

# 基于多端口波导结构的宽频带声触发器\*

庞乃琦<sup>1) #</sup> 王垠<sup>1) #</sup> 葛勇<sup>1)</sup> 施斌杰<sup>1)</sup> 袁寿其<sup>1)</sup> 孙宏祥<sup>1) 2) †</sup>

1) (江苏大学物理与电子工程学院, 流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

2) (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)

(2023年4月13日收到; 2023年5月23日收到修改稿)

基于线性相干及相位调控机制设计制备了两类声学触发器, 所设计的声学触发器由相控单元和多端口波导结构组成, 其宽度与长度分别为  $0.32\lambda$  和  $0.82\lambda$  ( $\lambda$  为声波波长), 具有亚波长结构特征. 基于相控单元的相位调制及声波的线性相干机制, 分别实现了 T 触发器和 D 触发器的声学逻辑功能, 且相对带宽 (工作带宽与工作频带的中心频率之比) 分别可以达到 0.23 和 0.22. 实验测量与数值模拟的结果吻合很好. 本文所提出的声触发器具有宽频带、亚波长尺寸及结构简单等特点, 可为设计新型声触发器及声逻辑门提供理论方案与原理性器件.

**关键词:** 声超构材料, 声触发器, 相位调制, 线性相干, 波导**PACS:** 43.35.+d, 43.25.+y**DOI:** 10.7498/aps.72.20230594

## 1 引言

声逻辑基础元器件由于其在逻辑运算、信息处理和集成声学等领域的广泛应用前景<sup>[1-7]</sup>, 受到研究学者越来越多的关注, 并已发展出多种不同机制的声逻辑门. 如基于非线性机制, Li 等<sup>[8]</sup> 基于球形粒子驱动链的非线性动力学效应实现了与门 (AND) 和或门 (OR) 的声逻辑功能. 近年来, 声子晶体<sup>[9-19]</sup> 的迅猛发展为设计实现高性能声逻辑门器件提供了可行性. 例如 Bringuier 等<sup>[11]</sup> 基于声子晶体中的输入与控制信号的线性相干机制设计实现了与非门 (NAND), 异或门 (XOR) 和非门 (NOT) 等类型声逻辑门. 张婷等<sup>[12]</sup> 基于包含线缺陷声子晶体的自准直声束线性干涉, 设计制备了 AND, OR 和 NOT 等基础声逻辑门器件. 夏建平<sup>[14]</sup> 提出了具有可编程功能的声拓扑绝缘体, 实现了 OR 和 XOR 的

声逻辑功能. 陆雨静等<sup>[19]</sup> 基于谷声子晶体设计了一种 X 型拓扑波导结构, 基于声波的线性相干及谷守恒机制, 实现了具有鲁棒性的 OR 和 XOR 双功能声逻辑门器件. 然而, 基于声子晶体的声逻辑门器件普遍存在着尺寸大问题, 为了克服该不足, 研究人员基于声学超材料<sup>[20-31]</sup> 设计实现了各类具有宽频带和超薄特性的声逻辑门器件. 如张婷等<sup>[27]</sup> 基于蜷曲空间单元结构设计制备了具有超薄平面结构的声逻辑门器件, 通过控制声信号的初始相位实现各类基础声逻辑门功能. 左承毅等<sup>[28]</sup> 提出一种基于多端口圆波导的宽频带声逻辑门, 通过使用具有一定相位差的两个输入信号即可实现相关的声逻辑功能, 且所实现的工作带宽大于 5 kHz. 在上述声逻辑门中, 研究人员均通过调制声信号初始相位和幅值实现各类声学逻辑功能. 此外, 王垠等<sup>[29]</sup> 将相控单元置于多端口波导结构中, 基于被动单元结构调制声信号的初始相位, 同样也可以实现各类

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12274183, 12174159) 和国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC1512403) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jsdxshx@ujs.edu.cn

声学逻辑功能. 上述工作均有效实现了各类声学逻辑门器件, 且有效地推动了其应用推广. 然而, 对于逻辑功能更为复杂的声触发器基础元器件, 相关工作仍有待深入展开.

