

Acoustic Signal Excitation and Processing Technology in Ultrasonic Imaging Detection System

Ming Zhou*, Yiyue Zhang, Kun Hou

School of Computer, Jilin Normal University, Siping Jilin
Email: zhou_m@126.com

Received: Dec. 18th, 2019; accepted: Jan. 7th, 2020; published: Jan. 14th, 2020

Abstract

In a process tomography system, the accuracy of projection data directly determines the imaging resolution. MAX038 chip with high working frequency is used as the signal generator in the ultrasonic transmitting circuit, according to the sound field requirements of imaging detection. At the front-end of receiving circuit, a passive RC band-pass filter and a voltage follower with high input resistance integrated op-amp were used. The results show that the transmitted ultrasonic wave amplitude and power are stable; electromagnetic interference in the received signal is effectively eliminated, and piezoelectric charge leakage at the front-end of the receiving circuit is avoided.

Keywords

Ultrasonic, Excitation Circuit, Pulse Transformer, Signal Processing Circuit, Anti-Interference Ability

超声成像检测系统声波信号激励与处理技术

周 明*, 张溢月, 侯 锟

吉林师范大学计算机学院, 吉林 四平
Email: zhou_m@126.com

收稿日期: 2019年12月18日; 录用日期: 2020年1月7日; 发布日期: 2020年1月14日

摘 要

在过程层析成像系统中, 投影数据精度直接决定成像分辨率。根据超声成像检测声场的要求, 采用高频*通讯作者。

MAX038芯片作为超声波发射电路的信号发生器；在接收电路前端设计了RC无源滤波预处理电路，并采用高输入电阻的集成运放芯片构成电压跟随器。设计结果表明，超声波激励信号幅值、功率稳定；有效地消除了接收信号中的电磁干扰成分，且避免了在接收电路前端产生的压电电荷泄漏。

关键词

超声波，激励电路，脉冲变压器，信号处理电路，抗干扰能力

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业过程层析成像，简称过程层析成像 PT (Process Tomography) [1] [2] [3]，是近年新出现的新型工业无损检测技术[4]，通过给检测对象表面分布的传感器施加激励电信号，并在接收传感器端，测量反映被测对象内部相介质物理参数分布的投影数据，再依据成像算法程序，能够重建反映物体内部结构的二维或三维图像。但在 PT 成像过程中，存在着各种测量环境噪声和成像电路系统噪声，因此，设计功率适合的超声波激励电路与接收信号处理电路成为必要。本文利用升压变阻器设计了超声激励电路；重点研究信号的去噪方法[5] [6]，利用高输入电阻芯片 CA3140E 作为信号处理电路前级，从而获得了精确的成像投影数据。

2. 超声波激励电路的设计

依据检测对象的结构特点，超声波激励电路应满足下面功能要求：由成像分辨率对超声激励脉冲频率的依赖关系[7]，确定超声激励脉冲频率为 180 kHz，且具有微调功能；激励脉冲具有足够高的输出功率，以满足检测声场要求；激励脉冲电压幅值稳定。

2.1. 脉冲发生器电路设计

MAX038 芯片输出信号幅频精度高、波形易于变换，外加少许外围电路就能够方便地输出方波、矩形波、正弦波、三角波或锯齿波。当频率调节引脚 FADJ 接地时，MAX038 输出信号的频率 f_o 与电流 IIN、COSC 引脚外接电容 C_f 之间的关系为

$$f_o = 2.5V / [(R_{w11} + R_{12})C_f] \quad (1)$$

采用 MAX038 芯片设计的矩形波信号发生电路如图 1 所示，其中， C_f 为 1 nF。当 f_o 按要求输出 180 kHz 时，IIN 引脚的外接电阻应为 13.9 kΩ，因此，在外接电阻中串联可调电阻 R_{w11} 实现阻值微调。

2.2. 功率放大电路设计

信号功率放大电路由电压调整电路、功率管、升压变阻器以及限幅电路等四部分构成，如图 2 所示。

电压调整电路由三极管 VT、电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 以及可变电阻 VR_1 构成，实现 MAX038 和 MOS 管间的电压调整，将波形产生电路的输出电压幅值调整至 5 V 以上，以达到功放 MOS 管栅极开启电压要求。电压调整电路电源 Vcc1 采用 12 V 供电。

