

[苏]Ф.К.Макаров

磁性槽楔交流电机

王绍禹 张国权 吴雅燕 王晓玲 译



力
社

98299

TM34
1022

[苏] Ф.К.Макаров

磁 性 槽 楔 交 流 电 机

王绍禹 张国权 吴雅燕 王晓玲 译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书较全面、深入地总结了世界各国在应用磁性槽楔以提高电机效率、降低电机温升、减小噪音和改善电机工作特性等方面的经验和问题。着重论述了磁性槽楔电机在气隙与槽楔中的磁场；磁性槽楔电机的齿区参数、工作特性、附加损耗和振动声学特性以及磁性槽楔的材料、制造安装工艺和试验方法等理论和实践问题。并附有计算齿区参数的整套程序。本书对我国电机制造和运行部门具有较大的参考价值，可供从事电机设计制造和运行检修的广大技术人员阅读，高校、中专师生亦可参考。

Ф.К.Макаров

**Электрические машины переменного
тока с магнитными клиньями
Энергоиздат 1981**

磁性槽楔交流电机

[苏] Ф.К.Макаров

王绍禹 张国权 吴雅燕 王晓玲 译

★

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

水利电力出版社印刷厂印刷

★

787×1092毫米 32开本 3.5印张 76千字

1987年3月第一版 1987年3月北京第一次印刷

印数0001—2060册 定价0.76元

书号 15143·6218

译 者 的 话

随着能源的日趋紧张，实现电机的高效运行已成为当前急需解决的技术课题。在交流电机上采用磁性槽楔是一项简单易行、效果明显的提高效率措施；也是降低电机温升、延长电机使用寿命和减小噪音的有效技术措施之一。

六十年代以来，一些工业发达国家相继发展了中、小型电机的新系列，对原系列电机进行改进的措施之一是以磁性槽楔替代传统的非磁性绝缘槽楔。我国在六十年代即着手这方面的研究、试验工作，至今已在电机制造和使用部门推广应用，取得了较好的效果并积累一定经验；然而，仍有个别地方在改用磁性槽楔后发生了起动困难及磁性槽楔脱出等问题；尤其是对磁性槽楔电机的理论问题，缺乏系统的了解和研究。

苏联Ф.К.Макаров所著《磁性槽楔交流电机》一书，较全面、深入地总结了近年来世界各国在应用磁性槽楔方面的经验和问题，系统地阐述了磁性槽楔电机的理论和实践，对我国电机制造和运行部门的有关工作具有较大的参考价值。为此，我们把它翻译出来。由于我们水平有限，错误之处敬请读者指正。

译 者

一九八五年六月

序 言

在苏联，交流电机的产量占电机总产量的很大比重。它在各个工业部门获得了广泛的应用。因此，提高交流电机的力能指标，是重要的国民经济课题。解决这一问题的一个途径，是采用软磁材料制成的槽楔，即所谓磁性槽楔将绕组固定在定子（转子）槽内。实践证明，对于开口槽电机，如以软磁材料槽楔代替普通的非导磁绝缘材料槽楔，可使电机效率提高，绕组和铁芯的温度降低，极大地改善振动声学特性^[1~6]。

实际上，随着电机制造业的发展，早产生了采用磁性槽楔的设想，1908年德国颁发了第一个磁性槽楔专利特许证。众所周知，目前已有300多个这方面的专利特许证和发明证^[6]。具有代表性的磁性槽楔结构如下：

1. 类似于电机有效铁芯的叠装，将钢槽楔嵌入绝缘薄板内。在1920~1940年曾有60多个这种槽楔的专利注册。由于这种槽楔系采用大量具有槽楔断面形状的电工钢片所组成，所以难于制造。又因这种槽楔的相对导磁率很高（ $10^2 \leq \mu \leq 10^4$ ），使作用于槽楔上的电磁力很大，造成电机因槽楔从槽内脱出而发生故障。由于这种槽楔可靠性低，所以未被应用。

2. 以绝缘材料（胶布板、胶纸板、合成树脂等）为基，含有大量强磁体（钢丝、钢丝网、波纹或平的薄钢片等）的槽楔。从1920年到现在已有100多个这种槽楔的专利特许证。

