

◇ 研究报告 ◇

级联积分梳状滤波器在超声检测系统中的应用*

周文佳^{1,2} 毛捷^{1†} 冷涛¹ 廉国选¹

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 在超声探伤系统中,通常要求回波幅度的垂直线性误差小于 $\pm 5\%$,通常采样率需 10 倍于原始信号频率以上,对于高频探头来说对仪器的 A/D 性能要求较高。该文提出了一种基于现场可编程门阵列的对探伤信号恢复幅值方法,采用高效的级联积分梳状滤波器(CIC 滤波器)及其 FIR 补偿滤波器进行滤波插值,在有限的采样频率下实现了高频信号的幅值恢复,并通过 MATLAB 和自研硬件平台进行了仿真、架构和实验,验证了 CIC 插值滤波器的滤波误差小于 2.2% 且效率高于具有同等插值效果的 FIR 插值滤波器,具备很好的工程应用价值。

关键词 CIC 滤波器,滤波插值,FIR 补偿滤波器,现场可编程门阵列

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)06-0861-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.06.005

Application of cascaded integral comb filter in the ultrasonic detection system

ZHOU Wenjia^{1,2} MAO Jie¹ LENG Tao¹ LIAN Guoxuan¹

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the ultrasonic detection system, generally the vertical linearity error of the echo signal amplitude should be less than $\pm 5\%$. Usually, the sampling rate is 10 times higher than the original signal frequency. For probe with high frequency, the A/D performance of the equipment is required to be rather high. In this paper, an interpolation method which is based on FPGA and aiming to restore the amplitude is proposed. The efficient cascaded integral comb filter(CIC filter) and its FIR compensation filter are used as interpolation filter, so that the amplitude of high frequency signal can be regained from a limited sampling frequency. The results are verified by MATLAB, hardware platform and experiments. It is demonstrated that the error rate of CIC interpolation filter is less than 2.2% and the efficiency is higher than that of FIR interpolation filter with equivalent interpolation effect. It has great engineering value.

Key words CIC filter, Interpolation, FIR compensation filter, Field-programmable gate array

2018-03-05 收稿; 2018-06-23 定稿

*中国科学院知识创新项目(CXJJ-16Z220)

作者简介: 周文佳(1992-),女,黑龙江大庆人,硕士研究生,研究方向:信号与信息处理。

†通讯作者 E-mail: maojie@mailucas.ac.cn

1 引言

对于超声检测系统,为了能够更方便和更快速地完成回波信号的重建,通常要求采样率达到10倍于原始信号频率以上^[1],对于高频探头来说对仪器的A/D性能要求较高,同时巨大的数据量给信号的传输、存储都带来了一定的难度。考虑到仪器成本、硬件资源占用率和实时效率等因素,可以使用多速率滤波器巧妙地解决这个问题。它基于采样定理,并在滤波器的配合下,采用有限的采样频率,对整个工作频带内的信号进行重采样,可实现高频信号的幅值恢复^[2],有效提升现有超声仪器性能。

可用于做插值的滤波器的基本滤波器有多种,如FIR滤波器、级联积分梳状(Cascade integrator comb, CIC)滤波器、半带FIR滤波器等。20世纪90年代,毛捷等^[3]、王秀芬等^[4]分别基于FIR滤波器、IIR滤波器的软件算法实现数字探伤仪中的滤波插值;2017年,李杏华等^[5]将插值算法用于相控阵系统中;2018年,尹子骞等^[6]设计出基于多级CIC滤波器的相控阵延时算法,插值的同时提高了时延精度。现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)作为一种可灵活定制的逻辑单元阵列,其内部有大量的逻辑资源可用来编程实现并行计算功能,并在后续逻辑功能调整时具有较强的灵活性,成本较低、风险低、易开发、可通用。为了减轻上位机软件工作负担、提高运算效率,本文基于FPGA利用CIC滤波器及其补偿滤波器实现滤波插值。CIC滤波器的优点在于仅需要加法运算来实现且所需的加法器数目也很少,不需存储滤波器系数故无需乘法运算,节约资源,可简单高效实现低通滤波,已被证明十分适合用作插值滤波器。在基于FPGA的高速率硬件系统中,CIC插值滤波器比其他插值滤波器更具明显优势,对于提高超声检测成像实时性具有重要意义^[7]。

