

基于 ANSYS 的履带式永磁磁选机磁场模拟

卢东方, 王毓华, 何平波, 孙 伟, 胡岳华

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用 ANSYS 软件中的电磁场分析模块, 分别采用 plane13 和 plane53 磁结构单元对履带式永磁磁选机的平面 $N-S$ 交替排列磁系进行模型构建和网格划分, 对磁系的磁场特征进行仿真和分析, 并通过理论公式计算分析两种磁结构单元的仿真误差。结果表明: 磁场仿真时, 靠近磁极表面处磁感应强度误差较小, 随着距磁极表面距离的增大, 磁感强度的误差逐渐增大。plane53 磁单元的磁场仿真结果较 plane13 的更加准确, 磁极表面的磁感强度与理论计算的相对误差为 2.08%; 在距离磁极表面 0.5cm 以内, 磁感强度的相对误差平均为 6.72%, 其误差范围可以满足履带式永磁磁选机设计的要求, 因此, 可以采用 ANSYS 电磁场分析模块中的 plane53 磁结构单元进行履带式永磁磁选机磁系设计。

关键词: 永磁磁选机; 磁系; ANSYS 软件; 模拟; 相对误差

中图分类号: TD923

文献标志码: A

Simulation of magnetic field on tracked permanent magnetic separator based on ANSYS

LU Dong-fang, WANG Yu-hua, HE Ping-bo, SUN Wei, HU Yue-hua

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By the electromagnetic field analysis module in ANSYS software, the plane13 and plane53 magnetic structure units were, respectively, used to build model and generate mesh on the planar $N-S$ arranged alternatively magnetic system of tracked permanent magnetic separator, the magnetic field distribution of the magnetic system was simulated. Then, the simulation errors of plane13 and plane53 were calculated through theoretical formula. The results indicate that the simulation error is small near the magnetic pole surface, and increases with the increase of distance to magnetic pole surface. The magnetic intensity simulation result of plane53 is more accurate than that of plane13. Comparing simulation results with the theory results, the relative error on magnetic pole surface is only 2.08% using plane53, and the average relative error is 6.72% within 0.5 cm of magnetic pole surface. Obviously, this error band can meet the demand of the tracked permanent magnetic separator design, so, plane53 can be used to design magnetic system of the tracked permanent magnetic separator.

Key words: permanent magnetic separator; magnetic system; ANSYS software; simulation; relative error

永磁磁选机无激磁功耗, 其磁系不需要冷却系统, 且结构紧凑、质量轻、占地少、制造和运行成本低、操作维护方便, 是一种节能省耗、高效廉价设备^[1]。磁选机的永磁化是磁选机的主要发展方向之一^[2], 而磁系则是磁选设备的核心和关键部位^[3], 因此, 对磁

选设备磁场特性进行研究就是对磁系结构的磁场特性进行研究^[4]。磁场分布特性是决定磁选效果的重要因素之一^[5], 因此, 对磁系磁场特性的研究也就显得尤为重要。目前, 反复试验和经验公式计算是研究磁系磁场的主要方法^[6], 反复试验成本高且费时费力, 而

对于复杂的磁系,要求出磁场的解析式也是非常困难的,因此,这类研究常常因为缺乏方便实用的计算手段,无法确定永磁体的尺寸和性能,甚至导致磁系设计的失败。

ANSYS 是基于数值计算的一种大型通用有限元软件,可以方便地对磁系进行建模和分析,并可以形象地画出磁力线分布以及磁场强度的云图,较为准确地给出各点数值^[7-9]。ANSYS 电磁仿真技术已应用于永磁体磁场计算和机电设计,如 BENABOU 等^[10]利用有限元模型计算 NdFeB 永磁体随着温度变化时的磁损耗;赵善彪等^[11]利用 ANSYS 仿真出瓦形永磁体磁场分部,并通过试验验证仿真的正确性;张荣岭等^[12]对条形永磁开路漏磁导磁场进行仿真计算;吴亚麟^[13]对稀土永磁同步电动机气隙磁场进行研究,求出空载气隙二维磁场的磁密分布曲线。但有关 ANSYS 软件在永磁磁选机磁系研究中应用鲜见报道。本文作者采用 ANSYS 软件的不同磁单元结构对履带式永磁磁选机磁系进行建模和分析,得到磁场分布特征、磁场强度值和磁力线分布等结果,而后通过等效磁荷法和经验公式对仿真结果进行验证和误差分析,最终确定可用于履带式永磁磁选机磁系设计和仿真的 ANSYS 磁结构单元。

