DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.302 **中图分类号**：TM472 **文献标志码**：A

基于磁通分流原理的混合磁路电抗器研究

梅 超[1]，吴 鹏[2]，杨富尧[3]，韩 钰[3]，苏海林[1]，邹中秋[1]
(1.安徽瑞德磁电科技有限公司，芜湖 241002；2.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103；3.国网智能电网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室，北京 102211)

摘要：干式铁心电抗器作为无功补偿的核心装置在电力系统中被大规模使用，但由于铁心磁致伸缩效应导致的振动噪声问题，成为限制其在城区室内变电站使用的主要因素。利用磁通分流原理，采用低磁致伸缩系数的软磁复合材料和硅钢共同作为电抗器铁心材料，考虑到二者材料有效磁导率的不同，合理调控磁通量在铁心中的分布，使硅钢部分流入较大磁通量，而软磁粉芯部分承担较少的磁通。基于上述设计思想，设计并制造了混合磁路电抗器样机。研究结果表明，在相同容量情况下，混合磁路电抗器的铁心损耗低于纯硅钢电抗器，并且其振动噪声均不超过60 dB(A)，低于硅钢电抗器。

关键词：干式铁心电抗器；磁通分流；低磁致伸缩；软磁复合材料；低振动噪声

Study on Hybrid-magnetic-circuit Reactors Based on Magnetic Flux Shunt Principle

MEI Chao[1], WU Peng[2], YANG Fuyao[3], HAN Yu[3], SU Hailin[1], ZOU Zhongqiu[1]
(1. Anhui Red Magneto-Electric Technology Co., Ltd., Wuhu 241002, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: Dry-type core reactors are usually employedas key equipment to achieve reactive compensation in electric power systems on a large scale. However, the vibration noise caused by the magnetostriction effect of core becomes a dominant factor that restrict their applicationsto indoor substations in urban areas. Soft magnetic composites (SMCs) with low magnetostriction and silicon steel were used together as the core material of reactors based on the magnetic flux shunt principle. With the consideration of difference in the efficient permeability between two kinds of materials, the flux in the core is reasonably regulated, so that the larger portion of the flux is carried by the silicon steel component, while the smaller portion flows through the part of SMCs. Based on the design idea, a hybrid-magnetic-circuit (HMC) reactor prototype was designed and fabricated. The research results show that the core losses of HMC reactors were less than those of the pure silicon steel reactor, and thenoise of HMC reactors was less than 60 dB(A), which was lower than that of the silicon steelreactor.

Keywords: Dry-type core reactor; magnetic flux shunt; low magnetostriction; soft magnetic composite (SMC); low vibration noise

随着输配电系统的高速发展，提升电网运行稳定性和电能质量逐渐成为国内外学者研究的热点[1]。在电力系统中，干式铁心电抗器起到无功补偿和消除电网谐波的作用，是电网运行不可或缺的重要组成部分[2]。随着用电需求的激增，目前城区室内变电站大范围建立，但变电站内的三相铁心电抗器作为无功补偿的核心装置往往产生较大噪声，成为城区电力装置的主要噪声源[3-4]。为解决电抗

收稿日期：2023-10-15；**修回日期**：2023-12-10；**录用日期**：2023-12-29；**网络首发日期**：2024-04-11
基金项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202118252A-0-0-00)
This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China Headquarters under the grant 5500-202118252A-0-0-00

