

兰州理工大学

科研成果汇总

学 号:	201081191002
研 究 生:	包艳艳
导 师:	陈伟 教授
研究方向:	电力设备状态检测与评估
论文题目:	特高压换流变绝缘纸板放电特 性与老化状态评估方法研究
学 科:	可再生能源发电与智能电网
学 院:	自动化与电气工程学院
入学时间:	2020年 9 月

2026年 4月 26日

目 录

1.检索报告.....	1
2.包艳艳,张嘉林,陈伟,等.均匀电场作用下矿物绝缘油中颗粒相互作用分析及互偶极子作用力建模[J].电工技术学报,2025,40(23):7724-7736.(EI:中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊).....	3
3.包艳艳,杨广泽,陈伟,等.基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别[J].西南交通大学学报,2025,60(03):781-792.(EI:中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊).....	21
4.包艳艳,陈伟,裴喜平,李恒杰,王琨,等.一种基于磁力声的变压器健康状态评估方法及系统:CN 115879345 B[P].2023-11-03.....	37
.包艳艳,等.热老化对多层油浸 Nomex 绝缘纸性能的影响[J],绝缘材料,2026,59(02):39-48.(EI:中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊).....	39



机构：兰州理工大学
姓名：包艳艳 [201081191002]
著者要求对其在国内外学术出版物所发表的科技论著被以下数据库收录情况进行查证。

检索范围：
• 工程索引（Engineering Index）：1884年-2026年

检索结果：

检索类型	数据库	年份范围	总篇数	第一作者
EI 收录	EI-Compendex	2025	2	2



委托人声明：
本人委托兰州理工大学图书馆信息咨询与学科服务部查询论著被指定检索工具收录情况，经核对检索结果，附件中所列文献均为本人论著，特此声明。

作 者（签字）：

完 成 人（签字）：刘 婧
完 成 日 期 ：2026年4月27日
完成单位（盖章）：兰州理工大学图书馆信息咨询与学科服务部
(本检索报告仅限校内使用)

附件一：EI 收录

#	作者	标题	来源出版物	文献类型	入藏号
1	Bao, Yanyan ; Yang, Guangze; Chen, Wei; Feng, Tingna	Voiceprint Recognition of Discharge Aliasing Signals from 750 kV Transformer and Pin-Plate Based on Sparse Representation Theory and Convolutional Neural Network 基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别	<i>Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Southwest Jiaotong University</i> 2025, 60 (3): 781-792.	Journal article (JA)	20252618 661668
2	Bao, Yanyan ; Zhang, Jialin; Chen, Wei; Wen, Dingjun; Liu, Kang	Analysis of Particle Interactions and Modeling of Mutual-Coupling Dipole Forces in Mineral Insulating Oils under Uniform Electric Fields 均匀电场作用下矿物绝缘油中颗粒相互作用分析及互偶极子作用力建模	<i>Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society</i> 2025, 40 (23): 7724-7736.	Journal article (JA)	20255219 805885
				合计	2
第 1 条，共 2 条： Accession number:20252618661668 Title:Voiceprint Recognition of Discharge Aliasing Signals from 750 kV Transformer and Pin-Plate Based on Sparse Representation Theory and Convolutional Neural Network Title of translation:基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别 Authors:Bao, Yanyan (1, 2); Yang, Guangze (3); Chen, Wei (1); Feng, Tingna (4) Author affiliation:(1) College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou; 730050, China; (2) State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou; 730070, China; (3) Tai'an Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Tai'an; 271000, China; (4) Hami Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Hami; 839000, China Source title:Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Southwest Jiaotong University Volume:60; Issue:3; Issue date:June 2025; Publication year:2025; Pages:781-792; Language:Chinese; ISSN:02582724; CODEN:XJDXEW; Document type:Journal article (JA) Database:Compendex Compilation and indexing terms, Copyright 2026 Elsevier Inc.					
第 2 条，共 2 条： Accession number:20255219805885 Title:Analysis of Particle Interactions and Modeling of Mutual-Coupling Dipole Forces in Mineral Insulating Oils under Uniform Electric Fields Title of translation:均匀电场作用下矿物绝缘油中颗粒相互作用分析及互偶极子作用力建模 Authors:Bao, Yanyan (1, 2); Zhang, Jialin (3); Chen, Wei (1); Wen, Dingjun (2); Liu, Kang (2) Author affiliation:(1) School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou; 730050, China; (2) Research Institute of Electric Power Science, State Grid Gansu Power Company, Lanzhou; 730070, China; (3) School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou; 730070, China Corresponding author:Chen, Wei(CW733000@163.com) Source title:Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society Volume:40; Issue:23; Issue date:December 2025; Publication year:2025; Pages:7724-7736; Language:Chinese; ISSN:10006753; CODEN:DIJXE5; Document type:Journal article (JA) Database:Compendex Compilation and indexing terms, Copyright 2026 Elsevier Inc.					

End



ISSN 1000-6753

CN 11-2188/TM

半月刊

SEMIMONTHLY

电工技术学报

TRANSACTIONS OF
CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY



中国电工技术学会主办

2025 年 第 23 期

第 40 卷 Vol. 40 No. 23

ISSN 1000-6753



- ◆美国《工程索引》(EI)收录期刊
- ◆俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊
- ◆中文核心期刊
- ◆中国科技核心期刊
- ◆《中国学术期刊综合评价数据库统计源》期刊
- ◆《中国期刊全文数据库》全文收录期刊
- ◆《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

电工技术学报 DIANGONG JISHU XUEBAO

第40卷 第23期 2025年12月10日出版
(半月刊, 1986年创刊)

主 管: 中国科学技术协会
主 办: 中国电工技术学会
出 版: 《电气技术》杂志社有限公司
主 编: 马伟明
常务副主编: 荣命哲
副主编: 闫 卓
编辑部主任: 郭丽军
编辑部副主任: 赫 蕾 李 冰
网 址: www.ces-transaction.com
编辑部
地 址: 北京西城区莲花池东路102号天莲大厦
10层(100055)
电 话: 010-63256949, 63256981, 63256994
E-mail: dgjsxb@vip.126.com
印 刷: 廊坊市蓝海德彩印有限公司
发 行: 天津市邮政局报刊发行处
订 阅: 全国各地邮局
国外发行: 中国国际图书贸易总公司
(北京第399信箱)
本期责编: 赫 蕾

TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY

Vol.40 No.23 Dec. 10, 2025
(Semimonthly, Founded in 1986)

Competent Department:
China Association for Science and Technology
Sponsor: China Electrotechnical Society
Publisher: *Electrical Technology Press Co. Ltd.*
Chief Editor: Ma Weiming
Executive Chief Editor: Rong Mingzhe
Deputy Chief Editor: Yan Zhuo
Director: Guo Lijun
Vice Director: He Lei Li Bing
Website: www.ces-transaction.com
Editorial Office
Add.: 10th Floor, Tianlian Building, No.102 Lianhuachi East Rd,
Xicheng District, Beijing 100055, P.R. China
Tel.: 8610-63256949, 63256981, 63256994
E-mail: dgjsxb@vip.126.com
Printed by: Langfang Lan Haide Printing Co. Ltd.
Distributed by: China International Book Trading
Corporation (P. O. BOX 399, Beijing)
Executive Editor: He Lei

电工技术学报

第 40 卷 第 23 期 (2025 年 12 月 10 日出版)

目 次

电工理论

7449	基于增强特征传递结构神经网络的超磁致伸缩电声换能器输出特性分析	徐修贤	高 兵	吴泽伟	何志兴	赵能桐
7462	基于深度里兹法的电磁场计算方法	张宇娇	张 强	孙宏达	赵志涛	黄雄峰
7475	地磁模拟法测量船舶感应磁场的垂向地磁模拟线圈优化设计	吴轲娜	叶志浩	吴朝辉	周国华	刘月林
7485	考虑磁滞的定点谐波有限元算法在非对称直流偏磁工况下的应用	赵小军	肖玉辰	武欣怡	高圣泽	仪 卓

电力系统与综合能源

7498	电-碳-绿证市场背景下电氢协同典型形态及参与模式研究综述	洪芦诚	王梓菽	林 今	朱 进	袁晓东
7515	基于分布鲁棒双边机会约束的联合市场出清模型与不确定性定价方法	蔡钦钦	徐 英	仪忠凯	涂正宏	周渝皓
7532	融合减碳型多能源微网的城​​市能源系统环境-经济协调优化模型	刘 硕	滕 云	陈 哲		
7554	考虑电-水耦合灵活性的数据中心与城市配​​电-水网协同规划研究	曾 博	孟自帅	董嘉路	徐心竹	马浩天
7570	异构新能源多馈入系统静态电压稳定机理与量化分析	王 彤	肖熠涵	范子宣	王增平	田 鑫
7590	多馈入系统中变​​流器多样性对系统强度的影响分析	马富艺龙	辛焕海	李知艺	黄林彬	鞠 平
7608	基于龙格库塔的双有源全桥变​​换器鲁棒预测电压控制策略	尹 政	邓富金	刘恒门	詹 昕	黄 堃
7621	基于多元高斯过程回归和空间聚类的复信号谐波源建模	褚昱麟	陈红坤	王嘉琦	吴艳梅	雷傲宇
7635	考虑三相负荷时空特性和配变动态安全负载域的配​​电变​​压​​器周前分相重过载预警	何华锦	任洲洋	冯健冰	张海峰	
7652	基于条件网络和知识注入的多标签学习电能质量扰动识别与分类方法	黄 杰	李建闽	朱冰凡	张驰成	梁成斌
7664	基于 I-V 曲线全局特征提取的光伏组串 Swin-Transformer 故障诊断方法	昌千琳	罗永捷	王强钢	任 博	周念成
7677	基于张量分解个性化联邦学习的网络-光伏爬坡协同攻击​​辨​​识	崔沛然	崔明建	汪 清	张 剑	
7694	基于故障区域拟合系数的双馈风场送出线路纵联差动保护	侯 冰	李轶凡	覃岚莎	汪序亮	李 慧
7707	基于数据驱动的漂浮式风机被动容错独立变桨控制方法研究	梁栋煊	刘 超	石 鑫	肖 异	尹 刚

高电压与放电

7724	均匀电场作用下矿物绝缘油中颗粒相互作用分析及互偶极子作用力建模	包艳艳	张嘉琳	陈 伟	温定筠	刘 康
7737	基于介质损耗谱结构不敏感频率点的油纸绝缘受潮状态评估方法	彭 誉	杨丽君	李佳俊	王健一	张晓琴
7751	基于实验与分子模拟的聚氯乙烯电/热分解分阶段产气特性	王梓豪	龚婧雯	叶倬成	周 凯	龚 薇
7763	基于乙烯共聚的高压抗冲共聚聚丙烯电缆绝缘材料机械和电气性能的协同优化	董新华	王 伟	袁 浩	李 琦	何金良
7776	不同缠绕工艺 GFRP 空心支柱绝缘子力电性能试验及多尺度力学仿真	李 乐	赵天放	刘云鹏	周松松	武文华
7793	基于小目标复杂环境 YOLO 算法的瓷质绝缘子低值缺陷识别方法	裴少通	王玮琦	胡晨龙	吴免霄	孙海超
7806	基于嵌入式 YOLO 网络的电力绝缘子自爆缺陷检测	李 鹏	宿雲龙	宁 昊	孟庆伟	魏 强

TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY

Vol.40 No.23 (Dec. 10 2025)

Contents

- 7449 Analysis of Output Characteristics of Giant Magnetostrictive Electroacoustic Transducer Based on Enhanced Feature Transfer Structure Neural Network..... Xu Xiuxian Gao Bing Wu Zewei He Zhixing Zhao Nengtong
- 7462 Electromagnetic Field Computation Methods Based on the Deep Ritz Method
.....Zhang Yujiao Zhang Qiang Sun Hongda Zhao Zhitao Huang Xiongfeng
- 7475 Optimization of Vertical Geomagnetic Simulation Coils for Ship's Induced Magnetic Field Measurement by Geomagnetic Simulation Method.....Wu Kena Ye Zhihao Wu Zhaoxue Zhou Guohua Liu Yuelin
- 7485 Application of Fixed Point Harmonic Finite Element Algorithm Considering Hysteresis in Asymmetric DC-Biased Magnetic Conditions.....Zhao Xiaojun Xiao Yuchen Wu Xinyi Gao Shengze Yi Zhuo
- 7498 A Review of Typical Forms and Participation Models of Electricity-Hydrogen Synergy in the Context of Electricity-Carbon-Green Certificate Markets Hong Lucheng Wang Ziqiu Lin Jin Zhu Jin Yuan Xiaodong
- 7515 Joint Market Clearing Model and Uncertainty Pricing Approach Based on Distributed Robust Bilateral Chance Constraint
.....Cai Qinqin Xu Ying Yi Zhongkai Tu Zhenghong Zhou Yuhao
- 7532 An Environment-Economic Coordination Optimization Model for Urban Energy Systems Integrating Carbon-Reducing Multi-Energy Microgrids.....Liu Shuo Teng Yun Chen Zhe
- 7554 Research on Synergistic Planning of Data Center and Urban Electricity-Water Distribution Networks Considering Electricity-Water Interdependent Flexibility Zeng Bo Meng Zishuai Dong Jialu Xu Xinzhu Ma Haotian
- 7570 Static Voltage Stability Mechanism and Quantitative Analysis of Heterogeneous New Energy Multi-Infeed Systems
..... Wang Tong Xiao Yihan Fan Zixuan Wang Zengping Tian Xin
- 7590 Impact Analysis of Converter Diversity on System Strength in Multi-Infeed Power System
.....Ma Fuyilong Xin Huanhai Li Zhiyi Huang Linbin Ju Ping
- 7608 Robust Predictive Voltage Control for Dual Active Bridge Converters Based on Runge-Kutta
..... Yin Zheng Deng Fujin Liu Hengmen Zhan Xin Huang Kun
- 7621 Complex Signal Modeling Method for Harmonic Source Based on Multivariate Gaussian Process Regression and DBSCAN Algorithm.....Chu Yulin Chen Hongkun Wang Jiaqi Wu Yanmei Lei Aoyu
- 7635 Week-Ahead Phase-Separated Overload Warning Method for Distribution Transformers Considering the Spatiotemporal Characteristics of Three-Phase Loads and the Dynamic Safety Loading Region
.....He Huajin Ren Zhouyang Feng Jianbing Zhang Haifeng
- 7652 A Multi-Label Learning Method Based on Conditional Networks and Knowledge Injection for Power Quality Disturbance Identification and Classification Huang Jie Li Jianmin Zhu Bingfan Zhang Chicheng Liang Chengbin
- 7664 Fault Diagnosis Method for Photovoltaic String Based on Global I-V Curve Feature Extraction Using Swin Transformer
.....Chang Qianlin Luo Yongjie Wang Qianggang Ren Bo Zhou Niancheng
- 7677 Cyber-Ramping Coordinated Attack Identification Method for PV Using a Tensor Decomposition Based Personalized Federated Learning.....Cui Peiran Cui Mingjian Wang Qing Zhang Jian
- 7694 Current Differential Protection for Wind Farm Transmission Line Based on Fault Region Fitting Coefficient
..... Hou Bing Li Yifan Qin Lansha Wang Xuliang Li Hui
- 7707 Research on Data-Driven Passive Fault-Tolerant Individual Pitch Control Method for Floating Offshore Wind Turbine
.....Liang Dongyang Liu Chao Shi Xin Xiao Yi Yin Gang
- 7724 Analysis of Particle Interactions and Modeling of Mutual-Coupling Dipole Forces in Mineral Insulating Oils under Uniform Electric Fields.....Bao Yanyan Zhang Jialin Chen Wei Wen Dingjun Liu Kang
- 7737 Evaluation Method of Oil-paper Insulation Damp State Based on the Structure-Insensitive Frequency Point of Loss Spectrum
.....Peng Yu Yang Lijun Li Jiajun Wang Jianyi Zhang Xiaoqin
- 7751 Gas Production Characteristics of PVC Electrical/Thermal Decomposition in Stages Based on Experiments and Molecular Simulations Wang Zihao Gong Jingwen Ye Zhuocheng Zhou Kai Gong Wei
- 7763 Synergistic Optimization of the Mechanical and Electrical Properties of High Voltage Impact Polypropylene Copolymer Cable Insulation Materials Based on Ethylene CopolymerizationDong Xinhua Wang Wei Yuan Hao Li Qi He Jinliang
- 7776 Multi Scale Mechanical Simulation and Electromechanical Experimental Testing of GFRP Hollow Insulators Based on Different Process Parameters.....Li Le Zhao Tianfang Liu Yunpeng Zhou Songsong Wu Wenhua
- 7793 Identification of Low-Value Defects in Porcelain Insulators Based on the Small Targets in Complex Environments YOLO AlgorithmPei Shaotong Wang Weiqi Hu Chenlong Wu Mianxiao Sun Haichao
- 7806 Self-Explosion Defect Detection of Power Insulators Based on Embedded YOLO Network
..... Li Peng Su Yunlong Ning Hao Meng Qingwei Wei Qiang

《电工技术学报》第九届编辑委员会

主任委员

马伟明

副主任委员(按姓氏笔画排序)

王秋良 沈建新 荣命哲 徐殿国 康重庆

顾问(按姓氏笔画排序)

严陆光 陈清泉 饶芳权 顾国彪 徐大懋
唐任远 黄其励 黄崇祺 雷清泉

委员(按姓氏笔画排序)

丁立健	于歆杰	王 东	王成山	王曙鸿
王耀南	文劲宇	冯江华	成永红	毕天姝
曲荣海	刘国林	刘国强	刘定新	关永刚
汤广福	阮新波	阮殿波	孙逢春	杜 雄
李立毅	李庆民	李 岩	李建林	李 奎
李 亮	李 勇	李 斌	李路明	李耀华
杨 飞	杨仕友	杨 帆	杨庆新	束洪春
肖立业	吴广宁	别朝红	何怡刚	何湘宁
汪友华	宋文祥	宋永华	迟庆国	张卓然
张 波	张承慧	张恒旭	陈维江	邵 涛
武建文	苑 舜	欧阳明高	罗 安	周 波
周腊吾	郑琼林	赵争鸣	贾利民	夏长亮
徐桂芝	高仕斌	郭剑波	唐 炬	黄兴溢
黄守道	黄学良	崔 翔	章 兢	商 澎
梁曦东	蒋 凯	韩肖清	程时杰	程 明
雷银照	蔡国伟	廖瑞金	翟国富	黎灿兵
魏新芳	Bin WU(加拿大)	Fred C. LEE(美国)	Jian Guo ZHU(澳大利亚)	
Jian Zhong WU(英国)	Jie CHANG(美国)	Z.Q.ZHU(英国)		



微信订阅号：电工技术学报

微信号：dgjsxb

推送《电工技术学报》的原创
精选论文、科研动态。

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242036

均匀电场作用下矿物绝缘油中颗粒相互作用分析及互偶极子作用力建模

包艳艳^{1,2} 张嘉琳³ 陈伟¹ 温定筠² 刘康²

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050)

(2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院 兰州 730070)

(3. 兰州交通大学新能源与动力工程学院 兰州 730070)

摘要 变压器绝缘油中电介质杂质颗粒在电场作用下形成“小桥”是导致其绝缘性能下降的关键因素。当电介质颗粒间距较近时,极化相互作用力显著,会对颗粒运动成链过程产生重要影响,而颗粒成链过程及其形态变化是影响变压器绝缘油中电场畸变及局部放电的重要因素,但目前对于颗粒相互作用过程及其对颗粒运动状态的影响机制尚不明确,且缺乏有效的相互作用力分析模型。因此,该文搭建试验平台开展了颗粒相互作用对绝缘油中颗粒运动特性的影响研究,试验结果表明:当外加电场方向与颗粒球心连线平行时,颗粒在电场作用下相互吸引并排列成链;而当外加电场方向垂直于颗粒球心连线时,颗粒在沿电场线平移运动成链过程中存在奇异的“自转”现象,即呈现“吸引-自转-成链”的特殊运动模式,然而,经典点偶极子作用力模型无法解释和描述这一特殊试验现象。为此,该文考虑颗粒相互作用影响过程,提出电场作用下颗粒自偶极子与互偶极子极化等效思想,构建考虑颗粒相互作用的互偶极子作用力模型,成功地解释了颗粒相互作用引发的“吸引-自转-成链”现象。同时,利用该模型实现了不同电场及不同颗粒粒径条件下颗粒相互作用力和力矩的定量计算。研究结果可为电场环境下颗粒相互作用行为分析及绝缘油中电场优化提供新方法。

关键词: 绝缘油 电介质颗粒极化 偶极矩 互偶极子模型 颗粒间相互作用力

中图分类号: TM15

0 引言

大型电力变压器的绝缘多以油纸绝缘为主,理想的绝缘油纯净无杂质^[1]。而在实际工程应用中,在变压器生产、运输、装配和绝缘油加注、维护等过程中,会不可避免地混入各类微小杂质颗粒^[2-3],而这些微小杂质颗粒被认为是威胁变压器绝缘油安全运行的重要因素之一^[4-6]。

近年来,相关学者对变压器绝缘油中的杂质颗粒进行了大量研究,探讨其形成机理以及杂质颗粒

对绝缘油电气性能的影响机制,以更好地识别污染物并完成对相关设备的维护^[7-8]。绝缘油中的颗粒可按类型分为非金属颗粒和金属颗粒,金属颗粒以铜、铁等为主,非金属颗粒的典型代表物质是纸纤维或碳纤维。纸纤维主要是由于变压器运行时会产生大量热量,绝缘纸在高温下发生反应并受热而裂解,出现了脱落现象,这部分纤维散落在变压器油中所形成的,而且随着变压器油运行时间的增加,纸纤维含量也将大幅增加^[9-10]。纤维颗粒在高压电场的作用下发生极化而运动至沿电场线排列^[11-12],引发局部放电进而导致绝缘失效。这种影响在直流电场^[13]情况下更加严重,且纤维颗粒在形成颗粒小桥前后对绝缘油的影响不同^[14-15]:在小桥结构形成前,由于纤维颗粒聚集成颗粒群后会使油中电场显著增强

甘肃省青年科技基金(24JRRA754)和国网甘肃省电力公司科技项目(522722240003)资助。

收稿日期 2024-11-13 改稿日期 2025-01-22

而导致绝缘油电离分解析出气体, 气体在颗粒近旁产生气泡, 电离使气泡随即增大; 当小桥结构形成之后, 纤维电导率较大, 进而使得泄漏电流增大、发热增多, 进一步促进了水分汽化, 在颗粒近旁形成气泡, 气泡则有可能排列成“气泡小桥”, 导致放电发生。M. H. S. Zainoddin 等通过探究直流电压下的绝缘油中纤维颗粒形成过程, 分析了纤维小桥厚度与电压大小间的关系^[16]。针对杂质颗粒的运动聚集、放电击穿等特性, 国内外学者已开展了一系列研究, 郝建等^[17]对绝缘油中不同浓度与颗粒大小条件下的纤维颗粒、金属铜颗粒以及两种颗粒的混合物在直流电压下的击穿场强进行了研究, 揭示了不同颗粒属性对绝缘油在直流电压下的击穿特性的影响; 梁晨等^[18]通过搭建交直流加压平台, 对含碳纤维颗粒的绝缘油击穿特性进行了测试, 探究了含颗粒的绝缘油在颗粒浓度、颗粒粒径和所受电压条件不同情况下击穿电压的变化情况, 试验结果表明电压类型对绝缘油击穿电压的影响较为明显, 随着颗粒浓度增加、颗粒粒径增大, 绝缘油的绝缘性能下降, 并说明了绝缘油电气性能下降的主要原因是碳颗粒在绝缘油中运动形成小桥; S. Mahmud 等^[19]建立了两个不同的试验装置分别研究了交流与直流条件下极板间两个不同电位处的桥接效应, 发现交流与直流电压下的板间颗粒小桥堆积形态有所不同; 王有元等^[20]对交直流复合电压作用下的铜颗粒在绝缘油中的运动特性展开探究, 研究了铜颗粒在绝缘油中的运动特性, 以及铜颗粒对绝缘油油品绝缘性能的影响机理; 李金忠等^[21]设计油纸绝缘实验, 分析了直流电压作用下小桥的形成原因及成分构成, 以探究固相杂质颗粒的形成与发展机理; 付守海等^[22]给出了计算变压器绝缘油中导电颗粒的理论模型, 表明电场力、惯性力等作用力的影响是油中颗粒运动的重要原因, 并对极板间的导电颗粒运动轨迹进行计算, 总结了颗粒粒径不同时颗粒的运动特点; M. Krins 等^[23]用实验的方法研究了绝缘棒在含碳颗粒的绝缘油中, 当绝缘棒材料和表面结构不同时, 碳颗粒对绝缘棒闪络电压的影响, 实验现象表明油中碳颗粒的存在导致油隙的击穿强度及闪络电压降低, 放电更易发生在电极表面。

综上所述, 油中固体颗粒运动成桥的行为易导致绝缘油电气性能降低, 虽然大量的研究已经表明了颗粒属性、电场类型等因素对颗粒运动成桥的影响效果, 但实验均以研究颗粒群为主, 且颗粒粒径较小, 在研究运动特性时必须考虑颗粒荷电影响,

