

干式变压器铜铝线材涡流检测技术开发与应用

边美华，张兴森

(广西电网有限责任公司电力科学研究院，广西 南宁 530023)

摘要：干式变压器作为电网的重要设备，当前存在“线圈以铝代铜、以次充好”现象。如何快速准确鉴别批量干式变压器线圈材质，成为当前配电网关注的难题。根据干式变压器特点，结合电磁涡流检测原理，建立了以铜铝线材特征相位、线材宽度为变量的检测分析方法，并找出铜铝线材线宽与特征相位关系规律，经现场检测验证，解决了干式变压器在不破坏情况下铜铝线材鉴别难题。

关键字：电磁涡流检测；干式变压器；铜铝线材

Development and application of eddy current testing technology for copper and aluminum wire of dry transformer

BIAN Meihua, ZHANG Xingsen

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: As an important equipment of power grid, the dry-type transformer has the phenomenon of “replacing copper with aluminum in the coil”. How to identify the coil material of batch dry transformer quickly and accurately has become a difficult problem for distribution network. according to the characteristics of dry transformer and the principle of electromagnetic eddy current detection, a detection and analysis method is established with the characteristic phase of material property of copper and aluminum coil and the width of coil wire as variables, and find out the relationship between line width and characteristic phase of copper-aluminum wire. This method is verified by field test and solve the problem of difficult identification of copper-aluminum wire of dry transformer coil without damage.

Key words: electromagnetic eddy current testing; dry transformer; copper-aluminum wire

0 引言

干式变压器作为电力的重要设备，具有安全、防火、无污染、机械强度高、抗短路能力强、局部放电小、热稳定性好、可靠性高、使

用寿命长、低损耗、低噪声、节能效果明显、散热性能好免维护、体积小、重量轻、占地面积少和安装费用低等优点，广泛用于局部照明、高层建筑、机场、码头和机械设备等场所^[1]。然而，由于铜材价格是铝材的3倍，当前国内某些企业为了降低生产成本，存在“线圈以铝代铜、以次充好”现象，这不仅给

广西电网有限责任公司科技项目 (GXKJXM20151011)

电网带来巨大直接的经济损失，也给电力系统带来了安全隐患。如何针对干式变压器线圈材质进行快速无损检测，成为干式变压器检测面临的难题。

目前，在干式变压器线圈材质快速甄别方法方面，国内学者对其开展了大量试验研究，也提出了一些可行的方法^[2]。文献[3]提出通过解体破坏绕组绝缘来检测，但该方法检测成本高，工程实用性差，不适合干式变压器批量检测。文献[4]提出通过变压器质量、尺寸等参数计算判断，但是不同厂家、不同系列的干式变压器设计差异较大，难以形成准确的判断标准。文献[5-6]提出基于X射线的鉴别方法，该方法探讨了均匀遮蔽物中不同绕组材质的X射线衰减规律，但需先确定外层材质，对于实际变压器的不均匀外壳环境尚不能进行工程应用。文献[7-8]提出用数字检测仪对配电变压器的电气参数进行测量，并使用等效电桥法测算出变压器绕组的直流电阻大小，结合变压器设计手册鉴别其绕组材质，该方法虽简单，但准确度比较差。文献[9-10]均提出基于热电效应的变压器绕组材质鉴别方法，该方法对于500 kV·A以下的小容量配电绕组铜铝材质检测准确性较高，试验操作也简单，时间周期短，但不适用于容量大于500 kV·A的大容量配电绕组铜铝材质检测。

干式变压器绕组部分被绝缘材料严密包裹，只外露接线端子，其绝缘介质一般为环氧树脂，厚度一般为4~7 mm，不导电和不导磁，高压绕组一般具有多层圆筒式或多层分段式特点。本文提出利用电磁涡流检测原理，通过铜铝线材宽度与特征相位关系规律来判断线圈材质，实现在不破坏情况下干式变压器铜铝线材的鉴别。

1 检测原理及仪器设计

1.1 原理

变压器线圈导线无论是铜材、铝材还是铜

铝合金材料，均是导体材料。如果在干式变压器环氧树脂表面放置涡流探头，产生交变磁场，依据电磁感应原理，铜材或铝材将会产生感应电流（涡电流），由于铜铝导体材料的电导率不一致，则感应电流（涡电流）的相位存在差异。通过检测出导体感应涡流的变化并进行数据处理，则可以判断出变压器导体的材质。

