

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.07.003

旋转磁场强度测量方式研究

师泯夏¹, 靳宇晖¹, 吴邦¹, 胡德贵¹, 邱爱慈¹, 李军浩¹,
王国利², 杨芸²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 南方电网科学研究院有限公司, 广州 510800)

摘要: 为精确旋转磁场强度的测量结果,文中利用有限元仿真软件建立三维电磁场模型,比较了两种主要磁场的测量方法,即H线圈和罗氏线圈的测量误差,得出H线圈测量结果更加准确的结论并对此作出解释。在此基础上,研究了H线圈的测量距离与测量误差的关系,并将研究结果应用至试验过程中,减小了实际测量结果的误差。

关键词: 旋转磁场; H线圈; 罗氏线圈; 测量方式

Study of Methods for Measuring Rotating Magnetic Field

SHI Minxia¹, JIN Yuhui¹, WU Bang¹, HU Degui¹, QIU Aici¹, LI Junhao¹, WANG Guoli², YANG Yun²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electrical Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510800, China)

Abstract: In order to accurately measure the rotating magnetic field strength, the finite element simulation software has been applied to build 3D electromagnetic field model. Error of two major methods about measuring magnetic fields H coils and Rogowski Chattock coil has been studied. A conclusion that measuring results using H coils are more accurate has been made and explained. Based on that, the relationship of test error with the distance between H coil and surface of sheet has been studied, and the results have been used to the experiments. The error of experimental measurement has been reduced finally.

Key words: rotating magnetic field; H coil; Rogowski Chattock coil; measuring method

0 引言

电力系统中广泛应用的旋转电机与变压器在运行过程中,其铁心会产生磁通密度方向在一个周期内随时间变化的旋转磁场,该旋转磁场会严重影响电机与变压器铁心的损耗与利用效率,因此研究铁心组成一电工钢片的二维磁特性十分必要。目前世界上针对该问题的研究已有三十多年^[1-2],但由于二维磁特性测量可重复性差,测量误差较大,电工钢片二维磁特性测量一直没有形成统一标准。

现应用于二维磁特性磁场强度测量的方法主要有两种:H线圈测量^[3-8]和罗氏线圈测量^[9-12],H线圈制作简单,但无法紧贴样片表面使得测量产生误差,罗氏线圈制作较为复杂且标定困难,但其端部可紧贴样片表面。因此利用有限元仿真研究两种

测量方式,对计算结果进行定性解释,并从测量误差出发比较H线圈测量与罗氏线圈测量。

为精确二维磁特性的测量结果,日本、澳大利亚学者对磁场强度测量误差进行研究^[13-17],但研究中并未考虑H线圈本身的厚度且未研究不同激励下的测量误差。因此本文应用有限元计算研究不同激励电压下,H线圈测量误差与测量距离关系,并将计算结果应用至实际测量过程中,以减小试验测量磁场强度的误差。

1 罗氏线圈测量与H线圈测量原理

研究电工钢片旋转磁场时需要利用基于方形样片的十字形单片测量仪(SRSST)^[17-23],该测量仪由一对相互垂直的XY轴磁极与连接磁极的铁轭组成,具体装置见图1。磁极磁场由捆扎在铁心上的励磁

线圈产生,将电工钢片样品放置在XY轴磁极中间,研究过程中需要测量样品的4个磁场分量,分别是平行于X轴Y轴方向的样品中点的磁场强度与磁通密度,其中磁通密度可以通过绕制在样品中部20 mm×20 mm处的B线圈利用电磁感应定律测量得到。而由于测量仪磁极产生的磁通并不全部经测试样品闭合,所以无法利用公式 $H = nIl/l$ 计算样品中点磁场强度,需要运用其它的磁场强度测量装置,其中H线圈测量与罗氏线圈测量方法应用较为广泛。

