# 输电线路零序参数的实用计算方法及系统

王开白[1],姜雨萌[2],刘家庆[1],晁璞璞[2],孙正伟[1],鲍 斌[1],李卫星[2]
(1. 国家电网公司东北分部,辽宁 沈阳 110000;2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要**:基于对输电线路参数计算方法的理论推导,分析影响输电线路参数工程计算精度的主要因素。针对输电线路沿线各段土壤电阻率变化较大且不易准确获取的问题,提出根据同一线路走廊内已投运线路实测参数反推沿线等效电阻率的方法;针对输电线路的局部同塔、局部平行及杆塔多样性特征,提出采用分段计算和杆塔参数简化处理方法;通过研究地线不同接地形式对零序参数的影响,结合实际调研分析,对理论计算公式进行了改进。基于MATLAB的AppDesigner,开发了输电线路参数辨识系统,结果表明,通过实用化改进,明显提升了输电线路参数计算的精度和工程实用性。

**关键词**:输电线路;参数辨识;实用计算;软件开发
**中图分类号**:TM 773 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.202103019

## 0 引言

输电线路电气参数是电力系统计算、保护整定计算等工作的基础资料,关系到电力系统安全稳定运行[1-3]。随着电网结构愈加复杂,输电线路间存在电磁耦合关系的情况越来越普遍,基于Carson公式的经典理论计算方法已无法满足工程对结果精度的要求,且实用性较差。近年来,基于数据采集与监视控制系统(SCADA)、相量测量装置(PMU)及故障录波数据的输电线路参数计算方法相继被提出[4-7]。

在输电工程设计阶段,由于不具备实测条件,评估输电线路参数是否满足设计要求仍需要依靠理论计算[8-9]。我国规定110 kV及以上电压等级线路需要实际测量,实测结果的准确性需要有理论计算结果作为判断依据,如:投运前的离线测量结果或利用SCADA、PMU及故障录波数据计算输电线路参数,其均需要与理论计算结果相对比。因此,研究输电线路参数的理论计算方法仍十分必要。

当线路运行方式发生变化时,零序互感参数可以通过测量出的独立零序阻抗矩阵变换计算得到[10],由此简化零序互感参数的计算方法,但计算方法仍依赖于实际测量结果。对于复杂的同塔线路,也可以通过对基本参数矩阵进行处理得到不同排列方式下的线路参数[8]。由于理论计算涉及许多变量,因此有必要对线路结构、所处环境等影响因素进行分析[11-16],并将其影响程度量化到计算中。本文结合工程实际,从土壤电阻率、架空地线、线路耦合情况以及杆塔结构4个方面,对零序参数的经典计算方法进行了改进,提出了改进计算流程,相较于经典计算方法其具有更高的精度和工程实用性。

另一方面,用于输电线路参数计算的软件主要有ATP/EMTP和PSCAD/EMTDC,两者均为通用型仿真软件,需要针对不同的线路和工作场景搭建不同的模型,工程实用性不强。除此之外,还有一些利用VC++、Visual Basic及MATLAB开发的参数计算软件[16-17],但当实际线路较复杂时,软件适用性还需要提高。本文采用改进的计算模型和方法,基于MATLAB的AppDesigner,设计和开发了用于输电线路参数计算的工程应用软件。经验证,相较于经典计算方法,所开发软件计算结果准确度更高。

## 1 输电线路参数的经典计算方法

经典计算方法采用Carson模型,结合输电线路自身的物理参数,假设线路三相完全换位,对线路参数进行简化计算。以下对经典计算方法进行简单介绍。

### 1.1 正序参数

对于单回线,其正序阻抗为:

$$Z_1 = R + jX_1 = R + j0.1445\lg(D_m/r') \quad (1)$$

$$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}} \quad (2)$$

其中,$R$和$X_1$分别为导线的电阻和正序电抗;$D_m$为相导线间几何均距;$r'$为导线有效半径;$d_{ab}$、$d_{bc}$、$d_{ca}$为三相导线之间的距离。

对于双回线,一回线路的正序阻抗为:

$$Z_1 = R + jX_1 = R + j0.1445\lg(D_{m2}/R_e) \quad (3)$$

$$R_e = \sqrt[6]{r_{eq}^3 d_{aa'}d_{bb'}d_{cc'}} \quad (4)$$

$$D_{m2} = \left(d_{ab}d_{ac}d_{ab'}d_{ac'}d_{ba}d_{bc}d_{ba'}d_{bc'}d_{ca}d_{cb}d_{ca'}d_{cb'}\right)^{1/12} \quad (5)$$

