# 一种故障检测的新方法

别朝红 于 龚 于九祥 (山东工业大学电力系·250014·济南)

【摘 要】 提出一种故障检测的新方法,该方法建立在卡尔曼滤波技术和假设检验理论的基础上。假设检验的方法认为,在正常运行时,卡尔曼滤波器运行在高斯分布的统计量基础上,其残差 $\tilde{e}_k$ 为零均值、独立的随机序列。当发生故障时,残差的分布不再为标准正态分布。利用这一事实,应用假设检验理论的方法,可以快速、准确地完成故障检测。此方法在山东邹县—潍坊 500kV 数字仿真线路上进行了验算,结果表明,故障检测可在 1.25ms 内完成,不受故障类型影响,所需数据窗少,判断准确。

【关键词】 卡尔曼滤波 故障检测 假设检验

#### 引 引言

电力系统发生故障时,要求迅速检测出故障,启动保护装置,对故障后的电压值、电流值进行准确的估计,并确定故障点的位置。

本文提出的故障检测方法,建立在卡尔曼滤波技术和假设检验理论基础之上。卡尔曼滤波算法是递推估计,所需数据窗短,运算量小,利于实现快速动作的继电保护。假设检验就是根据样本所提出的假设做出判断:是接受还是拒绝?在本文提出的方法中,我们将滤波方程的残差用作检验统计量,来决定是否有故障发生。电力系统正常运行时,残差按标准正态分布,如果发生故障,残差的数学期望值则不为0,其分布也不再为标准正态分布,由此可快速检测出有无故障发生。如果检测到故障信息,滤波器则清零,以提高下一次检测的收敛性能。

计算机仿真结果表明,电力系统的故障非常适合单样本假设检验的情况。将假设检验理论与 卡尔曼滤波技术相结合,应用于故障检测,获得了满意的效果。

#### 2 利用假设检验理论进行故障检测的方法

本方法所采用的卡尔曼滤波器的数学模型是旋转的坐标系下的状态空间模型。其数学模型简述如下:

系统状态方程:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_k X_{k-1} + W_k & k \neq k_0 \\ X_k = X_{k-1} + \triangle X & k = k_o \end{cases}$$
 (1)

别朝红,1970年生,在读硕士生。

于 龚, 计算机高级程序员, 在读硕士生。

于九祥,1939年生,教授,主要研究计算机继电保护和卡尔曼滤波技术。

<sup>\* 1994</sup>年9月收到初稿,同年12月收到修改稿。

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

量测方程:

$$Z_{k} = H_{k}X_{k} + V_{k}$$

$$H_{k} = \left[\cos\omega_{o}k\triangle t, -\sin\omega_{o}k\triangle t\right]$$
(2)

验前统计量:  $W_k$ 为系统噪声,假定为高斯分布;

 $\mathrm{E}[W_k] = 0$  ,  $\mathrm{E}[W_k W_1^{\mathrm{T}}] = Q_k \delta_{k1}$  ;

V<sub>k</sub>为量测噪声,假定为高斯分布;

 $\mathrm{E}[V_k] = 0$  ,  $\mathrm{E}[V_k V_1^{\mathrm{T}}] = R_k \delta_{k1}$  ;

 $W_k$ , $V_k$ 相互独立。

状态预测估计:  $\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_k \hat{X}_{k-1}$ ,

方差预测:  $P_{k|k-1} = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^{\mathrm{T}} + Q_{k-1}$ ,

状态估计:  $\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k(Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1})$ 

方差迭代:  $P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$ 

滤波增益:  $K_k = P_{k|k-1}H_k^{\mathrm{T}}[H_kP_{k|k-1}H_k^{\mathrm{T}} + R_k]^{-1}$ 

递推初值为X(0),P(0)。

如果卡尔曼滤波器是最优的,而且运行在高斯分布的统计量基础上,那么残差就组成了一组零均值、不相关的随机变量。

残差 
$$\tilde{e}_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k-1} \tag{3}$$

式中  $\hat{X}_k$  为状态估计,可由下式递推计算得到:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1} + K_k \tilde{e}_k \tag{4}$$

其中K<sub>k</sub>为卡尔曼滤波增益。

残差的协方差矩阵则为:

$$\widetilde{P}_{k} = \mathrm{E}\left[\widetilde{e}_{k}\widetilde{e}_{k}^{\mathrm{T}}\right] = H_{k}P_{k-1}H_{k}^{\mathrm{T}} + R_{k}$$
(5)

