A New Fault Location Scheme Based on Distribution Parameter for Four-Parallel Transmission Lines on Same Tower

XU Peng[1], **LIANG Yuansheng**[2]

1. *Power Dispatching & Communication Center of China Southern Power Grid, CSG, Guangzhou, P.R China*
2. *School of Electric Power, South China University of Technology, SCUT, Guangzhou, P.R China*

Email:63667814@qq.com, y_s_liang@126.com

Abstract: In order to make more accurate fault location for four-parallel transmission lines on same tower, based on distribution parameter modal, a fault location scheme for four-parallel transmission lines is proposed by calculating tow terminal currents. For the purpose of obtaining transmission line distribution parameters of common-vector-positive component, the information of the normal voltage and current are used to construct the transmission lines parameters adaptive frequency domain equation. Base on the relationship between the common-vector-positive component and the circulation components, a novel the frequency domain fault location scheme of four-parallel transmission lines on same tower is proposed. The four-parallel transmission lines model is constructed for simulation. And the analysis results demonstrated that the proposed fault location scheme is capable to obtain fault location accuracy preferably and not affected by the system impedance and transition resistance.

Keywords: four-parallel lines on same tower; distribution parameter; fault location

基于分布参数的同塔四回输电线路测距新原理

徐 鹏[1]，梁远升[2]

1. 中国南方电网电力调度通信中心，广东省广州市，中国，510623
2. 华南理工大学电力学院，广东省广州市，中国，510640

Email: 63667814@qq.com, y_s_liang@126.com

摘 要：为进行同塔四回线的精确故障测距，基于同塔四回输电线路的分布参数模型，提出利用输电线路双端电流的同塔四回输电线路故障测距原理。利用故障前电流和电压信息，构建基于分布参数的同塔四回输电线路同向正序观测方程以获得准确的同向正序参数，依据同向正序参数与各序环流量参数的关系构建基于各环流量的同塔四回线频域故障测距观测方程并求解故障距离。利用 ATP /EMTP 电磁暂态仿真软件，构建 500kV 同塔四回输电线路仿真模型，通过全面的仿真分析验证，仿真结果表明该测距原理测距精度高，不受系统阻抗和过渡电阻的影响。

关键词：同塔四回线；分布参数；故障测距

1 引言

同塔四回输电线路具有输送容量大、占地少、出线走廊窄可节省投资等优点，在中国的输电系统中已越来越多地被采用。2006 年世界首条 500kV 同塔四回线输电线路——利港电厂至梅里输电线路顺利启动投运，该工程在中国首次采用了全线同塔四回设计。目前，中国东北的沈大线和广东电网已建设了同塔四回路的 500 kV/220 kV 线路，110kV 及以下电压等级的同塔多回线的回路数更高[1]。

长期以来，高压输电线路的准确故障测距一直受到电网运行、管理部门和专家学者的普遍重视。故障的准确测距对于减少停电检修时间，提高电网输供电可靠性具有重大意义。同塔四回输电线路共用一个杆塔拉使得各回线之间的距离缩短，各回输电线路之间的电磁影响加强，相间和线间的充电电容加大。对于超高压线路，这些分布电容尤其不能忽略。在小电流

故障中如果不考虑分布电容的影响，将会严重影响各种计算结果的精度[3]。

目前，现有的利用双端工频量进行定位的四回线故障测距算法使用集中参数的同塔四回线模型[3-5]，该模型忽略了各回线之间分布电容的影响。当众所周知的是当线路较长时，集中参数模型对故障测距精度有较大的影响。而且对于同塔运行的四回输电线路其分布电容的影响非常明显，尤其当发生接地阻抗较大的小电流接地故障时，在分布电容上的电流之和有时大于故障时的接地电流，这时若忽略分布电容的影响，将导致结果不正确。

为此，本文提出了一种基于分布参数的双端同塔四回输电线路故障测距原理。首先对同塔四回线的电压与电流信息进行解耦化处理，利用故障前电压和电流信息构建基于分布参数的线路频域方程以求解准确的线路参数，其次构建基于各序环流量的故障测距观测方程，从而提出了一种同塔四回线的双端故障测距新算法。利用ATP/EMTP构建同塔四回输电线路模型，通过大量仿真分析，验证本文所提故障测距方法的正确性。

