

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.03

数据采集系统非典型采样故障的特征识别与定量表征

梁志国

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 针对数据采集系统断续性非典型采样故障, 提出一种以正弦激励为基础, 引入无故障拓展曲线为参照对象, 使用不同故障点之间的稳定测量曲线段与相对应的拓展曲线段之间的延迟时间差, 进行故障恢复时间确定的方法, 最终以每个故障点的故障恢复时间、不同故障点的时间间隔为特征进行故障识别与表征。在实际获取的非典型故障曲线上的识别分析与表征结果, 验证了本文所述方法的实用性与可行性。

关键词: 计量学; 数据采集; 采样; 故障; 识别; 表征; 评价

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)06-0017-06

Feature Recognition and Quantitative Characterization of A Typical Sampling Faults in Data Acquisition Systems

LIANG Zhiguo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095)

Abstract: Focusing on the intermittent and atypical sampling faults of the data acquisition system, a method is proposed based on sinusoidal excitation, introducing a fault-free expansion curve as the reference object, and using the stable measurement curve segment between different fault segment points and the corresponding expansion curve segment. The delay time difference is determined, and the fault recovery time is determined. Finally, the fault recovery time of each fault segment and the time interval of different fault segments are used for fault identification and characterization. The identification analysis and characterization results of the atypical fault curves obtained verify the practicability and feasibility of the method described in this article.

Key words: metrology; data acquisition; sampling; fault; identification; characterization; evaluation

0 引言

任何仪器与系统的使用过程中, 均可能产生故障。其中, 有一类故障的发作具有偶然性和条件性, 在正常使用过程中很难被发现, 且故障机理和发生条件不够明确且复现性差。这里, 我们称其为非典型故障。实际上, 在电子仪器设备中, 元器件的软击穿, 焊点的虚焊, 接插件的松动等, 均可能导致这类非典型故障出现。之所以称其为非典型故障, 主要是因为大多数使用条件下, 它们极少发生并被有效识别。而故障一旦发生, 便会造成明显的错误结果。数据采集系统非典型采样故障便具有这类特征, 它很难被遇到、

发现和有效识别, 故障原因、机理等尚不明确, 所带来的危害更加隐蔽, 对其进行识别、表征和深入研究十分迫切。

关于数据采集系统采样故障的识别与诊断, 已有很多卓有成效的工作, 一些研究重点针对采样数据系统的故障开展^[1-3], 另外也有侧重于诊断方法^[4]、复杂系统的研究^[5], 以及特别针对传感器的故障诊断研究^[6-7]。其后, 非均匀采样系统的故障诊断也被涉及^[8-10]。无论是提出问题^[11], 进行滤波^[12], 还是设计具体的故障观测器^[13], 它们分别以不同的理论方法, 从时域、频域、传递函数、滤波器等不同角度进行识别, 其多数目标, 都是针

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-10-25

引用格式: 梁志国. 数据采集系统非典型采样故障的特征识别与定量表征[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 17-22.

LIANG Z G. Feature recognition and quantitative characterization of a typical sampling faults in data acquisition systems[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 17-22.

对比较确切的具有良好复现性的采样故障情况，共同的特点是过程比较复杂繁琐，实现起来并不容易。对于复现性较低的非典型采样故障，考虑得比较少。

对于使用具有非典型故障的仪器设备的人们而言，相当于在伴随一枚未知爆炸时间的定时炸弹在工作，何时爆炸，以及损失会有多大，则完全取决于其所工作的场所和任务性质。因此，针对非典型采样故障数据的深入分析和定量表征，对于后续的故障机理分析，故障源头定位，并最终进行故障排除，具有重要的意义和价值。

