



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105653760 B

(45)授权公告日 2019.02.05

(21)申请号 201510962713.0

(22)申请日 2015.12.17

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105653760 A

(43)申请公布日 2016.06.08

(73)专利权人 山东大学  
地址 250061 山东省济南市历下区经十路  
17923号

(72)发明人 梁军 张莹 俞志皓

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 张勇

(51)Int.Cl.  
G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 102446228 A,2012.05.09,  
CN 102930140 A,2013.02.13,  
CN 102103650 A,2011.06.22,  
牛睿等.基于故障距离区间的混联线路单  
端行波测距.《电网技术》.2015,第39卷(第1期),  
第156-163页.

审查员 陈鸣

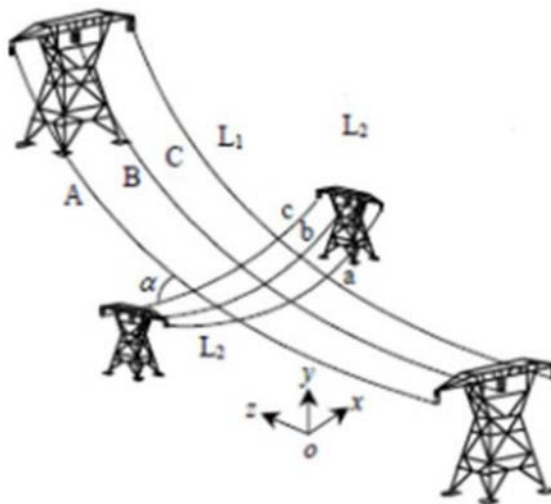
权利要求书3页 说明书18页 附图12页

(54)发明名称

考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,该方法综合考虑导体空间布置时互成角度、跨越高度、距虚拟交叉点距离等影响因素,推导了交叉跨越输电导线的分布参数三维模型通用计算公式,构造了相互耦合的通用零序电流电压方程。多组方案仿真结果表明,考虑导体空间布置的线路参数三维通用计算模型具有有效性和实用性,并可进一步将其推广到四回线乃至更多回线的参数计算中。



1. 考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,包括以下步骤:

(1) 建立交叉跨越的输电线路模型,所述交叉跨越的输电线路模型包括:下方一回线三相线路1、2、3,上方一回线三相线路4、5、6;

所述交叉跨越的输电线路模型中,将交叉跨越输电线路上的单回线竖直投影至下方单回线时,不同回线的两相之间呈 $\theta$ 角度;

(2) 采集交叉跨越输电线路的自身参数,包括:导线半径、下方单回线距离地面高度 $h_1$ 、交叉跨越输电线路互成角度 $\theta$ 以及交叉跨越输电线路间的垂直距离 $\Delta H$ ;

(3) 根据采集到的线路自身参数,分别计算自阻抗系数、同回线间的互阻抗系数以及不同回线间的互阻抗系数,并得到交叉跨越输电线路中各序阻抗参数;

(4) 计算任意一根导线的自电位系数;采用镜像电荷法考虑大地对导线四周电场分布的影响,根据导线的半径、导线与其相对于地面的镜像导线之间的距离计算同回线任意两根导线的互电位系数;

(5) 假设MN和PQ为不同回线路上的架空导线,ST和PQ为同回线路的相邻导线;做线路MN在PQ平面上的投影M'N',线路M'N'与线路PQ相交与点O',点O为线路MN上的与点O'相对应的点;设线路PQ上一点1到点O的距离为x,以x为变量计算任意两根导线沿线互电位系数;

(6) 根据计算的自电位系数和互电位系数根据相序转换得到交叉跨越线路的正序、负序和零序电容以及交叉跨越线路之间的零序互电容;

(7) 根据上述计算的线路参数,构造交叉跨越线路的通用三序电流电压方程;具体包括:

当交叉跨越线路通过正序或负序电流时,电流电压方程为均匀传输线方程;

当交叉跨越线路通过零序电流时,根据距离线路末端x位置处的零序电压增量与零序电流增量的表达式,构造零序电流电压方程组。

2. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(3)中,

同一回路中各相导线相互平行,对同回线间的任意的两根导线I、J,互阻抗系数具体为:

$$Z_{IJ} = R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{D_{IJ}};$$

其中, $R_g$ 为大地回路的单位长度等值电阻, $D_g = \frac{D_{Id}^2}{r_{sI} r_{sd}}$ 为等值地回线d的等值深度, $r_{sI}$ 、 $r_{sd}$

分别为导线I和等值地回线d的等值半径, $D_{Id}$ 为导线I与等值地回线d的等值距离; $D_{IJ}$ 为两根导线之间的距离;

不同回线间的互阻抗系数具体为:

$$Z_m = \frac{1}{9} (Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{24} + Z_{25} + Z_{26} + Z_{34} + Z_{35} + Z_{36})$$

其中, $Z_{14}$ 为回线1和回线4两相导线间的互阻抗; $Z_{15} \sim Z_{36}$ 的含义也分别为不同回线两相导线间的互阻抗。

3. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(3)中,输电线路中各回线的阻抗参数具体为:

单回线正序阻抗参数 $Z_1 = Z_s - Z_m$ ,单回线负序阻抗参数 $Z_2 = Z_s - Z_m$ ,零序阻抗参数 $Z_0 = Z_s + 2Z_m$ ;

两回线间只存在零序互阻抗 $Z_{0m} = 3Z_m$ ;

其中, $Z_s$ 为各单回线的平均自阻抗系数; $Z_m$ 为同一回线中各相导线之间的平均互阻抗系数; $Z_m'$ 为不同回线间的零序互阻抗系数。

4. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(4)中,任意一根导线的自电位系数具体为:

$$P_{II} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{II'}}{r_I}, \text{单位为km/F};$$

其中, $H_{II'}$ 为导线I与其镜像导线的距离, $r_I$ 为导线I的半径。

5. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(4)中,同回线任意两根导线I及J的互电位系数具体为:

$$P_{IJ} = P_{JI} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{IJ'}}{D_{IJ}}, \text{单位为km/F};$$

式中 $H_{IJ'}$ 为导线I与导线J的镜像导线之间的距离, $D_{IJ}$ 为导线I与导线J之间的距离。

6. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(6)中,两回线中,交叉跨越输电线路的正序、负序和零序电容具体为:

$$\text{单回线正序电容 } C_1 = \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}}; \text{ 另一单回线正序电容 } C_1' = \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}};$$

$$\text{单回线负序电容 } C_2 = \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}}; \text{ 另一单回线负序电容 } C_2' = \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}};$$

$$\text{单回线零序电容 } C_0 = \frac{1}{P_{s1} + 2P_{m1}}; \text{ 另一单回线零序电容 } C_0' = \frac{1}{P_{s2} + 2P_{m2}};$$

交叉跨越线路之间的零序互电容为:

$$C_{0m}(x) = \frac{1}{3P_{m'}(x)}$$

其中, $P_{s1}$ 、 $P_{s2}$ 分别为交叉跨越输电线路两回线中每相导线的平均自电位系数; $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$ 分别为同回线中各导线之间的平均互电位系数; $P_{m'}(x)$ 为不同回线之间平均互电位系数。

7. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,所述步骤(7)中,当交叉跨越线路通过零序电流时,构造的零序电流电压方程组具体为:

距离末端电压电流 $x$ 处的正序或负序电压电流 $\dot{V}$ 、 $\dot{I}$ 有如下关系:

$$\begin{aligned} d\dot{V} &= \dot{I}_2 z_i dx; \\ d\dot{I} &= \dot{V}_2 y_i dx \end{aligned};$$

其通解为:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Upsilon x) & Z_c \sinh(\Upsilon x) \\ \frac{\sinh(\Upsilon x)}{Z_c} & \cosh(\Upsilon x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix};$$

其中,  $Z_c = \sqrt{\frac{z_i}{y_i}}$  为线路特性阻抗,  $\Upsilon = \sqrt{z_i y_i}$  为线路传播系数,  $i=1,2$ , 代表正序或负序

电气参数;  $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_2$  为末端电压电流正序或负序量。

8. 如权利要求1所述的考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法, 其特征是, 所述步骤(7)中, 对交叉跨越输电线路零序网络, 第一回线的电压电流关系:

$$\frac{d\dot{V}_1}{dx} = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_m$$

$$\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \dot{V}_1(y_1 + y_m(x)) - \dot{V}_2 y_m(x)$$

第二回线的电压电流关系:

$$\frac{d\dot{V}_2}{dx} = \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_1 z_m$$

$$\frac{d\dot{I}_2}{dx} = \dot{V}_2(y_2 + y_m(x)) - \dot{V}_1 y_m(x)$$

其中,  $\dot{V}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_2$  分别为交叉跨越线路较低与较高回线距末端x处的零序电压、电流;  $z_m$  为零序互阻抗、 $y_m(x)$  为零序互导纳。

## 考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种考虑导体空间布置的线路分布参数三维通用计算模型设计方法。

### 背景技术

[0002] 输电线路参数是电力系统各项仿真计算的基础。随着经济的发展,走廊用地的动拆迁费用日益昂贵,输电容量的不断增大,工程实际中采用越来越多的同杆并架多回线路,以及无法避免的交叉跨越输电线路的场景越来越多。此外,超、特高压输电线路设计时,可能会遇到跨越较低电压等级送电线路的情况。平行双回线和同杆并架双回线等二维模型的参数计算及应用已经非常成熟,空间交叉跨越导线属于不平行导线结构,经典的二维分布参数计算模型不再适用,需重新考虑两回线之间的耦合效应,建立三维模型计算求解。

[0003] 新场景下交叉跨越输电线路的电磁耦合和静电感应使原有独立线路参数发生了改变,直接关系到潮流计算、继电保护、故障测距的准确性与精度,从而对工程实践有重要意义。

[0004] 输电线路流过电流会产生热量,主要体现为线路的电阻,由于大地电阻的存在,会使不同线间产生互电阻效应。线路上流过交变电流会在导线周围产生交变的磁场,从而在导线本身及相邻导线上产生电势,使线路产生自电感和互电感效应。此外,线路会产生电场,在大地和相邻线路上感应电荷,还会电离一部分周围的空气,从而和大地间产生对地电容、对地漏电导效应,与周围线路产生互电容和互电导效应。

[0005] 影响线路电感及电容的主要因素有两个,一是线路与大地间及线路间的距离,二是线路本身半径。当两回输电线路间距离较近时,两回线路的任意两相导体间电磁耦合及静电感应比较明显。

[0006] 对于交叉跨越输电导线来说,除了线间距离和线路半径,还需考虑投影至同一平面的互成角度。除此之外,线路离虚拟交叉点越远,线间距离越大,故电容大小沿线变化,不再是常数。

[0007] 现有方法中对不平衡输电线路进行一定的研究,包括:

[0008] 1、推导出了一种特殊的不平行输电线路的参数模型,将无限小的输电线路等效成平行线路,基于分布参数线路的原始物理意义来计算两根导线的分布参数。但模型中的两根导线是在同一平面内互成一定角度,属于二维模型,两根导线之间的距离沿线增大,不再均匀,当 $\theta$ 为0时,线路转化为平行输电线路。

[0009] 2、针对高压输电线路以及交叉跨越输电线路,基于模拟电荷法和毕奥-萨瓦定律,根据悬链线方程建立了输电导线的三维电磁场通用计算模型。该模型对交叉跨越输电线路这一新场景进行了初探,是确定线路最小对地高度及划定线路走廊宽度的重要依据,但并没有研究空间布置对线路参数的影响。

### 发明内容

[0010] 基于上述存在的问题,本发明提供了一种考虑导体空间布置的线路分布参数三维

计算模型设计方法,该计算模型综合考虑导体空间布置时互成角度、跨越高度、距虚拟交叉点距离等影响因素,构造了相互耦合的通用零序电流电压方程。采用simulink仿真多组方案进行对比,验证了该模型的正确性。

[0011] 为实现上述目的,本发明的具体方案如下:

[0012] 考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法,其特征是,包括以下步骤:

[0013] (1) 建立交叉跨越的输电线路模型,所述交叉跨越的输电线路模型包括:下方一回线三相线路1、2、3,上方一回线三相线路4、5、6;