2 同塔四回输电线路解耦化方法

同塔四回线输电线路简化系统如图 1 所示，图中 d 为故障点距 M 侧母线的距离。

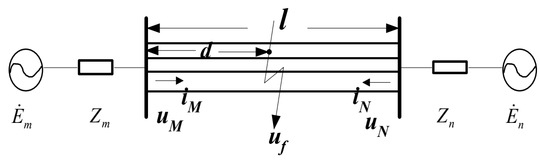

Figure.1 The simplified system of four-parallel transmission lines on same tower

图 1. 同塔四回线简化系统图

设同塔四回线模型中，Z_S 为各回线每相的自阻抗，Z_M 为各回线相间的互阻抗，Z_{X1} 和 Z_{X2} 分别为相邻回线的线间阻抗和非相邻回线的线间阻抗。若当同塔四回线的参数对称时，可以将四回线的电流电压分解为同向量（以下标 e 表示）和环流量（以下标 f、g、h 表示），并进一步的分解为 12 序分量，表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_{e,f,g,h} = T\dot{U}_{I,II,III,IV} \\ \dot{I}_{e,f,g,h} = T\dot{I}_{I,II,III,IV} \end{cases} \tag{1}$$

$$\dot{U}_{I,II,III,IV} = [\dot{U}_{IA},\dot{U}_{IB},\dot{U}_{IC},\dot{U}_{IIA},\dot{U}_{IIB},\dot{U}_{IIC},\dot{U}_{IIIA},\dot{U}_{IIIB},\dot{U}_{IIIC},\dot{U}_{IVA},\dot{U}_{IVB},\dot{U}_{IVC}]^T$$

$$\dot{I}_{I,II,III,IV} = [\dot{I}_{IA},\dot{I}_{IB},\dot{I}_{IC},\dot{I}_{IIA},\dot{I}_{IIB},\dot{I}_{IIC},\dot{I}_{IIIA},\dot{I}_{IIIB},\dot{I}_{IIIC},\dot{I}_{IVA},\dot{I}_{IVB},\dot{I}_{IVC}]^T$$

$$\dot{U}_{e,f,g,h} = [\dot{U}_{e0},\dot{U}_{f0},\dot{U}_{g0},\dot{U}_{h0},\dot{U}_{e1}\dot{U}_{f1},\dot{U}_{g1},\dot{U}_{h1},\dot{U}_{e2},\dot{U}_{f2},\dot{U}_{g2},\dot{U}_{h2}]^T$$

$$\dot{I}_{e,f,g,h} = [\dot{I}_{e0},\dot{I}_{f0},\dot{I}_{g0},\dot{I}_{h0},\dot{I}_{e1},\dot{I}_{f1},\dot{I}_{g1},\dot{I}_{h1},\dot{I}_{e2},\dot{I}_{f2},\dot{I}_{g2},\dot{I}_{h2}]^T$$

$$T=\frac{1}{12}\begin{bmatrix} 1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1\\ 1&1&1&j&j&j&-1&-1&-1&-j&-j&-j\\ 1&1&1&-1&-1&-1&1&1&1&-1&-1&-1\\ 1&1&1&-j&-j&-j&-1&-1&-1&j&j&j\\ 1&a&a^2&1&a&a^2&1&a&a^2&1&a&a^2\\ 1&a&a^2&j&ja&ja^2&-1&-a&-a^2&-j&-ja&-ja^2\\ 1&a&a^2&-1&-a&-a^2&1&a&a^2&-1&-a&-a^2\\ 1&a&a^2&-j&-ja&-ja^2&-1&-a&-a^2&j&ja&ja^2\\ 1&a^2&a&1&a^2&a&1&a^2&a&1&a^2&a\\ 1&a^2&a&j&ja^2&ja&-1&-a^2&-a&-j&-ja^2&-ja\\ 1&a^2&a&-1&-a^2&-a&1&a^2&a&-1&-a^2&-a\\ 1&a^2&a&-j&-ja^2&-ja&-1&-a^2&-a&j&ja^2&ja \end{bmatrix}$$

