

无取向立式磁屏蔽的性能分析和实验研究

赵志刚, 魏 鹏, 戎静怡, 李 兴, 刘慧敏

(电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

**摘要:** 本文基于 P21°-M1 磁屏蔽模型, 对工频下不同电流激励无取向立式磁屏蔽和取向立式磁屏蔽的屏蔽效果进行对比分析, 研究无取向磁屏蔽在变压器磁屏蔽中的适用性。本研究中, 采用激励线圈精确建模的方式, 从总损耗中分离出激励线圈负载损耗, 从而得到较为准确的磁屏蔽构件的损耗值。实验和仿真结果表明, 在相同电流激励下, 由于两种硅钢片的磁性能差异, 无取向立式磁屏蔽的屏蔽效果相较于取向立式磁屏蔽有微小的差异。

**关键词:** 磁屏蔽; 无取向硅钢片; 取向硅钢片; 导磁钢板; 杂散损耗

**DOI:** 10.12067/ATEEE1703064      **文章编号:** 1003-3076(2018)04-0064-06      **中图分类号:** TM206

1 引言

磁屏蔽是变压器的重要部件, 可改善变压器引线结构, 减小变压器结构件杂散损耗, 防止油箱壁过热。传统磁屏蔽由取向硅钢片制成, 主要包括平式 (MEM-type) 和立式 (M-type) 两大类。

取向硅钢片广泛应用于变压器铁心的制造, 高磁导率的磁屏蔽会使绝大部分漏磁通在其内部闭合, 从而达到减小油箱壁内漏磁通量和杂散损耗的目的<sup>[1-3]</sup>。但取向硅钢片现有的生产工艺和造价水平限制了取向磁屏蔽在小型变压器中的使用。而无取向硅钢片相较取向硅钢片, 具有较高的磁导率、产能更高、更易获得等优势。以 2015 年全球软磁材料市场份额为例: 取向硅钢片占比 16%, 远远低于无取向硅钢片 80% 的市场占有率, 这使得无取向硅钢片材料较取向硅钢片更易获得, 售价也较低, 其价格仅为取向硅钢片的 50% ~ 60%; 同时, 采用无取向硅钢片制作相同规格的立式磁屏蔽, 相较于取向立式磁屏蔽, 可节约 14.3% 的裁切成本。因此, 无取向硅钢片作为变压器磁屏蔽具有较好的适用性和经济性。

传统的磁屏蔽研究主要集中于优化磁屏蔽的结构、厚度, 或是研究不同激励方式下磁屏蔽的性能,

但很少有从工业生产经济性的角度对无取向磁屏蔽的研究<sup>[4-6]</sup>。因此, 本实验基于 P21°-M1 模型对无取向立式磁屏蔽和取向立式磁屏蔽的屏蔽效果进行对比研究。

2 实验模型与原理

本研究选用 P21°-M1 磁屏蔽基准模型作为实验模型。P21°-M1 模型的工程背景是研究电力变压器磁屏蔽对油箱壁的屏蔽效果<sup>[7]</sup>。研究中分别选用 35WW300 无取向硅钢片和 B30P105 取向硅钢片制作规格为 458 × 270 × 10mm<sup>3</sup> 的立式磁屏蔽, 并对两种不同类型的磁屏蔽构件的杂散损耗和磁通分布进行实验研究和仿真计算。

2.1 实验模型参数

P21°-M1 模型如图 1(a) 所示。具体参数如下:

(1) 激励线圈: 由两组规格相同、反向绕制的线圈组成。本研究中, 激励线圈施加反向激励。

(2) 立式磁屏蔽构件: 包含磁屏蔽和导磁钢板 (导磁钢板紧贴立式磁屏蔽水平放置), 构件模型具体如图 1(b) 所示, 规格参数见表 1。

为研究两种立式磁屏蔽和导磁钢板的内部磁通密度分布, 现设置如图 2(a) 和图 2(b) 所示的测量线圈, 线圈具体参数见表 2。

**收稿日期:** 2017-03-17  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51107026; 51677052; 51237005)  
**作者简介:** 赵志刚(1982-), 男, 河北籍, 副教授, 博士, 研究方向为工程电磁场与磁技术;  
魏 鹏(1992-), 男, 山西籍, 硕士研究生, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

