

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407972

超声波传感器测量受多物理场耦合影响的研究*

刘家军 李晨婧 王波 赵天朔

(西安理工大学电气工程学院 西安 710054)

摘要:在变电站运维局部放电监测中,超声波传感器的测量结果会受到电场、磁场、环境湿度、温度及振动物理场及其耦合作用影响,导致测量可靠性下降甚至信号失真。因此,针对超声波传感器的多物理场耦合影响量化问题,构建多物理场耦合传感器测试平台,模拟实际变电站复杂场景,开展单物理场及二、三、四、五物理场耦合下的超声波传感器测量影响实验研究。实验结果表明,仅施加单物理场时,振动使超声波传感器测量值严重失真,最大误差达69%,在不施加振动的情况下,温度和湿度对传感器的影响较大,最大相对误差均达到9.4%;在二、三、四、五物理场耦合下,振动与其他物理场耦合时的传感器误差高达60.3%,在不施加振动的情况下,超声波传感器测量值变化趋势主要受温度影响。根据实验结果得到传感器多物理场耦合影响模型,揭示了多物理场耦合对超声波传感器测量值的影响规律,为超声波传感器的测量误差校准提供依据。

关键词:超声波传感器;多物理场耦合;测量;误差校准

中图分类号: TN06; TM93

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 535.1020

Research on the influence of multi physical field coupling on ultrasonic sensor measurement

Liu Jiajun Li Chenjing Wang Bo Zhao Tianshuo

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the partial discharge monitoring of substation operation and maintenance, the measurement results of ultrasonic sensors are affected by the electric field, magnetic field, environmental humidity, temperature, and vibration, as well as their coupling effects, leading to a decrease in measurement reliability and even signal distortion. Therefore, in order to quantify the influence of multi-physical field coupling of ultrasonic sensors, this paper constructs a sensor test platform with multi-physical field coupling, simulates the complex scene of actual substation, and carries out experimental research on the influence of ultrasonic sensor measurement under single physical field and two, three, four and five physical field coupling. The experimental results show that when only a single physical field is applied, the vibration makes the measured value seriously distorted, and the maximum error is 69%. Without vibration, temperature and humidity have a significant impact on the sensor, and the maximum relative error is 9.4%. Under the coupling of the second, third, fourth and fifth physical fields, the sensor error is as high as 60.3% when the vibration is coupled with other physical fields. Without applying vibration, the change trend of the measured value of the ultrasonic sensor is mainly affected by temperature. Based on the experimental results, a multi physics field coupling influence model of the sensor was obtained, revealing the influence law of multi physics field coupling on the measurement values of ultrasonic sensors, and providing a basis for error calibration of ultrasonic sensors.

Keywords: ultrasonic sensor; multi physics field coupling; measurement; error calibration

0 引言

在变电站运维监测环节中,超声波传感器能够有效

监测局部放电信号,早期检测这些异常可以预防设备故障,减少停机时间和维修成本,从而提高变电站的安全性和可靠性^[1]。然而,在实际应用中,超声波传感器的测量结果会受到多种物理场的耦合作用影响^[2-3]。电场和磁

场会干扰超声波信号的传播,导致信号失真或误读;环境湿度的变化可能影响超声波的传播速度和衰减特性;温度变化则可能导致传感器自身的性能波动,影响其测量精度;振动则可能引入噪声干扰,进而影响信号的采集和处理。因此,超声波传感器在变电站中运维使用时,需要充分考虑这些多物理场的耦合效应,以确保测量的准确性。

针对上述问题,迫切需要开展对多物理场耦合下超声波传感器误差的测量与分析。这不仅有助于深入理解这些耦合作用对传感器性能的影响机制,也能为后续传感器设计、校准和应用提供理论依据和实践指导。通过系统地研究和评估多物理场对超声波传感器测量误差的影响,可以有效提升变电站的设备监测能力,确保电力系统的稳定和安全运行。

对单一物理场开展传感器可靠性测试已有较为成熟的研究,包括温度场^[4-7]、湿度场^[8]、电场^[9]、磁场^[10-11]及振动场^[12]。但其不足以反应变电站复杂工况的影响,因此,近年来许多学者开展了考虑多物理场耦合作用的影响研究。文献[13]建立多物理场效应分析和误差补偿模型,精准模拟与感知多物理场。文献[14]构建电热耦合物理场仿真模型,帮助评估绝缘性能。文献[15]研究在温度及振动两物理场同时作用在电连接器上的影响。文献[16]考虑油浸式变压器铁芯振动受电-磁-力多物理场影响。文献[17]进行电磁-流体-温度场耦合的电力舱温度仿真。文献[18]综合考虑电、热、流动和传质多物理场的相互作用,研究固体氧化物燃料电池局部瞬态响应特性。文献[19]基于氧传感器结构建立电-热-力耦合仿真模型,明确影响氧传感器工作性能和结构性能的原因。文献[20]综合考虑磁场、温度场和结构场多物理场耦合作用,评估电机的振动噪声水平。文献[21]对传感器进行温度、振动、电磁干扰三种物理场仿真,研究其退化机理。文献[22]通过磁热双向耦合的方法分析了供电方式对电机温升的影响。文献[23]研究温度、电流和振动3大物理场对电连接器性能退化的影响。

综上,实际工程应用中传感器测量值会受到多种物理场的耦合作用影响,现有研究对多物理场的耦合影响考虑不全面,且多为仿真研究,难以全面评估传感器在变电站复杂环境下的性能。本文构建综合多物理场耦合影响的传感器测试平台,能够在同一实验中同时调控并模拟电场、磁场、温度、湿度、振动等多种物理场。开展超声波传感器在多物理场耦合影响下的实验研究,获得超声波传感器的测量规律,得到多物理场耦合影响模型,为超声波传感器的测量误差校准提供依据。