[0014] 所述交叉跨越的输电线路模型中,将交叉跨越输电线路上的单回线垂直投影至下方单回线时,不同回线的两相之间呈 $\theta$ 角度;

[0015] (2) 采集交叉跨越输电线路的自身参数,包括:导线半径、下方单回线距离地面高度 $h_1$ 、交叉跨越输电线路互成角度 $\theta$ 以及交叉跨越输电线路间的垂直距离 $\Delta H$ ;

[0016] (3) 根据采集到的线路自身参数,分别计算自阻抗系数、同回线间的互阻抗系数以及不同回线间的互阻抗系数,并得到交叉跨越输电线路中各序阻抗参数;

[0017] (4) 计算任意一根导线的自电位系数;采用镜像电荷法考虑大地对导线四周电场分布的影响,根据导线的半径、导线与其相对于地面的镜像导线之间的距离计算同回线任意两根导线的互电位系数;

[0018] (5) 假设MN和PQ为不同回线路上的架空导线,ST和PQ为同回线路的相邻导线;做线路MN在PQ平面上的投影 $M'N'$ ,线路 $M'N'$ 与线路PQ相交与点 $O'$ ,点O为线路MN上的与点 $O'$ 相对应的点;设线路PQ上一点1到点O的距离为 $x$ ,以 $x$ 为变量计算任意两根导线沿线互电位系数;

[0019] (6) 根据计算的自电位系数和互电位系数根据相序转换得到交叉跨越线路的正序、负序和零序电容以及交叉跨越线路之间的零序互电容;

[0020] (7) 根据上述计算的线路参数,构造交叉跨越线路的通用三序电流电压方程;具体包括:

[0021] 当交叉跨越线路通过正序或负序电流时,电流电压方程为均匀传输线方程;

[0022] 当交叉跨越线路通过零序电流时,根据距离线路末端 $x$ 位置处的零序电压增量与零序电流增量的表达式,构造零序电流电压方程组。

[0023] 所述步骤(3)中,

[0024] 同一回路中各相导线相互平行,对同回线间的任意的两根导线I、J,互阻抗系数具体为:

$$[0025] \quad Z_{IJ} = R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{D_{IJ}};$$

[0026] 其中, $R_g$ 为大地回路的单位长度等值电阻, $D_g = \frac{D_{Id}^2}{r_{sI} r_{sd}}$ 为地中等值导线d的等值深度, $r_{sI}$ 、 $r_{sd}$ 分别为导线I和等值地线d的等值半径, $D_{Id}$ 为导线I与等值地回线d的等值距离; $D_{IJ}$ 为两根导线之间的距离;

[0027] 不同回线间的互阻抗系数具体为:

$$[0028] \quad Z_{m'} = \frac{1}{9} (Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{24} + Z_{25} + Z_{26} + Z_{34} + Z_{35} + Z_{36})$$

[0029] 其中,  $Z_{14}$  为回线1和回线4两相导线间的互阻抗;  $Z_{15} \sim Z_{36}$  的含义也分别为不同回线两相导线间的互阻抗。

[0030] 所述步骤(3)中, 输电线路中各回线的阻抗参数具体为:

[0031] 单回线正序阻抗参数  $Z_1 = Z_s - Z_m$ , 单回线负序阻抗参数  $Z_2 = Z_s - Z_m$ , 零序阻抗参数  $Z_0 = Z_s + 2Z_m$ ;

[0032] 两回线间只存在零序互阻抗  $Z_{0m} = 3Z_m'$ ;

[0033] 其中,  $Z_s$  为各单回线的平均自阻抗系数;  $Z_m$  为同一回线中各相导线之间的平均互阻抗系数;  $Z_m'$  为不同回线间的零序互阻抗系数。

[0034] 所述步骤(4)中, 任意一根导线的自电位系数具体为:

[0035]  $P_{II} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{II'}}{r_I}$ , 单位为 km/F;

[0036] 其中,  $H_{II'}$  为导线 I 与其镜像导线的距离,  $r_I$  为导线 i 的半径。

[0037] 所述步骤(4)中, 同回线任意两根导线 I 及 J 的互电位系数具体为:

[0038]  $P_{IJ} = P_{JI} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{IJ'}}{D_{IJ}}$ , 单位为 km/F;

[0039] 式中  $H_{IJ'}$  为导线 I 与导线 J 的镜像导线之间的距离,  $D_{IJ}$  为导线 I 与导线 J 之间的距离。

[0040] 所述步骤(5)中, 假设 MN 和 PQ 为不同回线路上的两根导线, ST 和 PQ 为较低回线路的相邻导线, 相距为  $s$ , 导线均平行于地面; 线路 PQ 上点 1 距  $O'$  点  $x$ , 点 1 与地下镜像点  $1'$  相距  $H_1$ ; 线路 MN 上点 2 距  $O$  点  $x$ , 点 2 与地下镜像点  $2'$  相距  $H_2$ ; 线路 ST 上点 3 距与线路 PQ 上点  $O'$  相对应的点  $O''$  点  $x$ , 点 3 与其地下镜像点  $3'$  相距  $H_3$ ; MN 在 PQ 线路上方  $\Delta H$  处,  $M'N'$  为 MN 垂直方向下投影, 且与 PQ 共平面, 交于虚拟交叉点  $O'$ , 互成角度  $\theta$ ;

[0041] 线路 PQ 和 MN 之间存在如下几何关系:

[0042]  $H_2 - H_1 = 2 \Delta H$

[0043]  $D_{1'2} = 2x \sin(\theta/2)$

[0044]  $H_{12'} = \sqrt{(H_1 + \Delta H)^2 + D_{1'2}^2}$

[0045]  $D_{12} = \sqrt{D^2 + \Delta H^2}$

[0046] 线路 ST 和 MN 之间存在如下几何关系:

[0047]  $D_{2'3} = \sqrt{x^2 + (x^2 + s^2) - 2x\sqrt{x^2 + s^2} \cos(\theta + \arctan \frac{s}{x})}$ ;

[0048]  $H_{2'3} = \sqrt{(H_1 + \Delta H)^2 + D_{2'3}^2}$ ;

[0049]  $D_{23} = \sqrt{D_{2'3}^2 + \Delta H^2}$ ;

[0050] 其中,  $D_{12}$  为点 1 到点 2 的距离;  $D_{1'2}$  为点 2 的地下镜像点  $2'$  到点 1 的距离;  $H_{12'}$  为点 1 的地下镜像点到点 2 的距离;  $D_{2'3}$  为点 2 的地下镜像点  $2'$  到点 3 的距离;  $H_{2'3}$  为点 3 的地下镜像点到点 2 的距离;  $D_{23}$  为点 2 到点 3 的距离;

[0051] 将上述参数分别带入步骤(4)中同回线任意两根导线 i 及 j 的互电位系数的计算公式, 即可求得交叉跨越输电线路的任意两根线之间的互电位系数。

[0052] 所述步骤(6)中, 两回线中, 交叉跨越输电线路的正序、负序和零序电容具体为:

[0053] 单回线正序电容  $C_1 = \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}}$  ; 另一单回线正序电容  $C_1' = \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}}$  ;

[0054] 单回线负序电容  $C_2 = \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}}$  ; 另一单回线负序电容  $C_2' = \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}}$  ;

[0055] 单回线零序电容  $C_0 = \frac{1}{P_{s1} + 2P_{m1}}$  ; 另一单回线零序电容  $C_0' = \frac{1}{P_{s2} + 2P_{m2}}$  ;

[0056] 交叉跨越线路之间的零序互电容为:

$$[0057] \quad C_{0m}(x) = \frac{1}{3P_{m'}(x)}$$

[0058] 其中,  $P_{s1}$ 、 $P_{s2}$ 分别为交叉跨越输电线路两回线中每相导线的平均自电位系数;  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$ 分别为同回线中各导线之间的平均互电位系数;  $P_{m'}(x)$ 为不同回线之间平均互电位系数。

[0059] 所述步骤(7)中,当交叉跨越线路通过零序电流时,构造的零序电流电压方程组具体为:

[0060] 距离末端电压电流x处的正序或负序电压电流  $\dot{V}$ 、 $\dot{I}$  有如下关系:

$$[0061] \quad \begin{aligned} d\dot{V} &= \dot{I}_2 z_i dx \\ d\dot{I} &= \dot{V}_2 y_i dx \end{aligned}$$

[0062] 其通解为:

$$[0063] \quad \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Upsilon x) & Z_c \sinh(\Upsilon x) \\ \frac{\sinh(\Upsilon x)}{Z_c} & \cosh(\Upsilon x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix};$$

[0064] 其中,  $Z_c = \sqrt{\frac{z_i}{y_i}}$ 为线路特性阻抗,  $\Upsilon = \sqrt{z_i y_i}$ 为线路传播系数,  $i=1,2$ ,代表正序或负

序电气参数;  $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_2$ 为末端电压电流正序或负序量。

[0065] 所述步骤(7)中,对交叉跨越输电线路零序网络,第一回线的电压电流关系:

$$[0066] \quad \frac{d\dot{V}_1}{dx} = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_m$$

$$[0067] \quad \frac{d\dot{I}_1}{dx} = \dot{V}_1(y_1 + y_m(x)) - \dot{V}_2 y_m(x)$$

[0068] 第二回线的电压电流关系:

$$[0069] \quad \frac{d\dot{V}_2}{dx} = \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_1 z_m$$

$$[0070] \quad \frac{d\dot{I}_2}{dx} = \dot{V}_2(y_2 + y_m(x)) - \dot{V}_1 y_m(x)$$

[0071] 其中,  $\dot{V}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_2$ 分别为交叉跨越线路较低与较高回线距末端x处的零序电



压、电流； $z_m$ 为零序互阻抗、 $y_m(x)$ 为零序互导纳。

[0072] 本发明的有益效果：

[0073] 本发明综合考虑导体空间布置时互成角度、跨越高度、距虚拟交叉点距离等影响因素，推导了交叉跨越输电导线的分布参数三维模型通用计算公式，构造了相互耦合的通用零序电流电压方程。多组方案仿真结果表明，考虑导体空间布置的线路参数三维通用计算模型具有有效性和实用性，并可进一步将其推广到四回线乃至更多回线的参数计算中。

#### 附图说明

[0074] 图1为交叉跨越输电导线参数三维计算模型；

[0075] 图2为交叉跨越输电导线空间布局俯视图；

[0076] 图3为交叉跨越的两根导线之间的互阻抗系数；

[0077] 图4为磁通示意图；

[0078] 图5为架空线路电容参数图；

[0079] 图6 (a) 为交叉跨越的两根输电导线的空间立体图一；

[0080] 图6 (b) 为交叉跨越的两根输电导线的空间立体图二；

[0081] 图7为相互耦合的零序分布参数模型示意图；

[0082] 图8 (a) 为交叉跨越线路较高一回线的零序电容随高度变化曲线；

[0083] 图8 (b) 为交叉跨越线路较高一回线的正负序电容随高度变化曲线；

[0084] 图9 (a) 为不同角度时零序互感与交叉跨越输电线路之间角度的关系；

[0085] 图9 (b) 为30度时零序互感与交叉跨越输电线路之间角度的关系；

[0086] 图10 (a) 为零序互感与交叉跨越输电线路之间垂直高度的关系；

[0087] 图10 (b) 为高度为10m时零序互感与交叉跨越输电线路之间垂直高度的关系；

[0088] 图11 (a) 为零序互容与跨越交叉输电线路间  $\Delta H$  的关系；

[0089] 图11 (b) 为零序互容与跨越交叉输电线路间  $\theta$  的关系；

[0090] 图11 (c) 为零序互容与跨越交叉输电线路间  $x$  的关系；

[0091] 图12 (a) 为任一回线发生故障时的单回线双端系统仿真模型；

[0092] 图12 (b) 为正常运行时的单回线双端系统仿真模型；

[0093] 图13为  $Y_{0m}$  沿线变化曲线图；

[0094] 图14为互成  $30^\circ$  的交叉跨越线路沿线电压电流幅值、相角变化曲线；

[0095] 图15为不考虑耦合的两单回线沿线电压电流幅值、相角变化曲线。

#### 具体实施方式：

[0096] 下面结合附图对本发明进行详细说明：

[0097] 本发明公开了一种考虑导体空间布置的线路分布参数三维计算模型设计方法，包括以下步骤：

[0098] (1) 建立交叉跨越的输电线路模型，为进行清晰的计算说明，标注交叉跨越的输电线路如下，下方一回线a、b、c相为1,2,3，上方一回线三相标号一次为4,5,6；

