

在线铁谱仪电磁装置磁场的有限元分析

吕晓军, 谢友柏

(西安交通大学 润滑理论及轴承研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对在线铁谱仪中的一种新型的直流电磁装置, 通过有限元分析揭示了其工作气隙中的磁场分布规律, 采用正交设计方法确定了夹角方案条件下的最佳工作气隙尺寸, 比较了磁场在夹角方案和倾角方案条件下的分布情况. 结果表明, 该装置在夹角方案条件下可以在油样流动方向上形成由弱到强的磁场分布, 但效果不如倾角方案好.

关键词: 在线铁谱仪; 有限元分析; 磁场

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)02-0164-04

在线铁谱仪可监测润滑油中的磨粒浓度及尺寸分布, 从而实现机器磨损状态的实时划分^[1]. 为了实现磨粒的有序沉积, 磁感应强度及其梯度在油样流动方向上要有一定的变化. 在线铁谱仪中的直流电磁装置, 其作用是产生有序沉积磨粒的高梯度强磁场. 实验研究表明, 无论是油液流动方向与磁极上表面之间存在 1 个倾角 (简称 MO 方案)^[2], 还是 2 个磁极之间存在 1 个夹角 (简称 BM 方案)^[3], 磨粒均会在逐渐增强的磁力作用下有序沉积. 本文作者针对在线铁谱仪中的直流电磁装置, 通过数字仿真探讨这个问题.

1 在线铁谱仪中的直流电磁装置边值问题

在线铁谱仪中的直流电磁装置主要由磁极、铁芯和线圈等元件组成, 其基本结构示意图如图 1 所示. 由图 1 可以看出, 直流电磁装置的几何结构关于 $y\sigma z$ 平面对称, 而激磁电流分布关于 $y\sigma z$ 平面反对称. 因此, 在有限元分析过程中, 只需要针对一半区域进行计算就可以描述整个直流电磁装置的磁场分布情况. 也就是说, 在图 1 所示的 $y\sigma z$ 平面上, 矢量磁位满足第二类边界条件, 简记为 Γ_2 . 与此同时, 如果以坐标 $(x, y, z) = (0, 0, 32.5)$ mm 为球心、以 R 为半径的空气球体模拟磁场向外扩散. 当球体半径 R 足够大时, 矢量磁位在球体外表面上满足第一类边界条件, 可将其记为 Γ_1 .

于是, 在直流电磁装置磁场的三维求解场域中, 矢量磁位满足如下的边值问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega: \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_c, \\ \Gamma_1: \vec{A} = 0, \\ \Gamma_2: \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, Ω 表示直流电磁装置磁场的整个求解场域, $\vec{A}$ 表示矢量磁位, n 表示单位法向矢量; μ 表示媒质

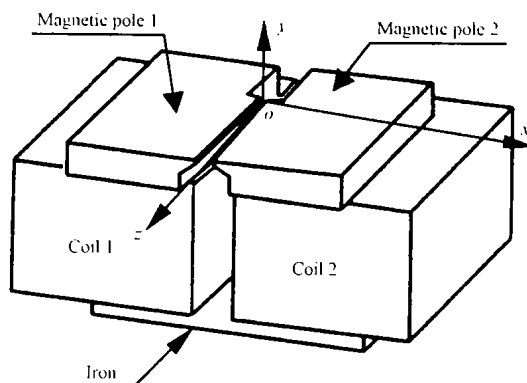


Fig 1 The shape of an electromagnet

图 1 直流电磁装置的基本结构

的磁导率 (H/m); $\vec{J}_c$ 表示激磁电流密度 (A/m^2).

求解上述边值问题的常用有限元方法包括节点法和棱边元法 (Edge), 其中的节点法又分为标量磁位法 (MSP)、矢量磁位法 (MVP) 以及耦合的矢量磁位和标量磁位法 (MVSP) 等几种. 由于直流电磁装置的磁极和铁芯处于磁饱和状态, 其磨粒沉积区域又位于气、铁交界附近, 采用棱边元法求解比较好^[4].

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59990470).

收稿日期: 2003-05-26; 修回日期: 2003-12-16/ 联系人谢友柏, e-mail: ybxie@mail.xjtu.edu.cn.

