

引用格式: 刘雪, 夏伟杰, 凡志邈, 等. 基于 CORDIC 的成像声呐加权系数实时生成方法研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 774-778. [LIU Xue, XIA Weijie, FAN Zhimiao. Research on CORDIC based real-time generation method of weight coefficients for imaging sonar[J]. Technical Acoustics, 39(6): 774-778.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.020

基于 CORDIC 的成像声呐加权系数 实时生成方法研究

刘 雪, 夏伟杰, 凡志邈

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

摘要: 针对线列阵成像声呐加权系数的预存储式生成方法, 需要在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中调用 Block Memory IP 核预存所有加权系数进行波束形成, 造成随机存储器(Random Access Memory, RAM)资源占用过多的问题, 提出了一种基于 CORDIC 实时生成加权系数的改进方法。通过预存少量的波束角度值并利用乘法器和 CORDIC IP 核实时生成加权系数, 该方法可降低 77%的 RAM 资源; 此外, 通过上位机下发声速, 可以实现动态加载不同声速下的加权系数进行波束形成, 并且能够保持较高的运算效率。经过 ISE 布局布线, 该方法有效地均衡了 RAM 资源与逻辑资源的占用率, 节省 FPGA 成本, 具有很好的工程应用价值。

关键词: 成像声呐; 线列阵; 加权系数; CORDIC; 现场可编程门阵列(FPGA)

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-06-0774-05

Research on CORDIC based real-time generation method of weight coefficients for imaging sonar

LIU Xue, XIA Weijie, FAN Zhimiao

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: When the existing method of pre-stored weight coefficient generation is used for linear array imaging sonar, it is necessary to call Block Memory IP core to pre-store all weight coefficients in field programmable gate array (FPGA) for beamforming, which causes excessive utilization of random access memory (RAM) resources in hardware. An improved method based on CORDIC algorithm to generate weight coefficients in real time is proposed. By pre-storing a small amount of beam angle values and using Multiplier and CORDIC IP core, this method can generate the weight coefficients in real time and reduce the RAM resource by 77%. Besides, this method can dynamically load the weight coefficients at different sound speeds for beam-forming, and maintain a high computational efficiency. Through ISE Synthesize, Map and Place & Route, this method can effectively balance the occupancy rates of RAM resources and logical resources, saves FPGA cost and has good engineering application value.

Key words: imaging sonar; line array; weight coefficient; CORDIC; field programmable gate array (FPGA)

0 引 言

成像声呐在海洋资源开发和海洋防卫等方面有着重要的意义。因其具有作用距离远、能够直观显示观测区域状况和识别目标等特点, 被广泛地应用于军事、经济领域。在成像声呐系统^[1-3]的设计过程中, 为了实现对目标更为细腻的刻画, 系统的角

度分辨率和距离分辨率指标往往都很高。成像声呐的接收阵列结构对系统性能影响巨大, 且接收阵列结构决定着声呐信号处理算法的选择。线阵作为一种经典的阵列结构, 在水声设备等相关领域有着广泛的应用和研究^[4-5]。传统成像声呐多采用预存固定加权系数的方法进行波束形成^[6-8], 虽然运算复杂度小, 但需要预存大量的系数; 在线列阵宽带多波束形成技术中, 存储一个声速下的固定加权系数, 便已占用了 44%随机存储器(Random Access Memory, RAM)资源。可见预存储方法对系统存储能力的要求非常苛刻, 亟需引入实时生成的方法来解决该问题。目前已有学者将 CORDIC 算法引入成像声呐波束形成算法中。杨长根等^[9]采用 CORDIC 算法实现

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2019-11-25

基金项目: 2018 年度江苏省“六大人才高峰”项目(KTHY-026)

作者简介: 刘雪(1993-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 夏伟杰, E-mail: nuaaxwj@nuaa.edu.cn