[0099] 所述交叉跨越的输电线路模型中，将交叉跨越输电线路上方的单回线竖直投影至下方单回线时，不同回线的两相之间呈  $\theta$  角度；

[0100] (2) 采集交叉跨越输电线路的自身参数,包括:导线半径、下方单回线距离地面高度 $h_1$ 、交叉跨越输电线路互成角度 $\theta$ 以及交叉跨越输电线路间的垂直距离 $\Delta H$ ;

[0101] (3) 根据采集到的线路自身参数,分别计算自阻抗系数、同回线间的互阻抗系数以及不同回线间的互阻抗系数,并得到交叉跨越输电线路中各序阻抗参数;

[0102] (4) 计算任意一根导线的自电位系数;采用镜像电荷法考虑大地对导线四周电场分布的影响,根据导线的半径、导线与其相对于地面的镜像导线之间的距离计算同回线任意两根导线的互电位系数;

[0103] (5) 假设MN和PQ为不同回线路上的架空导线,ST和PQ为同回线路的相邻导线;做线路MN在PQ平面上的投影M'N',线路M'N'与线路PQ相交与点O',点O为线路MN上的与点O'相对应的点;设线路MN上一点2到点O的距离为 $x$ ,以 $x$ 为变量计算任意两根导线沿线互电位系数;

[0104] (6) 根据计算的自电位系数和互电位系数根据相序转换得到交叉跨越线路的正序、负序和零序电容以及交叉跨越线路之间的零序互电容;

[0105] (7) 根据上述计算的线路参数,构造交叉跨越线路的通用三序电流电压方程;具体包括:

[0106] 当交叉跨越线路通过正序或负序电流时,电流电压方程为均匀传输线方程;

[0107] 当交叉跨越线路通过零序电流时,根据距离线路末端 $x$ 位置处的零序电压增量与零序电流增量的表达式,构造零序电流电压方程组。

[0108] 下面对上述方法做详细的说明。

[0109] 1. 导体空间布置对线路参数影响理论推导。

[0110] 图1、图2分别为交叉跨越输电导线参数三维计算模型和空间布局俯视图。将交叉跨越输电线路上的单回线竖直投影至下方单回线时,不同回线的两相之间呈 $\theta$ 角度。当两单回线相距较近时,将会产生电磁耦合和静电感应,使得交叉跨越输电导线的参数不能按照相互独立的单回线阻抗计算方法计算。本节将从阻抗参数和电容参数分别推导考虑导体空间布置的线路分布参数三维通用计算模型。

[0111] 1.1 阻抗参数计算

[0112] (1) 自阻抗系数和同回路间的互阻抗系数计算

[0113] 任意导线自阻抗系数的一般形式可写为:

$$[0114] \quad Z_{ii} = R_{ii} + j0.145 \lg \frac{D_g}{r_{si}} \quad (2-1)$$

[0115] 式中 $R_{ii} = R_i + R_g$ ,  $r_{si}$ 为导线 $i$ 的单位长度电阻,  $\Omega / \text{km}$ ;

[0116]  $R_g$ 为大地回路的单位长度等值电阻,根据理论分析: $R_g = \pi^2 \times 10^{-4} f = 9.869 \times 10^{-4} f$ ,在频率 $f = 50 \text{Hz}$ 的情况下,取 $R_g = 0.05 \Omega / \text{km}$ ;

[0117]  $r_{si}$ 、 $r_{sd}$ 为相应地为导线 $i$ 和等值地线 $d$ 的等值半径(已计入内电感),对非铁磁材料的圆形实心线, $r_s = 0.779r$ ,  $r$ 为导线实际半径;

[0118]  $D_g = \frac{D_{id}^2}{r_{si} r_{sd}}$ 为地中等值导线 $d$ 的等值深度,由 $D_g = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m)$ 来确定,其中 $\rho$ 为土壤

电阻率,  $\Omega \cdot m$ ,  $D_{id}$ 为导线 $i$ 与等值地回线 $d$ 的等值距离。

[0119] 采用完全换位且取各相导线半径一样时,

[0120] 平均自阻抗公式为

$$[0121] \quad Z_s = \frac{1}{3}(Z_{11} + Z_{22} + Z_{33}) = \frac{1}{3}(Z_{44} + Z_{55} + Z_{66}) = R_1 + 0.05 + j0.145 \lg \frac{D_g}{r_s} \quad (2-2)$$

[0122] 同一回路,各相导线相互平行,对任意的两根导线*i*、*j*,互阻抗系数的一般公式为:

$$[0123] \quad Z_{ij} = R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{D_{ij}} \quad (2-3)$$

[0124]  $D_{ij}$ 为两根导线之间的距离。

[0125] 由于 $D_{12}=D_{45}$ , $D_{13}=D_{46}$ , $D_{23}=D_{56}$ ,

[0126] 各相导线之间的平均互阻抗系数为:

$$[0127] \quad Z_m = \frac{1}{3}(Z_{12} + Z_{23} + Z_{13}) = \frac{1}{3}(Z_{45} + Z_{56} + Z_{46}) = R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}} \quad (2-4)$$

[0128] (2) 不同回路间互阻抗系数计算

[0129] 首先研究交叉跨越输电线路不同回线间任意两根导线的互阻抗系数。

[0130] 如图3所示,导线 $aa'$ 和 $bb'$ 互为异面直线,将 $aa'$ 向下竖直投影与导线 $bb'$ 交于 $O'$ 点,两者呈 $\theta$ 角度。两导线相距 $\Delta H$ ,将导线 $aa'$ 以角度 $\theta$ 投影将得到与导线 $bb'$ 平行的导线。

[0131] 由电磁场理论知,如图4所示的均匀磁场中,穿过面积 $A$ 的磁通为 $\Phi = BA \cos \theta$ , $\theta$ 为面积 $A$ 的方向与 $B$ 之间的夹角。则处于磁场中的一个 $N$ 匝线圈,若其各匝通过的磁通都相同,则经过该线圈的磁链为 $\Psi = N \Phi$ 。

[0132]  $Z_{ab}$ 和 $Z_{bb}$ 在大小上的差别有以下两点:

[0133] 一是 $Z_{ab}$ 中比 $Z_{bb}$ 少了 $b$ 导线的电阻 $R_b$ ;

[0134] 二是 $Z_{ab}$ 比 $Z_{bb}$ 少一部分电抗,而这一部分电抗则与 $a$ 导线和 $b$ 导线之间的磁链相对应。

[0135] 设由这两部分所构成的阻抗为 $Z_{b'b}$ ,则有

$$[0136] \quad Z'_{BB} = l \cos \theta (R_b l \cos \theta + j0.145 \lg \frac{D_{ab}}{r_{sb}}) \quad (2-3)$$

$$[0137] \quad Z'_{bb} = \frac{Z'_{BB}}{l} = \cos \theta (R_b + j0.145 \lg \frac{D_{ab}}{r_{sb}}) \quad (2-4)$$

[0138] 于是,根据上述分析可得互阻抗系数为:

$$[0139] \quad Z_{ab} = Z_{bb} - Z'_{bb} = j \cos \theta (R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{r_{sb}} - 0.145 \lg \frac{D_{ab}}{r_{sb}}) \quad (2-5)$$

[0140] 故将式(2-5)推广到不同回路位于不同位置各导线之间的互阻抗系数 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$ 、 $Z_{16}$ 等,其中,不同回路间各导线距离 $D_{14}$ 、 $D_{24}$ 、 $D_{34}$ 、 $D_{15}$ 等均为 $\Delta H$ 。

[0141] 当线路完全换位时,不同回线间的零序互阻抗系数为

$$[0142] \quad Z_{m'} = \frac{1}{9}(Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{24} + Z_{25} + Z_{26} + Z_{34} + Z_{35} + Z_{36}) \quad (2-6)$$

[0143] 对交叉跨越线路,在完全换位的情况下有:

$$[0144] \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{U}_{1b} \\ \dot{U}_{1c} \\ \dot{U}_{2a} \\ \dot{U}_{2b} \\ \dot{U}_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1a} \\ \dot{I}_{1b} \\ \dot{I}_{1c} \\ \dot{I}_{2a} \\ \dot{I}_{2b} \\ \dot{I}_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1a} \\ \dot{I}_{1b} \\ \dot{I}_{1c} \\ \dot{I}_{2a} \\ \dot{I}_{2b} \\ \dot{I}_{2c} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$[0145] \quad \text{其中分块矩阵 } A = D = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}, \quad B = C = \begin{bmatrix} Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \end{bmatrix}。$$

[0146] 为得到架空线路各序阻抗参数,将电压、电流转换到对称分量坐标系统中去,可得:

$$[0147] \quad U_{012} = S^{-1} Z_{abc} S I_{012} = Z_{012} I_{012} \quad (2-8)$$

$$[0148] \quad \text{其中,序阻抗矩阵 } Z_{012} = S^{-1} Z_{abc} S。S \text{ 为相序转换矩阵,具体如下: } S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix},$$

$$S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}。$$

[0149] 对矩阵A和D带入式(2-8)展开后得到序阻抗参数,其中单回线正序(或负序)阻抗参数 $Z_1 = Z_2 = Z_s - Z_m$ ,零序阻抗参数 $Z_0 = Z_s + 2Z_m$ 。

[0150] 对B和C进行对称分量分解如下:

$$[0151] \quad S^{-1} \begin{bmatrix} Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} 3Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

[0152] 即两回线间只存在零序互阻抗 $Z_{0m} = 3Z_m'$ 。

[0153] 1.2 电容参数计算

[0154] 当在输电线上施加交流电压时,即使线路无负载,也无泄漏电流,但仍会有充电电流流动,这是因为平行的导线恰如一个中间以空气为介质的电容器的两极板。通常线路的距离短,截面积小,且线间距离大,因此电容值很小。但对于高压远距离输电线路来讲(长度超过80km时),电容的影响显著增加,在许多场合,例如电力系统暂态过程计算中,就必须在序网中加入架空线路的容纳。

[0155] (1) 自电位系数和互电位系数计算

[0156] 如图5所示为两根架空导线a、b,在导线上分别载有电荷 $\dot{Q}_a$ 、 $\dot{Q}_b$ (单位为C/m)。采用镜像电荷法来考虑大地对导线四周电场分布的影响,导线镜像所带的电荷分别为

$-\dot{Q}_a$ 、 $-\dot{Q}_b$ ,采用以下几个假设:地是零电位的等位面;导线上的电荷均匀地分布,因而对导线外边的静电场而言,可以当作是集中在导线的轴线上;导线的电位沿线不变;导线距地的高度不变。

[0157] 对于自电位系数,以 $P_{aa}$ 为例, $P_{aa}$ 是指当导线上有单位电荷而其他导线没有电荷时导线a上应有的电位。在导线b没有电荷的情况下,电荷与对地电位之间存在如下关系:

$$[0158] \quad \dot{U}_a = P_{aa} \dot{Q}_a \quad (2-11)$$

[0159] 此时导线a和其镜像导线a'组成一单相双线路,故导线a上的电位根据电场理论可表示为:

$$[0160] \quad \dot{U}_a = \frac{\dot{Q}_a}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{aa'}}{r_a} \quad (2-12)$$

$$[0161] \quad \text{由此得到: } P_{aa} = \frac{1}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{aa'}}{r_a} \quad (2-13)$$

[0162]  $r_a$ 为导线a的半径; $H_{aa'}$ 导线a与其镜像导线之间的距离; $\zeta$ 为介质系数,已知真空中的介质常数为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$ 。

[0163] 对于任意一根导线的自电位系数的一般表示式如下:

$$[0164] \quad P_{ii} = \frac{1}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{ii'}}{r_i} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{ii'}}{r_i} \text{ km / F} \quad (2-14)$$

