第 52 卷 第 2 期：859-868 高电压技术 Vol.52, No.2: 859-868
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241938

基于贝塞尔曲线的油浸倒立式电流互感器主绝缘频域介电谱建模

张宇彤[1]，牛立群[2]，荆兆龙[1]，魏存金[2]，胡啸宇[3]，王路伽[1]
（1. 中国矿业大学电气工程学院，徐州 221116；2. 国网安徽省电力公司阜阳供电公司，阜阳 236000；
3. 国网安徽省电力公司电力科学研究院，合肥 230022）

摘　要：频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS)被广泛应用于判断油纸绝缘性能优劣。精准建模油浸倒立式电流互感器绝缘三角区这一故障高发区域对于深入理解 FDS 测试结果与绝缘性能变化的关系至关重要。为了得到更准确的油浸倒立式电流互感器的频域介电谱计算模型，采用贝塞尔曲线对油浸倒立式电流互感器的绝缘三角区进行几何刻画，并基于 X 模型得到了油浸倒立式电流互感器的主绝缘复电容。同时，建立了三维仿真模型得到了互感器复电容的有限元计算结果。通过将 3 台不同厂家油浸倒立式互感器的复电容实测结果分别与有限元模型和基于贝塞尔曲线的计算模型得到的结果进行对比，验证了该文提出的 FDS 计算建模方法的准确性。实验结果表明，基于有限元模型与基于贝塞尔曲线分别得到的复电容与 3 台互感器复电容实测值的平均相对误差分别小于 5.489%和 10.385%。

关键词：油浸倒立式电流互感器；绝缘三角区；复电容；有限元方法；频域介电谱；贝塞尔曲线

FDS Modeling of Main Insulation in Oil-immersed Inverted Current Transformers Using Bézier Curves

ZHANG Yutong[1], NIU Liqun[2], JING Zhaolong[1], WEI Cunjin[2], HU Xiaoyu[3], WANG Lujia[1]
(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Fuyang Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Company, Fuyang 236000, China;
3. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Frequency domain spectroscopy(FDS) is widely used to evaluate the quality of oil-paper insulation. Accurately modeling the triangle insulation of oil-immersed inverted current transformers,which is a critical fault-prone area, is essential for linking FDS results with insulation performance changes. To develop a more precise FDS computational model, this study employed Bézier curves to geometrically describe the triangle insulation and used the X-model to calculate the complex capacitance of the main insulation. A three-dimensional finite element simulation was also conducted to obtain the transformer's complex capacitance. The proposed model's accuracy was verified by comparing the measured complex capacitance of three oil-immersed inverted current transformers from different manufacturers with results from the FEM and Bézier-curve-based models. Experimental results showed that the average relative errors were less than 5.489% and 10.385%, respectively.

Key words: oil-immersed inverted current transformer; triangle insulation; complex capacitance; FEM; FDS; Bézier curve

0　引言

油浸式电流互感器凭借其油量少、体积小、动稳定性高等优点在 110 kV 及以上电网中占有接近 60%的比例[1-2]。受绝缘包扎工艺及形状特点影响，三角区绝缘结构最为复杂，是油浸倒立式电流互感器发生爆炸事故的起始击穿部位的多发之处，及时且准确地发现绝缘区域的劣化对于保障设备运维和提升设备可靠性至关重要[2-4]。频域介电谱技术(frequency domain spectroscopy, FDS)作为介电谱测试的一种，具有无损、抗干扰性、可靠性高等优点，其通过在更宽的频域范围内测量绝缘介质的损耗和复电容，往往能反映出油纸绝缘的老化状态、含水

基金资助项目：国家自然科学基金 (52207180)；安徽省自然科学基金(2208085UD18)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207180), Anhui Provincial Natural Science Foundation(2208085UD18).

量和几何结构的变化[5-6]。

电容型绝缘的几何模型对于复电容计算模型的构建及 FDS 的机理解释尤为重要。针对变压器和套管此类单一同轴圆柱型绝缘结构，常通过传统的 XY 模型或 X 模型评估设备的介电特性。XY 模型将变压器主绝缘结构简化为二维矩形结构，X 值表示纸筒总厚度与高低压绕组间主绝缘厚度之比，Y 值表示撑条总宽度与高低压绕组间主绝缘平均周长之比，适用于变压器等油纸绝缘系统的建模。X 模型则是 XY 模型的简化形式，将绝缘系统简化为油隙和绝缘纸的串联，X 值为绝缘纸厚度与复合绝缘系统总厚度之比，这种简化不会显著影响准确性，因此也常用于套管等简单绝缘结构的建模。随着研究的深入，学者们逐渐认识到非均匀老化、受潮和电导效应等因素对油纸绝缘系统的影响，在原模型的基础上提出了改进的 X 模型和 XY 模型[7-13]。此外，有学者发现有限元模型相较于传统 XY 模型因考虑了电场畸变等因素而具有更高的准确度[14]，XY 模型与有限元模型的结合成为了 FDS 预测与研究的新方法[14-15]。与变压器、套管的单一同轴圆柱型绝缘结构不同，绝缘三角区使互感器主绝缘的几何模型研究变得复杂，因此在复电容计算模型的提出过程中对绝缘三角区的几何处理尤为重要。

油浸倒立式电流互感器的油浸纸绝缘系统在结构上可分为 3 部分，分别是包裹在环状二次绕组屏蔽罩外侧的圆环形绝缘、包裹在直线段屏蔽罩外侧的同轴圆柱形绝缘和环形二次绕组屏蔽与二次引线管电容锥连接处的三角区绝缘。尽管结构上存在三角区这一部分，但过往研究对主绝缘电容的解析建模多基于两段式划分将主绝缘简化为头部与直线段两部分。其中，环部电容由外圆筒、内圆筒及圆筒两侧电容并联构成，而三角区则被忽视其曲度，简化为直线段的一部分。在此基础上，后续的研究通过头部外圆筒电容减去引线重叠部分电容的处理进一步提升了两段式划分建模方法的准确性[16]，但本质上仍未对三角区的复杂几何特征进行独立处理。随着对模型精度需求的提升，针对现有模型在三角区部分处理的局限性，需寻找一种聚焦于三角区的几何处理方法。贝塞尔曲线凭借可以对复杂曲线进行数学化的表示，提供了一种新的视角来刻画绝缘三角区的侧边曲线轮廓。通过应用贝塞尔曲线，能够显著提高互感器主绝缘几何模型的准确性。