1 多物理场耦合传感器测试平台

多物理场耦合传感器测试平台主要由恒温恒湿试验箱、电场发生器、磁场发生器和振动发生器组成,测试平台结构如图1所示。

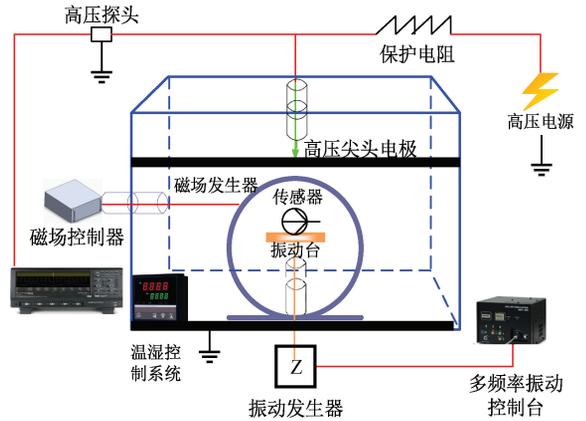


图1 多物理场耦合传感器测试平台结构

Fig.1 Structure of sensor testing platform under multi physics field coupling

恒温恒湿试验箱通过控制箱内加热、制冷、加湿和除湿4个过程来实现温、湿度的精确控制。加热系统由电热管通过电流产生热量升高箱内温度;制冷系统由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器组成,通过压缩机制冷循环降低箱内温度;加湿系统采用超声波加湿器或蒸汽加湿器,通过雾化或加热水增加箱内湿度;除湿系统通过冷却空气使水蒸气凝结成水滴来降低箱内湿度。恒温恒湿试验箱能够提供 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的广泛温度和 $20\text{RH}\%\sim 98\text{RH}\%$ 的相对湿度。

电场的施加在试验箱内部,电场的施加通过侧壁的高压绝缘套管来实现。高压绝缘套管连接到球电极,球电极再与上电极板连接,而下电极板则与地连接,从而在平行板间施加电压,利用电势差定义电场强度 E 为:

$$E = \frac{V}{d} \quad (1)$$

式中: V 为两极板之间电势差; d 为两极板之间距离。

机械振动测试采用多频率振动发生装置来模拟各种振动应力,采用SA-JZ010电动式激振器进行振动调控。其核心部分由上下两组弹簧片支撑一个可动驱动线圈,确保驱动线圈能够在特定范围内自由运动,根据电磁感应定律,线圈在磁场中会受到电动力 F 为:

$$F = BIL \quad (2)$$

式中: B 为工作气隙中平均磁感应强度; I 为功率放大器供给的电流瞬时值; L 为切割磁力线的线圈导线的有效长度。通过调节功率放大器的输出电流频率和强度,可

以精确控制振动。

稳态电磁干扰测试装置采用的是交变磁场发生器,线圈采用铜线绕制,确保高效的电流传输和磁场生成,线圈安装在一个稳固的框架结构中,由非磁性材料制成,以避免对磁场的干扰。当电流 I 通过每个线圈时,根据安培定律,每个线圈在其周围产生一个磁场。对于单个圆形线圈,在其轴线上某一点产生的磁场 B 可表示为:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中: μ_0 是真空磁导率; z 是测量点与线圈中心的轴向距离,在亥姆霍兹线圈的配置中,由于两个线圈具有相同的半径和间距,并且流经它们的电流方向相同,这些磁场在两线圈之间相互叠加。在两线圈的中心区域,叠加的磁场效果使得该区域内的磁场非常均匀。

综合上述模块,构造多物理场耦合传感器测量测试平台,如图 2 所示。平台能够在同一实验中同时调控并模拟电场、磁场、温度、湿度、振动等多种物理场的耦合效应,模拟变电站内复杂的工作环境,增强了实验的环境代表性。

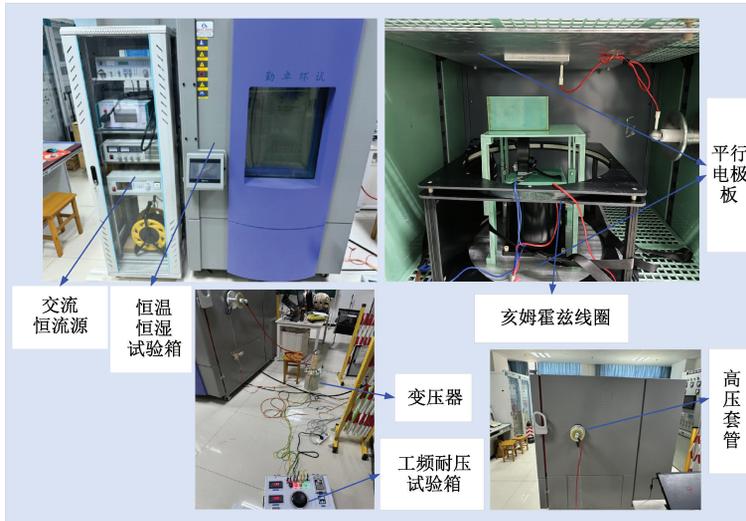


图 2 多物理场耦合传感器测试系统平台

Fig. 2 Sensor testing system platform under multi physics field coupling

2 多物理场耦合下超声波传感器影响分析

电力设备在放电过程中产生的声波的频谱很宽,可以从几十赫兹到几兆赫兹。超声波传感器在局部放电 (partial discharge, PD) 监测中,因其非接触的特性被广泛应用于电力设备如变压器、开关柜、电缆终端等的状态检测。但在实际运行环境中,常常存在多物理场耦合作用(如电场、磁场、湿度、温度与振动),这些都会干扰超声波的传播与接收,导致 PD 信号识别受到影响。