其中,$D_{m2}$为双回线的相导线间几何均距;$r_{eq}$为考虑导线分裂时的有效半径;$R_e$为双回线等效半径;$d$为

收稿日期:2020-07-22;修回日期:2021-01-22
基金项目:国家电网公司东北分部科技项目(SGDB0000DKJS1900188)
Project supported by the Science and Technology Project of Northeast Branch of SGCC(SGDB0000DKJS1900188)

任意2根导线之间的距离，下标代表对应的2根导线。

### 1.2 零序参数

对于单回线，其零序阻抗为：

$$Z_0 = R + 3R_d + j0.435\lg\left(D/\sqrt[3]{r'D_m^2}\right) \quad (6)$$

$$D = 660\sqrt{\rho/f} \quad (7)$$

其中，$D$为地中电流等值深度；$R_d$为大地电阻；$\rho$为土壤电阻率；$f$为频率。

对于有互感线路的双回输电线路，其等值零序阻抗为：

$$Z'_{10} = Z_0 + Z_m \quad (8)$$

$$Z_m = 0.15 + j0.435\lg(D/D_{12}) \quad (9)$$

$$D_{12} = (d_{aa'}d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bb'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}d_{cc'})^{1/9} \quad (10)$$

其中，$Z_m$为2回线路间的零序互阻抗；$D_{12}$为线路间等效几何均距。

当双回线路具有架空地线时，每一回线路的等值零序阻抗为：

$$Z_{10(g)} = Z'_{10} - Z^2_{0(1g)}/Z_{0(g)} \quad (11)$$

$$Z_{0(g)} = 3R_g + 0.15 + j0.435\lg(D/r'_{(g)}) \quad (12)$$

$$Z_{0(1g)} = 0.15 + j0.435\lg(D/\sqrt[3]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}}) \quad (13)$$

其中，$Z_{0(g)}$为地线的零序阻抗；$R_g$为地线的电阻；$r'_{(g)}$为地线的等价半径；$Z_{0(1g)}$为地线与第一回线路零序互阻抗。

对于多回线路和多根地线的输电线路，其正序阻抗参数及零序阻抗参数计算方法与上述类似，但要考虑所有的有电磁耦合关系的线路对线路参数的影响。

## 2 经典计算方法的改进

由于导线型号、杆塔结构以及地线型号等因素的综合影响，输电线路参数计算公式的构成十分复杂。计算时如果将全线所有杆塔和地线型号都充分考虑，计算量非常大，工程上也不可行。此外，由于条件限制，有些参数现场人员无法准确提供，如沿线的土壤电阻率。即使对土壤电阻率进行实测，用一处的土壤电阻率代替全线土壤电阻率也会产生较大的误差。因此，需要按照实际工程情况和需求对理论计算方法进行改进。

### 2.1 土壤电阻率的实用化处理

针对沿线土壤电阻率误差较大的问题，提出通过同一线路走廊内已投运线路的实际测量值，必要时对线路进行分段，采用最小二乘法反推沿线等效土壤电阻率的方法，其表达式为：

$$\varphi = \min\sum_{i=1}^{\infty}(Y_{\rho i} - Y_i)^2 \quad (14)$$

其中，$Y_{\rho i} = f(\rho i)$为第$i$段用土壤电阻率表示的输电线路零序参数计算公式；$Y_i$为第$i$段实际测量数据。通过改变土壤电阻率找到$\varphi$最小值，此时的土壤电阻率即为线路沿线的等值土壤电阻率。

图1为全线土壤电阻率修正方法示意图。如图所示，对于一回已投运、新增一回输电线路的情况及与已投运线路全程同塔或全程平行的情况，可以通过已投运线路的实测参数，反推沿线电阻率用于新建线路正序参数、零序参数及互感参数的计算。

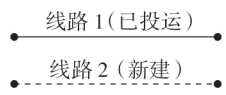


**图1 全线土壤电阻率修正方法示意图**

Fig.1 Schematic diagram of whole line correction method of soil resistivity

图2为土壤电阻率分段修正方法示意图。如图所示，对于完全新建线路的情况，可以采用沿线地质相近输电线路，用实测参数进行反推。若没有完全相同走廊的输电线路，可以采用分段的方法，采取多条已投运线路的实测值分段利用最小二乘法反推等值土壤电阻率。

