

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003110

多传感器数据融合的航天装置多余物检测技术*

李 硕¹ 王国涛^{1,2} 李超然¹ 高萌萌¹ 陈 蕊²

(1. 黑龙江大学 电子工程学院 哈尔滨 150008; 2. 哈尔滨工业大学 电器与电子可靠性研究所 哈尔滨 150001)

摘 要:航天电子装置内部结构复杂,多余物检测信号传播过程中存在许多未知因素的影响,导致数据受到严重干扰。针对多余物信号传输途中抗干扰性不强,易于干扰信号混叠无法准确识别等问题,采用基于多传感器数据融合的航天电子装置多余物检测方式。使用多传感器对同一信号进行脉冲提取,通过脉冲进行相关性处理后确定相关函数的权值,得到的支持度矩阵及权值矩阵,然后将数据融合后的脉冲组结果输出。实验结果表明,采用多传感器数据融合方法能有效抑制信号干扰,显著提高了多余物检测精度。

关键词: 航天电子装置;多余物;自动检测;多传感器

中图分类号: TM581.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Detection technology of remnant material in space equipment based on multisensor data fusion

Li Shuo¹ Wang Guotao^{1,2} Li Chaoran¹ Gao Mengmeng¹ Chen Rui²

(1. Electronic Engineering College of Heilongjiang University of Technology, Harbin 150008, China;

2. Institute of Reliability in Electrical Apparatus and Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The internal structure of Aerospace electronics device is complex, and there are many unknown factors in the process of the transmission of remnant material signal, leading to serious interference of data. In order to solve the problems of weak interference resistance in the process of the transmission of remnant material signal, easy to overlap interference signal and unable to identify accurately, the remnant detection method of aerospace electronic device based on multi-sensor data fusion is used. The same signal is used to extract by multi-sensor, then determine the weight of correlation function through correlation processing of pulse, and obtain the support matrix and weight moment array, then output the result of pulse group after data fusion. According to the result of the experiment, the multi-sensor data fusion method can effectively restrain the signal interference and significantly improve the detection accuracy of remnant objects.

Keywords: aerospace electronic equipments; remnant material; automatic detection; multi-sensor

0 引 言

随着中国航空航天产业的快速发展,在现有的生产过程中,很难确保航天级设备的高可靠性要求,由于各种类型的航空航天电子设备具有非常重要的作用,其稳定性严重影响航空航天系统的信赖性和安全性。

但是在制造密封航空电子部件的过程中,极易在元

器件内部出现残留的杂质,如金属屑、焊渣、松香、密封胶、点焊飞溅物等,这些都是会对密封电子装置产生巨大影响的常见多余材料。在使用这些密封电子元器件时,由于其使用环境发生变化,例如处于失重或超重状态,或在使用的过程中受到冲击振动这些类似情况,使得这些颗粒发生自由的非定向移动,卡在密封电子元器件内部组件的缝隙中,造成接触不灵敏、失效的情况,导致工程失败。对多余物进行检测是排除密封继电器工作故障、

收稿日期:2020-04-30 Received Date: 2020-04-30

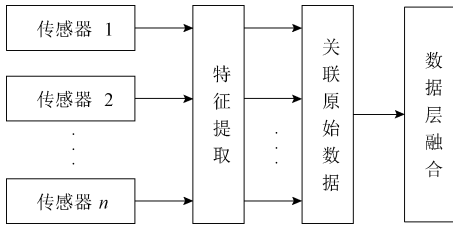
* 基金项目:国家自然科学基金(51607059,51077022)、黑龙江省自然科学基金(QC2017059)、黑龙江省博士后基金(LBH-Z16169)、黑龙江省高校基本科研业务费(HDRCCX-202004)、黑龙江省教育厅科技成果培育(TSTAU-C2018016)资助项目

保护航天系统顺利进行的必要措施^[1-4]。

由于航天产品的特殊性,在我国现有的工艺水平下,航天产品电子装联工艺一般采用手工操作完成,在各个环节之中不可避免的会将铜制导线、合金外壳屑、导线皮屑、纤维丝等微小多余物混杂其中。多余物在超重、失重、剧烈振动等条件下容易在器件内部移动,使得其掉落在某些关键部位造成短路、断路、轴承卡死、通道堵塞等严重影响电子装置的情况出现。经过我国多年研究发展粒子碰撞噪音探测 (particle impact noise detection, PIND) 已经成为国内外普遍采用的元器件多余物检测方法,并已初步应用于我国产品级航天设备的多余物检测中。但航天电子装置存在体型较大,内部结构模型复杂等特点,存在实验条件严苛、干扰信号严重、脉冲成分构成复杂的现象出现,使得实际检测准确率不稳定,受环境影响大等。本文将通过数据融合的方法,采用多传感器组合收集同源信号,利用相关函数统计原理,进行数据融合后依据相关度分配权值比重。做到对干扰信号的有效抑制,使得准确率得到显著提高^[5-8]。

