DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.040

基于最小航道法的实测数字信号奇异值剔除算法*

闫楚良1段垚奇1刘扬2刘克格1

(1.北京飞机强度研究所,北京100083;2.中国农业机械化科学研究院,北京100083)

【摘要】 由于使用环境和本身功能的影响,运载机械在进行实测数字信号采集时,常常会出现干扰信号值,即 数字信号奇异值。准确地剔除数字信号奇异值是实测数字信号处理中的一项关键工作。提出了基于最小航道法 的数字信号奇异值剔除算法,根据数据的变化趋势进行数字信号奇异值的甄别与检测。与幅值门限检测法和梯度 门限检测法进行了对比分析,结果表明基于最小航道法的奇异值剔除算法优于幅值门限检测法和梯度门限检测 法,处理结果真实可靠。

关键词:数字信号 信号奇异性 剔除算法 最小航道法
 中图分类号: V215.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0230-05

Elimination Algorithm for the Spike of the Measured Digital Signal Based on the Racetrack Method

Yan Chuliang¹ Duan Yaoqi¹ Liu Yang² Liu Kege¹

(1. Beijing Aircraft Strength Institute, Beijing 100083, China

 $\ \ 2. \ \ Chinese \ \ Academy \ of \ \ Agricultural \ \ Mechanization \ \ Sciences \ , \ Beijing \ \ 100083 \ , \ \ China \)$

Abstract

Due to the influence of the electromagnetic field and environment, there are spikes in the measured digital signal of carrier machinery. Eliminating the spike accurately is a key work of the digital signal processing. The algorithm based on the racetrack method of eliminating spike was put forward. This algorithm detects the spike according to the changing trends of the data, distinguishes spike and normal data obviously. Compared with the treatment results with amplitude threshold detection and differential threshold detection, the results show that the algorithm based on the racetrack method of eliminating spike is better than the others.

Key words Digital signal, Signal singularity, Elimination algorithm, The racetrack method

引言

实测载荷、应变等数字信号是运载机械进行力 学分析和试验的基础^[1-7]。由于使用环境和本身功 能的影响,实测的数字信号常常会受到电磁干扰的 影响而出现奇异值^[1]。目前,还没有一个能够完全 而又可靠地剔除奇异值的算法,许多算法过于敏感, 在剔除奇异值的同时,也删掉了一些有用的数 据^[8-14]。当前,常用两种算法对奇异值进行判断: 幅值门限检测法和梯度门限检测法^[8]。然而,幅值 门限检测法不能有效地区分奇异值和大幅值的正常 信号,梯度门限检测法不能有效地区分奇异值和大 梯度的正常信号,这两种算法在实践中都有一定的 缺陷。因此,需要寻找一种更加适合于实测数字信 号的奇异值剔除算法。

最小航道法(the racetrack method)是由 Fuchs H O 等首先提出的一种算法^[15],该算法常用于实测数据 的压缩,本文将最小航道法模型应用于实测数字信 号的奇异值检测,提出基于最小航道法的奇异值剔 除算法,使奇异值的甄别与检测标准更加准确、清

收稿日期: 2012-02-09 修回日期: 2012-03-21

^{*}国家自然科学基金资助项目(50135010)

晰,并且利用实测数据与幅值门限检测法及梯度门 限检测法进行效果对比。

1 最小航道法模型

最小航道法模型如图 1 所示,设定"航道"宽度 为 D_{min},航道的形状与实测载荷-时间历程一致。假 定水头在航道急流中前进,当在转弯处受到反向堵 截时,如图 1b 中 A、B、C、D 处,则该处为截除二维低 载后载荷-时间历程中有效峰值或谷值。凡是水头 从航道流过时,没有遇到反向堵截的峰值和谷值一 律截除,最后保留了一系列水头在转弯时受到反向 堵截处的峰值或谷值,将其连接起来,即可得到低载 D_{min}截除后又和原始载荷-时间历程保持一致的等 效载荷-时间历程,如图 1c 所示。



Fig. 1 Model of the racetrack method(a) 原始数据 (b) 截除过程 (c) 截除后数据

图 2 为最小航道法数据截除流程图。NXT 为下一个峰值点或谷值点,TRP 为候选有效峰值点或谷值点,XP 为当前有效峰值点或谷值点,*D*_{min}为由用户根据实际情况选定的最小截除门限值^[1]。

