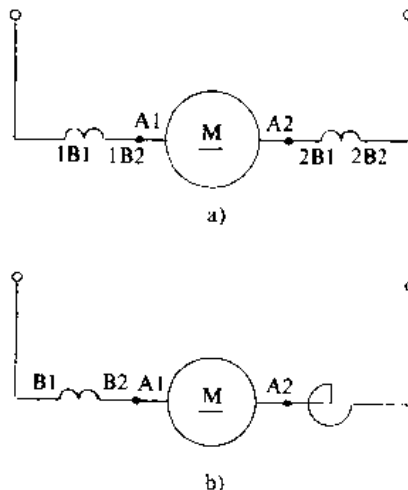


图 4-6-4 保护电枢绕组的接线方式
a) 无外接电抗器 b) 有外接电抗器

6 整流电源供电时电动机的轴电压

电动机在运行中由于磁路不对称或补偿绕组、换向极绕组、串励绕组的接线不当等原因,将在电枢轴的两端产生轴电压,此电压在轴承、轴承座(或端盖)对地之间形成回路,产生轴电流,导致轴承油膜破坏,轴瓦表面烧损。对于这种轴电压,可在轴承座和地之间垫以绝缘板隔断回路,以防止轴电流的危害。

电动机由整流电源供电时,除了可能存在上述的轴电压外,还由于电源的高频谐波电压作用在电枢绕组对铁心、轴颈对轴瓦、电源装置对地等电容回路上,产生轴对地的高频感应轴电压。谐波电压越高,此轴电压也越高,甚至使轴承油膜发生电击穿。

为防止高频感应轴电压对轴承油膜的电击穿,垫绝缘板的方法不能消除其影响,一般可用接地电刷在轴与地之间短接,使轴电流不经过轴颈、轴瓦(或滚动轴承)。

7 电动机额定电压与整流电源输出电压的匹配

整流电源供电除对电动机带来上述影响外,其输

出电压与电动机额定电压的匹配,特别在小功率电气传动系统省略整流变压器的情况下,也十分重要。

与直流发电机不同,整流电源的输出电压是用调节延迟角的方法调节的,延迟角越大,电压越低,输出电压和电流的波形品质越差。若电动机额定电压相对整流电源输出电压选得过高,则系统不能正常运行;若选得过低,则在电动机额定电压下整流电源延迟角已较大,整流电源对电动机的不良影响增大。

为了与整流电源输出电压匹配,电动机额定电压的选择一般应考虑:

- (1) 电网电压及其正常波动幅度。
- (2) 控制系统的调节裕度。对不逆转传动系统,应

考虑最小延迟角的限制;对可逆转传动系统,应考虑最小逆变颠覆角的限制。

- (3) 交流侧进线电抗和直流侧平波电抗的压降。
- (4) 整流装置本身的电阻压降和管压降。

当采用单相全波整流线路,电网电压为220V时,电动机额定电压可取160V。采用三相桥式整流线路,电网电压为380V时,第一象限运行的电动机的额定电压取440V;第四象限运行的电动机的额定电压取400V。对于容量较大、系统中不能省略整流变压器的大中型直流电动机,其额定电压应根据整流变压器及整流元件的电压等级、元件串并联技术和电动机的制造和运行等多方面的情况来确定。

第7章 直流电机的结构^{[6][7][15][16]}

直流电机结构应考虑下列主要问题:

(1) 电机的零部件,特别是转动的轴、换向器等,应有足够的强度和刚度,使其在技术条件所规定的各种运行情况下以及最高转速所引起的离心力作用下,能安全可靠地工作,并使机械振动和噪声减少到最小程度。

(2) 结构工艺性好,在满足电机的运行性能和技术要求的条件下,力求结构简单,便于制造、运输、维护和检修。

(3) 绝缘和通风结构应能承受电机的电磁负载、热应力和机械应力的综合作用,在复杂的工作环境条件下能长期可靠地工作,各部位的温升不超过规定的限值,从而保证足够长的使用寿命。

(4) 零部件的标准化、通用化程度高,互换性好。

1 直流电机的结构型式、防护等级、冷却方法和线端标志

1.1 结构与安装型式

直流电机常用的结构与安装型式有:IM1001, IM1002, IM1003, IM1004, IM2001, IM2011, IM3011, IM7211, IM7311 和 IM7321 等,矿井卷扬用大型直流电动机也有采用IM5710的(详见GB997《电机结构及安装型式代号》)。

1.2 防护等级

直流电机的防护等级一般采用IP21, IP23, IP44

和IP54等(详见GB4942.1《电机外壳防护分级》)。

1.3 冷却方法

直流电机的冷却方法一般有IC06, IC17, IC37, IC37A86, IC0040 和 IC0066 等(详见GB1993《电机冷却方法》)。

从有利于换向和绝缘出发,进入直流电机的冷却空气应有适宜的温度、湿度和清洁度。一般情况下,进风温度以不超过40℃,不低于5℃为宜,冷却空气相对湿度最好不超过85%,绝对湿度最好在5~12g/m³范围内,含尘量不超过0.1mg/m³。

对于高速和大型直流电机,应注意防止碳粉被吸入电机内部,污染绕组和换向器,在要求较高的电机中,常常采用换向器和电枢本体风路分开的两路通风方式。

1.4 线端标志

直流电机出线端按GB1971《电机线端标志与旋转方向》的规定标志。

2 直流电机的定子

直流电机的定子主要由机座、主极、换向极,有时还有补偿绕组等组成,如图4-7-1所示。它是产生主极、换向极磁场,构成部分磁路和风路的静止部件。

对定子的基本要求是:

- (1) 主极、换向极的极性正确。从换向器端看,发

电机的换向极极性应与电枢旋转方向前面的主极极性相同，而电动机则相反，见图4·7-2。电刷的极性与电枢绕组型式和电机旋转方向的关系见表4·7-1。

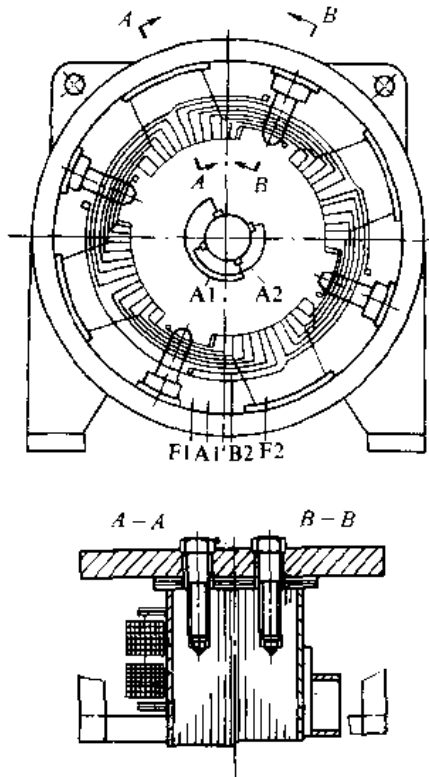


图4·7-1 直流电机定子

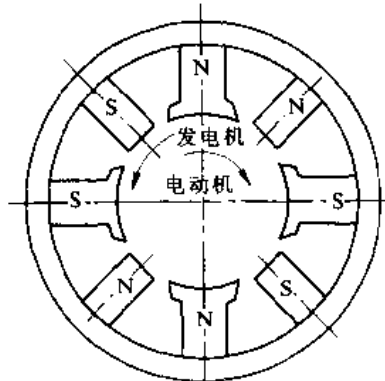


图4·7-2 主极和换向极的极性排列

表4·7-1 电刷的极性

绕组型式	从换向器端看主极下的电刷极性			
	电枢顺时针旋转		电枢逆时针旋转	
	N极	S极	N极	S极
叠绕(开口)	-	+	+	-
叠绕(交叉)	+	-	-	+
波绕(开口)	-	+	+	-
波绕(交叉)	+	-	-	+

注：蛙绕组按其叠绕组型式决定电刷极性

(2) 定子绕组各线圈间的连接正确。绕组单路连接时，对电流较大的串励绕组、换向极绕组和补偿绕组，应隔极相连，以免由线圈间的连接线内的电流形成产生轴电压的励磁磁动势。双路连接的各种绕组也应隔极相连，以防止由于两路电流分配不均而造成各对极的磁动势不等。

(3) 磁极、线圈、连接线等零部件坚固可靠，在冲击负载和磁场突变时，不致产生有害的变形或松动。

(4) 导电零件连接处的接触电阻小，对地绝缘性能良好。

(5) 定子各绕组及连接线布置紧凑、合理，有利于通风散热。

2·1 机座

直流电机的机座是磁路的组成部分，也是固定主极、换向极、端盖(罩)等零部件的支撑件。机座一般由铸钢铸成或由钢板焊接而成，对磁路动态性能要求高的电机，如晶闸管整流电源供电、负载经常快速变化的电机，常采用叠片机座。对机座的基本要求是：

(1) 具有足够的刚度。

(2) 便于加工、安装、运输和检修。钢板焊接的机座圈，不能因焊缝位置引起磁路不对称；叠片机座应保证每对极下扇形片接缝数相等。

(3) 机座中心高及底脚孔距离等安装尺寸应符合有关标准。

(4) 充分利用机座内部空间，使定子内各绕组通风散热良好。

常用的机座结构参见本卷第1篇第3章1·1节。

2·2 主极

主极产生电机主磁通，由主极铁心、主极线圈、极身绝缘、绝缘垫圈和紧固零件等组成。图4·7-3是常用的大中型直流电机的主极结构。

主极铁心通常用1~2mm厚的钢板冲制，表面不绝缘，经叠压并用铆焊或螺栓等方法紧固而成中小型电机的他(并)励线圈和小型电机的串励线圈一般按绝缘等级的要求选用相应绝缘等级的电磁线绕制。他(并)励线圈可单独绕制，绝缘后套在包好极身绝缘的主极铁心上，可绕在绝缘框架上，再套装在主极铁心上，也可直接绕在包好极身绝缘的主极铁心上。电流在70A以上的串励线圈和大型直流电机的他励线圈通常用裸线平绕或扁绕而成。

主极用螺栓固定到机座上。叠片机座有时在机座

冲片相应位置冲出缺口，便于主极、换向极固定时定位，如图4-7-4所示。

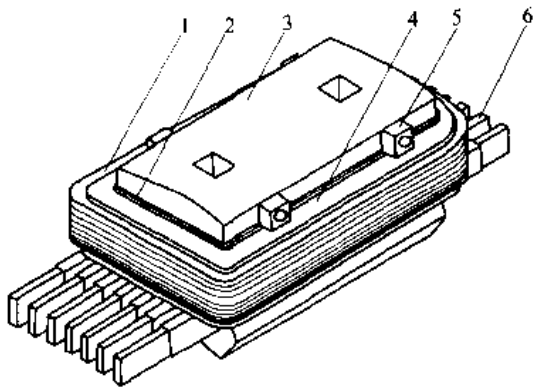


图4-7-3 直流电机主极结构

- 1—绝励线圈 2—极身绝缘 3—主极铁心
- 4—绝缘垫板 5—压块 6—补偿线圈

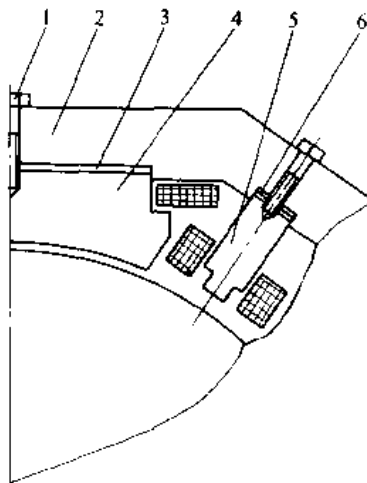


图4-7-4 叠片机座主极、换向极的固定

- 1—螺栓 2—叠片机座 3—主极垫片 4—主极
- 5—换向极 6—换向极垫片

大型直流电机固定磁极的螺栓大于M48时，往往在主极铁心内穿入钻攻好螺孔的铁杆，固定磁极的螺栓拧入铁杆上的螺孔内，以避免叠片铁心螺纹强度不够和攻螺纹的困难。在某些负载繁重的中小型电机中，有时也采用这种结构。

2.3 换向极

换向极产生换向极磁通，由换向极铁心、换向极线圈、极身绝缘和线圈固定件等组成。

换向极铁心有整体式和叠片式两种结构。换向极线圈可用一般电磁线或裸铜（铝）扁线绕制。在大型直流电机中为了压缩换向极线圈所占的定子空间和使线圈接近电枢表面以减少漏磁，换向极线圈有时采用扁铜带焊成矩形线圈，再用横穿换向极铁心的螺栓固定

在换向极铁心上，见图4-7-5。

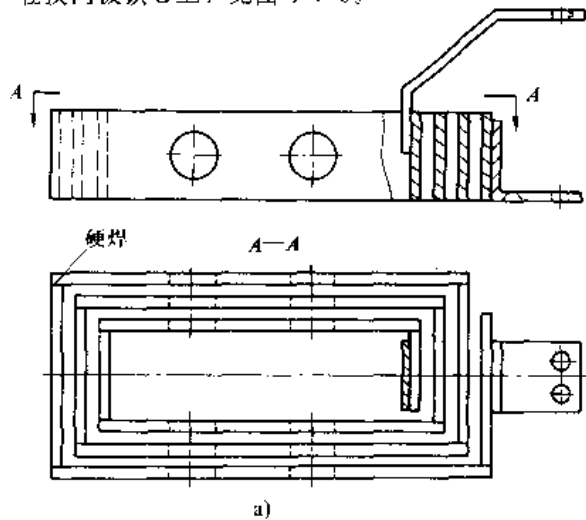


图4-7-5 矩形换向极线圈及其固定结构

- a) 矩形换向极线圈 b) 矩形换向极线圈固定结构

对特别细长的叠片式换向极铁心，为提高其刚度和整体性，可在铁心叠压和紧固后将其真空浸渍处理。

2.4 补偿绕组

2.4.1 补偿线圈

补偿线圈的基本结构型式有菱形、同心式和条式三种，见图4-7-6。

菱形补偿线圈一般由圆铜电磁线绕制，用于梨形补偿槽的小型电机；同心式补偿线圈由扁铜电磁线绕制，用于半闭口或开口补偿槽的中型电机，当补偿槽是开口槽时，为减少补偿齿、槽引起的磁脉动的影响，常采用磁性槽楔；条式补偿线圈分直线和端线两部分，由裸铜母线制成，用于半闭口或闭口补偿槽的大中型电机，嵌线时需将外包绝缘的直线部分穿入主极补偿槽内，然后用端线连接成绕组。

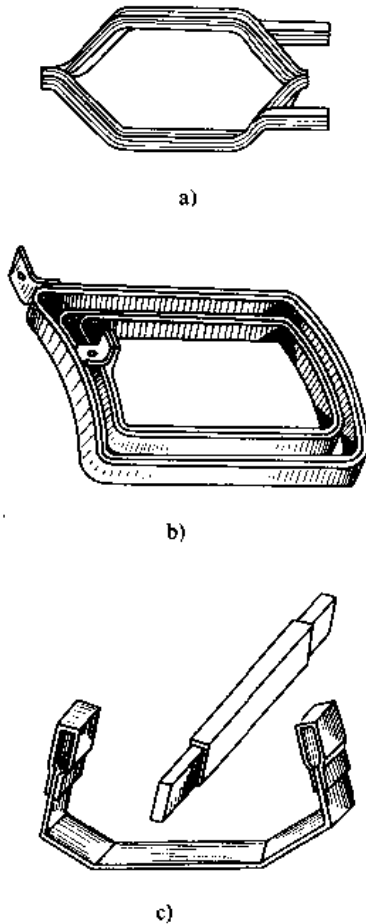


图 4-7-6 补偿线圈结构型式
a) 菱形 b) 同心式 c) 条式

2.4.2 补偿线圈的连接与端部固定

补偿线圈，特别是条式补偿线圈直线和端线部分的连接常用图 4-7-7 所示的三种方式。其中螺栓连接

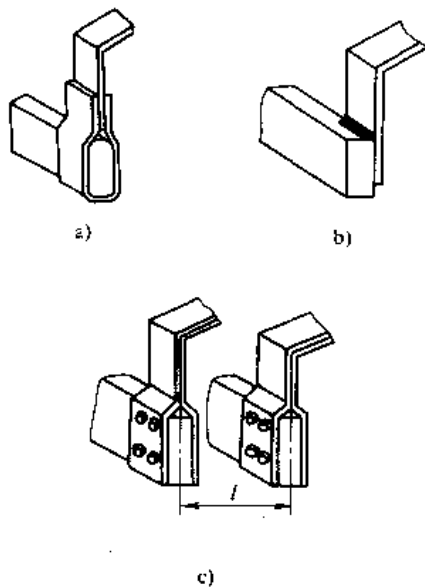


图 4-7-7 补偿绕组连接方式
a) 并头套软焊 b) 硬焊 c) 螺栓连接

拆装方便，但为满足工艺上的需要和保持各线圈间足够的距离，补偿线圈间距 t 不能太小；并头套焊接结构工艺简单，硬焊连接最可靠。连接方式根据电机使用要求进行选择。

为防止补偿绕组在电磁力作用下发生移动，其在槽内的直线部分一般都用槽楔固定，必要时将装配好的主极整体真空浸渍处理，使线圈和铁心成为一体，补偿绕组端部相互间用绝缘垫块隔开，并用玻璃绳绑扎或用螺栓压紧。大型直流电机补偿绕组端线部分有时用螺栓通过支架固定在机座内圆上，如图 4-7-8 所示。