1 多传感器数据层融合模型

数据融合是通过多级别处理和相关数据的信息,通过汇集多个传感器的所接收到的信息,以产生新的数据信息组合。相比于但传感器,可是得到更加高的准确率,



(a) 数据层融合结构
(a) Data level aggregation structure

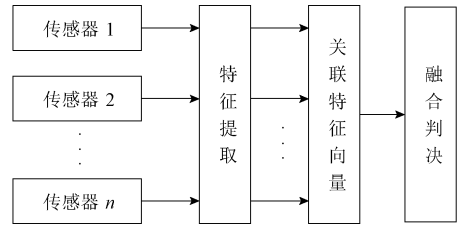
这种新信息的组合是由数据融合为基础所建立的^[9-10]。

数据融合是通过多级别处理和相关数据的信息,通过汇集多个传感器的所接收到的信息,以产生新的数据信息组合。根据模式的抽样性,一般将其分为 3 种,数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合的目的是直接采获系统的信息,以便处理融合问题根据直接收集到信号结果进行特征分析和判断,其数据量损失最小,并且可以提供较精确的微小信息。

特征层融合是中间融合层次,将系统中每个传感器自身所收集到的信号进行特征分析提取后,再由系统基于各个特征向量分析计算出联合特征向量以作为判断。一般来说特征向量可以使目标的边缘、方向和速度等信息。通过对数据的压缩能够有效降低对带宽的要求做到能够实时处理^[11-15]。

决策层融合是一种高层次的融合,在这一级别上,首先将传感器收集的所有数据指定属性说明,然后使用从特征向量中获得的信息。将结果融合为一个共同的目标或环境属性的描述,最佳的决策是直接根据每一项决策的可信度做出的^[16-20]。

本文通过在航空航天电子装置中检测多余物体的自动系统放置多个传感器和收集同一信号通过多个传感器分析计算出支持度矩阵,通过数据融合将权值分配,做到对干扰信号的有效抑制,在本方法中主要对数据层和特征层融合模型进行分析,如图 1 所示。



(b) 特征层融合结构
(b) Convergence structure of feature layer

图 1 结构型融合模型

Fig. 1 Merge structure model

2 基于相关加权多传感器检测数据层融合

图 2 所示为多传感器数据级加权融合模型,基本原理是权衡分析每个传感器提供的多余信息数值,对其进行相关加权,然后分析结果进行数据融合,并重新形成新的序列其对同一对象观测数据序列的集合为 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 则 X 为融合后的序列。

本文主要利用多传感器对于同源信息测量数据进行融合,将每个传感器的数据进行收集分析后,对不同传感器之间的数据进行的相关性计算,并列举出一个反应其支持程度的支持度矩阵,每个传感器权值分配都可以用

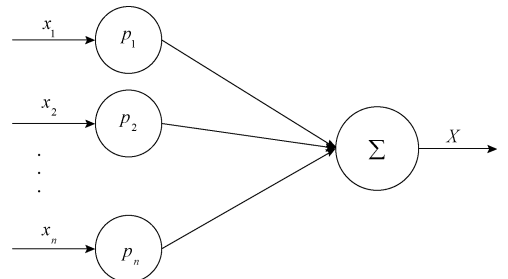


图 2 多传感器加权融合模型

Fig. 2 Multisensor weighted fusion model

支持矩阵来确定。对于整个脉冲时间,需要将其分割成不同时刻的片段分别进行融合权值计算,做到实时数据

匹配。并且在考虑传感器本身误差以及外界环境等干扰因素的前提下,通过相关性分析所得到的支持度矩阵确定权值,是一种具有自适应的方法。其具体流程如图 3 所示,步骤如下。