本文提出了两类基于多端口波导结构的声学触发器. 通过在波导结构中嵌入相控单元, 利用单元的相位调控及声波线性相干机制, 在同一阈值情形下实现了 T 触发器和 D 触发器的声逻辑功能. 在此基础上, 进一步实验验证了 T 触发器和 D 触发器的性能, 实验测量与数值模拟结果吻合较好. 最后, 实验测量了两类声触发器的工作带宽, 所设计的 T 触发器和 D 触发器的相对带宽 (工作带宽与工作频带的中心频率之比) 分别可以达到 0.23 和 0.22, 具有典型的宽频带特性.

## 2 声触发器设计与性能

### 2.1 数值模型

为了设计声学触发器, 引入文献 [32] 中的相控单元结构. 如图 1(a) 所示, 单元 (长和宽分别为  $l$  和  $h$ ) 由直空气通道与 10 组对称的斜挡板 (角度为  $\theta$ ) 组成, 壁厚为  $w$ , 其结构参数如下:  $l = \lambda/2$ ,  $h = \lambda/10$  及  $w = 0.005\lambda$ , 其中  $\lambda$  为声波波长. 单元的固体部分由环氧树脂 3 D 打印制备, 可以满足硬边界条件. 本文采用有限元多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 中的压力声学模块建立数值模型, 模拟单元及相关的器件性能. 在数值模型

中, 输入与输出端口的边界设置为平面波辐射边界, 其他边界均设置为硬声场边界, 采用的空气密度  $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$ , 声速  $c = 343 \text{ m/s}$ . 这里, 设入射声波波长  $\lambda$  为 10 cm (对应空气中的频率  $f_0 = 3.43 \text{ kHz}$ ).

图 1(b) 显示频率为 3.43 kHz 的声波通过具有不同参数  $\theta$  的单元产生的相位延迟及透射率, 变化参数  $\theta$  对应的相位延迟 (蓝实线) 可以覆盖整个  $2\pi$  区间, 且在  $15^\circ < \theta < 90^\circ$  范围, 声透射率 (红虚线) 在 0.8 以上. 这里, 选择  $\theta = 19^\circ$  和  $57^\circ$  对应的相控单元 I 和 II (黑色空心点) 设计声触发器, 其声透射率分别为  $T_I = 0.92$  和  $T_{II} = 0.96$ , 相位差  $\varphi_{II} - \varphi_I = \pi$ . 图 1(c) 显示所设计的声触发器示意图, 声触发器左右两侧输入端 T 和  $Q^n$  对应的直通道分别放置相控单元, 中间区域填充环氧树脂刚性固体, 其中参数  $d_1 = 0.075\lambda$  及  $d_2 = 0.1\lambda$ . 值得注意的是, 声触发器长度和宽度分别为  $0.82\lambda$  和  $0.32\lambda$ , 具有亚波长结构特征. 此外, 当 T 和  $Q^n$  端口对应的通道放置相同相控单元时,  $Q^{n+1}$  端口的声信号为干涉增强; 当 T 和  $Q^n$  端口对应的通道放置反相相控单元时 (图 1(c) 中单元 I 和 II),  $Q^{n+1}$  端口的声信号则为干涉相消. 因此, 基于线性声干涉机制, 可以实现多种声触发器功能.

