

# 高速异步电机转子闭口槽集肤效应预测

方瑞明 郑力新 黄东海

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

**摘要** 由于逆变电源中大量谐波分量的存在, 高速异步电机转子槽中的集肤效应现象更加严重. 因此, 在电机设计和分析过程中, 必须准确考虑集肤效应对转子参数的影响. 首先, 采用有限元法分析不同转子槽形的集肤效应系数. 在此基础上, 利用有限元法精确计算结果, 提出一种人工神经网络的非线性映射能力预测电机转子集肤效应系数的新方法. 该方法能够快速、准确的给出不同槽形、不同频率时的集肤效应系数.

**关键词** 高速异步电机, 转子槽, 集肤效应, 预测, 神经网络

**中图分类号** TM 343.06

**文献标识码** A

导体处于交变电磁场中时, 除了负载电流以外, 导体内还有涡流. 涡流使导体中电流趋于表面, 导致导体交流电阻增大, 漏抗变小. 这种现象称之为集肤效应. 在实际计算中, 我们以系数  $k_f$  来计及电阻增加, 以系数  $K_x$  来计及电抗的减少. 高速异步电机一般采用中频变频器供电. 由于变频器输出电压中谐波分量的影响, 电机转子电流的频率较高<sup>[1]</sup>. 导体中存在着较强的集肤效应, 导致转子导条中电密和磁密的分布不均匀. 从而, 影响转子回路的电阻与电抗, 并进而影响电机的运行性能. 因此, 准确地计算电机转子导条集肤效应系数, 这对高速异步电机设计、运行性能分析, 以及电机调速控制都具有重要的意义. 本文将对异步电机转子常用槽形的集肤效应进行分析. 在此基础上, 采用神经网络实现电机转子导条集肤效应系数的工程预测.

## 1 转子常用槽形的集肤效应分析

目前, 关于集肤效应的计算主要有解析法和有限元法两种. 前者以 Liwschitz 算法具有代表性, 较为通用的异步电机电磁计算程序<sup>[2]</sup>即采用这种方法. 但是, 此种方法中关于集肤效应计算的修正系数主要针对工频电机, 已不能满足高速异步电机的要求. 与解析法相比, 有限元法的计算精度有显著提高. 因此, 本文采用有限元计算软件 ANSYS, 分析异步电机转子不同槽形时集肤效应系数.

应用有限元方法算鼠笼导条的集肤效应, 首先要求解转子槽内正弦时变电磁场的分布情况. 求解区域选取一个转子齿槽, 忽略端部效应的影响. 此时, 所求解的问题是二维涡流场问题. 下面就分闭口槽和半开口槽两种情况, 讨论其有限元分析模型. 其边值方程, 在转子导条内、转子槽与铁芯交界处、转子槽口或边界上时有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z + j\omega A_z, \quad \frac{\partial A_z}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial A_z}{\partial n} = \frac{I_2}{b_{r0}}, \quad A_z = 0. \quad (1)$$

在式(1)中,  $J_z$  为转子导条内电密,  $I_2$  为转子导条电流,  $b_{r0}$  为转子槽口宽,  $\rho_r$  为转子导条电阻率,  $\omega$  为转子电流角速度,  $\omega = 2\pi f_2 = 2\pi s f_1$ ,  $s$  为电机转差率. 作为二维问题分析, 向量磁位和电密只有  $z$  向分量  $A_z$  和  $J_z$ . (1) 槽口边界上的点为一类边界条件, 考虑到磁势为相对值, 可以取为零. (2) 不考虑铁芯饱和的影响, 即铁芯磁导率为无穷大. (3) 磁力线水平地通过槽口.

**收稿日期** 2003-05-24

**作者简介** 方瑞明(1972-), 男, 讲师, 博士, 主要从事电机设计的研究. E-mail: fangrm@hotmail.com

**基金项目** 华侨大学科研基金资助项目(03B01)

闭口槽模型的分析区域选择一个完整的转子齿槽. 此时, 其边值方程<sup>[3]</sup>在转子导条内、 $x$  和  $x$  转子齿槽为径向对称点、在弧  $BC$  处时, 有下列<sup>[3]</sup>式(2) ~ 式(4). 即

$$\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y}) = -J_z + j(A_z - A_{z0}), \tag{2}$$

$$A_{zx} = A_{zx} \exp(-j \frac{2P}{Q_2}), \tag{3}$$

$$\frac{\partial A_z}{\partial n} = \frac{I_1}{BC}. \tag{4}$$

在式(2) ~ 式(4)中,  $A_{z0}$ 为转子导条内磁势  $A$  的平均值,  $\mu$  为铁芯材料有效磁导率,  $x$  和  $x$  为剖分区域沿径向边界的对称点,  $p$  为电机极对数,  $Q_2$  为转子槽数,  $I_1$  为弧  $BC$  处施加的定子等效电流.