针对颗粒在运动成链过程中颗粒相互作用对成链影响效果的研究较少, 且用于分析颗粒间相互作用力的模型较少, 难以做到对颗粒间相互作用力的定量计算。实际上, 当颗粒相距较近时, 显著的相互作用将使得颗粒周围电场发生变化, 进而影响颗粒间相互作用力, 且由于颗粒材质在电场中发生的极化类型不同^[24], 电介质颗粒链和导体颗粒链中的个体在电场中可能呈现不同的运动现象。为得到颗粒相互作用对颗粒成链的影响机制, 以及颗粒相互作用力对颗粒运动的影响效果, 本文选择绝缘油中的电介质颗粒, 搭建了考虑颗粒相互作用影响的颗粒运动特性试验平台, 试验过程中发现在外加电场垂直于颗粒球心连线时, 电介质颗粒在成链过程中存在“自转”现象。在使用点偶极子模型分析颗粒相互作用力时, 由于该模型仅将颗粒近似等效为位于球心的一对点偶极子, 得到的理论分析结果与试验现象不符。本文从电介质颗粒在电场中的极化过程出发, 得到了颗粒自偶极子、互偶极子等效思路, 提出了用于分析颗粒相互作用力的互偶极子模型, 并用该模型计算且分析了不同间距条件下颗粒的相互作用力及粒径存在差异时的颗粒相互作用力, 当颗粒间距 D 以颗粒粒径 R 为度量单位时, 计算结果显示, 若颗粒间距 D 在 $0.1R \sim 0.5R$ 之间, 颗粒会受到显著的相互作用力影响, 若在该范围内增大垂直方向外加电场的电场强度, 颗粒将发生明显的自转现象。本文提出的模型对试验中电介质颗粒出现的自转现象提供了理论分析方法, 揭示了颗粒相互作用对颗粒吸引-自转-成链的影响机制, 同时为电介质颗粒在电场中的输运、排列等颗粒相互作用行为提供了一种新的理论分析方法。

1 绝缘油中考虑相互作用影响下的颗粒运动特性试验

1.1 试验平台

为研究颗粒受到相互作用时其在绝缘油中的运动情况, 本文搭建了颗粒运动轨迹观测平台, 如图 1 所示。试验平台主要分为电压发生部分、外加电场区域、颗粒运动系统和观测系统四个部分。其中, 电压发生部分包括电源、直流高压发生器、保护电阻; 板-板电极、亚克力油箱组成外加电场区域; 细线、小木球用于完成颗粒运动系统; 将数码相机利用三脚架固定组成观测系统。试验中为确保颗粒在变压器油中保持运动状态并且不受外部条件干扰, 初始状态将小球置于静止的绝缘油中。试验所用绝

缘油选择 25 号长城变压器绝缘油, 油温保持在室温 29°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), 亚克力油箱尺寸为 $25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。此外, 板-板电极通过螺杆连接且全部浸于绝缘油中, 试验时保持板间距为 100 mm 。试验中使用木质小球代替颗粒模型, 小球半径 R 选择为 3 mm , 并在小球上做十字标记, 以方便观测小球发生的自转现象, 标记后的小球如图 1 中左上方插图所示。使用极细的棉线将木质小球穿起并悬挂于板-板电极间隙中, 使得小球位于同一水平线, 并且保持颗粒间距在 $0.1R \sim 0.3R$ 之间, 尽可能地使其靠近而不接触, 外加电场方向与颗粒球心连线方向相对位置排列俯视图如图 1 中左下方插图所示。试验时在亚克力油箱前侧放置相机拍摄并记录颗粒运动行为, 每隔 1 s 使用相机拍摄并记录小球此时的位置情况, 以得到小球在不同时刻的相对位置及单个小球的运动情况。

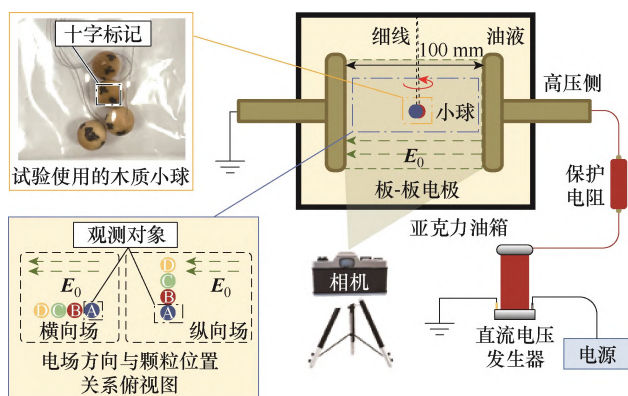


图 1 颗粒在绝缘油中运动状态观测平台

Fig.1 Observing platform for motion of particles in insulating oil

1.2 试验现象与讨论

试验中为克服小球重力/浮力, 选择轻质棉线将小球颗粒吊起, 并保持小球悬挂在同一水平面及同一轴线方向, 以方便观察相互作用力影响下小球的运动状态变化情况。当外加电场方向与颗粒球心连线方向平行时, 外加电场为纵向场。在该电场条件下, 当电压由 0 kV 逐渐增大至 40 kV 时, 观测平台拍摄到的颗粒运动情况如图 2 所示。

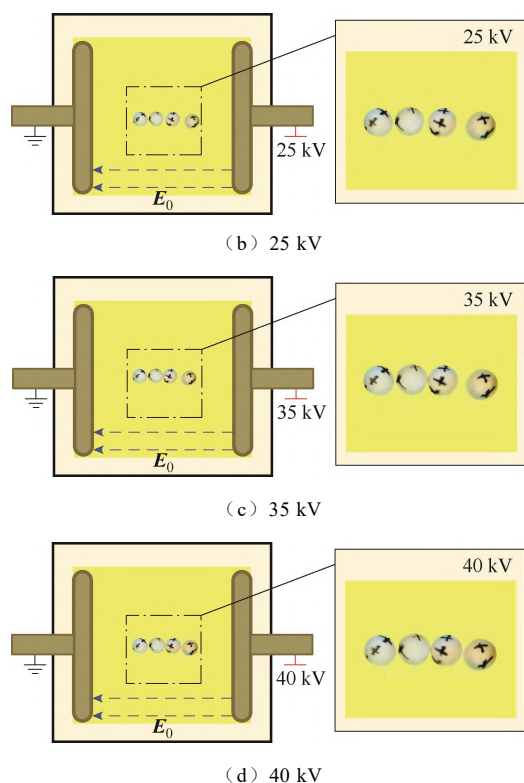
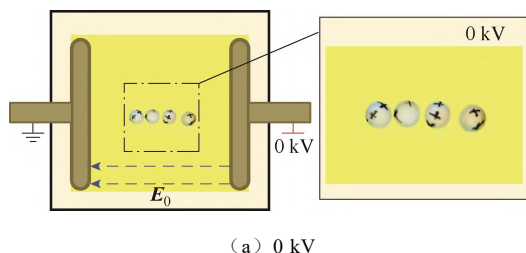


图 2 横向场时的颗粒运动情况

Fig.2 The motion of particles in a transverse field

由图 2 可以看出, 随着外施电压的增大, 木质颗粒逐渐开始出现运动趋势, 整体呈现“吸引-成链”的运动特性。对比图 2a 和图 2d, 相较于图 2a 中颗粒在初始状态下分散在绝缘油中的情况, 当外加电压增大至 40 kV 时, 图 2d 中颗粒最终相互吸引并排列成链。且颗粒在成链的过程中, 颗粒球面的标记位置并未发生偏转, 说明颗粒仅有在水平方向相互吸引的运动趋势。

当外加电场方向与颗粒球心连线方向垂直时, 外加电场为纵向场。在该电场条件下, 当电压从 0 kV 增大至 40 kV 时, 颗粒运动情况如图 3 所示。由图 3 可以看出, 随着外加电压增大至 25 kV , 颗粒开始发生沿电场线排列的相对运动, 并伴随有逆时针旋转的运动趋势; 直至电压增大至 35 kV , 图 3c 中颗粒沿电场线排列趋势较明显, 且对比图 3a 和图 3c 可发现, 位于颗粒链首端的颗粒 A 球面标记位置与最初的状态相比, 发生约 10° 的逆时针偏转; 当电压增大至 40 kV 时, 由图 3d 可观察到颗粒呈现沿电场线排列的状态。并且由图 3a~图 3d 的颗粒运动状态变化可知, 在纵向场作用下颗粒呈现“吸引-自转-成链”的运动特性, 即颗粒由最初的分散状态, 逐渐相互吸引且伴随自转现象发生相对运动, 直至最终形成沿电场线排列的链状结构。

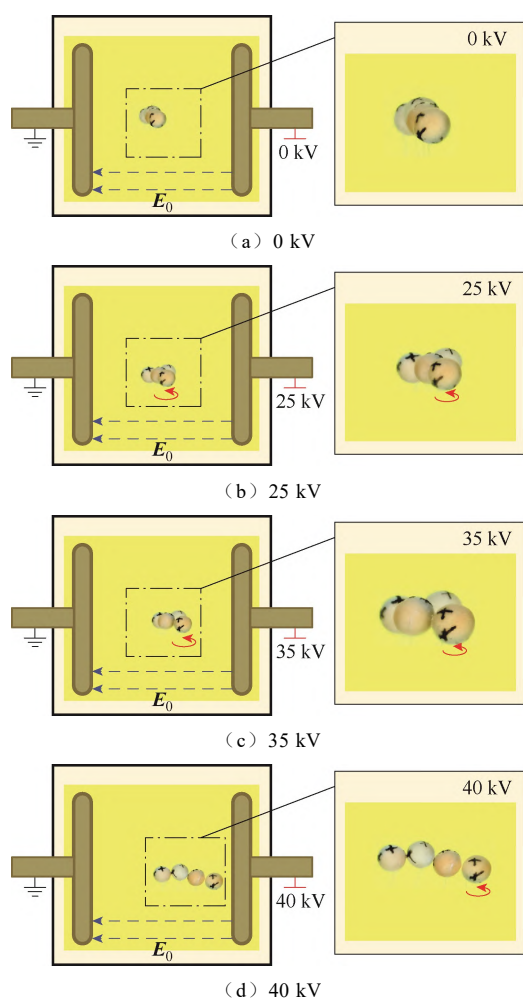


图 3 纵向场时的颗粒运动情况

Fig.3 The motion of particles in a longitudinal field

2 颗粒间相互作用行为分析

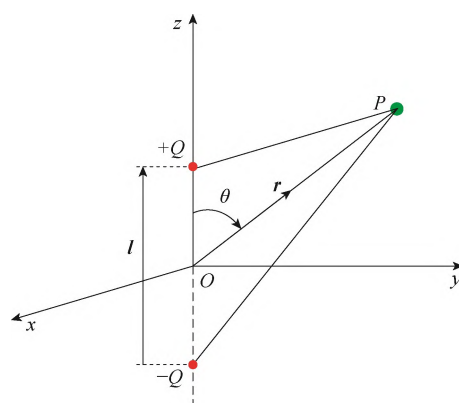
2.1 颗粒间相互作用的自转行为分析

对比颗粒在两种电场中的运动状态, 横向场中颗粒仅存在相互吸引后成链的运动特性, 即颗粒仅在水平方向发生平动; 而纵向场中颗粒除平动运动外还发生自转运动。为分析相互作用对颗粒运动产生的影响, 首先使用经典点偶极子模型对颗粒受到的相互作用力进行分析。

电偶极子模型是点电偶极子模型分析计算的基础, 以下首先对电偶极子相互作用力进行分析, 单电偶极子系统与远点 P 位置示意图如图 4 所示。电偶极子由一对处于坐标原点的等量异号点电荷 $+Q$ 与 $-Q$ 组成, 如图 4 所示。图 4 中, $\mathbf{r}$ 为远点 P 的位置矢量, θ 为 $\mathbf{r}$ 与 z 轴的夹角。位于坐标原点处的电偶极子对远点 P 产生的电场强度计算式^[24]为

$$\mathbf{E}_P = -\nabla \varphi_P \quad (1)$$

式中, φ_P 为点 P 的电势。

图 4 单电偶极子系统与远点 P 位置示意图Fig.4 Schematic diagram of single electric dipole system and far-point P

在计算远点 P 的电势时, 可由点电荷电势叠加定理计算, 即

$$\varphi_P = \frac{Ql \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{M \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (2)$$

式中, Q 为单个点电荷的电荷量; $\mathbf{M}$ 为点偶极子的有效偶极矩, $\mathbf{M} = Q\mathbf{l}$, $\mathbf{l}$ 为两电荷间的路径, 方向由负电荷指向正电荷, l 为其长度; r 为远点 P 到原点的距离; ϵ_0 为环境介电常数。

联立式 (1) 与式 (2), 得到当电偶极子位于原点时, 其对远点 P 产生的电场强度为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_P &= -\nabla \varphi_P = -\nabla \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ &= -\left(\frac{\partial}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi \right) \frac{Ql \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ &= \frac{M}{4\pi\epsilon_0 r^3} (2\mathbf{e}_r \cos \theta + \mathbf{e}_\theta \sin \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, φ 为 $\mathbf{r}$ 在 xOy 平面上的投影与 x 轴的夹角, 以逆时针方向为正; $\mathbf{e}_r$ 、 $\mathbf{e}_\theta$ 、 $\mathbf{e}_\varphi$ 分别为 r 、 θ 、 φ 方向对应的单位向量。

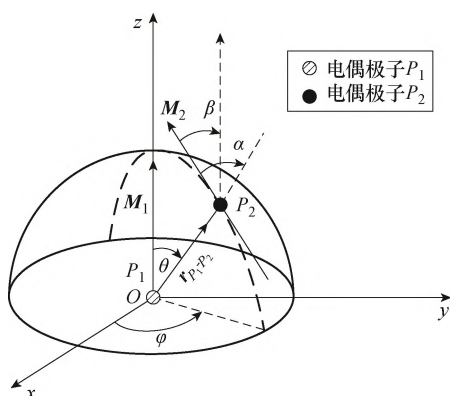
已知电荷体系的电偶极矩在外电场中的能量 W 计算式^[25]为

$$W = \mathbf{M} \cdot \nabla \varphi_P = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{E}_P \quad (4)$$

由此得到电偶极子在外电场中所受的力^[24]为

$$\mathbf{F} = -\nabla W = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{E}_P \quad (5)$$

在单个电偶极子远点 P 处引入偶极矩为 $\mathbf{M}_2$ 的电偶极子 P_2 , 并且令位于原点处的电偶极子 P_1 偶极矩为 $\mathbf{M}_1$, 得到两电偶极子系统, 电偶极子 P_1 与 P_2 在球坐标系中的位置示意图如图 5 所示。图 5 中, α 为 $\mathbf{M}_2$ 与 P_2 位置矢量 $\mathbf{r}_{P_1-P_2}$ 的夹角, β 为电偶极子 P_1 、 P_2 偶极矩 $\mathbf{M}_1$ 与 $\mathbf{M}_2$ 之间的夹角。

图 5 电偶极子 P_1 与 P_2 在球坐标系中位置示意图Fig.5 Position diagram of electric dipoles P_1 and P_2 in the spherical coordinate system

结合对远点 P 处电势计算的分析, 由式 (2) 可得到两电偶极子系统中, 电偶极子 P_1 在远点 P 产生的电势为

$$\varphi_{P_1} = \frac{Ql \cos \theta}{4\pi\epsilon_e r_{P_1-P_2}^2} = \frac{M_1 \cos \theta}{4\pi\epsilon_e r_{P_1-P_2}^2} = \frac{\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{r}_{P_1-P_2}}{4\pi\epsilon_e r_{P_1-P_2}^3} \quad (6)$$

当颗粒间距 D 远大于颗粒半径 R 时, 颗粒间相互作用对颗粒周围电场分布及相互作用力的影响可以忽略不计, 此时使用点电偶极子模型能够近似地计算两颗粒系统周围电场分布与颗粒相互作用力。在计算两颗粒相互作用力时, 可等效为两对电偶极子 P_1 与 P_2 之间相互作用力的计算。由此得到颗粒相互作用力为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{P_1} = -\nabla \varphi_{P_1} \\ \mathbf{F}_{P_1-P_2} = -\nabla W = \nabla (\mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{E}_{P_1}) \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7) 可得到当外加电场方向为横向场和纵向场时, 使用点电偶极子模型计算的颗粒所受的相互作用力分别为

$$\mathbf{F}_{\text{DIP-T}} = -\frac{6M_0^2}{4\pi\epsilon_e r_{P_1-P_2}^4} \mathbf{e}_r \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{\text{DIP-L}} = \frac{3M_0^2}{4\pi\epsilon_e r_{P_1-P_2}^4} \mathbf{e}_r \quad (9)$$

式中, M_0 为颗粒的有效偶极矩; $\mathbf{F}_{\text{DIP-T}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{DIP-L}}$ 分别为点偶极子模型计算的横向场 (用下角标中的 T 表示) 和纵向场 (用下角标中的 L 表示) 下颗粒所受的相互作用力; 负号表示两颗粒间的作用力为吸引力; $r_{P_1-P_2}$ 为两颗粒球心距离。颗粒偶极矩在两种电场中的排列情况如图 6 所示。图 6 中, $\mathbf{E}_{0-T}$ 和 $\mathbf{E}_{0-L}$

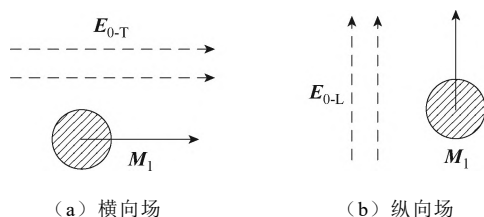


图 6 颗粒偶极矩在两种电场中的排列情况

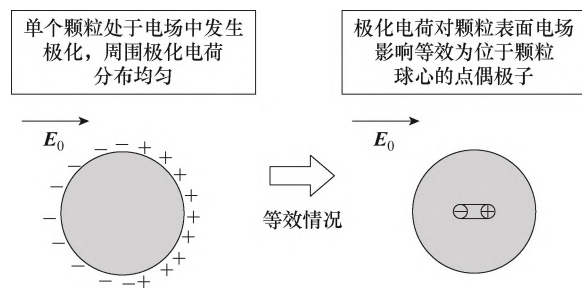
Fig.6 The arrangement of particle dipole moment in two kinds of electric fields

分别表示横向场和纵向场。

由式 (8)、式 (9) 及图 6 可知, 使用点偶极子模型分析颗粒相互作用力时, 当外加电场方向与颗粒球心连线方向平行时, 颗粒相互吸引; 而当外加电场方向与颗粒球心连线方向垂直时, 仅采用传统的颗粒相互作用力受力模型对颗粒进行分析时无法得到颗粒出现自转的力矩, 说明经典的点偶极子模型在相互作用力分析时不能解释颗粒在纵向场中发生的“吸引-自转-成链”运动特性。

2.2 颗粒相互作用力互偶极子模型

为了更好地描述颗粒在受到相互作用时发生的自转现象, 首先分析其在电场环境下的极化特性: 处于均匀外加电场 $\mathbf{E}_0$ 中半径为 R 的单个电介质颗粒, 会受到外加电场的作用发生极化, 经典点偶极子模型在分析其极化效果时, 认为此时单个电介质颗粒发生的极化是均匀的, 即单个颗粒周围均匀分布着极化电荷, 该情况可将电介质颗粒等效为一个位于颗粒球心的偶极矩, 颗粒在电场作用下发生运动时, 仅有位于球心的一个偶极矩; 而若两个半径为 R 的颗粒同时置于外加电场中, 当颗粒间间距较小、颗粒与环境相对介电常数较大时, 颗粒间的相互作用显著增大, 其中两颗粒边缘距离最近位置的相互作用最显著, 此时对单个电介质颗粒产生极化作用的电场分为外加电场 $\mathbf{E}_0$ 与另一颗粒的极化电场。因此, 该情况下单个电介质颗粒应等效为两个不同的偶极矩。颗粒数量、颗粒间距与极化效果之间的关系如图 7 所示。



(a) 单颗粒在电场中极化等效

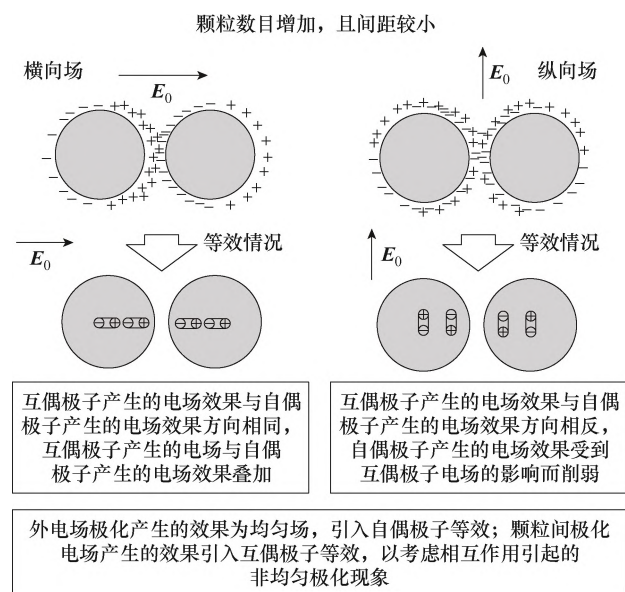


图 7 电介质颗粒数量、颗粒间距与极化效果的关系

Fig.7 The relationship between the number of dielectric particles, particle spacing and polarization effect

在先前的研究中，已对柱体^[26]以及旋转颗粒系统^[27]的极化过程进行了分析，并分别建立了用于计算双柱体系统及旋转颗粒系统电场分布的互偶极子模型，且得到了较高的计算精度。颗粒球系统中的互偶极子等效思想如下：外加电场对颗粒的极化过程是均匀的，引入位于颗粒球心处的自偶极子进行等效，其极化产生的偶极矩为自偶极矩；与该颗粒靠近的另一颗粒的极化电场的极化是非均匀的，将该过程用偏离球心的互偶极子等效，其极化产生的偶极矩为互偶极矩。由此即可得到颗粒间距较近时考虑颗粒间相互作用的两颗粒系统互偶极子模型。

实际情况中颗粒半径可能存在差异，根据文献[26-27]中柱体及颗粒的互偶极矩和自偶极矩的求解思路，可分别得到两种电场条件下，不同半径颗粒系统的互偶极矩。

1) 横向场

横向场条件下，颗粒互偶极矩为

$$M_{21-T} = 8\pi k^2 \varepsilon_e E_{0-T} \frac{(R_1 + \tau_1)^3 (2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3}{(2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3 - 2k(R_1 + \tau_1)^3} \cdot \left(\frac{R_1}{2R_1 + R_2 + D} \right)^3 \quad (10)$$

$$M_{12-T} = 8\pi k^2 \varepsilon_e E_{0-T} \frac{(R_1 - \tau_1)^3 (R_1 + D - \tau_1)^3}{(R_2 + D - \tau_2)^3 - 2k(R_1 - \tau_1)^3} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + D} \right)^3 \quad (11)$$

式中， M_{21} 为颗粒 1 的互偶极矩； M_{12} 为颗粒 2 的互偶极矩； $k = (\varepsilon_p - \varepsilon_e) / (\varepsilon_p + 2\varepsilon_e)$ ，其中 ε_p 为颗粒介电常数； D 为颗粒间距，本文中为两颗粒边缘到边缘的距离； R_1 和 R_2 分别为颗粒系统中两颗粒对应的粒径； τ_1 和 τ_2 分别为两颗粒互偶极子相对于颗粒球心的偏移距离。令 $s = R_2 / R_1 = \tau_2 / \tau_1$ ， s 为常数，用于量化 R_2 与 R_1 的粒径差异。

联立式(10)与式(11)，可得到横向场条件下两颗粒系统互偶极子偏移距离 τ 满足关系为

$$\frac{(R_2 + D - \tau_2)^3 - 2k(R_1 - \tau_1)^3}{(R_1 - \tau_1)^3 (R_2 + D - \tau_2)^3} = \frac{(R_1 + \tau_1)^3 (2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3}{(2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3 - 2k(R_1 + \tau_1)^3} = \left(\frac{2R_1 + R_2 + D}{R_1 + D} \right)^3 \quad (12)$$

2) 纵向场

纵向场条件下，颗粒的互偶极矩为

$$M_{21-L} = -4\pi k^2 \varepsilon_e E_{0-L} \frac{(R_1 + \tau_1)^3 (2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3}{(2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3 + k(R_1 + \tau_1)^3} \cdot \left(\frac{R_1}{2R_1 + R_2 + D} \right)^3 \quad (13)$$

$$M_{12-L} = -4\pi k^2 \varepsilon_e E_{0-L} \frac{(R_1 - \tau_1)^3 (R_2 + D - \tau_2)^3}{(R_2 + D - \tau_2)^3 + k(R_1 - \tau_1)^3} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + D} \right)^3 \quad (14)$$

联立式(13)与式(14)，可得到纵向场条件下两颗粒系统互偶极子偏移距离 τ 满足关系为

$$\frac{(R_2 + D - \tau_2)^3 + k(R_1 - \tau_1)^3}{(R_1 - \tau_1)^3 (R_2 + D - \tau_2)^3} = \frac{(R_1 + \tau_1)^3 (2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3}{(2R_1 + R_2 + D - \tau_2)^3 + k(R_1 + \tau_1)^3} = \left(\frac{2R_1 + R_2 + D}{R_1 + D} \right)^3 \quad (15)$$

在互偶极子模型建立过程中，当外加电场为纵向场时，认为互偶极子的互偶极矩与自偶极子的自偶极矩方向相反，即互偶极矩与自偶极矩产生的电场效果不同。

在实际情况下，颗粒相对位置易发生变化，电场方向可能与颗粒球心连线存在夹角，即颗粒系统在横向与纵向均含有分量。考虑外加电场是具有大小和方向的矢量，因此可对外加电场在规定的坐标

系内进行矢量分解。即假定颗粒系统静止并建立原点位于颗粒 1 球心的直角坐标系,两颗粒球心连线为 X 轴,垂直于颗粒球心连线方向为 Y 轴,规定颗粒球心连线与外加电场的夹角为 Φ ; 并且以外加电场方向为 x 轴,与电场垂直方向为 y 轴,建立另一坐标系,且该坐标系随着电场方向变化而旋转。电场任意角度时两颗粒系统截面示意图如图 8 所示,从图 8 中可知两坐标系相对位置,由此可对外加电场进行矢量分解,电场矢量分解过程为

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_{0//} + \mathbf{E}_{0\perp} = E_0 \cos \Phi \hat{\mathbf{X}} + E_0 \sin \Phi \hat{\mathbf{Y}} \quad (16)$$