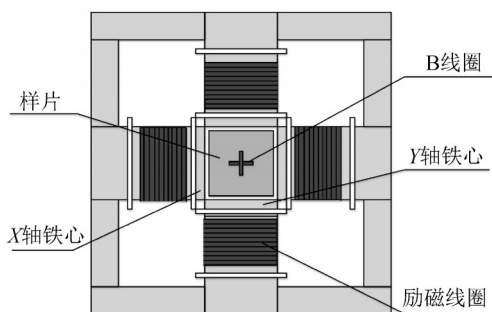


图1 基于方形样片的十字形单片测量仪

Fig. 1 Square rotational single sheet tester

1.1 H线圈测量磁场强度原理

H线圈为一个均匀绕制在非磁性材料上的薄片形线圈传感装置,H线圈测量磁场强度主要利用的是电磁感应定律边界条件:不同介质表面磁场强度连续的原理。通过放置在样品表面的H线圈测量磁场强度,H线圈具体结构与位置见图2。对测量得到的H线圈感应电压进行计算可求出样品中部表面磁场强度 $H_{x,y}$ 的值,当磁场强度方向平行于样品表面时,其具体计算公式为

$$H_{x,y} = \frac{1}{N_{x,y} A_{x,y} \mu_0} \int U_{x,y} dt \quad (1)$$

式(1)中: $H_{x,y}$ 表示X轴Y轴方向上的磁场强度; $N_{x,y}$ 、 $A_{x,y}$ 分别表示X轴Y轴方向上H线圈的匝数与横截面积; $U_{x,y}$ 表示X轴Y轴方向上H线圈的感应电压。

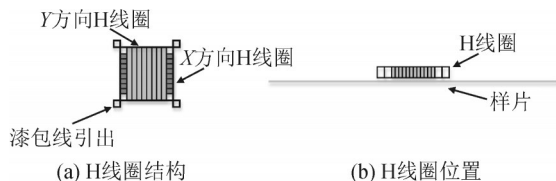


图2 H线圈结构与位置

Fig. 2 Structure and position of H coil

1.2 罗氏线圈测量磁场强度原理

罗氏线圈又称为磁位差计,是一种特殊结构的螺旋线圈传感器^[24],其结构为均匀绕制在非磁性材料上的环形线圈,可以弯曲的形式放置在被测对象

表面。罗氏线圈测量样品磁场强度时利用的是安培环路定律,见图3,罗氏线圈内部的磁场与样品表面流经磁场形成闭合回路,由于该回路包围的电流为零,罗氏线圈内部磁场路径积分等于样品表面磁场路径积分,即

$$\int_{C_1} H \cdot dl = H_{AB} l_{AB} \quad (2)$$

式(2)中: H 表示罗氏线圈内部磁场强度; H_{AB} 表示AB两点间切向磁场强度分量; l_{AB} 表示AB两点间距离。因此样品磁场强度可由罗氏线圈感应电压计算得到,即

$$H_{AB} = \frac{L_{average}}{\mu_0 S n l_{AB}} \int U dt = K \int U dt \quad (3)$$

式(3)中, $L_{average}$ 表示罗氏线圈内平均积分路径; S 表示罗氏线圈横截面积; n 表示罗氏线圈匝数; U 表示罗氏线圈感应电压; K 为表示罗氏线圈灵敏度的参数;可由 $L_{average}$ 、 S 等参数计算得到,也可由亥姆霍兹线圈校准得到。

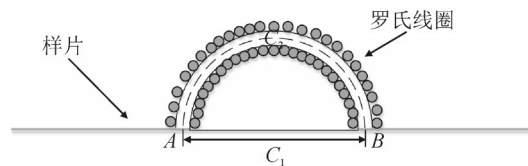


图3 罗氏线圈结构与位置

Fig. 3 Structure and position of Rogowski Chattock coil

2 H线圈与罗氏线圈测量仿真

利用有限元仿真软件分别模拟罗氏线圈和H线圈放置在十字形单片测量仪样品中部时磁场分布情况,计算得到H线圈和罗氏线圈感应电压,再应用式(1)、(3)计算得到H线圈和罗氏线圈测量得到的样品磁场强度。

计算过程中,由于样品与磁极之间的间隙会对样品表面磁场分布均匀程度产生影响,间隙为零时磁场分布不均匀,间隙较大时磁场分布较为均匀但由于空气中漏磁增加,样品表面磁场强度减小装置效率不高,而考虑到实际加工的准确度,该空隙距离无法无限减小,因此在仿真过程中取空隙距离为2 mm,在不考虑样品材料各向异性的条件下,建立十字形单片测量仪三维有限元模型,当激励电压为10 V时,样品表面磁通分布与磁力线分布情况见图4、5。

