

# 比对分析与故障检测技术及其在航天工程中应用

胡绍林<sup>1,2</sup>, Meinke Karl<sup>2</sup>, 陈如山<sup>1</sup>, Huajiang Ouyang<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学, 南京 210017; 2. Royal Institute of Technology, SE - 100 44, Sweden; 3. The University of Liverpool, L69 7ZX, United Kingdom)

**摘要:** 比对分析是工程信号分析与故障诊断的重要手段之一。论文提出并构建了3组可以分别适用于不同情况的数值比对算法,并建立了基于比对残差的渐变型故障分离和突发性故障诊断的实用方法。通过实例说明了比对分析方法在航天外测故障诊断等领域的重要应用。

**关键词:** 比对分析; 故障检测; 故障诊断; 趋势项分离

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)04-0001-04

比对分析是分析测量数据质量和判断所采用数据处理方法可靠性的常用方法之一,在航天器测控和过程监视等领域有广泛应用<sup>[1]</sup>。在航天器外测数据事后分析与处理过程中,为了判断某设备跟踪质量或分析数据处理的正确性和有效性,常将一组数据与其它设备或处理方法得到的数据进行比对,分析比对差值,并以此进行推断和决策。常用的比对方法有同类信息直接比对、不同源数据转换后的互比,以及测量信息与标称弹道反解数据的反解比较等多种形式。

## 1 数值比对与残差生成的一般方法

数据比对通常分为自比和互比两大类,其中互比又可进一步区分为直接互比和间接互比等。下面,面向航天工程数据处理的技术需求,建立几组实用的数据比对算法:

### 1.1 直接互比法

直接相互比对,简称直接互比,是比对分析中最简单的和最常用的情形。假定被观测对象  $X$  同时被两套(或多套)测量设备观测。本文以两套设备为例展开研究。假定两套设备获取的测量数据分别为  $X_1(t)$  和  $X_2(t)$ , 其中  $t$  为采样时间,如果测量数据  $X_1(t)$  和  $X_2(t)$  都是被观测对象  $X$  的测量值,且量纲和物理含义相同,则可对两组数据直接做差:

$$\delta_{1,2}(t) = (X_1(t) - X) - (X_2(t) - X) = X_1(t) - X_2(t) \quad (1)$$

由式(1)可以看出,直接互比残差实质上是两组测量值各自偏离真实值的差值的比较。可以设想,如果采用计算机仿真或其它任何途径可以获得观测对象  $X$  的一组粗略计算值(未必是准确的),则通过可以产生三组差值:

$$\delta_{1,0}(t) = X_1(t) - X(t), \delta_{2,0}(t) = X_2(t) - X(t), \delta_{1,2}(t) = X_1(t) - X_2(t) \quad (2)$$

利用式(2)的三组比对差值,不仅可以诊断观测设备的故障,也可以用来分析被观测对象本身的异常变化。具体算法,将在第2节中详细讨论。

收稿日期:2007-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90305007),江苏省自然科学基金资助项目(BK2006200),中英联合项目(NS-FC-RS/2005/R3-JP),瑞典研究院国际项目(SI-05483)

作者简介:胡绍林(1964-),男,安徽岳西人,研究员,瑞典皇家理工大学和英国 Liverpool 大学访问教授,近期从事计算机控制与系统安全研究;

Meinke Karl,男,瑞典籍,教授,近期研究方向为软件测试研究;

陈如山(1965-),男,江苏泰州人,教授,近期从事信号处理研究;