为了建立一种更为准确的互感器复电容计算模型作为 FDS 内在机理研究的支撑，本文提出了一种利用贝塞尔曲线刻画互感器主绝缘三角区的方法，同时建立互感器主绝缘等比例三维仿真模型，基于有限元法对油纸绝缘系统的 FDS 特性进行仿真研究。本研究对 3 台不同厂家 500 kV 等级油浸倒立式电流互感器的的频域介电特性进行测试，通过分别与油纸绝缘有限元模型和计算模型进行结果对比，验证了本文提出的两种模型的准确性。

1 X 模型理论基础

XY 模型通过将变压器主绝缘结构与油纸绝缘介电响应特性联系起来，被广泛用来诊断变压器主绝缘系统的状态[17-18]。与变压器相似，互感器主绝缘也由少油结构的圆柱型绝缘构成，绝缘主体部分由纸张和电容屏组成，绝缘整体浸泡在绝缘油中形成油纸复合绝缘结构，由于互感器绝缘结构没有显著的撑条影响，故 Y 值为 0。因此本文是在充分考虑了油浸倒立式电流互感器主绝缘三角区几何特殊性的情况下，基于 X 模型提出了互感器主绝缘 FDS 计算模型。图 1 描绘了互感器油纸绝缘 X 模型的示意图。

假设两平行电极板的重叠面积为 S，两平行电极板间的绝缘厚度为 d，则模型的几何电容 C_0 可以表示为式(1)，几何电容 C_0 由油纸绝缘的几何结构决定。

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \tag{1}$$

式中：ε_0 表示真空介电常数，为 8.854×10^{-12} F/m。

图 1 中绝缘油和绝缘纸部分的复电容值可以分别定义为：

$$C_{\text{oil}}^{*} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{roil}}^{*} S}{d(1-X)} \tag{2}$$

$$C_{\text{p}}^{*} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{rp}}^{*} S}{dX} \tag{3}$$

式中：C_{oil}^{*}、C_{p}^{*} 分别为绝缘油和绝缘纸的复电容；$\varepsilon_{\text{rp}}^{*}$ 为绝缘纸的复介电常数；$\varepsilon_{\text{roil}}^{*}$ 为绝缘油的复介电常

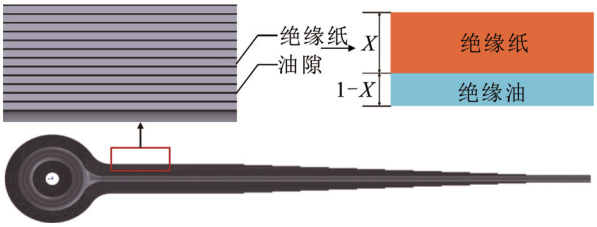


图 1 互感器油纸绝缘 X 模型示意图

Fig.1 X-model of the transformer OIP

数。则描述复合油纸绝缘系统与绝缘油、绝缘纸之间的电容关系如式(4)所示。C^*_{tot} 为油纸绝缘系统总复电容。

$$C^*_{\mathrm{tot}}=\frac{C^*_{\mathrm{oil}}C^*_{\mathrm{p}}}{C^*_{\mathrm{oil}}+C^*_{\mathrm{p}}} \tag{4}$$

由于绝缘系统总复电容 C^*_{tot} 除以几何电容 C_0 可以得到绝缘系统的复相对介电常数，因此，X 模型建立了复合绝缘系统和纸绝缘之间的复相对介电常数之间的数量关系，如式(5)所示[19]。绝缘油在电场的作用下极化损耗很小，其复相对介电常数通常取实部恒定为 2.2，虚部由电导率主导的形式，如式(6)所示。绝缘油的复介电常数可以通过取油样测得。

$$\varepsilon^*_{\mathrm{r}}=\frac{\varepsilon^*_{\mathrm{rp}}\varepsilon^*_{\mathrm{roil}}}{X\varepsilon^*_{\mathrm{roil}}+(1-X)\varepsilon^*_{\mathrm{rp}}} \tag{5}$$

$$\varepsilon^*_{\mathrm{roil}}=2.2-\mathrm{j}\frac{\sigma_{\mathrm{oil}}}{\varepsilon_0\omega} \tag{6}$$

式中：$\varepsilon^*_{\mathrm{r}}$ 为油纸复合绝缘的复介电常数；σ_{oil} 表示绝缘油的直流电导率；ω 角频率。

2 基于贝塞尔曲线的互感器主绝缘复电容计算模型构建

2.1 主绝缘复电容计算物理模型

X 模型通过将互感器主绝缘中的绝缘纸和绝缘油的关系抽象成一个关键的 X 参数，从而计算出油纸绝缘系统的复介电常数。互感器主绝缘由多层油浸纸和电容屏缠绕构成，这种结构在电场中的响应可以通过电容的串并联来模拟。本文研究的 500 kV 等级的油浸式电流互感器主绝缘采用主屏与端屏结合的绝缘结构。主绝缘中共设置高压电屏、中间电屏、末屏 3 个主电容屏，主电容屏以串联的形式嵌入主绝缘中，最外层屏接高电位，最内层末屏接地。主屏之间为了改善电场分布设置了几个较短的端屏，将端部绝缘屏间厚度减小[20]。相邻两个电屏及其中间的油纸绝缘部分就构成一个电容器，整个主绝缘形成由多个电容器串联的回路。

本文将主绝缘在纵向上拆分成如图 2 所示的由环部电容、三角区电容与直线段电容 3 部分电容并联组成的物理模型，其中环部电容又由外圆筒电容、内圆筒电容、拐弯处电容 3 部分并联后减去与三角区重叠部分电容的方法来等效，如图 3 所示。

2.2 主绝缘三角区的贝塞尔曲线拟合

将三角区形状近似抽象为一个底部较窄，逐渐向上扩展的喇叭型旋转体，具有平滑的曲线轮廓，如图 4 所示。利用平行板电容器式(1)推导三角区电容，其中电容器极板有效面积 S 为三角区部分电屏的面积，两极板之间的距离 d 为三角区部分两电容屏之间的油纸绝缘厚度。为了获得三角区旋转体母线的曲边函数，采用图 4(a)所示的三维数据扫描仪分别对 3 台不同厂家的 500 kV 油浸式电流互感器绝缘三角区进行测量，从三维数据中提取三角区边缘曲线的数据，同时设定三角区底部为 Y=0，对其采集而来的数据在二维坐标系中进行曲线建模，如图 4(b)所示。