### 2.2 T 触发器结构与性能

如图 1(c), T 触发器的 T 和  $Q^n$  端口对应的通道分别放置相控单元 I 和 II, 令 T 和  $Q^n$  端口的输

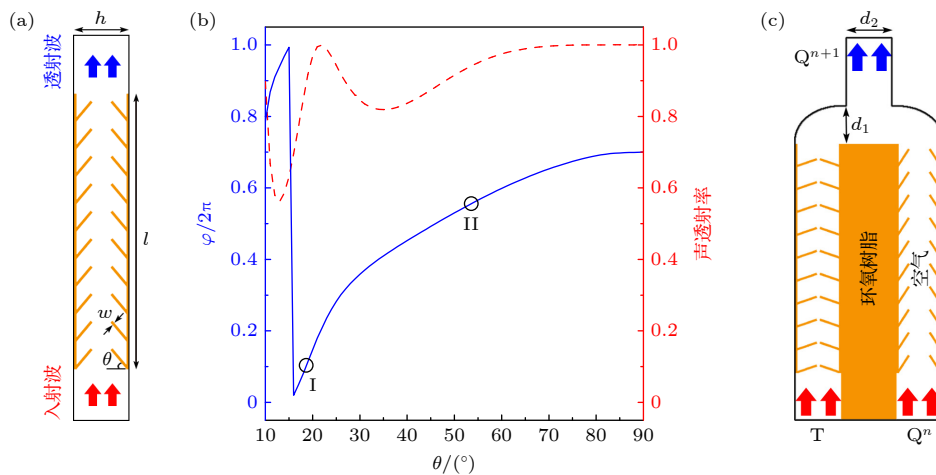


图 1 (a) 相控单元示意图; (b) 频率为 3.43 kHz 的声波通过具有不同参数  $\theta$  的单元产生的相位延迟与透射率; (c) 声触发器示意图. T 和  $Q^n$  端口的红色箭头表示输入声信号,  $Q^{n+1}$  端口的蓝色箭头表示输出声信号

Fig. 1. (a) Schematic of a phased unit cell; (b) phase delays (blue solid line) and transmissions (red dashed line) of sound wave with frequency of 3.43 kHz caused by the phased unit cells with different values of  $\theta$ ; (c) schematic of an acoustic trigger. The red arrows at the ports T and  $Q^n$  represent input sound signals, and the blue arrows at the port  $Q^{n+1}$  are output sound signals.

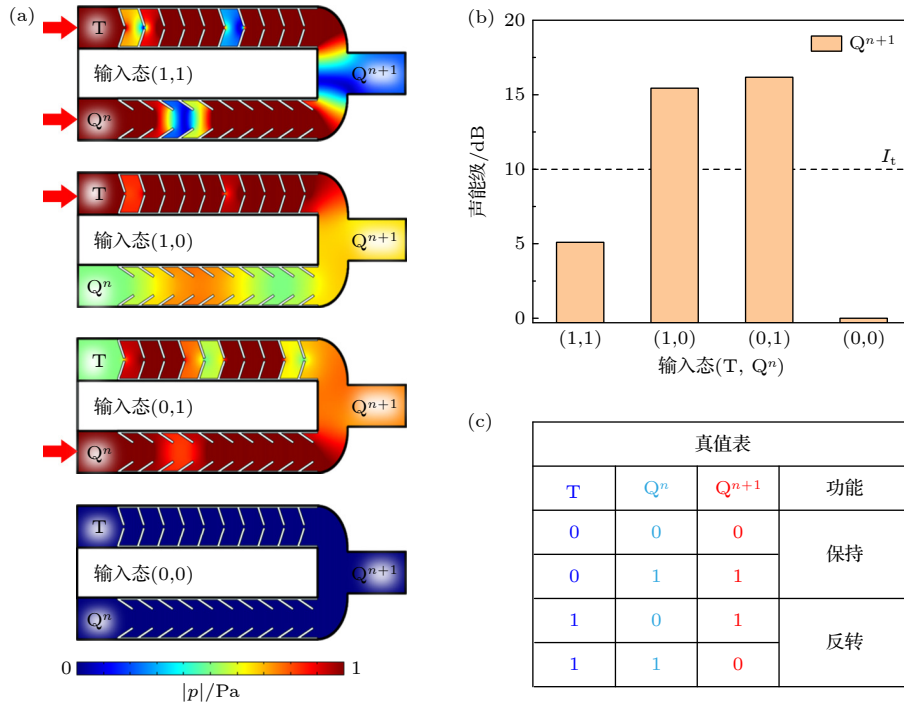


图 2 (a) 数值模拟频率为 3.43 kHz 不同输入态激发 T 触发器产生的声压幅值场分布; (b), (c) 对应的输出端  $Q^{n+1}$  的声能级和真值表  
 Fig. 2. (a) Simulated pressure amplitude distributions caused by the T-type trigger with different input states at 3.43 kHz; (b), (c) simulated acoustic intensity levels at the output port  $Q^{n+1}$  and truth table.