这种槽楔不但制作复杂，同时还必须采取专门措施以防止涡流引起强磁体的过热。由于这些强磁体($10^2 \leq \mu \leq 10^4$)很可靠地与楔体固定，所以这种槽楔的大部分在运行中很快被电磁力损坏。由于工艺性能低、造价高、又难以保证可靠性，所以这种槽楔未被广泛使用。布朗—包维尔 (Броун—Бовери) 公司，在某些高压电机上采用顺槽布置的绝缘钢丝与粘合材料压制在一起的磁性槽楔。

3. 以磁粉 (羰铁、工业用铁粉等) 为填料，热塑或热固树脂、树胶等为粘合剂组成的导磁介电物质，压制或压注而成的磁性槽楔。从1930年以来登记了100多种这种槽楔的专利许可证。这种槽楔制作简便。同时由于现代化学提供了大量可供选择的高强度和弹性好的粘合剂，能使分散的强磁性填料牢固地保持在槽楔内。这种槽楔的导磁率 $\mu = 3 \sim 10$ ，保证了电机所要求的性能^[3]。因而这种槽楔得到了广泛的应用。

现在已经成功地解决了用导磁介电物质制造磁性槽楔的技术工艺及其在电机上可靠应用问题。苏联技术科学博士B.A.特洛依兹基^[1]，工程师A.И.洛里克和技术科学硕士A.И雅戈夫列夫^[2]在制造磁性槽楔电机方面作了很大贡献。化学硕士B.Д.盖拉西莫夫和Л.В.彼夫兹涅尔在研制磁性槽楔材料方面也作了很大贡献。

至今，磁性槽楔电机的理论尚研究得不够充分。已发表的文献^[1, 7~11]并未概括与磁性槽楔电机参数计算有关的全部问题。本书的目的就是在某种程度上弥补这方面的不足。本书内容包括：磁性槽楔交流电机的电磁计算、磁性槽楔材料的选择和试验、以及磁性槽楔应用到各种耐热等级绝缘电机上的建议。本书所列的计算公式与已发表的文献所不同的

是，通过求解气隙和磁性槽楔磁场的微分方程组而得。这些公式可在研究几何尺寸和槽楔导磁率对电机参数的影响，以及制定与实验结果十分吻合的电磁计算方法时应用。

近来，技术科学博士O.П.高德别尔克教授在电机可靠性方面所进行的研究工作^[12, 13]，使制定磁性槽楔试验与可靠性估计的方法成为可能，并已提出了对磁性槽楔材料的技术要求。作者认为，在研究磁性槽楔交流电机的电磁计算问题上，技术科学博士T.Г.索洛盖尔教授提出的方法比较好^[14, 15]，适于工程应用。

本书第四章引用了化学硕士B.П.盖拉西莫夫和П.В.彼夫兹涅尔提供的详细材料。工程师B.С.贝什戈夫编制的磁性槽楔电机齿区参数的计算程序。

技术科学博士H.С.西乌诺夫教授和技术科学硕士A.Э.克拉夫契克在审阅本书手稿的过程中提出了宝贵的意见，工程师Ю.М.戈瓦列夫、M.С.涅多列佐夫和B.В.彼得良戈夫为本书的出版给予了很大帮助，在此，作者谨向他们表示感谢。

作者希望，本书对于磁性槽楔电机的设计、制造和运行有所裨益。

作 者

目 录

译者的话	
序 言	
第一章 气隙与槽楔中的磁场	1
第一节 磁场方程式	1
第二节 气隙磁场的谐波分析	14
第三节 磁性槽楔的磁拉力	24
第二章 磁性槽楔电机的参数	29
第一节 齿区参数	29
第二节 磁性槽楔电机的特性	36
第三章 附加损耗和振动声学特性	50
第一节 附加损耗	50
第二节 振动声学特性	56
第四章 磁性槽楔	61
第一节 对材料的技术要求	61
第二节 磁性槽楔的试验方法	62
第三节 磁性槽楔的材料和制造工艺	66
第五章 齿区参数的计算	73
第一节 计算导磁率	73
第二节 齿区参数计算举例	75
结束语	85
附 录 计算齿区参数的整套程序	87
参考文献	102