本文基于FPGA,采用Verilog HDL语言编程实现CIC插值滤波器及其FIR补偿滤波器,在有限的采样频率下实现了高频信号的幅值恢复。主要内容包括:CIC滤波器原理介绍,优缺点分析,针对缺点提出的补偿滤波器设计方法、架构设计、功能仿真、实验验证以及资源占用率分析,证明了CIC滤

波器结构简单易于实现,资源占用率低,可用于超声检测系统的滤波插值。

2 CIC滤波器的原理与结构

2.1 滤波插值原理

整倍数插值(设插值倍数为 L , L 为大于1的整数)是指在已知信号 $x(m)$ 的每相邻采样点之间等间距地插入 $L-1$ 个0值点,完成这个处理步骤的工具被称为 L 倍内插器。若输入采样率为 $f=1/T$,输出采样率为 $f=L/T$,则经过插值后的序列为

$$x_L(n) = \begin{cases} x(n/L), & n = 0, \pm L, \pm 2L, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

设信号 $x(m)$ 的频谱为 $X(e^{j\omega})$,求得信号 $x_L(n)$ 的傅里叶变换 $X_L(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega L})$,可见输出信号的频谱是输入信号的频谱的 L 倍压缩,插值后信号的频谱成分不仅含有基带分量即原始信号的频谱,而且含有其镜像高频分量。由采样定理知,在插值后接入一个低通滤波器滤除镜像分量保留原始基带谱,就可以使原始信号中插入的0值都恢复为“准确值”,从而提高信号时域分辨率^[8]。

2.2 CIC滤波器的原理与结构

CIC滤波器由两部分组成:积分器和梳状滤波器^[9]。积分器的结构如图1所示,其中 Δ 代表一个延时单元。其传递函数为

$$G(z) = 1/(1 - z^{-1}). \quad (2)$$

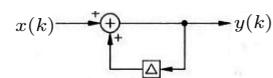


图1 积分器的结构

Fig. 1 The structure of integrator

而梳状滤波器的结构如图2所示。其传递函数为

$$H(z) = 1 - z^{-D}, \quad (3)$$

其中, D 为延迟单位的个数。二者级联后得到积分梳状滤波器如图3所示。其传递函数为

$$H(z) = \frac{1 - z^{-D}}{1 - z^{-1}} = 1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-D+1}, \quad (4)$$

与滑动平均滤波器的传递函数完全相同。同时可见,在实现相同的功能的前提下,与滑动平均滤波器($D-1$ 次加法运算、 $D-1$ 个寄存器)对比,CIC滤波器的运算量(2次加法运算、 $D+1$ 个寄存器)更少。

