第 52 卷 第 2 期：825-835 高电压技术 Vol.52, No.2: 825-835
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250620

谐波环境下电容器损耗模型及其小样本参数拟合方法

孙启明，李沂新，祝令瑜，唐义政，汲胜昌
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：随着新型电力系统的快速发展，光伏、风电等新能源通过电力电子设备大量接入电网，导致电力系统中谐波含量不断增加。高比例谐波导致电容器的损耗进一步升高，影响设备使用寿命。该文围绕电容器在复杂谐波环境下的损耗精确计算问题，构建了考虑场强影响的损耗物理模型，提出基于物理模型的小样本拟合方法，从而实现电容器损耗的精确计算。首先分析了谐波环境下电容器的损耗组成，分别对金属损耗和介质损耗进行物理建模。其次，通过聚丙烯介质在不同电场强度下的实测数据，结合双势阱模型分析聚丙烯热离子极化机理，建立了考虑场强非线性影响的电容器损耗模型。提出基于物理模型的小样本参数拟合损耗计算方法，采用差分进化算法结合 L-BFGS-B 的混合优化策略，提升非线性模型参数识别的稳定性与精度。最后，通过实测数据进行验证，结果表明：所提损耗模型在多谐波工况下的最大误差不超过 0.11 W，相对误差低于 5%，显著优于传统经验模型，具备良好的精度与泛化能力。该方法在小样本条件下依然能实现对复杂谐波场景下电容器损耗的精准计算与评估，可为新型电力系统中电容器的温度评估提供理论依据。

关键词：谐波环境；小样本参数拟合；双势阱模型；电场强度；介质损耗

Capacitor Loss Modeling and Small-sample Parameter Fitting Under Harmonic Conditions

SUN Qiming, LI Yixin, ZHU Lingyu, TANG Yizheng, JI Shengchang
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: With the rapid development of new electric power systems, large-scale integration of renewable energy sources such as photovoltaic and wind power via power electronic converters has led to increased harmonic content in the grid. A high proportion of harmonics significantly exacerbates capacitor losses, accelerates dielectric aging, and shortens service life. To address the challenge of accurately evaluating capacitor losses under complex harmonic conditions, this study develops a loss model considering nonlinear electric field effects and proposes a small-sample parameter fitting method guided by physical model. Firstly, the loss components under harmonic excitation are analyzed, and physical models are established for conductor and dielectric losses. Secondly, experimental data on polypropylene dielectric under varying field strengths are used to analyze the thermionic polarization mechanism via a double-well potential model, and to establish a capacitor loss model after taking into account the nonlinear effects of field strength. Besides, a hybrid optimization strategy combining differential evolution (DE) and L-BFGS-B is employed to improve parameter identification stability and accuracy. Finally, experimental validation shows that the proposed model achieves a maximum error below 0.11 W and a relative error under 5% under multi-harmonic conditions. The method outperforms conventional empirical models in accuracy and generalization, and remains effective under limited sample conditions, providing a reliable basis for capacitor loss and thermal evaluation in new electric power systems.

Key words: harmonic environment; small sample parameter fitting; double-well potential model; electric field intensity; dielectric loss

0　引言

随着我国新型电力系统建设不断推进[1]，高比例新能源和高比例电力电子设备正成为电力系统的发展趋势[2-3]，新能源输电过程中需要考虑电压调节、无功支撑和系统谐波等问题，需要大量电容器起到调节输出电压、提供无功补偿、吸收系统谐波的作用[4-5]。据统计，在直流换流站设备成本中，电容器设备成本占比可达 11%[6]。光伏、风电等分布式能源通过电力电子变换器大量接入电网，导致电力系统中谐波成分不断增加[7-9]。谐波会导致电容器损耗增加，使电容器设备的热稳定温度升高，高温会加速电容器内部聚丙烯电介质老化，介质材料的老化将进一步导致介质损耗增加，影响设备使用寿

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2406900)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2406900).

命[10-12]。

电容器的介质损耗可以分为极化损耗和电导损耗，温度、频率、电场强度都会通过影响电介质中不同弛豫过程的响应行为和内部载流子跃迁势垒进而影响介质损耗。现有研究大多只关注温度和频率对电容器介质损耗的影响，HE Yushuang 等人研究了温度和频率对金属化膜电容器介电性能的影响，使用 LCR 测量仪在 20~160 ℃、20~10^5 Hz 条件下测量了电容器的介质损耗[13]，实验电压为 1 V，实验结果显示，在较低温度下温度对介质损耗的影响较小，温度升高后电容器介质损耗升高，同时金属化膜电容器的介质损耗也随频率的升高而升高。ZHANG Nanyan 等人使用 Novocontrol 高精度宽带介电谱仪测量了 BOPP 薄膜的介质损耗随温度的变化规律[14]，测量电压为 1 V，温度范围为 20~150 ℃，测量结果显示 BOPP 薄膜随温度升高而升高。程璐等人研究了频率对 BOPP 介质损耗的影响[15]，低压宽频介电谱仪测试结果显示介电损耗角正切值在 0.1%~0.2%的范围内，并且在 1~10 kHz 频率区间出现了介电松弛峰。

在实际运行工况中，电容器中聚丙烯介质的工作场强一般在 50 kV/mm 以上[16]，而目前对聚丙烯的介质响应测试一般都在低电压(1~5 V)下进行，高电场强度下聚丙烯内部载流子的浓度和跃迁势垒相较低电压下都会发生改变，进而影响了电容器的介质损耗。CHENG Lu 等人针对介质材料受电场的影响进行了研究[16]，测试了聚丙烯基薄膜的介质损耗，测试结果显示聚丙烯薄膜的介质损耗随电场增加而增加，且存在“平台”现象，并通过空间电荷测试说明在高场作用下介质损耗增加的原因是离子跳变。

现有研究在对谐波下电容器进行损耗计算时，通常先计算各频率的发热功率，然后再进行线性叠加。XING Zhaoliang 等人先计算了电容器在各频率下的发热功率[17]，然后再累加计算总发热功率，进一步计算电容器的热场分布和热点温度，但并未考虑电场强度对介质损耗的影响。吴永利等人使用工频下介损值估算各次谐波频率下的介损值[18]，分别计算了各次谐波下的损耗累加得到全谐波损耗。但谐波与基波的不同相位会导致电容器承受电压幅值存在较大差距，而场强又会影响聚丙烯介质材料的介质损耗，因此，在计算电容器损耗功率时，需考虑电场强度对介质损耗的影响。

基于“物理场仿真+数据驱动”的电力设备损耗计算方法需要大量训练样本[19]，且传统数据驱动方法(如神经网络[20]、响应面法[21]等)对训练样本数量高度敏感，通常依赖大量覆盖多工况的历史数据以学习非线性输入输出映射关系[22]。在样本不足或非线性结构复杂的情况下，该类方法常易陷入过拟合，导致模型泛化能力差，预测精度难以保障。尤其在实际工程中，获取高质量损耗样本成本较高、试验空间有限，传统方法的样本依赖性制约了其在复杂谐波工况下的推广应用。