当环境中存在多个物理场时,传播介质及内部信号响应等都会受到干扰,导致测量误差。下面分析各物理场条件下误差产生的原因。

1) 温度场影响,温度是影响超声波在介质中传播速度的重要因素之一。超声波在空气中的传播速度 v 可以通过以下经验公式计算。

$$v(T) = 331.4 + 0.6T \quad (4)$$

式中: v 为传播速度; T 为温度。这表明环境温度会影响超声波的传播速度,从而影响传感器测量准确性。

2) 湿度场影响,空气湿度变化会降低空气的密度,影响声速。湿空气中的声速可以通过式(5)计算。

$$v_h(T, RH) = v(T) \cdot (1 + \alpha_h \cdot RH) \quad (5)$$

式中: RH 为相对湿度; α_h 为系数。

3) 电场影响,电场变化会引起压电元件的响应漂移,也可能通过电离气体影响超声波传播路径。影响模型较为复杂,简化可采用修正系数法。

$$v_E = v_0 \cdot (1 + \alpha_E \cdot E) \quad (6)$$

式中: E 为电场强度; α_E 为系数。若电场不均匀,可能造成声束弯曲。

4) 磁场影响,在强磁场(如大功率变压器或 GIS 中)下,磁场会耦合进压电陶瓷的电荷传输路径,产生感应噪声。感应噪声变化趋势如式(7)所示。

$$\Delta V \propto \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

式中: Φ 为磁通量。

5) 振动场影响,大型设备如变压器运行时本身有低频机械震动,外部机械振动会与超声波频率耦合,引发模式干扰,造成峰值漂移或杂波反射干扰。振动的影响难

以用精确的数学公式表达。

综上所述,得到多物理场条件下误差产生的原因如表 1 所示。具体为物理场变化→介质状态/传感器响应改变→超声波传播特性变化→PD 信号测量产生误差。

表 1 多物理场条件下误差影响因素

Table 1 Factors affecting errors under multiple physical field conditions

物理场	误差影响因素	关系
温度场 T	介质传输速度 v	$v(T) = 331.4 + 0.6T$
湿度场 RH	介质传输速度 v	$v_h(T, RH) = v(T) \cdot (1 + \alpha_h \cdot RH)$
电场 E	压电元件响应传播路径	$v_E = v_0 \cdot (1 + \alpha_E \cdot E)$
磁场 Φ	PD 感应噪声	$\Delta V \propto \frac{d\Phi}{dt}$
振动场 f	调制 PD 噪声	叠加干扰

虽然通过分析得到上述测量误差的核心影响链路,但实际中难以根据这些原因通过具体公式推算分析进行 PD 信号误差校正,并且实际工程应用中会产生多物理场耦合影响的情况,理论分析存在不全面的问题。因此需要构建本文多物理场耦合传感器测试平台,进行开展单物理场及二、三、四、五物理场耦合下的超声波传感器测量影响实验研究。

3 多物理场耦合下超声波传感器影响实验方案

为了测试多物理场耦合下的超声波传感器局放信号测量误差,在多物理场耦合传感器测试平台(图 2),对 PDS-T95 超声波传感器进行施加温度、湿度、电场、磁场以及振动下耦合影响实验。

1) 根据相关文献、传感器说明书以及 GB/Z 17799.6—2017 中对变电站中设备抗扰度要求,设置实验具体参数如表 2 所示。

表 2 实验参数设置

Table 2 Experimental parameter settings

参数名称	参数区间
电场强度/(kV/m)	0~12
温度/°C	-20~60
相对湿度/RH%	20~90
磁感应强度/ μ T	0~1 000
振动频率/Hz	50~800

2) 将超声波传感器放置于多物理场耦合传感器综合测试平台,保证所有物理场均可可靠施加。

3) 在多物理场耦合传感器综合测试装置接地处使

用放电发生器产生局放信号,电压设置为+6 kV,测试过程中保持超声波传感器位置、放电位置和放电电压不变。

4) 改变施加物理场参数,分别进行单物理场、双物理场、三物理场、四物理场、五物理场耦合测试。在进行多物理场耦合测试过程中,保持未参与耦合的物理场值在正常值范围内并保持不变。待所施加物理场稳定后,读取在不同物理场耦合环境下带电检测仪读取的超声波传感器多组测量数据,并记录数据。

4 多物理场耦合下超声波传感器测量结果分析

实验的核心目标是探讨多物理场耦合对超声波传感器影响的机理。在实验过程中,发现多个物理场的耦合作用显著影响传感器的测量。

4.1 超声波传感器多物理场耦合影响模型

结合经典物理理论,提出超声波传感器多物理场耦合的数学模型。超声波传感器的输出值 V 与多物理场(电场、磁场、温度、湿度、振动等)之间存在一定的耦合关系。传感器的测量值 V 可表示为一个多物理场耦合的函数,如式(8)所示。

$$V(E, B, T, RH, f) = \alpha_1 E + \alpha_2 B + \alpha_3 T + \alpha_4 RH + \alpha_5 f + \beta \quad (8)$$

式中: E 为电场强度; B 为磁感应强度; T 为温度; RH 为湿度; f 为振动频率; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 为待拟合的系数; β 为附加项。

该线性叠加模型假设传感器的响应是各个物理场影响的线性组合。通过实验数据拟合可获得这些系数,得到多物理场耦合影响模型。为了精简论文篇幅并避免叙述冗余,模型相关公式已整合于超声波传感器测试结果图内。

4.2 单物理场施加下超声波传感器测量影响分析

在单物理场影响测试时,施加单一温、湿、电、磁及振动物理场情况下,5 种物理场的参数设置如表 3 所示。

表 3 单物理场施加下参数设置

Table 3 Parameter setting under single physical field application

施加场	物理场				
	温度/°C	湿度/ RH%	电场/ (kV/m)	磁场/ μ T	振动/ Hz
温	-20~60	50	/	/	/
湿	20	20~90	/	/	/
电	20	50	2~12	/	/
磁	20	50	/	100~1 000	/
振动	20	50	/	/	50~800

