

電機學習題及例題集

Д. А. ЗАВАЛНИШИН, М. В. ЛАТМАНИЗОВ
Л. А. ЛОМОНОСОВА, Г. Б. МЕРКНИН
Е. А. ПАЛЬ, П. М. ПОСТНИКОВ 著
И. В. САФОНОВСКИЙ, В. И. СЫСОВ

陶 楚 良 譯

目 錄

原序	1
A. 直流電機	1
I. 電樞繞組	1
II. 均壓線	16
III. 繞組及均壓線練習題的數據	25
IV. 電樞繞組的計算基礎	32
V. 磁路、激磁安匝及補償繞組安匝之計算	38
VI. 發電機及電動機的特性	47
VII. 雜題(並聯運行、效率、整流)	56
B. 變壓器	67
I. 變壓器的無載	67
II. 參數、短路電壓和效率之求法	76
III. 電壓變化的確定及外特性的畫法	85
IV. 三繞組變壓器	88
V. 變壓器的發熱及冷卻	96
VI. 變壓器的並聯運用	111
C. 同步電機	121
I. 繞組	121
II. 繞組係數及電勢	184
III. 磁動勢	197
IV. 電壓圖	227
V. 附加損耗・效率及發熱	235
VI. 並聯運行, 電動機, 補償器	263
VII. 同步電機雜題	280
D. 感應電機	295

A. 直流電機

I. 電樞繞組

1. 電樞繞組的數據：有效導體數 $N=32$ ，每元件匝數 $w_s=1$ ，整流片數 $K=16$ ，磁極對數 $p=2$ 。聯接法一單疊右行繞組。算出繞組各節距 y, y_1, y_2 及 y_k 。

畫出繞組圖，排列磁極及電刷，並指出並聯支路。

解 電機的元件數：

$$S = \frac{N}{2w_s} = \frac{32}{2 \times 1} = 16.$$

第一部分節距：

$$y_1 = \frac{S}{2p} + \epsilon = \frac{16}{2 \times 2} = 4.$$

繞組是整距的，因為 $\epsilon=0$ 。

因為按照條件是要求畫出單疊右行繞組，複式係數 $m=+1$ （+號表示右行繞組）。因此， $y=m=+1$ 。

第二部分節距：

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3.$$

整流子節距的方程式和 y 相同，即 $y_k = +1$ 。

畫出繞組圖，因為這種電樞繞組照例是雙層的，所以 32 根有效邊中 16 根放在電樞槽的上部，而其餘 16 根則放在下部（圖 1）。所有 16

個元件的開始邊在上面，而下面是 16 根元件終了邊。

註 以後我們把元件開始邊理解為在槽上部的元件邊，而元件終了邊則是在槽下部的元件邊。

選取何處作為元件開始邊 1 (即從何處開始編號) 在理論上是完全一樣的；不過為了便於決定電刷的位置起見，取位於幾何中性線的作為元件開始邊 1；然後不管繞組的接法如何都依順時針方向繼續編號。

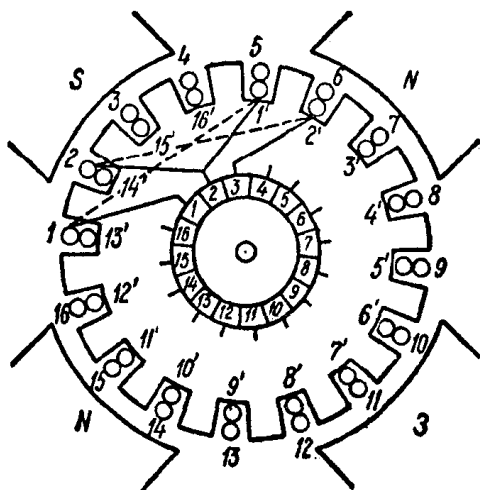


圖 1.

至於元件終了邊的編號，則第一個元件的終了邊 (1') 置於距離其開始邊為 y_1 的地方。因為 $y_1 = 4$ ，所以第一個元件的終了邊放在與其開始邊相距 4 個元件的地方，即槽 5 的下部，在元件 5 的開始邊下面。以後元件終了邊的號碼就這樣按照順時針方向繼續標誌下去。關於整流器的安排及整流片的編號，按理論講不管選取何處作為第一號整流片都是一樣的。不過，注意到把元件 1 和整流片 1 相連，應該這樣選擇這一整流片，使每個元件的兩根端接引線長度相等，即 $ab = a_1 b_1$ (圖 2)，這樣就決定了整流子的位置。再繼續順時針方向標誌整流片的號碼。

