

高精密航天器多余物检测算法研究

刘海江¹, 刘劲松¹, 魏臣隽²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘要: 高精密航天器中内部活动多余物的存在是降低航天器可靠性的重要因素。针对现有多余物检测算法在较强环境噪声下难以有效检测出多余物信号脉冲并排除可动组件干扰的问题, 提出了一种基于谱减法去噪、两级脉冲提取和脉冲发生序列周期性分析的高精密航天器多余物检测算法。利用谱减法实现对环境噪声的有效抑制; 采用两级脉冲提取法对多余物信号与可动组件信号进行脉冲提取; 通过对脉冲发生序列进行周期性分析, 以周期信号相似度作为区分多余物信号和可动组件信号的判别依据, 从而实现对多余物有无的检测。试验验证表明, 该算法能有效检测航天器内多余物与可动组件的存在情况, 识别准确率可达 96%。

关键词: 高精密航天器; 多余物; 脉冲提取; 可动组件

中图分类号: V416.6

文献标志码: A

Detection Algorithm of Remainder in High-Precision Spacecraft

LIU Haijiang¹, LIU Jinsong¹, WEI Chenjun²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Institute of Radio Equipment, Shanghai 200090, China)

Abstract: The presence of internal moving remainder in high-precision spacecraft is an important factor to reduce the reliability of spacecraft. Aiming at the problem that the existing remainder detection algorithm was difficult to effectively detect the remainder pulse and eliminate the interference of the movable component under relatively strong environmental noise, an algorithm for detecting the remainder of high-precision spacecraft based on spectrum subtraction denoising, two-stage pulse extraction and periodic analysis of pulse generation sequences was proposed. The spectrum subtraction method was used to achieve effective suppression of environmental noise. The two-stage pulse extraction method was used to extract the pulse of the remainder signal and the movable component signal. By analyzing the periodicity of the pulse generation

sequence, the periodic signal similarity was used as the discrimination basis for distinguishing the remainder signal and the movable component signal; thereby the detection of the remainder was realized. The experimental verification shows that the proposed algorithm can effectively detect the existence of remainder and movable components in the spacecraft, and the recognition accuracy can reach 96%.

Key words: high-precision spacecraft; remainder; pulse extraction; movable component

高精密航天器内部元器件与节点数量众多, 在生产环节中难免会引入小型金属件、胶块以及涂胶线头等多余物。当高精密航天器处于失重或剧烈震动的工作状态时, 多余物可能会损坏内部精密机械结构或导致绝缘焊点间短路, 甚至造成整个航天器烧毁。目前国内外普遍采用微粒碰撞噪声检测法进行多余物检测试验^[1], 由于其具有非破坏性和高效性, 高精密航天器多余物检测也基于此方法, 但由于航天器内部多余物微粒较小, 其在该类试验中所产生的脉冲信号基本淹没于环境噪声中, 且航天器内部接插件等可动组件信号对多余物检测存在干扰, 因此有效进行试验信号去噪、准确提取信号脉冲并识别可动组件是实现多余物检测的关键^[2-4]。

在噪声抑制方面, 李超^[2]采用卡尔曼滤波对试验信号的噪声进行抑制, 但存在需要准确估计多余物信号模型、噪声模型和阈值的缺点。在脉冲提取方面, 翟国富等^[5]利用基于能量特征的三门限端点检测算法提取信号脉冲, 但其无法排除例如人声的高能量窄频宽脉冲干扰。邵雷阵等^[6]在三门限端点检测算法基础上提出了两级门限法, 但其仅在脉冲信号的提取完整程度上进行了优化。在可动组件识

收稿日期: 2019-09-16

第一作者: 刘海江(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复杂装备数字化设计、智能制造与精密检测技术。E-mail: defensec@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

别方面,陈金豹^[7]利用改进K-平均聚类进行脉冲识别,但其无法判断可动组件的类型。戚乐^[8]采用多特征联合方式表征典型脉冲的特性,但其未给出具体判别依据。王强^[9]采用多特征组件信号识别技术来进行信号分类,但其未考虑可动组件信号的周期发生特性。

本文提出了一种基于谱减法去噪、两级脉冲提取和脉冲发生序列周期性分析的高精密航天器多余物检测算法。采用谱减法对试验信号进行环境噪声抑制处理;通过两级脉冲提取法提取多余物脉冲与可动组件脉冲;利用脉冲发生时间的编码序列求解出的周期信号相似度作为可动组件的识别依据。试验表明,此方法可以有效判断高精密航天器内部多余物的存在情况。

1 算法方案分析

1.1 方案基础

本文基于高精密航天器多余物自动检测系统开发多余物检测算法。检测系统由回转装置、信号检测模块和工控机组成,其中回转装置为多余物试验提供力学条件;信号检测模块对声信号进行采集与处理;工控机内的多余物检测软件可对系统硬件进行控制,同时利用多余物检测算法分析采集的数字音频信号从而实现多余物检测,系统构成图如图1所示。在运动形式选择上,该系统可提供内框转动和外框转动两种转动形式,在自动检测过程中采用内框转动形式进行多余物检测,外框转动用于人工复检操作。