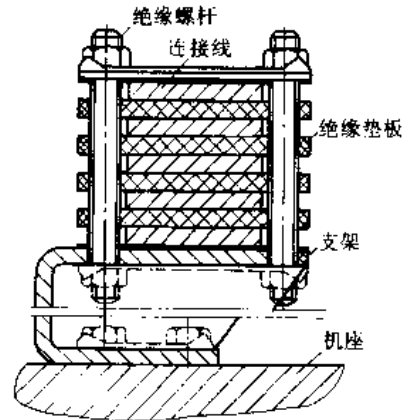


图 4-7-8 补偿绕组端线部分的固定

2.5 定子引出线与连接线

定子引出线与线圈极间连接线当电流较小时采用电缆，当电流较大时采用铜母线。电缆的最大载流量与电机的工作制、冷却方法、结构和防护型式有关。B 级绝缘电缆的最大载流量见表 4-7-2。

表 4-7-2 B 级绝缘电缆最大载流量

电缆铜导体截面积 (mm ²)	电缆的最大载流量 (A)			
	连续工作制		短时工作制	
	开启或防滴式	封闭式	开启或防滴式	封闭式
1	10			
1.5	15			
2.5	26	23	39	39
4	40	33	60	46
6	58	47	87	63
10	84	67	140	110
16	120	100	220	170
25	160	140	320	235
35	200	175	430	350
50	255	220	580	470
70	310	270	760	620
95	375	315	960	790
120	425	350	1140	940

注：F 级绝缘电缆最大载流量约为表中数值的 1.15 倍。

2.6 换向极垫片

在动态性能要求高、电流变化率 di/dt 大的直流电动机中,采用全叠片磁路结构后,调整换向极气隙用的换向极垫片中的涡流的阻尼作用,上升为阻碍换向极磁通跟随电枢电流快速变化的主要矛盾。常用的改进措施是在换向极垫片上冲一些窄槽,增加涡流路径的长度,从而增大涡流回路的电阻;或者用电阻率大的非磁性材料冲制垫片,以抑制垫片中的涡流。

3 直流电机的电枢

直流电机的电枢是实现机电能量转换的旋转部件,由电枢铁心、电枢绕组、换向器和轴等主要零部件组成。图 4-7-9 为一般中小型直流电机的电枢。

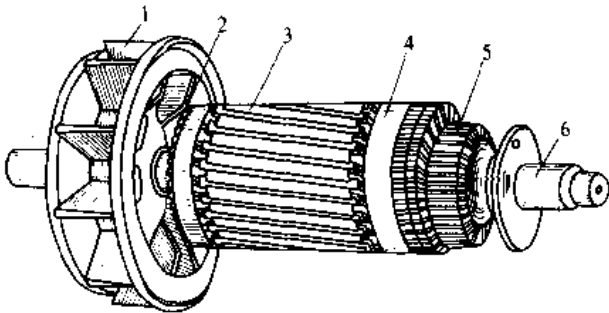


图 4-7-9 中小型直流电机的电枢
1-风扇 2 绕组 3 电枢铁心
4-绑带 5-换向器 6-轴

电枢结构不仅应满足电磁性能的要求,而且应保证它在交变电磁转矩和离心力的作用下,各组成部分的结构牢固可靠,通风风路合理。对功率较大的电机,当电枢直径受到飞轮力矩 GD^2 等限制时,常采用双电枢乃至三电枢结构。

3.1 电枢铁心

电枢铁心是由两面刷漆的 0.5mm 硅钢片冲制的电枢冲片叠装而成。中小型电机的铁心大多直接压装在轴上,铁心上设有轴向通风孔;大中型电机一般先将电枢冲片压装在电枢支架上,然后用键或热套的方法将支架与轴固定。铁心常常分成若干铁心段,段间设有径向通风沟。

3.1.1 电枢冲片及其固定

电枢冲片有整圆冲片和扇形冲片两种。整圆冲片的外径取决于硅钢片的宽度,一般不大于 990mm,当硅钢片供货宽度大于 1000mm 时,可相应增加整圆冲片的外径。

表 4-7-3 常用电枢铁心冲片及其固定

冲片类别	固定方式	结构简图	特征与应用
梨形槽	平键		冲片与轴用平键固定,适用于小型直流电机
	平键		冲片与轴用平键固定,适用于中小型直流电机
整圆	平键和楔键		冲片与支架用平键和楔键固定,适用于中型可逆转电动机
	径向楔键		冲片与支架用径向楔键固定,适用于大型发电机与不逆转的一般电动机
扇形	切向楔键和径向垫		冲片与支架用切向楔键和径向垫固定,适用于大型轧钢电动机
	内鸽尾筋		冲片与支架用带鸽尾筋的筋固定,适用于可逆转大型轧钢电动机
片	外鸽尾筋		冲片与支架用外鸽尾筋固定,冲片材料利用率高,通风冷却条件较好,适用于大型直流电机

整圆冲片上冲有梨形槽或矩形槽，前者适用于电枢直径小于200mm，电枢线圈为圆线散嵌线圈的小型电机；后者适用于电枢线圈用扁铜线制成的中小型电机。

带矩形槽的扇形冲片用于大型电机，为传递转矩和铁心叠片时定位，每张扇形片上至少带有1~2个鸽尾槽（筋）和相应数量的螺孔。常用电枢铁心冲片及其固定方式见表4·7-3。

3·1·2 扇形片的分片

扇形片应按以下基本要求分片：

(1) 电枢冲片的分片数应避免造成磁路不对称而引起的轴电压，每对磁极下叠片的接缝数 q 应为整数，即

$$q = \frac{S}{p} = \text{整数}$$

式中 S ——沿圆周方向的扇形片数；

p ——电机主极对数。

(2) 扇形片内外弦长之和或外弦长尽量接近硅钢片宽度，以利于合理套裁。

(3) 拉紧螺栓孔应均匀分布，孔数应为电枢支架筋数的整倍数，孔距一般为120~160mm。

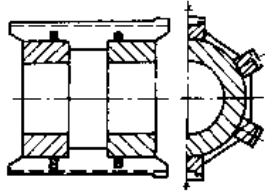
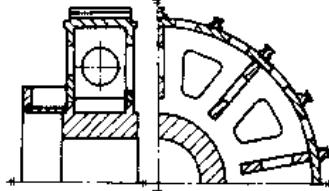

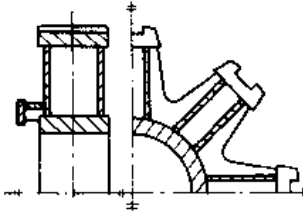
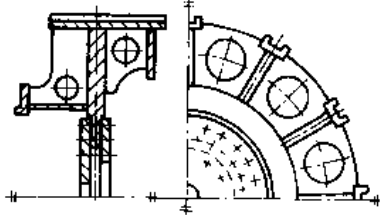
(4) 每张扇形片的槽数最好是整数，并且接缝处是半槽，以免折断齿。为避免出现半齿，当每张扇形片的槽数带1/2时，往往采用两种不同整数槽的扇形片（如每扇形片为26 $\frac{1}{2}$ 槽时，一种扇形片用26槽，另一种用27槽）。但这样要用两种冲模，增加了制造费用和叠片工艺的复杂性[⊖]。

为减少电动机在极低转速下的转速、转矩脉动，降低噪声，往往采用斜槽电枢铁心结构。在整圆冲片时，用轴上铣斜键槽叠装或外压装铁心套轴前扭斜来达到斜槽的目的。在扇形冲片情况下，可通过数控冲槽机使相邻层扇形冲片上的齿槽位置按规律平移一微小距离，并对扇形片按层按序编号，再严格按编号叠装出斜槽电枢铁心。

3·2 电枢支架

电枢支架是大中型电机电枢铁心的支撑件，能减轻电枢重量并有利于电枢的通风冷却。常用电枢支架结构见表4·7-4。

表 4·7-4 常用电枢支架结构

型式	星形支架	箱式星形支架	空心轴支架
结构简图			
特征	支架由铸铁浇铸或钢板焊接而成	支架为焊接结构，轮毂用锻钢，幅板外用圆筒连接，以增强支架刚度	支架为焊接结构，鸽尾筋与空心轴体直接焊接
适用范围	中型直流电机	大型直流电机	大型直流电机
型式	盒形支臂支架		夹板式支架
结构简图			
特征	支架为焊接结构，整体轮毂，盒形支臂，可较好地传递力矩，抗振，防止开焊和断裂，通风良好		支架为焊接结构，由主幅板、副幅板及筋焊接而成
适用范围	大型直流电机		矿井卷扬机用悬挂式大型直流电动机

⊖ 在使用数控冲槽机冲片并叠装成斜槽电枢铁心时，不受此约束。

电枢支架与轴一般通过键或热套紧配合。某些大型直流电动机电枢采用整体浸渍工艺时,由于受浸渍设备的限制,常常在电枢嵌线并整浸后才能套轴。为避免热套轴过程中铁心过热损伤绝缘,在加热电枢铁心使支架内孔扩大的同时,冷冻转轴使其外径缩小,以保证热套间隙而不致加热过高。为消除套轴过程中产生的轴向应力,常采用高压油打入轴和支架间的空腔以扩大电枢支架内孔的方法消除其内应力。

3.3 轴

轴除了要传递转矩、承受电枢全部质量和单向磁拉力外,还要承受轴伸传来的弯矩、轴向推力及扭转振动时所产生的交变或放大力矩等,是转动部分的关键部件。

对转轴的要求,它的常用结构和材料参见第1篇第3章2.1节。

3.4 电枢绕组

电枢绕组的分类、参数、特征和应用参见本篇第5章。组成绕组的各式线圈的典型结构如图4.7-10所示。

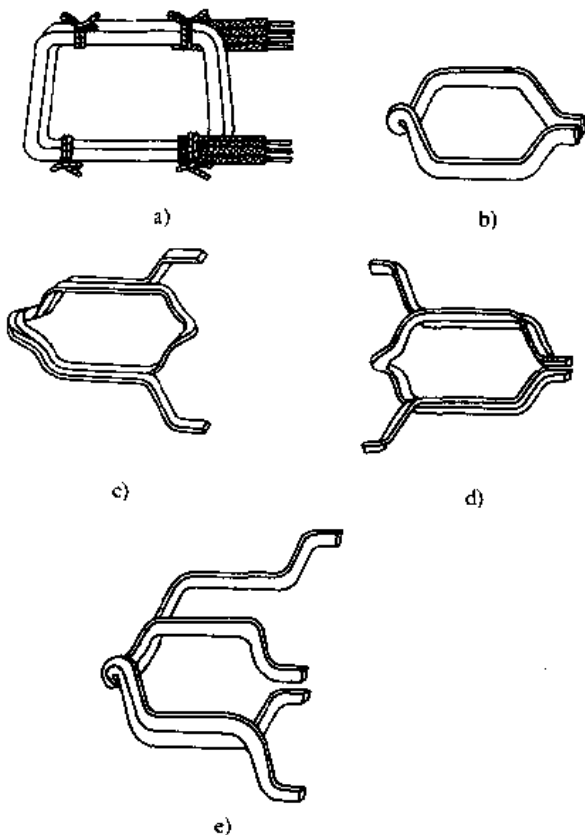


图4.7-10 电枢线圈结构

- a) 嵌线线圈 b) 单层叠绕成型线圈 c) 多层波绕成型线圈 d) 单鼻蛙绕线圈 e) 双鼻蛙绕线圈

在某些电磁参数高的大型直流电机中,为统筹解决换向和发热问题,电枢线圈采用变截面半线圈式结构,即上、下层半线圈的直线部分的导线截面与端线部分的导线截面不同,上、下层半线圈的直线部分的导线截面也不同,如图4.7-11所示。这样利用线圈各部位散热条件不同,即使各部位截面不同而电流密度不同也不会导致局部过热,电枢槽高度尺寸则明显减小,对电机的换向性能极为有利。

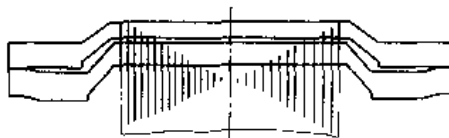


图4.7-11 变截面电枢线圈

电枢绕组在嵌线、固定后一般应浸渍处理。对技术要求高的电机,则进行真空整体浸渍(Vacuum-Pressure Impregnation—VPI)处理。

3.5 均压线

均压线的分类、参数和应用参见本篇第5章5节。常用的均压线结构见图4.7-12,其中人字形均压线广泛用于大中小型电机的叠绕组中;环式均压线一般使用在复波绕组中;渐开线式均压线是将换向器升高片分成两根渐开线导线,分别与电枢绕组的等电位点相连,升高片兼起均压线的作用,用于大型高速电机的叠绕组中,作为全额甲种均压线,在特殊情况下,也与穿过铁心的两种均压线结合在一起使用。

接在电枢一端的均压线可装在换向器端并与换向片或升高片连接;也可安装在非换向器端,借并头套与线圈鼻端或引线相连,如图4.7-13所示。接在换向器端的均压线均压效果好,但应注意防止碳粉积累引起的短路故障;接在非换向器端的均压线安装结构较为复杂,但便于修理;穿过铁心的均压线的安装如图4.7-14所示,其结构和安装都较为复杂。

3.6 电枢绕组的固定和温度测量

电枢绕组的直线部分通常用槽楔固定在电枢铁心槽内,端线部分通过绑扎无纬玻璃丝带固定在线圈支架上,槽楔的厚度和绑扎的宽度与厚度取决于所受离心力的大小、槽楔与无纬带的材质,以及电机的实际结构情况。端部绑扎带一般不应高出铁心外径。对于大型高速电机,无纬带绑扎厚度超过10mm时,应分几次绑扎成型,达到要求的厚度,以避免绑扎开裂。

为改善换向或提高极限容量,有些电机取消槽楔,

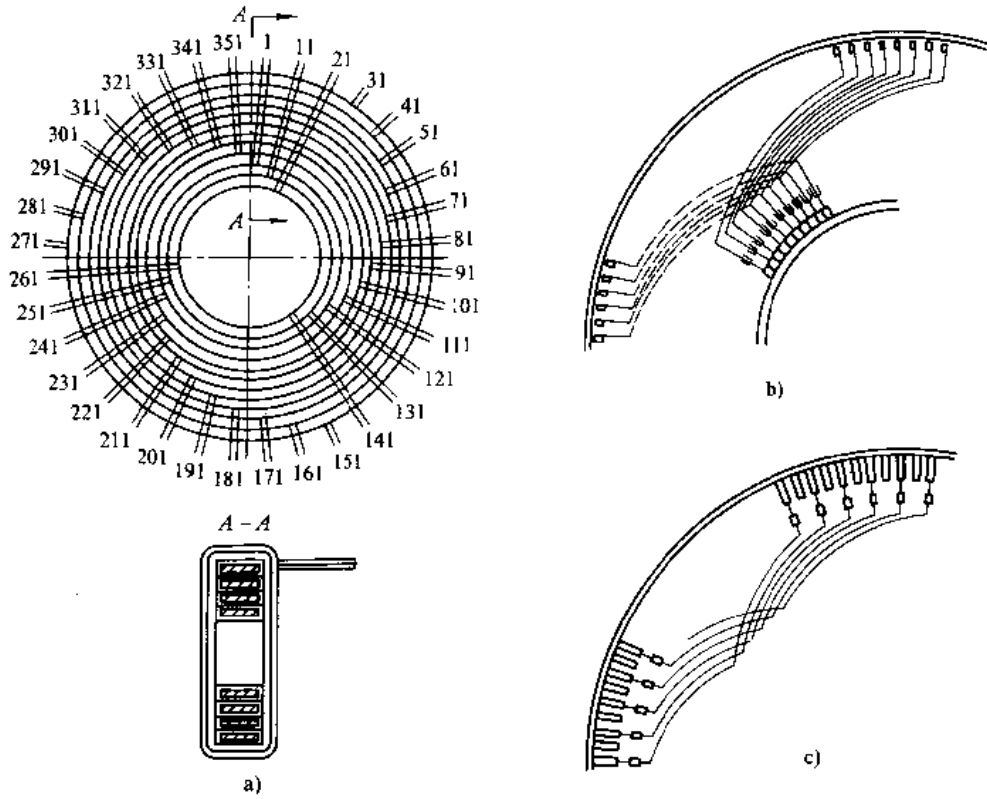


图 4-7-12 均压线的结构型式

a) 环式 b) 渐开线式 c) 人字式

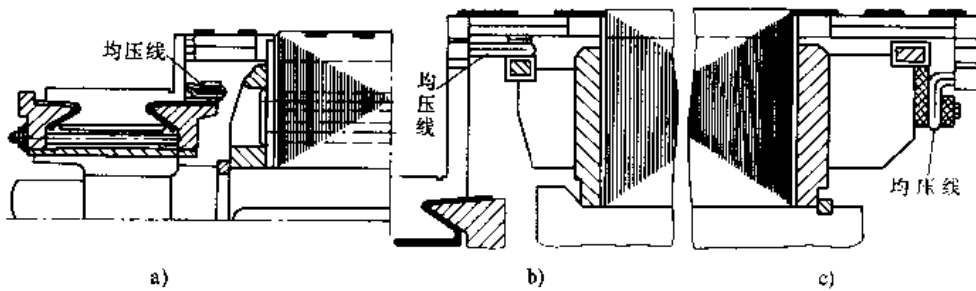


图 4-7-13 接在电枢一端的均压线安装结构

a)、b) 均压线在换向器端 c) 均压线在非换向器端

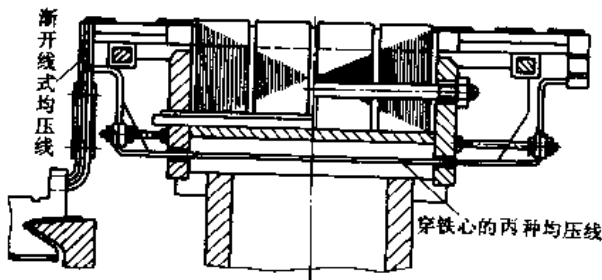


图 4-7-14 穿过铁心的均压线的安装结构

改用在铁心上绑扎无纬带固定绕组直线部分，以减小电枢槽高、降低换向电抗电动势。此时，铁心上的绑扎带往往高出铁心，在拆装电枢过程中，应注意避免绑扎带直接受力而损伤绑扎带和电枢绕组。