器噪声问题，国内外学者开展了大量研究。Rossi等[5]利用有限元软件分析磁致伸缩与噪声之间的关系，探讨了电抗器噪声来源；祝丽花等[6]建立铁心磁致伸缩效应的三维磁-机械耦合模型，分析铁心在磁场作用下振动位移的周围声场分布；吴书煜等[7]基于结构-噪声耦合的声学原理，以电抗器振动速度为载荷，构建电抗器多物理耦合模型，分析了电抗器噪声分布；周晓雨[8]对高频条件下非晶合金磁致伸缩和噪声之间的关系进行详细研究，提出了磁致伸缩模型并验证了模型准确性；罗进等[9]构建了电机定子磁致伸缩效应与振动噪声之间的数学关系，确定了磁致伸缩效应对电机振动噪声谐波分布的影响。基于上述分析可知，铁心电抗器振动噪声主要来源于铁心材料的磁致伸缩效应。为解决干式铁心电抗器振动噪声污染问题，目前工程领域主要采取被动治理措施，例如，给电抗器搭建隔声罩或建立隔音房；又或者改进铁心结构，在铁心下部加橡胶垫和改变气隙垫的硬度来实现降低噪声的目的[10-12]。但这种治理方式难以从根本上解决电抗器噪声问题，且增加了电抗器的制造成本和装置体积。因此，寻找 1 种可用于电抗器的低磁致伸缩系数铁心材料才有望从根本上改善电抗器的振动噪声问题。

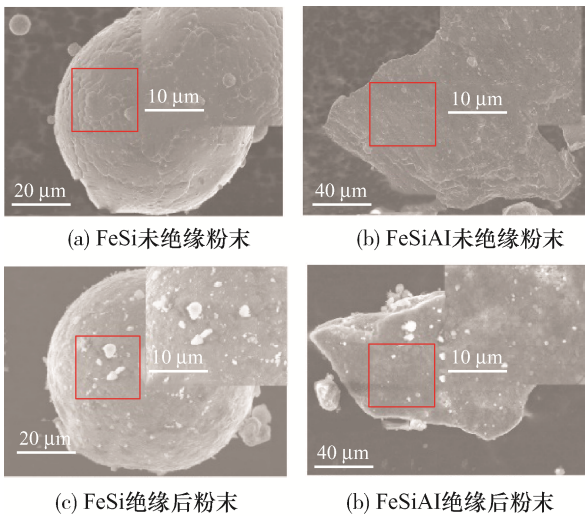
随着粉末冶金和材料制造技术的迭代发展，1 种低磁致伸缩系数的软磁复合材料(又名金属软磁粉芯)成为近年来软磁领域的研究热点[13]。软磁复合材料利用高电阻率的绝缘层包覆在金属磁粉表面，通过粉末冶金工艺制成。可调节金属磁粉的合金成分使其磁致伸缩系数接近于 0[14]，从而使得磁心具有低噪声特性，为从根本上改善铁心电抗器振动噪声问题提供了可能。软磁复合材料独特的微观结构使其有效磁导率远低于传统软磁材料，导致其磁滞损耗大于硅钢软磁材料[15]，因此若在不改变磁路结构情况下直接用软磁复合材料作为三相电抗器铁心材料虽然有望改善噪声问题，但会导致电抗器铁损大幅增加，增大了热击穿的风险。

基于上述分析，本文利用磁通分流原理对传统铁心电抗器的磁路结构进行优化改进，采用硅钢和软磁复合材料共同作为铁心柱材料制备出混合磁路电抗器，利用 2 种材料的不同磁导率合理调控铁心柱内的磁通密度分布，使铁心电抗器在低铁耗的同时具有低噪声特性，为改善电网中干式铁心电抗器的噪声问题提供了思路和有益参考。

1　软磁复合材料研究

本文采用商购气雾化铁硅粉末(FeSi-5.5wt%，D50=33 μm) 和破碎铁硅铝粉末 (Fe-9.6wt%Si-5.4wt%Al，D50=60 μm)作为原料制备软磁复合材料。铁硅与铁硅铝软磁复合材料的制备流程为：①将对比磁粉质量为 0.5%的磷酸溶液倒入对比磁粉质量为 45%的乙醇溶液中，得到磷酸绝缘液；②将磁粉加入到磷酸绝缘溶液中；③将混合液进行充分搅拌后加热到 80 ℃并保温 30 min；④取对比磁粉质量为 0.3%的粘结剂和 0.4%的脱模剂加入到干燥后的绝缘粉末中，并进行充分混合获得待成型粉末；⑤利用压机将上述待成型粉末压制成所需条块，获得样品生坯；⑥将样品生坯置于 730 ℃的氮气中热处理 30 min 以消除压制过程中产生的内应力，最终获得铁硅/铁硅铝软磁复合材料。