在這以後可以開始畫連線圖了。把整流片 1 聯到元件開始邊 1。從電樞的另外一邊，第一個元件的開始邊聯接到它的終了邊 1' 上 (即和它自己的第二有效邊相連)。把終了邊 1' 接到整流片 2 上，即順時針方向移過了一個整流片。這 ($y_k = +1$) 正是單疊右行繞組最基本的特徵，然後再像上面那樣繼續下去，就是說整流片 2 接到元件開始邊 2，開始邊 2 以虛線聯到終了邊 2'；終了邊 2' 再聯到整流片 3，依此類

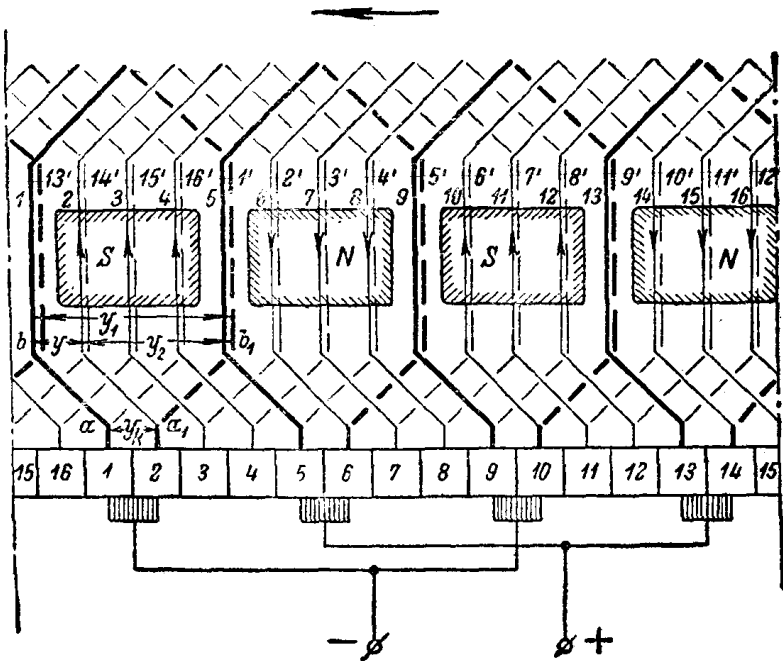


圖 2.

推，一直到畫出全部繞組，最後元件終了邊 16' 與整流片 1 相聯，整個繞組成為閉合了。為了畫圖方便和更明顯起見，大抵是把圖展成平面，為此我們把電樞切開並把它和磁極一起展開（圖 2）。因為元件的終了邊放在開始邊的下面，所以假定從電樞上面向下看時，終了邊是看不見的。但是為了使連接法更清楚起見，把元件終了邊用虛線畫在放在它上面的元件開始邊的旁邊，例如元件終了邊 1' 就用虛線畫在開始邊 5 的旁邊，再按照上面所說的規則畫出聯接圖。

正確地排列電刷是繪圖中要點之一。當然，不論元件與磁極間的相對位置如何，都可以把電刷排列得正確；但是為了更容易研究和更準確起見，磁極最好這樣安排，當繞組是整距時，把第一個元件（1—1'）放在磁場的幾何中性線上（圖 2），或者當繞組是短距時，放在和幾何中性線相對稱的位置（圖 3）。從圖 1 及圖 2 上可以看出，元件 1—1' 正好

放在中性線上（因為繞組是整距的）。電刷在各種情形及任何接法下，都是放在磁極中心下面；這時假定元件連到整流片上的端接引線長度是相等的。

註 上述排列電刷的方法是假定在電機中有附加極存在的。

在四個磁極之下放置四組電刷後，則可以得到並聯支路表：

2—3—4	第一並聯支路
1	5
8—7—6	第二並聯支路
10—11—12	第三並聯支路
9	13
16—15—14	第四並聯支路

在上表中以數字來表示元件的號碼，從這個表上可以看出共有四個並聯支路，並且每一支路是由三個元件組成。至於元件 1, 5, 9 及 13，它們被電刷所短接，因此並不包括在任何支路內。並聯支路數等於磁極數目，即 $2a=2p$ ，也是單疊繞組的主要特徵。

