

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.037

基于指针排序的快速中值滤波算法研究

张博, 张杰, 骆伟, 周毅

(中国航发控制系统研究所软件工程部, 江苏 无锡 214063)

摘要:为实现航空发动机控制系统采集信号快速中值滤波,设计一种基于指针排序的快速中值滤波算法,将中值滤波过程分解为窗口数据更新和窗口数据中值求取两个算法片段。针对窗口数据更新算法片段,提出一种环形数据窗口更新算法,通过指针指向平移实现数据窗口的滑动,缩短了窗口数据更新的耗时。针对窗口数据中值求取算法片段,提出一种基于指针排序的数据比较和移位算法,在运算内存开销较小的情况下实现了窗口数据中值的快速求取。实验结果表明:基于指针排序的快速中值滤波算法能够在耗时减少的情况下,实现信号随机噪声的有效滤除。

关键词:航空发动机;控制系统;中值滤波;指针;排序算法;快速排序

中图分类号:TP274 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0175-04

Research on Fast Median Filter Algorithm Based on Pointer Sorting

ZHANG Bo, ZHANG Jie, LUO Wei, ZHOU Yi

(Software Department of AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: In order to realize the fast median filtering of the signals collected by aeroengine control system, a fast median filtering algorithm based on pointer sorting is designed. The median filtering process is divided into two algorithm segments: updating window data and calculating the median of window data. For the algorithm segment of updating window data, an updated algorithm based on the ring data window is proposed, which realizes the sliding of the data window by translating the pointer, effectively shortening the time-consuming of updating the window data. For the algorithm segment of calculating the median of window data, a data comparison and shift algorithm based on pointer sorting is put forward, which achieves the rapid calculation of the median value of window data with small computational memory overhead. The experimental results show that the fast median filtering algorithm can effectively filter the random noise of signals with less time consumption.

Keywords: aeroengine; control system; median filtering; pointer; sorting algorithm; quick sorting

0 引言

滑油液位传感器用于航空发动机控制,由于航空发动机的工作环境比较恶劣,导致滑油液位信号会出现随机噪声干扰,干扰过大时会引起航空发动机的控制异常。基于发动机运行试验统计分析,滑油液位信号的干扰类型为脉冲噪声。中值滤波算法能够有效去除随机脉冲噪声的影响并有效保留原始信号的细节信息,因此采用中值滤波算法对滑油液位信号进行滤波^[1]。

传统中值滤波算法主要针对窗口内的数据进行排序求取中值,因此传统中值滤波算法的最小平均时间复杂度为 $O(n \log_2 n)$ 。吴小培等^[2]利用相邻滤波窗口的数据关联性,将相邻 2 次中值滤波合并为 1 次进行,减少了中值滤波时间,但其平均时间复杂度为 $O(n \log_2 n)$,未根本解决中值滤

波的效率问题。叶晓东等^[3]对初次排序得到有序序列进行 2 次对分查找和内插,实现了时间复杂度为 $O(n)$ 的算法,效率极大提升,但对分查找时直接使用数值比较相等,使得对浮点信号进行滤波时可能会出现风险。靳斌、朱冰莲、鲍祥生、梅各各等^[4-7]则是通过设计特定的数据结构,利用空间复杂度来换取时间复杂度的降低,最终实现了时间复杂度为 $O(n)$ 的算法,但由于算法实现开辟了数个与滤波窗口长度相同的内存空间,使得滤波窗口长度增大时,内存消耗严重。

发动机控制分为定点型和浮点型两种运算类型,其中浮点型运算明确禁止数值比较相等,且控制芯片对于运算速度和运算内存均有较高要求。因此,研究适用于任意数据类型、时间复杂度和空间复杂度均较低快速中值滤波算法具有重要意义。

第一作者简介:张博(1995—),男,安徽宿州人,工程师,CCF 专业会员(B6940M),硕士研究生,研究方向为航空发动机控制系统,996311109@qq.com。

1 快速中值滤波算法原理

中值滤波算法的窗口通常表示为 $\{B[0], B[1], \dots, B[2N]\}$, 窗口宽度为 $2N+1$, 通过窗口的滑动和窗口数据中值的求取实现中值的获取。本文为分析方便, 取窗口宽度为 5, 即 $N=2$ 。