[0165] 互电位系数,以 $P_{ba}$ 来看,是指导线上有单位电荷而其余导线上没有电荷时导线b上应有的电位。在导线b和c没有电荷的情况下,根据互电位系数定义:

$$[0166] \quad \dot{U}_b = P_{ba} \dot{Q}_a \quad (2-15)$$

[0167] 导线a与自身镜像导线a'在导线b上产生的电位,可表示为

$$[0168] \quad \dot{U}_a = \frac{\dot{Q}_b}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{ba'}}{D_{ba}} \quad (2-16)$$

$$[0169] \quad \text{由此得到: } P_{ba} = \frac{1}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{ba'}}{D_{ba}} \quad (2-17)$$

[0170] 对于任意两根导线i及j,互电位系数的一般表示式应为:

$$[0171] \quad P_{ij} = P_{ji} = \frac{1}{2\pi\zeta} \ln \frac{H_{ij'}}{D_{ij}} = 41.45 \times 10^6 \lg \frac{H_{ij'}}{D_{ij}} \text{ km / F} \quad (2-18)$$

[0172] 式中 $H_{ij'}$ 导线i与导线j的镜像导线之间的距离, $D_{ij}$ 为导线i与导线j之间的距离。

[0173] (2) 交叉跨越输电线路的相序电容

[0174] 由互电位系数表达式(2-18)可知,由于交叉跨越输电线路之间的距离在变,一回线的对地镜像与另一回线的距离也在变化,故电位系数沿线变化,不再如平行双回线一样是常数,下面推导交叉跨越线路以线路位置x为变量的电容表达式。

[0175] 交叉跨越导线的空间立体图如图6(a)和图6(b)所示,其中MN和PQ为不同回线路上的两根架空导线,ST和PQ为同回线路的相邻导线,相距s m,导线均平行于地面。MN在PQ线路上方 $\Delta H$ 处, $M'N'$ 为MN垂直方向下的投影,且与PQ共平面,交于虚拟交叉点O',互成角度 $\theta$ 。PQ

上存在点1距0'点x km,点1与地下镜像点1'相距 $H_1$ ,0点在0'点上方 $\Delta H$ 处,点2距0点x km,点2与地下镜像点相距 $H_2$ ,点1'与点2相距 $H_{12}$ ,1、2点相距 $D_{12}$ ,点1与点2的投影点相距 $D_{12'}$ ,点2与点3的投影点相距 $D_{23'}$ 。

[0176] 如图6(a),线路PQ和MN之间存在如下几何关系:

$$[0177] \quad H_2 - H_1 = 2\Delta H \quad (2-19)$$

$$[0178] \quad D_{1'2} = 2x \sin(\theta/2) \quad (2-20)$$

$$[0179] \quad H_{12'} = \sqrt{(H_1 + \Delta H)^2 + D_{12'}^2} \quad (2-21)$$

$$[0180] \quad D_{12} = \sqrt{D^2 + \Delta H^2} \quad (2-22)$$

[0181] 如图6(b),线路ST和MN之间存在如下几何关系:

$$[0182] \quad D_{2'3} = \sqrt{x^2 + (x^2 + s^2) - 2x\sqrt{x^2 + s^2} \cos(\theta + \arctan \frac{s}{x})} \quad (2-23)$$

$$[0183] \quad H_{12'} = \sqrt{(H_1 + \Delta H)^2 + D_{2'3}^2} \quad (2-24)$$

$$[0184] \quad D_{23} = \sqrt{D_{2'3}^2 + \Delta H^2} \quad (2-25)$$

[0185] 其他相邻位置线路的几何关系也可以类似计算得到。将相应参数带入公式(2-14)以及(2-18)即可得到线路的自电位系数和交叉跨越输电线路的任意两根线之间的互电位系数公式。距虚拟交叉点距离x变化时, $H_1$ 、 $H_2$ 不变,自电位系数和同回线路互电位系数不变; $D_{12}$ 发生改变,沿线交叉跨越线路之间的互电位系数发生改变。

[0186] 导线经过完全换位(三段式),交叉跨越输电线路每相导线的平均自电位系数分别为 $P_{s1} = \frac{1}{3}(P_{11} + P_{22} + P_{33})$ 、 $P_{s2} = \frac{1}{3}(P_{44} + P_{55} + P_{66})$ ;同回线各导线之间的平均互电位系数分别为 $P_{m1} = \frac{1}{3}(P_{12} + P_{23} + P_{13})$ 、 $P_{m2} = \frac{1}{3}(P_{45} + P_{46} + P_{56})$ 。不同回线之间平均互电位系数为 $P_m(x) = \frac{1}{9}(P_{14} + P_{15} + P_{16} + P_{24} + P_{25} + P_{26} + P_{34} + P_{35} + P_{36})$ 。 $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{14}$ 等为交叉跨越线路不同位置时的自电位系数和互电位系数,线路标号见图2。

[0187] 根据麦克斯韦方程式,对交叉跨越的两单回线,各线上的电位与各导线所载电荷的关系为:

$$[0188] \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{U}_{1b} \\ \dot{U}_{1c} \\ \dot{U}_{2a} \\ \dot{U}_{2b} \\ \dot{U}_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{s1} & P_{m1} & P_{m1} & P_m & P_m & P_m \\ P_{m1} & P_{s1} & P_{m1} & P_m & P_m & P_m \\ P_{m1} & P_{m1} & P_{s1} & P_m & P_m & P_m \\ P_m & P_m & P_m & P_{s2} & P_{m2} & P_{m2} \\ P_m & P_m & P_m & P_{m2} & P_{s2} & P_{m2} \\ P_m & P_m & P_m & P_{m2} & P_{m2} & P_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_{1a} \\ \dot{Q}_{1b} \\ \dot{Q}_{1c} \\ \dot{Q}_{2a} \\ \dot{Q}_{2b} \\ \dot{Q}_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_{1a} \\ \dot{Q}_{1b} \\ \dot{Q}_{1c} \\ \dot{Q}_{2a} \\ \dot{Q}_{2b} \\ \dot{Q}_{2c} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

[0189] 其中分块矩阵

$$A = \begin{bmatrix} P_{s1} & P_{m1} & P_{m1} \\ P_{m1} & P_{s1} & P_{m1} \\ P_{m1} & P_{m1} & P_{s1} \end{bmatrix}, \quad B(x) = C(x) = \begin{bmatrix} P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \\ P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \\ P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} P_{s2} & P_{m2} & P_{m2} \\ P_{m2} & P_{s2} & P_{m2} \\ P_{m2} & P_{m2} & P_{s2} \end{bmatrix}$$

[0190] 由于两单回线距地高度不同,故电位矩阵 $A \neq D$ ;由于互电位系数与两单回线之间的距离有关, $B$ 、 $C$ 变为线路位置 $x$ 的函数,随线路位置 $x$ 变化而变化,且 $B(x) = C(x)$ 。

[0191] 单回线路的序电位参数与前面讨论的阻抗的计算方法相同,用对称分量法分别对两个系统进行解耦。将电压、电流转换到对称分量坐标系统中去,可得:

[0192]  $j\omega U_{012} = S^{-1} P S I_{012} = P_{012} I_{012}$  其中,  $P_{012} = S^{-1} P S$

[0193]  $P_{012}$ 为对称分量坐标系统中的电位系数矩阵,经展开后 $A$ 和 $D$ 分别转化为

$$\begin{bmatrix} P_{s1} + 2P_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & P_{s1} - P_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & P_{s1} - P_{m1} \end{bmatrix} \text{和} \begin{bmatrix} P_{s2} + 2P_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & P_{s2} - P_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & P_{s2} - P_{m2} \end{bmatrix}, \text{矩阵中各非对角线元}$$

素均为零,表示正、负、零序之间无耦合,相互独立。

[0194] 对 $B$ 和 $C$ 进行对称分量分解如下:

[0195]  $S^{-1} \begin{bmatrix} P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \\ P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \\ P_m(x) & P_m(x) & P_m(x) \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} 3P_m(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-27)$

[0196] 即双回线之间的耦合电容只有零序耦合电容。序电位系数矩阵中各元素的倒数即为各序电容,在线路完全换位的情况下,用公式表达如下:

[0197]

$$\begin{aligned} \text{单回线正序电容 } C_1 &= \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}} & \text{另一单回线正序电容 } C_1 &= \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}} \\ \text{单回线负序电容 } C_2 &= \frac{1}{P_{s1} - P_{m1}} & \text{另一单回线负序电容 } C_2 &= \frac{1}{P_{s2} - P_{m2}} & (2-28) \\ \text{单回线零序电容 } C_0 &= \frac{1}{P_{s1} + 2P_{m1}} & \text{另一单回线零序电容 } C_0 &= \frac{1}{P_{s2} + 2P_{m2}} \end{aligned}$$

$$\text{交叉跨越线路之间零序互电容 } C_{0m}(x) = \frac{1}{3P_m(x)}$$

[0198] 同杆并架双回线作为交叉跨越输电线路的一种特例,两回线所成角度为 $0$ ,且通过优化及合理换位,使得同一回线路各相自电感和对地导纳相等,任意两相间的互阻抗和互导纳相等,不同回线路任意两相导体间的互阻抗和互导纳相等。故同杆并架双回线各序电容由式(2-27)简化如下:

[0199] 单回线正序电容  $C_1 = \frac{1}{P_s - P_m}$  单回线负序电容  $C_2 = \frac{1}{P_s - P_m}$

[0200] 单回线零序电容  $C_0 = \frac{1}{P_s + 2P_m}$  双回线零序耦合电容  $C_{0m} = \frac{1}{3P_m}$

[0201] 2. 相互耦合的零序电流电压关系

[0202] 在完全换位的情况下, 当两线路通过正序(或负序)电流时, 由于每回线三相电流之和等于零, 因而两回线路之间的正序(或负序)的平均互阻抗系数将为零。因此, 每回线的正序阻抗与单回线零序阻抗完全相等。在线路通过零序电流时则不然, 因每回线的三相零序电流之和不为零, 两回线路之间将存在零序互阻抗, 前一节的公式推导验证了这一点。对零序互导纳也是如此。

[0203] 正序(或负序)的分布参数模型为均匀长线传输方程, 距离末端电压电流  $x$  处的电压电流  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$  可由式(3-1)计算得到, 相应的电压电流和  $Z_c$ 、 $\Upsilon$  带入正序(或负序)量即可。

$$[0204] \quad \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Upsilon x) & Z_c \sinh(\Upsilon x) \\ \frac{\sinh(\Upsilon x)}{Z_c} & \cosh(\Upsilon x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

[0205] 其中,  $Z_c = \sqrt{\frac{Z_i}{Y_i}}$  为线路特性阻抗,  $\Upsilon = \sqrt{Z_i Y_i}$  为线路传播系数,  $i=1, 2$ ,  $\dot{U}_2$ 、 $\dot{I}_2$  为末端电压电流正序(或负序)量。

[0206] 下面讨论交叉跨越输电线路含零序互阻抗和导纳的零序电流电压关系。仿照均匀长线传输方程的推导过程, 交叉跨越线路相互耦合的通用零序分布参数模型示意图如图7所示。

[0207] 根据图7的分布参数模型, 第一回线  $dx$  段的零序电压降  $d\dot{V}$  和零序电流增量  $d\dot{I}$  可表示为:

$$[0208] \quad d\dot{V}_1 = \dot{I}_1 z_1 dx + \dot{I}_2 z_m dx \quad (3-2)$$

$$d\dot{I}_1 = \dot{V}_1 (y_1 + y_m(x)) dx - \dot{V}_2 y_m(x) dx$$

$$[0209] \quad \text{即} \quad \frac{d\dot{V}_1}{dx} = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_m \quad (3-3)$$

$$\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \dot{V}_1 (y_1 + y_m(x)) - \dot{V}_2 y_m(x)$$

$$[0210] \quad \text{同理, 第二回线的电压电流关系为} \quad \begin{aligned} \frac{d\dot{V}_2}{dx} &= \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_1 z_m \\ \frac{d\dot{I}_2}{dx} &= \dot{V}_2 (y_2 + y_m(x)) - \dot{V}_1 y_m(x) \end{aligned} \quad (3-4)$$