注:“/”表示未施加该物理场,下同

本文相对误差为(测量值-基准值)/基准值,基准条件为 20 ℃、50RH%、不施加其他场。表 3 中温度施加范围在 -20 ℃~60 ℃ 测试为仅施加温度场的超声波传感器影响测试。其他场参数恒定为相对湿度 50%,未施加额外电

场、磁场与振动。仅施加湿、电、磁以及振动影响类似。

根据测试数据对超声波传感器测量值与施加物理场之间关系进行了曲线拟合,并得到相应公式,如图 3 所示。

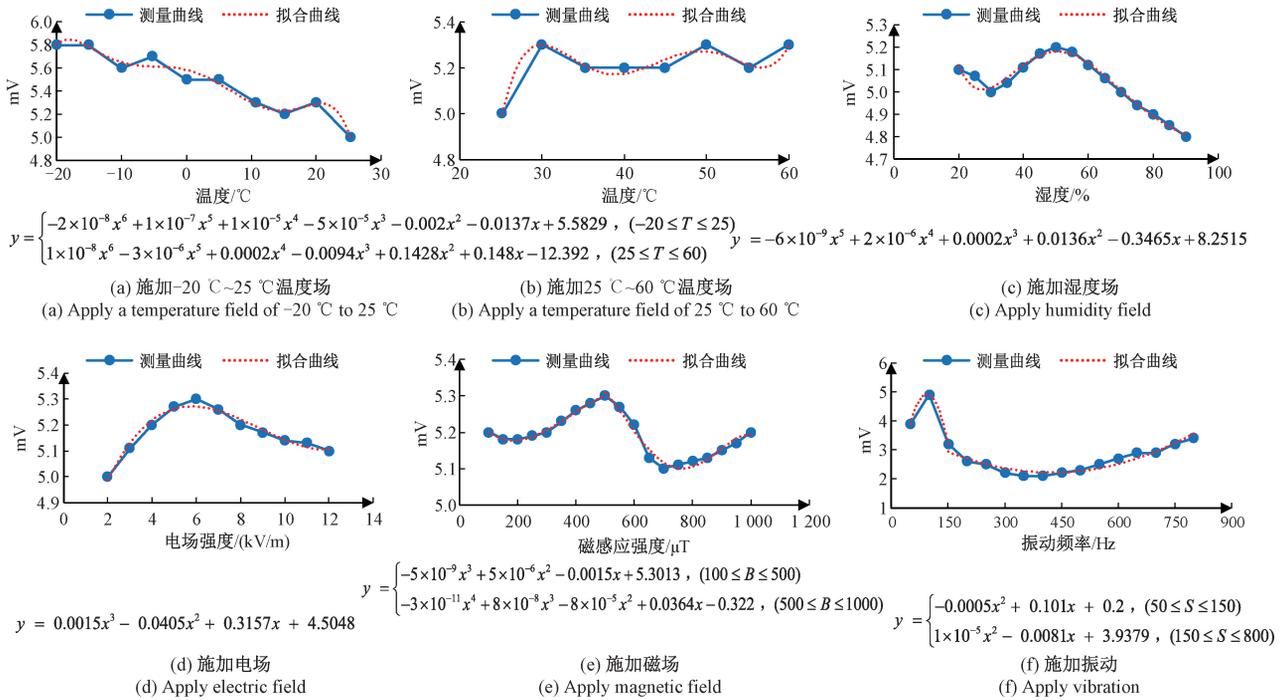


图 3 单物理场下超声波传感器测试

Fig. 3 Ultrasonic sensor testing under single physical field

在所施加的 5 种物理场中,振动会使超声波传感器测量到大量非局放信号,误差最大达到 69%,测量结果严重失真。排除振动的影响,仅施加其他单物理场的最大相对误差如表 4 所示。

表 4 施加单物理场下最大相对误差

Table 4 Apply maximum relative error under a single physical field

施加场	最大相对误差/%
振动场	69
温度场	9.4
湿度场	9.4
电场	5.6
磁场	3.7

表 5 双物理场耦合下参数设置

Table 5 Parameter setting under coupling of two physical fields

施加场	物理场				
	温度/℃	湿度/RH%	电场/(kV/m)	磁场/μT	振动/Hz
温-电	-20~60	50	2~12	/	/
温-磁	-20~60	50	/	100~1 000	/
温-湿	-20~60	20~90	/	/	/
温-振动	-20~60	50	/	/	50~800
电-磁	20	50	2~12	100~1 000	/
电-湿	20	20~90	2~12	/	/
电-振动	20	50	2~12	/	50~800
磁-湿	20	20~90	/	100~1 000	/
磁-振动	20	50	/	100~1 000	50~800
湿-振动	20	20~90	/	/	50~800

4.3 双物理场耦合下超声波传感器测量影响分析

在双物理场耦合影响测试时,5 种物理场的参数设置如表 5 所示。根据测试数据对超声波传感器测量值与施加物理场之间关系进行了曲线拟合,并得到相应公式,如图 4 所示。

在振动参与耦合的双物理场耦合环境下,传感器测量到的是大量的由振动产生的信号,已无法有效测量放电信号,误差最大为 52.8%;在不施加振动的情况下,双物理场耦合下最大相对误差(≥7.5%)数据统计如表 6 所示,温度与其他物理场耦合的环境下,传感器测量值大