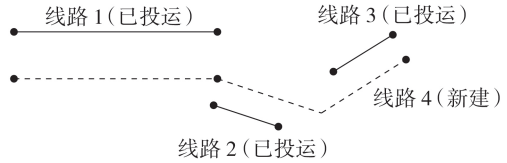


**图2 土壤电阻率分段修正方法示意图**

Fig.2 Schematic diagram of segmental correction method of soil resistivity

图3为土壤电阻率网格法修正示意图。如图所示，如果沿线没有相近的输电线路，可以采用同一网格内的输电线路的实测值进行反推等效土壤电阻率。网格划分方法根据地形和输电线路密度等实际情况确定。

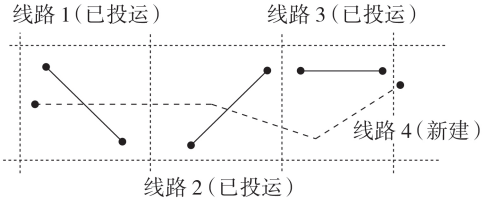


**图3 土壤电阻率网格法修正示意图**

Fig.3 Schematic diagram of grid correction method of soil resistivity

### 2.2 地线的实用化处理

实际工程中，测量某一回路零序参数时，地线已经架设好并且正常运行，地线对线路参数的测量是有影响的，因此在计算时必须考虑架空地线对线路零序自阻抗和零序互阻抗的影响。经调研发现，目前500 kV线路的光纤复合架空地线（OPGW）均为

逐级接地。通过对接地方式进行仿真和测量发现，OPGW 全线对输电线路起去磁作用，实际测量到的零序自阻抗和互阻抗为OPGW影响下的等效零序自阻抗和等效零序互阻抗，其理论计算公式分别为：

$$Z_{10(g)}=Z'_{10}-Z^2_{0(1g)}/Z_{0(g)} \tag{15}$$

$$Z_{12m}=Z_m-Z^2_{0(1g)}/Z_{0(g)} \tag{16}$$

为了减少电能损耗并保证OPGW安全可靠运行，目前在输电线路设计时已经考虑安装复合阻抗。复合阻抗主要是利用非线性电阻高压时导通、低压时呈高阻特性，其等效模型如图4所示。

**图4　复合阻抗的等效模型**

Fig.4　Equivalent model of composite impedance

带有复合阻抗的OPGW与大地的交流回路可以用卡松理论模型表示，如图5所示。图中，$\boldsymbol{V}_S$为交流系统电压；$R_{jd}$为杆塔接地电阻。

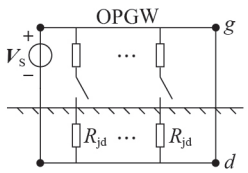


**图5　带复合阻抗的OPGW–大地等效回路**

Fig.5　Equivalent loop of OPGW-earth with composite impedance

在带有复合阻抗的OPGW影响下，输电线路的等效零序自阻抗和互阻抗的表达式中$Z_{0(g)}$变为：

$$Z_{0(g)}=3[R_g+nR_{jd}/L+R_d+\mathrm{j}0.1445\lg(D/r'_{(g)})] \tag{17}$$

其中，$n$为复合阻抗没有导通的数量；$L$为输电线路长度。

由式(17)可知，复合阻抗动作个数增加时会影响零序阻抗值。当复合阻抗全部导通时，输电线路的等效零序自阻抗相当于OPGW逐级接地时的等效零序自阻抗。当复合阻抗都断开时，输电线路的等效零序自阻抗最大。因此，目前输电线路参数的实际测量需要区分是否有复合阻抗。如果有复合阻抗，需要对复合阻抗总数量的1/3~1/2进行短接，用来模拟故障时复合阻抗动作给零序参数带来的影响。此时，式(17)中的$n$、$R_{jd}$和$L$应按照实际线路进行取值。

普通地线一般采取部分分段绝缘且每段绝缘单点或多点接地的方式。正常运行时，地线中没有零序电流流过，此时地线对输电线路零序参数没有影响。当发生故障时，避雷器动作使得架空地线导通，流过零序电流，会对输电线路参数产生影响。绝缘子击穿时，相当于输电线路经一个电阻与杆塔接地。对于分段绝缘地线，若地线仅在该故障杆塔单点接地，则地线上的电压基本为地电位或存在一短时过电压，该过电压在地线上传播衰减，可能引起相邻杆塔的地线绝缘子闪络，造成短时地线上存在一个环流，该环流对输电线路有一定去磁影响，但距离过短，一般影响不大，此时零序自阻抗不受地线影响，仍为：