2 实测数字信号奇异值常用检测模型

2.1 幅值门限检测法

这是最常用的奇异值检测算法。适用于幅值比 正常载荷大的奇异值^[8]。其检测依据是幅值,奇异 值判定依据为

$$S_n > S_m \tag{1}$$

式中 S_n — 第 n 个采样点的幅值 S_m — 设定的幅值门限值

2.2 梯度门限检测法

首先对原始信号进行差分求导,得到信号的梯



Fig. 2 Flow chart of the racetrack method

度,并对其进行统计分析^[8]。其检测依据是梯度的 绝对值 *K*_a,即

$$K_n = |S_n - S_{n-1}| > K_m$$
 (2)
式中 K_n (2)
 S_n (2)
 S_n (2)
 S_n (2)
 S_n (2)
 K_n (2)

3 基于最小航道法的奇异值剔除算法

从产生机理上分析,奇异值是由于电路故障或 受到干扰产生的,而正常信号是由于载荷变化产生 的。一个复杂的机械系统,其载荷变化会反映出惯 性和阻尼的影响,其变化趋势呈现出延迟性和连续 性。而奇异值却不受这些影响,它的产生和消亡几 乎是瞬时的,而且其变化趋势呈现出离散性。

最小航道法压缩模型能够保留数据的变化趋势,D_{min}的设置决定了所保留趋势的完整程度。如前所述,对于实测数字信号来讲,奇异值的趋势变化速度要比正常信号快得多,因此,只要 D_{min}设置恰当,对原始信号使用最小航道法压缩后,奇异值 *s*(*n*)以及前后两点*s*(*n*-1)和*s*(*n*+1)一定能被完整地保留下来。这就是基于最小航道法的奇异值剔除算法的基本依据。

但是,使用最小航道法压缩后,奇异值被完整保 留下来的同时,正常信号的变化趋势也同时被保留 下来。如何区分正常信号的变化趋势和奇异值成为 该算法的关键问题。

如前所述,奇异值从产生到消亡所经历的时间 要远远小于正常信号的趋势变化时间,即使差分计 算对奇异值的梯度进行了弱化,这一特点也依然明 显地存在。使用最小航道法压缩后,被保留下来的 奇异值与其前后两点的采样间隔很小,一般为1个 采样间隔,即使有个别情况,也不会超过3个采样间 隔。这一特点使大部分奇异值能被检测出来。个别 的正常信号因为变化趋势较快,使用最小航道法压 缩后,其前后两点的采样间隔也非常小,即使在采样 率设置时充分地考虑也无法避免,正常信号的变化 趋势呈现出连续性,而奇异值的变化趋势呈现出离 散性。利用这一区别,可以将个别变化趋势较快的 正常信号和奇异值区分开来。

基于最小航道法的奇异值剔除算法流程如 图 3 所示。



Fig. 3 Flow chart of algorithm based on the racetrack method of eliminating spike

*S*为实测数字信号,是一个*n*×2的二维矩阵。 *S*的第1列*S*(:,1)存放采样记录号,第2列*S*(:,2) 存放各采样点对应的数值

$$S(:,1) = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ \cdots \ m]$$
(3)
$$S(:,2) = [s(1) \ s(2) \ s(3) \ s(4) \ \cdots \ s(m)]$$
(4)

使用最小航道法压缩数据后,将保留的采样点记录号存入 X₁,与 X₁各采样点对应的数据存入 X₂。

 $X_{1} = [x(1) \ x(2) \ \cdots \ x(m_{1})]$ (5) $X_{2} = [s(x(1)) \ s(x(2)) \ \cdots \ s(x(m_{1}))]$ (6)

式中 x(i)——第 i 个被保留下来的采样点记录号 s(x(i))——第 x(i)个记录点所对应的数值

m₁——保留下来的采样点个数

图中 dX_1 是对 X_1 进行差分计算,即 dX_1 为所保 留的相邻两个采样点的间距

$$\mathrm{d}\boldsymbol{X}_1 = \mathrm{Diff}(\boldsymbol{X}_1) =$$

$$[x(2) - x(1) x(3) - x(2) \cdots x(m_1) - x(m_1 - 1)]$$
(7)

然后逐个检查 dX_1 中的元素,如果有且只有两 个相邻的点 $dX_1(i-1)$ 、 $dX_1(i)$ 小于等于 3,则判定 s(i)为奇异值。

将检测出的奇异值进行线性插值从而将其剔除,第*i*个采样点的插值公式为

$$s(i) = \frac{s(i-1) + s(i+1)}{2}$$
(8)

 S_1 为剔除奇异值后的数字信号,也是一个 $n \times 2$ 的二 维矩阵,与原始信号S结构相同, S_1 第1列 $S_1(:,1)$ 存放采样记录号,第2列 $S_1(:,2)$ 存放对奇异值进 行线性插值后各采样点数值。