第一章 气隙与槽楔中的磁场

第一节 磁场方程式

交流电机的定子绕组，通常是由嵌装到铁芯槽内的线圈组成。线圈用绝缘材料（聚合薄膜板、玻璃纤维板、胶纸板等）制成的槽楔固定。异步电机绕线式转子也具有类似的结构。下面的分析，对在定子或转子上采用磁性槽楔都适用。

转子和定子之间气隙中的磁场分布是非正弦的。空间磁场的高次谐波对电机特性有不良的影响，它使效率降低，温升增加，振动声学指标降低，使异步电动机转矩曲线畸变，导致发电机电压波形变坏。这些现象在定子（转子）为开口槽的电机上最为突出。

正如许多研究结果所证明的那样^[1~11]，当换以磁性槽楔后，定子（转子）槽上磁场曲线的低谷明显地减小（图1-1），从而降低了高次谐波的有害影响。为了估计磁性槽楔电机的性能，必须知道在转子和定子之间气隙和槽楔内的磁场分布图形。由于铁芯和槽楔的导磁率与磁场强度有关，且均为时间的函数，所以计算磁场的这种分布，应归结为求解非线性偏微分方程组。这个问题的数字求解，即使采用现代快速电子计算机也要花费大量的上机时间。

为了使磁场分布能线性化求解，通常作下述简化假设^[14~16]：

1. 铁芯中磁位降比气隙的磁位降小，可忽略不计。
2. 槽内的绕组不影响所研究的齿、槽楔和气隙中的

磁场。

3. 转子(定子)是平滑的。这样,当分析定子磁场时,可把转子视为平滑的,只是在取气隙值时要考虑转子的气隙系数。反之,在分析转子磁场时,可认为定子是平滑的,只是在取气隙值时,要考虑定子气隙系数。

4. 不考虑定子内表面的曲率。认为齿区是长方形。

5. 不考虑磁滞和涡流的影响。

6. 磁场是平行平面场。

7. 齿部磁位为某一恒定值;平滑面上的磁位为零,相当于理想的空载工况。

8. 各段槽楔的导磁率 μ_i ($i=1, 2, 3\cdots$) 为恒定值(图1-2)。

9. 铁芯的齿宽大于气隙 δ 的四倍,因而齿上的磁场相当均匀,且每个齿区的磁场可以视为与相邻齿区的磁场无关。

基于上述的简化假设,计算电机齿区的磁场问题,可以归结为求解一个符合拉普拉斯方程的标量磁位函数 φ

$$\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 = 0 \quad (1-1)$$

当采用上述的简化假设,又根据给定的边界条件,方程式(1-1)有唯一解^[16]。但由于计算复杂,在工程上并不适用。

然而,只要再引用一些补充的假设^[16],就可 用相当简便的方法,求得符合工程要求的解:

1. 仅槽楔部位参与槽的上部和槽楔内部所形成的磁场,穿过槽楔的磁通不流向绕组。

2. 定子(转子)齿上部的磁密为常量。如文献[17]指出,主磁通进入槽内的深度,即使是非磁性槽楔电机,也仅等于槽的宽度 b_m ,而在距槽壁距离为转子和定子间气隙 δ 处的齿面上的磁密,实际上是与齿面垂直的。

3. 磁性槽楔与定子内表面（转子外表面）相平。

4. 气隙磁场的磁力线与转子和槽楔表面垂直；而在槽楔中，则与转子和槽楔表面平行。

5. 不考虑槽楔高度 h 方向的磁位降。

假设 4 和 5 基于如下事实：空气间隙 δ 和槽楔高度 h 要比电机的铁芯和槽的几何尺寸小得多。

应用上述假设，即可分析装有 N 段、相对导磁率为 μ_r 的磁性槽楔定子（转子）槽的磁场（图 1-2）。因为所分析的是平行平面磁场，故下面的讨论可仅取单位电机长度。这里和以后，转子和定子间气隙取为：

