

空间交叉跨越导线间互电感的计算与分析

我国土地资源紧张，能源地域分布不均衡，当进行大规模远距离输电时，会出现走廊共用以及输电线间交叉跨越的情况。目前对平行输电线间的电气参数研究较多，但对于交叉跨越输电线间的电气参数鲜有报道。基于矢量磁位法，分析了交叉跨越导线间互电感的影响因素，得到了线间夹角、导线长度、交叉跨越点位置以及两线垂直距离对互电感大小的影响规律，对工程设计具有一定的参考意义。

张 荐 焦重庆/华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室

0 引言

我国能源分布和能源需求各地极不平衡，为了满足东部地区电能巨大的需求，因此常常需要远距离大规模地进行电力输送，如西电东输等工程。架空线杆塔和回路走廊要占用很多土地，对于一些土地资源紧张的地区，为了节约土地，可能会出现走廊共用或者输电线交叉跨越的情况^[1]。空间两回通电导线之间可能会产生相互的电磁干扰，线路之间形成场耦合。电场耦合即容性耦合，主要是指两个回路之间通过电场并以互电容的方式相互作用，在电路上可以用部分电容的概念来描述电场耦合。磁场耦合即感性耦合，主要指两个回路之间通过磁场并以互电感的方式相互作用，在电路上可以用互电感的概念来描述磁场耦合^[2]。

对于平行通电导线，如图1所示，该模型互电感的计算公式为人们所熟知。多回并行输电线路间互电感的计算和测量方法也有相关报道^[3]。

工程实际中，有些特殊场合会出现输电线路与输电线路、输电线路与通信

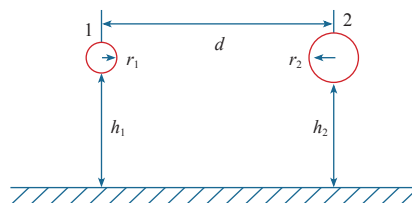


图1 无限大导电平面上两根平行的长直圆截面细导线

回路、输电线路与输油输气管道以及通信回路与通信回路等交叉跨越的情况^[4-5]。然而，对于交叉跨越导线间的互电感，一方面没有相应的解析公式，另一方面对其计算结果和影响因素的研究也鲜见报道。本文基于回路的磁链可以用沿回路矢量磁位的环量来计算的原理，并结合线段电流在空间任一点矢量磁位的解析公式，给出了任意两个多边形回路之间的互电感计算公式。基于该公式，针对大地上方两条相互交叉的导线，计算了不同的线路长度、交叉角度、交叉跨越点位置以及垂直距离情况的导线—大地回路之间的互电感，并得出了互电感随上述因素的变化规律。

本文结论对于传输线设计具有一定的参考价值，特别是要考虑交叉线路间互电感影响的情况。

1 计算模型

1.1 矢量磁位法

空间两个任意多边形回路如图2所示。图中， C_a 为空间任意形状的 m 边形回路； C_b 为空间任意形状的 n 边形回路； I_a 、 I_b 分别为两回路分别通过的电流； B 为 C_a 回路在 C_b 回路中产生的磁感应强



张 荐/硕士研究生

关键词/Keywords

输电线路·
交叉跨越·
矢量磁位法·
互电感·

度； A 为矢量磁位。则

$$M = \frac{\int_{S_{C_b}} \mathbf{B} dS}{I_{C_b}} = \frac{\oint_{C_b} \mathbf{A} dl}{I_{C_b}} \quad (1)$$

式中， S_{C_b} 为回路 C_b 围成的曲面； C_b 为回路 C_b 的边，即

$$C_{C_b} = \sum_{j=1}^n C_{bj} \quad (2)$$

回路 C_a 的每条边 C_{ai} 在回路 C_b 中产生的矢量磁位为 A_i ，那么

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i \quad (3)$$

C_{ai} 边与 C_{bj} 边对回路互感的贡献为

$$M_{ij} = \int_{C_{bj}} \mathbf{A}_i dl \quad (4)$$

那么 C_{ai} 边与回路 C_b 各边对回路互感的贡献

$$M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (5)$$

C_a 回路与 C_b 回路之间的互电感为

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (6)$$

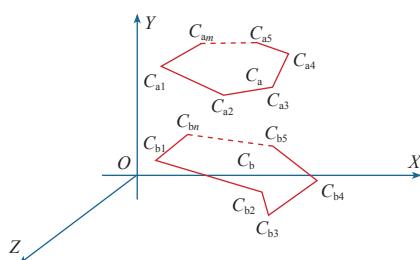


图2 空间两个任意多边形回路

一段有限长电流的矢量磁位如图3所示。 L 为空间一条有限长载流直导线， L 在空间任一点 P 处产生的矢量磁位为

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0 I_e z}{4\pi} \ln \frac{\sin \theta_1 (1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_2 (1 - \cos \theta_1)} \quad (7)$$