Huajiang Ouyang,男,英国籍,Reader,近期从事振动控制与测试技术研究。

## 1.2 转换互比法

所谓转换互比,是指两套(或多套)不同功能的设备或相同功能但所处状态不同的设备,测量同一对象  $X$  获得不同物理量  $Z_a$  和  $Z_b$ ,如果观测对象  $X$  与测量数据  $Z_a$  及  $Z_b$  之间存在转换关系  $Z_a = \xi_a(X)$  和  $Z_b = \xi_b(X)$ ,通过数据转换和比对处理,则可计算残差

$$\delta_{a,b}(t) = \xi_a(X) - \xi_a(\xi_b^{-1}(Z_b)) \text{ 或 } \delta_{b,a}(t) = \xi_b(X) - \xi_b(\xi_a^{-1}(Z_a)) \text{ 或 } \delta_X(t) = \xi_a^{-1}(Z_a) - \xi_b^{-1}(Z_b)$$

必须指出的是,有时受物理条件或数学工具的限制,上述三个比对残差不是总能同时得到的。

转换比对法在航天测控等领域中有广泛应用。譬如,布设于不同地理位置的几台雷达测量数据之间相互比对,脉冲雷达定位数据与干涉仪测速数据等不同类型设备不同类型数据之间的转换比对,等等,都可以归结到转换比对问题,在统一框架下进行分析和诊断。

## 1.3 自比对法

无论是直接比对还是转换比对,都涉及同一对象的两组数据之间比对。但是,在复杂系统状态监视与故障诊断过程中,较常见的还有仅一组测量数据的情形。对此,本节以双重中值滤波算法<sup>[2]</sup>为基础,建立测量数据序列  $\{y(t_i), t_i = t_0 + ih, i = 1, 2, 3, \dots\}$  的自比对算法:

$$\delta_y(t_i) = y(t_i) - \hat{y}_i \quad (1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中:  $\{\hat{y}_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$  为数据序列  $\{y(t_i), t_i = t_0 + ih, i = 1, 2, 3, \dots\}$  的滑动双重中值平滑,计算方法如下<sup>[2]</sup>:

1) 设置参数  $k = m$ , 构造滑动中值平滑序列  $\{\hat{y}_{jlm} | j = 1, 2, 3, \dots\}$

$$\hat{y}_{jlm} = \begin{cases} y_j & j = 1, \dots, k; n - k + 1, \dots, n \\ \text{med} \{y_i\} & k < j \leq n - k \end{cases} \quad (4)$$

2) 设置参数  $k = s$ , 按式(4)对  $\{\hat{y}_{ilm} | i = 1, 2, 3, \dots\}$  进行二次平滑,记结果为  $\{\hat{y}_{ils} | i = 1, 2, 3, \dots\}$ ;

3) 设置参数  $p$ , 取  $\bar{y}_{jlp} = \hat{y}_{jls}$  ( $j = 1, \dots, p, n - p + 1, \dots, n$ ) 并对  $\{\hat{y}_{jls} | i = 1, 2, 3, \dots\}$  做局部均值平滑:

$$\bar{y}_{jlp} = (2p + 1)^{-1} \sum_{i=j-p}^{j+p} \hat{y}_{jls} \quad (p + 1 \leq j \leq n - p) \quad (5)$$

4) 为补偿中值平滑对采样数据列中趋势性分量的不利影响,构造平滑残差:

$$\Delta y_i = y_i - \bar{y}_{jlp} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

5) 对于序列  $\{\Delta y_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$ , 重复1) - 3), 得残差的滑动平滑估计  $\{\Delta \bar{y}_{jls} | i = 1, 2, 3, \dots\}$ ;

6) 计算序列  $\{y_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$  的最终平滑结果:  $\bar{y}_i = \bar{y}_{jls} + \Delta \bar{y}_{jls}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )。

上述平滑算法的优点是具有很强的容错能力<sup>[2]</sup>,小样本崩溃点接近 50%,只要测量值序列中任意相邻  $m + s$  个数据的片段里异常数据个数  $\leq (m + s - 2)/2$  个,且斑点长度  $\leq \min\{m/2, s/2\} - 1$ ,则可确保数据平滑效果可靠。另外,利用上述滑动平滑算法产生的残差(6),能很好地保留数据序列  $\{y_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$  中脉冲型故障和阶跃型故障的故障信息,但会消除或者部分消除低频渐变型故障的故障信息。

