

文章编号: 1000-5862(2018)05-0454-05

# 基于弧垂效应的特高压线路无线电干扰研究

刘明萍, 叶小婷, 汪庆年

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 在电力需求日益增加而能源资源及负荷分布极不均衡的国情下, 对特高压输电技术的深入研究和完善刻不容缓, 其中特高压输电线路无线电干扰水平的准确评估和控制极为关键. 目前特高压交流线路无线电干扰研究方法中使用较普遍的是激发函数法, 该文采用一种更适合我国国情的激发函数对特高压线路无线电干扰进行研究, 在 2 维模型的基础上用考虑弧垂的等效分析法进行了算例仿真, 并与已运行的 1 000 kV 晋东南-南阳-荆门特高压交流示范工程线路无线电干扰实测数据进行对比, 发现考虑弧垂的等效分析法更适用于实际工程, 说明了实际特高压线路工程无线电干扰预测中考虑弧垂的必要性. 最后分析了无线电干扰影响因素并提出了相应的减弱干扰措施, 可为国家特高压输电线路以及杆塔的设计选型提供重要参考.

**关键词:** 特高压输电; 激发函数; 无线电干扰; 弧垂

**中图分类号:** TM 726 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.05.03

## 0 引言

在 2017 年的全国两会上被提到的“弃水、弃风、弃光”状况等问题引起了公众的广泛关注, 同时也受到了国家电力部门的高度重视. 问题的根源在于我国能源供应和能源需求处于极不均衡的状态, 能源资源“西富东贫、北多南少”, 能源需求却刚好相反, 而跨区大容量输电线路的建设可以有效改善这种极不均衡状态, 建设一个更加高效完善的特高压输电系统成为了迫切需要. 目前, 由特高压线路产生的电磁环境问题制约着特高压技术的发展, 而无线电干扰是主要电磁环境参数之一, 也是特高压线路及杆塔设计选型的重点考虑因素<sup>[1-4]</sup>.

R. Pelissier 等<sup>[5]</sup>最早提出了由输电线路电晕放电引起的无线电干扰问题; 随后 G. E. Adams 等<sup>[6]</sup>提出了无线电干扰计算方法, 并首次提出了产生函数的概念; 在 Adams 的理论基础上, C. H. Gary 等<sup>[7]</sup>通过试验测量提出了激发函数法求解无线电干扰的方法, 并从理论上证明了激发函数法的可行性. 此后许多国家通过各自的电晕笼和试验线段开展试验研究, 获取了各自国家的电晕效应产生量, 并

通过大量试验获得适合本国的无线电干扰预测经验公式<sup>[1]</sup>. 国内方面, 为了更精确地得到导线激发函数值, 何旺龄等<sup>[8]</sup>采用了基本传导方程和模态分析法, 推导了多导体试验导线无线电干扰电流与激发函数的关系, 较为准确地评估了特高压输电线路无线电干扰水平. 考虑到国外提出的激发函数并不完全适用于国内特高压线路无线电干扰水平的准确预测, 裴春明等<sup>[9]</sup>利用多元线性回归分析法研究并提出了一种更适合我国国情的大雨条件下的激发函数. 通过对比验证了所提激发函数的合理性和准确性. 在交流输电线路无线电干扰激发函数法及经验公式法研究的基础上, 张建功等<sup>[10]</sup>提出了数值计算法, 直接将数值计算得到的电晕电流代入激发函数的求解过程, 从微观上对无线电干扰强度的影响进行了分析, 该研究为无线电干扰水平的预测提供了另一种可选思路, 也为特高压交流线路工程建设作出了巨大贡献.

从诸多国内外文献来看, 目前在超特高压交流输电线路电晕无线电干扰计算建模中, 大部分采用的是简化法<sup>[11]</sup>, 直接将输电线路等效为无限长导线处理, 以线路弧垂最低点作为计算高度, 忽略了由特高压线路的自重、覆冰等因素导致的导线弧垂问题.

收稿日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (11147005, 61665006, 61865011) 和江西省自然科学基金 (20151BAB202018, 20161BAB212041, 20162BCB23012) 资助项目.

