

输电线路超高速保护中小波算法的研究

曹瑞峰¹, 张保会¹, 罗四倍¹, 段建东²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安理工大学电气工程系, 710048, 西安)

摘要: 使用不同的小波算法,即 Mallat 算法和提升算法分别编程实现输电线路超高速保护,从而进行对比研究,利用提升算法在运算量上的优势,对相同运算量下小波消失矩阶数的提高与保护性能之间的关系进行了探讨.通过大量的 ATP 仿真测试,对比使用不同算法时各个保护元件的出口速度、存量要求、灵敏度及可靠保护范围.研究表明,使用了提升算法的超高速保护在不影响其他性能的前提下可以有效地提高保护的出口速度,降低存量要求,最终证明了提升小波算法在超高速保护实现中的可行性和优越性,并指出小波消失矩阶数应恰当选取,并非越高越好.

关键词: 小波变换;Mallat 算法;提升算法;超高速保护

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0194-05

Algorithms of Wavelet Transform in Ultra-High-Speed Protection for Transmission Line

CAO Ruifeng¹, ZHANG Baohui¹, LUO Sibe¹, DUAN Jiandong²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Two algorithms of wavelet transform, Mallat algorithm and lifting scheme are adopted to realize the ultra-high-speed protection for EHV transmission line, and the performance is investigated. Through a large number of ATP simulations and comparison of operation speed, requirement for auxiliary memory, sensitivity, reliable protection zone between Mallat algorithm and lifting scheme, it indicates that lifting scheme enables to evidently improve the performance of ultra-high-speed protection on operation speed and memory requirement without effects on the other characteristics, and the order of wavelet vanishing moment ought to be selected properly for ultra-high-speed protection.

Keywords: wavelet transform; Mallat algorithm; lifting scheme; ultra-high-speed protection

在暂态信号处理工具中,由于小波变换良好的时频域分辨特性、滤波特性和奇异度检测特性,在近年来的超高速保护研究中得到了广泛的应用^[1-2].但是,目前提出的这些超高速保护方案所使用的小波多分辨率分析都是基于卷积的离散小波变换(Mallat 算法),运算量大,对存储空间的要求高,在保护硬件实现时并不理想.本文将提升小波算法应用于输电线路超高速保护中,并与 Mallat 算法进行比较,通过大量的 ATP 仿真试验,研究使用不同算法

时保护元件的出口速度、存量要求、灵敏度及可靠保护范围.

小波消失矩阶数的提高对于 Daubechies 小波的频域性能有着十分积极的作用,但是也会造成滤波器长度的增加,进而导致运算量增大.由于提升小波算法比 Mallat 算法运算量小,因此本文利用该特点研究了运算量不变的前提下小波消失矩阶数的提高与保护性能之间的关系.

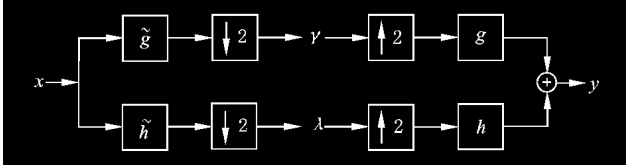
1 提升小波算法

1.1 提升小波算法的原理

基于提升算法的小波变换^[3-4],其实质就是将信号序列与小波滤波器系数的卷积转换为与一系列上三角或下三角矩阵的联合乘积。

1.1.1 Mallat 算法下信号的分解与重建 图1为基于卷积的离散小波变换,其无损重建的条件为

$$\left. \begin{aligned} h(z)\tilde{h}(z^{-1}) + g(z)\tilde{g}(z^{-1}) &= 2 \\ h(z)\tilde{h}(-z^{-1}) + g(z)\tilde{g}(z^{-1}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



$\tilde{h}$ 为分解低通滤波器; $\tilde{g}$ 为分解高通滤波器; h 为重构低通滤波器; g 为重构高通滤波器(均为 FIR 滤波器)

