

电 机 学

第 四 册

Г. Н. 彼特罗夫著



电 机 学

第 四 册

Г. Н. 彼特罗夫 著
吳鉄堅 关尚賢等译

高 等 教 育 出 版 社

本書系根据苏联国立动力出版社（Госэнергоиздат）出版的彼特罗夫（Г. Н. Петров）著“电机学，第二册，直流和交流整流子电机”（Электрические машины, часть II, коллекторные машины постоянного и переменного тока）1947 版譯出的。原書經苏联高等教育部审定为动力高等学校、电工高等学校动力系、和电工系用的教科書。

本書綜合研究直流电机、交流整流子电机和旋轉換流机各种問題。本書是專供上述高等学校的学生用的，但对欲繼續在电机領域中深造的現場工程師，亦可用作参考。

电 机 学

第 四 册

Н. Г. 彼特罗夫著

吳鉄堅 关尙賢等譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

（北京市書刊出版業營業許可証出字第054号）

京華印書局印裝 新華書店發行

統一書號15010·786 開本787×1092¹/₁₆ 印張11
字數232,000 印數0001—7,000 定價(7) 1.30
1959年6月第1版 1959年6月北京第1次印刷

序

这本电机学的第二册是在第一册出版之后隔了七年才出版的。这对它们彼此之间的协调增加了一些困难。虽然如此，两册仍可视为统一整体，其中第二册的编述是有可能完全根据第一册的材料。

第二册叙述直流电机，旋转换流机和交流整流子电机的基本理论问题和简单构造特征。

与第一册相同，本书的补充部分，均用小号字排出。

编述直流电机这一章是根据这样的可能性，即读者在学习本课程时，可以在研究交流电机各章之前，先研究直流电机。

6-11 a-b, 6-12, 6-13, 6-15 各节由 П. С. 谢尔盖耶夫副教授执笔，6-6 a-e 1 及 3x 1 由 М. С. 米哈依洛夫-米库林斯基副教授执笔，6-7 由 E. B. 尼图索夫教授与作者共同执笔。本书所有其余各篇均由本人执笔。

在述及有关直流电机及特殊用途直流电机各章时，作者曾部分采用 E. B. 尼图索夫教授盛意供给的资料。作者对 H. B. 戈罗霍夫教授及 Ю. С. 切乔特教授在审阅原稿时所提出的珍贵意见表示衷心感谢。

Г. Н. 彼特罗夫

目 录

序 iii

第六章 直流电机

6-1. 概說	1	ж) 改善换向的方法	49
a) 額定值	1	b) 换向器上的火花及环火	54
б) 基本构成部件	1	к) 换向电流对电机主磁場的影响	55
в) 应用范围	1	л) 换向的檢驗和調整	56
6-2. 电樞繞組中的感应电势及换向器上 电压的分布	3	м) 刷握和换向器上的电刷位置	57
a) 电樞繞組构成原理	3	6-8. 直流发电机	58
б) 电樞繞組中的感应电势	4	a) 电压和功率的方程式·特性曲綫	58
в) 沿换向器的电压分布	6	б) 他激发电机	59
6-3. 轉矩	7	в) 并激发电机	62
6-4. 电樞繞組	7	г) 串激发电机	64
a) 从环型繞組变换为鼓型繞組	7	д) 复激发电机	64
б) 繞組的分类	8	e) 研究发电机工作的分析方法	65
в) 鼓型繞組的构造	9	ж) 直流发电机的并联运行	66
г) 并联繞組	13	з) 直流发电机的振蕩	68
д) 串联繞組	15	6-9. 直流电动机	68
e) 串并联繞組	18	a) 电压和功率的方程式·特性曲綫·穩 定运行的条件	68
ж) 繞組对称条件	19	б) 起动	70
з) 用电势向量圖分析繞組	20	в) 机械特性曲綫和調速	71
и) 均压联接	22	г) 电动机的制动	79
к) 繞組类型选择	24	д) 并激、串激及复激电动机的应用范围	80
6-5. 直流电机的磁系統	25	e) 直流电动机的振蕩	81
a) 磁系統的类型	25	6-10. 直流电机的特殊用途	81
б) 直流电机磁路計算的特点	25	a) 縱軸联合激磁发电机(克列姆拉)	81
в) 电机磁系統的試驗研究	27	б) 双極系統发电机	82
г) 电机的激磁和自激磁的过程	28	в) 有輔助电刷的縱軸激磁发电机(三电刷 发电机)	83
6-6. 負載时电机的磁場	31	г) 橫軸激磁发电机	83
a) 橫軸电樞反应	31	д) 同步电机的励磁机	88
б) 縱軸电樞反应	32	e) 直流电机的励磁机	89
в) 电樞磁势	33	ж) 單向电机	90
г) 橫軸及縱軸电樞反应磁势	34	з) 高压电机	91
д) 縱軸电樞反应磁势对电机磁通的影响	34	6-11. 直流电机的損耗和效率、發热和冷却	91
e) 橫軸电樞反应磁势对电机磁通的影响	35	a) 損耗	91
ж) 电樞反应对电机工作的影响	38	б) 損耗的試驗决定	93
6-7. 换向	40	в) 效率 η	94
a) 换向过程的一般特性	40	г) 温开和冷却	94
б) 换向元件中的电势	41	6-12. 直流电机的构造及其發展远景	95
в) 直綫换向	42	a) 构造	95
г) 延緩换向	44	б) 直流电机的發展远景	101
д) 换向的一般情况	47		
e) 电抗电势的計算	47		

第七章 换流机

7-1. 电动机-发电机组	105	е) 电枢绕组的利用	111
7-2. 直流单枢换流机	105	ж) 电枢反应	112
7-3. 变交流为直流的单枢换流机	106	з) 换向	113
а) 结构和工作原理	106	и) 起动	114
б) 电压比	107	к) 电压调节	116
в) 电流比	108	л) 并联运行	116
г) 电枢绕组中的电流波形	108	м) 应用范围	117
и) 电枢绕组中的焦耳损耗	110	7-4. 换流机的其他型式	117

