

大型电力变压器电工钢片磁特性研究

孔庆奕^{1,2}, 容 烨¹, 李艳超³, 程志光⁴, 张 辉¹, 安 飞¹

- (1. 河北交通职业技术学院轨道交通系, 河北 石家庄 050035;
2. 电磁环境效应国家级重点实验室, 陆军工程大学, 河北 石家庄 050003;
3. 石家庄理工职业学院轨道交通系, 河北 石家庄 050228;
4. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071056)

摘要: 利用爱泼斯坦方圈测试系统,首先针对变压器制造厂商常用国内外取向硅钢片磁性能和损耗曲线进行测量和对比分析。其次,对比分析了电工钢片退火前后磁性能数据和损耗数据,目的是研究退火对电工钢片磁性能的影响。然后,考察长期运行条件下硅钢片磁特性的变化情况。最后,针对标准外不同频率和温度影响下的电工钢片磁特性进行了测量。本次测量获得的取向硅钢片磁性能数据对取向硅钢片磁性能模拟技术及变压器铁心设计、制造等方面研究具有重要意义。

关键词: 爱泼斯坦方圈; 取向硅钢片; 电磁特性

DOI: 10.12067/ATEEE1712034 **文章编号:** 1003-3076(2018)09-0017-07 **中图分类号:** TM153

1 引言

大型电力变压器的设计、制造离不开工作在高能量密度、高场强条件下的铁磁材料^[1],例如,有叠层结构的大型变压器硅钢片铁心,各类采用低碳钢、非导磁钢、取向硅钢片和混合钢构的变压器油箱、铁心夹件和拉板、电/磁屏蔽等构件。电工钢片的电磁特性具有复杂的非线性、多值性和矢量性质,包括各向异性、磁滞特性等^[2-5]。

特高压、特大容量电力变压器研发、设计、制造、运行中的节能降耗和安全等问题,与中低压、中小容量的产品相比更加突出^[6-8],在电压和容量较低的产品中可以忽略的问题在高电压大容量产品中却必须严加考虑。在这种情况下,没有充分的材料性能数据支持的关键产品的电磁分析与设计是不可想象的。电工材料生产制造商所提供的数据通常是在标准规定的条件下测得的^[9],有时与实际工况下的数据相差比较大,不能真实反应电工钢片的电磁性能。

本文利用爱泼斯坦方圈测试系统,首先针对变压器制造厂商常用国内外取向硅钢片磁性能和损耗

曲线进行测量。其次,利用爱泼斯坦方圈磁性能测量系统对两种常见的取向硅钢片进行了磁性能测量(包括磁化特性和损耗特性)并与退火前的数据进行了对比分析,目的是研究退火对电工钢片磁性能的影响。然后,为了考察长期运行条件下硅钢片磁特性的变化情况,本文选取了一台运行30年的变压器硅钢片样片进行磁性能测量,并与1988年的30ZH120材料样本数据进行比较,得出长期运行条件下电工钢片的磁特性变化。最后,针对标准外的不同频率和温度影响下的电工钢片磁特性进行了测量。本次测量获得的取向硅钢片磁性能数据对取向硅钢片磁性能模拟技术及变压器铁心设计、制造等方面研究具有重要意义。

2 爱泼斯坦方圈磁性能测量系统

爱泼斯坦方圈法是目前工业应用中广为采用的取向硅钢磁特性标准测量方法^[9-11]。25cm爱泼斯坦方圈为标准方圈,它由初级线圈、次级线圈和作为铁心的试样组成,形成一个空载变压器。采用爱泼斯坦方圈法测量时样品必须严格按照标准规定的尺

收稿日期: 2017-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577048)、中国博士后第63批基金项目(2018M633754)、河北交通职业技术学院级项目(ZR-201701)

作者简介: 孔庆奕(1983-),男,河北籍,副教授,博士后,研究方向为工程电磁场;
容 烨(1983-),女,河北籍,助教,硕士,研究方向为工程电磁场。

寸制作成样片,而且样片的最低数量和质量也有严格的规定。方圈的结构如图 1 所示。

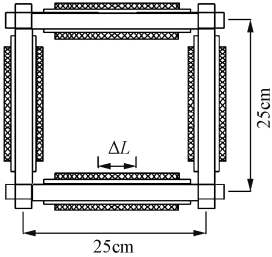


图 1 25cm 爱泼斯坦方圈

Fig.1 25cm Epstein frame

本次测量采用的爱泼斯坦方圈磁性能测量系统由长沙天恒测控技术有限公司生产。其主要被测参数的不确定度如下:磁密峰值 B_m (T) 为 0.5%;比总损耗 P_s (W/kg) 为 1%。