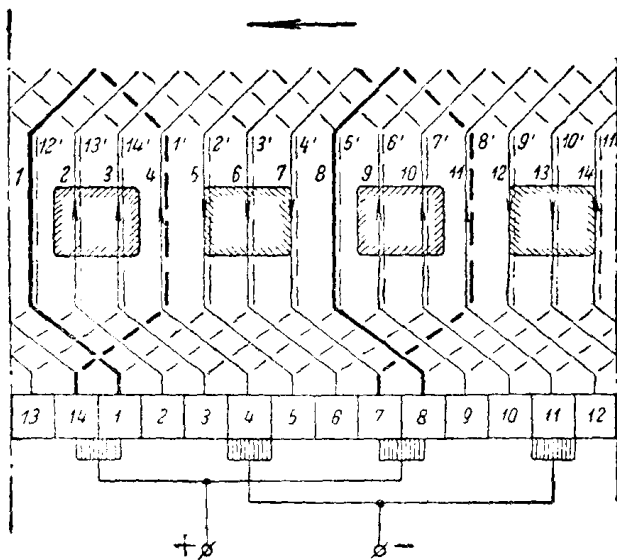


圖 3.

向右邊的陰影斜線表示北極，向左邊的陰影斜線則表示南極，展開圖上的磁極自然是假定放在繞組上面的。

2. 電樞繞組數據： $N=56$ ； $w_s=2$ ； $k=S$ ； $p=2$ 。單疊左行繞組。

算出繞組各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極及電刷，並示出各並聯支路。

解 元件數：
$$S = \frac{N}{2w_s} = \frac{56}{2 \times 2} = 14;$$

$$y_1 = \frac{S}{2p} + \varepsilon = \frac{14}{2 \times 2} - \frac{1}{2} = 3.$$

因為 $\varepsilon = -\frac{1}{2}$ 而不是零，所以繞組是短距的。

$$y = m = -1;$$

因為繞組是左行的，所以取了(－)號；

$$y_2 = y_1 - y = 3 - (-1) = 4.$$

整流子節距： $y_k = y = -1.$

答案 參考圖 3。

3. 電樞繞組數據： $N=72$ ； $w_s=2$ ； $S=K$ ； $p=2$ 。複($m=2$)疊右行繞組。

算出繞組各節距，並聯支路數，畫出繞組展開圖，排列磁極和電刷，並示出各並聯支路。

解 電樞繞組元件數：
$$S = \frac{N}{2w_s} = \frac{72}{2 \times 2} = 18.$$

整流片數： $K = S = 18.$

第一部分節距：
$$y_1 = \frac{S}{2p} + \varepsilon = \frac{18}{2 \times 2} - \frac{1}{2} = 4.$$

$\varepsilon = -\frac{1}{2}$ (短距繞組)。

繞組合成節距： $y = m = +2.$

因為繞組是右行的，所以取了(+)號。

第二部分節距： $y_2 = y_1 - y = 4 - 2 = 2.$

整流子節距： $y_k = y = +2.$

並聯支路對數: $a = m \times p = 2 \times 2 = 4$.

畫出繞組展開圖(圖4)。

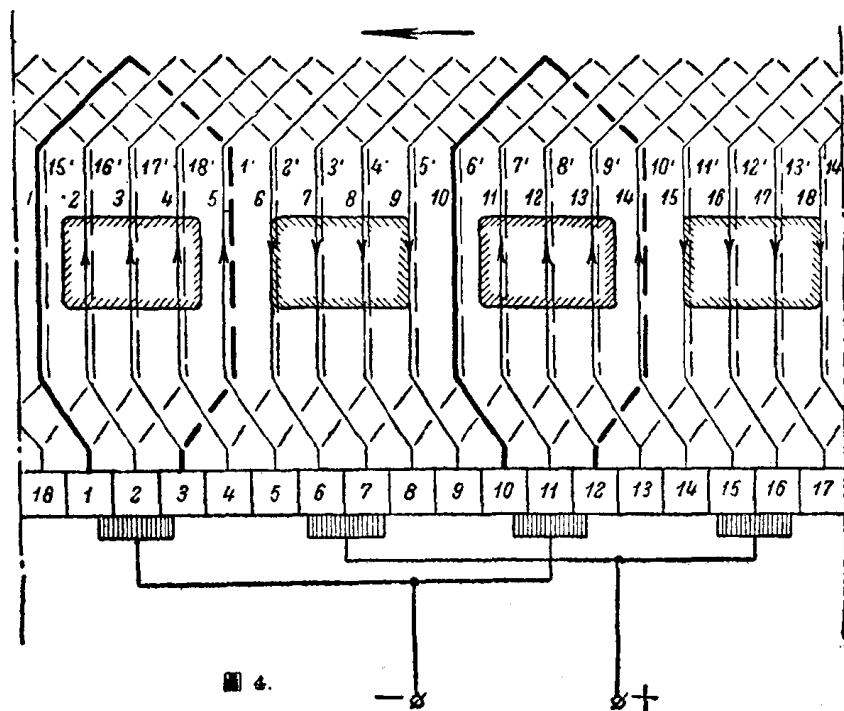


圖 4.