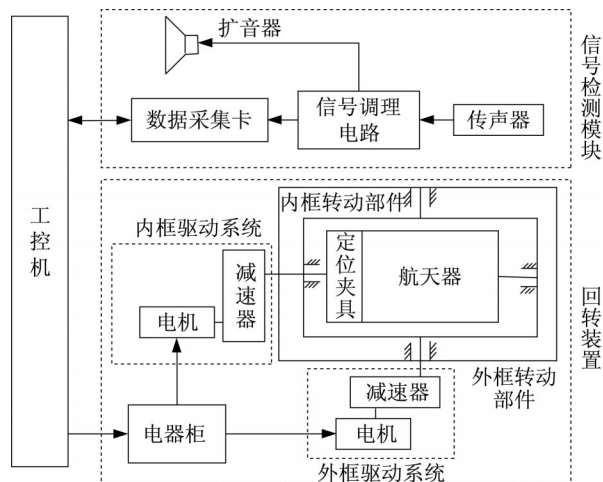


图1 多余物自动检测系统构成图

Fig.1 Composition diagram of remainder automatic detection system

1.2 问题分析

在信号噪声抑制方面,由于检测系统中的电机、减速器等硬件所产生的噪声有着统计平稳性以及碰撞信号不相关的特点,而谱减法对平稳加性噪声有着很好去噪效果,运算量小且实时性强,故采用谱减法对试验信号进行噪声抑制。

在去噪后的信号中,脉冲信号主要包括多余物信号、可动组件信号和干扰信号,其中干扰信号主要为谱减法处理后残留的音乐噪声或其他意外引入的高能量窄频宽脉冲,可根据噪声能量幅值将干扰信号分为低幅值干扰信号和高幅值干扰信号,脉冲信号耦合模型如图2所示。因此准确提取并识别各类脉冲信号即可实现多余物检测。

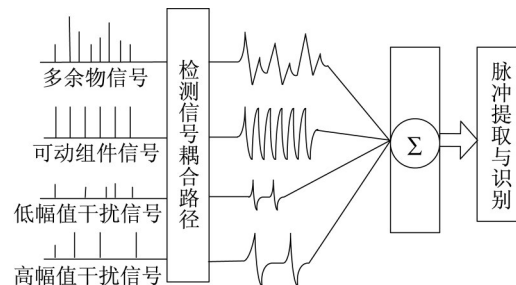


图2 脉冲信号耦合模型

Fig.2 Pulse signal coupling model

在脉冲提取方面,由于多余物信号和可动组件信号两者在时域上呈现窄带式震荡衰减特性,如图3a,图4a所示,可采用短时能量作为第一级识别标准提取出多余物脉冲信号、可动组件信号与高幅值干扰信号;由于多余物信号和可动组件信号在频域上是宽频带分布,如图3b,图4b所示,在采样频率48 KHz下,二者在2.4~15 kHz均有较强分布;而高幅值干扰信号呈现窄频带高幅值特性,如图5b所示的典型干扰信号在大于2.4 kHz后信号强度衰减明显,依据该特点,可利用信号在频域上的能量分布来识别并去除高幅值干扰信号。

在可动组件识别上,依据多余物信号的随机发生性和可动组件信号的周期发生性特点,对提取的脉冲信号发生时间序列进行周期性分析即可实现多余物与可动组件的区分。

1.3 算法流程

多余物检测算法首先利用谱减法对试验信号进行环境噪声抑制处理;在完成去噪后,算法利用两级脉冲提取法提取多余物与可动组件脉冲;对所提取脉冲的发生时间进行周期性分析实现对多余物与可动组件的区分;最后自动给出航天器内是否存在多