利用式(7)便可以计算出图2中回路 C_a 、 C_b 间的互电感 M 。

1.2 模型验证

两个矩形回路共面如图4所示。设 I_1 、 I_2 两个细长矩形回路共面， BC 边与 EH 边间的距离为 d ， BC

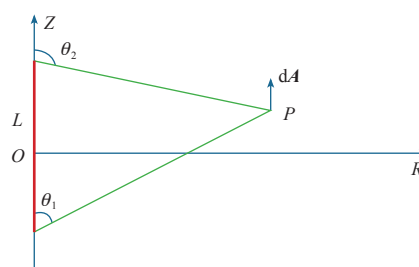


图3 一段有限长电流的矢量磁位

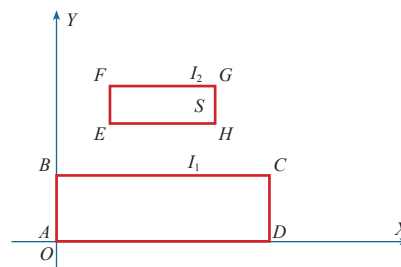


图4 两个矩形回路共面

$\gg EH$ ， $BC \gg GH$ 且 $BC \gg CD$ 。图4模型中两个回路的互电感解析公式可近似表示为

$$M = \frac{\mu_0 |EH|}{2\pi} \ln \frac{(|CD|+d)(|GH|+d)}{d(|CD|+|GH|+d)} \quad (8)$$

为了验证本文模型的准确性，分别用式(8)和本文模型计算了不同回路长度的互电感，并且求出了模型计算结果与式(8)计算结果间的相对误差。计算过程中设 $d=5$ m， $GH=CD=10$ m， $AD=1\ 000$ m，改变 EH 长度。计算结果如表1所示。

表1 不同回路长度的互电感

不同回路长度(EH)对应的互电感			
EH/m	式(8) 计算结果/ μH	模型计算结果/ μH	相对误差(%)
60	6.715	6.713	0.029 8
65	7.275	7.273	0.027 5
70	7.835	7.832	0.038 3
75	8.394	8.392	0.023 8
80	8.954	8.951	0.033 5
85	9.513	9.510	0.031 5
90	10.073	10.070	0.029 8
95	10.633	10.629	0.037 6
100	11.192	11.189	0.026 8

为了进一步验证本文模型的准确性，分别计算了回路间不同水平距离情况下的互电感，并且求出了模型计算结果与式(8)计算结果间的相对

误差。计算过程中随机设 $EH=60\text{ m}$, $GH=9\text{ m}$, $CD=10\text{ m}$, $AD=1\ 000\text{ m}$, 改变水平间距 d 。计算结果如表2所示。

表2 回路间不同水平距离对应的互电感

两回路间不同水平距离 (d) 对应的互电感			
d/m	式 (8) 计算结果/ μH	模型计算结果/ μH	相对误差(%)
5	6.715	6.713	0.029 8
10	3.243	3.241	0.061 7
15	1.950	1.948	0.102 6
20	1.310	1.308	0.152 7
25	0.944	0.942	0.211 9
30	0.713	0.711	0.280 5
35	0.558	0.556	0.358 4
40	0.449	0.447	0.445 4
45	0.369	0.367	0.542 0
50	0.309	0.307	0.647 2

从表1和表2的数据可以看出, 模型计算结果与式(8)计算结果误差在允许范围内, 可以验证模型的准确性。

2 交叉线路的电感计算和分析

在以下分析中, L_1 、 L_2 为两条空间交叉跨越导线, 以 L_1 所在直线为 X 轴, L_2 投影与 L_1 相交所确定的平面为 $X-Y$ 平面, 建立直角坐标系。计算 L_2 在 L_1 与大地构成的回路中产生的互电感。