3 变压器铁心常用国内外取向硅钢片磁性能对比分析

取向硅钢片做为变压器的核心部件,它的磁性能直接影响着变压器的性能^[12]。长期以来,大型电力变压器用取向硅钢片一直依赖进口,近年来,我国国内的取向硅钢片研发能力飞速发展,产品磁化性能大幅提高,但是缺乏相应的应用于超高压变压器的实验数据,以至使变压器生产商产生顾虑。为了对比分析国内外取向硅钢片的磁化性能,本文选取了变压器制造厂商常用国内外取向硅钢片样片,采用爱泼斯坦方圈磁性能测量系统对样片进行了磁性能和损耗测量。

为比较国内外不同厂家相同型号产品之间的损耗性能差异,测量相同型号的产品性能。图 2 和图 3 为损耗标称值均为 0.90W/kg 和 1.05W/kg 的 4 种型号取向硅钢片产品的损耗性能曲线。在被测试产品中,B27R090 和 B30P105 为宝钢产品,27RK090 为武钢产品,27PHD090 和 30PH105 为韩国浦项产品,27ZDKH90 和 30ZH105 为日本新日铁产品,27JGH110 为日本川崎产品。

硅钢片生产厂家通常习惯用牌号高低表示硅钢片的标称值,标称值越高,牌号也越高,标称值越低,对应的牌号也越低。可以看出,在牌号较低时,国内外硅钢片的性能差别不大,甚至国内的硅钢片性能在磁密较高时优于国外硅钢片。但是随着牌号的升高,国外硅钢片损耗值开始低于国内厂商的产品,如图 2 所示,在 1.8T 时,宝钢和武钢的硅钢片损耗值

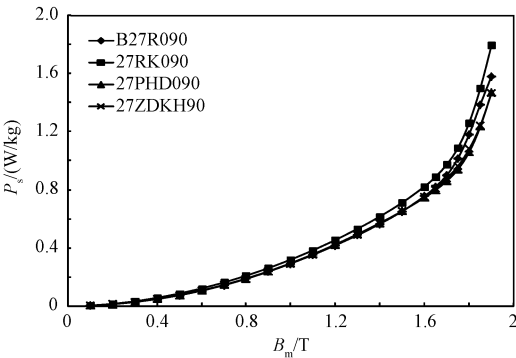


图 2 0.90W/kg 标称值取向硅钢片产品损耗性能比较

Fig.2 Comparison of loss performance of silicon steel with 0.90W/kg nominal value orientation

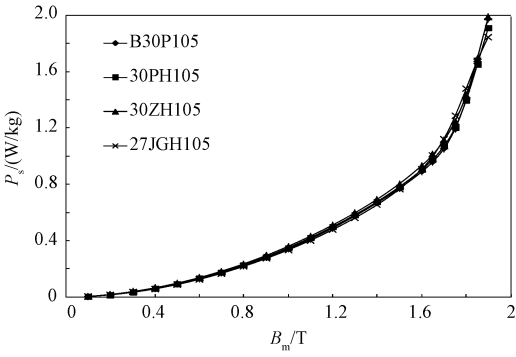


图 3 1.05W/kg 标称值取向硅钢片产品损耗性能比较

Fig.3 Comparison of loss performance of silicon steel with 1.05W/kg nominal value orientation

均大于日本新日铁和韩国浦项的硅钢片损耗值。

硅钢片经典损耗包括磁滞损耗和涡流损耗,即

$$P_{Fe} = P_h + P_e = \sigma_h f B_m^2 V + \sigma_e f^2 B_m^2 V \quad (1)$$

式中, P_{Fe} 为硅钢片铁损; P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; f 为频率; V 为硅钢片的体积; B_m 为磁密峰值; σ_h 为磁滞损耗系数; σ_e 为涡流损耗系数。