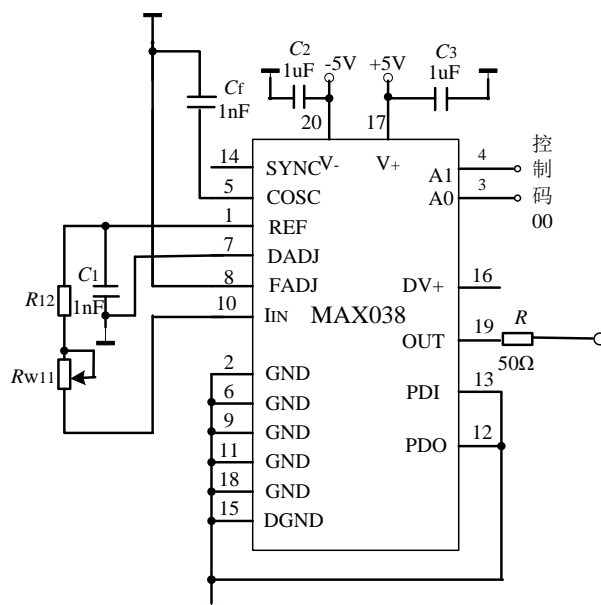


Figure 1. Oscillation circuit for rectangular wave

图 1. 矩形波产生电路

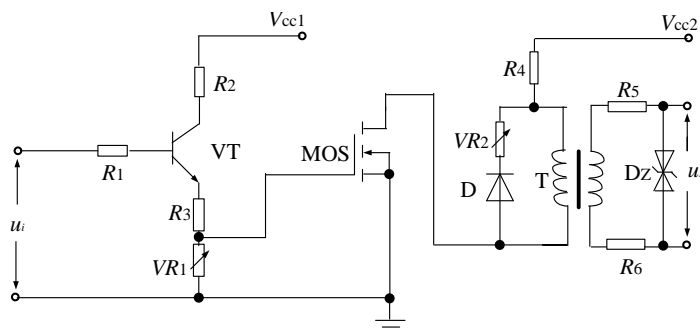


Figure 2. Power amplifier circuit

图 2. 功率放大电路

功放电路核心器件场效应管型号为 P45NF06，在其漏极串接限流电阻 R_4 ，阻值为 $100\ \Omega$ ，功率为 $10\ \text{W}$ 。功放电源 V_{cc2} 采用 $25\ \text{V}$ 供电。

升压变阻器(T)采用高频脉冲变压器来实现，它的作用为提升激励电压，并实现阻抗变换，使激励源与发射传感器达到阻抗匹配。所谓阻抗变换，是指将发射传感器的谐振阻抗变换成适当的阻抗值，并与激励源的输出阻抗相匹配，这样才能够获得所需的输出功率。

采用高频磁芯、合理直径的铜导线，并按变压器升压公式

$$U_1/U_2 = N_1/N_2 = 1/2 \quad (2)$$

绕制高频脉冲变压器，变压器初级匝数 N_1 的计算公式为

$$N_1 = \frac{U_1}{4fA \times B_m} \quad (3)$$

其中， U_1 为初级绕组电压， f 为脉冲频率， A 为磁芯截面积， B_m 为磁芯材料的饱和磁感应强度。

将参数 $U_1 = 25\ \text{V}$ ， $f = 180\ \text{kHz}$ ， $B_m = 0.1\ \text{T}$ ， $A = 1\ \text{cm}^2$ 代入式(3)，得到初级绕组匝数 N_1 为 4。考虑

到铜导线额定工作电流等因素, 确定 N_1 匝数为 10, N_2 为 20, 双线绕制。

结合超声波发射传感器的谐振等效直流电阻, 计算其初级绕组的变阻公式为

$$Z_1 = (N_1/N_2)^2 R \quad (4)$$

调整串联电阻 R_5 、 R_6 之值, 使变阻值 Z_1 与激励源输出阻抗相匹配。

功放电路中, 二极管 D 和可变电阻 $VR2$ 串联支路的作用是, 吸收变压器初级绕组产生的脉冲尖峰。IN47A 型稳压管在变压器输出绕组中实现双向限幅, 限幅值为 ± 40 V。超声波激励电路输出电压波形如图 3 所示。