2.1 导线间夹角对互电感的影响

(1) 交叉跨越点位于两线中点

L_1 长度为 $1\ 000\text{ m}$, L_2 长度为 $2\ 000\text{ m}$, 两线垂直距离为 10 m , 两线中性点投影重合, 模型俯视图如图5所示, 改变两线间夹角 θ , 计算出每个角

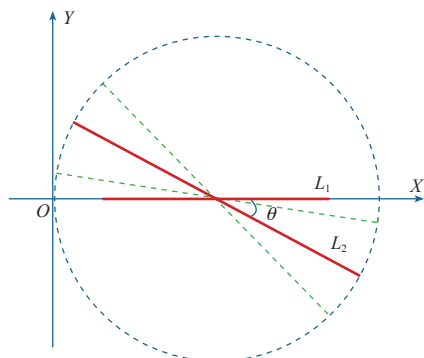


图5 交叉跨越通电直导线俯视图
(交叉跨越点为两线中点)

度对应的互电感, 绘成折线图如图6所示。

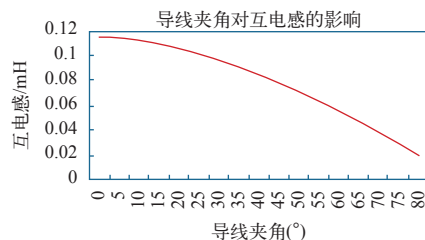


图6 互电感随夹角变化数据图
(交叉跨越点为两线中点)

从图6可以看出, 夹角为 0° 时, 互电感为最大值 $M=1.139\ 2\times 10^{-4}\text{ H}$, 互电感随夹角的增大呈现递减趋势; 当夹角趋于 90° 时, 互电感趋于0。

(2) 交叉跨越点位于两线端点

L_1 长度为 $1\ 000\text{ m}$, L_2 长度为 $2\ 000\text{ m}$, 两线垂直距离为 10 m , 两线左端点投影重合, 模型俯视图如图7所示。改变两线间夹角 θ , 计算出每个角度对应的互电感, 绘成折线图如图8所示。

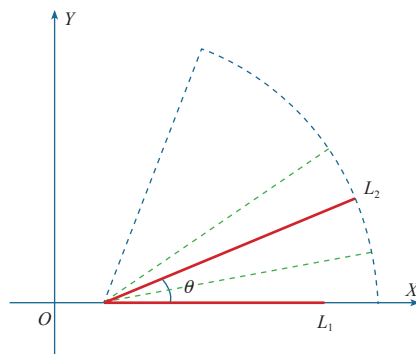


图7 交叉跨越通电直导线俯视图
(交叉跨越点为两线左端点)

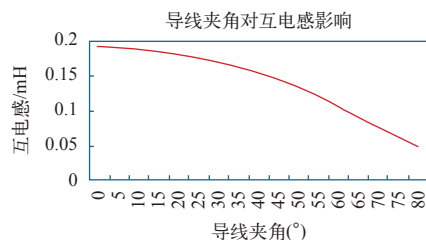


图8 互电感随夹角变化数据图
(交叉跨越点为两线左端点)

从图8可以看出, 夹角为 0° 时, 互电感为最大值 $M=1.899\ 9\times 10^{-4}\text{ H}$, 互电感随夹角的增大呈现递减趋势; 当夹角趋于 90° 时, 互电感趋于0。

经过计算比较可以看出, 两种情况下互电感

随角度变化趋势是相同的。当 L_1 、 L_2 长度均确定时,交叉跨越点不同,使同一角度下两种情况的互电感大小不同,交叉跨越点在线路端点时,两线互电感较大。

取两线夹角 θ ,将两种交叉跨越点情况示于同一图中,如图9所示。 L_2 与 L_1 交叉跨越点为两线左端点,对于 L_1 上任意一点 a , L_2 在 L_1 上产生的矢量磁位为 A_a , L_2 两个端点与 a 点连线和 L_2 之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,并且 $\theta_1=\theta$ 。 L_2' 与 L_1 交叉跨越点为两线中点,对于 L_1 上任意一点 a , L_2' 在 L_1 上产生的矢量磁位为 A'_a 。 L_2' 两端点与 a 点连线和 L_2' 之间的夹角分别为 θ'_1 和 θ'_2 。由几何关系得 $\theta'_2>\theta_2$, $\theta_1>\theta'_1$ 。进而由式(7)可知, $A_a>A'_a$ 。所以,在此种情况下交叉跨越点在线路端点时两线互电感较大。对于夹角这一影响因素,互电感随夹角增大而减小。两线夹角为 0° 时,互电感取得最大值;当夹角趋于 90° 时,互电感趋于0。