1 履带式永磁磁选机的结构

履带式永磁磁选机的结构如图1所示。

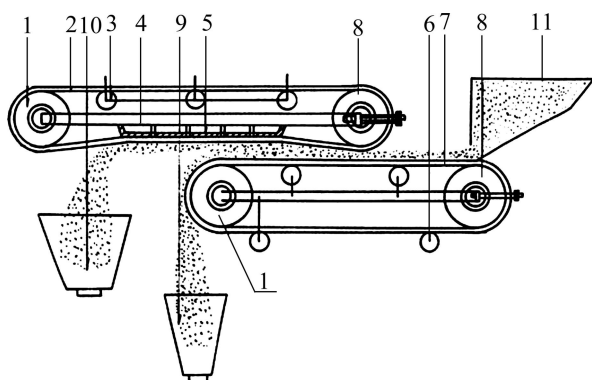


图1 履带式永磁磁选机的结构

Fig. 1 Structure of tracked permanent magnetic separator: 1, 8—Electric roller; 2, 7—Transport belt; 3, 6—Roller; 4—Fixed mounts; 5—Magnetic system; 9—Tailing box; 10—Concentrate box; 11—Feed box

履带式永磁磁选机主要由电动滚筒、运输皮带、托辊、磁系、滚筒、尾矿箱和精矿箱等部件组成,设备进行分选作业时,首先启动电动滚筒,使电动滚筒

上的皮带进行运转,当矿石从送料口到运输皮带表面后,非磁性矿石由于不会受到磁力的作用,落到尾矿箱内,而磁性矿石在磁系产生的磁场力作用下由运输皮带7上被吸引至运输皮带2上,进入精矿箱,因此,可以实现磁性物料与非磁性物料的分选。

履带式永磁磁选机的磁系为平面N-S交替排列磁系,采用合理的计算及仿真方法对其磁场特性进行表征是履带式永磁磁选机设计中最为重要的环节。

2 平面 N-S 交替排列磁系的建模及仿真

本文作者利用有限元分析软件 ANSYS10.0 对履带式永磁磁选机磁系(为了便于研究,取其中的4个磁极为研究对象)进行模拟计算,磁系为 N45 钕铁硼材料,建模时分别采用 plane13(四边形4节点)和 plane53(四边形8节点)磁结构单元对磁系空间进行划分,采用 2-D 磁矢量位法(MVP 法)对磁系的磁场进行求解。

2.1 模拟磁系与网格划分

所模拟磁系单元及其空间位置见图2,磁系单元有4个磁极组成,磁极为 N45 钕铁硼材料,剩磁 $B_r=1.32$ T,矫顽力 $H_c=923$ kA/m,磁极的相对磁导率 $\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} = 1.18$,其中 μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A; N、S 极交替排列,磁系下端导磁履带的相对磁导率 $\mu_r = 1000$ 。模拟空间采用 plane13 四边形磁单元划分时,节点总数为 1940 个,采用 plane53 四边形磁单元划分时,节点总数为 5726 个。磁系单元所在空间的网格划分见图3。