## 2 基于比对残差的故障与诊断

为便于叙述,本节将3类不同残差合记为  $\{\delta(t_i) | i = 1, 2, 3, \dots\}$ 。一般来说自比对残差主要用于突发性故障的检测与诊断;互比残差则即可用于突发性故障也可用于渐变型故障的检测与诊断。在建立故障的检测与诊断方法之前,残差序列的平稳性是首先必须考虑的问题。

### 2.1 残差序列平稳性的容错游程检验

关于时间序列平稳性的统计检验,较常用的方法有逆系数检验法和游程检验法等<sup>[3]</sup>。但是,这两种方法缺乏对异常数据的容错能力,残差序列中的突发性故障信息会影响统计检验的可信度。鉴于此,本节将对游程检验方法进行容错改进。具体地,选用 Huber 型  $\phi$ -函数<sup>[1]</sup>将时间序列游程检验方法中的关键环节-序列中心化算法修改为

$$\bar{\delta}(t_i) = \delta(t_i) - \frac{1}{\Theta_n} \sum_{i=1}^n \delta(t_i) \phi \left( \left| \delta(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(t_i) \right| \right) \quad (7)$$

式中:  $\Theta_n = \sum_{i=1}^n \phi\left(\left|\delta(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(t_i)\right|\right)$ ;  $\phi(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq c \\ x, & |x| > c \end{cases}$  ( $c$  为适当选定的门限函数)。统计式(7) 序列  $\{\bar{\delta}(t_i)\}$  中正号和负号的改换次数, 记为  $\gamma_\xi$  (通常称  $\gamma_\xi$  为数据列的游程数), 构造统计量:

$$v_\xi = \frac{n \sqrt{n-1}}{\sqrt{2n_1 n_2 (2n_1 n_2 - n)}} \left( \gamma_\xi - 2 \frac{n_1 n_2}{n} \right) \quad (8)$$

式中  $n_1$  为序列  $\{\bar{\delta}(t_i) | i=1, \dots, n\}$  中“+”号出现总数(含零);  $n_2$  则为该序列中“-”号出现的总数。

平稳性检验: 当值  $|v_\xi| > 2$  时, 判断  $\{\bar{\delta}(t_i) | i=1, \dots, n\}$  存在随时间变化趋势; 反之, 则认为残差序列是平稳的。

### 2.2 渐变型故障的拟合与分离

游程检验统计量(8) 特别适合于诊断外测系统是否存在趋势性异常和渐变型故障。对于诊断出的比对残差序列  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$  中含有渐变型故障分量的情形, 下面简要给出故障分量的容错拟合法。

由 Weierstrass 第一逼近定理<sup>[1]</sup>, 可以假定渐变型故障分量能够用适当阶数的多项式逼近, 即

$$\delta(t_i) = \alpha_0 + \alpha_1 t_i + \dots + \alpha_p t_i^p + \varepsilon(t_i) \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon(t)$  为拟合误差分量;  $p$  为多项式阶次;  $(\alpha_0, \dots, \alpha_p)$  为待估的拟合系数。一般地,  $p$  可以采用 AIC 准则确定<sup>[3]</sup>。当采样序列中无突发性异常数据时, 系数  $(\alpha_0, \dots, \alpha_p)$  通常可用最小二乘(LS)估计确定:

$$\begin{pmatrix} \hat{\alpha}_0 \\ \vdots \\ \hat{\alpha}_p \end{pmatrix} = (\Pi_n^T \Pi_n)^{-1} \Pi_n^T \begin{pmatrix} \delta(t_1) \\ \vdots \\ \delta(t_n) \end{pmatrix}, \quad \Pi_n = \begin{bmatrix} t_1^0 & \dots & t_1^p \\ \vdots & & \vdots \\ t_n^0 & \dots & t_n^p \end{bmatrix} \quad (10)$$