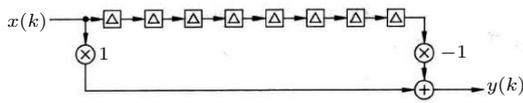


图2 梳状滤波器的结构

Fig. 2 The structure of comb filter

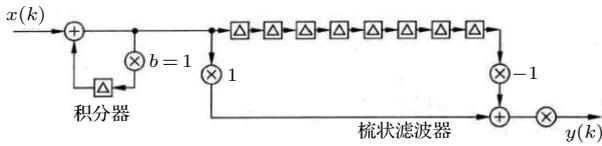


图3 积分梳状滤波器的结构

Fig. 3 The structure of integral comb filter

2.3 CIC滤波器的频谱分析

由上述可知,CIC滤波器是一种基于零极点相消的FIR滤波器。单级CIC滤波器的传递函数为

$$H(z) = \frac{1 - z^{-RM}}{RM(1 - z^{-1})}, \quad (5)$$

频率响应为

$$H(e^{j\omega}) = \frac{\sin(\omega R/2)}{RM \sin(\omega/2)}. \quad (6)$$

CIC滤波器梳状部分延迟 D 由 $R \times M$ 表示; M 为差分延迟,通常为1; R 为CIC滤波器的插值因子,它决定了插值后信号的采样频率,与 M 一起决定了主瓣和旁瓣的宽度,即 $R \times M$ 决定零点的位置。 $R \times M$ 的增大可以有效地减少通带内的混叠,但 $R \times M$ 过大会导致通带内主瓣衰减过大、主瓣宽度过窄,所以一般 M 取1或2;通常情况下,根据工程要求来确定抽取因子 R ,然后对通带带宽、通带衰减和混叠特性进行综合考虑来确定差分延迟 M 和滤波器的级数 N 。单级CIC滤波器的幅频特性如图4所示(原始信号采样率100 MHz, $R = 4, M = 1$)。

其中频率区间 $(0 \sim 2\pi/RM)$ 为CIC滤波器的主瓣,剩余部分为旁瓣,由频率响应公式计算和软件仿真结果可知旁瓣仅比主瓣电平低约13.46 dB,可知单级CIC滤波器旁瓣很高,阻带衰减很差,难以达到低通滤波效果。采用多级级联的办法可以较好地解决这个问题。若采用 N 级级联,则阻带衰减为

$N \times 13.46$ dB,随之带来的负面影响是通带内衰减也随着级数的增加而相应增大^[10]。综合考虑,3级已基本满足设计要求,其幅频特性如图5所示(采样率100 MHz, $R = 4, M = 1$)。

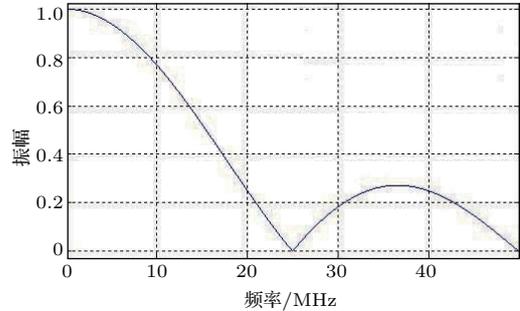


图4 单级CIC滤波器的幅频特性

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristics of single-stage CIC filter

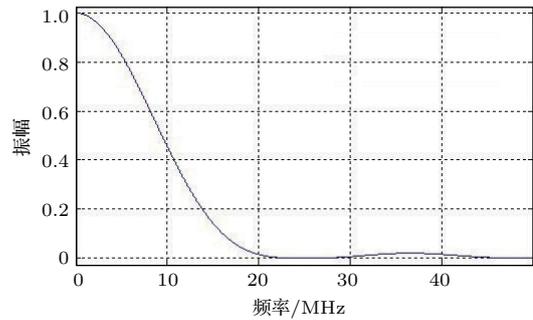


图5 3级CIC滤波器的幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristics of three-stage CIC filter

3 CIC补偿滤波器

由图5可知,直接使用CIC滤波器不能达到理想低通滤波效果,其通带很短并且不够平坦,阻带衰减过于缓慢,从而对信号幅值恢复带来一定的影响。为了解决这一问题,选择在CIC滤波器后级联一个补偿滤波器,为了使补偿后的CIC滤波器通带平整,其幅频响应为CIC滤波器幅频响应的倒数,是一个升幅FIR滤波器,即

$$G(f) = \left| RM \frac{\sin(\pi f/R)}{\sin(\pi M f)} \right|^N \approx \left| \frac{\pi M f}{\sin(\pi M f)} \right|^N = |\text{sinc}^{-1}(Mf)|^N. \quad (7)$$