2.1 H线圈测量仿真结果与分析

仿真H线圈测量磁场强度过程时,在原有的十字形单片测量仪模型基础上建立H线圈三维有限

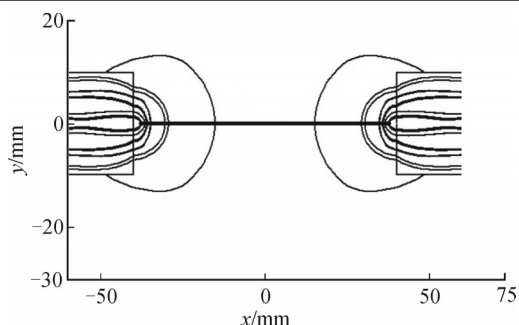


图4 样片表面磁力线分布

Fig. 4 Distribution of magnetic lines on the surface of sheet

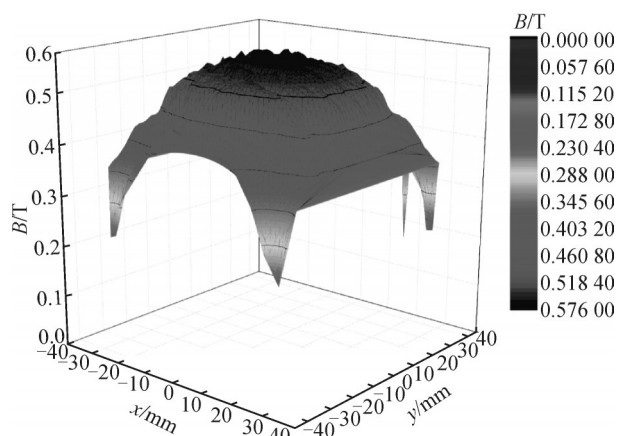


图5 样片表面磁通密度分布

Fig. 5 Distribution of flux density on the surface of sheet

元模型并将其设置在紧贴样片中点位置,计算得到H线圈在激励电压为10 V时的感应电压,应用式(1)得到H线圈测量磁场强度值,并与仿真得到的样片中点磁场强度值做对比,见图6。

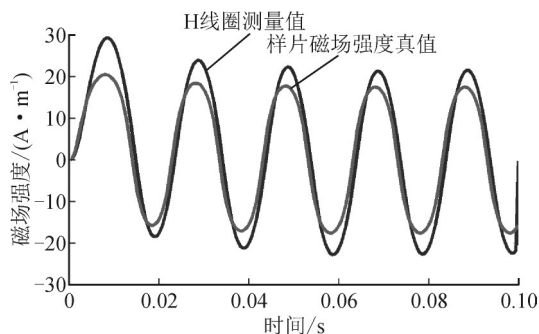


图6 H线圈测量值与真值比较

Fig. 6 Comparison of measuring value and true value of H coil

从图6可以看出,磁场强度的测量值与真值在0.05 s之前波形峰值较大并呈下降趋势,在0.05 s之后峰值达到稳定,这主要是因为单片测量仪从零时刻起始磁化并稳定有一个过程。图6中,H线圈测量得到的磁场强度峰值为21.51 A/m,磁场强度计算真值为17.47 A/m,两者频域分量以50 Hz为主,相角相差9°。以曲线拟合度作为测量准确度的衡量准

则,H线圈两条曲线拟合度为0.895 8,该值越接近1拟合度越好,证明H线圈测量值与真值较为接近,H线圈测量磁场强度较为准确。

除样片表面磁场,圆弧形磁力线会经空气穿过H线圈,其穿过H线圈磁场方向与样片表面磁场同向,因此H线圈磁场强度测量值大于真值,H线圈与其周围磁场的关系见图7。从图7还可以看出, n_1 、 n_2 分别表示同一条磁力线环绕H线圈a,b的匝数,且 $n_1 > n_2$,说明对比线圈b,距离样片较远的线圈a环绕匝数更多,其感应电压更大,因此H线圈距样片越远,测量得到的磁场强度误差更大。