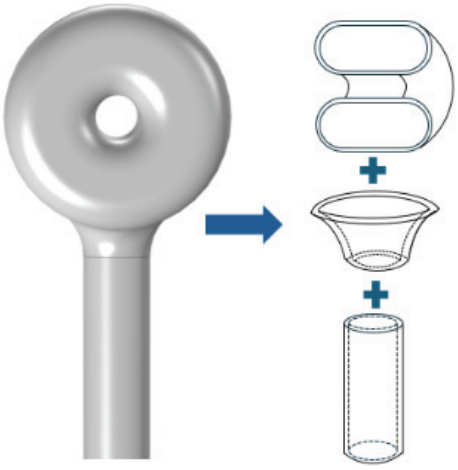
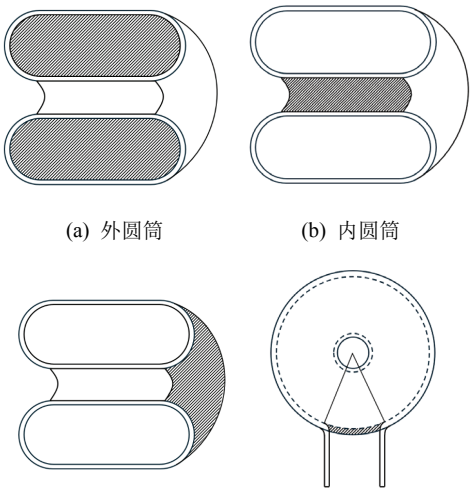


图 2 互感器油纸绝缘分区示意图

Fig.2 Partition of transformer OIP



(a) 外圆筒 (b) 内圆筒

(c) 拐弯处圆筒 (d) 环部与三角区重叠部分

图 3 互感器环部绝缘物理模型

Fig.3 Physical model of transformer ring insulation

贝塞尔曲线(Bézier 曲线)通常是依据 3 个或 2 个以上的位置任意点的坐标绘制的一条光滑的曲线，贝塞尔曲线具有控制简便、滑动流畅等优点，

因此，贝塞尔曲线对于绝缘三角区的曲线拟合具有很好的适用性。它由一个或一组控制点定义，曲线的形状由这些点通过数学公式间接控制[21-23]。用贝塞尔曲线拟合三角区曲边轮廓，要先确定其控制点。由于贝塞尔曲线的阶数增加会极大地增加后续电容推导的计算量和复杂性，因此在保证曲线拟合准确性的前提下，本文采用二次贝塞尔曲线，其参数计算式表示为：

$$P(t)=\sum_{i=0}^{2}P_iB_{i,2}(t)=P_0(1-t)^2+2P_1t(1-t)+P_2t^2 \quad (7)$$

式中：P_0、P_2 分别为起始点和终止点；P_1 为控制点；t 为曲线参数变量，取值范围在 0~1 之间。

对于二次贝塞尔曲线，曲线的起点与终点的切线交点即为另外一个控制顶点，标准的二次贝塞尔曲线如图 5(a)所示。

根据式(7)可知，基于贝塞尔曲线的拟合算法需要找到 3 个控制点的坐标，对于三角区边缘曲线的数据来说，需要在数据点云中找到起点和终点，即 P_0 和 P_2 可以获得。P_1 是贝塞尔曲线分别在 P_0 和 P_2 处的切线的交点，由互感器头部绝缘的结构可知，P_2 为三角区与头部相交的一点，如图 5(b)所示，P_2 与三角区侧边曲线的切线即为半径为 R_0 的环部绝缘过 P_2 的切线，P_0 与三角区侧边曲线的切线即为与直线段绝缘侧边重合的一条竖直的直线。由两条切线相交可以得到 P_1 点的坐标，则可以通过 3 个数据点进行贝塞尔曲线拟合求取参数方程。

将二次贝塞尔曲线的参数方程用矩阵的方式表达如下：

$$P(t)=\begin{bmatrix}t^2 & t & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -2 & 1\\ -2 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_0\\ \boldsymbol{P}_1\\ \boldsymbol{P}_2\end{bmatrix} \quad (8)$$

式中：$\boldsymbol{P}_0$、$\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$ 为控制点 P_0、P_1、P_2 的矢量性质。

将向量 $\boldsymbol{P}_0$、$\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$ 分解成 X 和 Y 方向上的空间分量，其中 X 方向沿三角区径向，Y 方向沿三角区轴向，其矩阵表达式为：

$$X(t)=\begin{bmatrix}t^2 & t & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -2 & 1\\ -2 & 2 & 0\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_0\\ X_1\\ X_2\end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y(t)=\begin{bmatrix}t^2 & t & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -2 & 1\\ -2 & 2 & 0\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Y_0\\ Y_1\\ Y_2\end{bmatrix} \quad (10)$$

展开后，按 t 的升幂来书写，得二次贝塞尔曲线的参数式为：

$$\begin{cases}X(t)=A_0+A_1t+A_2t^2\\ Y(t)=B_0+B_1t+B_2t^2\end{cases}\ 0\le t\le 1 \quad (11)$$

其中的系数表示为：

$$\begin{cases}A_0=X_0\\ A_1=2(X_1-X_0)\\ A_2=X_2-2X_1+X_0\\ B_0=Y_0\\ B_1=2(Y_1-Y_0)\\ B_2=Y_2-2Y_1+Y_0\end{cases} \quad (12)$$

在本文提出的基于三角区拟合的复电容计算模型中，三角区部分整体的复电容可以为式(13)所示，其中三角区电容屏结构关系示意图如图 6 所示。

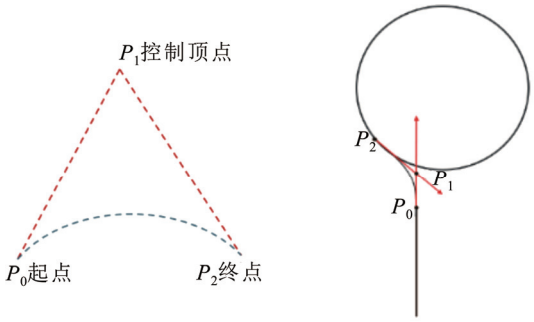
$$C_\Delta^*=\frac{1}{\dfrac{1}{C_1^*}+\dfrac{1}{C_2^*}} \quad (13)$$



(a) 三维数据扫描仪 (b) 三角区扁平化坐标系示意图

图 4 三维数据扫描仪和三角区扁平化坐标系示意图

Fig.4 3D data scanner and flattened coordinate of the triangle insulation



(a) 标准二次贝塞尔曲线 (b) 三角区贝塞尔曲线控制点

图 5 标准二次贝塞尔曲线与三角区贝塞尔曲线控制点

Fig.5 Standard quadratic Bézier curve and Bézier curve control points of the triangle insulation