在同样规格条件下，当把涡流探头从空气中放置到线圈上时，铜铝材质涡流信号变化如图1所示。如果变压器线圈是铜材，则阻抗信号将从A点移动到B点；如果变压器线圈是铝材，则阻抗信号将从A点移动到C点。AB和AC两段的幅度和角度存在差异。根据特征相位是在AB段附近变化还是在AC段附近变化，即可推断出线圈是有铜材还是有铝材^[11]。

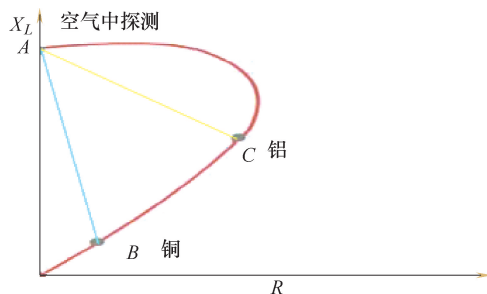


图1 铜铝材质涡流信号变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of eddy current signal change of copper aluminum material

1.2 影响因素分析

根据干式变压器特点以及涡流检测原理，影响因素主要包括探头励磁线圈尺寸、频率、环氧树脂层厚度、线圈材质、线材的宽度和厚度及干式变压器工作温度。据相关资料表明^[12-13]，线材厚度和环氧树脂对检测影响较小，环氧树脂厚度在3~8 mm之间，特征相位差为0°~1°，同宽度不同厚度线材特征相位差为0°~3°，但线材宽度对检测影响较大，同厚度不同宽度线材特征相位角差为0°~19°。此外，工作温度超过70℃时，电涡流传感器的灵敏度才会显著降低。而干式变压器是在常温下检测，因此工作温度的影响暂不予以考虑，

但必须考虑线宽对检测的影响。

1.3 涡流仪器设计

涡流检测仪的基本原理是信号发生器产生交变电流供给检测线圈，线圈产生交变磁场并在工件中感应涡流，涡流受到工件性能的影响并反过来使线圈阻抗发生变化，然后通过涡流传感器拾取被检测工件信息信号。该信号经调理电路处理后，送入 A-D 转换器进行高速采样，转换后的数字信号送 DSP 进行检波、滤波和相位旋转等处理，ARM9 嵌入计算机对 DSP 送来的信号信息进行进一步处理，最终在屏幕上铜铝材质特征相位^[14]，仪器设计框图

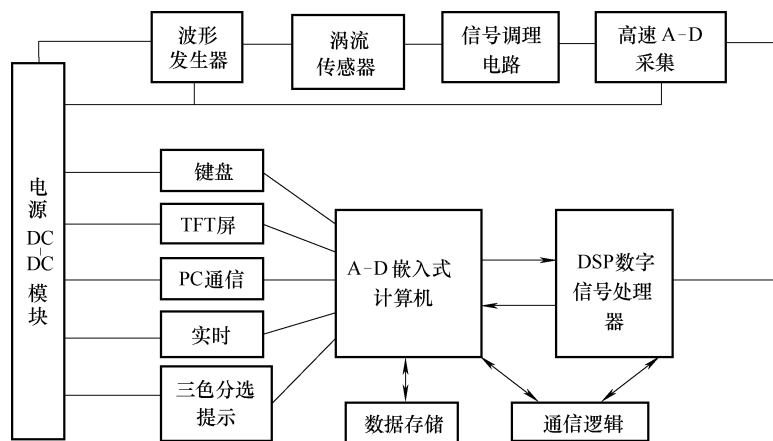


图 2 仪器设计框图

Fig. 2 Block diagram of instrument design



图 3 干式变压器涡流检测仪

Fig. 3 Eddy current detector for dry type transformer

2 铜铝线圈导线线宽与特征相位变化规律分析

2.1 对比试样制作

通过收集不同厂家生产使用的不同规格铜

如图 2 所示。根据文献[11]给出特征参数计算公式，干式变压器导线材质鉴别采用的特征相位探头线圈的平均半径约为 2 mm。此外，利用涡流探头在铜铝线材上移动时线材中间和边缘产生的涡流强度不一致形成波峰波谷原理，即两个波峰之间距离为线材宽度，设计线圈宽度检测探头。线圈宽度探头包括高频笔式探头和编码器两部分，软件基于 LabVIEW 基础进行编写。为保证检测灵敏度，线圈宽度探头检测线圈直径为 1.5 mm，频率范围为 50~500 kHz，编码器规格为 2000P/R，转轮直径为 40 mm。开发的涡流仪器及探头如图 3 所示。