图1 信号的分解与重建

1.1.2 使用多项矩阵的信号分解与重建 信号分解时,先对信号滤波,再进行二抽取,效率较低。因此,将二抽取环节提到滤波之前,此时输出为

$$y_e(z) = h_e(z)x_e(z) + z^{-1}h_0(z)x_0(z) \quad (2)$$

式中: $h_e(z)$ 和 $h_0(z)$ 是滤波器 h 的偶数位和奇数位系数; $x_e(z)$ 和 $x_0(z)$ 是信号 x 的偶数位和奇数位采样序列; z^{-1} 表示它们之间的延迟。于是可以写出

$$\begin{pmatrix} \lambda(z) \\ \gamma(z) \end{pmatrix} = \tilde{P}(z) \begin{pmatrix} x_e(z) \\ z^{-1}x_0(z) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{P}(z) = \begin{pmatrix} \tilde{h}_e(z) & \tilde{h}_0(z) \\ \tilde{g}_e(z) & \tilde{g}_0(z) \end{pmatrix} \quad (4)$$

信号重建时,由于二插值环节置于滤波之前,使得滤波器要对大量的 0 进行处理。将二插值环节改到滤波之后,和上面相似,可以得到

$$\begin{pmatrix} \gamma_e(z) \\ z\gamma_0(z) \end{pmatrix} = P(z) \begin{pmatrix} \lambda_e(z) \\ \gamma_e(z) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$P(z) = \begin{pmatrix} h_e(z) & g_0(z) \\ h_0(z) & g_e(z) \end{pmatrix} \quad (6)$$

于是得到如图2所示的信号分解与重建过程。此时,

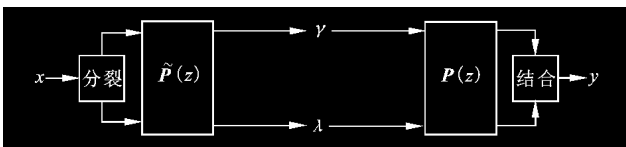


图2 使用多项矩阵的信号分解与重建

无损重建的条件为

$$\tilde{P}(z^{-1})P(z) = I \quad (7)$$

可以证明 $\tilde{P}(z^{-1}) = P(z)^{-1}$, 所以无损重建的条件就是矩阵 $P(z)$ 的行列式为 1。

1.1.3 原始提升和对偶提升 由于多项矩阵 $P(z)$ 的行列式为 1, 滤波器组 (h, g) 互补, 与 h 互补的任意有限长滤波器可以写为

$$g^{\text{new}}(z) = g(z) + h(z)s(z^2) \quad (8)$$

式中: $s(z^2)$ 是一个劳伦多形式, 进而得到

$$P^{\text{new}}(z) = \begin{pmatrix} h_e(z) & h_e(z)s(z) + g_e(z) \\ h_0(z) & h_0(z)s(z) + g_0(z) \end{pmatrix} \quad (9)$$

对信号分解部分进行相似的处理。以上过程称为原始提升步骤, 如图3所示, 同理可以得到对偶提升步骤, 如图4所示。

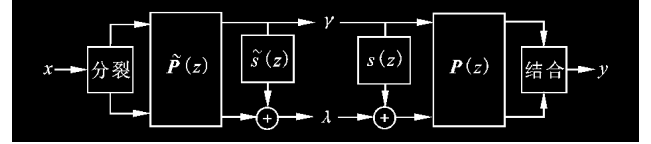


图3 原始提升

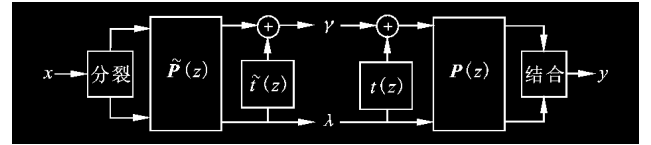


图4 对偶提升

1.1.4 多项矩阵的分解 由上面的分析可以推知, 多项矩阵 $P(z)$ 总可以分解为一系列的提升步骤

$$P(z) = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \prod_{i=1}^m \begin{pmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: K_1 和 K_2 为比例常数。分解过程可以通过欧几里得定理来实现^[5], 一组劳伦多形式进行有限次的分解, 就转化为了三角矩阵的连乘形式。

