



# 无槽直流 牵引电动机

БЕСПАЗОВЫЕ  
ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРО-  
ДВИГАТЕЛИ  
ПОСТОЯННОГО  
ТОКА

22.72

## 译 序

无槽直流牵引电动机是电机设计制造方面的一大改革。这种电机最根本的特点是由于电枢无槽而使电枢线圈的电感量显著减小，电抗电势比有槽电枢直流电动机小得多，因而换向性能显著改善，过载能力与可靠性大为提高。

由于无槽电枢直流电动机具有这些优点，所以在国内外都受到了电机设计制造工作者的广泛重视，有关方面的科研成果逐日丰硕。可是关于无槽电枢直流电动机的技术资料却一直比较零散，尤其在我国，至今尚无一本较为完整的书问世。为了弥补这一缺陷，我们把苏联莫斯科动力出版社 1976 年出版的《БЕСПАЗОВЫЕ ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА》（无槽直流牵引电动机）一书译出，以供国内从事电机科研、设计的工程技术人员以及大学电机专业教学参考。

这本书实质上是一篇关于无槽直流电动机的科研成果总结报告，涉及的专业知识和数学知识较广，由于译者水平有限，虽经努力，译文错误难免，恳请读者批评指正。

本书译文蒙牟永武、钟伯刚同志精心校阅，谨致谢意。

译者

# 目 录

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第一章 牵引电机制造的现状和发展趋势 .....              | 1   |
| 1. 牵引电机制造的主要问题和动向 .....               | 1   |
| 2. 无槽电枢牵引电动机的特点 .....                 | 3   |
| 3. 无槽电枢牵引电动机的试用情况和发展远景 .....          | 6   |
| 第二章 无槽电枢的结构和参数。电动机的<br>气隙与磁路 .....    | 9   |
| 4. 无槽电枢绕组及其特点 .....                   | 9   |
| 5. 电枢电磁负载与主要尺寸之决定及其特点 .....           | 15  |
| 6. 靠近绕组端部的电枢铁心的延长 .....               | 29  |
| 7. 无槽电枢的结构 .....                      | 36  |
| 8. 绕组固定的机械强度及其计算 .....                | 39  |
| 9. 无槽电动机磁路的特点。电枢绕组<br>端部区域主极的延长 ..... | 47  |
| 第三章 无槽电枢牵引电动机磁场的特点及其计算 .....          | 57  |
| 10. 主极气隙磁密的分布 .....                   | 57  |
| 11. 用模拟法计算无槽电动机气隙中的主磁场 .....          | 61  |
| 12. 用模拟法计算补极和无槽电枢绕组的磁场 .....          | 66  |
| 13. 用蒙特卡洛法计算无槽电枢电动机的气隙磁场 .....        | 73  |
| 第四章 无槽电枢牵引电动机的换向 .....                | 85  |
| 14. 换向的特点 .....                       | 85  |
| 15. 线圈元件电感的试验研究 .....                 | 88  |
| 16. 用模拟法研究线圈元件的电感 .....               | 93  |
| 17. 换向计算。电抗电势的计算方法 .....              | 97  |
| 18. 主极磁场交变分量的计算 .....                 | 104 |
| 19. 换向区磁场交变分量的计算 .....                | 108 |
| 20. 无火花区的分析 .....                     | 116 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 第五章 无槽牵引电动机的电位条件 .....                       | 120 |
| 21. 无补偿无槽牵引电动机的静态电位条件 .....                  | 120 |
| 22. 串励与他励无补偿无槽牵引电动机<br>过渡状态下的工作条件 .....      | 123 |
| 23. 过渡过程中, 无补偿无槽牵引电动机<br>换向器上电位条件的研究 .....   | 131 |
| 第六章 无槽电枢牵引电动机的损耗及其计算 .....                   | 136 |
| 24. 无槽电枢电动机损耗的特点 .....                       | 136 |
| 25. 无槽电枢绕组导体中换向损耗的计算 .....                   | 137 |
| 26. 由法线磁密与切线磁密所引起的无槽电枢<br>绕组导体中的损耗及其计算 ..... | 139 |
| 第七章 无槽电枢牵引电动机绕组发热计算的特点 .....                 | 145 |
| 27. 无槽电枢绕组的温升计算 .....                        | 145 |
| 28. 磁极线圈的温升极限 .....                          | 148 |
| 29. 对无槽电枢电动机温度场的研究 .....                     | 155 |
| 第八章 无槽电枢电动机工作特性的特点 .....                     | 159 |
| 30. 机-电特性的计算 .....                           | 159 |
| 31. 牵引电动机工作特性的比较 .....                       | 162 |
| 32. 对于由无槽牵引电动机牵引的电力机车<br>抗滑行性能的评价 .....      | 166 |
| 第九章 无槽电枢牵引电动机的最佳设计 .....                     | 171 |
| 33. 最佳设计的特点 .....                            | 171 |
| 34. 自变量及其函数极限值的决定 .....                      | 173 |
| 35. 自变量的变化区域 .....                           | 178 |
| 36. 最佳设计问题的数学模型 .....                        | 181 |
| 37. 最佳设计问题的算法和程序 .....                       | 186 |
| 38. 选择牵引电动机可靠性的最佳方法 .....                    | 196 |
| 参考文献 .....                                   | 200 |