第八章 交流整流子电机

8-1. 交流整流子电机的用途	120	串级联接	148
8-2. 三相整流子电机	120	а) 基本定义和分类	148
а) 在转子电路中引入附加电势时的三相异步无整流子电机的运行	120	б) 串级联接的速度特性	150
б) 借助于整流子在异步电机的转子电路中引入附加电势	123	в) 为了平行地移动速度特性的串级联接	151
в) 在三相整流子转子中的电流换向	125	г) 为了扭转速度特性的串级联接	152
г) 定子和转子电路并联连接的三相整流子电机	126	и) 为了使速度特性平行移动的同时而又扭转的串级联组	153
и) 补偿的三相异步电机	132	е) 研究串级线路的分析法	153
е) 定子和转子电路串联连接的三相整流子电机	132	ж) 串级线路的应用范围	153
ж) 三相整流子电机的自激	137	8-5. 单相整流子电机	154
8-3. 为了调节功率因数的异步电机与整流子三相激磁机串级联接	138	а) 应用、结构和基本定义	154
а) 基本定义	138	б) 在单相整流子电动机转子绕组中感应电势	155
б) 用自激式激磁机的串级联接	138	в) 作用于单相整流子电机转子上的转矩	156
в) 带有独立激磁式激磁机的串级联接	145	г) 在单相转子绕组中的电流换向	157
8-4. 为了调节转速的异步电机与整流子电机的		и) 定子和转子电路串联连接的电动机	159
		е) 定子和转子电路具有变压器联系的电动机(推斥的)	163
		ж) 单相整流子电动机的分类	163

参考文献

第六章 直流电机

在第一章 1-4, 中已闡明了直流电机的基本工作原理并且簡略地研究过直流电机的主要工作部件——換向器的构造和用途。

本章根据这些初步的知識研究直流电机更詳細的理論并說明它們的构造。

6-1. 概說

a) 額定值 額定值是表征直流电机規定的运行状态与条件的量, 标記在固定于机壳的名牌上。

額定值有: 1) 容量, 以千瓦表示, 2) 主电路电流, 以安培表示, 3) 主电路电压, 以伏表示, 4) 并激(或他激)繞組电压, 以伏表示, 5) 每分鐘轉數。

此外, 在名牌上还指出电机的用途(电动机或发电机), 激磁方式, 和指定的电机工作情况。

苏联国家标准規定了三种可能的工作情况: 1) 持續的, 2) 短时的, 3) 間歇的(參閱第四章 4-15, 6^①); 按照这些情况来計算电机的發热和冷却。

6) 基本构成部件 如第一章 1-4, 所述, 直流电机是由不动的部分——定子和轉动的部分——轉子所組成的。在电机轉子的軸 1 上(圖 6-1) 固定着由鋼片叠成的电樞 2(第一章 1-8)。在电樞的外表面上冲出槽 3, 其中安置着与換向器 5 相接的繞組 4。电机的定子是整塊鋼或生铁的机座 6 构成, 在其上固定着主

磁極 7 和在主磁極之間用来减小換向器上电刷火花的附加磁極(即換向極) 8。

主磁極和附加磁極的铁心制成整塊的, 或者常常由鋼片叠成, 用双头螺釘沿軸向夹紧。

主磁極铁心靠着轉子的一端是極靴, 在設計电机构造时考虑利用它調节气隙中磁場的分布。激磁繞組 9 套在主磁極的铁心上, 依照电机的激磁方式, 它和电樞电路并联或串联連接, 或由独立的电源饋电。

电刷^② 借固定于刷架 11 的刷杆 10 放在換向器上。刷杆上装有刷握 1(圖 6-2); 电刷 2 靠它維持在应有的位置, 并且压在換向器上。

直流电机的电樞繞組总是閉合的, 并由串联連接的元件构成, 每一元件与相应的換向片連接(圖 6-3)。繞組分兩層放在槽內。小容量电机中一般采用半封閉槽(圖 6-4 之左), 中型及大型电机中則采用开口槽(圖 6-4 之右)。

b) 应用范围 直流电机广泛地用作发电机和电动机。容量自几分之一千瓦至 10000 千瓦甚至更大。直流电机的电压一般不超过数千伏, 但是某些容量不大的特殊类型直流电机的电压有高达 30 千伏甚至更高的。应用最广的电机, 其电压不超过 1000 伏。直流电机的轉速范围很大——自每分鐘几十轉至每分鐘几千轉。某些特种用途的电机的轉速亦有达到每分鐘几万轉的。

直流电机的应用范围是極其多样的。直流发电机用于工业、有綫和无綫通訊装置、汽車运输和空中运输上。此外, 电动机則广泛地作

^① 第四章 4-15, 6 的数据与苏联国家标准 (ГОСТ) 第 2020 条符合。实际上苏联国家标准 (ГОСТ) 183 - 41 (\$40 \sim 48\$) 已稍有更动。