式中：$\dot{U}_{I,II,III,IV}$ 为同塔四回线相电压分量，$\dot{I}_{I,II,III,IV}$ 为同塔四回线相电流分量；$\dot{U}_{e,f,g,h}$ 为同塔四回线序电压分量，$\dot{I}_{e,f,g,h}$ 为同塔四回线序电流分量；e_0，e_1，e_2 分别为同向量的零、正、负序分量，f_0，f_1，f_2，g_0，g_1，,g_2，h_0，h_1，h_2 分别为各序环流量的零、正、负序分量；$a = e^{j120}$。

同塔四回输电线路的 12 序分量序网图如图 2 所示。图中 Z_{Me0}，Z_{Me1}，Z_{Me2}，Z_{Mf0}，Z_{Mf1}，Z_{Mf2}，Z_{Mg0}，Z_{Mg1}，Z_{Mg2}，Z_{Mh0}，Z_{Mh1}，Z_{Mh2} 分别为 M 侧至故障点各序阻抗；Z_{Ne0}，Z_{Ne1}，Z_{Ne2}，Z_{Nf0}，Z_{Nf1}，Z_{Nf2}，Z_{Ng0}，Z_{Ng1}，Z_{Ng2}，Z_{Nh0}，Z_{Nh1}，Z_{Nh2} 分别为 N 侧至故障点各序阻抗；Z_{MS0}，Z_{MS1}，Z_{MS2} 分别为 M 侧系统各序阻抗；Z_{NS0}，Z_{NS1}，Z_{NS2} 分别为 N 侧系统各序阻抗；$\dot{U}_{F,e0}$，$\dot{U}_{F,e1}$，$\dot{U}_{F,e2}$，$\dot{U}_{F,f0}$，$\dot{U}_{F,f1}$，$\dot{U}_{F,f2}$，$\dot{U}_{F,g0}$，$\dot{U}_{F,g1}$，$\dot{U}_{F,g2}$，$\dot{U}_{F,h0}$，$\dot{U}_{F,h1}$，$\dot{U}_{F,h2}$ 分别为故障点等效的各序附加电源。

依据对如图 2 各序分量的分析，e 序分量为同向量，其序电流除了流经同塔四回线，还流经线路外系统；f、g、h 序分量为环流量，其序电流只流经线路而不流经外系统，发生故障时同塔四回线的负荷电流对环流量没有影响。

3 基于分布参数的双端同塔四回线测距原理

由于同塔四回线发生对称型跨线故障时环流量电流为零且单回线对称故障时同向负序和零序量为零，而对于任何类型的故障同向正序电流电压总存在，因此适用于任何故障类型和消除负荷的影响采用同向正序故障分量作为计算量。

利用同塔四回线故障前两端的正常稳态运行电压和电流冗余信息，利用全波傅氏算法提取各回线各相

的工频电压和电流相量，然后采用同塔四回线解耦分析方法对电压和电流相分量进行解耦处理，提取同向正序故障分量电压和电流，基于长线方程，可得从 M 端的 e_1 序电压和电流相量 $\dot{U}^{e_1}_{NormalM}$、$\dot{I}^{e_1}_{NormalM}$ 推算至 N 端的 e_1 序电压相量 $\dot{U}^{e_1}_{NormalN}$ 为：

