

高等学校教学用书



电 工 学

DIANGONGXUE

中 册

上海交通大学电机工程系
电工学教研组编

上海交通大学出版社

066750
本书是上海交通大学电机工程系电工学教研组根据近年来的教学经验以及参照了有关的数学大纲集体编写的。

全书共分三册出版。上册包括电工基础和电气测量部分；中册包括电机和电力传动与控制；下册包括工业电子学、电热、电焊、照明及发电、输电、配电等部分，本书是中册。

本书讲解清楚，由浅入深，注意到与其他课程的联系，而且例题较多。因此本书比较适合我国目前学生的水平，可以作为学时较多的高等工业学校非电工类专业“电工学”课程的教材。

简装本说明

目前 350×1168 公厘规格纸张较少，本书暂以 787×1092 公厘规格纸张印刷，定价相应减少 20%。希鉴谅。

电 工 学

中 册

上海交通大学电机工程系电工学教研组编

人民教育出版社出版 北京王府井大街 7 号

(北京新华书店总发行所可定购 1965 年 2 月)

人民教育出版社印刷厂印装

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

16·975 开本 787×1092 1/32 印张 12.5

印数 00001—50,000 定价 (77) 0.40

1965 年 12 月北京第 1 次印刷

目 录

第二篇 电机

第八章 直流电机	249
§ 8-1. 概述	249
§ 8-2. 直流电机的基本作用原理	250
§ 8-3. 直流电机的可逆原理	252
§ 8-4. 直流电机构造的主要部件	255
§ 8-5. 直流电机的电枢绕组	257
§ 8-6. 直流电机的电枢电动势	269
§ 8-7. 直流电机的电磁转矩与电磁功率	271
§ 8-8. 直流电机的电枢反应	273
§ 8-9. 电流的换向	277
§ 8-10. 直流发电机按激磁方法分类	283
§ 8-11. 他激发电机	285
§ 8-12. 并激发电机	289
§ 8-13. 串激发电机	293
§ 8-14. 复激发电机	294
§ 8-15. 并发电机的并联运用	296
§ 8-16. 直流电动机基本原理	300
§ 8-17. 直流电动机的启动	303
§ 8-18. 直流电动机的转速	304
§ 8-19. 并激电动机的特性	305
§ 8-20. 并激电动机的各种运转状态	308
§ 8-21. 并激电动机的调速	316
§ 8-22. 串激电动机的特性	320
§ 8-23. 串激电动机的各种运转状态及调速	323
§ 8-24. 复激电动机	327
§ 8-25. 直流电机的损耗与效率	32
§ 8-26. 电机放大机	
§ 8-27. 直流电机一般故障的鉴别和处理的方法	

第九章 变压器

§ 9-1. 概述	
-----------	--

§ 9-2. 变压器的无载情况	341
§ 9-3. 变压器的负载情况	345
§ 9-4. 变压器的等值电路	351
§ 9-5. 变压器负载时副电压的变化	353
§ 9-6. 变压器的功率和效率	354
§ 9-7. 三相变压器	358
§ 9-8. 变压器的并联运行	365
§ 9-9. 变压器的构造及冷却方法	366
§ 9-10. 自耦变压器	370
§ 9-11. 仪用互感器	372
第十章 异步电动机	377
§ 10-1. 概述	377
§ 10-2. 定子旋转磁场	379
§ 10-3. 异步电动机的定子绕组与转子绕组	385
§ 10-4. 定子与转子电路的分析	394
§ 10-5. 异步电动机的功率	402
§ 10-6. 异步电动机的转矩	404
§ 10-7. 异步电动机的转矩-转差率曲线分析	408
§ 10-8. 异步电动机的启动反转调速与制动	410
§ 10-9. 特种型式的异步电动机	419
§ 10-10. 异步电动机的功率因数	422
§ 10-11. 异步电动机的损耗和效率	423
§ 10-12. 单相异步电动机	424
§ 10-13. 自整角机	429
§ 10-14. 二相异步电动机	431
§ 10-15. 异步电动机一般故障的鉴别和处理办法	435
第十一章 同步电机	442
§ 11-1. 概述	442
§ 11-2. 同步电机的作用原理及构造	442
§ 11-3. 同步电机的电枢反应	446
§ 11-4. 同步发电机的矢量图和特性曲线	448
§ 11-5. 同步发电机的并联运行	452
§ 11-6. 同步电机的电磁功率和转矩	464
交激磁对同步电机运行时的影响	469
同步电动机的启动	472
同步电机的损耗与效率	475
同步电动机	478