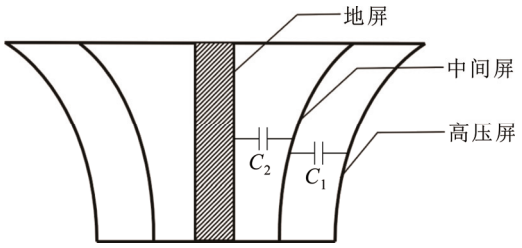


图 6 三角区电容屏示意图

Fig.6 Schematic diagram of the capacitive screen in the triangle insulation

式中：C_{Δ}^{*}为三角区复电容；C_{1}^{*}为三角区电容器高压层与中间层之间绝缘层的复电容；C_{2}^{*}为中间层与接地层之间绝缘层的复电容。

类比于圆柱形电容器计算式，利用微积分的思想将图6所示喇叭形绝缘部分视为纵向方向的多个微小同心圆柱壳的叠加，每个圆柱壳的高度是Δy，厚度是$r_2(t)-r_1(t)$，其中$r_1(t)$为空心圆柱的内半径，$r_2(t)$为空心圆柱的外半径。对于每个小同心圆柱来说，电场呈轴对称分布，方向沿圆柱筒的径向。绝缘电容芯体中铝箔的轴向长度明显大于各绝缘层厚度，因此，条纹电场对复电容的影响可以忽略。不考虑边缘场效应的每个微元空心圆柱电容器的复电容ΔC^{*}为：

$$\Delta C^{*}=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^{*}\Delta y}{\ln\left(r_2(t)/r_1(t)\right)} \tag{14}$$

对于式(13)中的C_{2}^{*}来说，$r_2(t)=x_2(t)$，$r_1(t)=x_1(t)$。$x_2(t)$由式(12)可得，$x_1(t)$根据厂家提供的电容屏尺寸结合$x_2(t)$的表达式得到。对于C_{1}^{*}来说，$r_2(t)=x_1(t)$，$r_1(t)=x_0(t)$。$x_0(t)$根据厂家提供的电容屏尺寸结合$x_1(t)$的表达式得到。C_{1}^{*}和C_{2}^{*}的表达式为：

$$C_1^{*}=\int_0^1\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}}^{*}}{\ln\left(x_2(t)/x_1(t)\right)}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \tag{15}$$

$$C_2^{*}=\int_0^1\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}}^{*}}{\ln\left(x_1(t)/x_0(t)\right)}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \tag{16}$$

假设互感器主绝缘整体各部分的老化程度均匀，及拥有相同的介电参数$\varepsilon_{\mathrm{r}}^{*}$。结合由式(5)所示的X模型，三角区绝缘部分的复电容可以表示为式(17)，其中由于绝缘油的流动性可以视为主绝缘中各层的绝缘油的介电参数相同，并且绝缘纸和绝缘油的厚度比非常接近，所以将油纸绝缘的X值视为相等。

$$C_{\Delta}^{*}=\frac{\dfrac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{rp}}^{*}\varepsilon_{\mathrm{roil}}^{*}}{X\varepsilon_{\mathrm{roil}}^{*}+(1-X)\varepsilon_{\mathrm{rp}}^{*}}\displaystyle\int_0^1\frac{\mathrm{d}y/\mathrm{d}t}{\ln\left(r_1(t)/r_0\right)}\mathrm{d}t\cdot\int_0^1\frac{\mathrm{d}y/\mathrm{d}t}{\ln\left(r_2(t)/r_1(t)\right)}\mathrm{d}t}{\displaystyle\int_0^1\frac{\mathrm{d}y/\mathrm{d}t}{\ln\left(r_1(t)/r_0\right)}\mathrm{d}t+\int_0^1\frac{\mathrm{d}y/\mathrm{d}t}{\ln\left(r_2(t)/r_1(t)\right)}\mathrm{d}t} \tag{17}$$

根据现有研究中对电流互感器头部和直线段的计算方法将头部电容与直线段电容分别计算出来，再加上绝缘三角区部分计算得到的复电容公式，可以得到油浸倒立式电流互感器主绝缘整体的复电容计算式见式(18)。其中，利用空心圆柱电容器的计算式得到的其他各部分复电容值公式见附录A。

$$C_{\mathrm{tot}}^{*}=C_{\omega}^{*}+C_{\mathrm{a}}^{*}+C_{\mathrm{b}}^{*}-C_{\mathrm{s}}^{*}+C_{\Delta}^{*}+C_{\mathrm{y}}^{*} \tag{18}$$

式中：C_{tot}^{*}为主绝缘复电容；C_{ω}^{*}为头部拐弯处复电容；C_{a}^{*}为头部内圆筒复电容；C_{b}^{*}为头部外圆筒复电容；C_{s}^{*}为头部与直线段重合部分复电容；C_{y}^{*}为直线段复电容。

3 互感器真机试验与有限元模型构建

3.1 频域介电响应测试

为了验证所提出的基于贝塞尔曲线的复电容计算模型，对3台不同厂家的500 kV等级油浸倒立式电流互感器进行了现场介电响应测量。试验所用设备为OMICRON公司提供的DIRANA介质响应分析仪。根据厂家提供的信息，DIRANA仪器测试电压为±200 V的交流电压，最大连续输出电流为50 mA，该设备在进行FDS测试时具有广泛的测试频段，其测试范围达到了2×10^{-4}~5×10^{3} Hz。

对3台500 kV等级油浸倒立式电流互感器进行了分别频域介电响应测试，DIRANA的测试电压引线与一次导杆相连，测试信号引线与末屏测试端子相连，二次绕组的输出端子接地。本实验采用的3台油浸倒立式电流互感器的基本参数如表1所示。

3.2 互感器绝缘有限元仿真模型构建

以CT-A为例，油浸倒立式电流互感器主绝缘的结构采用的是电容型绝缘结构，即在绝缘油纸中通过增设电容屏来改善主绝缘内部的电场分布。在屏蔽罩与屏蔽管外包绕的绝缘纸和电容屏形成电流互感器的主绝缘结构，成倒置“吊环”状。本文基于COMSOL软件将整个主绝缘按其屏间绝缘厚度分层建立模型，将各层绝缘的部分表面设为电容屏，表2列出了本文构建的互感器绝缘的关键几何尺寸，建模所需的所有几何参数均取自互感器制造公司。