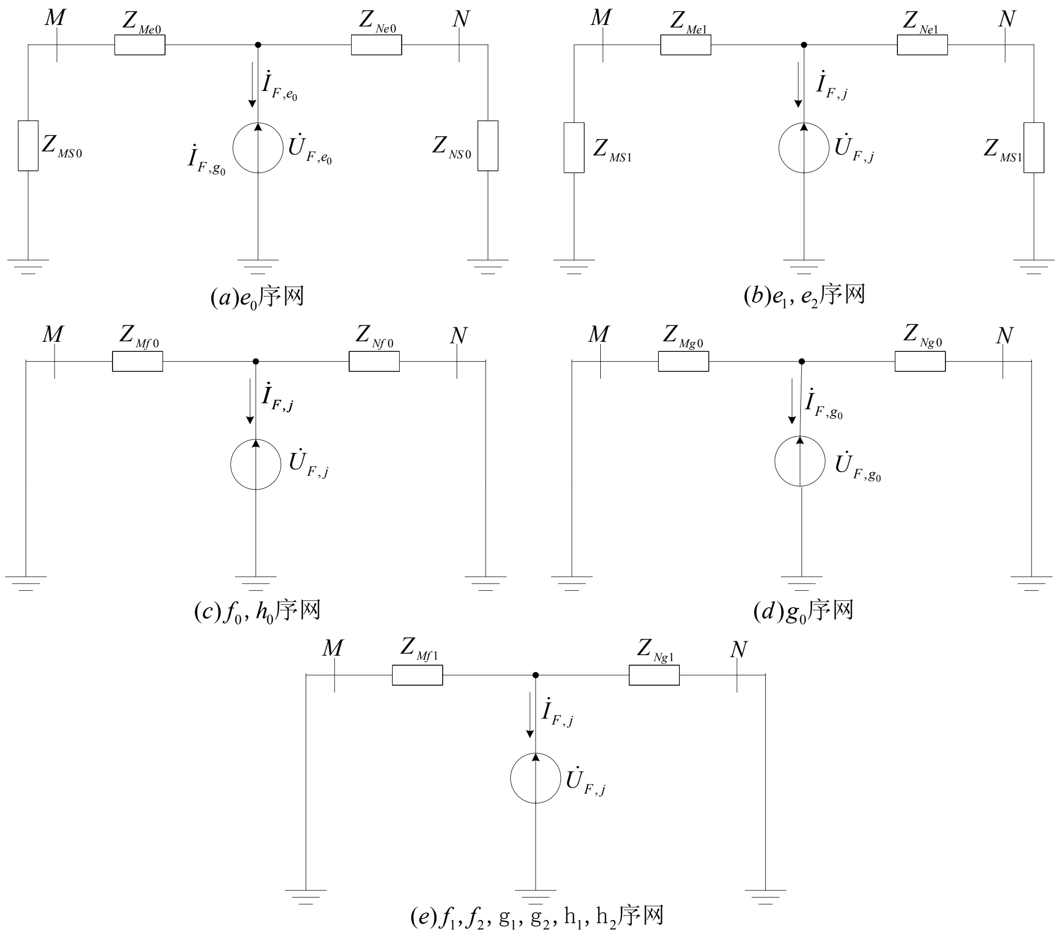

Figure.2 The twelve-sequence component equivalent networks of four-parallel transmission lines on same tower.
图 2. 同塔四回线 12 序等效序网图.

$$\dot{U}^{e_1}_{Normal.N}=\dot{U}^{e_1}_{Normal.M}\operatorname{ch}(\gamma^{e_1}l)-\dot{I}^{e_1}_{Normal.M}Z^{e_1}_{C}\operatorname{sh}(\gamma^{e_1}l) \quad (2)$$

类似地，从 N 端的 e_1 序电压和电流相量 $\dot{U}^{e_1}_{NormalN}$、$\dot{I}^{e_1}_{NormalN}$ 推算至 M 端的 e_1 序电压相量 $\dot{U}^{e_1}_{NormalM}$ 为：

$$\dot{U}^{e_1}_{Normal.M}=\dot{U}^{e_1}_{Normal.N}\operatorname{ch}(\gamma^{e_1}l)-\dot{I}^{e_1}_{Normal.N}Z^{e_1}_{C}\operatorname{sh}(\gamma^{e_1}l) \quad (3)$$

分别取式(2)和式(3)的实部与虚部，构建含 $\gamma^{e_1}_{real}$、$\gamma^{e_1}_{imag}$、$Z^{e_1}_{C.real}$ 和 $Z^{e_1}_{C.imag}$ 为待观测量的线路分布参数观测方程：

$$\begin{cases} real[f^{e_1}_{Adaption.M}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})]=0 \\ real[f^{e_1}_{Adaption.N}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})]=0 \\ imag[f^{e_1}_{Adaption.M}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})]=0 \\ imag[f^{e_1}_{Adaption.N}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})]=0 \end{cases} \quad (4)$$