# 第一章 牵引电机制造的现状 和发展趋势

## 1. 牵引电机制造的主要问题和动向

为了对铁路干线运输和工业铁路运输进行以电气化为基础的全面改造,牵引电机的制造问题今后将成为科学技术方面的主要课题之一。

根据国民经济的需要,在今后 25~30 年内,科学研究和设计试验工作者的任务将是保证在生产中制成并推广应用:

轴——轨垂直负载达 300 千牛顿,最高速度达 130~140 公里/小时的铁路干线货运电力机车;

最高速度  $v_{\text{max}} = 200 \sim 250$  公里/小时的客运电车和电气列车,特殊地段可达 350~500 公里/小时。

开采露天矿用的工业用大功率交流牵引机组。

今后对电力机车车辆的主要要求是必须确保具有高度的可靠性和耐久性。

要想圆满地解决上述问题,首先必须抓住牵引电气传动系统尤其是牵引电动机的完善化这个关键。

从目前半导体技术的发展状况来看,现在已经可以试用同步(半导体式)和异步牵引电动机作为牵引传动的原动机,它们在更远的将来必将获得广泛应用。

在使用磁力浮悬式电力机车的高速(达 350 公里/小时或以上)运输中,将采用异步或同步直线电动机作为动力。

不过,近期内电力机车实际上还只能采用由恒定或脉动直流电源供电的直流牵引电动机,而且其主导地位将继续维

持下去。

对于牵引电动机有关数据的分析表明：由于其型式之改革，牵引电动机的各项基本运行技术指标和经济技术指标近 25 年来都有大幅度的提高，例如：电动机的单机容量已增大了一倍左右，单位功率的重量差不多减轻了一半，而效率则提高 3%。与此同时，更使人满意的是电动机单位功率的绕组用铜量减少了三分之二以上，电工钢用量减少了 25%，电绝缘材料用量大约减少了 30%〔1〕。

这一切说明牵引电动机有效材料的利用率已经达到了相当高的水平，而且由于其转速也上升了 45~55%，电抗电势上升了 15~35%，无疑这样一来便加重了换向、发热和机械方面的负担。

直流牵引电动机公认的缺点是必须有换向器，有了换向器便使电动机的结构和制造工艺都比较复杂，且可靠性降低，故其造价和运行维护费用都比较高。

此外，更主要的是产生环火的危险性限制了直流牵引电动机的使用范围。正因为如此，为了使具有换向器的直流电动机在与无换向器的交流电动机比较时具有足够的竞争能力，所以在直流电动机的设计、制造和运行维护等方面，首要的任务是必须保证获得有利于换向的电磁、电势以及机械方面的最佳条件〔2〕。

今后，为了满足对电力机车牵引电动机必须具有高度的可靠性和耐久性的要求，最好采用独立悬挂式⊙结构的牵引传动系统，因为与轴悬式结构相比，这样可使作用于牵引电动机结构部件的振动、颠簸和冲击的水平降低百分之八十到九十，从而可改善其换向的机械条件，同时可以在不降低其