式中, $\mathbf{E}_{0//}$ 和 $\mathbf{E}_{0\perp}$ 分别为电场 $\mathbf{E}_0$ 在横、纵两个方向上的分量; $\hat{\mathbf{X}}$ 和 $\hat{\mathbf{Y}}$ 分别为 X 和 Y 方向上的单位向量。特别地,当 $\mathbf{E}_0$ 仅包含横、纵向分量时,电场分别为横向场和纵向场。

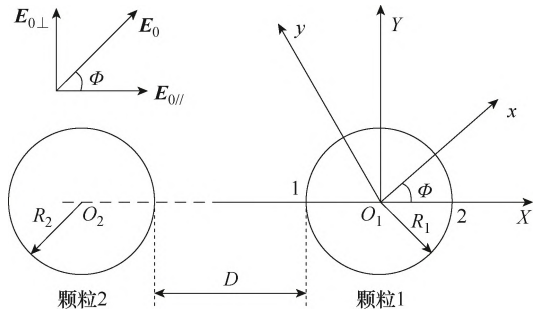


图 8 电场任意角度时两颗粒系统截面示意图

Fig.8 Cross-section of a two-particle system at any angle of electric field

利用上述分解合成方法,当外加电场同时存在横向电场分量与纵向电场分量时,其效果同样能等同于一个合成电场。由此思路能够计算颗粒在任意位置下的相互作用力。颗粒系统在横纵电场联合作用下的运动轨迹如附图 1 所示。

由前述分析可知,当颗粒相互间距较近时,颗粒相互作用会影响颗粒周围的电场分布,进而影响颗粒周围相互作用力。由式(1)可知,准确地描述颗粒相互作用力的关键是得到其周围电场分布的精确计算值,点偶极子模型在计算电场时未充分考虑颗粒相互作用,可能存在计算误差。文献[26-27]中的计算结果误差对比已说明互偶极子模型能够得到精度较高的颗粒局部电场分布。因而,使用互偶极子模型在计算两颗粒相互作用力时,基于精度较高的电场计算结果,能够得到对颗粒间相互作用力的准确描述。使用互偶极子模型分析颗粒周围相互作用力的原理与点偶极子模型相同,基于点偶极子模型对颗粒相互作用力的分析原理,利用互偶极子模

型对颗粒相互作用力分析如下。

位于颗粒 2 球心 O_2 处的自偶极子在球心 O_1 处产生的电势和颗粒 2 的互偶极子在球心 O_1 处产生的电势分别为

$$\varphi_{M_{22-O_1}} = \frac{\mathbf{M}_{22} \cdot \mathbf{r}_1}{4\pi\epsilon_e r_1^3} \quad (17)$$

$$\varphi_{M_{12-O_1}} = \frac{\mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{r}_2}{4\pi\epsilon_e r_2^3} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{M}_{22}$ 为颗粒 2 的自偶极矩; r_1 为颗粒 2 自偶极子到球心 O_1 的距离; $\mathbf{r}_1$ 为颗粒 1 自偶极子指向颗粒 2 自偶极子的位置矢量; r_2 为颗粒 2 的互偶极子到球心 O_1 的距离; $\mathbf{r}_2$ 为颗粒 1 自偶极子指向颗粒 2 互偶极子的位置矢量。

位于颗粒 2 球心 O_2 处的自偶极子在颗粒 1 互偶极子处产生的电势和颗粒 2 的互偶极子在颗粒 1 互偶极子处产生的电势分别为

$$\varphi_{M_{22-1}} = \frac{\mathbf{M}_{22} \cdot \mathbf{r}_3}{4\pi\epsilon_e r_3^3} \quad (19)$$

$$\varphi_{M_{12-1}} = \frac{\mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{r}_4}{4\pi\epsilon_e r_4^3} \quad (20)$$

式中, r_3 为颗粒 2 的自偶极子到颗粒 1 的互偶极子的距离; $\mathbf{r}_3$ 为颗粒 1 互偶极子指向颗粒 2 自偶极子的位置矢量; r_4 为颗粒 2 的互偶极子到颗粒 1 的互偶极子的距离; $\mathbf{r}_4$ 为颗粒 1 互偶极子指向颗粒 2 互偶极子的位置矢量。

根据式(1)中的电场强度计算式,对式(17)~式(20)进行求解,得到使用互偶极子模型计算的颗粒 1 球心 O_1 处和颗粒 1 互偶极子处的电场强度为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{22-O_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \cdot \frac{3(\mathbf{M}_{22} \cdot \mathbf{r}_1)\mathbf{r}_1 - r_1^2 \mathbf{M}_{22}}{r_1^5} \\ \mathbf{E}_{12-O_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \cdot \frac{3(\mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{r}_2)\mathbf{r}_2 - r_2^2 \mathbf{M}_{12}}{r_2^5} \\ \mathbf{E}_{22-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \cdot \frac{3(\mathbf{M}_{22} \cdot \mathbf{r}_3)\mathbf{r}_3 - r_3^2 \mathbf{M}_{22}}{r_3^5} \\ \mathbf{E}_{12-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \cdot \frac{3(\mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{r}_4)\mathbf{r}_4 - r_4^2 \mathbf{M}_{12}}{r_4^5} \end{cases} \quad (21)$$

式中, $\mathbf{E}_{22-O_1}$ 、 $\mathbf{E}_{12-O_1}$ 分别为 $\mathbf{M}_{22}$ 和 $\mathbf{M}_{12}$ 在颗粒 1 球心 O_1 处产生的电场强度; $\mathbf{E}_{22-1}$ 、 $\mathbf{E}_{12-1}$ 分别为 $\mathbf{M}_{22}$ 和 $\mathbf{M}_{12}$ 在颗粒 1 互偶极子处产生的电场强度。

由式(7)对式(21)进行求解,得到互偶极子模型计算的颗粒 1 球心 O_1 处和互偶极子处的颗粒间相互作用力为

$$\begin{cases} F_{22-O_1} = \frac{3M_{11}M_{22}}{4\pi\epsilon_e r_1^4} [(\cos\beta_1 - 3\cos\alpha_1 \cos\theta_1)\mathbf{e}_{r1} - \cos\alpha_1 \sin\theta_1 \mathbf{e}_{\theta1}] \\ F_{12-O_1} = \frac{3M_{11}M_{12}}{4\pi\epsilon_e r_2^4} [(\cos\beta_2 - 3\cos\alpha_2 \cos\theta_2)\mathbf{e}_{r2} - \cos\alpha_2 \sin\theta_2 \mathbf{e}_{\theta2}] \\ F_{22-1} = \frac{3M_{21}M_{22}}{4\pi\epsilon_e r_3^4} [(\cos\beta_3 - 3\cos\alpha_3 \cos\theta_3)\mathbf{e}_{r3} - \cos\alpha_3 \sin\theta_3 \mathbf{e}_{\theta3}] \\ F_{12-1} = \frac{3M_{21}M_{12}}{4\pi\epsilon_e r_4^4} [(\cos\beta_4 - 3\cos\alpha_4 \cos\theta_4)\mathbf{e}_{r4} - \cos\alpha_4 \sin\theta_4 \mathbf{e}_{\theta4}] \end{cases} \quad (22)$$

式中, F_{22-O_1} 、 F_{12-O_1} 分别为 M_{22} 和 M_{12} 与颗粒 1 球心 O_1 处的相互作用力; F_{22-1} 、 F_{12-1} 分别为 M_{22} 和 M_{12} 与颗粒 1 互偶极子处的相互作用力; M_{11} 为颗粒 1 的自偶极矩; θ_1 为颗粒 2 自偶极矩与位置矢量 r_1 的夹角; α_1 为颗粒 1 自偶极矩与位置矢量 r_1 的夹角; β_1 为颗粒 2 自偶极矩与颗粒 1 自偶极矩的夹角; θ_2 为颗粒 2 互偶极矩与位置矢量 r_2 的夹角; α_2 为颗粒 1 自偶极矩与位置矢量 r_2 的夹角; β_2 为颗粒 2 互偶极矩与颗粒 1 自偶极矩的夹角; θ_3 为颗粒 2 自偶极矩与位置矢量 r_3 的夹角; α_3 为颗粒 1 互偶极矩与位置矢量 r_3 的夹角; β_3 为颗粒 2 自偶极矩与颗粒 1 互偶极矩的夹角; θ_4 为颗粒 2 互偶极矩与位置矢量 r_4 的夹角; α_4 为颗粒 1 互偶极矩与位置矢量 r_4 的夹角; β_4 为颗粒 2 互偶极矩与颗粒 1 互偶极矩的夹角; α_i 、 θ_i 和 β_i ($i=1, 2, 3, 4$) 以逆时针方向为正; $\mathbf{e}_{r1}$ 、 $\mathbf{e}_{\theta1}$ 、 $\mathbf{e}_{r2}$ 、 $\mathbf{e}_{\theta2}$ 、 $\mathbf{e}_{r3}$ 、 $\mathbf{e}_{\theta3}$ 、 $\mathbf{e}_{r4}$ 、 $\mathbf{e}_{\theta4}$ 分别为各下标方向上的单位向量。

同时, 由式 (22) 可知, 颗粒的相互作用力可分为两部分: 一部分由自偶极子产生, 另一部分由互偶极子产生, 且式 (22) 能够反映颗粒自偶极矩、互偶极矩与颗粒间相互作用力的关联关系。

由式 (22) 可得到, 当外加电场为横向场时, 使用互偶极子模型计算的颗粒 1 球心 O_1 处和颗粒 1 互偶极子的相互作用力为

$$\begin{cases} F_{22-O_1} = -\frac{3M_{11}M_{22}}{2\pi\epsilon_e r_1^4} \mathbf{e}_{r1} \\ F_{12-O_1} = -\frac{3M_{11}M_{12}}{2\pi\epsilon_e r_2^4} \mathbf{e}_{r2} \\ F_{22-1} = -\frac{3M_{21}M_{22}}{2\pi\epsilon_e r_3^4} \mathbf{e}_{r3} \\ F_{12-1} = -\frac{3M_{21}M_{12}}{2\pi\epsilon_e r_4^4} \mathbf{e}_{r4} \end{cases} \quad (23)$$

同理可得外加电场为纵向场时, 颗粒 1 球心 O_1 处和颗粒 1 互偶极子的相互作用力为

$$\begin{cases} F_{22-O_1} = \frac{3M_{11}M_{22}}{4\pi\epsilon_e r_1^4} \mathbf{e}_{r1} \\ F_{12-O_1} = -\frac{3M_{11}M_{12}}{4\pi\epsilon_e r_2^4} \mathbf{e}_{r2} \\ F_{22-1} = -\frac{3M_{21}M_{22}}{4\pi\epsilon_e r_3^4} \mathbf{e}_{r3} \\ F_{12-1} = \frac{3M_{21}M_{12}}{4\pi\epsilon_e r_4^4} \mathbf{e}_{r4} \end{cases} \quad (24)$$

使用互偶极子模型分析相互作用力时, 颗粒 1 偶极矩在两种电场中的排列情况如图 9 所示。

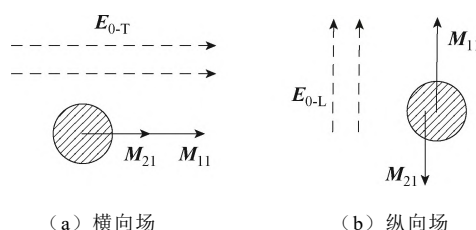


图 9 两种电场中颗粒 1 互偶极矩自偶极矩排列情况
Fig.9 The arrangement of mutual-coupling dipole moment and self-dipole moment of particle 1 in two electric fields

为更好地观测颗粒自转并验证颗粒互偶极子模型的正确性, 本文对纵向场中三颗粒系统中中间颗粒的运动特性进行了观测记录, 其自转运动特性示意图如附图 2 所示。由附图 2a~附图 2d 可以观察到, 位于中间的颗粒随两极板间电压增大发生了明显的自转行为。由附图 2a 可知, 初始状态下中间颗粒保持静止, 且标记 A 位于 y 轴负半轴; 随着电压增加, 中间颗粒的标记开始发生一定的偏转, 到附图 2d 时能够看到中间颗粒发生了明显的自转变化, 自转角度约为 50° , 这与本文中分析情况一致, 证明了互偶极子模型能够正确地分析颗粒间相互作用造成的颗粒自转现象。

由式 (24) 及图 9 可知, 若使用互偶极子模型分析颗粒相互作用力, 当电场存在垂直分量时, 互偶极子能够计算颗粒自偶极子相互作用力与互偶极

子相互作用力。且互偶极子相对颗粒球心偏移，因而当存在垂直分量 $\mathbf{E}_{0\perp}$ 作用时，互偶极子相互作用力存在力矩，该力矩表达式^[24]为

$$\mathbf{M}_{F_{21}} = \boldsymbol{\tau} \times \mathbf{F}_{21} \quad (25)$$

式中， $\boldsymbol{\tau}$ 为颗粒互偶极子相对球心的偏移矢量； $\mathbf{F}_{21}$ 为两颗粒间互偶极子作用力。

由式(25)可知，颗粒互偶极子相互作用力矩在外加电场为纵向场时最大，此时增大外加电场可使颗粒发生明显自转，有效地促进颗粒成链过程。利用互偶极子作用力模型计算分析得到的颗粒相互作用行为与试验中出现的“吸引-自转-成链”的运动特性一致，成功地解释并描述了这一特殊现象。

同时，使用互偶极子模型得到的颗粒在纵向场条件下的互偶极子相互作用力计算结果如图 10 所示，计算时外加电场 $E_0=1 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。

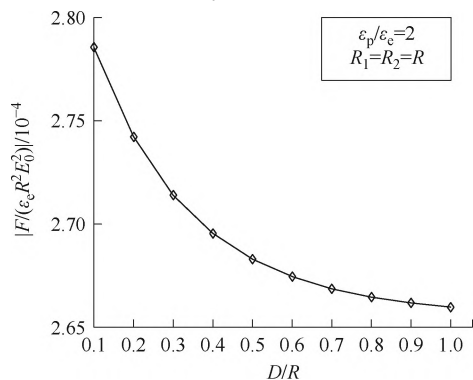


图 10 颗粒互偶极子相互作用力随颗粒间距的变化

Fig.10 Variation of particle mutual-coupling dipole interaction with the particle spacing

互偶极子在外加电场的作用下相对球心存在偏移距离，当电场方向与颗粒球心连线方向存在夹角时，纵向分量 $\mathbf{E}_{0\perp}$ 影响互偶极矩在外加电场中的方向，使得互偶极子相互作用力与自偶极子相互作用力方向相反，且互偶极子相互作用力与自偶极子相互作用力无法合成，偏离颗粒球心的互偶极子相互作用力使得颗粒发生自转。

由图 10 可知，在颗粒间距较近时，颗粒间相互作用力较为显著，此时在相同电场条件下颗粒受到的互偶极子相互作用力也较大，颗粒在该力的作用下发生自转；随着颗粒间间距增大，颗粒间相互作用减弱，颗粒受到的互偶极子相互作用力也随之减小，即增大颗粒间距，颗粒自转行为将会减弱。

当颗粒 1 与颗粒 2 半径同时扩大倍数 t 由 1 变化为 2 时，颗粒 1 的互偶极子相互作用力如图 11 所示；颗粒 2 与颗粒 1 半径比 R_2/R_1 从 1.1 增大至 2 时，颗粒 1 的互偶极子相互作用力如图 12 所示。由

图 11 可知，当颗粒 2 与颗粒 1 半径之比保持不变时，同时增大两个颗粒的半径，颗粒受到的互偶极子相互作用力逐渐增大，即随着颗粒半径的增大，颗粒相互作用力同时增大；而由图 12 可知，当颗粒 1 半径保持不变时，随着颗粒 2 半径的增大，即随着颗粒半径差异程度的增大，颗粒受到的互偶极子相互作用力逐渐减小。根据以上趋势，推测当两颗粒半径之比差距足够大时，相互作用对颗粒彼此的影响将变得很小。

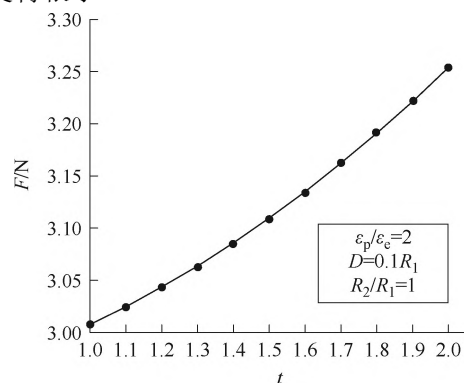


图 11 颗粒 2 与颗粒 1 半径同时扩大 t 倍时，颗粒 1 互偶极子相互作用力变化曲线

Fig.11 The mutual-coupling dipole interaction force curve of particle 1 with changed by the radius of particle 2 and particle 1 increases by t times

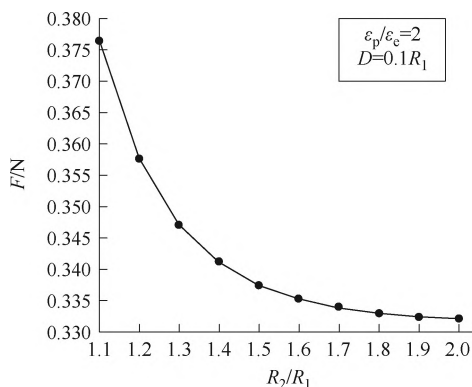


图 12 颗粒 2 与颗粒 1 半径比 R_2/R_1 由 1.1 变化至 2 时，颗粒 1 互偶极子相互作用力变化曲线

Fig.12 The mutual-coupling dipole interaction force curve of particle 1 with the radius ratio R_2/R_1 between particle 2 and particle 1 changes from 1.1 to 2

由上述分析可知，经典的点偶极子模型在分析颗粒间相互作用力行为时，并不能解释颗粒在纵向场下的“自转”现象，而考虑颗粒相互作用的互偶极子模型方法，不仅解释了颗粒在绝缘油中的自转现象，同时实现了对颗粒自转时受到的相互作用力和力矩的定量计算。

3 结论

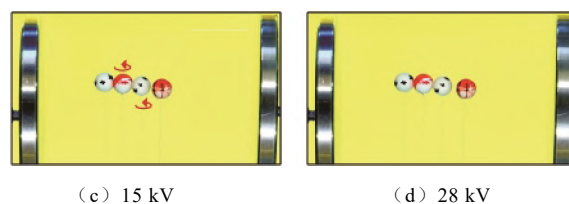
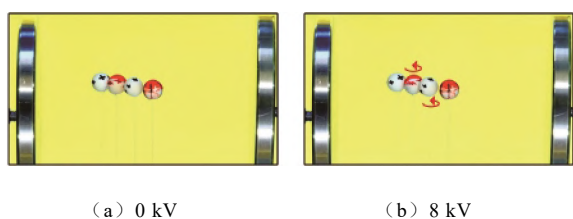
本文在进行颗粒运动特性试验时发现,不同外加电场条件作用下,绝缘油中电介质颗粒呈现的运动特点不同:当电场方向与颗粒中心连线方向一致时,颗粒由于相互作用而呈现“吸引-成链”的运动趋势;而当电场方向与颗粒中心连线方向垂直时,颗粒呈现“吸引-自转-成链”的特殊运动模式。颗粒自转现象的机制是颗粒在电场环境下形成相互作用力矩的本质体现,而经典点偶极子作用力模型无法解释该现象。本文以试验结果为基础,根据颗粒在电场中的极化效果,考虑颗粒相互作用对颗粒周围电场分布及相互作用力的影响,提出了颗粒系统互偶极子与自偶极子的等效方法,获得了颗粒相互影响下电场分布及电偶极矩表达式,建立了用于考虑颗粒相互影响的互偶极子作用力模型,解释并描述了颗粒相互吸引-自转-成链的运动机制。对试验现象及模型计算结果分析得到如下结论:

1)颗粒的自转现象本质上是颗粒相互作用形成互偶极子等效力矩的结果,即偏离球心的互偶极子在纵向电场分量作用下形成偏转力矩,促使颗粒发生自转运动,且三颗粒系统的自转试验能够充分说明互偶极子概念在分析颗粒相互作用力时的正确性。

2)颗粒互偶极子相互作用力在外加电场与颗粒中心连线方向一致时最大,此时增大外加电场可使颗粒发生明显自转,且颗粒自转现象可有效地促进颗粒成链过程。

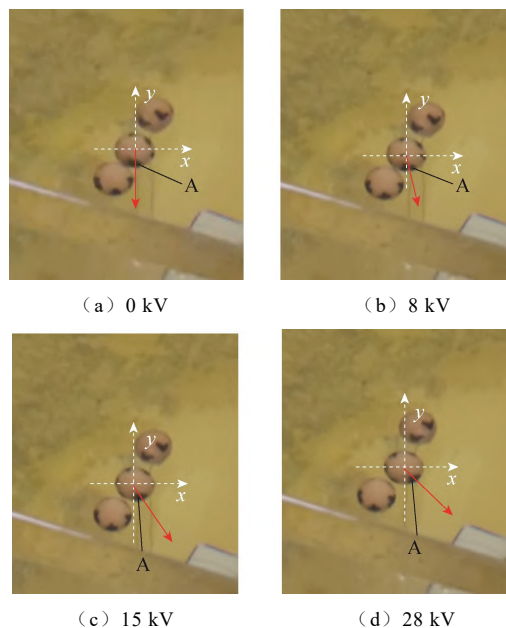
3)利用该模型计算了颗粒自转受到的相互作用力,以及颗粒粒径存在差异情况下的颗粒相互作用力。计算结果表明,若两颗粒粒径相同,当颗粒间距 D 在 $0.1R \sim 0.5R$ 之间时,颗粒之间存在显著的相互作用力,且颗粒相互作用力随着颗粒间距的增大而减小,随着颗粒粒径的增大而增大;对于粒径存在差异的颗粒系统,在颗粒半径比 R_2/R_1 增大的过程中,半径为 R_1 的颗粒受到的相互作用力随半径比的增大而减小。

附 录



附图 1 横纵电场联合作用时颗粒运动轨迹

App.Fig.1 Particle motion trajectory under the combined action of transverse and longitudinal electric fields



附图 2 纵向场下三颗粒系统中间颗粒自转运动示意图

App.Fig.2 Rotation of the middle particles in a three-particle system in longitudinal field

参考文献

- [1] 林智勇, 李荣华, 黄国泰, 等. 基于频域二次微分分解谱法的油纸绝缘等效电路参数辨识[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15): 4966-4975.
Lin Zhiyong, Li Ronghua, Huang Guotai, et al. Identification of dielectric response equivalent circuit of transformer's oil-paper insulation based on quadratic differential decomposition spectroscopy of frequency domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(15): 4966-4975.
- [2] Butcher M, Neuber A A, Cevallos M D, et al. Conduction and breakdown mechanisms in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(2): 467-475.
- [3] Kalantar A, Levin M. Factors affecting the dissolution of copper in transformer oils[J]. Lubrication Science, 2008, 20(3): 223-240.

