

超高压输电线路下工频电场抑制方法的研究

李永明¹, 何健¹, 徐禄文², 杨越¹, 贾晋¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆市电力科学试验研究院, 重庆 400015)

摘要: 随着我国电力工业的发展和城镇化建设规模的不断扩大, 500 kV 线路越来越接近公众活动区域, 甚至进入市区, 线路引起的电磁污染必然会对住在沿线附近的居民产生影响。这种影响已引起社会各方面的广泛关注, 并且由超高压输电线路引起的环境投诉与纠纷也越来越多^[1, 2]。因此, 如何降低超高压输电线路下方的工频电场强度已经成为环境保护和电力部门中的一个焦点问题。针对上述问题, 提出了采用架设屏蔽线和屏蔽网的措施来抑制输电线路下工频电场强度的方法, 并用仿真计算及实际测试结果验证了抑制方法的有效性; 分析比较了各种屏蔽线(网)架设方案下工频电场的抑制效果, 提出了屏蔽线的最优架设方案。

关键词: 超高压; 输电线路; 工频电场抑制; 屏蔽线

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0047-05

Research on Suppression of Power Frequency Electric Field Due to EHV Transmission Lines

LI Yong-ming¹, HE Jian¹, XU Lu-wen², YANG Yue¹, JIA Jin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Electric Power Test and Research Institute, Chongqing 400015, China)

Abstract: For the purpose of controlling the frequency electric field intensity caused by EHV transmission lines, shielding lines and shielding net are proposed to suppress the electromagnetic pollution from the power-frequency electric field in the area under transmission lines. Simulation results and measurements verify the suppression effect of the two methods. Moreover, suppression effects of various shielding lines and (nets) are compared, and the best way to setting up shielding line is suggested.

Key words: EHV; transmission line; power frequency electric field; suppression; shielding line

0 引言

随着我国电力工业的发展和城镇化建设规模的不断扩大, 500 kV 线路越来越接近公众活动区域, 甚至进入市区, 线路引起的电磁污染必然会对住在沿线附近的居民产生影响。这种影响已引起社会各方面的广泛关注, 并且由超高压输电线路引起的环境投诉与纠纷也越来越多^[1, 2]。因此, 如何降低超高压输电线路下方的工频电场强度已经成为环境保护和电力部门中的一个焦点问题。自 1972 年国际大电网会议召开后, 国内外对高压输电线产生的电磁环境污染问题做了大量的研究^[3-14], 关于工频电场的研究主要集中在计算、测量及其危害方面, 对于如何抑制工频电场方面的研究很少。

笔者研究分析了降低超高压输电线路下工频电场强度的方法与措施, 提出了架设屏蔽线和屏蔽网的方法来降低特定区域的工频电场, 并对屏蔽线根数、架设高度、水平位置等因素对屏蔽效能的影响进行分析, 在此基础上提出了屏蔽线的最优架设方案, 并进行了现场模拟试验对仿真结果进行了验证, 结果表明采用推荐的架设方案可以将最大电场强度降低到 50% 以下。

1 输电线路下工频电场的计算方法

输电线路下的工频电场计算一般采用国际大电网会议第 36.01 工作组推荐的等效电荷法, 首先计算出单位长度导线上的等效电荷, 然后再计算由这些电荷产生的电场^[3]。

计算时假设输电线路为无限长并平行地面, 把

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2008-11-12

作者简介: 李永明(1964), 男, 副教授, 主要从事电磁场数值计算、电磁兼容等方面的研究。

地面视为良导体。多导线线路中单位导线上的等效电荷 Q , 是通过矩阵方程 $[Q]=[P^{-1}][U]$ 来计算的, U 为导线上的电压, P 为导线的电位系数。

当求出导线单位长度的等效电荷后, 电场强度可以用高斯定理 $E=\frac{Q}{2\pi\epsilon\rho}$, 这里 ρ 是从计算点到导体或者它的镜像的距离。对于空间任意一点的电场强度可根据叠加原理计算得到, 点 (x, y) 的电场强度分量 E_x 和 E_y 可表示为