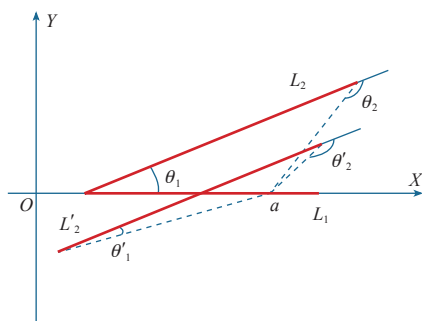
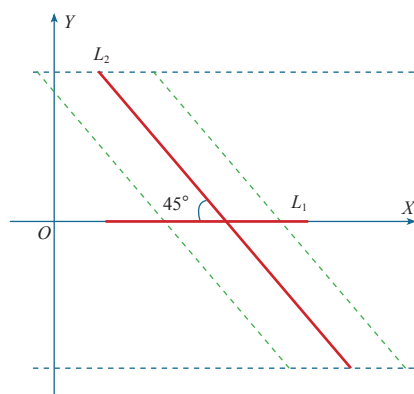


图9 矢量磁位分析

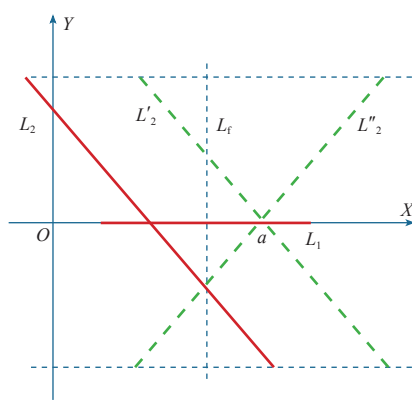
2.2 导线交叉跨越点对互电感的影响

L_1 长度为1 000 m, L_2 长度为2 000 m, 两线垂直距离为10 m, 夹角为 45° , L_2 中点投影在 L_1 上由左向右平移, 模型俯视图如图10所示, 计算出每个跨越点对应的互电感, 绘成折线图如图11所示。

从图11可以看出, 在 L_2 向右平移到 L_1 中点的过程中, 由于 L_2 在 L_1 上产生的 A 逐渐增大, 所以互电感逐渐增大。图10b中, L_t 为导线 L_1 的中垂线, 当 L_2 从 L_1 中点继续向右平移过程中, 假设 L_2 到达 L_2' 的位置, 此时 L_1 与 L_2 两线交点为 a , L_2' 与 L_2'' 关于 X 轴对称, 所以 L_2' 与 L_2'' 在 L_1 上产生的 A 是相同的,



(a) 改变导线交叉跨越点示意图



(b) 对称分析图

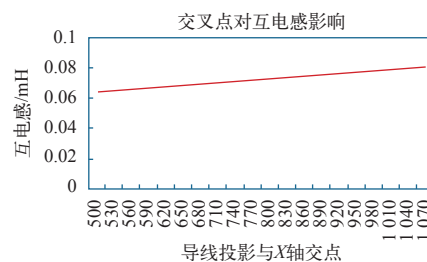
图10 两条交叉跨越通电直导线俯视图
(两线夹角 45° , 改变交叉跨越点)

图11 互电感随交叉跨越点变化数据图

又因 L_2 与 L_2'' 关于 L_t 轴对称, 所以 L_2 与 L_2'' 在 L_1 上产生的 A 相同, 进而得出 L_2 与 L_2' 在 L_1 上产生的 A 相同。所以 L_2 经过 L_1 中点继续向右平移的过程等价于 L_2 由 L_1 中点向 L_1 左端点平移的过程, 在此过程中 L_2 在 L_1 上产生的 A 减小, 所以互电感逐渐减小。综上, 在两线长度及线间夹角一定的情况下, 当 L_2 中点投影与 L_1 中点重合时, 互电感达到最大值 $M=8.050\ 3\times 10^{-5}$ H。互电感变化曲线关于 $X=1\ 000$ 对称, L_2 位于 L_1 端点时, 互电感达到最小值

$$M = 6.3835 \times 10^{-5} \text{ H}.$$

2.3 导线长度对互电感的影响

(1) 交叉跨越点位于两线中点

L_1 长度为 1 000 m, L_2 长度变化, 两线垂直距离为 10 m, 夹角为 45° , L_2 中点投影与 L_1 中点重合, 模型俯视图如图 12 所示, 计算出 L_2 不同长度对应的互电感, 绘成折线图如图 13 所示。