^② 关于直流电机用的电刷牌号請參閱 6-7, 页。

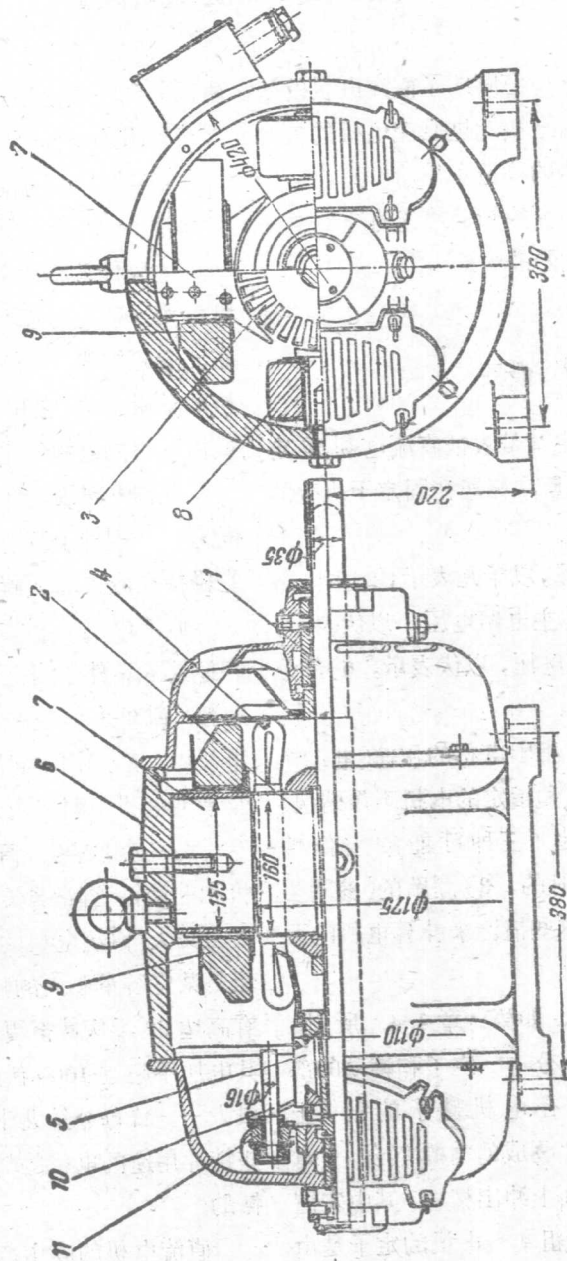


图 6-1. 直流电机。

为电气機車，內燃機車及摩托機車的曳引之用。与感应电动机和同步电动机相比较，直流电动机的主要优点是能够在寬广的範圍內平滑而經濟地調节速度，并且調幅的上限不象用在50赫时的无换向器式交流电动机为3000轉/分所限制^①。

直流电机的主要缺点是由于有换向器而致价格較昂，和由于在主电路上采用了有产生火花傾向的滑动的电刷接触而致可靠性較差。

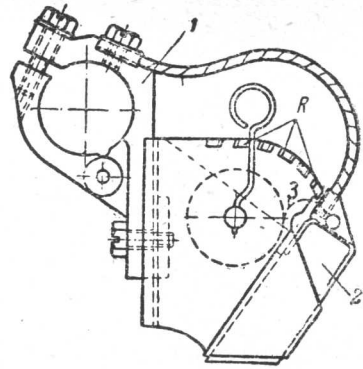


圖 6-2. 帶有电刷 2 的刷握 1。齿 R 能够調节弹簧 3 对电刷的压力。

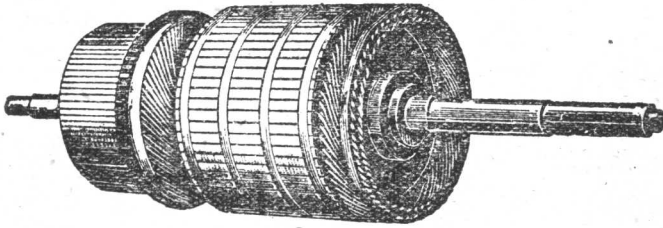


圖 6-3. 直流电机纏好繞組的电樞。

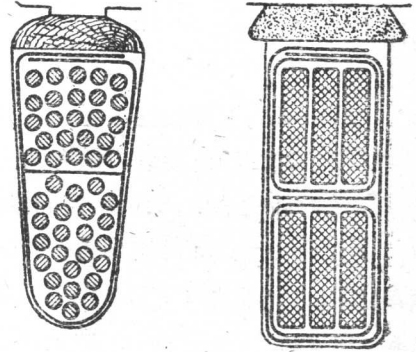


圖 6-4. 在里面放有导体的半封閉槽(左)和开口槽(右)。

6-2. 电樞繞組中的感应电势及换向器上电压的分布

a) 电樞繞組构成原理 直流电机的电樞有环型和鼓型两种。

与此相应，电樞繞組亦分为环型的和鼓型的。下面将要証明，从感应电势的观点来看，鼓型繞組和环型繞組是等效的。因此，我們以后将从研究环型繞組开始，在这种繞組中易于考究电势感应的过程及电压在换向器上的分布。

假設有一个四極电机的环型电樞，它具有引到换向器上的閉路的綫匝。

我們来研究一下，綫匝之間应该怎样联接才能在换向器上电刷之間获得最大的电压。仍与通常一样，电刷放在主磁極之間的中性綫 n 的位置上。

圖 6-5 a 表示最簡單的联接方法，各綫匝按照排列的次序串联起来。在这种情形下整个繞組分为四个綫匝組：1—3, 5—7, 9—11, 12—14, 每組綫匝的电势相加起来，构成相应的刷間电压。在我們观察的瞬間綫匝 4, 8 和 15 短接，因而不参与构成刷間电压。