电介质响应的有限元仿真模拟在实际的FDS测试中电压激励的频率一般不超过5 kHz，因此，设备内部的电场可视为准静态场，应用于频域电场

表1 测试油浸倒立式电流互感器参数

Table 1 Parameters of the tested TA

编号	等级	型号	绝缘油
CT-A	500 kV	AGU-550	45号
CT-B	500 kV	LVB-500W3	45号
CT-C	500 kV	CA-550	45号

表2 油浸倒立式电流互感器主绝缘尺寸

Table 2 Main insulation dimensions of the TA

电容屏	直线段直径/mm	屏长度/mm	环部内直径/mm	环部外直径/mm
高压屏	289.98	1 265.58	144.49	890.91
中间屏	182.78	2 562.96	227.34	806.90
末屏	77.52	3 891.41	309.76	722.40

的电准静态场方程如式(19)所示：

$$-\nabla\left(\left(\sigma+\mathrm{j}\omega\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}\boldsymbol{E}\right)\nabla V\right)=0 \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；V 为电动势；ε_r 为相对介电常数。

利用 COMSOL Multiphysics 软件的 AC/DC 模块构建油浸倒立式电流互感器主绝缘有限元模型，对模型外侧高压屏添加 200 V 的交流激励，末屏为 0 电位，直线段各中间端屏设置为悬浮电位。根据不同测试互感器的绝缘油和油浸纸介电数据作为有限元模型中对应部分的材料特性分别进行设置，同时设置铝箔的电导率为 3.030×10^7 S/m。在频域内，表征绝缘纸和绝缘油介电响应特性的复相对介电常数 $\varepsilon_\mathrm{r}^*(\omega)$ 可表示为：

$$\varepsilon_\mathrm{r}^*(\omega)=\varepsilon_\mathrm{r}'-\mathrm{j}\varepsilon_\mathrm{r}''=\varepsilon_\mathrm{r}-\mathrm{j}\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \tag{20}$$

式中：ε_r' 和 ε_r'' 分别为复相对介电常数的实部和虚部；σ为电导率。由式(20)可以导出用于计算绝缘纸的电导率σ和相对介电常数 ε_r 的公式，如式(21)—(22)所示。将得到的$\sigma(\omega)$和$\varepsilon_\mathrm{r}(\omega)$作为绝缘纸的仿真参数分别输入到有限元仿真模型中的绝缘材料模块。绝缘油材料的频域复介电常数由式(6)描述。

$$\sigma(\omega)=\varepsilon_\mathrm{r}''\varepsilon_0\omega \tag{21}$$

$$\varepsilon_\mathrm{r}(\omega)=\varepsilon_\mathrm{r}' \tag{22}$$

对主绝缘三维模型进行了网格划分，为了提高仿真模型的网格质量和计算精度，需要尽可能的细化网格。本文建立的油纸绝缘模型几何形状较为复杂，对网格剖分的计算精度要求较高，过于细化网格会导致计算时间大大增加，因此本文选择的最佳网格划分方案是在综合考虑计算量和精度的基础上，首先利用物理场控制网格形成自由四面体网格，然后在稀疏区域采用用户自定义网格进行网格划分，以提高精度[24-27]，网格划分如图 7 所示。

通过全局计算，可以得到互感器绝缘有限元模型的仿真复导纳 Y，则由式(23)可以计算出模型的复电容 C^*。

$$C^*=C'-\mathrm{j}C''=\frac{1}{\mathrm{j}\omega}\cdot\frac{1}{V}=\frac{Y}{\mathrm{j}\omega} \tag{23}$$

4 结果验证与误差分析

4.1 基于贝塞尔曲线主绝缘复电容计算值准确性验证

利用在现场对 3 台不同厂家的互感器主绝缘三角区进行三维扫描得到的关键数据点，结合 2.2 节的方法推导得到了每台设备基于贝塞尔曲线刻画绝缘三角区的复电容计算值实部 C'_cal 和虚部 C''_cal。将 3 台设备现场测试得到的复电容测量值(Mea)分别与复电容计算值(Cal)和复电容仿真值(Sim)进行比较，分别得到计算值、仿真值与实测值复电容实部和虚部的相对误差，验证了基于贝塞尔曲线拟合绝缘三角区的复电容计算建模方法的准确性。

图 8 和图 9 分别给出了 3 台不同厂家互感器设备的复电容值实部的测量值 C'_mea、仿真值 C'_sim 和计算值 C'_cal，复电容虚部的测量值 C''_mea、仿真值 C''_sim 和计算值 C''_cal。



图 7 CT-A 主绝缘模型网格划分

Fig.7 CT-A main insulation model meshing

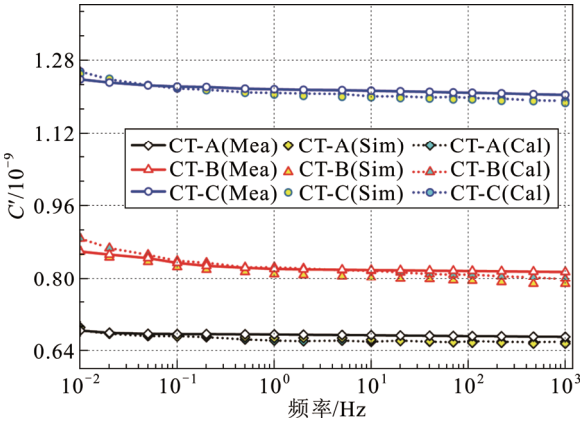


图 8 3 台互感器复电容实部测量值、仿真值、计算值

Fig.8 C'_mea, C'_sim, and C'_cal of the three transformers

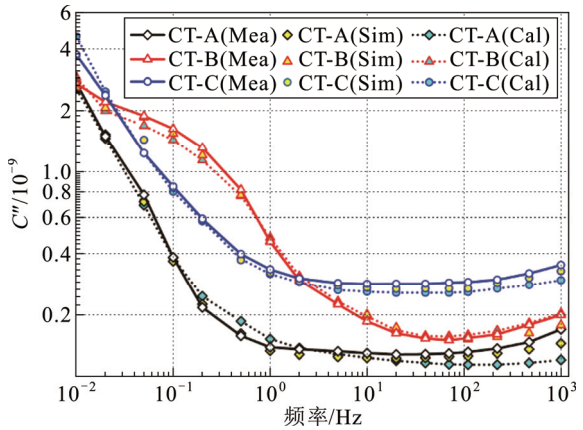


图 9 3 台互感器复电容虚部测量值、仿真值、计算值

Fig.9 C''_mea, C''_sim, and C''_cal of the three transformers

从图中可以看出，整体上这 3 台设备的测量、仿真和计算得到的复电容实部和虚部均在测试频域内能较好地重叠，而实部重叠效果要整体优于虚部。其中，仿真值、计算值分别与实测值的偏差最小值基本集中在中低频段，这表明基于贝塞尔曲线的复电容计算模型在中低频范围内对复电容实部和虚部的预测具有相对较高的精度。