针对电容器在复杂谐波环境下损耗功率计算中现有研究的不足，本文提出了谐波环境下基于物理模型的小样本拟合方法，构建了电容器在谐波环境下的损耗功率计算模型，重点分析电场强度对聚丙烯介质损耗的影响规律及其物理机制，采用基于“物理建模+小样本拟合”的方法对电容器的发热损耗进行了拟合计算。首先分析了谐波环境下电容器的损耗组成，分别对金属损耗和介质损耗进行物理建模。其次，通过实验测量聚丙烯介质在不同电场强度下的损耗特性，并基于双势阱模型对其微观机制进行了深入探讨。基于介质损耗受电场强度的影响规律，构建了考虑场强影响的电容器损耗精确计算模型，采用混合优化算法保证小样本数据集下模型的准确计算。最后，利用实测数据对所提模型进行验证，并与传统方法进行对比，结果表明本方法在谐波工况下能够更准确地反映电容器的实际损耗特性，为新型电力系统中电容器的温度评估和稳定运行提供参考。

1 谐波环境下电容器损耗物理建模

电容器单元在复杂谐波条件下运行时，其总损耗主要由两部分构成：一是由电流流过导体引起的金属损耗，二是电介质在交变电压作用下产生的介质损耗。在实际谐波工况中，电流和电压均包含多种频率分量，通过测试电容器在各谐波电流与电压激励和组合电压下的响应，可以分别计算不同频率分量和电压幅值对总损耗的贡献，为电容器在谐波环境下的损耗建模提供依据。

1.1 电容器金属损耗

在谐波环境下，交流电流流过金属导体时会产生趋肤效应，金属导体的交流电阻会发生变化，导致导体损耗增加。电容器单元中的导体包括元件铝箔电极、内熔丝、汇流铜排和焊点。其中，元件铝箔电极的厚度通常为几微米，在电容器谐波范围内

电阻不随频率变化，记元件铝箔的等效串联电阻为 R_e。放电电阻与电容器芯子并联，其阻值通常为兆欧姆级，受趋肤效应影响可忽略，记放电电阻阻值为 R_{fd}。其余金属导体在电容器工作谐波范围内均可能存在趋肤效应。

受趋肤效应影响的导体电阻值随频率增大而增大，则金属损耗 P_m 可表示为：

$$P_m = \sum_{h\in H} I_h^2 \left(R_e + \frac{1}{(\omega_h C)^2 R_{fd}} + (1+k_m\omega_h)R_m\right) \quad (1)$$

式中：$H=\{h_n\}$为电容器承受的谐波频次组合；I_h 为各次谐波电流有效值；ω_h 为各次谐波电流角频率；R_m 为内熔丝、焊点等金属导体阻值；k_m 为金属导体趋肤效应系数。

1.2 电容器介质损耗

介质损耗是电介质材料在交流电场作用下，由电导和极化的滞后效应引起的功率损耗。通常使用介质损耗角正切值 tanδ 表示，目前电容器最广泛使用的介电材料为聚丙烯(polypropylene，PP)，现有研究表明，电容器的实际运行过程中承受电压频率范围在 50~2 450 Hz，大于 2 450 Hz 分量可以忽略不计[23-24]，在此频段内聚丙烯薄膜的 tanδ 几乎不随频率变化[25]，则介质损耗 P_d 可以表示为：

$$P_d = U^2\omega C\tan\delta \quad (2)$$

式中：U 为聚丙烯介质承受的电压有效值；ω 为电压角频率；C 为电容值。由式(2)可知，当电容器承受谐波电压时，介质损耗随频率增加成比例线性增加。由文献[16]可知，聚丙烯的介质损耗在一定范围内随电场升高而升高，谐波成分的增加将导致电容器承受的电压幅值增加，进而导致介质损耗进一步升高。因此，为精确计算复杂谐波环境下电容器单元的介质损耗，需考虑谐波叠加后频率、谐波电压有效值和电压幅值对介质损耗 P_d 的影响，即：

$$P_d = f(U_{RMS}, U_{peak}, \omega) \quad (3)$$

2 考虑场强非线性影响的介质损耗机理分析与建模

2.1 介质损耗随电场变化规律

电容器用聚丙烯薄膜由于在生产过程中使用的催化剂、抗氧化剂等添加剂未完全清除，或加工时水分子等微小颗粒可能混入材料中等原因而存在杂质缺陷。由于库仑力的作用，杂质离子容易在其周围束缚异号电荷形成填隙离子，填隙离子在周围不同位置的改变实际上是杂质离子的跳跃，在跳跃过程中要克服一定的势垒，在完整性较差的晶体中，跳跃极化的贡献是显著的[26]。聚丙烯由于高分子链的复杂排列，其结晶度通常较低，存在大量非晶区，导致结构缺陷较多，如链折叠不完善、分子链缠结等。对于聚丙烯这类半结晶聚合物，由于负亲和作用，注入的电荷主要在非晶区输运，这意味着在非晶区较多的聚丙烯样品中空间电荷具有较高的迁移率[27]。

在高压电场的作用下，聚丙烯内部离子电荷的迁移势垒会发生变化，影响离子的迁移率，热离子极化和空间电荷极化的强度变化会导致聚丙烯薄膜介电损耗增加。为了研究场强对聚丙烯薄膜介电损耗的影响规律，使用宽带介电测试平台加 HVB4000 高压电源模块测试聚丙烯薄膜在 50 Hz、不同温度下的介电损耗谱，如图 1 所示。

根据图 1 可以看出，当场强在 10 kV/mm 时，聚丙烯损耗开始上升，在 30~50 kV/mm 之间损耗增速降低，产生“平台”现象，当场强大于 50 kV/mm 时，损耗进一步快速上升，并在 60~70 kV/mm 区间又出现“平台”现象。伴随场强持续升高，聚丙烯介质中注入电荷增加，同时杂质解离，离子浓度升高，克服内摩擦阻力产生电流，导致聚丙烯损耗持续增加。在电场小于 70 kV/mm 范围内，损耗快速增加说明此场强区间内产生了弛豫介电响应，几处损耗增加过程对应不同势垒范围内热离子极化过程的增强。

2.2 双势阱模型

热离子极化过程的越障运动可以用双势阱弛豫模型描述[25]，如图 2 所示，离子的迁移发生在两

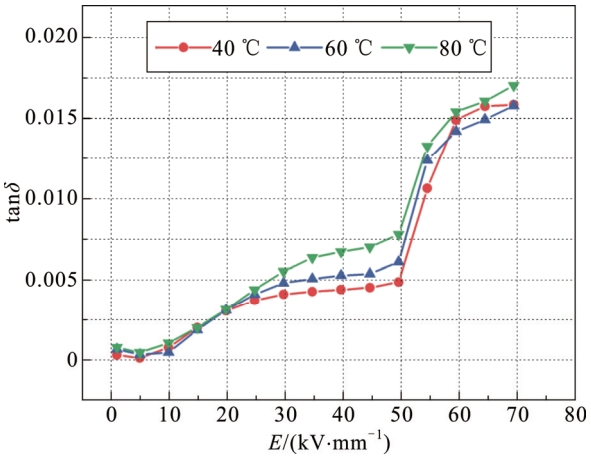


图 1 50 Hz、不同温度下 PP 介电损耗正切随场强的变化

Fig.1 Change of dielectric loss tangent of PP with field strength at 50 Hz and different temperature