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x-x_i}{L_i^2} - \frac{x-x_i}{L_i'^2} \right) \quad (1)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y-y_i}{L_i^2} - \frac{y+y_i}{L_i'^2} \right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, x_i, y_i 为导线的坐标, $i=1, 2, \dots, n$; n 为导线数; L_i, L_i' 分别为导线及其镜像至计算点距离。

安装屏蔽线后输电线下电场场强的计算方法, 同前面输电线下方电场计算方法完全相同, 只需注意使屏蔽导线的电位为零。求出每根导线所带电荷后, 就可以计算出合成场强的分布。屏蔽网相当于由许多根屏蔽线密集交叉排列组成的, 由于计算过程中计算的是二维场的情况, 可以将其等效为多根屏蔽线的叠加来进行计算。

2 影响输电线下工频电场的主要因素

由以上工频电场强度的计算可知, 输电线下空间某点电场强度值与每根导线上电荷的数量以及该点与导线之间的距离有关; 导线上的电荷多少, 除与所加电压有关外, 还与导线的几何位置及其尺寸有关。因此, 导线的布置形式、对地距离和相间距离、分裂根数以及双回路时两回路间电压的相序等, 都直接影响线下电场强度的分布和大小。

2.1 导线对地高度的影响

图 1 给出了单回路水平排列的 500 kV 交流线路(导线采用 4xLGJQ-300 mm², 相间距 10 m)在相导线对地高度不同时, 地面上 1.5 m 处的电场强度横向分布曲线。由图 1 可见, 电场强度随导线离地高度的增加而减小, 但在一定范围内减小的程度很显著, 以后减小的程度逐渐缓慢。表 1 为导线对地高度不同时电场强度的最大值。由表 1 可看到, 导线对地距离由 15 m 抬高到 16 m 时, 最大场强降低 0.621 kV/m, 而往上依次抬高 1 m 时, 最大电场强度依次降低 0.529、0.455、0.393、0.341、0.299、0.264 kV/m。因此, 当导线最低距离不大时, 增加导线对地距离, 地面上 1.5 m 处的场强减小得很显著; 随着导线对地距离的增加, 场强减小程度逐渐缓慢。因此, 当导线对地距离增加到一定程度, 再靠抬高导线来减小地面附近的电场强度, 经济投入会比较大。

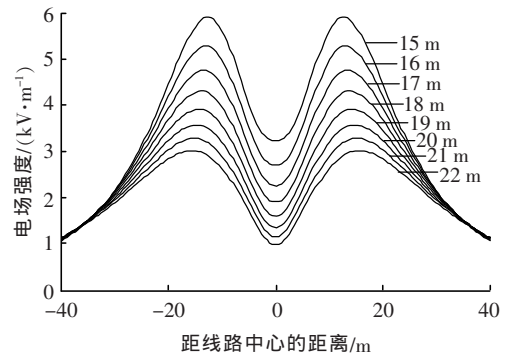


图 1 导线对地高度不同时电场强度的横向分布

表 1 导线对地高度不同时电场强度的最大值

导线高度/m	最大场强/(kV·m ⁻¹)
15	5.913
16	5.292
17	4.763
18	4.308
19	3.915
20	3.574
21	3.275
22	3.011

2.2 相间距离的影响

减小相间距离时, 最大场强值和高场强覆盖范围都相应减小, 但场强的减小程度没有增加线路对地距离的效果明显。但如果大幅度地减小相间距离, 如采用 V 型绝缘子串, 还是能比较明显地减小线下场强值。但是减小导线相间距离将受到相间绝缘的限制。

2.3 分列导线结构尺寸的影响

减少分裂导线的根数和分裂间距, 对减小地面场强还是很有效的。但是, 值得注意的是: 减少分裂根数, 可使导线表面场强增大, 使无线电干扰和可听噪声增加。子导线半径变化对线下空间场强的影响不大。

2.4 导线布置方式的影响

计算表明: 对于单回路输电线路, 倒三角排列对减小最大场强和高场强区的效果较好; 对于双回路输电线路, 逆相序排列对减小最大场强和高场强区的效果较好。由此可见, 在线路设计中选择导线布置方式时, 应考虑(至少在某些对场强有较严格限制的特殊段)在单回路中采用倒三角布置, 在双回路中采用逆相序布置, 对减小线下最大场强和节省线路走廊都有利。