式中：

$$f^{e_1}_{Adaption.M}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})=$$
$$\dot{U}^{e_1}_{Normal.M}\operatorname{ch}(\gamma^{e_1}l)-\dot{I}^{e_1}_{Normal.M}Z^{e_1}_{C}\operatorname{sh}(\gamma^{e_1}l)-\dot{U}^{e_1}_{Normal.N}$$
$$f^{e_1}_{Adaption.N}(\gamma^{e_1}_{real},\gamma^{e_1}_{imag},Z^{e_1}_{C.real},Z^{e_1}_{C.imag})=$$
$$\dot{U}^{e_1}_{Normal.N}\operatorname{ch}(\gamma^{e_1}l)-\dot{I}^{e_1}_{Normal.N}Z^{e_1}_{C}\operatorname{sh}(\gamma^{e_1}l)-\dot{U}^{e_1}_{Normal.M}$$

式(4)的线路分布参数观测方程的待观测量个数为 4，方程数为 4，满足方程求解的要求，故可采用最小二乘法求解方程(4)中待观测量 $\gamma^{e_1}_{real}$、$\gamma^{e_1}_{imag}$、$Z^{e_1}_{C.real}$ 和 $Z^{e_1}_{C.imag}$。

通过求解方程(4)即可获取同塔四回输电线路的 e_1 序分布参数，即为 f、g、h 环流量的正序和负序参数。

利用 f_1，f_2，g_1，g_2，h_1 和 h_2 序分量构建故障测距频域观测方程。

$$\begin{cases} 0-\dot{I}_M^{f_1}Z_C^{f_1}sh(\gamma^{f_1}d^{e1})=0-\dot{I}_N^{f_1}Z_C^{f_1}sh[\gamma^{f_1}(l-d^{e1})] \\ 0-\dot{I}_M^{f_2}Z_C^{f_2}sh(\gamma^{f_2}d^{e2})=0-\dot{I}_N^{f_2}Z_C^{f_2}sh[\gamma^{f_2}(l-d^{e2})] \\ 0-\dot{I}_M^{g_1}Z_C^{g_1}sh(\gamma^{g_1}d^{f1})=0-\dot{I}_N^{g_1}Z_C^{g_1}sh[\gamma^{g_1}(l-d^{f1})] \\ 0-\dot{I}_M^{g_2}Z_C^{g_2}sh(\gamma^{g_2}d^{f2})=0-\dot{I}_N^{g_2}Z_C^{g_2}sh[\gamma^{g_2}(l-d^{f2})] \\ 0-\dot{I}_M^{h_1}Z_C^{h_1}sh(\gamma^{h_1}d^{h1})=0-\dot{I}_N^{h_1}Z_C^{h_1}sh[\gamma^{h_1}(l-d^{h1})] \\ 0-\dot{I}_M^{h_2}Z_C^{h_2}sh(\gamma^{h_2}d^{h2})=0-\dot{I}_N^{h_2}Z_C^{h_2}sh[\gamma^{h_2}(l-d^{h2})] \end{cases} \quad (5)$$

对于式(5)可得到不同的解：

$$\begin{cases} d^{f1}=\dfrac{1}{\gamma^{f1}}ath\dfrac{I_N^{f1}sh(\gamma^{f1}l)}{I_M^{f1}+I_N^{f1}ch(\gamma^{f1}l)} \\ d^{f2}=\dfrac{1}{\gamma^{f2}}ath\dfrac{I_N^{f2}sh(\gamma^{f2}l)}{I_M^{f2}+I_N^{f2}ch(\gamma^{f2}l)} \\ d^{g1}=\dfrac{1}{\gamma^{g1}}ath\dfrac{I_N^{g1}sh(\gamma^{g1}l)}{I_M^{g1}+I_N^{g1}ch(\gamma^{g1}l)} \\ d^{g2}=\dfrac{1}{\gamma^{g2}}ath\dfrac{I_N^{g2}sh(\gamma^{g2}l)}{I_M^{g2}+I_N^{g2}ch(\gamma^{g2}l)} \\ d^{h1}=\dfrac{1}{\gamma^{h1}}ath\dfrac{I_N^{h1}sh(\gamma^{h1}l)}{I_M^{h1}+I_N^{h1}ch(\gamma^{h1}l)} \\ d^{h2}=\dfrac{1}{\gamma^{h2}}ath\dfrac{I_N^{h2}sh(\gamma^{h2}l)}{I_M^{h2}+I_N^{h2}ch(\gamma^{h2}l)} \end{cases} \quad (6)$$