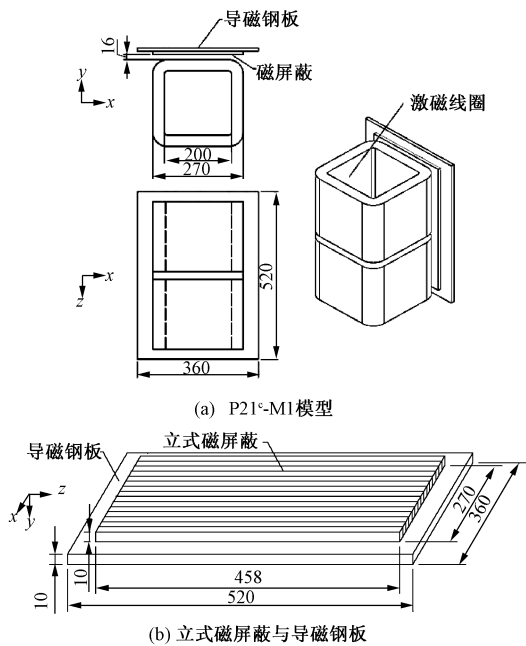


图1 模型与构件  
Fig.1 P21<sup>c</sup>-M1 model and structure

表1 立式磁屏蔽和导磁钢板参数

	硅钢牌号	单片规格 /mm <sup>3</sup>	模型数量 /片
无取向磁屏蔽	35WW300	458×10×0.35	771
取向磁屏蔽	B30P105	458×10×0.30	900
导磁钢板	Q235B	520×360×10	1

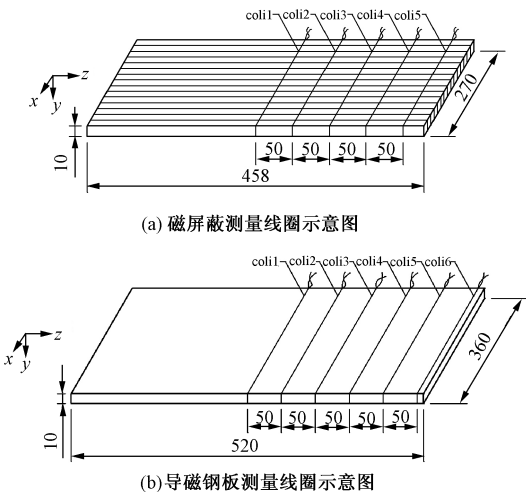


图2 测量线圈位置示意图  
Fig.2 Measuring coil position

2.2 材料性能参数

本文采用 25cm 标准爱泼斯坦方圈法对 35WW300 无取向硅钢片和 B30P105 取向硅钢片的

磁性能数据进行测量<sup>[8]</sup>,结果如图 3 所示。可以看出,35WW300 无取向硅钢片的比总损耗和磁导率都介于 B30P105 取向硅钢片轧制方向和垂直轧制方向两者之间。

表2 测量线圈参数

Tab.2 Measuring coil parameters			
测量位置	线圈标号	线径/mm	匝数/匝
磁屏蔽	coila1 ~ a5	0.30	10
导磁钢板	coilb1 ~ b6	0.08	10