入声信号初始相位和振幅相同, 声触发器的输入态表示为  $(Q_1, Q_2)$ ,  $Q_i$  表示 T 和  $Q^n$  端口有无输入信号, 分别定义为“1”和“0”. T 触发器主要用于实现保持与反转功能<sup>[33,34]</sup>, 其特性方程满足  $Q^{n+1} = T \oplus Q^n$ . 图 2(a) 显示数值模拟不同输入态激发 T 触发器产生的声压幅值场分布, 当输入态为 (1, 1) 时,  $Q^{n+1}$  端口的声压幅值接近于 0. 这主要由于所采用的是一对反相相控单元, 声信号在  $Q^{n+1}$  端口产生干涉相消. 然而, 当输入态为 (1, 0) 和 (0, 1) 时,  $Q^{n+1}$  端口的声压幅值较强, 明显高于输入态 (1, 1) 对应的输出声信号.

为了量化声触发器的输出性能, 引入声能级定义

$$I = 10 \lg \left( \frac{\iint_S |p_1|^2 d\sigma}{\iint_S |p_2|^2 d\sigma} \right),$$

式中  $p_1$  和  $p_2$  分别表示有声触发器结构对应的出射端区域  $S$  中的声压. 这里, 选取阈值  $I_t = 10$  dB, 当  $I > I_t$  时, 其输出态为“1”; 而  $I < I_t$  时, 其输出态为“0”. 图 2(b) 和图 2(c) 分别显示数值模拟 T 触发器输出端  $Q^{n+1}$  的声能级及其真值表. 基于所选择的阈值  $I_t = 10$  dB, 可以得到, 输入态 (1, 1), (1, 0), (0, 1) 及 (0, 0) 对应的  $Q^{n+1}$  端口输出态分别

为 (1), (1), (1) 及 (0). 如图 2(c) 真值表所示, 当 T 端口的输入态为 (0) 时,  $Q^{n+1}$  端口输出态与  $Q^n$  端口输入态保持一致; 而当 T 端口的输入态为 (1) 时,  $Q^{n+1}$  端口输出态与  $Q^n$  端口输入态相反, 实现了 T 触发器的声逻辑功能.

### 2.3 D 触发器结构与性能

在 T 触发器结构的中间固体区域引入控制端 A, 可以设计实现 D 触发器. D 触发器主要用于实现置 0 和置 1 功能<sup>[33,34]</sup>, 其特性方程满足  $Q^{n+1} = D$ . 下面为了实现控制端 A 的功能, 数值模拟声波通过具有不同参数  $\theta$  的单元 (斜挡板宽度为  $3w$ ) 产生的相位延迟 (蓝实线) 及透射率 (红虚线), 如图 3 所示, 选取相控单元 III 放置控制端 A, 其挡板角度  $\theta = 52^\circ$ , 声透射率  $T_{\text{III}} = 0.7$ , 相位延迟  $\varphi_{\text{III}} = \varphi_{\text{II}} - \pi/5$ .

图 4(a) 给出了数值模拟不同输入态激发 D 触发器产生的声压幅值场分布. 可以看出, 输入态为 (1, 1) 时,  $Q^{n+1}$  端口的输出声压幅值较强, 与图 2(a) 中输入态 (1, 1) 对应的结果相反, 这主要由于控制端 A 的声信号的存在. 此外, 输入态 (0, 1) 对应的输出声压幅值高于输入态 (1, 1) 对应的结果, 这主要由于 D 端口的输入态为 (0), 因此无信号与输入