利用相对误差分析了 3 台不同厂家互感器设备的基于现场 FDS 测量的复电容实测值分别与基于互感器主绝缘 FEM 模型的复电容仿真值和基于贝塞尔曲线拟合主绝缘三角区的复电容计算值的符合程度。表 3 列出了 3 台互感器设备的各个指标的平均相对误差。其中，ε'_{sm} 为仿真复电容值实部和实测复电容值实部的相对误差，ε''_{sm} 为仿真复电容值虚部和实测复电容值虚部的相对误差，ε'_{cm} 为计算复电容值实部和实测复电容值实部的相对误差，ε''_{cm} 为计算复电容值虚部和实测复电容值虚部的相对误差。

如表 3 所示，3 台设备的复电容计算值和仿真值均与实测值呈现较小的相对误差，各指标不超过 11%，其中复电容虚部的误差整体要大于实部，经分析其主要原因在于虚部本身的敏感性，虚部反映了绝缘系统的损耗特性，其相关参数如电导率、介质损耗角正切值受外部环境以及老化程度等因素的影响较大，因此虚部更易受测试过程中的误差影响。经过以上的数据对比和误差分析，表明本文提出的基于贝塞尔曲线拟合绝缘三角区的复电容计算模型和互感器主绝缘 FEM 仿真模型均具有较高的适应性和可靠性，能够应用于不同厂家的 500 kV 油浸倒立式电流互感器得到较准确的互感器复电容。

4.2 原始复电容建模方法与考虑三角区优化的复电容建模方法结果准确性对比

将 3 台互感器设备分别使用原始主绝缘几何处理方法(og)与本文提出的基于贝塞尔曲线拟合的方法(Bezier)得到两组复电容的计算值。将两组复电容的实部值和虚部值分别与复电容实测值(Mea)进行比较，如图 10 和 11 所示。从图中可以看出，使用基于贝塞尔曲线优化后的复电容计算模型 C_b^* 相较于原始几何处理方法计算的复电容 C_{og}^* 与实际测试值 C_{mea}^* 的符合程度要更高，原始几何处理方法由于忽略了三角区在几何上呈现为上宽下窄的曲弧形，其计算出来的复电容实部和虚部都偏小于实测值，基于贝塞尔曲线优化三角区的方法改善了这一差异，进一步减小了复电容计算值与实测值之间的误差。

表 3 3 台互感器各个指标的平均相对误差

Table 3 MRE of each indicator for the three transformers

平均相对误差	平均值/%		
	CT-A	CT-B	CT-C
ε'_{sm}	1.329	1.835	0.964
ε''_{sm}	5.364	5.489	4.084
ε'_{cm}	1.435	0.914	0.785
ε''_{cm}	10.343	10.385	8.471

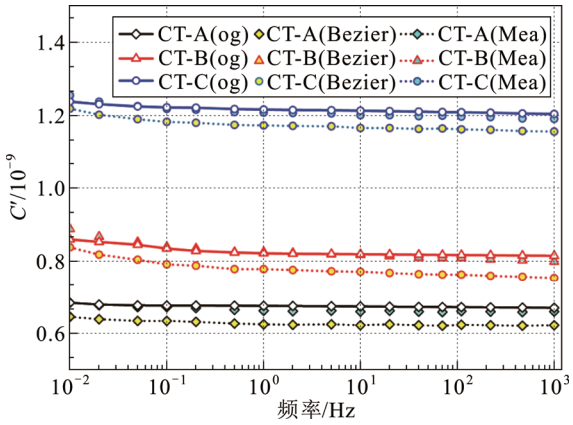


图 10 3 台互感器两种复电容实部计算值与实测值对比

Fig.10 Comparison of the C'_b and C'_{og} of the three transformers

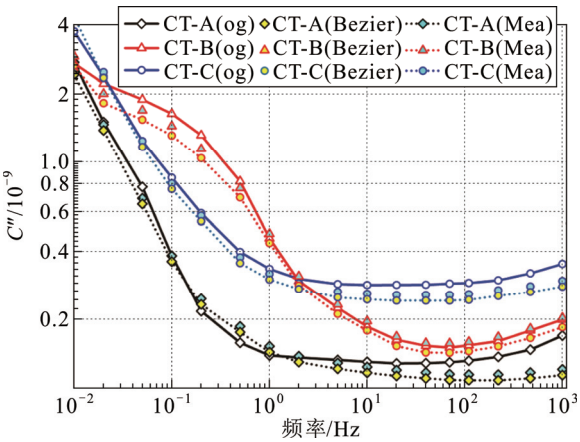


图 11 3 台互感器两种复电容虚部计算值与实测值对比

Fig.11 Comparison of the C''_b and C''_{og} of the three transformers

表 4 分别列出了两种计算模型得到的复电容计算值与设备复电容实测值之间的相对误差，与表 3 中的 ε'_{cm} 和 ε''_{cm} 相比可发现，3 台设备改进后的复电容计算值实部和虚部的准确度相比原始计算值均有 5%~10%的提升。

5 结论

1）基于贝塞尔曲线拟合的复电容计算模型与有限元仿真模型均表现出较高准确性。3 台互感器

表 4 复电容原始计算值与实测值之间的平均相对误差

Table 4 MRE between the C_b^* and C_{og}^*

C_b^* 和 C_{og}^* 的相对误差	平均相对误差/%		
	CT-A	CT-B	CT-C
ε'_{og}	7.046	6.694	4.445
ε''_{og}	16.765	16.268	13.779

复电容实部仿真值与实测值的平均相对误差最大为 1.835%，虚部误差最大为 5.489%；计算模型实部误差最大为 1.435%，虚部误差最大为 10.343%。

2）贝塞尔曲线优化显著提升了模型精度。相较于忽略三角区曲率的原始模型，优化后复电容实部与虚部误差分别降低 5%~10%，验证了复杂几何特征精确刻画的必要性。

3）文中提出的复电容计算模型和仿真模型对不同厂家油浸倒立式电流互感器均具有较强的的适用性。这项研究为主绝缘三角区绝缘状态和故障机理研究提供了一定的理论依据和技术支撑，为实现油浸式电流互感器绝缘性能的精准评估与状态诊断奠定了技术基础。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 王 琼，杨文良，车传强，等. 一起油浸式电流互感器局部放电缺陷的诊断和分析[J]. 变压器，2020，57(3)：82-86.
WANG Qiong, YANG Wenliang, CHE Chuanqiang, et al. Diagnosis and analysis of oil-immersed current transformer with PD defects[J]. Transformer, 2020, 57(3): 82-86.

