

750 kV 单回并行输电线路电磁辐射环境研究

任定高

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 采用《环境影响评价技术导则 输变电》(HJ 24—2020)附录 C、D 推荐的计算模式对 750 kV 单回并行输电线路电磁辐射环境进行计算与预测。结果表明,经过耕地、园地、牧草地、畜禽饲养地、道路等场所,当导线对地最小高度为 15.5 m 时,单回并行线路下的工频电场强度最大值超过 10 kV/m;需将导线对地最小高度提至 16.5 m,才能满足 4 kV/m 控制限值要求。750 kV 单回并行输电线路产生的工频磁场强度小于公众曝露控制限值(100 μ T),一般情况下不会成为线路建设的环境制约因素;但其产生的工频电场是电磁环境主要影响因素,电场强度控制限值(4 kV/m)是线路建设的环境制约因素,同时也是输变电电磁环境重点控制因素。现场实测结果与理论预测结果符合性较好,表明采用的预测模式具有较好的应用性,研究结果可为 750 kV 单回并行输电线路的建设和环境监管提供支持。

关键词: 工频电场;工频磁场;电磁辐射环境;单回并行线路;输电线路

中图分类号: X123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)01-0093-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.09.10

750 kV 超高压交流输电技术具有大容量、高电压和远距离输电等优点,在西电东输等重大能源输送项目中,起着重要的作用。输电电压和输电功率的增加,使输电线路下方的电磁环境恶化,输电线路工程的电磁环境已成为决定输电线路建设的重要因素,研究 750 kV 超高压交流输电电磁环境影响,是输电线路工程领域的重要课题之一。

从 20 世纪 80 年代开始,中国针对输变电工程建设及运行产生的电磁辐射问题,系统研究了电磁辐射产生原理、对环境的影响以及监测、评价和管理等内容。国家环境保护部门发布了电磁环境控制限值^[1],制订了辐射环境管理、监测方法和评价导则等^[2-8],建设部门专门制定了一系列工程设计、施工验收规范^[9-10],对输变电工程建设及运行产生的电磁辐射监测和评价进行了规范。

目前,单回及单回并行输电线路仍然是建设的主流,也有部分科研人员对同塔多回建设线路进行了研究^[11-15]。笔者对 750 kV 单回并行交流输电线路的工频电场和工频磁场的影响进行预测,研究了 750 kV 交流输电线路单回并行架设

条件下的电磁辐射环境影响水平及其分布规律,对《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)中线路经过非居民区和经过居民区时的对地最小高度进行核算,以期得到满足《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)电磁环境要求的建设参数。

1 750 kV 单回并行输电线路电磁环境影响预测模式及参数

1.1 预测模式的选取

采用《环境影响评价技术导则 输变电》(HJ 24—2020)附录 C、D 推荐的计算模式,进行 750 kV 交流输变电线路的工频电场、磁场电磁环境影响预测,根据 750 kV 交流输电线路的三相导线排列方式、导线对地距离、相间距离、导线型式和运行工况等参数,预测计算线路运行时产生的工频电场、磁场强度,分析线路投运后电磁环境影响程度及范围。

1.1.1 工频电场强度预测模式

1.1.1.1 单位长度导线上等效电荷的计算

高压输电线上的等效电荷是线电荷,高压

收稿日期: 2023-09-27

第一作者简介: 任定高(1970—),男,安徽无为,人,硕士,高级工程师,主要从事辐射防护与环境保护工作。

输电线半径(r)远远小于线路的架设高度(h),可以假定等效电荷的位置位于输电导线的几何中心。

假设输电线路平行于地面并且线路长度无限长,地面可视为良导体,利用镜像法计算输电线上的等效电荷。为了计算多导线线路中导线上的等效电荷,可利用矩阵方程^{[4]21}:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: U —各导线对地电压的单列矩阵; Q —各导线上等效电荷的单列矩阵; λ —各导线的电位系数组成的 n 阶方阵(n 为导线数目)。根据镜像原理可求出 $[U]$ 矩阵和 $[\lambda]$ 矩阵。

