

一种能反应高阻接地故障的微机 距离保护算法

华中理工大学 张 哲

摘要: 本文从故障测距的角度出发,分析了常规接地距离保护的测距性能,并将精确故障测距算法—解方程算法引入距离保护,仿真计算表明,该算法较常规 I_0 极化方式相比承受过渡电阻的能力有显著提高,可在微机距离保护中采用。

关键词 距离保护 故障测距 仿真计算

一 前言

输电线路发生接地故障时,过渡电阻的存在将对保护的動作性能产生不利影响,特别是对于超高压远距离输电线路保护,这种影响更为显著。产生上述现象的主要原因从测距的角度来说是由于在经过电阻短路时,常规接地距离继电器的“测距”存在一定误差,不能正确反应实际故障距离。当过渡电阻达到一定数值时测距误差的增大将使得保护发生误动或拒动。为了提高接地距离继电器承受过渡电阻的能力,一种基本途径是改善接地距离继电器的测距性能,实现故障距离的精确测量。本文首先从测距的角度对常规接地距离继电器的動作性能进行了分析,并对目前采用的精确故障测距算法故障电流相位修正阻抗法^[1]进行了讨论。由此出发,导出了更适宜在接地距离保护中使用的算法—解方程算法。仿真计算表明,上述算法承受过渡电阻的能力较常规接地距离继电器相比有显著的提高,可在微机距离保护中采用。

二 几种常规接地距离继电器测距性能分析

1. 经过电阻接地时的故障距离测量

对图1所示系统,设f点A相经过电阻 R_f 接地,图2为其零序等值网络。M侧测量电压为:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{m0} &= \dot{I}_0 \cdot l \cdot Z_{l0} + 3R_f \cdot \dot{I}_f \\ &= \dot{U}_{f0} + \dot{U}_f\end{aligned}\quad (1)$$

测量阻抗为:

$$Z_m = l \cdot Z_{l1} + \dot{I}_{f0} \cdot 3R_f / \dot{I}_a$$

$$= l \cdot Z_{l1} + A \cdot e^{j\theta} \quad (2)$$

式中:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{m1} + 3K \dot{I}_{m0} \quad K = (Z_{f0} + Z_{l1}) / 3 \cdot Z_{l1}$$

$$A = 3R_f |\dot{I}_{f0}| / |\dot{I}_a| \quad \theta = \arg \dot{I}_{f0} - \arg \dot{I}_a$$

Z_{l0} 、 Z_{l1} 分别为输电线单位长度的零序和正序阻抗。

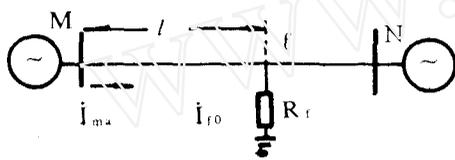


图1 系统接线图

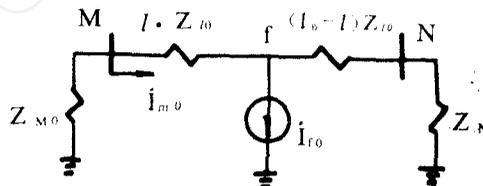


图2 零序网络图

将向量方程(2)展成实、虚部表示形式有:

$$x_m = l \cdot x_{l1} + A \sin \theta \quad (3)$$

$$R_m = l \cdot R_{l1} + A \cos \theta \quad (4)$$

在上述两方程中有三个未知量 l 、 A 、 θ , 因此, 必须补充其它约束条件才能求出故障距离 l 。由于 A 是 R_f 、 I_{f0} 的函数, 一般情况下难以给出有关 A 的约束方程。因而, 在实际保护方案中通常补充有关 l 与 θ 的约束条件, 以求出故障距离 l 。根据所给定的约束条件的不同, 相应有不同的测距方法, 从而构成不同的保护方式。

2. 常规接地距离继电器的测距性能。

根据方程(3)(4)不难求得实际故障距离为:

$$l = (x_m - R_m \cdot \text{tg} \theta) / (x_{l1} - R_{l1} \cdot \text{tg} \theta) \quad (5)$$