[0211] 其中, 耦合容抗  $y_m(x)$  为距虚拟交叉点距离  $x$  的函数。该微分方程组无法直接解出形如均匀长线传输方程的表达式, 故采用龙格-库塔法来解该一阶微分方程组。

[0212] 对同杆并架双回线,  $z_1 = z_2$ ,  $y_1 = y_2$ ,  $y_m$  为定值,  $V_1 = V_2$ , 方程得到简化。当两回线无



耦合时,  $z_m, y_m$  为0, 式 (3-3) 和 (3-4) 得到简化, 其解为形如式 (3-1) 的均匀长线传输方程。

[0213] 3. 计算结果与验证

[0214] 3.1 空间布置对线路参数的影响因素分析

[0215] 给定线路自身参数, 包括导线半径、距离地面高度  $h_1$ 、交叉跨越输电线路互成角度  $\theta$  和垂直距离  $\Delta H$  等, 根据《城市电力规划规范 (GB50293-1999)》, 220kV 架空电力线路导线与地面之间最小垂直距离, 非居民区为6.5m, 同一回线水平排列相间距离为7—12m, 设置具体参数如表1所示。运用推导的计算公式可以得到输电线路的分布参数, 包括单回线正(负)序参数  $R_1, L_1, C_1$ , 单回线零序参数  $R_0, L_0, C_0$ , 交叉跨越线路互阻抗参数  $R_{0m}, L_{0m}, C_{0m}(x)$ 。

[0216] 表1 设定参数列表

[0217]

较低回线导线实际半径 $r$ (各相导线半径相等)	25mm
较高回线导线实际半径 $r$ (各相导线半径相等)	20mm
导线平均几何半径 $r'$	$r' = 0.779r$
大地回路的单位长度等值电阻 $R_g$	$0.05 \Omega / \text{km}$
较低一回线距离地面高度 $h_1$	7m
土壤电阻率 $\rho$	$2 \Omega \cdot \text{m}$
同回线相间距离 $s$ (假设两回线相同)	7m

[0218] 交叉跨越线路较高一回线的零序及正负序电容受到交叉跨越两回输电线路之间的垂直距离  $\Delta H$  的影响, 如图8 (a) 和图8 (b) 所示。

[0219] 将推导的交叉跨越线路间的零序互阻、互感、互容表达式控制变量绘制图形如图9 (a)、图9 (b) 和图10 (a)、图10 (b) 所示。

[0220] 如图9 (a)、图9 (b) 所示, 当角度固定时, 交叉跨越输电线路之间的零序互感随高度的增大而减小。当角度增大到90度时, 互感为0, 即两回线间不存在电感耦合。图10 (a)、图10 (b) 所示, 当高度固定时, 交叉跨越输电线路之间的零序互感随角度的增大而减小, 直至90° 时为0。

[0221] 从图11 (a) - (c) 可以看出, 零序互容随交叉跨越输电线路之间高度的增大而增大, 随线路所成角度的增大而增大, 随距离交叉点距离的增大而增大。当角度为90° 时, 零序互电容增加速度增快, 容抗迅速减小。

[0222] 3.2 仿真验证

[0223] 由于现有仿真软件无法搭建体现空间关系的三维输电线路模型, 故在simulink中, 首先利用两组单回线参数分别搭建两个独立的单回线仿真模型, 其中任一回线发生故障时可表示为图12 (a), 正常运行时可表示为图12 (b), 两回线均采用分布参数线路模型, 线路基本参数如表1所示。其中, 较低一回线电压等级220kV, 相角差为20°, 全长300km, 较高一回线电压等级500kV, 相角差为20°, 两者电源幅值分别为1和1.05pu, 全长300km。

[0224] 两独立单回线系统M、N两侧系统参数均为:

[0225]  $Z_{m1} = 1.2498 + j16.932 \Omega$ ,  $Z_{m0} = 6.888 + j43.139 \Omega$ ;  $Z_{n1} = 1.0415 + j14.110 \Omega$ ,  $Z_{n0} = 5.74 + j35.949 \Omega$ 。

[0226] 由表1中的原始参数按第二节线路分布参数三维通用模型计算到的较低一回线正序参数  $R_1 = 0.06 \Omega / \text{km}$ ,  $L_1 = 1.226 \text{mH} / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.009375 \mu\text{F} / \text{km}$ ; 零序参数  $R_0 = 0.21 \Omega / \text{km}$ ,  $L_0 =$

2.853mH/km,  $C_0=0.007048\mu\text{F}/\text{km}$ 。

[0227] 较高一回线正序参数 $R_1=0.06\ \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=1.271\text{mH}/\text{km}$ ,  $C_1=0.008819\mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序参数 $R_0=0.21\ \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=2.898\text{mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.005307\mu\text{F}/\text{km}$ 。

[0228] 已知同杆并架双回线单线故障比例占80%以上, 交叉跨越输电线路由于线间距离比同杆并架双回线大, 且距交叉点越远, 两回线之间距离越大, 跨线故障几率显然比同杆并架双回线要低, 故仿真验证只考虑交叉跨越线路其中一回发生单回线故障的情况。

[0229] 假设线路中点150km ( $x=0$ ) 处为交叉跨越线路的虚拟交叉点。在较低一回线路据左端150km处设置故障点A相接地故障, 故障区间为 $[0.04\text{s}, 0.08\text{s}]$ , 较高一回线正常运行, 来模拟交叉跨越线路中的单线故障。将测量得到的线路左端 ( $x=150\text{km}$ ) 处的故障后两周波的相电压电流转化为零序电压电流, 其中, 较低一回线零序电压 $U_0=-1.4135+1.3175i\ \text{kV}$ ,  $I_0=-21.7780-33.6935i\ \text{A}$ ; 较高一回线 $U_0=0\text{kV}$ ,  $I_0=0\text{A}$ , 作为相互独立的单回线初始值求解微分方程式(3-3)、(3-4)。

[0230] 由3.1节知, 交叉跨越线路距虚拟交叉点越远, 受零序耦合影响越小, 故此时的电流电压值更接近两独立的单回线的实际值, 由于前者与空间布置有关, 目前尚无法利用软件搭建模型得到, 故将距虚拟交叉点较远处的后者作为交叉输电线路左端电流电压量更具合理性。

[0231] 交叉跨越两回输电线路之间的垂直距离 $\Delta H$ 取10m。按照不同方案, 由电气参数通用计算模型计算得到的零序参数和交叉跨越线路之间的零序互阻抗和互容抗参数如表2所示。

[0232] 表2方案设置明细

[0233]

方案描述	较低一回线零序参数	较高一回线零序参数	交叉跨越线路零序互阻抗参数
------	-----------	-----------	---------------

[0234]

参考方案：不考虑耦合的两单回线	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	无
方案一：不考虑 $Y_{0m}$ 、考虑 $Z_{0m}$ 的两平行单回线 (能搭出来)	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.211\times 10^{-6}i$	$Z_{02}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0.1500+0.4874i$
方案二：不考虑 $Y_{0m}$ 、考虑 $Z_{0m}$ 、互成 30 度的两单回线	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0.1299+0.4221i$
方案三：不考虑 $Y_{0m}$ 、考虑 $Z_{0m}$ 、角度为 90 度的两单回线	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0$
方案四：考虑 $Y_{0m}$ 和 $Z_{0m}$ 的两平行单回线 ( $Y_{01}\neq Y_{02}$ )	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0.1500+0.4874i$ $Y_{0m}=1.0499\times 10^{-5}i$
方案五：考虑 $Y_{0m}$ 和 $Z_{0m}$ 、角度为 30 度的交叉跨越线路	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0.1299+0.4221i$ $Y_{0m}$ 沿线变化，如图 13 所示。
方案六：考虑 $Y_{0m}$ 和 $Z_{0m}$ 、角度为 90 度的交叉跨越线路	$Z_{01}=0.2100+0.8963i$ $Y_{01}=2.214\times 10^{-6}i$	$Z_{01}=0.2100+0.9103i$ $Y_{02}=1.667\times 10^{-6}i$	$Z_{0m}=0$ $Y_{0m}$ 沿线变化。

[0235] 注：其中单位阻抗参数单位为  $\Omega/\text{km}$ ，单位导纳参数单位为  $1/(\Omega\text{ km})$ 。

[0236] 图13表明了交叉跨越输电线路容抗参数的非线性不均匀性， $Y_{0m}$ 在虚拟交叉点从1km开始发生改变的步长越来越大，直至不再改变，在后续研究中可以等效为分段平行双回线。

[0237] 由通用分布参数模型得到各方案线路交叉点处零序电压电流如表3所示。

[0238] 表3较低一回线A相接地时交叉跨越线路电压电流计算结果

[0239]

方案	线路中点处较低一回线零序电压/ kV	线路中点处较低一回线零序电流/A	线路中点处较高一回线零序电压/ kV	线路中点处较高一回线零序电流/A
参考方案	-5.2089 +5.2296 i	-20.6848-32.5912i	0	0
方案一	-5.2085 + 5.2262i	-20.6856 -32.5904i	-1.7108 + 2.1442i	0.2711 + 0.2154i
方案二	-5.2091 + 5.2281i	-20.6855 -32.5904i	-1.4816 + 1.8569i	0.2348 + 0.1865i
方案三	-5.2112 + 5.2338i	-20.6850 -32.5902i	$(-0.1048 + 0.1313i) \times 10^{-15}$	$(0.1660 + 0.1319i) \times 10^{-16}$
方案四	-5.1104 + 5.1115i	-17.3595 -28.8468i	-1.8123 + 2.2621i	-3.0578 - 3.5305i
方案五	-4.8973 + 4.8445i	-11.3134 -22.0043i	-1.8036 + 2.2500i	-9.1464 -10.4067i
方案六	-4.6152 + 4.3327i	-8.3774 -19.2647i	-0.6083 + 0.9132i	-12.3291 -13.3393i

[0240] 方案一到方案三均不考虑耦合电容,方案三中交叉跨越角度为90度,由式(2-5)知零序互阻抗为0,即线路之间不存在任何耦合,交叉跨越线路的电气参数与两不考虑耦合的单回线无异,对比方案三和参考方案在线路交叉点处的零序电压电流,印证了这一点,从而证明了交叉跨越输电线路三维模型中零序互阻抗参数计算方法的正确性。

[0241] 由于故障种类和故障位置众多,下面给出30°交叉跨越线路发生几种经典不对称故障的计算结果,与测量得到的不考虑耦合的两单回线系统进行比较。由表3—表7可知,当交叉跨越线路中某一回线在沿线不同位置发生不对称故障时,互电阻、互电抗和互电容效应均不可忽略。

[0242] 表4较高一回线A相接地时交叉跨越线路电压电流计算结果

[0243]

方案	故障点位置	线路交叉点处较低一回线零序电压/ kV	线路交叉点处较低一回线零序电流/A	线路交叉点处较高一回线零序电压/ kV	线路交叉点处较高一回线零序电流/A

[0244]

两相互 独立的 单回线	50km	0	0	-74.589+65.030i	253.39+476.93i
	150km	0	0	-99.471+131.06i	-553.68 -654.08i
	250km	0	0	-60.968+73.971i	-307.13-393.05i
30° 交 叉跨越 线路	50km	-75.637 +83.529i	-334.71 - 433.59i	-205.48 + 179.28i	-393.30 - 889.10i
	150km	-32.552 +54.307i	-230.94 - 201.36i	-93.63 + 121.29i	-314.89 - 448.08i
	250km	-20.165 +30.851i	-130.24 - 122.73i	-57.195 + 68.427i	-172.53 - 267.47i

[0245] 表5较低一回线BC相短路时交叉跨越线路电压电流计算结果

[0246]