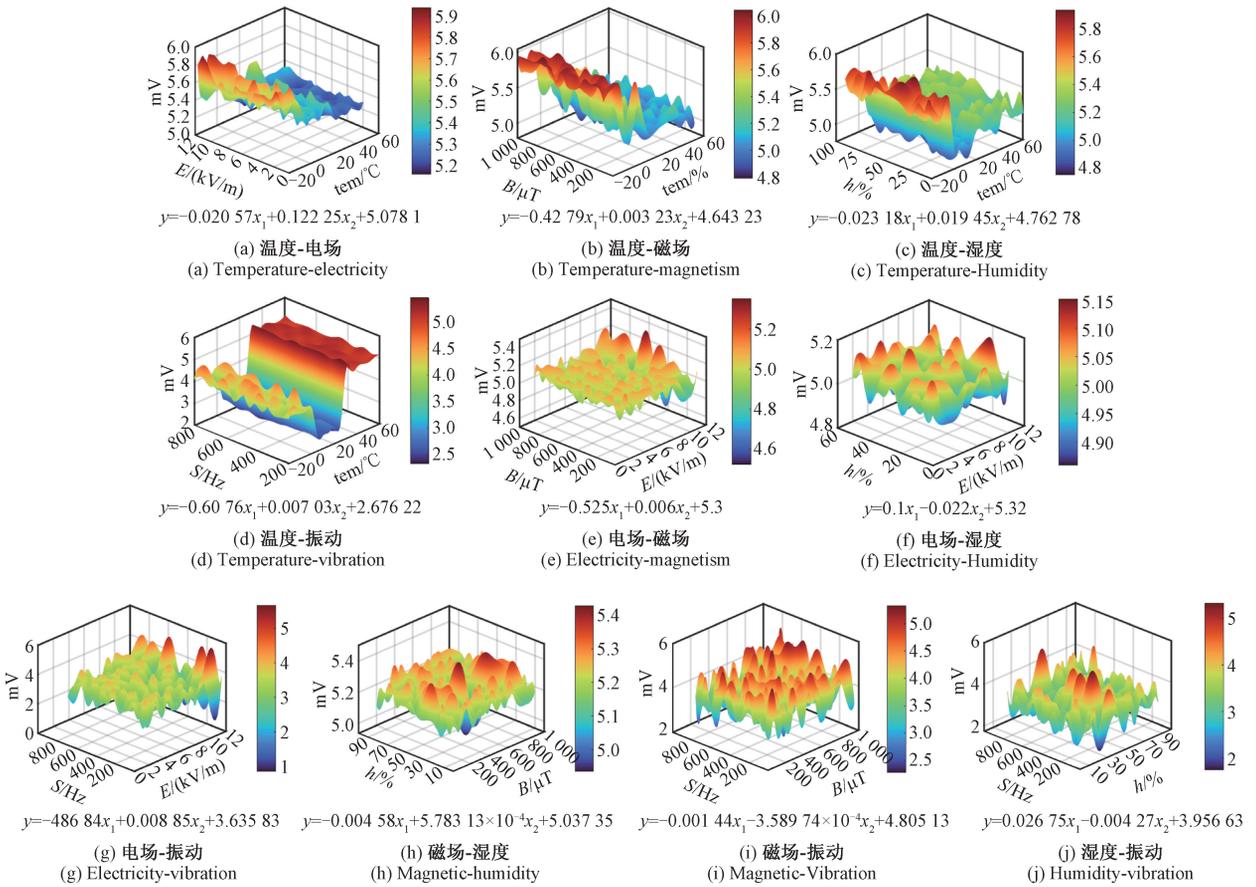


图 4 双物理场耦合下超声波传感器测试

Fig. 4 Ultrasonic sensor testing under coupling of two physical fields

小与变化趋势主要受温度影响,尤其在低温情况下,误差最大为 13.2%;在其余情况下,超声波传感器测量值随物理场变化在相对较小范围的波动,误差最大为 7.5%。

明显降低,误差最大为 9.4%;在不施加振动的情况下,传感器测量值主要受温度影响,三物理场耦合下最大相对误差($\geq 7.5\%$)数据统计如表 8 所示。

表 6 双物理场耦合下最大相对误差

Table 6 Maximum relative error under dual physical field coupling

施加场	最大相对误差/%
温度-湿度耦合	9.4
温度-电场耦合	9.4
温度-磁场耦合	13.2

4.4 三物理场耦合下超声波传感器测量影响分析

在三物理场耦合影响测试时,5 种物理场的参数设置如表 7 所示。根据测试数据对超声波传感器测量值与施加物理场之间关系进行了曲线拟合,并得到相应公式,如图 5 所示。

在施加振动的情况下,传感器测量到的是大量的由振动产生的信号,已无法有效测量放电信号,误差最大为 56.6%,严重失真,在不施加振动的情况下,传感器误差

表 7 三物理场耦合下参数设置

Table 7 Parameter setting under coupling of three physical fields

施加场	物理场				
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/RH%	电场/(kV/m)	磁场/ μT	振动/Hz
温-湿-电	-20~60	20~90	2~12	/	/
温-湿-磁	-20~60	20~90	/	100~1 000	/
温-湿-振	-20~60	20~90	/	/	50~800
电-湿-磁	20	20~90	2~12	100~1 000	/
振-湿-磁	20	20~90	/	100~1 000	50~800
振-电-磁	20	50	2~12	100~1 000	50~800
湿-电-振	20	20~90	2~12	/	50~800
振-电-温	-20~60	50	2~12	/	50~800
磁-振-温	-20~60	50	/	100~1 000	50~800
电-磁-温	-20~60	50	2~12	100~1 000	/