$$\delta = \delta' k_\delta \textcircled{1}$$

式中 δ' ——转子和定子间的实际气隙；

k_δ ——平滑面的气隙系数。

取槽的对称轴为坐标原点。在第 i 段且坐标为 x 的截面上的磁通 $\Phi_i(x)$ 为：

$$\Phi_i(x) = \Phi(x_i) - \varphi_i(x) \textcircled{2} \quad (1-2)$$

式中 $\Phi(x_i)$ ——槽楔 x_i 截面处的磁通；

$\varphi_i(x)$ ——在长度为 $x - x_i$ 槽楔上，向转子分流的磁通。

显然，

$$\varphi_i(x) = \int_{x_i}^x B_{\Gamma i}(x) dx$$

① 原文为 “ $k_{\delta 1}$ ”，为全书统一，改为 “ k_δ ” ——译者

② 根据原文图 1-2 座标，本式似应改为： $\Phi(x_i) = \Phi_i(x) - \varphi_i(x)$ ，由其推得的式(1-3)也应改写为：

$$B_K(x_i) = B_{K i}(x) - \frac{1}{h} \int_{x_i}^x B_{\Gamma i}(x) dx \text{ 和 } \frac{dB_{K i}(x)}{dx} = \frac{1}{h} B_{\Gamma i}(x) \text{ ——译者}$$

式中 $B_{\Gamma i}(x)$ ——第 i 段槽楔所对应的平滑表面上的磁密。

认为磁力线沿槽楔厚度的分布密度为定值, 将式 (1-2) 的两边除以槽楔高度 h , 并将磁通以磁密表示, 则

$$\left. \begin{aligned} B_{K i}(x) &= B_K(x_i) - \frac{1}{h} \int_{x_i}^x B_{\Gamma i}(x) dx \\ \frac{dB_{K i}(x)}{dx} &= -\frac{1}{h} B_{\Gamma i}(x) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 $B_{K i}(x)$ ——第 i 段槽楔 x 截面上的磁密。

第 i 段槽楔 x 截面上的磁位 $F_i(x)$ 为:

$$F_i(x) = F(x_i) - G_i(x) \quad (1-4)$$

式中 $F(x_i)$ —— x_i 槽楔截面处的磁位;

$G_i(x)$ ——在槽楔 $x-x_i$ 长度上的磁位降。

显然,
$$G_i(x) = \int_{x_i}^x H_i(x) dx$$

式中 $H_i(x)$ —— i 段槽楔的磁场强度。

因为 $F_i(x) = B_{\Gamma i}(x) \delta / \mu_0$ 和 $H_i(x) = B_{K i}(x) / \mu_{K i}$ ②, 由式 (1-4) 得:

① 根据原文图1-2座标, 本式似应改为: $F(x_i) = F_i(x) - G_i(x)$, 由其推得的式(1-5)也应改写为:

$$F(x_i) = \frac{B_{\Gamma i}(x)}{\mu_0} \delta - \int_{x_i}^x \frac{B_{K i}(x)}{\mu_{K i}} dx$$

和
$$\frac{dB_{\Gamma i}(x)}{dx} = \frac{B_{K i}(x)}{\delta \mu_i} \quad \text{——译者}$$

② 原文误为 “ $H_i(x) = B_{K i} / \mu_{K i}$ ” ——译者

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_{\Gamma i}(x)}{\mu_0} \delta &= F(x_i) - \int_{x_i}^{\infty} \frac{B_{K i}(x)}{\mu_{K i}} dx \\ \frac{dB_{\Gamma i}(x)}{dx} &= -\frac{B_{K i}(x)}{\delta \mu_i} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 μ_0 ——真空导磁率；

$\mu_{K i}$ —— i 段槽楔的绝对导磁率；

μ_i —— i 段槽楔的相对导磁率^①。

为确定电机气隙和磁楔中的磁密分布，必须同时求微分方程式 (1-3) 和 (1-5) 的解。其解为：

$$B_{K i}(x) = C_i \operatorname{ch}(k_i x) + D_i \operatorname{sh}(k_i x) \quad (1-6)$$

$$B_{\Gamma i}(x) = -h k_i [C_i \operatorname{sh}(k_i x) + D_i \operatorname{ch}(k_i x)] \quad (1-7)$$