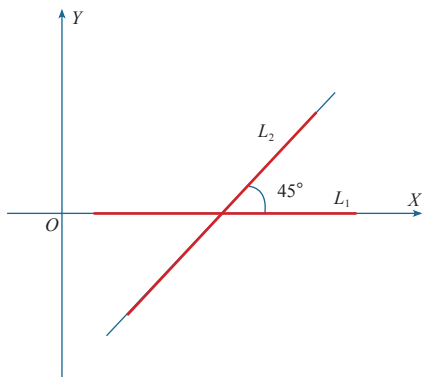


图12 两条交叉跨越通电直导线俯视图
(两线夹角 45° , 交叉跨越点为两线中点)

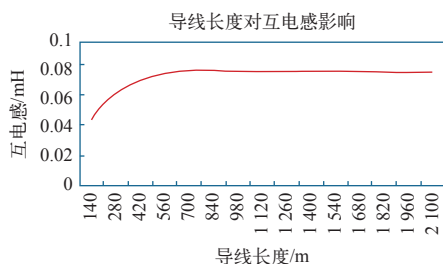


图13 互电感随导线 L_2 长度变化数据图
(两线夹角 45° , 交叉跨越点为两线中点)

从图 13 中可以看出, 对于图 12 模型, 互电感随导线长度的增加先增大后趋于定值。从具体计算数据来看在 $L_2 < 5\,000$ m 范围内, 互电感的值趋于 $M = 8.0000 \times 10^{-5} \text{ H}$ 。

(2) 交叉跨越点位于两线端点

L_1 长度为 1 000 m, L_2 长度变化, 两线垂直距离为 10 m, 夹角为 45° , L_2 左端点投影与 L_1 左端点重合, 模型俯视图如图 14 所示, 计算出不同 L_2 长度对应的互电感, 绘成折线图如图 15 所示。

从图 15 中可以看出, 对于图 14 模型, 互电感随导线长度的增加先增大后趋于定值。从具体计算数据来看在 $L_2 < 5\,000$ m 范围内, 互电感的值趋

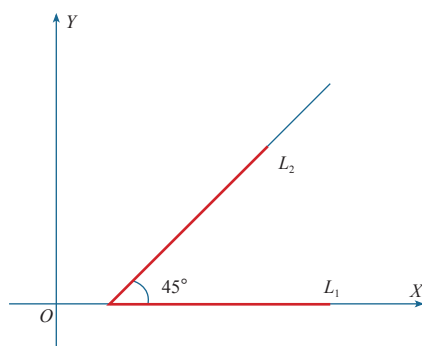


图14 两条交叉跨越通电直导线俯视图
(两线夹角 45° , 交叉跨越点为两线端点)

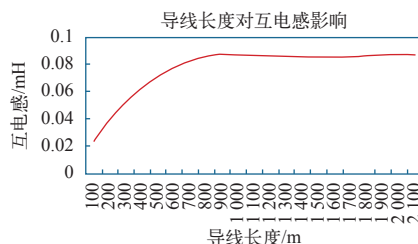


图15 互电感随导线 L_2 长度变化数据图
(两线夹角 45° , 交叉跨越点为两线端点)

于 $M = 8.6500 \times 10^{-5} \text{ H}$ 。

对于上述两种情况, 当 $L_2 < 1\,000$ m 时, L_2 在 L_1 上产生的 A 随 L_2 的增长而显著增加, 所以互电感也随之增加。以交叉跨越点为两线中点的情况为例来进行说明, 如图 16 所示。当 L_2 长度足够长时, 将 L_2 增加部分记作 L_i , L_i 在 L_1 上任意一点 a 产生的矢量磁位为 A_a , 由 L_i 引起的互电感记作 ΔM 。 L_2 越长, 则 L_i 两端点与 a 点连线和 L_2 之间的夹角 θ_1 、 θ_2 越小, 由式 (7) 可知, 当 θ_1 、 θ_2 趋近于 0 时, A 趋近于 0, 所以 ΔM 也趋近于 0, 即当 L_2 足够长时, 由 L_2 增加的