扇形变换和复数求模运算, 陈朋等^[10]在三维声呐频域波束形成算法中利用 CORDIC 直接实现复数的相位旋转功能, 马超^[11]设计了一种基于 CORDIC 的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理器, 用于声呐波束形成。此外, 在其他工程应用的 FPGA 实现中也引入了 CORDIC, 王韬等^[12]在移动通信的梯度跟踪算法现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现方案中, 引入 CORDIC 算法实现三角函数的计算。受前述文献中 CORDIC 算法的不同应用启发, 本文提出了一种基于 CORDIC 的实时生成加权系数算法, 以解决硬件中 RAM 资源占用过多的问题。

本文在研制便携式微小型宽带多波束成像声呐背景下展开, 围绕实时生成加权系数的 FPGA 实现方法进行研究, 以缓解 FPGA 中 RAM 的资源消耗问题。本文的成像声呐相关技术指标为: 量程 120 m, 视角 120°, 中心频率 720 kHz, 带宽 100 kHz, 波束数 512, 波束间距 0.23°, 量程分辨率 0.8 cm, 最高帧率 20 Hz。

1 成像声呐加权系数分析

1.1 线列阵波束形成理论^[13]

如图 1 所示, 等间隔线列阵由 M 个相同的阵元 1, 2, ..., m , ..., M 组成, 阵列间距为 d , 各阵元的接收方向图相同, 幅度加权系数为 A_k ($k=1, 2, \dots, M$)。

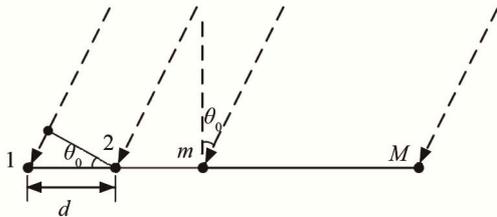


图 1 基元间隔相等的线列阵
Fig.1 A linear array of equally spaced elements

本文使用的声呐发射基阵是由 64 个阵元组成的, 这些阵元以弧形排列成弧阵; 接收阵为线阵, 由 96 个阵元组成。为获得更高的距离分辨率, 本文采用线性调频信号作为发射信号, 信号中心频率为 720 kHz, 带宽为 100 kHz。在同等阵列结构条件下, 窄带波束形成仅需要考虑信号来向对导向矢量的影响, 而宽带波束形成还需要考虑带宽内信号频率变化的影响。故在 FPGA 实现时, 需要采用宽带多波束形成技术。声呐发射信号的复数形式为

$$s(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \exp[j(2\pi f_0 t + \pi K t^2)] \quad (1)$$

其中, $\text{rect}[\cdot]$ 为矩形窗函数。

该信号遇到目标反射产生延迟 τ , 得到具有延迟 τ 的回波信号。首先对回波信号进行复解调、降采样; 然后采用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)方法将时域信号变换到频域进行处理, 对于变换后的频域信号进行脉冲压缩; 最后, 将一个或多个连续频点看作一个窄带进行处理, 运用频域波束形成方法, 进行逐个频点加权移相相加, 得到 θ_i 方向的波束输出:

$$y(\omega) = \sum_{k=1}^M A_k s_k(\omega) e^{j(\omega + \omega_0)\tau_k} = \sum_{k=1}^M A_k \text{rect}\left[\frac{\omega}{2\pi B}\right] e^{j(\omega + \omega_0)\tau_k} e^{-j\varphi_{ok}} \quad (2)$$

其中: $s_k(\omega)$ 是第 k 个水听器在脉冲压缩后频域的表达形式; ω_0 是声呐回波信号的中心角频率; τ_k 是第 k 个阵元相对于接收阵第 1 个阵元的延时。对于宽带信号, 补偿相移的时候, 需要考虑频率点的不同。

φ_{ok} 是第 k 个阵元信号需要补偿的相位, 不同的相位补偿可以改变波束的指向, 多个相位补偿方法即可形成多个波束。 τ_k 、 φ_{ok} 的表达式为

$$\begin{cases} \tau_k = (k-1)d \sin \theta / c \\ \varphi_{ok} = (\omega + \omega_0) \times (k-1)d \sin \theta' / c \end{cases} \quad (3)$$

其中: c 为水中声速, d 为等间隔的阵元间距, 本文中 $d = \lambda/2 = 1.04$ mm (中心频率为 720 kHz), θ 为信号来向, θ' 为均匀分布在 120° 视角范围内的第 k 个波束的指向角度。