第三篇 电能应用

第十二章 电力传动	478
§ 12-1. 电力传动的定义及其发展	478
§ 12-2. 选择电动机的原则	480
§ 12-3. 电机的发热和冷却曲线	486
§ 12-4. 电动机的运行分类及容量计算和选择	489
§ 12-5. 控制设备	500
§ 12-6. 控制线路	505
§ 12-7. 电工技术保安	516

第二篇 电机

第八章 直流电机

§8-1. 概述

电机是工业企业电气化中的主要环节之一。早在1838年B. C. 耶可比創造和发明了世界上第一台雛形直流电动机，用以驅动小舟，此为电力拖动的开始。自从1889年M. O. 多里沃-多勃罗沃利斯基发明了三相电流和异步电动机，为工业电气化奠定了可靠的基础。虽然，目前工业上广泛应用交流电及交流电动机，但是某些工业(电化工业)及运输(电力曳引)、电讯等方面仍然需要直流电。直流电动机虽然較异步电动机結構复杂且价格昂貴，然而它有良好的調速特性和起动特性，这是异步电动机所不及的。尤其近年来，在需要平滑且有广闊調速范围的电力拖动中，异步电动机已漸被直流电动机所代替。现在直流电动机广泛应用在軋鋼机，矿井提升机，大型挖土机，以及龙门鉋，鏜床等大型机床的电力拖动上。

解放前，我国的电机制造业基础十分薄弱，主要是修理和仿造一些小型电机，直流电机仅能制造40千瓦以下的。解放后，在党和政府的正确领导下，电机制造业和其他工业一样获得了飞跃的发展；在第一个五年計劃內，电机方面完成的新产品达数千种。现在已经制成4650千瓦的軋鋼机用的直流电动机，小型的一般直流电机，从0.25—200千瓦也都能产生，基本上满足了国家需要。其他特种直流电机，如功率放大机(ΘMY)，电解用直流发电机，起重及冶金用直流电动机，曳引直流电动机等，均已生产，供应

建設需要。第二个五年計劃期間，电机制造工业和其他机器制造工业一样将获得更大的发展，可以基本上满足冶炼，軋鋼，化工，矿井提升，交通运输等方面的要求。

§ 8-2. 直流电机的基本作用原理

直流电机的作用原理，象所有的电机一样，亦是建立在电磁感应定律和载流导体同磁场相互作用的基础上的。将机械能转变为直流电能的电机，称为直流发电机，反之，将直流电能转变为机械能的电机，称为直流电动机。

首先，我們来討論直流发电机的基本作用原理。图 8-1 表示直流发电机最简单的原理图。在两个固定磁极 N 、 S 之間，有一圓柱形鉄心，其上安放繞組（綫圈） $ab-cd$ ，綫圈的两端分別与相互絕緣的两銅片（換向片或称整流片）相連。于是，当鉄心旋轉时，綫圈和換向片能同时旋轉。两个对空間靜止的电刷 A 与 B ，压紧在两个換向片上，它們分別与外电路連接，如图 8-1 所示。

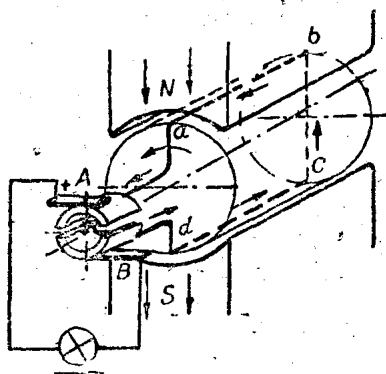


图 8-1. 直流电机的工作原理图。

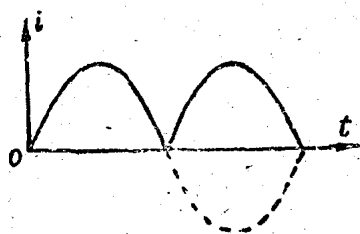


图 8-2. 換向后的电流。

当电机的电樞（产生感应电势的繞組部分，在直流电机中，电樞是指轉子）被原动机（例如汽輪机）带动，以等速 n 按反时針方向旋轉时，导体 $ab-cd$ 切割磁力綫而感应电势，感应电势的方向可