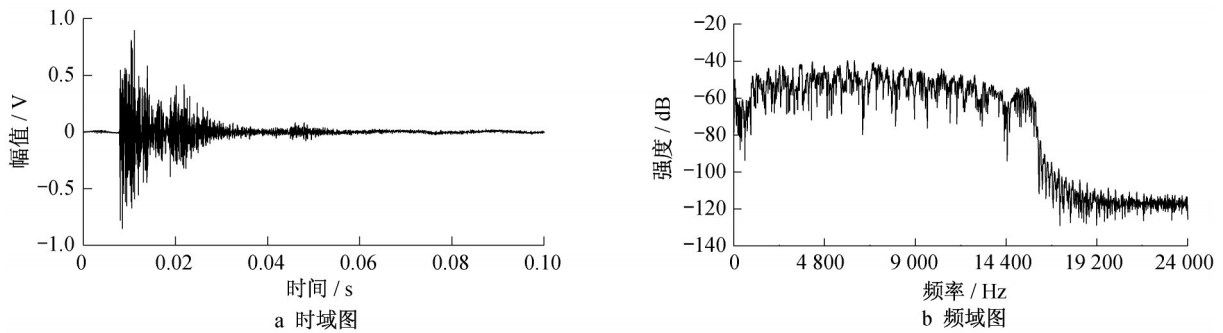


图3 多余物信号

Fig.3 Remainder signal

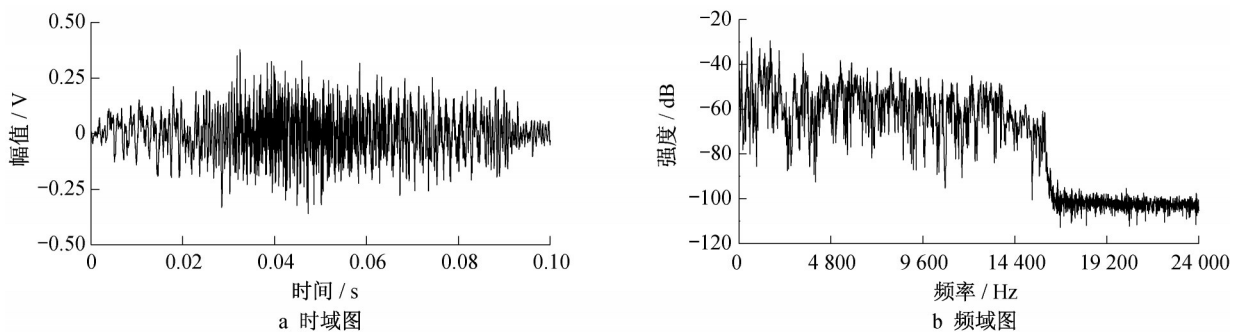


图4 可动组件信号

Fig.4 Movable component signal

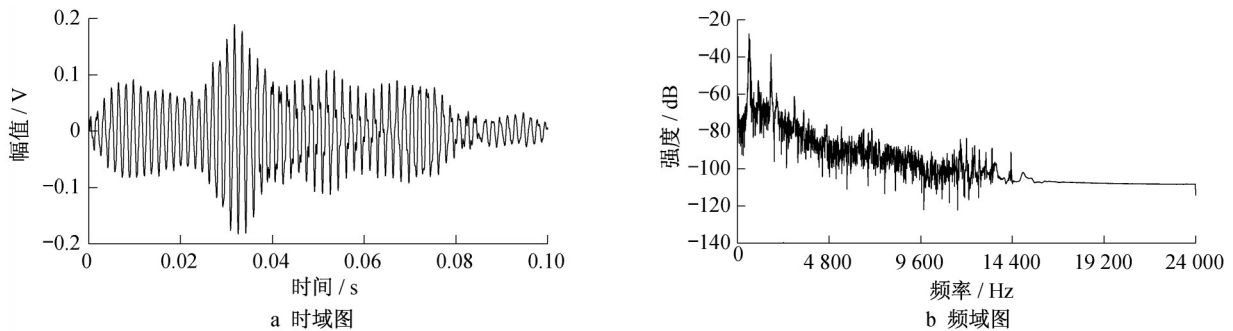


图5 高幅值干扰信号

Fig.5 High amplitude interference signal

余物与可动组件的检测结果。

2 多余物检测算法

2.1 基于谱减法的噪声抑制

2.1.1 谱减法原理^[10]

将带噪信号进行加窗分帧处理后,对每一帧信号 $x_i(m)$ 进行离散傅里叶变换后为

$$X_i(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x_i(m) \exp(j \frac{2\pi mk}{N}), \quad (1)$$

$$k=0, 1, \dots, N-1$$

式中: $x_i(m)$ 表示经加窗分帧处理后的得到的第 i 帧信号; N 为帧长; j 为虚数单位。

每个分量的幅值为 $|X_i(k)|$,它的相位角是:

$$X_{angle}^i(k) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(X_i(k))}{\text{Re}(X_i(k))} \right] \quad (2)$$

已知纯噪声段信号时长为 I_s ,对应的帧数为 N_{is} ,通过对该段噪声进行噪声估算可得噪声的平均能量为

$$D(k) = \frac{1}{N_{is}} \sum_{i=1}^{N_{is}} |X_i(k)|^2 \quad (3)$$

则谱减法为

$$\left| \hat{X}_i(k) \right|^2 = \begin{cases} \left| X_i(k) \right|^2 - a \cdot D(k), & \left| X_i(k) \right|^2 \geq a \cdot D(k) \\ b \cdot D(k), & \left| X_i(k) \right|^2 < a \cdot D(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\left| \hat{X}_i(k) \right|$ 表示谱减后的幅值; a 为过减因子; b 为增益补偿因子。

将 $X_{\text{angle}}^i(k)$ 与 $\left| \hat{X}_i(k) \right|$ 结合, 利用快速傅里叶逆变换, 即可求出谱减后的信号。

2.1.2 谱减法参数确定

在利用谱减法进行试验信号噪声抑制时, 噪声段、过减因子 a 和增益补偿因子 b 的选择对噪声抑制效果影响显著。

在噪声段的选择上, 选取试验信号前导噪声段长度 t 作为谱减法噪声估计的输入信号, 本试验中, t 选为外部振动周期的三分之一。

在纯噪声段, 即当 $\left| X_i(k) \right|^2 < a \cdot D(k)$ 时, 取增益补偿因子 b 为 0.001, 使得谱减后的纯噪声段的能量 $\left| \hat{X}_i(k) \right|^2$ 衰减到原信号的 1‰。

在过减因子 a 的选择上, 由于碰撞信号的短时高能特点, 当过减因子 a 大于临界值 c 时, 谱减后短时脉冲信号段的能量与噪声信号段的能量会产生明显差别, 噪声段得到很好的抑制, 信号能量趋于稳定。由于均方值可表征信号能量的特性, 故采用去噪信号的均方值变化率 R 作为确定临界值 c 的特征参数。本文采用迭代法确定过减因子 a , 取 a 的初值为 1, 步长为 1, 其余参数按上述方法选择, 则均方值变化率 R 表达式为

$$R = \frac{E^m(X^2(t)) - E^{m-1}(X^2(t))}{E^{m-1}(X^2(t))}, \quad m \geq 2 \quad (5)$$

式中: $E^i(X^2(t))$ 表示当 $a=i$ 时谱减后信号的均方值。

对每次 a 取新值均进行谱减法计算, 并对谱减后的输出信号求解均方值变化率 R , 将其作为收敛指标。本文取收敛条件为均方值变化率 R 小于 0.02, 即信号能量趋于稳定时收敛, 并选取此时的过减因子 a 作为谱减法输入参数进行去噪。

为验证谱减法对试验信号的去噪效果, 实验选取了测试时长为 1 min, 脉冲发生周期为 3 s 的金属碰撞信号作为信号输入。图 6 给出了均方值变化率 R 随过减因子 a 的变化曲线, 当 $a=24$ 时, 均方值变化率 R 为 0.018 6, 小于 0.02, 故取过减因子 a 为 24。图 7 展示了当特征参数 $a=24, b=0.001$ 时, 利用谱