4.5 四物理场耦合下超声波传感器测量影响分析

在四物理场耦合影响测试时,5 种物理场的参数设

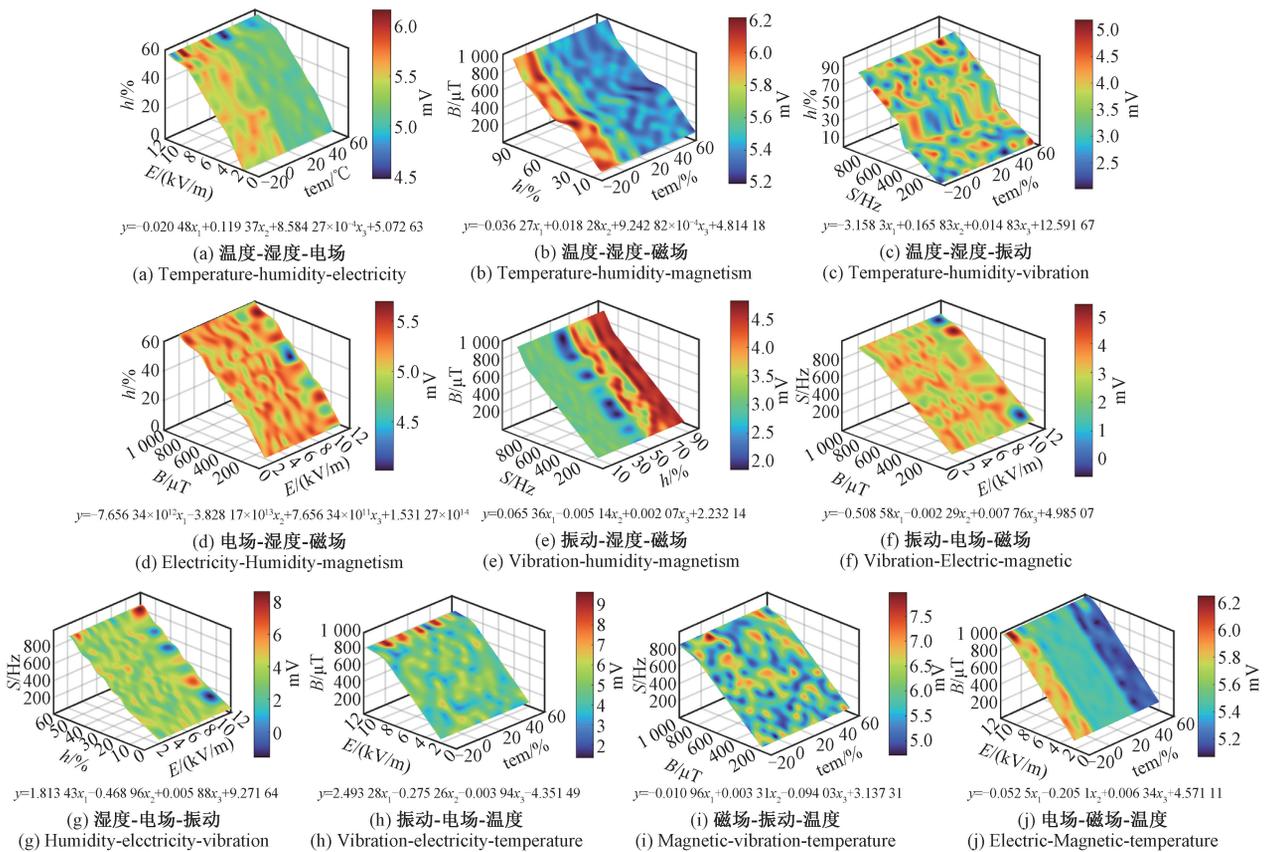


图 5 三物理场耦合下超声波传感器测试

Fig. 5 Ultrasonic sensor testing under coupling of three physical fields

置如表 9 所示。根据测试数据对超声波传感器测量值与施加物理场之间关系进行了曲线拟合,并得到相应公式,如图 6 所示。

表 8 三物理场耦合下最大相对误差

Table 8 Maximum relative error under coupling of three physical fields

施加场	最大相对误差/%
温度-电场-磁场耦合	15
温度-湿度-磁场耦合	13.2
温度-湿度-电场耦合	9.4
电场-磁场-湿度耦合	7.5

表 9 四物理场耦合下参数设置

Table 9 Parameter setting under coupling of four physical fields

施加场	物理场				
	温度/ ℃	湿度/ RH%	电场/ (kV/m)	磁场/ μT	振动/ Hz
温-湿-电-磁	-20~60	20~90	2~12	100~1 000	/
振-磁-温-湿	-20~60	20~90	/	100~1 000	50~800
振-温-磁-电	-20~60	50	2~12	100~1 000	50~800
电-湿-磁-振	20	20~90	2~12	100~1 000	50~800
振-电-温-湿	-20~60	20~90	2~12	/	50~800

在振动参与耦合的四物理场耦合环境下,测量结果仍严重失真,在对超声波传感器进行可靠固定后,传感器测量值误差明显降低,误差最大为 1.8%;在不施加振动的情况下,超声波传感器测量值变化趋势主要受温度影响,电场-磁场-温度-湿度耦合下最大相对误差为 9.4%。

4.6 五物理场耦合下超声波传感器测量影响分析

在五物理场耦合影响测试时,温度施加范围为 -20℃~60℃,电场强度施加范围为 2~12 kV/m,湿度施加范围为 20%~90%,振动频率施加范围为 50~800 Hz,磁感应强度施加范围为 100~1 000 μT,同时改变五场参数。根据测试数据对超声波传感器测量值与施加物理场之间关系进行了曲线拟合,并得到相应公式,如图 7 所示。

振动会使超声波测量结果严重失真,最大误差达到 60.3%。传感器测量值随温度与相对湿度的增大均呈下降趋势,在温度 -20℃~25℃和相对湿度 70RH%以上下降趋势更为明显。电场与磁场会使传感器测量值产生相对较小幅度的波动。