注:制造立式磁屏蔽所需的硅钢片较多,在测量中为了更好地固定磁屏蔽,选用线径较粗的 0.30mm 的粗铜线。

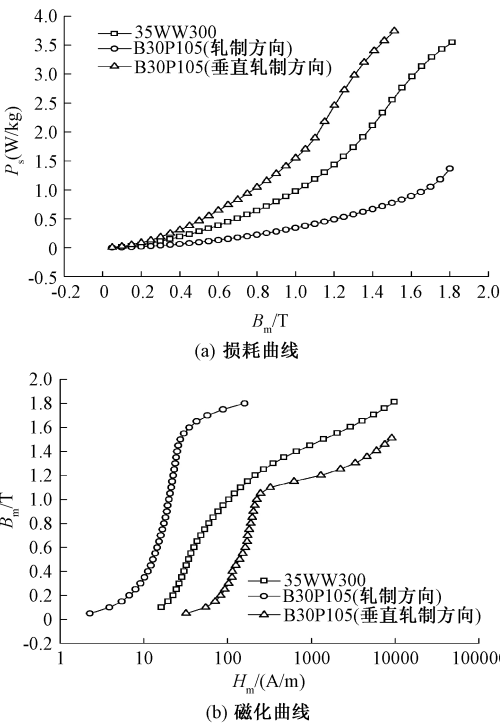


图3 磁化曲线和损耗曲线  
Fig.3 Magnetization and loss curves

2.3 实验线路

实验线路图如图 4 所示。其中,磁屏蔽构件的损耗数据由精密功率分析仪(LMG500,德国)测量得到,测量线圈内感应电压波形则由示波器探头(DSOX2024A,美国)测量获得。

2.4 实验原理

传统测量结构件杂散损耗的方法多采用负载激励测量的总损耗值减去空载激励测得的损耗值,但这种方法忽略了屏蔽构件的存在对激励线圈涡流损耗的影响<sup>[9-11]</sup>。文献[12-15]所提出的镜像测量法通过镜像线圈对激励线圈进行漏磁通补偿,近似模拟激励线圈在负载工况下的磁通分布,从而达到精

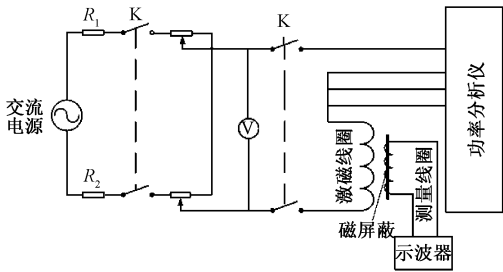


图4 实验电路

Fig.4 Experimental circuit

确分离激励线圈损耗的目的。但所需实验装置较为复杂,以本实验室现有条件难以达到。因此,本实验采用改进的测量方法——测量与仿真相结合的方法,来确定屏蔽构件的损耗。

P21<sup>°</sup>-M1 模型中的总损耗包含屏蔽中损耗(仅含磁滞损耗,忽略涡流损耗)、导磁钢板中的损耗(涡流损耗和磁滞损耗)和激励线圈中的损耗(涡流损耗和电阻损耗)。屏蔽构件的总损耗包含屏蔽中损耗和导磁钢板中的损耗。损耗的计算公式为:

$$P_{load} = P_{shield} + P_{steel} + P_{coil} \tag{1}$$

$$P_{plate} = P_{shield} + P_{steel} \tag{2}$$

式中, $P_{load}$ 为负载总损耗的测量值; $P_{shield}$ 为负载磁屏蔽中杂散损耗; $P_{steel}$ 为负载导磁钢板中杂散损耗; $P_{coil}$ 为负载激励线圈中损耗; $P_{plate}$ 为负载工况下磁屏蔽和导磁钢板中的总损耗值。

因此,负载工况下,模型中屏蔽构件的损耗可由式(3)求解:

$$P_{plate} = P_{load} - P_{coil} \tag{3}$$

式中, $P_{coil}$ 不再是传统方法中空载激励线圈损耗的测量值,而是采用负载工况下激励线圈经精确建模后线圈损耗的仿真计算值。因为构成激励线圈的主要材料是铜,铜作为非导磁材料,其损耗的计算结果(电阻损耗和涡流损耗)依赖于场量的精确计算。在实验时,保证磁通密度分布结果的准确性,就能保证激励线圈负载工况下损耗结果的正确性,从而得到较为准确的激励线圈负载损耗值。

3 P21<sup>°</sup>-M1 模型仿真

本研究中,采用国际知名厂商 Infolytica 集团的工程电磁场分析软件——MagNet 软件对工频下不同电流激励的 P21<sup>°</sup>-M1 模型进行三维仿真分析。

3.1 线圈建模

传统的激励线圈整体建模默认电流在导线内部均匀分布,忽略了涡流对线圈损耗的影响。而线圈

精确建模,通过对每一根导线精确建模,考虑到集肤深度对线圈涡流损耗的影响,使线圈的损耗计算更为精确。表3 为不同建模方式的描述。本研究采用表3 中的精细建模方式进行激励线圈精确建模,激励线圈三维仿真模型如图5 所示。