$$k_i = 1/\sqrt{h \delta \mu_i} \quad (1-8)$$

在式 (1-6) 和 (1-7) 中的 C_i 和 D_i ，是由边界条件决定的积分常数。

考虑到对称情况 (图1-3)，槽内无电流时，相邻齿的磁位相等且符号相同；当槽内有电流时，相邻齿的磁位相等，但符号相反。导磁率为 μ_{i-1} 和 μ_i 的任意两段槽楔边界 x_i 上，应当满足下述关系式：

$$B_{K(i-1)}(x_i) = B_{K i}(x_i) \quad (1-9)$$

$$B_{\Gamma(i-1)}(x_i) = B_{\Gamma i}(x_i) \quad (1-10)$$

在齿-槽楔的左交界面上 (图1-3)，

$$B_{\Gamma}(-b_m/2) = B_m \quad (1-11)$$

在槽楔-齿的右交界面上，

$$\text{无电流槽的} \quad B_{\Gamma}(b_m/2) = B_m \quad (1-12)$$

① 原文对 μ_i 无说明，为便于阅读，作此补充——译者

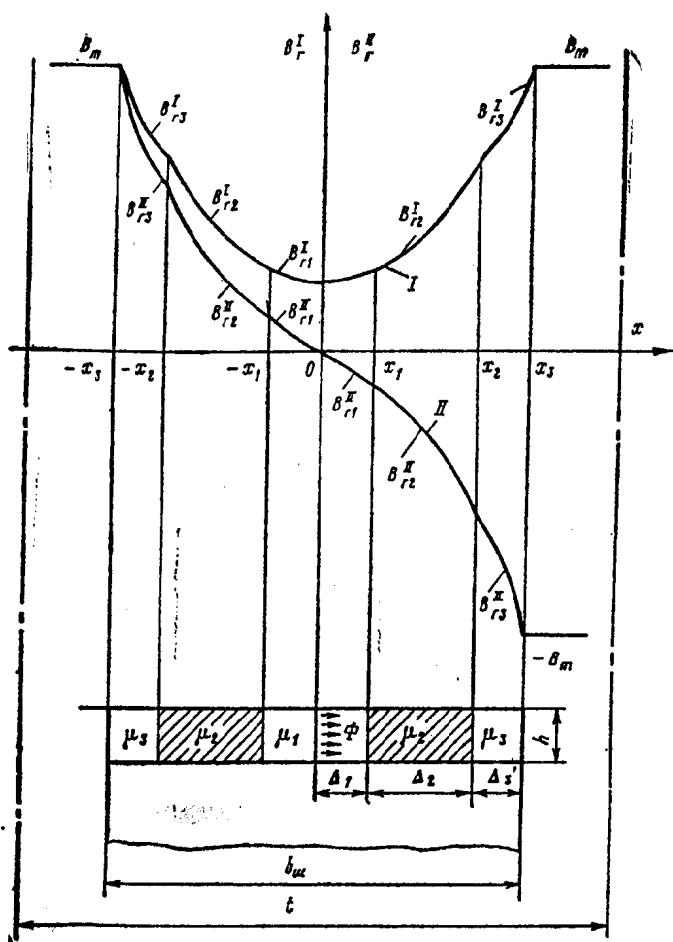


图 1-3 三段 ($N=3$) 磁性槽楔
 $B_r^I(x)$ —槽内无电流; $B_r^{II}(x)$ —槽内有电流

有电流槽的 $B_r(b_m/2) = -B_m$ (1-13)
 式中 b_m ——磁性槽楔宽度。

由边界条件式 (1-9) ~ (1-13), 即可确定积分常数 C_1 和 D_1 。有时利用 $B_r(x)$ 和 $B_k(x)$ 曲线的对称性作为边界条件, 往往是很方便的。这时在没有电流的槽中心线上

$$B_k(0) = 0 \quad (1-14)$$

在有电流的槽中心线上

$$B_r(0) = 0 \quad (1-15)$$

整节距单线圈在齿上的磁密最大值, 可采用众所周知的公式^[13]计算

$$B_m = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{O_m}{2} \quad (1-16)$$

式中 O_m ——槽内总电流的最大值。

如果长度以 m 表示 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$), 则式 (1-6) ~ (1-8) 和 (1-16) 中的磁密的单位为 T。