1.1.1.2 等效电荷产生的电场计算

夏天满负荷线路有最大弧垂时,导线的对地高度最小。在此条件下,可以计算出地面电场强度的最大值。在档距中央一段处所计算的地面电场强度最大,符合理论预测条件。

求出各导线单位长度的等效电荷量后,可根据叠加原理计算出空间任意一点的电场强度, (x, y) 点的电场强度水平分量(E_x)和垂直分量(E_y)表示如下^{[4]23}:

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{x-x_i}{L_i^2} - \frac{x-x_i}{(L'_i)^2} \right), \quad (2)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{y-y_i}{L_i^2} - \frac{y+y_i}{(L'_i)^2} \right) \quad (3)$$

式中: x_i, y_i —导线 i 的水平、纵向坐标($i=1, 2, \dots, m$); m —导线数; ϵ_0 —介电常数; L_i, L'_i —分别为导线 i 及导线 i 的镜像至计算点的距离。

1.1.2 工频磁场强度预测模式

计算其在A点产生的磁场强度,一般不考虑导线的镜像,仅考虑处于空间的实际导线,其结果已与实际相符。计算公式^{[4]29}为

$$H = \frac{I}{2\pi \sqrt{h^2 + L^2}}, \quad (4)$$

式中: I —导线 i 中的电流值,A; h —导线与预测点的高差,m; L —导线与预测点的水平距离,m。

1.2 选择预测参数

1.2.1 塔型选择

依据《环境影响评价技术导则 输变电》(HJ 24—2020)8.1.2.3“塔型选择时,可主要考虑线路经过居民区时的塔型,也可按保守原则选择电磁环境影响最大的塔型”,本研究选择电磁环境影响最大的直线塔型进行电磁环境影响预测计算。

根据对不同直线塔型参数、每种类型进行的计算和比较可知,直线塔水平相间距越大,电磁环境影响越大,因此以ZBC3塔为代表性塔型进行电磁环境影响预测。ZBC3塔单回线路并行间距100m(线路中心对线路中心),相导线水平排列,边导线距离最近的中心线距离为19m。导线型号为6×JL3/G1A-400/50型钢芯铝绞线。

1.2.2 导线对地高度

根据《110kV~750kV架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)规定,当线路经过非居民区时,导线对地最小高度为15.5m;当线路经过居民区时,对地最小高度为19.5m(距离边相线投影6m)。

1.2.3 电压及电流

预测电压为标称电压750kV的1.05倍,即787.5kV;电流采用导线最大长期允许载流量进行预测计算。

对750kV交流输电单回并行线路电磁环境影响,具体预测参数见表1及图1。

表1 电磁环境影响预测参数

Table 1 Predictive parameters of electromagnetic radiation environment

预测情景	750 kV 单回并行线路
导线型式	JL3/G1A-400/50
塔型	ZBC3 直线塔
子导线外径/mm	27.63
分裂型式	6 分裂
分裂间距/mm	400
输送电流/A	899
预测电压/kV	787.5
计算原点 O(0,0)	线路走廊中心左侧 119 m
计算距离/m	0~238
排序排列方式	C1A1B1/A2B2C2