方案	故障 点位 置	线路交叉点处 较低一回线零 序电压/ kV	线路交叉点处较 低一回线零序电 流/A	线路交叉点处 较高一回线零 序电压/kV	线路交叉点处 较高一回线零 序电流/A
两相互 独立的 单回线	50km	-5.2083+5.2316i	-20.6740-32.5729i	0	0
	150km	-5.2055+5.2306i	-20.6834-32.5467i	0	0
	250km	-5.2101+5.2304i	-20.6778-32.5575i	0	0
30° 交叉跨 越线路	50km	-4.8896 +4.8425i	-11.3158-21.9718i	-1.8004 + 2.2488i	-9.1434 -10.3925i
	150km	-4.8897 +4.8426i	-11.3155-21.9762i	-1.8005 + 2.2489i	-9.1435 -10.3914i
	250km	-4.8928 +4.8425i	-11.3128-21.9786i	-1.8016 + 2.2490i	-9.1431 -10.4000i

[0247] 表6较高一回线BC相接地短路时交叉跨越线路电压电流计算结果

[0248]

方案	故障点位置	线路交叉点处较低一回线零序电压/ kV	线路交叉点处较低一回线零序电流/A	线路交叉点处较高一回线零序电压/kV	线路交叉点处较高一回线零序电流/A
两相互独立的	50km	0	0	56.312-42.385i	-155.46-351.94i
	150km	0	0	78.508 -89.406i	365.81+499.86i

[0249]

单回线	250km	0	0	47.095-49.254i	197.30+294.59i
30° 交叉跨越线路	50km	58.031 -	214.46 +	155.22 - 116.86i	235.10 + 653.70i
		55.476i	323.54i		
	150km	26.252 -	156.51 +	73.744 - 82.661i	203.88 + 338.62i
		37.494i	157.50i		
	250km	15.912 -	85.8844	44.162 - 45.511i	108.36 + 198.30i
		20.816i	+94.0397i		

[0250] 取表4中30°交叉跨越线路较高一回线50km处A相接地的情况,计算得到从交叉点( $x=0\text{km}$ )至线路左端( $x=150\text{km}$ )的沿线零序电压电流如图14所示,相互独立的两单回线沿线零序电压电流如图15所示。

[0251] 对比图14、15可知,成一定角度的交叉跨越线路,如果按独立的两单回线来处理,与因实际耦合情况造成的沿线电流电压相比,幅值、相角均存在明显差异。这种差异随着交叉跨越线路之间高度的缩短、角度的减小,将越来越大。故交叉跨越线路在工程实际中不能按照独立的单回线来处理,否则有可能发生保护误动、测距精度降低等一系列不良后果。

[0252] 本发明基于经典的线路参数计算公式推导了交叉跨越线路参数通用计算模型,分析了角度、相对高度、距交叉点距离对线路耦合参数的影响,构造了交叉跨越线路相互耦合时的通用零序电流电压方程。对交叉跨越输电线路来说,其零序互阻抗参数随角度、高度的增加而变小,零序互电容参数随角度、高度的增加而变大,且沿线变化,距虚拟交叉点越远,数值越大,达到一定距离后,不再变化,可等效为存在耦合的平行双回线。用多组方案进行Matlab仿真对比,验证了考虑导体空间布置的三维线路参数通用计算模型的正确性,同时发现交叉跨越线路,如果按独立的两单回线来处理,与因实际耦合情况造成的沿线电流电压相比存在差异,且差异不可忽略,从而证明了该模型的实用性。该数学模型是潮流计算、继电保护、暂态分析以及故障测距的基础,在工程实践中具有指导意义。

[0253] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

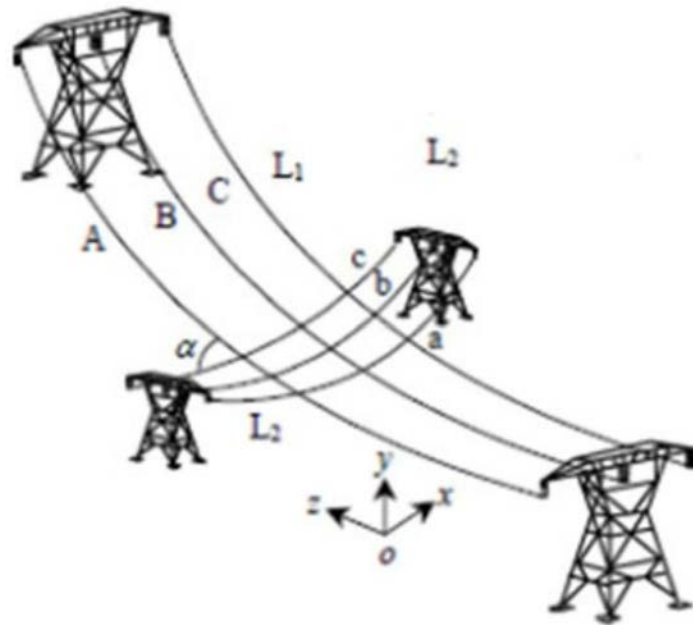


图1

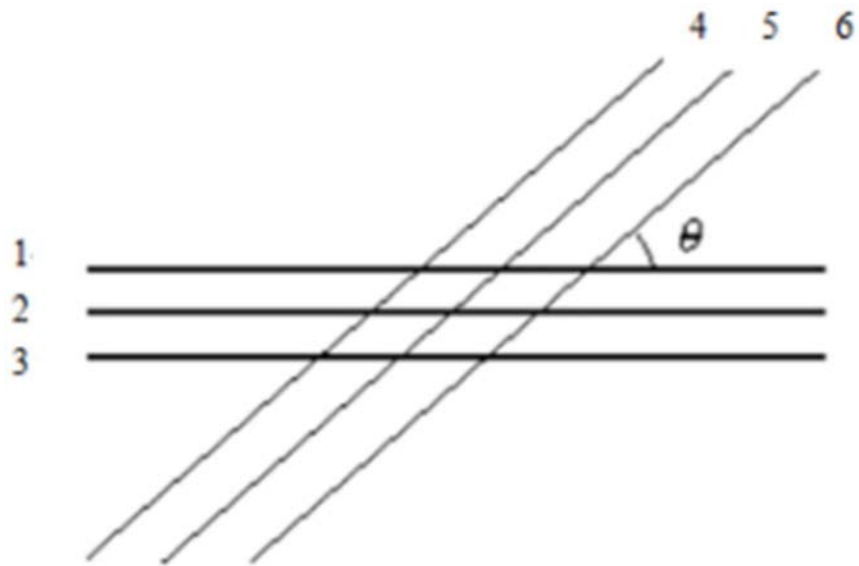


图2

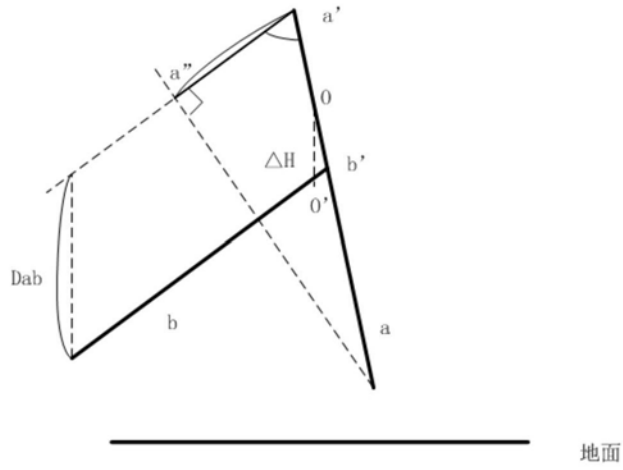


图3

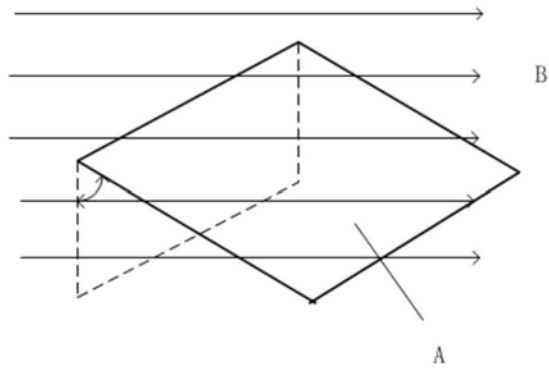


图4

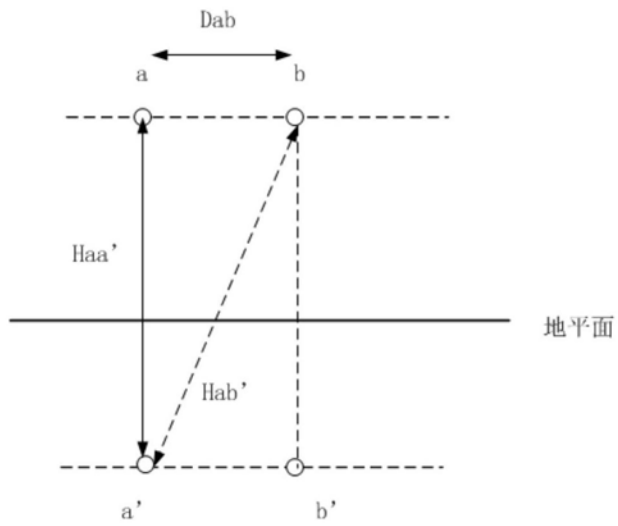


图5



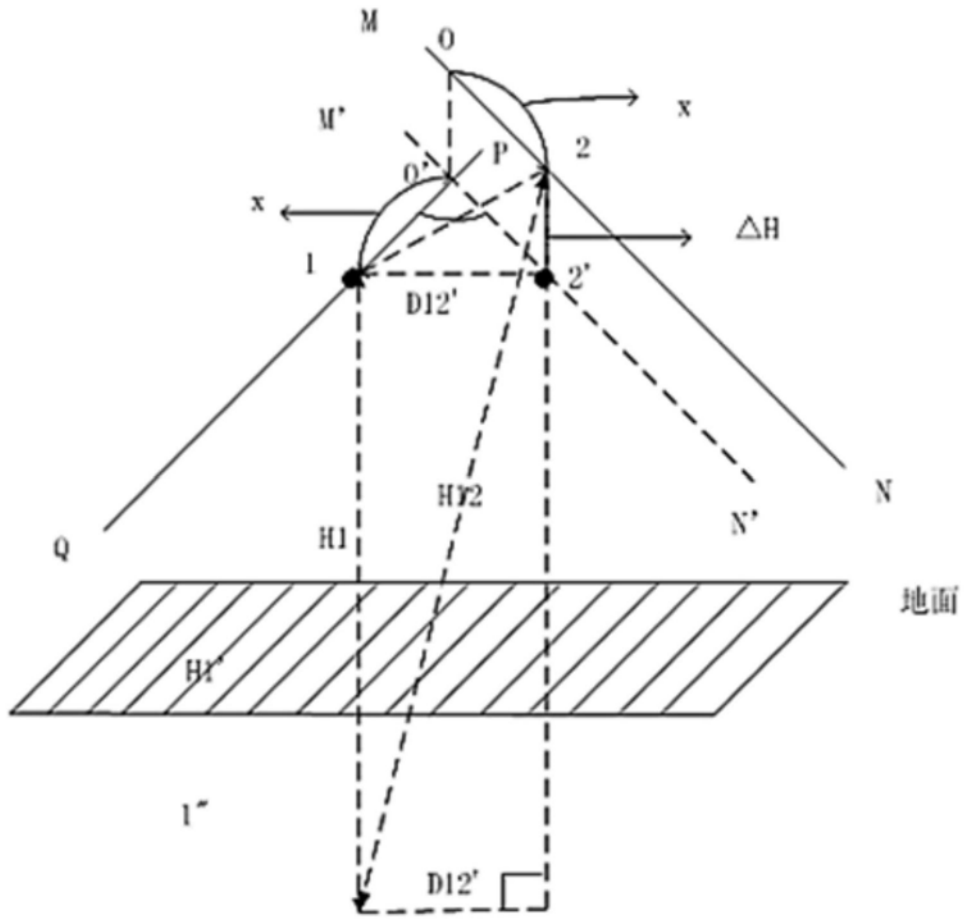


图6(a)