作者简介: 谢友柏, 男, 1933 年生, 教授, 博导, 中国工程院院士, 目前主要从事摩擦学系统与现代设计方法的研究.

2 夹角方案条件下的气隙形状优化设计

直流电磁装置在夹角方案条件下的气隙形状如图 2 所示. 在图 2 中, w_1 表示油样入口端的宽度

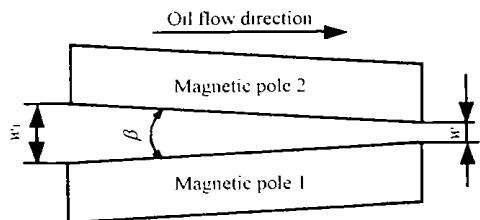


Fig 2 The airgap shape of BM scheme

图 2 夹角方案条件下的气隙形状

(mm); w 表示油样出口端的宽度 (mm); β 表示 2 个磁极之间的夹角 ($^\circ$).

由文献[5]可知, 1 个铁磁性磨粒在不均匀磁场中所受磁力可以表示为:

$$F_{my} = \frac{x_m V}{\mu} (\vec{B} \cdot \nabla B_y). \quad (2)$$

式中: F_{my} 表示磁力 F_m 在 y 方向分量 (N); V 表示磨粒体积 (m^3); x_m 表示磨粒体积磁化率 ($Wb/A \cdot m$); μ 表示磨粒磁导率 ($Wb/A \cdot m$); $\vec{B}$ 、 B_y 分别表示磁感应强度及其在 y 方向分量 (T).

$$\text{令 } f_{my}(x, y, z) = \vec{B} \cdot \nabla B_y. \quad (3)$$

$$\text{式(1)可写为: } F_{my} = \frac{x_m V}{\mu} f_{my}(x, y, z). \quad (4)$$

很明显, 在其他参数给定的条件下, 磨粒所受磁力 F_{my} 与 $f_{my}(x, y, z)$ 成正比. 由于 $f_{my}(x, y, z)$ 只是磁感应强度及其梯度的函数, 它可以用来衡量直流电磁装置的磁场性能. 假设激磁线圈匝数为 2 000, 如果直流电磁装置的磁极形状已经确定, 那么气隙宽度 w 、磁极夹角 β 以及激磁电流强度 I 等参数就成为影响工作气隙中 $f_{my}(x, y, z)$ 分布的主要参数. 因此, 我们将把这 3 个变量作为优化问题的设计变量, 通过正交设计确定它们的取值范围.

在图 1 所示的坐标系中, 当 $x = 0$ mm、 $y = 1$ mm 时, 若令 $f_{\max}$ 表示 $f_{my}(x, y, z)$ 在 z 方向 5 mm、15 mm 和 25 mm 处的平均值, $f_{\min}$ 表示 $f_{my}(x, y, z)$ 在 z 方向 35 mm、45 mm、55 mm 处的平均值, 优化问题的目标函数可表示为:

$$\max f(w, \beta, NI) = (f_{\max} - f_{\min}) \times (f_{\max} + f_{\min}). \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 1.0 \leq w \leq 2.0 \\ 2.0 \leq \beta \leq 6.0 \\ 1.5 \leq I \leq 2.1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: w 表示油样出口端的气隙宽度 (mm); β 表示 2 个磁极之间的夹角 ($^\circ$); I 表示激磁电流强度 (A).

正交表是进行正交优化的工具, 一般可以表示为 $L_n(t_q)$ (L 表示正交表, n 表示试验方案的个数, t 表示水平数, q 表示因素的个数). 若采用表 1 所示的因素

表 1 正交实验的因素和水平

Table 1 The factor and level of orthogonal design

Level	Factor		
	w/mm	β/Degree	I/A
1	1.0	2.0	1.5
2	1.5	4.0	1.8
3	2.0	6.0	2.1

和水平, 可选择四因素三水平正交表 $L_9(3^4)$, 相应方案及计算结果见表 2.

在表 2 中, m_{ij} 表示第 j ($j = 1, \dots, 3$) 列中相应于表中水平号为 i ($i = 1, \dots, 3$) 的各个试验结果的平均值, R_i 表示第 i ($i = 1, \dots, 3$) 个因素的极差. 显然, 正交优化的结果是: 气隙宽度 $w = 1.0$ mm, 夹角 $\beta = 4.0^\circ$, 激磁电流 $I = 2.1$ A. 由于 1 个因素的极差值越大, 其对目标函数的影响越大. 由表 2 可见, 激磁电流强度 I 最重要, 气隙宽度 w 次之, 磁极夹角 β 最次.