- [4] 刘云鹏, 赵家莹, 刘贺晨, 等. 低频电压下含纤维素颗粒变压器油绝缘特性及影响因素[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1198-1207.
Liu Yunpeng, Zhao Jiaying, Liu Hechen, et al. Insulation characteristics and influencing factors of transformer oil containing cellulose particles under low-frequency voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1198-1207.
- [5] 刘道生, 周春华, 丁金, 等. 变压器纳米改性油纸复合绝缘研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2464-2479, 2490.
Liu Daosheng, Zhou Chunhua, Ding Jin, et al. Research overview of oil-paper composite insulation modified by nano particles for transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2464-2479, 2490.
- [6] 田文锐, 任慧敏, 杨定乾, 等. 低温环境下油浸绝缘纸介电响应特性与温度归一化研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(11): 3630-3642.
Tian Wenrui, Ren Huimin, Yang Dingqian, et al. Study of dielectric response characteristics and temperature normalization of oil-paper insulation in low temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(11): 3630-3642.
- [7] 张国治, 闫伟阳, 王堃, 等. 流动绝缘油中纤维杂质颗粒运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2500-2509.
Zhang Guozhi, Yan Weiyang, Wang Kun, et al. Simulation research on movement characteristics of fiber impurity particles in flowing insulating oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2500-2509.
- [8] 张宁, 王鹏, 刘智捷, 等. 流-电耦合场中金属颗粒群的荷电计算及影响因素研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5534-5544.
Zhang Ning, Wang Peng, Liu Zhijie, et al. Study on the charge calculation and influencing factors of metal particle groups in fluid-electric coupling field [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5534-5544.
- [9] Ciuriuc A, Notinger P V, Jovalekic M, et al. Experimental study on vegetable and mineral transformer oils properties[C]//2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Bran, Romania, 2014: 169-174.
- [10] Yang Li jun, Sun Weidong, Gao Sihang, et al. Thermal aging test for transformer oil-paper insulation under over-load condition temperature[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 2846-2853.
- [11] 黄宇辰, 房俊龙, 闫伟阳. 不同电压类型下油流中纤维杂质颗粒运动特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4817-4828.
Huang Yuchen, Fang Junlong, Yan Weiyang. Simulation research on the motion characteristics of fiber impurity particles in oil flow under different voltage types[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4817-4828.
- [12] 张宁, 刘士利, 郝建, 等. 变压器油中气泡杂质相局部放电特性研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2757-2776.
Zhang Ning, Liu Shili, Hao Jian, et al. Review on partial discharge characteristics of bubble impurity phase in transformer oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2757-2776.
- [13] 李原, 张乔根, 赵毅. 直流电压下纤维小桥对油纸复合绝缘局部放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3611-3618.
Li Yuan, Zhang Qiaogen, Zhao Yi. Effect of cellulose bridge on characteristics of partial discharge in oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3611-3618.
- [14] Lu Wu, Liu Qiang. Effect of cellulose particles on impulse breakdown in ester transformer liquids in uniform electric fields[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2554-2564.
- [15] Pohl H A. The motion and precipitation of suspensions in divergent electric fields[J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(7): 869-871.
- [16] Zainoddin M H S, Zainuddin H, Aman A. Investigation of the dielectrophoresis effect on the electrical performance of dielectric liquid[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, 12(23): 7003-7007.
- [17] 郝建, 但敏, 廖瑞金, 等. 颗粒属性对矿物绝缘油直流击穿特性的影响差异及原因分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5270-5281.
Hao Jian, Dan Min, Liao Ruijin, et al. Influence of particle properties on DC breakdown characteristics

- of mineral oil and its difference reason analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5270-5281.
- [18] 梁晨, 伍衡, 李原龙, 等. 油中碳颗粒对交直流复合电压下绝缘油击穿特性的影响[J]. 绝缘材料, 2018, 51(4): 21-27.
Liang Chen, Wu Heng, Li Yuanlong, et al. Effect of carbon particles on breakdown strength of insulating oil under AC/DC composite voltage[J]. Insulating Materials, 2018, 51(4): 21-27.
- [19] Mahmud S, Chen G, Golosnoy I O, et al. Bridging in contaminated transformer oil under DC and AC electric field[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 472: 012007.
- [20] 王有元, 李熙, 李原龙, 等. 交直流复合电压下铜颗粒在油中的分布及对绝缘油击穿特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5581-5590.
Wang Youyuan, Li Xi, Li Yuanlong, et al. Distribution of copper particle in insulating oil and its influence on breakdown strength of insulating oil under combined AC and DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5581-5590.
- [21] 李金忠, 张乔根, 李原, 等. 直流电压下油纸绝缘杂质小桥的形成过程[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3901-3908.
Li Jinzhong, Zhang Qiaogen, Li Yuan, et al. Generation process of impurity bridges in oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3901-3908.
- [22] 付守海, 王淑娟, 王景春. 变压器油中导电颗粒运动轨迹的计算[J]. 现代电力, 1999, 16(2): 30-37.
Fu Shouhai, Wang Shujuan, Wang Jingchun. Calculation of particles moving traces in transformer oil[J]. Modern Electric Power, 1999, 16(2): 30-37.
- [23] Krins M, Borsi H, Gockenbach E. Impact of carbon particles on the electrical strength of different solid/liquid interfaces in a non-uniform field[C]// Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, VA, USA, 1998: 623-626.
- [24] 张明月, 刘浩琦, 曹辉, 等. 金属颗粒极化中场激发双电层的电荷和电场特征研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(4): 531-541.
Zhang Mingyue, Liu Haoqi, Cao Hui, et al. Study on the charge and electric field characteristics of field-induced electric double layer in metal particles polarization[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(4): 531-541.
- [25] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [26] 张嘉琳, 康永强, 蒲绪宏, 等. 双柱体系统局部电场计算的互偶极子模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3869-3883.
Zhang Jialin, Kang Yongqiang, Pu Xuhong, et al. The mutual-coupling dipole model in calculating the local electric field for two-cylinder system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3869-3883.
- [27] Kang Yongqiang, Zhang Jialin, Shi Zhipeng, et al. A new method for calculating the electric field distribution in particle-particle rotating systems[J]. Journal of Electrostatics, 2024, 132: 103967.

作者简介

包艳艳 女, 1990 年生, 博士研究生, 研究方向为超特高压电力设备状态检测、诊断与评价。

E-mail: npuersbyy0930@163.com

陈伟 男, 1976 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网与智能电器、电能质量分析与状态评价等。

E-mail: CW733000@163.com (通信作者)

Analysis of Particle Interactions and Modeling of Mutual-Coupling Dipole Forces in Mineral Insulating Oils under Uniform Electric Fields

Bao Yanyan^{1,2} Zhang Jialin³ Chen Wei¹ Wen Dingjun² Liu Kang²

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering Lanzhou University of Technology
Lanzhou 730050 China

2. Research Institute of Electric Power Science State Grid Gansu Power Company Lanzhou 730070 China

3. School of New Energy and Power Engineering Lanzhou Jiaotong University Lanzhou 730070 China)

Abstract The formation of small bridge by dielectric impurity particles in insulating oil under the action

of electric field is the key factor that leads to the decrease of insulation performance. When the distance between dielectric particles is relatively close, the polarization interaction force is significant, which greatly affects the electric field distribution around dielectric particles and the chain process of particles in oil. The particle chain process and its morphological change are important factors affecting the distortion of electric field and partial discharge in transformer insulation oil. However, the mechanism by which the interaction between particles affects their motion is not well understood, and there is a lack of effective models for analyzing the interaction forces. Therefore, an experimental platform was established to study the effect of dielectric particle interaction on particle motion in insulating oil.

In the experiment, the electric field is uniform, and the field direction is changed to simulate the electric field in different directions. Dielectric particles are replaced by wooden balls and fixed with extremely fine cotton thread. The influence of their interaction on the particle chain process is mainly studied. The experimental results show that when the direction of the applied electric field is parallel to the line connecting the center of the particles, the particles attract each other and form a chain under the action of the electric field. However, when the direction of the external electric field is perpendicular to the line connecting the particle center, there will be a special “self-rotation” phenomenon in the process of the particle translation movement along the electric field line to form a chain, that is, the special motion mode of “attraction-self-rotation-chain”. However, the classical point dipole interaction model cannot explain and describe this special experimental phenomenon. Therefore, the process of particle interaction is considered in this paper, and the equivalent idea of self-dipole and mutual-coupling dipole polarization of particles under the action of electric field is proposed. On this basis, a model of mutual-coupling dipole interaction considering particle interaction is established, and the analytical expressions of particle self-dipole moment and mutual-coupling dipole moment are obtained, and the relationship between particle radius and “mutual-coupling dipole moment” is established.

The mutual-coupling dipole model is used to represent the result of particle interaction by the offset of the mutual-coupling dipole away from the center of the sphere, and successfully explains the “attraction-self-rotation-chain” phenomenon caused by particle interaction, that is, the particle self-rotation mechanism is the essential reflection of the interaction torque formation in the electric field environment. The self-rotation experiment of a three-particle system fully proves the validity of the concept of coupled dipoles in the analysis of the interaction force between particles. At the same time, the mutual-coupling dipole model can realize the quantitative calculation of particle interaction force and torque under different electric field angles and particle R . The calculation results show that when two particles have the same particle radius and particle spacing D is between $0.1R$ and $0.5R$ (D and R is the distance between the particles and the particle radius, respectively), there is a significant interaction force between particles, and the particle interaction force is inversely proportional to the particle spacing and proportional to the particle radius. The above analysis model provides a new method for analyzing the interaction behavior of particles in the electric field environment and optimizing the electric field in the insulating oil.

Keywords: Insulating oil, dielectric particle polarization, dipole moment, mutual-coupling dipole model, interaction between particles

(编辑 李 冰)

ISSN 0258-2724
CN 51-1277/U
CODEN XJDXEW

西南交通大学学报

JOURNAL OF SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY

2025 年 6 月 第60卷 第3期
Vol. 60 No. 3 Jun. 2025



Ei Compendex 收录期刊

中文核心期刊

中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊

中国科技论文统计源期刊

德国数学文摘 (Zbl MATH) 收录期刊

3
2025
中国 成都

《西南交通大学学报》第八届编辑委员会

顾 问:

沈志云 (中国科学院院士, 中国工程院院士, 西南交通大学)
钱清泉 (中国工程院院士, 西南交通大学)
卢春房 (中国工程院院士, 中国铁道学会)
李树深 (中国科学院院士, 中国科学院)
何华武 (中国工程院院士, 中国工程院, 中国科学技术协会)
秦顺全 (中国工程院院士, 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 西南交通大学)
刘友梅 (中国工程院院士, 中车株洲电力机车研究所有限公司)
丁荣军 (中国工程院院士, 中车株洲电力机车研究所有限公司)
杜彦良 (中国工程院院士, 石家庄铁道大学)
余海岁 (英国皇家工程院院士, 英国利兹大学)
何 川 (中国工程院院士, 西南交通大学)

主 编: 翟婉明 (中国科学院院士, 美国工程院院士)

副主编: 李恒超 WANG Kelvin C. P.

委 员: (按姓名字母排列)

蔡国庆	陈 辉	陈维荣	陈学良	崔 凯	方 勇
高宏力	高仕斌	韩 科	何旭辉	何正友	蒋阳升
康国政	李恒超	李天瑞	李翔宇	李永乐	蔺鹏臻
凌建明	LIU Binbin	刘国祥	刘松玉	刘晓波	刘志刚
马光同	蒲黔辉	钱林茂	任尊松	单德山	汤宝平
唐小虎	王开云	WANG Kelvin C. P.		王 平	温泽峰
吴广宁	WU Qing	闫连山	闫学东	杨 冰	殷国栋
袁艳平	翟婉明	湛利华	周绍兵	周仲荣	朱 庆
朱胜阳	宗周红				

西南交通大学学报

第 60 卷 第 3 期 2025 年 6 月

目 次

电气化铁路贯通供电对电网的影响与解决方案	李群湛	533
城市轨道跨换乘站资源共享供电方案优化设计	刘 炜, 邓皓天, 许 倩, 等	541
计及阶梯式碳交易的牵引供电系统混合储能容量配置	郭文凯, 王 果, 闵永智	550
考虑杆件初弯曲的弦支穹顶结构非线性屈曲分析	姜正荣, 邱俊明, 石开荣, 等	561
钢筋骨架系统约束藏羌民居片石墙抗震性能	莫 忱, 杨保杉, 包忠辉, 等	569
路桥过渡段纵连轨道板纵向力分布特征与上拱机理分析	蔡小培, 王昌昌, 董 博, 等	580
基于数字钻进参数的岩石强度确定方法	贾朝军, 陈范雷, 雷明锋, 等	589
基于自编码器的非线性气动力辨识及非线性颤振分析	梅瀚雨, 廖海黎, 王昌将	599
基于核磁共振技术的硬石膏岩孔隙结构冻融损伤特性	候 超, 靳晓光, 何 杰, 等	608
非对称渗流边界小净距隧道渗流场特征及结构安全分析	喻炳鑫, 陈子全, 何 川, 等	618
不同强度混凝土填充高强方钢管抗剪性能对比分析	王佳丽, 王 莹, 陈西文, 等	628
FDR 联合静力贯入快速测土体质量含水率和干密度试验研究	臧耀辉, 王柳江, 毛航宇, 等	639
铺设锁定轨温差对高原铁路无缝道岔受力特性的影响	高 原, 杨东升, 王树国	648
应力-剪胀关系比较与岩石应力-剪胀关系研究	梁基冠, 黄林冲, 马建军, 等	656
基于喷雾动量法的共轨喷油器喷油稳定性试验研究	赵建辉, 徐 煜, 杨贵春, 等	665
基于逆向分析的车辆对碰事故再现系统	刘永涛, 高隆鑫, 方腾源, 等	671
高速列车动力学性能参数优化迭代设计	姜 杰, 丁国富, 邹益胜, 等	679
基于弦角描述符的平面开环轨迹尺寸综合方法	朱留宪, 魏 巍, 李 立	688
循环载荷作用下 LS-FA-211001 吸力锚时变可靠性分析	杨顺奇, 钱华明, 钟泽棋, 等	698
竖井全断面掘进机异型刀盘的滚刀布局	黄鸿颖, 管会生, 母国旺, 等	704
地铁梯形轨枕轨道钢轨波磨成因研究	宋启峰, 陈光雄, 董丙杰, 等	714
繁忙终端区连续下降运行的 4D 轨迹预测	王 超, 陈含露, 秦宏坤, 等	722
乘务资源共享下的城市轨道交通轮班计划优化	刘葛辉, 金 华, 彭其渊, 等	731
考虑客流需求的高速铁路列车运行图加线模型与算法	赵天胤, 张永祥, 王 蔚, 等	741
 “人工智能理论与应用”专栏		
基于机器学习算法的智能编组站 5G 天线参数规划	陈建译, 闫连山, 郭兴海, 等	752
基于行人重识别的施工现场人员位置信息感知	杨 彬, 胡晋铭, 张其林, 等	761
基于分段惩罚参数 SVM 算法的锂电池失效识别	金 辉, 胡寅道, 葛红娟, 等	770
基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别	包艳艳, 杨广泽, 陈 伟, 等	781

[期刊基本参数] CN 51-1277/U * 1954 * b * A4 * 260 * zh * P * ¥12.00 * 1000 * 28 * 2025-06

[本期责任编辑] 郭菊彬

西南交通大学学报
XINAN JIAOTONG DAXUE XUEBAO
(双月刊, 1954 年创刊)

第 60 卷 第 3 期 (总第 283 期) 2025 年 6 月

JOURNAL OF SOUTHWEST
JIAOTONG UNIVERSITY
(Bimonthly, Started in 1954)

Vol. 60 No. 3 (Sum 283) Jun. 2025

主 编 翟婉明
主管单位 中华人民共和国教育部
主办单位 西南交通大学
编辑出版 西南交通大学学报编辑部
中国 成都 邮政编码 611756
电话 (028) 66367562, 66366845
传真 (028) 66366552
电子邮箱 xbz@home.swjtu.edu.cn
网址 <https://xnjdxs.swjtu.edu.cn/>
印 刷 四川盛图彩色印刷有限公司
发行范围 公开发行
国内订购 全国各地邮政局
国内发行 成都市邮政局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱, 邮政编码 100044)
国外发行代号 BM853

Editor in Chief: ZHAI Wanming
Competent Authority: The Ministry of Education of P. R. C.
Sponsor: Southwest Jiaotong University
Editor and Publisher: Editorial Department of Journal of
Southwest Jiaotong University,
Chengdu 611756, China,
Tel: 86-28-66367562, 66366845
Fax: 86-28-66366552
E-mail: xbz@home.swjtu.edu.cn
<https://xnjdxs.swjtu.edu.cn/>
Printing: Sichuan Shengtu Colour-Printing Co., Ltd.
Domestic Subscription Office: All Local Post Offices
Domestic Distributor: Post Bureau of Chengdu City
Overseas Distributor: China International Book Trading
Corporation (P.O. Box 399, Beijing 100044, China)
Subscription Code BM853

ISSN 0258-2724
CN 51-1277/U

国内发行代号 62-104

国内定价: 12.00 元



基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别

包艳艳^{1,2}, 杨广泽³, 陈伟¹, 冯婷娜⁴

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070; 3. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000; 4. 国网新疆电力有限公司哈密供电公司, 新疆 哈密 839000)

摘 要: 变压器绝缘水平和健康状态对电网的安全稳定至关重要, 为研究 750 kV 变压器内部存在放电故障时, 箱体外采集的可听声信号中可能混杂有电晕声、鸟鸣等其他干扰信号的工程实际问题, 提出一种基于稀疏表示理论 (SBSS) 与卷积神经网络 (CNN) 的 750 kV 变压器与尖板放电混叠信号的声纹识别方法. 首先, 采集武胜 750 kV 变电站变压器正常运行声信号作为背景声, 构建针-板放电模型得到放电声信号和现场常见干扰声作为前景声, 通过添加不同信噪比的前景声到背景声中构造混叠声信号; 然后, 利用基于稀疏表示理论的盲分离算法实现目标前景声纹图谱和冗余背景声纹图谱的分离; 最后, 对 CNN 模型超参数进行优化, 以提高模型对分离后的各类前景声纹图谱的分类性能. 研究表明: 通过盲源分离算法可以剔除冗余背景声干扰, 使神经网络聚焦于前景声的分类识别; 本文方法可实现混叠声信号中前景声纹的分离, 分离后, CNN、支持向量机 (SVM) 和反向传播神经网络 (BPNN) 的识别准确率分别提高 7.6%、17.2% 和 14.3%.

关键词: 局部放电; 时频图谱; 稀疏表示; 盲分离; 卷积神经网络; 深度学习

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A

Voiceprint Recognition of Discharge Aliasing Signals from 750 kV Transformer and Pin-Plate Based on Sparse Representation Theory and Convolutional Neural Network

BAO Yanyan^{1,2}, YANG Guangze³, CHEN Wei¹, FENG Tingna⁴

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China; 3. Tai'an Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Tai'an 271000, China; 4. Hami Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Hami 839000, China)

Abstract: Transformer insulation level and health state are crucial to the safety and stability of the power grid. In order to study the practical engineering problem that the audible acoustic signals collected outside the box may be mixed with other interference signals, such as corona sound and bird song when there is a discharge fault inside the 750 kV transformer, a voiceprint recognition of 750 kV transformer and pin-plate discharge aliasing signals based on sparse representation theory (SBSS) and convolutional neural network (CNN) was proposed. Firstly, the normal operation sound signal of Wusheng 750 kV Substation was collected as the background sound, and the discharge sound signal and the common interference sound in the field were used as the foreground sound by constructing the pin-plate discharge model. The aliasing sound signal was constructed by adding the foreground sound with different signal-to-noise ratios to the background sound. Secondly, the blind separation algorithm

收稿日期: 2023-04-21 修回日期: 2023-11-16 网络首发日期: 2023-11-27

第一作者: 包艳艳 (1990—), 女, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为输变电设备状态评估、诊断, E-mail: 1076453621@qq.com

引文格式: 包艳艳, 杨广泽, 陈伟, 等. 基于 SBSS 与 CNN 的 750 kV 变压器和尖板的放电信号声纹识别[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(3): 781-792.

BAO Yanyan, YANG Guangze, CHEN Wei, et al. Voiceprint recognition of discharge aliasing signals from 750 kV transformer and pin-plate based on sparse representation theory and convolutional neural network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(3): 781-792.

based on SBSS was used to realize the separation of target foreground and redundant background voiceprint spectra. Finally, the hyperparameters of the CNN model were optimized to improve the classification performance of the model on the separated various types of foreground voiceprint spectra. The results show that the blind source separation algorithm can eliminate the redundant background sound interference so that the neural network can focus on the classification and recognition of foreground sound. The proposed method can separate foreground voiceprint in the aliasing sound signals, and the recognition accuracies of the CNN, the support vector machine (SVM), and the back-propagation neural network (BPNN) after separation are improved by 7.6%, 17.2%, and 14.3%, respectively.

Key words: partial discharge; time-frequency spectrum; sparse representation; blind separation; convolutional neural network; deep learning

变压器作为电力系统中的重要电气设备,其绝缘水平和健康状态是保障电网安全稳定的前提^[1-2].受制造工艺及运行环境影响,变压器内部金属毛刺、悬浮颗粒等绝缘缺陷使其周围极易出现不均匀电场,导致绝缘劣化加速,发生局部放电^[3-5],准确识别放电可为变压器异常状态预警提供重要参考.

在工业场景中,通过各种传感器收集设备的状态数据,结合人工智能算法对设备进行运行状态评估可大幅提升运维的效率^[6-8].可听声信号蕴含丰富的变压器运行状态信息,相对于振动信号检测,可听声检测具有不停电测量和非接触式诊断的优点^[9];同时,由于声波传播的衰减程度与频率的平方成正比,可听声检测也极大克服了超声信号在传播过程中的大幅信息衰减^[10].在特征提取方面,峰值、峭度、偏度、波形因子、裕度因子等统计参数常用于描述信号时域特征^[11];傅里叶变换等通常用来获取信号的全局频率分布,主频、次频及频带能量占比等常用于提取信号的频域特征^[12-13];时域分析和频域分析在工程中被广泛使用,从本质上讲,他们只适用于分析平稳信号,难以完整反映非平稳信号中的局部特征信息.变压器正常运行时声信号较平稳,而放电等各类异常声信号具有较强的时变性和非平稳性,单域特征描述较为片面,时域和频域相结合的时频分析能够提取非平稳信号频率随时间变化的时频特征,克服单一域分析的局限性^[14].同时,通过时频分析得到的信号声纹谱图将一维信号可视化为二维图像,更为直观地展示声信号的特征信息,反映变压器的运行状态.设备状态可视化技术也是目前信号处理和现场监测的常用手段之一.

基于信号盲分离算法和稀疏表示理论,文献^[15]运用快速独立分量分析实现了断路器合闸期间各类源信号的盲分离,此方法通常要求现场声音传感器数量大于等于信号源数目,分离出的各类源信号的

排列顺序与上下幅值具有随机性.文献^[16]利用集合经验模态分解和稀疏表示理论对声音信号矩阵进行去噪,此方法的目的是获得成分相对单一的变压器背景声信号,异常前景噪声均被去除,其原始信号矩阵由一维时域信号分割、裁剪、拼接而成.文献^[17-18]采用基于稀疏表示的分类算法,分别对断路器机械故障和干式变压器铁芯绕组松动故障的声音信号特征向量进行识别.目前,盲分离算法的应用对象多为一维声音信号,且适用场景有限,缺少广泛意义;稀疏表示理论作为近年来信号处理领域的研究热点,主要应用于信号重构和分类场景,而将其应用于信号盲分离的研究尚少,特别是针对二维图像数据的分离.基于研究现状,本文对稀疏表示理论在二维图像信号盲分离方面的应用进行了探究.

对变压器运行状态进行监测时,其声纹谱图中的异常部分可能是设备故障产生的放电声,也可能是讲话声、鸟鸣声等其他现场干扰,以上声信号统称为前景声纹.考虑到基于先验知识而设计的各种去噪算法的局限性,本文摒弃了传统方法对各类未知现场噪声的抑制和去除环节,而是选择在变压器正常运行背景声中直接分离出未知类型的前景声纹^[19],然后,对各类型前景声纹进行放电故障或噪声干扰的判断与识别^[20-21],实现用统一的分离识别代替复杂的去噪筛选.

传统的局部放电识别方法首先通过人工构造特征参量,提取特征参数后将其输入分类器进行识别,此思路对声纹图像的适用度有限.随着各类智能算法的快速发展,卷积神经网络等深度学习算法克服了人工提取的主观性和局限性^[22],在大规模图像学习和分类方面发挥了重要作用,已应用于新一代电力系统的状态诊断,目前主要集中于直流电缆^[23]、气体绝缘开关^[24]等设备的放电识别.本文基于稀疏盲分离得到的声纹谱图,进一步探究其在油浸式变压

器放电声纹识别方面的应用。

电抗器和变压器内部均存在铁芯和绕组,属于油浸式设备。750 kV电抗器正常运行期间,声音信号的频率分量主要集中在1000 Hz以内。西北地区一台750 kV电抗器运行期间产生异常声信号,对该设备解体后发现其内部有明显放电痕迹。对故障期间采集的声信号进行分析发现,1000~7500 Hz频率分量有明显增加,与放电信号在1000 Hz以上频率分量有较多分布的现象相吻合。因此,实际的故障电抗器声信号可以视为正常运行期间声信号和故障放电声信号的叠加。本文提出采用混合叠加变压器正常运行声信号和针板电极放电声信号模拟变压器内部放电声信号的方法具有一定的合理性和可行性。

本文首先采集武胜750 kV变电站变压器正常运行声信号作为背景声;搭建模拟放电实验平台,将变压器油中放电声信号与其他常见干扰声信号作为前景声;将不同信噪比的各类型前景声以随机位置

添加到变压器运行背景声中,构造可模拟现场环境的混叠声信号。然后,利用基于稀疏表示理论的盲分离算法对混叠声纹时频谱图进行前景声纹的分离提取;调整优化卷积神经网络的结构参数,对分离出的前景声纹谱图进行学习和识别。最后,将本文方法与传统特征提取和识别算法进行对比分析。

1 基本原理

1.1 声纹时频谱图

非平稳信号的特征信息会随时间变化发生改变,传统的时域和频域分析方法大多只适用于平稳信号的全局信息提取,难以准确反映非平稳信号在时频域上的局部特征信息。时频谱图建立了非平稳信号在时域和频域之间的联系,能够反映信号频率分布随时间刻度变化的规律,可以完整直观地展现声信号的局部特征和全局特征,为声纹的特征提取与识别提供了极大便利。图1为声纹时频谱图的绘制流程。图中,DCT为离散傅里叶变换。

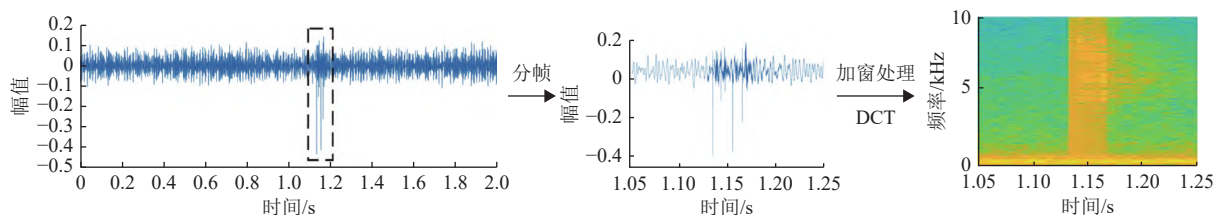


图1 声纹时频谱图绘制流程

Fig. 1 Drawing process of voiceprint time-frequency spectrum

在进行时频谱图绘制时,首先要对原始声信号进行分帧及加窗操作。分帧是通过特定长度的窗口在非平稳的放电声信号上移动加权,从而将其分割成为短时平稳的信号片段,这些片段称为帧。为保持帧与帧之间的连续性并使其平滑过渡,分帧一般采用交叠分割的方法,即前一帧和后一帧保持一定的交叠部分,称为帧移,关系式为

$$M = \frac{T - L\alpha}{L(1 - \alpha)}, \quad (1)$$

式中: M 为帧数, L 为帧长, T 为声信号长度, α 为重叠率。

将每帧信号片段进行加窗处理,改善频谱泄漏带来的影响。本文选择具有较好时间和频率聚集特性的汉明窗,窗函数为

$$w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & 0 \leq n \leq N-1, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为时间, N 为汉明窗长度。

将加窗处理的信号片段进行短时离散傅里叶变换,得到线性时频谱。频谱函数为

$$W(f) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}fn}, \quad 0 \leq n, 0 \leq f \leq \frac{N-1}{N}, \quad (3)$$