⊙ 或译“支架悬挂式”——译者注。

结构部件的强度安全系数的前提下减轻电动机的自重。

在换向的电磁条件方面，起主导作用的是电抗电势——它至今仍然限制着牵引电动机经济技术指标的提高。

对于有齿电枢牵引电动机，防止换向器环火最有效的措施是采用补偿绕组。利用补偿绕组还能使电力机车达到高速运行，从而可提高其功率利用系数。但设置补偿绕组却使电动机结构复杂，同时由于其结构部件的各种故障而降低电动机的可靠性。

下面将要阐述：为了解决带换向器的直流电动机电力传动系统的完善化问题，其中包括改善换向性能与工作特性以及保证高度的可靠性、简化结构与提高有效材料的利用率等等，最好是使用无槽电枢牵引电动机。

## 2. 无槽电枢牵引电动机的特点

在普通直流牵引电动机中，电枢的齿区是一个最重要的部分。如何选择齿、槽的几何形状与尺寸，使其通过的磁通最多而同时又能摆下断面积足够大的绕组，是一件至为重要的事。

磁路中不存在齿区是无槽电枢牵引电动机突出的特点。这里的电枢绕组是均匀地嵌放在预制的铁心绝缘筒表面上的（图1）。

由于电枢上不存在齿区，使这种电动机的气隙增大而有效磁通减少。因此，为了使其磁通保持在与有齿电枢电动机相同的水平上，必须增加主极线圈的匝数，以便相应地加大励磁绕组的磁势。

由于气隙和气隙磁势  $F_g$  较大，使无槽电枢电动机成为一种低磁密的电动机，而且有着较软的机械-电气特性

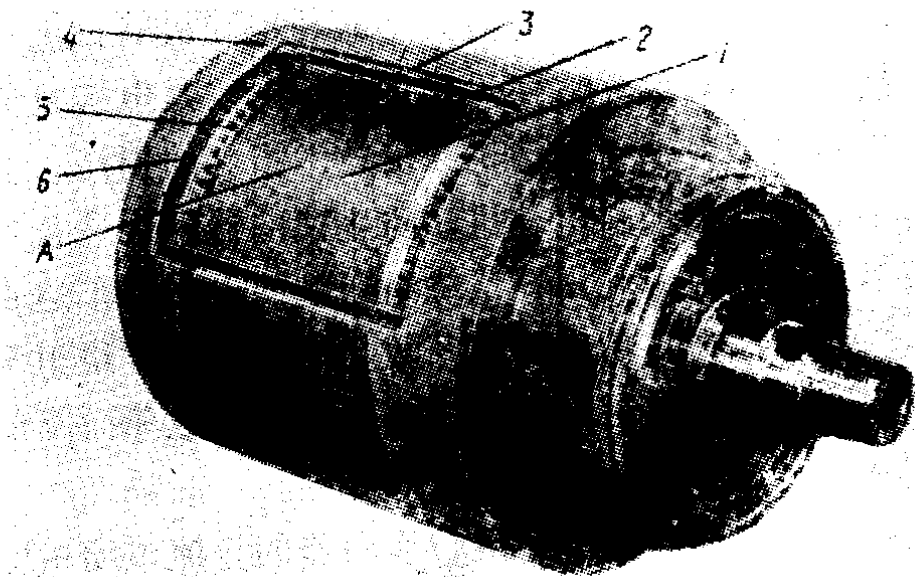


图1 牵引电动机的无槽电枢（图中4部  
绕组已除去）

1—电枢铁心 2—铁心上的绝缘筒 3—绕组的  
有效部分（单层） 4—玻璃丝绑扎 5—圆  
柱状绝缘垫 6—绕组端部（双层）

（图2）。显然，在高速运行和自动调节的工作区内，这种特性对功率的有效利用是极为有利的。而且这种电动机的磁稳定度系数和过载能力都要比带补偿绕组的有齿电枢电动机大得多。