如图6所示,信号采样频率为50 MHz,星号线为3级CIC滤波器的幅频特性,虚线为30阶FIR补偿滤波器的幅频特性,点实线为两个滤波器级联后

的幅频特性。可见级联FIR补偿滤波器之后的CIC滤波器具有更加平坦的通带, -3 dB带通由10 MHz扩展到14.7 MHz, 适用于更高频率的超声信号。另外为了对比CIC滤波器的处理效率, 这里还给出了具有与此CIC插值滤波器相似滤波性能的64阶FIR滤波器的频谱特性。后文所提的CIC滤波器均指补偿后的CIC滤波器。

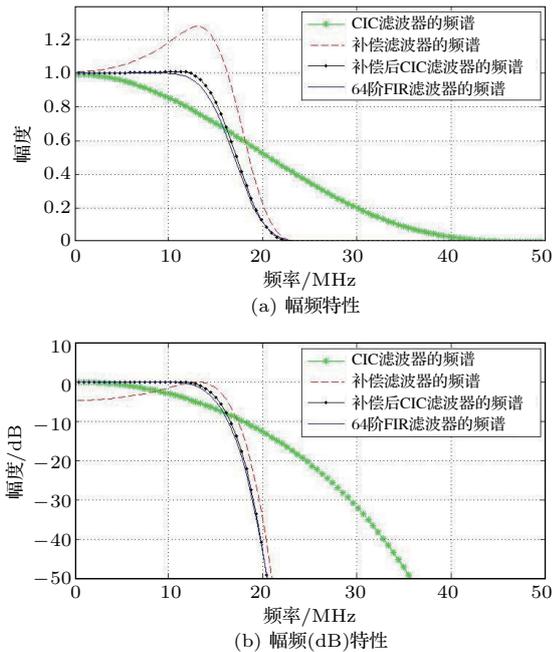


图6 CIC、FIR插值滤波器的幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of CIC filter and FIR filter

4 仿真与实验

4.1 MATLAB仿真结果

本文利用MATLAB软件进行仿真并基于自研超声检测平台进行实验, 对8 MHz超声回波信号的滤波插值效果做了验证。为了说明滤波插值的有效性, 本文在以下的仿真及实验过程中均选择了原始信号采样最差的情况(信号峰值最低的采样结果)。

原始信号为8 MHz高斯包络正弦信号, 采样率为50 MHz, 选用3阶CIC滤波器进行2倍插值, 并用30阶升幅FIR滤波器作为补偿, 仿真结果如图7所示。这里原始信号最高峰幅值为1.00 V, 调整信号起始相位, 在较差的情况下, A/D获取的最高峰幅值为0.87 V, 相对于原始信号的误差为12.64%, 经CIC滤波插值后, 最高峰幅值为0.97 V, 相对于

原始信号的误差为2.16%, 起到了很好的信号恢复的作用。

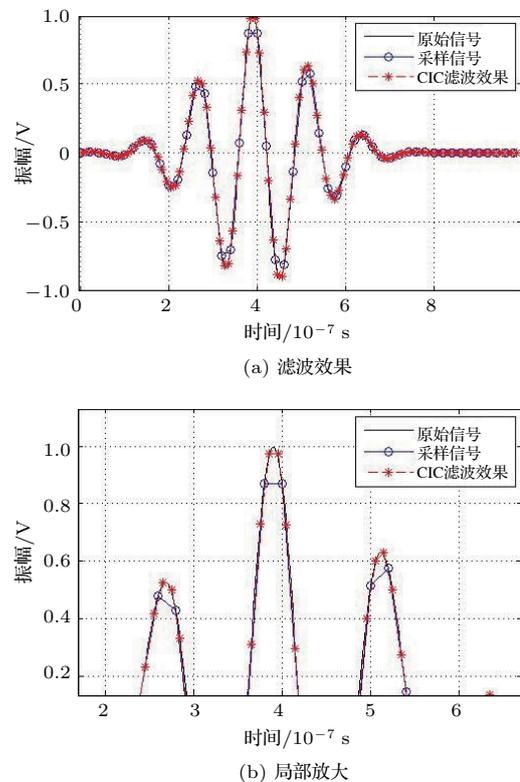


图7 CIC滤波器插值效果的软件仿真

Fig. 7 Software simulation of interpolation effect of CIC filter

4.2 实验结果

基于现有的原理分析与仿真结果, 在实验室开发的一款通用超声检测板上基于FPGA实现CIC插值滤波器的功能, 通过滤波插值, 将信号的时域分辨率提升到100 MHz。