减法进行环境去噪的结果, 由谱减后的试验信号可以看出噪声得到了很好的抑制。

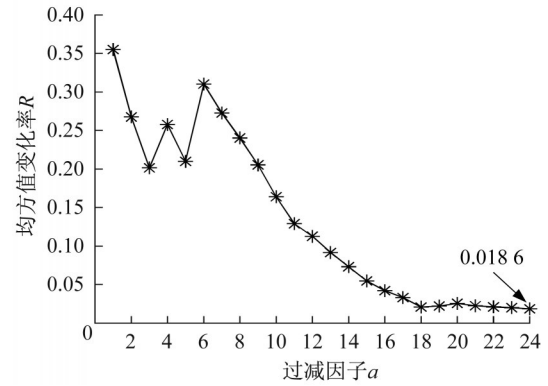


图6 均方值变化率 R 随过减因子 a 的变化曲线

Fig.6 Variation curve of mean square value change rate R changing with over-reduction factor a

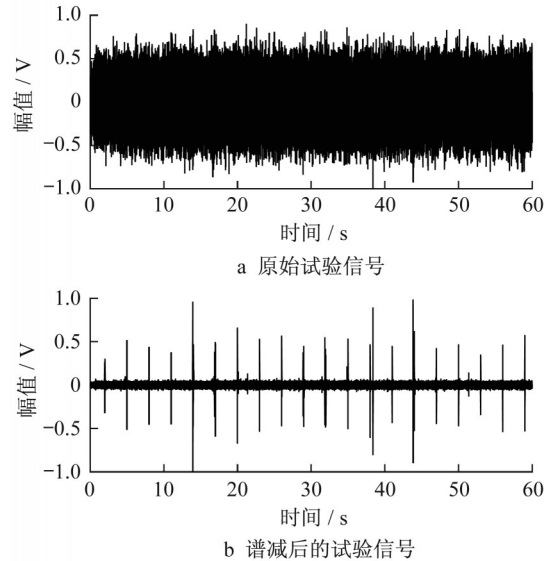


图7 基于谱减法的噪声去噪结果

Fig.7 Denoising results based on spectrum subtraction

2.2 脉冲提取

本文通过两级脉冲提取法提取多余物脉冲与可动组件脉冲, 为后续脉冲识别提供基础。两级脉冲提取法流程图如图 8 所示。

2.2.1 双门限检测法

双门限检测法首先在谱减后的信号短时能量图上选取较高能量门限 T_1 进行粗判, 即确定了代表脉冲大体位置的 b, c 点; 以一个较低能量门限 T_2 作为起止点识别门限, 并从 b 点往左、 c 点往右进行搜索, 分别找出脉冲主体起点 a 与终点 d , 即确定了脉冲信号的主体位置, 如图 9~图 10 所示。双门限检测法

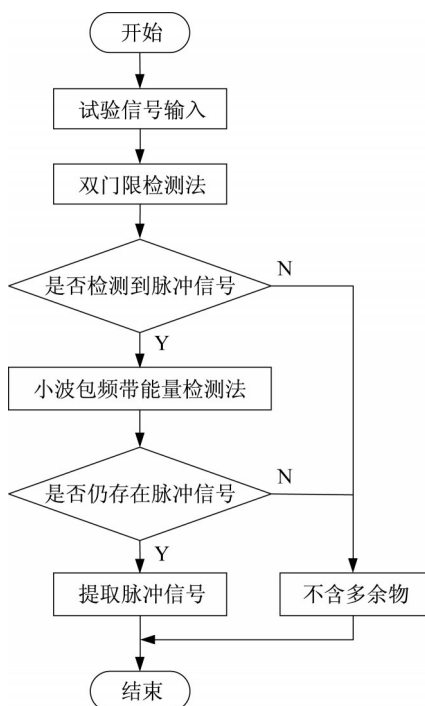


图8 两级脉冲提取法流程图

Fig.8 Flow chart of two-stage pulse extraction method

通过能量门限排除了低幅值脉冲信号干扰,其两个门限的选择与信号本身能量特点相关。本文以整个信号的短时能量均值作为基准 T_{st} ,选取特征系数 a_1 和 a_2 ,则两能量门限可表示为 $T_t = a_1 \cdot T_{st}$, $T_l = a_2 \cdot T_{st}$ 。经过大量实验,采用特征系数 $a_1 = 20$ 和 $a_2 = 0.5$ 可以获得较好的脉冲主体提取效果。