基于指针排序的快速中值滤波算法对窗口的滑动和窗口数据中值的求取进行优化。如图 1 所示, 定义环形窗口数组 $B = \{B[0], B[1], B[2], B[3], B[4]\}$, 将环形窗口数组中最老数据的数组索引定义为 h_{ead} 用以指示最老的数据位置。图 1 中 $B[3]$ 为最老数据, h_{ead} 的值为 3。定义指针数组 $P = \{P[0], P[1], P[2], P[3], P[4]\}$, 其中 $P[0]$ 指向数值最大的元素, $P[1] \sim P[4]$ 依次有序指向数值更小的元素。

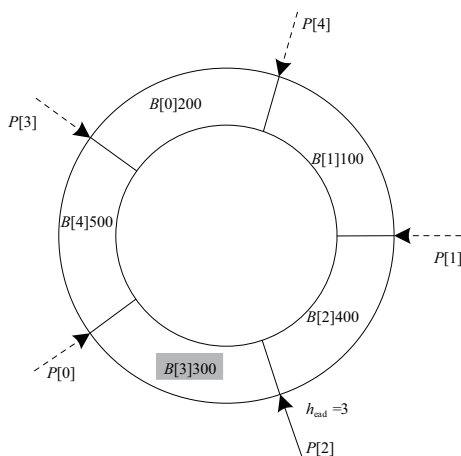


图 1 中值滤波环形数据窗口及指针数组指向示意图

经过上述定义以后, 假设已经得到如图 2 所示的初始状态有序窗口数组, 其中 $h_{\text{ead}}=3$, 并约定图中虚线箭头为当前步骤指针更新指向。

与窗口滑动进行数据更新的方式不同, 当有数据更新时, 如图 2 中数据更新步骤所示, 基于指针排序的快速中值滤波算法将最老位置的元素更新, 即 $B[3]$ 更新为 600; 在窗口数据中值求取结束后, 将 h_{ead} 更新为 4。相比于窗口滑动进行数据更新的时间复杂度 $O(n)$, 基于指针排序的快速中值滤波算法将数据更新的时间复杂度降低为 $O(1)$ 。

基于指针排序的快速中值滤波算法求取窗口数据中值的过程如图 2 中步骤 1 和步骤 2 所示。

步骤 1 遍历指针数组 P , 获取指向最新数据元素地址 $\&B[3]$ 的指针 $P[2]$ 。

步骤 2 更新指针数组 P 的指针指向, 实现窗口数组 B 中数据元素的排序, 以图 2 为例。

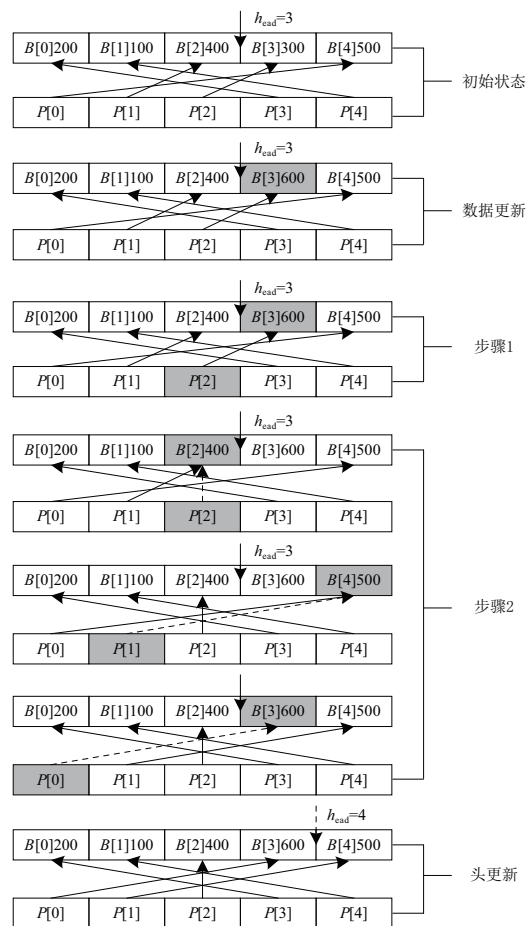


图 2 基于指针排序的快速中值滤波算法原理

1) 将窗口数组 B 最新元素 $B[3]$ 600 与 $P[1]$ 指向的数据元素 $B[2]$ 400 进行比较, 由于 $B[3]$ 600 大于 $B[2]$ 400, 因此, 令 $P[2]$ 指向数据元素 $B[2]$ 400。