个势能极小值的稳定态 M、N 之间。双势阱系统的势能曲线函数通常被表示为：

$$V(x)=-\frac{a}{2}x^2+\frac{b}{4}x^4 \tag{4}$$

式中：a、b 为势能参数，满足 a>0，b>0，两个稳定态分别位于 $x=\pm x_0$ 处。在无外电场时，电荷量为 q 的离子稳定在$\pm x_0$ 处，跃迁势垒 E_a 表示为：

$$E_a=V(0)-V(x_0)=\frac{a^2}{4b} \tag{5}$$

在外加电场 E 的作用下，系统势能函数修正为：

$$V'(x)=-\frac{a}{2}x^2+\frac{b}{4}x^4-qEx \tag{6}$$

在外电场作用下，离子可能发生迁移，其跃迁速率 Γ 满足 Arrhenius 定律：

$$\Gamma=\Gamma_0 \mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}} \tag{7}$$

跃迁势垒 E'_a 则表示为：

$$E'_a=V'(0)-V'(x_0)=\frac{a^2}{4b}-qEx_0 \tag{8}$$

为突出说明越障运动对极化弛豫的影响，本文忽略粒子间的相互作用，并假设势垒高度 E_a>>kT。施加外加电场 E 后，粒子从 M 迁移至 N 处的概率增大，宏观上表现为粒子的定向迁移，即离子的极化过程。在双势阱系统中，离子的迁移率 μ 的数学表达式如下：

$$\mu=\mu_0 \mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}} \tag{9}$$

在外加电场 E 的作用下，离子从 M 到 N 位置迁移的迁移率增大，从 N 到 M 迁移的迁移率减小，宏观上表现为热离子极化定向迁移的离子浓度 Δn 为：

$$\Delta n=n_0\frac{\omega_0}{2\pi}\mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}}(\mathrm{e}^{\frac{qEx_0}{kT}}-\mathrm{e}^{-\frac{qEx_0}{kT}}) \tag{10}$$

式中：n_0 为不施加外电场时离子浓度；ω_0 是离子在势阱中的振动角频率。

2.3 考虑场强非线性影响的介质损耗模型

根据双势阱弛豫模型所描述的热离子极化过程，外施电场会激发热离子极化使离子产生定向迁移，该定向迁移过程将产生附加损耗。附加损耗 ΔP_d 由下式给出：

$$\Delta P_d=V\Delta nq\mu_0E^2=Vn_0\frac{\omega_0}{2\pi}\mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}}q\mu_0E^2(\mathrm{e}^{\frac{qEx_0}{kT}}-\mathrm{e}^{-\frac{qEx_0}{kT}})=$$
$$Sdn_0\frac{\omega_0}{2\pi}\mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}}q\mu_0(\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})^2(\mathrm{e}^{\frac{q\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d}x_0}{kT}}-\mathrm{e}^{-\frac{q\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d}x_0}{kT}}) \tag{11}$$

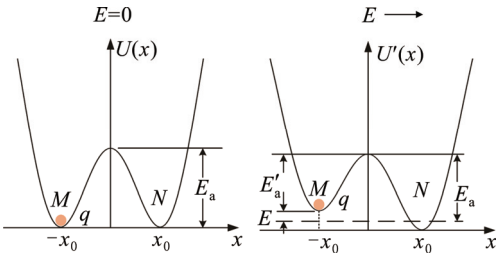


图 2 双势阱弛豫模型

Fig.2 Double well potential model

式中：V 为聚丙烯介质体积；S 为聚丙烯薄膜有效面积；d 为薄膜厚度。记 ϕ_p 和 γ 为热离子极化损耗常数：

$$\Phi_p=Vn_0\frac{\omega_0}{2\pi}\mathrm{e}^{-\frac{E_a}{kT}}q\mu_0 \tag{12}$$

$$\gamma=\frac{qx_0}{kT} \tag{13}$$

则附加损耗 ΔP_d 可表示为：

$$\Delta P_d=\Phi_p(\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})^2 2\sinh(\gamma\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d}) \tag{14}$$

电容器在谐波环境下的介质损耗 P_d 可由下式计算：

$$P_d=\sum_{h\in H}(U_h^2\omega_hC\tan\delta)+\Phi_p(\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})^2 2\sinh(\gamma\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d}) \tag{15}$$

式中：h 为谐波次数；U_h 为各频次电压有效值。

3 基于物理模型的小样本拟合损耗计算方法

为提高复杂谐波工况下电容器损耗计算的准确性，提出一种基于物理模型的小样本数据拟合电容器损耗计算方法。该方法基于参数可辨识的电容器损耗物理模型结构，融合小样本实验数据，通过混合优化算法实现对非线性模型参数的准确识别，实现电容器损耗模型在复杂谐波环境下的准确求解。

3.1 参数可辨识的电容器损耗计算物理模型

电容器在电力系统中承受谐波特性受负载功率波动、开关器件的开关频率和占空比的影响，谐波相位不同会改变电容器承受电压的幅值，影响电容器的介质损耗计算。

因此，计算电容器单元在谐波环境下损耗时，除已知电压、电流有效值及各次谐波含量外，还需获得电压幅值。电容器单元损耗 P 由介质损耗 P_d 和金属损耗 P_m 组成：

$$P=\sum_{h\in H}(U_h^2\omega_h C\tan\delta)+\Phi_{\mathrm{p}}(\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})^2\times 2\sinh(\gamma\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})+\sum_{h\in H}I_h^2(R_{\mathrm{e}}+\frac{1}{(\omega_h C)^2R_{\mathrm{fd}}}+(1+k_{\mathrm{m}}\omega_h)R_{\mathrm{m}})=\sum_{h\in H}I_h^2(\frac{\tan\delta}{\omega_h C}+R_{\mathrm{e}}+\frac{1}{(\omega_h C)^2R_{\mathrm{fd}}}+(1+k_{\mathrm{m}}\omega_h)R_{\mathrm{m}})+\Phi_{\mathrm{p}}(\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d})^2\times 2\sinh(\gamma\frac{U_{\mathrm{peak}}}{d}) \tag{16}$$

式(16)中的损耗参数可通过对电容器的测试中获得，针对单台电容器试品，在其老化状态不变的情况下，损耗参数不变。对试品施加工况 $G=\{g_1, g_2, \cdots, g_m\}$，其中 $g=\{H, \{I_h\}, U_{\mathrm{peak}}\}$，可以获得电容器的损耗 $P=\{P_1, P_2, \cdots, P_m\}$，则构建电容器损耗计算物理模型如下：

$$P=\sum_{h\in H}I_h^2(\frac{\alpha_1}{\omega_h^2}+\frac{\alpha_2}{\omega_h}+\alpha_3\omega_h+\alpha_4)+\beta_1U_{\mathrm{peak}}^2\sinh(\beta_2U_{\mathrm{peak}}) \tag{17}$$