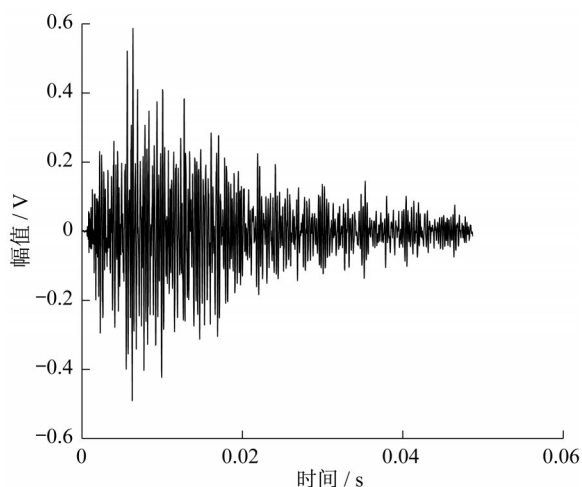


图9 典型碰撞信号幅值图

Fig.9 Typical collision signal amplitude map

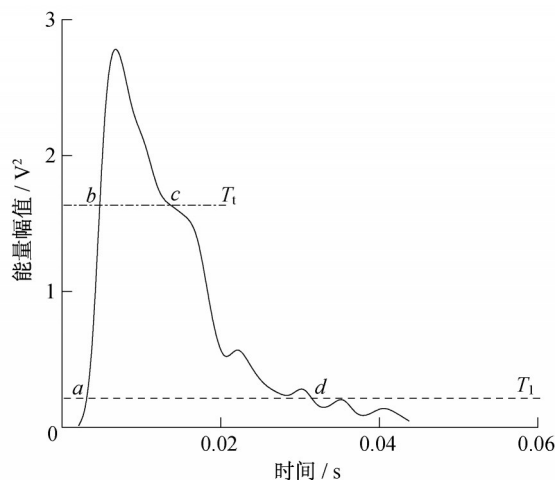


图10 典型碰撞信号短时能量图

Fig.10 Typical collision signal short-time energy diagram

2.2.2 小波包频带能量检测法

小波包频带能量检测法利用小波包分解求解能量分布特征剔除高幅值干扰信号。小波包分解可以同时高频信号与低频信号进行分解,相比于小波变换仅对低频信号进行进一步分解而言,其在高频频带上具有更高的分辨率,故对包含大量中、高频成分信号的时频局部化分析具有很好的效果^[11]。多余物信号和可动组件信号均为短时碰撞信号,二者能量在频域上呈现宽频带分布特性且包含大量中高频成分,而满足能量门限特征的高幅值干扰信号往往呈窄频特性,故可采用小波包对信号能量分布进行分析。将由第一级识别法提取出的脉冲信号进行 J 层满尺度小波包分解,利用信号在 J 层上的能量分布特性正确识别多余物脉冲和可动组件脉冲。

原始信号 $f(x)$ 在正交小波包空间 U_j^n 的能量分布可定义为^[12]

$$E(j, n) = \sum_{k \in Z} [a_k^{(n, j)}]^2 \quad (6)$$

式中: $a_k^{(n, j)}$ 表示 $f(x)$ 在小波包空间上的小波包变换系数。

当原始信号 $f(x)$ 在进行 J 层满尺度小波包分解后,在 J 层的能量分布表示为 $S(J, x)$, 其中 $S(J, x) = [E(J, 0), E(J, 1), E(J, 2), \dots, E(J, 2^J - 1)]$ 。取 K 为 $2^J \times 1$ 阶,且元素全为1的矩阵,则定义能量分布特征矩阵 S_e 为

$$S_e = \left[\frac{E(J, 0)}{S(J, x) \times K}, \frac{E(J, 1)}{S(J, x) \times K}, \frac{E(J, 2)}{S(J, x) \times K}, \dots, \frac{E(J, 2^J - 1)}{S(J, x) \times K} \right] \quad (7)$$

基于能量分布特征矩阵 $S_e, f(x)$ 在正交小波包空间 U_j^n 的能量分布宽度 w 定义为

$$w = \text{num} \{ S_e \geq T_h \} \quad (8)$$

式中: w 表示能量分布宽度; T_h 为能量占比阈值; num 运算为求解给定矩阵的所有元素中满足元素值大于 T_h 值的元素个数。本文选取 T_h 为 5%。

在小波包分解中,小波基函数选择需要结合波形信号特点,并满足正交性、对称性、紧支性、正则性和消失矩等特性。在声发射信号检测中, Daubechies 小波、Symlets 小波和 Coiflets 小波是适用于声信号特点且满足以上条件的优选小波基函数^[13]。而在小波包分解层数的选择上,为保证在采样频率为 f_s 时干扰信号频带主体在第 J 层分解上基本覆盖一个频带范围,以更好地得到能量分布宽度特征,则小波包分解层数可由式(9)确定,即:

$$J = \left\lceil \log_2 \frac{f_s}{\Delta f} - 1 \right\rceil \quad (9)$$

式中: f_s 为采样频率; Δf 为干扰信号主体频宽; $\lceil \cdot \rceil$ 表

示向下取整。

已知采样频率 f_s 为 48 kHz 且由多次实验获得的干扰信号主体频宽 Δf 为 2.8 kHz, 本文采用 Db8 小波对脉冲信号进行 3 层满尺度小波包分解, 得到典型碰撞信号与干扰信号在第 3 层的能量百分比, 如图 11 所示, 根据二者分布特征, 选取能量分布宽度为 3 作为第二级脉冲检测标准, 即当脉冲的能量分布宽度大于等于 3 时判断为碰撞信号, 并进行脉冲提取。

为验证两级脉冲提取法的脉冲提取效果, 利用其对某一可动组件信号进行了脉冲提取, 其结果示意图如图 12 所示, 可以看出该方法对排除干扰信号与提取信号脉冲有着很好的效果。对 100 组试验信号进行试验, 脉冲识别准确率达到 98%。

当试验信号经过两级脉冲提取法后未提取出脉冲, 则判断该航天器内不含有多余物; 当两级脉冲提取法检测出脉冲, 则进行下文脉冲识别。

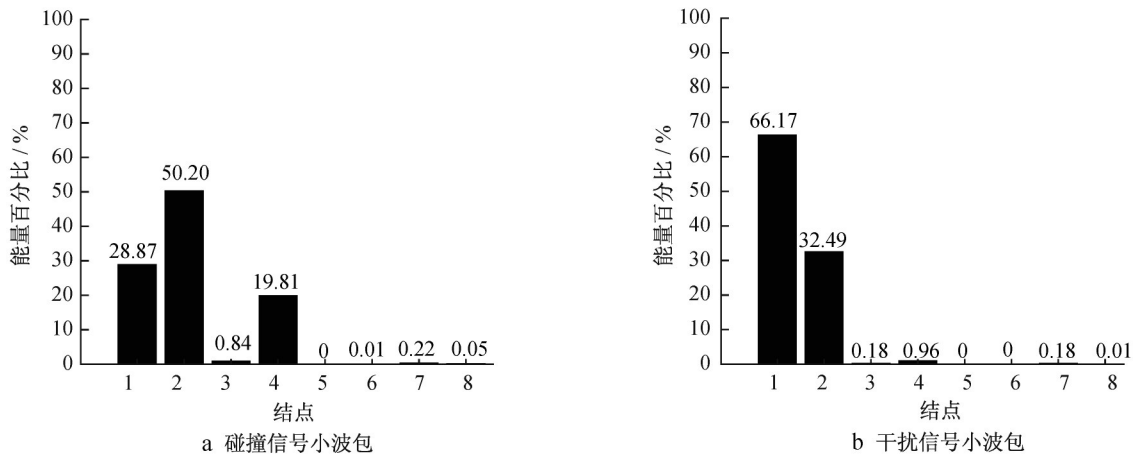


图 11 典型碰撞信号和干扰信号第三层能量百分比

Fig.11 Layer 3 energy percentage of typical collision signal and interference signal