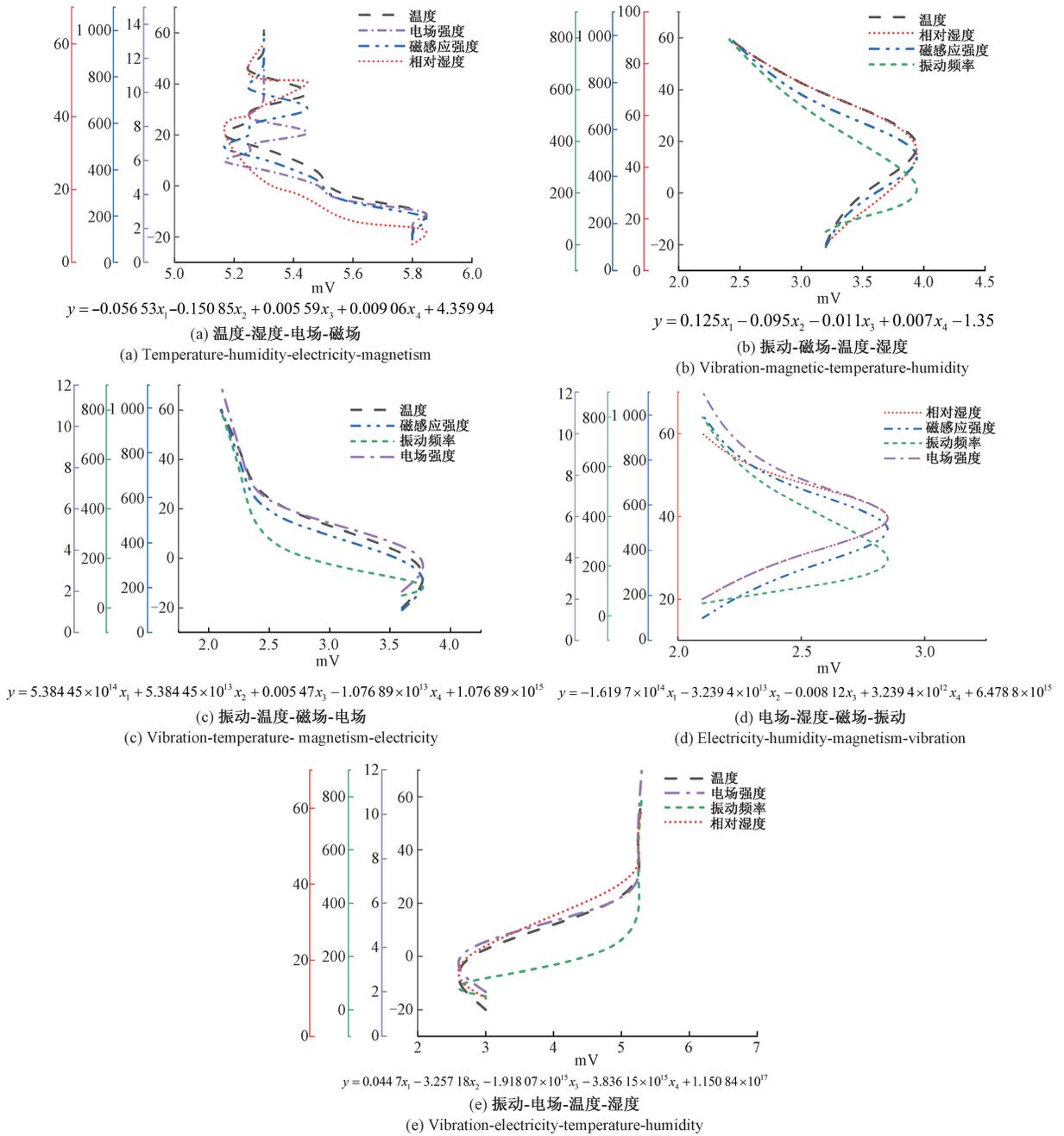


图 6 四物理场耦合下超声波传感器测试

Fig. 6 Testing of ultrasonic sensors under four physical field coupling

5 结论

本文针对超声波传感器在多物理场耦合下的测量影响量化问题,在多物理场耦合测试平台上,进行单个物理场及二、三、四、五物理场耦合下的超声波传感器测量实验。根据测量结果,得到多物理场耦合下超声波传感器测量影响模型,量化各物理场对超声波传感器测量结果的具体影响,可以为外部环境干扰下的测量提供校准参

考。本文提出的多物理场耦合下传感器影响测试技术,可推广至电流传感器、高频传感器、特高频传感器等多种传感器测量实验。

在超声波传感器实际应用中,需要关注电磁干扰、温湿度变化、机械振动等环境因素的影响。振动会使测量信号严重失真,传感器使用中需采取防震措施;温度及湿度对传感器误差影响较大,须按照研究得出的规律对传感器进行误差补偿;采取电磁屏蔽措施以减少外部电磁场对传感器测量的干扰。