铝线材，按照干式变压器的制作方式，采用亚克力板粘接铜铝线材，亚克力板厚度为 5 mm，铜铝试样规格列式为宽度×厚度，部分铜铝试样如图 4、图 5 所示。

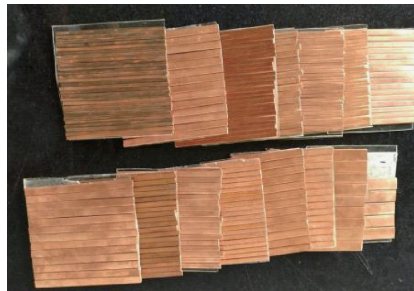


图 4 制作铜试样

Fig. 4 Making copper sample



图 5 制作铝试样
Fig. 5 Making aluminum sample

2.2 特征相位采集

项目组采用开发仪器和探头，对实验室制作的各规格对比试样进行检测，不同规格铜铝线材与特征相位关系如表 1 所示。

表 1 各容量线材对比试样特征相位
Tab. 1 Characteristic phase of comparison sample for each capacity wire rod

序号	铜		铝	
	规格/mm	相位(°)	规格/mm	相位(°)
1	12.7×3.6	258	15×4.9	258
2	12.5×3.15	258	13.2×4.75	255
3	11.2×2.8	255	11.2×4	251
4	9×2.8	252	10×3.42	246
5	7.47×3.75	249	9×3.35	244
6	7.1×2.65	244	8.27×2.94	239
7	6.63×2.77	240	7.5×3.55	239
8	6.31×2.51	239	7.1×4	239
9	5.6×2.5	235	6.3×3.75	235
10	5.3×2.0	229	6×3.15	229
11	4.7×2.22	226	5.3×2.5	222
12	4.5×2.36	226	4×2.5	214
13	4×1.6	219	3×1.9	203
14	3.75×1.8	217	φ2.35	202
15	3.55×1.5	214	φ2.24	201
16	3.15×1.4	209	-	-
17	3×1.4	208	-	-
18	φ2	201	-	-
19	φ1.7	199	-	-
20	φ1.56	199	-	-

2.3 铜铝线圈导线线宽与特征相位回归分析

根据表 1 铜铝线圈导线线宽与特征相位对应关系，采用 SPSS 软件进行回归分析，得到模型汇总和参数估计值，具体如表 2、表 3 所示，铜铝线圈导线线宽与特征相位拟合函数如图 6、图 7 所示。

表 2 铜线材模型汇总和参数估计值
Tab. 2 Copper wire model summary and parameter estimation

方程	模型汇总				参数估计值		
	R ²	F	df ₁	df ₂	Sig.	常数	b ₁ b ₂
指数	0.9907	820.157	2	17	0.000	176.3	13.2 -.52

表 3 铝线材模型汇总和参数估计值
Tab. 3 Aluminum wire model summary and parameter estimation

方程	模型汇总				参数估计值		
	R ²	F	df ₁	df ₂	Sig.	常数	b ₁ b ₂
指数	0.9874	422.673	2	12	0.000	179.4	10.5 -.33

其中 R^2 为决定系数，反映因变量的全部变异能通过回归关系被自变量解释的比例， R_2 越大，越接近 1，说明模型拟合效果越好；Sig 是指显著性水平，一般来说越接近 0 越好； F 值是方差检验量，是整个模型的整体检验量，评价拟合的方程有没有意义，当 Sig 值越小时， F 值越大，方差分析显著性越明显； df 为自由度，表示样本中独立或能自由变化的自变量个数； b_1 和 b_2 为常数。