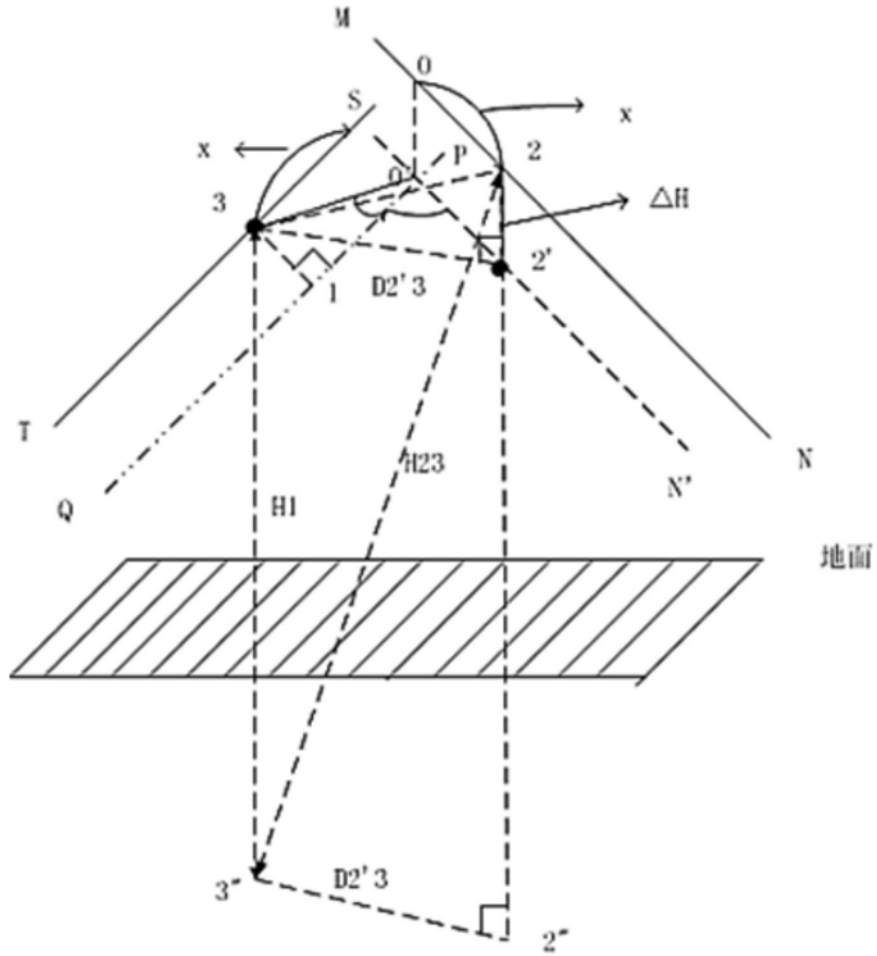


图6 (b)

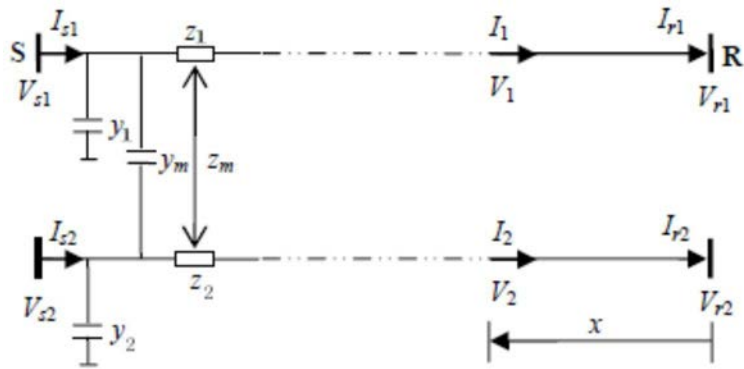


图7

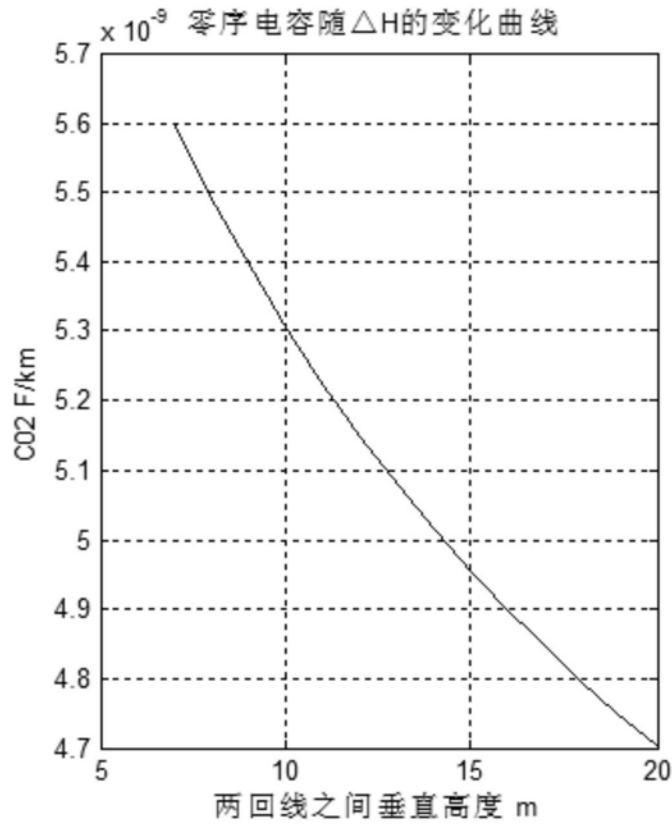


图8(a)

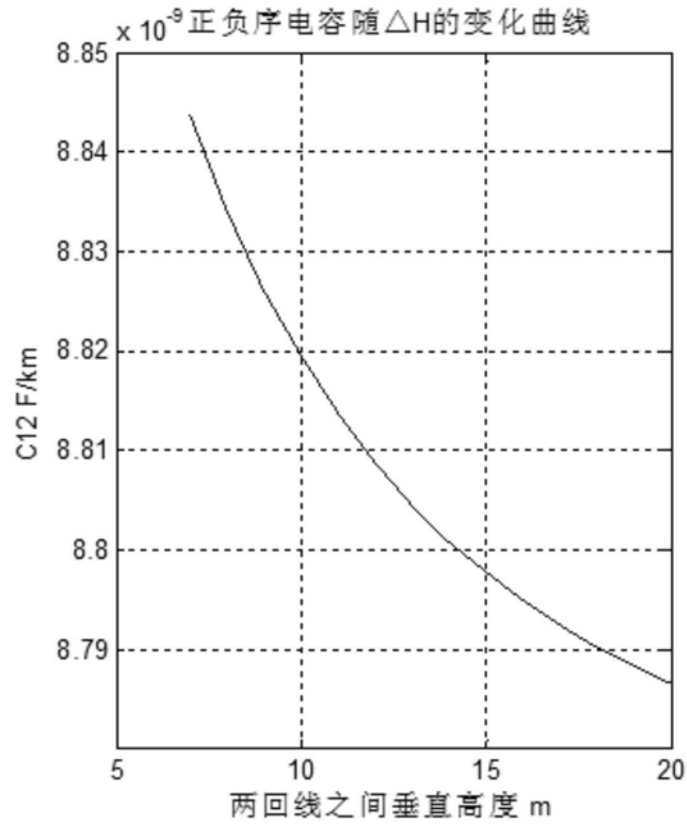


图8 (b)

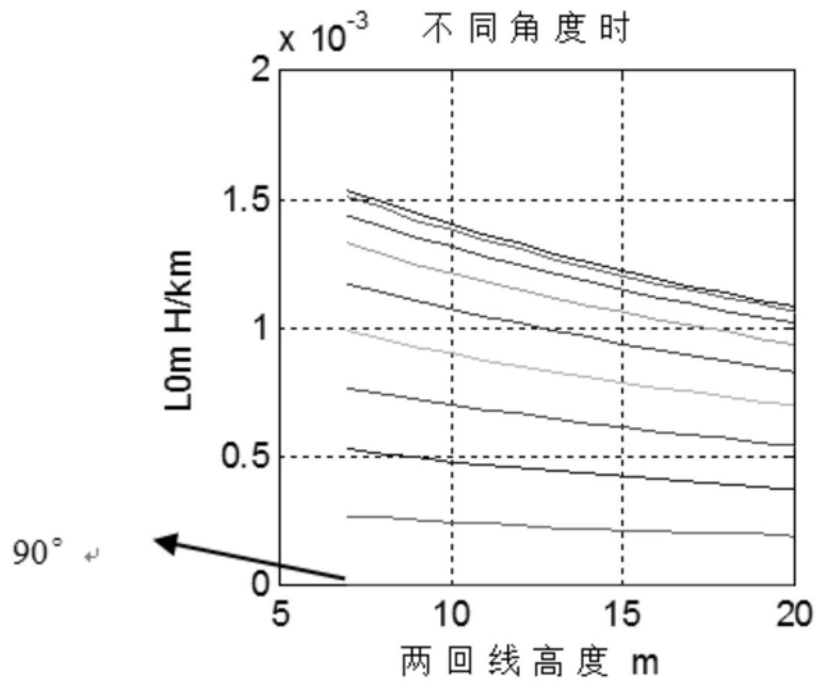


图9 (a)

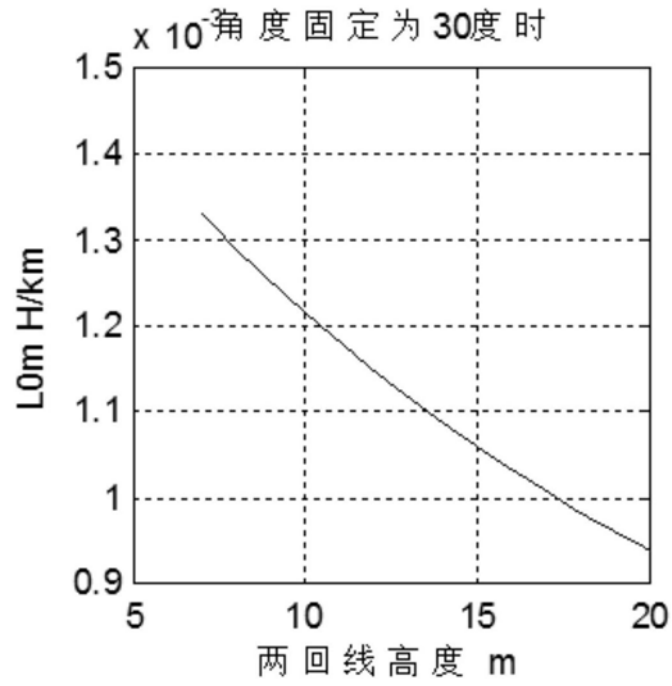


图9 (b)

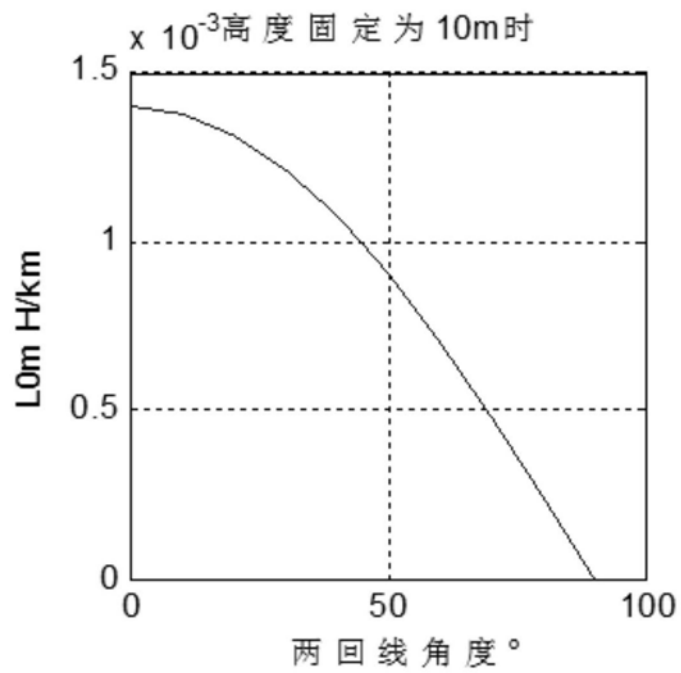


图10 (a)