因為元件開始邊 1 聯到整流片 1 上(按照一般規則),而元件終了邊 1' 則聯到整流片 3 上 ($y_k = +2$), 所以這些整流片應該對稱地放在元件 1 中心的兩邊, 同時, 在它們之間的整流片 2 正處在磁極中心之下, 我們遵照所有各種節距按一般的規則畫出接線圖, 整流片 3 連到元件開始邊 3, 其餘依此類推, 逐步把所有單數的元件和整流片聯在一起, 最後是元件終了邊 17' 與整流片 1 相聯, 而電機整個繞組的一半成為閉合了。再把其餘一半繞組的元件連起來, 為此把整流片 2 聯至元件開始邊 2, 元件開始邊 2 用虛線聯到元件終了邊 2', 元件終了邊 2' 又連到整流片 4 (不是 3, 因為 $y_k = 2$!) 等等, 一直到元件終了邊 18' 與整流片 2 相連, 而第二個電樞繞組的一半也閉合了。電樞繞組自行閉合的

兩半用電刷並聯起來。因此，在這種聯接法下，電機的並聯支路數目比磁極數目要多一倍。

至於電刷的安置和磁極的排列，基本上是和單疊繞組相同的，就是說，元件 1—1' 放得和磁極對稱。因為電刷應該從組成複式繞組的兩個並聯單繞組引出電流，所以在任何情形下，電刷的寬度都應當比一個整流片更寬些。一般地說，在所有引出過的接線圖中，電刷寬度都是按條件取的，因為甚至在單疊繞組中通常也取電刷寬度等於 2—3 個整流段^①。

假定在複疊繞組中做得使元件端接引線長度相等，則電刷中心處在磁極中心之下。

其他的電刷和磁極按照一般規則放得相距 180 電角度。

接線表如下：

1	
2—4	第一並聯支路
3—5	第二並聯支路
8—6	第三並聯支路
9—7	第四並聯支路
10	
11—13	第五並聯支路
12—14	第六並聯支路
17—15	第七並聯支路
18—16	第八並聯支路

元件 1 和 10 各被電刷所短路，所以並不屬於任一並聯支路。

4. 電樞繞組數據： $S=K=23$ ， $p=2$ 。單疊右行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極及電刷，指出並聯支路。

5. 電樞繞組數據： $S=K=28$ ； $p=3$ 。單疊右行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極及電刷，並指出並聯支路。