测距值 l 对应于图3中的线段 \overline{os} (图中 \overline{ps} 与 \dot{I}_{f0} 平行)。由于在实际故障条件下 θ 角未知, 因此, 一般只给出有关 θ 角的近似约束条件, 从而得到精度不同的近似测距算法。

a. 电抗型阻抗继电器

在所有近似测距算法中, 最简单的形式是令 $\theta = 0$, 由式(5)有测距值:

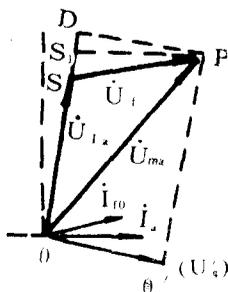


图3

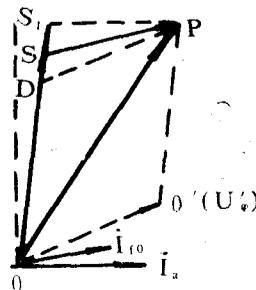


图4

$$l_1 = x_m / x_{11} \quad ;$$

l_1 对应图 3 中的线段 $\overline{os_1}$ ($\overline{s_1p}$ 与 \dot{I}_1 平行。)

若设保护整定距离为 l_{z1} (图 3 \overline{OD} 中), 则当 $l < l_{z1}$ 时, 必有 \overline{OD} 滞后 \dot{I}_1 (\overline{OD} 与 \overline{DP} 平行)。即补偿电压:

$$\dot{U}'_0 = \dot{U}_{m1} - l_{z1} \cdot z_{11} \cdot \dot{I}_1 \quad (\dot{U}'_0 = \overline{OD}')$$

滞后电流 \dot{I}_1 。同理, 若 $l_1 > l_{z1}$, 则有补偿电压 U' 超前 \dot{I}_1 , 如图 4 所示。因此, 以电流 \dot{I}_1 作为极化量构成的电抗型阻抗继电器, 其保护性能从测距的角度来说等同于近似假设 \dot{I}_{12} 与 \dot{I}_1 同相, 即:

$$\theta = \theta_1 = \arg \dot{I}_{12} - \arg \dot{I}_1 = 0$$

然后利用测距方程 (5) 求解故障距离 l_1 , 通过比较 l_1 与整定距离 l_{z1} 的大小来决定保护是否动作。由于在实际故障情况下, 一般 \dot{I}_{12} 与 \dot{I}_1 不同相, 因此, 电抗型阻抗继电器的测距值 l_1 与实际故障距离 l 不同, 从而造成保护的超越或缩范围。当 \dot{I}_{12} 超前 \dot{I}_1 时, 有 $l_1 > l$ (图 3 中 $\overline{os_1} > \overline{os}$), 将发生缩范围。反之, 若 \dot{I}_{12} 滞后 \dot{I}_1 , 有 $l_1 < l$, 保护将发生超越。

b. 接地方向距离继电器

对于接地方向继电器, 设其动作区如图 5 所示。图中, 极化电压 \dot{U} 选择为与动作边界平行, 即: $\dot{U}_f = \dot{U}_0 \angle -90^\circ$, \dot{U}_0 为故障相电压。

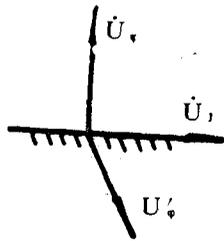


图 5

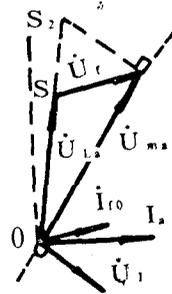


图 6 $\overline{os} \rightarrow l$, $\overline{os_2} \rightarrow l_2$

上述方向距离继电器的保护性能与电抗型继电器一样, 也可从测距的角度来加以描述。只是对于接地方向距离继电器其等值的测距条件为近似假设 \dot{I}_{12} 与极化电压 \dot{U} 同相 (\dot{I}_{12} 滞后测量电压 90°), 即假设:

$$\arg \dot{I}_{12} = \arg \dot{U}_{m1} - \pi/2$$

$$\theta = \theta_2 = \arg \dot{I}_{12} - \arg \dot{I}_1$$

$$= (\arg \dot{U}_{m1} - \pi/2) - \arg \dot{I}_1$$

相应的测距值为:

$$l_2 = (x_m - R_m \operatorname{tg} \theta_2) / (x_{l1} - R_{l1} \operatorname{tg} \theta_2)$$