式中：h 为谐波次数；$H=\{h_n\}$为电容器承受的谐波频次组合；I_h 为第 h 次谐波的电流有效值；$\omega_h=h\times 2\pi f_0$ 为角频率；U_{peak} 为该工况下测得的电压峰值；α_1、α_2、α_3、α_4 为各频次线性叠加的损耗项参数；β_1、β_2 为受场强非线性影响的损耗项参数。

模型结合了电容器损耗基于趋肤效应的频率响应机制和由热离子极化导致的非线性电场响应机制，针对电容器目前所承受的复杂谐波工况，从微观机理和工程实际出发，表达了电容器在复杂电流与电压作用下的损耗行为。由式(17)可知，本文所提电容器损耗计算物理模型中所有变量均由试验测得，且模型中各参数均分布在不同非线性结构中，具有明确物理意义和可辨识性。因此，本文所提物理模型可以在小样本数据集中使用优化策略进行求解与拟合。

3.2 基于物理模型的小样本损耗建模与混合优化识别方法

电容器损耗计算问题可利用基于物理机制构建的显式模型结构，将预测问题转化为参数辨识问题，即在小样本数据集 $D=\{(g_i, P_i)\}_{i=1}^N$ 上，拟合式(17)中的参数向量 $\boldsymbol{\theta}=[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2]^{\mathrm{T}}$，以最小化拟合值与实测值之间的误差，即：

$$\min_{\boldsymbol{\theta}}\sum_{i=1}^{N}\left|P(g_i;\boldsymbol{\theta})-P_i^{\mathrm{measured}}\right| \tag{18}$$

式中：$g_i=\{H_i, \{I_{h,i}\}, U_{\mathrm{peak},i}\}$表示第 i 个样本对应的输入工况。由于损耗表达中包含频率倒数、线性、平方项及指数非线性项，使得目标函数呈现多峰、非凸等特征，因此在小样本条件下对优化方法提出了更高要求。

式(17)中 $\beta_1U^2_{\mathrm{peak}}\sinh(\beta_2U_{\mathrm{peak}})$项描述了聚丙烯介质损耗受电场强度影响的非线性关系。其中 $\sinh(x)$函数在 x 较大时梯度波动剧烈，容易导致拟合陷入局部最优或无法收敛。为实现拟合模型中多个非线性参数的有效识别，本文采用差分进化(differential evolution, DE)与拟牛顿法(limited-memory broyden-fletcher-goldfarb-shanno, L-BFGS-B)相结合的混合优化策略，并引入动态切换机制，流程图如图 3 所示。在该策略中，首先利用 DE 算法的全局搜索能力，在较大的参数空间内获取具有较高质量的初始可行解，DE 算法具备良好的全局探索能力，能够有效避免陷入局部最优；将 DE 算法的解作为初值引入 L-BFGS-B 算法，在局部范围内进一步迭代求解，L-BFGS-B 能够在给定边界条件下快速逼近局部最优解，以加速收敛至局部最优解；动态切换机制通过监控适应度函数在最近 M 轮的标准差 σ，当 σ 小于预设阈值 ε_0 时，视为进入局部收敛区间，自动切换至 L-BFGS-B 进行局部精调，从而在保持全局搜索能力的同时提升计算效率。

该混合优化策略充分结合了 DE 在全局搜索阶段的准确性与 L-BFGS-B 在局部收敛阶段的高效性，同时避免了陷入局部最优或计算冗余，在保证优化稳定性的同时提升了参数识别的计算精度与计算效率，实现电容器损耗物理模型中非线性参数的

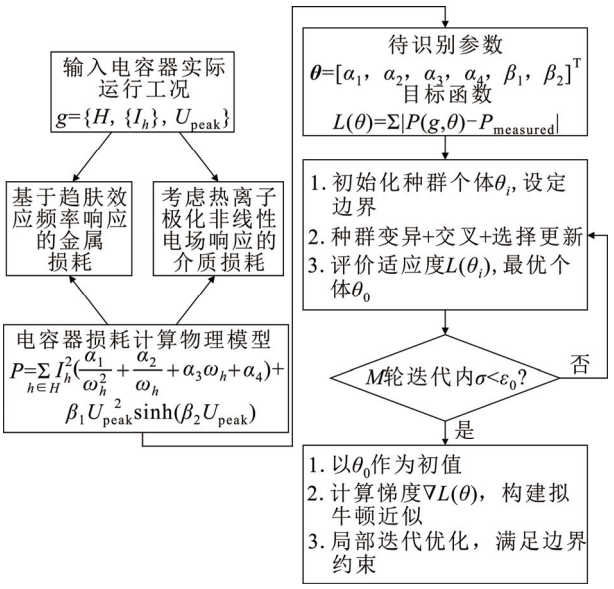


图 3 混合优化求解策略流程图

Fig.3 Strategy of hybrid optimization solution

高效辨识。

4 试验验证与损耗模型对比分析

为验证所提出的基于物理模型的小样本拟合电容器损耗计算方法的有效性，本文搭建了具备谐波加载和损耗精密测量的试验平台，并以高压并联电容器样机作为被测对象，开展多组工况下的谐波损耗试验，获取实际损耗数据作为模型训练与测试的基础。

4.1 试验平台

电容器谐波加载与损耗测量平台包括谐波加载系统、测试系统及电容器样机 3 个部分。试验测试平台如图 4 所示。

谐波加载系统包括多频合成电源、中频变压器、电流反馈控制及上位机组成。多频合成电源可输出包含谐波分量的复合电流，电流频率范围为 50~2 450 Hz，各频率分量幅值与相位均可通过上位机独立调整，复合电流通过中频变压器加载到电容器样机上。通过调节基波电流与谐波电流的幅值及相对相位，可精确控制加载电压的波形，模拟电容器的复杂谐波环境。

测量系统使用 HIOKI PW8001 功率分析仪搭配 HIOKI 高精度电流互感器 CT6872 和 AC/DC 高压分压器 VT1005 测量电容器样机在不同工况下的损耗。PW8001 功率分析仪搭配 CT6872 和 VT1005 可以实现电压电流相位补偿，PW8001 主机可自动获得传感器的相位特性，并以 0.001°的分辨率进行补偿，测量系统通过 15 MHz/18 位高精度采集电压电流数据，将电压电流采样数据进行降噪处理后，通过数值积分实现电容器损耗高精度计算。

本文以 BAM2.28-16.5-1W 型号的电容器样机为试品进行测试，其额定电压为 2.28 kV，额定电容为 10.1 μF，其采用聚丙烯薄膜为介质，具备良好的频率响应和热稳定性。全膜型电容器广泛应用于电力系统的无功补偿及滤波等环节，具有代表性工程背景。

4.2 电容器样机损耗分析

为全面评估损耗计算模型的效果，试验设置了两种工况数据，开展了单频电流与含高比例谐波的组合电流注入实验。首先，对样机分别施加纯单一频次电流，频次包括 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、23、25、35、37、47 及 49 共 16 组，电流有效值统一设置为 7.6 A，电流频次包含低、中、高频段，以考察不同频率电流下损耗模型的响应特性。