应用有限元法解上述方程, 可求出转子槽内各节点的磁势值, 以及槽内各单元的场强值磁场分布. 然后, 依据下面公式, 计算各频率下电阻电抗的变化系数<sup>[4]</sup>. 电阻增加系数为

$$K_F = \frac{R_U}{R} = \frac{\int J_z^2 ds}{J_z^2 S_b} = \frac{\int_{e=1}^E J_{ez}^2}{J_z^2 S_b} = \frac{\int_{e=1}^E (J_{eR}^2 + J_{eI}^2)}{J_z^2 S_b}. \tag{5}$$

在式(5)中  $R_U, R$  为转子导条交流电阻和直流电阻,  $J_{ez}$  为涡流场时的单元平均电密,  $J_{ez} = J_{sz} - j A_{ze(av)}$ , 其中  $J_{sz}$  为单元自由电密,  $A_{ze(av)}$  为单元 3 个节点的平均磁位,  $J_{eR}$  和  $J_{eI}$  分别为单元  $e$  内复电密的实部和虚部,  $e$  为有限元剖分单元面积,  $S_b$  为转子导条面积. 电感减少系数为

$$K_x = \frac{L_U}{L} = \frac{S_b \int B^2 ds}{S_b B^2 ds_{(=0)}} = \frac{\int_{e=1}^E (B_{ex}^2 + B_{exI}^2 + B_{eyR}^2 + B_{eyI}^2)}{\int_{e=1}^E (B_{ex}^2 + B_{ey}^2)} \tag{6}$$

式中  $L_U, L$  为转子导条交流电感和直流时的电感,  $B_{exR}^2, B_{exI}^2$  和  $B_{eyR}^2, B_{eyI}^2$  分别为单元  $e$  内的  $B_x$  和  $B_y$  的实部和虚部.

本文采用上述方法分别计算一台高速电机, 在转子导条材料和截面积相同(即转子导条直流电阻相同), 而槽形不同(保持转子齿部磁带和导条电密不变)时的集肤效应系数, 如图 1 所示.

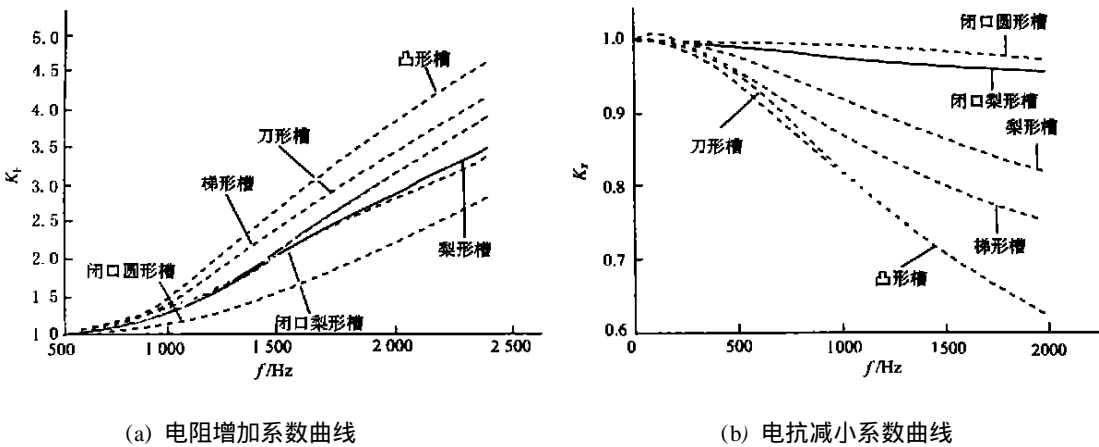


图 1 电机转子不同槽形时的集肤效应系数

表 1 列出了 1 700 Hz 时, 转子不同槽形时集肤效应系数. 可以看出, 闭口槽能够削弱集肤效应现象. 在同等条件下, 电机采用闭口槽时转子导条的电阻增加系数最小, 可以降低电机损耗. 不仅如此, 采用闭口槽还能够有效削弱电机齿谐波, 从而减小电机杂散损耗, 提高电机效率. 因此, 高速变频电机设计时转子应优先选取闭口槽, 尤其是闭口圆形槽.