由于电枢绕组是嵌放在无槽的电枢上的，故电感和电抗电势都比普通电动机小得多。而且由于所有绕组元件的换向参数具有显著的同一性，故为换向提供了颇为有利的电磁条件。

由于气隙和磁势都相当大，而且这里的磁势比横向的电枢反应磁势要大得多，故可显著地抑制电枢反应的不良作用。不过，与此同时却又产生了电枢反应磁通沿导磁体未饱和部分闭合的影响。

他励时，甚至在冲击电流很大的场合，也可由于电枢反



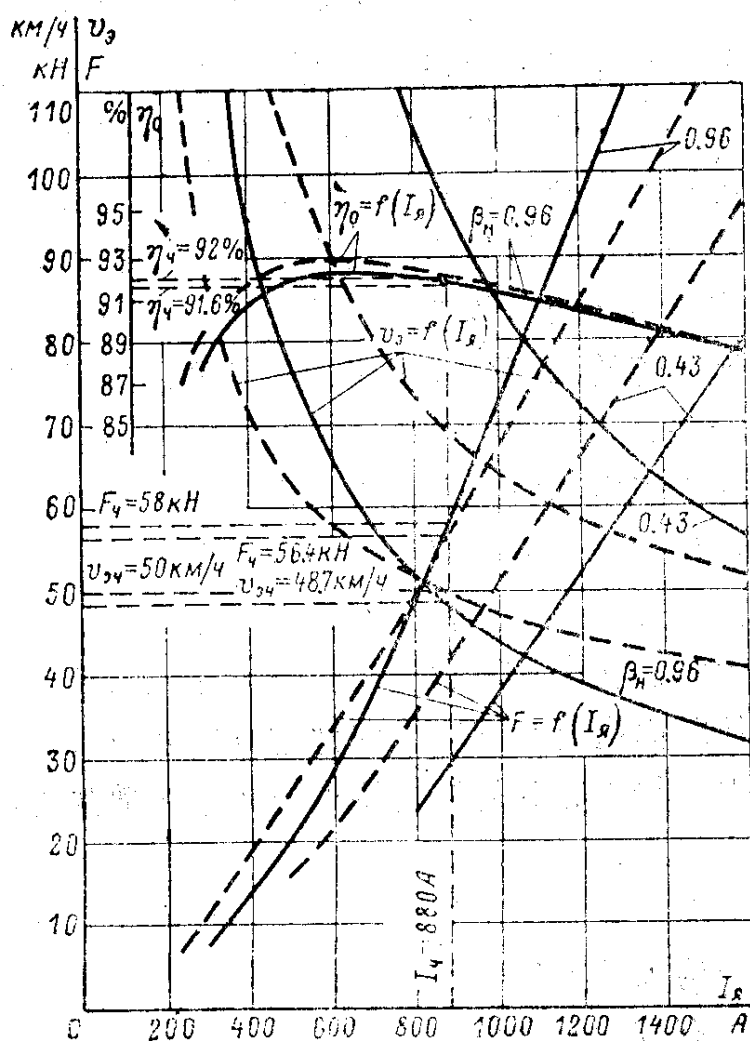


图2 HB-504A型(实线)和HB-418K6型(虚线)牵引电动机的机械-电气特性

应的去磁作用不大而使电动机的转矩特性  $M = f(I)$  呈直线状，而转速特性  $n = f(I)$  也比较稳定。这对于牵引电动机是至为重要的，因为只有换向条件良好，才能有条件制成既不用补偿绕组又能换向正常，甚至在瞬时高度过载时也能可靠工作的牵引电动机。

对于有补偿绕组的普通电动机，气隙大小可按机械条件所允许的最小值决定，其值大约是无补偿绕组电动机气隙的

70~75%。缩小气隙可减少有补偿绕组电动机的用铜量。但在无槽电枢牵引电动机中设置补偿绕组反而会增加电机的用铜量，而且整个电机的尺寸也将增大。其所以如此，是因为无槽电枢电机的气隙无法减小，而且为了在主极极靴上嵌放补偿绕组而必须设置齿和槽，也难免要增大主极的长度（因为实际上主极线圈的匝数是不变的，所以线圈占有的主极长度也是不能缩短的）。此外，由于无齿无槽，这里的电磁负载可以提高一些。