进一步地，本文在 50 Hz 基波电流的基础上叠加 3、5、13 和 25 次谐波形成组合电流，3 次和 5 次谐波为电力系统中最主要的低次谐波来源，13 次谐波属于系统中的中频段典型谐波，而 25 次谐波则代表高频分量，用于考察模型在宽频谐波条件下的拟合能力与非线性响应特性。基波电流有效值为 6.88 A，叠加谐波电流的有效值均设为 3.35 A。将谐波相位设置为 0°、90°和 180°，在保证电流有效值和频次组合不变的情况下探究电压峰值变化及其对电容器损耗的影响。最终共采集 31 种不同工况下电容器样机的损耗样本，具体试验条件见表 1 和表 2，电压峰值为实测值。

从表 1、表 2 中可知，施加单频电流时随电流频次增加，电压峰值减小；施加组合电流时，在相同谐波电流条件下，随谐波相位改变，电压峰值改变较大，谐波频次越低，电压峰值随谐波相位的改变越大。所测得电容器样机在不同工况下的损耗如图 5、图 6 所示。

图 5 展示了施加单次谐波电流的条件下，电容器损耗功率随谐波次数的变化趋势，电流有效值均

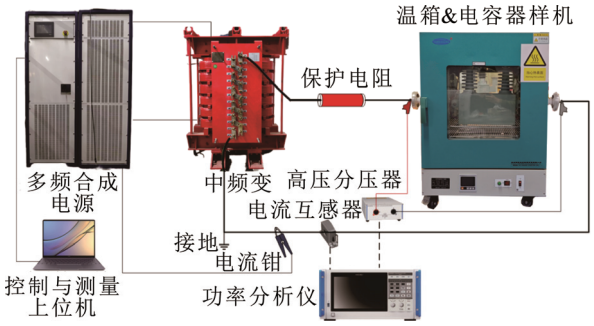


图 4 电容器谐波加载与损耗测量平台

Fig.4 Test system of capacitor harmonic loading and loss measurement

表 1 单频电流试验条件

Table 1 Experimental conditions of single frequency current

电流频次	电压峰值/V	电流频次	电压峰值/V
1	3 428.44	17	200.75
3	1 129.61	19	179.50
5	676.88	23	148.70
7	483.38	25	136.86
9	376.81	35	98.31
11	308.47	37	92.64
13	261.53	47	72.69
15	226.41	49	61.26

表 2　组合电流试验条件

Table 2　Experimental conditions of combined current

电流频次组合	谐波相位	电压峰值/V
1+3	0°	2 691.88
	90°	3 358.13
	180°	3 592.82
1+5	0°	3 383.44
	90°	3 275.01
	180°	2 970.32
1+13	0°	3 195.32
	90°	3 181.57
	180°	3 122.51
1+25	0°	3 146.88
	90°	3 141.57
	180°	3 123.76

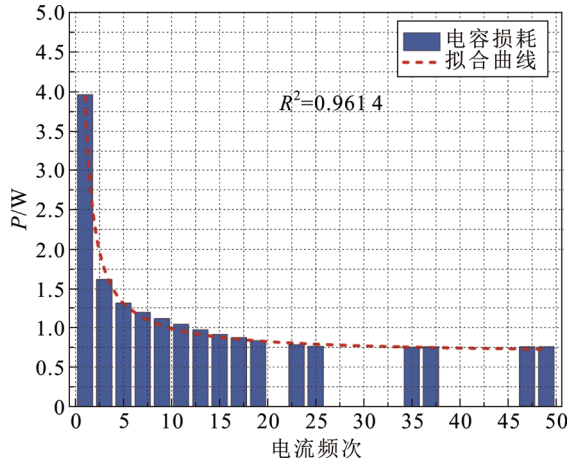


图 5　单频电流损耗功率与电流次数的关系

Fig.5　Loss under single frequency current conditions

保持为 7.6 A。结果表明，随着谐波次数的增加，电容器的损耗功率呈显著下降趋势。通过对实验数据进行非线性拟合，拟合曲线采用 $y=a/x+b$ 的函数形式，表征电容器损耗与谐波频率成反比的关系，拟合度R^2=0.961 4，说明单频电流施加时谐波频率对电容器的介质损耗具有显著影响。图 5 中还可以看出，在高频段损耗数据相比拟合曲线稍高，这是由于金属损耗受趋肤效应的影响在高频段略有增加。

图 6(a)展示了在基波电流与谐波电流有效值均保持恒定的条件下，谐波相位变化对电容器损耗功率的影响规律，不同频次谐波相位的改变对电容器损耗的影响规律不同。结合表 2 与图 6(b)可见：在相同电流叠加条件下，谐波相位的改变会显著影响叠加电压的峰值，且该影响随谐波频率的降低而增强，表明低次谐波对峰值电压的影响更强；相反，高次谐波受相位影响较弱，导致电压峰值波动幅度较小。

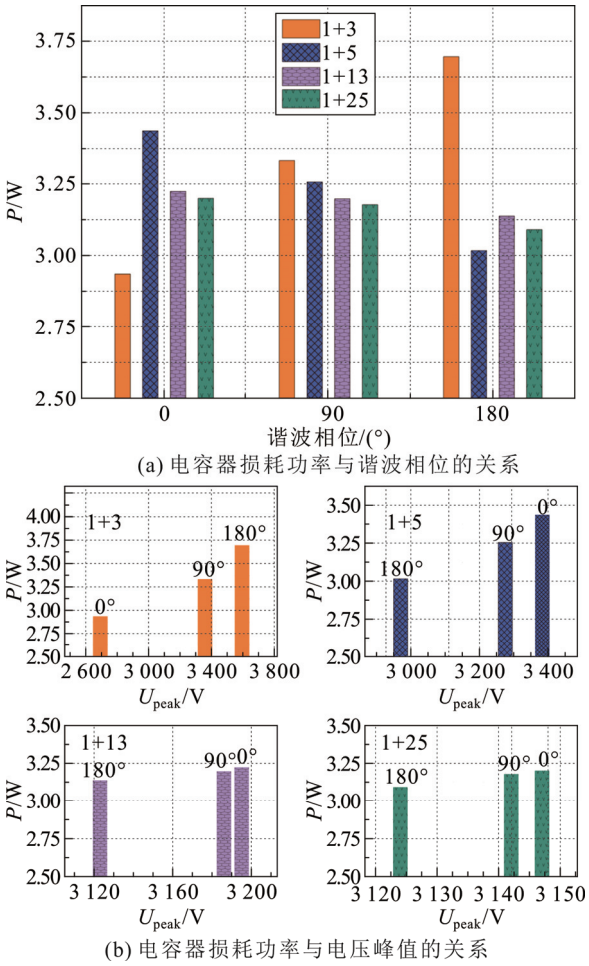


图 6　组合电流损耗

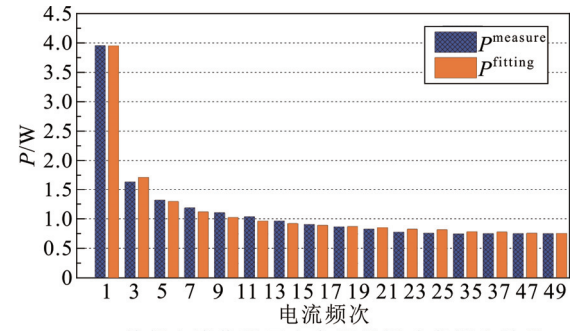
Fig.6　Loss under combined current conditions