按右手定则决定。显然,当导体从 N 极转入 S 极时(或从 S 极转入 N 极时),其中感应电势的方向将改变,电枢旋转一周,电势变换方向两次,所以在电枢线圈 $ab-cd$ 中仍然感应交变电势。但是由于每一电刷仅和与一定磁极下的导体相连接的换向片接触,因而外电路中的电流永远向一个方向流动,即自电刷 A 通过负载,流入电刷 B 。这样,感应在线圈 $ab-cd$ 中的交流电流,在外电路中已换向为脉动电流(图8-2)。

在发电机情况下,电刷 A 向外电路引出电流,是为正极(+),电刷 B 则向电机引入电流,是为负极(-)(图8-1)。

图8-2所示脉动电流,在最大值与零之间变化,故具有显著之波动。如果将绕组导体数及相应的换向片数加多,那末电流的脉动程度可以减小。图8-3, a 所示是由绕在空心圆柱铁心上的四个线圈组成的电枢绕组,每一个线圈起端和末端分别接到相邻的二个换向片上,四个线圈串联成一闭合回路。但从图中所画出的电势方向可以看出,放置于几何中性线(垂直于磁极轴线的直线)上的两个电刷之间形成两条并联支路:所有 N 极下的线圈串联成一条支路,所有 S 极下的线圈串联成另一条支路。两电刷之间的电压

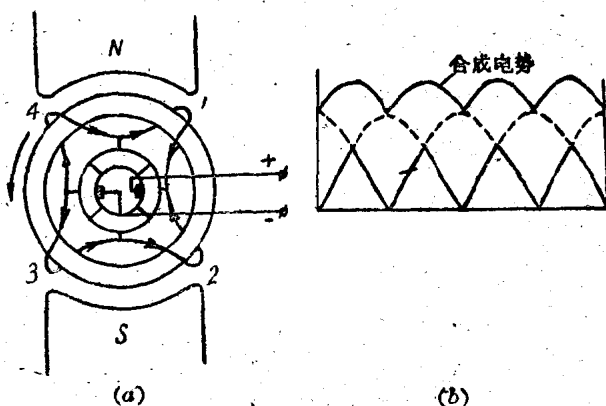


图8-3. (a)电机简图; (b)换向后的电势曲线。

等于任意一支路内线圈中电势瞬时值的和。例如在我们观察的瞬间是 $e_1 + e_4$ 或 $e_2 + e_3$ 。同时由图中可見到，四个线圈在空間位置上相差 90° ，因此，其中的感应电势在時間上亦相差 90° （指两极情况）。图 8-3 画出了一个支路内合成电势的曲线（即电刷两端的电压）。很明显，合成电势的脉动程度已经大为减少，如果再增加电枢线圈数目，则电势的脉动程度将进一步改善。在实际的直流电机中，由于线圈数目很多，故合成电势的脉动很小，实际上可视为恒定。

其次，我们来研究直流电动机的基本作用原理。电动机的原理是基于磁场和电流间的相互作用。图 8-4 是表示垂直于图 8-1

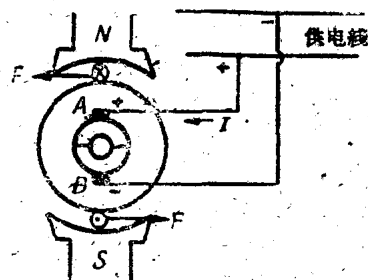


图 8-4. 电动机作用原理图。

电枢轴的截面图。现在把电刷接在直流供电线上，于是电枢线圈中便有电流流过，和发电机情况相反，将电流引入电机的电刷 A 为正极，引出电流的电刷 B 为负极。因为线圈导体处于磁场之中，

导体上便受到电磁力的作用，力

的方向可以根据左手定则决定；因此对于电枢转轴产生力矩，使电机转轴带动其他机械负载而旋转。

当线圈导体从一个极性的范围下转入相反极性的范围下时，通入导体的电流必须改变方向，才能使产生的力矩方向不变，转轴才可以朝一定的方向旋转。这时，直流电动机的换向器起了重要的作用，即是每当一导体从一极面下转入另一极面下时，与它相连接的换向器片便与另一极性的电刷相接触，以保证导体中的电流改变方向。