其中  $P_k$  为误差的协方差矩阵,定义为  $E[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)^T]$ 。根据概率知识,可以将  $e_k$  通过一个线性变换将其转换为标准正态分布,则:

$$\tilde{e}_{nk} = \frac{\tilde{e}_k}{\sqrt{\tilde{b}_k}} \tag{6}$$

当故障发生时,残差的分布则不再为标准正态分布,此时:

$$X_k = X_{k-1} + \triangle X \tag{7}$$

那么,将(2)式代入(3)式,得:

$$\tilde{e}_k = H_k X_k + V_k - H_k \hat{X}_{k-1} \tag{8}$$

再将(7)式代入(8)式,则:

$$\tilde{e}_{k} = H_{k}X_{k-1} + H_{k}\Delta X + V_{k} - H_{k}\hat{X}_{k-1}$$

$$= H_{k}(X_{k-1} - \hat{X}_{k-1}) + V_{k} + H_{k}\Delta X$$
(9)

由于卡尔曼滤波器在第 k-1 步以前都是无偏的,而且  $E(V_k)=0$  ,则:

$$\mathbf{E}(\tilde{e}_k) = H_k \triangle X \tag{10}$$

由于故障是可观测的,即  $\triangle X \neq 0$ ,那么  $H_k \triangle X$  也就不再为零。这样,在故障条件下,正态分布的残差为有偏的,这一事实将用在假设检验之中。为了便于讨论,假定滤波器为单输出,所以下面所讨论的  $\tilde{e}_{nk}$  均为标量。

把标准正态分布的残差 enk 取为检验统计量,

原假设 Ho: 无故障发生,

备择假设 $H_1$ :有故障发生。

然后,根据 $\tilde{e}_{nk}$ 的分布来决定是否接受(拒绝) $H_0$ 。由于无故障情况下, $\tilde{e}_{nk}$ 为标准正态分布 N(0,1),所以可以根据标准正态分布表来决定拒绝或接受假设的边界值。

判定准则:如果 $|\tilde{e}_{nk}| > T_r$ ,拒绝 $H_0$ 

式中, $T_r$ 为拒绝域的临界点。 $T_r$ 可以由设计者根据实际的运行情况,即所允许的最大误报警动作率  $\alpha$  来选择,即:

 $\alpha = P(拒绝 H_0 | H_0 为真)$ 

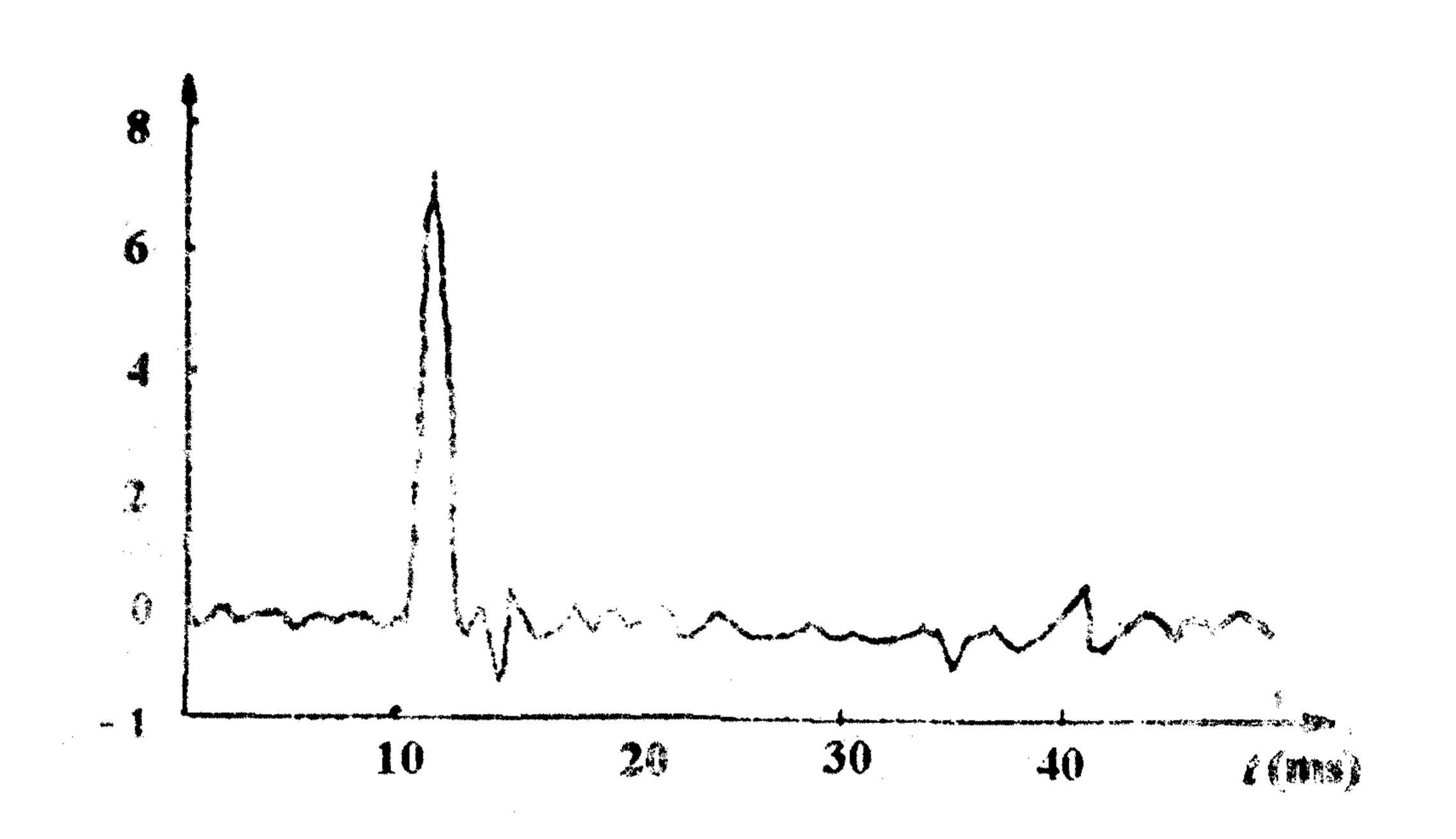


图 1 单相故障残差的分布曲线

Fig. 1 Residual error curve of single-phase fault

在统计学中,我们常把这种"弃真"的错误

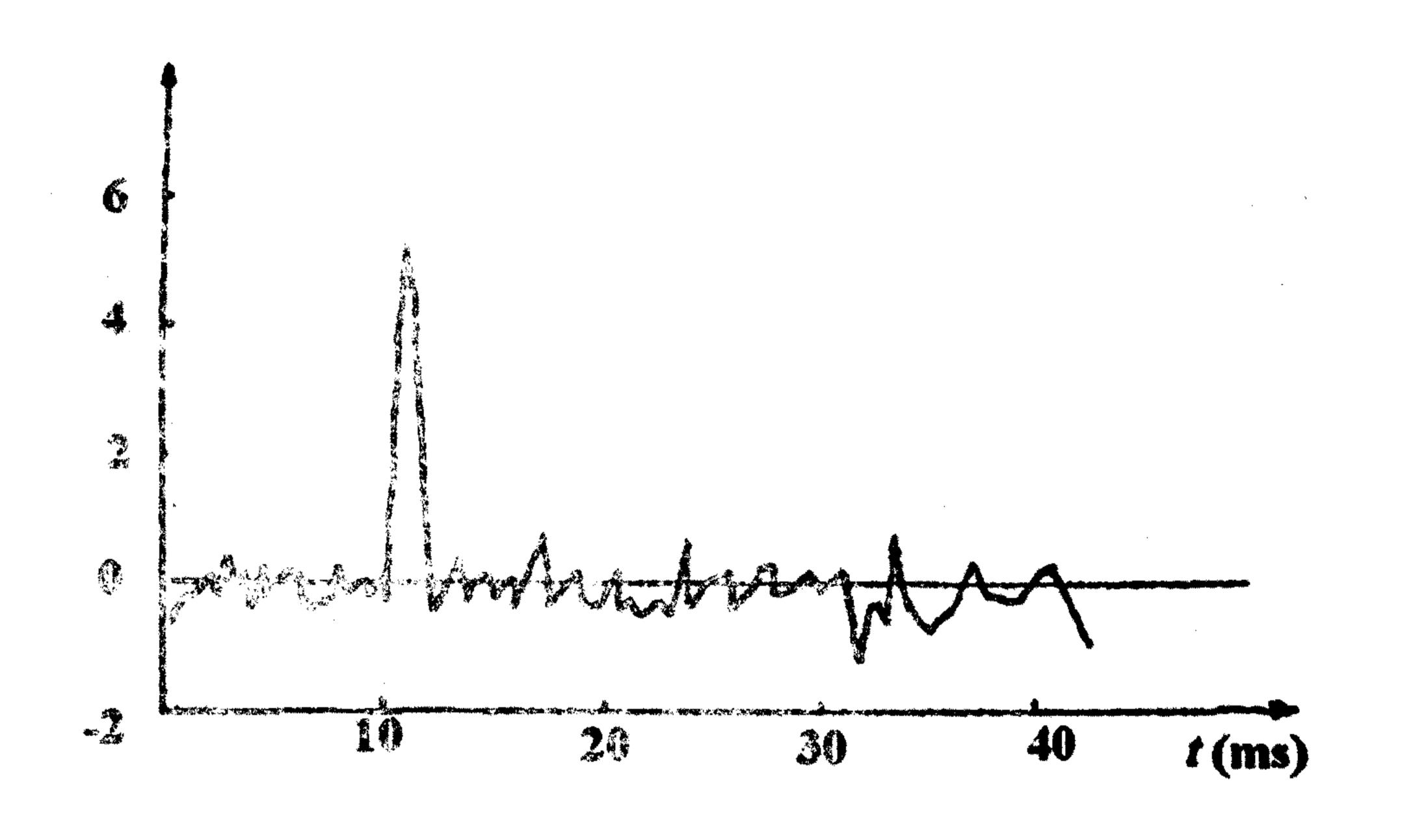


图 2 两相故障残差的分布曲线

Fig. 2 Residual error curve of two-phase fault

称为第 I 类错误,把  $\alpha$  称为假设检验的显著性水平。例如,我们将  $\alpha$  取为 0.01,即误报警动作率为 1%,则根据标准正态分布表可查得  $T_r$  为 2.58。至此,根据以上的讨论,对于采样值,经过卡尔曼滤波器,由式(6)可计算出  $\tilde{e}_{nk}$ ,若  $\tilde{e}_{nk} > T_r$ ,则认为有故障发生,否则,无故障发生,从而,完成了故障检测。

## 3 检测方案的仿真实验结果

使用 EMTP 程序,对山东邹县一潍坊 500kV、376.4km 输电线路进行了各种情况下的仿真运算,得到了满意的结果。

在仿真实验中,采样频率为 32 采样点/周,状态向量的初值为零,噪声方差  $Q_k$ 、 $R_k$  假定为 0.001,拒绝域的临界点  $T_r$  取为 2.58,即允许的最大误报警动作率为 1%,所有的电压、电流向量均用标幺值表示。

图 1~图 3 为不同类型故障下, 残差的分布曲线。在仿真实验中, 故障发生的时刻均为 10ms。从图中可看出, 不论何种故障, 均可在 1.25ms 以内检测出故障(残差值大于 2.58)。若根据不同

的 $\alpha$ ,取不同的 $T_r$ ,则故障检测的时间也不同,即灵敏度可根据需要调整。

## 4 结论

- (1) 电力系统的故障非常适合单样本的假设 检验。单样本假设检验的故障检测技术可靠、快 速,特别适合在线应用;
- (2) 本方法可在故障发生后 1.25ms 以内完成故障检测,且不受故障类型的影响;
- (3) 对线路上的微小变化,即电压过零时发生的故障,也可迅速地检测出,灵敏度高;
- (4) 故障检测的灵敏度可以根据用户所允许的最大误报警动作率  $\alpha$  , 选择不同的  $T_r$  进行调整。

