

交流输电线路附近民房上方电场解耦计算方法

徐吉来¹, 高克利¹, 万保权¹, 路遥¹, 刘兴发¹, 张亮²

- (1. 电网环境保护国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 湖北省 武汉市 430074;
2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江省 哈尔滨市 150030)

Decoupled Calculation Method of Electric Field Above Civil houses Near AC Transmission Line

XU Jilai¹, GAO Keli¹, WAN Baoquan¹, LU Yao¹, LIU Xingfa¹, ZHANG Liang²

- (1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection (China Electric Power Research Institute), Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. Heilongjiang Province Electric Power Research Institute, Harbin 150030, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Due to the limited power transmission corridor, the HVAC overhead lines are inevitably adjacent to the residential platforms. To meet the limit requirements of the electric field, accurately and quickly predicting the power frequency electric field above the residential platforms is crucial for line design and electromagnetic environment assessment. In this paper, an engineering practical calculation method using the distortion coefficient curve of the residential platform is proposed. The platform distortion coefficient curves of different sizes are fitted by the multiple regression method. Finally, a true test is carried out to prove the predicted results. The result shows: the multiple regression goodness of fit is above 0.997, and the fitting degree of the formula is good. The electric field distribution solved by the distortion coefficient curve is compared with the measured results, and the maximum relative error is 5.9%, which verifies the accuracy of the prediction method. The research results can provide a technical basis for the fast prediction of the power frequency electric field above the nearby residential platform during the design process of the AC transmission line.

KEY WORDS: power frequency electric field; private housing platform; distortion coefficient; multiple regression analysis; simulated charge method; finite element method; true test

摘要: 由于输电走廊有限, 高压交流架空线路不可避免地邻近民房平台, 准确而快速地预测民房平台上方工频电场以满足限值要求对线路设计和环境评价至关重要。该文提出使用畸变系数曲线计算民房平台电场的工程实用方法, 通过多元

回归方法对不同尺寸的平台畸变系数进行拟合, 并开展真型试验以证明预测结果。结果表明: 多元回归拟合优度达 0.997 及以上, 畸变系数公式拟合程度较好; 利用畸变系数曲线求解的电场分布与实测结果对比, 最大相对误差为 5.9%, 验证了预测方法的准确性。研究成果可为交流输电线路设计过程中, 附近民房平台上方工频电场的快速预测提供支撑。

关键词: 工频电场; 民房平台; 畸变系数; 多元回归分析; 模拟电荷法; 有限元法; 真型试验

0 引言

为实现大范围资源的优化配置, 我国大力发展超特高压输电网络^[1-4]。在进行超特高压交流输电线路设计时, 由于输电走廊有限, 线路靠近居民区民房、农用大棚等物体的情况日益普遍, 引起工程沿线居民的环保投诉。根据《环境影响评价技术导则》(HJ 24-2020)中的评估要求, 生态环境部明确了对线路附近区域民房平台的工频电场监测与预测要求^[5]。因此, 实现平台上方电场的准确预测, 对于线路设计和沿线电磁环境友好具有重要的意义。

目前, 交流架空线路附近存在民房平台时的工频电场预测常见的计算方法包括模拟电荷法、有限差分法、边界元法以及有限元法。其中应用最为广泛的是模拟电荷法^[6-10]和有限元法^[11-15]。模拟电荷法基于静电场的唯一性定理, 其优势在于原理简单, 易于编程, 计算效率较高, 在地面上方 1.5m 处工频电场计算中具有广泛的应用^[5]。但在计算有平台的问题时, 一般采用的点电荷、线电荷的模拟电荷法难以等效平台边界的电场分布, 导致模拟电荷法在该问题计算中存在一定的局限性。由于部分

基金项目: 国家电网公司总部科技项目: 输电线路附近民房平台处电场控制技术(8100-202055155A-0-0-00)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation: Research on the technology of electric field control at residential platform near transmission lines (8100-202055155A-0-0-00).

商业软件的应用以及计算机计算能力的提高,越来越多学者采用有限元方法进行复杂场域的工频电场计算。由于直接对民房平台上表面电位值离散拟合,有限元法利于民房平台上方的电位和电场强度求解。然而,其主要问题是需进行大量的场域剖分,尤其对于三维问题,计算时间和数据量均较大。针对单个问题尚可,却不利于线路设计过程中的大规模运算。

在线路设计过程中,需要计算多种线路高度、极间距、导线型式等参数条件下地面 1.5m 处电场强度。考虑民房平台时,又需要进行不同高度、长宽、与边相导线水平距离等参数的平台上方电场强度预测。在快速而准确地大规模求解上述问题时,目前的计算方法无论是模拟电荷法或有限元法,均存在一定的局限性。对于平台上方电场预测,通常采用将地面提升到平台高度或直接计算无平台时空间电场强度的方法,前者改变了计算场域大小,相当于考虑了无限大平面上方电场强度分布,与实际平台电场分布特性仍有差距;而后者则没有考虑到民房平台对电场的畸变作用。两种方法可以满足计算效率问题,但难以满足计算准确性。

因此,针对上述线路设计工程中的实际问题,本文提出基于畸变系数的交流线路附近民房平台上方的工频电场解耦计算方法。对比分析不同塔型、不同导线型式等参数条件下的电场强度畸变系数,并利用回归拟合得到畸变系数与平台尺寸间的函数关系,结合利用模拟电荷法求得的地面 1.5m 处工频电场强度分布。结果可实现不同尺寸平台上方电场强度的快速求解,以满足线路设计过程中需要的多种参数条件下的大规模运算。

1 工频电场场域方程及畸变系数定义

1.1 工频电场评估区域

根据《环境影响评价技术导则》(HJ 24-2020)的评估要求^[5],超、特高压输电线路的电场评价范围为边导线地面投影外两侧各 50m。在边导线地面投影外两侧各 20m 范围内有电磁环境敏感目标的架空线,需对电磁环境影响进行全面、详细的评价。在无其他监测高度需求时,监测探头需架设在地面(或立足平面)上方 1.5m 处^[16],因此一般评估 1.5m 高度的工频电场。