图 1 为铁硅与铁硅铝粉末绝缘前后的扫描电子显微镜 SEM(scanning electron microscope)照片。



(a) FeSi未绝缘粉末　(b) FeSiAI未绝缘粉末

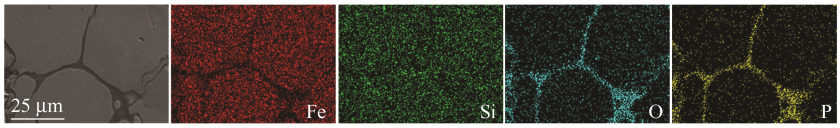
(c) FeSi绝缘后粉末　(b) FeSiAI绝缘后粉末

图 1　铁硅与铁硅铝粉末绝缘前后的典型 SEM 照片

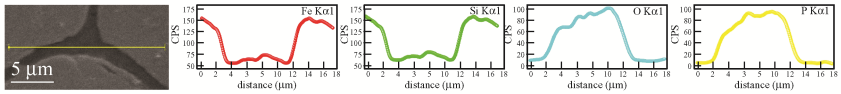
Fig.1 Typical SEM images of raw and insulated FeSi and FeSiAl powders

图 1(a)为未绝缘铁硅粉末，铁硅粉末表面具有明显的鳞片状结构；图 1(b)为未绝缘铁硅铝粉末，铁硅铝粉末表面光滑，边角处较为尖锐；图 1(c)为绝缘后的铁硅磁粉，磷酸钝化后的磁粉表面粗糙，铁硅粉末的鳞片状结构被绝缘包覆层覆盖；图 1(d)为绝缘后的破碎铁硅铝粉末，磷酸钝化后的磁粉表面粗糙度有明显提升，边缘处由于包覆层的存在使得平滑程度提升。

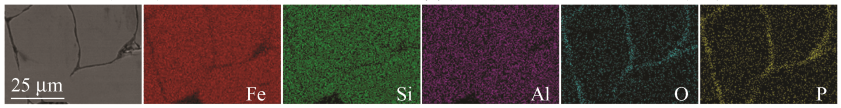
除 SEM 照片外，可利用 X 射线能谱仪 EDS (energy dispersive spectrometer)探测软磁复合材料磁心断面处的元素分布来证明绝缘包覆层的存在。图 2(a)为典型铁硅软磁复合材料磁心断面的 EDS 元素面分布图，可知 Fe、Si 元素信号主要集中在磁粉区域，O、P 元素信号均匀分布在磁粉与磁粉之间，说明绝缘包覆层均匀分布在铁硅磁粉表面；图 2(b)为铁硅磁粉界面处的 EDS 线扫描结果，可知 O、P 元素与 Fe、Si 元素在磁粉界面相同位置处呈现相反变化规律，进一步说明在铁硅磁粉表面形成了磷酸盐绝缘包覆层；图 2(c)和(d)分别为典型铁硅铝软磁复合材料磁心断面的 EDS 元素面分布图及铁硅铝磁粉界面处的 EDS 线扫描结果，可在磁粉颗粒之间清晰发现 O、P 元素信号，并且 O、P 元素在磁粉界面处的信号强度增强，Fe、Si、Al 元素信号主要分布于磁粉区域，在磁粉之间的气隙处呈现减弱趋势，进一步说明磷酸与铁硅铝磁粉表面发生钝化反应，形成绝缘包覆层。综上所述，采用磷酸钝化技术，可成功在铁硅磁粉与铁硅铝磁粉表面形成均匀的绝缘包覆层。



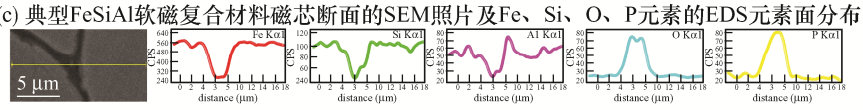
(a) 典型FeSi软磁复合材料磁芯断面的SEM照片及Fe、Si、O、P元素的EDS元素面分布图