A_k 是第 k 个水听器的幅度加权系数, 用于改善波束性能。采用切比雪夫加权, 可以在波束宽度展宽很少的前提下降低旁瓣的宽度, 从而提升波束性能。

由式(2)、(3)可知, 要进行计算的加权系数为

$$A_k e^{-j\varphi_{ok}} = A_k [\cos(\varphi_{ok}) - j \sin(\varphi_{ok})] = A_k \exp[-j(\omega + \omega_0) \times (k-1) d \sin \theta' / c] \quad (4)$$

其中: $\theta' = (i-1) \times q_0 - \pi/3$, $i=1, 2, \dots, 512$, q_0 为波束间距, $q_0 = (2\pi/3)/511$ 。

1.2 预存储式生成方法

为了使用 FPGA 实现 1.1 节线列阵频域宽带多波束形成技术^[14-16], 首先需要使用 Matlab 软件将加权系数计算出来。对于宽带多波束形成, 每个频点的加权系数都需要单独生成。本文基于 64 频点的脉冲压缩结果, 每 96 个通道进行波束形成, 则一组加权系数就是一个 96×64 的二维数组。如要产生 512 个波束, 则需要 3 145 728 个加权系数。

由于上述加权系数数量较大, 已超出本文 FPGA 芯片选型的 RAM 容量, 为了降低 FPGA 的

存储压力, 将逐频点(64 点)补偿的方法改为划分为 8 个子频带的方式^[7], 其理论仿真及硬件实现已经验证了采用 8 个子频带的方式进行补偿几乎不会对波束形成结果有任何影响。因此, 最终需要存储 1 572 864 个加权系数。

在 FPGA 中使用上述加权系数时, 需要在 FPGA 实例化若干个 RAM, 然后将加权系数存储进去, 以便于在波束形成时可以直接从 RAM 中读取加权系数并与脉冲压缩后的通道数据相乘, 最后进行逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)来实现多波束的产生。FPGA 实现流程如图 2 所示。

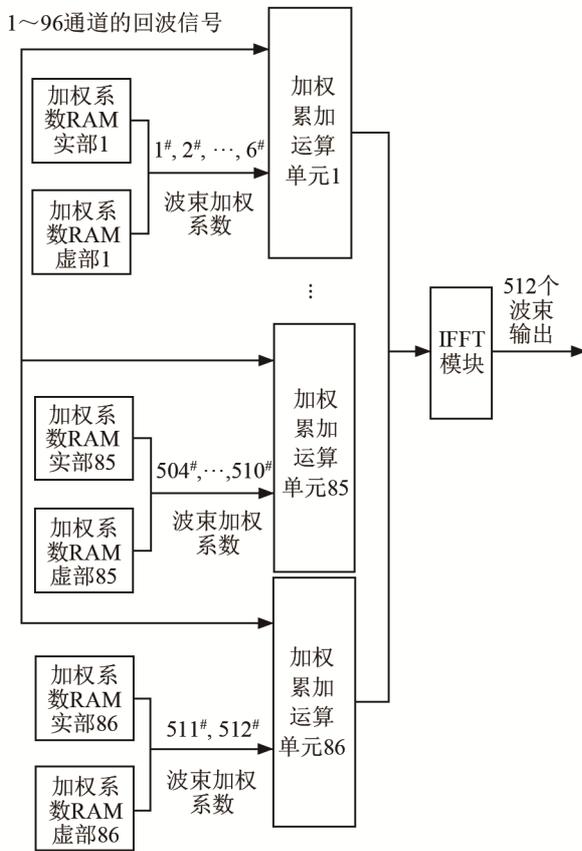


图 2 现有预存储式方法的 FPGA 实现流程
Fig.2 FPGA implementation process with the existing pre-storage method