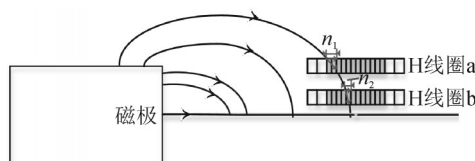


图7 H线圈周围磁场与H线圈关系

Fig. 7 The relationship between magnetic field around H coil and H coil

2.2 罗氏线圈测量仿真结果与分析

仿真罗氏线圈测量时,在原有的测量仪模型基础上建立罗氏线圈三维有限元模型并将其设置在样片中点位置,罗氏线圈端口紧贴样片表面,计算得到H线圈在激励电压为10 V时的感应电压,应用式(3)得到罗氏线圈测量磁场强度值,并与仿真得到的样片中点磁场强度真值做对比,见图8。图8中,罗氏线圈测量得到的磁场强度峰值为14.42 A/m,磁场强度计算真值为18.87 A/m,两者频域分量以50 Hz为主,相角相差35.82°,罗氏线圈两条曲线拟合度为0.838 6,在同等仿真计算条件下,罗氏线圈测量误差比H线圈大,拟合程度也不如H线圈。

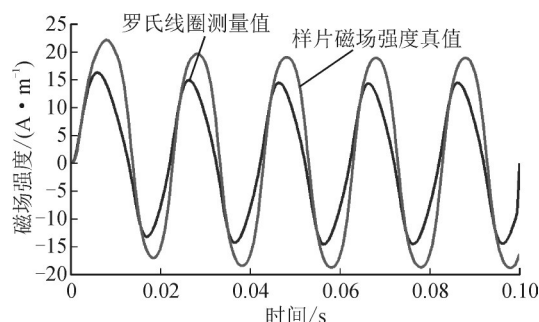


图8 罗氏线圈测量值与真值比较

Fig. 8 Comparison of measuring value and true value of Rogowski Chattock coil

实际试验过程中,由于罗氏线圈端口可较好贴合样片表面,因此可不考虑其端口与样片距离对测量结果的影响,罗氏线圈与其周围磁场的关系见图9。除样片表面磁场,圆弧形磁力线会经空气穿过罗氏线圈,其穿过罗氏线圈磁场方向与样片表面磁场反向,

因此罗氏线圈磁场强度测量值小于真值。

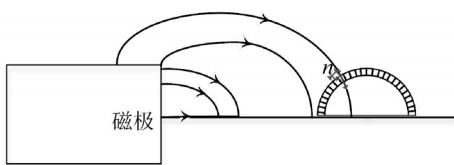


图9 罗氏线圈周围磁场与罗氏线圈关系

Fig. 9 The relationship between magnetic field around Rogowski Chattock coil and Rogowski Chattock coil

3 H线圈测量仿真与实验结果

基于上述罗氏线圈与H线圈测量结果的比较,相比罗氏线圈,H线圈测量误差更小,因此在实际测量时会选用H线圈测量磁场强度的方法。由于H线圈是放置在样片表面的,因此H线圈周围特别是样片表面上方的磁场分布会影响H线圈的感应电压,且原则上H线圈离样片表面越近,磁场强度测量结果越准确。但由于加工局限,H线圈与样片无法完全贴合,即H线圈与样片之间距离无法为0。为精确磁场强度测量结果,需要研究H线圈距离与测量误差之间的关系。利用有限元仿真软件参数化扫描功能,改变H线圈与样片之间的距离,计算其感应电压对应的磁场强度值与测量误差,不同激励电压下H线圈样片之间的距离与测量误差关系见图10。

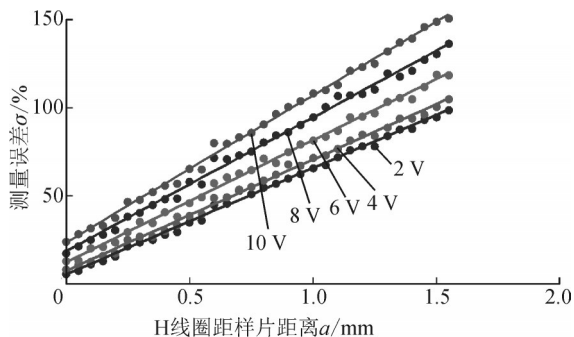


图10 不同激励电压下H线圈测量误差

Fig. 10 Error of H coil under different exciting voltage

图10中,H线圈测量误差为

$$\sigma = \frac{(H_m - H_{true})}{H_{true}} \% \quad (4)$$

式(4)中: H_m 为H线圈感应电压对应磁场强度; H_{true} 为仿真计算样片中点磁场强度值。可以看出,随着H线圈与样片距离的增大,测量误差也增大且成线性关系。