2.3 可动组件识别

可动组件信号与多余物信号在时域与频域上有着很强的相似性, 极易引起误判。本文依据多余物信号的随机发生性和可动组件信号的周期发生性特点区分二者。

2.3.1 信号编码

在实际高精密航天器产品中, 可动组件有时会较为松动, 此时可动组件信号发生时间并不呈现严格的周期性特点。同样, 某些强碰撞多余物信号在短时间内会产生多次高能量峰值, 这类信号会被两级脉冲识别法提取出多个多余物信号。为了强化较为松动的组件信号的周期特性, 且减少冗余多余物

信号的数量, 采用离散时间段来表示脉冲发生时刻。首先以回转试验周期 T 为参考周期, 将测试信号采集时间 T_c 均分为 T_c/T 个相等时间尺度, 如图 13 所示。

其次, 采用某一时间尺度 t 将一个周期 T 进行进一步等长度细分得到 T/t 个时间段。由于脉冲信号持续时间小于 0.1 s, 且根据人工利用扩音器进行多余物检测时, 人耳能分辨两个声音的最小时间差为 0.1 s 的经验, 可以认为在 0.1 s 内不同时刻产生的单个或多个脉冲信号均可归为同一个脉冲信号, 故取时间尺度 t 为 0.1 s 将周期 T 细分。

在两级脉冲识别法的基础上加入脉冲发生时间

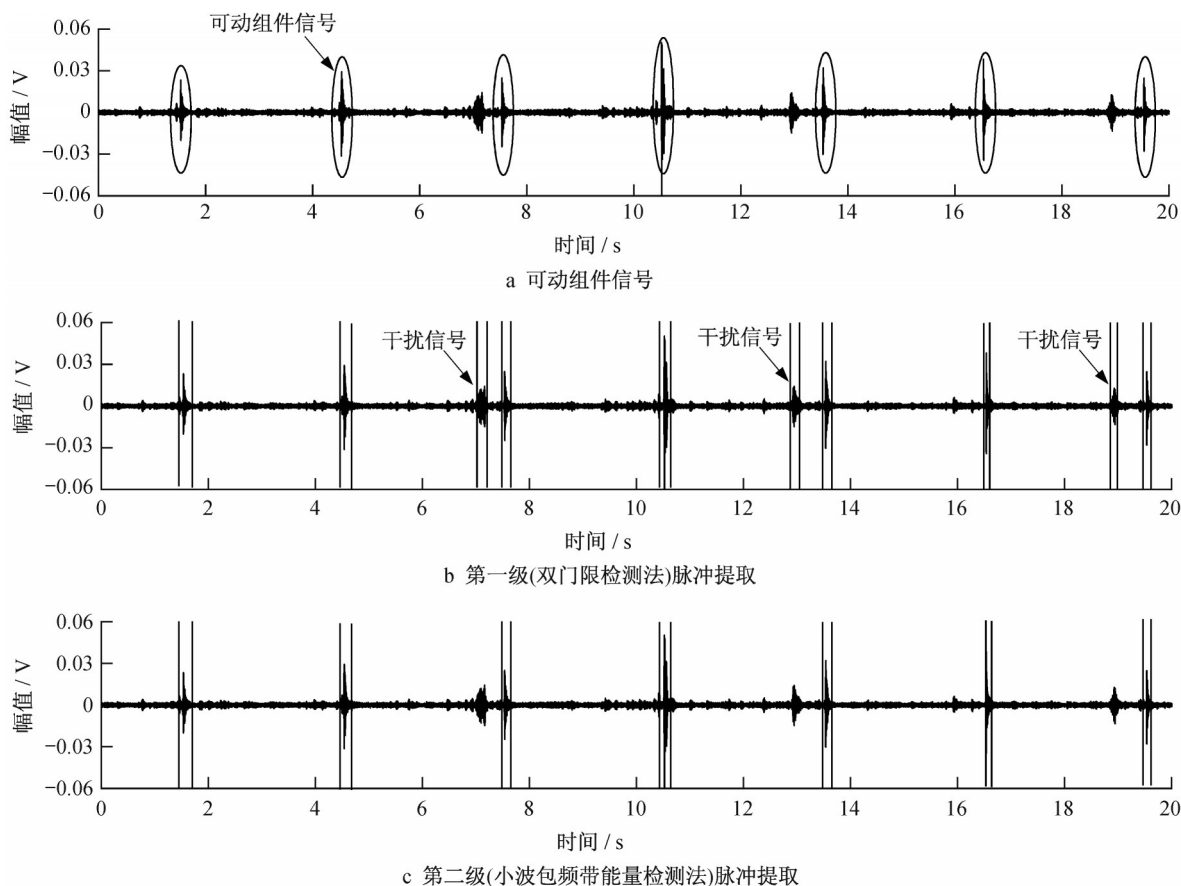


图 12 两级脉冲提取法提取可动组件信号示意图

Fig. 12 Schematic diagram of extracting movable component signals by two-stage pulse extraction method