利用式 (1-6) ~ (1-13), 可以计算段数 N 为任意值时槽楔的积分常数, 从而便能研究复型槽楔的磁场。

对于 $N = 2$ 的槽楔, 如果槽内没有电流, 则积分常数为:

$$C_1 = 0 \quad (1-17)$$

$$C_2 = \frac{B_m [k_1 \text{ch}(k_1 A_1) \text{sh}(k_2 A_1) - k_2 \text{ch}(k_2 A_1) \text{sh}(k_1 A_1)]}{hk_2 [k_1 \text{ch}(k_1 A_1) \text{ch}(k_2 A_2) + k_2 \text{sh}(k_1 A_1) \text{sh}(k_2 A_2)]} \quad (1-18)$$

$$D_1 = \frac{-B_m}{h [k_1 \text{ch}(k_1 A_1) \text{ch}(k_2 A_2) + k_2 \text{sh}(k_1 A_1) \text{sh}(k_2 A_2)]} \quad (1-19)$$

$$D_2 = \frac{-B_m [k_1 \text{ch}(k_1 A_1) \text{ch}(k_2 A_1) - k_2 \text{sh}(k_1 A_1) \text{sh}(k_2 A_1)]}{hk_2 [k_1 \text{ch}(k_1 A_1) \text{ch}(k_2 A_2) + k_2 \text{sh}(k_1 A_1) \text{sh}(k_2 A_2)]} \quad (1-20)$$

当 $N = 2$, 且槽内有电流时

$$C_1 = \frac{B_m}{h[k_1 \text{sh}(k_1 \Delta_1) \text{ch}(k_2 \Delta_2) + k_2 \text{ch}(k_1 \Delta_1) \text{sh}(k_2 \Delta_2)]} \quad (1-21)$$

$$C_2 = \frac{-B_m[k_1 \text{sh}(k_1 \Delta_1) \text{sh}(k_2 \Delta_1) - k_2 \text{ch}(k_1 \Delta_1) \text{ch}(k_2 \Delta_1)]}{k_2 h[k_1 \text{sh}(k_1 \Delta_1) \text{ch}(k_2 \Delta_2) + k_2 \text{ch}(k_1 \Delta_1) \text{sh}(k_2 \Delta_2)]} \quad (1-22)$$

$$D_1 = 0 \quad (1-23)$$

$$D_2 = \frac{B_m[k_1 \text{sh}(k_1 \Delta_1) \text{ch}(k_2 \Delta_1) - k_2 \text{sh}(k_2 \Delta_1) \text{ch}(k_1 \Delta_1)]}{k_2 h[k_1 \text{sh}(k_1 \Delta_1) \text{ch}(k_2 \Delta_2) + k_2 \text{ch}(k_1 \Delta_1) \text{sh}(k_2 \Delta_2)]} \quad (1-24)$$

式中 Δ_1 和 Δ_2 ——导磁率为 μ_1 和 μ_2 的磁性槽楔对应段的长度。

将 μ_1 和 μ_2 值代入式 (1-8)，可得对应段的系数 k_1 和 k_2 。实际所采用的结构 $N \leq 3$ (图 1-3)。

关于采用不同段数槽楔的问题，在第二章将作进一步叙述。

只有一段 ($N=1$) 的磁性槽楔， $\mu_1=\mu_2=\mu$ ， $\Delta_2=0$ 和 $\Delta_1=b_m/2$ 。在这种情况下，如果槽内没有电流，则 (1-6) 和 (1-7) 式变为下列形式：

$$B_K^I(x) = \frac{-B_m \sqrt{h\delta\mu}}{h \text{ch}(b_m/2\sqrt{h\delta\mu})} \text{sh} \left(\frac{x}{\sqrt{h\delta\mu}} \right) \quad (1-25)$$

$$B_\Gamma^I(x) = \frac{B_m}{\text{ch}(b_m/2\sqrt{h\delta\mu})} \text{ch} \left(\frac{x}{\sqrt{h\delta\mu}} \right) \quad (1-26)$$

如果槽内有电流，则

$$B_K^{II}(x) = \frac{B_m \sqrt{h\delta\mu}}{h \text{sh}(b_m/2\sqrt{h\delta\mu})} \text{ch} \left(\frac{x}{\sqrt{h\delta\mu}} \right) \quad (1-27)$$