式中: f 为频率。

功率谱密度为

$$X = 10 \lg |W(f)|^2. \quad (4)$$

1.2 基于稀疏表示理论的声纹盲分离

本文以变压器正常运行背景声的功率谱密度矩阵为基准,选择K-SVD(K-singular value decomposition)算法训练基准声纹字典;然后,以基准声纹字典为变换域,利用正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit, OMP)重构混叠信号声纹谱图在此变换域上的声纹,实现混叠信号中目标前景声纹与背景声纹的分离,并对前景声纹类型作进一步判断识别。

1.2.1 稀疏表示理论

稀疏表示理论在声纹识别中是获取声纹功率谱密度矩阵 $A \in \mathbf{R}^{U \times P}$ 在某一组字典 $D \in \mathbf{R}^{U \times K}$ 上的稀疏表示系数矩阵 $\theta \in \mathbf{R}^{K \times P}$, 其表达式和数学模型分别如式(5)和图 2 所示。

$$A \approx D\theta. \quad (5)$$

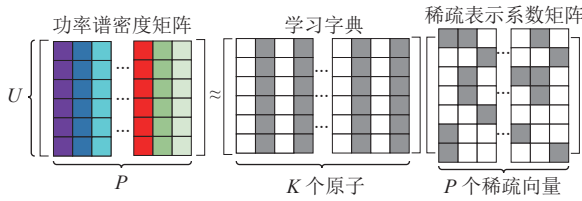


图 2 稀疏表示模型

Fig. 2 SBSS model

字典 D 包含一组基函数的矩阵, 用于表示信号。字典矩阵的列是基函数, 通常是过完备的, 即包含的基函数数量大于信号空间的维数。 θ 包含了信号在字典矩阵中的稀疏表示, θ 中的大部分元素为 0, 只有少数元素非零, 这些非零元素对应的基函数是信号的主要成分。

1.2.2 K-SVD 字典学习和 OMP 算法

本文选择的 K-SVD 字典学习算法可以灵活地与 OMP 算法结合使用, 泛化能力较强。其利用输入的原始矩阵 F 和初始化字典, 通过 K 步 SVD 分解计算的迭代, 逐步更新字典 D , 并使用 OMP 算法求解稀疏表示系数向量 θ , 得到让 θ 尽量稀疏的字典 D , 其优化迭代过程可以分为稀疏编码阶段和字典更新阶段。

1) 稀疏编码

固定字典 D , 利用 OMP 算法计算稀疏表示系数 θ 。给定 OMP 算法初始化条件: 将残差 R 定义为输入矩阵 Z , 定义空集合 S 为测量矩阵, 稀疏表示系数 θ 所有元素设为 0。

首先, 计算字典 D 中与残差 R 内积最大的原子, 并将其添加到集合 S 中; 其次, 利用式(6)得到新的稀疏系数向量 $\hat{\theta}$ 。

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|S\theta - Z\|_2. \quad (6)$$

然后, 利用式(7)更新残差 R_{new} , 直至稀疏向量 $\hat{\theta}$ 在字典 D 下的稀疏度无法降低, 再更新字典 D 。

$$R_{\text{new}} = R - S\hat{\theta}. \quad (7)$$

2) 字典更新

利用得到的稀疏表示系数向量, 更新字典 D 的

第 m 列原子 d_m ($1 \leq m \leq K$), 目标函数改写为

$$\|F - D\theta\|_2^2 = \left\| F - \sum_{j=1}^P d_j \theta^{(j)} \right\|_2^2 = \|E_m - d_m \theta^{(m)}\|_2^2, \quad (8)$$

式中: $\theta^{(j)}$ 为 F 的 K 个列向量的稀疏表示系数矩阵的第 j 行, E_m 为除去原子 d_m 时所有 K 列向量的误差。

记 ω_m 为 $\theta^{(m)}$ 的非零索引, 如式(9)所示。

$$\omega_m = \{i | 1 \leq i \leq G, \theta^{(m)}(i) \neq 0\}, \quad (9)$$

式中: G 为信号长度。

根据 ω_m 选择 E_m 的列构成矩阵 B_m , 对矩阵 B_m 进行奇异值分解得到 $B_m = U \Delta V^T$ 。用 U 的第 1 列更新 d_m ; 用 V^T 第 1 列乘以 Δ 中第 1 个元素, 以此更新 $\theta^{(m)}$ 对应索引 ω_m 相应位置的元素。

得到当前误差矩阵 E_m 后, 只需要调整 d_m 和 $\theta^{(m)}$, 使其乘积与 E_m 的误差值尽可能小。当字典的全部列向量都更新完毕时, 再利用更新后的字典继续进行稀疏编码和字典更新过程, 经过多轮迭代, 直至目标函数的数值趋于收敛, 由此得到最终的学习字典 D 。

1.2.3 分离步骤

1) 变压器运行声信号基准字典训练

选择常用的离散余弦字典 D_c 作为初始字典, 将变压器正常运行背景声的功率谱密度矩阵 X 作为原始信号矩阵, 设置误差约束常数 k , 利用 K-SVD 算法进行学习、训练、更新, 得到变压器正常运行背景声信号时频谱图的对字典 D , 并将其作为基准声纹字典进行下一步运算。矩阵 D_c 中第 a 行第 b 列的元素为

$$D_c(a, b) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\zeta}}, & a = 1, b = 1, 2, \dots, M, \\ \frac{1}{\sqrt{\varrho}} \cos \frac{(a-1)(2b-1)\pi}{2\varrho}, & a > 1, b = 1, 2, \dots, M, \end{cases} \quad (10)$$

式中: ζ 为信号在时间上的长度, 即每个基函数的点数, 对应离散余弦变换中信号的维度; ϱ 为频率分量数量, 即字典中不同频率基函数的个数, 对应频率轴的分辨率, 控制基函数的频率分布。

2) 前景声纹的分离与提取

对于混叠声信号时频谱图的功率谱密度矩阵 X , 利用 OMP 算法计算其在基准声纹字典 D 上的稀疏表示系数 θ_i , 重构信号 ($X_i = D\theta_i$) 为分离出的变压器正常运行背景声时频谱图, 信号余量 $Z - D\theta_i$ 则为分离出的目标前景声纹。

基于稀疏表示理论的盲源分离方法流程如图3所示。

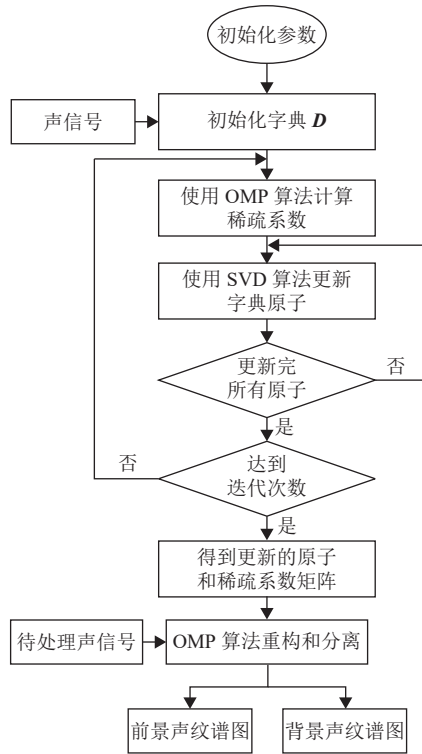


图3 变压器声纹谱图稀疏盲分离方法流程

Fig. 3 Process of sparse blind separation method for transformer voiceprint spectra

1.3 卷积神经网络

本文从混叠声信号中分离出未知类型的前景声纹,利用卷积神经网络对前景声纹进行放电或干扰的判断和识别,实现变压器运行状态监测。图4为基于SBSS和CNN的声纹识别系统示意。

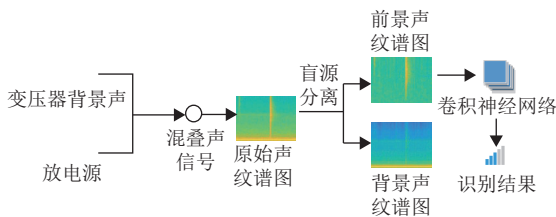


图4 基于SBSS和CNN的声纹识别系统示意

Fig. 4 Voiceprint recognition system based on SBSS and CNN

卷积神经网络含有输入层、卷积层、池化层、全连接层和输出层等一般结构。

输入层将不同类型声纹谱图的功率谱密度作为输入。在卷积层操作中,卷积核通过特定步长的移动对输入数据进行卷积计算,利用激活函数 $\sigma(\bullet)$ 计算得到该层特征数据,其过程可表示为

$$C_e = \sigma(C_{e-1} \otimes Q_e + b_e), \quad (11)$$

式中: C_e 为卷积神经网络第 e 层特征图, Q_e 为第 e 层卷积核的权重, b_e 为第 e 层的偏置项。

池化层用于对卷积操作得到的数据进行降维,提高网络计算效率,如式(12)所示。

$$C_e = p(C_{e-1}), \quad (12)$$

式中: $p(\bullet)$ 为池化操作。

全连接层对上一层输出的特征数据进行加权求和,利用激活函数 $h(\bullet)$ 继续求解,完成目标分类。加权求和计算如式(13)所示。

$$y_{w,q}(x) = h\left(\sum_{u=1}^n p_u x_u + q_u\right), \quad (13)$$

式中: $y_{w,q}(x)$ 为全连接层神经元的输出值, p_u 为第 u 个输入特征的权重, x_u 为第 u 个输入特征的值, q_u 为第 u 个神经元的偏置量。

卷积神经网络作为深度学习领域的经典算法,能够利用自身网络结构及参数自适应地逐步逐层提取图像特征,在一定程度上避免了传统识别方法需要人工构造特征的主观性和局限性。

2 声信号采集与混叠实验

为获得变压器正常运行声信号作为背景声,本文在武胜 750 kV 变电站对变压器正常运行声信号进行采集。根据 GB/T 3785.1—2023^[25],声音测量频率范围应覆盖 25 Hz~16 kHz。本文选用 COMICA-VM20 超心型电容式驻极指向麦克风,其灵敏度范围为 -43~-23 dB,频响范围为 20 Hz~20 kHz,并基于 GoldWave 数据采集软件对变压器声信号进行采集,采样频率 44.1 kHz。根据 GB/T 1094.10—2022^[26],采集时麦克风指向方向垂直于变压器油箱壁,位置距离油箱壁 50 cm,为尽可能减少风机噪声影响,仅采集变压器正面运行声音,测点以九宫格状均匀分布。

为获得变压器典型油纸绝缘缺陷放电声信号作为前景声,本文构造了针板人工缺陷模型^[27-28],用以模拟金属尖端等绝缘缺陷的形态结构和产生的不均匀电场,以实验室背景噪声为环境底噪,采集其在 25 号克拉玛依变压器油中的放电声信号,如图5所示。图中: Φ 为直径, r 为半径。

实验平台接线如图6所示,包括工频变压器(容量 6 kVA,额定电压 60 kV,分压器分压比为 1000:1)、控制箱、保护电阻(阻值为 10 k Ω)、电容分压器、低

压臂电容、油箱和针板放电模型,麦克风参数设置与 750 kV 变电站现场采集时相同。

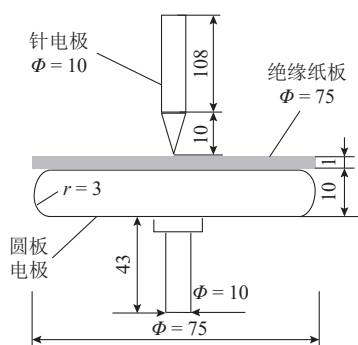


图 5 放电模型设计

Fig. 5 Design drawings of discharge models

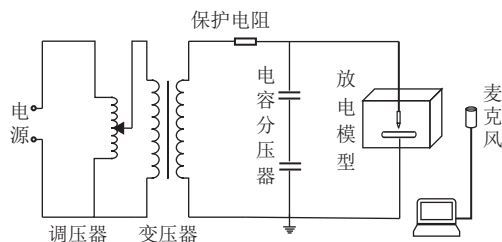


图 6 模拟放电实验接线图

Fig. 6 Wiring diagram for simulated discharge experiment

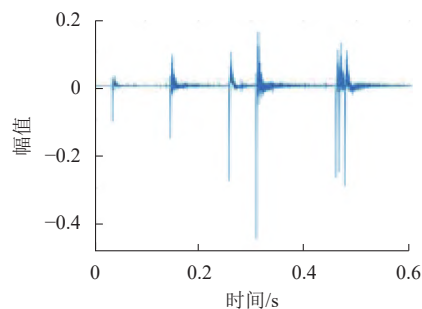
油中放电随机性强,且随电压升高逐渐剧烈.本文随机截取不同电压等级下放电声信号中的不同放

电脉冲区域,单次截取时长控制在 2 s 以内.此时,每个截取样本的信噪比、样本时长、所含脉冲个数、脉冲形态和放电程度各不相同,有效模拟了放电的随机性和复杂性,表征涵盖了不同的劣化程度,得到的放电样本库特征信息丰富,从而避免了样本中放电特征的重复。

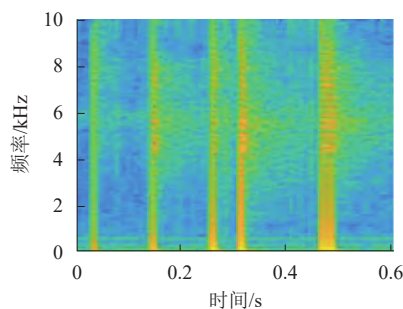
现场声信号一般认为是由多种源信号合成叠加所得^[29],本文设计信号混叠实验,以 750 kV 变电站变压器正常运行声信号作为背景声,将上述截取样本以随机位置添加到时长为 2 s 的变压器运行背景声中,构造可模拟现场环境的混叠声信号,图 7 为随机混叠示意.此时,同一截取样本可能混叠在不同背景声信号中的不同位置,再次模拟了放电的随机性和复杂性。

将变电站现场可能存在的讲话声、鸟鸣声等环境声信号添加到变压器正常运行背景声中,构造混叠声信号,如表 1 所示。

放电声和环境声都会在正常运行声纹谱图中产生异常声纹区域,当检测到异常区域时,则对声纹谱图中的异常前景声纹进行分离和识别,若识别为环境声则表示运行正常,若识别为放电声则表示运行异常,作出放电故障预警。

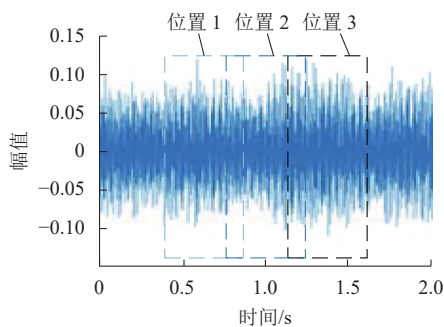


① 时域信号

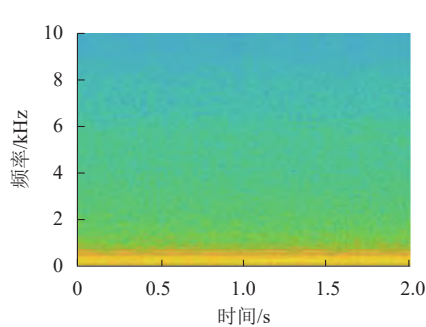


② 时频谱图

(a) 放电脉冲

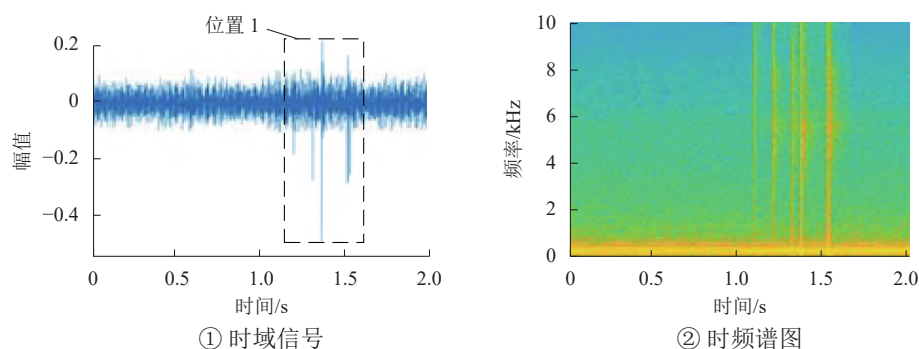


① 时域信号



② 时频谱图

(b) 变压器正常运行声纹



(c) 混叠声信号

图7 随机混叠示意

Fig. 7 Random aliasing

表1 声纹样本

Tab. 1 Voiceprint samples

前景声	背景声	混叠信号	样本数/个	时长/s
放电声	武胜变	放电声 + 武胜变	135	2
说话声	武胜变	说话声 + 武胜变	135	2
鸟鸣声	武胜变	鸟鸣声 + 武胜变	135	2

3 结果分析

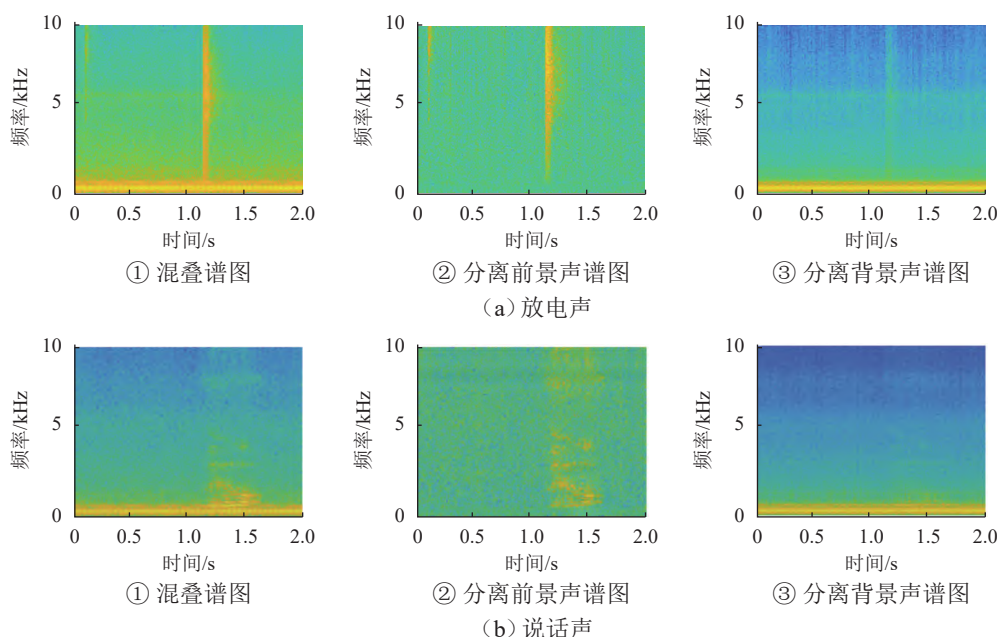
3.1 声纹时频谱图和稀疏盲分离

绘制声纹时频谱图时,为兼顾分帧片段的特征代表性和信息准确性,本文选择的分帧帧长为0.02 s,即1个工频周期,帧移为0.01 s.

变压器正常运行声信号的时域波形平稳,代表声音频率能量分布的特征频带主要集中在1 kHz以下,1 kHz以上的高频部分未出现特征频带,整体频

率分布随时间变化表现平稳;而放电声的时域波形存在明显时变脉冲,声纹谱图中特征频带主要集中在1 kHz以上的高频区域,呈条形贯通状分布,具有时间随机性、位置随机性和强度随机性.

采用第1.2节的稀疏盲分离算法实现混叠声信号中非平稳信号和连续平稳信号之间的分离,混叠及分离声纹谱如图8所示.鸟鸣声主要集中在4~8 kHz的高频区域,谱图形貌并不规则;说话声频带分布因人而异,与变压器运行声存在一定频带范围的交集.综上所述,正常声信号谱图在1 kHz以上的高频区域,不存在特征声纹,且谱图频率分布均匀稳定;而各类异常声信号具有较强的时变性和非平稳性,特征频带多集中于1 kHz以上的高频区域,谱图形貌特征各异.



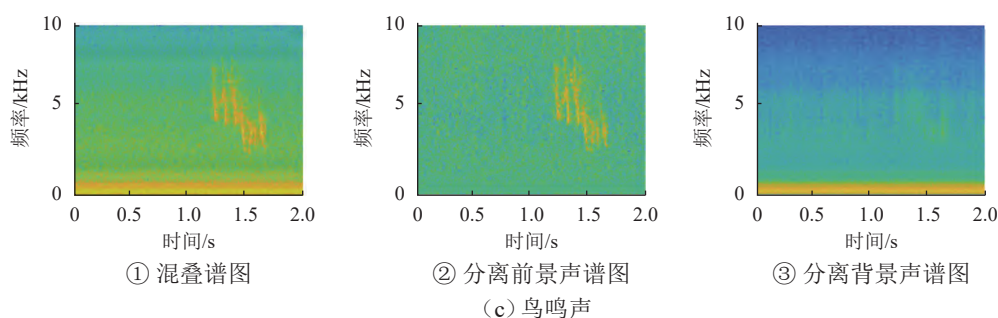


图 8 混叠及分离声纹谱图

Fig. 8 Aliasing and separated voiceprint spectra

由图 8 可见, 各类型的非平稳前景声纹均从混叠声纹谱图中被最大限度地分离出来, 其中, 分离前景声谱图是去掉各部分背景噪声所得到的声纹谱图, 分离出的前景声纹与背景过渡平滑, 为后期建立样本库对其进行类型识别提供了基础条件。

为初步评价分离效果, 本文以 750 kV 变电站变压器正常运行声信号功率谱密度作为参考, 将分离出的背景声纹与参考谱图进行相似度对比, 计算如式(14)所示, 结果如表 2。由表 2 可知, 分离出的背景声纹谱图与参考谱图的相似度均大于 0.80^[30]。

$$J = \frac{\sum_{s=1}^R \sum_{d=1}^P (O_{sd} - \bar{O}_{sd})(Y_{sd} - \bar{Y}_{sd})}{\sqrt{\sum_{s=1}^R \sum_{d=1}^P (O_{sd} - \bar{O}_{sd})^2 \sum_{s=1}^R \sum_{d=1}^P (Y_{sd} - \bar{Y}_{sd})^2}}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{O} = (O_{sd}) \in \mathbf{R}^{R \times P}$, 为参考谱图的功率密度矩阵; $\mathbf{Y} = (Y_{sd}) \in \mathbf{R}^{R \times P}$, 为分离出的背景声纹的功率密度; $\bar{O}_{sd}$ 与 $\bar{Y}_{sd}$ 分别为矩阵 $\mathbf{O}$ 和 $\mathbf{Y}$ 所有元素的均值; J 为皮尔逊相关系数, 表示分离背景与参考图谱的声纹相似度。

表 2 分离背景与参考谱图声纹相似度对比
Tab. 2 Voiceprint similarity comparison of separated background and reference spectra

谱图类型	放电声	说话声	鸟鸣声
J	0.87	0.89	0.87

3.2 CNN 网络参数与识别结果

在进行网络学习之前, 需要将分离出的前景声纹谱图划分为训练集和验证集。本文将同一类别标签下的 135 组样本随机选取 100 个作为训练集, 剩余 35 个作为验证集, 将带标签样本随机排序后输入到 CNN 进行训练和识别。

由于 CNN 在每次训练时权重参数都是随机初始化的, 训练结果不可避免地呈现出一定的数值波动。此外, 样本的质量、计算机硬件的性能等因素也

可能对训练结果产生影响。为应对这些不确定性, 本文在每种参数配置下均进行多次训练, 并综合考虑网络稳定性和识别结果的准确性, 最终确定网络的最佳参数设置。

3.2.1 网络结构

CNN 网络结构参数, 如卷积核尺寸和步长、池化核的尺寸和步长、卷积层与池化层数量等, 均对网络训练迭代过程及识别效果有着显著影响。经过参数调整与优化尝试, 得到如表 3 所示的网络结构参数。

CNN 网络结构中的卷积核尺寸和移动步长、池化核尺寸和移动步长、卷积层和池化层数量等网络结构参数会影响网络训练的迭代过程和识别效果, 本文通过多次参数调整和寻优得到的网络结构参数如表 3 所示。为缓解梯度消失或梯度爆炸, 在卷积层使用常见的 ReLU 激活函数, 且在每批数据前向传递时, 对每一层进行规范化操作, 使得数据满足均值为 0, 方差为 1 的正态分布; Max Pooling 作为常用的一种池化方式, 能够保留更多纹理特征信息, 减少网络计算量, 防止过拟合; 全连接层的 Softmax 函数将多分类问题以概率的形式展现出来, 是 Sigmoid 函数在多分类问题上的推广。

表 3 CNN 网络结构参数
Tab. 3 Parameters of CNN structure

结构层	通道数/个	核尺寸	激活函数/池化类型
输入层	1		
卷积层	16	5 × 5	ReLU
池化层	16	3 × 3	Max Pooling
卷积层	32	5 × 5	ReLU
池化层	32	3 × 3	Max Pooling
卷积层	64	5 × 5	ReLU
池化层	64	3 × 3	Max Pooling
卷积层	128	5 × 5	ReLU
全连接层	1024		Softmax
输出层	3		

3.2.2 训练参数

批尺寸、学习率、优化器等参数影响网络的训练速度和最终准确率。

批尺寸是进行1次参数学习所使用的样本数量,本文保持总迭代次数为600次不变,选取以5为间隔步长的不同批尺寸以对比识别结果,部分参考结果如图9所示。

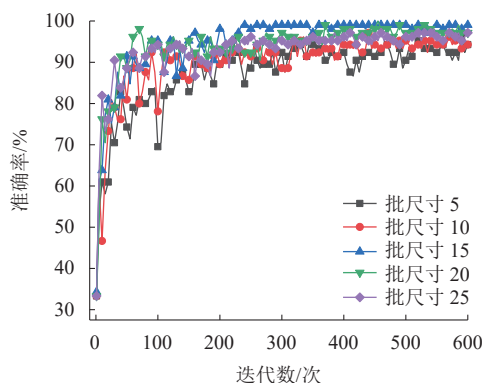


图9 不同批尺寸识别准确率对比

Fig. 9 Comparison of recognition accuracies of different batch sizes

在批尺寸为5、10时,每次训练结果的数值波动较大,选择准确率众数值作为参考;在批尺寸为15、20、25时,每次训练所得准确率的数值波动较小,网络迭代过程较稳定,准确率值随批尺寸的增大而减小;综合考虑时间和准确率,本文选择15为批尺寸参数。