§ 8-3. 直流电机的可逆原理

当导体受到外加机械力的作用在磁场中运动而切割磁力线

时,导体中便感应电势,若将此导体和外电路接成闭合回路,那末在导体中将产生感应电流。而且由于磁场对载流导体的相互作用,在该导体上除机械力外,还将受到电磁力的作用。

或者当导体受到外加电压的作用,导体中便有电流流过,此载流导体在磁场内受到电磁力的作用而运动时,由于导体切割磁力线的结果,因而在导体内也感应电势。

俄国学者楞次综合了电磁现象,指出电磁感应定律与电磁力效应间的密切关系,确定了电机本质上的可逆原理。

根据电机的可逆原理,同一直流电机可以作为发电机运用,也可以作为电动机运用。现在我们用功率的形式来进行分析。

(1)发电机运用情况:当电枢被原动机带动,它的圆周速度为 v ,在磁感应强度的平均值为 B 的磁场中等速旋转时,那末在电枢导体中将产生感应电势,电势的平均值为

$$E = Blv, \quad (8-1)$$

式中 l 为导体的有效长度。

若将电枢和外电路接通(图8-5),那末电枢导体中便有电流流过,于是电流和磁场作用而产生电磁力

$$F_e = BIl. \quad (8-2)$$

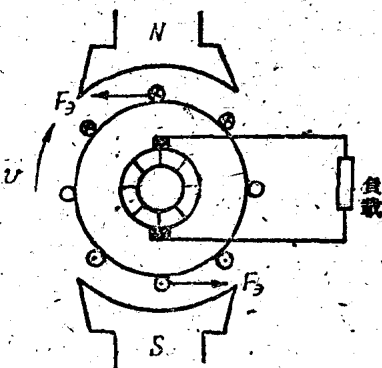


图8-5. 发电机的作用原理图。

电磁力 F_e 的方向(左手定则决定)与原动机的机械力的方向(电枢的旋转方向)相反,所以此电磁力 F_e 有制动的作用。

如果要使发电机的电枢能继续以等圆周速度旋转,以保证电功率的不断输出,那末原动机的机械力 F 就必须和这个电磁力大小相等而方向相反,即 $F_e = F$,于是输入发电机的机械功率便转换为等量的电功率,即

$$Fv = F_s v = (BlI)v = (Blv)I = EI, \quad (8-3)$$

式中 EI 为由机械功率 Fv 转换成的电磁功率, 它消耗在外电路的负载电阻 (R) 和电枢的内电阻 (r_s) 上, 即

$$EI = I^2 R + I^2 r_s = UI + I^2 r_s. \quad (8-4)$$

将方程式两边除以 I , 可得发电机运用情况下的电势平衡方程式

$$E = U + Ir_s, \quad (8-5)$$

式中 E 为发电机的感应电势; EI 为发电机的电磁功率; U 为发电机的端电压; UI 是从发电机电枢两端得到的电功率; Ir_s 为内电阻上的电压降落; $I^2 r_s$ 为发电机内电阻上消耗之电功率。

(2) 电动机运用情况: 若将电刷接到直流供电线上 (图 8-6),

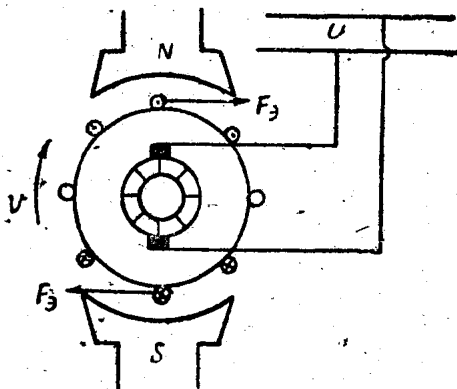


图 8-6. 电动机的作用原理图。

电机转子即带动机械负载以等圆周速度 v 旋转。此时电枢导体在电磁场中运动, 也和发电机情况相似, 其中产生感应电势 ($E = Blv$), 此电势方向 (以右手定则决定) 与外加电压方向相反, 所以这个电势称为反电势。于是得电动机运用时的电势平衡方程式

$$U = E + Ir_s. \quad (8-6)$$

将方程式两边乘以 I , 可得:

$$UI = EI + I^2 r_s, \quad (8-7)$$

式中 UI 是供电綫輸入电动机的电功率; $I^2 r_a$ 是电樞內电阻上損耗的电功率; EI 是轉換成机械功率的电功率。

这时, $EI = (Blv)I = (BII)\phi = F_\phi v$. (8-8)