$$Z_{10(g)}=Z_{10} \tag{18}$$

若地线在该故障杆塔绝缘，则杆塔的短时电位上升很可能使地线绝缘击穿，造成地线上形成短时环流，环流的距离取决于故障杆塔与地线接地的杆塔距离，最长为一个分段绝缘的距离。因此，对于普通地线，在测量时需要按照规定在部分杆塔进行临时接地处理，将1/3~1/2段架空地线的每段首末端接地，以此来模拟真实故障下绝缘子动作给零序参数带来的影响。此时零序参数分别为：

$$Z_{10(g)}=Z'_{10}-\alpha(Z^2_{0(1g)}/Z_{0(g)}) \tag{19}$$

$$Z_{12m}=Z_m-\alpha(Z^2_{0(1g)}/Z_{0(g)}) \tag{20}$$

其中，$\alpha$为实际测量时短接处理的线路长度占线路全长的百分比。

### 2.3　线路间的走向及杆塔结构的实用化处理

目前，500 kV输电线路与互感线路有同塔与平行这2种。双回输电线路有全程同塔、全程平行局部同塔以及局部同塔且局部平行这4种情况。局部同塔主要有3种情况，如图6所示，其中情况(3)最为常见。

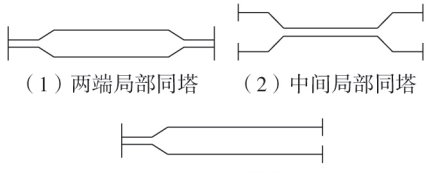


**图6　3种常见局部同塔线路示意图**

Fig.6　Schematic diagram of three typical topologies of line partially on same tower

对于局部同塔或局部平行的线路，提出采用分段计算方法，分别计算同塔段、平行段以及无互感段的线路参数，根据同塔段及平行段占比的形式进行计算，由此求出全线的参数，计算公式如下：

$$z_0=(z_{P0}L_P+z_{T0}L_T+z_{D0}L_D)/L \tag{21}$$

$$z_m=(z_{Pm}L_P+z_{Tm}L_T+z_{Dm}L_D)/L \tag{22}$$

其中，$z_0$为全线零序自阻抗参数；$z_m$为全线零序互阻抗等效参数；$z_{P0}$、$z_{T0}$、$z_{D0}$和$z_{Pm}$、$z_{Tm}$、$z_{Dm}$分别为平行段、同塔段及单回独立段的单位阻抗零序自参数和互参数；$L_P$、$L_T$、$L_D$分别为平行段、同塔段及单回独立段的线路长度。

计算时，如果各段杆塔型号各不相同，将每种杆塔型号均用于计算会使工程计算变得十分复杂，因

此需要对杆塔参数提出简化处理方法。通过对东北地区实际输电线路进行调研发现，500 kV电压等级下单回线主要塔型为酒杯塔及猫头塔。酒杯塔的导线排列方式为水平排列，猫头塔的导线排列形式为三角形；双回线主要采用鼓型塔，2回导线的排列方式一般为对称排列。

根据调研分析结果，并结合电网设计中的标准模块参数，针对全线杆塔信息不详知的情况，提出采用各模块下杆塔参数的典型值进行实用化计算，以此减少对杆塔信息的依赖性，提高计算方法的工程实用性。

### 2.4 输电线路参数的改进计算流程

通过上述对输电线路参数影响因素的分析和实用化处理，结合工程实际情况调研结果，对输电线路参数的计算方法进行了改进，改进的部分包括：①土壤电阻率；②地线型号及接地方式；③线路走向和杆塔型号。利用改进计算方法分别设计有互感线路和无互感线路的计算流程，见附录中图A1及图A2。计算流程主要由计算线路基本参数、修正土壤电阻率、消去架空地线影响、计算互感线路影响、计算正序参数、计算零序参数几个部分组成。

## 3 软件设计与实现

根据工程需求，结合东北地区实际情况，在MATLAB的AppDesigner平台上开发了输电线路参数辨识系统，主界面如附录中图A3所示，由已投运线路和拟投运线路2个模块构成，拟投运线路模块由参数计算和测量结果比较2个子模块构成。

### 3.1 已投运线路的信息查询

线路库中存储已有东北地区500 kV输电线路的实际线路图及实际测量参数结果，点击线路可以显示对应线路的基本工频参数信息，包括线路名称、长度、正序阻抗、零序阻抗、测试时间等信息。

### 3.2 拟投运线路的参数计算

该模块用于输电线路的工频参数计算，计算流程采用第2节的改进计算方法。在计算之前，用户可以选择线路类型，分有互感线路和无互感线路2种情况，如附录中图A4所示。计算界面如附录中图A5所示，计算结果可以用计算等值沿线土壤电阻率的方法进行修正，功能界面如附录中图A6所示。