2) 将窗口数组 B 最新元素 $B[3]$ 600 与 $P[0]$ 指向的数据元素 $B[4]$ 500 进行比较, 由于 $B[3]$ 600 大于 $B[4]$ 500, 因此, 令 $P[1]$ 指向数据元素 $B[4]$ 500。

3) 令 $P[0]$ 指向数据元素 $B[3]$ 600, 重新获得有序的指针数组 P , 中值即为 $P[N]$ 指向的数值。

综上, 基于指针排序的快速中值滤波算法主要思路是通过对比最新元素与左侧或右侧指针所指向的数据元素大小, 更改指针的指向, 重新获得有序的指针数组, 最终求取窗口数组的中值。

2 快速中值滤波算法实现与复杂度分析

基于指针排序的快速中值滤波算法的数据更新过程复杂度为 $O(1)$, 不再进行单独分析。本节对求取窗口数据中值过程进行详细分析。

如图 3 所示, 与算法原理对应, 求取窗口数据

中值过程分为步骤1、步骤2及返回中值等3个步骤,在进行算法复杂度分析时设 $n=2N+1$ 。

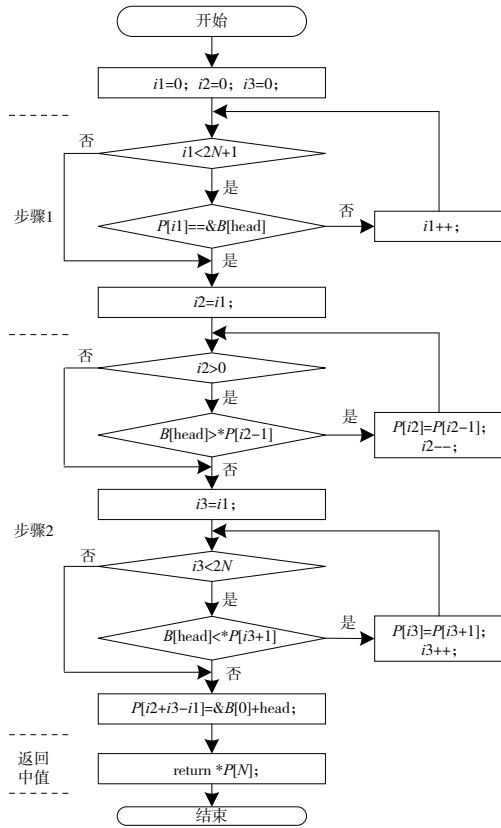


图3 基于指针排序的快速中值滤波算法实现

步骤1 遍历指针数组,指针元素与 $\&B[\text{head}]$ 进行比较,如果相等则退出循环,此时循环因子 $i1$ 为指向数组 B 最新元素的指针数组下标,即 $P[i1]$ 指向数组 B 最新元素。算法语句最大频度 $T(n)=2N+1$,算法语句最小频度 $T(n)=1$,算法语句平均频度 $T(n)=N+1$,时间复杂度为 $O(n)$ 。

步骤2 根据 $P[i1]$ 指向数值元素与左右指针指向数值元素的大小关系,向左或向右遍历指针数组,变更指针的指向。算法语句最大频度 $T(n)=4N+1$,算法语句最小频度 $T(n)=3$,算法语句平均频度 $T(n)=2N+2$,时间复杂度为 $O(n)$ 。

返回中值步骤仅对指针解引用获取中值,算法语句最大频度为 $T(n)=1$,算法语句最小频度 $T(n)=1$,算法语句平均频度 $T(n)=1$,时间复杂度为 $O(1)$ 。