线路附近存在平台时,需计算和监测地面及平台上表面 1.5m 高度的工频电场强度,计算场域的

俯视图和正视图如图 1 所示。图中: l_x 为平台垂直线路方向的长度; l_y 为平台平行线路方向长度; h 为平台高度。计算场域中包括空气域和平台场域。

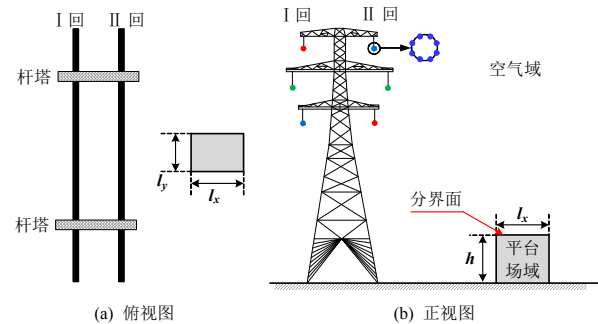


图 1 输电线路附近平台计算场域的俯视图和正视图

Fig. 1 Calculation area of top and front view of the platform near the transmission line

1.2 场域方程与边界条件分析

工频电场为电准静态场,由于其频率为 50Hz,因时变磁场产生的感应电场远小于电荷产生的库仑电场,可以忽略,因此可仅考虑由线路电荷产生的库仑电场,与静电场采用相似的方法求解^[13-15]。电准静态场满足的泊松方程由相量形式^[17]表示为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \dot{\mathbf{E}} = \dot{\rho} / \varepsilon \\ \dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\mathbf{E}}$ 为电场强度矢量, V/m; $\dot{\rho}$ 为电荷密度, C/m³; ε 为介电常数, F/m; $\dot{\phi}$ 为电位值, V。

如图 1 所示,对于建筑物与空气之间的分界面,在电场稳定后,由电流在分界面的法向连续性^[17]有:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_{1c} + j\omega\varepsilon_1 \dot{\mathbf{E}}_1) = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_{2c} + j\omega\varepsilon_2 \dot{\mathbf{E}}_2) \quad (2)$$

式中: \mathbf{n} 为垂直于分界面的单位矢量; \mathbf{J}_{1c} 和 \mathbf{J}_{2c} 为传导电流密度矢量, A/m²; $\dot{\mathbf{E}}_1$ 和 $\dot{\mathbf{E}}_2$ 为电场强度矢量, V/m; ε_1 和 ε_2 为介电常数, F/m。

传导电流密度与电场强度之间关系可由欧姆定律表示:

$$\mathbf{J}_c = \sigma \cdot \dot{\mathbf{E}} \quad (3)$$

式中: \mathbf{J}_c 为传导电流密度矢量, A/m²; σ 为电导率, S/m。

联立式(2)与式(3),可得到分界面的电场强度关系,如下:

$$\mathbf{n} \cdot (\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1) \dot{\mathbf{E}}_1 = \mathbf{n} \cdot (\sigma_2 + j\omega\varepsilon_2) \dot{\mathbf{E}}_2 \quad (4)$$

式中 σ_1 和 σ_2 为电导率, S/m。

因此,边界位置的电场强度法向分量与 $\sigma + j\omega\varepsilon$ 呈反比,表 1 给出了部分材料的电导率和相对介电

常数^[13, 17]。

表 1 常见材料的电导率和相对介电常数

Table 1 Conductivity and relative permittivity of common materials

材料	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
空气	0	1
铜	5.8×10 ⁷	1
钢铁	1×10 ⁷	1
石灰石	1×10 ⁻²	2.2~2.5
水泥	1×10 ⁻² ~1×10 ⁻¹	2~10
干土	1×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻⁴	3~4
木材	1×10 ⁻⁶ ~1×10 ⁻²	2~10
蒸馏水	2×10 ⁻⁴	81

对于一般输电线路附近建筑物边界，一侧为空气材料，另一侧为建筑物材料。考虑建筑物的电导率和介电常数最小的情况，当建筑物电导率为 10⁻⁶ S/m、相对介电常数为 2 时，建筑物内部电场强度法向分量幅值也仅约外部法向分量幅值的 0.0028 倍，此时内部基本可以认为无电流流入，即建筑物按照电位为零的等势体考虑，这与文献[13]的结论相同。

此时，在空气域中满足电位的拉普拉斯方程，建筑物边界和地面均属于第一类边界条件。

1.3 平台畸变系数定义

由于工频电场一般评估 1.5m 高处的电场强度，因此平台畸变系数定义为平台上 1.5m 高度处和地面 1.5m 高度处的电场强度之比，定义由建筑物引起的畸变系数 k 为

$$k = E_b / E_g \quad (5)$$

式中： E_g 为地面 1.5m 高处工频电场强度幅值，V/m； E_b 为民房平台上表面 1.5m 高处工频电场强度幅值，V/m。

值得说明的是，畸变系数 k 是关于平台尺寸、高度、平台与导线参数的函数，在二维场域中为曲线，三维场域中为曲面。一般来说，在建筑物边沿附近畸变值较大，而在中心附近畸变较小。如图 2 所示，在二维场域中，可采用抛物线进行描述，而在三维场域中，则可以采用旋转抛物面进行描述。

由于一般建筑物和地面附近的工频电场以垂直分量为主，因此可以参考部分电场测量装置的校准方法^[18-20]，采用匀强电场下建筑物上方电场强度幅值与地面 1.5m 处电场强度幅值求解畸变系数。在建筑物尺寸一定时，该畸变系数在改变平台与导线间距离和导线参数时变化较小，将在下文进行详