① 整流段——整流片寬度加上兩片之間的絕緣層寬度。

6. 電樞繞組數據: $S=K=22$; $p=2$ 。單疊左行繞組。

計算各節距, 畫出繞組展開圖, 排列磁極及電刷, 並指出並聯支路。

7. 電樞繞組數據: $m=2$; $S=K=24$; $p=2$ 。複疊右行繞組。

計算各節距, 畫出繞組展開圖, 排列磁極及電刷, 並指出並聯支路。

8. 電樞繞組數據: $m=2$; $S=K=27$; $p=2$ 。複疊右行繞組。

計算各節距, 畫出繞組展開圖, 排列磁極及電刷, 並指出並聯支路。

9. 電樞繞組數據: $m=-2$; $S=K=26$; $p=2$ 。複疊左行繞組。

計算各節距, 畫出繞組展開圖, 排列磁極及電刷, 並指出並聯支路。

10. 電樞繞組數據: $N=114$; $w_s=3$; $S=K$; $p=2$ 。單波左行繞組。

計算各節距, 畫出繞組展開圖, 排列磁極及電刷, 並指出並聯支路。

解
$$S=K=\frac{N}{2w_s}=\frac{114}{2 \times 3}=19;$$

$$y_1=\frac{S}{2p}+\varepsilon=\frac{19}{2 \times 2}+\frac{1}{4}=5;$$

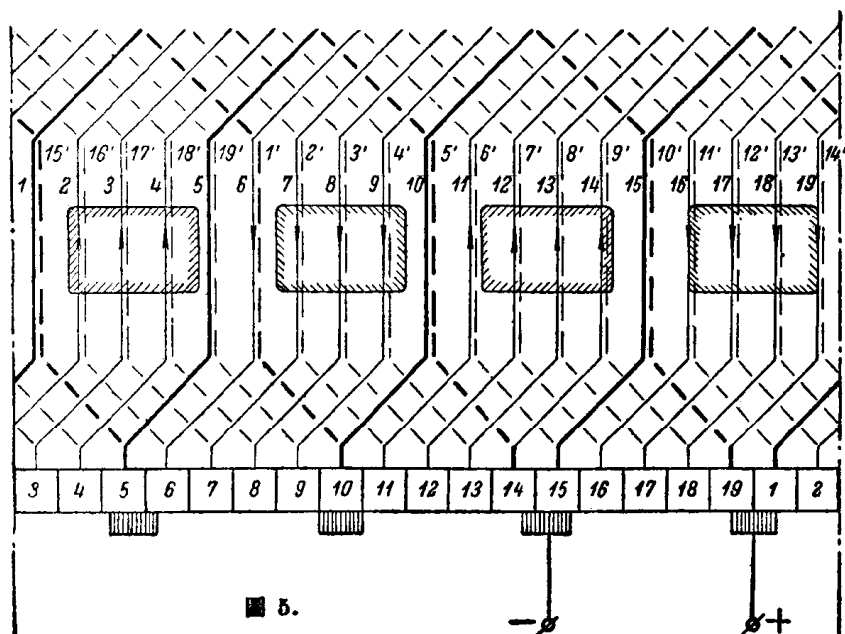
$$y=\frac{S+m}{p}=\frac{19-1}{2}=9;$$

$m=1$, 因為繞組是單式; 用 $(-)$ 號, 因為繞組是左行的。

$$y_2=y-y_1=9-5=4; y_k=y=9.$$

繞組連接圖繪製如下(圖 5)。按照所有繞組的一般規則, 把整流片 1 連到元件開始邊 1, 元件終了邊 1' 必須聯到由整流器節距 y_k 所決定的整流片上去。

因為 $y_k=y=9$, 所以從整流片 1 開始, 應該來到第 $1+9=10$ 整流片。因此元件終了邊 1' 聯到整流片 10 上。然後, 整流片 10 又聯到元件開始邊 10; 元件終了邊 10' 再聯到 $10+9=19$ 整流片上。這樣, 環繞了整個整流子, 我們來到了第一片左邊一個, 第 19 整流片, 也就是說這是單式左行繞組。我們不難注意到, 在單波繞組中一共只有兩條並聯支路($a=1$)。至於說到電刷的組數, 那末爲了得到兩條支路, 只要兩組



電刷就够了；在實用上，大部分還是有多少磁極就用多少組電刷。

電刷和磁極的排列規則與疊繞組有些區別，像以前要求的那樣，電刷把元件短路時，各元件的位置要和磁極相對稱，不過在波式繞組內，要準確地合乎以上的條件是不可能的，因為被電刷所短路的各元件在磁場內是有位移的，因此，不能夠在同一時間都排列得和磁極相對稱。因此可以推薦下述方法：磁極之一必須和繞行電樞第一周的元件開始邊和終了邊相對稱。在我們這個例題裏，有兩個元件同時被同極性的電刷所短路（ $p=2$ ），磁極一定要放在和元件開始邊 1 及終了邊 10' 對稱的地位，在圖 5 上是這樣做了。當元件端接引線長度相等時，電刷是處在磁極中心的下面。

並聯支路表如下：

19—9—18—8—17—7—16—6 第一並聯支路

11—2—12—3—13—4—14 第二並聯支路

元件 1, 5, 10 和 15 被電刷所短路。

11. 電樞繞組數據: $S=18$; $p=2$; $w_s=1$ 。單波左行繞組。
計算各節距, 畫出繞組展開圖並排列磁極和電刷。

解
$$y_1 = \frac{S}{2p} + \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4.$$

合成節距:

$$y = \frac{S+m}{p} = \frac{18-1}{2} \neq \text{整數}.$$

要按照正常的形式利用全部元件來完成這個繞組圖是不可能的。因此只能讓一個(必要時更多些)元件變成虛設, 也就是爲了填滿地位把它放在槽內, 但不包括在接線圖裏。在所給的情形下, 爲了要使 y 是整數, 我們把一個元件當作虛設。那末包括在接線圖內的元件數目等於 17 而 $y = \frac{17-1}{2} = 8$ 。