表3 不同建模方式

Tab.3 Various modeling methods		
建模方式	整体建模	精细建模
线圈类型	Stranded	Solid
横截面	291mm × 35mm	6.52mm × 2mm
匝数	300	1
电流分布	均匀	非均匀
涡流损耗	忽略	考虑

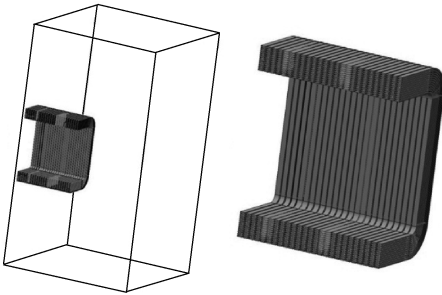


图5 三维仿真模型

Fig.5 3D simulation model

3.2 磁屏蔽建模

立式磁屏蔽涡流损耗主要是由垂直于叠片方向的漏磁通引起的涡流损耗,但由于硅钢片叠片面积较小,涡流损耗在总损耗中占比较小,工程中常忽略不计,因此仿真时将电导率  $\varepsilon$  设为 0,磁导率按式(4)所示各向异性处理:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_0 / (1 - C_f) & & \\ & C_\mu \mu_y & \\ & & C_\mu \mu_z \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, $\mu$  为磁屏蔽磁导率; $\mu_0$  为真空磁导率; $\mu_y$  为垂直轧制方向磁导率; $\mu_z$  为轧制方向磁导率; $C_f$  为叠片系数。

工程上已提出了一种实际可行的求解硅钢叠片中磁滞损耗的方法,即认为磁滞损耗  $W_h$  是磁通密度峰值  $B_m$  的函数。基于磁通密度分布结果,结合图3 获得的损耗曲线,求解磁滞损耗  $W_h$ :

$$W_h = \sum_{e=1}^{N_e} W_h^{(e)}(B_m^{(e)}) \rho V^{(e)} \tag{5}$$

式中, $W_h^{(e)}$  为单元磁滞损耗; $B_m^{(e)}$  为磁通密度峰值; $\rho$  为屏蔽构件密度; $V^{(e)}$  为单元体积; $N_e$  为单元总数。

## 4 P21°-M1 模型屏蔽效果的研究

### 4.1 屏蔽效果

P21°-M1 模型中导磁钢板的磁通密度云图和导磁钢板单独作用时的磁通密度云图分别如图 6 所示。无取向磁屏蔽和取向磁屏蔽对导磁钢板的屏蔽作用效果明显。

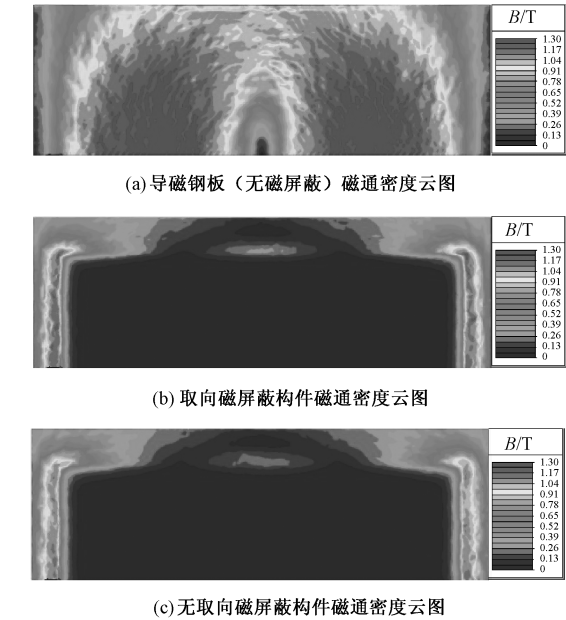


图 6 磁通密度云图  
Fig. 6 Shaded plot

### 4.2 损耗分析

表 4 和表 5 分别为 35WW300 无取向磁屏蔽、B30P105 取向磁屏蔽构件的杂散损耗。可知,测量和仿真相结合测量屏蔽构件杂散损耗的方法具有较好的一致性,说明该损耗测量和计算方法的有效性。