在普通牵引电动机中，由于受齿部屏蔽作用的影响，只有少量磁通穿过嵌放电枢绕组的槽内。但无槽电枢的绕组却处于全部磁通的作用之下。所以在无槽电枢里为了保证电枢绕组导体中的涡流损耗不超过允许值，必须采取特殊措施，例如沿导体断面高度和宽度方向把它分成几股等。

无槽电枢绕组有利的结构特点使得它在散热方面比有齿电枢绕组好得多。

由于取消了齿和槽，使设计者在选择电磁负载、主要尺寸、电枢结构以及如何利用电枢绕组端部来增加主磁通和转矩方面可以有较大的自由。

最后，由于没有齿，要特别注意保证高的机械强度和电枢绕组固定的可靠性。

### 3. 无槽电枢牵引电动机的试用情况和发展远景

不论是在苏联或是在其他各国，专家们对无槽电枢直流电机都极为关注，这种电机已被用于自动化和遥控系统中〔3〕。苏联制成的这类电动机最大功率已达1200千瓦〔4, 5〕，据报导日本早在1962年即已制成了大功率的无槽电枢电动机〔6〕。

从 1964 年起,就已经对铁路干线电力机车和电气列车上的无槽电枢牵引电动机的制造进行了全面研究〔7, 8〕<sup>⊖</sup>,其概况可见表 1。

表 1

| 参 数                     | 电 动 机 型 号     |            |                 |                             |             |             |
|-------------------------|---------------|------------|-----------------|-----------------------------|-------------|-------------|
|                         | 用 于 电 力 机 车 者 |            |                 |                             | 用于电气列车者     |             |
|                         | HB-504 A      | HB-504 A   | HB-509          | HB-510                      | PT-116      | PT-64-1     |
| 电力机车<br>型 号             | BJ180 T       | 已设计        | BJ112<br>BJ182M | 已设计<br>ОПЭ-2<br>(工业用机<br>组) | ЭР-22       | ЭР-9        |
| 试制电动机<br>出产时间           | 1971          | —          | 1973            | —                           | 1970        | 1974        |
| 功率(千瓦)                  | 790           | 900        | 750             | 465                         | 220         | 220         |
| 换向器上的<br>电压(伏)          | 950           | 950        | 1500            | 1500                        | 750         | 825         |
| 转速<br>(转/分)             | 865           | 860        | 780             | 655                         | 580         | 760         |
| 转矩:<br>(千牛·米)<br>(公斤·米) | 9.75<br>890   | 10<br>1020 | 9.15<br>935     | 6.78<br>690                 | 3.62<br>373 | 2.86<br>283 |
| 效 率                     | 0.94          | 0.937      | 0.934           | 0.925                       | 0.89        | 0.898       |
| 极 数                     | 6             | 6          | 6               | 4                           | 4           | 4           |
| 电动机重量<br>(公斤)           | 4360          | 4700       | 5000            | 4600                        | 2000        | 2000        |

自 1971 年起,就在 ЭР-22 型电气列车上对 PT-116 型无槽电枢牵引电动机(试验用样机)进行了试运转。

自 1972 年起,在两台试验用的 BJ180T 型电力机车上试用的 HB-504A 型无补偿绕组无槽电枢牵引电动机已经运行了三年之久〔9, 10〕。BJ180T 型电力机车在西伯利亚东部恶劣条件下的运行经验表明:

HB-504A 型无补偿无槽牵引电动机在全部负载范围内

⊖ 这里指苏联而言——译者注。

运行时，实际上是无火花换向的(《暗区》)，换向器的维修工作量大为减轻。

与普通的 HB-418K6 型串励直流电动机比较，换向器工作表面的磨损量大约减少了一半，且未见换向器片间有铜的迁移，因此打破了行车三十万公里即需重新研磨换向器的常规，机车可行驶七十万公里而不必研磨换向器，电动机仍能正常运行。