综上所述, 在输电线路规划设计阶段, 可以从线路的电场效应、绝缘配合、电晕效应及成本造价等各方面来综合考虑其结构参数。在不影响线路主要性能参数的前提下, 可以适当改变线路的结构参数和布置方式来降低其周围的工频电场: 增加输电线

离地高度;在相间绝缘允许的情况下,适当减小相间距离;减小分裂导线根数也可以减小场强,但这要增加无线电干扰水平;合理布置导线位置,无论单回路还是双回路,采用倒三角排列可减小线下场强和节省线路走廊;在采用双回路输电时,应考虑采取逆相序排列方式。

3 抑制效果的仿真分析与实验验证

对于已经建成投运的输电线,调整其各种线路参数一般都是较难实现的。因此,当需要降低线路下方场强,尤其是人员活动频繁或有特殊需要而必须将输电线下场强控制在很低数值的一些地方,可在相导线与地面之间安装屏蔽线和屏蔽网来抑制电场强度^[15,16]。

3.1 屏蔽线对线下电场的改善

架设屏蔽线的根数、高度、距中相的水平距离等都对改善效果都有着很大的影响,因此,对各种不同屏蔽线架设方案进行了仿真计算,以分析比较出屏蔽线架设的最优方案。

3.1.1 架设屏蔽线根数对屏蔽效果的影响

图2为分别架设1、2、3、4、5、6根屏蔽线(高10m,水平位置在-13m左边每隔1m处)后,输电线下场强的水平分布。由2图可见,架设了屏蔽线一侧的电场强度大幅减小,而未架设屏蔽线一侧基本没有改变;电场强度的减小程度随着屏蔽线根数的增加而增加,但并不是成正比的,在一定范围内减小的程度很显著,以后减小的程度逐渐缓慢。表2为架设屏蔽线根数不同时电场强度的最大值。由表2可以看到,当架设1根屏蔽线后,最大场强减小了0.799 kV/m,而此后每增加1根屏蔽线,最大场强依次降低1.137、1.381、1.583、1.757、1.912 kV/m。因此,考虑到经济因素,对于一般需要降低场强的区域只需架设4~8根屏蔽线即可将最大场强降低到50%以下,如对场强要求更为严格可再增加适当数量的屏蔽线。

3.1.2 架设屏蔽线高度对屏蔽效果的影响

图3为在高6、8、10、12、14、16m分别架设一根屏蔽线(水平位置-13m)后,输电线下场强的水平

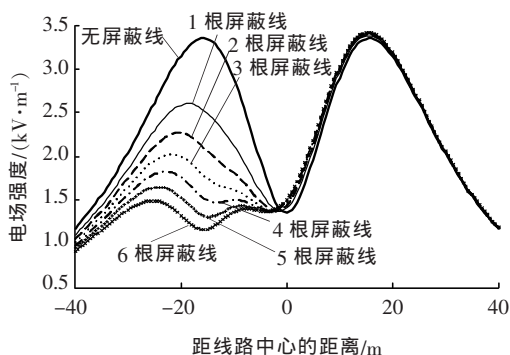


图2 架设屏蔽线根数不同时电场强度的横向分布

表2 架设屏蔽线根数不同时电场强度的最大值

屏蔽线根数	最大场强/(kV·m ⁻¹)	最大场强的减小值/(kV·m ⁻¹)
0	3.403	0
1	2.604	0.799
2	2.266	1.137
3	2.022	1.381
4	1.820	1.583
5	1.646	1.757
6	1.491	1.912

分布。由图3可见,电场强度的减小程度随着屏蔽线架设高度的增加而增加,但并不是成正比的,在一定范围内减小的程度较显著,以后减小的程度逐渐缓慢,这和屏蔽线根数的影响规律是相同的,但增加屏蔽线高度减小场强的程度没有增加屏蔽线根数的效果明显。表3为架设屏蔽线高度不同时电场强度的最大值。由表3可以看到,当屏蔽线高为6m时,最大场强降低了0.588 kV/m,而此后高度每增加2m,最大场强依次降低0.710、0.799、0.863、0.911、0.948 kV/m。由此可以看出,屏蔽线高度对屏蔽效果的影响要小于屏蔽线根数的影响,而且当屏蔽线达到一定高度后再提高其高度是一种非常不经济的方法。因此,屏蔽线的架设高度一般选择8~10m即可。