硅钢片铁损和磁密峰值的平方成正比,硅钢片磁化性能越好,相同磁场强度 H 下产生的 B_m 越大,导致铁损值也相应地增高,所以损耗性能好的硅钢片磁化性能不一定好。又因为损耗和频率也有关系,频率的变化也会对硅钢片损耗值产生影响,在频率变化条件下,铁损不再满足经典的损耗计算公式,这时可产生磁化性能和损耗性能都好的硅钢片。综上所述,硅钢片的损耗性能优劣和磁化性能优劣之间没有必然的联系。

为了分析验证硅钢片磁化性能和损耗值之间的关系,选取宝钢不同型号硅钢片样片进行磁化曲线测量,结果如图 4 所示。

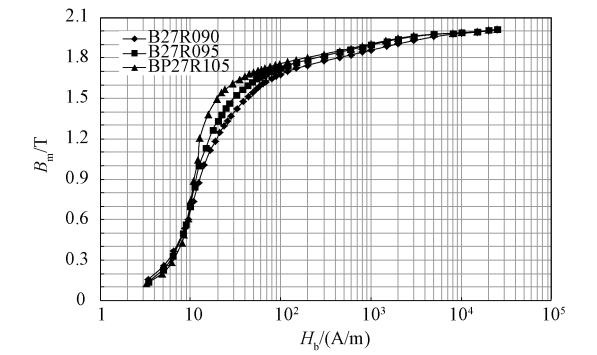


图4 宝钢3种型号取向硅钢片产品 B_m - H_b 磁化性能曲线

Fig.4 B_m - H_b magnetization curves of 3 types of silicon steel products in Baogang

图4中, H_b 表示磁通密度 B 取磁密峰值 B_m 时对应的磁场强度,因为此时 $-\partial B/\partial t=0$,可以认为涡流近似为0,所以可以将 B_m - H_b 曲线近似看成硅钢片的直流磁化曲线。测量结果显示,取向硅钢片磁化性能的优劣和损耗性能的优劣并没有直接的对对应关系。即损耗较低的取向硅钢片材料,其磁化性能却不一定较好,有些低损耗的取向硅钢片材料反而磁化性能较差。

4 变压器铁心常用取向硅钢片退火前后的磁性能

变压器用取向硅钢片在生产过程中要经过裁剪、冲压和叠装,不可避免地会产生内应力,降低了硅钢片的磁化性能,增加了铁损^[13]。为了降低这种影响,可以采取硅钢片退火的方法来降低内应力,为了定性分析退火对硅钢片磁性能的影响,本文选取了一组硅钢片进行退火处理,并对退火前后硅钢片损耗数据和磁化性能进行了对比分析,本次测量环境温度在24℃~30℃区间内,频率为50Hz,退火前后损耗测量结果如图5、图6和表1所示。图6中的 B_m - H_m 曲线由硅钢片各磁滞环最大 B 、 H 值所对应的点连接而成,其中 B_m 和 H_m 对应表示这条磁滞曲线的最大磁通密度和磁场强度值。这就是通常意义下的交流磁化曲线。

取向硅钢片损耗特性的测量结果显示,硅钢片样片进行退火处理后,损耗性能及磁化性能与退火前均有一定的变化。由于剪切过程中的应力及产生毛刺等影响,使得退火后与退火前材料性能有一定的差距。经过对比发现,在频率50Hz条件下,低磁密时,退火前后损耗差别不大;随着磁密增加,退火前后损耗差值逐渐增大,退火后损耗最大下降约

16.12%左右,在铁磁材料接近饱和时,退火对硅钢片损耗的影响逐渐减小。

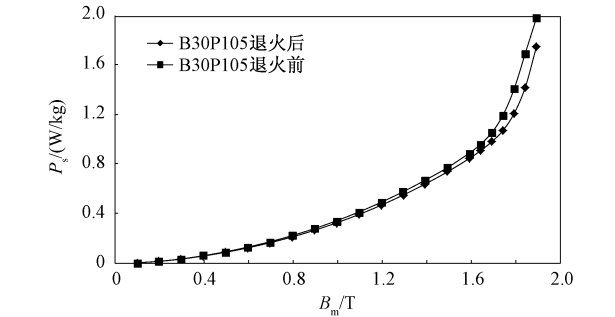


图5 B30P105退火前后损耗性能曲线对比

Fig.5 Comparison of loss performance curves of B30P105 before and after annealing