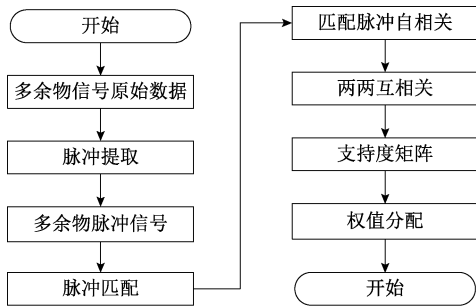


图 3 权值分配流程

Fig. 3 Flow chart of weight allocation

1) 采用三门限端点算法将多余物脉冲提取,其中 3 个门限的阈值为 $Th=2\bar{V}$ 、 $Tls=\bar{V}$ 、 $Tle=\bar{V}$ 时。

2) 将 3 个同构声发射器所发出的信号通过数据采集卡全部收集起来,3 个传感器通道分别将其表示为 S_1 、 S_2 、 S_3 , $\{X_1\}$ 、 $\{X_2\}$ 、 $\{X_3\}$ 为 3 个传感器所检测的信号,通过脉冲提取算法,将所提取到的脉冲序列表示为 $\{X_1(i), i=1, 2, \dots, n\}$ 、 $\{X_2(i), i=1, 2, \dots, m\}$ 、 $\{X_3(i), i=1, 2, \dots, u\}$ 。当在 t 时刻 $\{X_1(i)\}$ 中存在 $x_1(t)$ 元素,若其他序列中 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 分别存在,则表明在相同时刻在 S_2 、 S_3 通道中存在脉冲匹配,反之亦然。

3) 将把一段时间内所收集到的脉冲进行自相关处理,其中 $x_i(k)$ 为在一段时间内,传感器 i 所测得到的多余物脉冲序列,信号通过自相关后提取信号的有用信息,去掉无用信息,提高信号的信噪比。自相关函数表示为:

$$R_{x_i x_i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} x_i(k) x_i(k+m) \quad (1)$$

4) 将传感器 i 和传感器 j 分别收集到的脉冲序列 $x_i(k)$ 、 $x_j(k)$ 做互相关,可通过其 $R_{x_i x_j}$ 来描述 $x_i(k)$ 、 $x_j(k)$ 的相似程度,其互相关函数为:

$$R_{x_i x_j} = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} x_i(k) x_j(k+m) \quad (2)$$

5) 将第 k 组脉冲经由传感器 i 和传感器 j 互相关后得到支持度 $d_{ij}(k)$,可以列出第 k 组的支持度矩阵。

$$D(k) = \begin{vmatrix} 0 & d_{12}(k) & d_{13}(k) \\ d_{21}(k) & 0 & d_{23}(k) \\ d_{31}(k) & d_{32}(k) & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

由于装置内部各种传感器的放置空间不同,存在组件阻挡等,在传播过程中声音信号会存在衰减和畸变情况出现,导致差异较大。对于同一传感器,支持度之和远远小于 1,则对其本身的脉冲无意义,故 $d_{ii}(k) = 0$ 。

通过式(3)可得权值分配矩阵:

$$p'_i(k) = \sum_{j=1}^3 d_{ij}(k) \quad (4)$$

$$p'(k) = \{p'_1(k), p'_2(k), p'_3(k)\} \quad (5)$$

令 $p' = p'_1(k) + p'_2(k) + p'_3(k)$, 再对 $p'(k)$ 归一化处理

后权值分配矩阵为:

$$p(k) = \left\{ \frac{p'_1(k)}{p'}, \frac{p'_2(k)}{p'}, \frac{p'_3(k)}{p'} \right\} \quad (6)$$

6) 根据式(3)~(6)可以得到,第 k 组 3 个传感器所得多余物脉冲信号的数据层融合:

$$X(k) = \sum_{i=1}^3 p_i(k) x_i(k) \quad (7)$$

7) 由上述分析综合得到在整个采集时间段内 3 个传感器在数据层融合结果为:

$$X = \{X(1), X(2), \dots, X(k)\} \quad (8)$$

3 实验验证

为了验证所提出的航空航天器件多传感器数据集融合方法,通过航天电子装置多余物检测系统完成。在不同的情况下会对传感器性能产生影响,考虑到在实际应用中的使用情况,需要对多传感器的自适应性以及抗干扰性能稳定性进行效果分析,验证其强抗干扰性的优点。其次采取使用单传感器测量和多传感器测量的对比,将控制变量和多次实验相结合的测试方法、是否采取数据融合方法对比,来检查是否需要使用多传感器数据集融合和使用效果。