3.1.3 架设屏蔽线距边相的水平距离对屏蔽效果的影响

图4为在水平位置-12、-13、-14、-15、-16、-17m处分别架设一根屏蔽线(高10m)后,输电线下场强的水平分布。由4图可见,一根屏蔽线在水平

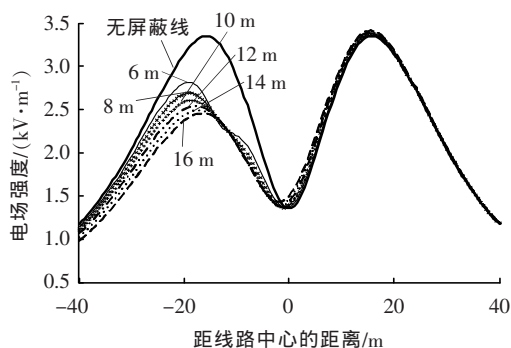


图3 架设屏蔽线高度不同时电场强度的横向分布

表3 架设屏蔽线高度不同时电场强度的最大值

屏蔽线高度/m	最大场强/(kV·m ⁻¹)	最大场强的减小值/(kV·m ⁻¹)
无屏蔽线	3.403	0
16	2.455	0.948
14	2.492	0.911
12	2.540	0.863
10	2.604	0.799
8	2.693	0.710
6	2.815	0.588

位置-12、-13、-14、-15 m 时,场强的改善程度是逐渐增加的,但从-16 m 处场强的改善程度开始逐渐减小。表 4 为架设屏蔽线水平位置不同时电场强度的最大值。由表 4 可以看到,当在-12 m 处架设一根屏蔽线后,最大场强减小了 0.717 kV/m,而此后水平位置向左移动 1 m,最大场强依次降低 0.799、0.873、0.934、0.931、0.864 kV/m。从上面的分析可以看出,屏蔽线架设的离边相过远或者过近都无法起到很好的屏蔽作用。因此,对于需要降低场强的线路段,可以选择在需要降低场强的一侧距离边相 4 m 处架设屏蔽线,此时屏蔽效果最优。

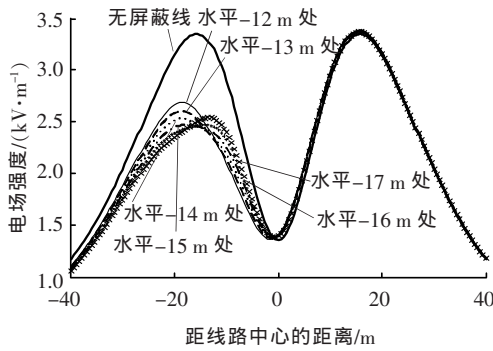


图 4 架设屏蔽线水平位置不同时电场强度的横向分布

表 4 架设屏蔽线水平位置不同时电场强度的最大值

屏蔽线水平位置	最大场强/(kV·m ⁻¹)	最大场强的减小值/(kV·m ⁻¹)
无屏蔽线	3.403	0
-12 m	2.686	0.717
-13 m	2.604	0.799
-14 m	2.530	0.873
-15 m	2.469	0.934
-16 m	2.472	0.931
-17 m	2.539	0.864

综上所述,屏蔽线的根数和水平位置对其屏蔽效果起着决定性的作用,屏蔽线的高度对屏蔽效果的影响没有上面 2 个因素明显,而且提高屏蔽线高度无疑将增加施工的难度和费用,因此在架设屏蔽线时应首先考虑前 2 个影响的因素。通过上面的分析,对于需要降低场强的区域,推荐在需屏蔽侧距边相 4 m、高 8~10 m 处架设 4~8 根屏蔽线即可将最大场强降低到 50%以下。