电枢无纬带绑扎如图 4-7-15 所示。

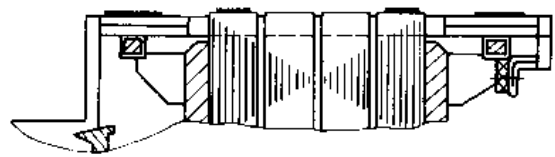


图 4-7-15 电枢无纬带绑扎

大中型直流电机的电枢绕组根据使用要求，通过埋置的电阻测温元件在运行中测量其温度。温度信号可用无接触的无线电发射，或通过滑动接触的集电环和电刷，从转动中的电枢传输到静止的接收装置进行测量。因此，事先应根据不同的测量原理在电枢上安装相应的装置。

无线电无接触电枢绕组测温装置容易遭受电磁场的干扰，为保证测量精度而采用的线路、屏蔽措施和安

装维护都比较复杂。

为排除滑动接触电阻对测量精度的影响,采用一种集电环式电枢绕组测温装置。在电枢上、在测温元件与集电环之间加装电阻—频率变换器,使电阻测温元件随温度变化而变化的电阻转变成频率,通过集电环和电刷传送到静止的测量装置上,经过解调由频率得出应测得的温度。这种装置已得到广泛应用。

3.7 换向器

换向器一般由换向片、云母片、V形绝缘环、压圈和紧固件组成。

3.7.1 结构型式

换向器的结构型式主要取决于电机的功率、电压

和转速。常见的换向器有塑料换向器、拱形换向器和绑环换向器三种。

1. **塑料换向器** 它的结构简单,加工方便,适合于批量生产,主要用于小型直流电机。

2. **拱形换向器** 它是应用最广泛的换向器,广泛应用于大中小各类电机中。

3. **绑环换向器** 它应用于换向器圆周速度超过 40m/s 的高速直流电机中。

近年来发展出一种新颖的插入式绑环换向器,其绑环不影响换向器工作表面,通风散热良好,兼备拱形和绑环换向器两者的优点,可替代拱形换向器应用于一些大中型电机中。

各类换向器的典型结构见图 4.7-16。

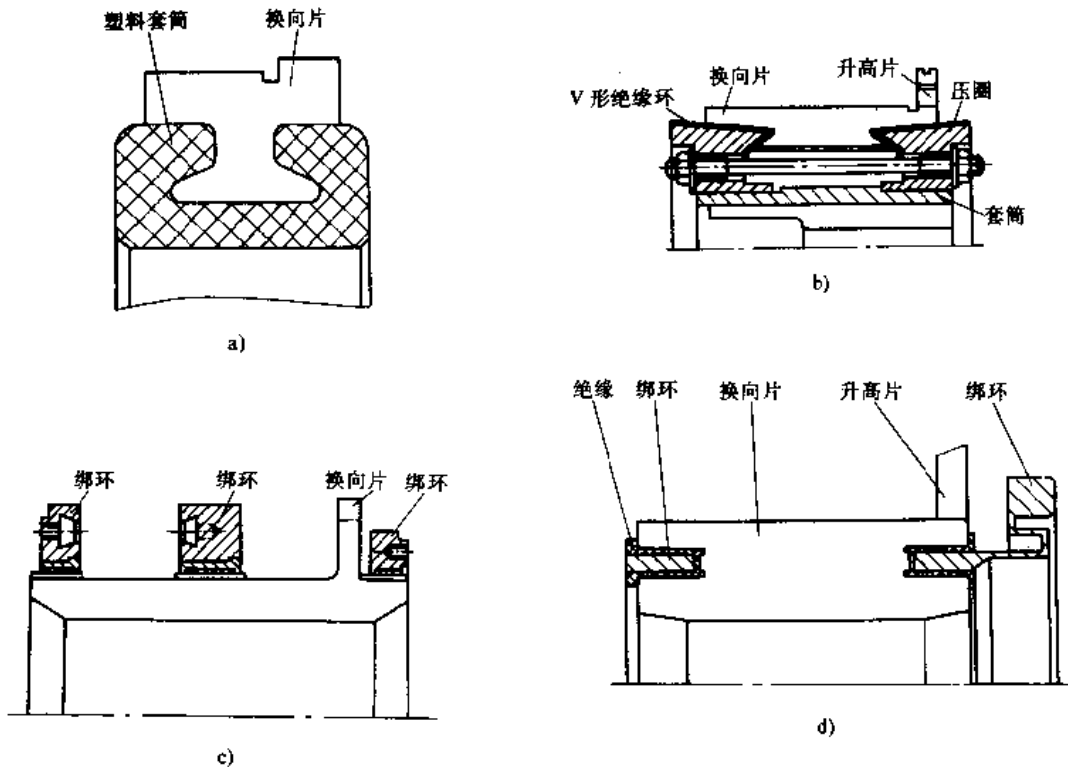


图 4.7-16 换向器的典型结构

a) 塑料换向器 b) 拱形换向器 c) 绑环换向器 d) 插入式绑环换向器

3.7.2 主要尺寸

1. **换向器直径** 取决于电磁设计和电机结构,推荐按 JB2568《电机换向器直径系列》选用。

2. **换向器长度** 换向器工作表面的长度除考虑每个刷杆电刷数和电刷、刷握尺寸外,还应考虑电刷轴向位移(图 4.7-22)、运转时电枢的轴向窜动量、换向器端面圆角半径等。

3. **换向片高度** 它取决于换向器直径、长度、磨损量以及电机转速等,由换向器强度计算确定,可按下式估算:

对一般用途电机

$$h = 2.2 \sqrt{D_k - 1} \quad (\text{cm})$$

对特殊用途电机

$$h = 2.8 \sqrt{D_k - 1} \quad (\text{cm})$$

式中 D_k ——换向器直径 (cm)。

换向器容许的径向磨损量可按式估算：

$$\epsilon = 0.5 \sqrt{D_k} \quad (\text{cm})$$

3.7.3 换向片

换向片常用冷拉梯形铜排制成。梯形铜排的尺寸要求高于一般铜母线，应给予严格控制。为提高其电导率与耐磨、耐热和耐弧性，以及机械强度等性能，往往也采用含银、铬、镉、锆和稀土等铜合金梯排。各种材料的主要性能见表4-7-5。

表 4-7-5 换向片材料主要性能

材料类别	硬铜	银铜	镉铜	铬铜	锆铜	稀土铜
化学成分的质量分数 (%)	含铜 99.9	含银 0.07~0.2	含镉 1	含铬 0.4~0.6	含锆 0.2	含镧 0.1
抗拉强度 (MPa)	340~440	340~440	490	440~490	390~440	340~440
硬度 HBS	80~110	95~110	100~115	110~130	120~130	95~110
电导率 (%IACS) ①	98	96	85	80~85	90	96
高温强度 (MPa)	200℃ 时 200~250	290℃ 时 250~260		400℃ 时 210	400℃ 时 340	

① IACS—国际退火工业纯铜标准的简称。1913年国际电工学会规定，退火工业纯铜在20℃时的电阻率为0.01724Ω·mm²/m为标准电导率，以100%IACS表示。

3.7.4 升高片及其固定

升高片是换向片与电枢绕组的中间连接零件。在小型电机中电枢直径和换向器直径相差较小时，或为了提高运行的可靠性，将换向片的一端加高来代替升高片。在大中型电机中，电枢与换向器直径相差较大，必须借助升高片连接电枢绕组与换向片。

升高片一般用0.6~1mm的软铜板或1~1.6mm韧性好的软铜带制成。常见的升高片结构如图4-7-17所示。当升高片较长时，其中部弯成弧形，见图4-7-17e，以改善升高片受热后的变形和减少换向片所受的升高片的离心力。在有些大型电机中，在发热允许的情况下，用钢材制作升高片，以防止频繁正反转及冲击负载作用下发生升高片断裂。

升高片和换向片常用连接结构如图4-7-18所示，

其中钢质升高片与换向片必须用硬钎焊连接。当换向片较薄时，可在换向片侧面铣槽，升高片贴在换向片侧面槽内，再铆接或硬钎焊。硬钎焊时应注意防止换向片过热退火。

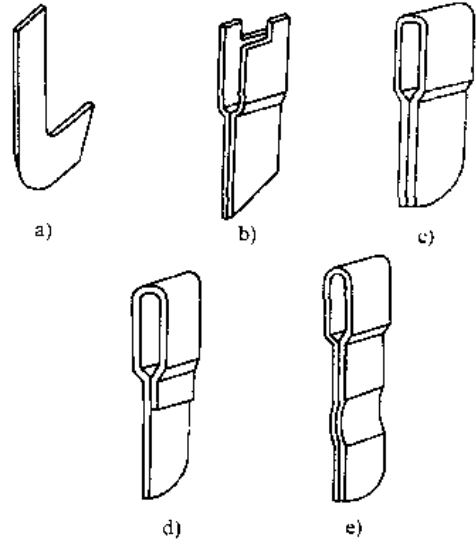


图 4-7-17 升高片结构

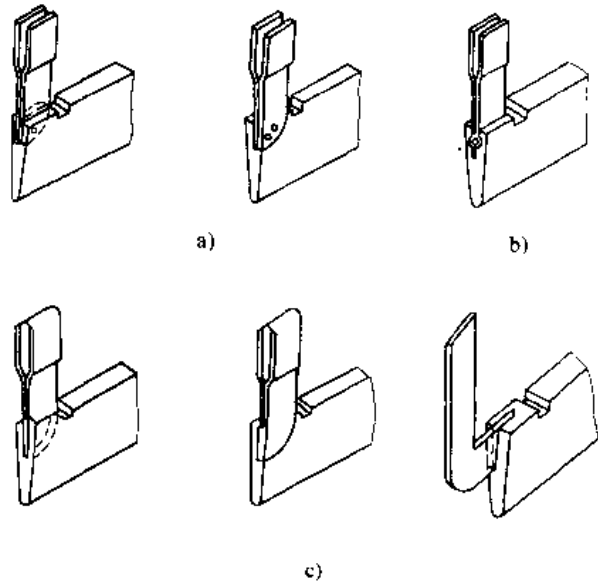


图 4-7-18 升高片与换向片的连接结构
a) 铆接(软钎焊) b) 轴向销子固定(软钎焊)
c) 硬钎焊

电枢线圈引出线一般放入升高片上部的并头套内，再用软钎焊(B级绝缘电机)或硬钎焊(F级绝缘电机)焊接。在升高片和换向片为一体的情况下，线圈引线与换向片常采用钨极惰性气体保护焊焊接。有些大型电机的升高片上部为平板，则用中频焊或钨极电阻焊与电枢线圈引线搭接或对接，如图4-7-19所示。

大型电机的升高片较长，在正反转或快速加减速

时容易引起谐振,导致升高片变形直至折断。为此,需要采取适当措施固定升高片。常用的方法有绑绳固定、绝缘垫圈固定、弹性垫块固定及捆束式固定等。图4-7-20为弹性垫块固定和捆束式固定的示意图。

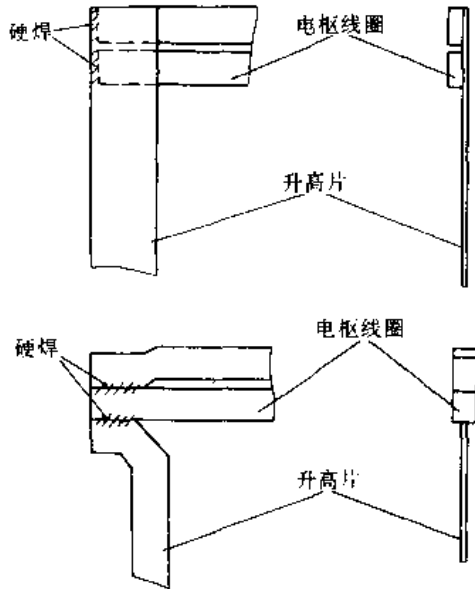


图 4-7-19 升高片与电枢线圈的焊接

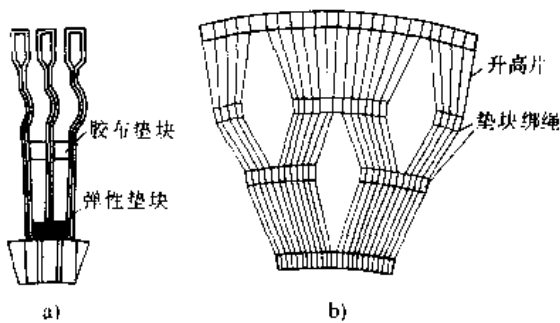


图 4-7-20 升高片固定结构示意图

a) 弹性垫块固定 b) 捆束式固定

弹性垫块固定结构采用弹性垫块置于升高片根部,并用环氧树脂涂封,这样对升高片的机械振动产生阻尼作用,从而降低其振幅。捆束式固定结构将升高片分成若干组,用绝缘垫块将升高片相互隔开,并用线绳将升高片捆成若干束,这样可以限制升高片的谐振。

4 直流电机的电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等零件组成,见图4-7-21,通过固定的电刷和旋转的换向器之间的滑动接触,把外电路与电枢电路连接。中小型电机的刷杆座固定在端盖或轴承内盖上,大中型电机的刷杆座则固定在机座上。有些大型电机为了提高刷杆座的结构刚度,常将刷杆座直接固定在底板上。