本文选取了计量校准工作中发现的一台具有非典型采样故障的数据采集系统的故障数据，进行详细分析，对其故障特征进行了确切表征。

1 故障特征及识别

ZJZ-044A 数据采集系统是一种插卡式多通道通用数据采集系统，拥有 32 个测量通道，A/D 位数 12 bit，量程范围 ± 5 V。其在进行误差限、线性度、直流增益等静态特性校准中，均未发现异常。而在进行动态有效位数校准中，发现正弦波拟合结果发散，无法获得正常有效的正弦拟合结果。经过对原始采样数据的调取，发现其采集曲线波形如图 1 所示，存在多个波形规律不连续的故障点。

其中，所用的标准信号源为 FLUKE5700A 多功能校准器，输出的正弦信号幅度为 4.5000 V，频率为 49.000 Hz。数据采集系统的采样速率为 1 kSa/s，数据序列长度为 $n = 2000$ 点。

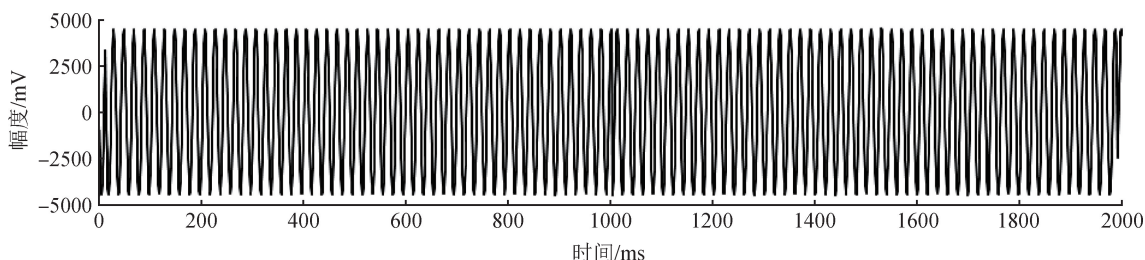


图 1 数据采集系统故障数据

Fig. 1 Failure data of the data acquisition system

2 故障特征分析及表征

从图 1 所示的曲线可见，在全部 2000 个采样点中， $t_0, t_1, \dots, t_{1999}$ 时刻里，存在故障跳变的时刻点分别为 $t_{13}, t_{1004}, t_{1992}$ 时刻点。