与有齿电枢电动机相比，电刷磨损量减少了 15~20%。

在电动机正常的励磁减弱 ( $\beta_n = 0.96$ ) 和最高转速时，与使用 HB-418K6 型电动机相比，电力机车的功率利用率提高了 60%。

在同样的轮缘耐磨强度和车轮的切削修理周期下，车轮与轨道之间的耦合稳定性与普通电力机车一样。

在 HЭB3 电力机车工厂为 БЛ80T 型电力机车试制无槽牵引电动机的生产实践中证实：

1) 无槽电动机的结构比普通有齿电枢电动机简单，造价较低，生产准备费用大约减少四分之三；

2) 由于无槽电机结构简单，故制造工艺简化，且牵引特性较好，每生产一台电力机车可节约资金两万三千卢布；

3) 由于电枢上没有齿和槽，在电枢结构和绕组型式的选择方面可以比较自由。

无槽牵引电动机令人满意的试运行结果为它们在所有的铁路干线和工业与市区铁路运输的电力机车上更广泛的应用奠定了基础。无疑地，它们也可以在无轨电车上使用。

但应注意，为了保证无槽电枢绕组固定的高度可靠性，玻璃丝绑扎许用拉伸应力的取值应不大于 150 兆帕<sup>⊖</sup>。

⊖ 1 兆帕  $\approx$  10 公斤/厘米<sup>2</sup>——译者注。

## 第二章 无槽电枢的结构和参数。

### 电动机的气隙与磁路

#### 4. 无槽电枢绕组及其特点

**绕组** 从线圈元件边有效部分 $\ominus$ 在电枢表面上嵌放的方式、线圈端部安排以及利用线圈端部来提高电动机转矩的可能性等各方面来看，无槽电枢绕组与有齿电枢绕组是大不相同的。

无槽电枢绕组可以做成双层的，也可以做成单层的。

双层绕组线圈有效部分及其端部的嵌放和布置方式都是双层的。由图 3, 6 可见，采用这种绕组时，在无槽电枢上相当于有齿电枢齿部（见图 3, a）的那一部分是闲着的，所以即使是加宽导体宽度也很难把线圈嵌放得紧密扎实，而且这样做还将使线圈端部伸长到无法实现的程度，或者只好把线圈端部搞成四层（图 3, e）。

单层绕组的结构是：线圈的有效部分沿着电枢铁心圆周表面依次紧凑地嵌放成单层，而线圈端部则做成双层（见图 3, 1）。与单层绕组比较，双层绕组铜的填充系数要小 23~30%，主极气隙和主极线圈绕组要增大 0.5~0.7 倍，而绝缘材料用量要增加 0.4~0.6 倍。

无槽牵引电动机电枢上的单层绕组最初是利用厚度不超过 3 毫米的垫块（1）来嵌装的（见图 3, d），这种方式使线圈导体的高度增加而宽度减小，所以降低了绕组的填充系数。以后我们放弃了垫块（1）而采用了类似图 3, 1 所示的改进

---

$\ominus$  或称直线部分——译者注。

型电枢绕组〔11〕。

正是由于上述原因，我们认为参考文献〔12〕所说的在大容量的无槽电枢上设置无磁性齿的办法是不适宜的。

至于绕组形式的选定，无槽电枢与有齿电枢一样——一般来说，单波绕组容易制作，且可不设均压线。但单波绕组中换向器片间最大电压比单叠绕组者上升 30~40%，电抗电势上升 20%，并且用脉动直流供电时其不平衡的交变电势大约要增大三倍。

所以，对于功率大于 480 千瓦的无槽电机最好采用单叠绕组，对于功率小一些的电机则采用单波绕组。

但无论采用哪一种无槽电枢绕组，都必须充分满足对称性条件，且须切实可行。在这方面，可以事先利用公式

$$2pUt_x = \pi D_a E_{x.c.p} C_D \quad (1)$$

来分析上述条件有关的各个参数。

在初步确定电枢铁心直径  $D_a$  时，不但要考虑电动机在电力机车上的安装条件，而且要考虑到如何保证无槽电枢绕组的机械强度。电动机端电压  $U \leq 1500$  伏时，换向器片间平均电压  $E_{x.c.p}$  一般不大于 18 伏。

