

一种用于传感器故障检测的改进残差检验法

管桦¹, 魏瑞轩²

(1. 空军工程大学科研部, 陕西西安 710051; 2. 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘要: 针对基于卡尔曼滤波器的残差检验法会跟踪软故障的局限性, 提出了一种基于状态递推器的改进方法。然后通过对残差量的正态分布标准化措施, 将残差向量整体的 χ^2 检测问题转化为每个独立分量的偏差检测问题。根据本文方法, 不但提高了故障检测灵敏度, 同时, 具有一定的故障定位能力。仿真结果表明该方法是有用的, 能够在很大程度上提高系统的故障检测灵敏度。

关键词: χ^2 检验; 残差检验; 正态分布; 状态递推器

中图分类号: TP206+.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)03-0026-03

由于 χ^2 检验法只需确定检测系统的有效性而并不确定造成故障的具体原因, 具有简单易行等优点, 因此被广泛用于动态系统的故障检测中^[1-3]。其中, 基于卡尔曼滤波器的残差检测法易于发现系统的硬故障, 而对于渐变的系统软故障却不十分有效。究其原因, 主要是残差检验法的“故障跟踪”特性造成的。为此, 本文基于卡尔曼滤波器的状态递推器, 提出一种改进的方法。

1 残差 χ^2 检验法

考虑如下离散系统模型

$$\begin{cases} X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma_{k-1}W_{k-1} \\ Z(k) = H(k)X(k) + V_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z(k) \in R^m$ 为系统的量测值; $X(k) \in R^n$ 为系统状态; $\Phi(k, k-1) \in R^{n \times n}$ 为系统的一步状态转移阵; $\Gamma_{k-1} \in R^{n \times r}$ 为系统的噪声阵; $W_k \in R^r$ 和 $V_k \in R^m$ 为相互独立的高斯白噪声序列, 且有 $E\{W_k\} = 0, E\{W_k W_j^T\} = Q_k, E\{V_k\} = 0, E\{V_k V_j^T\} = R_k$ 。并设初始状态 X_0 为独立于 W_k 和 V_k 的高斯随机向量, 且 $E X_0 = X_0, E\{X_0 X_0^T\} = P_0$ 。

对于式(1)确定的系统模型, 一般的卡尔曼滤波方程可写为^[4]

$$\hat{X}(k) = (I - K(k)H(k))\Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1) \quad (2)$$

$$P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Gamma_{k-1}Q_{k-1}\Gamma_{k-1}^T \quad (3)$$

$$P(k) = (I - K(k)H(k))P(k, k-1) \quad (4)$$

$$K_k = P(k, k-1)H^T(k)(H(k)P(k, k-1)H^T(k, k-1) + R_k)^{-1} \quad (5)$$

根据以上方程可得卡尔曼滤波器的估计残差为 $r(k) = Z(k) - H(k) \cdot \hat{X}(k/k-1)$ 。容易证明, 当无故障发生时, 卡尔曼滤波器的残差 $r_i(k)$ 为零均值高斯白噪声, 而其方差为 $A_i(k) = H_i(k)P_i(k/k-1)H_i^T(k) + R_i(k)$ 。当系统发生故障时, 残差 $r_i(k)$ 的均值不再为零。因此, 根据残差 $r_i(k)$ 的性质可进行故障检测, 这即为残差检验法。易得系统的故障检测函数如下^[4]: $\lambda(k) = r^T(k)A_k^{-1}r(k)$ 。其中, $\lambda(k)$ 服从于自由度为

收稿日期: 2004-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60304004)

作者简介: 管桦(1962-), 男, 湖北孝感人, 副教授, 主要从事通信与电子信息系统研究;
魏瑞轩(1968-), 男, 教授, 主要从事控制系统的故障诊断研究。

m 的 χ^2 分布, 即 $\lambda_k \sim \chi^2(m)$ 。 m 为测量 $Z(k)$ 的维数。故障判定准则为: 若 $\lambda(k) > T_D$, 判定有故障; 若 $\lambda(k) < T_D$, 判定无故障。 T_D 为预先设置的门限, 可由误警率 P_f 确定。