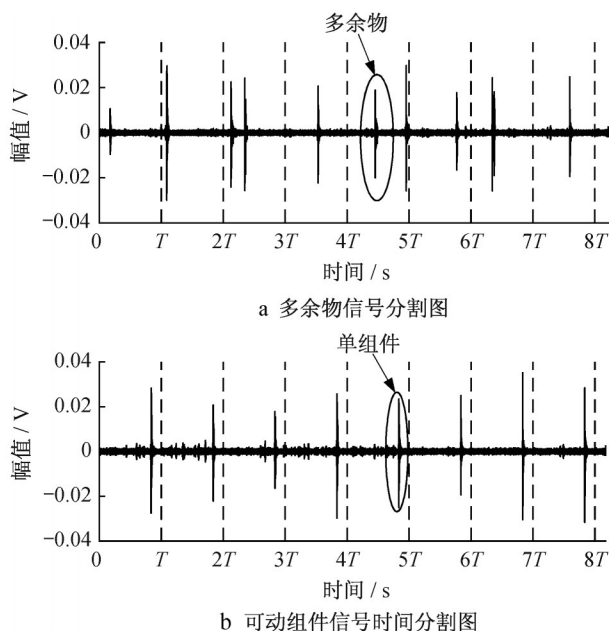


Fig.13 Time division diagram of signal

段的识别准则即可获得每个脉冲在一个周期内的发生时间段。识别准则为当脉冲起点与终点均在同一个时间段内时,则该时间段为该脉冲信号发生时间

段;当脉冲起点与终点处于不同时间段时,则将脉冲分割到这些时间段,通过选取脉冲信号的短时能量最大的时间段作为该脉冲信号发生时间段。构造 T/t 长码字 $x=(x_1x_2...x_i...x_{T/t})$, 将一个周期 T 内所有存在脉冲的时间段 x_i 置 1, 其余置 0, 如图 14 所示。在测试时间为 T_e 的测试条件下, 可将测试信号编码成由 T_e/T 个码字 x 组成的码组集合。

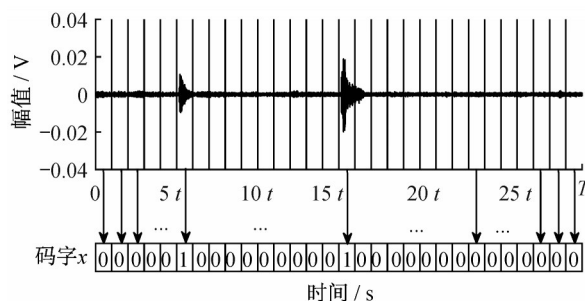


Fig.14 Signal coding diagram

2.3.2 识别依据

在完成信号编码后, 本文基于汉明距离对脉冲信号进行识别。在信息理论中^[14], 汉明距离用于描

述两个 m 长码字 $x=(x_1x_2...x_i...x_m)$ 和 $y=(y_1y_2...y_i...y_m)$ 间的距离,其数学表达式为

$$D(x,y)=\sum_{k=1}^m x_k \oplus y_k \tag{10}$$

式中: \oplus 表示模二加法运算; $x_k,y_k \in \{0,1\}$; $D(x,y)$ 表示两个等长码字在对应位置上不同码符号的数目,即两个 m 长码字 x,y 之间的汉明距离。

试验信号码组集合是在回转周期为 T 、试验次数为 N 的试验条件下,由反映单回转周期内脉冲信号发生时段 N 个码字组成。对于由 N 个码字组成的码组集合 X ,不重复两个码字 X_i^j,X_k^j 之间的汉明距离可组成向量 V :

$$V=(\sum_{k=1}^m x_k^1 \oplus x_k^2, \sum_{k=1}^m x_k^1 \oplus x_k^3, ..., \sum_{k=1}^m x_k^i \oplus x_k^j, ...) \tag{11}$$

式中: $i,j \in N$ 且 $i \neq j$ 。

定义试验信号周期信号相似度 S 为

$$S=1-\frac{\text{mean}(V)}{h} \tag{12}$$

式中: S 表示周期信号相似度; $\text{mean}(V)$ 运算表示求解向量 V 中元素的平均值; h 表示由大量实验所确定的最大经验汉明距离。

当信号的周期信号相似度低于给定阈值时,判断信号为多余物信号。为保证航天器内部活动多余物得到充分激活且保证可动组件获得周期性外部激励,则需要在保证试验安全的前提下,使回转装置达到较高的匀速转动速度。经试验验证,回转装置的匀速转动速度为 $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时可获得理想的实验效果。基于此,本文在匀转速 $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,单件测试时间为 150 s 的测试条件下,基于多次试验获得最大经验汉明距离 $h=5$,周期信号相似度 $S=90\%$ 。

可动组件主要包括单组件、双组件以及少数多组件。识别可动组件类型可为排查非正常可动组件提供帮助。本文采用脉冲序列统计图进行辅助判断,通过统计 T_c/T 个码字 x 组成的码组集合在每个细分时间段内脉冲个数的总数,可得脉冲序列统计值 $Y=(Y_1,Y_2,...,Y_i,...,Y_m)$,并将其在脉冲序列统计图上进行表示。根据峰值的大小与个数可以辅助检测人员进行可动组件类别的判断,如图 15 所示脉冲序列统计图存在两个明显峰值,可以判断该件高精度航天器存在双组件。

3 试验与分析

在匀转速 $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,单件测试时间为 150 s 的测

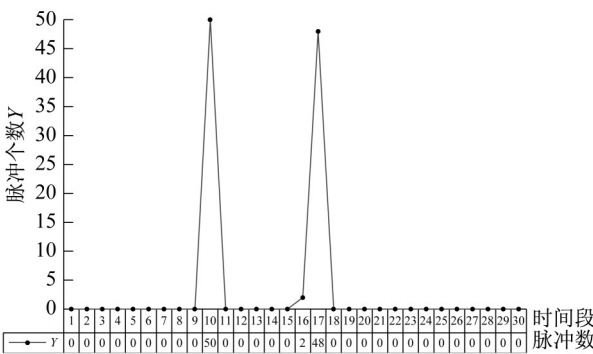


图 15 脉冲序列统计图

Fig.15 Pulse sequence statistics

试条件下,利用多余物检测系统对 100 件试验用高精度航天器进行了多余物检测试验。本文通过将人工多次测试所得出的结论作为真值,并将其与多余物自动检测系统检测结果进行对比,结果见表 1 和表 2。