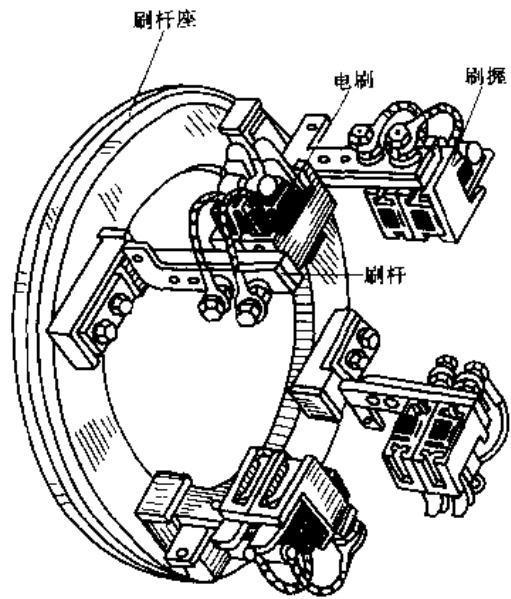


图 4-7-21 电刷装置结构

4.1 对电刷装置结构的基本要求

(1) 具有足够的刚度,在电机正常运行时,不产生有害变形和机械振动。

(2) 保证电刷与换向器滑动接触良好,刷握沿换向器周向等分。

(3) 便于维护、更换电刷和调节电刷压力。

(4) 电刷在换向器表面布置合理。电刷的轴向位移有利于减少换向器表面因磨损出现的轴向波浪度,周向位移可调节电机换向的强弱。电刷位移布置如图4-7-22所示。

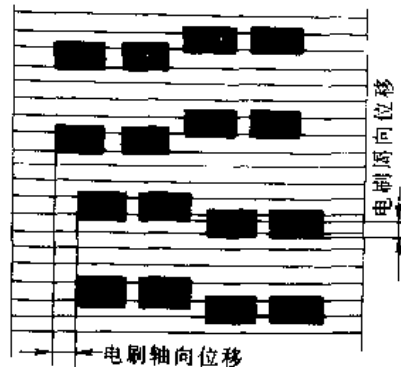


图 4-7-22 电刷位移布置示意图

4.2 刷握结构

刷握由刷盒、弹簧及压指等零件组成。电刷在刷盒内应能上下自由滑动而不晃动,对换向器外圆表面有

良好的跟随性。电刷压力一般为15~25kPa,应力求均匀,在电刷磨损过程中压力能保持大致不变。

刷握结构有直、斜两大类,弹簧可分恒压、蜗卷和螺旋等几种。常用的刷握结构见表4-7-6。

表4-7-6 常用刷握结构

直 刷 握	简图			
	特点	电刷磨损过程中压力 p_1 基本保持不变 $p_1 = 7.74 \frac{bh^3}{R_0^2} K \quad (\text{kN})$ 式中 b —弹簧宽度 (mm) h —弹簧厚度 (mm) R_0 —弹簧内径 (mm) K —系数 1~2.2	电刷磨损过程中,压力 p_1 变化不大,压力可通过微调机构调节 $p_1 = \frac{p_0 l}{l_0 \cos \alpha} \quad (\text{kN})$	电刷磨损过程中,压力 p_1 有所变化,压力可调节 $p_1 = \frac{M_0}{l_b \cos \alpha} \quad (\text{kN})$
	适用范围	正反转中小型直流电机	正反转中小型直流电机	正反转中小型直流电机
斜 刷 握	简图			
	特点	电刷受力情况较直刷握好,其安装位置是电刷锐角边对着电机旋转方向,常用倾斜角 $\beta=20^\circ$	电刷压力可以调节,常用倾斜角为 $\beta=20^\circ$	电刷压力可以调节,常用倾斜角 $\beta_1=10^\circ, \beta_2=30^\circ$,其安装位置是电刷 30° 锐角边对着电机旋转方向
	适用范围	单向旋转的直流电机	正反转大中型直流电机	单向旋转的大中型直流电机

5 直流电机的端盖或端罩

端盖或端罩是保护电机内部和构成风路的部件,它的结构取决于电机的防护型式。

许多中小型电机的轴承及叠片机座电机的底脚安排在端盖上,端盖还起着支撑电枢和整个定子的作用。端盖一般用铸铁铸造或用钢板焊接,经止口与机座配合,并用螺栓固定在一起。

配备座式滑动轴承的大中型电机，采用薄钢板焊接的端罩。对端罩的基本要求是刚度好，焊接、加工和拆装方便，通风效果好和外形美观。端罩上往往设置观察窗和进入电机内部的门，端罩内有时还装设照明装置。

6 直流电机的轴承

中小型直流电机一般采用滚动轴承，中心高 630mm 以上的电机根据需要也可采用端盖式滑动轴承；大型电机一般采用座式滑动轴承。

7 直流电机的底板

采用座式滑动轴承的大中型直流电机一般应配有底板。底板是承受电机动、静载荷的重要部件，必须有足够的强度、刚度以及开有地脚螺栓孔。底板大多用钢板或型钢焊接、加工而成，一般采用整块结构；当宽度超过 4~4.5m 时，为了运输方便，可分成两半，到安装工地再用螺栓和圆销连接成整体。大型电机的底板也可采用条状分块式结构，不过安装、调整比较复杂。

底板一般通过二次灌浆与基础连成一体。

第 8 章 直流电机的试验、安装和维护

1 直流电机的试验^[17]

直流电机出厂前必须按 GB755《旋转电机基本技术要求》及各类产品技术条件的规定，按 GB1311《直流电机试验方法》进行各项试验。

1.1 试验项目

直流电机的试验分检查试验、型式试验和特殊试验三类，各类的试验项目见表 4-8-1。

表 4-8-1 直流电机试验项目

试验项目	检查试验	型式试验	特殊 ^② 试验
绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定	✓	✓	
绕组在实际冷状态下直流电阻的测定	✓	✓	
空载特性的测定	✓ ^①	✓	
额定负载试验（同时检查换向）	✓	✓	
短时过电流试验（同时检查换向）	✓	✓	
电动机的短时过转矩试验（同时检查换向）	✓	✓	
发电机固有电压调整率或电动机固有转速调整率的测定	✓	✓	
超速试验	✓	✓	
振动测定	✓ ^①	✓	
匝间冲击耐压试验	✓	✓	
短时升高电压试验（如已进行匝间冲击耐压试验，可不再进行）	✓	✓	

(续)

试验项目	检查试验	型式试验	特殊 ^② 试验
耐电压试验	✓	✓	
温升试验		✓	
效率测定		✓	
有换向极电机的无火花换向区域的测定 ^③		✓	
噪声测定		✓	
无线电干扰的测定			✓
转动惯量测定			✓
轴电压测定			✓
电感测定			✓
整流电源供电时电机的电压、电流脉动率的测定			✓
电枢电流变化率的测定			✓

注：表中标有“✓”者表示应进行试验。

① 可根据需要仅列为型式试验项目。

② 产品有要求时进行。

③ 换向性能的判断和调整参见本篇第 4 章。

1.2 试验方法

1.2.1 振动测定

按 GB10068《旋转电机振动测定方法及限值》进行。

1.2.2 噪声测定

按 GB10069《旋转电机噪声测定方法及限值》进

行。

1.2.3 无线电干扰的测定

按 GB3907《工业无线电干扰基本测量方法》进行。

1.2.4 其他试验项目

按 GB1311《直流电机试验方法》进行。

2 直流电机的安装

直流电机的安装工艺过程取决于电机的大小、质量和结构。大中型直流电机,特别是多电枢和多电机机组的安装工作比较复杂,安装的技术要求较高,其品质与电机运行的可靠性有直接联系。下面简单叙述大中型直流电机的安装要领。

2.1 安装前的准备

设备到达安装工地后应立即开箱检查验收。暂不安装的电机经验收后应保存在室温为 $5\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度小于 75%、无有害气体而且清洁的室内。保存期间应定期检查绕组、换向器、轴颈及其他主要零部件有无锈蚀、损坏等情况。

安装电机的基础在承受给定的静、动载荷下,应不产生有害的下沉、变形或振动现象,因此,在安装前应对基础的品质和尺寸进行仔细检查。一般以被拖动设备的基础作为电机基础的基准,利用主纵轴线和主横轴线检查基础尺寸和底板上底脚螺孔的轴线,以便正确安装好轴承座、定子和电机。

确定主纵轴线和主横轴线的方通常采用架线法,即用架子把一根直径为 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 的钢丝架在基础上空,并用 15kg 左右的重物将钢丝拉紧。根据分布在主纵轴线两边的基础上底脚螺孔中心距之中点把钢丝调整好,然后悬上铅锤,用冲子在基础中预埋的钢板上冲出两点记号,再在基础上划出主纵轴线。用同样方法在基础上划出与主纵轴线正交的主横轴线。

2.2 底板和轴承座的安装

大中型直流电机的底板大多是整块的,也有由若干块组成的。底板安装时在其下面的各着力点垫以金属平垫块和成对的楔形垫块,用以调整底板的标高和水平度。垫块的数量、大小和分布应考虑垫块和二次灌浆承力面联合承受电机的静、动载荷以及基础螺栓固紧力的需要。底板标高偏差 $\pm 0.5\text{mm}$, 水平度偏差 $\leq 0.15\text{mm/m}$, 前后左右按基础主纵、主横轴线找正。

底板水平调整的示意图如图 4-8-1 所示。在电机或机组总装配和最后调整后,进行浇固底板的工作,此前应仔细清除底板上浇混凝土部位的防锈漆和油污。

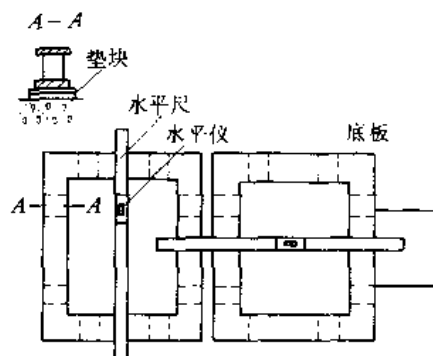
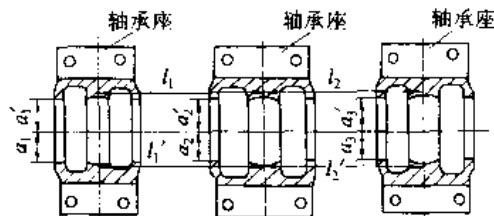


图 4-8-1 底板水平的调整

安装轴承座时必须保证电机的轴线与已装好的机组的主纵轴线在同一垂直面之内,且各轴承座的中心高一,般需经预装和最后调整两个过程。轴承座的最后调整在调整轴中心线时进行。

安装轴承前应清洗并检查轴承座与轴瓦。各轴承座中心应在同一轴线上,用架线法检查和找正,左右允许偏差 $\pm 0.10\text{mm}$, 轴向两侧中心距 (l_1 与 l'_1 , l_2 与 l'_2) 允许偏差 $\pm 0.5\text{mm}$, 如图 4-8-2 所示。绝缘轴承座的对地绝缘电阻在电机总装后,用 500V 兆欧表检查应不小于 $1\text{M}\Omega$ 。



$$l_1 = l'_1, l_2 = l'_2, a_1 = a'_1, a_2 = a'_2, a_3 = a'_3$$

图 4-8-2 轴承座的定心

2.3 联轴器的热套

联轴器有时采用热套工艺套装在轴上,联轴器加热的温度为 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。套装联轴器后,其端面与轴肩的配合端面应无间隙。

2.3.1 联轴器加热温度 t 的估算

$$t = \frac{\delta + \Delta}{11D \times 10^{-6}} - t_0 \quad (4.8-1)$$

式中 δ ——联轴器和轴的实测配合公差 (mm);

Δ ——联轴器和轴套装时所需的最小间隙 (mm), 根据联轴器的直径和质量选取, 一般为 $0.2\sim 0.4\text{mm}$;

t_0 ——测量时的室温 (°C);
 D ——联轴器内径 (mm)。

2.3.2 联轴器加热的方法

联轴器可用油煮或感应加热等方法加热。大型联轴器一般使用感应加热法, 绕在联轴器外表面的绝缘加热线圈中的电流 I 和匝数 N 可按下式计算:

$$I = \frac{mt_1cK}{UT} \times 10^3 \quad (\text{A}) \quad (4.8-2)$$

$$N = \frac{UA\cos\varphi}{\rho lI} \quad (4.8-3)$$

式中 m ——联轴器质量 (kg);
 t_1 ——联轴器加热温升 (K), $t_1 = t - t_0$;
 c ——钢的比热容, $c = 0.5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
 K ——热损失系数, 一般 $K = 2 \sim 2.5$;
 U ——电源电压 (V);
 T ——加热时间 (h);
 A ——导线截面积 (mm^2);
 l ——单匝长度 (m);
 ρ ——电阻系数 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), 铜线时 $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0.0217 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;
 $\cos\varphi$ ——功率因数, 通常取 $0.5 \sim 0.7$ 。

2.4 定子和电枢的安装

定子和电枢进行安装前应先装好联轴器, 然后根据定子和电枢的大小及结构情况决定安装工艺过程。整圆定子的大中型电机, 一般可先安放定子, 而后穿进电枢, 再把定子和电枢一起吊放在底板和轴承座上进行轴线调整。定子分半的大型电机, 分半定子和电枢的安装程序一般是: 固定定子下半部分, 安装电枢, 然后组装上半定子。在分半定子吊装过程中, 应将钢索系在合适位置并加用支撑, 以防止变形, 如图 4.8-3 所示。接着进行初步调整轴向窜动间隙、联轴器处两轴线的重合性及定子与电枢间的气隙。

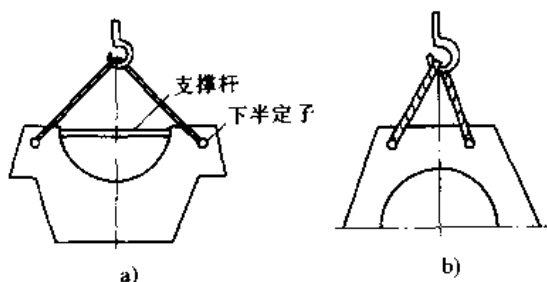


图 4.8-3 分半定子的吊装
 a) 下半定子起吊 b) 上半定子起吊

轴向窜动间隙是指轴肩与轴瓦端面间的距离, 应调整到传动端的两侧间隙 a_1 和 b_1 相等, 非传动端的两侧间隙 a_2 大于 b_2 (图 4.8-4), 同一端圆周各点间隙均匀, 允许偏差不大于平均间隙的 10%。有止推轴承的电机, 止推环与推力瓦端面间的间隙根据结构要求约为 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 。

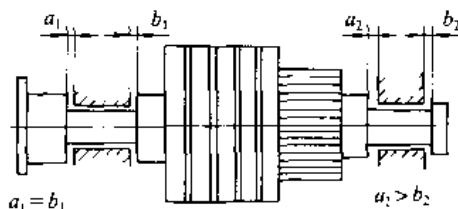


图 4.8-4 电枢的轴向窜动间隙

用直尺和塞规测量相配两联轴器的径向间隙 a 和轴向间隙 b , 初步检查两轴线的重合性, 如图 4.8-5 所示。若电枢位置正确, 应无径向间隙, 且沿圆周各轴向间隙相等。

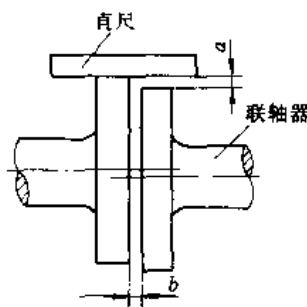


图 4.8-5 两轴线的初步调整

定子与电枢间的气隙应调整到沿圆周各点均匀, 并符合设计要求。气隙小于 3 mm 的电机, 其最大、最小和平均气隙间的容差应不超过 $\pm 10\%$; 气隙大于或等于 3 mm 的电机, 应不超过 $\pm 5\%$ 。同一轴线上前后端气隙之差不超过平均气隙的 5% 。各磁极间距离偏差不超过 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 。电枢铁心与定子磁极的轴向位置应对准。

2.5 机组轴线的调整

机组轴线的调整是安装工作中的关键工序之一。机组各转轴的中心线应构成一条连续、光滑的挠度曲线, 为此相互连接的两个联轴器的端面应保持平行并且同心, 以保证相连两个联轴器的轴线重合, 这种调整工作称为轴线定心。

当机组由两台电机组成时, 其中间联轴器两边轴颈应按水平要求安装, 见图 4.8-6a; 当机组由三台电机组成时, 其中间电机的轴应按水平要求安装, 见图

4·8-6b。整条轴线在机组两端轴颈处的扬度值 α 应尽可能相等而方向相反。

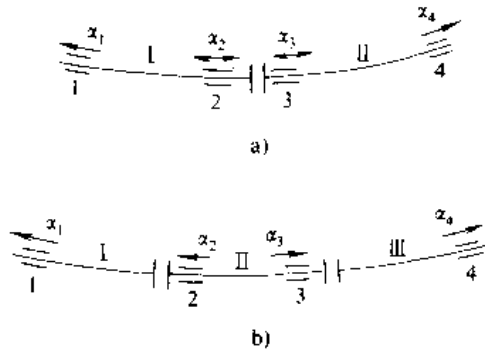


图 4-8-6 机组的正确轴线

a) 两电机机组 b) 三电机机组

在特殊情况下，为考虑机组轴颈扬度值的较合适分配，往往将具有两轴承的电机轴颈或具有最重载荷的轴颈安装成水平。

2·5·1 轴线定心要点

一般用测量轴颈的水平度和联轴器的径向及轴向间隙的方法进行机组轴线定心，即在联轴器外圆固定彼此相差180°位置的两对测量工具I和II，如图4·8-7所示。在两个电机同时顺序回转0°、90°、180°、270°四个位置时，测量一组径向间隙和两组轴向间隙，如图4·8-8所示。

根据测量值按下式计算联轴器的径向和轴向偏差，即

$$\left. \begin{aligned} a_y &= \frac{a_1 - a_3}{2} \quad (\text{mm}) \\ a_x &= \frac{a_2 - a_4}{2} \quad (\text{mm}) \\ b_y &= \frac{b_1 + b'_1}{4} - \frac{b_3 + b'_3}{4} \quad (\text{mm}) \\ b_x &= \frac{b_2 + b'_2}{4} - \frac{b_4 + b'_4}{4} \quad (\text{mm}) \end{aligned} \right\} (4\cdot8\cdot4)$$