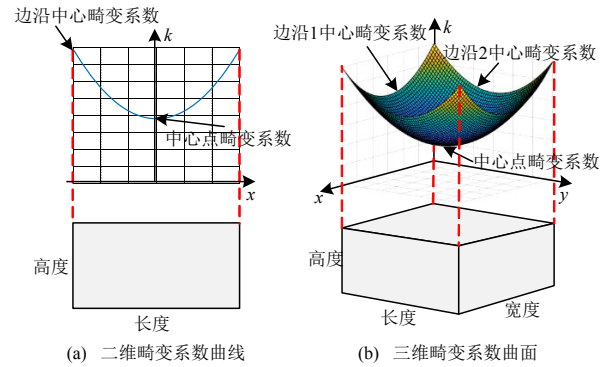


图 2 畸变系数曲线/面描述

Fig. 2 Distortion coefficient curve/surface description

细的讨论。由于监测要求为立足平台上方 1.5m 处，并且一般在线路设计时考虑为长方体的规则形状，为简化模型，本文中的建筑物平台模型均为长方体（下文简称为平台），不考虑平台与线路存在夹角的情况。

1.4 计算流程

本文计算方法的流程图如图 3 所示，其中拟合函数是使用多元回归方法求得的已知函数，通过解耦计算平台上方工频电场分布。基于拟合函数的交流架空线路附近民房上方电场解耦计算步骤如下：

- 1) 基于模拟电荷法，求解无民房存在时的地面 1.5m 高度处的电场强度分布 E_g ；
- 2) 基于拟合函数，求解指定尺寸平台的畸变系数曲线 k ；
- 3) 根据线路和平台的位置关系，将平台的畸变系数曲线 k 平移至相应位置；
- 4) 将地面电场强度分布 E_g 与畸变系数 k 相乘，得到平台上方电场强度分布 E_b 。

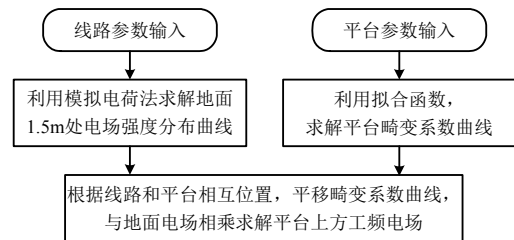


图 3 计算流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calculation process

2 畸变系数与平台、导线参数之间关系

如图 1 所示，平台的主要参数包括垂直线路方向长度 l_x 、平行线路方向长度 l_y 和高度 h 。以三维场域为例，可通过拟合曲线获得指定尺寸民房平台上方中心点畸变系数和两个边沿中心的畸变系数。由于电场强度对于 l_x 和 l_y 具有对称性质，两个边沿中心的畸变系数对于 l_x 和 l_y 也具有对称性质，因此

可仅获得面中心点畸变系数和平行线路边沿中心点畸变系数与平台尺寸之间的函数关系，再通过交换 l_x 和 l_y 获得垂直线路边沿中心畸变系数，最终获得畸变系数曲面，来描述平台上表面的畸变系数分布。下文将面中心点畸变系数和平行线路的边沿中心点畸变系数简称为中心畸变系数和边沿畸变系数。中心和边沿畸变系数与平台参数相关，而与导线参数因素基本无关，受平台与导线间的距离影响较小。

2.1 畸变系数与导线参数之间关系

为探究畸变系数与导线参数之间的关系，选取典型塔型及导线。铁塔包括常见的鼓型、酒杯型和猫头型 3 种，而导线则包括超、特高压交流输电线路常用的 5 种型式的导线，导线参数如表 2 所示。另外，本文还计算了不同相间距，导线高度条件下畸变系数变化曲线。平台的尺寸为 $6m \times 6m \times 3m$ ，距离线路中心位置 30m，电压设定为 500kV，同塔双回采用逆相序排列。

表 3 给出了不同塔型和无限大平面情况下中心畸变系数和边沿畸变系数的计算结果。其中，鼓型塔的下相导线高度为 25m，中相导线高度为 35m，上相导线高度为 45m，两回线路间距均为 15m；酒杯塔导线高度为 25m，相间距为 15m；猫头塔下相导线高度为 25m，下相导线间距为 15m，上相导线高度为 35m，导线型号均为 6xLGJ 630。由表 3 可得，3 种塔型的中心畸变系数和边沿畸变系数基本一致。对比无限大平面产生的匀强电场下的畸变系

表 2 不同导线分裂型式畸变系数计算结果

Table 2 Calculation results of distortion coefficients for different wire splitting types

导线编号	导线分裂型式	导线直径 /mm	分裂间距 /mm	中心畸变系数	边沿畸变系数
1	4xLGJ 400	26.8	450	1.5418	1.5912
2	6xLGJ 400	26.8	450	1.5416	1.5929
3	6xLGJ 500	30.0	450	1.5435	1.5926
4	6xLGJ 630	33.6	450	1.5433	1.5914
5	8xLGJ 630	34.3	400	1.5424	1.5956

表 3 不同塔型畸变系数计算结果

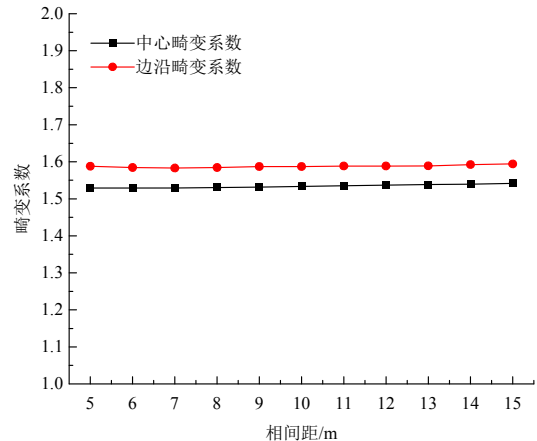
Table 3 Calculation results of distortion coefficients of different tower types