总结以上情况, 一直流电机既可以輸入机械功率(能量)而輸出电功率(能量), 此时电机作为发电机运用; 也可以輸入电功率(能量)而輸出机械功率(能量), 作为电动机运用。

例 8-1. 設一直流电机的电压为 110 伏, 电樞电阻的电压降为电机电压的 4.5%, 試求此直流电机在发电机及电动机情况下的电势各为若干?

解: 电樞电阻(r_a)电压降为 $I r_a = 0.045 \times 110 = 5$ 伏。

在发电机情况下的电势为:

$$E = U + I r_a = 110 + 5 = 115 \text{ 伏.}$$

在电动机情况下的电势为:

$$E = U - I r_a = 110 - 5 = 105 \text{ 伏.}$$

§ 8-4. 直流电机构造的主要部件

直流电机主要由三部分組成:

(1) 静止部分 它由下列各部件組成: (a) 主磁极——产生磁通; (b) 附加磁极(换向极)——位于主磁极之間, 用以改善换向; (c) 机座; (d) 电刷装置。

(2) 旋轉部分(电樞) 它是一个在磁极間旋轉的圓柱体, 由 (a) 有齿鉄心, (b) 电樞繞組和 (c) 换向器三部分組成。

(3) 空气隙 位于静止部分和轉动部分之間。

图 8-7 是直流电机的主要部件拆散后的形状。机壳(机座)是用鑄鋼或鑄鉄制成。它的內表面安装主磁极和换向极。主磁极的极心由鋼片制成, 其上套着激磁繞組(图 8-8)。换向极的极心由鑄鋼制成, 它安装于主磁极之間。装有軸承的端盖也装在机座上。电樞鉄心是由冲有齿和槽的电工鋼片(旧称硅鋼片)迭成, 如图 8-9 所示; 电樞繞組由互相絕緣的銅綫制成, 嵌放于电樞鉄心的槽中。

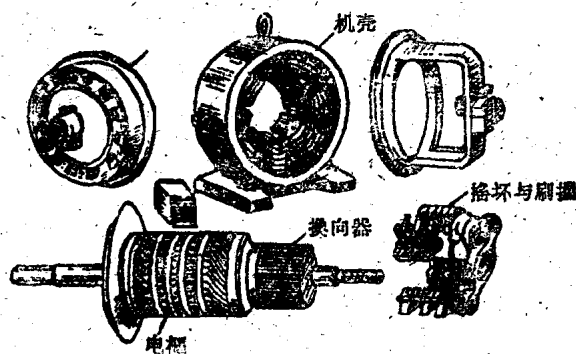


图 8-7. 直流电机的部件图。

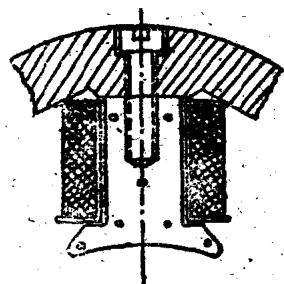


图 8-8. 主磁极。

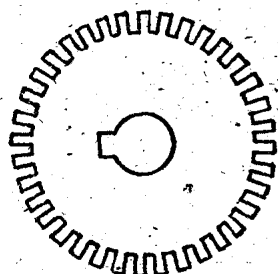


图 8-9. 硅钢片。

电枢绕组与换向器片相联接，换向器和电枢铁心同装在电机的转轴上，并能与轴一起旋转。转轴装在端盖的轴承内。换向器(图 8-10)是圆柱形，它是由楔形铜片组成，铜片与铜片之间以及和换向器的轭环之间用云母片绝缘。为了使电枢和外电路接通，故在换向器上装有电刷(图 8-11)，电刷安放在刷握之中，用弹簧紧压