作者简介: 刘明萍 (1980-), 江西赣州人, 男, 副教授, 博士, 主要从事激光等离子体物理研究. E-Mail: mpliu@ncu.edu.cn

以上简化法可以满足弧垂较小的输电线路计算精度要求,但是在计算大跨度或重荷载特高压输电线路无线电干扰水平时会产生不可忽略的计算误差,不利于对线路电磁环境进行评估和预测。在特高压输电线路电磁场和可听噪声研究模型中,已有不少研究者考虑到弧垂的影响问题,通过建立考虑弧垂的3维模型进行研究,得到了2维计算模型在考虑弧垂条件下同3维计算模型的等效关系<sup>[12]</sup>。因此,为了提高计算精度并更好地深入了解和掌握无线电干扰水平及特性,在2维计算模型的基础上,本文采用符合我国国情的激发函数<sup>[9]</sup>和考虑弧垂的等效对地高度计算方法进行分析。

## 1 模型的建立

$$H_m = H - 2S_{ag}/3, \quad (1)$$

$$R_i = R \sqrt{nr/R}, \quad (2)$$

其中  $H_m$  为等效计算高度,  $S_{ag}$  为线路弧垂,  $R$  为分裂导线半径,  $n$  为次导线根数,  $r$  为次导线半径。

简化与假设: (i) 忽略线路端部效应, 将输电线路视为无限长直平行导线, 并取输电线等效对地高度  $H_m$  为导线的离地高度, 其中  $H_m$  由(1)式计算得到; (ii) 视线路工频电场为准静态场; (iii) 设线路中流过3相对称正弦电流, 视输电线为无限长直平行导线, 忽略端部效应的影响, 用2维场处理; 3相平行排列, 可用相量来表征特高压输电线路上的电压和电流, 以研究输电线稳态时的电场分布; (iv) 输电线路等效半径为  $R_i$ , 其中  $R_i$  由(2)式计算得到, 分裂导线示意图如图1所示; (v) 特高压输电线路杆塔接地良好, 与大地等电位, 计算中取大地为0电位。

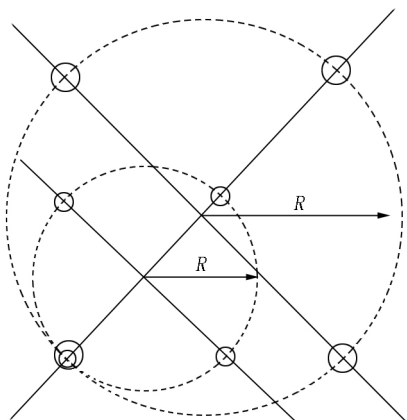


图1 分裂导线示意图

在建立2维计算模型时假设特高压输电线路为无限长直平行导线, 线路离地高度即认为是等效对地高度  $H_m$ , 无限长直导线产生的电场是平行的2维

场, 在计算时只需将垂直于输电线弧垂最低点的横截面作为计算平面即可, 计算模型如图2所示。

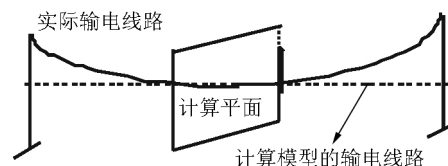


图2 输电线路2维计算模型

## 2 算例分析

本文以1000 kV 晋东南-南阳-荆门特高压交流示范工程线输电线路湖北段为例, 对其中某一观测站所处位置的线路进行建模仿真。该段主要采用了猫头塔布置, 其中A、B、C 3相导线呈正三角排列, 导线型号为8×LGJ-500/35, 子导线直径为30 mm, 子导线分裂间距为400 mm, 避雷线为OPGW光缆, 相间距为15.6 m, 导线对地高度  $H_1$ 、 $H_2$  分别为取45.5 m、27.5 m, 土壤电阻率为100 Ω·m, 取一个档距为400 m, 由文献[13]弧垂计算公式得弧垂为10.24 m。其线路结构如图3所示。