3.1 多传感器稳定性分析

取某型号航天继电器放入 1.3 mg 铜粒,采用航天电子装置多余物检测系统对其进行 PIND 检测。应用脉冲提取算法将 3 个不同传感器所采集到的信号分析得到一组经过脉冲提取匹配处理后的序列,分别以 A、B、C 表示,如图 4(a)~(c) 所示。将经过相关函数的权值确定后得到的支持度矩阵及权值矩阵如式(9)、(10) 所示。数据融合后的脉冲组结果如图 4(d) 所示。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1805 & 0.3958 \\ 0.1805 & 0 & 0.3674 \\ 0.3958 & 0.3674 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_1 = [0.3351 \quad 0.3173 \quad 0.3476] \quad (10)$$

为了验证这种融合方法的有效性和对异常数据的处理能力,分别将突发性高能量瞬间脉冲、机械转台电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 和随机序列环境脉冲序列和编号为 B、C 的多余物脉冲做相关性分析组成新的脉冲序列,通过给出相似度矩阵来得到权值分配,数据融合后如图 5~7 所示。支持度矩阵和各序列权值矩阵如式(11)~(16) 所示。

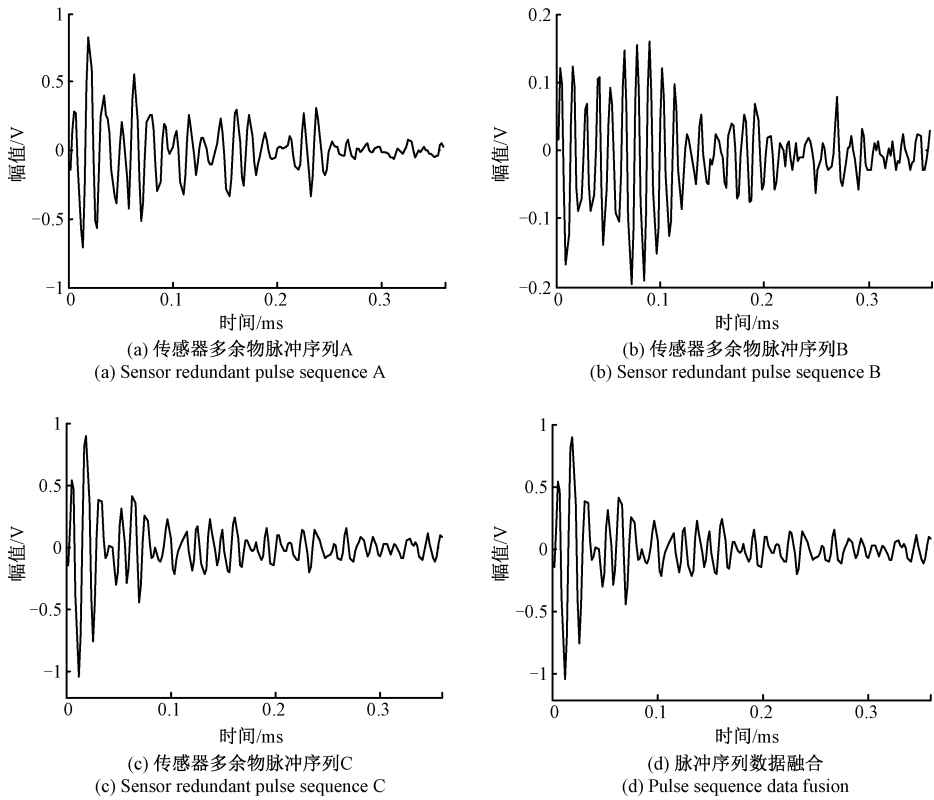


图 4 多传感器数据融合效果