2 基于状态递推器的改进方法

以上检测易于发现系统硬故障, 对软故障的检测却不十分有效。因为软故障开始很小, 不易检出, 发生故障的传感器输出将影响预报值, 使它“跟踪”故障输出, 残差因而一直保持较小, 所以难于发现软故障。

传统残差检验法“跟踪故障”的原因是由卡尔曼滤波的基本性质决定的。在滤波过程中, 状态估计量实际上是对系统初始条件和系统量测量的一种信息压缩。当系统的滤波时间越来越长时, 系统初始条件的作用会趋于零, 而系统的量测信息会逐渐被压缩于状态估计中。

对于渐变的软故障, 当开始的故障量比较小时, 会难以检测; 由于卡尔曼滤波会自动利用新的量测量对系统的状态估计进行修正, 因此含有故障信息的量测量依然会被当作有用的信息用于状态估计的修正。这样, 估计 $\hat{X}(k/k-1)$ 就会逐渐被修正与含故障信息的量测一致起来, 从而, 残差即对“软故障”进行了跟踪, 导致难以检测该故障。

为消除该方法的跟踪故障特性, 考虑采用基于状态递推器的故障检测方法。设 $\hat{X}_s(0)$ 为先验信息, 即 $\hat{X}_s(0) = X_0$, $P_s(0) = P_0$, 则基于状态递推器^[5] 计算所得的第 k 步状态估计 $\hat{X}_s(k)$ 由下列公式计算:

$$\hat{X}_s(k) = \Phi(k, k-1)\hat{X}_s(k-1) \quad (6)$$

$$P_s(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P_s(k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Gamma_{k-1}Q_{k-1}\Gamma_{k-1}^T \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可以看出, $\hat{X}_s(k)$ 是仅与系统模型有关的量。显然, 当初始条件为高斯随机向量时, $\hat{X}_s(k)$ 、 $\hat{X}(k/k-1)$ 均为状态 X 的高斯无偏估计。根据 $\hat{X}_s(k)$ 构建估计偏差 $r_s(k) = Z(k) - H(k) \cdot \hat{X}_s(k)$ 估计偏差。显然, $E\{r_s(k)\} = 0$; 现记 $A_{sk} = E\{r_s(k) * r_s^T(k)\}$, 则容易证明:

$A_{sk} = E\{r_s(k) * r_s^T(k)\} = H(k)[P(k/k-1) - P_s(k, k-1)]H^T(k) + R(k)$ 。所以, $r_s(k)$ 服从均值为零、方差为 A_k 的高斯分布, 即 $r_s(k) \sim N(0, A_k)$ 。因此, 当系统发生故障时, $r_s(k)$ 不再是高斯分布。根据 $r_s(k)$ 的这一特性也可以进行故障检测。由于 $\hat{X}_s(k)$ 不会跟踪故障, 因此当发生故障时, $r_s(k)$ 会发生较大的变化, 从而易于检测。基于这一认识, 可以构建如下的故障检测函数:

$$\lambda_s(k) = r_s^T(k)A_{sk}^{-1}r_s(k) \quad (8)$$

其中, $\lambda_s(k)$ 是服从自由度为 m 的 χ^2 分布, 即 $\lambda_k \sim \chi^2(m)$ 。 m 为测量 $Z(k)$ 的维数。故障判定准则为: 若 $\lambda_s(k) > T_D$, 判定有故障; 若 $\lambda_s(k) < T_D$, 判定无故障。 T_D 为预先设置的门限, 可由误警率 P_f 确定。

在实际中, 为克服模型误差带来的影响, 进一步提高故障检测灵敏度, 可采用第 N 步无故障的卡尔曼滤波器输出作为递推器的先验信息, 进而计算 $r_s(k)$ 进行故障检测。

3 故障检测函数的标准化处理

根据式(8)进行故障检测时, 隐含着假定了该故障会对每一个量测量都产生影响。但是, 当传感器发生故障时, 故障对每个元素的影响可能是不同的, 如某些故障可能只影响其中的部分量测量。在这种情况下, 根据式(8)进行检测则可能降低系统的故障检测灵敏度^[5]。为此, 根据正态分布的性质, 可以采用下面的标准化措施, 将对整体的检测问题转化为对每个分量的检测问题。