综上所述, 将图2中的多项矩阵分解为一系列的提升步骤, 最终实现了使用提升算法的小波变换。

1.2 提升小波算法的特点

(1) 不同于 Mallat 算法, 提升算法实现了完全的在位计算, 不需占用辅助存储空间, 可降低小波变换硬件实现成本。这从提升步骤可以明显看出, 每次提升都是直接使用新数据来取代原来的数据

$$\left. \begin{aligned} \gamma^{\text{new}}(z) &= \gamma(z) + t(z)\lambda(z) \\ \lambda^{\text{new}}(z) &= \lambda(z) + s(z)\gamma(z) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(2) 提升算法的计算复杂度比 Mallat 算法大为降低, 变换速度更快, 利用实时数据处理。对于较长的滤波器, 其运算量接近于 Mallat 算法的一半^[5]。

本文超高速保护方案使用了 db3 和 db5 小波。

对于单个采样点,db3-Mallat 算法和 db5-提升算法都需要 12 次乘法、10 次加法,db3-提升算法仅需要 8 次乘法、6 次加法。因此,除了进行不同小波算法的比较之外,还可以通过 db3-Mallat 算法与 db5-提升算法研究相同运算量下小波消失矩阶数的提高与保护性能之间的关系。

2 输电线路超高速保护

根据文献[6-8]提出的输电线路超高速保护方向元件、边界元件及故障选相元件,分别使用 Mallat 算法和提升算法完成小波变换部分,编程实现各保护元件,从而研究超高速保护中的小波算法。

以方向元件^[6]为例,其动作原理基于行波传播特性,即在保护安装处检测到故障后的一段较短的时间 Δt 内,不同方向故障时正、反行波的幅值比会有明显的差异。 $\Delta t < \min\{2l_1/c, 2l_2/c\}$, c 为光速, l_1 、 l_2 分别为本侧线路和背侧线路的长度。正向故障时, $\Delta u_f/\Delta u_b = k_r$ (反射系数 $0 < |k_r| < 1$), 反向故障时, $\Delta u_f/\Delta u_b \rightarrow \infty$, 因此可以使用该比值构成保护判据。为了提高可靠性,实际中通常使用的是正、反行波高频分量能量 $E_{j,f}$ 和 $E_{j,b}$ 的比值,并可通过小波变换来提取高频分量,最终得到的实用判据为

$$\lambda_D = E_{j,f}/E_{j,b} \quad (12)$$

为了对不同算法进行对比,以方向元件为例,其程序流程如图 5 所示,边界元件及故障选相元件的处理相似。

3 ATP 仿真研究

3.1 仿真系统模型

某 500 kV 超高压输电系统如图 6 所示,线路长度 $l_{PM} = 214$ km, $l_{MN} = 160$ km, $l_{NQ} = 301$ km。所有线路均不换位,采用考虑线路参数频率特性的 J. Marti 模型(分布参数线路模型),母线杂散电容设为 $C_s = 0.01 \mu\text{F}$,避雷器采用 IEEE 推荐的频率相关模型,阻波器的阻塞频带为 $[58, 126]$ kHz。采样率设为 400 kHz,考察 M 侧超高速保护的性能。

3.2 仿真测试结果

针对不同的故障位置、故障初始角(θ)、过渡电阻以及故障类型进行了约 500 组故障仿真试验。限于篇幅,以下给出部分仿真测试结果。

表 1、表 2 反映的是单相接地故障时方向元件的动作性能。可以看到,db3-Mallat 算法和 db5-提升算法所实现的方向元件在各种故障条件下均性能稳定,判断正确。对于 db3 小波,正向故障时 λ_D 在