鉴于 LS 估计存在容易受异常数据影响和缺乏对突发性故障的容错能力等缺点, 本文将模型参数的 LS 估计算式(10)改进为

$$\begin{pmatrix} \hat{\alpha}_0^\phi \\ \vdots \\ \hat{\alpha}_p^\phi \end{pmatrix} = (\Pi_n^T \Pi_n)^{-1} \Pi_n^T \begin{pmatrix} \bar{\delta}_{LS}(t_1) + \bar{\delta}_{LS}(t_1) \phi(\bar{\delta}_{LS}(t_1)) \\ \vdots \\ \bar{\delta}_{LS}(t_n) + \bar{\delta}_{LS}(t_n) \phi(\bar{\delta}_{LS}(t_n)) \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中:  $\bar{\delta}_{LS}(t_i) = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 t_i + \dots + \hat{\alpha}_p t_i^p$ ;  $\bar{\delta}_{LS}(t_i) = \delta(t_i) - \bar{\delta}_{LS}(t_i)$ , ( $i=1, \dots, n$ ) 为 LS 拟合残差;  $\phi(\cdot)$  为 Huber 型门限函数<sup>[1]</sup>。由式(11), 结合模型(9), 可给出渐变型故障趋势分量变化的拟合曲线为

$$\bar{\delta}_\phi(t_i) = \hat{\alpha}_0^\phi + \hat{\alpha}_1 t_i + \dots + \hat{\alpha}_p^\phi t_i^p \quad (12)$$

利用趋势分量的容错拟合估计式(12), 可以很容易地实现残差序列  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$  中渐变型故障的统计分离, 使之变为(或接近)均值平稳序列。

### 2.3 突发性故障的检测与诊断

对于容错游程检验(8)判断为平稳过程的比对差序列  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$ , 突发性故障的典型表现形式是比对序列中含有孤立型异常数据、斑点型异常数据和数据台阶跳跃。

当比对差序列  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$  散点图中存在毛刺状的疑似孤立型或斑点型的异常症状时, 可以构造比对残差方差的最稳健估计<sup>[4]</sup>:

$$\hat{\sigma}_\delta = 1.483 \operatorname{med}_{i=1, \dots, n} \{ |\delta(t_i) - \operatorname{med}_{i=1, \dots, n} \{\delta(t_i)\}| \}$$

采用“ $3\sigma$ ”进行故障诊断: 当  $\delta(t_i) \notin [-3\hat{\sigma}_\delta, 3\hat{\sigma}_\delta]$  时, 判断对象在  $t_i$  时刻可能发生突发性故障。

如果比对差序列  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$  散点图中存在台阶状跳跃的异常症状, 可以通过对  $\{\delta(t_i) | i=1, \dots, n\}$  一阶差分, 生成差分序列  $\nabla\delta(t_i) = \delta(t_i) - \delta(t_{i-1})$ , 由此将原序列的阶跃型故障检测与诊断问题转化为差分序列  $\{\nabla\delta(t_i)\}$  的脉冲型突变检测与诊断问题, 采用前文所述方法处理。

## 3 应用实例

分别布站于两不同地理位置的脉冲雷达 I 和 II 同时跟踪同一空间飞行器, 获得目标相对两组测站的距离  $R$ 、方位角  $A$  和俯仰角  $E$  的测量数据序列  $(R_I(t), A_I(t), E_I(t))$  与  $(R_{II}(t), A_{II}(t), E_{II}(t))$ 。由于雷达