端  $Q^n$  的信号产生干涉相消. 然而, 当输入态为 (1, 0) 和 (0, 0) 时,  $Q^{n+1}$  端口的声压幅值较弱. 前者是由于控制端 A 和输入端 D 的声信号在输出端处产生弱干涉相消; 而后者是由于 D 与  $Q^n$  端口无声信号输入, 而控制端 A 通道中的单元 III 声透射率相对较低 (约为 0.7), 且透射声信号能量会均匀分散到其他三个端口, 因此输出端信号的声能级低于阈

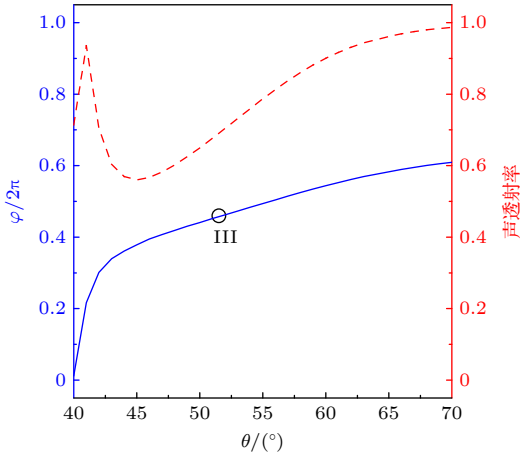


图 3 数值模拟声波通过具有不同参数  $\theta$  的单元 (斜挡板宽度为  $3w$ ) 产生的相位延迟 (蓝色实线) 及透射率 (红色虚线)  
Fig. 3. Simulated phase delays (blue solid line) and transmissions (red dashed line) caused by the phased unit cells with different values of  $\theta$ .

值. 图 4(b) 和图 4(c) 分别显示输出端  $Q^{n+1}$  的声能级及其真值表. 基于统一的阈值, 输入态 (1, 1), (1, 0), (0, 1) 及 (0, 0) 对应的  $Q^{n+1}$  端口输出态分别为 (1), (0), (1) 及 (0). 如图 4(c) 所示,  $Q^{n+1}$  端口的输出态始终与 D 端口的输入态保持一致, 而与  $Q^n$  端口的输入态无关, 从而实现了 D 触发器相关的声逻辑功能.

### 3 实验结果与讨论

为了验证 T 触发器和 D 触发器的声学性能, 实验测量两类声触发器输出端  $Q^{n+1}$  的声能级强度. 图 5(a) 为实验测量装置, 图 5(b) 和图 5(c) 为样品照片. 为了实现相同输入声信号, 在左侧两个输入端放置相同的声源, 相控单元与声源的间距为 5 mm. 输入声信号由功率放大器驱动声源产生. 采用 0.25 in (1 in = 2.54 cm) 麦克风 (Brüel&Kjær-4961 型) 在右侧输出端测量输出声信号. 实验测量数据由 Brüel&Kjær3160-A-022 模块进行采集记录, 并通过 Pulse Labshop 软件进行数据分析. 图 5(d), (e) 显示实验测量的频率为 3.430 kHz 的不同输入态声波激发两类声触发器对应的输出端  $Q^{n+1}$  的声能级, 其中参考信号为实验测量的环