铜线圈导线线宽与特征相位函数关系式为

$$y = -0.52x^2 + 13.2x + 176.3 \tag{1}$$

铝线圈导线线宽与特征相位函数关系式为

$$y = -0.33x^2 + 10.5x + 179.4 \tag{2}$$

从 SPSS 软件回归分析结果表明，回归模型显著，拟合度好，铜铝线圈导线线宽与特征相位拟合函数满足要求。

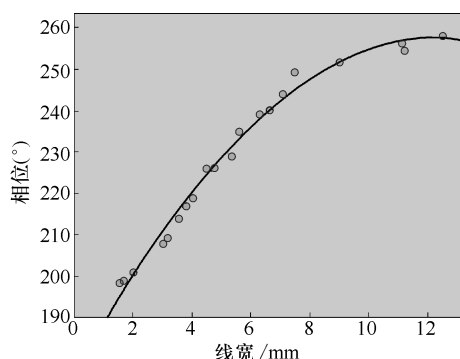


图6 铜线材线宽与特征相位拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of line width and characteristic phase of copper wire

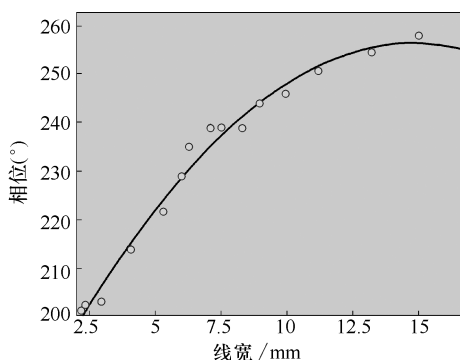


图7 铝线材线宽与特征相位拟合曲线

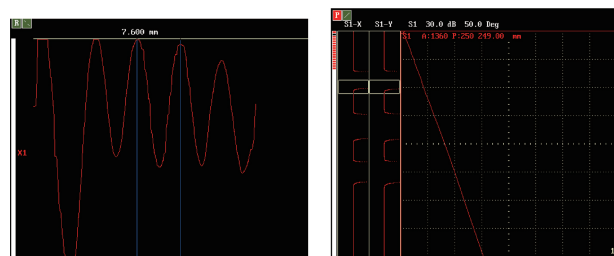
Fig. 7 Fitting curve of line width and characteristic phase of aluminum wire

3 现场验证

利用本文中的干式变压器线圈材质无损检测方法及相关检测装置,对国内各主要干式变压器厂家生产的各种型号干式变压器进行生产现场检测验证,覆盖了干式变压器全部变电容量,涉及变电容量 315~2 500 kV·A,共检测超过 300 台。由于篇幅原因,只列举其中 8 种型号干式变压器,检测结果如图 8~图 15 和表 4 所示。通过检测干式变压器线圈导线宽度和特征相位两个参数,将检测结果与铜铝线圈材质规律进行对比,从而确定线圈导线铜铝材质。试验结果表明,仪器检测结果和变压器实际材质相符,验证了该方法及配套装置的正确性和实用性,可以准确有效地鉴别铜材和铝材

干式变压器。

(1) SCB11-2500/10 干式变压器



(a) 线圈导线宽度

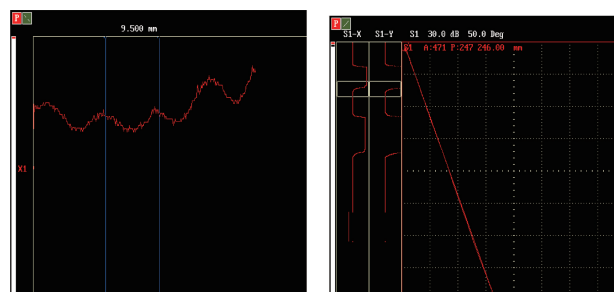
(b) 特征相位检测

图8 出厂编号为 125001170020 线圈

导线线宽及特征相位检测图

Fig. 8 Detection diagram of wire width and characteristic phase of 125001170020 coil

(2) SCB10-2000/10 干式变压器



(a) 线圈导线宽度

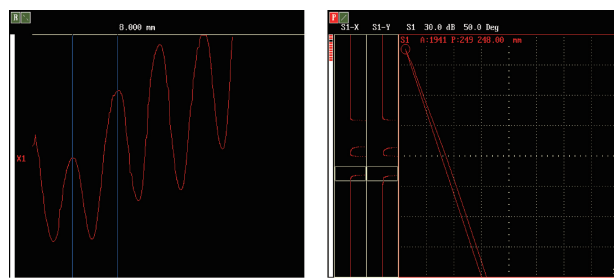
(b) 特征相位检测

图9 出厂编号为 020002170028 线圈

导线线宽及特征相位检测图

Fig. 9 Detection diagram of wire width and characteristic phase of 020002170028 coil