表现形式为

$$t_{1004} - t_{13} = 991 \text{ ms},$$

$$t_{1992} - t_{1004} = 988 \text{ ms},$$

$$t_{1004} - t_{13} \approx t_{1992} - t_{1004} \approx 990 \text{ ms}.$$

在这三个故障点上，出现了正弦波形规律的不连续，似乎被人为切掉了一部分。其局部细化波形分别如图 2 ~ 图 4 所示。

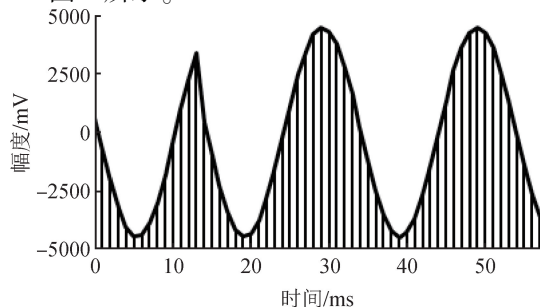


图 2 故障点 t_{13} 附近的局部波形图

Fig. 2 Local waveform near the fault point t_{13}

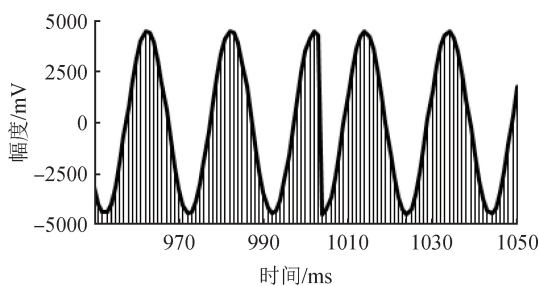


图 3 故障点 t_{1004} 附近的局部波形图

Fig. 3 Local waveform near the fault point t_{1004}

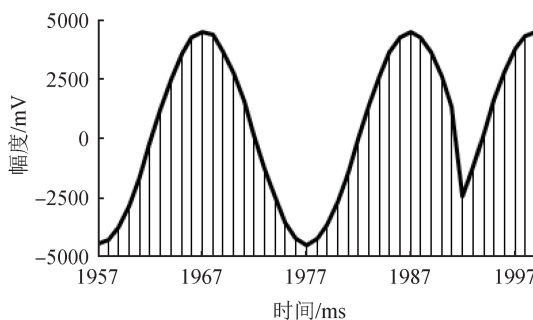


图 4 故障点 t_{1992} 附近的局部波形图

Fig. 4 Local waveform near the fault point t_{1992}

对于故障点处的波形是否真正是“切掉”了一部分波形，以及“切掉”的波形部分有多大，本文将使用模型化处理方式进行识别。

将图 2 所示第 1 个故障点之前的共 14 点局部正常

波形曲线单独提取出来，进行正弦拟合^[14]，获得拟合参数如表 1 所示。

将拟合波形拓展到全部采样点上，如图 5 中虚线部分所示，称其为拓展曲线。

表 1 实测曲线段拟合结果
Tab. 1 Fitting results of measured curve segments

拟合幅度/mV	拟合频率/Hz	拟合初始相位/(°)	拟合直流分量/mV	拟合残差有效值/mV	动态有效位数/bit
4485.596	50.476	82.32	17.858	19.089	7.24

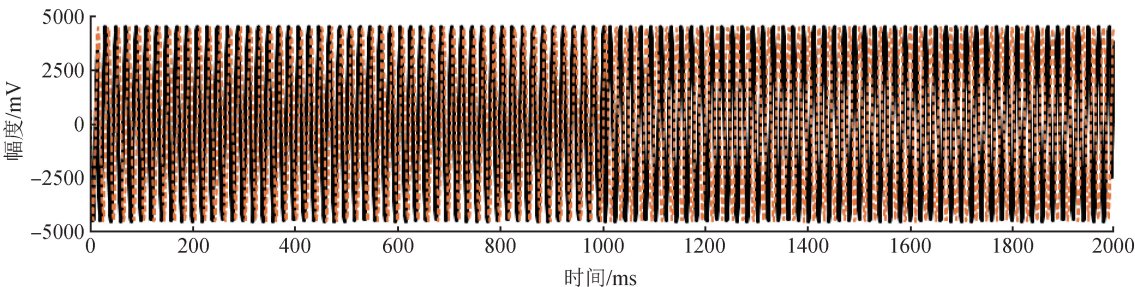


图 5 数据采集系统故障曲线及拓展曲线

Fig. 5 Failure curve and expansion curve of the data acquisition system

将第 1 个故障点之后、第 2 个故障点之前的稳定正常曲线段与对应的拓展曲线段进行 900 点截取，获得如图 6 所示的波形曲线。

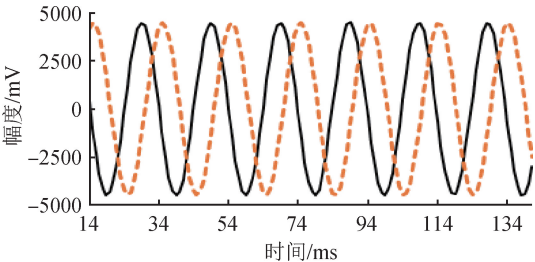


图 6 故障点 1 之后曲线与拓展曲线(局部)

Fig. 6 Measured curve and expansion curve after fault point 1 (partial)

