

直流电机换向译文集

设计理论

第一机械工业部大电机研究所編譯

机械工业出版社

73.231
566

直流电机换向译文集

设计理论

第一机械工业部大电机研究所编译

(EK 611/35)



“設計理論”是直流电机換向譯文集的第二分冊，共選了七篇文章，主要介紹主極與換向極磁場對直流电机換向的影響，提出了合理的換向極靴形狀的建議以及選用电樞槽數、刷蓋片數、繞組節距等應加注意的事項；說明了自動調節換向極強度的換向極勵磁系統的設計，最後討論了以整流器供電對大型直流电动机運行所產生的影響。

本譯文集主要供直流电机的設計制造人員參考。

直流电机換向譯文集

設計理論

第一机械工业部大电机研究所編譯

*

机械工业出版社出版（北京苏州胡同141号）

（北京市书刊出版业营业登记出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印張 $2 \frac{1}{16}$ · 字數 53 千字

1966年3月北京第一版·1966年3月北京第一次印刷

印數 0,001—4,500 · 定價(科六) 0.34 元

*

統一書號: 15033 · 4026

目 录

换向极磁场形状对直流电机换向的影响.....	1
主极磁场对直流电机换向的影响.....	8
直流电机换向极励磁系统的改进.....	20
在冲击负荷下涡流对直流电机换向的影响.....	27
在冲击负荷下电机的换向.....	35
在过负荷及冲击负荷下直流电机换向极磁场的研究.....	44
大型直流电动机用整流器供电的效果.....	61

換向極磁場形狀對直流電機換向的影響

В. И. Толкунов

高靜云 譯 朱兆椿 校

換向極極靴形狀對換向性能的影響程度如何，目前還不是很清楚的。

一個研究組認為，換向極磁場形狀對換向性能具有很大的影響，據他們看來，換向不良的基本原因之一是在換向時有一個附加電流 i_d [1] 流过。這個電流的數值等於 $(e_r - e_w) / \Sigma r$ ，此處 Σr 為滑出和滑入兩換向片與電刷間的接觸電阻之和，而 e_r 與 e_w 是電抗電勢與旋轉電勢。因此，為了消除附加電流 i_d ，就要求旋轉電勢在數值和形狀上的變化與電抗電勢相適應。

根據上述理由，實際上只要改變換向極下的氣隙，就可以使 e_r 與 e_w 的平均值達到平衡，而換向極氣隙的改變可以通過改變換向極與機座間的磁性墊片厚度來達到。同樣，也可以採用改變極靴形狀的辦法而使換向極磁場形狀與感應場形狀一致，從而使隨時間變化的旋轉電勢曲線形狀與電抗電勢曲線形狀達到吻合（全距繞組）。由上述情況可知，換向極的極靴形狀對換向性能有很大影響。

雖然所引用的理論是多年來眾所周知的，但至今還沒有能夠提供一個良好的資料，以供調整換向時選擇適宜的極靴形狀。同時也沒有任何反駁這一理論的資料。這裡首先要提出一個試驗，在被試電機上裝有不同形狀的極靴，並且對應

于每一种极靴都要作出无火花区，这是很复杂的，这只有在规模较大的电机制造厂里的试验台上才能实现。

另一个研究组〔2、3〕基本上是怀疑换向极极靴形状能够影响换向性能的，认为〔2〕在换向过程中，换向极的作用在于转移后刷边的电流堆积。非常明显，问题的关键是在于确定换向极磁场对换向性能的影响程度如何，而这一问题目前还不是很清楚的。

1957年末和1958年初，在哈尔科夫电机厂曾进行了研究工作，其目的：第一，明确换向极磁场形状对换向性能的影响程度；第二，在“П”系列电机的几台试制品中，获得最适宜的换向极极靴形状。

工作的主要内容是在П系列的两台试制的电机上安装各种不同形状换向极极靴，并且对每种极靴都测出其无火花区域。同样的，对每一种极靴建立其换向极磁场，并与感应磁场比较。在电磁试验室里，对每一种极靴分别用作图法（用建立磁力线管的方法）和在电解槽中模拟磁场的方法进行了试验，但其效果很低。

1. 试验电机型号为 П92，功率75千瓦，电压220伏，电枢绕组型式为单波绕组，电枢槽数为29，换向片数为87，换向极气隙7毫米，电刷牌号5T-9，刷宽 $2 \times 8 + 3$ 毫米。