然后通过比较 l_2 与 l_{zd} 的大小决定保护是否动作。由于在一般故障条件下,故障点零序电流 \dot{I}_{f0} 超前极化电压 \dot{U}_f ,并且两者之间的差角较大,因此,接地方向距离继电器的测距值 l_2 偏大($l_2 > l$)易造成严重的缩范围,如图6所示。此外,若实际 \dot{I}_{f0} 滞后 \dot{U}_f ,有 $l_2 < l$,保护将发生超越误动。

C. I_0 极化方式距离继电器。

对于以 \dot{I}_0 极化方式构成的距离继电器,其动作区见图7,极化量为,

$$\dot{I}_f = 3 \dot{I}_{f0} \angle -\gamma$$

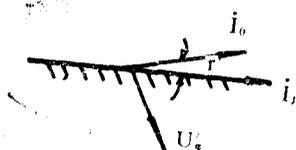


图 7

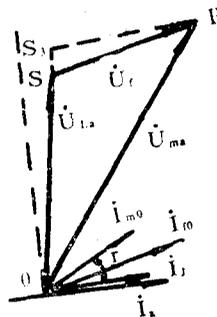


图 8

从测距的角度看,等同于设:

$$\arg \dot{I}_{f0} = \arg \dot{I}_{m0} - \gamma$$

即: $\theta = \theta_3 = \arg \dot{I}_{m0} - \gamma - \arg \dot{I}_f$

测距值为:

$$l_3 = (x_m - R_m \operatorname{tg} \theta_3) / (x_{l1} - R_{l1} \operatorname{tg} \theta_3)$$

由矢量图8不难看出,为了防止保护超越误动必须使得测距值 l_3 ($\overline{OS_3}$) 不小于实际故障距离 l (\overline{OS}),即要求所选择的极化量 \dot{I}_f 滞后故障点零序电流 \dot{I}_{f0} 。而在一般情况下,故障点越靠近对侧母线, \dot{I}_{m0} 超前 \dot{I}_{f0} 的角度越大,因此,为保证任何点故障时不发生超越误动,下偏角应选择为不小于对侧母线故障时测量端零序电流 \dot{I}_{m0} 与故障点零序电流 \dot{I}_{f0} 之间的差角。

接地距离继电器的动作特性除能从测距的角度加以描述外,也可以从其在阻抗平面上动作边界的变化来加以说明。当正向故障时,对于测距算式(5),满足动作条件 $l < l_{zd}$ 的等值动作区见图9所示。对于电抗型继电器由于设 $\theta = \theta_1 = 0$,故其动作边界为水平线,且固定不变。而其它两种继电器 θ 角分别为 θ_2 和 θ_3 。由于在不同的故障情况下, θ_2 、 θ_3 的数值不同,因此,后两种继电器的动作边界将随故障条件的不同而变化,动作边

界情况见图10。由上所述不难看出，文献〔2〕中提出的采用阻抗继电器动作边界的自适应调整来提高承受过渡电阻的能力，其动作性能实质上与常规 I_0 极化方式相同。

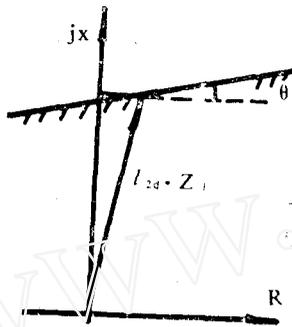


图9

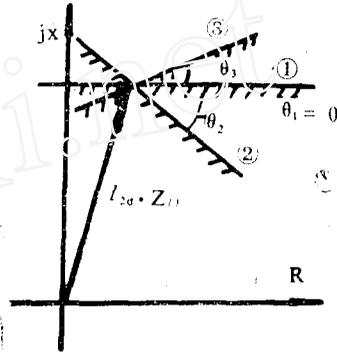


图10 ①电抗型 ②接地方向 ③ I_0 极化

在上述几种接地距离继电器中，由于 I_0 极化方式以假设条件， $\arg \dot{I}_{f0} = \arg \dot{I}_{m0} - \gamma$ 为基准，而在一般情况下， \dot{I}_{f0} 与 \dot{I}_{m0} 的相位差不大，因此，其测距值较其它两种方式更准确，承受过渡电阻的能力更强。 I_0 极化方式存在的主要问题是防止保护发生超越误动，下偏角 γ 需从最严重情况考虑，当线路较长时，下偏角的数值可能较大，从而使保护承受过渡电阻的能力显著降低。因此，对于超高压远距离输电线路，需采取措施改善保护装置的测距性能，以提高反映高阻接地故障的能力。