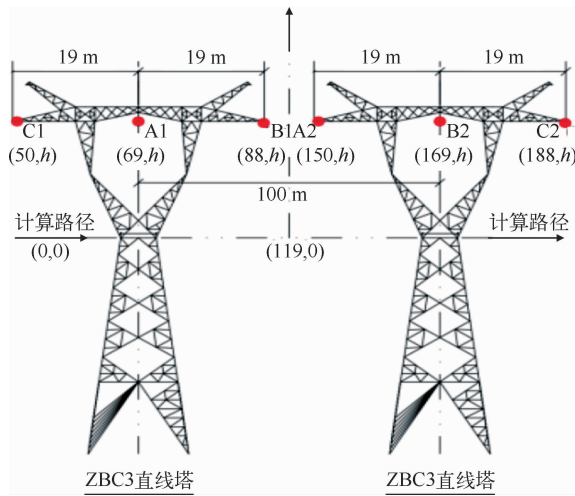


图 1 750 kV 单回并行线路

Fig. 1 750 kV single cycle parallel line

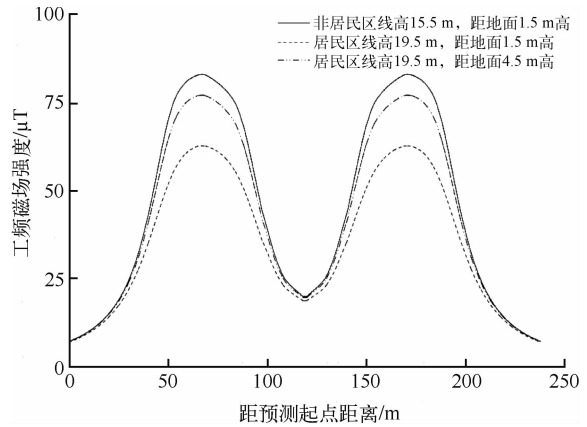


图 3 最低线高时的工频磁场强度分布

Fig. 3 The power frequency magnetic field distribution at the lowest line height

2 电磁环境影响预测

2.1 工频电场强度预测

750 kV 单回并行线路交流输电线路产生的工频电场强度预测结果见图 2。

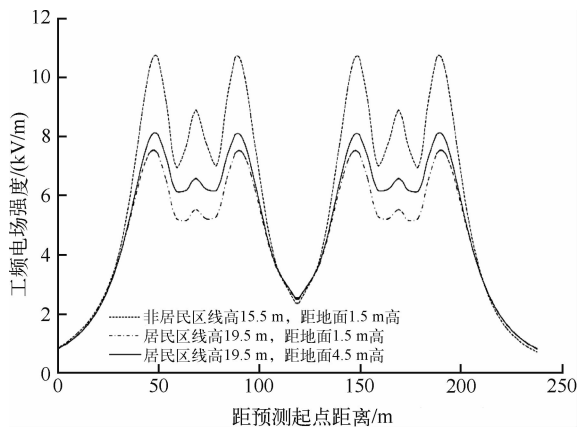


图 2 最低线高时的工频电场分布

Fig. 2 The power frequency electric field distribution at the lowest line height

线路产生的工频电场强度随着线高的增加而降低。工频电场强度一般在边导线投影附近达到最大。当线高不变时,在边导线外侧区域,距离该导线投影距离越远,工频电场强度越低。工频电场强度最大预测值分别为 10.73、7.38、8.04 kV/m,距预测起始点距离分别为 189、190、190 m。

2.2 工频磁场强度预测

750 kV 单回并行线路交流输电线路产生的工频磁场强度预测结果见图 3。

线路产生的工频磁场强度随着线高的增加而降低。一般在线路中心达到最大。当线高不变时,距离线路中心越远,工频磁场强度越低。在单回并行线路经过非居民区导线对地最小高度 15.5 m、距离地面 1.5 m 高度处,以及经过居民区导线对地最小高度 19.5 m、距离地面 1.5、4.5 m 高度处,工频磁场强度最大值分别为 82.92、62.67、77.03 μT ,距预测起始点距离均为 171 m。单回并行线路产生的工频磁场强度小于公众曝露控制限值(100 μT)。一般情况下,750 kV 线路产生的工频磁场强度不是线路建设的环境制约因素。

2.3 750 kV 输电线路电磁环境限值分析

2.3.1 经过非居民区时限值分析

当单回并行线路对地高度为《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)线路经过非居民区时导线对地最小高度(15.5 m)时,距地面 1.5 m 高处的工频电场强度的最大预测值是 10.73 kV/m(图 2),此工频电场强度不满足《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)中架空线路下的耕地、园地、牧草地、畜禽饲养地、养殖水面、道路等场所的限值要求(10 kV/m)。