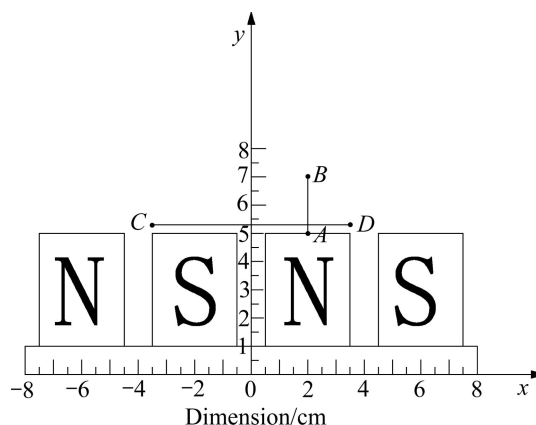


图2 模拟的磁系单元及其空间位置

Fig. 2 Magnetic system simulated and its local space

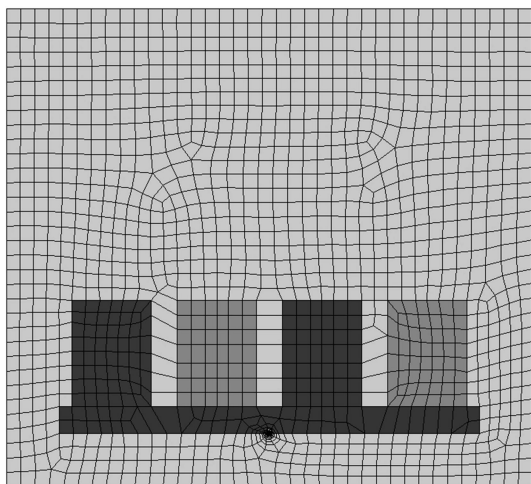


图3 磁系单元所在空间的网格划分

Fig. 3 Mesh generation of magnetic system in space

2.2 磁矢量位法(MVP)求解方程

在永磁场中, 忽略位移电流、电流密度和电场强度, 麦克斯韦方程变为 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$; ∇ 为散度算子; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量。由于磁场的无散性, 引入矢量函数 $\mathbf{A}$, 使 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, 因此,

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (1)$$

由安培环路安律微分式 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ 和导磁媒质中

$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, 可得 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}$, 将 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 代入此式,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (2)$$

根据矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (3)$$

在磁场中, 要确定一个矢量, 必需确定其散度和旋度, 应用库伦规范式: $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 因此 $\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}$, 表明矢量 $\mathbf{A}$ 满足矢量形式的泊松方程, 它相当于 3 个标量形式的泊松方程, 在直角坐标系中, 它们是

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 A_x &= -\mu J_x \\ \nabla^2 A_y &= -\mu J_y \\ \nabla^2 A_z &= -\mu J_z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; A_x 、 A_y 、 A_z 为矢量函数 $\mathbf{A}$ 在 x 、 y 、 z 方向上的分量函数。

由于这 3 个方程和静电场电位的泊松方程完全一致, 参照静电场中泊松方程的解答方法进行解答。

2.3 计算结果及讨论

采用 plane13 和 plane53 磁单元划分空间区域, 施加荷载求解后可得磁系的磁场分布, 图 4 和 5 所示分别为使用 plane13 和 plane53 磁结构单元进行模拟的结果。