(b) FeSi软磁复合材料典型磁粉界面处的SEM照片及对应Fe、Si、O、P元素的EDS线扫描结果



(c) 典型FeSiAl软磁复合材料磁芯断面的SEM照片及Fe、Si、O、P元素的EDS元素面分布图



(d) FeSiAl软磁复合材料典型磁粉界面处的SEM照片及对应Fe、Si、Al、O、P元素的EDS线扫描结果

图 2 铁硅、铁硅铝软磁复合材料磁心断面处、磁粉界面处 SEM 照片及对应元素面分布

Fig. 2 Cross-sectional and interfacialSEM images of FeSi and FeSiAl SMC and corresponding elemental distribution

2 三相干式铁心电抗器磁路设计与分析

2.1 三相干式铁心电抗器结构

本文的研究对象为三相干式铁心电抗器，其基本结构如图 3 所示。电抗器主要由 3 部分组成，分别为铁心饼、绕组和气隙。对于干式铁心电抗器而言，气隙结构设计尤为关键，由于三相磁路存在中间柱磁阻低于边柱磁阻的问题，所以可以通过气隙

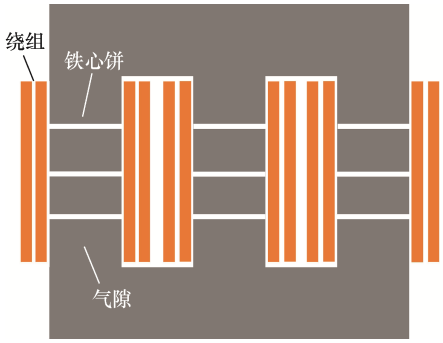


图 3 干式铁心电抗器结构

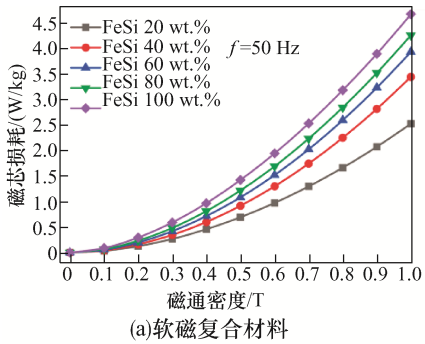
Fig. 3 Structure of dry-type core reactor

设计来达到要求的电感值并实现三相平衡。

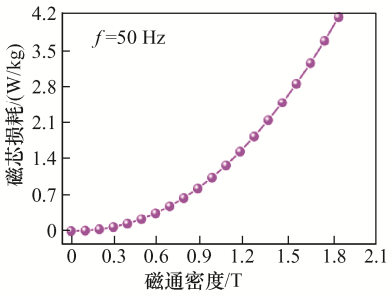
2.2 电抗器铁心材料损耗分析

对比铁硅和铁硅铝软磁复合材料可知，铁硅材料的饱和磁通密度大于铁硅铝材料，而铁硅铝材料的磁晶各向异性常数接近 0，导致铁硅铝材料的磁心损耗低于铁硅材料。从磁器件设计角度考虑可知，高的饱和磁通密度可以有效减少磁器件的体积和降低进入磁饱和的风险；低的磁心损耗可以降低磁器件的温升，避免磁器件热击穿。因此，通过上述 2 种材料的复合合理调控软磁材料的饱和磁通密度和磁心损耗，对于降低电抗器的工作噪声和运行过程中的铁心损耗非常关键。

本文基于铁硅和铁硅铝软磁复合材料，将二者绝缘后的粉末按照不同质量比进行混合得到复合粉芯，工频条件下软磁复合材料和硅钢材料的磁心损耗对比如图 4 所示。图 4(a)为不同质量比复合粉芯在工频条件下磁心损耗随磁通密度变化的曲线。可以看出，随着工作磁通密度增加，所有样品的磁心损耗逐渐增加，并且随着铁硅含量的降低，复合粉芯的磁心损耗逐渐降低。此外，复合粉芯的饱和磁通密度随铁硅含量降低而逐渐降低。综合考虑，选取饱和磁通密度和磁心损耗介于中间的复合粉芯，即铁硅含量为 60 wt%的复合粉芯，作为电抗器设计的铁心材料。图 4(b)为硅钢材料的磁心损耗随磁通密度变化的曲线，对比图 4(a)与(b)可知，软磁复合材料在相同情况下磁心损耗高于硅钢。因此，仅通过复合粉芯直接替代硅钢不能解决三相干式电抗器的铁心损耗和温升问题，有必要对传统的磁路结构进行重新设计。