通过上述算法分析,基于指针排序的中值滤波算法的算法语句最大频度为 $T(n)=6N+3$,算法语句最小频度 $T(n)=5$,算法语句平均频度 $T(n)=3N+4$,时间复杂度为 $O(n)$ 。基于指针排序的中值滤波算法求取窗口数据中值过程开辟大

小为 n 的指针数组,因此空间复杂度为 $O(n)$ 。

3 实验结果分析

3.1 快速中值滤波算法有效性验证实验

为验证基于指针排序中值滤波算法的有效性,选取正弦波进行验证。首先,使用波形生成器生成幅值为 1.0、周期为 5 s、采样频率为 40 Hz 的正弦波,并叠加取值 $[0.0, 1.0]$ 之间的随机噪声;然后,将波形数据使用窗口宽度分别为 15、31、63 的中值滤波算法进行滤波处理。滤波处理完毕后,结果如图 4 所示,从绘制正弦波的原始波形图及不同窗口宽度下的滤波波形,可以看出基于指针排序的中值滤波算法能够有效地进行滤波处理。

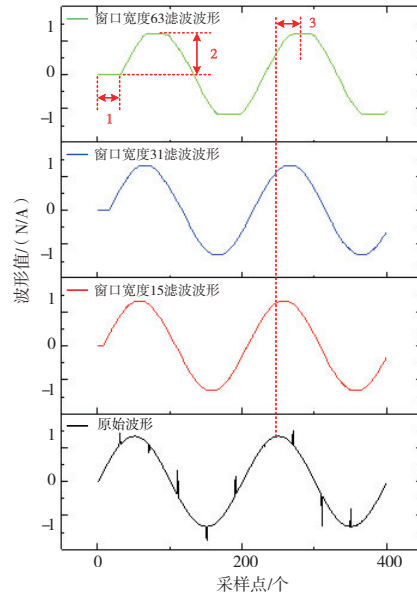


图4 正弦波原始波形及滤波波形

如图4中标注1所示,基于指针排序的中值滤波算法在滤波开始的 N 个周期不能有效发挥滤波的作用,滤波窗口内的更新数据个数必须大于 N ,滤波才可能生效。

如图4中标注2所示,当波形由单调递增变为单调递减,滤波后的波形峰值会降低。同理,当波形由单调递减变为单调递增,滤波后的波形峰值会增高。滤波后的峰值大小取决于滤波窗口宽度 $2N+1$ 和采样频率 $f(\text{Hz})$ 以及波形的单调速率。

如图4中标注3所示,基于指针排序的中值滤波算法会导致滤波后的波形滞后于原始波形,滞后的时间 $t_{\text{delay}}(\text{s})$ 取决于滤波窗口宽度 $2N+1$ 和采样频率 $f(\text{Hz})$:

$$t_{\text{delay}} = N/f \quad (1)$$

完成中值滤波算法测试验证后,将该算法应用于 XX 航空发动机数字电子控制器中进行飞行器试飞。如图 5 所示,截取试飞过程中一段时间内具有脉冲噪声干扰特征的 XX 信号采样波形及中值滤波后波形,可以看出中值滤波算法能够有效地实现 XX 信号的滤波。为观察滤波细节,将图 5 中区域 1 放大,得到如图 6 所示的波形。

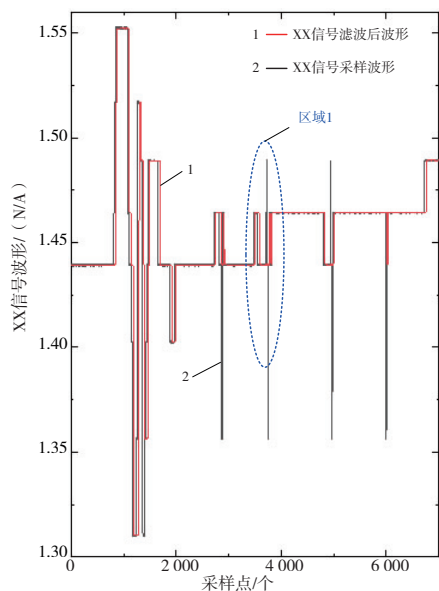


图 5 XX 信号原始波形及滤波波形

如图 6 所示,区域 2 中原始波形有细微的毛刺,经过中值滤波后毛刺消失,验证了中值滤波对于微小波动的平滑作用。如区域 3 和区域 4 所示,中值滤波算法对于飞行过程中 XX 信号突然出现的脉冲噪声具有良好的滤除作用。