4 试验验证

为了验证基于最小航道法的奇异值剔除算法的 效果,将常态数据和包含大幅值、大梯度的实测数 据,按实际出现比例进行了分割和拼接,制作了一段 典型实测数字信号,分别用幅值门限检测法、梯度门 限检测法和基于最小航道法的奇异值剔除算法进行 处理,并人工对每种算法的效果进行检查,对比结果 如表1~3 所示。

表 1 幅值门限检测法处理结果 Tab.1 Effect of amplitude threshold detection

幅值门限	剔除点数	剩余奇异	实际奇异	误剔除的
值(码值)		值数	值数	正常点数
33550	1 785	0	10	1 775
33551	1 563	0	10	1 553
33552	1 478	1	10	1 469
33553	1 402	3	10	1 395
33554	1 237	3	10	1 230
33555	836	4	10	830
33556	758	5	10	753
33557	620	5	10	615
33558	512	7	10	509
33559	480	7	10	477
33560	337	7	10	334
33561	301	8	10	299
33562	285	9	10	284
33563	269	10	10	269

从表1可以看出,用幅值门限检测法处理该实 测数字信号时,随着幅值门限值的增加,剩余奇异值 的个数越来越多,误剔除的正常点也越来越少。但 是,直到奇异值剔除率达到0之前,都一直伴随有大

表 2 梯度门限检测法处理结果 Tab. 2 Effect of differential threshold detection

梯度门限值	剔除点数	剩余奇异	实际奇异	误剔除的
		值数	值数	正常点数
1	316	0	10	306
2	96	0	10	86
3	74	0	10	64
4	58	0	10	48
5	39	0	10	29
6	23	0	10	13
7	9	1	10	0
8	3	7	10	0
9	1	9	10	0
10	0	10	10	0

表 3 基于最小航道法的奇异值剔除算法处理结果

Tab. 3 Effect of algorithm based on the racetrack method of eliminating spike

压缩门限值	剔除点数	剩余奇异	实际奇异	误剔除的
		值数	值数	正常点数
0	10	0	10	0
1	10	0	10	0
2	10	0	10	0
3	10	0	10	0
4	6	4	10	0
5	5	5	10	0
6	4	6	10	0
7	3	7	10	0
8	1	9	10	0
9	1	9	10	0
10	1	9	10	0
11	1	9	10	0
12	0	10	10	0

量正常信号被误剔除的现象。所以幅值门限检测法 不能用于该段实测信号的奇异值剔除。

从表 2 可以看出,用梯度门限检测法处理该实 测信号时,随着梯度门限值的增加,剩余奇异值的个 数越来越多,误剔除的正常点也越来越少。当梯度 门限值大于 7 时,误剔除的正常数据个数为0,但是 随着梯度门限值的增加,剩余奇异值也越来越多。 所以梯度门限值的最佳设定值为 7,此时奇异值剔 除率为 90%。

从表 3 可以看出,用基于最小航道法的奇异值 剔除算法处理该实测信号时,最初随着压缩门限值 的增加,剩余奇异值的个数最初保持为 0,当压缩门 限值大于 3 时,剩余奇异值的个数开始增加。但是, 随着压缩门限值的增加,误剔除的正常点数一直保 持为 0。即用基于最小航道法的奇异值剔除算法处 理该实测信号时,不会有误剔除正常信号的现象,并 且能使压缩门限值处于一个区间内时,奇异值的剔 除率为100%。

实测数字信号中,存在一些正常的数据,其幅值 接近或大于奇异值的幅值,而幅值门限检测法不能很 好地区分奇异值和大幅值正常信号,如图4b所示。

奇异值从产生到消亡所经历的时间远小于正常 信号中一个载荷循环的维持时间。因此,从产生机 理上看,梯度门限检测法能够显著地区分奇异值和 正常信号,但是在实际采集信号中,由于采样率的限 制,实测信号往往不能如实地反映出奇异值真正的 梯度,差分计算对奇异值的梯度进行了弱化,从而使 其与梯度较大的正常信号区别不明显。而梯度门限 检测法不能很好地区分奇异值和大梯度的正常信 号,如图4c所示。



幅值门限检测法的统计学本质是从信号中挑出 幅值显著的数据点作为奇异值;梯度门限检测法的 统计学本质是从信号中挑出梯度显著的数据点作为 奇异值。幅值或梯度是否显著,所参考的是整个起 落的数据分布。而对于实测数字信号来讲,奇异值 的本质是数据变化趋势的突变,而变化趋势参照的 是局部数据。这就是以上两种算法不能适用于实测 数字信号的根本原因。而本文提出的基于最小航道 法(图4d)的奇异值剔除算法,是直接依据变化趋势 进行奇异值的检测,所以更加适用于实测数字信号 的奇异值检测和剔除。