(3) SCB11-1250/10 干式变压器



(a) 线圈导线宽度

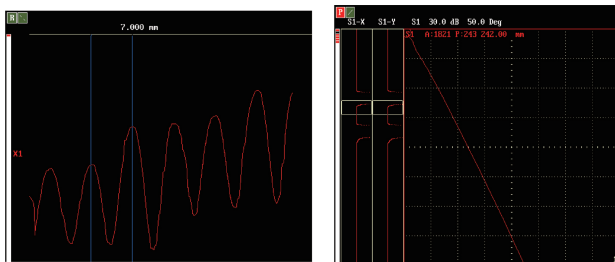
(b) 特征相位检测

图10 出厂编号为 112501170125 线圈

导线线宽及特征相位检测图

Fig. 10 Detection diagram of wire width and characteristic phase of 112501170125 coil

(4) SCB11-1000/10 干式变压器

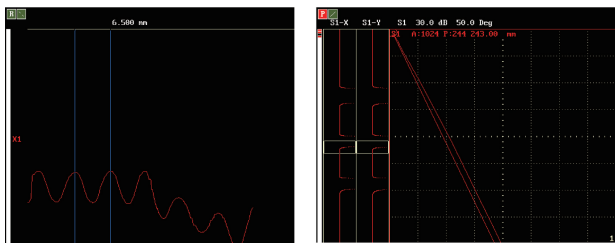


(a) 线圈导线宽度 (b) 特征相位检测

图 11 出厂编号为 110001170131 线圈导线
线宽及特征相位检测图

Fig. 11 Detection diagram of wire width and
characteristic phase of 110001170131 coil

(5) SCB11-800/10 干式变压器

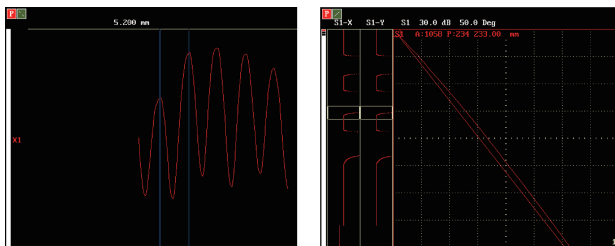


(a) 线圈导线宽度 (b) 特征相位检测

图 12 出厂编号为 108001170939 线圈导线
线宽及特征相位检测图

Fig. 12 Detection diagram of wire width and
characteristic phase of 108001170939 coil

(6) SCB10-630/10 干式变压器

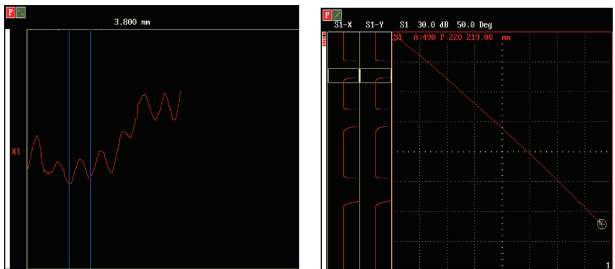


(a) 线圈导线宽度 (b) 特征相位检测

图 13 出厂编号为 106301170320 线圈导线
线宽及特征相位检测图

Fig. 13 Detection diagram of wire width and
characteristic phase of 106301170320 coil

(7) SCB11-400/10 干式变压器

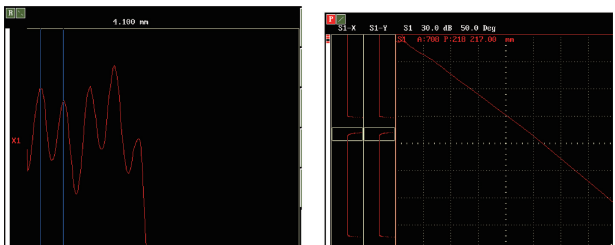


(a) 线圈导线宽度 (b) 特征相位检测

图 14 出厂编号为 104001170069 线圈
导线线宽及特征相位检测图

Fig. 14 Detection diagram of wire width and
characteristic phase of 104001170069 coil