3 直流电磁装置磁场的仿真结果及分析

3.1 夹角方案条件下的磁场分布规律

设磁动势 $NI = 3\ 600$ AT、夹角 $\beta = 4^\circ$ 和气隙宽度 $w = 1.0$ mm, 在图 1 所示坐标方向上, 磁感应强度 B_x 在 $y\text{-}oz$ 平面上的分布情况如图 3 所示, $f_{my}(x, y, z)$ 在 $y\text{-}oz$ 平面上的分布如图 4 所示. 在图 3 和图 4 中, y 轴和 z 轴分别表示图 1 中的 y 方向和 z 方向坐标. 由图 3 与图 4 可知: 当 y 不变时, B_x 和 $f_{my}(x, y, z)$ 随着 z 增加而减小; 当 z 不变时, B_x 和 $f_{my}(x, y, z)$ 也随着 y 增加而减小, 但 $f_{my}(x, y, z)$ 沿 z 方向的变化速度比 B_x 快.

3.2 夹角方案与倾角方案条件下的磁场分布比较

设磁动势为 3 600 AT、气隙宽度 $w = 1.0$ mm, 在图 1 所示坐标方向上, $f_{my}(x, y, z)$ 在夹角方案条件下沿表 3 所确定路径分布如图 5 中曲线 1 所示. 设磁动势为 3 600 AT 和气隙宽度 $w = 1.5$ mm, $f_{my}(x, y, z)$ 在倾角方案条件下沿表 3 确定路径上的分布如图 5 曲线 2 所示. 在图 5 中, 横轴表示路径起点与观察点间的距离, 纵轴表示 $f_{my}(x, y, z)$.

由图 5 可知, $f_{my}(x, y, z)$ 在 z 方向两端比较小, 在其它区间随着 z 增加而减小. 当 z 不变时, 倾角方

表 2 正交设计的结果
Table 2 The results of orthogonal design

	w/mm	$\beta/ (^{\circ})$	I/A	f
1	1.0	2.0	1.5	5.49×10^4
2	1.0	4.0	1.8	1.66×10^5
3	1.0	6.0	2.1	1.25×10^5
4	1.5	2.0	1.8	6.73×10^4
5	1.5	4.0	2.1	1.13×10^5
6	1.5	6.0	1.5	3.11×10^3
7	2.0	2.0	2.1	8.11×10^4
8	2.0	4.0	1.5	4.50×10^3
9	2.0	6.0	1.8	3.57×10^4
m_1	$m_{11} = 1.15 \times 10^5$	$m_{12} = 6.78 \times 10^4$	$m_{13} = 2.09 \times 10^4$	
m_2	$m_{21} = 6.10 \times 10^4$	$m_{22} = 9.45 \times 10^4$	$m_{23} = 8.98 \times 10^4$	
m_3	$m_{31} = 4.04 \times 10^4$	$m_{32} = 5.45 \times 10^4$	$m_{33} = 1.06 \times 10^5$	
R_i	$R_1 = 7.50 \times 10^4$	$R_2 = 4.00 \times 10^4$	$R_3 = 8.53 \times 10^4$	