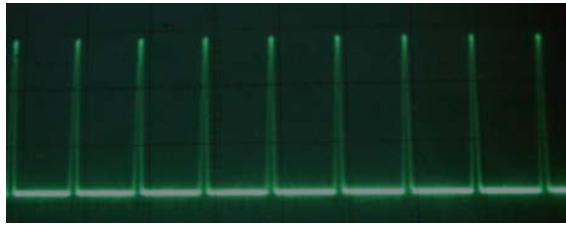


Figure 3. Excitation voltage waveform
图 3. 激励电压波形

3. 信号接收电路的设计

超声接收信号较弱(mV 单位), 并伴有较为严重的噪声信号, 波形如图 4 所示。

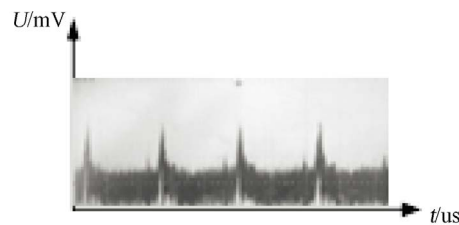


Figure 4. Received signal waveform
图 4. 接收信号波形

经分析, 噪声产生的原因有电源噪声、电路噪声、空间工频电磁波信号干扰等因素, 因此信号接收电路的设计重点为滤波电路的设计。

设计的信号接收电路具有滤波、信号放大、提取包络电压等功能, 以获得精确的成像投影数据, 框图如图 5 所示, 具体含有信号预处理、电压跟随器、工频陷波器、带通滤波、可编程放大及检波等电路。

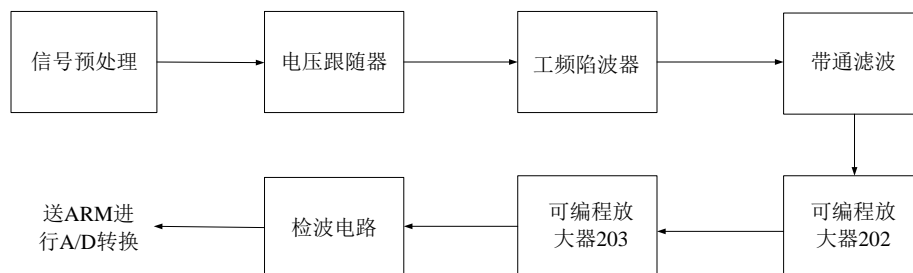


Figure 5. Diagram of signal receiving circuit
图 5. 信号接收电路框图

3.1. 信号预处理电路设计

信号预处理电路采用无源 RC 带通滤波器实现, 原理图如图 6 所示。将低通上限截止频率设定为 300 kHz, 高通下限截止频率设定为 100 kHz, 并由此确定电路的 R 、 C 参数。

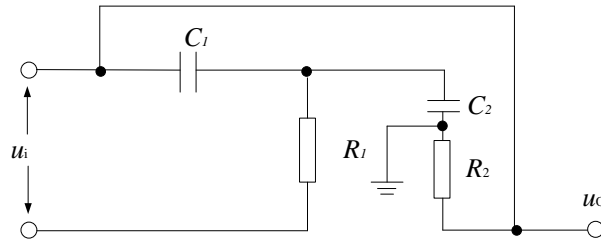


Figure 6. RC band-pass filter
图 6. RC 带通滤波器

RC 带通滤波器的传递函数(放大倍数)为输出、输入电压之比。低通滤波器的传递函数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad (5)$$