图 2 中采用预存储式生成方法, 将 $A_k \cos(\varphi_{ok})$ 与 $A_k \sin(\varphi_{ok})$ 分别存储在两个系数 RAM 中, 形成 1 组波束在 1 种声速下的实/虚部加权值。每个 RAM 的存储深度为 6 144, 每个波束形成需预存波束加权系数矢量实际所需存储空间为 $6\ 144 \times 2 \times 16\ \text{bit} = 196\ 608\ \text{bit} = 24\ \text{kB}$, 整个系统所占 RAM 空间大小为 $24\ \text{kB} \times 86 \approx 2\ 064\ \text{kB}$ 。资源消耗报告如表 1 所示。

表 1 现有预存储式生成方法的资源消耗报告
Table 1 The resource consumption report of the existing pre-storage method

资源名称	消耗量	可用量	利用率
RAMB36E1/FIFO36E1s	371	795	46%
仅使用 RAMB36E1	371		
仅使用 FIFO36E1	0		
RAMB18E1/FIFO18E1s	590	1 590	37%
仅使用 RAMB18E1	590		
仅使用 FIFO18E1	0		

2 基于 CORDIC 的加权系数实时生成方法

2.1 实现方法

在 FPGA 中实时完成 1.1 节中式(3)的计算, 不仅涉及到加减乘除四种运算, 还涉及到 \sin 函数、 $\exp()$ 函数这类三角函数。对于乘法使用乘法器实现, 对于所有的除法, 我们将其转换为对应乘法进行运算。 $\sin()$ 函数可以直接用 CORDIC IP 核计算得到^[11], 而 $\exp()$ 函数可以借助于欧拉公式将其转换为 $\cos()$ 和 $\sin()$ 运算, 也使用 CORDIC IP 核计算得到。具体实现

步骤如下:

(1) 控制循环变量

加权系数中涉及到频点 n 、通道数 k 、波束数目 i 三个循环变量; FPGA 中可以控制 n 的变化与时钟 clk 同步, n 增加到 64 时, k 自增 1, k 增加到 96 时, i 自增 1, 以此往复循环。

(2) 计算 τ'

由 1.1 节可知: $\tau' = (k-1) d \sin \theta' / c$ 。

③ 预存波束角度

由于 d 是一个常数, 可以使用 Matlab 软件计算出 512 个 $d \sin \theta'$, 将其分别存储在 86 个 RAM 中, 深度为 6, 这样可以避免使用 FPGA 计算 $\sin \theta'$ 时逻辑资源不够用的情况出现。

④ 调用乘法器

$d \sin \theta'$ 的值在上一步已经得到了, 避免使用除法器, 我们可以采用上位机下发声速的倒数 $1/c$, 在 FPGA 中调用两次乘法器, 即可计算出 τ 。

(3) 计算 \exp 中的常数

在 FPGA 程序中我们定义成 phase 变量 l 来表示 \exp 括号中的相位值, 同样调用两次乘法器即可计算出相位值。

(4) 计算 \exp

根据欧拉公式, 我们将相位值输入到 CORDIC 中, 即可得到加权系数的实部和虚部。

CORDIC IP 核要求输入值必须为-1~1 之间的数值，但是相位值却不是处于-1~1 之间，如果将相位值直接输入到 CORDIC 中，超出有效输入范围的值对应的输出是无效的，因此导致 CORDIC 输出出现部分正确、部分不正确的情况，为了将所有的值缩放到-1~1 之间，需要将相位值的高两位使用高第三位的值进行填充，即： $scale_phase = \{phase[17], phase[17], phase[17], phase[16:0]\}$ ，然后相位的前三位作为定点数的整数部分，后面 17 位作为小数部分即可，得到 $scale_phase$ 作为 CORDIC 的输入相位。

(5) 切比雪夫加权

最后调用两个乘法器，将步骤(4)的结果与切比雪夫幅度加权系数进行相乘，得到最终的波束加权系数。

综上，基于 CORDIC 实时方法生成加权系数的 FPGA 实现流程如图 3 所示。其中， clk 为该模块的时钟信号， en 为使能信号， v 为实时声速， f_s 为采样频率， x_cos 为 cordic ip 核的输出的余弦值， x_sin 为 cordic ip 核的输出的正弦值。