实验选用8 MHz探头、50 MHz的采样率, 采用3阶CIC滤波器进行2倍插值, 并用30阶升幅FIR滤波器作为补偿, 为了对比CIC滤波器的处理效率, 另外还设计了一路具有相近滤波插值性能的64阶FIR滤波器。如图8所示, 利用示波器的2.5 GHz采样信号作为原始信号, 以实线表示, 长、短虚线分别代表CIC滤波器和64阶FIR滤波器的插值效果。在这四种信号的第一个正向峰值处, 原始信号幅值为0.23 V, 50 MHz采样信号幅值为0.21 V, 相对于原始信号的误差为7.66%; CIC滤波后信号幅值为0.23 V, 误差为0.78%; 64阶FIR滤波后信号幅值为0.22 V, 误差为4.86%。由此可见CIC滤波器具有良好的幅值恢复插值性能。

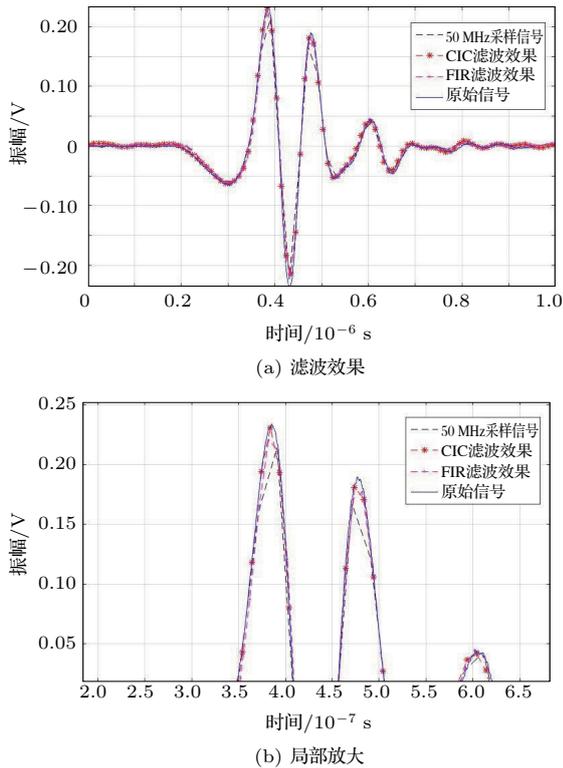


图8 CIC滤波器插值效果的实验波形

Fig. 8 Experimental result of interpolation effect of CIC filter

4.3 资源占用率分析

FPGA中的计算时间严格遵循用户设定的时钟周期,在本次实验中CIC模块和FIR模块的输入时钟均为50 MHz,64阶FIR滤波器比3级CIC滤波器(含30阶FIR补偿滤波器)慢了31个时钟周期,即 $0.62\ \mu\text{s}$ 。

系统整体资源占用量如表1所示。相比于64阶FIR滤波器,CIC滤波器在查找表LUT、触发器FF

表1 两种滤波器的系统资源占用量

Table 1 System resource occupancy rate using two filters

资源	CIC滤波器 占用量/%	FIR滤波器 占用量/%
LUT查找表	11.46	11.40
LUTRAM	3.64	9.57
FF触发器	8.29	7.95
Block RAM	62.38	62.38
DSP	9.44	18.89
IO接口	35.44	35.44
BUFG全局时钟线	31.25	31.25
MMCM时钟管理器	50.00	50.00

等资源方面的占用量相近,但CIC滤波器占用了更少的DSP单元(包括乘法器、寄存器、门等)和LUTRAM单元,分别降低了50.03%和61.96%,这对于资源量有限的复杂并行超声系统具有重要意义。