令截止频率 f_p 为 $1/(2\pi R_1 C_1)$, 则放大倍数转化为

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_p}} \quad (6)$$

\dot{A}_u 的模为

$$|\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}} \quad (7)$$

将信号频率 $f = 180$ kHz 及上限截止频率 $f_p = 300$ kHz 代入式(7)中, 得到低通滤波器信号放大倍数为 0.85。同上, RC 高通滤波器的电压放大倍数 \dot{A}_u 的模为

$$|\dot{A}_u| = \frac{\frac{f}{f'_p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f'_p}\right)^2}} \quad (8)$$

将信号频率 $f = 180$ kHz 和 下限截止频率 $f'_p = 100$ kHz 代入式(8)中, 可得高通滤波器信号放大倍数为 0.87。因此, RC 带通滤波器总的信号电压放大倍数为 0.74。

引入无源 RC 带通滤波电路, 有效地抑制了工频干扰(如图 7)。 RC 滤波电路虽削弱了信号幅值, 但超声成像过程利用的是电压值之比(正比于声压比), 信号幅度的衰减并不影响投影数据的使用。经 RC 滤波后的信号中还含有一定的噪声成分, 且数值较弱, 峰 - 峰值在 10 mV 左右, 因此需要后续电路来进一步处理。

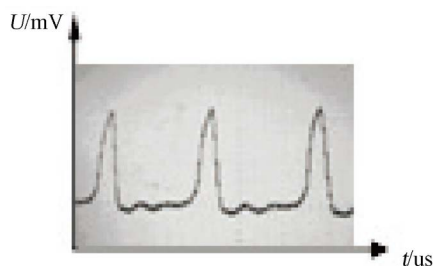


Figure 7. Signal waveform after RC filtering
图 7. RC 滤波后的信号波形

3.2. 电压跟随器设计

接收超声波传感器等效于无源信号源，且内阻很大。如将接收传感器内阻设定为 R_s ，输出信号经由集成运放进行放大，则放大倍数为

$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u \quad (9)$$

其中， R_i 为放大器输入电阻。

为保证放大器具有稳定放大倍数，要求其输入电阻 R_i 应远远大于信号源输出电阻 R_s 。另一方面，因超声传感器的输出信号很弱，如放大器的输入电阻不高，则会造成压电电荷泄漏，使测量值出现较大偏差。

实验发现，如电压跟随器采用输入电阻较小集成运放 OP07 或 OP37，其信号输出甚至为零值，由此说明该两种型号集成运放的输入电阻远小于 R_s ，因此产生了不可忽视的压电电荷泄漏。在信号接收电路设计中，选用集成运放 CA3140E 来构成电压跟随器，该芯片的输入电阻为 $1.5 \text{ T}\Omega$ ，输出电阻为 60Ω 。

3.3. 工频陷波器设计

由于前级输出信号中还含有一定的 50 Hz 工频干扰成分，因此，采用 Q 值可调的双 T 型工频陷波器加以滤除(如图 8)，集成运放型号为 OP37。

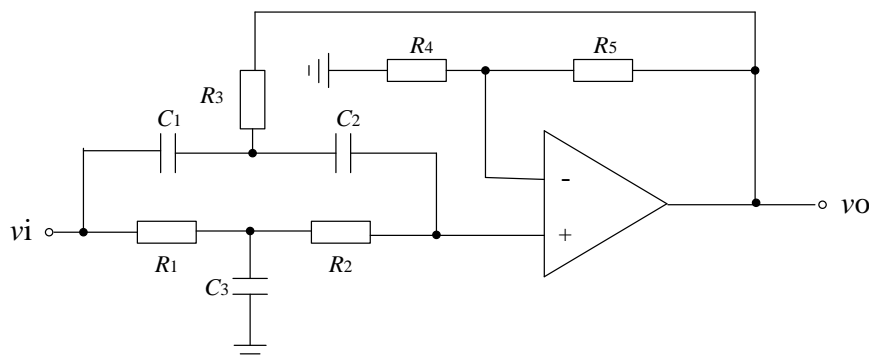


Figure 8. Double T power frequency trap
图 8. 双 T 型工频陷波器

其中， $C_1 = C_2 = C$ ， $C_3 = 2C$ ， $R_1 = R_2 = R$ ， $R_3 = R/2$ 。

陷波器通带电压放大倍数为

$$A = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (10)$$

将通带放大倍数设定为 1, 即要求 R_4 远远大于 R_5 , 电路中, 它们的阻值分别选择为 10 k Ω 和 1 k Ω 。陷波器中心频率为 $1/(2\pi RC)$, 用该频率来确定 R 、 C 参数值。