三 能反应高阻接地故障的距离保护算法

要提高距离保护承受过渡电阻的能力，从测距的角度来说即要求其在经过渡电阻短路时测距准确。由测距算式(5)可知，若已知角 θ ，则测距计算可完全不受接地电阻的影响。

因为： $\theta = \arg \dot{I}_{f0} - \arg \dot{I}_a$

令： $\alpha = \arg \dot{I}_{f0} - \arg \dot{I}_{m0}$ ； $\beta = \arg \dot{I}_{m0} - \arg \dot{I}_a$

则有： $\theta = \alpha + \beta$

由于在故障条件下 β 角是可测量，因此，要实现准确测距则要求已知角 α 。 α 角反映的是故障点零序电流与测量端零序电流之间的相位差，它由系统零序网络参数决定。由零序网络图2有：

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{x_{m0} + l_0 \cdot x_{l0} + x_{n0}}{R_{m0} + l_0 \cdot R_{l0} + R_{n0}} - \text{tg}^{-1} \frac{(l_0 - l) x_{l0} + x_{n0}}{(l_0 - l) R_{l0} + R_{n0}} \quad (6)$$

因而从理论上来说，在已知系统零序网络参数的条件下，通过相应的测距计算可准确求出实际故障距离而不受接地电阻的影响。

1. 故障电流相位修正阻抗法

在文献〔1〕中提出，当已知系统零序参数时可通过有限次迭代修正计算来求解实际

故障距离,并且该算法的测距精度对零序参数的不准确性不敏感⁽⁹⁾。算法的迭代公式为:

$$\left. \begin{aligned} l(k) &= \frac{U_{m0}}{I_a} \cdot \frac{1}{|z_{11}|} \cdot \frac{\sin[\theta_3 - \alpha(k-1)]}{\sin[\theta_4 + \alpha(k-1)]} \\ \alpha(k) &= \text{tg}^{-1} \frac{x_{m0} + l_0 \cdot x_{l0} + x_{n0}}{R_{m0} + l_0 \cdot R_{l0} + R_{n0}} - \text{tg}^{-1} \frac{[l_0 - l(k)] x_{l0} + x_{n0}}{[l_0 - l(k)] R_{l0} + R_{n0}} \\ \alpha(0) &= 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

然而进一步的分析研究表明,上述算法在原理上存在一定缺陷,在某些情况下不能保证最终测距结果的正确有效。

根据电压测量方程(1)有矢量图11,由正弦定律有:

$$l = \frac{U_{m0}}{I_a} \cdot \frac{1}{|z_{11}|} \cdot \frac{\sin \theta_3}{\sin \theta_4} = \frac{U_{m0}}{I_a} \cdot \frac{1}{|z_{11}|} \cdot \frac{\sin(\theta_3 - \alpha)}{\sin(\theta_4 + \alpha)} \quad (8)$$

将方程(6)、(8)与迭代方程组(7)比较不难看出,故障电流相位修正算法从数学意义上来说即是采用迭代方程求解方程组(6)、(8)。对于相位修正迭代算法来说,要保证计算结果正确有效,首先必须满足迭代计算过程收敛,有关算法收敛性的讨论请参见文献⁽¹⁾。除了算法的收敛性要求之外,另一个需要引起特别注意的是,即使算法收敛,是否总能确保计算结果一定收敛至真值。根据图11有:

$$\theta_3 = \theta_m - \beta; \quad \theta_4 = \pi_1 - \theta_3 - \theta_2 = \pi - \theta_{L1} + \beta$$

将上述两式代入方程(8)并展开化简有:

$$l = \frac{(x_m - R_m \text{tg} \alpha) - (R_m + x_m \text{tg} \alpha) \text{tg}^2}{(x_{l1} - R_{l1} \text{tg} \beta) - (R_{l1} + x_{l1} \text{tg} \beta) \text{tg} \alpha} \quad (9)$$