由于 $r_s(k) \sim N(0, A_k)$, 若记 $l_k = A_k^{-1/2}r_s(k)$, 则有 $E\{l_k\} = 0$, 且 $E\{l_k * l_k^T\} = E\{[A_k^{-1/2}r_s(k)] * [A_k^{-1/2}r_s(k)]^T\} = A_k^{-1/2}E\{r_s(k) * [r_s(k)]^T\}(A_k^{-1/2})^T = I$ 。所以, $l_k \sim N(0, I)$ 。这说明, l_k 的每个元素服从标准的正态分布, 即 $l_k(i) \sim N(0, 1)$, 其中 $i = 1, \dots, m$ 。这样, 即可将对传感器的整体量测问题转化为对每个分量的检测问题。由于 $l_k(i) \sim N(0, 1)$, 则可以构建如下故障检测函数。 $\eta_k(i) = l_k(i) \cdot l_k(i)$ 从而, 根据每个 $\eta_k(i)$ 的故障检测门限 ξ_i (由误警率设定) 即可进行故障检测, 故障判定规则为: 如果 $\eta_k(i) \geq \xi_i$, 则系统有故障; 如果 $\eta_k(i) < \xi_i$, 则系统无故障。若记 $a_k(i) = \eta_k(i) / \xi_i$, 则可将该规则转化为一种更为简洁的偏差比较形式的故障判定规则, 即: 若 $|a_k(i)| \geq 1$, 则系统有故障; 若 $|a_k(i)| \leq 1$, 则系统无故障。

采用以上方法,不但可以提高故障检测灵敏度,还可以对某些故障进行识别。由于该方法实现了对传感器残差向量的每个分量的检测,因而可以判定故障是由哪一个分量引起的,这即实现了故障识别与定位。

4 仿真结果及结论

考虑如下单输入单输出系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = 0.8x(k) + w(k) \\ y(k) = x(k) + v(k) + f(k-m) \end{cases}$$

其中, $w(k)$, $v(k)$ 分别为零均值的高斯白噪声,且 $E\{w(k)\} = 0$, $E\{w(k)w(j)\} = q\delta_{ij}$, $E\{v(k)\} = 0$, $E\{v(k)v(j)\} = r\delta_{ij}$, 并设初始条件为, $\hat{X}(0) = \hat{X}_s(0) = 0$, $P(0) = P_s(0) = 1$, $q = r = 0.01$, $b = 1$, $f(k-m)$ 表示从 m 时刻开始出现的传感器故障量。为说明以上问题,现以一般的残差检验法和本文方法进行对比研究,且记 rs_1 为一般残差检验法的故障检测函数, rs_2 为本文方法的故障检测函数。如果以误警率 $P_f = 0.005$ 选择故障检测门限,则有 $T_D = 7.879$ 。设系统从第 50 步开始传感器发生如下形式的软故障 $f = 0.02 * (k - 50)$, 则仿真结果如图 1 所示。从图中可以看出,根据本文的方法在第 60 步即发现了故障,而根据一般的残差检验法却需要在 90 步左右才可以发现故障。显然,本文方法具有更高的故障检测灵敏度。

针对一般残差检验法对“软故障”的检测不是十分有效的问题,本文分析了其产生“跟踪故障”的根本原因。在此基础上,提出了一种基于系统状态递推器的改进方法,同时为进一步提高故障检测灵敏度和故障定位功能,提出了对故障检测函数进行标准化处理的方法。仿真结果说明了本文方法是有效的,可以在很大程度上提高系统的故障检测灵敏度。

参考文献:

- [1] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 张育林,李东旭. 动态系统故障诊断理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1997.
- [3] Fahmida N. Chowdhury. Ordinary and Neural Chi - Squared Tests for Fault Detection in Multioutput Stochastic Systems [J]. IEEE TRANS on Control Systems Tech, 2000,8(2):372 - 379.
- [4] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
- [5] Brumback B D, Srinath M D. Fault - tolerant Multisensor Navigation System Design [J]. IEEE TRANS on Aerospace and Electric, 1987, AES - 23 (6):738 - 755.