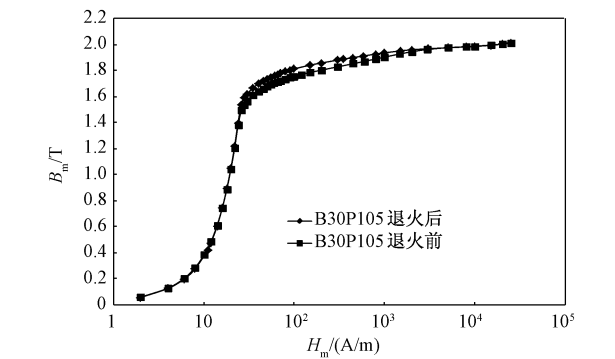


图6 B30P105退火前后 B_m - H_m 磁化性能曲线对比

Fig.6 Comparison of magnetization curves of B_m - H_m before and after B30P105 annealing

表1 B30P105退火前后损耗测量值			
Tab.1 Measurement of loss performance of B30P105 before and after annealing			
B_m /T	P_s /(W/kg)		退火前后差值(%)
	退火前	退火后	
0.10	0.0041	0.0039	-4.88
0.20	0.0158	0.0150	-5.06
0.30	0.0349	0.0332	-4.87
0.40	0.0609	0.0580	-4.76
0.50	0.0924	0.0880	-4.76
0.60	0.1298	0.1235	-4.85
1.50	0.7698	0.7360	-4.39
1.60	0.8880	0.8455	-4.79
1.70	1.0517	0.9792	-6.89
1.75	1.1923	1.0697	-10.28
1.80	1.4026	1.2059	-14.02
1.85	1.6885	1.4163	-16.12
1.90	1.9739	1.7439	-11.65

5 长期服役变压器用取向硅钢片磁性能研究

一直以来,针对变压器老化的问题主要集中在变压器绝缘老化问题上,很少从变压器取向硅钢片损耗特性和磁化特性入手分析长期服役变压器取向硅钢片磁特性的变化问题^[14]。选取长期服役 30 年的 400MV·A/121kV 变压器,其参数如表 2 所示。本文选取了变压器不同部位共 8 组取向硅钢片样片(如图 7 所示),并将 8 组取向硅钢片取样,采用爱泼斯坦方圈磁性能测量系统对此 8 组取向硅钢片进行了磁性能测量,同时与 1988 年的 30ZH120、30ZH110 硅钢片样本以及沈阳工大测量的近两年的 30ZH120 材料样本损耗数据和磁化性能数据进行对比,分析长期服役条件下磁特性的变化情况。

表 2 取样变压器参数

Tab.2 Parameters of sampling transformer

型式/参数	数值
结构型式	SUB 外铁式(壳式)
线圈型式	三相双绕组
冷却方式	强迫油循环
容量/(MV·A)	400
电压/kV	121/21
总量/t	254
不含油重/t	215
整体尺寸/m ³	8.8×6.9×7
运输尺寸/m ³	6.2×3.4×6.6

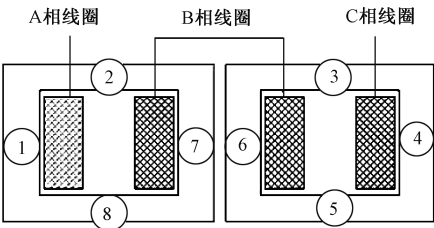


图 7 主变 400MV·A/121kV 所取硅钢样片位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of position of silicon steel sample taken from main transformer

400MV·A/121kV

损耗测量结果如图 8 和表 3 所示,磁化性能测量结果如图 9 和表 4 所示。可以看出,同一台变压器的不同部位,硅钢片样片的损耗曲线及磁化曲线存在一定的差异,所以通过单一的测量标准测得的硅钢片磁性能数据并不能真实地反应硅钢片真实工

况下的磁性能,必须对现有的测量方法加以改进,为后续真实工况下变压器用取向硅钢片的磁性能测量方法的研究提供必要的数据支持。

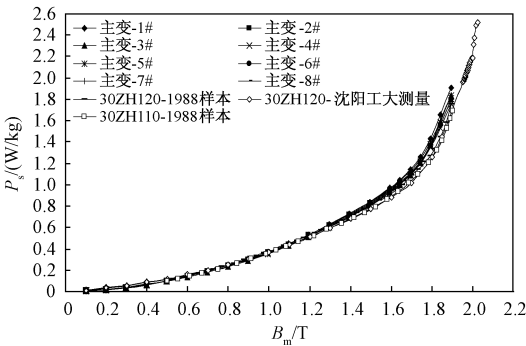


图 8 主变不同部位与样本损耗测量结果比较

Fig.8 Comparison of measurement results of loss performance among main transformer and sample