然后，分别拟合^[15]，获得拟合参数如表 2 所示。由此，获得图 6 实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时间差为^[16-17]

$$T_1 = 14.26 \text{ ms} + n \times T_0 \tag{1}$$

式中： T_0 为被测正弦信号的周期， $T_0 = 1/49 \text{ s}$ ； n 为 0 或者某一正整数。不失一般性，此处设 $n = 0$ 。

第 1 个故障点导致采集出现了断裂点，其后的波形被延迟了时间 $\tau_1 = T_1 = 14.26 \text{ ms}$ 。

将第 2 个故障点之后、第 3 个故障点之前的稳定正常曲线段与对应的拓展曲线段进行 900 点截取，获得如图 7 所示的 1004 ms 以后的波形曲线。

然后，分别拟合，获得拟合参数如表 3 所示。

表 2 实测曲线段与拓展曲线段拟合结果

Tab. 2 Fitting results of measured curve segment and extended curve segment

波形曲线	拟合幅度/mV	拟合频率/Hz	拟合初始相位/(°)	拟合直流分量/mV	拟合残差有效值/mV	动态有效位数/bit
实测曲线段	4495.000	50.36071	85.155	-12.270	19.25	7.23
拓展曲线段	4485.596	50.47609	-23.277	-17.859	0.0487	25.82

表 3 实测曲线段与拓展曲线段拟合结果

Tab. 3 Fitting results of measured curve segment and extended curve segment

波形曲线	拟合幅度/mV	拟合频率/Hz	拟合初始相位/(°)	拟合直流分量/mV	拟合残差有效值/mV	动态有效位数/bit
实测曲线段	4494.707	50.361	90.686	-14.458	19.369	7.22
拓展曲线段	4485.596	50.476	238.974	-17.859	0.04693	25.88

由此, 获得故障点 2 之后的实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时间差为

$$T_2 = 8.406 \text{ ms} + m \times T_0 \quad (2)$$

式中: m 为 0 或者某一正整数。

第 2 个故障点导致采集出现了断裂点, 其后的波形被延迟了时间 $\tau_2 = T_2 - \tau_1$ 。

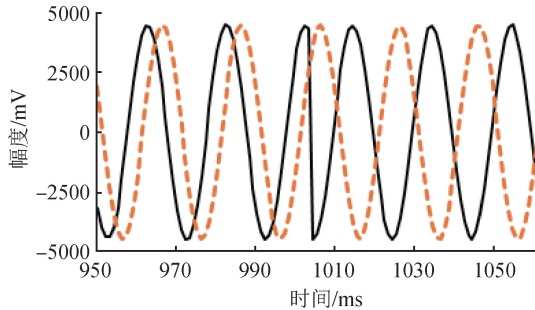


图 7 故障点 2 左右的实测曲线与拓展曲线

Fig. 7 Measured curve and extended curve around fault point 2

由 $\tau_2 > 0$, 可以判定 $m = 1$, $\tau_2 = 14.55 \text{ ms}$ 。

将第 3 个故障点之后的稳定正常曲线段与相应拓展曲线段进行截取, 获得曲线如图 8 所示, 其中 1992 ms 点处开始直至结尾部分的 8 个点属于异常曲线。

然后, 分别拟合^[14], 获得拟合参数如表 4 所示。

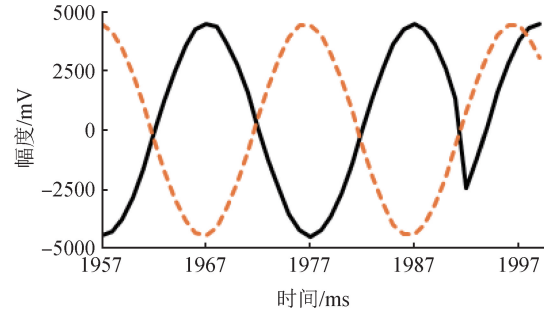


图 8 故障点 3 左右的实测曲线与拓展曲线

Fig. 8 Measured curve and extended curve around fault point 3

表 4 实测曲线段与拓展曲线段拟合结果

Tab. 4 Fitting results of measured curve segment and extended curve segment

波形曲线	拟合幅度/mV	拟合频率/Hz	拟合初始相位/(°)	拟合直流分量/mV	拟合残差有效值/mV	动态有效位数/bit
实测曲线段	4493.602	50.361	-123.450	15.016	7.992	8.50
拓展曲线段	4468.455	50.591	-80.434	35.305	5.394×10^{-6}	29.00