Fig. 4 Multisensor data fusion effect

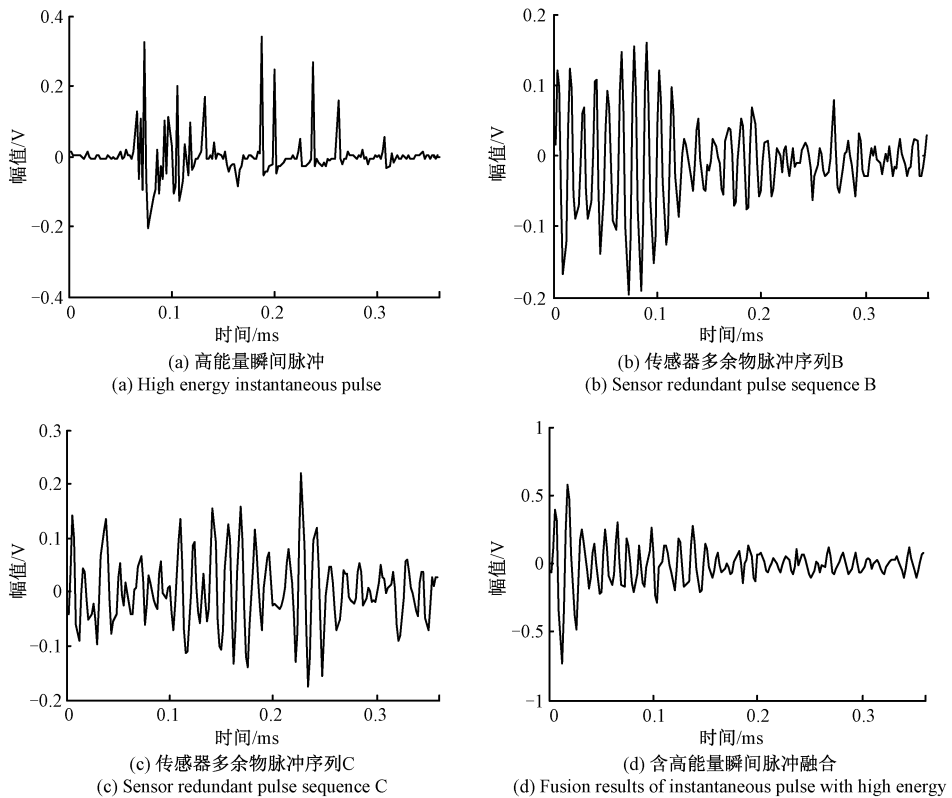


图 5 含高能瞬时脉冲的多传感器数据融合效果

Fig. 5 Multisensor data fusion with high energy instantaneous pulse

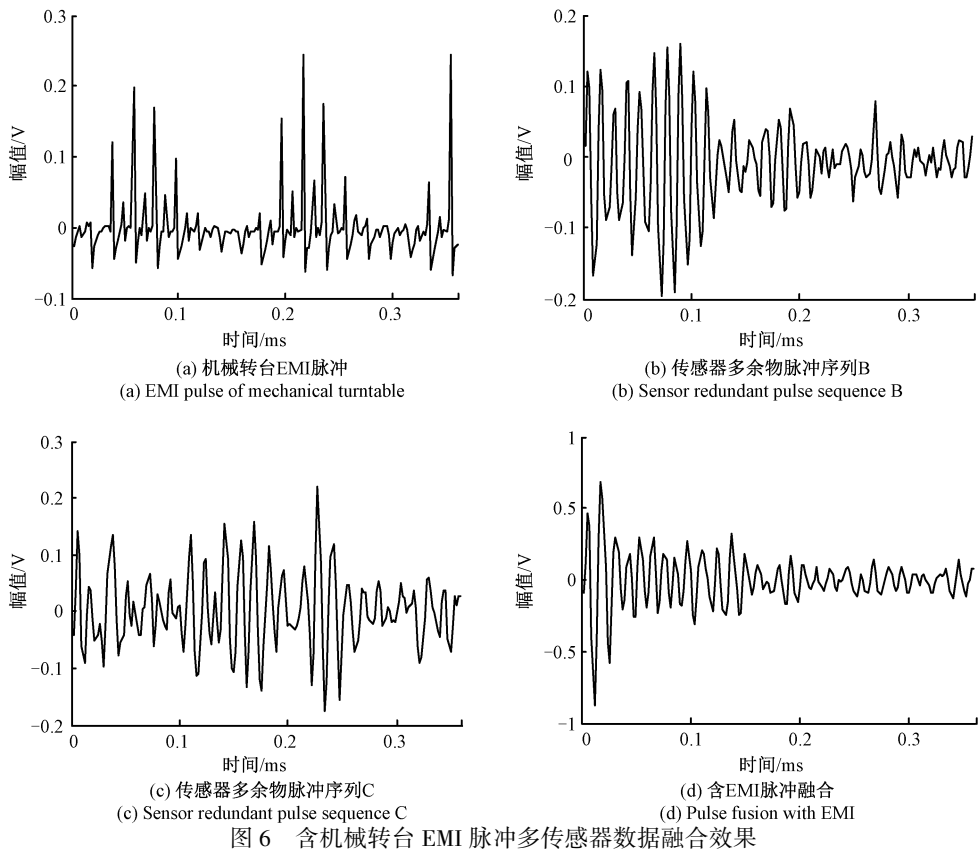


Fig. 6 Data fusion effect of EMI pulse multisensor with mechanical turntable

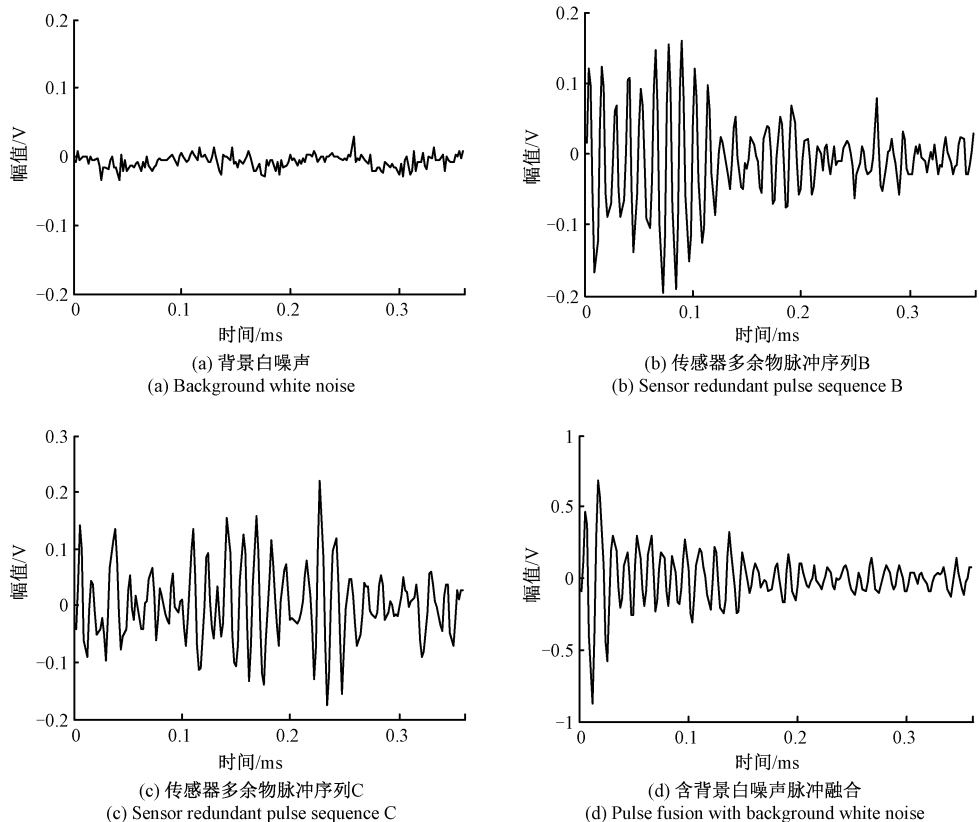


Fig. 7 Multisensor data fusion with background white noise

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.029\ 1 & 0.075\ 8 \\ 0.029\ 1 & 0 & 0.367\ 4 \\ 0.075\ 8 & 0.367\ 4 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P_2 = [0.117\ 7 \quad 0.461\ 5 \quad 0.420\ 9] \quad (12)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.038\ 7 & 0.037\ 6 \\ 0.038\ 7 & 0 & 0.367\ 4 \\ 0.037\ 6 & 0.367\ 4 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P_3 = [0.068\ 2 \quad 0.501\ 8 \quad 0.430\ 0] \quad (14)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.044\ 7 & 0.044\ 3 \\ 0.044\ 7 & 0 & 0.367\ 4 \\ 0.044\ 3 & 0.367\ 4 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$P_2 = [0.078\ 8 \quad 0.495\ 7 \quad 0.425\ 6] \quad (16)$$

对实验结果对比分析可知,1) 三个脉冲融合得到的权值如式(2), 3 个权值分别为 0.335 1、0.317 3、0.347 6,表明 3 个传感器之间的权重相似。2) 权值如式(9)、(11)、(13)分别表示测试台高能量瞬间脉冲、EMI 脉冲以及随机序列环境脉冲与其余传感器采集的多余物脉冲进行数据融合效果,根据观察可知其权重值分别为 0.117 7、0.068 2、0.078 8,其结果明显可以反映数据融合的方法能够有效对于干扰信号进行有效的抑制,充分反映了此方法的抗干扰强的优点。