表 3 主变不同位置和 1988 年样本损耗测量数据

Tab.3 Results of loss performance of main transformer and sample of 1988

B_m/T	$P_s/(W/kg)$				
	主变-1#	主变-2#	主变-4#	主变-7#	30ZH120-1988 样本
1.60	1.0444	1.0073	1.0000	1.0366	0.9574
1.70	1.1382	1.0875	1.0896	1.1230	1.0383
1.75	1.2588	1.2013	1.2005	1.2417	1.1407
1.80	1.4339	1.3611	1.3491	1.4009	1.2717
1.85	1.6511	1.5551	1.5294	1.6013	1.4442
1.90	1.9042	1.7895	1.7541	1.8390	1.7556

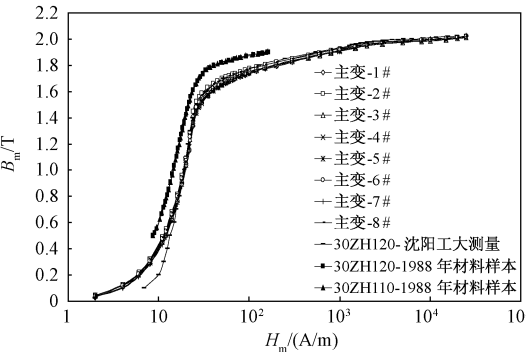


图 9 主变不同部位与样本磁化性能测量结果比较

Fig.9 Comparison of measurement results of magnetization of main transformer and samples

对比分析测量结果可知,取向硅钢片在长时间运行之后,它的磁性能和损耗数据与原始数据相比,磁性能有了明显下降,硅钢片铁损有了明显增加。

表 4 主变不同位置和 1988 年样本磁化性能测试数据

Tab.4 Results of magnetization of main transformer
and sample of 1988

B_m/T	$H_m/(A/m)$				
	主变-1#	主变-2#	主变-4#	主变-7#	30ZH120-1988 样本
0.5	12.0369	11.033	11.0273	12.0426	8.63925
0.6	14.0272	12.0202	12.0215	14.0253	9.42972
0.7	16.0016	14.0093	14.0112	16.0086	11.4126
0.8	17.9855	17.9804	17.9932	17.9945	13.5056
1.6	40.0296	30.0079	40.0106	40.1727	23.914
1.7	69.9994	49.9846	65.1526	60.0063	29.0204
1.8	199.8548	149.677	198.470	196.373	40.8875
1.9	798.9907	596.093	999.440	801.595	162.566

6 实际工况下变压器用取向硅钢片磁性能研究

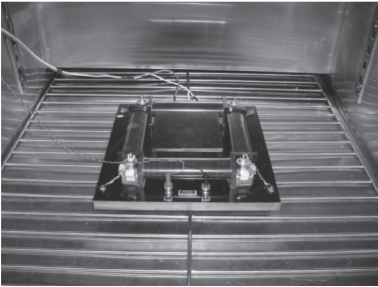
硅钢片生产商所提供的硅钢片磁性能数据,一般都是 IEC 标准规定的条件下所测得的,在变压器实际工况下硅钢片的磁特性会发生怎样的变化,生产商并没有提供,并且在变压器运行过程中也不方便进行硅钢片的磁特性测量^[15]。针对实际工况下硅钢片磁特性变化问题,本文从不同环境温度和不同工作频率两方面展开相关的研究,为真实评估和计算变压器损耗提供理论依据。

利用爱泼斯坦方圈对硅钢片 30Q120 的样片在 50Hz 激励,环境温度 25℃、50℃、75℃、100℃、125℃ 情况下进行了损耗测量。测温装置如图 10 所示,测量结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,环境温度的升高,对硅钢片的比总损耗特性影响不是很大,损耗曲线基本趋于一致。但是随着磁密的增加,环境温度会导致硅钢片比总损耗出现略微的差异,随着温度升高,比总损耗在逐渐降低。究其原因,硅钢片的损耗主要包括磁滞损耗和涡流损耗,环境温度的升高,加剧硅钢片内部磁畴的变化,导致损耗增加;但是温度升高,也会导致硅钢片的电导率下降,降低涡流损耗。总体来看,温度升高会导致损耗有略微的下降,由于变压器整体质量较大,细微的比总损耗差异,也会给变压器整体的损耗计算带来影响,为了更好地对变压器的损耗特性进行测量和仿真,需要进行不同环境温度下硅钢片磁特性的研究。