### 3.3 新投运线路实测参数结果准确性判定

新投运线路的实测参数准确性判别有2种途径：新投运线路的参数在计算结束后，如果此时线路已实测，可以在参数计算界面选择“实测值比较”功能，弹出实测值比较界面，直接对实测结果进行准确性判别，如附录中图A7所示；如果此时还未对实际线路进行测量，则可以在计算界面选择“保存结果”功能，将计算结果保存到后台，等进行实测后，通过“拟投运线路”模块下的“测量结果比较模块”，查找以前保存的待判别的线路计算结果，进而对实测参数进行判别并显示实测结果是否合理。

## 4 测试验证与结果分析

选取东北地区已投入运行的输电线路进行计算结果的校验。选取宽利1号线和宽利2号线，2条线路全程同塔双回架设。宽利1号线先投入运行，宽利2号线后投入运行。

分别采用经典计算方法和改进的计算方法对线路参数进行计算，计算结果如表1所示。从表1可以看出，经典方法由于没有充分考虑输电线路的实际情况而导致计算结果与实测结果偏差较大，零序自电抗偏差为8.6%，零序互电抗偏差为20.8%。采用实用化改进方法后，零序自电抗偏差减小为1.5%，零序互电抗偏差减小为2.3%。可以看出改进计算方法可以很大程度地提高计算精度。

**表1 宽利2号线计算结果**

Table 1 Calculation results of Kuanli Line 2

| 线路参数 | 实测值/Ω | 计算值/Ω | | 误差/% | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 经典法 | 改进法 | 经典法 | 改进法 |
| $R_1$ | 2.39 | 2.27 | 2.27 | −4.8 | −4.8 |
| $X_1$ | 32.11 | 31.66 | 31.72 | −1.4 | −1.1 |
| $R_0$ | 22.18 | 25.32 | 23.30 | 14.1 | 5.0 |
| $X_0$ | 102.13 | 110.99 | 100.59 | 8.6 | −1.5 |
| $X_m$ | 57.94 | 70.04 | 59.33 | 20.8 | 2.3 |

进而选取部分东北地区500 kV的输电线路，包含局部同塔、全线同塔以及全线平行这3种常见类型进行计算，其结果如表2—4所示，从计算结果可以得出如下结论。

**表2 高宽2号线计算结果**

Table 2 Calculation results of Gaokuan Line 2

| 线路参数 | 实测值/Ω | 计算值/Ω | | 误差/% | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 经典法 | 改进法 | 经典法 | 改进法 |
| $R_1$ | 0.92 | 0.67 | 0.67 | −27.2 | −27.2 |
| $X_1$ | 9.13 | 9.44 | 9.36 | 3.4 | 2.5 |
| $R_0$ | 6.46 | 5.97 | 7.14 | 7.6 | 10.5 |
| $X_0$ | 28.35 | 26.76 | 29.16 | 5.6 | 2.8 |
| $X_m$ | 15.36 | 13.56 | 15.96 | 11.7 | 3.9 |

**表3 高沙2号线计算结果**

Table 3 Calculation results of Gaosha Line 2

| 线路参数 | 实测值/Ω | 计算值/Ω | | 误差/% | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 经典法 | 改进法 | 经典法 | 改进法 |
| $R_1$ | 2.01 | 2.03 | 2.03 | 1.1 | 1.1 |
| $X_1$ | 28.86 | 29.11 | 28.29 | 0.8 | −1.9 |
| $R_0$ | 21.71 | 26.20 | 19.68 | 20.6 | −9.3 |
| $X_0$ | 76.66 | 94.04 | 81.47 | 22.6 | 6.2 |
| $X_m$ | 24.74 | 32.27 | 22.93 | 30.4 | −7.2 |

表4　瓦海2号线计算结果

Table 4　Calculation results of Wahai Line 2

| 线路参数 | 实测值 / Ω | 计算值 / Ω | | 误差 / % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 经典法 | 改进法 | 经典法 | 改进法 |
| $R_1$ | 1.58 | 1.40 | 1.40 | −11.3 | −11.3 |
| $X_1$ | 23.11 | 23.97 | 23.42 | 3.7 | 1.4 |
| $R_0$ | 21.70 | 19.74 | 18.54 | 9.0 | −14.5 |
| $X_0$ | 74.29 | 81.75 | 77.33 | 10.0 | 4.1 |
| $X_m$ | 49.75 | 53.44 | 47.21 | 7.4 | −5.1 |