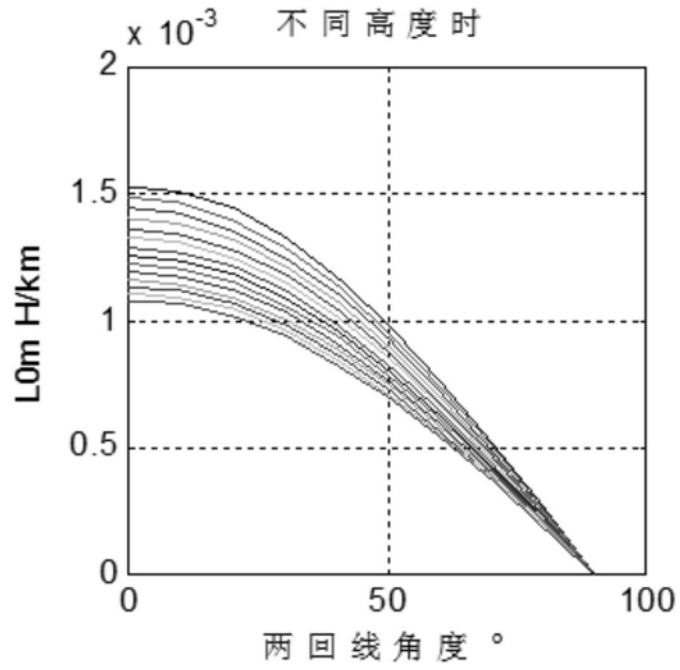


图10 (b)

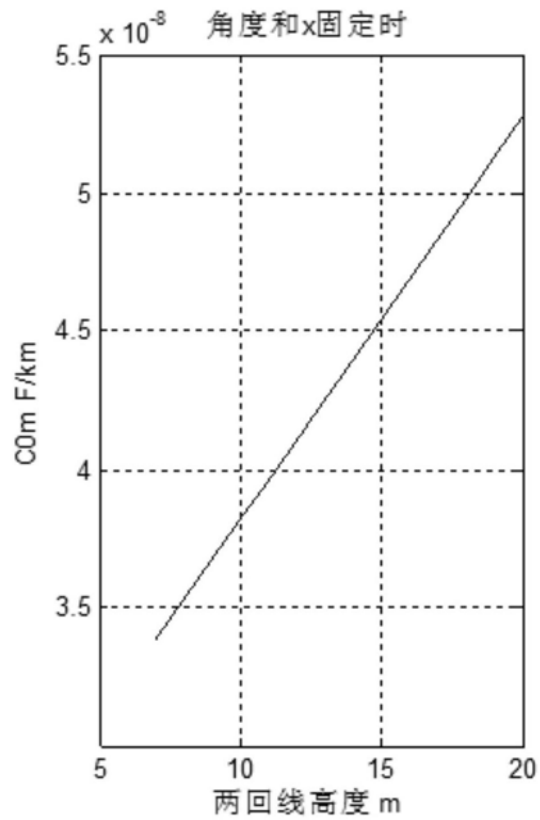


图11 (a)

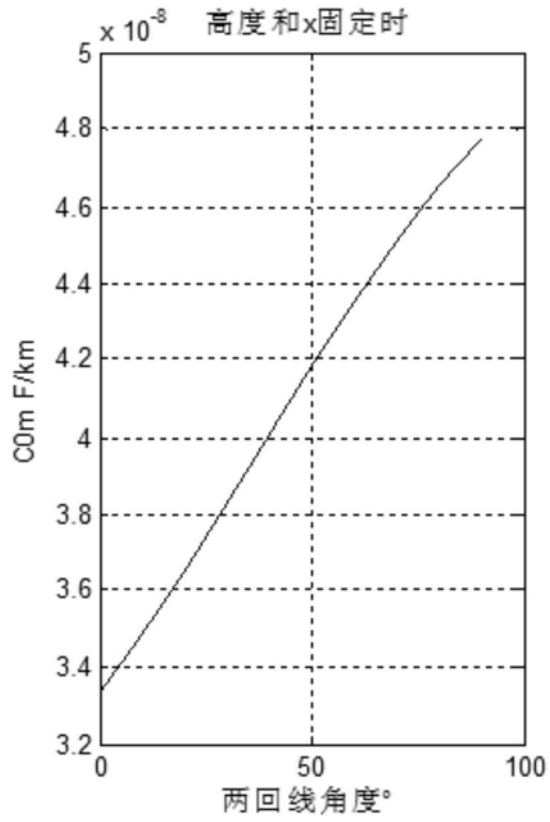


图11 (b)

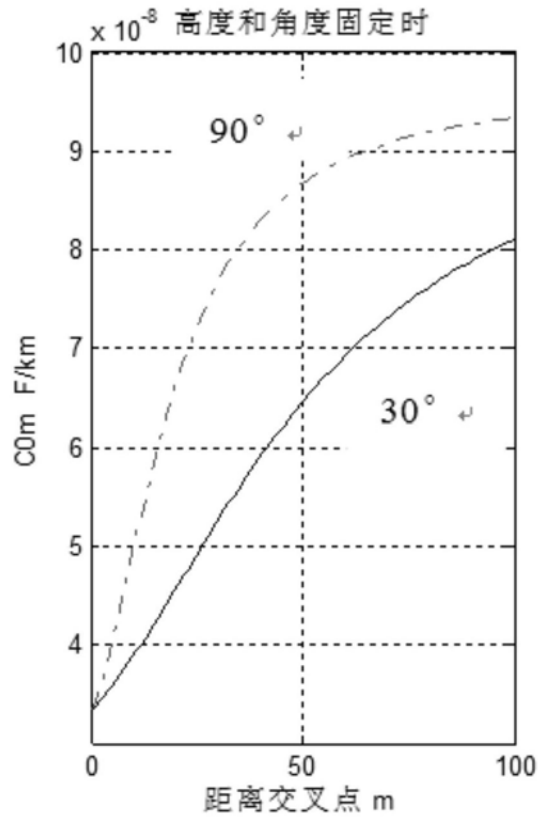


图11 (c)



图12 (a)



图12 (b)



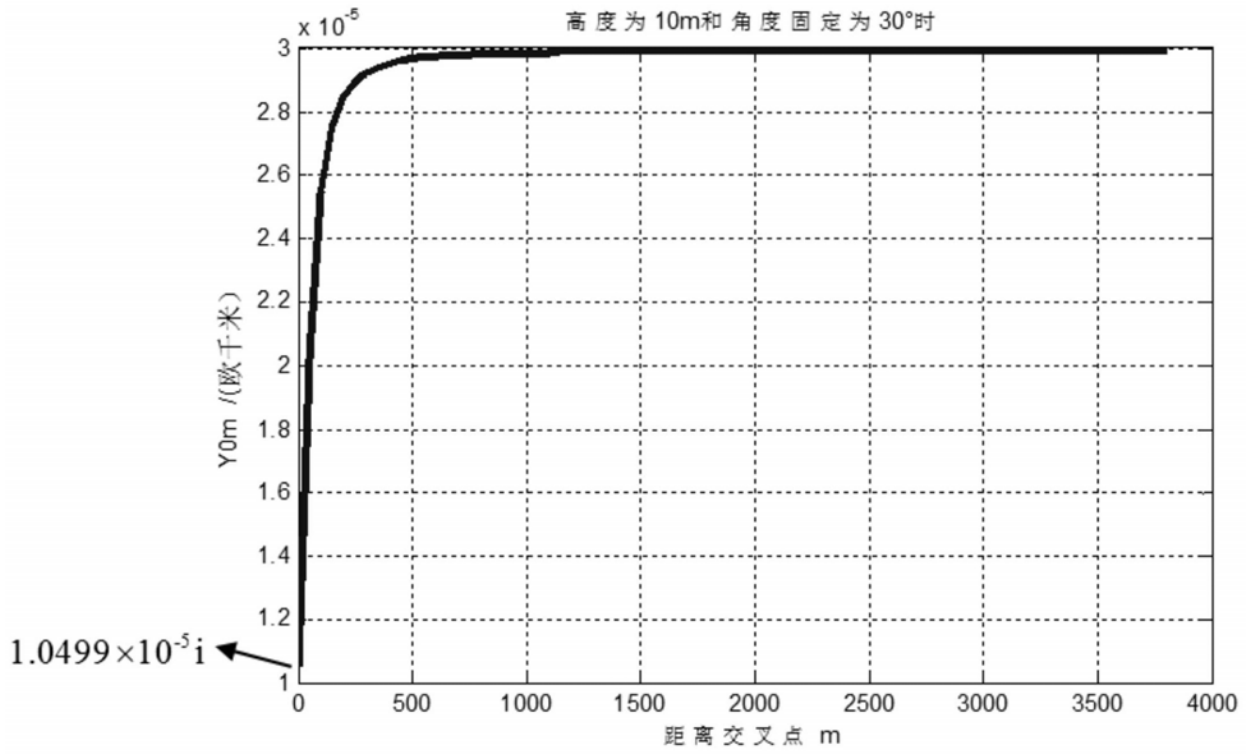


图13

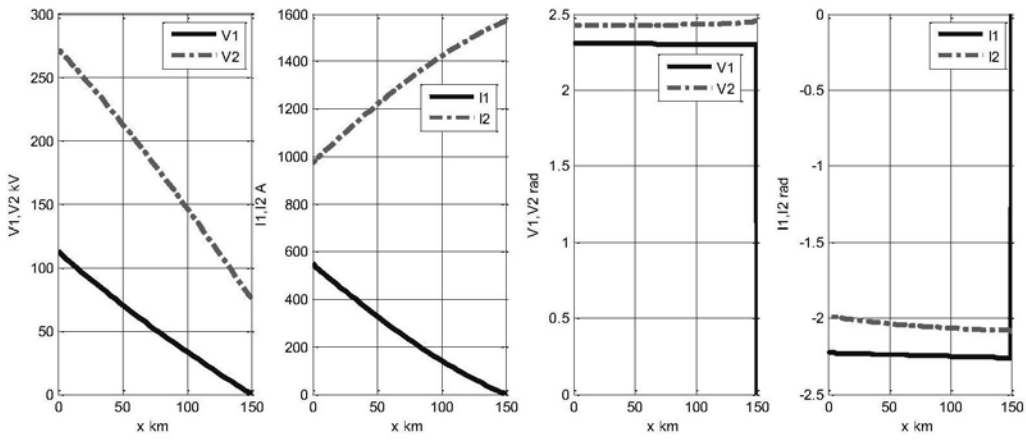


图14

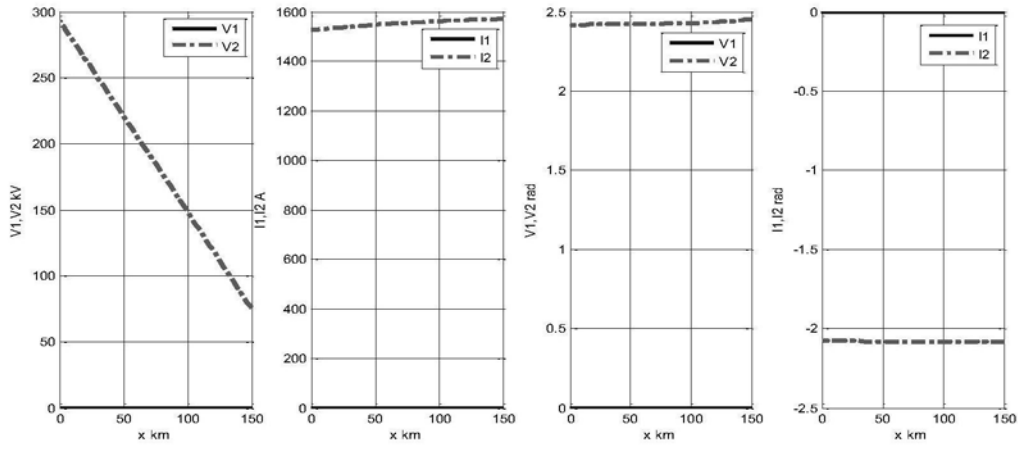


图15