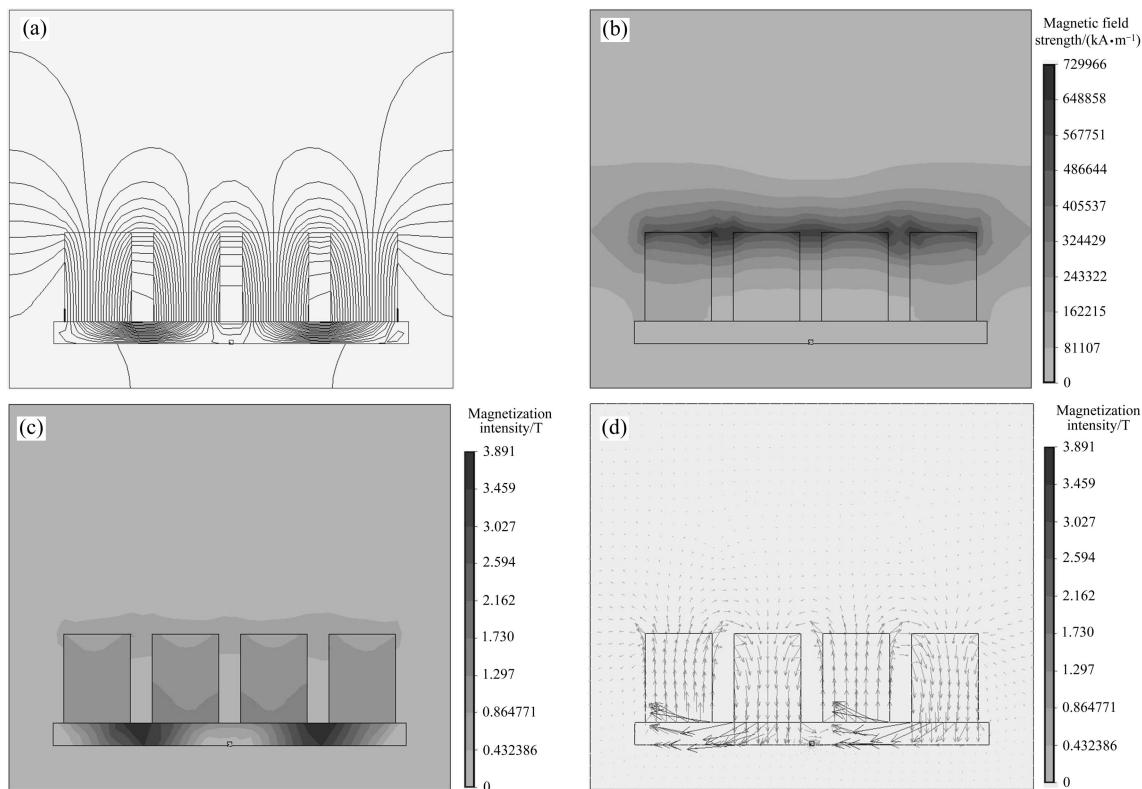


图4 使用 plane13 磁单元进行模拟的结果

Fig. 4 Simulation results of magnetic system by element plane13: (a) Distribution of magnetic force lines; (b) Cloud map of magnetic field strength; (c) Cloud map of magnetization intensity; (d) Vector graphic of magnetization intensity