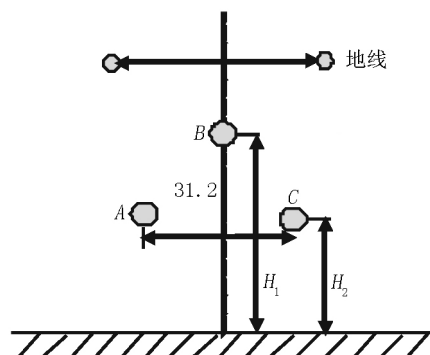


图3 猫头塔布置线路结构

基于以上算例和模型, 用适用于我国国情的激发函数在考虑弧垂与忽略弧垂条件下分别进行无线电干扰计算, 得到无线电干扰横向分布规律图, 如图4所示。

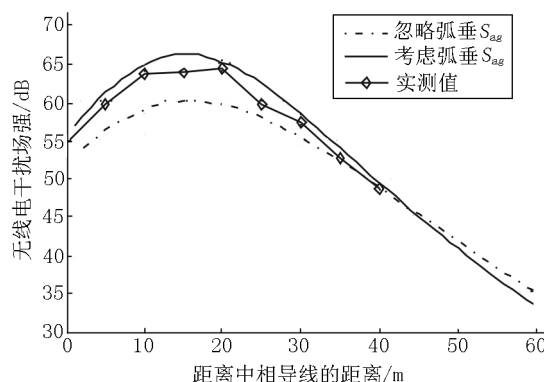


图4 考虑弧垂与忽略弧垂时无线电干扰横向分布  
通过对比图4中考虑线路弧垂与忽略线路弧垂

的 2 种情况,并参考文献[14]中实测数据可知,特高压交流输电线路弧垂的考虑与否对线路无线电干扰水平的预测影响较大,在忽略弧垂时计算所得无线电干扰值基本高于实测值并且偏差较大,而考虑弧垂情况下计算所得无线电干扰值变化规律与文献实测数据较相符.忽略弧垂情况下于中相导线外 10、15、20 和 25 m 处无线电干扰计算值分别为 58.88、59.92、59.50 和 57.83 dB,其偏差分别为 7.3%、5.9%、7.3% 和 2.8%;而考虑弧垂情况下于中相导线外 10、15、20 和 25 m 处无线电干扰计算值分别为 64.77、66.11、65.15 和 62.30 dB,其偏差分别为 2.0%、3.8%、1.5% 和 4.7%. 综上可看出,虽然考虑弧垂的等效对地高度算法不够精确,但要小于忽略弧垂情况下无线电干扰预测偏差,说明在实际特高压线路工程无线电干扰预测中,考虑弧垂的影响是很有必要的.

基于以上算例和模型,分析弧垂对线路无线电干扰的影响,弧垂依次取 5、10、15、18 m,得到如图 5 所示无线电干扰分布曲线.

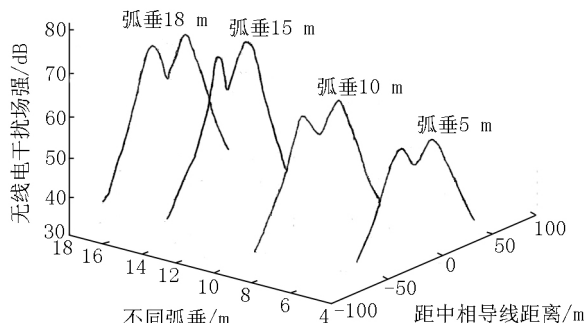


图 5 不同弧垂所对应的无线电干扰横向分布

通过图 5 中变化规律曲线分析可知,不同弧垂条件下的输电线路无线电干扰值变化规律大致相同,但其干扰水平相差较大.在线路弧垂由 5 m 增加至 18 m 过程中,虽然距边相导线 20 m 位置附近无线电干扰水平相差较小,但中相导线位置处无线电干扰值增加约 6 dB,而无线电干扰最大值增加约 13 dB,因此会存在当距边相导线 20 m 位置处无线电干扰水平符合限值标准,但其他位置处无线电干扰水平并不符合限值标准的情况,从而进一步说明了在实际特高压线路工程无线电干扰预测中,考虑弧垂这一影响因素的必要性.