过高的学习率前期学习速度较快,但在迭代后期学习效率逐渐变差,易造成网络不收敛;学习率过小会减慢训练速度,同时影响结果准确性。如图10所示,学习率为 3×10^{-1} 时,验证集准确率曲线失真严重,出现不同程度凹陷;学习率为 3×10^{-3} 、 3×10^{-4} 、 3×10^{-5} 时,验证集准确率曲线的最终准确率逐渐减小。由于各学习率总迭代时间相差不大,综合考虑后,本文选用 3×10^{-2} 为学习率参数。

本文选择了Sgdm、Rmsprop、Adam优化器进行对比实验。Sgdm在梯度下降中引入动量机制,减小了参数陷入局部最小值的可能性,但缺少对学习率的自适应更新;Rmsprop在考虑迭代衰减的情况下由大到小自适应地对学习率进行调整;Adam是Sgdm和Rmsprop的结合,其既引入了动量机制,又可自适应调整学习率,训练过程中学习率整体保持在较为平稳的范围,是目前应用最为广泛的深度学习优化器之一。

如图11所示,Adam优化器网络迭代过程较为

稳定,最终识别准确率较高;另外2类优化器的网络迭代过程均出现了不同程度的下降和凹陷,最终识别准确率数值波动较大,故本文选用Adam优化器进行网络识别。

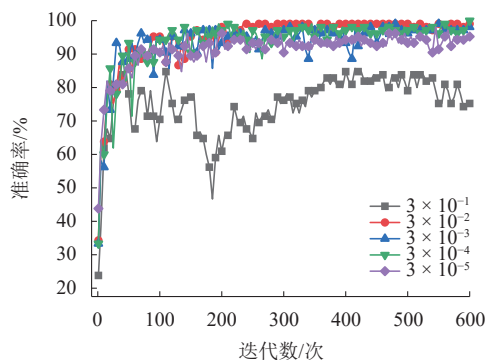


图10 不同学习率识别准确率对比

Fig. 10 Comparison of recognition accuracies of different learning rates

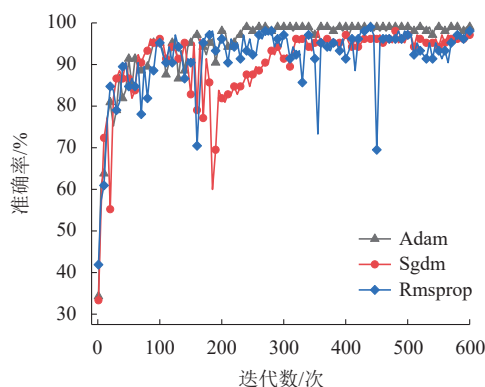


图11 不同优化器识别准确率对比

Fig. 11 Comparison of recognition accuracies of different optimizers

3.2.3 对比分析

为评估系统特征提取与分类方法的性能,将传统方法与深度学习算法进行对比分析。采用传统的灰度梯度共生矩阵法提取声纹谱图的梯度优势、均方差、灰度熵等15种灰度纹理特征^[21],将特征参数分别输入到支持向量机(SVM)和反向传播(BP)神经网络,将识别结果与CNN进行对比分析。SVM采用RBF核函数, c 、 g 参数寻优采用交叉验证法(c 为正则化参数,表示模型对错误分类点的惩罚力度; g 为核函数的高斯核带宽参数,表示数据映射到高维空间后的分布),BP神经网络学习率为0.0001,权重和阈值寻优采用负梯度下降法。

为进一步评价稀疏盲分离算法的效果,验证分离的必要性,采用不同方法对混叠声纹(分离前)和前景声纹(分离后)进行识别,并对比其准确率。如

表4所示,无论分离前或分离后,传统的分类识别方法由于人工特征提取的主观性和局限性,无法全面反映谱图特征,识别准确率较低;而CNN通过构建网络自动逐层提取图像特征,减少了前期人工特征构造的局限性,具有较高的识别准确率。

表4 不同方法的声纹识别准确率对比
Tab. 4 Comparison of voiceprint recognition effects of different methods

谱图类型	CNN	SVM	BP
混叠声纹谱	91.43	65.71	43.81
前景声纹谱	99.05	82.86	58.10

4 结 论

1) 本文通过混叠 750 kV 变压器正常运行期间声信号与针-板放电声信号,模拟变压器故障信号,可扩充故障声信号样本库。

2) 变压器正常运行期间的声纹谱图特征频带主要集中于 1 kHz 以下,频率分布随时间平稳变化,而放电等各类异常声信号谱图特征频带多集中于 1 kHz 以上的高频区域。

3) 采用稀疏盲分离算法对不同的混叠声纹谱图进行处理,分离出的前景声纹保留了目标声纹特征,剔除了冗余背景信息,使神经网络能够更加专注于具有代表性的前景声纹特征;与未经分离的声纹谱图相比,采用 CNN、SVM 和 BP 3 种算法,分离后的前景声纹的识别准确率分别提高了 7.6%、17.2% 和 14.3%。

4) 相对传统特征提取和分类方法,本文利用 CNN 自动逐层提取各类前景声的谱图特征,在一定程度上避免了人工特征构造的主观性与局限性。在以分离后的前景声纹谱图为识别对象的对比实验中,优化后的 CNN 与 SVM 和 BP 算法识别率相比,分别提高 16.19% 和 40.95%。

致谢: 甘肃省电力公司电力科学研究院科技项目(52272219000Q)的支持。

参考文献:

[1] 吴广宁,周芃,高波,等. 不同水分含量油浸纸板沿面放电发展过程及特性[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 552-560.
WU Guangning, ZHOU Peng, GAO Bo, et al. Discharge development and characteristics of oil-immersed pressboard surface with different moisture

contents[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 552-560.

- [2] 贾亚飞,朱永利,王刘旺,等. 基于 VMD 和多尺度熵的变压器内绝缘局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 208-217.
JIA Yafei, ZHU Yongli, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on VMD and multiscale entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 208-217.
- [3] 律方成,牛雷雷,王胜辉,等. 基于紫外成像和改进 YOLOv3 的瓷悬式绝缘子放电严重程度评估[J]. 高压技术, 2021, 47(2): 377-386.
LÜ Fangcheng, NIU Leilei, WANG Shenghui, et al. Discharge severity assessment of porcelain suspension insulators based on UV images and improved YOLOv3[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 377-386.
- [4] 郭蕾,曹伟东,白龙雷,等. 乙丙橡胶电缆终端气隙局部放电过程及特征提取[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(5): 1011-1019, 1028.
GUO Lei, CAO Weidong, BAI Longlei, et al. Partial discharge process and feature extraction of air gap in EPR cable terminal[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 1011-1019, 1028.
- [5] 高佳程,朱永利,贾亚飞,等. 基于改进 SVDD 算法与马氏距离的未知局部放电类型的识别[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3510-3517.
GAO Jiacheng, ZHU Yongli, JIA Yafei, et al. Pattern recognition of unknown types of partial discharge based on improved SVDD algorithm and mahalanobis distance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3510-3517.
- [6] 从建力,王源,徐舟,等. 振噪融合的地铁钢轨波磨快速测量方法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(3): 677-684.
CONG Jianli, WANG Yuan, XU Zhou, et al. Rail corrugation measurement method based on vibration-noise fusion in metro system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(3): 677-684.
- [7] 卜秀孟,王力东,黎清蓉,等. 高速磁浮车-桥耦合振动控制参数影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(4): 848-857, 866.
BU Xiumeng, WANG Lidong, LI Qingrong, et al. Influence analysis of vibration control parameters for high-speed maglev train-bridge coupling[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(4): 848-857, 866.
- [8] 刘伟,赵春发,娄会彬,等. 基于虚拟激励法的磁浮车桥耦合系统随机振动分析[J]. 西南交通大学学报,

- 2024, 59(4): 823-831.
- LIU Wei, ZHAO Chunfa, LOU Huibin, et al. Stochastic vibration analysis of maglev train-bridge coupling system based on pseudo excitation method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(4): 823-831.
- [9] 张重远, 罗世豪, 岳浩天, 等. 基于Mel时频谱-卷积神经网络的变压器铁芯声纹模式识别方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 413-423.
- ZHANG Zhongyuan, LUO Shihao, YUE Haotian, et al. Pattern recognition of acoustic signals of transformer core based on Mel-spectrum and CNN[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 413-423.
- [10] 张瑞琪. 基于声学信号的变压器放电故障诊断方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [11] 游颖敏, 王景芹, 舒亮, 等. 基于音频特征的交流接触器电寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1986-1998.
- YOU Yingmin, WANG Jingqi, SHU Liang, et al. The method of electrical life prediction considering the audio characteristics of AC contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1986-1998.
- [12] 金潇. 基于声信号的配电变压器故障诊断方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [13] 武立平, 吴强, 丰遥, 等. 基于振动信号SVM分类的变压器状态识别[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 232-238.
- WU Liping, WU Qiang, FENG Yao, et al. State recognition of transformer based on SVM classification of vibration signals[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 232-238.
- [14] 符凯. 基于HHT的非平稳信号特征提取方法及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [15] 孙玉伟, 罗林根, 陈敬德, 等. 含噪背景下基于盲源分离与NSVDD的断路器机械故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1104-1113.
- SUN Yuwei, LUO Lingen, CHEN Jingde, et al. Mechanical fault diagnosis method of circuit breaker based on blind source separation and NSVDD under noisy background[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1104-1113.
- [16] 周东旭, 王丰华, 党晓婧, 等. 基于稀疏表示理论的特高压交流变压器声信号盲分离研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3139-3148.
- ZHOU Dongxu, WANG Fenghua, DANG Xiaojing, et al. Blind separation of UHV power transformer acoustic signal preprocessing based on sparse representation theory[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3139-3148.
- [17] 孙玉伟, 罗林根, 陈敬德, 等. 基于声音特征与改进稀疏表示分类的断路器机械故障诊断方法[J]. 电网技术, 2022, 44(3): 1214-1222.
- SUN Yuwei, LUO Lingen, CHEN Jingde, et al. Mechanical fault diagnosis method of circuit breaker based on sound characteristics and improved sparse representation classification[J]. Power System Technology, 2022, 44(3): 1214-1222.
- [18] 周东旭, 王丰华, 党晓婧, 等. 基于压缩观测与判别字典学习的干式变压器声纹识别[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6380-6390.
- ZHOU Dongxu, WANG Fenghua, DANG Xiaojing, et al. Dry type transformer voiceprint recognition based on compressed observation and discrimination dictionary learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6380-6390.
- [19] 刘云鹏, 王博闻, 岳浩天, 等. 基于50 Hz倍频倒谱系数与门控循环单元的变压器偏磁声纹识别[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4681-4694, 4746.
- LIU Yunpeng, WANG Bowen, YUE Haotian, et al. Identification of transformer bias voiceprint based on 50 Hz frequency multiplication cepstrum coefficients and gated recurrent unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4681-4694, 4746.
- [20] CAO J W, CAO M, WANG J Z, et al. Urban noise recognition with convolutional neural network[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(20): 29021-29041.
- [21] ALAMIR M A. A novel acoustic scene classification model using the late fusion of convolutional neural networks and different ensemble classifiers[J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107829.1-107829.8.
- [22] 陈晓雷, 孙永峰, 李策, 等. 基于卷积神经网络和双向长短期记忆的稳定抗噪声滚动轴承故障诊断[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(2): 296-309.
- CHEN Xiaolei, SUN Yongfeng, LI Ce, et al. Stable anti-noise fault diagnosis of rolling bearing based on CNN-BiLSTM[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(2): 296-309.
- [23] 朱煜峰, 许永鹏, 陈孝信, 等. 基于卷积神经网络的直流XLPE电缆局部放电模式识别技术[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 659-668.
- ZHU Yufeng, XU Yongpeng, CHEN Xiaoxin, et al. Pattern recognition of partial discharges in DC XLPE cables based on convolutional neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 659-668.
- [24] 万晓琪, 宋辉, 罗林根, 等. 卷积神经网络在局部放电图像模式识别中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(6):

- 2219-2226.
WAN Xiaoqi, SONG Hui, LUO Ling, et al. Application of convolutional neural networks in pattern recognition of partial discharge image[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2219-2226.
- [25] 全国电声学标准化技术委员会. 电声学 声级计 第1部分: 规范: GB/T 3785.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [26] 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—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [27] 范文杰, 张志斌, 夏昌杰, 等. 多手段测量下的油纸绝缘针板电极局部放电的演化规律分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 914-927.
FAN Wenjie, ZHANG Zhibin, XIA Changjie, et al. Evolution law of partial discharge of oil-paper insulated needle-plate electrode based on multi-method measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 914-927.
- [28] 程养春, 张振亮. 基于随机森林的变压器多源局部放电诊断[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5246-5256, 5322.
CHENG Yangchun, ZHANG Zhenliang. Multi-source partial discharge diagnosis of transformer based on random forest[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5246-5256, 5322.
- [29] 潘宁. 复杂电磁环境下时频混叠信号的识别与分离[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [30] 纪德洋, 金锋, 冬雷, 等. 基于皮尔逊相关系数的光伏电站数据修复[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1514-1523.
JI Deyang, JIN Feng, DONG Lei, et al. Data repairing of photovoltaic power plant based on Pearson correlation coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1514-1523.

(中文编辑: 李永辉)

(上接第760页)

- [7] 朱思峰, 陈国强, 张新刚, 等. 多目标优化量子免疫算法求解基站选址问题[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 49-53.
ZHU Sifeng, CHEN Guoqiang, ZHANG Xingang, et al. Multi-objective optimization quantum immune algorithm for solving base stations location planning problem[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 49-53.
- [8] 蔡佳祺, 万海斌, 孙友明, 等. 基于人工蜂群算法的基站天线方位角与下倾角自优化方法[J]. 电信科学, 2021, 37(1): 69-75.
CAI Jiaqi, WAN Haibin, SUN Youming, et al. Artificial bee colony algorithm based self-optimization of base station antenna azimuth and down-tilt angles[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(1): 69-75.
- [9] ZHU F S, CAI W W, WANG Z G, et al. AI-empowered propagation prediction and optimization for reconfigurable wireless networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 9901960.1-9901960.10.
- [10] 胡津铭. 基于能效的无线通信网络资源分配算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [11] 田春明, 杨安, 叶乐, 等. 基于贝叶斯算法的天线端到端优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12): 3413-3419.
TIAN Chunming, YANG An, YE Le, et al. End-to-end antenna optimization based on Bayesian optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(12): 3413-3419.
- [12] RAJ N. Indoor RSSI prediction using machine learning for wireless networks[C]//2021 International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Bangalore: IEEE, 2021: 9352852.1-9352852.3.
- [13] 唐苏文, 陈明. 基于改进粒子群算法的分布式天线系统跨层功率分配方案[J]. 高技术通讯, 2010, 20(2): 138-142.
- [14] 侯雄文. 浅析 DBSCAN 算法中参数设置问题的研究[J]. 科教导刊-电子版(下旬), 2017(10): 266-277.
- [15] 北京乾径科技有限公司. CloudRT 高性能云计算射线跟踪仿真平台[EB/OL]. [2021-09-23]. <http://cn.raytracer.cloud>.
- [16] HE D P, AI B, GUAN K, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 10-27.
- [17] 中国移动通信. 4G 网络高速铁路覆盖技术需求[EB/OL]. (2016-06-03)[2022-02-13]. <https://max.book118.com/html/2016/0603/44748063.shtml>.

(中文编辑: 蒋栋辉)

证书号第6462614号



发明专利证书

发明名称：一种基于磁力声的变压器健康状态评估方法及系统

发明人：包艳艳;陈伟;裴喜平;李恒杰;王琨;韩松涛

专利号：ZL 2022 1 1611797.X

专利申请日：2022年12月14日

专利权人：兰州理工大学

地址：730050 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号

授权公告日：2023年11月03日

授权公告号：CN 115879345 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



证书号 第6462614号

专利权人应当依照专利法及其实实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年12月14日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

兰州理工大学

发明人：

包艳艳;陈伟;裴喜平;李恒杰;王琨;韩松涛

绝缘材料

2
2026

中国·桂林 Guilin, China

高压绝缘专题

广告

X-FIPER New Material Co., Ltd. 
**aramid
paper** 

筑梦十九载 再谱新诗篇
芳纶绝缘纸

超美斯新材料股份有限公司

Since 2007

**X-超美斯®
FIPER**



地址：江苏省苏州市吴江区友谊新路79号

邮编：215200

电话：(0512) 88810666 传真：(0512) 86871060

网址：www.xfiper.com



ISSN 1009-9239



02>

中文核心期刊 中国科技核心期刊

美国《化学文摘》 英国《科学文摘》 美国《乌利希期刊指南》 EBSCO收录期刊

中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会会刊 中国电器工业协会绝缘材料分会会刊





- 国家级高新技术企业
- 国家“小巨人”企业
- 浙江省“隐形冠军”企业
- 浙江省绿色企业
- 质量奖获奖单位

新能源汽车用绝缘材料 行业先行者

环保型高性能浸渍漆 低黏型高导热灌封胶

Environmentally Friendly And High-performance Varnish
Low Viscosity High Thermal Conductivity Potting Resin

国内绝缘漆
生产制造领军企业



浙江荣泰科技企业有限公司

www.jxrt.com kefu@jxrt.com 400-8181-500 0573-83188888

<<< 扫码查看官网

绝缘材料

JUEYUAN CAILIAO

1966年创刊·月刊·国内外公开发行

刊号: ISSN 1009-9239
CN 45-1287/TM

2026年第59卷第2期

2026年2月20日出版

本期责任编辑 龚桂胜

《绝缘材料》第九届编辑委员会

主任委员: 孔 伟

副主任委员: (按姓氏笔画排列)

顾 问: 杜伯学 党智敏 翁 凌 黄兴溢
陆燕荪 顾国彪(院士) 雷清泉(院士)
曹亚琴 刘 亮

委 员: (按姓氏笔画排列)

王 旭 王会娟 王健一 方 志 尹 毅 田国峰 朱晓辉
刘文凤 刘金刚 刘冠芳 刘晓旭 刘晓播 汲胜昌 孙秋芹
李 琦 李建英 李盛涛 李清泉 李强军 吴 斌 吴广宁
何俊佳 张 艺 陈妍慧 邵 涛 周 渠 周远翔 郑 刚
郝春成 郝留成 查俊伟 施利毅 袁莽龙 夏 宇 高 宇
高景晖 唐 超 章 程 梁智明 曾 智 虞锦洪 虞鑫海

青 年 委 员: (按姓氏笔画排列)

王 健 王 爽 王 鹏 王少华 王威望 方 苏 孔晓晓
左沛元 申子魁 任小龙 任俊文 刘捷丰 阮浩鸥 李 卓
李术林 李传扬 李国倡 杨 涛 杨 斌 肖 淞 吴子剑
何东欣 宋 欢 张 灵 张 鹏 张 静 张天栋 张云霄
张佳庆 张施令 张晓晶 张笑瑞 张博雅 陈文求 林 荧
周 友 郑含博 赵月涛 赵永生 秦少瑞 郭裕钧 黄正勇
黄芝强 彭 磊 曾 亮 曾福平 谢 军 谢志辉 雷志鹏
翟 磊 滕陈源 潘 成 戴仨民

主 管: 中国机械工业集团有限公司
主 办: 桂林电器科学研究院有限公司
编辑出版: 《绝缘材料》编辑部
主 编: 祝晚华
执行主编: 熊雪梅
编 辑 部: 秦文军 龚桂胜 苏丹妮 陈碧芳
电 话: 0773-5888291、5888014、5888420
广 告 部: 吴建文
电 话: 0773-5888014
网 络 部: 蒋明周 李红霞
电 话: 0773-5861906
发 行 部: 欧 艳
电 话: 0773-5888375
地 址: 广西桂林市东城路8号
邮政编码: 541004
电子信箱: jy9988@188.com
网 址: www.insulation.org.cn
印 刷: 广西广大印务有限责任公司
国内发行: 桂林市邮政局
订 阅: 全国各地邮政局
邮发代号: 48-20
国内定价: 240元/年
国外发行: 中国出版对外贸易总公司
(北京782信箱 邮编100011)
发行代号: DK45009
国外定价: 720元/年

目次

高压绝缘专题

交联聚乙烯绝缘电缆低频老化特性研究

..... 刘宗喜, 欧阳本红, 黄凯文, 毕建刚, 王昱力(1)

浓度梯度驱动的电绝缘副产物扩散模型及应用

..... 陈静, 徐静, 刘学, 唐松柏, 吴永昊, 李飞, 高景晖, 钟力生(10)

基于实验与分子模拟的XLPE电/热分解分阶段产气特性研究

..... 王白根, 齐蓓, 郑国栋, 高艳, 周喜超, 徐子尚, 彭勇(20)

交联改性提升变压器油纸绝缘体系的绝缘特性研究

..... 侯微, 杨占刚, 谢梁, 胡章魁, 周经纬, 向阳峻桐, 颜巍(30)

热老化对多层油浸Nomex绝缘纸性能的影响

..... 包艳艳, 魏龙江, 温定筠, 王晓飞, 陈振勇, 吴玉硕, 陈博栋, 康永强(39)

新型聚丙烯绝缘材料及其与硅橡胶组合用于电缆接头的性能研究

..... 展云鹏, 侯帅, 柳杰, 李艳飞, 樊灵孟, 蒋莉梅(49)

电缆中间接头硅橡胶热老化的非线性超声评价方法

..... 徐祥梦, 方春华, 普子恒, 吴田, 江进波, 岳浩(58)

脱气处理对直流电缆电树放电演变临界击穿条件的影响

..... 杨天宇, 顾黄晶, 李海, 陈韦蒙, 何阳, 李柏雨, 赵谔(68)

电缆附件绝缘界面放电故障气体诊断方法

..... 刘凤莲, 薛志航, 张宗喜, 苟杨, 冯阳, 孙韬(77)

垂直洋流下考虑沉积物渗透性的高压直流海缆载流量研究

..... 高剑伟, 李欢, 惠卓斌, 朱梦瑶, 魏磊, 武康宁(87)

双组份聚脲材料在提升输电线路导线间隙绝缘强度中的研究和应用

..... 彭红刚, 苏小盟, 刘珊, 王牧浪, 刘云勋, 李龙生, 王子民(99)

电致发光涂层在GIS盆式绝缘子缺陷自诊断的应用

..... 刘贺晨, 田文浩, 田怀青, 江翼, 吴雄(108)

混合瓷绝缘子界面的水煮老化特性分析

..... 周日文, 冒珏岑, 王学宗, 张虎, 黄星宇, 梁进祥, 武文华, 王羽(117)

基于分布电导的绝缘子直流电场和发热机理研究

..... 李唐兵, 邹礼斌, 况燕军, 胡睿哲(124)

换流变压器网侧1100 kV环氧树脂浸纸电容式套管绝缘结构设计及校核

..... 郭贤珊, 陈力, 陕华平, 廖文锋, 王坤涵, 王鑫, 张韵莹(135)

10 kV轻量化带电作业操作杆设计及研制

..... 王月鹏, 孟一飞, 杜炳超, 张佳星, 赵盼盼, 李传扬(142)

基于鸚鵡算法优化随机森林模型和健康指数的变压器剩余寿命预测

..... 温爱辉, 文豹, 宋坤宇, 廖卫平, 徐进, 高凌志, 熊韵奇(148)

目次

高压绝缘专题

交联聚乙烯绝缘电缆低频老化特性研究

..... 刘宗喜, 欧阳本红, 黄凯文, 毕建刚, 王昱力(1)

浓度梯度驱动的电绝缘副产物扩散模型及应用

..... 陈静, 徐静, 刘学, 唐松柏, 吴永昊, 李飞, 高景晖, 钟力生(10)

基于实验与分子模拟的XLPE电/热分解分阶段产气特性研究

..... 王白根, 齐蓓, 郑国栋, 高艳, 周喜超, 徐子尚, 彭勇(20)

交联改性提升变压器油纸绝缘体系的绝缘特性研究

..... 侯微, 杨占刚, 谢梁, 胡章魁, 周经纬, 向阳峻桐, 颜巍(30)

热老化对多层油浸Nomex绝缘纸性能的影响

..... 包艳艳, 魏龙江, 温定筠, 王晓飞, 陈振勇, 吴玉硕, 陈博栋, 康永强(39)

新型聚丙烯绝缘材料及其与硅橡胶组合用于电缆接头的性能研究

..... 展云鹏, 侯帅, 柳杰, 李艳飞, 樊灵孟, 蒋莉梅(49)

电缆中间接头硅橡胶热老化的非线性超声评价方法

..... 徐祥梦, 方春华, 普子恒, 吴田, 江进波, 岳浩(58)

脱气处理对直流电缆电树放电演变临界击穿条件的影响

..... 杨天宇, 顾黄晶, 李海, 陈韦蒙, 何阳, 李柏雨, 赵谔(68)

电缆附件绝缘界面放电故障气体诊断方法

..... 刘凤莲, 薛志航, 张宗喜, 苟杨, 冯阳, 孙韬(77)

垂直洋流下考虑沉积物渗透性的高压直流海缆载流量研究

..... 高剑伟, 李欢, 惠卓斌, 朱梦瑶, 魏磊, 武康宁(87)

双组份聚脲材料在提升输电线路导线间隙绝缘强度中的研究和应用

..... 彭红刚, 苏小盟, 刘珊, 王牧浪, 刘云勋, 李龙生, 王子民(99)