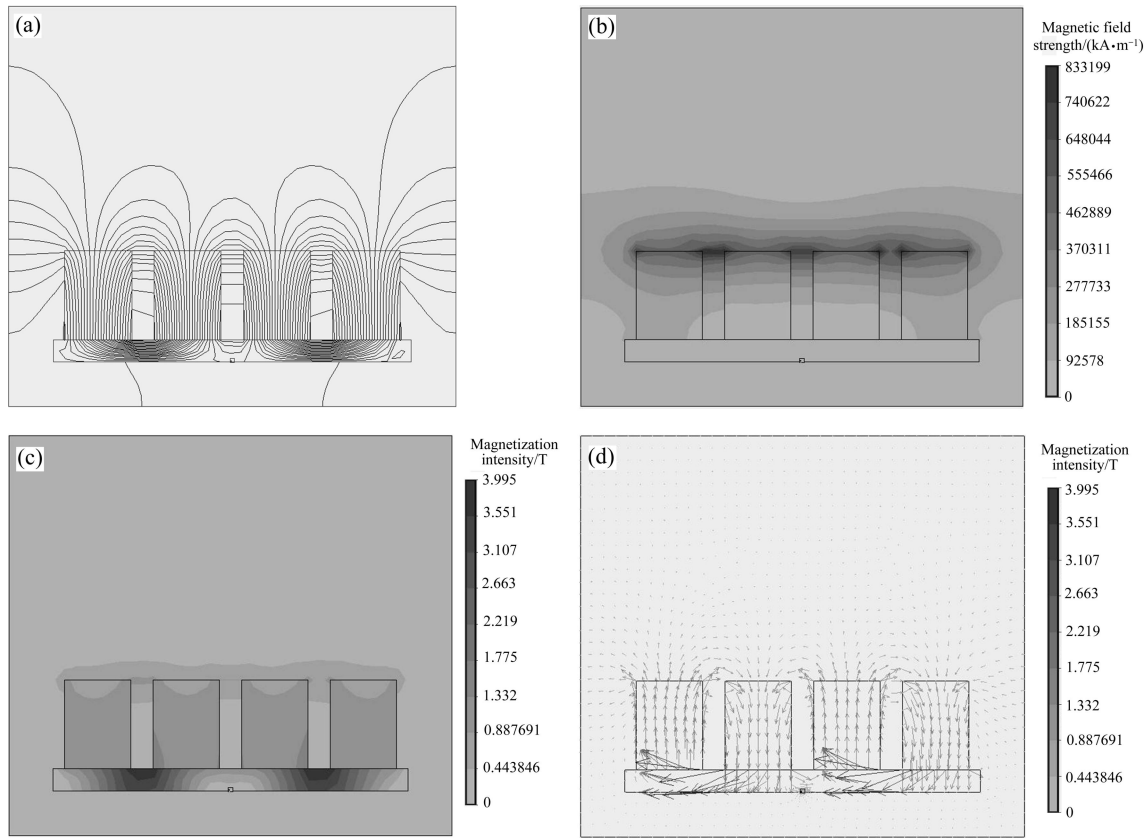


图5 使用 plane53 结构单元进行模拟的结果

Fig. 5 Simulation results of magnetic system by element plane53: (a) Distribution of magnetic force lines; (b) Cloud map of magnetic field strength; (c) Cloud map of magnetization intensity; (d) Vector graphic of magnetization intensity

由图4和5的仿真结果可知,两种磁单元划分模型后,计算所得的磁力线分布规律大致相同,plane13磁单元模拟所得磁场强度最高值为729966 kA/m,磁感应强度最高值为3.891 T;plane53磁单元模拟所得磁场强度最高值为833199 kA/m,磁感应强度最高值为3.995 T。因此,plane53磁单元模拟所得磁场强度要略高于plane13磁单元。

3 理论公式计算

由永磁体等效磁荷模型^[14]计算,可得长方形永磁体对称轴线的磁感应强度为

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\arcsin \frac{ab}{\sqrt{(a^2 + b^2)(b^2 + h^2)}} - \arcsin \frac{ab}{\sqrt{[a^2 + (h + L_m)^2][b^2 + (h + L_m)^2]}} \right] \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 L_m 分别为磁体的长、宽、高; h 为长方

形永磁体对称轴线上点坐标 z 值。

长方形永磁参数如图6所示。根据上述公式对模拟永磁体表面对称中心磁感应强度进行计算,其中 $L_m = 4$ cm, $b = 1.5$ cm, $a = 1$ cm, $h = 0$ cm, $B_r = 1.32$ T, 计算得磁极表面中心磁感应强度 $B_0 = 0.6241$ T。

在图7所示的平面 $N-S$ 交替排列磁系的磁场中,既无永磁源又无电流,为无源场($B_r = 0$)和无旋场($B_d = 0$)。在直角坐标系中两公式可变换成如下的形式

$$\frac{\partial(\ln B)}{\partial x} + \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\ln B)}{\partial y} + \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

式中: α 为磁力线方向的角度。

$\ln B$ 和 α 是共轭调和函数,它们都满足拉普拉斯方程。

对于式(7),令

$$\frac{\partial(\ln B)}{\partial x} = -\frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\ln B)}{\partial y}=\frac{\partial \alpha}{\partial x}=C_1 \tag{9}$$

因此,

$$\ln B=C_1 y+C_2 \tag{10}$$

$$\alpha=C_1 x+C_3 \tag{11}$$

为了确定式(9)~(11)中积分常数 C_1 、 C_2 和 C_3 , 利用上述已知的边界条件, 分析具体的磁场分布有: 当 $y=0$ 时, $B=B_0$; 当 $x=0$ 时, $\alpha=\frac{\pi}{2}$, $C_3=\frac{\pi}{2}$; 当 $x=\frac{1}{2}l$ 时,