布站在不同地点,显然无法通过直接比对判断数据质量。

图1是采用间接互比方法计算的比对残差。比对方法:由 $(R_I(t), A_I(t), E_I(t))$ 计算目标在雷达I测站坐标系下坐标 $(x_{I \rightarrow I}(t), y_{I \rightarrow I}(t), z_{I \rightarrow I}(t))$ ,通过坐标原点平移和轴系旋转,得到目标相对于测站坐标系II的坐标 $(x_{I \rightarrow II}(t), y_{I \rightarrow II}(t), z_{I \rightarrow II}(t))$ ,进而计算出目标相对测站II的 $(R_{I \rightarrow II}(t), A_{I \rightarrow II}(t), E_{I \rightarrow II}(t))$ ,计算 $(R_{II}(t), A_{II}(t), E_{II}(t))$ 与 $(R_{I \rightarrow II}(t), A_{I \rightarrow II}(t), E_{I \rightarrow II}(t))$ 之间的比对差。

从比对残差图1中实线可以明显诊断出,雷达II可能存在渐变型的故障或设备工作状态异常。实际诊断结果是雷达II时间系统存在0.05s的时标错误。图1中虚线是修复时间系统后的比对残差。

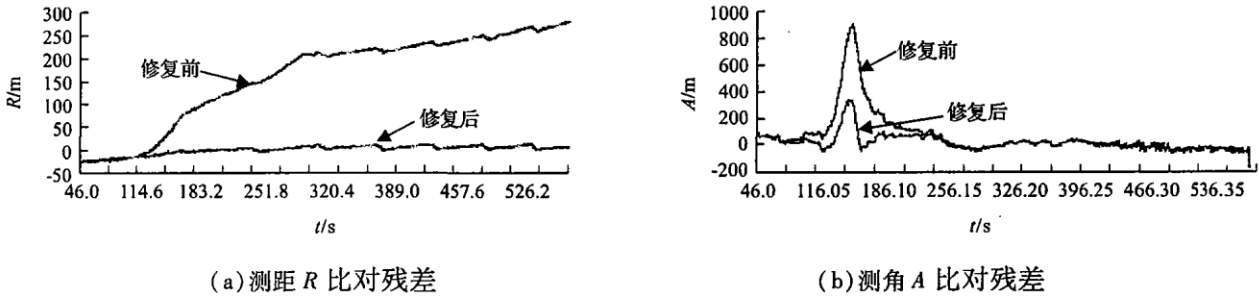


图1 两雷达测量数据转换比对残差

从上述应用实例可以看出,比对分析和故障诊断是一项并不很复杂的工作。但是,如果要能准确、科学地对比对结果进行分析与诊断,则有望找出比对残差中可能出现的长弧段异常、野值、斑点、随机误差超标、系统误差残差中存在趋势性分量等,对保障靶场试验安全性具有重要的工程价值。

#### 参考文献:

- [1] 胡绍林,孙国基.过程监控技术及应[M].北京:国际工业出版社,2001:1-67.
- [2] 胡绍林,黄刘生.非平稳信号II型双重中值容错滤波算法[J].系统仿真学报,2004,16(7):1580-1584.
- [3] 米红,张文章.实用现代统计分析方法与SPSS应用[M].北京:当代中国出版社,2000:34-99.
- [4] Hampel F, Ronchetti E, Rousseeuw P, et al. Robust Statistics - the Approach Based on Influence[M]. John Wiley, 1986:1-220.

(编辑:姚树峰)

## Comparison Analysis and Fault Detection with Applications in Tracking Spacecraft

HU Shao - lin<sup>1,2</sup>, Meinke Karl<sup>2</sup>, CHEN Ru - shan<sup>1</sup>, OUYANG Huajiang<sup>3</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210017, China; 2. Royal Institute of Technology, SE - 100 44, Sweden; 3. The University of Liverpool, L69 7ZX, UK)

**Abstract:** Comparison analysis is a key tool to analyze signal and to detect faults in engineering. There are three different kinds of algorithms are set up to compare signals. Based on these new algorithms, several practical approaches are built to detach gradual change and to diagnose abrupt faults. A practical example is given from a space - flight engineering mission to show that methods given in this paper are valuable.

**Key words:** comparison analysis; fault detection; fault diagnosis; estimation of abnormal tendency