3.2 屏蔽网对线下电场的改善

为了研究屏蔽网的屏蔽效果,对架设屏蔽网和屏蔽线的几种情况进行了计算分析和比较。图 5 中粗实线为未屏蔽的电场分布,从上到下的曲线依次为架设 1 根(水平位置-13m)、2 根(水平位置-12 m、-13 m)、3 根(水平位置-12、-13、-14 m)屏蔽线和屏蔽网(水平位置在-12~14 m,宽 2 m),架设高度为 10 m 时的电场强度的水平分布。从图 5 中可以看

出,屏蔽网对电场的屏蔽效果还是非常明显的,而且其屏蔽的范围要比屏蔽线的屏蔽范围大很多。表 5 为架设屏蔽线(网)时电场强度的最大值。从表 5 可看到,架设一根屏蔽线后,最大场强减少了 0.799 kV/m,而架设屏蔽网后,最大场强减少了 1.467 kV/m。因此,对于某些对电场强度有严格限定的区域,可以采用架设屏蔽网来减小电场强度。

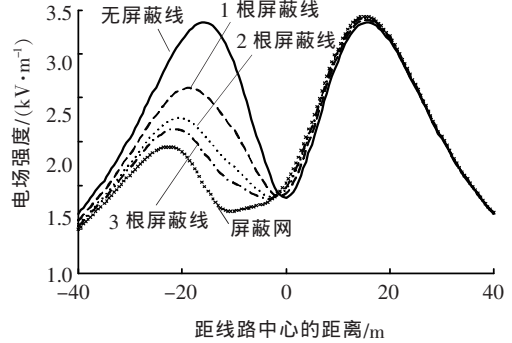


图 5 架设屏蔽线(网)时电场强度的横向分布

表 5 架设屏蔽线(网)时电场强度的最大值

屏蔽类型	最大场强/(kV·m ⁻¹)
无屏蔽	3.403
1 根屏蔽线	2.604
2 根屏蔽线	2.264
3 根屏蔽线	2.139
屏蔽网	1.936

此外,从图 5 中可以看出,架设屏蔽线(网)后,输电线路下方电场强度的最大值发生了偏移,这是由于屏蔽线(网)上的感应电荷产生的电场强度与输电线上电荷产生的电场强度的矢量叠加在屏蔽线(网)附近导致电场强度数值的减小最大,因此发生了电场强度最大值的偏移。

3.3 实验验证

在单回路水平排列的 500 kV 交流线路下架设不同根数、高度、水平位置的屏蔽线(网)后进行了现场屏蔽效能测试。屏蔽线(网)的架设方式及测量布点见图 6。

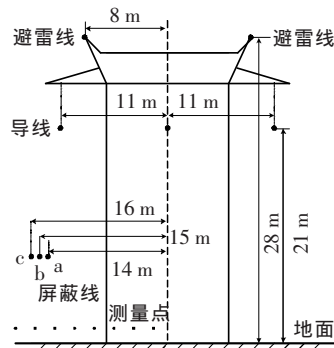


图 6 屏蔽线(网)架设位置示意图

该次试验对以下几种架设方案进行了现场屏蔽效能测试: 在 a, a, b, a, b 和 c 位置, 高 10 m 处分别架设屏蔽线; 在 a 位置, 高 10, 8.08, 6.16 m 处分别架设 1 根屏蔽线; 在 a, b, c 位置, 高 10 m 处分别架设 1 根屏蔽线; 在 a, b 位置中间架设屏蔽网高 8 m; 在 a 位置, 高 10 m 处分别架设不同材质和参数的屏蔽线。

图 7 给出了其中几种架设屏蔽线(网)架设方案的结果与仿真计算结果的对比, 从图 7 可以看出, 测量结果和计算结果基本一致, 并且屏蔽线的根数、高度、水平位置等对屏蔽效果的影响规律也与仿真是一致的。图中某些局部位置误差较大, 这是由于: 电场的测量过程中受到温度、湿度、线路负荷等多种外界因素的影响, 因此测量值存在一定误差; 在理论计算过程中, 假设输电线路为无限长并平行地面, 且把地面视为良导体, 但在实际的测量线路无法完全达到上述假设, 因此产生一定的计算误差, 但这种误差很小, 完全可以满足工程需要^[3]。此外, 使用铁丝、铜丝和避雷线作为屏蔽线时对屏蔽效果的影响非常小, 铜丝要稍微好于其他两种, 而且屏蔽线的粗细程度对屏蔽效果也基本没有影响。因此, 为了施工和屏蔽线的材料的工艺简单化, 可以选取避雷线材料作为屏蔽线。