以《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)中非居民区最低线高 15.5 m 进行预测,线高每次增加幅度为 0.5 m,预测点距离地面高 1.5 m,直至找出在非居民区线下工频电场强度满足 10 kV/m 限值要求的最低线高,工频电场强度预测结果见图 4。可以看出,

在单回并行线路经过非居民区、导线对地最小高度16.5 m时,距地面高 1.5 m 的预测点的工频电场强度均小于10 kV/m,满足 10 kV/m 控制限值要求。

2.3.2 经过居民区时限值分析

以一层平房为例,对单回并行线路离地高 1.5、4.5 m 处满足工频电场强度 4 kV/m 限值时的距离进行预测,结果见表 2。

单回并行线路距离边相线 6 m,距地面 1.5、4.5 m 高处,导线最小对地高度分别为 29.0、29.5 m 时,才能满足 4 kV/m 控制限值要求。单回并行线路最小架设线高为 19.5 m 时,地面 1.5、4.5 m 高处,距离边相线分别 18.72、18.79 m 才能满足 4 kV/m 控制限值要求。

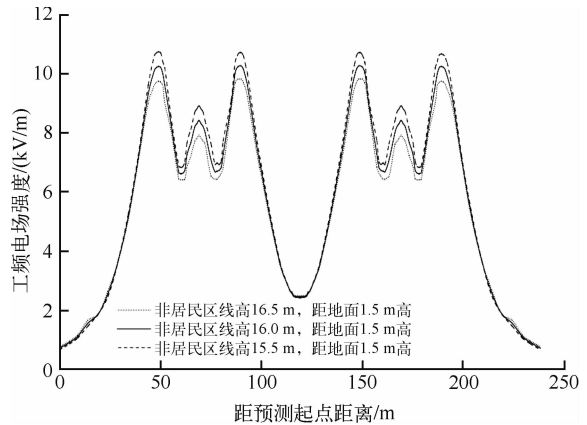


图 4 不同线高时的工频电场强度分布
Fig. 4 The power frequency electric field distribution for different line heights

表 2 经过居民区时线高对电场强度的影响

Table 2 Effect of line height on electric field strength when passing through a residential area

导线对地 最小线高/m	距地面 1.5 m 高、电场强度限值 4 kV/m		导线对地 最小线高/m	距地面 4.5 m 高、电场强度限值 4 kV/m	
	与并行线路走廊 中心最小距离/m	与边导线最小 距离/m		与并行线路走廊 中心最小距离/m	与边导线 最小距离/m
≥29.5	任何距离均小于 4 kV/m		≥30.0	任何距离均小于 4 kV/m	
29.0	75.00	6.00	29.5	75.00	6.00
28.5	76.95	7.95	29.0	77.29	8.29
28.0	78.93	9.93	28.5	79.01	10.01
27.5	80.24	11.24	28.0	80.23	11.23
27.0	81.26	12.26	27.5	81.22	12.22
26.5	82.11	13.11	27.0	82.05	13.05
26.0	83.00	14.00	26.5	82.77	13.77
25.5	83.49	14.49	26.0	83.41	14.41
25.0	84.07	15.07	25.5	83.97	14.97
24.5	84.59	15.59	25.0	84.49	15.49
24.0	85.05	16.05	24.5	84.95	15.95
23.5	85.48	16.48	24.0	85.37	16.37
23.0	85.86	16.86	23.5	85.76	16.76
22.5	86.21	17.21	23.0	86.10	17.10
22.0	86.53	17.53	22.5	86.42	17.42
21.5	86.82	17.82	22.0	86.71	17.71
21.0	87.08	18.08	21.5	86.98	17.98
20.5	87.32	18.32	21.0	87.21	18.21
20.0	87.53	18.53	20.5	87.43	18.43
19.5	87.72	18.72	20.0	87.62	18.62
			19.5	87.79	18.79