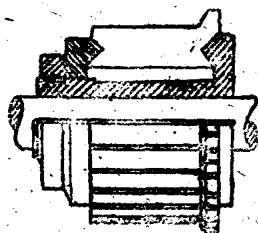


图 8-10. 换向器。

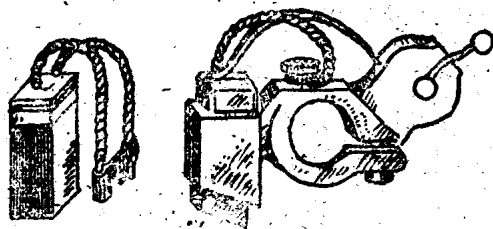


图 8-11. 电刷。

在换向器上，刷握安装在絕緣良好的搖环上，中小型容量的电机，搖环装在軸承上，大型的則装在机座上。移动搖环即可改变电刷在换向器上的位置。

小容量电机的空气隙寬度为 1—3 毫米，大容量电机則增加到 10—12 毫米，空气隙之大小，对于电机性能和工作的影响甚大。

§ 8-5. 直流电机的电枢繞組

电枢繞組是电机的一个重要部分，它使能量从某一种形态轉換为另一种形态(机械能轉換为电能，或电能轉換为机械能)。按照电枢的型式，电枢繞組可以分为环型电枢繞組和鼓型电枢繞組两种。現在直流电机只用鼓型繞組，但为了学习簡便起見，仍从环型繞組开始討論，因为环型繞組与鼓型繞組本質上并无区别，仅在技术上、經濟上而言，环型不及鼓型完善，但其較鼓型簡單得多。

(1) 环型繞組

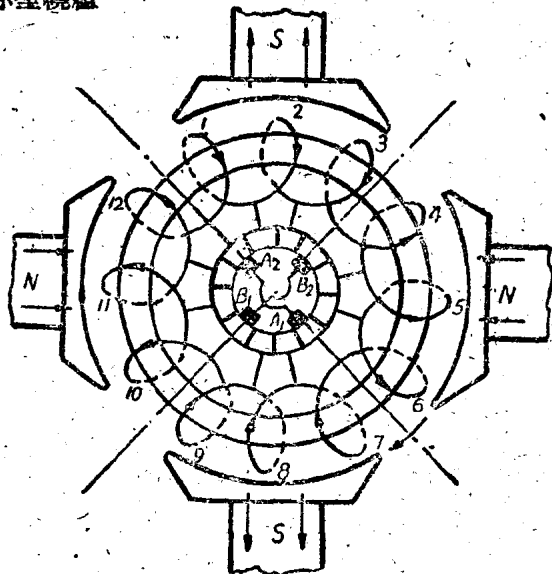


图 8-12. 环型电枢繞組圖。

环型电樞鉄心是以硅鋼片迭成的空心圓柱体。环型繞組繞在此空心圓柱体上,成为螺旋形状(图 8-12)。图中有 12 个繞組元件(假定每个繞組元件仅有一匝綫圈),組成一个閉合迴路。每一个元件的起端和末端分别接到二个相邻的換向器片上,因此,換向器片数便等于元件数。

磁极的磁通,经过空气隙,通入电樞鉄心,而空心圓柱形电樞鉄心的內腔并无磁通通过。那末当电樞在磁极之間旋轉时,便只有电樞外表面的導綫才切割磁通而感应电势,而电樞內腔的導綫則切割不到磁通,不能感应电势,故它們只能看作为連接導綫。从图 8-12 中可知,处于同一磁极下的導綫中的电势方向都相同,它們互相串联,組成一个繞組支路,位于相邻的异性磁极下的導綫,感应相反方向的电势,組成另一个繞組支路,如图中在位于 S 极下的元件 1, 2, 3 中感应相同方向的电势,組成一个繞組支路;另一个支路由位于 N 极下的元件 4, 5, 6 組成,其中感应电势方向恰和前者相反。因此,在一对磁极下的元件便組成一对支路。