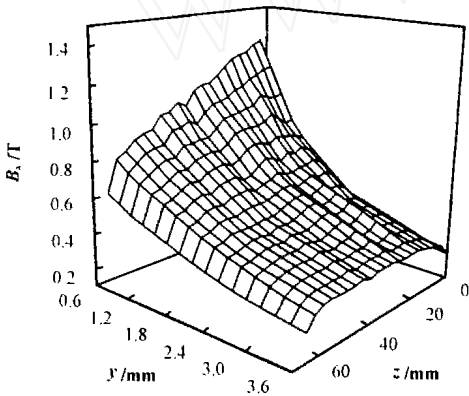


Fig 3 B_x distribution in y - z plane
图 3 y - z 平面上的 B_x 分布

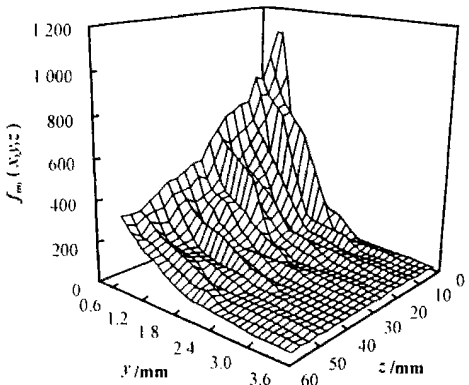


Fig 4 $f_{my}(x,y,z)$ distribution in y - z plane
图 4 y - z 平面上的 $f_{my}(x,y,z)$ 分布

案条件下的 $f_{my}(x,y,z)$ 比较大. 或者说, 倾角方案的效果比夹角方案好.

4 结论

a. 磁场在夹角方案条件下在 z 轴方向上由强

到弱分布, 但是效果不如倾角方案好.
b. 直流电磁装置在夹角方案条件下的工作气

表 3 $f_{my}(x,y,z)$ 在夹角方案和倾角方案条件下的路径
Table 3 $f_{my}(x,y,z)$ path in BM and MO scheme

	First point (x,y,z)/mm	End point (x,y,z)/mm
BM scheme	0,1.0,0	0,1.0,65
MO scheme	0,0.5,0	0,1.63,65

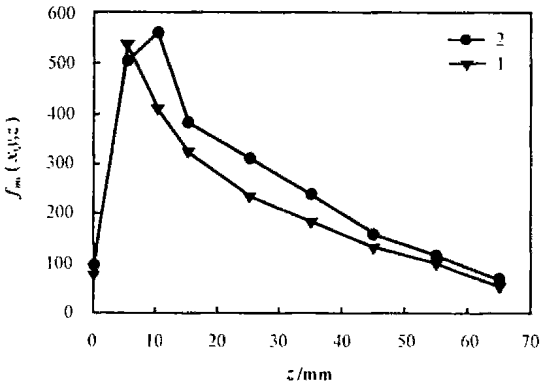


Fig 5 $f_{my}(x,y,z)$ distribution in z direction
图 5 $f_{my}(x,y,z)$ 沿 z 方向的分布

隙形状优化结果为气隙宽度 $w = 1.0$ mm, 夹角 $\beta = 4.0^{\circ}$, 激磁电流 $I = 2.1$ A.

参考文献:

[1] Liu Y(刘岩), Xie YB(谢友柏), Huang DL(黄广龙) et al. Research on tribological condition on-line monitoring system (一种摩擦学状态在线监测系统的研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1998, 18 (4): 341-345.
[2] Seifert W W, Westcott V C. A method for the study of wear particles in lubricating oil [J]. Wear, 1972, 21: 29-42.

- [3] Liu Y, Xie Y B, Yuan C J, *et al.* Research on an online ferrograph[J]. *Wear*, 1992, 153 (2) : 323-330.
- [4] Nakata T, Takahashi N, Fujiwara K, *et al.* Comparison of various methods of analysis and finite elements in 3-D magnetic field analysis[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27 (5) : 4073-4 076.
- [5] Xie Y B(谢友柏), Zhang E(张鄂), Yuan C J(袁崇军). Research on ferrograph and ferrography(铁谱技术研究和电磁铁谱仪)[R]. Science and Technology Report of Xi'an Jiaotong University(西安交通大学科学技术报告), 1983.

Finite Element Analysis of an Electromagnetic Device of an On-Line Ferrograph

LU Xiao-jun, XIE You-bai

(*Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract : A newly developed electromagnetic device was introduced. The device had the magnetic poles protruded forward and was suitable to installing the image fiber for the ferrographic analysis of wear debris. The magnetic flux intensity and diversity along the oil flow direction were simulated making use of finite element software Ansys, and the parameters applicable to the electromagnet were suggested. It was found that the theoretical results based on the finite element analysis agreed well with the corresponding experimental ones. Thus it was feasible to use the designed electromagnet to collect the deposited wear particles.

Key words : on-line ferrograph; electromagnetic field analysis; finite element method

Author : XIE You-bai, male, born in 1933, Professor, member of Chinese Academy of Sciences, e-mail: ybxie@mail.xjtu.edu.cn