铁塔编号	铁塔型式	中心畸变系数	边沿畸变系数
1	鼓型	1.5367	1.6020
2	酒杯型	1.5433	1.5914
3	猫头型	1.5320	1.5894
4	无限大平面	1.5425	1.5671

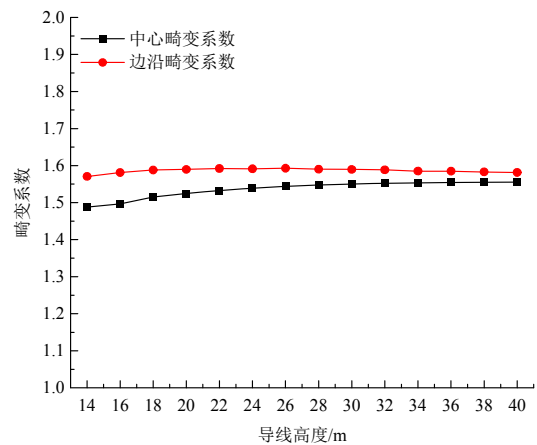
数，最大相对误差也仅有 2.22%，该误差可以满足工程测量、计算的要求。

在酒杯型塔的前提下，对 5 种型式的导线进行畸变系数计算，相间距为 15m，导线高度为 25m，如表 2 所示。对比超、特高压交流输电线路常用的 5 种型式的导线，中心畸变系数和边沿畸变系数均基本一致，畸变系数与导线分裂型式基本无关。

图 4 给出了在塔型为酒杯塔，导线型号为 6xLGJ 630 时，畸变系数与导线相间距、高度之间



(a) 畸变系数与相间距关系



(b) 畸变系数与导线高度关系

图 4 畸变系数与相间距、导线高度间关系

Fig. 4 Relationships between distortion coefficient, phase spacing and wire height

的关系。图 4 在讨论畸变系数与相间距之间关系时，导线高度固定为 25m，而在讨论畸变系数与导线高度之间关系时，相间距固定为 15m。结果表明，畸变系数与相间距基本无关，中心畸变系数随着导线高度的增加略有增高，然而几种高度间的最大相对误差仅有 4.4%。此外，一般超、特高压输电线路导线高度均 20m 以上，而 20m 以上时电场强度畸变系数相对误差最大值仅有 2.0%。因此可以认为，在一般的导线高度范围内，畸变系数与导线高度基本无关。对于其他塔型和线路参数，也有类似的结论，

本文不做过多叙述。

2.2 畸变系数与平台和线路中心间距关系

为探究电场强度畸变系数与平台和线路中心距离之间的关系，仍选取典型的酒杯型塔算例，开展畸变系数特性计算。其中导线相间距 15m，导线高度 25m，导线型号为 6×LGJ 630。

图 5 给出了平台距离线路中心 0~80m 平台上方的电场强度畸变系数计算结果，并给出了以匀强电场下的畸变系数的±5%相对误差范围曲线，结果表明：平台上方畸变系数均随着平台和线路中心间距的增大而逐渐减小，在平台距离中心 0m 处，电场强度畸变系数可达 1.7 以上，这是由于中心附近的地面上方 1.5m 处，存在不可忽略的水平方向电场强度分量，因此电场强度方向与匀强电场的垂直地面方向有差别，匀强电场的畸变系数不适用于此处。但在特高压线路设计时，要求输电边导线垂直投影线外侧水平距离 7m 内不得存在居民住宅^[21]，因此在线路设计过程中一般可不考虑该位置的平台上方电场强度幅值问题。

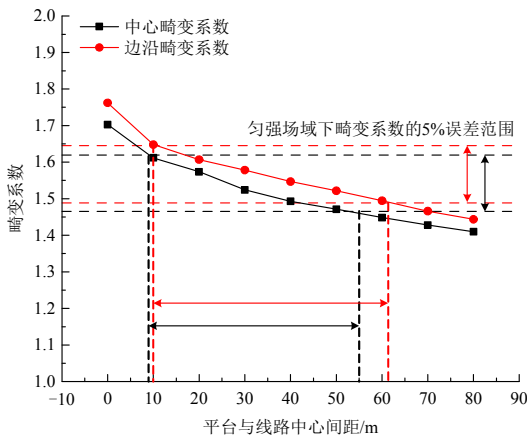


图 5 畸变系数与平台和线路中心间距关系

Fig. 5 Relationship between the distortion coefficient and distance of the platform from center of line

另外，匀强场域的边沿畸变系数 5%误差涵盖范围约 10~60m，而中心畸变系数 5%误差涵盖范围约 10~55m。在该范围内的平台畸变系数相对误差均不超过 5%，可以满足工程的设计需求。而在距离中心 55m，即距离相导线 40m 外时，地面电场强度幅值一般较小；并且，由于其畸变系数是小于匀强场域下的畸变系数，若以后者为基准来设计线路，相当于对该位置电场强度留有一定的裕度，不会使得建筑物上方的电场强度预测值偏小而出现实测超标的情况。因此，在距离中心 55m 外，仍可使用匀强场域下的畸变系数。

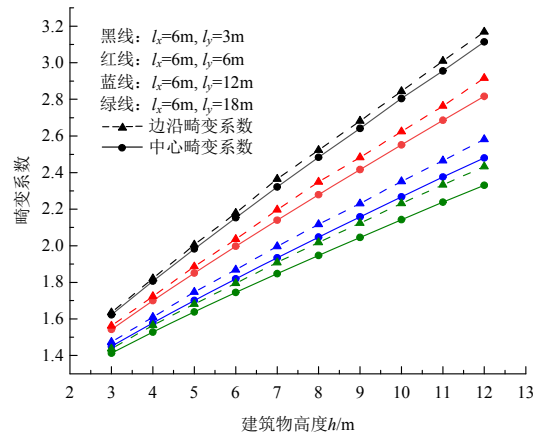
此外，针对其他尺寸的建筑物也具有类似的结论。综上，虽然不同位置的平台畸变系数与匀强电场下的畸变系数略有差别，但对于工程设计，都可以使用匀强电场下的畸变系数进行预测。