### 3 影响因素分析

由上述结论可知,本文采用的符合我国国情的激发函数和考虑弧垂的等效对地高度计算方法更适用于此工程线路的无线电干扰预测,在以上算例基础上,从线路结构、环境和人为因素 3 个方面进行无

线电干扰影响因素分析.

#### 3.1 线路结构

根据以上算例,在保持其他线路结构参数不变的情况下,分别改变线路杆塔塔型、子导线分裂数、子导线截面积以及导线对地高度,得到各分布曲线分别如图 6 至图 9 所示.

由图 6 可知,线路杆塔的选型对无线电干扰有一定的影响.输电线路所选塔型不同,对应的无线电干扰变化规律以及相同位置处的无线电干扰值也不同.3 相导线正三角排列的猫头塔所对应无线电干扰呈先增后减的变化规律,而 3 相导线倒三角排列的单回路紧凑型塔所对应的无线电干扰呈递减的变化规律.在距中相导线 15.6 m 位置范围外,两曲线均呈现递减的变化规律.因此在实际特高压输电线路设计杆塔选型中,应根据实际情况或者具体范围内无线电干扰限值要求来选择塔型,对于减弱无线电干扰有一定的作用.

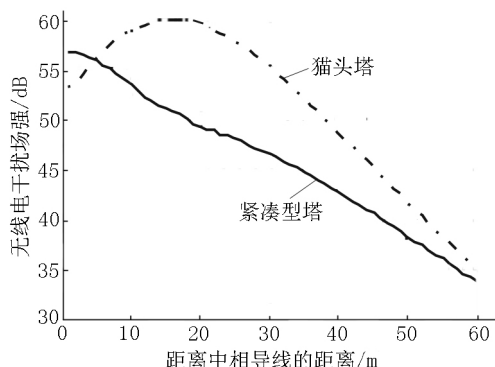


图 6 不同杆塔下无线电干扰横向分布

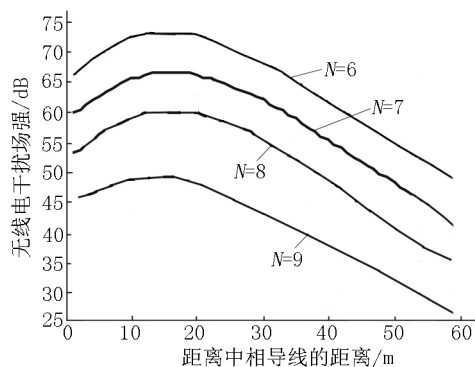


图 7 不同导线分裂数下无线电干扰横向分布

由图 7 和图 8 可知,随导线分裂数以及子导线截面的增大,无线电干扰水平减小,其实质在于导线分裂数以及子导线截面的增加,导致导线表面场强的显著减小而影响导线电晕效应.分裂根数从 6 开始,每增加 1 根,线下无线电干扰下降依次约 3、7、8 dB,分裂数从 6 增加到 9,线下无线电干扰下降约 20 dB,下降幅度近 27%;在中相导线位置处,子导线截面积每增加一级,无线电干扰值约下降 2 ~

3 dB,而在无线电干扰最大值位置,子导线截面积每增加一级,无线电干扰值约下降2~7 dB.因此,适当地增加分裂数以及子导线截面积都是降低无线电干扰的有效措施.但也不能盲目增加,一方面增加分裂导线数目容易加剧导线振动、覆冰等问题;另一方面无限制地增加分裂导线数目或者子导线截面必然带来成本和维护费用的增加.一般国内外建议特高压输电线路的分裂导线数为8,在线路设计时应该综合考虑坚持可持续发展原则.