求平均值，得故障距离 d：

$$d=\frac{d^{f1}+d^{f2}+d^{g1}+d^{g2}+d^{h1}+d^{h2}}{6} \quad (7)$$

需指出的是本文中的同塔四回输电线路若发生同名相跨线故障时，该算法失效。因为此时同塔四回线中的各序环流量为 0。但同塔四回线的同塔四回线同名相跨线故障类型只有 11 种，只占总故障类型的 0.13%，因此本文所提测距算法适用于大多数故障类型。

4 故障测距原理的仿真验证

为了检验本文所提方法的正确性和有效性，本文采用 ATP/EMTP 对进行了仿真验证。 M 端系统参数为：相电源 E_M=288.63kV ∠ -4.5°，系统自阻抗 Z_{SM}=j59.345Ω,系统互阻抗 Z_{MM}=j4.363Ω；N 端系统阻抗参数为：相电源 E_N=288.63kV∠0°，系统自阻抗 Z_{SN}=j67.256Ω,系统互阻抗 Z_{MN}=j7.259Ω。

表 1 列出了线路不同位置不同类型金属性短路的故障测距结果。表 1 中，IAG 表示 I 回线 A 相接地故障，IIBG 表示 II 回线 B 相接地故障，IBCG 表示 I 回线 B 和 C 相接地故障，其余类推。

由表 1 可得，在金属性故障情况下，故障测距的最大相对误差为 0.09%，可见本文所提测距方法具有较高的精度。

Table.1 Fault location results under metallic faults.
表 1 金属性故障测距仿真结果.

故障类型		故障距离	故障类型	本文方法 测距结果/km	绝对误差/km	相对误差/%
单回线故障	单相接地	5	IIAG	4.9964	-0.0036	0.072%
		20	IIICG	19.9853	-0.0147	0.074%
		40	IVCG	40.0215	0.0215	0.054%
		60	ICG	60.0431	0.0431	0.072%
	相间故障	5	IVAB	5.0042	0.0042	0.084%
		20	IIIBCG	19.9931	-0.0069	0.035%
		40	IVCAG	40.0158	0.0158	0.039%
跨线故障	双线故障	5	IBIICG	5.0039	0.0039	0.078%
		20	IIAIIIBCG	19.9859	-0.0141	0.070%
		40	IIIABIVBC	39.9942	-0.0058	0.015%
		60	IAIVABC	60.0138	0.0138	0.023%
	三线故障	5	IAIIBIIICG	4.9958	-0.0042	0.084%
		20	IIBCIIIAIVCG	19.9821	-0.0179	0.090%
		40	IBCIICAIVAB	40.0148	0.0148	0.037%
		60	IABCIIICIVBC	59.9836	-0.0164	0.027%
	四线故障	5	IAIIBIIICIVBG	4.9971	-0.0029	0.058%
		20	IBCIIAIIICIVABCG	19.9825	-0.0175	0.087%
		40	IABCIICIIICAIVA	40.0146	0.0146	0.037%
		60	ICIIACIIIBIVABC	60.0258	0.0258	0.043%

由于发生短路故障时通常在故障处具有过渡电阻，因此本文还进行了具有过渡电阻的故障仿真分析验证。设接地电阻为 150Ω，相间电阻为 10Ω，其测距结果列于表 2。

由表 2 可见，当线路发生非金属性故障时，本文所提测距方法的最大相对误差为 0.372%。可见，过渡电阻对本文所提故障测距方法的影响很小，该方法具有很好的耐受过渡电阻能力。

5 结论

(1)本文所提同塔四回线故障测距方法采用分布参数，解决了在发生接地电阻大的小电流接地故障时，由于同塔四回线对地分布电容导致测距值偏大的问题，提高了测距精度。

(2)提出的基于分布参数的同塔四回线线路参数自

978-1-935068-17-4 © 2010 SciRes.