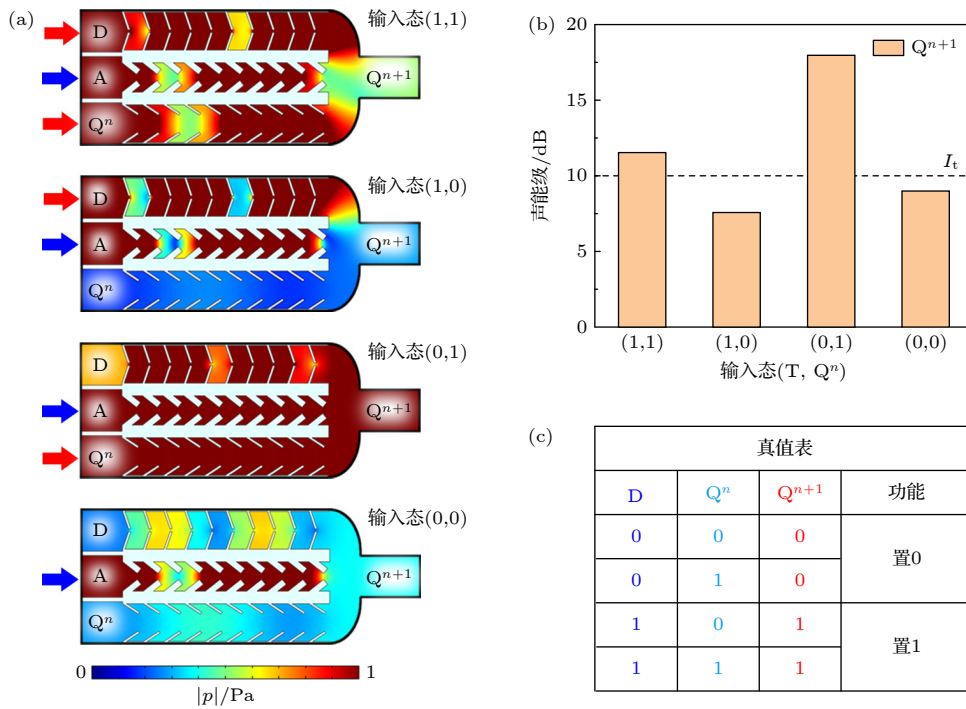


图 4 (a) 数值模拟频率为 3.43 kHz 不同输入态激发 D 触发器产生的声压幅值场分布; (b), (c) 对应的输出端  $Q^{n+1}$  的声能级和真值表  
Fig. 4. (a) Simulated pressure amplitude distributions caused by the D-type trigger with different input states at 3.43 kHz; (b), (c) simulated acoustic intensity levels at the output port  $Q^{n+1}$  and truth table.

境噪声,与图 2(b)和图 4(b)中的数值模拟结果相比,实验测量与数值模拟结果吻合较好,从而验证了所设计的 T 触发器和 D 触发器可行性.

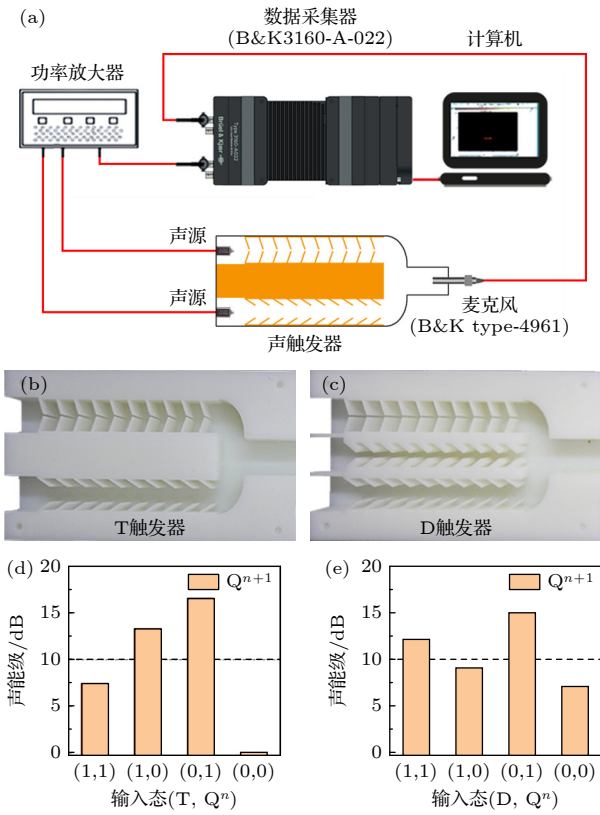


图 5 (a) 实验装置示意图; (b), (c) T 型与 D 型触发器样品照片; (d), (e) 实验测量的频率为 3.43 kHz 的不同输入态声波激发 T 触发器和 D 触发器对应输出端  $Q^{n+1}$  的声能级  
Fig. 5. (a) Schematic of experimental set-up; (b), (c) photographs of the T-type trigger and D-type trigger; (d), (e) experimental measurement of the acoustic intensity levels at the output port  $Q^{n+1}$  of T-type trigger and D-type trigger at a frequency of 3.43 kHz.