(a)软磁复合材料



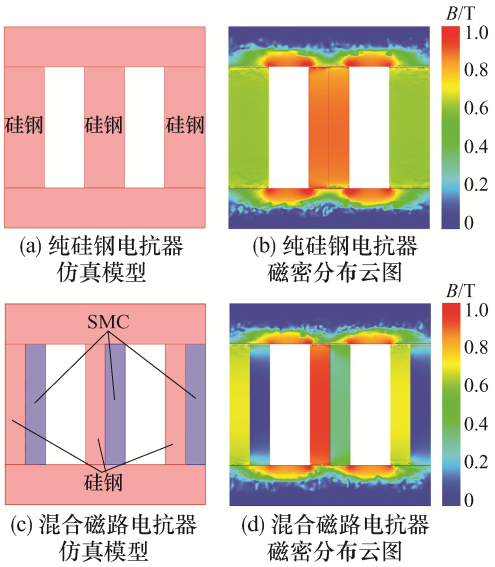
(b)硅钢材料

图 4　工频条件下软磁复合材料和硅钢的磁心损耗随磁通密度变化的曲线

Fig. 4 Curves of core loss varying with flux density at 50 Hz for SMCs and silicon steel

2.3 磁通分流原理分析

考虑到软磁复合材料的有效磁导率远低于硅钢材料，因此硅钢磁路的磁阻小于软磁复合材料磁路的磁阻，造成磁力线更易在硅钢磁路进行汇聚与流通。为验证上述分析，采用有限元电磁场仿真软件对三相电抗器电磁参数进行仿真计算，结果如图 5 所示。图 5(a)与(b)分别为纯硅钢电抗器仿真模型和磁密分布云图，图 5(c)与(d)分别为软磁复合材料/硅钢混合磁路电抗器仿真模型和磁密分布云图。由图 5(b)可知，当铁心柱为硅钢材料时，磁通密度分布较为均匀；由图 5(d)可知，当铁心柱为硅钢与软磁复合材料组合时，磁力线主要集中在磁导率较高的硅钢材料处。综上可知，可利用 2 种材料磁阻不同的特性调控磁通量在 2 种材料中的分



(a) 纯硅钢电抗器仿真模型　(b) 纯硅钢电抗器磁密分布云图

(c) 混合磁路电抗器仿真模型　(d) 混合磁路电抗器磁密分布云图

图 5　硅钢电抗器和混合磁路电抗器模型和磁密分布

Fig. 5 Models and distribution of flux density for silicon steel reactor and HMC reactor

布，让硅钢磁路承担主要磁通量，而软磁复合材料磁路承担较少磁通量，可成功实现磁通分流，从而降低软磁复合材料的工作磁密，进而有效抑制软磁复合材料铁心的损耗。

2.4 三相电抗器样机设计

本文研究的电抗器主要性能指标为：额定电压 220 V，额定电抗 14.5 Ω，采用自然风冷方式进行散热。其他主要指标参数见表 1。依据上述性能指标和磁通分流原理，分别设计 1 个硅钢电抗器样机(样机 A)和 2 个软磁复合材料/硅钢混合磁路电抗器样机(样机 B、样机 C)，其铁心截面示意图如图 6 所示。样机 A 的铁心柱为纯硅钢材料；样机 B 与样机 C 的铁心柱为软磁复合材料+硅钢材料，且样机 B 与样机 C 的软磁复合材料体积占比均为铁心柱总体积的 30%。基于上述磁路结构，研制了 3 台 10 kvar 电抗器样机，其实物如图 7 所示。