3.4. 有源带通滤波器设计

有源带通滤波器由二阶低通滤波器和二阶高通滤波器构成, 前级为低通滤波器, 后级为高通滤波器。两级滤波器皆采用集成运放 OP37, ± 15 V 电源供电, 电路如图 9 所示。

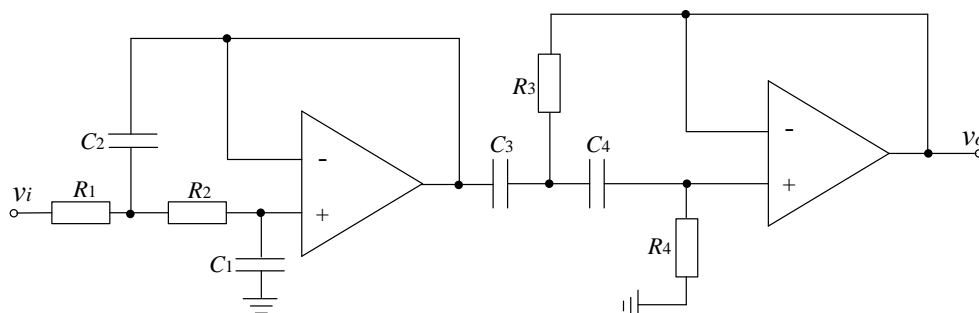


Figure 9. Active band-pass filter circuit
图 9. 有源带通滤波电路

其中, $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$; $R_3 = R_4$, $C_3 = C_4$ 。设定低通滤波器的上限截止频率为 220 kHz, 高通滤波器下限截止频率为 150 kHz, 并由这两个截止频率来确定各级 R 、 C 参数值。

3.5. 程控放大电路设计

为使采集信号达到 A/D 转换电压指标要求, 电路采用程控放大器 PGA202 和 PGA203 进行级联放大。程控放大器 PGA202 工作在十进制放大方式, 放大倍数有 1、10、100、1000 等四种, 程控放大器 PGA203 工作在二进制放大方式, 放大倍数有 1、2、4、8 等四种, 两种芯片皆有 A1、A0 引脚作为放大倍数选择端, 各放大倍数所对应的 A1、A0 控制信号分别为 00, 01, 10 和 11。如将两芯片级联放大, 放大能力可达到 1~8000 倍。两芯片皆与 TTL/CMOS 兼容, 放大频率响应为 1 MHz, 输入电流为微安级。

程控级联放大电路采用 PGA202、PGA203 芯片各一片, 供电电源为 ± 15 V, 并将总放大倍数设定为 40, 电路连接如图 10 所示。

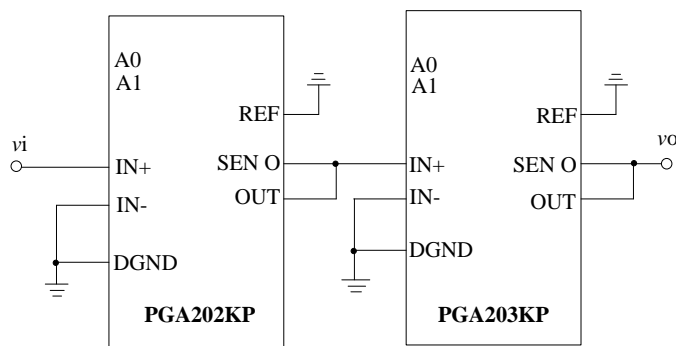


Figure 10. Programmable cascade amplifier circuit
图 10. 程控级联放大电路

PGA 放大电路是信号处理电路中唯一的数字部分, 为避免外部元件引起增益、CMR 等方面的误差,

在电路板设计时采用了“一点接地法”。

3.6. 检波电路设计

设计如图 11 所示的检波电路，实现接收信号的包络检波。检波二极管 D (1N60)的作用是去掉输入信号的负电压部分，高频检波电容 C (1 nF)的作用是将检波二极管输出信号中高频成分滤除，检波电阻 R (10 kΩ)的作用是构成电流回路，提供输出电压。