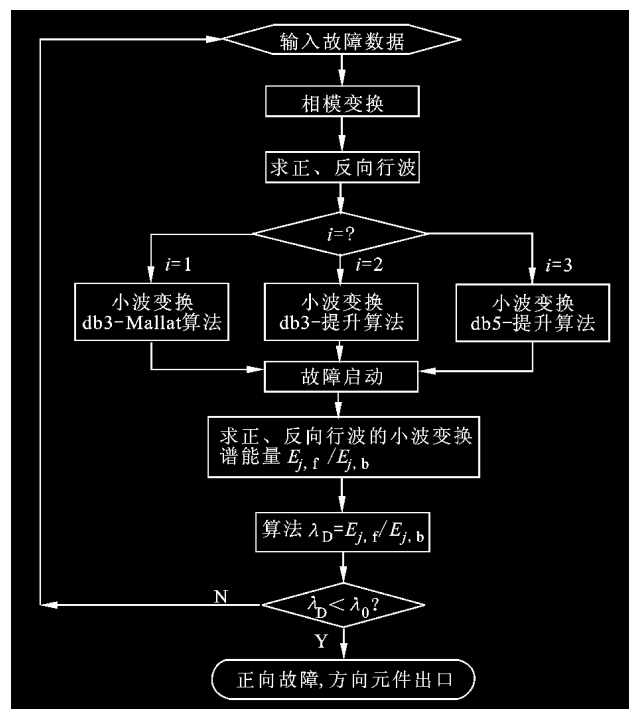


图5 方向元件程序流程图

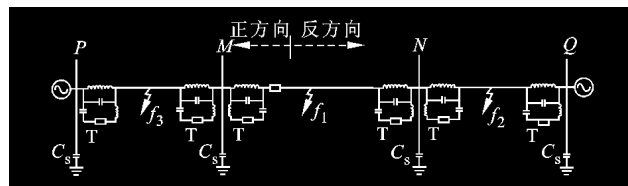


图6 超高压输电系统

10^{-2} 数量级,明显小于阈值 $\lambda_0 = 1.2$,反向故障时比值 λ_D 均在 10^5 数量级,远远超过了阈值 1.2,可

表 1 方向元件动作性能(db3-Mallat 算法)

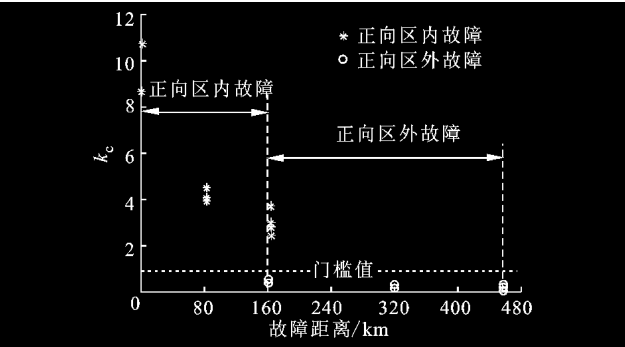
故障位置	$\theta/(^{\circ})$	过渡电阻/ Ω	λ_D	判别结论
线路 MN 中点	5	0	0.138 169	正向故障
		300	0.139 982	
	45	0	0.134 562	
		300	0.136 462	
	90	0	0.134 192	
线路 NQ 中点		300	0.136 102	正向故障
	5	0	0.042 864 7	
		300	0.044 941 1	
	45	0	0.045 054 6	
		300	0.047 169 4	
线路 PM 中点	90	0	0.044 755 0	反向故障
		300	0.046 864 7	
	5	0	490 058	
		300	515 941	
	45	0	485 608	
线路 PM 中点		300	513 669	反向故障
	90	0	484 321	
		300	512 706	

表2 方向元件动作性能(db5-提升算法)