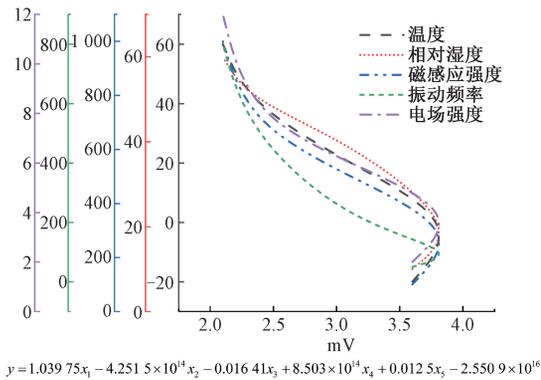


图 7 五物理场耦合下超声波传感器测试

Fig. 7 Testing of ultrasonic sensors under five physical field coupling

参考文献

- [1] 孙源,宋颜峰,王昊天,等. 开关柜局部放电超声-TEV融合检测技术 [J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5052-5060.
SUN Y, SONG Y F, WANG H T, et al. Ultrasonic TEV fusion detection technology for partial discharge in switchgear [J]. High Voltage Technology, 2023, 49(12): 5052-5060.
- [2] 张宇帅,隋浩冉,韩世杰,等. 一种用于高压电气设备局放超声检测的新型 EFPI 传感器 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 204-209.
ZHANG Y SH, SUI H R, HAN SH J, et al. A new EFPI sensor for ultrasonic detection of partial discharge in high-voltage electrical equipment [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(2): 204-209.
- [3] 颜育,姚露露,吴明,等. 电缆局部放电超声检测用高灵敏度柔性 PZT 压电超声传感器 [J]. 高电压技术, 2025, 51(7): 3225-3233.
YAN Y, YAO L L, WU M, et al. High sensitivity flexible PZT piezoelectric ultrasonic sensor for partial discharge ultrasonic testing of cables [J]. High Voltage Technology, 2025, 51(7): 3225-3233.
- [4] 王喜阳,肖福礼,李毅,等. 微电磁力称重传感器动态温度补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 335-343.
WANG X Y, XIAO F L, LI Y, et al. A dynamic temperature compensation method for micro electromagnetic force load cell [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 335-343.
- [5] 江银玉,丁勇,左锋,等. 霍尔效应式力传感器的温度补偿 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 9-17.
JIANG Y Y, DING Y, ZUO F, et al. Temperature compensation of Hall-effect force sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 9-17.
- [6] 王兰雨,陈红梅,张昊哲. 适用于霍尔电流传感器的温漂补偿电路设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 8-15.
WANG L Y, CHEN H M, ZHANG H ZH. Design of temperature drift compensation circuit for Hall current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 8-15.
- [7] 陈胜硕,胡杰祥,李志,等. 光学电压传感器温度响应特性分析与实验研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 169-178.
CHEN SH SH, HU J X, LI ZH, et al. Analysis and experimental study on temperature response characteristics of optical voltage sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 169-178.
- [8] 胡武鹏. 温湿度对于气压传感器核查工作的影响评估 [J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(3): 60-62,66.
HU W P. Evaluation of the influence of temperature and humidity on the verification work of pressure sensor [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2024, 41(3): 60-62,66.
- [9] 张巍,张洲威,彭春荣,等. 一种 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 239-248.
ZHANG W, ZHANG ZH W, PENG CH R, et al. Research on the anti-charge-interference method for MEMS three-dimensional electric field sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 239-248.
- [10] XU S, DENG X, ZHENG P, et al. Linearity range extension of magnetostrictive current sensors through magnetic circuit optimization [J]. Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73:1-13.
- [11] SHEN Y D, LI Y J, RAN R P, et al. Effect of substrate temperature on temperature sensitivity and magnetoresistance of CrO_xN_y thin film cryogenic sensor [J]. Ieee Sensors Journal, 2024, 24(16):25354-25359.
- [12] 杜世龙. 多物理场作用下燃气轮机用温度传感器的应力场仿真研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
DU SH L. Simulation Study on the stress field of temperature sensors for gas turbine under multiple physical fields [D]. Tianjin: Hebei University of

- Technology, 2021.
- [13] 赵琴,王立,郑然,等. 空间指向测量仪器的多物理场效应研究综述 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 1-16.
ZHAO Q, WANG L, ZHENG R, et al. Review of the research on the multi-physics field effects of space pointing determination instruments [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7):1-16.
- [14] 张施令,彭宗仁,程建伟,等. 基于三维构型与电热传感的特高压换流变压器出线装置区域数字孪生模型研究 [J]. 高压电器, 2022, 58(7):128-140.
ZHANG SH L, PENG Z R, CHENG J W, et al. Research on digital twin model of outgoing-line device area of UHV converter transformer based on three-dimensional configuration and electro-thermal sensing[J]. High Voltage Apparatu, 2022, 58(7):128-140.
- [15] LIU X L, CAI Z B, CUI Y, et al. Effect of different atmospheres on the electrical contact performance of electronic components under fretting wear [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2018, 51(15):155302.
- [16] 崔佳嘉,马宏忠,李楠,等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4):48-55.
CUI J J, MA H ZH, LI N, et al. Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4):48-55.
- [17] 姜岚,李远,智李,等. 基于 POD-RBF 代理模型和特征点 KNN 校正的电力舱温度反演方法 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(24):68-76.
JIANG L, LI Y, ZHI L, et al. Inverse temperature estimation of power cabin based on POD-RBF proxy model and feature point KNN Correction [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24):68-76.
- [18] 齐珂,王迪,谢喆,等. 考虑多物理场耦合特性的固体氧化物燃料电池瞬态特性研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(3):1264-1274.
QI K, WANG D, XIE ZH, et al. Research on transient characteristics of solid oxide fuel cells considering coupling features of multiphysics fields [J]. CIESC Journal, 2025, 76(3):1264-1274.
- [19] 倪帅. 极限电流型氧传感器的多物理场耦合特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
NI SH. Research on the Multi-physical field coupling characteristics of limiting current oxygen sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [20] 孟羚玉,陈长征,史宗辉,等. 永磁同步电机磁固热多物理场耦合振动噪声分析 [J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(4):43-49,117.
MENG L Y, CHEN CH ZH, SHI Z H, et al. Vibration and noise analysis of magnetic-solid-thermal multi-physical field coupling of permanent magnet synchronous motors [J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(4): 43-49,117.
- [21] 刘德崇. 变电站传感器多物理场仿真及可靠性评估研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
LIU D CH. Research on multi physical field simulation and reliability evaluation of substation sensors [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [22] 刘成成,杜汉东,雷刚,等. 逆变器供电下混合磁心爪极永磁电机的多物理场耦合分析 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(6):1758-1770.
LIU CH CH, DU H D, LEI G, et al. Multi-physics coupling analysis of permanent magnet claw pole machine with hybrid cores by inverter power supply [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6):1758-1770.
- [23] 丁睿. 电连接器多物理场耦合接触性能研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
DING R. Study of contact performance of electrical connector coupled with multiple physical fields [D]. Suzhou: Soochow University, 2023.

作者简介



刘家军, 2013 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能传感器技术、电力系统运行与控制。

E-mail: liujiajun-88@163.com

Liu Jiajun received his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2013. Now he is a professor and doctoral supervisor in Xi'an University of Technology. His main research interests include intelligent sensor technology, power system operation and control.



李晨婧 (通信作者), 2020 年于河南科技大学获得学士学位, 现为西安理工大学博士研究生, 主要研究方向为智能传感器技术。

E-mail: lcjing2021@126.com

Li Chenjing (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2020. Now she is a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology. Her main research interest includes intelligent sensor technology.