电致发光涂层在GIS盆式绝缘子缺陷自诊断的应用

..... 刘贺晨, 田文浩, 田怀青, 江翼, 吴雄(108)

混合瓷绝缘子界面的水煮老化特性分析

..... 周日文, 冒珏岑, 王学宗, 张虎, 黄星宇, 梁进祥, 武文华, 王羽(117)

基于分布电导的绝缘子直流电场和发热机理研究

..... 李唐兵, 邹礼斌, 况燕军, 胡睿哲(124)

换流变压器网侧1100 kV环氧树脂浸纸电容式套管绝缘结构设计及校核

..... 郭贤珊, 陈力, 陕华平, 廖文锋, 王坤涵, 王鑫, 张韵莹(135)

10 kV轻量化带电作业操作杆设计及研制

..... 王月鹏, 孟一飞, 杜炳超, 张佳星, 赵盼盼, 李传扬(142)

基于鸚鵡算法优化随机森林模型和健康指数的变压器剩余寿命预测

..... 温爱辉, 文豹, 宋坤宇, 廖卫平, 徐进, 高凌志, 熊韵奇(148)

热老化对多层油浸 Nomex 绝缘纸性能的影响

包艳艳^{1,2}, 魏龙江³, 温定筠⁴, 王晓飞², 陈振勇⁴, 吴玉硕²,
陈博栋², 康永强^{3*}

- (1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070;
3. 兰州交通大学 新能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730070;
4. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为研究变压器用多层 Nomex 绝缘纸在热老化过程中的性能劣化特性,本文首先对多层油浸 Nomex 绝缘纸进行加速热老化试验,然后搭建频域介电谱测试平台和表面电位测试平台,获得不同老化时间下油浸 Nomex 绝缘纸的介质损耗因数和表面电位衰减曲线,并计算和分析不同老化程度油浸绝缘纸的表面陷阱分布特性。结果表明:随着热老化程度的增加,油浸 Nomex 绝缘纸试样全频段的介质损耗因数明显增大,双层和三层油浸绝缘纸试样的介质损耗因数明显大于单层油浸绝缘纸试样,且三层油浸绝缘纸试样的介质损耗因数增幅更大。随着热老化程度的增加,油浸绝缘纸试样的表面初始电位逐渐降低,表面电位衰减率随老化时间的增加而增加,且随着绝缘纸层数的增加,相同老化周期下的表面电位衰减率逐渐降低。油浸绝缘纸的浅陷阱密度随老化程度的增加而增大,深陷阱密度则下降,且双层油浸绝缘纸的深陷阱密度和能级的下降速率小于单层油浸绝缘纸,而其浅陷阱密度和能级的增大速率大于单层油浸绝缘纸。研究结果可为变压器油纸绝缘的设计提供一定的参考。

关键词:热老化;多层 Nomex 绝缘纸;频域介电特性;表面电荷;红外光谱

Effect of thermal ageing on properties of multi-layer oil-immersed Nomex insulating paper

BAO Yanyan^{1,2}, WEI Longjiang³, WEN Dingjun⁴, WANG Xiaofei², CHEN Zhenyong⁴,
WU Yushuo², CHEN Bodong², KANG Yongqiang^{3*}

- (1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology,
Lanzhou 730070, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Power Company, Lanzhou 730070, China;
3. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
4. State Grid Gansu Power Company, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the performance degradation characteristics of multi-layer Nomex insulating paper used in transformers during the thermal ageing process, firstly, the multi-layer oil-immersed Nomex insulating paper was conducted accelerated thermal ageing test, then a frequency domain dielectric spectroscopy testing platform and a surface potential testing platform were established to obtain the dielectric loss factor and surface potential decay curves of oil-immersed insulating paper at different ageing time, and the surface trap distribution characteristics of the oil-immersed insulating paper with different ageing degree were calculated and analyzed. The results show that with the increase of thermal ageing degree, the dielectric loss factor of oil-immersed Nomex insulating paper samples increases significantly across all frequency bands. The dielectric loss factors of double-layer and triple-layer oil-immersed insulating paper samples are significantly higher than that of single-layer oil-immersed insulating paper sample, and the dielectric loss factor of triple-layer oil-immersed insulating paper sample exhibits an even greater increase. As the thermal ageing degree increases, the initial surface potentials of the insulating paper samples gradually decrease, and the surface potential decay rate increases with ageing time, while at the same ageing cycle, the surface potential decay rate gradually decreases with the increase of insulating paper

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(522722240003); 甘肃省青年科技基金资助项目(24JRRA754)。

layer number. The shallow trap density of oil-immersed insulating paper increases with the increase of ageing degree, while the deep trap density decreases. The decline rates of deep trap density and energy level of double-layer oil-immersed insulating paper are lower than those of single-layer oil-immersed insulating paper, while the increase rates of its shallow trap density and energy level are higher than those of single-layer oil-immersed insulating paper. The research results can provide some reference for the design of transformer oil-paper insulation.

Key words: thermal ageing; multi-layer Nomex insulating paper; frequency domain dielectric properties; surface charge; infrared spectroscopy

0 引言

在现代电力系统中,变压器作为关键设备,其绝缘系统的可靠性直接关系到电力设备的安全与稳定运行^[1]。绝缘纸广泛应用于变压器等电气设备中,其绝缘性能的优劣对变压器的使用寿命和稳定运行具有重要影响。在众多的绝缘材料中,Nomex绝缘纸凭借其良好的电气绝缘性能、高温耐受性和高机械强度,常被用作油浸式变压器绕组高温区域的关键绝缘材料,以提升设备的运行可靠性^[2-3]。在变压器运行环境中,绝缘纸材料会经历热、电及机械应力等多种因素的协同作用而发生老化,其中热老化是导致绝缘纸性能劣化的重要因素^[4-5]。

绝缘纸内部由于材料固有的不均匀性、杂质及结构缺陷等因素会形成大量物理化学陷阱,在外加电场作用下,绝缘纸中的电荷载流子发生迁移并在陷阱处被捕获,导致空间电荷在特定区域非均匀积聚,进而影响绝缘纸材料内部电场的分布特性^[6-9]。随着长期服役或高温环境中的热老化作用,绝缘纸的性能逐渐退化,其陷阱特性显著改变,表现为陷阱深度、陷阱密度以及陷阱分布状态的变化,这些变化进一步影响了绝缘纸中电荷的积累与消散规律,使其内部的电场分布产生畸变^[10-12]。这种电场的非线性分布不仅加速了绝缘纸的老化进程,还可能导致其电气强度显著下降,最终引发绝缘介质的击穿失效。

目前,国内外众多学者对于绝缘纸的热老化特性及其电荷输运行为展开了广泛的研究,主要通过测量和分析绝缘纸的多种参数来表征其老化状态及性能退化特性,这些参数包括绝缘纸的聚合度、介电频谱特性、拉伸强度、微观形貌以及变压器油中糠醛含量等。文献[13-16]通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、气相色谱(GC)等手段对绝缘纸化学组分的变化和降解产物进行表征。文献[17-18]研究了不同温度和热老化时间下绝缘油的频域介电

特性。文献[19-21]通过频域介电谱技术对不同老化程度的油纸绝缘进行测试,分析了油纸绝缘的介电特性与老化状态的关系。文献[22-24]采用静电计测量了油纸绝缘的表面电位分布,分析了热老化和高频电老化对油纸绝缘表面电荷积聚和消散特性的影响。文献[25-27]研究了油纸绝缘系统在直流与脉冲电压作用下的界面电荷动态行为,结果表明绝缘纸表面电荷在初始阶段衰减较为迅速,随着时间的推移逐渐减缓,最终表面电荷的消散趋于稳定。文献[28-30]测量了不同老化阶段绝缘纸的红外光谱,分析了油纸绝缘老化过程中有机分子官能团的变化情况。目前绝缘纸的老化研究主要集中于单层材料体系或复合层压纸,然而,在高压设备实际应用中绝缘纸为多层结构,人们对同质多层结构的界面协同劣化机制尚不明确。尤其当层间存在物理/化学陷阱耦合时,界面效应会显著影响材料的老化进程,具体表现为:①多层结构效应,层间界面阻碍分子链自由降解,延缓主链断裂;②界面势垒效应,层间界面形成势垒,捕获载流子并稳定深陷阱状态;③界面极化效应,界面两侧介质在电荷迁移率和极化响应上出现严重失配,阻碍电荷的跨界面迁移。同时,多层界面导致载流子迁移路径延长,抑制电荷的消散,传统基于均质材料的陷阱理论难以解释多层体系的非线性老化行为。因此,深入研究热老化对多层Nomex绝缘纸老化特征量的影响及其机理具有重要的理论和实践意义。

本文首先对多层油浸Nomex绝缘纸试样进行加速热老化试验,然后搭建频域介电谱测试平台和表面电位测试平台,测量不同老化程度油浸绝缘纸的介质损耗因数和表面电位衰减曲线,分析热老化对单层、双层、三层油浸Nomex绝缘纸频域介电特性、表面电荷积聚消散特性、陷阱分布特性的影响,并阐释多层绝缘纸的老化机理,为变压器的绝缘设计与防护提供试验基础和依据。

1 试验

1.1 加速热老化试验

本研究使用杜邦 T411 型 Nomex 绝缘纸(厚度为 0.58 mm)与克拉玛依 25# 变压器油作为试验材料。将绝缘纸裁剪为 40 mm×40 mm 的方形,并通过环氧树脂胶将裁剪的绝缘纸粘合制成双层、三层结构,如图 1 所示。试验前使用滤油机将绝缘油过滤 3 次,将过滤后的绝缘油和绝缘纸置于温度为 90℃、真空度为 50 Pa 的真空干燥箱内持续干燥 48 h;将 Nomex 绝缘纸试样与绝缘油按 1:10 的质量比在氮气环境下进行浸渍处理,并将尺寸为 5 cm×5 cm×0.1 cm 的铜条浸入每个装有油纸的容器中,以模拟实际工况中的变压器绕组,保证绝缘纸完全浸没在绝缘油中并密封;最后依据 GB/T 464—2008 和 DL/T 285—2012 设定加速热老化条件参数,对装有油纸的容器在 50 Pa、150℃ 的恒温恒压条件下进行加速热老化,试验包括 5 个老化周期,每个周期时长为 5 d(总时长为 25 d)。



图 1 绝缘纸试样

Fig.1 Insulating paper samples

1.2 油纸绝缘系统频域介电谱测试平台

本试验采用自主搭建的频域介电谱测试平台,如图 2 所示,其中全密封亚克力试验箱内集成三电极测量系统。测试时将油浸绝缘纸试样置于高压电极与测试电极之间,并将环形屏蔽电极接地以抑制表面电流干扰。油纸绝缘材料的频域介电谱采用 Megger 公司生产的 IDAX300 型测试系统进行测量,其可以提供测试频率为 $10^{-4} \sim 10^3$ Hz、峰值范围为 0~200 V 连续可调的正弦交流电压。通过对不同层数油浸绝缘纸试样施加不同频率正弦交流电压,试样中将产生电流,通过精确测量电压和电流的数值,可以计算试样的介电常数和介质损耗因数($\tan\delta$)。为保证试验结果的可靠性与可重复性,每组试验重复 3 次,取 3 次测量数据的平均值作为试验结果。

1.3 油纸绝缘系统表面电位测试平台

为分析不同热老化时长对油浸绝缘纸绝缘性能的影响,本研究对热老化试样进行表面电位衰减特性测试,测试系统如图 3 所示。电晕激励源为 P10

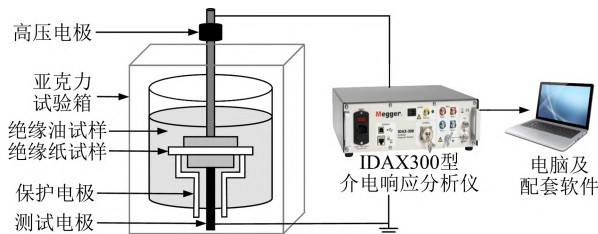


图 2 频域介电谱测试平台

Fig.2 Frequency-domain dielectric spectroscopy testing platform

型高频脉冲电源,其可输出幅值为 0~10 kV、频率为 1 Hz~50 kHz 的单极性高频方波脉冲电压,高精度静电探头型号为 TREK MODEL 3455-ET,精度为 $\pm 0.1\%$,表面电位计型号为 TREK-341B。电晕充电过程中,控制针电极与油浸绝缘纸试样的距离为 5 mm。测试流程如下:将试样置于接地铜板平台上,施加 5 kV 电压(频率为 10 kHz)进行 10 min 的电晕充电,充电完成后,迅速撤去电压,并在 2 s 内将试样转移至固定的静电探头下方(静电探头和试样的距离为 3 mm)进行表面电位测量,防止电荷在迁移过程中发生耗散或中和。测试过程中持续监测并记录油浸绝缘纸表面电位随时间变化的衰减曲线。

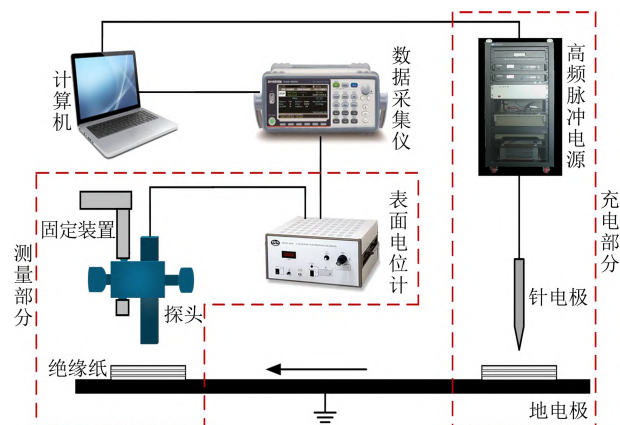


图 3 表面电位测试平台

Fig.3 Surface potential testing platform

基于有源静电探头法测得的油浸绝缘纸表面电位 μ ,可通过式(1)反推计算其表面电荷密度 σ 。

$$\sigma = \mu \epsilon_0 \epsilon_r / d \quad (1)$$

式(1)中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为油浸 Nomex 绝缘纸的相对介电常数; d 为静电探头与绝缘纸表面的距离。

由式(1)可知,表面电荷密度 σ 与表面电位 μ 成线性正比关系,表面电位分布情况可反映表面电荷密度分布情况。因此,本文直接分析油浸绝缘纸的表面电位分布特性。

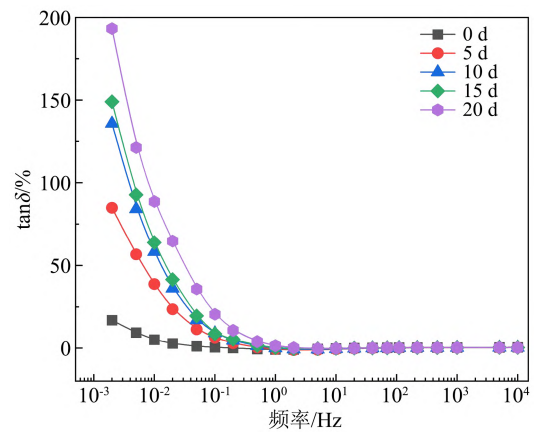
2 试验结果

2.1 不同老化时间多层油浸绝缘纸的频域介电特性

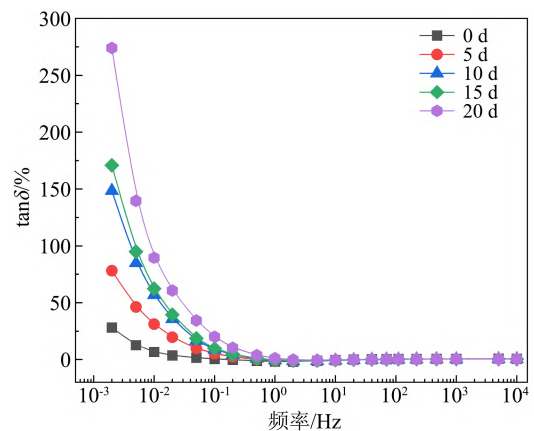
不同老化时间多层油浸绝缘纸 $\tan\delta$ 随频率的变化曲线如图4所示。由图4可知,随着老化程度的增加,单层、双层及三层油浸绝缘纸全频段的 $\tan\delta$ 明显增大,表明对应的电导损耗及松弛极化损耗均增加。

由图4还可以看出,各油浸绝缘纸试样在中低频率段内的 $\tan\delta$ 增幅随着热老化时间的增加更为显著。造成这一现象的原因是低频区以界面极化和电导损耗为主导,而高频区则以快速的电子或离子极化为主,受老化影响较小。在热老化过程中,纤维素降解生成水分、糠醛、有机酸等极性产物,这些副产物不仅加速绝缘纸的劣化,也增加了极性物质和可移动离子的浓度,从而提高了整体电导率。电导率对 $\tan\delta$ 的影响与频率呈负相关,因此在低频下 $\tan\delta$ 变化更为显著。同时,随着热老化程度的加剧,介质中的偶极子与跳跃载流子浓度持续上升,进而在低频范围内加剧了介电弥散响应,最终使得 $\tan\delta$ 随老化时间延长而增大,并且在低频段增幅尤为明显。

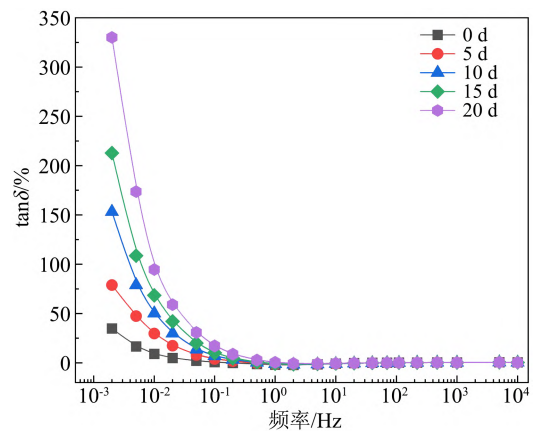
进一步分析图4可以发现,当老化时间和频率相同时,随着油浸绝缘纸层数的增多,其 $\tan\delta$ 在 $10^{-3} \sim 10^0$ Hz 范围内不断升高,而在 $10^0 \sim 10^3$ Hz 频域范围内,随着测试频率的增大, $\tan\delta$ 基本无变化。在老化初期,单层、双层及三层油浸绝缘纸试样的 $\tan\delta$ 相近,随着老化程度的增加,双层和三层油浸绝缘纸试样的 $\tan\delta$ 明显大于单层油浸绝缘纸试样的 $\tan\delta$,并且相较于双层油浸绝缘纸试样,三层油浸绝缘纸试样的 $\tan\delta$ 增幅更大。这是因为相较于仅存在“油-纸”界面的单层结构,多层绝缘纸结构引入了额外的“纸-纸”界面。这些界面通常被绝缘油渗透或含有微气隙,从而形成具备梯度介电属性的界面区域。由于绝缘纸、绝缘油和微气隙3种介质在介电常数和电导率上存在差异,导致界面两侧介质在电荷迁移率和极化响应上出现严重失配,阻碍电荷的跨界面迁移,并诱发 Maxwell-Wagner-Sillars 界面极化效应。随着层数增加,界面数量增多且介电属性梯度更陡峭,导致有效的界面极化弛豫时间延长和可被激发的 Maxwell-Wagner-Sillars 极化单元增加。这种高度弛豫性的界面极化过程大幅增强了介电



(a) 单层绝缘纸



(b) 双层绝缘纸



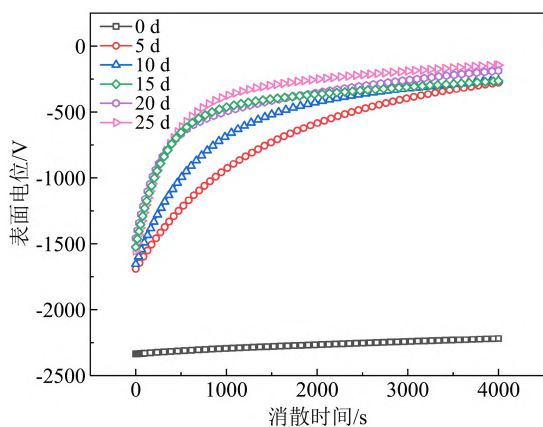
(c) 三层绝缘纸

图4 不同老化时间下油浸绝缘纸介质损耗因数测试曲线
Fig.4 Testing curves of the dielectric loss factor of oil-immersed insulating papers under different ageing time

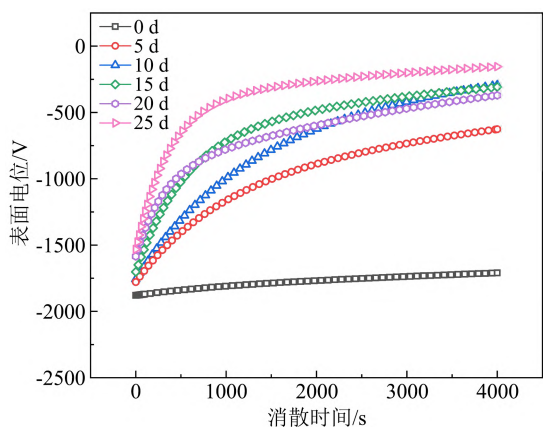
能量的不可逆耗散,成为交流电压下主导 $\tan\delta$ 的关键因素,致使多层结构油浸绝缘纸的 $\tan\delta$ 显著高于单层结构油浸绝缘纸。

2.2 不同老化时间多层油浸绝缘纸的表面电荷积聚与消散特性

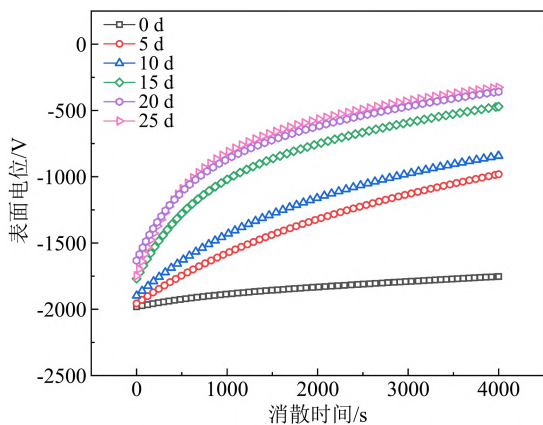
图5为不同老化时间油浸绝缘纸试样的表面电



(a) 单层绝缘纸



(b) 双层绝缘纸



(c) 三层绝缘纸

图5 不同老化时间下油浸绝缘纸表面电位衰减曲线

Fig.5 Surface potential decay curves of oil-immersed insulating papers under different ageing time

位时域衰减曲线。从图5可以看出,油浸绝缘纸的初始表面电位随老化时间增加而降低,初始表面电位越低,表明试样表面积累的电荷密度越小。表面电位的衰减过程呈现典型弛豫衰减特征,在衰减初期速率最快,随后持续递减,最终趋于稳态。

为便于定量比较不同油浸绝缘纸试样表面电

位的衰减程度,本文定义表面电位衰减率 dV/dt 计算式如式(2)所示。

$$\frac{dV}{dt} = \left| \frac{V_0 - V_{4000}}{V_0} \right| \quad (2)$$

式(2)中: V_0 为试样初始表面电位; V_{4000} 为消散时间 $t=4\,000\text{ s}$ 时的表面电位值。

基于式(2)计算的表面电位衰减率如图6所示。从图6可以看出,未老化的油浸绝缘纸试样表面电位衰减率最低,约为10%。电晕充电后,相较于未老化试样,热老化5 d的油浸绝缘纸试样表面电位衰减率增幅最大,且随着绝缘纸层数的增加,表面电位衰减率增幅减小。当老化时间为5 d时,单层、双层、三层油浸绝缘纸试样的表面电位衰减率分别为82.11%、64.78%、49.93%。随着老化时间的增加,油浸绝缘纸表面电位衰减率增长趋势减缓。对不同层数的油纸绝缘试样进行分析发现,单层油浸绝缘纸表面电位的衰减率始终高于双层和三层油浸绝缘纸,且随着绝缘纸层数的增加,相同老化时间下的表面电位衰减率逐渐降低。但随着老化程度的加剧,多层绝缘纸表面电位衰减率的增长趋势明显大于单层绝缘纸。

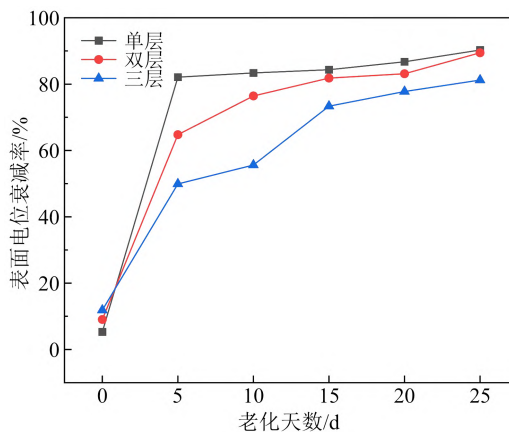


图6 油浸绝缘纸试样表面电位衰减率

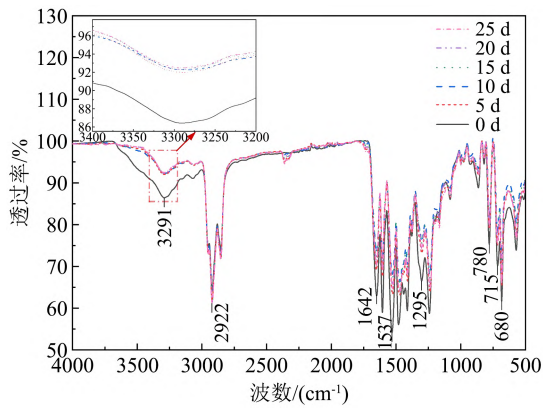
Fig.6 Surface potential decay rate of oil-immersed insulating paper samples