[2] 陈瑞国，韩洪刚，孙艳鹤. 220 kV 油浸倒立式电流互感器问题分析[J]. 变压器，2010，47(5)：68-71，74.
CHEN Ruiguo, HAN Honggang, SUN Yanhe. Problem analysis of 220 kV oil-immersed inverter-type current transformer[J]. Transformer, 2010, 47(5): 68-71, 74.

[3] 王晓琪. 电气设备运行及维护保养丛书：电力互感器[M]. 北京：中国电力出版社，2014：46.
WANG Xiaoqi. Electrical equipment operation and maintenance series: power transformers[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2014: 46.

[4] 钱国超，邹德旭，马 仪，等. 倒立电流互感器典型缺陷及制造关键工艺分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2015，36(2)：73-77.
QIAN Guochao, ZOU Dexu, MA Yi, et al. Typical defects and key manufacture technology of the inverted minimum oil current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 73-77.

[5] FOFANA I, HEMMATJOU H, MEGHNEFI F, et al. On the frequency domain dielectric response of oil-paper insulation at low temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 799-807.

[6] 董 明，王 丽，吴雪舟，等. 油纸绝缘介电响应检测技术研究现状与发展[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1179-1189.
DONG Ming, WANG Li, WU Xuezhou, et al. Status and progress in study of dielectric response technology for oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1179-1189.

[7] SU Z C, ZHANG Y Y, DU Y Y, et al. An enhanced X model of oil-impregnated paper bushings including axial and radial nonuniform thermal aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 825-833.

[8] FAN X H, LIU J F, ZHANG Y Y, et al. A modified XY model of transformer oil-paper insulation system including non-uniform aging and conductance effect[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(13): 2008-2017.

[9] LIU J F, SUN T Y, FAN X H, et al. A modified simulation model for predicting the FDS of transformer oil-paper insulation under nonuniform aging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6004709.

[10] SU Z C, ZHANG Y Y, DU Y Y, et al. Two models for predicting frequency-domain spectroscopy of nonuniformly damped OIP bushings based on FEM and dielectric theory[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3519810.

[11] LIU J F, WANG Q Y, FAN X H, et al. An improved geometric model for constructing frequency-domain spectroscopy of nonuniform aged oil–paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 317-325.

[12] 张大宁，白 帆，牛朝滨，等. 不同受潮类型下油纸绝缘套管的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4942-4950.
ZHANG Daning, BAI Fan, NIU Chaobin, et al. Frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushings under different damp types[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4942-4950.

[13] 周利军，李先浪，王东阳，等. 不均匀老化油纸绝缘稳态水分分布的频域介电谱[J]. 高电压技术，2015，41(6)：1951-1958.
ZHOU Lijun, LI Xianlang, WANG Dongyang, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy of non-uniform aging oil-paper with equilibrium moisture distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1951-1958.

[14] 刘 媛，董 明，任 明，等. 油纸绝缘频域介电谱仿真模拟中 XY 模型与有限元模型对比研究[J]. 高电压技术，2014，40(11)：3483-3490.
LIU Yuan, DONG Ming, REN Ming, et al. Comparison and research of XY model and finite element model in the simulation of frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3483-3490.

[15] 董 明，刘 媛，任 明，等. 水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究[J]. 高电压技术，2014，40(11)：3403-3410.
DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Impacts of moisture content and distribution on frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation system by FEM approach[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3403-3410.

[16] 阎秀恪，孙 阳，于存湛，等. 油浸倒立式电流互感器主绝缘电场分析与优化设计[J]. 电工技术学报，2014，29(1)：37-43.
YAN Xiuke, SUN Yang, YU Cunzhan, et al. Electric field analysis and optimal design of main insulation for oil-immersed inverted current transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 37-43.

[17] BLENNOW J, EKANAYAKE C, WALCZAK K, et al. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 681-688.

[18] SAHA T K, PURKAIT P. Understanding the impacts of moisture and

thermal ageing on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 568-582.

[19] AHN H M, LEE J Y, KIM J K, et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1267-1272.

[20] 尚耀辉，赵建洲，刘亚亚，等. 油纸绝缘电流互感器的绝缘设计[J]. 电力电容器与无功补偿，2009，30(3)：25-27，32.
SHANG Yaohui, ZHAO Jianzhou, LIU Yaya, et al. The insulation design of oil-paper insulated current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 25-27, 32.

[21] 谢伟松，钱珅晶. Bezier 曲线在生产设计中的应用[J]. 航空精密制造技术，2006，42(1)：51-53.
XIE Weisong, QIAN Shenjing. Improvement of Bezier curves in production design[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(1): 51-53.

[22] 李　方，李　迪，黄　昕. 非均匀有理 B 样条在线拟合高速平滑插补法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2010，38(8)：61-65.
LI Fang, LI Di, HUANG Xin. High-speed smoothing interpolation based on NURBS online fitting[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 61-65.

[23] 孙家广，杨长贵. 计算机图形学[M]. 3 版. 北京：清华大学出版社，1998.
SUN Jiaguang, YANG Changgui. Computer graphics[M]. 3rd ed. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1998.

[24] 梁　巧，杨梦迪，王路伽，等. 计及波纹补偿的油浸倒立式电流互感器流热-结构耦合建模及油位特性分析[J/OL]. 中国电机工程学报，2025：1-12[2024-12-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250206.1455.009.
LIANG Qiao, YANG Mengdi, WANG Lujia, et al. Thermal-fluid-structure interaction modeling and oil-level characterization of oil-immersed inverted current transformers considering bellows compensation[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-12 [2024-12-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250206.1455.009.

[25] 王路伽，邱亚博，张海龙，等. 基于压损系数的变压器饼层混合式绕组中绝缘油流动分配的建模及优化[J]. 中国电机工程学报，2025，45(14)：5700-5709.
WANG Lujia, QIU Yabo, ZHANG Hailong, et al. Modeling and optimization of insulating oil flow distribution in transformer disc-layer hybrid winding based on pressure loss coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(14): 5700-5709.