繞組展開圖如圖 6 所示。

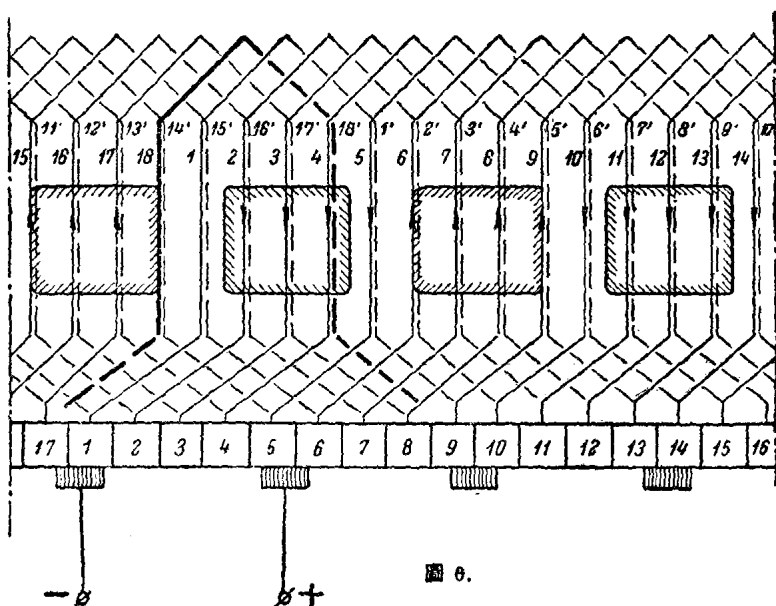


圖 6.

元件 18—18' 是虛設的，並不連接到整流片上去。當計算節距 y_1 時虛設元件的號數也必須考慮進去，因為虛設元件在槽內仍佔有一定的地位；當計算合成節距 y 時，在這個節距越過虛設元件時，虛設元件的號數是不考慮在內的。我們用接線圖 6 的例子來說明這一點，從整流片 8 開始繞行，整流片 8 聯接到元件開始邊 8；8 接到元件終了邊 8'；按照節距 $y=8$ ，元件終了邊 8' 接到整流片 $8+8=16$ ；整流片 16 又聯到元件開始邊 16；它的開始邊 16 接到終了邊 16'；再按照節距 $y=8$ ，元件終了邊 16' 又必須聯到整流片 $16+8=24$ 。因為總片數小於這個數目，所以必須減去 17，即 16' 應聯到第 7 整流片上，這樣，當繞組經過虛設元件時，後者沒有被算進去（當計算整流子節距或電樞上的合成節距時）。實際上，假定把元件的第一個或最後一個號碼作為虛設元件，繞組圖是不難畫出的，這一點在所給的情形裏（圖 6）也做到了。

12. 電樞繞組數據： $S=K=21$ ； $p=2$ 。單波左行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極與電刷，並指出並聯支路。

13. 電樞繞組數據： $S=K=29$ ； $p=3$ 。單波右行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極與電刷，並指出並聯支路。

14. 電樞繞組數據： $m=-2$ ； $S=K=26$ ； $p=2$ 。複波左行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極與電刷，並指出並聯支路。

註 複式繞組的完成與單式相似（參考第 10 題）。僅需嚴格保持合成節距 $y = \frac{s+m}{p}$ 。

並聯支路對數 $a=m$ 。

15. 電樞繞組數據： $S=K=32$ ； $p=3$ 。單波繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極與電刷，並指出並聯支路。

16. 電樞繞組數據： $m=\pm 2$ ； $S=K=31$ ； $p=3$ 。複波繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極與電刷，並指出並聯支路。

17. 電樞繞組數據： $S=K=24$ ； $p=2$ 。單波左行繞組。

計算各節距，畫出繞組展開圖，排列磁極及電刷，並指出並聯支路。

18. 電樞繞組數據： $N=52$ ； $w_1=1$ ； $S=K$ ； $p=2$ 。每一實槽裏的

虛槽(元件)數 $u_s = 2$ 。單疊右行繞組。

畫出繞組展開圖,用實槽來表示。

解 元件數:

$$S = \frac{N}{2w_s} = \frac{52}{2 \times 1} = 26.$$

槽數:

$$Z = \frac{S}{u_s} = \frac{26}{2} = 13.$$

按元件數計算的第一部分節距:

$$y_1 = \frac{S}{2p} + \epsilon = \frac{26}{4} \pm \frac{1}{2}.$$

可取: $y_1 = 6$ 及 $y_1 = 7$ 。

當 $y_1 = 6$ 時,按槽計

$$y_{1Z} = \frac{y_1}{u_s} = \frac{6}{2} = 3,$$

就是說,第一部分節距按照槽數計算,各處都是一樣大小的。這種情形(等元件繞組)的接線圖示於圖 7。

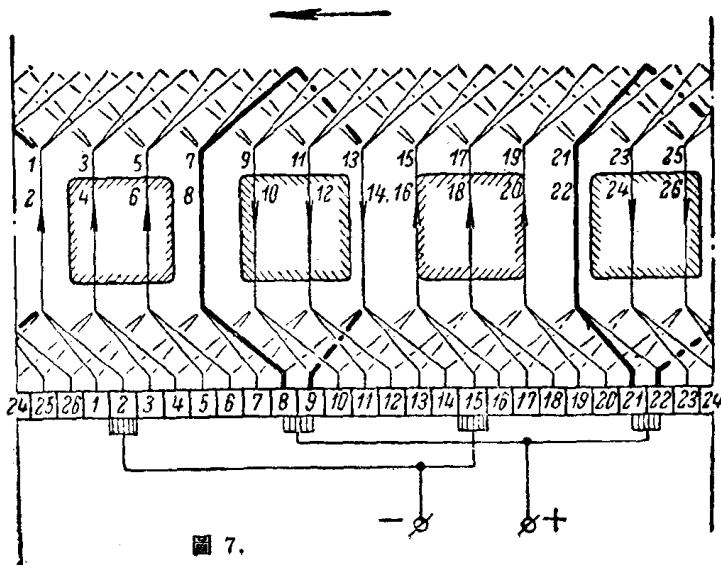


圖 7.

當 $y_1=7$ 時,

$$y_{1z} = \frac{y_1}{w_s} = \frac{7}{2} = 3\frac{1}{2},$$

就是說按槽數計的第一部分節距的大小是變動的,它將輪流等於

$$y'_{1z}=3 \text{ 或 } y''_{1z}=4.$$

這種情形(級節式繞組)的繞組圖示於圖 8。

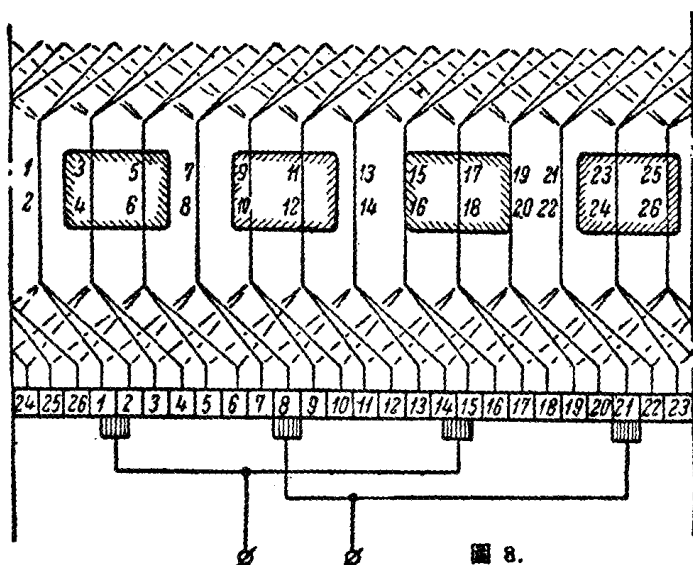


圖 8.