2.3 畸变系数与平台参数之间关系

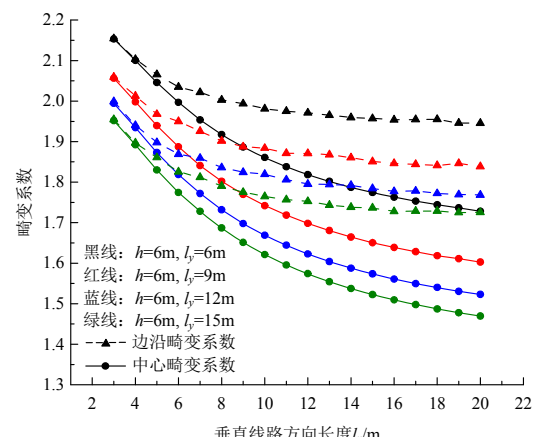
由上文结果可得，畸变系数与平台参数基本无关，在距离相导线 7m 外时，也可使用匀强电场场源下的畸变系数进行预测。因此，为获得畸变系数与 l_x 、 l_y 、 h 之间的关系，以匀强电场作为场源，利用有限元仿真，计算不同平台参数条件下，电场强度分布规律。

图 6 列举了 4 种建筑物尺寸的电场强度畸变系数，其他尺寸平台的计算结果也具有相似的性质，不在此赘述。根据图 6 结果，可知：

- 1) 边沿畸变系数一般略大于中心畸变系数，并且两种畸变系数的变化趋势基本一致。
- 2) 畸变系数随着建筑物高度 h 的增大而增大，且基本呈线性分布；畸变系数随着 l_x 和 l_y 的增大而减小，且基本呈对数分布。
- 3) 畸变系数随 l_x 和 l_y 变化关系中，中心畸变系数比边沿畸变系数衰减更快；由于 l_x 和 l_y 的对称性，



(a) 畸变系数与建筑物高度h关系曲线



(b) 畸变系数与垂直线路方向长度lx关系曲线

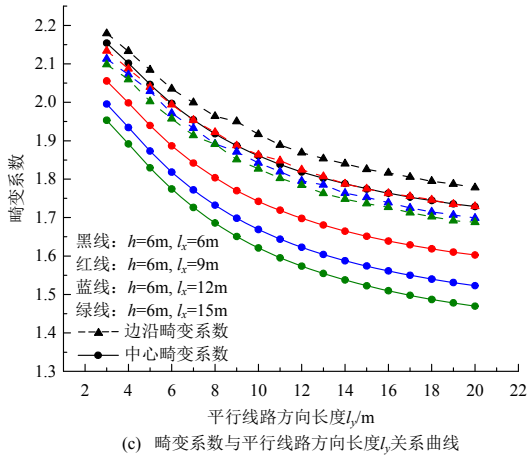


图6 畸变系数与 h, l_x, l_y 关系曲线
Fig. 6 Relationship curve between distortion coefficient and h, l_x, l_y

图6(b)和(c)中,中心畸变系数具有相同的变化趋势。但对于边沿畸变系数,其随 l_y 的变化下降更快。

因此,可获得以 l_x, l_y, h 为自变量因子的中心畸变系数和边沿畸变系数的拟合公式,其与 h 呈线性关系,与 l_x, l_y 呈对数关系。畸变系数的拟合公式应为以上关系的线性组合。

3 多元回归分析拟合畸变系数曲线

本节结合上文分析各因素对畸变系数的影响规律,将不同尺寸的建筑物置于匀强电场中,以1m为步长,开展平台高度为3~12m、垂直线路长度和垂直线路宽度均为3~20m,共3240种平台畸变系数的计算。根据上文分析,畸变系数与高度 h 正相关关系,与 l_x 和 l_y 均呈负相关关系,通过对比,最终选取了 $h, \ln(l_x), \ln(l_y), h \cdot \ln(l_x)$ 和 $h \cdot \ln(l_y)$ 作为自变量参数,建立中心点畸变系数和边沿畸变系数的回归方程。

畸变系数的回归方程可以表示为

$$k_0 = \beta_0 + \beta_1 \cdot h + \beta_2 \cdot \ln(l_x) + \beta_3 \cdot \ln(l_y) + \beta_4 \cdot h \cdot \ln(l_x) + \beta_5 \cdot h \cdot \ln(l_y) \quad (6)$$

对于中心畸变系数,拟合得到回归方程为

$$k_0 = 1.288 + 0.265h - 0.038 \cdot \ln(l_x \cdot l_y) - 0.035h \cdot \ln(l_x \cdot l_y) \quad (7)$$

边沿畸变系数,拟合得到的回归方程为

$$k_m = 1.212 + 0.237h - 0.015 \cdot \ln(l_x) - 0.021 \cdot \ln(l_y) - 0.016h \cdot \ln(l_x) - 0.034h \cdot \ln(l_y) \quad (8)$$

式中: $\beta_0 \sim \beta_5$ 为曲线拟合参数; h 的取值范围为3~12m; l_x 和 l_y 的取值范围均为3~20m。

平台上方的 l_x 和 l_y 是具有对称式性质的,因此

仅需要上述两个畸变系数值就可以描述畸变系数曲线/面。值得说明的是,中心畸变系数的回归方程与 $l_x \cdot l_y$ 的值相关,而此值刚好为建筑物上表面的面积。