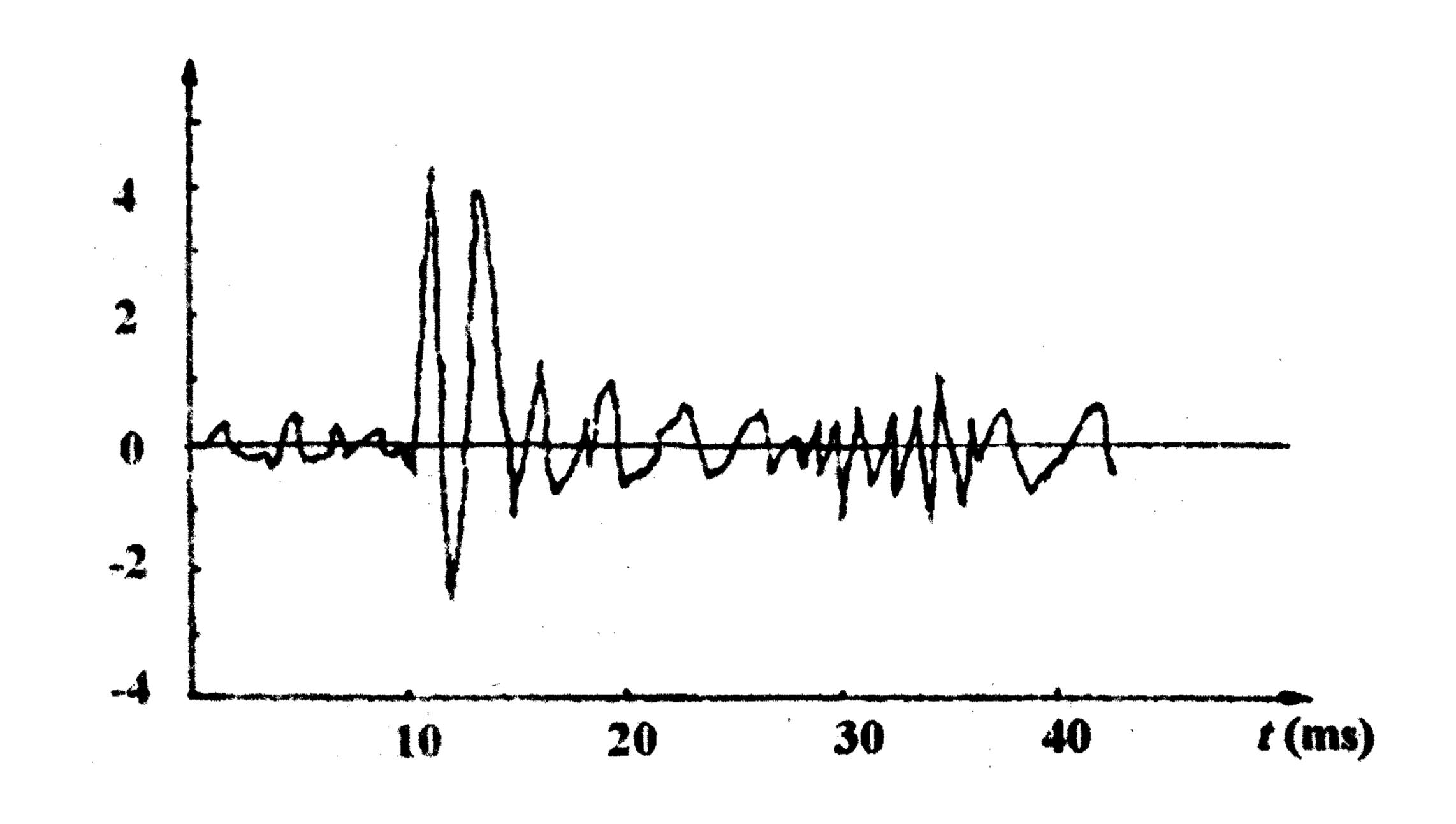


图 3 三相故障残差的分布曲线

Fig. 3 Residual error curve of three-phase fault

## 参考文献

- 1 浙江大学数学系编. 概率论与数理统计. 人民教育出版社
- 2 Fahmida N C, John P C, Jorg L A. Power System Fault Detection and State Estimation Using Kalman Filter With Hypothesis Testing. IEEE Trans. On Power Delivery, 1991.7, 6 (3): 1025-1030
- 3 Brown R G. Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering. John Wiley and Sons, 1983

#### A NEW ALGORITHM OF FAULT DETECTION

Bie Zhaohong, Yu Yan, Yu Jiuxiang
(Shandong University of Technology, Ji'nan)

Abstract This paper describes a new algorithm of fault detection. The proposed algorithm is based on the Kalman filter and hypothesis testing. In normal operation, the Kalman filter is operating with Gaussian statistics, the residuals constitute a sequence of zero—mean, independent random variables. If a fault has taken place, the residuals are no longer standard normal distribution. The residuals in the filter equation are used as test statistics to sense the fault. The algorithm has been tested on a 500kV simulating transmission line. It is shown that fault detection can be finished in 1.25ms and the precision is not affected by fault types.

Keywords Kalman filter fault detection hypothesis testing