用这种方法联接的繞組，称为并联繞組，因为它們构成多个并联电路(圖 6-6)，并联电路

^① 頻率为 50 赫时只有采用双籠电动机(第四章, 4-13, b)或双电动机(第四章, 4-12, a)才有可能获得 3000 轉/分以上的轉速。

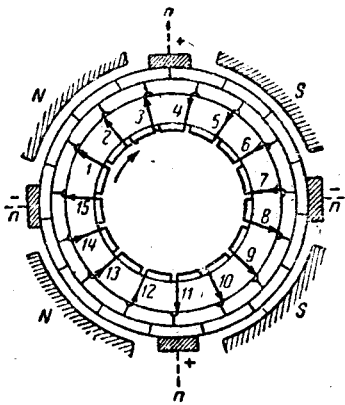


圖 6-5a. 并联繞組。

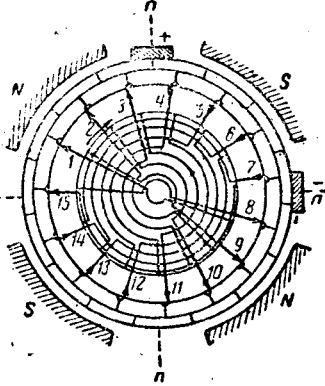


圖 6-5b. 串联繞組。

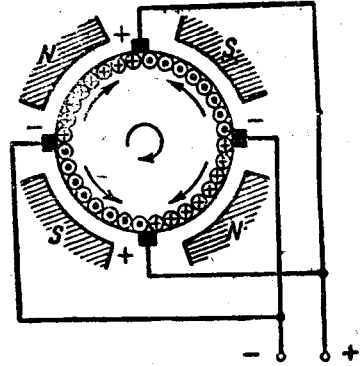


圖 6-3. 繞組中的并联电路。

数目 $2a$ 等于电机的極数 $2p$ ：

$$2a = 2p. \quad (6-1)$$

这种电机的刷杆数也等于極数 $2p$ 。

环型繞組綫匝的串联方法有两种(圖 6-7, a)。在第一种情形中,如果从換向器边观察,沿电势方向由一个綫匝过渡到另一个綫匝是順着时針方向向右移动的,而在第二种情形(圖 6-7, b),則是向左移动的^①。两种方法的区别仅在于在两种情形中获得相反的电刷極性。

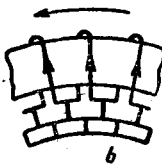
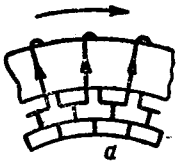


圖 6-7. 繞組綫匝的联接:
(a)右行,(b)左行。

圖 6-5 b 表示环型电樞繞組构成和綫匝联接的第二种方法。这种方法是先把各磁極下的同一極性在綫匝按一定的次序联接起来: 1—9—2—10—3—11—4。

① 这一点与变压器綫匝的串接相似。

除了短接的綫匝 4 外,所有这些綫匝的电势是算术相加的。其次以同一順序,把在另一極性各磁極下的綫匝: 12—5—13—6—14—7—15—8 联接起来。这些綫匝的电势(除了短接的綫匝 15 和 8)也是算术相加的。

这样一来,繞組只构成两条并联电路,与电机的極数无关。因此在換向器上,放两个刷杆 1 和 2 于中性綫上便足够了,它們之間的电压等于并联电路中綫匝电势瞬时值之和。

用这种方法联接的繞組称为串联繞組。其并联支路数

$$2a = 2. \quad (6-2)$$

上述两种构成环型繞組的方法可作为所有目前所采用的直流电机繞組繞制的基础。

6) 电樞繞組中的感应电势 前已述及,电樞繞組不論由上述两种方法中的那一种所构成,不同極性的电刷之間的电压是由在观察瞬間参与組成繞組并联支路的各綫匝所产生的电势之和所构成的。

假設繞組由 N 个有效导体組成并构成 $2a$ 个并联支路。在每一支路中串联导体数为 $\frac{N}{2a}$, 在环型并联繞組中这些导体处在一个磁極之下,而在环型串联繞組則处在同一極性所有磁極之下。

研究某一瞬间在距离中性线 x 处并以速度 v_a 在磁场内移动的导体(图 8)。在其中产生的电势为

$$e_x = B_x l_i v_a, \quad (6-3)$$

式中 l_i 是电枢的计算长度(第三章, 3-4, a, 2)。

把绕组一条并联支路所包括的所有导体的电势加在一起以获得刷间电压(或电势):

$$E = \sum_{N/2a} e_x = l_i v_a \sum_{N/2a} B_x = l_i v_a B_{cp} \frac{N}{2a}, \quad (6-4)$$

如果注意到 $v_a = \frac{2prn}{60}$, 其中 n 是电枢的每分钟转数, 和一个磁极的磁通 $\Phi = B_{cp} \tau l_i$, 则把这些数值代入等式(6-4)之后得到:

$$E = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi. \quad (6-5)$$

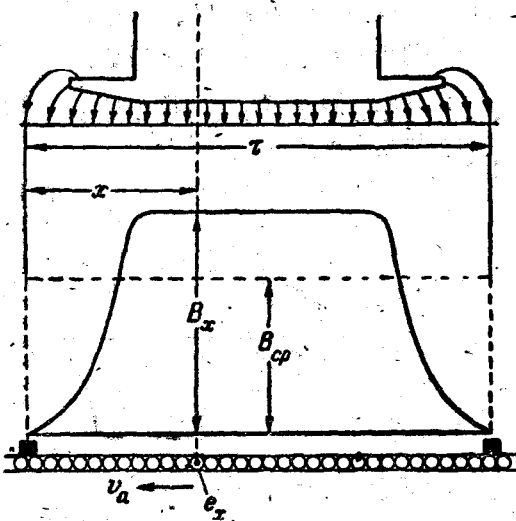


图 6-8. 电枢绕组电势的产生。

给环型绕组推导的这个公式, 对鼓型绕组也充分地正确, 因为在这两种情形下的讨论过程依然是一样的。在鼓型绕组中磁通 Φ 应理解为与绕组的线圈交链的磁通。如果线圈的宽度不等于 τ , 则与它交链的磁通将小于一个磁极的磁通^①。

^① 通常线圈宽度与极距 τ 区别很小, 因此和它交链的磁通与一个磁极的磁通之差并不大于 1~3%。

在绕组线圈内产生的电势的基波频率称为“旋转频率”等于[参阅第一章的方程式(1-9)]:

$$f_B = \frac{pn}{60}, \quad (6-6)$$

鼓型绕组并联支路中的线圈数

$$w = \frac{N}{2 \cdot 2a} = \frac{N}{4a}, \quad (6-7)$$

因此对于鼓型绕组, 公式(6-5)亦可写成如下形式:

$$E = 4f_B w \Phi. \quad (6-8)$$

公式(6-5)及(6-8)并不能完全准确地决定在换向器上电刷之间的电压(电势)值。实际上这个电压是在 E_{\max} 和 E_{\min} 之间的不大的范围内脉动, 因为, 从一方面看来, 一部分线圈在换向时被电刷短接, 而自并联电路中移出, 而从另一方面看来, 当电枢旋转了相当于一个换向片的角度时, 各线圈中电势之和是稍有变动的。由理论所求得的这些脉动电压 ΔE 的平均值一般是不大的。如果只研究绕组线圈电势的基波并认为电刷的宽度足够小, 则如前所证明(原本第一部, 式(4-29))