表 4 35WW300 无取向磁屏蔽构件杂散损耗  
Tab. 4 Stray-field loss of non grain-oriented magnetic shielding structure

激磁 电流/A	测量值 /W	计算值/W			误差 (%)
		磁屏蔽	导磁钢板	屏蔽构件	
10	1.11	0.10	1.07	1.17	-5.4
15	2.55	0.22	2.30	2.52	1.2
20	4.41	0.39	3.95	4.34	1.6
25	6.71	0.59	6.01	6.60	1.6

图 7 为不同方法得出的磁屏蔽构件杂散损耗。可以看出,两种磁屏蔽构件中,导磁钢板内的损耗值基本相同,但无取向磁屏蔽构件的总损耗值略大于取向磁屏蔽构件的损耗值,说明两种磁屏蔽的屏蔽

表 5 B30P105 取向磁屏蔽构件杂散损耗  
Tab. 5 Stray-field loss of grain-oriented magnetic shielding structure

激磁 电流/A	测量值 /W	计算值/W			误差 (%)
		磁屏蔽	导磁钢板	屏蔽构件	
10	1.10	0.04	1.06	1.10	0
15	2.38	0.09	2.38	2.47	-3.8
20	4.15	0.14	3.94	4.08	1.7
25	6.33	0.23	5.97	6.20	2.1

效果有微小差异,且损耗值的差异主要是两种磁屏蔽磁滞损耗值的差异,而磁滞损耗主要由材料所处的磁场和磁导率共同决定。因此影响两种磁屏蔽构件损耗的关键因素可能在于磁屏蔽所处的磁场、制造磁屏蔽的硅钢片材料的磁导率。

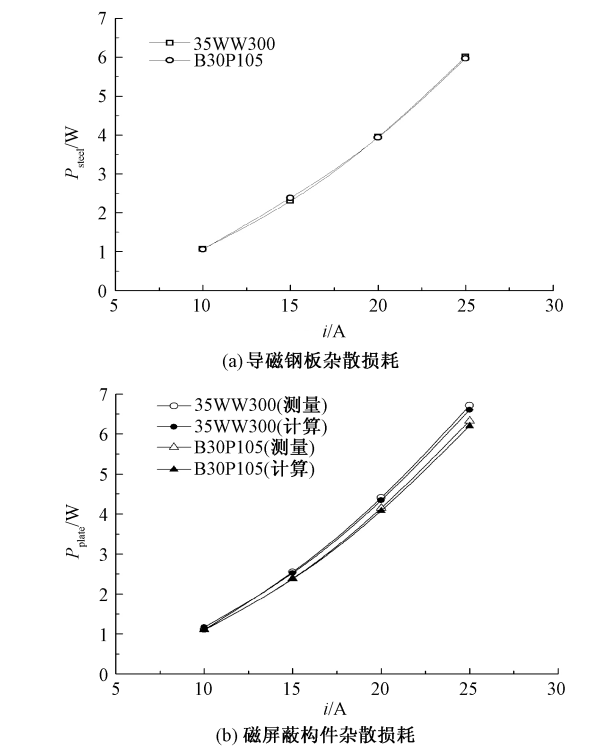


图 7 磁屏蔽构件杂散损耗  
Fig. 7 Stray-field loss in magnetic shields

### 4.3 磁通分布

图 8 为法向磁通和磁通密度云图。对图 8(a)、图 8(b)中的两种磁屏蔽和导磁钢板的内部磁通密度分析可知,磁屏蔽和导磁钢板在  $z$  方向上的法向磁通分量均随着激励电流的增加而增大,同时在磁屏蔽构件中,绝大部分的磁通都分布在磁屏蔽内部,在导磁钢板中分布的漏磁通较小,这也与图 8(b)显示的导磁钢板中磁通量有较为明显的变化,而表 4



和表 5 中的损耗值相差不大相印证。对电流 25A (50Hz, rms)下磁屏蔽磁通密度云图(如图 8(c)和图 8(d)所示)进行对比分析可知,无取向磁屏蔽在 0~200mm 范围内的法向磁通和取向磁屏蔽的法向磁通基本相同,即两种磁屏蔽所处的磁场基本相同,这从侧面说明导致两种磁屏蔽构件损耗不同的关键因素是磁屏蔽的磁导率。