在规定的电机上，曾相继确定了十种不同形状的极靴。这些极靴的外形尺寸示于图1。极靴是作成分开的，以螺钉固定在换向极铁心上。以无火花区来衡量每种极靴的换向性能。然而，同样是评价换向性能，但通常当火花不够稳定时采用这种方法却有很大的缺陷。此外，也很难确定，到底换向区域的特性是由于所研究的换向参数的改变而改变的，还是由于换向区域不够稳定而改变的。为了避免上述困难，在这

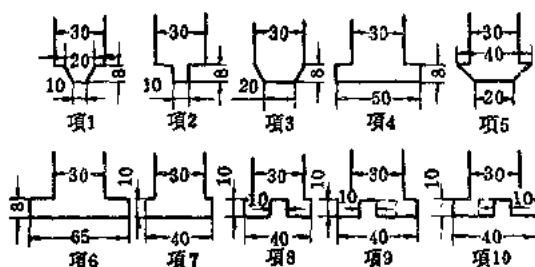


图1 II92型电动机各种型式的极靴。

项试验中，曾在同一个极靴下作了几次无火花区域试验（经过几天的时间，测出了无火花区域），然后确定一个最终的无火花区域，这个最终的无火花区域的每一个点，是所有各无火花区域相应点的算术平均值。

表1总结了所有各试验的结果，各个数值均以电枢额定电流 I_n 的百分比来表示。

表 1

所研究的样品序号 (见图1)	无 火 花 区 域 宽 度		
	$I = I_n$	$I = 0.5 I_n$	$I = 0$
1	3.3	4.05	9.97
2	5.7	7.8	9.45
3	6.55	9.0	11.32
4	7.4	7.1	8.7
5	8.63	8.51	10.8
6	11.55	8.15	9.16
7	7.83	7.15	8.35
8	7.31	7.09	10.4
9	8.61	9.48	13.4
10	9.16	8.0	10.1

根据表1绘出额定负荷情况下的无火花区域宽度 $\Delta I_n\%$

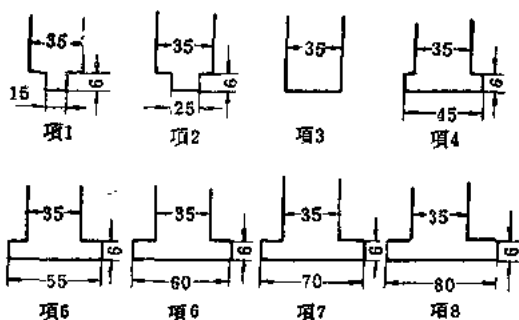


图2 П101型电动机各种型式的极靴。

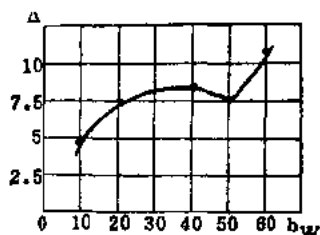
与极靴宽度 b_w 的关系曲线(图3)。这曲线满意而详细地表明了额定状态下,电机换向的可靠性与换向极极靴宽度的关系[⊙]。

如上所述,对每一种形状的极靴都建立了磁场。将这些磁场与感应磁场比较后可以看出,图1中位置1的换向极磁场与感应磁场配合得最好。

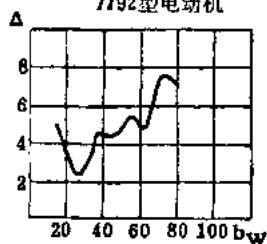
然而由表1可以看出,在装该极靴的情况下,试制样品电机的换向指标最低。

2. 试验电机型号为П101,

功率 100 千瓦, 电压 220 伏, 电流 500 安, 转速 1500 转/分,



П792型电动机



П101型电动机

图3 相对换向区域宽度 $\Delta I_n\%$ 与极靴宽 b_w 的关系曲线。

⊙ 假若极靴形状不同而其宽度相同,那么数值 $\Delta I_n\%$ 将界于所有与这个宽度相应的数值之间。从整理后的曲线可以看出,当换向极极靴加宽时,试制样品电机的换向性能大为提高。——译注

电枢直径 327 毫米，电枢铁心长 190 毫米，电枢绕组型式为单迭绕组，电枢槽数为 38，换向片数为 152，换向极气隙 7.7 毫米，电刷牌号 BT9，刷宽 $2 \times 10 + 3$ 毫米。