$$\alpha=0, \quad C_1=-\frac{\pi}{l}。$$

将积分常数 C_1 、 C_2 和 C_3 代入上式中, 得到

$$\ln \frac{B}{B_0}=-\frac{\pi}{l} y=-C y \tag{12}$$

取指数式为

$$B=B_0 e^{-C y} \tag{13}$$

式(12)和(13)中 l 为两磁极中心之间距离; x , y , z 为 P 点对应坐标。

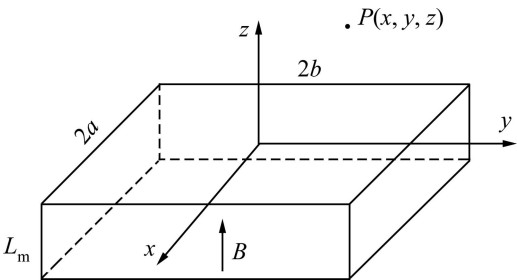


图 6 长方形永磁体的参数
Fig. 6 Parameter of rectangular permanent magnet

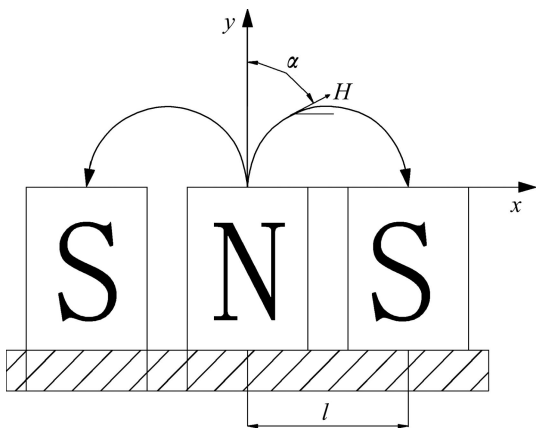


图 7 平面排列型磁系磁场
Fig. 7 Magnetic field of planar arrangement magnetic system

所模拟的平面 N - S 交替排列磁系(见图 2)中 $l=4$ cm, 因此, $C=\frac{\pi}{l}=\frac{\pi}{4}$ cm⁻¹, 磁极中线 AB 上距离磁极中心表面的磁感应强度 $B=B_0 e^{-Cy}$, 其中常数 $e=2.72$ 。

4 仿真结果与理论计算的比较及分析

从 plane13 和 plane53 磁单元仿真结果中分别得到图 2 中 AB 线段上各点的磁感应强度值。另外, 通过理论公式计算得到 AB 线段上各点磁感应强度值。不同方法得到的 AB 线段上磁感应强度值见表 1, plane13 和 plane53 磁单元仿真结果与理论计算的相对误差见图 8。

表 1 不同方法计算的线段 AB 上磁感应强度值
Table 1 Calculation results of magnetization intensity by using different methods in AB line

Number	Distance from surface of magnetic pole/cm	Magnetization intensity/T		
		Element plane13	Element plane53	Theory calculation result
1	0	0.6375	0.6371	0.6241
2	0.2	0.5741	0.5715	0.5334
3	0.4	0.5100	0.5056	0.4558
4	0.6	0.4476	0.4431	0.3896
5	0.8	0.3897	0.3882	0.3328
6	1	0.3320	0.3332	0.2845
7	1.2	0.2867	0.2889	0.2431
8	1.4	0.2867	0.2487	0.2080
9	1.6	0.2065	0.2097	0.1776
10	1.8	0.1789	0.1822	0.1518
11	2	0.1513	0.1549	0.1297

从表 1 可以看出, 随着取值点距离磁极表面距离的增大, ANSYS 仿真与理论计算的磁感应强度值都呈减小趋势, 在同一点上, ANSYS 仿真所得磁感应强度值要略大于理论计算值。从图 8 中 plane13 和 plane53 磁单元仿真结果与理论计算的相对误差可知, 使用两种磁单元对磁系进行仿真计算, 在磁极表面的磁感应强度值误差较小, 分别为 2.15%(plane13)和 2.08%(plane53)。随着距离磁极表面距离的增大, 相对误差逐渐变大。在距离磁极表面 1 cm 以内, plane53 磁单元的磁感应强度仿真结果误差较 plane53 磁单元的小; 在距离磁极表面 2 cm 以内, plane13 和 plane53 磁单

元仿真磁感应强度平均相对误差分别为 16.08% 和 14.87%; 在距离磁极表面 1.4 cm 处, plane13 磁单元仿真出现相对误差最大值。因此, 使用 plane53 磁单元进行模拟可得到更加准确、稳定的解, 尤其在距离磁极表面 0.5 cm 以内, 磁感应强度仿真值的平均相对误差为 6.72%,