5 结论

本文叙述了插值基本原理、CIC滤波器的结构与频谱分析及补偿FIR滤波器的设计方法和补偿效果,通过仿真和实验验证了其滤波插值幅值恢复的良好效果,证明了基于FPGA的CIC插值滤波器设计架构的正确性和实用性。这种滤波器结构简单,参数少,能够节约硬件资源,大大减少了计算量,在工程上易于实现,对于提高超声检测成像的实时性具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 曹淑琴, 赵新超, 袁开国, 等. 基于FPGA的超声波信号处理设计与实现[J]. 电子技术应用, 2010, 36(5): 104-108.
Cao Shuqin, Zhao Xinchao, Yuan Kaiguo, et al. Design and implementation of ultrasonic processing scheme based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2010, 36(5): 104-108.
- [2] 鲍晓宇, 施克仁, 洪玉萍. 超声信号处理系统中FPGA的动态重构[J]. 微电子学与计算机, 2003, 20(7): 5-7.
Bao Xiaoyu, Shi Keren, Hong Yuping. Dynamic reconfiguration of FPGA in ultrasonic signal processing system[J]. Microelectronics & Computer, 2003, 20(7): 5-7.
- [3] 毛捷, 郭成彬. 插值滤波器在全数字超声探伤仪中的应用[J]. 无损检测, 1996, 18(9): 241-243, 261.
Mao Jie, Guo Chengbin. Application of interpolator to numerical ultrasonic flaw detector[J]. NDT, 1996, 18(9): 241-243, 261.
- [4] 王秀芬, 郭成彬, 黄振俨. 插值数字滤波技术在超声检测仪中的应用[J]. 应用声学, 1997, 16(5): 39-41.
Wang Xiufen, Guo Chengbin, Huang Zhenyan. Application of digital filtering to ultrasonic inspection[J]. Journal of Applied Acoustics, 1997, 16(5): 39-41.
- [5] 李杏华, 江尚良, 刘全利, 等. 高精度波束形成的相控阵超声系统研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3): 471-476.
Li Xinghua, Jiang Shangliang, Liu Quanli, et al. Research on phased array ultrasonic system with high-precision beamforming[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(3): 471-476.
- [6] 尹子骞, 秦云, 骆英, 等. 基于多级CIC滤波器的相控阵延时算法设计[J]. 信息技术, 2018(1): 1-4, 9.
Yin Ziqian, Qin Yun, Luo Ying, et al. The time delay of ultrasonic phased array based on multistage CIC filter[J]. Information Technology, 2018(1): 1-4, 9.

- [7] 宋建波, 林迟鸣. CIC 滤波器的设计与应用 [J]. 信息通信, 2012(6): 44-45.
Song Jianbo, Lin Chiming. The design and application for CIC filter[J]. Information & Communications, 2012(6): 44-45.
- [8] 桑亚楼, 阮郑兴. 无线电数字信号处理与软件无线电技术综述 [J]. 电子科技, 2012, 25(6): 155-157.
Sang Yalou, Ruan Zhengxing. Review on radio digital signal processing and software radio technology[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(6): 155-157.
- [9] 朱体高, 刘铁根, 张海顺. 采用 FPGA 信号处理系统的设计与应用 [J]. 电气传动, 2011, 41(1): 52-55.
Zhu Tigao, Liu Tiegeng, Zhang Haishun. Design and application of signal processing system based on FPGA[J]. Electric Drive, 2011, 41(1): 52-55.
- [10] Babic D, Vesma J, Renfors M. Decimation by irrational factor using CIC filter and linear interpolation[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001. Proceedings. IEEE, 2007, 6: 3677-3680.