式中:

- $x_m = U_{m0} \cdot \sin \theta_m / I_a$ 测量电抗;
- $R_m = U_{m0} \cdot \cos \theta_m / I_a$ 测量电阻;
- $x_{l1} = |z_{11}| \cdot \sin \theta_{l1}$ 线路单位长度正序电抗。
- $R_{l1} = |z_{11}| \cdot \cos \theta_{l1}$ 线路单位长度正序电阻。

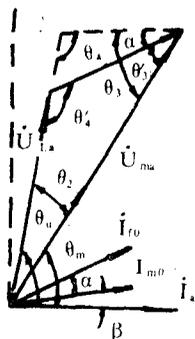


图11

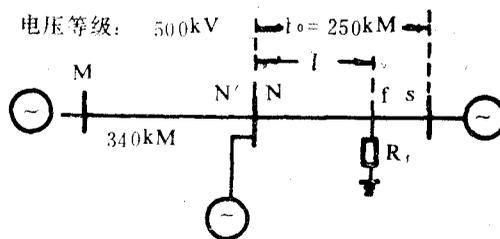


图12

此外,对方程(6)两边取正切有:

$$\text{tg} \alpha = \frac{l \cdot (x_{l0} - G \cdot R_{l0}) + (F \cdot G - E)}{-l(G \cdot x_{l1} + R_{l0}) + G \cdot E + F} \quad (10)$$

其中: $E = l_0 \cdot x_{l0} + x_{n0}$; $F = l_0 \cdot R_{l0} + R_{n0}$;

$$G = (x_{m0} + x_{n0} + l_0 \cdot x_{l0}) / (R_{m0} + R_{n0} + l_0 R_{l0})$$

联立求解方程(9)、(10)不难得到:

$$A| \cdot l^2 + B| \cdot l + C| = 0 \quad (11)$$

式中: $A| = D \cdot (X_{l0} - G \cdot R_{l0}) + C \cdot (G \cdot x_{l0} + R_{l0})$

$$B| = D \cdot (F \cdot G - E) - B \cdot (x_{l0} - G \cdot R_{l0}) - C \cdot (G \cdot E + F) - A \cdot (G \cdot x_{l0} + R_{l0})$$

$$C| = A \cdot (G \cdot E + F) - B \cdot (F \cdot G - E)$$

$$A = x_m - R_m \operatorname{tg} \beta$$

$$B = R_n + x_n \operatorname{tg} \beta$$

$$C = x_{l1} - R_{l1} \operatorname{tg} \beta$$

$$D = R_{l1} + x_{l1} \operatorname{tg} \beta$$

由于方程组(6)(8)与方程(11)同解,因此,满足方程组(6)、(8)的根有两个,而其中只有一个是真根。对于相位修正算法,当给定一初始启动值,即使迭代过程收敛,也只能收敛至双根中的一个而该根并不一定是真根,因此,算法的收敛性并不能保证最终测距结果的正确有效。仿真计算表明,相位修正算法在某些情况下将收敛至不正确解,导致测距错误,造成保护误动。因此,不宜在接地距离保护中采用。

2. 精确故障测距新算法——解方程算法

为了清除故障电流相位修正算法可能收敛至假根而遗失真根的缺陷,最直观、简便的方法是直接求解一元二次方程(11)。满足方程(11)的解为:

$$l_{1,2} = \frac{-B| \pm \sqrt{B|^2 - 4A| \cdot C|}}{2 \cdot A|}$$

对于解方程算法来说,存在的主要问题是如何进行真根的识别。为了探讨利用一侧电量识别真根的可能性,对双根所对应的故障情况进行了仿真计算。在仿真计算中,根据方程(11)求出的双根 l_1 和 l_2 。系统零序网络图2以及电压测量方程(1)求解各根对应的接地电阻值 R_{f1} 、 R_{f2} ,并由所求的两组故障条件:(l_1, R_{f1})、(l_2, R_{f2})分别计算测量端的各相电流、电压值。仿真计算结果表明,在某些情况下,两组故障条件所对应的测量端各相电流、电压无论其幅值还是相位都大体相同。因此,在这种情况下仅利用一侧电量将很难对真根作出识别。解方程算法虽然在某些情况下进行根的识别存在一定困难,但是在大多数场合,采用一定的判别方法仍能方便地确定真根,给出正确的测距值。在I.极化方式中,为了防止保护发生超越误动,下偏角的选取一般按最不利情况考虑,即下偏角可取为对侧母线故障时本侧零序电流与故障点零序电流相位之间的差角:

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{m0} + x_{n0} + l_0 \cdot x_{l0}}{R_{m0} + R_{n0} + l_0 \cdot R_{l0}} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{m0}}{R_{n0}}$$

相应的测距值为:

$$l' = \frac{(x_m - R_m \operatorname{tg} \beta) - (R_m + x_m \operatorname{tg} \beta) \operatorname{tgr}}{(x_{l1} - R_{l1} \operatorname{tg} \beta) - (R_{l1} + x_{l1} \operatorname{tg} \beta) \operatorname{tgy}}$$

因此,本线故障时,实际故障距离 l 必然满足 $l \leq l'$ 。对于解方程算法,为了识别出真根,一种简便有效的方法是在求出双根 l_1 、 l_2 后,进一步分别与 l' 进行比较,若双根中只有一根位于区间(0, l')此根即为真根,而另一根为假根略去。若双根均小于 l' ,为防止保护误动,可选双根中大者作为“实际故障距离”,然后与整定距离比较,以决定保护

是否动作。显然,采用这种判别方法可能导致在某些情况下误选具有较大值的假根作为实际故障测距值,引起保护拒动。然而,仿真计算表明,上述方法较常规 I_0 极化方式相比保护拒动区将大大减小,承受过渡电阻的能力有显著提高。

有关算法在邻线故障时的测距性能由于文章篇幅所限,将另外撰文讨论。

对于解方程算法存在的计算量相对较大的问题一种适宜的处理方法是将常规 I_0 极化方式与解方程算法相结合,当故障点较近或接地电阻较小时,由 I_0 极化方式动作,快速切除故障。而当故障发生在保护范围末端或接地电阻较大时虽然 I_0 极化方式可能拒动,但同时保护的速动性要求也相应降低,此时可由解方程算法作进一步判别,将故障线路切除。

四 仿真计算结果

上述解方程算法通过数字仿真计算进行了检验,并与常规 I_0 极化方式作了比较。系统接线图如图12所示,整定距离为线路全长的85%,接地电阻变化范围为 $0 \sim 300 \Omega$ 。 I_0 极化方式的下偏角取为对侧母线故障时本侧零序电流与故障点零序电流之间的相位差角。表1中给出了部份仿真计算结果。从仿真计算结果不难看出,解方程算法承受接地电阻的能力较常规 I_0 极化方式相比有显著提高,可作为一种新的保护算法在微机接地距离保护中采用。

表 1

保护位置	保护构成方式		故障点位置 l/l_0 (%)					
			20%	30%	40%	60%	70%	80%
N侧	I_0 极化	拒动区	无	无	$>210\Omega$	$>100\Omega$	$>60\Omega$	$>20\Omega$
	解方程算法		无	无	无	$>190\Omega$	130—270 Ω	90—160 Ω
S侧	I_0 极化	拒动区	$>20\Omega$	$>50\Omega$	$>70\Omega$	$>110\Omega$	$>130\Omega$	$>150\Omega$
	解方程算法		60—70 Ω	70—80 Ω	90—100 Ω	130—150 Ω	150—170 Ω	170—190 Ω

说明: 1. 拒动区表示当接地电阻值位于该区间时,保护拒动。

五 结 论

接地距离保护的运行性能可从不同的角度来加以描述,通过比较其测距性能的好坏来说明承受接地电阻的能力将更为直观、简便。解方程算法作为一种精确故障测距算法可在微机距离保护中采用,仿真计算表明,该算法较常规 I_0 极化方式相比承受过渡电阻的能力有显著提高,具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 蔡德礼、叶一麟. 高压输电线故障点定位的一种新的计算机方法. 重庆大学学报. NO.2, 1982.
- [2] 张之哲. 自适应式微机距离保护的研究. 博士学位论文. 华中理工大学. 1985.9.
- [3] 叶一麟、蔡德礼. 系统参数变化对故障点测距精度的影响. 重庆大学学报, NO.4, 1984.