为了进一步展示所设计的 T 触发器和 D 触发器的带宽,实验测量两类触发器输出端  $Q^{n+1}$  对应的声能级谱,分别见图 6(a)和图 6(b).可以看出,基于统一阈值  $I_t = 10$  dB,在阴影区域范围中均可实现 T 触发器和 D 触发器的功能,对应的工作频段分别为 3.293—4.069 kHz 和 3.400—4.138 kHz,相对带宽分别可以达到 0.23 和 0.22,从而实验验证了两类声触发器的宽频带特征.除此之外,如图 6(a)和图 6(b)所示,两类触发器不同输入态所对应的声能级谱变化幅度较大,这主要由于所设计的单元相位差与频率密切相关,同时也限制了触发器的工作带宽.在此基础上,可知两类触发器的工作带宽不一致,这主要由于 D 触发器控制端 A 中

的单元 III 相位延迟及声透射率同样与频率相关,从而影响了 D 触发器的工作带宽.

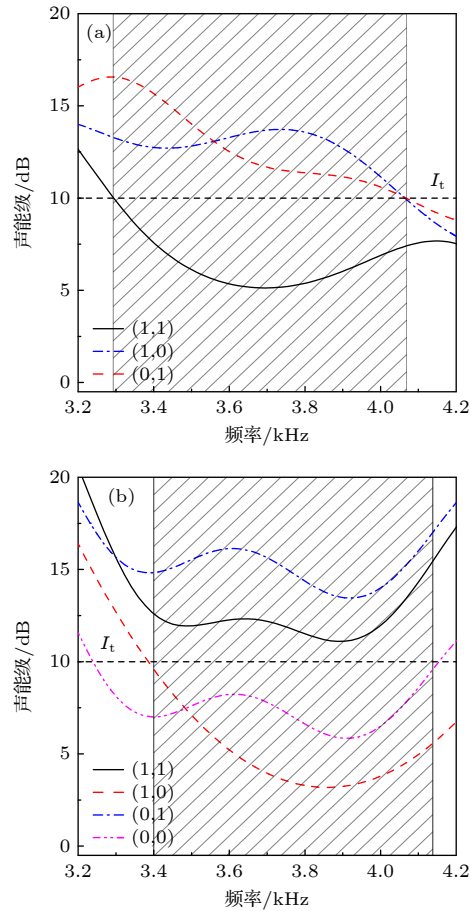


图 6 T 触发器 (a) 和 D 触发器 (b) 输出端处的不同输入态对应的声能级谱. 黑色阴影区域范围分别为 (a) 3.293—4.069 kHz, (b) 3.400—4.138 kHz  
Fig. 6. Measured intensity level spectra at the output ports of the T-type trigger (a) and D-type trigger (b) for different input states. Black shaded regions cover the ranges of 3.293–4.069 kHz in panel (a) and 3.400–4.138 kHz in panel (b).

## 4 结 论

本文基于多端口波导结构及相控单元,实验设计了两类声学触发器,所设计的声学触发器宽度和长度分别为  $0.32\lambda$  和  $0.82\lambda$ ,具有亚波长结构特征.研究表明:在多端口波导结构中嵌入相控单元,利用单元的相位调控及声波的线性相干机制,可以实现 T 触发器和 D 触发器对应的声逻辑功能,且对应的相对带宽分别可以达到 0.23 和 0.22,具有宽频带特征.实验测量与数值模拟结果吻合较好.与其他类型的声逻辑器件相比,所设计的声触发器具有具有小型化、宽频带、相同阈值及波导结

构易连接等优点, 在声开关、声通信及声二极管等领域具有一定的潜在应用, 同时也为设计新型声逻辑器件提供了理论方案与原理性器件.