为判断回归方程的有效性,需对回归方程及参数进行统计检验,本文采用拟合优度检验、F检验和T检验3种方法。中心点畸变系数 k_0 和边沿畸变系数 k_m 的统计性分析结果如表4所示。拟合优度 R^2 均可达到0.997及以上,而F检验和T检验的显著性水平均低于0.001。结果表明,各参数对于拟合曲线都具有高度显著的性质。

表4 畸变系数的统计性分析结果

Table 4 Statistical analysis results of distortion coefficient

畸变系数	检验方法	统计量	数值	显著性	
k_0	拟合优度检验	R^2	0.997	—	
	F检验	F	215938.0	<0.001	
	T检验	β_0		205.2	
		β_1		338.8	
		β_2		-20.3	<0.001
		β_3		-20.3	
		β_4		-148.7	
	k_m	拟合优度检验	R^2	0.997	—
		F检验	F	201453.8	<0.001
		T检验	β_0		181.5
β_1				285.0	
β_2				-7.7	<0.001
β_3				-10.5	
β_4				-62.3	
β_5			-134.8		

此外,当建筑物的面积无限大时,相当于将地面抬升了建筑物高度后,计算地面上方1.5m处电场强度。因此,在面积趋于无限大时,畸变系数应该为定值,本文提出的公式无法满足该结论。本文的拟合公式需要在 h 的取值范围为3~12m, l_x 和 l_y 的取值范围均为3~20m下使用,该范围基本可以涵盖大部分尺寸的平台。

4 试验验证分析

4.1 真型试验分析

为验证本文方法的有效性,于1000kV交流特高压双回线路(定台线)下方开展平台模型真型试验,获得大量特高压交流线路附近平台上的工频电场有效数据。如图7所示,其中前者为双层平台结构,后者为单层结构,本文测试结果来自于单层结构平台。线路逆相序排列,采用8×JL1/G1A-630/55,导线直径34.3mm,子导线分裂间距为

400mm，线路参数见表 5。

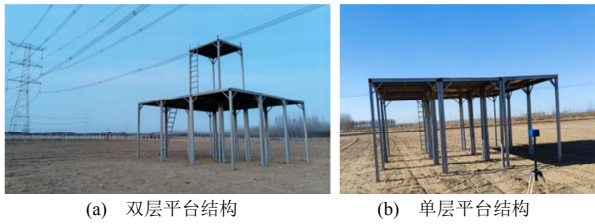


图 7 平台模型试验实拍图

Fig. 7 Real shot of platform model experiment

表 5 特高压交流输电线路参数

Table 5 Parameters of UHV AC transmission line

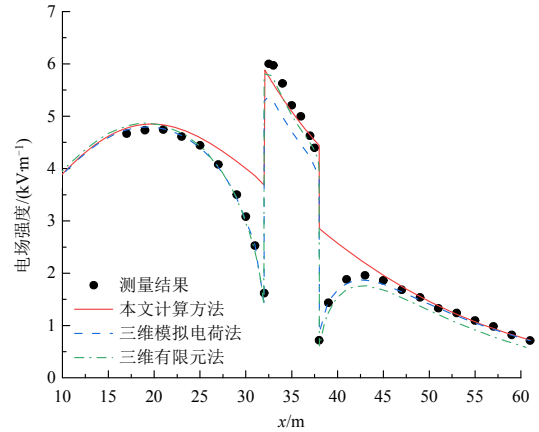
参数	数值
电压等级/kV	1000
线路档距/m	625
相导线高度/m	70
	50
	30
两回线路间距/m	34

应用本文提出的工频电场工程实用计算方法，分别对不同位置的单层结构平台进行了计算分析，平台长、宽均为 6m，高度为 3m，测量了沿平台中心线方向的电场强度分布，通过两组计算值与测量值的对比分析，验证本文所提方法的有效性。

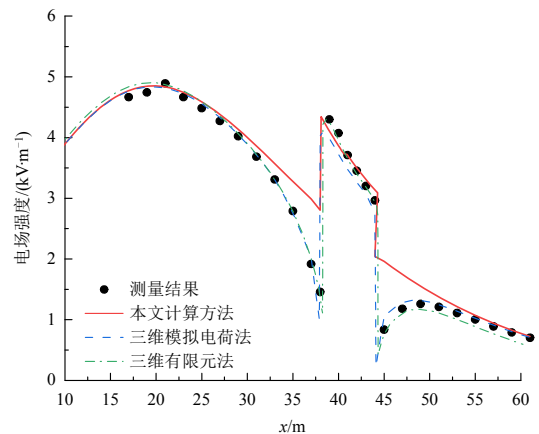
计算与测量的对比结果如图 8 所示，分别对平台模型距离相导线外 15 和 21m 两处位置的垂直线路断面进行测量，在平台上方电场强度拟合较好。从计算结果来看，模拟电荷法略小于有限元法，由于拟合公式的结果来自于有限元法，本文方法计算结果与有限元法较为接近。在 15 和 21m 两种位置平台上方预测结果与测量结果的相对误差最大值分别为 5.9% 和 3.7%，可以满足工程设计的预测需求，证明了计算方法的有效性。

此外，根据测量结果，平台附近电场强度下降显著，这是由于平台电位基本为零，对于其附近地面主要起屏蔽作用。而文中方法利用模拟电荷法计算地面 1.5m 处工频电场强度，在平台附近，仍是原来的地面 1.5m 处的工频电场，因此与测量值出现偏差，直接建立了平台模型的有限元法和模拟电荷法不会出现该问题。在线路设计中，一般只要求最大值不能超过限值，因此虽然平台附近地面的电场显著低于预测值，却并不影响线路参数的设计。在距离建筑物较远处的位置，地面上 1.5m 的电场强度计算值与测量值也符合的较好，真型试验结果证明了预测方法的有效性。