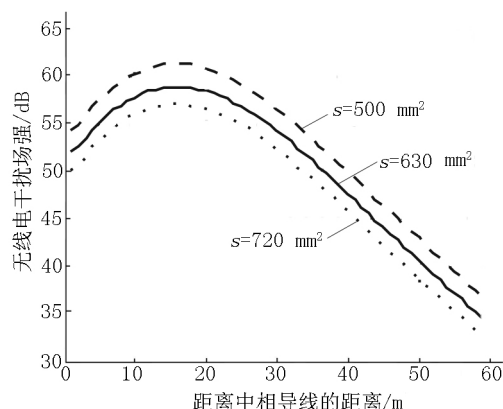


图8 不同子导线截面下无线电干扰横向分布

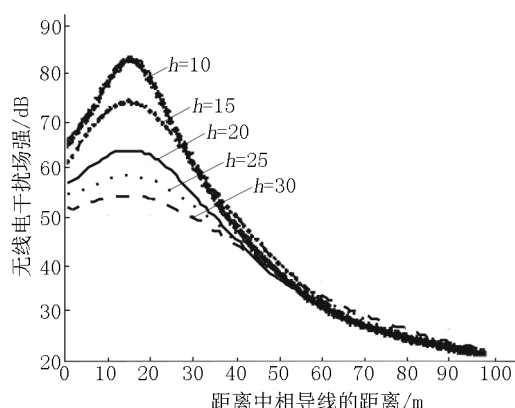


图9 不同导线对地高度下无线电干扰横向分布

由图9可知,线下无线电干扰最大值随导线对地高度的增加而减小.在距边相导线约15 m范围内,电晕放电产生的无线电干扰随导线对地高度的增加而减小;但是在距边相导线约15 m范围外,导线对地高度对电晕放电产生的无线电干扰影响较小,而且当导线达到一定高度时无线电干扰减小的幅度逐渐变小.该结果正好与工程实测结果相对应:距边相导线15 m范围外的线路无线电干扰与线路高度的相关性很小<sup>[15]</sup>.因此,在一定的范围内适当增加导线对地高度可减小无线电干扰,但高度达到一定时此方法并不合适,而且成本也会过高.在实际线路设计时,为满足无线电干扰限值的要求,应通过不断优化得到一个最适合的高度.

### 3.2 环境及人为因素

除线路参数外,土壤电阻率、海拔高度、下垫面

植被以及雾、霾、温湿度等气候条件也是线路下方无线电干扰场强的重要影响因素.研究表明,随着土壤电阻率的增加,线路的无线电干扰值是呈递减趋势的,其衰减速度逐渐趋缓.因此,当土壤电阻率增加至一定值时,其变化对于无线电干扰值的影响作用将不明显<sup>[16]</sup>.而实际特高压线路途经地区众多,各个地区的土壤电阻率变化范围也较大,因此无线电干扰测量值相差也较大.海拔高度对无线电干扰场强的影响实质是对导线临界起晕场强的影响,海拔升高时,导线临界起晕场强随之减小,导线附近空气的电离作用将加强,导线表面的电晕效应将更加明显,随之无线电干扰增加<sup>[10]</sup>;但是当海拔高度增大到一定程度时,海拔对无线电干扰的影响作用逐渐减弱<sup>[17]</sup>.植被对线路无线电干扰有一定的削弱作用,各种植被对电磁场削弱率由高到低排列为高大树木、灌木、草坪,因此在条件允许的情况下,在输电线路走廊或居民区内适当种植植被,可有效地将输电线路下无线电干扰水平限制在较低水平.温度升高电晕程度增强,无线电干扰随之增强.湿度增加,电晕程度减弱,无线电干扰随之减弱<sup>[18]</sup>.雾、霾条件下无线电干扰会出现明显的波动现象,其幅度变化分别可达15 dB和20 dB,这是因为在雾、霾条件下大气中分别有小水滴悬浮物和固体小颗粒悬浮物,导致导线表面放电情况的增加,从而对无线电干扰造成影响,但是从长期效应看来,其影响是有限的<sup>[19]</sup>.

至于人为因素,在用激发函数法求解线路无线电干扰过程中,激发函数以及导线表面场强计算方法的选取、电晕电流在导线上传播模型的选取、以及计算过程中失误等因素均会是特高压线路无线电干扰的影响因素.因此,对于导线表面电场强度计算方法、电晕电流传播模型进行更加深入研究,对于降低无线电干扰是有重要意义的.