适应原理，消除线路参数不确定性，从而满足了故障测距的高精度要求。

表 2 具有过渡电阻条件下测距仿真结果.
Table.2 Fault location results with fault resistance.

故障类型		故障距离	故障类型	本文方法		
				测距结果 /km	绝对误差 /km	相对误差 /%
单回线故障	单相接地	5	IIAG	4.9843	-0.0157	0.314%
		20	IIIBG	20.0235	0.0235	0.117%
		40	IVCG	40.0415	0.0415	0.104%
		60	ICG	59.9369	-0.0631	0.105%
	相间故障	5	IVAB	5.0127	0.0127	0.254%
		20	IIIBCG	19.9832	-0.0168	0.084%
		40	IVCAG	39.8527	-0.1473	0.368%
跨线故障	双线故障	5	IBIICG	5.0142	0.0142	0.284%
		20	IIAIIIBCG	20.0184	0.0184	0.092%
		40	IIIABIVBC	39.9736	-0.0264	0.066%
		60	IAIVABC	60.0524	0.0524	0.087%
	三线故障	5	IAIIBIIICG	5.0164	0.0164	0.328%
		20	IIBCIIIAIVCG	19.9736	-0.0264	0.132%
		40	IBCIICAIVAB	40.0325	0.0325	0.081%
		60	IABCIIICIVBC	60.0462	0.0462	0.077%
	四线故障	5	IAIIBIIICIVBG	4.9814	-0.0186	0.372%
		20	IBCIIAIIICIVABCG	19.9764	-0.0236	0.118%
		40	IABCIICIIICAIVA	39.9672	-0.0328	0.082%
		60	ICIIACIIIBIVABC	60.0468	0.0468	0.078%

（3）以 500kV 同塔四回输电线路模型进行了仿真验证，结果表明本文测距方法的正确性。

References (参考文献)

[1] WEI Gang, XUE Min, Investigation the four-circuit transmission lines erected on the same pole, Electric Power Construction, 1999, (3), P4-8. (Ch).
韦钢，薛敏，同杆并架 4 回输电电路的探讨，电力建设[J]，1999，(3)，P4-8.

[2] Chen Kunwei, Huang Shou meng, Song Liqun, Fault analysis of distributed parameter of transmission line and relay performance, Proceeding of the EPSA, 1995, 7(1), P38-47. (Ch).
陈琨薇，黄守盟，宋丽群，输电线路分布参数的故障分析与继电保护动作特性[J]，电力系统及其自动化学报，1995，7(1)，P38-47.

[3] TIAN Yu, FAN Chunju, GONG Zhendong, Twelve-sequence Component Method of Four-parallel Lines on Same Tower, Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21), P35-39. (Ch).
田羽，范春菊，龚震东，同杆 4 回线 12 序分量法，电力系统及其自动化[J]，2007，31(21)，P35-39.

[4] GONG Zhen-dong, FAN Chun-ju, TIAN Yu, A fault location algorithm suitable for jointed four transmission lines [J], Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23), P70-73. (Ch).
龚震东，范春菊，田羽，一种适合于同杆 4 回线的故障测距方法[J]，电力系统自动化，2007，31(23)，P70-73.

[5] REN Ming-zhu1, TAI Neng-ling, YUAN Cheng, XIONG Chao-ying, A New Fault Location Algorithm for Jointed Four Transmission Lines Based on Single-ended Data[J], Journal of Shanghai Jiao tong University, 2009, 43(8), P1228-1232 (Ch).
任明珠，邰能灵，袁成，熊超英，基于单端量的同塔并架 4 回线路故障测距方法[J]，上海交通大学学报，2009，43(8)，P1228-1232.