为了进一步验证 ANSYS 分析结果的可靠性, 从 plane53 磁单元仿真结果中调取线段 CD 上磁场强度值, CD 线段上的磁场强度值如图 9 所示。

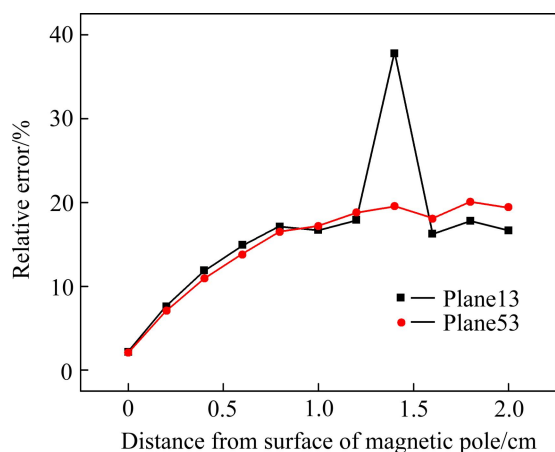


图 8 plane13 和 plane53 磁单元仿真结果与理论计算的相对误差

Fig. 8 Relative error between simulation results of elements plane13 and plane53 and theory calculation

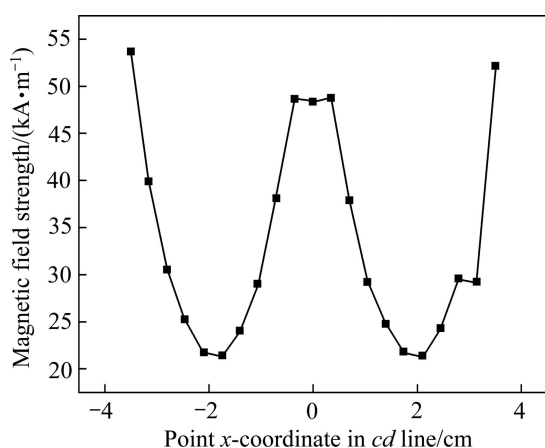


图 9 plane53 磁单元仿真 CD 线段上的磁场强度模拟结果

Fig. 9 Simulation results of magnetic field strength in CD line by using element plane53

从图 9 中 plane53 磁单元模拟 CD 线段上的磁场强度可知, 磁场强度在极隙处较高, 在磁极中线上磁场强度最低, 在磁极边缘磁场强度分布较高, 总体来看, 磁场强度沿 x 方向呈马鞍型分布, plane53 磁单元仿真结果与《磁电选矿学》^[15]中, 当极宽与极隙之比

为 3 时, 水平方向磁场强度变化趋势相同, 而本模型中磁系的极宽为 3 cm, 极隙为 1 cm, 极宽与极隙之比正好等于 3, 进一步证明采用 plane53 磁单元仿真时结果的可靠性。

5 结论

1) 使用 ANSYS 有限元分析软件对履带式永磁磁选机平面 $N-S$ 交替排列磁系进行仿真研究, 采用 plane13 和 plane53 磁单元分别划分磁系空间区域, 得到磁系周围磁力线、磁场强度、磁感应强度的分布情况; 采用等效磁荷法和平面磁系磁感应强度公式计算得到磁极表面中点及中线上的磁感应强度值。

2) ANSYS 仿真结果与理论计算比较表明, plane53 磁单元对平面 $N-S$ 交替排列磁系仿真较 plane13 的更加准确, 尤其在磁极表面, 相对误差仅为 2.08%; 在距离磁极表面 0.5 cm 以内, 平均相对误差为 6.72%。

3) 当平面 $N-S$ 交替排列磁系的极宽与极隙之比为 3 时, plane53 磁单元仿真所得磁场强度沿 x 方向呈马鞍型分布, 仿真结果与《磁电选矿学》^[15]中的磁场强度变化趋势相同, 进一步证明采用 plane53 磁单元仿真时结果的可靠性。

4) ANSYS 软件可以直观、简洁地模拟出磁系周围的磁场分布, 使用 plane53 磁单元进行模拟可得到更加准确、稳定的解, 其误差范围可以满足履带式永磁磁选机磁系设计的需要。

REFERENCES

- [1] 陈建生, 杨刚, 裴宝泉. 磁选机的现状和发展趋势[J]. 矿山机械, 2007, 37(17): 75-79.
CHEN Jian-sheng, YANG Gang, QIU Bao-quan. Current situation and development tendency of the magnetic separators[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 37(17): 75-79.
- [2] 刘鹏, 焦红光, 陈清如. 永磁高梯度磁选机的发展现状及解析[J]. 矿山机械, 2008, 36(21): 105-108.
LIU Peng, JIAO Hong-guang, CHEN Qing-qu. Present status of development and analysis of permanent-magnet high gradient magnetic separators[J]. Mining & Processing Equipment, 2008, 36(21): 105-108.
- [3] 袁致涛, 高太, 郭小飞, 韩跃新. 永磁强磁预选设备的研制与应用[J]. 东北大学学报, 2010, 31(8): 1188-1191.
YUAN Zhi-tao, GAO Tai, GUO Xiao-fei, HAN Yue-xin. Development and application of high-intensity permanent