同时，在保证基波与谐波有效值不变的前提下，谐波相位所引起的电压峰值增加将直接导致电容器损耗功率上升，且电压峰值的增幅越大，对应的损耗增长幅度也越显著，这一现象与图 1 中 PP 介电损耗随场强的变化规律相呼应。前文对聚丙烯薄膜介质的损耗机理分析表明，电压峰值的升高将增强其承受的电场强度，诱发更强的热离子极化行为，从而引起介质损耗显著增加，最终导致整体损耗功率上升。

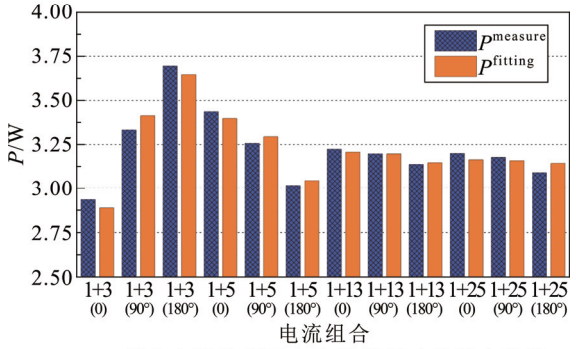
4.3　损耗模型小样本拟合效果验证

在小样本训练集下，基于所提损耗物理模型结构，通过混合优化求解策略完成非线性参数的辨识，获得最优参数组 $\boldsymbol{\theta}^*$。将该参数组代入模型后，计算各训练样本下的损耗拟合值 P^{fitting}，并与实测值 P^{measure} 进行对比。

图 7 给出了小样本训练集下的实测值 P^{measure} 与拟合值 P^{fitting} 对比柱状图，图中可见两者高度相符，拟合结果能够准确反映不同频率、不同频率组



(a) 单频电流作用下电容器损耗功率拟合效果



(b) 组合电流作用下电容器损耗功率拟合效果

图 7 单频和组合电流下损耗拟合效果

Fig.7 Fitting performance of loss under single frequency and combined current excitation

合、不同电压峰值条件下的损耗变化趋势。训练集样本的最大误差为 0.08 W，平均绝对误差为 0.036 W。

为进一步验证电容器损耗计算模型的泛化水平，选取部分典型单频电流与组合电流工况构建小样本训练集(见表 3)，使用其识别出的参数组 $\boldsymbol{\theta}^*$构建模型，并对组合电流下的数据样本进行损耗拟合验证。同时，为增强验证场景的复杂性，测试集中引入了包含 1+3+5 次分量的典型复杂谐波电流组合。图 8 展示了测试样本的拟合结果与实测值对比情况，测试样本的最大误差为 0.11 W，平均绝对误差为 0.047 W。可见模型在多数复杂组合工况下均能较好地追踪损耗变化趋势，表现出较强的泛化能力与拟合准确性，进一步验证了所提出方法在小样本条件下的鲁棒性与实用价值。

从误差分布角度看，预测误差在电压峰值较高或谐波组合复杂度较大的测试样本中略有上升，主要由于高电压或复杂谐波引起的模型非线性增强，模型中 $\sinh(\beta_2 U_{peak})$项对拟合参数更为敏感。但整体误差依然可控，且在合理范围内。

4.4 混合优化算法性能评估

为进一步验证所提出 DE-L-BFGS-B 混合优化算法在模型参数识别过程中的收敛效率与稳定性，

表 3 小样本数据集

Table 3 Small-sample dataset

电流频次组合	谐波相位/(°)	电压峰值/V
1		3 428.44
3		1 129.61
11		308.47
49		61.26
1+3	0	2 691.88
1+5	90	3 275.01
1+5	180	2 970.32
1+13	0	3 195.32
1+25	90	3 141.57
1+25	180	3 123.76

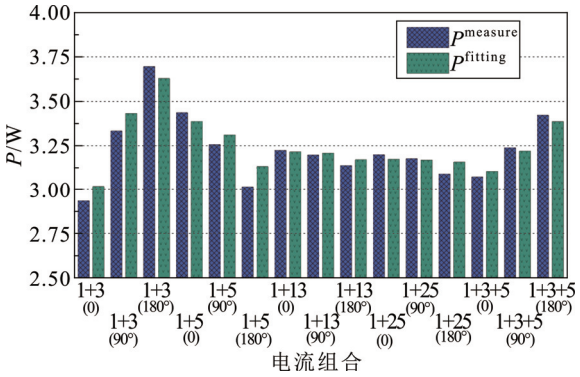


图 8 组合电流下测试数据集的验证效果

Fig.8 Validation performance under combined current using the test dataset

本文基于表 2 组合电流条件下的小样本数据集开展优化算法性能评估。设置 DE 算法种群规模 N_{P0}=30，变异因子 F_0=0.35，交叉概率 C_{R0}=0.8；动态切换机制中 M=20，切换阈值 ε_0=0.1。

1）首先对比了固定 DE 迭代次数 N=1 000 (python 库默认)的静态切换和动态切换机制的效果。结果表明，在动态切换机制下，DE 算法迭代次数均小于 70，远低于 DE 算法默认的迭代次数 N=1 000。同时，与静态切换机制相比，计算结果的标准差仍控制在 0.05 W 以内，表明引入动态切换策略可在不影响优化精度的前提下提高计算效率，避免计算冗余。

2）对比 DE-L-BFGS-B 混合优化算法和单一 DE 算法、L-BFGS-B 算法的识别效果，在使用相同初始参数范围和目标函数情况下，通过 10 次优化计算对 3 种方法进行比较，主要比较计算标准差、迭代次数和运行时间。优化算法性能对比情况见表 4。

由表 4 可知，单独使用 DE 算法可获得较优解，单平均迭代次数 452 次，平均计算时间 2.84 s，远大于混合算法下迭代次数 59 次和计算时间 0.51 s；

表 4　优化算法性能对比

Table 4　Comparison of optimization algorithm performance

优化方法	指标	平均值	最小值	最大值
DE	均方根误差/W	0.040	0.040 4	0.040 5
	n_{iter}/次	452	418	603
	t/s	2.84	2.49	4.07
L-BFGS-B	均方根误差/W	0.154	0.084	0.179
	n_{iter}/次	15	11	21
	t/s	0.03	0.029	0.036
DE-L-BFGS-B	均方根误差/W	0.040	0.040 4	0.040 5
	n_{iter}/次	59	44	65
	t/s	0.51	0.38	0.57

单独使用 L-BFGS-B 算法往往陷入局部最优，计算标准差平均值为 0.154 W，远高于混合算法的 0.04 W。因此，采用 DE-L-BFGS-B 混合优化算法，可在保证参数识别稳定性的同时提升计算精度与计算效率。