表 6 给出了使用本文方法、有限元法及模拟电



(a) 平台距离边相导线15m的预测值与实测对比



(b) 平台距离边相导线21m的预测值与实测对比

图 8 电场强度预测值与实测值对比

Fig. 8 Comparison of predicted and measured values of electric field strength

表 6 平台距离边相导线 21m 算例的计算时间对比

Table 6 Comparison of calculation time for the case where the platform is 21 m away from the conductor

序号	计算方法	计算时间/s
1	三维模拟电荷法	192.8
2	三维有限元法	873.8
3	本文方法	145.4

荷法求解平台距离边相导线 21m 算例的时间对比。可知，本文方法略小于模拟电荷法。这是由于本文方法将平台上表面电场的计算解耦为地面 1.5m 处和畸变系数的乘积，因此无需进行三维模拟电荷法中的平台模型建立。对于有限元法，本模型四面体网格单元共 13808376 个，求解时间为约为本文方法的 6 倍。本方法相较于有限元法计算效率提升明显。

4.2 实际线路测试分析

为进一步验证本文提出的算法，开展某 500kV 交流输电线路附近平台上的工频电场强度测试工作。如图 9 所示，三相导线三角形排列，采用钢芯铝绞线 4×LGJ-400/35，子导线直径为 26.8mm，正方形分裂，间距为 450mm。线路档距为 493m，

一侧为干子型转角塔，中相距离两边相水平距离分别为 8.5m 和 6.5m，另一侧为猫头塔，两边相间距 18m，上相导线距离下相均约 7m。测量线路旁边两处民房平台时，房屋高度以及测点与三相导线中央的水平距离如表 7 所示。

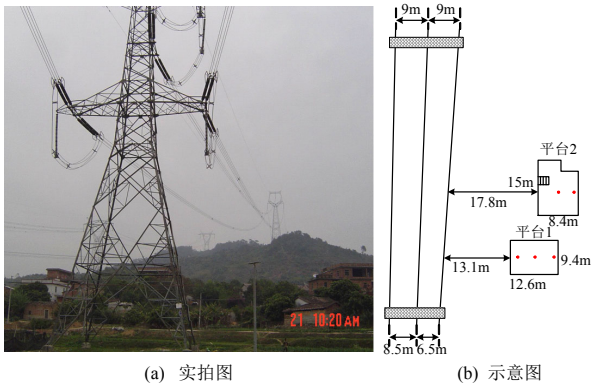


图 9 实际平台实拍图及示意图

Fig. 9 Real shot and schematic diagram of actual platform

表 7 房屋高度、测点与导线距离参数

Table 7 Parameters of house height, measuring point and wire distance

序号	下相导线对地高度/m	房屋高度/m	房屋线中央的水平距离/m	与导线中央的水平距离/m		
				测点 1	测点 2	测点 3
1	23.4	6.0	20.6	22.6	26.6	30.6
2	24.5	9.7	25.3	29.3	33.3	—

计算与测量的对比结果如图 10 所示。

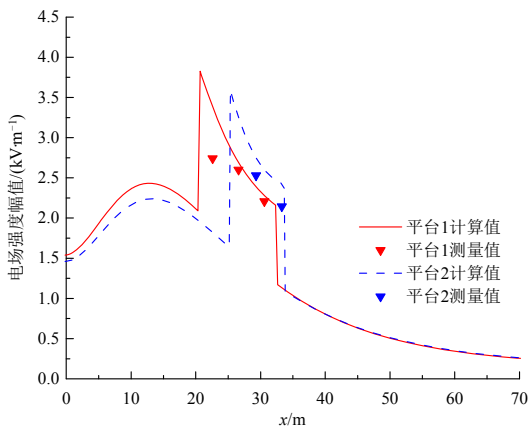


图 10 电场强度预测值与实测值对比

Fig. 10 Comparison of predicted and measured values of electric field strength

由图 10 可知，电场强度预测值与实测值拟合较好。由于实际平台并非完全的长方体，并且平台 1 上方的测点 1 附近存在物体的屏蔽作用，电场强度测量值较预测值低约 19.1%。而在其余位置的电场强度，预测值与实测值的相对误差均在 5~8% 左右。在线路设计过程中，由于留存的相应裕度并不会导致该位置的电场强度超标，实际线路测试结果

证明了方法预测结果的有效性。

5 结论

本文提出基于平台畸变系数的工频电场计算方法，对平台上方的工频电场解耦计算，利用多元回归方法拟合畸变系数曲线，在保证计算准确性的同时有效地提高了计算效率。得到以下结论：

- 1) 平台畸变系数与 h 近似呈线性分布，与 l_x 和 l_y 均近似呈对数分布；平台畸变系数与导线型式、杆塔型式基本无关，且受平台与杆塔间相互位置影响较小。
- 2) 本文提出的拟合公式拟合优度达到 0.997 及以上；在拟合公式中， h 的取值范围为 3~12m， l_x 和 l_y 的取值范围均为 3~20m，该范围基本可以涵盖大部分尺寸的平台。
- 3) 利用本文方法，可快速地开展输电线路附近不同尺寸的平台上方电场强度的预测；可大规模、快速计算不同线路参数条件下的民房平台上方电场强度分布情况。结果可为交流输电线路设计、环评监测过程中，附近民房平台上方工频电场的快速预测提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 233-261.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 233-261 (in Chinese).
- [2] 郭雄, 万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 84-88.
WU Xiong, WAN Baoquan. Power transmission project electromagnetic environment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 84-88(in Chinese).
- [3] 王黎明, 曹露, 梅红伟, 等. 特高压交流同塔双回输电线路严重脱冰跳跃抑制措施仿真研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1475-1482.
WANG Liming, CAO Lu, MEI Hongwei, et al. Simulation research on suppressing measures against severe ice-shedding jump of UHVAC double-circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1475-1482 (in Chinese).
- [4] 傅中, 陈维江, 王贻平, 等. 1000kV 同塔双回特高压交流输电线路工频序参数测量计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1285-1291.
FU Zhong, CHEN Weijiang, WANG Yiping, et al.