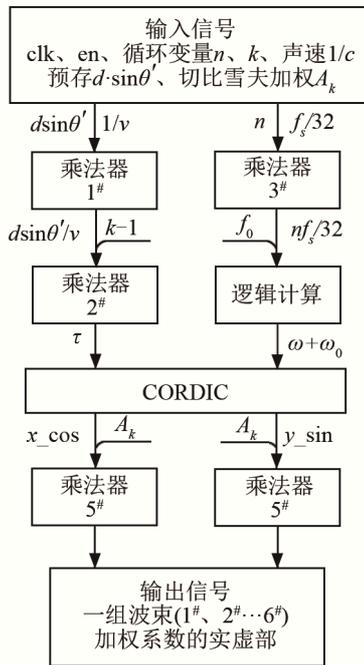


图 3 基于 CORDIC 的实时系数生成的 FPGA 实现
Fig.3 FPGA implementation with the CORDIC based dynamic weight generation module

本文共需要 86 个上述模块完成 512 个波束形成加权系数的计算。

2.2 资源消耗对比

采用 CORDIC 实时生成方法的资源消耗报告如表 2 所示。

表 2 基于 CORDIC 实时生成方法资源消耗报告
Table 2 The resource consumption report of the CORDIC based real-time generation method

资源名称	消耗量	可用量	利用率
RAMB36E1/FIFO36E1s	371	795	46%
仅使用 RAMB36E1	371		
仅使用 FIFO36E1	0		
RAMB18E1/FIFO18E1s	160	1 590	10%
仅使用 RAMB18E1	160		
仅使用 FIFO18E1	0		

由前面的仿真实验分析，表 3 给出了两种方法的资源消耗对比。

表 3 两种系数生成方法的资源消耗
Table 3 Comparison of resource consumption between the two generation methods of weight coefficients

方法	总体资源消耗/%		加权系数模块的 RAM 资源/%
	Logic 资源	RAM 资源	
预存储	5	83	44
实时生成	37	56	10

3 结论

本文提出了一种基于 CORDIC 的成像声呐加权系数实时生成方法，该方法用逻辑资源代替存储器资源，改进了预存储式生成方法。经过综合、布局布线后，显示整体系统模块消耗的逻辑资源增加了 32 个百分点，RAM 资源占用降低了 27 个百分点，有效地均衡了两种资源的利用率。对于波束加权系数模块的 RAM 资源占用率。在原有基础上降低了 77%，很大程度节省了 FPGA 的资源。

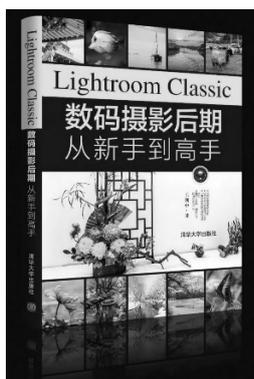
参 考 文 献

- [1] 董珊珊. 基于实测数据的多波束成像声呐系统优化与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
DONG Jinjin. Based on the measured data of the multi-beam imaging sonar system optimization and implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [2] 杨成, 夏伟杰, 杨康, 等. 多波束成像声呐调理采集电路的设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(12): 108-117.
YANG Cheng, XIA Weijie, YANG Kang, et al. Design of multi-beam imaging sonar conditioning acquisition circuit[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(12): 108-117.
- [3] 殷凤平, 吴杰, 周建江. 基于 FPGA 的多通道高速声呐波束形成系统[J]. 数字技术与应用, 2009(10): 96-100.
YIN Fengping, WU Jie, ZHOU Jianjiang. Multi-channel high-speed sonar beamforming system based on FPGA[J]. Digital Technology and Application, 2009(10): 96-100.
- [4] YANG T C. Deconvolved conventional beamforming for a horizontal line array[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(1):160-172.
- [5] 杨秀庭, 王文生, 陈国安, 等. 均匀线列阵声呐近场波束形成的性能研究[C]//2009 年全国水声学学术交流会议论文集, 2009.