[26] 周利军，王　健，王路伽，等. 强油导向结构变压器绕组区域温度建模及热点定位[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3896-3904.
ZHOU Lijun, WANG Jian, WANG Lujia, et al. Thermal modeling and hot spot locating for transformer winding in oil forced and directed cooling mode[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3896-3904.

[27] 周利军，唐浩龙，王路伽，等. 基于多面体网格剖分的油浸式变压器三维温度场及油流场仿真[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3524-3531.
ZHOU Lijun, TANG Haolong, WANG Lujia, et al. Simulation on three-dimensional temperature field and oil flow field of oil-immersed transformer based on polyhedral mesh[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3524-3531.



张宇彤
2000—，女，硕士生
研究方向为油纸绝缘介电响应与建模仿真
E-mail: yutong_Z@cumt.edu.cn

ZHANG Yutong



牛立群
1984—，男，硕士，高工
研究方向为电网检修、电气试验
E-mail: niulq2755@ah.sgcc.com.cn

NIU Liqun
Senior engineer



王路伽(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，硕导
研究方向为电气设备多物理场建模与状态感知
E-mail: lujia.wang@cumt.edu.cn

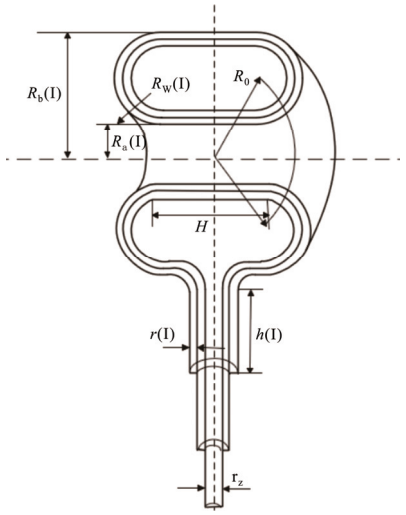
WANG Lujia
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2024-12-05　在线出版日期　2025-06-11　　编辑　曹昭君

附录 A

头部内圆筒复电容计算公式：

$$C_a^*(i)=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^* H}{\ln\dfrac{R_{a(i-1)}}{R_{a(i)}}}$$



$$C_a^*=\frac{1}{\dfrac{1}{C_{a(1)}^*}+\dfrac{1}{C_{a(2)}^*}+\cdots+\dfrac{1}{C_{a(i)}^*}}=$$

$$\frac{2\pi\varepsilon_0 H\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*}{X\cdot\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*+(1-X)\cdot\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*}}{\sum_{i=1}^{I}\ln\dfrac{R_{a(i-1)}}{R_{a(i)}}}$$

头部外圆筒复电容计算公式：

$$C_b^*(i)=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^* H}{\ln\dfrac{R_{b(i)}}{R_{b(i-1)}}}$$

$$C_b^*=\frac{1}{\dfrac{1}{C_{b(1)}^*}+\dfrac{1}{C_{b(2)}^*}+\cdots+\dfrac{1}{C_{b(i)}^*}}=$$

$$\frac{2\pi\varepsilon_0 H\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*}{X\cdot\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*+(1-X)\cdot\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*}}{\sum_{i=1}^{I}\ln\dfrac{R_{b(i)}}{R_{b(i-1)}}}$$

头部拐弯处复电容计算公式：

$$C_\omega^*(i)=\frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^* R_0}{\ln\dfrac{R_{\omega(i)}}{R_{\omega(i-1)}}}$$

$$C_\omega^*=\frac{1}{\dfrac{1}{C_{\omega(1)}^*}+\dfrac{1}{C_{\omega(2)}^*}+\cdots+\dfrac{1}{C_{\omega(i)}^*}}=$$

$$\frac{4\pi\varepsilon_0\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*}{X\cdot\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*+(1-X)\cdot\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*}R_0}{\sum_{i=1}^{I}\ln\dfrac{R_{\omega(i)}}{R_{\omega(i-1)}}}$$

头部与三角区重合部分复电容

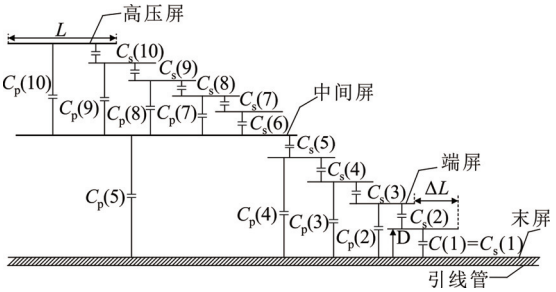
$$C_{S_{(i)}}^*=\sum_{k=1}^{i}\frac{r_{(k)}+r_z}{H/2}\frac{\arcsin\left(\dfrac{r_z+\sum_{k=1}^{i}r_{(k)}}{R_{b(i)}}\right)}{\pi}\frac{C_{b_{(i)}}^*}{2}$$

$$C_s^*=\frac{1}{\dfrac{1}{C_{s(1)}^*}+\dfrac{1}{C_{s(2)}^*}+\cdots+\dfrac{1}{C_{s(i)}^*}}=$$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^{I}\dfrac{(H/2)\pi}{\left(\sum_{k=1}^{i}r_{(k)}+r_z\right)\cdot\arcsin\left(\dfrac{r_z+\sum_{k=1}^{i}r_{(k)}}{R_{b(i)}}\right)}\cdot\dfrac{C_{b_{(i)}}^*}{2}}$$

直线段复电容计算公式：

直线段的电容分为端屏之间对齐的部分和端屏与零屏对齐的两部分考虑。



$$C_s^*(i)=\frac{2\pi\varepsilon_0\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*}{X\cdot\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*+(1-X)\cdot\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*}\left(L(i-1)-\Delta L(i)\right)}{\ln\dfrac{D(i)}{D(i-1)}}$$

$$C_p^*(i)=\frac{2\pi\varepsilon_0\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*}{X\cdot\varepsilon_{\mathrm{roil}}^*+(1-X)\cdot\varepsilon_{\mathrm{rp}}^*}L(i)}{\ln\dfrac{D(i)}{D(0)}}$$

各屏对末屏的复电容可表示为

$$C^*(i)=\frac{C^*(i-1)\cdot C_s^*(i)}{C^*(i-1)+C_s^*(i)}+C_p^*(i)$$

当 i=10 时即为直线段总复电容表达式。