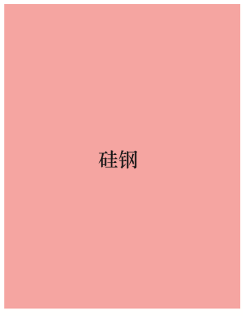
2.5 三相电抗器样机电磁分析

图 8 为三相电抗器样机的磁密分布云图。可以看出，本文设计的 2 种混合磁路结构电抗器成功实现磁通分流，即中柱硅钢部分承担了较大的磁通量，软磁复合材料部分承担了较少的磁通量。

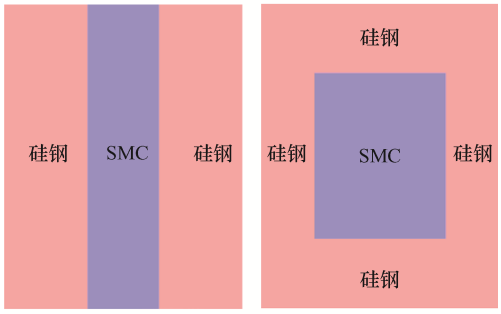
表 1 三相铁心电抗器技术指标

Tab. 1 Technical indexes for three-phase core reactors

指标	参数/设置
额定功率/kvar	10
额定电压/V	220
额定电流/A	15
电感值/mH	32
工作频率/Hz	50
绕组匝数	226
外形尺寸/mm	360×310×230
绝缘等级	F



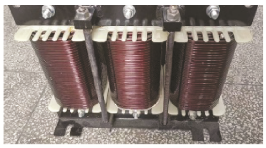
(a)样机A



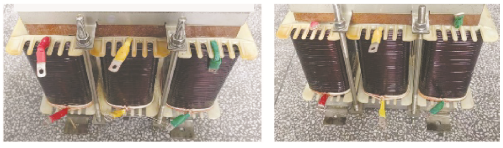
(b) 样机B (c) 样机C

图 6 电抗器中柱铁心截面示意

Fig. 6 Schematic of cross-section of core column in reactor



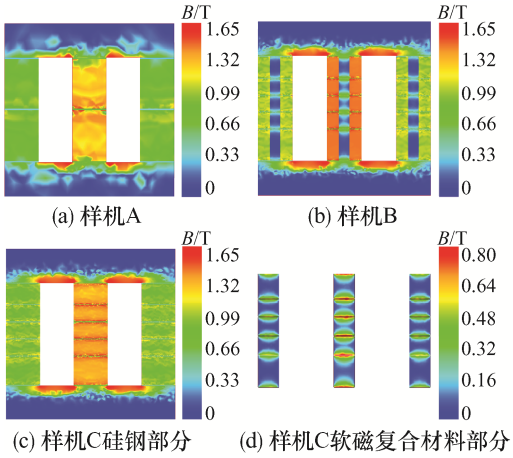
(a)样机A



(b)样机B (c)样机C

图 7 三相电抗器样机

Fig. 7 Three-phase reactor prototypes



(a) 样机A (b) 样机B

(c) 样机C硅钢部分 (d) 样机C软磁复合材料部分

图 8 电抗器的磁密分布

Fig. 8 Distribution of flux density of reactors

为进一步分析磁通分流对电抗器电磁参数的影响，利用有限元仿真软件后处理功能对中柱部分电磁参数进行详细计算，具体计算结果如图 9 所示。可以看出，样机 A 中柱部分的平均磁密略低于样机 B 与样机 C，说明中柱全部采用硅钢材料可使得磁通分布更均匀，平均磁密相对较低；对于混合磁路电抗器而言，磁密在中柱硅钢部分和软磁复

合材料部分具有较大差异，其中样机 B 中柱硅钢部分承担磁通量大于样机 C 中柱硅钢部分，因此样机 B 中柱软磁复合材料部分承担的磁通量小于样机 C 中柱软磁复合材料部分。