（1）改进方法对于电抗参数的修正具有明显的效果。修正后的正序电抗、零序自电抗及零序互电抗的计算偏差均在10% 以内，准确性较高。其中零序互电抗的平均计算偏差从17.58% 降低到4.63%；零序自电抗的平均计算偏差从11.7% 降低到3.65%。

（2）改进方法对于电阻参数具有一定的修正效果，但误差波动范围比较大，从1% 左右到27% 左右不等，和电抗分量相比偏差较大。分析认为存在如下原因：①在测量电阻值时，受仪器仪表精度影响较大，由于环境因素等影响，测量结果本身存在一定误差；②相比于电抗分量，电阻分量本身绝对值很小，相对偏差显得更加明显。因此可以考虑根据实际测量时的环境参数，如温度、湿度等参数对电阻计算值进行修正。

## 5　结论

本文基于输电线路参数的经典计算方法，解析了输电线路参数工程计算误差的主要来源，从沿线土壤电阻率、地线参数、线路间的走向及杆塔结构等几个方面对经典计算方法进行了工程实用化改进，并采用MATLAB的AppDesigner开发了输电线路参数辨识系统。采用东北地区实际输电线路作为实例，对软件的功能进行了测试和分析，相比于经典计算方法，改进的方法考虑了工程实用性，计算结果具有更高的准确性。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

## 参考文献：


[1] H.WAYNE BEATY. 电力计算手册[M]. 衣涛，张庚午，王承民，等译. 北京：中国电力出版社，2007：181-215.

[2] 马俊杰，吴伯华. 架空输电线路工频参数测量干扰分析及对策[J]. 华中电力，2010，23(3)：6-9，14.
MA Junjie，WU Bohua. Analysis of disturbance and countermeasure on transmission line parameters testing[J]. Central China Electric Power，2010，23(3)：6-9，14.

[3] 邓军，肖遥，郝艳捧. 新型同塔双回高压直流输电线路分布参数测量方法及工程应用[J]. 电力自动化设备，2016，36(3)：154-158，174.
DENG Jun，XIAO Yao，HAO Yanpeng. Measuring of distributed parameter and its application for dual-loop HVDC transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(3)：154-158，174.

[4] 安艳秋，高厚磊. 基于同步相量测量的线路参数在线计算[J]. 电力自动化设备，2002，22(9)：21-23.
AN Yanqiu，GAO Houlei. On-line calculation of transmission line parameters using synchronized phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment，2002，22(9)：21-23.

[5] 李钦，项凤雏，颜伟，等. 基于SCADA及PMU多时段量测信息的独立线路参数估计方法[J]. 电网技术，2011，35(2)：105-109.
LI Qin，XIANG Fengchu，YAN Wei，et al. An approach to estimate parameters of single transmission line based on multi-interval information measured by SCADA and phasor measurement units[J]. Power System Technology，2011，35(2)：105-109.

[6] 薛安成，徐飞阳，游宏宇，等. 基于微型PMU的配电线路抗差参数辨识[J]. 电力自动化设备，2019，39(2)：1-7，43.
XUE Ancheng，XU Feiyang，YOU Hongyu，et al. Robust parameter identification of distribution line based on micro PMU[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(2)：1-7，43.

[7] 梁振锋，李文睿，张惠智，等. 利用非全相运行故障录波数据的线路参数计算[J]. 西安交通大学学报，2018，52(12)：106-111，136.
LIANG Zhenfeng，LI Wenrui，ZHANG Huizhi，et al. Calculation of line parameters using non-all phase operation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2018，52(12)：106-111，136.

[8] 隆茂. 复杂同塔线路参数对称性及对保护影响分析[D]. 武汉：华中科技大学，2015.
LONG Mao. The analysis concerning symmetry of complex parallel transmission lines on same tower parameters and its effect on relay protection[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2015.

[9] 靳楠. 复杂情况下架空输电线路参数在线校准方法研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
JIN Nan. Research on online calibration method of overhead transmission line parameters under complex conditions[D]. Beijing：North China Electric Power University，2017.

[10] 许扬，陆于平，袁宇波. 一种同杆架设多回线路简化零序互感计算方法[J]. 电力自动化设备，2013，33(6)：94-99.
XU Yang，LU Yuping，YUAN Yubo. Calculation of zero-sequence mutual inductance for multi-circuit parallel transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment，2013，33(6)：94-99.