表 1 不同槽形的集肤效应系数比较

转子槽形	闭口圆形槽	闭口梨形槽	梨形槽	梯形槽	刀形槽	凸形槽
$K_F$	2.411 6	3.064 1	3.209 3	3.379 6	3.672 8	4.100 6
$K_x$	0.949 3	0.921 6	0.778 3	0.844 7	0.670 6	0.669 4

进一步研究槽桥高度(即导条上部至转子外表面的高度)对电机转子闭口圆形槽集肤效应的影响,结果如图 2. 可见,随着槽桥高度的增加,电机的集肤效应也将加剧. 这样,闭口圆形槽的集肤效应系数与开

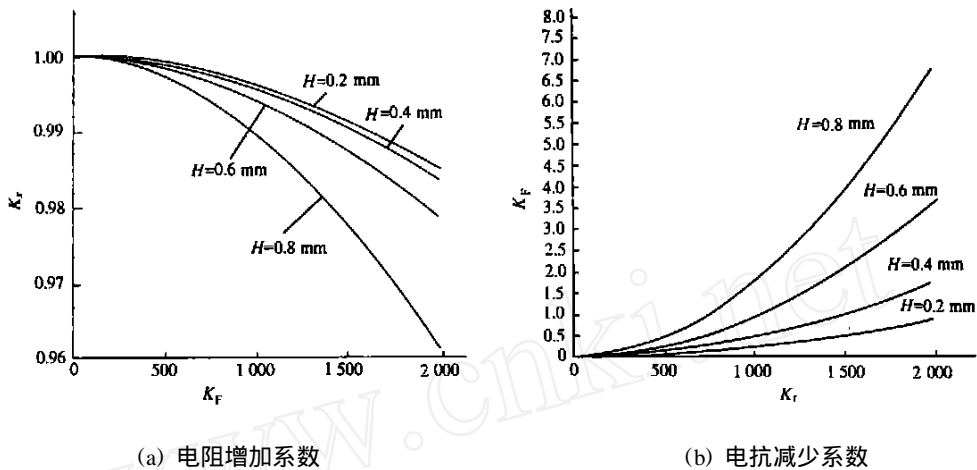


图 2 闭口圆形槽集肤效应系数与槽桥高度的关系

口槽相近,失去了采用闭口槽的意义. 因此,在设计闭口圆形槽时,槽桥高度不能太高. 但受加工精度及机械强度的限制,槽桥高度也不能太低. 在实际设计时,可以在 0.20 ~ 0.50 mm 之间取值.

## 2 集肤效应系数预测神经网络模型设计

采用有限元分析的方法计算电机集肤效应,只要边界条件选择及网格剖分得当,具有很高的计算精度. 但是,有限元法的边界条件确定比较困难,对计算机资源要求较高、计算时间长. 电机设计和仿真都是一个要求反复迭代计算的过程,有限元法很难嵌入其中. 因此,理想的方法是在电机设计和分析过程中直接利用有限元法的计算结果. 基于 BP 算法的多层前向神经网络模型,能够实现从输入到输出的高度非线性映射. 目前,它广泛应用于复杂非线性领域的预测问题<sup>[5]</sup>. 采用 BP 神经网络模型预测集肤效应系数,只要训练得当,其结果既具有路的方法的快速性,又具有场的方法的准确性. 在高速异步电机仿真与分析程序中嵌入训练后的神经网络模型,可以有效解决计算量和计算准确性之间的矛盾. 考虑到电机转子的槽形不同,如果采用一个单一的神经网络模型以实现多种槽形的集肤效应系数预测的话,那么,神经网络的规模会过于庞大,使得神经网络的训练过程漫长,难于收敛. 因此,针对不同槽形的特点,可以采用不同结构的神经网络模型. 下面以转子闭口圆形槽为例,具体说明其实现过程.

### 2.1 网络结构的确定

神经网络的结构,是根据所研究问题的具体情况确定的. 一般来讲,网络输入层神经元节点数就是系统的特征因子(自变量)个数,输出层神经元节点数就是系统目标个数. 文[6]证明用一个 3 层的 BP 网络,可以完成任意的  $n$  维到  $m$  维的映射. 因此,采用单隐层网络,对于闭口圆形槽,其输入神经元为槽桥高度、槽半径、导条电阻率、导条电流频率. 考虑到这几个输入自变量的数量级相差较大,为加快收敛过程,需要进行规范化处理,转换到  $[0, 1]$  区间. 输出神经元为电阻增加系数和电抗减少系数. 隐含层节点数对 BP 网络的影响较大. 隐层节点数目过少,网络将不能建立复杂的判断,使网络训练不出来,或不能识别以前没有的样本,且容错性差. 节点数目过多,学习时间过长,网络的泛化能力降低. 本文采用的隐含层节点数通过试验确定为 7, BP 网络结构为 4 7 2.