为将计算结果应用至实际测量过程中并将仿真与实验相结合,首先对不同激励电压下测量误差与H线圈距离的关系进行拟合,拟合结果见表1。再制作与仿真模型规格相同的十字形单片测量仪与H线圈,在上述激励电压下测量H线圈感应电压并计算得到试验测量磁场强度,应用拟合得到的测

量误差与H线圈距样片距离的关系式,得到试验H线圈试验测量误差与排除误差后的磁场强度试验测量精准值。在激励电压为10 V时,H线圈试验测量值、试验测量精确值与磁场强度真值见图11。从图11中可以看出,H线圈在未排除误差前试验测量值与真值相差158%,排除误差后,H线圈试验测量精确值与真值相差1.03%,说明H线圈不能紧贴样片表面会严重影响磁场强度测量精度,且仿真拟合后H线圈的测量精确值可较好表示磁场强度真值。

表1 不同激励电压下测量误差与H线圈距离的关系

Table 1 Relationship of error and distance under different exciting voltage

激励电压/V	测量误差与H线圈距样片距离关系
2	$\sigma = 60.5a + 4.775$
4	$\sigma = 63.1a + 6.945$
6	$\sigma = 69.37a + 11.72$
8	$\sigma = 75.97a + 17.95$
10	$\sigma = 83.64a + 22.9$

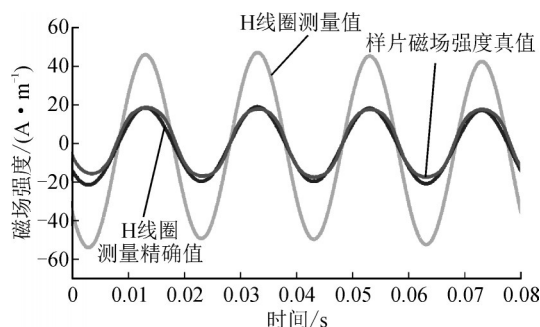


图11 试验H线圈测量值、测量精确值与磁场强度真值

Fig. 11 Measured value, exact value and true value in experiment

由于测量误差与H线圈测量距离呈线性关系的,也可利用双H线圈法,将同一测量线圈放置不同测量距离得到磁场强度测量值,再应用线性插值计算得到磁场强度真值,计算公式为

$$H = \frac{d_2 H_1 - d_1 H_2}{d_2 - d_1} \quad (5)$$

式(5)中: H_1 、 H_2 分别表示H线圈距样片不同距离时磁场强度测量值; d_1 、 d_2 分别表示样片与H线圈之间距离。测量原理结果与仿真拟合方法相近,在此不再赘述。

4 结语

为减小十字形单片测量仪的磁场强度的测量误差,首先构建十字形单片测量仪模型并利用有限元软件计算磁场分布情况,对比了两种磁场强度测量方法—H线圈测量与罗氏线圈测量方法,通过计

算两种方法的测量误差得出H线圈测量结果更准确的结论。在此基础上,研究了H线圈的测量距离与测量误差的关系,通过拟合两者关系,精确了试验过程中磁场强度的测量结果。文中的创新点在于仿真过程中设置了H线圈与罗氏线圈,通过其感应电压计算得到磁场强度测量值,使仿真结果更贴合实际。并将试验与仿真相结合,两者结果吻合并验证了精确手段的有效性。

参考文献:

- [1] ENOKIZONO M, SIEVERT J. Numerical analysis of accuracy of rotational magnetic loss measurement apparatus[J]. IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, 1990, 5(9):742-748.
- [2] ZHU J G. Numerical modeling of magnetic materials for computer aided design of electromagnetic devices[M]. Sydney: Technology University, 1994.
- [3] GUO Y G. Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: A review[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2008, 44(2): 742-748.
- [4] ABDALLH A A. A Rogowski-Chattock coil for local magnetic field measurements: Sources of error[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(10): 7003.
- [5] 李丹丹, 刘福贵, 李永建, 等. 一种新的混合矢量磁滞模型磁滞算子定义方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 15-21.
LI Dandan, LIU Fugui, LI Yongjian, et al. A new definition of the hysteron in hybrid vector hysteresis model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 15-21.
- [6] 陈龙, 汪友华, 赵洽宇, 等. 超微晶合金旋转磁特性测量用励磁装置的设计与优化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 19-27.
CHEN Long, WANG Youhua, ZHAO Hanyu, et al. Design and optimization of a magnetizer for high frequency rotational magnetic characterization for nanocrystalline alloy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 19-27.
- [7] ZHU J G, RAMSDEN V S. Two dimensional measurement of magnetic field and core loss using a square specimen tester[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1993, 29(6): 2995-2997.
- [8] ENOKIZONO M, SUZUKI T, SIEVERT J D. Measurement of dynamic magnetostriction under rotational magnetic field[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1990, 26(5): 2067-2069.
- [9] ALINEJAD-BEROMI Y A, MOSES A J, MEYDAN T. New aspects of rotational field and flux measurement in electrical steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1992, 112(1-3): 135-138.
- [10] ENOKIZONO M. Studies on two-dimensional magnetic measurement and properties of electrical steel sheets at oita university[C]//1st International Workshop Magnetic Properties Electrical Sheet Steel Under 2-D Excitation. Braunschweig, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt(PTB), 1991: 82-101.
- [11] SIEVERT J. Recent advances in the one- and two-dimensional magnetic measurement technique for electrical sheet steel[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1990, 26(5): 2553-2558.
- [12] BRIX W. Improved method for the investigation of the rotational magnetization process in electrical steel sheets[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1984, 20(5): 1708-1710.
- [13] ENOKIZONO M, SHIRAKAWA G, SUZUKI T, et al. Two-dimensional magnetic properties of silicon-steel sheet[J]. IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, 1991, 11(6): 937-946.
- [14] SCHULTE F J. Eine meßeinrichtung zur zweidimensionalen erfassung der magnetischen eigenschaften von elektroblech[C]//Dissertation RWTH Aachen.[S.l.]: Fakultät für Elektrotechnik.[s.n.], 1989: 270-277.
- [15] SALZ W, HEMPEL K A. Which field sensors are suitable for a rotating flux apparatus[C]//1st International Workshop Magnetic Properties Electrical Sheet Steel Under 2-D Excitation. Braunschweig, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt(PTB), 1991: 117-126.
- [16] ZHU J G, ZHONG J J, RAMSDEN V, et al. Power losses of soft magnetic composite materials under two dimensional excitation[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(8): 4403-4405.
- [17] ZHONG J J, ZHU J G. Improved measurement with 2-D Rotating fluxes considering the effect of internal field[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2005, 41(10): 3709-3711.
- [18] JESENİK M. Field homogeneity in a two-phase rotational single sheet tester with square sample[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2003, 39(3): 1495-1498.
- [19] YOON H S. Finite element analysis of a very large-scale permanent magnet BLDC motor considering two-dimensional magnetic properties of electrical steels[C]//31st International Telecommunications Energy Conference.[S.l.]: IEEE, 2009: 8307.
- [20] AIHARA S. Measurement of local vector magnetic properties in laser scratched grain-oriented silicon steel sheet with a vector-hysteresis sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2012, 48(11): 4499-4502.
- [21] ZENG J B. Investigation and simulation on magnetic hysteresis properties of magnetorheological fluid[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2017, 64(2): 1611-1616.
- [22] NAKANO M, NISHIMOTO H, FUJIWARA K, et al. Improvements of single sheet testers for measurement of 2-D magnetic properties up to high flux density[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1999, 35(5): 3965-3967.
- [23] MORI Y, MIYAGI D, NAKANO M, et al. Measurement of magnetic properties of grain-oriented electrical steel sheet using 2D single sheet tester[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, 87(9b): 47-51.
- [24] MAKAVEEV D, VON RAUCH M, DE WULF M, et al. Accurate field strength measurement in rotational single sheet testers[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 215(2): 673-676.

师浪夏(1993—),女,博士研究生,研究方向为变压器直流偏磁与磁场测量。