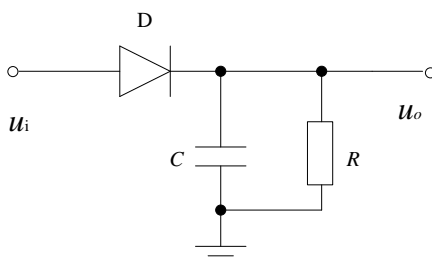


Figure 11. Detection circuit

图 11. 检波电路

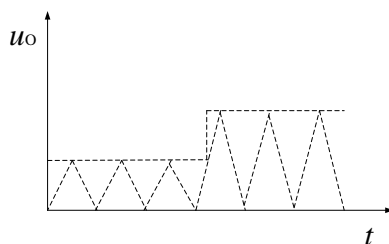


Figure 12. Voltage waveform of detection circuit

图 12. 检波电路电压波形

检波电路输出为输入信号的电压包络值，如图 12 所示，并传送至 ARM 控制器进行 A/D 转换。

4. 超声成像投影数据测量测量

实验测量测量装置为直径 20 cm、高度为 60 cm 的圆桶，内部盛满水。圆桶水平截面如图 13 所示，将超声发射传感器置于桶壁一侧，用超声接收传感器在 1 至 5 位置(间隔 5 cm)分别测量接收电压信号，每位置测量 10 次并求平均值，实验数据如表 1 所示。

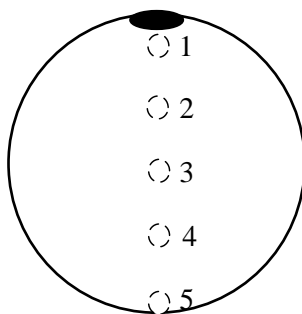


Figure 13. Schematic diagram of projection data measuring device

图 13. 投影数据测量装置示意图

Table 1. The projection data
表 1. 投影数据

测量位置	接收信号电压平均值(单位: mV)
1	416.0
2	356.8
3	335.2
4	310.0
5	302.2

5. 结论

针对液固两相流超声成像系统对超声波投影数据采集精度的要求, 采用 MAX038 芯片作为信号源, 设计了超声波激励电路, 该电路激励电压工作频率高, 且可微调。设计了信号采集电路, 采用两项措施提高信号电路的抗干扰能力, 一项措施是在接收电路前端设置了 RC 无源带通滤波电路, 该项措施有效地消除了信号中的工频干扰成分; 另一项措施是采用输入电阻极高(1.5 TΩ)的集成运放 CA3140E 构成电压跟随器作为阻抗调整单元, 该项措施有效地避免了接收电路前端易产生的压电感应电荷泄漏, 实现了投影数据的准确接收。

基金项目

吉林师范大学大学生创新创业训练计划项目 S2018054; 四平市科技发展计划项目(四科合字第 2014063 号)。

参考文献

- [1] 马平, 周晓宁, 田沛. 过程层析成像技术的发展及应用[J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(1): 1-5.
- [2] 杜运成. 基于电容层析成像技术的气液两相流特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [3] 李楠, 徐昆, 刘逵. 基于超声层析成像技术的气/液两相流检测仿真[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5):735-742.
- [4] 杨键刚, 吴运新, 龚海, 李伟, 韩雷. 基于 LabVIEW 的电磁超声热态金属在线缺陷检测系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(5): 809-814.
- [5] 陈文会, 丁晓鸿, 陈江宁, 刘小民. 超声波测距信号小波阈值去噪参数的选定方法[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3): 407-410.
- [6] 刘宇舜, 程登峰, 夏令志, 李森林, 程洋. 基于单通道盲源分离算法的局部放电特高频信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5625-5635.
- [7] 赵彩凤, 于志, 王智勇. 高频功率脉冲变压器的设计[J]. 变压器, 2003, 40(10): 6-7.