(编辑:姚树峰)

A Modified Residual Test Method Applied to Sensor Failure Detection

GUAN Hua¹, WEI Rui -xuan²

(1. Science Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China; 2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: For the disadvantage of tracking the soft failure of the residual test based on Kalman filter, this paper makes an improvement on the method by using the state propagator. With the aid of normalizing the residual vector with the normal distribution, each component of the residual vector needs to be tested instead of the whole of that. Thus a higher fault detection sensitivity as well as the capability of the fault identification can be obtained according to the presented method. The simulation shows that the method is effective, by using this method the fault detection sensitivity of the system can be improved to a great extent.

Key words: chi - square test; residual test; normal distribution; state propagator

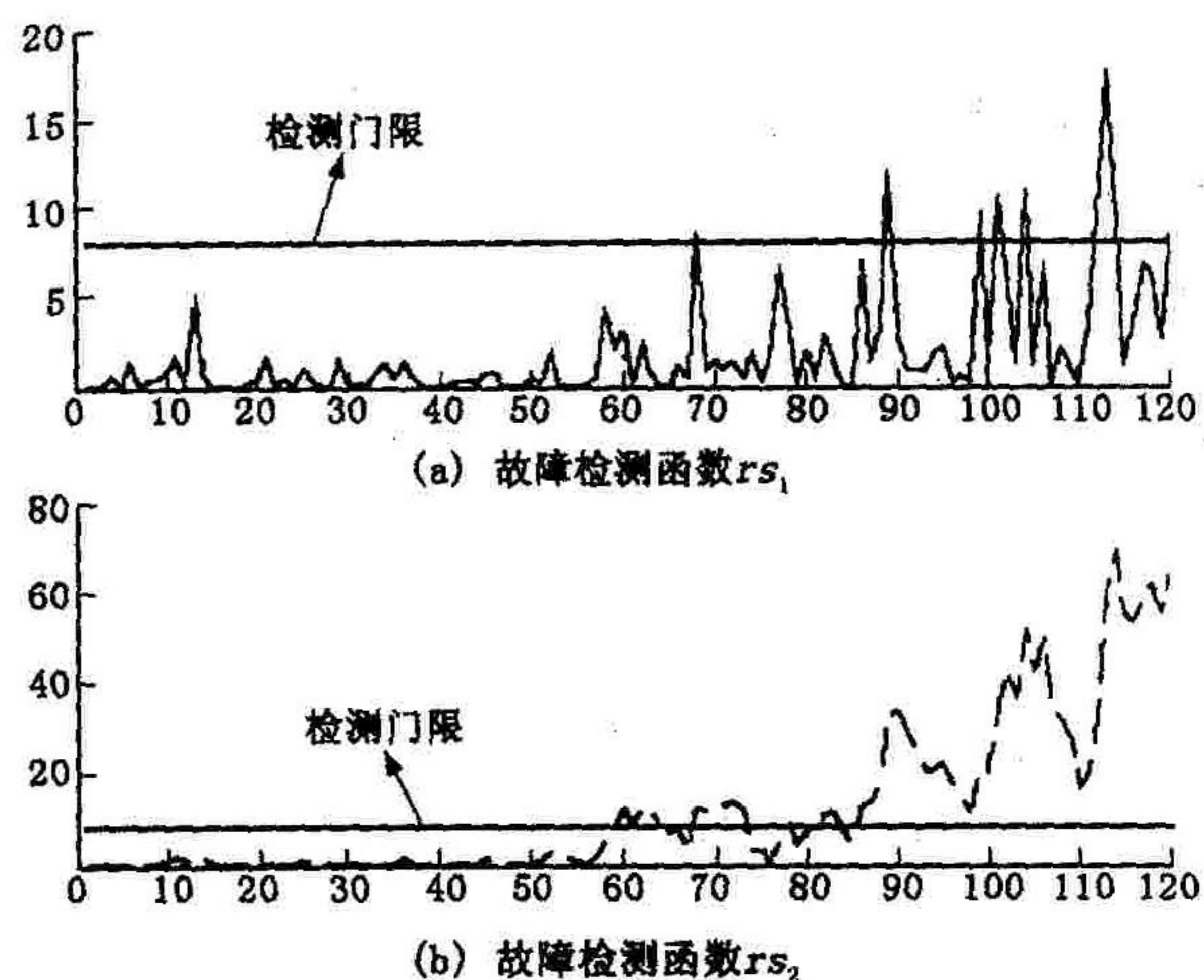


图1 传感器发生故障时两种方法的检测能力比较