$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \cos \frac{\pi}{N_k}, \quad (6-9)$$

其中 N_k 是每对极的换向片数^①。

由(6-9)式得出电压脉动的百分值为

$$\begin{aligned} \varepsilon\% &= \frac{\Delta E}{E} 100 = \frac{0.5(E_{\max} - E_{\min})}{0.5(E_{\max} + E_{\min})} 100 = \\ &= \frac{1 - \cos \frac{\pi}{N_k}}{1 + \cos \frac{\pi}{N_k}} 100 = 100 \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2N_k}. \quad (6-10) \end{aligned}$$

由(6-10)式所决定的 $\varepsilon\%$ 值与 N_k 值的关系列于下表:

N_k	2	4	6	8	10	20	40
$\varepsilon\%$	100	17.2	7.2	4	2.5	0.62	0.16

^① 在这里我们认为 N_k 是偶数。当 N_k 是奇数时电压脉动要小 4 倍。

由上表可以看出，当换向片数 N_k 足够大时刷间电压脉动的百分值 δ 是不大的。每当电枢转过一个换向片，电压的脉动就完成一个周期的变化，因此脉动频率比旋转频率 f_r 大 N_k 倍。在实用上主要是考虑换向器上的电压脉动对有线和无线电通讯装置的影响，在那里电压的脉动可能引起不希望的干扰作用。

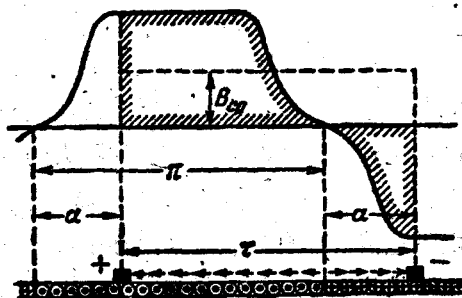


圖 6-9. 刷子移动对电机电势的影响。

当电刷自中性线移开时(圖 6-9)，刷间的电压就要减小，因为在这种情形下并联电路中与电刷移动的角度 α 相应的一部分导体电势与其余导体的电势相反，故总的电压减小。

N_k 值足够大时，相应于电枢绕组一对并联电路的等效正弦电势^① 多边形其极限可以圆周代替(圖 6-10)。这个圆周的直径等于放在中性线上的电刷之间的电压。电刷移动 α 角时，刷间电压等于半圆 ab 在水平轴上的投影，因此在普遍情形下

$$E = 4f_r w \Phi \cos \alpha. \quad (6-11)$$

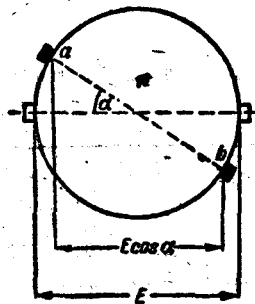


圖 6-10. 电枢导体在极端情况下的电势多边形。

① 我们以等效的正弦电势代替绕组的非正弦电势。

如果能用平面测繪仪测繪磁場曲綫，如圖 6-9 所示，借以求出磁通 $\Phi = B_{cp} r l_i$ ，則移刷后的电势值亦可用公式(6-5)計算。这种方法較繁，但結果也更准确。

B) 沿换向器的电压分布 为了直流电机的正常工作，使相邻换向片间电压不超过 30~50 伏是重要的。当电压高于这一限度而在片间的絕緣物上藏有电刷的炭末时，换向片间就容易發生持續的火花，在不利条件下，有时候它会轉变为“环火”，亦即轉变为把不同極性的电刷短接的巨大电弧。如已知气隙磁感应分布，换向器的片间电压是容易求出的。由圖 6-11 可知，任何换向片 1 及 2 之间的电压 U_k ，如略去线匝内的电压降，等于接至这些换向片上的线匝中感应的电势 E_{12} 。电势 E_{12} 是和該线匝在此瞬間所处位置的磁感应 B 成比例的。因此气隙磁感应分布曲綫在一定的尺度上也代表相应的相邻换向片间的电势曲綫^①：

$$u_k = E_{12} = 2Bl_i v_a. \quad (6-12)$$

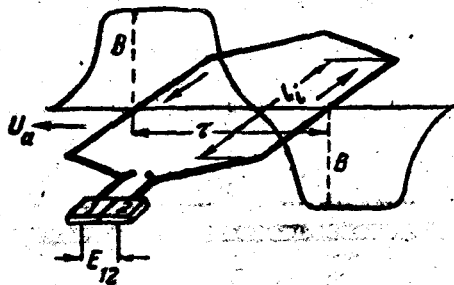


圖 6-11. 相邻换向片间的电压。

“电位曲綫”对沿换向器周电压的遞变給予一个很清晰的概念。这一曲綫容易借計算或实验方法求出。設以电压表的一端接在刷杆 A 上(圖 6-12)，而另一端則借滑动接触 A_0 之助沿旋轉着的换向器向刷杆 B 的方向移动。电压表讀数和沿换向器与刷杆 A 的距离的关系就是电

① 当线匝宽度等于 τ 时这是正确的。

位曲線。容易看出，电位曲線是对磁場曲線的积分。如果磁場曲線的縱坐标与繞組各單个綫匝的电势成比例，則这一曲線所盖的面积在某一尺度上是与A及A_x点之間所包括的綫匝的电势之和成比例的。