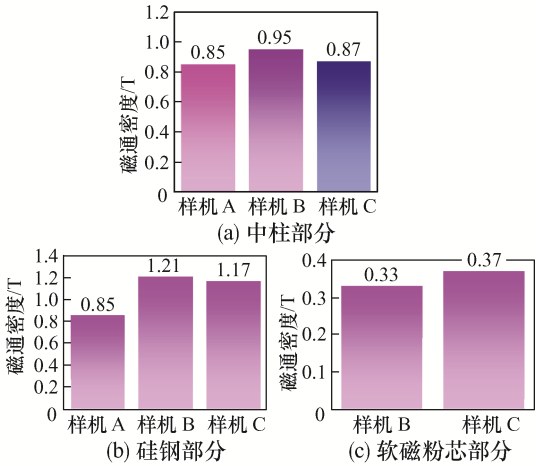


图 9　电抗器中柱部分的平均磁密

Fig. 9 Average flux density of central column in reactor

2.6　三相电抗器样机测试

图 10 为 3 台电抗器样机铁心损耗的测试结果。可以看出，纯硅钢电抗器的铁心损耗大于混合磁路电抗器，其中混合磁路电抗器样机 C 具有最低的铁心损耗。

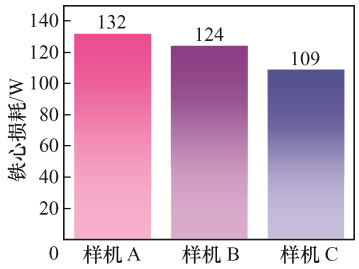


图 10　电抗器样机的铁心损耗

Fig. 10 Core loss ofreactor prototypes

根据 GB/T 1094.10—2003 电抗器测试要求[16]进行噪声测试的结果见表 2。可以看出，纯硅钢电抗器的噪声大于混合磁路电抗器，其中混合磁路电抗器样机 C 的噪声值最低，仅为 55.2 dB(A)。

表 2　电抗器样机的噪声测试数据

Tab. 2 Noise test data of reactor prototypes

样机	背景噪声值/dB(A)	实测噪声值/dB(A)
样机 A	32.5	64.0
样机 B	32.3	58.8
样机 C	32.7	55.2

综上所述，基于磁通分流原理研制的混合磁路电抗器不仅具有较低的铁心损耗，而且具有低噪声特性，可为改善干式铁心电抗器的噪声问题提供解决办法和设计参考。

3　结语

干式铁心电抗器作为无功补偿装置，被广泛应用于城区室内变电站。由于电抗器铁心材料往往采用具有较大磁致伸缩系数的硅钢片，因此使得电抗器噪声问题无法得到彻底解决。本文利用磁通分流原理，在传统纯硅钢磁路中引入一定比例的低磁致伸缩软磁复合材料，利用 2 种材料磁阻的不同，合理调控每种材料内部承担的磁通量大小，使得硅钢部分流入较大的磁通量，而软磁复合材料部分承担较少的磁通量。基于上述设计思想，本文成功研制 2 台 10 kvar 软磁复合材料/硅钢混合磁路电抗器样机，利用有限元电磁场软件对其磁密分布进行了仿真分析。结果表明，当软磁复合材料占据 30%铁心柱体积时，软磁复合材料部分的平均磁通密度在 0.33~0.37 T 之间，硅钢部分的平均磁通密度在 1.17~1.21 T 之间。对比纯硅钢电抗器，混合磁路电抗器不仅铁心损耗较低，而且其工作状态下的噪声均低于 60 dB(A)，证明了利用磁通分流原理设计软磁复合材料/硅钢混合磁路电抗器可以同时降低铁心损耗与电抗器噪声，为改善干式铁心电抗器的噪声问题提供了有益参考和新的思路。

参考文献：

[1] 陈硕，田杰，梁兆杰，等. 干式空心电抗器噪声测量的干扰研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 147-152.
Chen Shuo, Tian Jie, Liang Zhaojie, et al. Study on interference of noise measurement of dry-type air-core reactor [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 147-152. (in Chinese)

[2] 周季，刘佳，张电. 电抗器铁心构造对电抗器固有振动频率的影响研究[J]. 电工技术, 2023(5): 126-129.
Zhou Ji, Liu Jia, Zhang Dian. Study on the influence of reactor core structure on the natural vibration frequency of reactor [J]. Electric Engineering, 2023(5): 126-129. (in