◇ 声学新闻和动态 ◇

2018 年度全国检测声学会议在重庆成功召开

2018年10月17-20日,由中国声学学会检测声学会主办、重庆大学承办、中国科学院声学研究所协办的2018年度全国检测声学会议在重庆大学虎溪校区成功召开。中国声学学会学术委员会主任程建春,中国声学学会检测声学会副主任刘晓峻、邓明晰、胡恒山、徐春广、毛捷及程茜,中国声学学会物理声学会主任刘晓宙,中国声学学会医学超声分会主任他得安,中国声学学会功率超声分会副主任林书玉以及中国机械工程学会无损检测分会副理事长卢超等人出席了开幕式。来自全国50家高等院校、研究院所和企业的160余位代表参加了会议,围绕检测声学相关的基础、应用基础及前沿技术等研究热点展开了热烈的学术交流。

大会开幕式由检测声学会程茜副主任主持。检测声学会副主任毛捷研究员致开幕词,她代表因事未能到会的王秀明主任、代表分会对各位参会代表表示了欢迎,同时对会务组辛勤工作表示感谢,希望与会代表借助会议平台开展学术交流,开拓研究视野,活跃学术思想,推动自主创新。重庆大学航空航天学院院长胡宁教授在随后的发言中感谢了中国声学学会检测声学会对学院的信任,他表示学院作为承办方将全力做好服务工作,为各位专家学者提供良好的学术交流平台。重庆大学校长助理夏之宁教授代表学校对各位莅临山城表示了欢迎,表示本次会议是重庆大学向各兄弟高校和院所学习的难得机会,体现了交叉融合、改革创新的发展理念。

此次会议特邀了11位专家为与会代表奉上了一场精彩的学术盛宴。胡宁教授介绍了非线性 Lamb 波的最新研究进展;美国 Blatek 公司耿学仓总裁介绍了无损检测用压电换能器的最新进展及相关工艺;哈尔滨工业大学胡恒山教授介绍了震电测井波场的模拟与分析;北京工业大学何存富教授介绍了厚壁管道超声导波检测方法 with 传感关键技术研究;北京理工大学徐春广教授介绍了残余应力超声检测与无应力制造技术;南京航空航天大学袁慎芳教授介绍了结构健康监测中损伤的概率挖掘诊断;中国石油大学(北京)乔文孝教授介绍了方位固井质量评价技术及效果分析;东莞理

工学院林荣博士介绍了基于超声导波的钢轨探伤关键技术研究;浙江大学居冰峰教授介绍了基于激光超声的亚表面缺陷测量技术;中国科学院声学研究所张秀梅研究员介绍了随机渗透率模型及井孔斯通利波;中国科学技术大学田超研究员介绍了可用于单细胞和单血管成像的光声显微成像技术。各位专家的精彩报告引发了与会代表的浓厚兴趣与热烈讨论。

19日,80余篇专题报告在“检测超声与光声检测”、“固体声学及深部钻测”以及“非线性声学及非线性超声检测技术”三个分会场同时进行,涉及了超声检测理论与方法、超声成像与信号处理、光声光热检测新技术、复杂固体介质中的计算声学、非常规储层声学、随钻与声波测井理论与方法、非线性声学理论、技术与材料评价等内容。会议安排紧凑,交流自由充分,反应热烈。报告结束后,经学术委员会评审,南京大学王晓戎、复旦大学李旦、河海大学姜学平、中科院声学所吴樵和胥利文、中国石油大学(北京)李丹、哈尔滨工业大学许家旗、国防科技大学朱颖以及华东理工大学丁涛涛9位青年学者获得了优秀论文奖,相关内容将在《应用声学》杂志发表。

闭幕式上,中国声学学会检测声学会副主任刘晓峻教授致闭幕词,他感谢了承办单位的大力支持,并对与会代表们高质量的学术报告和积极参与的精神表示赞赏。随后中国声学学会学术委员会主任程建春教授为优秀论文获奖者颁奖,会议在热烈的掌声中圆满落幕。

2018年度全国检测声学会议展示了我国检测声学领域的最新研究成果,促进了高校、科研院所和企业同行的交流合作,为大家的科研工作提供了更多的科研创新思路。欢迎更多的专家学者关注检测声学会的活动,检测声学会将继续组织高质量的学术交流会议,为推动我国的检测声学事业发展而努力。

(中国声学学会 安志武)