- 式中 a_y ——联轴器径向垂直偏差 (mm)；
 a_x ——联轴器径向水平偏差 (mm)；
 b_y ——联轴器轴向垂直偏差 (mm)；
 b_x ——联轴器轴向水平偏差 (mm)；
 a_1, a_2, a_3, a_4 ——工具 I 在 0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器径向间隙 (mm)；
 b_1, b_2, b_3, b_4 ——工具 I 在 0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器轴向间隙 (mm)；
 b'_1, b'_2, b'_3, b'_4 ——工具 II 在 0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器轴向间隙 (mm)。

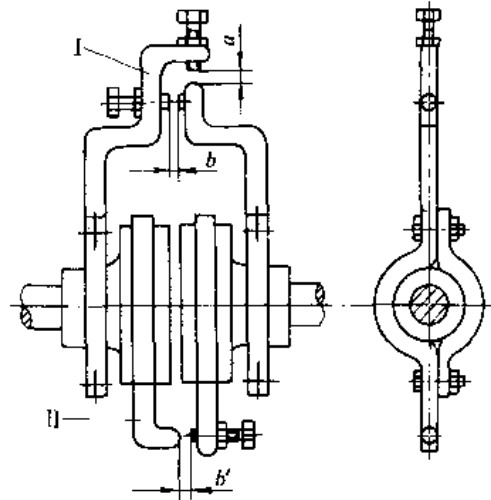


图 4-8-7 两个联轴器间的间隙测量

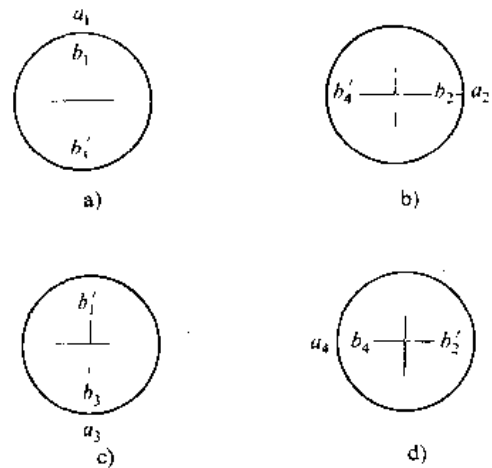


图 4-8-8 在不同位置测得的两个联轴器的间隙

a) 0°位置 b) 90°位置 c) 180°位置 d) 270°位置

2·5·2 轴线定心允许偏差和调整

机组轴线定心的允许偏差与联轴器的结构型式有关，允许偏差值见表 4·8-2。

一般通过调整靠近联轴器端的轴承高度和左右位置来消除轴线的径向偏心，通过调整离联轴器较远的轴承高度和左右位置来消除轴线的轴向偏斜。调整量为：

轴承 1 高度的增减值

$$\Delta H_{y1} = \frac{l_1 b_y}{R} + a_y \quad (\text{mm})$$

轴承 1 左右位移值

$$\Delta H_{x1} = \frac{l_1 b_x}{R} + a_x \quad (\text{mm})$$

扬度值 α 为水平仪的气泡向一个方向偏移时的读数。

表 4-8-2 机组轴线定心的允许偏差

联轴器型式	联轴器内孔直径 ϕ	允许偏差 (mm)	
		径向 (a_x, a_y)	轴向 (b_x, b_y)
刚性联轴器	<400	0.03	0.02
	400~600	0.04	0.03
	>600~1000	0.05	0.04
齿轮联轴器	<150	0.08	0.08
	≥ 150	$0.08 + \frac{\phi - 150}{100}$ $\times 0.01$	$0.08 + \frac{\phi - 150}{100}$ $\times 0.01$
弹性联轴器	<200	0.05	0.05
	≥ 200	$0.05 + \frac{\phi - 200}{100}$ $\times 0.01$	$0.05 + \frac{\phi - 200}{100}$ $\times 0.01$

轴承 2 高度的增减值

$$\Delta H_{y2} = \frac{l_2 b_y}{R} + a_y \quad (\text{mm})$$

轴承 2 左右位移值

$$\Delta H_{x2} = \frac{l_2 b_x}{R} + a_x \quad (\text{mm})$$

式中 l_1 、 l_2 、 R —机组的有关尺寸, 见图 4-8-9。

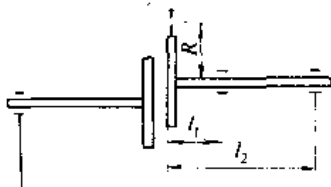


图 4-8-9 机组轴线调整

2.6 轴承装配

滑动轴承装配包括测量和调整轴承各部分的间隙, 检查和必要时研刮轴瓦的工作表面, 接通润滑系统等工作。

轴颈与轴瓦的间隙是否适宜对轴承温度、电机振动有重要影响。其径向间隙一般见表 4-8-3, 侧向间隙约为径向间隙的一半。

常用压铅丝法测量轴颈与轴瓦的径向间隙: 把 $\phi 1 \sim \phi 1.5 \text{mm}$ 铅丝放置在轴颈与轴瓦的顶部之间, 以及上下半轴瓦接合面之间, 上半轴瓦受一定压力后, 测得铅丝变形后的厚度差 $a_1 - b_1$ (a_1 —放置在轴颈顶部的铅丝变形后的厚度, b_1 —上下半轴瓦左右两接合面间的铅丝变形后的平均厚度), 即为径向间隙。

表 4-8-3 轴颈与轴瓦的径向间隙

轴颈直径	间隙 (mm)	
	1000r/min 及以下的电机	1000r/min 以上的电机
80~120	0.08~0.16	0.12~0.21
>120~180	0.10~0.20	0.15~0.25
>180~250	0.12~0.22	0.18~0.30
>250~360	0.14~0.25	0.21~0.34
>360~500	0.16~0.30	0.24~0.45
>500~750	0.20~0.40	0.28~0.5

轴瓦与轴承上盖间的间隙: 对圆柱形轴瓦为 0.05~0.15mm, 对球形瓦为 $\pm 0.03 \text{mm}$ 。

轴瓦工作表面的接触角一般为 $60^\circ \sim 120^\circ$, 重载和低速电机的轴承接触角较大。根据制造厂的规定, 轴瓦可以不研刮, 轴瓦必须研刮时, 研刮过的下轴瓦工作表面上每平方厘米面积内与转轴轴颈的接触点数不应少于两点。

2.7 电机的干燥

电机在运输、贮存或停机过程中, 绝缘易受潮而影响电气强度。在电机投运前, 绝缘电阻如低于表 4-8-4 所列数值, 应进行干燥处理。

表 4-8-4 电机的绝缘电阻

电机电压 (V)	电枢绕组		他(并)励绕组冷态绝缘电阻 (M Ω)
	冷态绝缘电阻 (M Ω)	绝缘吸收比 R_{60}/R_{15} ①	
≤ 500	≥ 0.5	≥ 1.3	> 1
> 500	≥ 1.0	≥ 1.3	> 1

① R_{15} 和 R_{60} 分别为用兆欧表测电枢绕组对地绝缘电阻历时 15s 和 60s 时所测得的绝缘电阻值。

电机干燥通常用外部加热法、铁损耗干燥法或通电干燥法。当采用其中某一种方法不能获得必需的干燥温度或个别部分加热不均匀时, 则可将其中某两种方法配合使用。

2.7.1 外部加热法

中小型电机或大型电机的局部可用不同的热源通过对流或辐射进行干燥。干燥时要注意防止接近热源部位的局部过热。

2.7.2 铁损耗干燥法

利用电枢转轴为导体，由其两端通入低压工频交流电构成单匝励磁绕组，使电枢铁心内产生铁损耗而发热，以加热电枢铁心和绕组，进行电枢干燥。

2.7.3 通电干燥法

在绕组中通入一定电流，利用绕组铜损耗产生的热量进行干燥。这种方法不适用于绝缘电阻过低的电机。

(1) 励磁绕组通电干燥法 在励磁绕组中通入50%~80%额定励磁电流，并用降压法监视励磁绕组温度，使其不超过绝缘等级所容许温度的90%。

(2) 电枢绕组短路干燥法 电机作发电机短路运行，使电机产生50%额定电流，定时停机监测电枢绕组温度，调节短路电流大小以控制绕组温度不超过70℃。为防止电机自励，如电机有串励绕组，应事先断开，并将刷杆座顺电机旋转方向适当移位。

(3) 电枢静止通电干燥法 电枢在静止状态下通入低压直流电进行干燥，此时，控制电枢温度在70℃左右，并按时盘动电枢，使各换向片、电枢线圈能轮流接入电路，以防止局部过热。

2.8 电机的试车

试车的目的是综合检查电机安装品质，核实电机是否已具备正常运行条件。

试车前应检查电机内部接线、绝缘电阻、电刷位置、油路和通风系统以及线端与电源连接等是否符合规定的要求。

电机第一次起动应是空载起动，电机逐步升速到额定值，并空转1~2h，以检查电机有无振动、发热、漏油和异响等机械方面的安装问题。同时，在电机的额定电压下，观察电刷下的火花情况。停机后，全面检查定子、电枢机械部分有无缺陷和电枢绕组有无发热等情况。

电机振动应不超过GB10068-2《旋转电机振动测定方法及限值 振动限值》的规定。

3 直流电机的维护

3.1 维护

直流电机在运行前后和运行过程中，应按运行规程的要求检查电机的静态和工作状况，对换向器、电刷装置、轴承、通风系统、绕组绝缘等部位重点加以维护。

(1) 电机应经常保持清洁，并防止油、水进入内部。在起动前应仔细清除在换向器、绕组、电刷装置、铁心、连接线等零部件表面上的灰尘、油污等。

(2) 换向器表面应保持光滑，并形成一层均匀的暗褐光泽的换向器膜。若换向器表面沾有碳粉、油污等杂物，应用干净、柔软的白布沾酒精擦去；如换向器表面出现粗糙、不圆、烧伤等缺陷时，可用细砂布（切忌用金刚砂布）固定在木质支架上磨去缺陷。换向器外圆不允许有凹片、凸片。换向器外圆径向圆跳动量不应超过表4.8-5中的值。换向器云母沟下刻深度和换向片边缘倒角见表4.8-6和图4.8-10。对片间电压较高的电机，为防止环火，换向片前端应倒角，如图4.8-11所示。

表 4.8-5 换向器外圆容许径向圆跳动量

换向器线速度 (m/s)	冷态跳动量 (mm)	热态跳动量 (mm)
>40	0.03	0.05
15~40	0.04	0.06
<15	0.05	0.10

表 4.8-6 换向器云母沟下刻深度 (mm)

换向器直径	云母沟下刻深度
<50	0.5
50~150	0.8
>150~300	1.2
>300	1.5

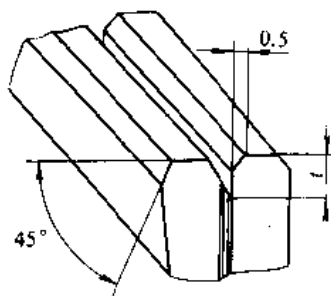


图 4.8-10 换向器云母下刻和换向片倒角

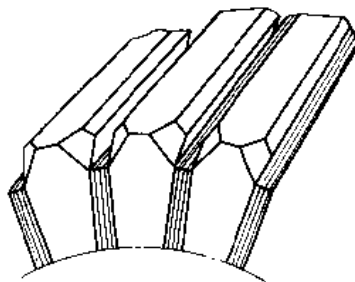


图 4.8-11 换向片前端倒角

表 4-8-9 直流电机一般故障与排除故障的措施

故障	原因	排除措施	
绝缘电阻低	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电机绕组和导电部分有灰尘、金属屑、油污物 2. 绝缘受潮 3. 绝缘老化 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 用压缩空气吹净 2. 用上述方法无效时, 用弱碱性洗涤剂水溶液进行清洗, 然后干燥处理 3. 烘干处理 4. 浸漆处理或更换绝缘 	
电枢接地	<ol style="list-style-type: none"> 1. 金属异物使线圈与地接通 2. 电枢绕组槽部或端部绝缘损坏 	<ol style="list-style-type: none"> 5. 用 220V 小容量试灯查出接地点, 排除异物 6. 用低压直流电源测片间压降或片与轴间压降, 找出故障点, 更换故障线圈 	
电枢绕组	短路	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电枢线圈接线错误 2. 换向片间或升高片间有焊锡等短接 3. 匝间绝缘损坏 	<ol style="list-style-type: none"> 7. 按正确接线纠正线圈与升高片的连接 8. 测量片间压降, 查出并清除故障点 9. 更换绝缘
	断路	<ol style="list-style-type: none"> 1. 接线错误 2. 线圈和升高片、并头套开焊 	<ol style="list-style-type: none"> 10. 同措施 7 11. 补焊
	接触电阻大	<ol style="list-style-type: none"> 1. 线圈和升高片、并头套焊接不良 2. 升高片和换向片焊接不良 	<ol style="list-style-type: none"> 12. 同措施 11 13. 补焊和加固其连接
换向器	片间短路	<ol style="list-style-type: none"> 1. 片间云母损坏 2. 片间有碳粉或铜屑短接 3. 换向器 3°锥面涂封不好, 进入异物 	<ol style="list-style-type: none"> 14. 拆开换向器更换片间云母后重新组装 15. 吹净、换向片倒角 16. 清除金属异物, 做涂封处理
	接地	<ol style="list-style-type: none"> 1. V 形绝缘环 30°锥面损坏 2. 换向器内部进入金属异物 3. V 形绝缘环 3°锥面有灰尘引起爬电 	<ol style="list-style-type: none"> 17. 拆开换向器, 更换 V 形绝缘环 18. 拆开换向器, 清除异物 19. 清除灰尘, 加强绝缘涂封
	外圆变形	<ol style="list-style-type: none"> 1. 片间云母、V 形绝缘环产生热收缩 2. 压圈、螺母等紧固件运行后松动 	<ol style="list-style-type: none"> 20. 在换向器热态下, 对称均匀地紧螺母 21. 同措施 20, 圆跳动超过表 4-8-5 规定时, 车换向器外圆
	升高片断裂	<ol style="list-style-type: none"> 1. 扭振或机械冲击使升高片疲劳破坏 2. 升高片材质硬脆 3. 升高片有机械损伤 	<ol style="list-style-type: none"> 22. 改进升高片固定结构, 防止运行时谐振 23. 局部更换升高片 24. 同措施 22
电机过热	<ol style="list-style-type: none"> 1. 负载过大 2. 电枢线圈短路 3. 主极线圈短路 4. 电枢铁心绝缘损坏 5. 冷却风量不足, 环境温度高, 内部不洁 	<ol style="list-style-type: none"> 25. 减小和限制负载 26. 同措施 7、8、9 27. 查出短路点, 补强绝缘 28. 局部或全部进行绝缘处理 29. 清理电机内部, 增大风量, 改善冷却条件 	
发电机不发电、电压低、不稳定	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电枢线圈匝间短路 2. 励磁绕组断路, 接错线 3. 电刷不在中性位置 4. 转速不够 	<ol style="list-style-type: none"> 30. 同措施 7、8、9 31. 查出原因, 纠正接线 32. 调整电刷到中性位置 33. 提高转速 	
电动机转速不正常	<ol style="list-style-type: none"> 1. 励磁线圈断路、短路, 接线错误 2. 电刷不在中性位置 3. 起动机接触不良, 电阻不适当 4. 负载力矩过大 	<ol style="list-style-type: none"> 34. 纠正接线错误, 消除短路 35. 同措施 32 36. 更换合适的起动机 37. 减少负载阻力矩 	

(续)

故障	原因	排除措施
机械振动	1. 基础不坚固或电机固定不牢固 2. 机组、电机轴线定心不正确 3. 电枢不平衡 4. 轴颈与轴瓦间隙太大或太小	38. 增加基础的坚实性, 加强电机的固定 39. 重新正确调整好机组轴线定心 40. 重校电枢平衡 41. 调整其间隙
滚动轴承发热、噪声大	1. 轴承内润滑油脂充得太满 2. 滚珠磨损 3. 轴承与轴配合太松	42. 减少润滑油脂 43. 更换轴承 44. 使其达到要求的配合精度
滑动轴承发热、漏油	1. 轴颈与轴瓦间隙太小 2. 油环停滞, 油路不畅或油泵有故障 3. 油牌号不适合, 油内含杂质和脏物 4. 油箱内油位太高 5. 轴承密封不好, 轴承座接合面间隙大	45. 研刮轴瓦, 使间隙合适 46. 更换油环, 排除故障, 保证油量充足 47. 更换润滑油, 清除杂质 48. 减少油量 49. 改进密封结构, 研刮接合面使之密合
通风冷却系统	冷却器漏水	1. 冷却器管与承管板铆接不良 50. 补焊止漏
	冷却器堵塞	1. 冷却水管内部积聚杂质 51. 冲洗水管, 必要时加水过滤器
	冷却器水温高	1. 冷却器容量小 2. 进水温度高 52. 加大冷却器容量 53. 降低冷却器进水温度
	冷却空气含尘量大	1. 过滤器效能差 2. 电机密封不严 54. 清洗过滤器, 改进结构, 更换过滤器内油液 55. 防止电机漏风
	风道潮湿	1. 冷却器漏水 2. 轴承漏油 56. 消除漏水 57. 消除漏油