5 结论

(1)在3种算法的门限值均为最佳设定值时, 基于最小航道法的奇异值剔除算法的奇异值剔除率 高于幅值门限检测法和梯度门限检测法。

(2)基于最小航道法的奇异值剔除算法的门限 值最佳设定域较宽,这使得它在实际处理中更便于 操作。

(3)用基于最小航道法的奇异值剔除算法处理 该实测数字信号时,奇异值和正常信号的区分非常 明显,没有误剔除正常信号的现象。这是幅值门限 检测法和梯度门限检测法所不具备的优势。

参考文献

- 1 闫楚良.飞机载荷谱实测技术与编制原理[M].北京:航空工业出版社,2010.
- 2 阎楚良,高镇同.飞机高置信度中值随机疲劳载荷谱的编制原理[J].航空学报,2000,21(2):118~123. Yan Chuliang, Gao Zhentong. Compilation theory of median stochastic fatigue load-spectrum with high confidence level for airplane [J]. Acta Aeronautica at Astronautica Sinica,2000,21(2):118~123. (in Chinese)
- 3 阎楚良,张书明,叶舸,等. 中值随机载荷谱数据处理专家系统[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(4):428~431. Yan Chuliang, Zhang Shuming, Ye Ge, et al. Data treatment expert system for median stochastic load-spectrum [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2000,26(4):428~431. (in Chinese)
- 4 刘克格,闫楚良.飞机起落架载荷谱实测与编制方法[J].航空学报,2011,32(5):841~848.
 Liu Kege, Yan Chuliang. Load measurement and compilation of landing gear of airplane [J]. Acta Aeronautica at Astronautica Sinica,2011,32(5):841~848. (in Chinese)
- 5 阎楚良,张书明,卓宁生,等. 飞机机翼结构载荷测量试验力学模型与数据处理[J]. 航空学报,2000,21(1):56~59. Yan Chuliang, Zhang Shuming, Zhuo Ningsheng, et al. Mechanical model and data processing of load measurement test for the airplane's wing structure[J]. Acta Aeronautica at Astronautica Sinica,2000,21(1):56~59. (in Chinese)
- 6 Yan Chuliang, Liu Kege. Theory of active reliability-based design for predetermined life of structures [J]. Advanced Materials Research, 2008, 44 ~ 46: 745 ~ 750.
- 7 Brychta R J, TUNtrakool S, Appalsamy M, et al. Wavelet methods for spike detection in mouse renal sympathetic nerve activity[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54(1):82 ~93.
- 8 王国军, 胡人喜, 陈欣. nsoft 疲劳分析理论与应用实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 9 李映颖,谭光宇,曲建岭,等.飞行记录参数奇异点的处理[J].电机与控制学报,2009,13(增刊1):135~138. Li Yingying, Tan Guangyu, Qu Jianling, et al. Prehandling research of flight parameter strange points based on Matlab digital filtering technique [J]. Electric Machines and Control,2009,13(Supp. 1):135~138. (in Chinese)
- 10 张漫,汪懋华.联合收获机测产系统数据采集与处理的误差分析[J].农业机械学报,2004,35(2):172~174,171. Zhang Man,Wang Maohua. Brief report on research works of eight papers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(2):172~174,171. (in Chinese)
- 11 张书慧,马成林,吴才聪,等.变量施肥机空间数据采集与处理方法[J].农业机械学报,2004,35(4):93~96.
 Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Spatial data collection and processing for variable ratio fertilizing [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(4):93~96. (in Chinese)
- 12 胡宇轩,阎楚良.数据挖掘技术在农业机械质量控制中的应用[J].农业机械学报,2007,38(5):153~156.
 Hu Yuxuan, Yan Chuliang. Design and implementation on data mining technology in quality control of agricultural machinery
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(5):153~156. (in Chinese)
- 13 马京汉,周增产,于德年,等.屠宰废水 COD 测试方法及数据处理[J].农业机械学报,1999,30(5):72~75.
 Ma Jinghan, Zhou Zengchan, Yu Denian, et al. Testing method and computer numerical analysis for cod of slaughtering waste water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1999,30(5):72~75. (in Chinese)
- 14 王海军, 靳平, 刘贵忠, 等. 地震记录中毛刺干扰的自动检测[J]. 地震学报, 2003, 25(3):331~338.
 Wang Haijun, Jin Ping, Liu Guizhong, et al. Automatic spikes detection in seismogram [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3):331~338. (in Chinese)
- 15 Fuchs H O, Nelson D V, Burke M A, et al. Fatigue under complex loading: analyses and experiments [M]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1977: 145 ~ 162.