- Measurement and calculation of power frequency sequence parameters of 1000 kV UHVAC double-circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1285-1291 (in Chinese).
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for environmental impact assessment of electric power transmission and distribution: HJ 24—2020[S]. Beijing: China Environmental Press, 2020 (in Chinese).
- [6] 刘震寰, 邬雄, 张广洲, 等. 特高压同塔双回输电线邻近民房处电场计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1849-1855.
- LIU Zhenhuan, WU Xiong, ZHANG Guangzhou, et al. Calculation and analysis of the electric field intensity of the building near the ultra high voltage two circuit AC transmission line on one tower[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1849-1855 (in Chinese).
- [7] 肖冬萍. 特高压交流输电线路电磁场三维计算模型与屏蔽措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- XIAO Dongping. Research on three dimension calculation models and shielding measures for electromagnetic field of ultra-high voltage AC transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009 (in Chinese).
- [8] 王晓燕. 特高压交流输电线路电磁环境研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- WANG Xiaoyan. Study on electromagnetic environment of ultra-high voltage AC transmission lines[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011 (in Chinese).
- [9] 李永明, 周悦, 刘哲, 等. 超高压输电线路在复杂场景下工频电场的分区域算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 162-166.
- LI Yongming, ZHOU Yue, LIU Zhe, et al. Subdomain algorithm of power frequency electric field for EHV power transmission line under complex scenes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 162-166 (in Chinese).
- [10] 杨勃, 徐禄文, 刘彤. 高压交流输电线路邻近城市高层建筑时的畸变电场计算[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 59-64.
- YANG Bo, XU Luwen, LIU Tong. Calculation of distorted electric field for high-voltage AC power transmission lines adjacent to urban high buildings[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(10): 59-64 (in Chinese).
- [11] 赵志斌, 董松昭, 谢辉春. 特高压交流同塔双回输电线路邻近建筑物时畸变电场研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2171-2177.
- ZHAO Zhibin, DONG Songzhao, DENG Xinli, et al. Distorted electric field of the building near UHVAC double circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2171-2177 (in Chinese).
- [12] 赵志斌, 董松昭, 邓新丽, 等. 特高压同塔双回交流输电线路邻近建筑物时的安全距离[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2943-2950.
- ZHAO Zhibin, DONG Songzhao, DENG Xinli, et al. Safety distance of UHV double-circuit AC transmission lines on one tower adjacent to buildings[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2943-2950 (in Chinese).
- [13] 吴桂芳, 谢莉, 王勋, 等. 交流输电线路附近民房曝露处工频电场计算[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 873-878.
- WU Guifang, XIE Li, WANG Xun, et al. Calculation of power frequency electric field around residential houses exposed to air near AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 873-878 (in Chinese).
- [14] 吴桂芳, 陈维江, 毛继兵, 等. 交流输电线路附近民房平台处工频电场限值研究[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1532-1537.
- WU Guifang, CHEN Weijiang, MAO Jibing, et al. Study on limits of power frequency electric field on house platform near AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1532-1537 (in Chinese).
- [15] 翟宾, 宁健, 李建晖, 等. 环境湿度对输电线路下方空间电场测量结果的影响[J]. 南方电网技术, 2020, 14(3): 17-22.
- ZHAI Bin, NING Jian, LI Jianhui, et al. Influence of environmental Humidity on the measurement results of space electric field under the transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(3): 17-22 (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国环境保护部. 交流输变电工程电磁环境监测方法(试行): HJ 681—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Electromagnetic environmental monitoring method for AC electric power transmission and distribution project (on trial): HJ 681—2013[S]. Beijing: China Environmental Press, 2014 (in Chinese).
- [17] 马信山, 张济世, 王平. 电磁场基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- MA Xinshan, ZHANG Jishi, WANG Ping. Fundamentals of electromagnetic fields[M]. Beijing: Tsinghua

University Press, 1995 (in Chinese).

- [18] 王延召, 干喆渊, 周兵, 等. 金属盖板对高压直流合成场测量的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 651-657.
WANG Yanzhao, GAN Zheyuan, ZHOU Bing, et al. Influence of meatal plate on the measurement of high voltage total electric field[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 651-657 (in Chinese).
- [19] 赵录兴, 崔翔, 陆家榆, 等. 直流输电线路地面合成电场测量方法探讨[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 644-652.
ZHAO Luxing, CUI Xiang, LU Jiayu, et al. Discussion on measurement method of total electric field for DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 644-652 (in Chinese).
- [20] 徐吉来, 高克利, 万保权, 等. 以单极通量线法为初值的直流合成场数值计算及实测[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2091-2098.
XU Jilai, GAO Keli, WAN Baoquan, et al. Numerical calculation and measurement of DC total field using unipolar flux line method as initial value[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2091-2098 (in Chinese).
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 1000kV 架空输电线路设计规范: GB 50665—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of 1000kV

overhead transmission line: GB 50665—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012 (in Chinese).



徐吉来

在线出版日期: 2023-03-31。

收稿日期: 2022-06-13。

作者简介:

徐吉来(1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压绝缘技术与电磁环境计算, xujl13wq14@163.com;

高克利(1966), 男, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为电力设备运行技术等, gaokl@epri.sgcc.com.cn;

万保权(1971), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统电磁环境和电场兼容技术研究, wanbaoquan@epri.sgcc.com.cn;

路遥(1977), 女, 教授级高工, 主要从事电力系统电磁环境和电磁计算方向研究, luyao@epri.sgcc.com.cn;

刘兴发(1979), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统的电磁兼容和生物电磁方向研究, liuxingfa@epri.sgcc.com.cn;

张亮(1981), 男, 高工, 研究方向为高压和电磁环境保护, zl8885@126.com。

(编辑 胡琳琳)