- [6] 黄慧, 汪飞, 夏伟杰, 等. 成像声呐中多波束形成的 FPGA 工程实现[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2014, 14(3): 29-32.
HUANG Hui, WANG Fei, XIA Weijie, et al. FPGA engineering implementation of multi-beam forming in imaging sonar[J]. Single Chip Microcomputer and Embedded System Application, 2014, 14(3): 29-32.
- [7] 王梦南, 王壮, 程鑫, 等. 宽带阵列接收信号波束形成算法综述[J]. 现代电子技术, 2013(21): 56-61.
WANG Mengnan, WANG Zhuang, CHENG Zhu, et al. Overview of beamforming algorithm for receiving broadband array signals[J]. Modern Electronic Technology, 2013(21): 56-61.
- [8] 赵拥军, 陈辉, 刘成城, 等. 宽带波束形成结构及算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014(7): 687-694.
ZHAO Yongjun, CHEN Hui, LIU Chengcheng, et al. Research on broadband beamforming structure and algorithm[J]. Journal of Electrical Measurement and Instrumentation, 2014(7): 687-694.
- [9] 杨长根. 基于 FPGA 的声成像算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
YANG Changgen. Research and implementation of acoustic imaging algorithm based on FPGA[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [10] 陈朋, 陈耀武. 三维声呐频域波束形成算法的优化及实现[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(3): 830-835.
CHEN Peng, CHEN Yaowu. Optimization and implementation of 3-D sonar frequency-domain beamforming algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering Science), 2010, 40(3): 830-835.
- [11] 马超. 基于 CORDIC 的 FFT 处理器设计[J]. 信息技术, 2015(7): 205-207.
MA Chao. Design of FFT processor based on CORDIC[J]. Information Technology, 2015(7): 205-207.
- [12] 王韬, 罗明阳, 吴军, 等. 基于 CORDIC 的梯度跟踪算法的 FPGA 实现[J]. 计算机工程, 2008, 34(14): 26-28.
WANG Tao, LUO Mingyang, WU Jun, et al. FPGA implementation of gradient tracking algorithm based on CORDIC[J]. Computer Engineering, 2008, 34(14): 26-28.
- [13] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
LI Qihu. Introduction to sonar signal processing[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 王海军. 多波束形成算法和硬件实现研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
WANG Haijun. Research on multi-beamforming algorithm and hardware implementation[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2007.
- [15] LIU W, WEISS S. Design of frequency invariant beamformers for broadband arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 855-860.
- [16] WENG L Y, LI M, GONG Z, et al. Underwater object detection and localization based on multi-beam sonar image processing[C]// Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012.
- [17] 李根根. 宽带多波束成像声呐算法研究与 FPGA 实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
LI Gengen. Research on wideband multi-beam imaging sonar algorithm and FPGA implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

· 简讯 ·

王朔中新著《Lightroom Classic 数码摄影后期从新手到高手》出版



《声学技术》副主编王朔中所著《Lightroom Classic 数码摄影后期从新手到高手》一书于 2020 年 10 月由清华大学出版社出版。Adobe 公司的 Lightroom Classic 是一个面向数码摄影后期工作，融照片管理、编辑优化、输出分享为一体的强有力工作平台。无论是几张照片还是一大批照片，Lightroom Classic 都能快捷高效地进行处理，获得满意的效果。该书注重合乎逻辑、易于理解、方便记忆的基本流程和操作要领，立足于降低进入门槛，深入浅出，循序渐进，引导读者掌握 Lightroom Classic 的精髓和合理工作流程。全书包括四个部分：预备知识、照片管理、优化修饰、输出分享。预备知识简述数码摄影后期基本概念，对计算机的要求、软件界面和系统设置进行说明。利用图像数据库对大量照片进行有序管理是 Lightroom Classic 区别于其他软件的重要特色，包括照片导入、标注、收藏、筛选以及检索。优化修饰即通常理解的数码后期，不妨称之为狭义的后处理。Lightroom Classic 具有强大的全局和局部处理编辑能力，效果毫不逊于 Photoshop 软件，工作效率高更是其突出优势。Lightroom Classic 提供多种输出分享方法，除了可以将编辑处理后的照片导出之外，还可以进行幻灯放映、画册制作、打印以及网页生成。该书基于 Lightroom Classic 的最新版本，主要面向专业摄影师和业余摄影爱好者，也可作为大专院校相关专业的教学用书。

《声学技术》编辑部