利用爱泼斯坦方圈对硅钢片 30Q120 的样片在 25℃ 室温,频率 50Hz、100Hz、200Hz、300Hz、400Hz 情况下的损耗特性进行了测量,结果如图 11 所示。



(a) 温湿交变箱及放置于其中的爱泼斯坦方圈



(b) 放置于温湿交变箱中的爱泼斯坦方圈

图 10 温控箱中爱泼斯坦方圈

Fig. 10 Epstein measurements under controllable temperature conditions

表 5 各温度下的比总损耗

Tab.5 Specific total loss at different temperatures

B_m/T	$P_s/(W/kg)$				
	25℃	50℃	75℃	100℃	125℃
0.10	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
0.20	0.016	0.016	0.016	0.015	0.015
0.30	0.036	0.035	0.034	0.034	0.033
0.40	0.062	0.061	0.060	0.058	0.057
0.50	0.094	0.092	0.091	0.088	0.087
1.50	0.778	0.767	0.755	0.740	0.727
1.60	0.897	0.883	0.872	0.857	0.844
1.70	1.058	1.042	1.035	1.021	1.014
1.80	1.365	1.349	1.343	1.335	1.334

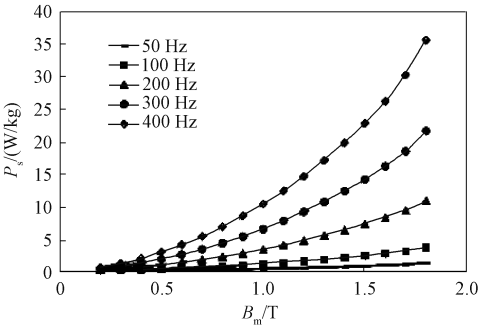


图 11 不同频率下硅钢片比总损耗测量结果

Fig. 11 Measurement results of specific loss of silicon steel sheet at different frequencies

可以看出,随着施加频率的增大,硅钢片的比总损耗也随着逐渐增大,单一采取 50Hz 工况下的硅钢片损耗特性曲线进行变压器设计计算,会给计算结果带来很大的误差。为了更好地对变压器的损耗特性进行测量和仿真,需要进行不同工作频率下硅钢片磁特性的研究。

7 结 论

(1) 本文利用爱泼斯坦方圈测试系统,对市场上常用的国内外取向硅钢片磁性能和损耗曲线进行了测量,经过测量发现,国内外硅钢片在低磁密时差别不大,但是在高磁密时差别逐渐增大。

(2) 研究退火对电工钢片磁性能的影响,测量结果显示,在频率 50Hz 条件下,低磁密时,退火前后损耗差别不大;随着磁密增加,退火前后损耗逐渐增大,退火后损耗最大下降约 16% 左右,铁磁材料接近饱和时,退火对硅钢片损耗的影响逐渐减小。

(3) 考察了长期运行条件下硅钢片磁特性的变化情况,对比发现取向硅钢片在长时间运行之后,磁性能有了明显的下降,硅钢片铁损有了明显的增加。

(4) 对标准外不同频率和温度条件下的电工钢片损耗特性进行了测量,研究发现实际工况下硅钢片磁性能数据会发生改变,采用实际工况下硅钢片磁性能数据,会使损耗计算结果更接近测量实际值,所得实验结果对变压器设计计算具有指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 毛卫民, 杨平 (Mao Weimin, Yangping). 电工钢的材料学原理 (Material science principles on electrical steels) [M]. 北京: 高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2013.
- [2] 仇圣桃, 付兵, 项利, 等 (Chou Shengtao, Fu Bing, Xiang Li, et al.). 高磁感取向硅钢生产技术与工艺的研发进展及趋势 (Recent research trends and developments of production process and technology for high magnetic induction grain-oriented silicon steel) [J]. 钢铁 (Iron and Steel), 2013, 48 (3): 1-7.
- [3] 董晶, 卢凤喜 (Dong Jing, Lu Fengxi). 变压器用取向硅钢片的现状及发展趋势预测 (Present status and development trends of oriented silicon sheet used for transformer) [J]. 钢铁研究 (Research on Iron & Steel), 2005, (4): 59-61.
- [4] 程灵, 杨富尧, 马光, 等 (Cheng Ling, Yang Fuyao, Ma Guang, et al.). 电力变压器用高磁感取向硅钢的发展及应用 (Development and application of high mag-