在该电机中曾相继确定了八种形状不同的极靴。

经过几个月的时间，观察到了试制样品电机的换向性能。为了避免由于时间的不同、机械因素（换向器等）以及周围环境对换向的影响，曾以不同形式重复几次地更换极靴，对同一个极靴来讲，其无火花区域通常很少有差别（对于较窄的极靴，这个差别是很显著的）。下面列出的表 2 与表 1 相似，表 2 总结了所有各项试验的结果。

表 2

所研究的样品序号 (见图 2)	无 火 花 区 宽 度		
	$l = l_H$	$l = 0.5 l_H$	$l = 0$
1	5.0	7.6	10.8
2	2.1	7.3	10.2
3	4.7	7.95	11.5
4	4.2	4.8	8.4
5	5.5	5.9	8.0
6	4.4	4.7	9.0
7	7.7	8.8	11.8
8	6.8	7.0	8.8

按表 2 绘出电机额定负荷时的 $\Delta i_n \% = f(b_w)$ 曲线。虽然换向区域宽度对极靴的依赖关系表现得不很明显，但这曲线与上述样品电机的曲线很相似。

除上述试验外，在同一个厂里，在“П”系列试制样品电机的换向调整中，还进行了装有各种不同极靴的试验。下面引入 П111 型电动机（160 千瓦、220 伏、796 安、1500

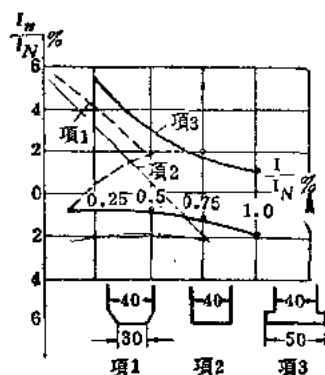


图 4 PI111型电动机的无火花区域。

转/分)在各种不同形状极靴情况下所测得的无火花区域(图4)。由图4中可以看出,该电机的换向性能随极靴宽度的增加而提高。而且在其它试制样品电机中,可以得到相似的结果。

结 论

根据上述的基本分析,在所研究的电机范围内可以作出如下结论:

1. 良好的极靴形状能够使旋转磁场形状与感应磁场形状相符的这一理论,是不符合实际情况的。当考虑到实际换向周期小于计算换向周期这一因素时,理论上与实际情况的偏差就更大了,因为此时感应磁场大大地缩小了;

2. 电机换向的可靠性,通常是随着极靴宽度的增加而提高。并且对某一台电机来讲,这种特性表现得很明显,而对另外一台电机来讲则表现得很差。在最适宜的极靴情况下,在整个换向区宽度上,可以得到在数值上与感应磁场大致相同的旋转磁场;

3. 实际上, 最良好的换向条件是在换向开始和结束时, 其旋转电势大于感应电势, 而在换向过程中, 其感应电势大于旋转电势。两个磁场的总面积应当大致相等;

4. 无火花区域的稳定性通常随着换向极靴宽度的增加而提高。

参 考 文 献

〔1〕 Э. Арнольд, И. Л. Ла-кур, Машины постоянного тока, т. I, Гостехиздат, 1931.

〔2〕 М. Ф. Карасев, Коммутация машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1955.

〔3〕 Н. В. Волошин, Экспериментальное исследование процессов коммутации машин постоянного тока, Диссертационная работа ХПИ, 1954.

〔4〕 Я. И. Каган, О. И. Богданов, Исследование магнитных полей электрических машин и аппаратов, Технический отчет МГН-19, ХЭМЗ.

译自 Электромеханика, 1959, №2, 76~80页

主极磁场对直流电机换向的影响

В. П. Толкунов

高静云 译

通常认为，只有当电刷移开几何中性线很远时，主极磁场对换向性能才有很大的影响。然而并非完全如此，很多电机（特别是大容量高电压电机）的试验表明，在某些条件下，主极磁场对换向性能具有很大的影响，有时甚至具有决定性的影响〔2〕。这种影响在接近空载状态时表现得特别明显，而在负载情况下表现得较差，这主要表现在无火花区的缩小方面，无火花区是在发电机和电动机状态下绘出的。

首先研究空载状态。在此状态下，由于工作回路中没有电流存在，因而在短路元件中的同期电流不是由 $+i_a$ 变到 $-i_a$ ，而在整个换向周期中始终保持为零（此处 i_a ——电枢绕组并联支路的支路电流）。在此情况下，短路元件中的暗示电抗电势 $-e_s$ 值等于零，因为它的存在是以在元件中具有随时间而变化的电流为先决条件的。电机在空载时出现火花，这可能是由于主极磁场在短路元件中产生了旋转电势而造成的。