由此, 获得图 8 故障点 3 之后的实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时间差为

$$T_3 = 2.4385 \text{ ms} + q \times T_0 \quad (3)$$

式中: q 为 0 或者某一正整数。

第 3 个故障点导致采集出现了断裂点, 其后的波形被延迟了时间 $\tau_3 = T_3 - \tau_1 - \tau_2$

由 $\tau_3 > 0$, 可以判定 $q = 2$, $\tau_3 = 14.44 \text{ ms}$ 。

3 讨论

从上述故障数据曲线及分析过程可见, 该故障属于数据采集系统中极为少见的非典型采样故障, 而非信号受意外干扰产生的粗大误差。该曲线的波形中, 共有 3 个故障数据点, 由于是针对正弦信号进行的数据采集, 每次故障出现前后的部分, 均属于正常的正弦信号波形, 仅在故障点处出现了波形规律的不连续, 该故障在进行直流和变化缓慢的信号波形测量采集中很难被有效发现和识别, 在采样序列长度不够大时也很难发现, 只有在测量已知的标准信号波形并且采样序列长度足够大时, 才有可能被发现和识别。其每个故障点处造成的波形延迟约为 14 ms, 近似恒定; 两个

故障点之间的时间间隔约为 990 ms, 近似相等。

从波形数据上看, 在每一个故障点后并未出现故障恢复的过渡过程。若存在过渡过程, 需要在结束过渡过程的“正常”曲线波形部分进行截取拟合以获取故障恢复时间才可获得准确测量结果。过渡过程本身, 则可以从实测曲线与拟合回归曲线之间的差异中获取。

结合各个故障点的故障信息及其相互间的位置关系, 可以初步判定, 该非典型采集故障可能属于数据采集系统中采样控制计数器相关的故障, 它每间隔约 990 ms 发作一次, 约需 14 ms 才能从故障状态恢复正常。

若数据采集系统的采集过程使用的是轮询式采集方式, 则轮询计数器有可能在 990 左右的计数值附近出现异常, 或者计数时钟在 990 ms 的间隔存在异常隐患。

若数据采集系统的采集过程使用的是中断式采集方式, 则控制中断的堆栈计数器有可能在 990 左右的计数值附近出现异常阻塞或溢出错误。

若数据采集系统的采集过程使用的是 DMA 采集方式, 则 DMA 控制器的地址计数器有可能在 990 左右的

计数值附近出现异常。

该故障也可能是由于 A/D 转换状态指示电平工作不正常造成的, 当 A/D 转换完毕后, 需要变动其完毕状态指示电平(由低到高, 或者由高到低)表示其数据转换已经完成, 可以读取了。若该电平变动异常, 则导致相应读取数据的操作迟迟不能被执行, 也会导致出现这种不连续的断点故障。

该故障的定位、维修、维护, 可以从这些方面着手进行。

4 结论

综上所述, 针对本文所述这类波形规律不连续的非典型采样故障的数据采集系统, 使用正弦激励, 利用分段正弦拟合方式进行故障参数识别是一种切实可行的方法。该方法不仅可以判别出每次采样故障的恢复时间, 以及在故障恢复过程中是否存在过渡过程, 还可以判断出相邻故障点之间的时间间隔, 从而进行更为确切的故障判别与诊断。

非典型采样故障数据采集系统的故障分析与表征方法和过程总结归纳如下:

1) 利用正弦信号对数据采集系统进行激励, 获得含有 p 处不连续的非典型采样故障的采样序列, 并且从起始点开始的一段波形曲线是正常无故障波形;

2) 截取起始点开始的一段正常无故障波形进行正弦拟合, 获得拟合曲线, 并将其拓展到全序列, 形成拓展序列;