3）为进一步验证所提出混合优化算法的鲁棒性，本文采用单因素敏感性分析(one-factor-at-a-time, OFAT)方法，对变异因子 F、交叉率 C_R 与种群规模 N_P 的影响进行量化。每次仅改变一个参数，其余两参保持基准值不变，参数的取值范围为 $F\in[0.05, 0.95]$，$C_R\in[0.05, 0.95]$，$N_P\in[5D, 10D]$，其中 D=6 为待识别参数维数。表 5 给出了目标函数均方根误差、DE 阶段迭代次数 I_{ter} 以及优化计算时间 t 的结果。

由表 5 可知：随 F 增加，均方根误差呈上升趋势，同时迭代次数与计算时间也显著上升，说明变异因子 F 过大导致步长过大，种群引入过大的扰动易陷入局部优化；随 C_R 增加，均方根误差下降，迭代次数与时间均减小，反映高交叉率 C_R 增强搜索空间的覆盖率，增强了全局搜索能力；N_P 在 30~60 范围内变化时，均方根误差和迭代次数差异不大，表明在中等复杂度问题中，小规模种群即可获得良好解，避免计算资源浪费，因此 DE 算法可选择 F=0.35，C_R=0.80，N_P=30，即“低 F+高 C_R”策略，该策略可在多数维度进行小步更新，提高全局搜索能力。

综合考虑全局探索效率与计算时耗，本文最终选择“低 F+高 C_R”的 DE 和 L-BFGS-B 混合的优化算法，并引入动态切换机制，相比单一的 DE 算法计算时间减少 82%，相比单一 L-BFGS-B 算法误差减小 74%，实现电容器损耗物理模型中非线性参数的高效辨识。

4.5　损耗模型对比分析

为进一步评估本文所提考虑电场非线性影响的电容器损耗计算方法的精度与工程适用性，选取常用于工程近似分析的经验型损耗模型作为对比基准，开展在相同数据集上的损耗拟合分析。对比结果将从误差大小、损耗追踪能力以及对物理变化规律的反映能力等多个维度进行量化与讨论。

表 5　核心参数 OFAT 分析结果

Table 5　Analysis results of the core parameter by OFAT

改变参量	参量取值	均方根误差/W	I_{ter}/次	t/s
F	0.05	0.040 8	22	0.39
	0.35	0.039 2	30	0.50
	0.65	0.040 8	40	0.75
	0.8	0.042 4	46	0.75
	0.85	0.046 9	49	0.78
	0.95	0.047 6	66	1.05
C_R	0.05	0.045 5	38	0.64
	0.2	0.041 4	34	0.55
	0.35	0.040 6	32	0.53
	0.5	0.040 6	32	0.62
	0.8	0.040 4	29	0.49
	0.95	0.040 3	27	0.44
N_P	30	0.040 4	28	0.47
	40	0.040 5	25	0.55
	50	0.040 4	26	0.87
	60	0.040 5	26	1.21

传统电容器损耗建模方法多基于简化的线性叠加，忽略电场强度对介质损耗带来的非线性影响，通常采用以下结构进行计算：

$$P=\sum_{h\in H} I_h^2\left(\frac{\alpha_1}{\omega_h^2}+\frac{\alpha_2}{\omega_h}+\alpha_3\omega_h+\alpha_4\right) \tag{19}$$

式中：h 为谐波次数；$H=\{h_n\}$为电容器承受的谐波频次组合；I_h 为第 h 次谐波的电流有效值；$\omega_h=h\times 2\pi f_0$ 为角频率；α_1、α_2、α_3、α_4 为电容器损耗项参数。

采用 4.3 节组合电流下测试数据集验证效果的小样本训练集(见表 3)和测试集数据对两种损耗模型进行对比分析。对比结果见图 9，表 6 给出了各测试样本的损耗计算误差。从图 9 中可以看出，考虑场强非线性影响的损耗计算模型计算准确性高，传统模型普遍偏差较大，尤其在电压峰值波动较大情况下偏差更显著。同时，传统损耗模型主要依据电流有效值构建，对复杂谐波变化时损耗的追踪能力弱。

从测试数据集的误差来看，未考虑场强影响的计算误差达到 0.4 W 以上，且不能分辨由电压峰值改变对损耗带来的变化。相比之下，考虑场强增强效应的损耗建模方法在各类测试工况中均表现出较高的拟合准确性，最大绝对误差不超过 0.11 W，相

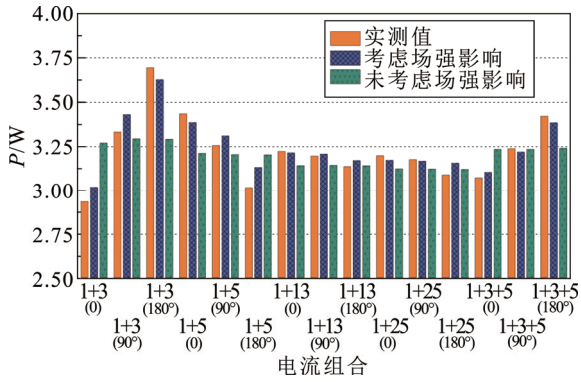


图 9 传统模型与考虑场强影响的损耗模型测试效果

Fig.9 Test performance between traditional model and loss model considering the influence of field strength

表 6 两种模型测试数据集损耗计算误差

Table 6 Loss error of test dataset for two models

电流频次组合	谐波相位	未考虑场强损耗误差/W	考虑场强损耗误差/W
1+3	0°	0.336 5	0.083 9
	90°	0.037 0	0.106 7
	180°	0.402 3	0.071 2
1+5	0°	0.223 5	0.035 4
	90°	0.049 2	0.061 4
	180°	0.188 1	0.104 3
1+13	0°	0.080 0	0.002 9
	90°	0.051 8	0.015 7
	180°	0.006 3	0.035 8
1+25	0°	0.073 7	0.021 8
	90°	0.053 0	0.004 2
	180°	0.032 8	0.070 4
1+3+5	0°	0.162 3	0.056 4
	90°	0.002 8	0.025 6
	180°	0.180 2	0.104 0

对误差控制在 5%以内，具备良好的拟合精度与泛化能力。

本文所提考虑场强非线性影响的损耗模型能够有效响应电压峰值变化所引起的损耗波动，而未考虑场强影响的模型则难以利用电压峰值这一关键参数，导致在不同电流组合下的预测结果变化较小。同时，未考虑场强影响的模型中趋肤效应的相对权重被放大，导致高频电流下计算的损耗值普遍偏大，难以真实反映电容器的实际损耗特性。考虑到实际测量过程中引入误差，该方法在小样本条件下依然能实现对复杂谐波场景下电容器损耗的精准建模与计算，具有较强的工程应用价值。

5 结论

1）本文针对电容器在复杂谐波环境下的损耗功率计算问题，基于双势阱模型明确了聚丙烯介质损耗随电场强度增加而显著增强的非线性规律，并根据热离子极化离子公式推导了电容器在复杂谐波工况下的损耗计算公式，构建了电容器损耗计算物理模型。

2）针对电容器损耗数据样本较少的问题，提出一种基于参数可辨识的物理模型融合小样本数据的损耗计算方法，通过“低 *F*+高 *CR*”的 DE 算法和 L-BFGS-B 混合优化算法，并引入动态切换机制，在保障全局搜索能力的同时提升计算效率，相比单一优化算法计算时间减少 82%、计算误差减少 74%，实现电容器损耗模型在谐波环境下的准确高效求解。

3）通过单频电流与组合谐波电流下的实测数据进行验证，结果表明损耗功率模型在复杂谐波场景下的最大误差不超过 0.11 W，平均误差为 0.047 W，相对误差小于 5%，相比传统模型的最大误差 0.4 W，模型具备良好的计算精度与泛化能力。

未来将结合电容器老化机理和老化试验引入寿命退化因子，拓展当前模型在长期运行及多源谐波工况下的适用性与预测精度。

参考文献 References

[1] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[2] 谢小荣，贺静波，毛航银，等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报，2021，41(2)：461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.