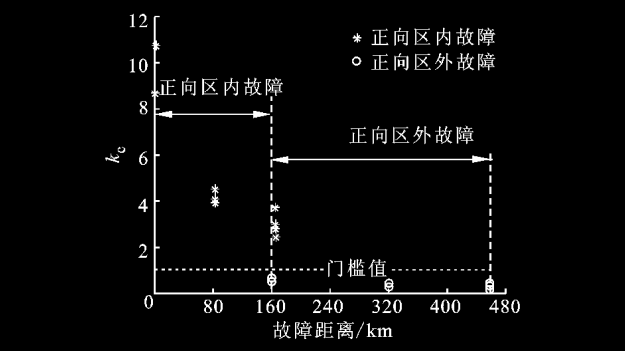
故障位置	$\theta/(^{\circ})$	过渡电阻/ Ω	λ_D	判别结论
线路MN中点	5	0	0.366 313	正向故障
	45	300	0.354 778	
		0	0.372 085	
		300	0.360 159	
	90	0	0.372 653	
		300	0.360 690	
线路NQ中点	5	0	0.384 787	正向故障
	45	300	0.399 863	
		0	0.399 113	
		300	0.415 187	
	90	0	0.397 110	
		300	0.413 043	
线路PM中点	5	0	55 169.7	反向故障
	45	300	42 224.8	
		0	56 543.3	
		300	4 753.18	
	90	0	56 914.7	
		300	43 064.7	

见方向元件判别故障方向的灵敏度极高.使用db5小波时方向元件仍然判断正确,但是比值 λ_D 在正向故障时为 10^{-1} 数量级,反向故障时为 10^4 数量级,相对于db3小波,灵敏度有所下降.

图7对比了采用相同的小波(db3)时Mallat算法和提升算法下故障距离、故障类型对边界元件性



(a)db3-Mallat 算法



(b)db3-提升算法

图7 边界元件动作值随故障距离和故障类型的变化

能的影响,其 k_c 为边界元件的动作值,故障距离为正向区内1 km、80 km、159 km和正向区外10 km、150 km、300 km,4种典型故障(Ag、ABg、AB和ABC),故障初始角 45° ,金属性故障.可以看出,对于相同的小波,基于提升算法的边界元件与Mallat算法下得到的测试结果相同,这与理论上是一致的.

表3反映了db3-提升算法下故障初始角和过渡电阻对故障选相元件性能的影响,故障位置为线路MN中点处.其中,基于提升算法的故障选相元件能够正确判别出故障类型并选出故障相,其性能基本不受上述故障条件的影响(包括故障初始角 0° 附近).

表3 初始角与过渡电阻对选相元件的影响(db3-提升算法)

故障类型	$\theta/(^{\circ})$	过渡电阻/ Ω	e_0	e_A	e_B	e_C	判别结论
Ag	5	0	0.84	1	0.003 1	2.5×10^{-3}	Ag
	45	300	0.83	1	0.003 1	2.5×10^{-3}	
		0	0.89	1	0.005 9	5.0×10^{-3}	
		300	0.89	1	0.005 6	4.7×10^{-3}	
	90	0	0.90	1	0.007 8	6.6×10^{-3}	
		300	0.90	1	0.007 3	6.1×10^{-3}	
ABg	5	0	0.15	0.38	1	1.4×10^{-3}	ABg
	45	300	0.017	0.76	1	1.5×10^{-4}	
		0	0.003 6	0.94	1	1.2×10^{-4}	
		300	3.1×10^{-4}	0.98	1	9.5×10^{-6}	
	90	0	0.13	1	0.41	6.7×10^{-4}	
		300	0.015	1	0.77	7.1×10^{-5}	
AB	5	0	2.2×10^{-13}	1	1	2.0×10^{-11}	AB
	45	300	1.1×10^{-12}	1	1	9.9×10^{-11}	
		0	1.5×10^{-14}	1	1	5.4×10^{-12}	
		300	7.7×10^{-14}	1	1	2.7×10^{-11}	
	90	0	4.1×10^{-13}	1	1	5.8×10^{-12}	
		300	2.1×10^{-12}	1	1	3.0×10^{-11}	
ABC	5	0	7.1×10^{-5}	0.11	1	0.48	ABC
	45	300	1.4×10^{-5}	0.11	1	0.48	
		0	5.2×10^{-6}	0.90	1	0.019	
		300	1.6×10^{-6}	0.90	1	0.019	
	90	0	4.2×10^{-5}	1	0.12	0.46	
		300	5.3×10^{-6}	1	0.12	0.46	

3.3 相关问题的探讨与分析

(1)仿真测试的结果表明,使用提升算法的超高速保护元件基本不受各种故障条件(故障距离、故障类型、故障初始角和过渡电阻)的影响,性能稳定,判断正确,其中方向元件在判别故障方向时具有极高的灵敏度.