电位曲線是阶梯形的，因为自一个换向片过渡到另一个换向片电压是突变的，但当换向片数足够多时它可以平滑曲線表示，如图6-12。

用实验方法取得的电位曲線可以用来判断气隙中磁場分布的特性(参閱6-6, Ⅱ, 2)。

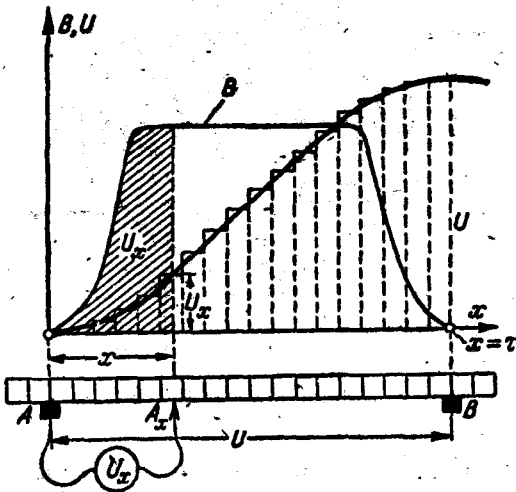


圖 6-12. 电位曲線的求法。

6-3. 轉矩

直流电机的轉矩是流經电樞繞組的电流与电机的磁場相互作用而生的。

当电机的磁場和电樞电流給定时，在發电机与电动机两种状态下轉矩是一样的，并指向同一方向，而电樞的旋轉方向在这两种状态下却是相反的。

在电动机状态力矩使电樞轉动并作机械功；在發电机状态力矩与原动机的轉矩方向相反并与后者平衡。

轉矩由作用在电樞各單个导体上的切綫力之和所构成。每一个力均与电流及磁感应的法綫分量的乘积成比例。所有各导体中的电流均相等。磁感应与在导体中产生的电势成比例。因此为了确定取决于繞組全部并联电路的合成轉矩，可将作用于一并联电路內的全部导体电势相加，即将电机总电势求出，乘以电樞总电流 I_a 。

因此，轉矩与电机的电磁功率成比例，并且比例系数，如所周知，决定于电樞的角速度。

$$M = \frac{EI_a}{\omega} \text{ 焦耳。} \quad (6-13)$$

若电势值取自公式(6-5)，磁通以伏秒表示，轉矩以公斤-公尺表示，并考虑到 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，則等式(6-13)可以写成如下形式：

$$M = \frac{1}{62} \frac{p}{a} NI_a \Phi \text{ 公斤-公尺。} \quad (6-14)$$

由这一等式可知，直流电机的轉矩与电樞繞組的参数 (p, a, N)，电樞电流 I_a 以及磁通 Φ 有关。

电刷从中性綫移开角度 α 时，电樞繞組与激磁磁場的磁鏈随 $\cos \alpha$ 成比例地改变(6-2, 6)，除此以外，在激磁磁場之上还加上了电樞磁場(参閱6-6)。在这种情形下，把 E 理解为电机的合成磁場所产生的电势，則轉矩仍然可以采用公式(6-13)和(6-14)决定。

轉矩的調节法和轉矩与电机运行情况的关系将在以后研究。

6-4. 电樞繞組

a) 从环型繞組变换为鼓型繞組 研究圖6-13所示的环型并联繞組。这种繞組的每一綫匝只圍繞磁極的一半磁通，因此繞組得不到充分利用。如果从法拉第定則出發，則这一点

可作如下解释，环型电枢里面的导体不切割磁感应线因而好象是“无效的”。采用鼓型绕组可以消除这一缺点。为了使里面的导体变成“有效的”，必须把它们改放在电枢的外部表面上（图 6-14）。同时必须使线圈两个边的电势是算术相加的。为此，线圈的二边应放在不同极性的磁极下。这样的线圈将围绕一个磁极的全部磁通。由此可以得到把环型绕组变换为鼓型绕组的程序如下：把里面的“无效”导体 1', 2', 3', 等等改放在电枢的外部的表面上，并使与相应的外面导体 1, 2, 3 等等相距一个（或接近一

个）极距 τ 。并联环型绕组改为并联鼓型绕组可以有二种方法，把导体 1', 2', 3' 等等放在导体 1, 2, 3 等等的右边或左边，这两种方法没有理论上的区别。

和上面完全相仿，可以把串联环型绕组变换为串联鼓型绕组。

鼓型绕组的尾接虽然比环型绕组的长一些，但绕组导体的利用较好。

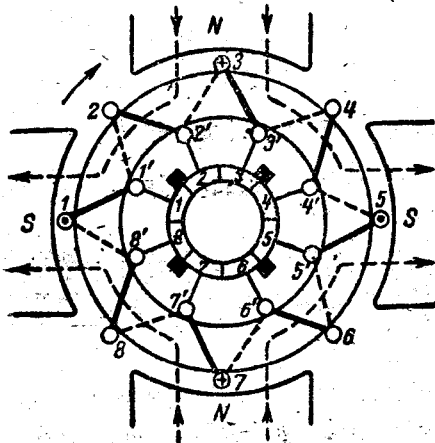


图 6-13. 环型并联绕组。

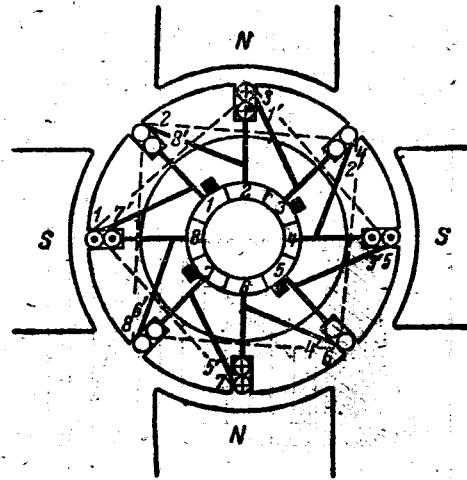


图 6-15. 鼓型双层绕组的结构。

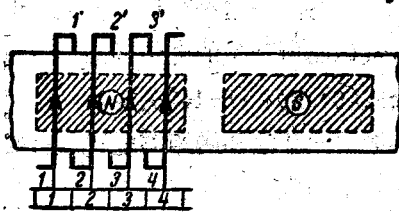


图 6-14. 从环型绕组过渡到鼓型绕组。

近代直流电机的绕组，为了制造方便，分为两层放在电枢表面的槽内。图 6-15 所示的也就是图 6-13 的绕组，但放在槽内。导体 1, 2, 3 等等放在槽的上部，导体 1', 2', 3' 等等则放在槽的下部。