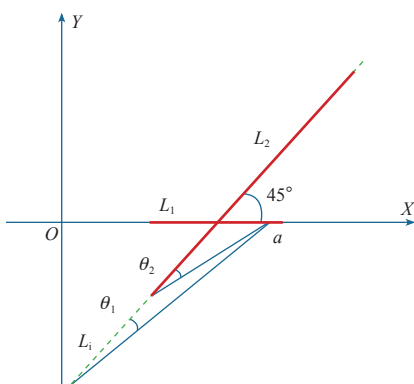


图16 矢量磁位分析图

部分对整体互电感的贡献趋近于0。当 $L_2 > 1\ 000\text{ m}$ 时,互电感增加十分微小,可以忽略不计。交叉跨越点为两线端点时的情况与上述分析同理。在一定范围内,两种情况下互电感趋于的稳定值基本相同。

2.4 两线间垂直距离对互电感的影响

L_1 长度为 $1\ 000\text{ m}$, L_2 长度为 $2\ 000\text{ m}$,两线水平夹角为 45° , L_2 中点在 $X-Y$ 平面投影与 L_1 中点重合。模型在 $X-Z$ 平面投影如图17所示。改变两线间垂直距离,计算出对应的互电感,绘成折线图如图18所示。

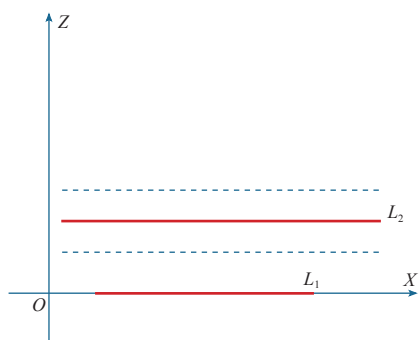


图17 两条交叉跨越通电直导线 $X-Z$ 主视图
(两线水平夹角 45° ,交叉跨越点为两线中点)

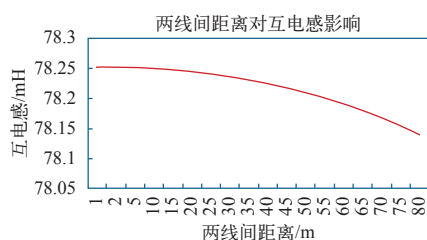


图18 互电感随两线间距离变化数据图
(两线夹角 45° ,交叉跨越点为两线中点)

从图18中可以看出,当两线间夹角和两导线长度均一定时,其互电感大小随着两线间垂直高度的增大而减小。

3 结束语

空间交叉跨越导线间互电感受两线夹角、导线长度、两线交叉跨越点位置和两线间垂直距

离的影响。本文基于回路的磁链可以用沿回路矢量磁位的环量来计算的原理,并结合线段电流在空间任一点矢量磁位的解析公式,给出了任意两个多边形回路之间互电感的计算公式。基于该公式,针对大地上方两条相互交叉的导线,计算了不同的线路长度、交叉角度、交叉跨越点位置以及垂直距离情况的导线—大地回路之间的互电感,并得出了互电感随上述因素的变化规律:①两线长度一定,线间互电感随夹角的增大而减小;②两线夹角一定,互电感值受到两根导线长度的影响,固定一根导线长度,在某一范围内,互电感随另一根导线长度的增大而增加;③当两线夹角和导线长度均一定而交叉跨越点不同时,其对应的互电感值不同,交叉跨越点越靠近导线端点,互电感值越小;④当两线夹角与两线长度均一定时,互电感随两线间垂直间距的增大而减小。因此,工程上为了减小导线间互电感,可以适当增大两线间夹角,缩短导线长度,增大两线间垂直高度,在其他同等条件下,可以适当将交叉跨越点选择在靠近两线端点处。

参考文献

- [1] 吴驰,张龙伟,朱军,等.共走廊同塔交直流输电线路电磁耦合分量的计算分析[J].中国电力,2013,58(4):43-47.
- [2] 张小林.基于矢量磁位的轴对称电流磁场求解[J].江西科学,2015,33(1):72-74.
- [3] 马跃,李国满,王少华,等.1 000 kV皖南—浙北特高压线路工频参数测试干扰及结果分析[J].中国电力,2015,60(1):87-91.
- [4] 崔鼎新,张顺福.有限长架空电力线路与通信线路之间的互感系数[J].电力技术,1982,27(1):32-37.
- [5] 柴旭峥,梁曦东,曾蝶,等.我国紧凑型输电线路的电气参数特性分析[J].电网技术,2007,51(1):16-19.

(收稿日期:2015-07-25) EA