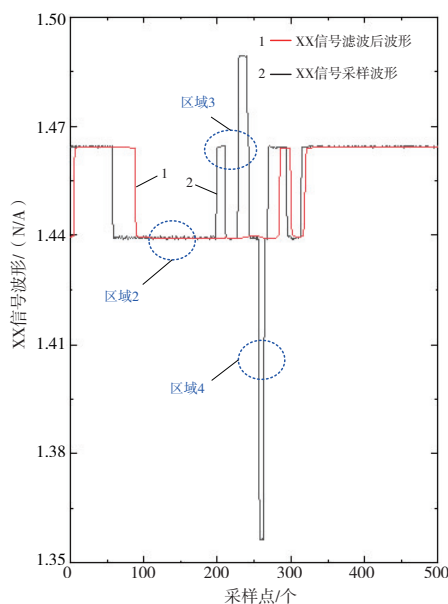


图 6 XX 信号原始波形及滤波波形局部放大图

3.2 快速中值滤波算法运算速度对比实验

为验证基于指针排序的中值滤波算法的运算速度,利用 XX 航空发动机数字电子控制器开展实验。如表 1 所示,算法 1 为基于指针排序的中值滤波算法,算法 2 为文献[7]的快速中值滤波算法,算法 3 为基于 Hoare C A R 快速排序算法的传统中值滤波算法。针对不同中值滤波算法,实验选取 5 种数据窗口长度开展 15 组实验,每组实验运行 20 000 个数据采样周期,重复运行 50 次取算法耗时平均值,对耗时均值进行单位归一化处理。可以看出,算法 1 和算法 2 的耗时呈现时间复杂度为 $O(n)$ 的增长趋势,算法 3 的耗时呈现时间复杂度为 $O(n \log_2 n)$ 的增长趋势,算法 1 相比算法 2 耗时减少约 50%。

表 1 中值滤波算法运算用时对比

数据窗口长度	算法 1 耗时均值	算法 2 耗时均值	算法 3 耗时均值
15	2.48	3.62	56.20
31	3.26	6.22	217.11
63	5.20	10.58	1 007.21
127	8.36	22.14	4 836.22
255	15.34	43.82	25 168.30

3.3 快速中值滤波算法的应用约束

基于指针排序的中值滤波算法作为中值滤波算法的一种,其应用场景在于消除缓变信号的随机噪声干扰,这是中值滤波算法应用的最顶层约束。此外,基于指针排序的中值滤波算法具有以下几个使用约束。

1) 由于中值滤波算法前 N 个周期不能有效发挥滤波作用,因此在使用中值滤波时,应充分考虑前 N 个周期的信号处理措施。例如:上电的前 N 个周期不进行滤波或者设置中值滤波算法的滤波窗口数据为信号安全值,以便消除前 N 个周期不能有效发挥滤波作用的影响。

2) 由于中值滤波算法会导致波形滞后,因此在使用中值滤波时,应充分考虑采样频率和滤波窗口长度对滞后时间的影响。如果控制系统对于信号值的实时性要求较高,不能采用中值滤波。

3) 由于中值滤波算法会导致波形的峰值改变,因此在波形峰值较为关键的应用场合,应当根据滤波窗口宽度、采样速率和波形单调速率对峰值差值进行计算,选取合适的滤波参数。

(下转第 242 页)