对于无升高片的换向器，比值  $C_D = \frac{D_a}{D_x}$  一般为 0.85~0.92。

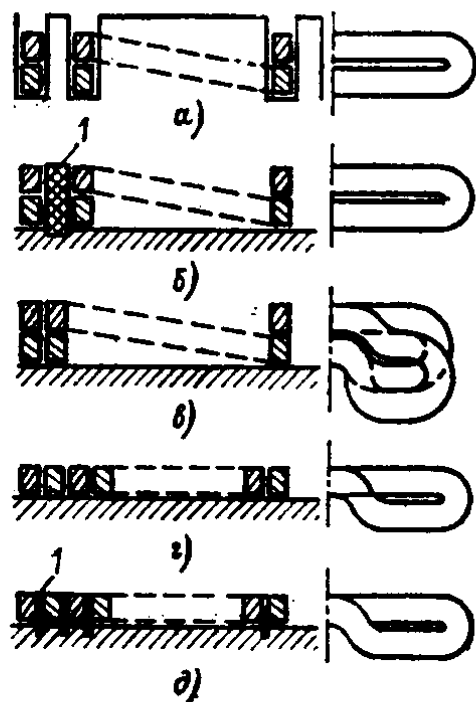


图 3 不同绕组的示意图

a) 有齿电枢者    b) ~ d)

无槽电枢绕组

对于有升高片者,  $C_D$  等于  $0.75 \sim 0.85$ 。

另一方面, 在确定直径  $D_a$  和  $D_x$  时还要注意到使电枢的圆周速度最大不超过  $60 \sim 70$  米/秒, 换向器的最大圆周速度不大于  $52 \sim 55$  米/秒。

换向器片的片数可按下述条件决定, 即片数

$$K \geq \frac{2pU}{E_{x.c.p}}$$

换向器的片间节距  $t_x$  应不小于 4 毫米。

每个“虚拟槽” $\ominus$  分得的换向器片数  $u_x$  越多, 绝缘用量就越少, 但换向区的宽度  $b_{x.x}$  越宽, 因此导致主极的极弧系数减小, 并使电动机的运行条件变坏。因此若  $U \leq 1000$  伏, 应取  $u_x = 3$  或  $4$ ; 当  $U \geq 1000$  伏时, 可取  $u_x$  为  $5, 6$  或  $7$ 。

比较图 3, a 和图 3, b 可见, 无槽电枢的双层绕组和有齿电枢的双层绕组相似, 同样是在“槽”内放下两个线圈边, 一个边放在另一个边的上方, 相互交替。但无槽电枢单层绕组却与有齿电枢者不同, 这里的线圈一个挨着一个连续排列着铺成一层(见图 3, c)。为了便于理解从有齿电枢双层绕组到无槽电枢单层绕组的转化, 最好引用“虚拟槽”或“假槽”这一概念, 而且假定每一个这样的虚拟槽由两个并肩平放的线圈边组成。与此同时, 我们也把两个线圈边分别叫做“上层边”和“下层边”。

选择“槽”数时, 也必须遵守熟知的绕组对称性条件, 并需保证做成单层绕组的可行性。也就是说, 必须使  $(Z/p) \pm \varepsilon = \text{奇数}$  (其中  $\varepsilon$  为绕组线圈的伸长或缩短量)。

对于无槽电枢绕组最好取  $\varepsilon = 0$ , 因为这样可以充分利用电机的内部空间, 但对换向并无不良影响。在研究无槽电

$\ominus$  因为无槽电枢实际上没有槽, 所以这里所说的“槽”都是虚拟的——译者注。

枢单层绕组时，已证明 $\pm \varepsilon$ 并不影响绕组等(电)位点的存在和安装均压线的可能性。这样也不会影响同时换向的线圈元件的数目，因为这些元件之间都有互感作用。但在有齿电枢绕组里却只考虑有效边在同一槽内同时换向的元件，而对于虽然同时换向但放在不同槽内的元件则不予考虑，因为它们彼此之间没有互感作用。