第9章 基本系列直流电动机

基本系列直流电动机按尺寸大小分为小型、中型和大型三个系列。在基本系列基础上, 根据使用要求可进行各种电磁或结构派生, 以满足不同特殊要求。

1 小型直流电动机系列^①

小型直流电动机系列的转矩范围大致为 14.7~6420N·m, 包括中心高为 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 和 355mm 的 11 个机座号。

1.1 用途

本系列适用于调速范围广、过载要求不大于 1.6 倍的电气传动系统, 已广泛应用于冶金工业轧机辅助传动、金属切削机床、造纸、印刷、纺织、印染、水泥和塑料挤出机械等的传动。

1.2 功率、电压和转速

功率采用硬性功率等级, 范围为 1.5~450kW。

额定电压为 160V 和 440V, 也可根据具体情况派生出 220V 和 400V 或其他电压。标准励磁电压为 180V。

额定转速有 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 和 400r/min 等七级。

1.3 调速范围及过载能力

恒功率弱磁调速最高转速可达到 3.5 倍额定转

① 经过近年来的发展, Z4 系列已成为我国小型直流电动机基本系列的主导系列, 下面的叙述主要以 Z4 系列的数据、资料为基础。

速；恒转矩降压调速最低转速可至 20r/min。

电动机在额定转速及以下时的过载能力为 1.6 倍额定转矩左右。弱磁调速时的过载能力按转速比例逐渐下降到 1.0 倍额定转矩。

1.4 供电电源及绝缘等级

本系列电动机采用三相全控桥式晶闸管整流电源时，可不外接平波电抗器而长期工作。额定电压为 160V、由单相桥式晶闸管整流电源供电的电动机，其电枢回路需接入 5~20mH 的平波电抗器以抑制电流脉动。

本系列电动机的绝缘等级为 F 级，采用可靠绝缘结构及浸渍工艺。

1.5 防护等级、安装型式和冷却方法

全系列的防护等级均为 IP21S，也可做成 IP44。

电动机的安装型式有 IMB-3、IMB-35、IMV-1 和 IMV-15 等。

全系列的标准冷却方法为他冷、强迫通风，在径向配有骑式鼓风机，独立供电，并附空气过滤器。即电动机可采用 IC-06、IC-17 和 IC-37 三种冷却方法。

1.6 结构特点

本系列电动机的基本结构是多角形机座，全叠片定子磁轭，垂直防滴，安装底脚在前、后端盖上，出线盒位于机座侧面。315 及 355 两个机座号带有补偿绕组，250 和 280 机座号必要时也可带有补偿绕组，其他机座号均无补偿绕组。

2 中型直流电动机系列^①

中型直流电动机系列的转矩范围大致为 2.2~4.3kN·m，包括中心高为 355、400、450、500、560、630 及 710mm 的七个机座号（中型系列中的小机座号与小型系列中的大机座号有搭接）。

2.1 分类

中型直流电动机分三类：

A 类——一般工业用直流电动机。

B 类——金属轧机用直流电动机，与 A 类相比有以下两点区别：

- (1) 能在 115% 额定负载下长期运行。
- (2) 能在 125% 额定负载下运行 2h。

在以上两种情况下电动机的温升另有规定。

C 类——可逆轧机用直流电动机，适用于快速正反转、频繁承受冲击负载的轧机可逆机架传动。

2.2 功率、电压和转速

中型直流电动机的功率、电压和转速等级采用柔性等级，即在按一定规律进行系列设计的基础上，电动机的功率、电压和转速按用户的需要和系列设计中的优化组合确定。这样，可最大限度地发挥电动机的额定容量和性能，还能获得大量的电动机规格。

2.3 过载能力

中型直流电动机 1min 短时过载能力见表 4.9-1~表 4.9-3。

表 4.9-1 A 类电动机的短时过载能力 (%)

基本转速的百分数	额定电流的百分数	
	偶尔使用	经常使用
100	200 (180)	175 (160)
200	160	150
≥300	140	125

注：电动机的基本转速等于或大于表 4.9-1 中的数值时，应取括号内的数值。

表 4.9-2 B 类电动机的短时过载能力 (%)

基本转速的百分数	额定电流的百分数	
	偶尔使用	经常使用
100	200 (180)	175 (160)
200	200 (180)	160 (160)
≥300	175 (160)	140 (140)

注：电动机的基本转速等于或大于表 4.9-2 中的数值时，应取括号内的数值。

偶尔使用是指很少发生或仅在紧急情况下发生的使用情况，经常使用是指作为正常工作周期的一部分的使用情况。

短时过载之后必须轻载运行，使电动机整个负载周期的负载方均根值不超过其额定值。

在所有转速及负载下，本系列电动机的电流变化率 di/dt 允许达到每秒 $200I_N$ 。

① Z 系列是我国中型直流电动机基本系列的主导系列，下面叙述以 Z 系列的数据、资料为基础。

表 4-9-3 C 类电动机的短时过载能力 (%)

基本转速 的百分数	偶尔使用		经常使用	
	基速额定转 矩的百分数	额定电流 的百分数	基速额定转 矩的百分数	额定电流 的百分数
93	275	256	—	—
95	—	—	225	214
125	190	248.5	166	207.5
150	162	242.5	135	202
175	135	236.5	112	196.5
200	115	230	95.5	191
225	99.5	224	82.5	185.5
250	87.5	216	72	180
275	77	212	63.5	174.5
300	68.5	200	56.3	169

表 4-9-4 机座中心高与转速

中心高 (mm)	355	400	450	500	560	630	710
基速 (r/min)	1000	900	800	710	630	560	560

2.4 供电电源及绝缘等级

本系列电动机可采用三相全控桥式晶闸管整流电源供电。在额定电压、额定基本转速和额定负载电流下，相控总量不小于 85%，电流脉动率最大不超过 10% 时，可不外接平波电抗器。

本系列电动机的绝缘等级为 F 级，主极和电枢均经真空整浸 (VPI) 处理。

2.5 防护等级、安装型式和冷却方法

本系列电动机采用 IP23 和 IP44 两种防护等级。安装型式为 IM1001 和 IM1002 两种。系列的冷却方法有 IC06、IC17、IC37 和 ICW37A86 等四种。

2.6 结构特点

本系列电动机采用薄钢板多角形叠片结构机座，安装底脚在前、后端盖上，出线盒位于机座侧面，带有补偿绕组，中心高 355~560mm 的电动机采用滚动轴承，中心高 630mm 以上的采用滚动或滑动轴承。

3 大型直流电动机系列

大型直流电动机通常指电枢直径超过 1m、用扇形电枢冲片叠装成电枢铁心的直流电动机。由于大型直流电动机属于单个小批生产产品，其规格和性能要求

随着主机的变化而各不相同，只能形成有一定标准化、通用化程度的系列框架，很难形成中小型电动机那样的系列。

3.1 分类

根据使用特性的不同，大型直流电动机一般分为轧钢电动机和矿井卷扬电动机两大类。

3.1.1 轧钢电动机

大型轧钢电动机又可分为可逆转电动机和不逆转电动机两种，分别相当于中型直流电动机系列中的 C 类和 B 类电动机。根据快速变化的需要，除单电枢外，还可制造两电枢乃至三电枢电机。

1. 可逆转电动机 国产大型可逆转电动机转矩范围大约为 200~1500kN·m，功率范围大约为 1600~6300kW，弱磁调速比通常为 1:1.6~1:2.0。主要技术经济指标 GD^2/T_N 最高可达 2.3~1.3kN·m²/(kN·m)，电机利用系数 $C=P_N/(D^2ln_N)$ 最高可达 10~16kW/(m³·r/min)。

2. 不逆转电动机 国产大型不逆转电动机转矩范围大致为 25~500kN·m，功率范围大致为 800~5700kW，弱磁调速比通常达 1:3 左右。主要技术经济指标 $P_N n_{max}$ 最高达 2.5~3.2×10⁶kW·r/min。

3.1.2 矿井卷扬电动机

这类电动机的特点是转速低、功率大，虽要求正反向旋转，负载却相对平稳，要求在整个转速范围内，特别是低速时运行稳定。国产大型矿井卷扬电动机转速最低为 20r/min，功率为 2850kW。

3.2 过载能力、供电电源和绝缘等级

基本上与中型直流电动机系列的相同。

3.3 防护等级、安装型式和冷却方法

大型直流电动机的防护等级一般为 IP23 或 IP44。安装型式一般为 IM7311 或 IM7321，矿井卷扬电动机也可能采用 IM5710。冷却方法一般为 IC37。

3.4 结构特点

大型直流电动机一般均采用分半式叠片机座、座式滑动轴承，为保证低速时运行稳定、转速均匀，电枢铁心叠压成斜槽。矿井卷扬电动机的电枢有时采用无轴、无轴承的结构，直接悬挂在卷扬机的主轴上。

第 10 章 派生和专用直流电机

1 起重、冶金用直流电动机^①

1.1 用途

起重冶金用直流电动机结构坚固,转动惯量小,过载能力大,调速范围宽,能承受振动、冲击、频繁启动和制动,快速正反转,广泛应用于轧机传动、起重运输设备、挖掘和港口机械中。

1.2 性能

起重、冶金用直流电动机的转矩范围约为 35~4100N·m (正在扩展到 14000N·m)。电动机可用晶闸管整流电源供电,在电源为三相全控桥式线路时,可不外接平波电抗器。

电动机的定额有 S1 连续工作制的连续定额, 30 或 60min 的 S2 短时工作制的短时定额, 和 S3—30% 的断续周期工作制的周期工作定额。

电动机的额定电压为 220V 或 440V。220V 电动机允许提高电压到 500V 恒转矩运行。励磁方式有串励、复励、并励和他励。复励时串并励磁化力的比,在外通风连续定额或全封闭 60min 短时定额时为 1:1。

并、他励调速电动机可以弱磁调速到 2~3 倍额定转速恒功率运行。电动机的过载能力见表 4-10-1。

表 4-10-1 最大起动转矩和最大运行转矩

励磁方式	最大起动转矩 额定转矩	最大运行转矩 额定转矩
串励	5.0	4.0
复励	4.5	3.5
并励或他励	3.0	2.8

注: 额定转矩是指在连续工作制和额定情况下的转矩。

1.3 结构特点

起重、冶金用直流电动机的防护等级为 IP23 或 IP44, 安装型式为 IM1004 或 IM1003。冷却方法有 IC06、IC17 和 IC0040 三种。

为保证严酷的使用要求和方便安装维护, 电动机有下列结构特点:

(1) 采用结构刚性好的机座和平面端盖。

(2) 转轴材料采用合金钢, 能承受频繁的冲击和振动。

(3) 采用 F 级绝缘, 定子磁极和电枢采用无溶剂压力整浸处理, 从而具有良好的绝缘性能和整体性。

(4) 换向片和升高片为整体结构, 与电枢线圈采用钨极惰性气体保护焊 (Tungsten-Inert Gas Arc Welding—TIG) 焊接, 因而具有良好的电气性能和机械强度。

(5) 滚动轴承备有不停车加油机构, 便于清理和维护。

(6) 电动机两个轴伸的尺寸和承载能力相同, 两端的安装尺寸对称, 可以根据出线方向需要使用任一轴伸。

(7) 只要卸去或装上机座上的窗盖, 即可根据需要在封闭自冷和强迫风冷之间变换冷却方法。

起重、冶金用直流电动机有向更小转动惯量发展的趋势, 以应对转动惯量有更高要求的电气传动系统。为适应某些不用机械减速器直接驱动的特定使用场合的需要, 还将发展低速派生产品, 其额定转速为原系列的 1/4~1/5。

2 直流测功机

2.1 特点和用途

直流测功机是定子具有独立支撑、可对转轴自由摆动、机壳上带有力臂可以测量转矩的特殊结构他励直流电机, 具有测量精度高、转速范围广、运行稳定、调节方便, 以及既能输出又能吸收机械功率, 便于能量回收等优点。可以用来测量动力机械的输出转矩或负

^① ZZJ-800 系列轧机传动直流电动机是这类电动机的代表产品, 下面均按它的数据和资料进行叙述。ZZJ-800 系列的功率等级、性能和安装尺寸等均按国家标准 GB5227《轧机传动直流电动机》的规定, 并符合国际电工委员会标准 IEC34-13《起重、冶金用辅机电动机技术规范》, 因此, 该系列电动机可以和国外的 800 系列电机互换使用。

载机械(如风机、泵和发电机等)的输入转矩,并结合测定转速以确定功率。

近年来,随着被试机械的高速化,国外已制造出150~250kW, 700~9000r/min; 15~75kW, 10000~15000r/min的直流测功机,为了对燃气轮机等高速机械进行测试,还制造出通过行星齿轮增速,转速达15000r/min的1800kW直流测功机和转速达100000r/min的700kW直流测功机。

2.2 工作原理

被试机械为动力机械时,测功机作发电机运行,轴端输入机械功率;被试机械为负载机械时,测功机作电动机运行,从轴端输出机械功率。

当测功机作发电机运行时,测量过程中的转矩平衡关系如图4.10-1所示。

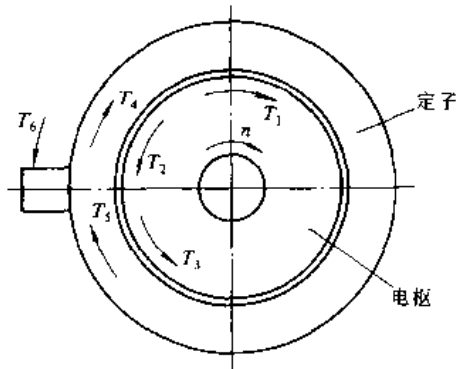


图 4.10-1 直流测功机转矩平衡示意图
在电枢上

$$T_1 = T_2 + T_3$$

在定子上

$$T_6 = T_4 + T_5$$

式中 T_1 ——测功机轴上的输入转矩 (N·m);

T_2 、 T_3 ——作用于电枢及定子上的电磁转矩,两者大小相等方向相反 (N·m);

T_4 、 T_5 ——电枢及定子上轴承、电刷和风摩擦阻转矩 (N·m);

T_6 ——测力装置上的转矩,与定子上的转矩平衡 (N·m)。

一般可认为 T_4 与 T_5 相等,则 $T_1 = T_6$,说明测力装置上所示的转矩为被试机械的输入转矩。

测功机作电动机运行时,其转矩平衡与作为发电机运行时类似。

测功机定子测力臂直接和测力装置相连,因此,从测力装置上的读数可算得转矩和功率。

测试转矩为

$$T = Fl \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4.10-1)$$

测试功率为

$$P = Tn/9550(\text{kW}) \quad (4.10-2)$$

式中 F ——测力装置所示的力 (N);

l ——测力臂有效长度 (m);

n ——测功机转速 (r/min)。

2.3 误差和改进措施

在实际情况下, T_4 和 T_5 不是完全相等的,就是说在电枢和摆动的定子上不是同时出现两个大小相等、方向相反的机械阻力矩,从而引起了测量误差,配套装置的精度也是测量误差的主要原因之一。

造成测功机测量误差的原因和提高精度的措施见表 4.10-2。

表 4.10-2 测功机误差及提高精度的措施

误差原因	提高精度措施
定子摆动轴承的摩擦转矩	将定子滚动轴承结构设计为带有正反向的盘车装置,使静摩擦改变为动摩擦,或采用静压顶起轴承
定子不平衡	精密校定子静平衡
定子引出线阻力矩	采用金属软引线或液态金属引线
径向通风随定子摆动产生压力不均匀	采用轴向通风,在进出风口设置导风板,使转子上的风摩擦转矩反映到定子上
测力及测速等测量装置精度差	采用高精度的测力装置及测速装置,如采用高灵敏度的压力—张力传感器代替传统的测力计,采用光电或磁脉冲转速传感器测量转速 此外,应用计算机实行定转矩、定电流、定转速控制或综合控制,实现测试过程自动化,包括数据处理、打印和曲线描绘等

3 船用直流电机

船用直流电动机主要用作海洋与内河船舶、舰艇上各种辅助机械的动力和潜艇的电力推进;船用直流发电机供照明或作其他供电电源之用。它们的基本性能应符合国家船舶检验局《钢质海船入级与建造规范》和国军标《舰船电气规范》的有关规定。

3.1 分类和用途 (表 4·10-3)