表 1 多余物试验检测结果

Tab.1 Detection results of remainder test			
编号	人工检测结果	本文方法检测结果	是否误判
1	无多余物	无多余物	否
2	有多余物	有多余物	否
3	单组件	单组件	否
4	无多余物	无多余物	否
...
21	单组件	有多余物	是
...
53	有多余物	无多余物	是
54	有多余物	无多余物	是
...
68	有多余物	无多余物	是
...
79	双组件	双组件	否
100	无多余物	无多余物	否

表 2 多余物试验检测结果统计

Tab.2 Statistics on the detection results of remainder test							
件数	是否有多余物存在						
	人工检测				本文检测方法		
			组件				组件
100	有	无	单	双	有	无	单
	25	67	6	2	23	70	5

在被检测的 100 组航天器中,21 号航天器的单组件为过于松动螺栓,在一次回转中产生多次冲击,从而被检测系统误判为有多余物;53 号、54 号与 68 号航天器中的多余物由于颗粒十分微小未产生明显撞击使得检测系统误判为无多余物。由于小波包频带能量检测法中能量分布宽度特征的选择和可动组件识别中周期

信号相似度的确定是基于典型多余物与可动组件实验所得,对于十分微弱的非典型多余物脉冲信号,由于其能量分布宽度较小,故小波包频带能量检测法将其误判为干扰信号;而对于过于松动的可动组件,较高的周期信号相似度阈值也使得其被误判。从检测结果来看,本文所提出的高精密航天器多余物检测算法正确率为96%,能对航天器内部典型多余物与可动组件实现很好的检测。

4 结论

本文基于微粒碰撞噪声检测原理,提出了一种高精密航天器多余物检测算法,与其他多余物自动检测算法相比,其对低信噪比条件下的多余物与可动组件信号检测效果较好,结论如下:

(1)采用谱减法对环境噪声进行抑制且谱减参数确定方法对环境噪声去噪有着很好效果。

(2)采用基于短时能量和能量分布宽度特征的两级脉冲提取法提取多余物脉冲与可动组件脉冲。

(3)提出了试验信号编码方法并采用周期信号相似度实现了多余物信号与可动组件信号的准确区分。

(4)对于可动组件类型的识别,本文提出了采用脉冲序列统计图进行判断的方法。

(5)本文提出的多余物检测算法虽然在实际使用过程中对非常微小的多余物颗粒和过于松动的可动组件检测效果不佳,但对典型多余物与可动组件能实现很好的检测,通过后期实验积累完善微小多余物的特征识别并优化周期信号相似度阈值的选取,便可达到满意的效果。

参考文献:

- [1] United States Department of Defense. Department of defense test method standard microcircuit: MIL-STD-883G[S]. Philadelphia: Navy Publications and Printing Press, 2006.
- [2] 李超.多通道多余物微弱信号检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
LI Chao. Research on multi-channel weak signal detection of loose particle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [3] 乌英嘎.星载电子设备活动多余物识别方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
WU Yingga. Research on identification method of activated remainder for electronic equipments in satellites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [4] 邢通,陈金豹,翟国富,等.星载电子设备多余物自动检测系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(4):359.
XING Tong, CHEN Jinbao, ZHAI Guofu, *et al.* Automatic detection system of loose particle for space-borne electronic equipment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(4): 359.
- [5] ZHAI G F, CHEN J B, WANG S J, *et al.* Material identification of loose particles in sealed electronic devices using PCA and SVM[J]. Neurocomputing, 2015, 148:222.
- [6] 邵雷阵,燕会臻,王国涛,等.基于PIND多余物检测设备的脉冲提取方法设计[J].电器与能效管理技术,2019(10):21.
GAO Leizhen, YAN Huizhen, WANG Guotao, *et al.* Design of signal pulse extraction method for remainder detection equipment[J]. Electrical Apparatus and Energy Efficiency Management Technology, 2019(10): 21.
- [7] 陈金豹.密封电子设备多余物检测的信号特征识别与置信度评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
CHEN Jinbao. Signal pattern recognition and confidence evaluation for loose particle detection of sealed electronic devices[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [8] 戚乐.航天发动机多余物检测系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
QI Le. Research on loose particle detection system for aerospace engines[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [9] 王强.密封电子元器件多余物检测信号调理优化与组件信号识别[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
WANG Qiang. Signal conditioning optimization and component signal recognition for redundant particles detection of sealing electronic components [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [10] 宋知用.MATLAB在语音信号分析与合成中的应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013.
SONG Zhiyong. Application of MATLAB in speech signal analysis and synthesis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2013.
- [11] 邸继征,银俊成.小波分析应用解析[M].北京:科学出版社,2016.
QI Jizheng, YIN Juncheng. Analysis of wavelet analysis application [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 李世玲,李治,李合生.基于小波包能量特征的滚动轴承故障监测方法[J].系统仿真学报,2003,15(1):76.
LI Shiling, LI Zhi, LI Hesheng. The method of roller bearing fault monitoring based on wavelet packet energy feature[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(1):76.
- [13] 马锐.小波分析在岩样破裂声发射检测中的应用[D].西安:西安科技大学,2013.
MA Rui. Application of wavelet analysis in the detection of acoustic emission of rock sample rupture [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [14] 周荫清.信息理论基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.
ZHOU Yinqing. Information theory foundation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012.