3 分析与讨论

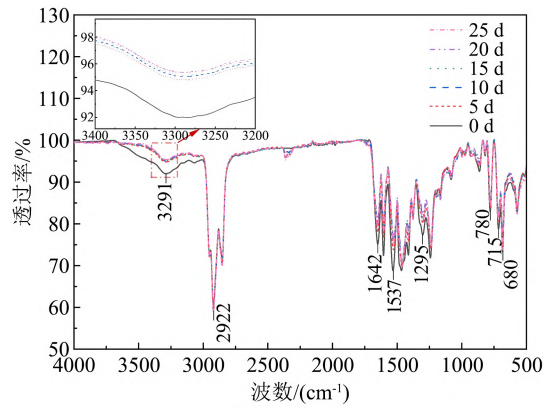
3.1 热老化对多层油浸绝缘纸官能团的影响

绝缘纸在外界应力作用下会发生一系列老化反应,生成 CO 、 CO_2 、糠醛等特征产物,因此绝缘纸的老化过程必然伴随着其分子结构中官能团的变化,利用红外光谱技术可以从分子层面揭示这些变化。不同老化时间下单层、双层及三层油浸绝缘纸

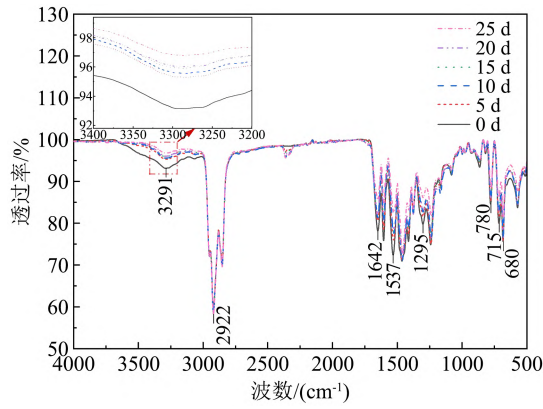
的红外光谱表征结果如图7所示,各吸收峰的位置如表1所示。



(a) 单层绝缘纸



(b) 双层绝缘纸



(c) 三层绝缘纸

图7 不同老化时间下油浸绝缘纸的红外光谱图

Fig.7 Infrared spectroscopy of oil-immersed insulating papers under different ageing time

从图7可以看出,相较于未老化的油浸绝缘纸,老化后的油浸绝缘纸在4 000~500 cm⁻¹范围内并未出现新的特征吸收峰,说明热老化作用下未生成新的官能团,但不同老化时间下各吸收峰的透过率峰值存在差异。由于透过率与吸收强度呈反比,透过

表1 油浸绝缘纸红外光谱主要吸收峰归属

Table 1 Attribution of major absorption peaks in the infrared spectra of oil-immersed insulating paper

吸收峰波数/(cm ⁻¹)	对应化学键特征峰
3 291	N-H伸缩振动峰
2 922	甲基与亚甲基C-H反对称伸缩振动峰
1 642	酰胺 I 带峰(C=O伸缩振动)
1 537	酰胺 II 带峰(N-H键面内弯曲振动、部分C-N键伸缩振动)
1 295	酰胺 III 带峰(C-N键伸缩振动、N-H键面内弯曲振动、C-C键伸缩振动)
780	N-H键面外弯曲振动峰
680	酰胺 V 带峰(N-C=O面内弯曲振动)

率升高即代表对应振动的吸收减弱。随着热老化程度的加剧,油浸绝缘纸的特征吸收峰峰值逐渐降低,吸收强度逐渐减弱,表明材料的化学结构发生了一定程度的变化。

结合图7和表1可以看出,不同层数的油浸绝缘纸在3 291 cm⁻¹处都有明显的N-H键伸缩振动峰。未老化的单层油浸绝缘纸在3 291 cm⁻¹处透过率为86.44%,老化时间为15 d的单层油浸绝缘纸透过率为92.68%,相较于未老化试样增加了7.22%,老化时间为25 d的单层油浸绝缘纸透过率为93.24%,相较于未老化试样增加了7.87%;未老化的双层油浸绝缘纸在3 291 cm⁻¹处透过率为91.99%,老化时间为15 d的双层油浸绝缘纸透过率为95.13%,相较于未老化试样增加了3.41%,老化时间为25 d的双层油浸绝缘纸透过率为95.38%,相较于未老化试样增加了3.69%;未老化的三层油浸绝缘纸在3 291 cm⁻¹处透过率为93.16%,老化时间为15 d的三层油浸绝缘纸透过率为95.91%,相较于未老化试样增加了2.95%,老化时间为25 d的三层油浸绝缘纸透过率为96.51%,相较于未老化试样增加了3.60%。综合可知,随着老化时间的增加,各绝缘纸在3 291 cm⁻¹处的透过率逐渐增大,且单层油浸绝缘纸的增幅大于双层和三层油浸绝缘纸,说明热老化过程破坏了油浸绝缘纸中的氢键网络,导致氢键数量减少,分子间的结合力减弱;在相同老化时间下,单层油浸绝缘纸的破坏程度大于双层和三层油浸绝缘纸,其氢键网络的完整性较低,氢键数量衰减程度明显高于双层和三层油浸绝缘纸,表明在多层结构中,相邻绝缘纸层间的界面相互作用提供了一种保护效应:层间界面阻碍分子链的自由降解,有效延

缓分子链的主链结构在热应力下的断裂过程,从而在一定程度上保护了纸基的整体结构强度与绝缘性能,使其热老化降解速率相对于单层结构有所降低。另外,在 $1\,500\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 的红外指纹区,老化试样的特征吸收峰强度显著低于未老化试样,原因在于关键化学键(N-H、C-N、C-C、N-C=O)的断裂,这会导致芳纶分子主链发生断裂及苯环结构开环,进而导致聚合物分子量下降,使得油浸绝缘纸的绝缘性能劣化。

绝缘材料内部的陷阱结构对其绝缘性能具有重要影响。分子链的有序排列、弯曲与折叠等结构,会在材料内部形成陷阱以物理机制束缚电荷;而分子链断裂、添加剂及杂质等因素引入的结构缺陷,则产生化学陷阱。实验所用Nomex绝缘纸的主要成分为聚间苯二甲酰间苯二胺(PMPD-I)短切纤维与沉析纤维^[31]。短切纤维宽度随着热老化程度的增加持续减小直至断裂,导致纤维间形成孔隙与空洞;同时,PMPD-I长链发生键断裂反应和侧基氧化-水解反应,逐步引入 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_3$ 等脂肪族官能团及 $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 等极性基团,其中 $-\text{CH}_3$ 基团易捕获注入电子, $-\text{OH}/-\text{COOH}$ 基团可通过氢键或静电作用俘获周围电荷。这种化学反应过程直接改变了绝缘纸内部陷阱的分布状态,使物理陷阱与化学陷阱均发生明显变化,其中浅陷阱密度增多,而深陷阱密度则显著降低^[32]。随着老化时间的增加,浅陷阱主导的陷阱导致电荷平均束缚能降低,电荷去极化过程加速,表现为绝缘纸表面电位衰减率持续上升,最终引发Nomex绝缘纸的绝缘性能劣化。

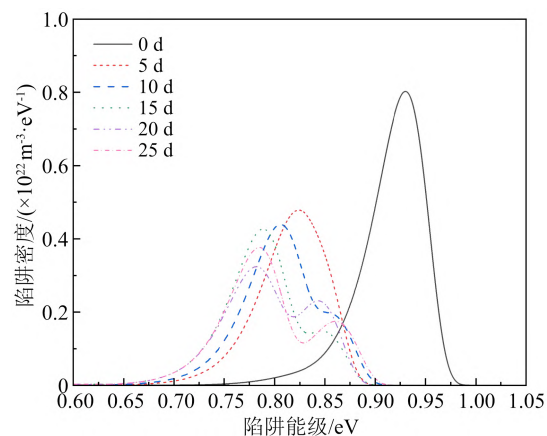
3.2 热老化对多层绝缘纸陷阱分布特性的影响

基于表面电位衰减曲线的测量数据,假设陷阱中脱陷的载流子将不再被重新捕获,结合式(3)可计算得到绝缘纸表面陷阱能级密度分布函数 $N(E)$ 。

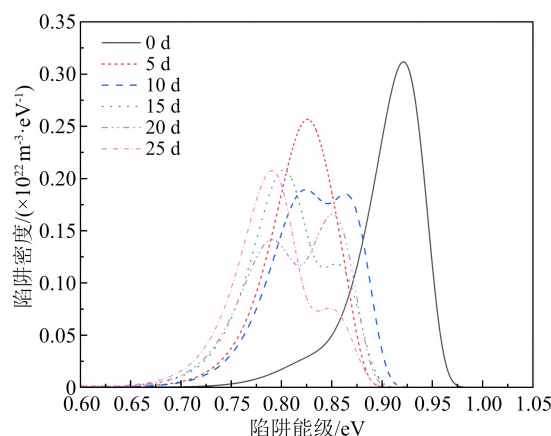
$$N(E) = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_r}{qkTL^2} \left| t \frac{dV}{dt} \right| \quad (3)$$

式(3)中: ε_0 为真空介电常数; ε_r 为Nomex绝缘纸的相对介电常数; q 为电子的电荷量; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; L 为绝缘纸试样厚度。

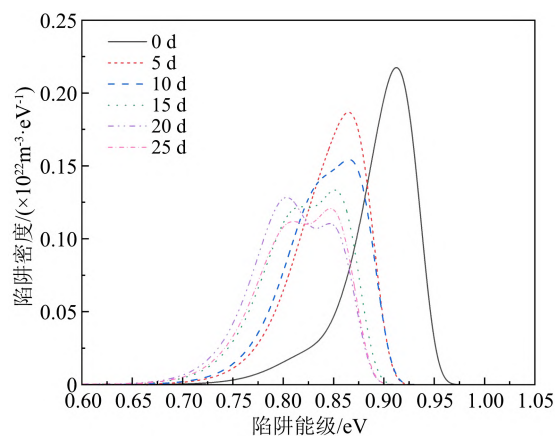
图8为不同老化时间下油浸绝缘纸试样的陷阱分布。从图8可以看出,老化试样的陷阱能级分布呈现典型的双峰特征,分别对应浅陷阱能级中心($0.60\sim 0.80\text{ eV}$)和深陷阱能级中心($0.80\sim 1.00\text{ eV}$)。未老化油浸绝缘纸呈现出深陷阱主导的特



(a) 单层绝缘纸



(b) 双层绝缘纸



(c) 三层绝缘纸

图8 不同老化时间下油浸绝缘纸试样的陷阱分布

Fig.8 Trap distribution of oil-immersed insulating paper samples under different ageing time

征,其深陷阱能级密度显著高于浅陷阱。然而,随着热老化程度加剧,浅陷阱密度逐渐升高,而深陷阱密度逐渐降低。在所有老化周期中,陷阱密度曲线的双峰结构始终存在,且随着老化时间增加,浅陷阱和深陷阱密度之间的差值在老化初期呈现减小趋势,而在老化后期逐渐增大。与单层油浸绝缘

纸相比,双层和三层油浸绝缘纸的陷阱密度较低。随着热老化时间的增加,双层油浸绝缘纸的深陷阱密度和能级的下降速率低于单层油浸绝缘纸,浅陷阱密度和能级的增长速率高于单层油浸绝缘纸,而三层油浸绝缘纸相较于双层油浸绝缘纸所呈现的变化趋势更为显著。

绝缘纸的表面电位衰减特性与其内部的陷阱分布特性有关,电荷陷入浅陷阱容易脱陷,陷入深陷阱难以脱陷。老化初始阶段,浅陷阱中载流子快速脱陷导致表面电位急剧下降;随着时间的推移,深陷阱能级主导的油浸绝缘纸表面陷阱分布特性使得衰减速率显著减缓。未老化的油浸绝缘纸试样陷阱分布以深陷阱为主,电荷被捕获后难以消散,然而,随着老化程度的加剧,油浸绝缘纸内部产生大量浅陷阱,电荷入陷后更容易脱陷。因此,对比未老化试样,老化油浸绝缘纸试样的表面电位衰减速率更快。

3.3 热老化对多层油浸绝缘纸表面电荷积聚与消散特性的影响

电晕充电后,表面电位峰值位于加压中心,即为中心处初始表面电位,图9为不同老化时间下油浸绝缘纸的中心处初始表面电位。

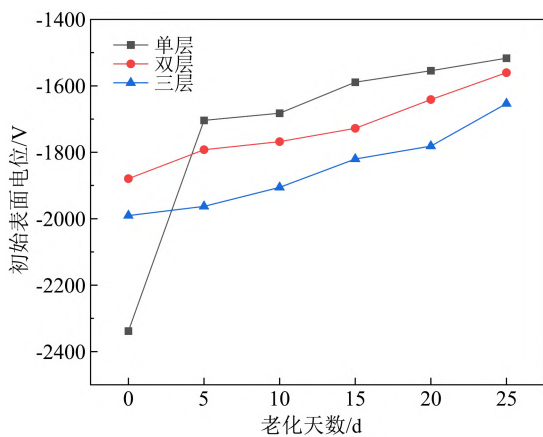


图9 不同老化时间下油浸绝缘纸试样的初始表面电位

Fig.9 Initial surface potential of oil-immersed insulating paper samples under different ageing time

由图9可知,不同层数油浸绝缘纸试样电晕充电后初始表面电位随热老化时间的变化趋势一致,均随着热老化时间的增加而逐渐下降。对比未老化与老化试样中心处初始表面电位可知,未老化试样的初始表面电位显著高于老化试样,这是由于未老化的油浸绝缘纸积聚电荷的能力较强,随着绝缘纸的老化,其积聚并束缚电荷的能力减弱。在所有

老化阶段,双层和三层试样的电荷积聚能力始终高于单层试样,且随着绝缘纸层数的增加,积聚电荷的能力上升。

热老化作用会导致Nomex绝缘纸的介电性能逐渐劣化,其介电常数随之改变,最终影响电荷注入行为,可以通过式(4)的肖特基势垒方程进行解释。

$$\psi(x) = \psi_m - x - q^2 / (16\pi\epsilon_0\epsilon_r x) - qEx \quad (4)$$

式(4)中: $\psi(x)$ 为介质表面势垒; ψ_m 为电极金属功函数; x 为介质表面亲和势; E 为外加场强。

由式(4)可知,在其他条件相同的情况下,介质势垒与相对介电常数 ϵ 呈正相关,介电常数降低会导致势垒显著降低,而更低的势垒意味着电荷更容易脱陷。未老化绝缘纸的势垒高,捕获的电荷需克服较高的势垒才可脱陷,因此未老化的油浸绝缘纸试样表面电位的衰减速率较慢。随着老化时间的增加,油浸绝缘纸的介电常数逐渐减小,势垒降低,绝缘纸中产生大量浅陷阱,导致其表面电位衰减速率加快。随着绝缘纸层数的增加,试样内部新增的层间界面增多,由于各层在纤维取向、胶含量与致密度上的微小差异,这些界面区域处容易形成结构缺陷并演化为深陷阱,从而俘获并积聚大量电荷。同时,界面两侧介电常数与电导率的不连续会诱发Maxwell-Wagner-Sillars极化,在界面附近形成额外的电位势垒。被俘获的载流子必须克服更高的界面势垒才能脱陷,导致电荷释放受阻,最终表现为试样表面电位峰值随绝缘纸层数增加而增大,表面电位的衰减速率随绝缘纸层数增加而降低。

4 结论

本文通过对油浸多层Nomex绝缘纸进行加速热老化试验,分析了油浸多层Nomex绝缘纸在热老化作用下频域介电特性、表面电荷积聚与消散特性以及陷阱分布特性的变化,主要结论如下:

(1)随着老化程度的增加,单层、双层及三层油浸绝缘纸试样全频段的介质损耗因数显著增加,在中低频段内的增幅随着热老化时间的增加更为显著。在老化初期,单层、双层及三层油浸绝缘纸试样的介质损耗因数相近,随着老化程度的增加,双层和三层油浸绝缘纸试样的介质损耗因数明显大于单层油浸绝缘纸试样,并且相较于双层油浸绝缘纸试样,三层油浸绝缘纸试样的介质损耗因数增幅

更大。

(2)油浸绝缘纸试样的初始表面电位随老化时间增加而逐渐降低。试样表面电位在老化初期衰减率较高,随着老化时间增加,衰减率显著减缓并最终趋近于稳定状态。同时电晕充电后,表面电位衰减率随老化时间的增加而增加。单层油浸绝缘纸试样表面电位的衰减率始终高于双层和三层油浸绝缘纸试样,且随着油浸绝缘纸层数的增加,相同老化时间下试样油浸绝缘纸的表面电位衰减率逐渐降低。

(3)随老化时间的增加,油浸绝缘纸内部深陷阱密度降低,浅陷阱密度增加。未老化的油浸绝缘纸以深陷阱为主,导致其表面电位衰减率最低。与单层油浸绝缘纸相比,双层和三层油浸绝缘纸的陷阱密度较低。随着热老化时间的增加,双层油浸绝缘纸的深陷阱密度和能级的下降速率低于单层油浸绝缘纸,浅陷阱密度和能级的增长速率高于单层油浸绝缘纸,而三层油浸绝缘纸相较于双层油浸绝缘纸所呈现的变化趋势更为显著。

参考文献 References

- [1] 杜伯学,朱闻博,李进,等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1300-1309.
DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(6):1300-1309.
- [2] 彭发东,于海川,徐晓刚,等. 变压器用耐高温绝缘纸性能对比分析[J]. 绝缘材料,2018,51(12):30-35.
PENG Fadong, YU Haichuan, XU Xiaogang, et al. Comparative analysis on properties of high temperature resistance insulating paper for transformer[J]. Insulating Materials,2018,51(12):30-35.
- [3] 赵建网,金佳敏,王和忠,等. Nomex 绝缘纸的发展及其在变压器中的应用[J]. 电工材料,2015(4):28-31.
ZHAO Jianwang, JIN Jiamin, WANG Hezhong, et al. Development and application in transformers of Nomex insulation paper [J]. Electrical Engineering Materials,2015(4):28-31.
- [4] HOHLEIN I, KACHLER A J. Aging of cellulose at transformer service temperatures. part 2. influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2005,21(5):20-24.
- [5] 王政宇,温敏敏,宋建成,等. 热老化对 Nomex 绝缘纸空间电荷特性的影响[J]. 变压器,2019,56(6):37-44.
WANG Zhengyu, WEN Minmin, SONG Jiancheng, et al. Effects of thermal aging on space charge characteristics of Nomex insulation paper[J]. Transformers,2019,56(6):37-44.
- [6] 廖瑞金,唐超,杨丽君,等. 电力变压器用绝缘纸热老化的微观结构及形貌研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(33):59-64.
LIAO Ruijin, TANG Chao, YANG Lijun, et al. Research on the microstructure and morphology of power transformer insulation paper after thermal aging[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(33):59-64.
- [7] 黄猛,单唯,姚园鑫,等. 绝缘纸电气与机械性能的多级构效关系机理分析[J/OL]. 中国电机工程学报,2025:1-13.[2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250407.1528.003>.
HUANG Meng, SHAN Wei, YAO Yuanxin, et al. Multi-level structure-activity relationship mechanism analysis of electrical and mechanical properties of insulating paper[J/OL]. Proceedings of the CSEE,2025: 1-13. [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250407.1528.003>.
- [8] 欧阳希,周渌,李雪丰,等. 不同交直流复合电压下油浸绝缘纸微观结构及电气性能的变化规律分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7394-7404,7512.
OUYANG Xi, ZHOU Zhuan, LI Xuefeng, et al. Analysis of microstructure and electrical properties of oil-impregnated insulation paper under different AC/DC composite voltages[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(24):7394-7404,7512.
- [9] MIZUTANI T. Effects of additives and morphology on space charge in LDPE[C]//Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Himeji, Japan: IEEE, 2001:487-492.
- [10] MEUNIER M, QUIRKE N, ASLANIDES A. Molecular modeling of electron traps in polymer insulators: chemical defects and impurities[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(6): 2876-2881.
- [11] MO Y, YANG L J, YIN F, et al. Development of PPTA/cellulose three-layer composite insulating paper with low dielectric constant and good mechanical strength based on molecular dynamics simulation[J]. Polymer Composites,2022,43(3):1698-1710.
- [12] 黄伟嘉,李佳,王国庆,等. 矿物绝缘油浸纸在天然酯中的加速老化特性[J]. 绝缘材料,2023,56(8):32-36.
HUANG Weijia, LI Jia, WANG Guoqing, et al. Accelerated ageing characteristics of mineral insulating oil-impregnated paper in natural esters[J]. Insulating Materials,2023,56(8):32-36.
- [13] 李元,张崑,唐峰,等. 利用近红外光谱定量评估绝缘纸聚合度的建模方法研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(S1):287-296.
LI Yuan, ZHANG Yin, TANG Feng, et al. Investigations on quantitative evaluation modeling for determining the degree of polymerization of insulating paper by near infrared spectroscopy [J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(S1):287-296.
- [14] WANG F P, ZHOU J, DAN L Y, et al. Advancing thermal stability in natural ester oil-paper insulation systems via precision nanostructuring with parylene films: experimental and molecular-level comprehensive assessment[J]. Polymer Testing, 2024, 140:108592.
- [15] CHEN X, LUO X, MA J Y, et al. Study on the microscopic characteristics of low temperature composite insulation under the development of air gap discharge based on molecular dynamics

- [J]. Journal of Molecular Structure, 2025, 1329: 141438.
- [16] 谢一鸣, 阮江军, 金硕, 等. 热老化过程中油浸纸板电阻率影响因素研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(6): 46-53.
XIE Yiming, RUAN Jiangjun, JIN Shuo, et al. Study on influence factors of resistivity of oil-immersed paperboard during thermal ageing[J]. Insulating Materials, 2023, 56(6): 46-53.
- [17] SINGHA S, ASANO R, FRIMPONG G, et al. Comparative aging characteristics between a high oleic natural ester dielectric liquid and mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 149-158.
- [18] WANG D Y, ZHOU L J, WANG L J, et al. Frequency domain dielectric response of oil gap in time-varying temperature conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 964-973.
- [19] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 43-49, 76.
LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Relationship between frequency domain dielectric characteristic quantity and aging status of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 43-49, 76.
- [20] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 113-119.
LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Simulation and experimental study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119.
- [21] ZHOU L J, WEN R T, ZHANG J, et al. Parameter extraction for thermal aging of oil-paper insulation in onboard transformer based on the transfer function and dielectric response test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1214-1222.
- [22] 李奕萱, 高波, 李晓楠, 等. 热老化对Nomex绝缘纸表面电荷积聚消散特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5707-5717.
LI Yixuan, GAO Bo, LI Xiaonan, et al. Effect of thermal aging on surface charge accumulation and dissipation of Nomex paper[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5707-5717.
- [23] 吴楠, 李晓楠, 李赫, 等. 高频电老化过程中油纸绝缘表面电荷积聚消散特性[J]. 南方电网技术, 2022, 16(7): 40-45, 75.
WU Nan, LI Xiaonan, LI He, et al. Accumulation and decay characteristics of charges on oil-paper insulated surface under high frequency electrical aging process[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 40-45, 75.
- [24] 李奕萱, 高波, 李晓楠, 等. 多层油纸绝缘介质不同局放阶段的陷阱参数演变规律[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 260-268.
LI Yixuan, GAO Bo, LI Xiaonan, et al. Evolution of trapping parameters of multi-layer oil-paper insulating medium at different partial discharge stages[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 260-268.
- [25] DU B X, ZHU W B, ZHANG J G, et al. Surface and interface charge accumulation and decay of oil-paper insulation under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 939-946.
- [26] WANG F, LIANG K B, ZHONG L P, et al. Influence of paper surface morphology on streamer propagation at oil-paper interface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2305-2314.
- [27] DU B X, JIANG J P, ZHANG J G, et al. Dynamic behavior of surface charge on double-layer oil-paper insulation under pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2712-2719.
- [28] 赵莉华, 陈志杰, 安建国, 等. 芳纶纳米纤维绝缘纸在新型油纸绝缘中的热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 19-25.
ZHAO Lihua, CHEN Zhijie, AN Jianguo, et al. Thermal ageing characteristics of aramid nano fiber insulating paper in new oil-paper insulation[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3): 19-25.
- [29] 郑蝶吉, 王哲铭, 赵文彬, 等. 天然酯浸渍硅烷改性绝缘纸系统的长期热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 67-73.
ZHENG Dieji, WANG Zheming, ZHAO Wenbin, et al. Long-term thermal ageing characteristics of natural ester impregnated silane modified insulating paper system[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 67-73.
- [30] 廖瑞金, 周旋, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘热老化过程的中红外光谱特性[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 1-6.
LIAO Ruijin, ZHOU Xuan, YANG Lijun, et al. The mid-infrared spectra characteristic of the transformer oil-paper insulation in thermal ageing process[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 1-6.
- [31] 彭磊, 高萌, 付强, 等. 短切纤维结晶度对间位芳纶绝缘纸性能的影响[J]. 绝缘材料, 2025, 58(5): 15-21.
PENG Lei, GAO Meng, FU Qiang, et al. Effect of crystallinity of chopped fibers on properties of meta-aramid insulation paper[J]. Insulating Materials, 2025, 58(5): 15-21.
- [32] 黄青丹, 宋浩永, 王炜, 等. 单酯绝缘油纸绝缘系统的热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(9): 52-56.
HUANG Qingdan, SONG Haoyong, WANG Wei, et al. Thermal ageing characteristics of monoester insulating oil-paper insulation system[J]. Insulating Materials, 2022, 55(9): 52-56.

收稿日期: 2025-06-03; 修回日期: 2025-07-01。

作者简介:

包艳艳(1990—), 女(汉族), 甘肃兰州人, 博士生, 主要从事超特高压电力设备状态检测、诊断与评价方面的研究;

通信作者: 康永强(1988—), 男(汉族), 甘肃天水人, 副教授, 博士, 主要从事高压绝缘防护及新能源电力系统安全方面的研究。