一切环型绕组都可用类似的方法变换为鼓型绕组。

6) 绕组的分类 前已述及(6-2, a), 环型绕组, 因而也是鼓型绕组(6-4, a)的绕制方法有二: 1)各线圈按照它们在电枢圆周上排列顺序串联起来和 2)先把同一极性所有磁极下的线圈串联起来, 然后把另一极性所有磁极下的线圈串联起来。

第一类的绕组, 无论是环型的或是鼓型的,

将称为**单并联绕组**。它们的基本特征用等式

$$2a = 2p \quad (6-15)$$

表示。

第二类的环型与鼓型绕组称为**单串联绕组**。它们的基本特征为

$$2a = 2. \quad (6-16)$$

大电流的电枢为了增加并联支路数采用复的或多路的绕组。复的环型及鼓型绕组由单的组成。即二个或数个相同的单绕组并排放置在电枢上，并且把它们接到相应的换向片上。例如，当复绕组由两个单绕组所构成时，其中一个单绕组与偶数换向片相接，另一个则与奇数换向片相接(图 6-16)。因此，由单环型或鼓型并联绕组可构成复的或多路的并联绕组。如果构成复绕组的单绕组数为 m ，则 m 路并联绕组的特征由下式表明：

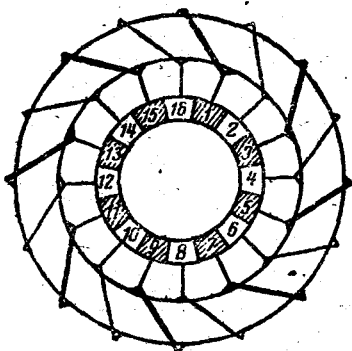


图 6-16. 复环型绕组的结构、双闭路绕组。

$$2a = 2p \cdot m \quad (6-17)$$

用类似的方法可以把单串联绕组构成复的或多路的串联绕组^①，其特征以下式表示：

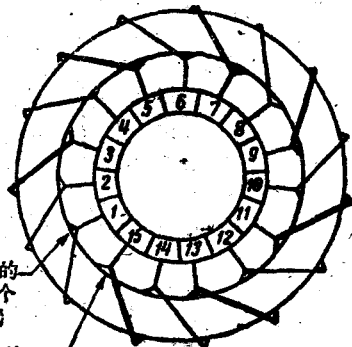
$$2a = 2m. \quad (6-18)$$

在某些情形下，大电流的电枢(6-4, e)采用混合式复绕组，它是由单或复并联绕组与复串联绕组合成的。在这种情形下，两绕组有相同

的并联支路数接到同一的换向片上，而且各分担电流的一半。这种绕组可以称为**复串并联或多路串并联绕组**^①。

复绕组可以有各种不同的构成形式。如果构成复绕组的 m 个单绕组中的每一个都是闭路的，亦即每一个单绕组的最后一个线圈的末端与最初一个线圈的始端相接，则这种绕组称为 m 闭路的或通称为**多闭路的绕组**(图 6-16)。如果第一个绕组的最后一个线圈的末端不使它闭合，而与第二个绕组的最初一个线圈的始端相接，余类推，而只是最后一个绕组的最后一个线圈的末端与第一个绕组的最初一个线圈的始端相接才构成闭路，则这种绕组称为**单闭路绕组**(图 6-17)。

有时复绕组由数个(例如 g 个) s 路的单闭



第一个绕组的始端与第二个绕组的末端
第一个绕组的末端与第二个绕组的始端

图 6-17. 单闭路复环型绕组。

路绕组构成。因为 $m = sg$ ，所以这种绕组是 m 路 s 闭路的^②。

上述绕组的分类可表解如下：

B) **鼓型绕组的构造** 为了下面的叙述方便，我们规定鼓型绕组构成部件的名称如下：

① 这种绕组，在 1910 年为拉吐尔所提出并在 1915 年为巴拉翁-波威拉公司所专利，近来获得了推广，因为这种绕组的原件外形象蛙，故又名“蛙型绕组”。

② 译者注：即每一闭路有 S 个单绕组，整个绕组有 m 个并联路。

① 这些绕组有时也称为**串-并联绕组**——这一名称我们将不采用。

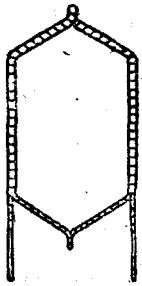
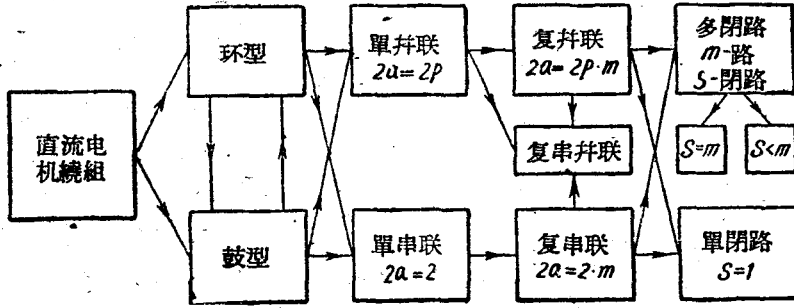