3) 将第 1 个故障段之后、第 2 个故障段之前的稳定正常曲线段与对应的拓展曲线段进行波形截取。然后, 分别拟合, 获得实测曲线段拟合参数, 以及拓展曲线段拟合参数。

计算获得实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时间差为

$$T_1 = \Delta t_1 + n \times T_0 \quad (4)$$

式中: T_0 为被测正弦信号的周期; Δt_1 为两条曲线直接的相位差对应的时间差; n 为 0 或者某一正整数。不失一般性, 此处可设 $n=0$ 。

第 1 个故障点导致采集出现了断裂点, 其后的波形被延迟了时间 τ_1 , $\tau_1 = T_1$ 。

4) 将第 k 个故障段之后、第 $k+1$ 个故障段之前的稳定正常曲线段与对应的拓展曲线段进行波形截取。然后, 分别拟合, 获得实测曲线段拟合参数, 以及拓展曲线段拟合参数。

计算获得实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时

间差为

$$T_k = \Delta t_k + m \Delta T_0 \quad (5)$$

式中: Δt_k 为两条曲线直接的相位差对应的时间差; m 为 0 或者某一正整数。

第 k 个故障点导致采集出现了断裂点, 其后的波形被延迟了时间 τ_k 。

$$\tau_k = T_k - \sum_{i=1}^{k-1} \tau_i \quad (6)$$

$$\tau_k > 0 \quad (k = 1, 2, \dots, p-1) \quad (7)$$

由式(6)、式(7)判定 m 的取值。

5) 将第 p 个故障段之后直至序列结尾的稳定正常曲线段与对应的拓展曲线段进行波形截取。然后, 分别拟合, 获得实测曲线段拟合参数, 以及拓展曲线段拟合参数。

计算获得实测曲线段相对于拓展曲线段的延迟时间差为

$$T_p = \Delta t_p + q \times T_0 \quad (8)$$

式中: Δt_p 为两条曲线直接的相位差对应的时间差; q 为 0 或者某一正整数。

第 p 个故障段导致采集出现了断裂点, 其后的波形被延迟了时间 τ_p 。

$$\tau_p = T_p - \sum_{i=1}^{p-1} \tau_i \quad (9)$$

$$\tau_p > 0 \quad (10)$$

由式(9)、式(10)判定 q 的取值。

由于采集序列的有限长特征, 以及故障发作点在采集序列上出现位置的不可控, 导致各个曲线段的长短不一, 有些可以用多周期正弦拟合方式进行分析, 而另外一些可能需要使用残周期拟合方式进行分析, 这在实际分析过程中需要引起注意。当然, 它们的误差和不确定度也将有很大差异。

参考文献

- [1] 邱爱兵. 采样数据系统的故障诊断方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
QIU A B. Research on fault diagnosis method for sampled-data systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [2] 张萍. 采样数据系统的故障检测方法[D]. 北京: 清华大学, 2002.
ZHANG P. Fault diagnosis method for sampled-data systems [D]. Beijing, Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [3] 张萍, DING S X, 王桂增, 等. 采样数据系统的故障检测[J]. 自动化学报, 2003, 29(2): 306-311.
ZHANG P, DING S X, WANG G Z, et al [J]. Fault detection