(2)超高速保护的动作速度很大程度上决定于小波变换部分的计算量.按照文中各个元件选取的

数据窗长度和小波变换尺度,并考虑使用 TI 公司 C32 系列的 DSP 中已经用于实际保护装置的性能较高的型号来实现,其指令周期为 33 ns,可以得到使用 db3 小波时 Mallat 算法和提升算法下各个元件中小波变换部分的运算量及所需时间,如表 4 所示.可以看出,提升算法时各元件的出口速度优于 Mallat 算法,就 db3 小波而言,各元件中小波变换部分的速度可以提升 57%左右.

表 4 各元件中小波变换部分的运算量及所需时间

算法	保护	运算量		所需时间/ μs
		乘法/次	加法/次	
Mallat 算法	方向元件	9 408	7 840	约 569
	边界元件	7 440	6 200	约 450
	故障选相元件	15 360	12 800	约 929
提升算法	方向元件	6 272	4 704	约 362
	边界元件	4 960	3 720	约 286
	故障选相元件	10 240	7 680	约 591

此外,提升算法实现了完全的在位运算,不需占用辅助存储空间,因此基于提升算法的超高速保护对存量的要求较低,利于降低硬件实现成本.

(3)根据仿真测试的结果,对 db3-Mallat 算法和 db5-提升算法用于超高速保护的性能进行比较发现,方向元件的判别灵敏度有所下降,边界元件的可靠保护范围也有一定程度缩小.也就是说,在运算量不变的前提下,小波消失矩阶数的增加并未提高保护的性能.原因是提高小波消失矩阶数虽然能改善小波的频域性能,使小波在频域上具有更好的局域性,但小波的时域性能(如紧支性)相应下降了.

4 结 论

(1)提升小波算法应用于超高速保护是可行的,各保护元件性能稳定,判断正确,基本不受各种故障条件的影响.

(2)基于提升算法的超高速保护在出口速度和存量要求等方面均优于 Mallat 算法,这对于保护的实现具有重要的意义.

(3)在运算量不变的前提下,小波消失矩阶数的提高并不意味着保护方案性能的提升,小波消失矩应恰当选取.

参考文献:

- [1] 董杏丽,葛耀中,董新洲.基于小波变换的无通道全线速动行波保护[J].电力系统自动化,2001,25(10):18-22.
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. A wavelet and travelling wave based non-communication high speed transmission line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 18-22.
- [2] 林湘宁,刘沛,杨春明,等.基于小波分析的超高压输电线路无通信全线速动保护方案[J].中国电机工程学报,2001,21(6):9-14.
LIN Xiangning, LIU Pei, YANG Chunming, et al. A wavelet analysis based non-communication protection scheme for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 9-14.
- [3] SWELDENS W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2): 511-546.
- [4] VALENS C. The fast lifting wavelet transform[EB/OL]. [2004-02-26]. <http://perso.wanadoo.fr/polyvalens/clemens/clemens.html>.
- [5] DAUBECHIES I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. Journal of Fourier Analysis, 1998, 4(3): 247-269.
- [6] 段建东,张保会,周艺.超高速暂态方向继电器的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):7-12.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, ZHOU Yi. Study of ultra-high-speed transient-based directional relay [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 7-12.
- [7] 段建东,张保会,周艺,等.基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J].中国电机工程学报,2006,26(3):1-6.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, ZHOU Yi, et al. Transient-based faulty phase selection in EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 1-6.
- [8] 段建东,张保会,李鹏,等.超高压输电线路单端暂态量保护元件的实用算法[J].中国电机工程学报,2007,27(7):45-51.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, LI Peng, et al. Principle and algorithm of non-unit transient-based protection for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 45-51.

(编辑 杜秀杰)