[11] 李晓华，刘飘，李帆，等. 同塔输电线路零序互感参数的规律研究[J]. 南方电网技术，2017，11(12)：76-84.
LI Xiaohua，LIU Piao，LI Fan，et al. Study on the regularity of zero-sequence mutual inductance parameters of transmission lines on the same tower[J]. Southern Power System Technology，2017，11(12)：76-84.

[12] LI B T，LÜ M. A calculation method of transmission line equivalent geometrical parameters based on power-frequency parameters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2019，111：152-159.

[13] 郑钏，蔡金锭. 输电线路工频参数影响因素的量化研究[J]. 高电压技术，2008，34(4)：813-815，838.
ZHENG Chuan，CAI Jinding. Quantification of factors influencing transmission line parameters[J]. High Voltage Engineering，2008，34(4)：813-815，838.

[14] 彭向阳，胡卫，毛先胤，等. 输电线路架空地线接地方式对线路零序参数的影响[J]. 电网技术，2014，38(5)：1302-1309.
PENG Xiangyang，HU Wei，MAO Xianyin，et al. Impacts of overhead ground wire grounding modes on zero-sequence parameters of transmission line[J]. Power System Technology，2014，38(5)：1302-1309.

[15] AHMADI H，ARMSTRONG M. Transmission line impedance calculation using detailed line geometry and HEM soil resis-

tivity measurements[C]//2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE). Vancouver,BC,Canada:IEEE,2016:1-4.

[16] 沈亦钦. 关于输电线路参数计算软件的开发[J]. 电力与能源,2016,37(5):645-648.
SHEN Yiqin. Development of transmission line parameter calculation application software[J]. Power & Energy,2016,37(5):645-648.

[17] 刘振波. 输电线路工频参数理论计算软件的研制[D]. 保定:华北电力大学,2005.
LIU Zhenbo. Development of theoretical calculation soft-ware for power frequency parameters of transmission lines[D]. Baoding:North China Electric Power University,2005.

作者简介:

王开白

王开白(1973—),男,吉林镇赉人,高级工程师,主要研究方向为高压电网继电保护运行管理(**E-mail**:wangkaibai@sina.com);

姜雨萌(1996—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统及继电保护(**E-mail**:jiangyumeng070@163.com);

李卫星(1977—),男,河南正阳人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制(**E-mail**:wxli@hit.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Practical calculation method and system of transmission line zero-sequence parameters

WANG Kaibai[1],JIANG Yumeng[2],LIU Jiaqing[1],CHAO Pupu[2],SUN Zhengwei[1],BAO Bin[1],LI Weixing[2]

(1. Northeast Branch of State Grid Corporation of China,Shenyang 110000,China;
2. School of Electrical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

**Abstract**: Based on the theoretical derivation of the transmission line parameter calculation method, the main factors that affect the transmission line parameter engineering calculation accuracy are analyzed. For the problem that the soil resistivity along the transmission line is variable and difficult to obtain accurately, a method for inferring the equivalent resistivity along the line based on the measured parameters of the lines in operation is proposed. For the transmission line characteristics of line partially on the same tower, line partially parallel and tower diversity, the section calculation method and method for simplifying parameters of tower are proposed. By studying the influence of different grounding form of ground wire on zero-sequence parameters, combined with actual investigation and analysis, the theoretical calculation formula is improved. Based on AppDesigner of MATLAB, a transmission line parameter identification system is developed. The results show that the accuracy of transmission line parameter calculation and engineering practicability are obviously improved through practical improvement.