- for sampled-data systems[J]. *Acta automatica sinica*, 2003, 29(2): 306–311. (in Chinese)
- [4] 张萍, DING S, 王桂增, 等. 采样数据系统故障检测的 H^∞ 方法[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(3): 361–366.
ZHANG P, DING S, WANG G Z, et al. H^∞ approach to fault detection in sampled-data systems[J]. *Control theory & applications*, 2003, 20(3): 361–366. (in Chinese)
- [5] 邱爱兵, 文成林, 姜斌. 基于混杂系统方法的一类采样数据系统鲁棒故障检测[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1182–1188.
QIU A B, WEN C L, JIANG B. A hybrid system approach to robust fault detection for a class of sampled-data systems[J]. *Acta automatica sinica*, 2010, 36(8): 1182–1188. (in Chinese)
- [6] 邱爱兵, 姜斌. 基于输出时滞方法的非均匀采样数据系统传感器故障检测[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(12): 1757–1765.
QIU A B, JIANG B. An output delay approach to sensor fault detection for non-uniformly sampled-data systems[J]. *Control theory & applications*, 2010, 27(12): 1757–1765. (in Chinese)
- [7] 尤富强, 王福利, 关守平. 采样数据系统传感器故障的 H^∞ 估计[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(6): 1110–1112.
YOU F Q, WANG F L, GUAN S P. Estimation of sensor faults for sampled-data systems in H^∞ setting. *Control theory & applications*, 2008, 25(6): 1110–1112. (in Chinese)
- [8] FADALI M S, LIU W. Observer-based robust fault detection for a class of multirate sampled-data linear systems[C]//American Control Conference. IEEE, 1999.
- [9] 邱爱兵, 文成林, 姜斌. 一种新的多速率采样系统快速率故障检测设计方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(10): 2240–2245.
QIU A B, WEN C L, JIANG B. A novel fast rate fault detection method for multi-rate sampled systems[J]. *Acta electronica sinica*, 2010, 38(10): 2240–2245. (in Chinese)
- [10] 张宁, 丁锋, 朱大奇. 非均匀采样数据系统的故障检测[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(6): 774–776, 801.
ZHANG N, DING F, ZHU D Q. Fault detection for non-uniformly sampled-data systems[J]. *Computer measurement & control*, 2008, 16(6): 774–776, 801. (in Chinese)
- [11] 张萍, 王桂增, 周东华. 采样数据系统的故障诊断问题[J]. *上海海事大学学报*, 2001, 22(3): 72–77.
ZHANG P, WANG G Z, ZHOU D H. Fault diagnosis for sampled-data systems[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2001, 22(3): 72–77. (in Chinese)
- [12] 胡峰, 温熙森, 孙国基, 等. 采样时间序列的故障数据检测与滑动容错滤波[J]. *上海海运学院学报*, 2001, 22(3): 27–29, 43.
HU F, WEN X S, SUN G J, et al. Outliers detection and fault-tolerant sliding filter for sampled time series[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2001, 22(3): 27–29, 43. (in Chinese)
- [13] 邱爱兵, 文成林, 姜斌. 采样数据系统最优诊断观测器设计[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(8): 979–984.
QIU A B, WEN C L, JIANG B. Optimal diagnostic observer for sampled-data systems[J]. *Control theory & applications*, 2010, 27(8): 979–984. (in Chinese)
- [14] 梁志国, 孟晓风. 残周期正弦波形的四参数拟合[J]. *计量学报*, 2009, 30(3): 245–249.
LIANG Z G, MENG X F. A curve-fit arithmetic of four-parameter sine wave for partial period[J]. *Acta metrologica sinica*, 2009, 30(3): 245–249. (in Chinese)
- [15] 梁志国, 朱济杰, 孟晓风. 四参数正弦曲线拟合的一种收敛算法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(11): 1513–1519.
LIANG Z G, ZHU J J, MENG X X. Convergence algorithm of four-parameter sine wave curve-fit[J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2006, 27(11): 1513–1519. (in Chinese)
- [16] 梁志国, 朱济杰. 数据采集系统通道间延迟时间差的精确评价[J]. *仪器仪表学报*, 1999, 20(6): 619–623.
LIANG Z G, ZHU J J. The evaluation of channel delay of data acquisition systems[J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 1999, 20(6): 619–623. (in Chinese)
- [17] 梁志国. 通道间延迟时间差的测量不确定度[J]. *计量学报*, 2005, 26(4): 354–359.
LIANG Z G. The measurement uncertainty of delay between channels[J]. *Acta metrologica sinica*, 2005, 26(4): 354–359. (in Chinese)