[3] 祝令瑜，占 草，刘琛硕，等. 高压 IGBT 劣化机理分析及状态监测技术研究综述[J]. 高电压技术，2021，47(3)：903-916.
ZHU Lingyu, ZHAN Cao, LIU Chenshuo, et al. Review of deterioration mechanism analysis and condition monitoring technology for high voltage IGBT[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 903-916.

[4] 王程锦，何晋伟，洪芦诚. 分频次有源阻尼自适应调节的混合有源滤波器系统谐振抑制方法[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3573-3582.
WANG Chengjin, HE Jinwei, HONG Lucheng. Resonance suppression method of hybrid active power filter system with frequency independent adaptive active damping gain regulator[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3573-3582.

[5] 肖晃庆，甘慧辰，黄 莹，等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J/OL]. 高电压技术，2025：1-18(2025-04-28) [2025-06-07]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241030.
XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-18(2025-04-28) [2025-06-07]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20241030.

[6] POU J, CEBALLOS S, KONSTANTINOU G, et al. Circulating current injection methods based on instantaneous information for the modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Indus-

trial Electronics, 2015, 62(2)：777-788.
[7] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.
[8] 马宁宁，谢小荣，贺静波，等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
[9] 李建林，郭兆东，马速良，等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “Source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.
[10] 赵　晨. 谐波影响下电力电容器及其串联电抗器的多物理场研究[D]. 广州：华南理工大学，2021.
ZHAO Chen. Research on multiphysical fields of power capacitor and its series reactor under the influence of harmonics[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2021.
[11] 党智敏，杨旻昊. 高储能薄膜电容器用介质材料研发的挑战与思考[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2210-2218.
DANG Zhimin, YANG Minhao. Challenges and reflection on dielectric materials for high-energy-density film capacitor application[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2210-2218.
[12] 张云霄，张佳瑞，蔡英健，等. 多物理场下薄膜电容器用聚丙烯材料劣化及诊断方法研究进展[J/OL]. 电工技术学报，2024：1-22 (2025-04-28) [2025-06-07]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces. 241154.
ZHANG Yunxiao, ZHANG Jiarui, CAI Yingjian, et al. Research progress on degradation and diagnostic methods of polypropylene materials for film capacitors under multiple physical fields[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024: 1-22 (2025-04-28) [2025-06-07]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753. tces. 241154.
[13] HE Y S, WANG F P, PAN J Y, et al. Effect of temperature on dielectric properties of metallized film capacitor[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.
[14] ZHANG N Y, HO J, RUNT J, et al. Light weight high temperature polymer film capacitors with dielectric loss lower than polypropylene[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(12): 9396-9401.
[15] 程　璐，李志元，王镜然，等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8964.
[16] CHENG L, LIU W F, LIU H B, et al. Evolution of dielectric relaxation under elevated electric field of polypropylene-based films[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(44): 445502.
[17] XING Z L, GUO S W, SUN Q M, et al. Thermal field simulation of high voltage shunt capacitor based on electrothermal coupling in harmonic environment[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference. Harbin, China: IEEE, 2024: 5052-5057.
[18] 吴永利，国　江，冯春林，等. 电力电容器在工频与谐波条件下的热稳定性能研究[J]. 高压电器，2025，61(1)：136-144.
WU Yongli, GUO Jiang, FENG Chunlin, et al. Research on thermal stability performance of power capacitor under power frequency and harmonic condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 136- 144.
[19] YANG J J, ZHANG G, LIU Y F, et al. A method for calculating hot-spot temperature of traction transformer based on multiphysical model and combined neural network[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 6726-6737.
[20] 骆小满，阮江军，邓永清，等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术，2020，46(3)：860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866.
[21] 张重远，刘迪程，高成龙，等. 基于 Twin Builder 的 110 kV 油浸式变压器 3 维磁场降阶模型及损耗分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：941-951.
ZHANG Zhongyuan, LIU Dicheng, GAO Chenglong, et al. Three-dimensional magnetic field model order reduction and loss analysis of 110 kV oil-immersed transformer based on twin builder[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 941-951.
[22] 祝令瑜，唐义政，占　草，等. 功率模块多物理场快速求解技术综述[J/OL]. 高电压技术，2025：1-18[2025-07-28]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20250369.
ZHU Lingyu, TANG Yizheng, ZHAN Cao, et al. Review of fast solution techniques for multi-physics fields in power modules[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-18[2025-07-28]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250369.
[23] 郑琳子，祝令瑜，汲胜昌，等. 柔性直流输电用金属化膜电容器多频介损在线获取方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(4)：63-68.
ZHENG Linzi, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Study on online acquisition method of multi-frequency dielectric loss tangent of metallized film capacitor for MMC-HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 63-68.
[24] LI Y B, WANG J, SUN Q M, et al. Research on breakdown characteristics of PP films for shunt capacitors under multi-frequency harmonic voltages group[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Plasma and Energy Conversion. Nanjing, China: Springer, 2023: 575-583.
[25] 冉昭玉，刘雨杭，孟　礼，等. 换流阀高压直流电容聚丙烯材料选型关键参数与方法[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2354-2362.
RAN Zhaoyu, LIU Yuhang, MENG Li, et al. Key parameters and methods of polypropylene material selection for HVDC capacitors in converter valves[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2354-2362.
[26] 殷之文. 电介质物理学[M]. 2 版. 北京：科学出版社，2003.
YIN Zhiwen. Dielectric physics[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Science Press, 2003.
[27] ZHENG F H, GU M, DONG J X, et al. Fast space charge behavior in heat-treated polypropylene films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(28): 42235.



孙启明
2000—，男，博士生
主要从事新型电力系统下电容器损耗、温度场计算和优化设计的研究工作
E-mail: sunqiming@stu.xjtu.edu.cn

SUN Qiming
Ph.D. candidate



祝令瑜(通信作者)
1988—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备振动噪声、输电设备状态监测及故障诊断等方面的研究工作
E-mail: zhuly1026@xjtu.edu.cn

ZHU Lingyu
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-04-25　在线出版日期　2025-11-17　　编辑　曹昭君