起到理想跟踪效果。选择模糊WMR-PID方法处理的时候能够大幅降低控制动态的超调量,说明模糊WMR-PID控制器可以实现理想的控制效果,并达到优异鲁棒性。

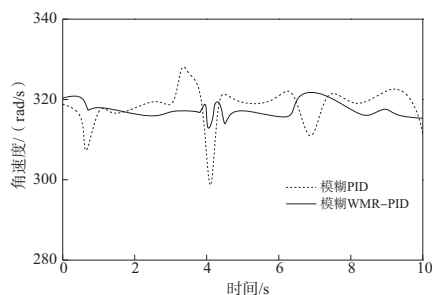


图6 干扰下控制速度曲线

4 结语

1) 采用模糊推理的方式确定输出变量,根据重心分析法解模糊处理,并建立了模糊WMR-PID控制模型。

2) 模糊WMR-PID控制方式可以实现快速跟随要求,当初始指令速度为2 450 r/min时,指令在8 s时迅速增大至3 540 r/min,14 s时又迅速降低至1 930 r/min。

3) 相对模糊PID方法,模糊WMR-PID能够大幅降低控制动态的超调量,说明模糊WMR-PID控制器可以实现理想控制,并达到优异鲁棒性。

参考文献:

- [1] 徐鹏,曾俊杰,张伟. 直流无刷电机的改进型滑模控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021(11): 182-188.
- [2] 任志斌,周运逸,朱杰,等. 基于无刷直流电机的无位

置传感器控制[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 100-102, 107.

- [3] 吕中正,张兰红,曹克强. 电动汽车增程器用无刷直流电机控制系统设计与研究[J]. 电子器件, 2021, 44(5): 1149-1154.
- [4] 刘乐平,袁林中,曾昭韦,等. 自旋飞行器IMU隔离的装置设计及其解旋性能[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5): 197-202.
- [5] 张淑芳,宋香明,朱彬华. 结合改进PSO-BP神经网络的无刷直流电机控制[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2021, 54(4): 62-67.
- [6] 刘雨豪,廖平. 基于MFO算法的无刷直流电机模糊控制设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 107-111.
- [7] KHAN M A, RAHMAN M A. A new wavelet-based speed controller for induction motor drives[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(12): 1282-1298.
- [8] KHAN M A S K, RAHMAN M A. A novel neuro-wavelet-based self-tuned wavelet controller for IPM motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 1194-1203.
- [9] 唐伟,王立忠,庄健,等. 无刷直流电机的模糊自整定MRPID转速控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1786-1792, 1800.
- [10] 张瑞成,赵铭. 模糊PID轧机单辊传动系统负荷平衡控制的研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 371(1): 37-41.
- [11] 王婷婷,胡黄水,赵宏伟,等. 无刷直流电机转速智能混合控制器设计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020, 58(3): 659-665.
- [12] 刘晋霞,王莉,刘宗峰. 四驱电动轮汽车模糊逻辑控制的再生制动系统[J]. 机械设计与制造, 2021, 370(12): 164-168.

收稿日期:2022-08-12

(上接第178页)

4 结语

本文提出了基于指针排序的中值滤波算法,通过设计环形数据窗口进行滤波窗口数据的快速更新,通过基于指针排序的窗口中值获取算法进行窗口中值的快速获取,实现了中值滤波算法运算速度的大幅提升。由于基于指针排序的中值滤波算法不涉及元素数值的相等判断操作,因此该算法适用于任意数据类型的中值滤波。该算法除了能够获取窗口中值元素外,能够获取窗口任意位置的元素,具有较为广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 俞莎莎,朱如鹏,李苗苗,等. 基于机器视觉的齿面点

蚀面积特征提取的研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 87-90.

- [2] 吴小培,柴晓冬,张德龙. 一种中值滤波的快速算法[J]. 数据采集与处理, 1995, 10(2): 151-155.
- [3] 叶晓东,朱兆达. 中值滤波的快速算法[J]. 信号处理, 1997, 13(3): 227-230.
- [4] 靳斌,郭永彩,杨冠玲,等. 一种中值滤波的快速算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1999, 22(5): 13-16.
- [5] 朱冰莲,潘哲明,李单单. 一种中值滤波的快速算法[J]. 信号处理, 2008, 24(4): 684-686.
- [6] 鲍祥生,尹成,田继东,等. 中值滤波的一种快速算法[J]. 石油物探, 2005, 44(4): 325-328.
- [7] 梅各各,靳斌,龚伟. 一种快速中值滤波算法[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2012, 31(6): 77-80.

收稿日期:2022-09-27