下面的试验可以证明这一点，在这个试验中，短路元件中没有工作电流，只有旋转电势，因而会出现火花。

如果在空载状态下运行的发电机中，将励磁绕组开路，那么将没有电势产生，并且不论是在电枢绕组的并联支路中还是在短路元件中都没有电流流过。作者在不同容量电机

中所进行的试验表明，如果给这种状态下运行的电机换向极绕组外加一电流，那么，当短路元件具有 0.2~0.4 伏的旋转电势时在电刷下面就已经出现了火花。

由上述试验表明，在旋转电势较小时，在电刷下面就已经能够引起火花，甚至当电机中没有工作电流时，也能出现火花。当短路元件中是由主极磁场感应出电势的情况下将表现得差一些，但有时这个电势能够达到很大值，因而它就能在电刷下引起火花。

现在来分析一下主极磁场对换向的影响程度及它与电机的哪些因素有关。

首先，重要的数值是电机的换向区与中性区之比。

这个比值称为换向极覆盖系数，等于

$$N_e = \frac{b_\kappa}{b_{Ne}} = \frac{(\beta_i + u_n + \varepsilon - 1)t_\kappa \frac{D_\alpha}{D_\kappa}}{(1 - \alpha)\tau} \quad (1)$$

式中 N_e ——换向极覆盖系数；

b_κ ——换向区宽；

b_{Ne} ——中性区宽；

β_i ——刷盖片数的计算值；

u_n ——每槽片数；

ε ——电枢绕组的短距；

t_κ ——换向片的片距；

D_α ——电枢直径；

D_κ ——换向器直径；

$(\alpha = \frac{b_p}{\tau})$ ——极弧系数；

b_p ——主极极弧长；

τ ——极距。

刷盖片数的计算值 β_i 由下式确定：

$$\beta_i = \frac{b_i}{t_K} = \frac{b}{t_K} + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \quad (2)$$

式中 b_i ——电刷的计算宽度 $b + \left(1 - \frac{a}{p}\right)t_K$;

a ——电枢绕组支路对数;

p ——极对数;

b ——电刷的实际宽度。

进行初步整理得:

$$\begin{aligned} N_e &= \frac{(\beta_i + u_n + e - 1)t_K \frac{D_a}{D_K}}{(1 - \alpha)\tau} \\ &= \frac{\beta_i t_K \frac{D_a}{D_K} + u_n t_K \frac{D_a}{D_K} + (e - 1)t_K \frac{D_a}{D_K}}{(1 - \alpha) \frac{\pi D_a}{2p}} \\ &= \frac{\frac{b_i}{\pi D_K} + \frac{t_K}{\pi D_a} + \frac{e - 1}{\pi D_K} t_K}{(1 - \alpha) \frac{1}{2p}} \end{aligned}$$

最终结果为:

$$N_e = \frac{k_D + \frac{1}{Z_p} + \frac{e - 1}{Z_p u_n}}{1 - \alpha} \quad (3)$$

式中 k_D ——以换向器表面处极距表示的电刷覆盖系数 (称之为换向器覆盖系数);

$Z_p = \frac{Z}{2p}$ ——一个极下所具有的槽数;

t_K ——电枢齿顶距。

在普通设计的电机中, 式 (3) 的第三项比头两项要小得多, 因此, 可以得出这样的结论: 主极磁场伸入换向区程度的换向极覆盖系数取决于换向器覆盖系数 k_D 、每极所具有的槽数 Z_p 和极弧系数 α 。

● 原著中没有 t_K 。——译注

过去有些工厂选择电刷宽度是以换向器覆盖系数 k_D 不超过规定的极限值 (0.12~0.15) 为准则的。有些作者也坚持了同样的见解[1]。

近年来,在选择良好的电刷宽度及评价主极对换向的影响程度时,是以换向极覆盖系数为基础的。

因此,对中小型电机而言,此值应为 0.6~0.7,对大型电机而言应为 0.5~0.6。用这样的数值来选择电刷宽度。

选择电刷宽度和评价主极磁场对换向影响的这种方法,使 k_D 与槽数联系起来,因此,它比上面所说的只用系数 k_D 一个数值的计算方法要准确得多。

然而不足之处是,换向极覆盖系数本身同样也不能全面评价主极磁场对换向的影响。事实上,数值 N_e 只表示主极磁力线伸入换向区的程度,还不能全面的判断主极磁场在这些元件中所产生的电势值的大小,这个电势值 e_z 才是主极磁场影响换向性能的实际标准。