图 6-18. 绕组元件。

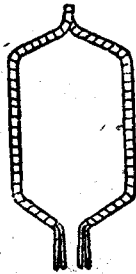


图 6-19. 线圈。

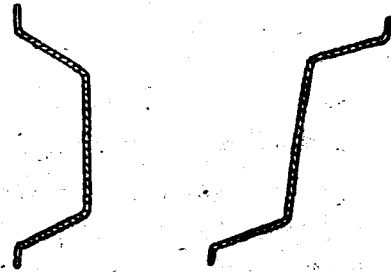


图 6-20. 叠绕组的半边元件 (参看图 6-22)。

图 6-21. 波绕组的半边元件 (参看图 6-22)。

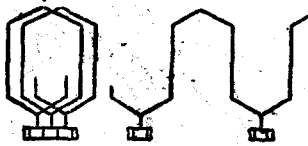


图 6-22. 叠绕组和波绕组。

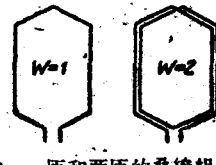


图 6-23. 一匝和两匝的叠绕组元件。

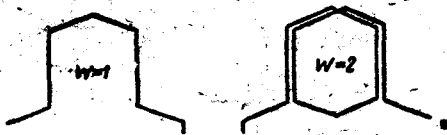


图 6-24. 一匝和两匝的波绕组元件。

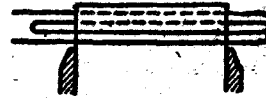


图 6-26. 槽内元件导体的布置。

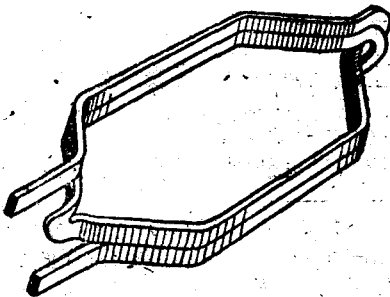


图 6-25. 叠绕组线圈。

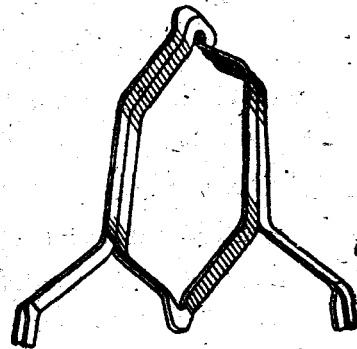


图 6-27. 波绕组线圈。

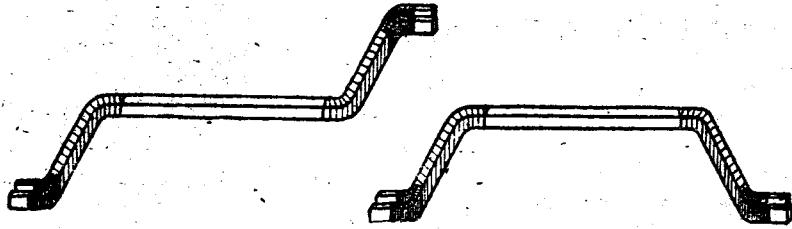


圖 6-28. 由两个單匝半边元件构成的半边繞圈。左圖是波繞組的, 右圖是疊繞組的。

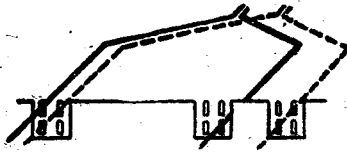


圖 6-29. 異槽式繞組元件的放置。

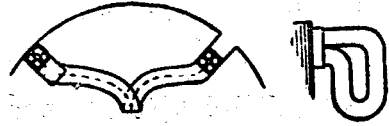


圖 6-30. 雙層繞組的放置。

1. 繞匝——距离約为一个極距的两导体(正向的与反向的)的組合。

2. 元件——接到两个換向片上的單个或多个繞匝(圖 6-18)。

3. 繞圈——放在两个槽內的繞組部分, 是由具有共同槽絕緣的一个或数个元件所构成(圖 6-19)④。

4. 繞圈边——放在一个槽內的繞圈部分。

5. 端接——繞圈在槽外的部分(在換向器側或与之相反的一側)。

与交流电机繞組相似(第三章, 3-2), 直流电机繞組分为多匝式及条式。在多匝式繞組中元件是一个整体并用一根导体繞成(圖 6-18)。

电流大时, 导体截面亦大, 繞組的端接部分弯曲困难。在这样的情形下便采用条式繞組。条式繞組的元件由半边元件(圖 6-20 及 6-21)組成, 在端接部分相互之間借“并头套”連在一起并焊接起来。

多匝式及条式繞組的繞圈在放入槽中之前先在使繞圈成型的特殊設備——模具上制成。

④ 繞圈有时也称为元件。我們遵照苏联国家标准(GOST) 2108-43 所規定的術語。

这种繞組称为成型的。只有容量很小的电机的繞組导体才不預先在模具上繞制而直接用手在电樞槽中繞装。这种繞組称为手繞的。

根据繞組串联繞匝所构成的外形, 并联鼓型繞組称为疊繞組, 串联鼓型繞組称为波繞組(圖 6-22)。

圖 6-23 及 6-24 表示疊繞組及波繞的單匝与多匝元件。

圖 6-25 表示由一个二匝元件組成的疊繞組繞圈。通常制造繞圈要使得放在槽上層的繞圈始边导体在上, 而在槽下層的末边导体在下(圖 6-26)。这样做可以使元件末端与換向器的联接更为方便。

圖 6-27 表示由两个二匝元件組成的波繞組繞圈。导体在其中的位置及端接部分的弯曲也和圖 6-26 相当。

圖 6-28 表示由两个單匝半边元件构成的疊繞及波繞条式繞組的半边繞圈。

半边元件在特制的模具上弯成, 嵌入电樞槽內后再互相联接。

在某些情况下采用異槽式繞組(圖 6-29), 它的每一繞圈所有元件的一边放在同一槽內, 另一边則放在两个相邻的槽內。采用这样复杂