屏蔽效果,均能有效遏制导磁钢板中的漏磁通,达到减小油箱壁损耗的目的。但两种磁屏蔽磁通密度分布基本相同,损耗数值却存在着较大差异,其主要原因在于组成磁屏蔽的无取向硅钢片和取向硅钢片磁导率的差异。

(2)由于本实验只对实验室现有的两种硅钢片进行实验研究和对比分析,其研究结果具有一定的局限性,未来将对更多品牌、不同牌号的硅钢片进行对比实验。

(3)取向磁屏蔽目前仅适用于大型变压器中,未来在考虑生产成本和环境成本的趋势下,可以考虑应用于小型或中型变压器中。

参考文献 (References):

[ 1 ] 韩晓东, 翟亚东 (Han Xiaodong, Zhai Yadong. ). 高压直流输电用换流变压器 (Converter transformer used for HVDC transmission) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2002, 38 (3): 5-6.

[ 2 ] Cheng Z, Takahashi N, Forghani B, et al. 3-D finite element modeling and validation of power frequency multi-shielding effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48 (48): 243-246.

[ 3 ] 王晓燕, 程志光, 李琳 (Wang Xiaoyan, Cheng Zhiguang, Li Lin). 改进的基于 TEAM 21 模型杂散损耗测量和验证方法 (Measurement and validation of stray loss base on improved TEAM Problem 21 Model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (6): 21-27.

[ 4 ] 朱占新, 谢德馨, 张艳丽 (Zhu Zhanxin, Xie Dexin, Zhang Yanli). 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析 (Time domain analysis of 3D leakage magnetic fields and structural part losses of large power transformers) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (9): 156-160.

[ 5 ] 石建, 李琳, 程志光, 等 (Shi Jian, Li Lin, Cheng Zhiguang, et al. ). 电力变压器油箱磁屏蔽的优化设计 (Optimization design of magnetic shields onto power transformer tank) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2013, 14 (2): 7-11.

[ 6 ] 郭晶, 李琳, 王晓燕, 等 (Guo Jing, Li Lin, Wang Xiaoyan, et al. ). 电力变压器磁屏蔽模型涡流场和损耗的计算与测量 (Calculation and measurement of eddy current and loss in magnetic) [J]. 电力科学与工程 (Electric Power Science and Engineering), 2012, 28 (6): 20-25.