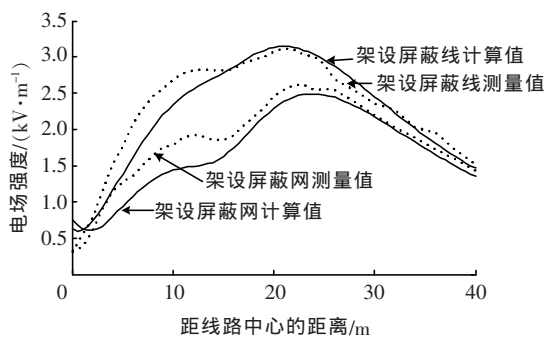


图 7 计算值和测量值的对比

以上试验表明, 在输电线下需要屏蔽侧沿线路方向水平架设屏蔽线可以很好地降低工频电场, 对于某些对电场有特殊要求的区域可以选择架设屏蔽网。

4 结论

(1) 在输电线路规划设计阶段, 可以从线路的电场效应、绝缘配合、电晕效应及成本造价等各方面来综合考虑其结构参数。在不影响线路主要性能参数的前提下, 可以适当改变线路的结构参数和布置方式来降低其周围的工频电场。

(2) 针对已经建成投运的输电线, 调整其各种线路参数一般都是较难实现的, 提出采用架设屏蔽线

或屏蔽网的方法来降低电场强度; 计算分析了屏蔽线架设的根数、高度、水平距离等因素对屏蔽效果的影响, 并提出了最优架设方案; 通过现场架设屏蔽线的试验对以上的结论进行了验证, 计算结果与实测结果基本一致。

(3) 采用推荐的方案架设屏蔽线可以将最大场强降低到 50% 以下, 对于某些对电场有更严格要求的区域可以采用屏蔽网。

参考文献:

- [1] 粟福珩. 高压输电的环境保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [2] KOEGLSCHATZ U. Dielectric-barrier Discharge: Their History, Discharge Physics and Industrial Application[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [3] 国际大电网会议第 36.01 工作组. 输电系统产生的电场和磁场[M]. 邵方殷(译). 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [4] DENO D. Transmission Line Fields [J]. IEEE Trans. on PAS, 1976, 95(5): 1 600-1 611.
- [5] BRACKEN T D. Field Measurements and Calculations of Electro-static Effects of Overhead Transmission Lines[J]. IEEE Trans on PAS, 1976, 95(2): 494-504.
- [6] BRACKEN T D, KHEIFETS L I, SUSSMAN S S. Exposure Assessment for Power Frequency Electric and Magnetic-fields (EMF) and Its Application to Epidemiological Studies [J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 1993, 3(1): 1-22.
- [7] VALJUS J, HONGISTO M, VERKASALO P, et al. Residential Exposure to Magnetic Fields Generated by 110-400 kV Power Lines in Finland[J]. Bioelectromagnetics, 1995, 16(6): 365-376.
- [8] READ D, MORGAN M G. The Efficacy of Different Methods for Informing the Public about the Range Dependency of Magnetic Fields from High Voltage Power Lines [J]. Risk Analysis, 1998, 18(5): 603-610.
- [9] LI C Y, THERIAULT G, LIN R S. A validity Analysis of Residential Magnetic Fields Estimated from High Voltage Transmission Lines[J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 1997, 7(4): 493-504.
- [10] 封滢彦, 俞集辉. 超高压架空输电线的工频电场及其影响(1)[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(4): 10-14.
- [11] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.
- [12] 蒋宏济, 万力, 王继纯. 110 kV 电缆电磁辐射对环境的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 87-88.
- [13] 王勤, 杨敬梅, 张欣, 等. 西北 750 kV 输电线路工频电场模拟试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 34-36.
- [14] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-77.
- [15] 蒋虹, 焦景慧, 林志和, 等. 超高压线路降低电场强度对策研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 56-58.
- [16] 路遥, 邬雄, 万保权, 等. 交流特高压线路下电场强度的改善[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 66-68.