由此可见，无槽电枢绕组的短节距和有齿电枢绕组短节距的意义是不同的。因此，在无槽电枢绕组中最好采用全节距。

当 $p = 2$ 或 $4$ ， $u_x = 1, 3$ 或者 $5$ 时，单波绕组( $a = 1$ )具有对称性。如 $p = 3$ ，则 $u_x = 1, 2, 4$ 或 $5$ 。而槽数

$$Z = px \pm 1$$

式中  $x$  ——任意整数。

对于无槽电枢绕组中不交叉的单叠绕组，换向器上的节距可以按“虚拟槽”的数目来计算，而绕组的第一分节距和第二分节距可以象有齿电枢绕组一样来决定。

**绕组层** 绕组导体、绝缘物和玻璃丝绑扎在电枢铁心上占有的径向空间，叫做绕组层或绕组区(图4)。当 $D_a =$ 常数时，绕组层的厚度主要决定于电枢绕组导体的断面积 $q_a$ 和匝数 $N$ 。

由于无槽电枢绕组处于整个磁场作用下，所以降低绕组涡流损耗的必要性更加重要，在导线尺寸的选择和绕组层的合理设计方面比有齿电枢者要求更严格。

由于这种缘故，通常一根所需断面积为 $q_a$ 的电枢绕组导体往往需由几根并联的导线复合而成——沿宽度方向有 $f_x$ 根，沿高度方向有 $f_y$ 根。实践中可取 $f_x = 1$ 或 $2$ ， $f_y = 1, 2$ 或 $3$ 。



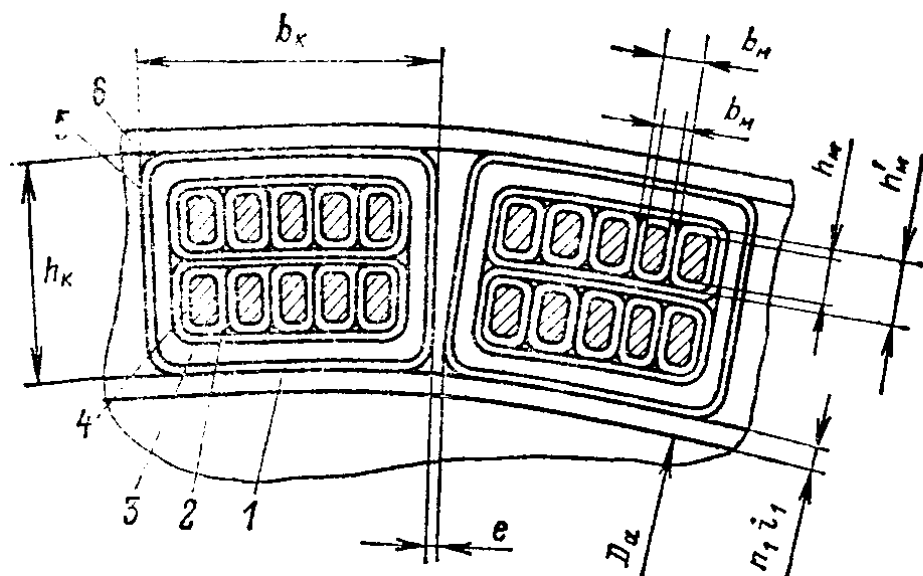


图4 绕组层的尺寸示意

无槽电枢绕组的导线不许平放，否则会使绕组端部加长且散热条件恶化，同时由于线圈中的导体沿高度方向所处的位置不同，因而涡流损耗与元件的电感都将增大。

无槽电枢绕组的绝缘是由牌号 ЛС 25P-ТТ (ТУ16-503·030-69) 而厚度为0.09 和0.13 毫米的玻璃云母带或玻璃云母布组成的，外层绝缘采用热处理过的玻璃丝带 (ГОСТ 5937-68)。

工艺性能最好，可靠性最高的是牌号 ПЭТВСД 的玻璃丝包漆皮电磁线 (按 ТУ16·06-362-69)。单边绝缘的层数和结构 (图4) 可根据电动机的端电压按表2所列数据决定。

表2中的匝间绝缘指的是在导体上包扎的玻璃丝云母绝缘 (即  $\Delta_a = n_1 i_1$ )。牌号为 ПЭТВСД 的导线单边绝缘厚度为0.18~0.2 毫米。

对于嵌有间隔垫块 (1) (图3, 6) 的无槽电枢绕组，线圈绝缘与有齿电枢者相似。