3.2 采用多传感器数据融合必要性及效果分析

取一台体积为 60 mm×60 mm×40 mm,质量 4.8 kg,某型号航空航天电子插板式装置,分别放入 0.5、0.9、1.7 mg 三种不同质量的铅锡混合微粒。根据表 1 所示的试验条件,收集了 200 份各不同质量的实验数据。100 个数据集采用单传感器收集,100 个数据集采用多传感器收集。通过比较单个传感器的精确度和多个传感器的精确度,以确定是否需要使用多个传感器。单个传感器所收集的数据进行直接决策判断,多个传感器收集的数据分别采用数据融合和无数据融合两种方法。

对处理后的不同数据,采用相同的标准进行多余物的决策,实验结果如表 2 所示。通过数据融合处理的有无来验证方法的实际效果如何。

表 1 检测条件

Table 1 Test conditions

检测条件	加速度/g	转台速率/(r·s ⁻¹)	工作时间/s
A	1.4	5.0	
B	2.0	6.0	10.0
C	2.7	7.0	

由实验结果对比分析可知,1) 在相同条件下,通过计算各方法下的平均精准度分析,采用单传感器的平均精准度为 70.2%;多传感器直接信息决策的平均精准度为 80.9%;多传感器数据融合后的平均精准度为 84.8%。2) 通过分析实验数据,单传感器的多余物检测精准度低于多传感器的多余物检测精准度,充分证明多传感器相

表 2 多余物检测试验结果

Table 2 Test results of superfluous substance detection

测试条件	微粒质量/ mg	单传感器		多传感器	
		直接判决 精准度/%	直接判决 精准度/%	数据融合后判 决精准度/%	
A	0.5	61	77	81	
	0.9	67	78	82	
	1.7	74	82	87	
B	0.5	67	77	80	
	0.9	69	82	85	
	1.7	77	85	88	
C	0.5	66	78	84	
	0.9	71	80	85	
	1.7	80	88	91	

关加权组合方法可以有效提高精准度更加能有效地收集到微小多余物的信息。3) 通过实验数据分析可知,多传感器进行多余物检测时采用数据融合后的精准度要高于无数据融合的精准度,充分证明了密封装置多传感器数据融合方法的适用性,并且将检测精准度从 80.9% 提高至 84.8%。

上述的结论充分验证了多传感器的必要性以及数据融合在进行多传感器处理中的有效性。

4 结 论

本文通过对航天电子装置多余物检测中数据收集以及分析进行深入的分析 and 探讨。提出多传感器数据融合的航空密封电气装置多余物检测方法,利用多传感器信息收集结构,采用加权算法进行数据融合处理,将不同数据的权重进行分配,做到对于干扰信号的强抗干扰性。对于实际问题中常存在的 0.5 mg 多余物微粒,多传感器数据融合检测精度达到 84.8%,较常使用的单传感器提升了 14.6% 准确度,较多传感器直接处理提升了 3.9%。

参考文献

- [1] 王世成,王国涛,翟国富,等. 密封电子元器件微粒碰撞噪声自动检测系统的研究[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(9):1-4.
WANG SH C, WANG G T, ZHAI G F, et al. Research on automatic detection system for particle collision noise of sealed electronic components [J]. Computer and Digital Engineering, 2010, 38(9):1-4.
- [2] 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: 222-228.
- [3] WANG G T, LI K, WANG S J. A study on the activation condition of vibration tests for particle impact noise detection of space relay remainders [C].