(8) SCB10-315/10 干式变压器



(a) 线圈导线宽度 (b) 特征相位检测

图 15 出厂编号为 003152170043 线圈
导线线宽及特征相位检测图

Fig. 15 Detection diagram of wire width and
characteristic phase of 003152170043 coil

表 4 各种型号干式变压器检测结果与验证对比表
Tab. 4 Test results and verification comparison
of various types of dry type transformers

序号	型号	检测 线宽/ mm	曲线计			判断	实际
			特征 相位 (°)	算铜特 征相位 (°)	算铝特 征相位 (°)		
1	SCB11-2500/10	7.6	250	247	240	铜	铜
2	SCB10-2000/10	9.5	247	255	249	铝	铝
3	SCB11-1250/10	8	249	249	242	铜	铜
4	SCB11-1000/10	7	243	243	236	铜	铜
5	SCB11-800/10	6.5	244	240	234	铜	铜
6	SCB10-630/10	5.2	234	230	225	铜	铜
7	SCB11-400/10	3.8	220	218	214	铜	铜
8	SCB10-315/10	4.1	218	222	216	铝	铝

4 结束语

1) 针对当前干式变压器线圈材质鉴别难题, 本文提出了基于电磁涡流原理的干式变压器线圈材质鉴别方法, 只需要在干式变压器环氧树脂表层处放置涡流探头, 无须直接接触变压器内部线圈, 不会对变压器绝缘等产生破坏性影响, 是一种新的无损检测方法。

2) 建立以铜铝线材特征相位、线圈导线宽度为变量的检测分析方法, 同时开发出专用变压器涡流检测仪, 并找出铜铝线材线宽与特征相位关系规律。

3) 经现场验证, 本方法鉴别准确性高, 仪器操作简单, 检测时间短, 具有较高的工程应用价值。将该方法应用至干式变压器入网检测中, 可以有效地减少因干式变压器线圈材质质量问题带来的安全隐患, 提高配电网的安全稳定运行水平。EA

参考文献

- [1] 周贤士. 干式变压器的发展动态 [J]. 变压器, 2004 (3): 36-41.
- [2] 李超群, 秦永保, 宋玉鼎, 等. 配电变压器绕组材质的快速甄别方法 [J]. 电工技术, 2018 (9): 66-68.
- [3] 鞠进良. 查处以铝充铜变压器案的技巧 [J]. 中国质量技术监督, 2014 (1): 30-31.
- [4] 顾小虎, 于春雷. 铝导线油浸式变压器的判断方法 [J]. 变电技术, 2014 (5): 19-20.
- [5] 张仁奇, 李小军, 蒋欣, 等. 配电变压器线圈用材的 X 射线鉴别方法 [J]. 无损检测, 2015, 37 (1): 49-55.

- [6] 胡加瑞, 陈伟, 陈红冬, 等. 干式变压器绕组材质鉴别无损检测研究 [J]. 变压器, 2018 (2): 65-68.
- [7] 戴明强. 变压器直流电阻常见故障的判断与处理 [J]. 数字化用户, 2013 (30): 32-32.
- [8] 袁世平. 变压器直流电阻异常的诊断和处理 [J]. 浙江电力, 2013, 32 (20): 34-36.
- [9] 杜林, 余欣玺, 周年荣, 等. 基于热电效应的变压器绕组材质鉴别方法 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (7): 2275-2280.
- [10] 伍鸿飞, 韩凌云, 李国彬, 等. 热电效应法配变绕组材质现场鉴别测试研究 [J]. 云南电力技术, 2018, 46 (4): 89-91.
- [11] 边美华, 梁庆国, 张兴森, 等. 干式变压器铜铝线材涡流检测系统的设计与开发 [J]. 广西电力, 2018, 41 (5): 52-55.
- [12] 李贵娥, 麻红昭, 沈家旗, 等. 电涡流检测技术及影响因素分析 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (11): 1665-1669.
- [13] 边美华, 张兴森, 梁庆国, 等. 干式变压器线材涡流检测影响因素分析 [J]. 无损检测, 2020, 44 (2): 21-23.
- [14] 边美华, 梁庆国, 张兴森, 等. 便携式干式变压器导线材料原位无损检测装置的研制 [J]. 无损检测, 2018, 40 (2): 65-68.

作者简介



边美华

边美华 (1980—) 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电网设备材料无损检测及失效分析工作。

(收稿日期: 2021-01-15)