## 4 结论及展望

目前,特高压线路无线电干扰的研究建模中大多直接将输电线路等效为无限长导线处理,忽略了导线弧垂问题.本文在2维模型的基础上,利用考虑弧垂的等效分析法以及更符合我国国情的激发函数进行研究,计算结果相对于实测值的误差要明显小于忽略弧垂情况下的误差,说明在实际特高压线路工程无线电干扰预测中,考虑弧垂的影响很有必要.因此,为了提高计算精度,更好地深入了解和掌握无线电干扰水平及特性,今后的研究可以建立考虑弧垂情况的3维直观计算模型.特高压线路途经的环境条件复杂,除以上所研究的影响因素外还存在众多待研究的因素如空气密度、气压、空间自由电荷数

量等,关于这些方面的研究较少,在今后的研究中可综合考虑,形成更全面的无线电干扰有效评估方法.此外,关于直流输电线路以及交直流混合线路无线电干扰的研究较少,可以从线路干扰主要根源电晕方面深入研究,以形成更加完善的无线电干扰特性分析模型.

## 5 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 粟福珩. 高压输电的环境保护 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.
- [4] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新 [J]. 电网技术, 2013, 37(3): 567-574.
- [5] Pelissier R. Radio-interference caused by extra-high-voltage power lines [J]. Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, 1953, 31(7): 409-418.
- [6] Adams G E. The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1956, 75(3): 411-419.
- [7] Gary C H. The theory of the excitation function: a demonstration of its physical meaning [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1972, 91(1): 305-310.
- [8] 何旺龄, 万保权, 刘震寰, 等. 特高压交流试验线段的无线电干扰特性研究及长线路预测 [J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3953-3960.
- [9] 裴春明, 万保权, 何旺龄, 等. 应用电晕笼的特高压交流输电线路无线电干扰试验研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1582-1588.
- [10] 裴春明, 何旺龄, 万保权, 等. 海拔高度对交流线路无线电干扰水平的影响 [J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3330-3336.
- [11] 何为, 肖冬萍, 杨帆. 超特高压环境电磁场测量、计算和生态效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [12] 应力. 基于三维模型的交流输电线路可听噪声计算方法及规律研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [13] 肖冬萍, 何为, 张占龙, 等. 特高压输电线路工频磁场三维优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 116-120.
- [14] 刘丽娜, 陶加祥, 张业茂, 等. 特高压交流示范工程输电线路电磁环境实测分析 [J]. 中国电力, 2017, 50(10): 46-51.
- [15] Project UHV. Transmission line reference book: 345 kV and above [EB/OL]. [2017-11-16]. <https://www.osti.gov/biblio/5278767>.
- [16] 中国电力科学研究院. 特高压输电技术交流输电分册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 231-232.
- [17] 何旺龄. 超/特高压交流输电线路无线电干扰产生机理与激发函数研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [18] 蒋虹, 陈豫朝, 张广洲, 等. 温湿度对交流电晕无线电干扰的影响 [J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2918-2923.
- [19] 谢辉春. 特高压交流输电线路无线电干扰统计特征及预测评估方法 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

## The Study on Radio Interference of UHV Transmission Lines Based on the Effect of Transmission Line Sag

LIU Mingping, YE Xiaoting, WANG Qingnian

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031, China)

**Abstract:** Under the condition of the increasing demand for electricity and the unbalanced distribution of energy resources and load, the Ultra High Voltage (UHV) transmission technology needs to be studied and improved urgently, and it's very important for the accurate evaluation and control of the radio interference from UHV transmission lines. At present, the method of the study on radio interference of the UHV AC transmission lines is usually the excitation function method. On the basis of a two-dimensional model, a typical simulation is performed using the equivalent analysis method with the sag of the transmission lines. After comparing with the measured data from the 1 000 kV Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1 000 kV UHV AC pilot project, it shows that the equivalent analysis method is more applicable to the practical engineering. The results of the paper suggest that it's necessary to consider the sag in the prediction of radio interference in the practical UHV transmission project. Finally, the influence factors on the radio interference are analyzed and the corresponding solutions are given to weaken the interference, which are helpful for the design and selection of UHV transmission lines and towers.

**Key words:** UHV transmission lines; excitation function; radio interference; transmission line sag

(责任编辑: 冉小晓)