- ICIEA2011. 2011;2610-2614 (EI:20113614296081)
- [4] 唐晓庆, 张龙, 王国涛, 等. 基于随机振动的航天继电器多余物自动检测系统 [J]. 低压电器, 2010(8): 40-42.
TANG X Q, ZHANG L WANG G T, et al. Automatic detection system for aerospace relay excess based on random vibration [J]. Low Voltage Apparatus, 2010(8):40-42.
- [5] 郭亮. 火箭发动机多余物识别与定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
GUO L. Research on identification and location method of rocket engine residues [D]. Harbin: Harbin University of technology, 2016.
- [6] 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): 359-365.
XING T, CHEN J B, ZHAI G F, et al. Automatic detection system for surplus in spaceborne electronic equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(4): 359-365.
- [7] 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): 21-26, 73.
GAO L ZH, YAN H ZH, WANG G T, et al. Design of pulse extraction method based on PIND detection equipment [J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2019(10): 21-26, 73.
- [8] WANG G T, LIANG X W, XUE Y Y, et al. Algorithm used to detect weak signals covered by noise in PIND [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019.
- [9] LIU W Q, TAO G L, FAN Y J, et al. Robust fusion steady-state filtering for multisensor networked systems with one-step random delay, missing measurements, and uncertain-variance multiplicative and additive white noises[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(14): 4716-4754.
- [10] 孙世政, 周清松, 何泽银. 嵌入式时栅角位移传感器短周期误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 27-34.
SUN SH ZH, ZHOU Q S, HE Z Y. Short period error analysis and compensation of embedded time grating angular displacement sensor [J]. Journal of instrumentation, 2019, 40(4): 27-34.
- [11] 钱鑫, 王国涛, 王淑娟. 密封电子元件及设备多余物的 PIND 方法研究进展[J]. 航天制造技术, 2016(6): 1-5, 16.
QIAN X, WANG G T, WANG SH J. Research progress of PIND method for sealing electronic components and equipment surplus [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(6): 1-5, 16.
- [12] 曹辉, 杨理践, 刘俊甫, 等. 基于数据融合的小波变换漏磁异常边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 71-79.
CAO H, YANG L J, LIU J F, et al. Wavelet transform magnetic flux leakage anomaly edge detection based on data fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 71-79.
- [13] 赵晨. 基于混沌纠错机制的 WSN 网络数据精确融合算法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(3): 31-34.
ZHAO CH. Accurate fusion algorithm of WSN network data based on chaos error correction mechanism [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(3): 31-34.
- [14] 闫哈哈, 邢波涛, 任璐, 等. 遥感数据融合技术文献综述[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9): 26-36.
YAN H H, XING B T, REN L, et al. Literature review of remote sensing data fusion technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(9): 26-36.
- [15] 吴天舒, 陈蜀宇, 吴朋. 基于应力波分析的状态监控与故障预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3061-3070.
WU T SH, CHEN SH Y, WU P. Study on condition monitoring and fault prediction based on stress wave analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3061-3070.
- [16] 邱立达, 刘天键, 傅平. 基于稀疏滤波的无线传感器网络数据融合[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 352-357.
QIU L D, LIU T J, FU P. Data fusion of wireless sensor networks based on sparse filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(3): 352-357.
- [17] 刘娟花, 柯熙政. 多 MEMS 陀螺数据融合方法性能比较[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(8): 1265-1273.
LIU J H, KE X ZH. Comparison of performance of multi-MEMS gyroscope data fusion methods [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(8): 1265-1273.
- [18] 曾金芳, 滕召胜. 单传感器数据处理最大熵方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1096-1099.
ZENG J F, TENG ZH SH. Single sensor data processing maximum entropy method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(12): 1096-1099.
- [19] 张聚伟, 王宇. 一种有向传感器网络强栅栏覆盖算法[J].

电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 83-91.

ZHANG J W, WANG Y. A strong fence coverage algorithm for directed sensor networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31 (1): 83-91.

- [20] 孙斌, 马春晖, 金心宇, 等. 传感器网络中基于压缩感知的压缩域目标跟踪算法研究与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1617-1625.

SUN B, MA CH H, JIN X Y, et al. Research and application of compressed domain target tracking algorithm based on compressed sensing in sensor network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30 (11): 1617-1625.

作者简介



李硕, 2019 年于黑龙江科技大学获得学士学位, 现为黑龙江大学硕士研究生, 主要研究方向为密封电子元器件多余物检测技术。

E-mail: 736953146@qq.com

Li Shuo received his B. Sc. degree from

Heilongjiang University of science and technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Heilongjiang University. His main research interests include simulation analysis of test conditions for loose particle detection of sealed electronic components.



王国涛(通信作者), 2003 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为黑龙江大学副教授, 主要研究方向为密封电子元器件和电子设备多余物检测技术。

E-mail: star5892@163.com

Wang Guotao(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2003, Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. Now he is an associate professor at Heilongjiang University. His main research interests include loose particle detection technology for sealed electronic components and electronic equipment.