工频电场小于公众曝露控制限值(4 kV/m)要求,是 750 kV 单回并行输电线路经过居民区建设的环境制约因素,同时也是输电线路电磁环境重点控制因素。

线路在满足《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)的设计要求时,其工频电场强度不一定能满足《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)电磁辐射控制限值的环保要求。

3 750 kV 输电线路电磁环境监测

3.1 监测仪器

监测仪器主机:SEM-600;探头:LF-01 电磁场探头;频率范围:5 Hz~400 kHz;量程:0.01 V/m~100 kV/m;1 nT~10 mT。该仪器经中国计量科学研究院检定,在检定有效期内。

3.2 监测方法

现场监测依据《交流输变电工程电磁环境监测方法(试行)》(HJ 681—2013),监测布点位于750 kV 河泉I回线、750 kV 河泉II回线,以750 kV 河泉I回线路的#694~#695杆塔之间的外侧边导线地面投影北侧50 m为监测布点的起点,垂直于线路方向向南布点,布点间距为5 m;当布点接近于边导线下方时,适当增加监测点位,测点距地面1.5 m高,依次测至河泉II线#705~#706两塔之间南侧边导线投影外50 m止。

3.3 现场监测结果

两条750 kV 单回线路并行架设时,750 kV 河泉I回、II回线路产生的工频磁场强度最大值为 $3.897 \mu\text{T}$,小于控制限值($100 \mu\text{T}$)。

750 kV 河泉I回线、750 kV 河泉II回线(I回线路#695~#694塔之间、II回线路#706~#705塔之间)并行走线时,产生的工频电场强度最大值(6.820 kV/m)出现在750 kV 河泉II回线路边导线投影外侧4 m处(距离计算线路原点186 m处);且随着距离的增大,工频电场强度呈明显降低趋势,至750 kV 河泉II回线路边导线外20 m处工频电场强度为 3.180 kV/m ,小于 4 kV/m 控制限值。750 kV 河泉I回线路边导线至外侧边导线外20 m处(距离计算线路原点30 m处)工频电场强度为 3.475 kV/m ,小于 4 kV/m 控制限值。线路下的工频电场强度最大值小于经过农业耕作、牧草地等区域 10 kV/m 控制限值。

3.4 监测值与理论预测值比较

根据验证线路的各项参数进行预测计算,将工频电场强度的实测值与理论预测值进行比较,结果见图5。可以看出,实测值与理论预测值符合性较好。虽然预测结果最大值大于实测结果、最小值小于实测结果;但考虑监测区域的地形、地貌等环境因素,以及线路的运行工况等均与理论状况有一定差异,认为理论预测结果与现场实际监测结果基本一致,用模式预测结果来分析

750 kV线路对周围电磁环境影响是合理的,能较好地反映750 kV 线路运行产生的工频电场强度。

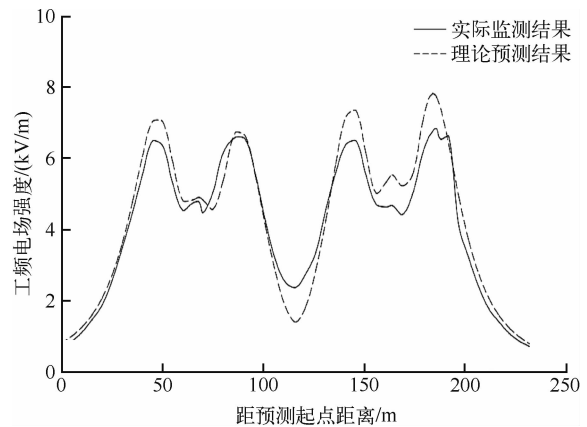


图5 工频电场实际监测结果及预测值

Fig. 5 The on-site monitoring results and expected results for the power frequency electric field