- magnetic separator for pre-concentration[J]. Journal of Northeastern University, 2010, 31(8): 1188–1191.
- [4] 刘晨敏, 刘 鹏, 何权富, 张宏方. 对极式永磁磁选机的数值模拟研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(13): 96–100.
- LIU Chen-min, LIU Peng, HE Quan-fu, ZHANG Hong-fang. Study on numerical simulation of opposite-pole permanent magnetic separator[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(13): 96–100.
- [5] ANDREW E M, IGOR V M, BRUCE G C, BRUCE J B. A compact permanent magnet array with a remote homogeneous field[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2007, 186: 100–104.
- [6] 陈庆仕, 屈小章. 有限元在永磁计算中的应用[J]. 江西科学, 2008, 26(1): 145–150.
- CHEN Qing-shi, QU Xiao-zhang. Application of finite element in computation of PM body[J]. Jiangxi Science, 2008, 26(1): 145–150.
- [7] LI Xia, XIA Ling, CHEN Wu-fan, LIU Feng, STUART C, XIE De-xin. Finite element analysis of gradient z -coil induced eddy currents in a permanent MRI magnet[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2011, 208: 148–155.
- [8] TAKAYAMA T, KAMITANI A, TANAKA A. Numerical simulation of permanent magnet method: Influence of experimental conditions on accuracy of j_c -distribution[J]. Physica C, 2010, 470: 1354–1357.
- [9] HANIOTIS A, KLADAS A. Permanent magnet machine operation with static converter: Modeling and experimental verification of space harmonics effects[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 106: 286–291.
- [10] BENABOU A, GEORGES S, CLENET S. Permanent magnet modelling for dynamic applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320: 830–835.
- [11] 赵善彪, 张天孝, 问会青, 樊 理. 基于 ANSYS 的瓦形永磁体磁场分析[J]. 微电机, 2007, 40(10): 21–25.
- ZHAO Shan-biao, ZHANG Tian-xiao, WEN Hui-qing, FAN Li. Analysis on magnetic field of tegular permanent magnet with ANSYS[J]. Micromotor, 2007, 40(10): 21–25.
- [12] 张荣岭, 郑艳明, 崔 浩, 梁慧敏, 翟国富. 条形永磁开路漏磁导磁场仿真计算方法[J]. 机电元件, 2008, 28(4): 25–26.
- ZHANG Rong-ling, ZHENG Yan-ming, CUI Hao, LIANG Hui-min, ZHAI Guo-fu. Magnetic field simulation method for calculating leakage permeance of bar permanent magnet in open magnetic circuit[J]. Electromechanical Components, 2008, 28(4): 25–26.
- [13] 吴亚麟. 稀土永磁同步电动机气隙磁场的研究[J]. 中小型电机, 2004, 31(5): 32–34.
- WU Ya-lin. Research on air-gap magnetic field in REPM synchronous motor[J]. Middle and Small Electric Machine, 2004, 31(5): 32–34.
- [14] 汤双清, 沈 洁, 陈习坤, 蔡敢为. 基于磁荷模型的永磁体空间磁场的有限元分析和计算[J]. 三峡大学学报, 2003, 25(5): 453–455.
- TANG Shuang-qing, SHEN Jie, CHEN Xi-kui, CAI Gan-wei. Finite-element analysis and calculation on spatial magnetic field emanated from permanent magnet based on magnetic-charge model[J]. Journal of China Three Gorges University, 2003, 25(5): 453–455.
- [15] 刘树贻. 磁电选矿学[M]. 长沙: 中南工业大学, 1993: 84–85.
- LIU Shu-yi. Magnetic and electricity dressing[M]. Changsha: Central South University of Technology, 1993: 84–85.

(编辑 李艳红)