假使电机的外电路未曾接通,由于电机的对称性,在繞組元件組成的閉合迴路內,电势的总和将等于零(各支路的电势因为大小相同方向相反),于是电樞繞組的导体中没有电流流过,若将电机的外电路接通,为了要充分利用繞組元件中所感应的电势(就是要使相邻二电刷間的电压达到最大值),例如在图 8-12 中,如果要在电刷 A_1B_1 之間获得最大电压,它們之間必須包括 1, 2, 3 三个元件,所以电刷必須放在几何中性綫上。由于在这种情况下,电机共有二对支路,所以除 A_1B_1 一对电刷以外,还应有另一对电刷 A_2B_2 ,也同样应放在几何中性綫上。

当电樞旋轉时,每一电樞繞組元件,不断地从一个磁极下,越过几何中性綫而进入相邻的异性磁极之下,亦即是不断地从一条并联支路轉入另一条并联支路,此时,元件中的电势及电流方向均

将改变。绕组元件从一个磁极下转入相邻的异性磁极下时，它在几何中性线处被电刷所短路，因为此时与元件连接的两换向片同时与电刷相接触。例如在图 8-12 中所示，电枢是以顺时针方向旋转的，在我们观察瞬间，元件 12 及 6，和 3 及 9 分别处于 N 极和 S 极下，它们都即将从所处的磁极下转出，在一瞬间后，它们都将同时位于几何中性线上，此时电刷 A_1, A_2, B_1, B_2 将分别接触换向片 12-1 6-7, 3-4 及 9-10。而相应地将元件 12, 6, 3 及 9 予以短路，这是绕组元件中电流进行换向的过程，将在 §8-9 中详细讨论。

为了更清楚地表示图 8-12 中的电流在各支路中的分布情况，我们采用简化图形来表示(图 8-13)。图中每一个支路的元件互相

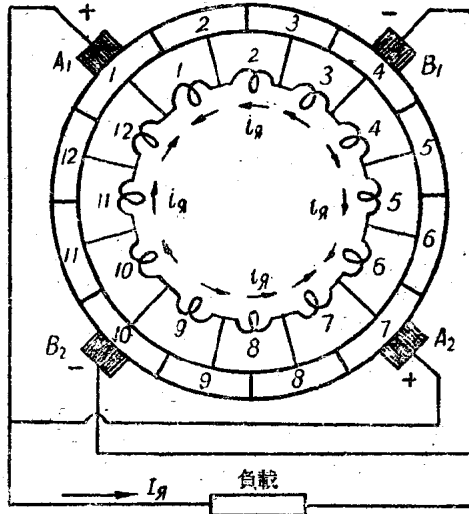


图 8-13. 环型电枢绕组的简化图。

串联，而各支路则互相并联，所以电机的电势由一个支路的电势决定。而电机的电枢总电流 I_g 则等于各个并联支路中电流 i_g 之和，即 $I_g = 4i_g$ 。在一般情况下，设并联支路的对数为 a ，那末

$$I_g = 2ai_g \quad (8-9)$$

因此,綜合以上所述对于环型繞組而言,我們可以归納出下列的結論:

1) 电樞繞組的并联支路对数 = 电机磁极对数

$$a = p, \quad (8-10)$$

式中 p 为电机磁极对数;

2) 电刷对数 = 并联支路对数 = 极对数

$$b = p, \quad (8-11)$$

式中 b 为电刷对数,

3) 换向片数 = 繞組元件数

$$K = S, \quad (8-12)$$

式中 K 为换向片数, S 为元件数;

4) 电刷放置的正确位置是使被它短路的元件有效边要位于几何中性綫上,在环型电机中,电刷应放在几何中性綫上。

必須指出,环型电樞繞組的元件仅仅是位于电樞外表面的导体才感应电势,于是环型电樞繞組的銅綫便不能充分利用,同时这种电樞在制造上也很不方便,因为它不可能应用定型的繞組。由于环型电樞繞組具有以上的缺点,所以現在实际上已不应用。

(2) 鼓型繞組

現今的电机都用鼓型电樞,因为鼓型电樞可以很有效地利用銅綫。实际上,如果將环型电樞內腔的导体,搬到电樞的外表面,于是繞組元件的两边都能切割磁通而感应电势。为了要使元件两边內的电势彼此相加,該元件的宽度必須大概等于一个极距(两个相邻磁极的軸綫沿着电樞圓周綫的距离):

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (8-13)$$

式中 τ 为极距,

D 为电樞的直径,