### 2.2 网络训练

本文以图 2 计算结果,作为训练样本. 采用变动量因子和动态学习率的改进 BP 算法,进行网络训练. 其方法可参考文献[6].

### 2.3 集肤效应预测

通过上述训练过程,神经网络各神经元的连接权值与阈值便可确定. 然而,采用神经网络技术的目的在于寻找蕴涵在样本数据中输入和输出的本质联系. 从而,对于未经训练的输入也能给出合适的数值,即实现泛化. 因此,对于 BP 网络还需要用一组独立于训练数据之外的数据,对训练完成的网络加以

测试. 只有训练和测试的误差均在容许范围之内, 此时的连接权值矩阵才是所求的解. 图 3 为槽桥高等于 0.36 mm 时, 采用神经网络计算结果与有限元法结果的比较. 可以看出, 采用神经网络计算集肤效应

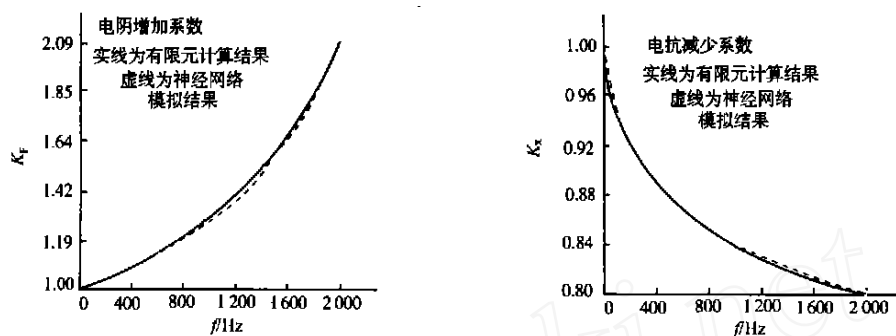


图 3 采用 BP 网络计算的闭口圆形槽集肤效应系数

系数具有较高的精度, 而计算时间却远少于有限元法.

### 3 结束语

本文对高速变频电机转子槽的集肤效应系数的计算方法, 进行了研究. (1) 用有限元法对不同转子槽型在不同频率时的集肤效应进行了分析, 指出闭口圆形槽能够有效削弱集肤效应的影响. 所得结果对于高速变频电机转子冲片设计, 具有指导意义. (2) 提出一种集肤效应系数预测新方法. 即利用人工神经网络的非线性映射能力和有限元算法的精确计算结果, 预测不同槽型不同频率时的集肤效应系数. 该方法与磁路法结合, 可以改进传统磁路法的分析精度.

### 参 考 文 献

- 1 方瑞明. 高速变频电机设计与电机智能设计方法研究[D]. [学位论文]. 南京: 东南大学电气工程系, 2002. 17 ~ 18
- 2 上海电器科学研究所编. 中小型电机设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 70 ~ 74
- 3 Williamson S, Lim L H, Robinson M J. Finite element models for cage induction motor analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(6): 1 007 ~ 1 017
- 4 汤蕴缪. 电机内的电磁场[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 173 ~ 175
- 5 谢开贵, 李春燕, 周家启. 基于神经网络的负荷组合预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 85 ~ 89
- 6 Yu X, Loh N K, Miller W L. Comparisons of four learning algorithms for training the multi-layer feed forward neural networks with hard limiting neurons[J]. IEEE Neural Networks Theory, 1996, 7(4): 546 ~ 553

## Predicting the Skin Effect on Closed Slot of Rotor in High-Speed Motor

Fang Ruiming Zheng Lixin Huang Donghai

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** Owing to the existence of enormous harmonic components in the inverter, the phenomenon of skin effect in high-speed asynchronous motor becomes even more serious. The influence of skin effect on rotor parameters must be accurately considered. The authors analyse at first the skin effect coefficient on rotor slot of different shapes by adopting finite element method; and then predict the skin effect coefficient of motor rotor by a new method which combines nonlinear mapping ability of artificial neural network with finite element method. By this new method, skin effect coefficients of different slot shapes and different frequencies can be accurately given.

**Keywords** high-speed asynchronous motor, rotor slot, skin effect, prediction, neural network