[ 7 ] 程志光, 刘涛, 范亚娜, 等 (Cheng Zhiguang, Liu

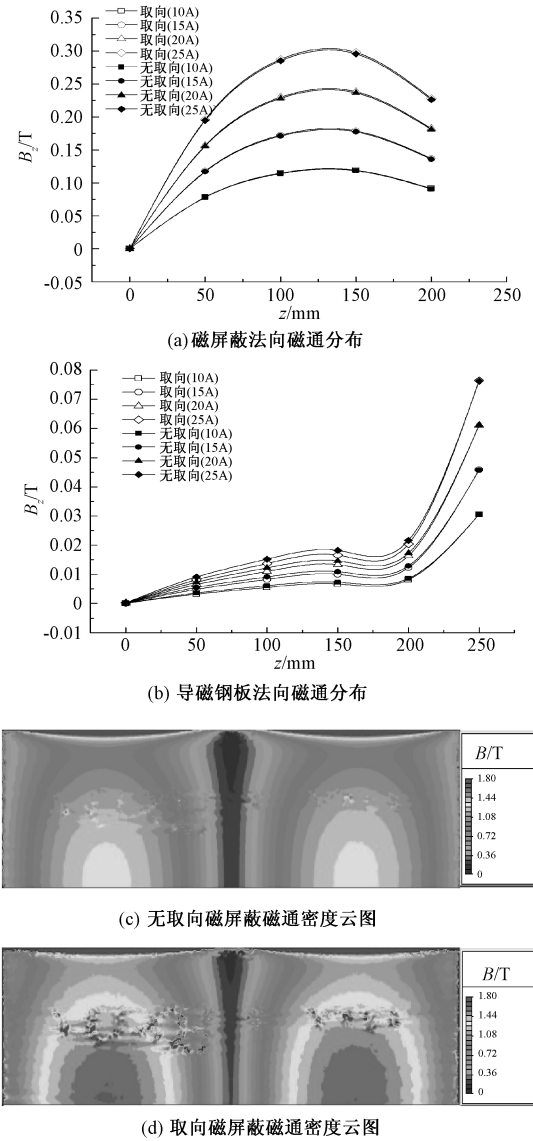


图 8 法向磁通和磁通密度云图

Fig. 8  $B_z$  and shaded plot

5 结论

本文基于 P21<sup>c</sup>-M1 磁屏蔽基准模型分别对无取向立式磁屏蔽和取向立式磁屏蔽的屏蔽效果进行对比分析,得出以下结论:

(1)无取向磁屏蔽和取向磁屏蔽均具有较好的

- Tao, Fan Yana, et al.). 基于 TEAM P21 三维杂散场问题建模仿真与验证 (TEAM P21 based validation of 3D stray-field modeling and simulation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (9): 194-203.
- [8] GB/T 3655-2008, 爱泼斯坦方圈测量电工钢片 (带) 磁性能的方法 (Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame) [S].
- [9] 赵志刚, 赵新丽, 程志光, 等 (Zhao Zhigang, Zhao Xinli, Cheng Zhiguang, et al.). HVDC 中电力变压器直流偏磁屏蔽效应研究 (Research on the shielding effects of power transformer under DC-biased condition in HVDC) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (7): 45-52.
- [10] 赵志刚, 程志光, 刘福贵, 等 (Zhao Zhigang, Cheng Zhiguang, Liu Fugui, et al.). 基于漏磁补偿的变压器结构件损耗与磁通分布研究 (Research of structure loss and flux distribution of transformer based on leakage flux compensator) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (6): 1666-1674.
- [11] 范亚娜, 刘洋, 马光, 等 (Fan Yana, Liu Yang, Ma Guang, et al.). 电力变压器两种磁屏蔽中磁通及损耗的仿真分析与验证 (Analysis and validation of flux and iron loss inside two kinds of magnetic shielding of power transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (7): 32-36.
- [12] 郭满生 (Guo Mansheng). 大容量电力变压器杂散损耗的数值分析计算 (Numerical analysis and calculation of stray loss of large power transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2010, 47 (11): 1-4.
- [13] 李永刚, 李悦宁, 程志光, 等 (Li Yonggang, Li Yuening, Cheng Zhiguang, et al.). 电力变压器中不同磁屏蔽的建模、仿真和基准化实验验证 (Modeling, simulation and benchmarking validation of magnetic shields in large power transformers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (2): 61-66.
- [14] 赵志刚, 史文军, 王振, 等 (Zhao Zhigang, Shi Wenjun, Wang Zhen, et al.). 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究 (Research of eddy-current loss of copper shielding in transformer under different frequencies) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 58-64.
- [15] Cheng Z, Takahashi N, Forghani B, et al. Effect of variation of B-H properties on loss and flux inside silicon steel lamination [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (5): 1346-1349.

## Performance analysis and experimental study on non grain-oriented silicon steel in M-type shields

ZHAO Zhi-gang, WEI Peng, RONG Jing-yi, LI Xing, LIU Hui-min

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** This research investigates different shielding effect generated in M-type shield made of non grain-oriented silicon steel laminations and grain-oriented silicon steel laminations under different current excitation in power frequency. Based on the P21<sup>c</sup>-M1 model, the applicability of non-oriented magnetic shielding in transformer magnetic shielding is studied. Load loss of excitation coils is separated from the total loss by means of the precise model of excitation coils, so as to obtain the more accurate loss of magnetic shields. The measured and calculated results show that M-type shield made of grain-oriented silicon steel laminations has better shielding effect than M-type shield made of non grain-oriented silicon steel laminations under the same current excitation due to the difference of magnetic permeability.

**Key words:** magnetic shields; non grain oriented silicon steel; grain oriented silicon steel; magnetic steel plate; stray field loss