4 结论与建议

1)研究了750 kV 单回并行线路电磁辐射环境影响水平及分布规律,得出满足《电磁环境控制限值》的750 kV 单回并行线路的建设参数:经过非居民区,导线对地最小高度为16.5 m;经过居民区,距离边相线6 m处的导线最小对地高度为29.5 m;经过居民区,单回并行线路最小架设线高为19.5 m时,距离边相线18.79 m处可满足辐射限值要求。

2)一般情况下,750 kV 单回并行线路产生的工频磁场强度不是线路建设的环境制约因素。工频电场小于公众暴露控制限值(4 kV/m)要求是经过居民区导线线路建设的主要环境制约因素,同时也是电磁环境的重点控制因素。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 电磁环境控制限值:GB 8702—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2015:1-6.
- [2] 国家环境保护局. 辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法:HJ 10.2—1996[S].北京:国家环境保护局,1996:442-453.
- [3] 国家环境保护局. 辐射环境保护管理导则 电磁辐射环境影响评价方法与标准:HJ 10.3—1996[S].

- 北京:国家环境保护局,1996:454-457.
- [4] 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,2020:1-31.
- [5] 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,2013:1-6.
- [6] 国家能源局.输变电工程电磁环境监测技术规范:DL/T 334—2021[S].北京:中国电力出版社,2021:1-16.
- [7] 生态环境部,国家市场监督管理总局.直流输电工程合成电场限值及其监测方法:GB 39220—2020[S].北京:中国环境出版集团,2020:1-9.
- [8] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.直流输电线路和换流站的合成场强与离子流密度的测量方法:GB/T 37543—2019[S].北京:中国标准出版社,2019:1-16.
- [9] 住房和城乡建设部.110 kV~750 kV架空输电线路设计规范:GB 50545—2010[S].北京:中国计划出版社,2010:1-74.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.110 kV~750 kV架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2010:1-66.
- [11] 郭天伟,罗日成,潘茜雯,等.750 kV同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):46-53.
- [12] 张启.750 kV同塔双回高压输电线路电磁环境测量[J].工业技术创新,2019,6(2):5-8.
- [13] 姚池,张婉莹.通道拥挤地区输电线路杆塔优化设计[J].电力设备管理,2023(2):137-139.
- [14] 齐建召,张国华.500 kV同塔双回输电线路电磁环境的影响因素分析[J].河北电力技术,2011,30(3):32-34.
- [15] 欧小波,彭发东,庞小峰.同塔双回输电线路中感应电压和感应电流的仿真及实验研究[J].广东电力,2013,26(1):53-58.

Electromagnetic Radiation Environment of 750 kV Single Cycle Parallel Transmission Line

REN Dinggao

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: The electromagnetic radiation environment of 750 kV single cycle parallel transmission line was calculated and predicted by adopting the calculation model recommended by Appendix C and D of *Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment of Electric Power Transmission and Distribution* (HJ 24—2020). The results show that when the minimum height to ground of the conductor passing through farmland, garden land, pasture land, livestock and poultry breeding land, roads and other places is 15.5 m, the maximum value of the power frequency electric field intensity under the single cycle parallel line is more than 10 kV/m, the minimum height to ground of the conductor needs to be elevated to 16.5 m to satisfy the limit requirement of 4 kV/m. The power frequency magnetic field generated by the 750 kV single cycle parallel transmission line is less than the public exposure control limit(100 μ T), which generally will not be an environmental constraint for the construction of the line, however, the power frequency electric field generated by the line is the main factor of the electromagnetic environmental impact, and the control limit of the power frequency electric field strength(4 kV/m) is an environmental constraint for the construction of the line, and it is also a key control factor for the electromagnetic environment of the transmission and transformation power. The field measurement results and the theoretical prediction results are in good conformity, indicating that the prediction model used has good applicability, and the results of the study can provide technical support for the construction and environmental supervision of 750 kV single cycle parallel transmission lines.

Key words: power frequency electric field; power frequency magnetic field; electromagnetic radiation environment; single cycle parallel line; transmission line