Chinese)

[3] 吴益明, 吴鹏, 刘红军, 等. 基于低磁致伸缩磁材的低噪声电抗器研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 268-272, 282.
Wu Yiming, Wu Peng, Liu Hongjun, et al. Research on low-noise reactors based on magnetic materials with low magnetostriction [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 268-272, 282. (in Chinese)

[4] 谢洪平, 何宏杰, 陈喆, 等. 基于多参数变量优化的户内空心电抗器电磁屏蔽方案研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 448-455.
Xie Hongping, He Hongjie, Chen Zhe, et al. Research on electromagnetic shielding scheme for indoor air-core reactor based on multi-parameter variable optimization [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 448-455. (in Chinese)

[5] Rossi M, Le Besnerais J. Vibration reduction of inductors under magnetostrictive and Maxwell forces excitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(12): 8403406.

[6] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣格, 等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1-6, 19.
Zhu Lihua, Yang Qingxin, Yan Rongge, et al. Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1-6, 19. (in Chinese)

[7] 吴书煜, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于多物理场耦合的特高压并联电抗器振动噪声仿真分析与实验研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 122-127.
Wu Shuyu, Ma Hongzhong, Jiang Ning, et al. Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 122-127. (in Chinese)

[8] 周晓雨. 高频变压器的磁致伸缩特性与振动噪声分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
Zhou Xiaoyu. Analysis of magnetostrictive characteristics and vibration noise in high-frequency transformers. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2021. (in Chinese)

[9] 罗进, 于慎波, 窦汝桐, 等. 磁致伸缩效应对永磁同步电机振动噪声影响分析[J]. 机械工程与自动化, 2022(5): 4-6.
Luo Jin, Yu Shenbo, Dou Rutong, et al. Analysis of influence of magnetostrictive effect on vibration noise of permanent magnet synchronous motor [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(5): 4-6. (in Chinese)

[10] 邓珺, 杨向宇, 龙巍. 变压器的降噪技术[J]. 变压器, 2009, 46(3): 34-36, 39.
Deng Jun, Yang Xiangyu, Long Wei. Technology to reduce transformer noise [J]. Transformer, 2009, 46(3): 34-36, 39. (in Chinese)

[11] Du B X, Liu D S. Dynamic behavior of magnetostriction-induced vibration and noise of amorphous alloy cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(4): 7208708.

[12] Gao Yanhui, Muramatsu K, Fujiwara K, et al. Vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4789-4792.

[13] Silveyra J M, Ferrara E, Huber D L, et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world [J]. Science, 2018, 362(6413): eaao0195.

[14] O'Handley R C. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications [M]. New York: John Wiley & sons, 2000.

[15] Jo S, L T. Soft magnetic composites: Recent advancements in the technology [J]. Metal Powder Report, 2017, 72(6): 425-429.

[16] 中国电器工业协会. 电力变压器 第10部分: 声级测定: GB/T 1094.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
China Electrical Equipment Industry Association. Power transformers - Part 10: Determination of sound levels: GB/T 1094.10—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)



梅超

作者简介：

梅超(1991—)，男，通信作者，博士。研究方向：软磁复合材料开发和新型磁路结构研究。E-mail：meichao@red-mag.com.cn。

吴鹏(1983—)，男，博士，高级工程师。研究方向：低噪声工频电抗器。E-mail：wupeng2@js.sgcc.com.cn。

杨富尧(1986—)，男，博士，高级工程师。研究方向：高性能软磁材料开发。E-mail：yangfuyao@geiri.sgcc.com.cn。

韩钰(1978—)，女，博士，高级工程师。研究方向：高性能软磁材料开发。E-mail：hanyu@geiri.sgcc.com.cn。

苏海林(1980—)，男，博士，教授。研究方向：软磁材料开发和磁路结构研究。E-mail：hailinsu@hfut.edu.cn。

邹中秋(1981—)，男，硕士。研究方向：高性能软磁材料开发。E-mail：zhgl@red-mah.com.cn。

(责任编辑：郭凯凯)