- netic indication on grain-oriented silicon steel for power transformer) [J]. 材料导报 (Material Review), 2014, 28 (6): 115-118.
- [5] 李建明, 梁作德, 李华春, 等 (Li Jianming, Liang Zuode, Li Huachun, et al.). 高磁感硅钢片电磁性能比较分析及应用 (Comparative analysis and application of electromagnetic properties of high magnetic induction silicon steel sheet) [J]. 变压器 (Transformer), 2014, 51 (4): 37-40.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] GB/T 13789-1992, 单片电工钢片带磁性能测量方法 (Methods and measurement of magnetic properties by means of a signal sheet tester) [S].
- [9] 赵志刚, 赵新丽, 程志光, 等 (Zhao Zhigang, Zhao Xinli, Cheng Zhiguang, et al.). 基于爱泼斯坦方圈组合和损耗加权处理技术的取向电工钢磁性能扩展模拟 (Modeling of magnetic properties of GO electrical steel based on Epstein combination and loss data weighted processing) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (9): 204-210.
- [10] 张艳丽, 李强, 王洋洋, 等 (Zhang Yanli, Li Qiang, Wang Yangyang, et al.). 谐波磁场下硅钢片磁致伸缩特性分析 (Analysis on magnetostrictive properties of silicon steel sheet under harmonic magnetic field) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (14): 545-550.
- [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, 52.
- [12] 薛刚, 李永建, 曹磊, 等 (Xue Gang, Li Yongjian, Cao Lei, et al.). 磁性材料三维磁特性传感信号检测技术

中关键问题的研究与分析 (Research and analysis on several key issues of sensor signal detection of there-dimensional (3D) magnetic properties) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 19-22, 80.

[13] 林喜智,周冀松,汪邦照,等 (Lin Xizhi, Zhou Jisong, Wang Bangzhao, et al.). 变压器匝数取整对18脉冲变压整流器波形影响的研究 (Study on influence of 18-pulse transformer rectifier waveform with rounded transformer turns) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 55-63.

[14] 杜永,程志光,谢德馨,等 (Du Yong, Cheng Zhiguang, Xie Dexin, et al.). 各向异性取向硅钢片的多方向磁性能模拟 (Modeling for multi-directional magnetic property of anisotropic grain-oriented silicon steel) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34 (12): 3022-3026.

[15] 刘洋,杨富尧,范亚娜,等 (Liu Yang, Yang Fuyao, Fan Yana, et al.). 畸变磁通作用下变压器铁心模型损耗的实验研究与模拟分析 (Experimental study and modeling analysis of iron loss in transformer core model under distorted flux density) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 65-69.

Research on magnetic characteristics of electrical steel sheet
of large power transformer

KONG Qing-yi^{1,2}, RONG Ye¹, LI Yan-chao³, CHENG Zhi-guang⁴, ZHANG Hui¹, AN Fei¹

(1. Department of Urban Mass Transit, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050035, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effect, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 3. Department of Urban Mass Transit, Shijiazhuang Institute of Technology, Shijiazhuang 050228, China; 4. Baoding Tianwei Baobian Electric Co. Ltd., Baoding 071056, China)

Abstract: Firstly, the magnetic properties and loss curve of the commonly used domestic and foreign oriented silicon steel are measured and compared. Secondly, the comparison and analysis of the magnetic performance and the loss data before and after the annealing are made to study the influence of annealing on the magnetic properties of the electrical steel sheet. Then, the changes in the magnetic properties of silicon steel on the long-term operating conditions are studied. Finally, the magnetic properties of the electrical steel sheets are measured under different frequencies and temperatures. The magnetic properties of oriented silicon steel obtained from this measurement are of great significance for the research on the magnetic properties of oriented silicon steel and the design and manufacture of transformer cores.

Key words: Epstein frame; oriented silicon steel sheet; electromagnetic performance