**Key words**: transmission line; parameter identification; practical calculation; software development

# 附录

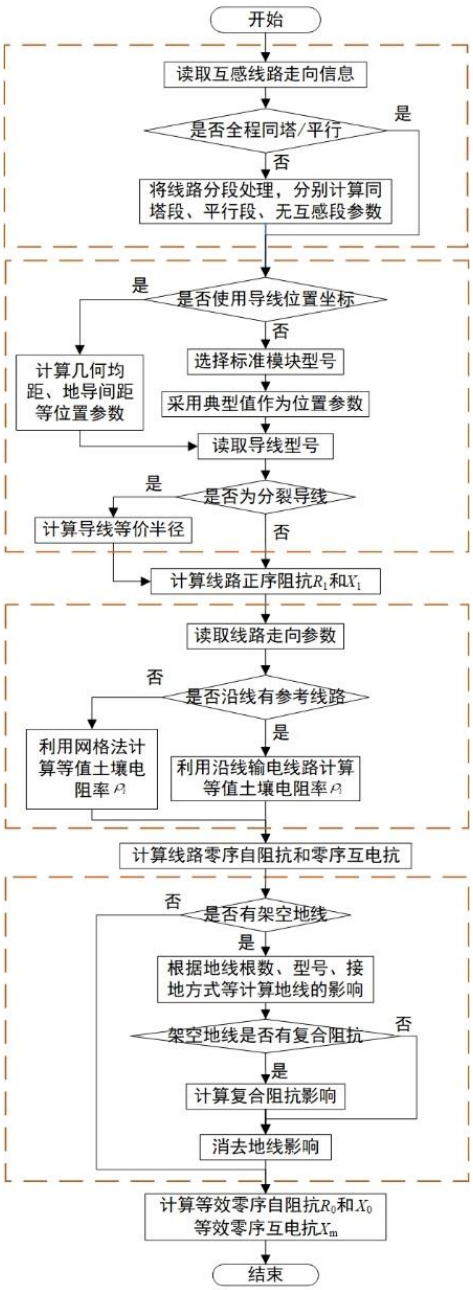


图 A1　有互感线路的改进计算流程

Fig.A1　Improved calculation process for lines with mutual inductance

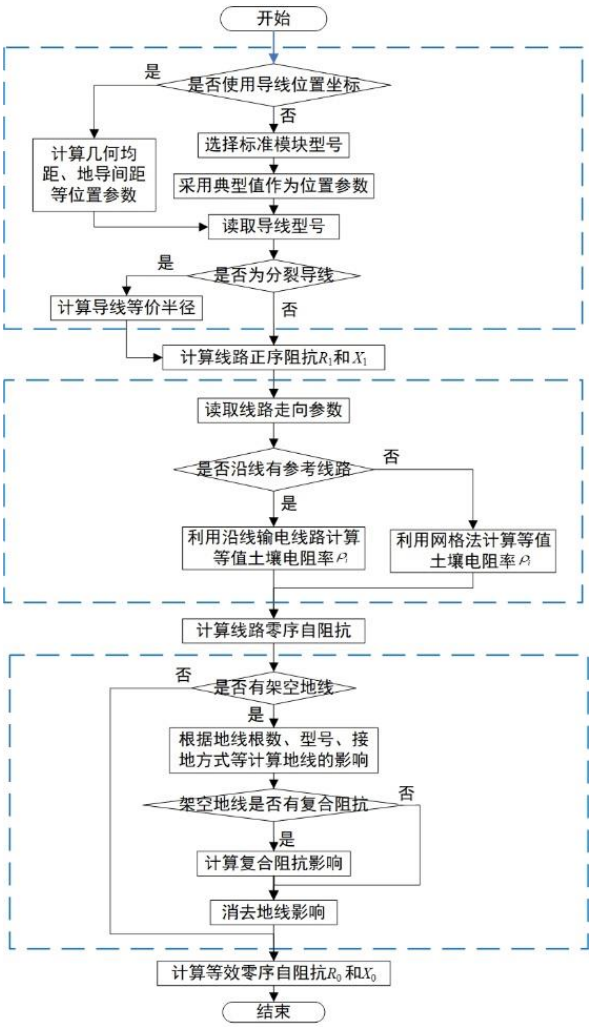


图 A2　无互感线路的改进计算流程

Fig.A2　Improved calculation process for lines without mutual inductance

图 A3　登录与权限设置界面

Fig.A3　Login and permission setting interface

图 A4　线路类型选择界面

Fig.A4　Line type selection interface

图 A7　实测结果比较界面

Fig.A7　Measured result comparison interface

图 A5　参数计算界面

Fig.A5　Parameter calculation interface

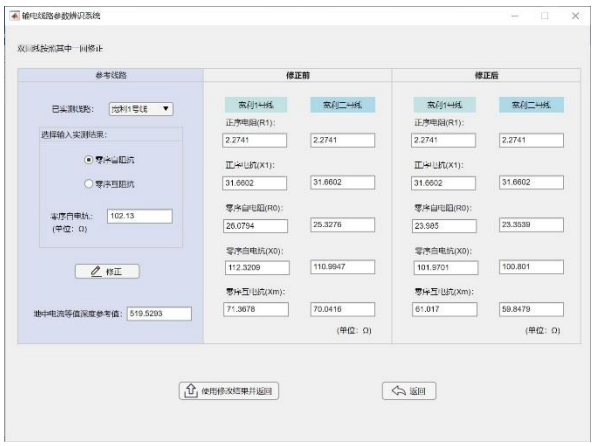


图 A6　计算结果修正界面

Fig.A6　Calculation result correction interface