表 4·10-3 船用直流电机的分类和用途

名称	特性和用途	定额
恒速发电机	柴油机驱动,复励。是照明和机电设备的动力源	连续定额
变速发电机	船舶主轴驱动,并励或复励。转速在 1450~2100r/min 范围内变化,需带调压器。用于小型渔轮,功率不大	连续定额
充电发电机	并励,24/36V 或 48/72V。用于船舶蓄电池充电及浮充供电	连续定额
一般电动机	并励,转速恒定。主要用于各种泵和风机等	连续定额
起重用电动机	并励、串励或复励。过载能力大,正反转,起制动频繁,防水式结构,带电磁制动器。用于锚机、起货机等	短时定额或周期工作定额
自动舵电机组	由差复励发电机、励磁机(包括驱动电动机)和执行电动机组成。执行电动机为防水结构,能堵转 1min。用于舵机自动操纵	短时(1h)定额
幅压电动机①	蓄电池组供电,电压在 175/220/320V 或 350/440/640V 范围内变化时能正常工作,并励或复励。用于潜艇电力推进和泵、风机、压缩机等的驱动,有时带起动绕组,推进用电动机兼作充电发电机用。推进或压缩机电机电压为 220/320V 或 440/640V	175V 或 350V 为短时(30min)定额,其余为连续定额

① 幅压电动机在电压大幅度变化时,转速变化应尽量小些。因为上限电压时,过高的转速往往使电动机和被驱动设备严重过载;而下限电压时,转速太低又会出现被驱动设备功能不足,或起动困难。在电磁设计选择电磁参数时,对上述情况应予考虑,如采用较大的主极气隙,使气隙磁位降占磁路总磁位降的 80%~90%,必要时可增加一套起动绕组,其电流密度可为正常绕组的 3~4 倍。

3.2 技术要求和措施

船用直流电机的运行环境十分恶劣,应提出一些特殊技术要求,并采取相应的措施,主要有:

(1) 防潮、防霉、防盐雾、防水。船用直流电机的

金属部件除本身有较好的防腐能力外,均应有镀层或油漆被覆;带电零件之间和对地应有足够的爬电距离;绝缘材料防潮性能好,定子和电枢需经严格的绝缘处理,表面喷耐潮、耐霉的覆盖漆;出线盒、机座与端盖等的接缝处及转动部分应根据需要采用不同形式的防水结构;根据技术要求做防潮、防霉菌、防盐雾和防水试验;24kW 及以上电机,可在定子内装设驱潮空气加热器。

(2) 耐振动和冲击。船舶航行经常处在冲击、振动和颠簸状态下,电机结构材料应采用钢质或其他高强度材料,电机结构应有足够的刚度,并满足纵倾的要求,紧固零件应有止动装置,带电零件之间或对地应有足够的电气间隙。

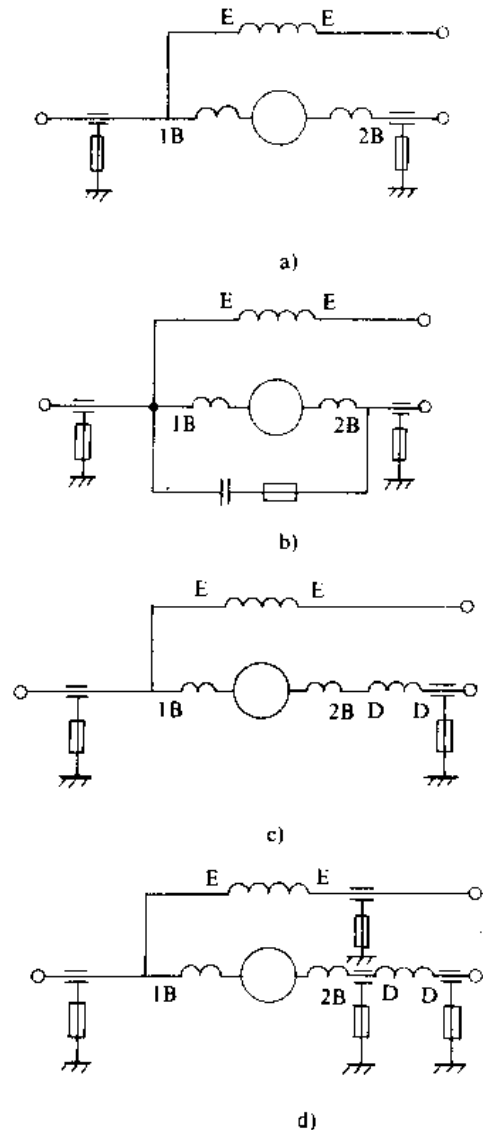


图 4·10-2 滤波电容器的一般连接方法
a)、b) 并励电机 c)、d) 复励电机

(3)良好的换向性能。船用直流电机对换向性能要求较高。连续定额电机从空载(不允许空载的电机从1/4负载)到额定负载的所有情况下,火花不应超过1~1 1/2级;在短时过电流或过转矩时,火花不超过1 1/2级。短时定额和断续定额的直流电机从空载到负载的所有情况下,火花不应超过1 1/4~1 1/2级,短时过电流或过转矩的火花等级,由产品技术条件规定。因此,船用直流电机必须对换向性能做仔细的调整和考核,出厂负载试验时间也较一般电机的长。

(4)抑制无线电干扰。船用直流电机应有良好的电磁兼容性,除提高对换向性能的要求外,经常附加滤波装置以防止宽频带射频对无线电信号或微电子线路的干扰。滤波电容器的接地电容量应尽量小,而且是带熔断丝的穿心式电容器,以防一旦介质击穿造成电机机壳带电的危险。电容器通常安装在接线盒内。为获得满意的抑制效果,常把电机的换向极绕组分成相同的两部分,对称接在电枢两端。电容器的接法见图4-10-2。

4 汽车发电机和起动机

4.1 特点和用途

汽车发电机有并励式和硅整流式两种,是汽车、拖拉机、特种车辆及船舶内燃机上各种用电设备的电源,并可按浮充方式对蓄电池充电。由于硅整流式发电机无换向器、工作转速高、功率大、体积小,已取代并励式发电机。

起动机主要用作内燃发动机的起动力,有电磁(串励)式和永磁式两种。永磁式起动机采用钕铁氧体或钕铁硼永磁材料,具有体积小、质量轻、成本与功能比低和制造方便等优点,将逐步取代电磁式起动机。

汽车发电机和起动机一般制成单线制,即有一个线端利用发动机的机架做回路,并与蓄电池的负极或正极相接。汽车发电机和起动机技术要求应符合专业标准ZBT35001《汽车电器设备基本技术条件》的规定。

根据使用要求,汽车发电机和起动机应该体积小、结构简单、维护方便和零部件的互换性高。

4.2 汽车发电机工作特性

汽车发电机为连续工作制,额定电压为14或28V,输出电流范围为18~120A,保用期为3000h(工作小时)以上。发电机转速随发动机转速变化而变化,最高转速与最低转速之比为3~8,一般采用调节器调

节励磁电流,使电压保持在一定范围内。

4.3 起动机工作特性

起动机为30s短时工作制,额定电压为12或24V,由蓄电池组供电,功率为0.5~11kW。用于柴油发动机时,起动机每次工作时间为5s,保用5000次以上;用于汽油发动机时,其每次工作时间为1.5s,保用25000次以上。起动机不以换向火花等级考核其换向性能,而是以在正常工作时不出现环火为准。

4.3.1 电磁负荷

电磁式起动机为高电磁负荷电机,其电枢电负荷为500~900A/cm,气隙磁通密度为0.7~0.9T,齿部最大磁通密度为2~3T,绕组电流密度为18~30A/mm²,电刷电流密度达70~150A/cm²。永磁式起动机的磁通密度低于电磁式起动机,但电流密度比电磁式起动机的高。

4.3.2 最大有效功率

起动机用蓄电池作电源,其电压随负载的增大而显著下降。由于各种容量的蓄电池内阻不同,其电压随负载增大而下降的幅度也不同。因此,起动机的功率与蓄电池容量大小有关,常以指定蓄电池容量时的最大有效功率作为额定功率。

起动机最大有效功率按下式计算:

$$P_{\max} = (0.88 \sim 0.9) \frac{(E - \Delta U_b)^2}{4\Sigma R} \times 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (4.10-3)$$

式中 E ——蓄电池的电动势(V);

ΣR ——蓄电池内阻、连接线和接触电阻及电枢电路电阻之和(Ω);

ΔU_b ——正负电刷接触压降,取1~2V。

最大有效功率时的电流

$$I_N = \frac{I_k}{2} = \frac{E - \Delta U_b}{2\Sigma R} \quad (\text{A}) \quad (4.10-4)$$

式中 I_k ——制动电流(A)。

5 蓄电池供电车辆用电动机

5.1 特点和用途

蓄电池供电车辆用电动机一般为串励直流电动机,具有较高的起动转矩、较软的机械特性以及低噪声、无污染等优点,常作为市内交通、厂矿内短途运输、

mm² 以上。

(4) 由于主极有效气隙大, 所需励磁安匝大, 使主极绕组用铜量显著增加, 进而使电机尺寸和质量增大。

(5) 由于换向性能好, 在小容量电机里一般可以不带换向极。

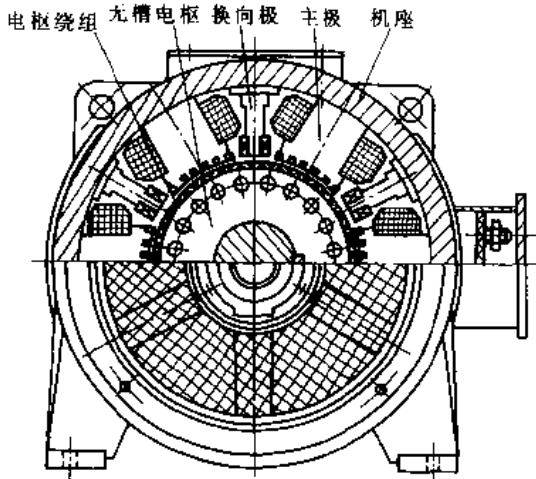


图 4-10-4 无槽直流电动机

无槽直流电动机常用于自动化控制系统中作为执行元件。由于换向和动态性能优良, 无槽直流电动机的应用也可向大容量、换向困难和动态性能要求高的方向发展。

6.2 电枢绕组布线与绝缘

无槽直流电动机的电枢绕组由均匀分布于电枢铁心表面的电枢线圈靠绝缘材料(如绝缘漆、环氧无纬玻璃丝带和环氧树脂等), 与铁心紧固成一体。电枢绕组的布线与绝缘应该达到如下要求:

- (1) 要有粘结强度高、耐热性能好的对地绝缘。
- (2) 电枢线圈应严格按节距对称布放, 并注意上下层相互位置, 以免在绕组内产生环流。

(3) 绕组的绑扎和粘结应能保证电枢导线受到电磁力和离心力作用时, 能固定在电枢铁心表面上而不产生位移。

(4) 电枢导线的布放及电枢绝缘结构, 应尽可能使电枢表面具有最大的布满率和最小的间隙, 一般布满率在 95% 左右。

6.3 涡流损耗

无槽直流电动机当其电枢绕组导线进入或离开气隙磁场时, 导线内将产生较大的涡流损耗, 这种损耗对于功率大的电机尤为突出。因此, 电枢线圈宜用多股绝缘铜绞线或布线切向宽度较小的矩形导线制作。每根

导线的涡流损耗 P 可按下列式计算:

对圆形截面导线

$$P = \beta_1^2 v^2 l \frac{\pi r^4}{4\rho} \quad (\text{W}) \quad (4.10-5)$$

对矩形截面导线

$$P = \beta_1^2 v^2 l \frac{hb^3}{12\rho} \quad (\text{W}) \quad (4.10-6)$$

式中 β_1 ——磁通密度在电枢表面分布线的斜率 (T/m);

l ——在磁场内的导线长度 (m);

v ——导线圆周速度 (m/s);

r ——圆导线半径 (m);

b, h ——电枢铁心矩形导线的切向宽度和径向高度 (m);

ρ ——导线电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)。

上式表明损耗 P 和 β_1^2 成正比, 因此, 应设法减小气隙磁场波形的陡削程度。

7 永磁直流电动机

小功率永磁直流电动机具有下垂的机械特性、线性的调节特性, 并能按输入电压信号迅速改变转速, 一般在自动控制系统中作为执行元件 (参见第 5 篇第 4 章 1.2 节)。

随着高性能永磁材料, 特别是钕铁硼永磁材料的开发和应用, 促进了体积小、效率高、结构简单的永磁直流电动机向大功率发展。在小功率永磁直流电动机的基础上, 我国已开发出功率为 0.55~220kW 的钕铁硼永磁直流电动机系列。该系列的额定电压为 160 和 440V, 恒转矩调速到 20r/min 时仍能稳定运行, 适用于晶闸管整流电源供电, 在电源采用三相全控桥式线路时, 电动机可不外接平波电抗器。其结构特点主要表现在磁体结构形式上, 应用高矫顽力永磁材料时, 磁体结构采用瓦片状。无换向极的小功率电动机, 瓦状磁体直接粘贴在机座内表面; 有换向极的电动机, 磁体先粘贴在软铁磁极体上, 然后把磁极固定在机座内。图 4-10-5 为采用钕铁硼磁体的永磁直流电动机的定子, 换向极绕组占有机座内较大的空间, 从而可以缩小电机的外径。

钕铁硼永磁材料的剩余磁感应强度、矫顽力和磁能积都很高, 但材料的温度系数较大, 电机性能易随磁体温度发生变化, 因此, 最高温度一般不超过 120℃。瓦形钕铁硼磁体永磁直流电机的主要电磁参数大致如下:

- (1) 磁极漏磁系数较小, 一般为 1.05~1.1。
- (2) 气隙磁通密度取剩余磁感应强度的 50%~75%。
- (3) 电负荷为 15000~30000A/m。
- (4) 极弧系数为 0.7~0.75。
- (5) 磁体的磁导很小, 瓦形磁体相当于把电枢磁场的磁阻增加若干倍, 使电枢反应的去磁作用减弱到可忽略不计;
- (6) 功率较小、电压不超过 160V 的电机, 一般不装换向极 (160V 以上电机需装换向极)。
- (7) 磁体厚度 C 用下式估算:

$$C \geq \frac{F}{[1 - (B_g \sigma / B_r)] H_c} \quad (\text{m}) \quad (4 \cdot 10 - 7)$$

式中 F —— 每极总磁动势 (A);
 B_g —— 气隙磁通密度 (T);
 σ —— 漏磁系数;
 B_r —— 磁体剩余磁感应强度 (T);
 H_c —— 磁体矫顽力 (A/m)。

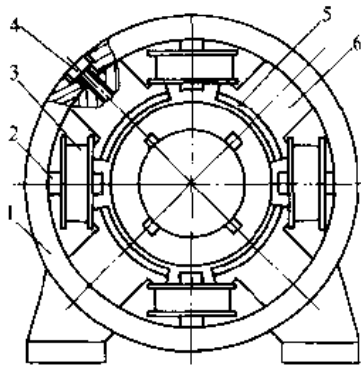


图 4-10-5 有换向极的永磁直流电机的定子
 1—机座 2—换向极铁心 3—换向极绕组
 4—螺栓 5—永磁体 6—软铁磁极体

8 充电用直流发电机

充电用直流发电机是一种并励调压发电机, 通过调节励磁电流, 使输出电压在一定范围内变化, 具有下降的外特性, 以适应充电要求。电压等级有 24/36, 48/72, 60/90, 110/160 和 220/320V。在平均电压为 30, 60, 75, 135 和 270V 下能输出额定电流时的功率称为额定功率。当电压在平均电压与上限电压之间时, 输出功率不应大于额定功率; 在平均电压与下限电压之间时, 输出电流不应大于额定电流。上限电压与最大电流的乘积为计算功率, 比额定功率大 20% 左右, 因此, 与额定功率相同的一般发电机相比, 其体积略大。发电机的

磁路在下限电压时, 应有一定的饱和度, 以保证稳定工作; 在上限电压时, 则有较高的气隙和电枢齿部磁通密度。由于最大电流与上限电压不会同时出现, 因此, 电枢热负荷和励磁绕组电流密度用得稍高。为使发电机能按蓄电池的充电电压特性平滑地调节输出电压, 须根据电机的空载和负载特性曲线配置适当的磁场变阻器, 使每级的电压调节量不超过平均电压的 3%。

充电用直流发电机适用于蓄电池充电、浮充供电以及其他需要可调直流电压的场所。随着电力电子技术的发展, 充电用直流发电机已被效率高、噪声低的晶闸管整流器取代。但内燃机驱动的充电用直流发电机, 在舰船、海岛、野外等电网不能达到的地方, 仍是必需的能源设备。

充电发电机在结构上无特殊要求, 一般均用标准系列进行派生。

9 直流励磁机

9.1 特点和用途

直流励磁机有并励和他励两种励磁方式, 用作同步电机或直流电机的励磁电源, 除一般电磁参数外, 励磁机还应满足主机对它提出的特殊励磁要求, 如最低稳定电压、电压稳定系数、强励倍数、顶值电压和电压增长速度等。随着晶闸管整流励磁系统、无刷励磁系统、交流励磁机和其他励磁方式的发展, 直流励磁机由于其强励特性、维护等方面的原因, 特别是容量满足不了大型汽轮发电机和水轮发电机的励磁要求, 已经被逐步取代。