为了计算 e_z , 需要引入一个公式。首先来研究一下在空载状态下电势 e_z 是怎样对换向起着不良影响的,并研究其极限程度的出现。假定电枢绕组是全节距的,这在计算中是不会引出很大误差的。

在上述条件下,电势 e_z 随时间的变化规律将完全相似于换向区中的磁感应强度 B_θ 的变化,这个磁感应强度是由主极在换向区中产生的(图1)。最有意义的是电势值 $e_z = e_{z\max}$ 。这

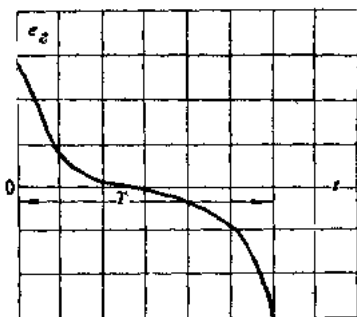


图 1

e_z —由主极磁场产生的电势;

T —换向周期。

个电势是当短路元件在换向周期内一开始和将要结束的那一瞬间时产生的。在研究主极磁场对换向的影响时，先适当研究一下数值 e_{zm} ，它能全面地评价随时间而变化的数值 e_z 。

在直接处于主极极靴下面的电枢元件中所产生的电势 e_c 等于 $2aE/Ka$ （此处 E ——电机电压）。如果不考虑电枢齿的饱和，那么， e_{zm} 与 e_c 的比值将等于距离主极中性线 $b_k/2$ 处的力线管磁导与直接处于主极极靴下的力线管磁导之比。这个比值用 k'_e 表示；则

$$e_{zm} = k'_e e_c \quad (4)$$

当考虑到处于主极极靴下的齿的饱和时（实际上，在换向区中的电枢齿总是可以认为不饱和的），式（4）可用下式表示：

$$e_{zm} = k'_e k_z e_c \quad (4')$$

此处， $k_z = (F_\delta + F_z) / F_\delta \quad (5)$

F_δ ——使电机的工作磁通通过气隙所用的励磁磁势；

F_z ——使电机的工作磁通通过电枢齿所用的励磁磁势。

由于系数 k'_e 的性质是不固定的，因而求解 e_{zm} 的计算值很困难。

在确定这个系数时最简单的方法是采用建立磁力线管的作图法。在此求取系数 k'_e 时，如果要求不是非常精确的话，可以采用作者所提供的半经验公式〔2〕：

$$k'_e = 1 / [1 + 0.75(1 - N_e)(1 - \alpha)k_m] \quad (6)$$

此处 k_m ——极距 τ 与主极气隙之比。

将用式（6）计算所得的系数 k'_e 与用作图法所求得的系数以及用试验研究方法所求得的系数三者相比较，表明用

● 原著中为 b_c 。——译注

式(6)计算所得的 k'_e 值比用试验方法的, 其偏差不大于 10~15%。

为了便于分析, 采用式(6)。则有:

$$e_{em} = k_s \frac{k'_e}{\alpha} \cdot \frac{2aE}{K} \quad (6')$$

选用了符号 $k_e = k'_e/\alpha$ 及直流电机理论中一个重要参数, 即平均片间电压 Δu :

$$\Delta u = \frac{2p\mu}{K} \approx \frac{2pE}{K} \quad (7)$$

则:

$$e_{em} = k_s k_e \frac{a}{p} \Delta u \quad (8)$$

由式(8)可以清楚地看到, 在空载状态下各种因素对数值 e_{em} 的影响。数值 e_{em} 可以用来评价主极磁场对换向的影响程度, 现给出影响 e_{em} 的各值:

k_s ——电机的饱和系数;

δ ——主极气隙;

b_k ——换向区宽;

τ ——极距;

α ——极弧系数及比值 $\frac{a}{p} \Delta u$ 。

下面分析一下给定因素中的每一个单独因素。

1. 系数 k_s 此系数为电枢齿的饱和系数, 其值等于 $(F_\delta + F_s)/F_\delta$ 。电机在额定负载时, 磁路中的齿磁势大约占气隙磁势的 15~20%。在电枢齿高度饱和的电机中, 数值 F_s 占数值 F_δ 的 40~50% (在某些条件下要更高些)。在这样的电机中, 由于齿的饱和, 磁力线的“扩散”现象大大加强了, 而且主极磁场的磁力线显著地超出了极靴的范围。在这样的电机中, 其相应的系数 k_s 可以达到 1.5 或更高一些。由此可