19. 電樞繞組數據: $S=16$; $w_s=5$; $K=S$; $p=2$. 單疊右行繞組。

把每個元件用線圈的形式表示後,畫出繞組展開圖。

答案 參考圖 9。

20. 電樞繞組數據: $S=17$; $w_s=5$; $p=2$; $K=S$. 單波左行繞組。

把每個元件用線圈的形式表示後,畫出繞組展開圖。

答案 參考圖 10。

21. 電樞繞組數據: $N=72$; $p=2$; $w_s=2$; $K=3$. 複 ($m=2$) 疊行繞組。

把每一個元件用線圈形式表示後,畫出繞組展開圖(參考習題19)。

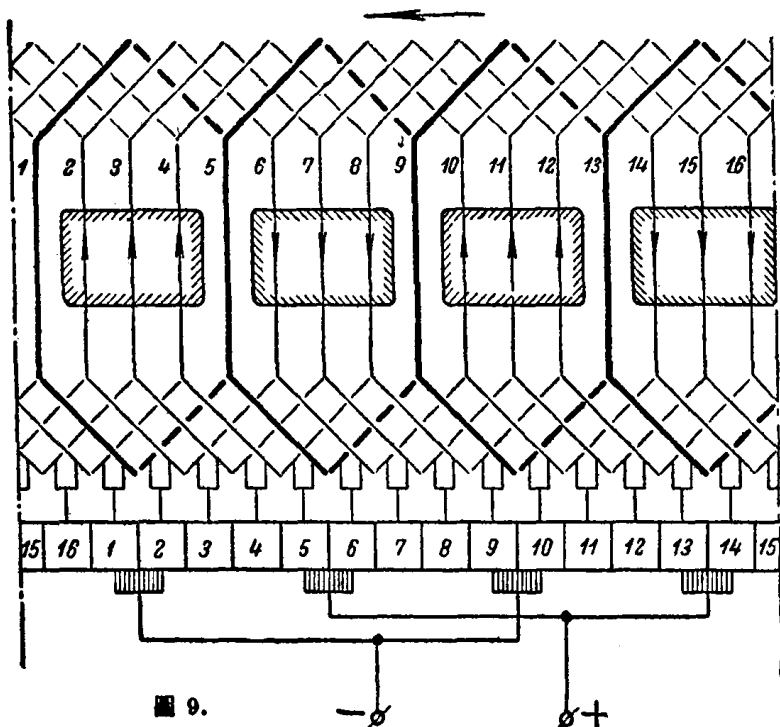


圖 9.

22. 電樞繞組數據： $N=114$ ； $w_s=3$ ； $K=S$ ； $p=2$ 。單波左行繞組。

把每個元件用線圈形式表示後，畫出繞組展開圖（參考習題 20）。

23. 如所已知，在磁不對稱的情況下，電樞繞組內將產生一個均壓電流，這個電流將使得電流在各個並聯支路內分配得不均勻（為簡單起見，取環型電樞的並聯繞組）。設某電機有四個並聯支路，上面兩支路的電流等於 100 安，而下面兩支路則為 200 安，電機送出的額定電流為 600 安，下面半個繞組流過 200 安應當是過熱了，不過因為電樞是在旋轉的，當下面的繞組轉到上面的位置時電流等於 100 安了。因之在這一段時間內它發熱不足，好像電樞總的發熱應該是不變的。但是實際上在磁的不對稱下發生的過熱又應該如何解釋呢？

解 繞組的發熱並不由在電樞內流過的電流的平均值所決定而是

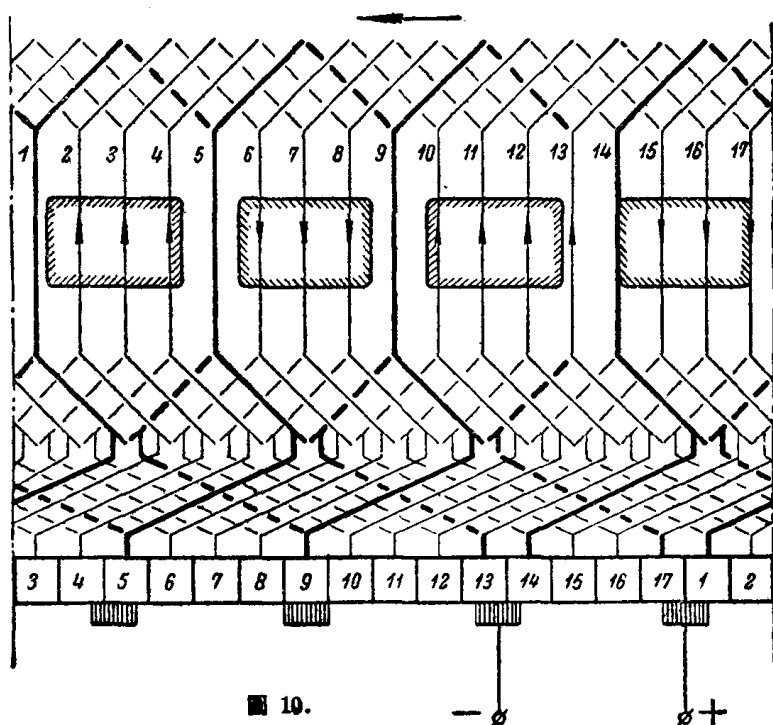


圖 10.

取決於其有效值。在所給的情況下平均值等於額定電流 $\frac{100+200}{2}=150$ 安，而在電流分配不均勻的情況下其有效值等於 $I_1 = \sqrt{\frac{200^2+100^2}{2}} = 158$ 安。

顯然，當電流均勻分配時，有效值等於平均值，因為

$$I_2 = \sqrt{\frac{150^2+150^2}{2}} = 150 \text{ 安。}$$

當電流分配不均勻時，有效值的增加為：

$$\frac{I_1}{I_2} = 1.053.$$

熱耗的增加等於：

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = 1.11 \text{ 或 } 11\%.$$