9.2 对励磁机的特殊要求

(1) 最低稳定电压和电压稳定系数。主机有强励要求的励磁机正常工作时的磁负荷一般较低, 有些主机由于连接的输电线存在分布电容, 空载升压受到限制, 所要求的最低稳定电压往往只有励磁机额定电压的 15%~20%。对自并励励磁机来说, 有一个从最低稳定电压起到额定电压为止的工作范围内的电压稳定问题。

电压稳定系数是衡量并励励磁机在某一电压点上运行是否稳定的判据。从励磁机空载特性曲线上可求得任一点 a 的电压稳定系数 (图 4-10-6) 为

$$K = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{ac}{ab} = \frac{dc}{oc}$$

式中 θ_1 —— 图 4-10-6 中 oa 与横轴的夹角;

θ_2 ——图 4·10-6 中 a 点切线与横轴的夹角。

并励励磁机在全部工作范围内的电压稳定系数应不小于 1.1。

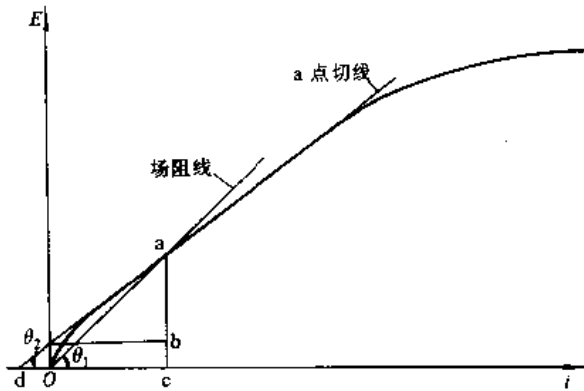


图 4·10-6 并励励磁机的空载特性

为满足最低稳定电压的要求，常采用在极身顶上装磁桥的结构或主极极身开槽(图 4·10-7)，使空载特性曲线在低电压时即开始弯曲达到电压稳定。磁桥高度或极身开槽中间的气隙长度 δ ，决定空载特性曲线弯曲的程度，磁桥总面积或极身开槽后剩余的铁心面积 $A_m = b_m l_p$ 决定最低稳定电压值 (δ 、 b_m 见图 4·10-7， l_p 为主极铁心长)。

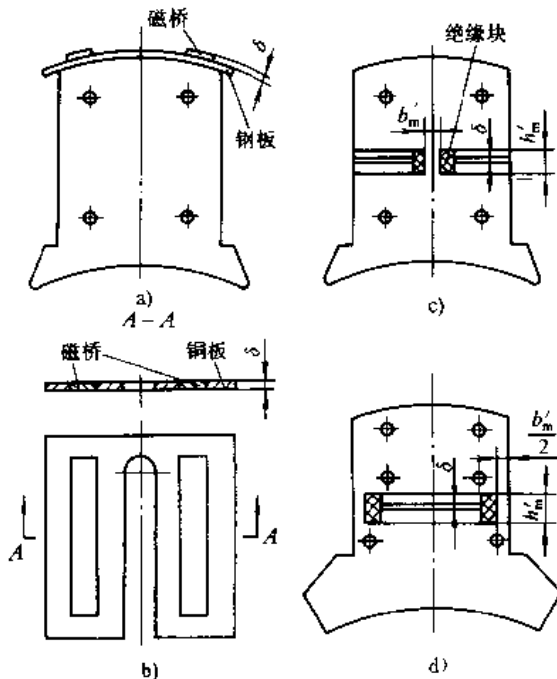


图 4·10-7 并励励磁机的主极铁心

a) b) 极顶装磁桥 c)、d) 极身开槽

(2) 强励倍数、顶值电压和电压增长速度。在电网或供电线路电压突然下降时，主机要求强励以便在最短时间内恢复电压。主机有强励要求的励磁机应满足

主机提出的以下要求：

1) 强励倍数。强励时要求励磁机将其输出电压提高到主机额定励磁电压的倍数，通常为 1.8~2.0 倍。

2) 顶值电压。强励时要求励磁机在空载下达到的最高电压。

3) 电压增长率。强励时要求励磁机从主机额定励磁电压开始在第一个 0.5s 内所达到的电压上升率。

这三个要求关系密切。有时，在强励倍数和电压增长率都满足的情况下，励磁机能达到的最高电压可能超过要求的顶值电压很多，应在励磁机励磁电路内接入固定电阻加以限制。强励时，励磁机的电枢电流相应增加，换向火花也因而增大，但不应发展成有害火花。

9.3 结构特点

主机的同轴励磁机根据主机的转速有高速和低速之分，其结构与相应的直流电机的基本相同。

立式水轮发电机的同轴励磁机需考虑机组起动时转子约有 15~20mm 的顶起高度。因此，应适当加长换向器的工作表面长度，刷架与换向器升高片之间、定子和转子相关部件之间应留有足够的距离。

转子水内冷的汽轮发电机或水轮发电机，冷却水需从励磁机端引入，励磁机结构应保证发电机进水管通、密封可靠。

为尽量减少主机振动对励磁机换向的影响，汽轮发电机同轴励磁机与主机一般采用弹性或半刚性连接，如齿式联轴器或波形联轴器。小型汽轮发电机的同轴励磁机，其电枢往往直接套在或悬挂在主机的轴上。

10 直流牵引电动机

直流牵引电动机用于铁道干线电力机车、工矿电力机车、城市无轨电车和地铁等作为牵引动力。一般为直流串励电动机或脉流串励电动机，由直流牵引发电机或晶闸管整流电源供电(参见应用卷(二)第 3 篇第 5 章)。

11 电机扩大机

电机扩大机是自动控制系统中用以放大功率的一种特殊直流电机(参见第 6 篇第 5 章 1 节)。

12 直流测速发电机

直流测速发电机为他励式或永磁式小型直流发电机。其作用是将机械转速转换为与之成正比的电压输出信号，用于自动控制系统(参见第 6 篇第 3 章 3 节)。

13 直流力矩电动机

直流力矩电动机是低转速大转矩直流电动机，可以直接带动负载并长期在堵转状态下工作，有反应速度快、调节线性度好等优点，在位置或伺服系统中作为执行元件（参见第 6 篇第 4 章 6.1 节）。

14 单极电机

14.1 特点和用途

单极电机是一种应用单极感应原理、不需要换向的无换向器直流电机，既可作发电机运行又可作电动机运行，有圆盘式和圆筒式两种结构型式，如图 4.10-8 所示。

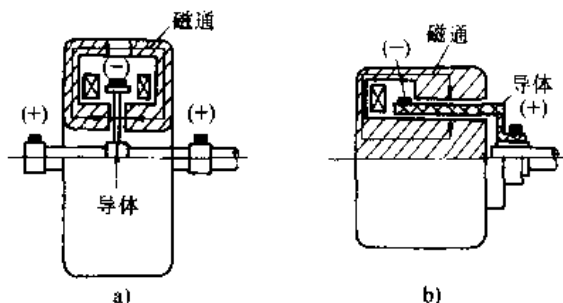


图 4.10-8 单极直流电机原理图
a) 圆盘式 b) 圆筒式

单极直流发电机电压低、电流大，适用于电解铝（铜）、制氯、加速器等需要大电流、低压恒定直流电源或脉冲直流电源的场所。在磁通密度、导体长度和转速达到容许极限时，单极直流电机的端电压可达 50V 左右，采用钠钾集电装置后，容量可达到 10MW。

单极直流电动机近年来通过采用超导技术也取得迅速发展。

14.2 工作原理

如图 4.10-8 所示，当圆盘或圆筒形导体在磁场内做切割磁力线旋转时，会在圆盘的内、外缘或圆筒的两端产生直流电动势，通过电刷接通外电路成为直流发电机；反之，若在圆盘的内、外缘或圆筒的两端通过电刷接通直流电源，流过直流电流的圆盘或圆环，在磁场作用下会按一定方向旋转，成为直流电动机。因为电枢电路内部电流是完全的直流，所以不需要换向器，也没有铁损耗。

14.3 关键技术

根据工作原理，单极直流电机本质上是一种低电

压大电流电机。其关键技术，特别是制造大容量单极电机的关键技术，是提高电枢电压和解决大电流集流问题，见表 4.10-5。

表 4.10-5 单极电机关键技术问题及其解决方法

关键技术	解决方法	说明
提高电枢电压	采用双盘式电枢	两个盘式电枢串联，使端电压加倍
	采用扇形块电枢导体	将电枢导体分成许多分隔的扇形块，通过各自的集电环将扇形块串联起来，以获得高的端电压
	采用多筒式电枢	把多个同轴的圆筒式电枢串联，提高电枢电压
	采用超导磁场绕组	提高磁通密度，提高端电压
大电流集流	用铜石墨电刷	在线速度为 40m/s、电流密度为 30A/cm ² 下工作
	用碳纤维电刷	能在线速度为 100m/s、电流密度为 90A/cm ² 下工作
	用液体集电装置 ^①	电流密度可达 4000A/cm ² 。用水银（允许工作温度为 200℃）、液态钠钾（允许工作温度为 500℃）、液态镓铟等作集电装置中的金属液

① 液态金属蒸发点低，对固体金属有侵蚀作用，且汞蒸气有毒，钠钾合金化学性能活泼，在空气中有爆炸危险，须用惰性气体将其与空气隔绝。对装置的工作温度、材料选择和密封都应重视。

15 超导直流电机^{[1][18][19][20]}

超导技术在直流电机上主要应用于使励磁绕组超导化，用较小的励磁电能获得比常规高数倍的磁场，来提高电机的容量，并达到小型化和轻量化的目的。

15.1 超导单极电机

单极电机励磁绕组超导化后，可提高电压，降低转速，开发大容量低速超导单极电动机。由于不存在换向问题，因此，具有广阔的应用前景。

超导单极电机也可分成圆盘式和圆筒式两种结构形式，如图 4.10-9 所示。

圆盘式超导单极电机，如图 4.10-9a 所示，有一个超导化的励磁绕组包围在常规电枢四周，相对于旋

转的圆盘还有一个静止的反转矩圆盘,由电刷(集电装置)从旋转圆盘向其引入电流,使静止圆盘内的电流与旋转圆盘内的电流大小相等、方向相反,从而使静止圆盘承受电枢反作用转矩,而励磁绕组的支撑只承受绕组质量及其自身的电磁力。超导绕组由液氮保持低温,放在室温容器内,并设置热辐射屏。

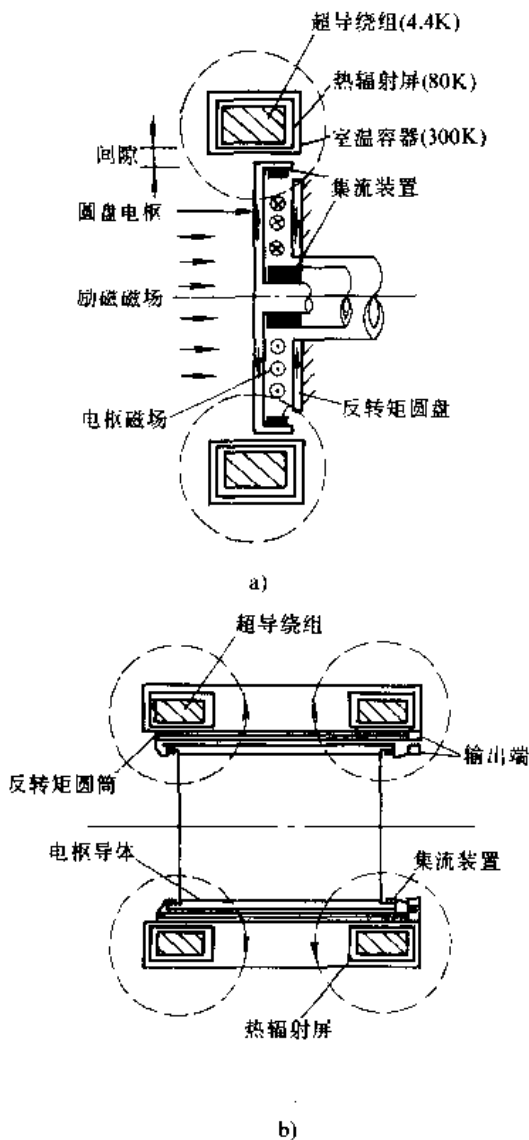


图 4-10-9 超导单极电机原理图
a) 圆盘式 b) 圆筒式

圆筒式超导电机,如图 4-10-9b 所示,有两个超导化的励磁绕组和一个常规的圆筒形电枢,电枢电流沿轴向流动,在圆筒的两端集电。与圆盘形结构中静止圆盘起同样作用的静止的反转矩圆筒,设在静止的励磁绕组和转动的圆筒之间,一端用电刷与旋转圆筒相连接,另一端作输出端,因此,它的气隙比圆盘形的大。超导绕组也放在室温容器内,并设置热辐射屏。

圆盘形结构简单,但在集电方向有困难,即圆盘外缘转速过高,而轴附近的电流密度过大。因此,5MW 以上采用圆筒式超导直流电机。

超导技术的应用也带来另一些技术问题。由于超导绕组产生高磁通密度,需要把磁通约束在电机内,以保护环境免受其影响。超导绕组本身的运行可靠性、稳定性、减少超导绕组的液氮损耗和失超保护也需要妥善解决。

超导单极电机的容量可达到 200MW。超导单极直流电动机经过原理性样机和工业样机模拟机的研制,开始进入工业样机的研制阶段。目前,已有兆瓦级的单极直流电动机制成并投入运行,主要应用于舰船电力推进,可望向需要低惯量的轧机电动机推广。

15.2 带换向器的超导直流电动机

带换向器的普通直流电动机,特别是无槽直流电动机,励磁绕组超导化后可提高磁通密度,不需要电枢铁心并提高电气负荷,从而有:

- (1) 换向时的电抗电动势降到常规电机的 $1/(2.5 \sim 3.5)$, 换向能力大为改善。
- (2) 与常规直流电机比较,相同尺寸时出力提高一倍;相同出力时质量降到 $1/2 \sim 1/3$ 。
- (3) 起动能力增加约 1.5 倍。
- (4) 效率约提高 1.5%。

这些特性特别适合于要求低转动惯量、频繁正反向旋转和过载倍数大的使用场合,如轧钢电动机、牵引主电动机等。

参 考 文 献

- [1] 电气学会编. 电气工学ハンドブック 第2卷: 设备部分, 13 编 直流機および超電導機器.
- [2] 章名涛主编. 电机学. 北京: 科学出版社, 1973
- [3] 浙江大学编. 电机学. 北京: 中国工业出版社, 1961
- [4] 西安交通大学陈世坤主编. 电机设计. 北京: 机械工业出版社
- [5] Liwshitz M. 电机设计. 程福秀主译. 龙门联合书局, 1953
- [6] Рабинович И Н, Шубов И Г. Проектирование Машин Постоянного Тока. Москва, Ленинград: Г. Э. И., 1967
- [7] Гурин Я С, Курочкин М Н. Проектирование

- Машин Постоянного Тока. Москва, Ленинград: Г. Э. И., 1961
- [8] Richter R. Elektrische Maschinen Band 1, Allgemeine Berechnungselemente, Die Gleichstrommaschinen. Basel, Stuttgart; Birkhäuser, 1967
- [9] Archiv für Elektrotechnik, Ein Verfahren zur Berechnung der Kommutierungsströme und Bürstenspannungen von Gleichstrommaschinen. Stiebler M. Vol 66, No 516, 1983
- [10] Clayton A E, Hancock N N. The Performance and Design of Direct Current Machines. London; Sir Isaac Pitman & Son Ltd, 1959
- [11] Darling A G, Liprille T M. Rate of Rise of Short Circuit Current of D-C Motors and Generators. Trans A. I. E. E. Vol 71, Part I, 1952
- [12] 采用叠片换向极铁心和磁路对改善 ZQ-650 脉流牵引电动机换向的作用. 北京: 科学技术出版社, 1966
- [13] 可控硅供电对直流电动机换向性能影响的分析. 大电机技术, 1974 年第 3 期, 哈尔滨大电机研究所
- [14] 平滑铁心形直流机的电机子导体に発生するうず电流损. 小澤国男. 電気学会雑誌, 1965 年第 85 卷第 8 册第 923 号
- [15] E. 维特曼, W. 克伦贝格尔. 电机结构. 刘彦清等译. 北京: 机械工业出版社, 1976
- [16] A. E. 阿列克谢也夫. 电机结构学. 北京: 机械工业出版社, 1957
- [17] 冯雍明主编. 电机的工业试验. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [18] Bumby J R. Superconducting Rotating Electrical Machines. Clarendon Press, 1983
- [19] Glebov I A, Chubraeva L I. Development of Superconducting Generators and Motors. Proc. 9th ICEC, 1982. 5
- [20] Japan marine machinery Development Association. Development of Superconducting Motor for Ship Propulsion. Zosen, 1983. 2