## 参考文献

- [1] Liang B, Guo X S, Tu J, Zhang D, Cheng J C 2010 *Nat. Mater.* **9** 989
- [2] Li X F, Ni X, Feng L, Lu M H, He C, Chen Y F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 084301
- [3] Liang B, Kan W, Zou X, Yin L, Cheng J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 083510
- [4] Babace S, Viard N, Wang P, Fang N X, Bertoldi K 2016 *Adv. Mater.* **28** 1631
- [5] Nan T, Lin H, Gao Y, Matyushov A, Yu G, Chen H, Sun N, Wei S, Wang Z, Li M, Wang X, Belkessam A, Guo R, Chen B, Zhou J, Qian Z, Hui Y, Rinaldi M, McConney M E, Howe B M, Hu Z, Jones J G, Brown G J, Sun N X 2017 *Nat. Commun.* **8** 296
- [6] Zuo S Y, Wei Q, Tian Y, Cheng Y, Liu X J 2018 *Sci. Rep.* **8** 10103
- [7] Wu Y D 2021 *Prog. Electromagn. Res.* **170** 79
- [8] Li F, Anzel P, Yang J, Kevrekidis P G, Daraio C 2014 *Nat. Commun.* **5** 5311
- [9] Liu Z, Zhang X, Mao Y, Zhu Y Y, Yang Z, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [10] Lu M H, Zhang C, Feng L, Zhao J, Chen Y F, Mao Y W, Zi J, Zhu Y Y, Zhu S N, Ming N B 2007 *Nat. Mater.* **6** 744
- [11] Bringuier S, Swintek N, Vasseur J O, Robillard J F, Runge K, Muralidharan K, Deymier P A 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 1919
- [12] Zhang T, Cheng Y, Guo J Z, Xu J Y, Liu X J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 113503
- [13] Lu J, Qiu C, Ke M, Liu Z 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 093901
- [14] Xia J P, Jia D, Sun H X, Yuan S Q, Ge Y, Si Q R, Liu X J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1805002
- [15] Tian Z, Shen C, Li J, Reit E, Bachman H, Socolar J E S, Cummer S A, Huang J 2020 *Nat. Commun.* **11** 762
- [16] Jia D, Wang Y, Ge Y, Yuan S Q, Sun H X 2021 *Prog. Electromagn. Res.* **172** 13
- [17] Yan Q H, Chen H S, Yang Y H 2021 *Prog. Electromagn. Res.* **172** 33
- [18] Li Y M, Kong P, Bi R G, He Z J, Deng K 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 244302 (in Chinese) [李荫铭, 孔鹏, 毕仁贵, 何兆剑, 邓科 2022 物理学报 **71** 244302]
- [19] Lu Y J, Wang Y, Ge Y, Yuan S Q, Jia D, Sun H X, Liu X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 123506
- [20] Li J, Chan C T 2004 *Phys. Rev. E* **70** 055602
- [21] Fang N, Xi D, Xu J, Ambati M, Srituravanich W, Sun C, Zhang X 2006 *Nat. Mater.* **5** 452
- [22] Li J, Fok L, Yin X, Bartal G, Zhang X 2009 *Nat. Mater.* **8** 931
- [23] Lai Y, Wu Y, Sheng P, Zhang Z Q 2011 *Nat. Mater.* **10** 620
- [24] Liang Z, Li J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 114301
- [25] Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, Wu D J, Wei Q, Liu X J 2015 *Nat. Mater.* **14** 1013
- [26] Cummer S A, Christensen J, Alù A 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16001
- [27] Zhang T, Cheng Y, Yuan B G, Guo J Z, Liu X J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 183508
- [28] Zuo C Y, Xia J P, Sun H X, Ge Y, Yuan S Q, Liu X J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 243501
- [29] Wang Y, Xia J P, Sun H X, Yuan S Q, Liu X J 2019 *Sci. Rep.* **9** 8355
- [30] Li Z P, Cao G T, Li C H, Dong S H, Deng Y, Liu X K, Ho J S, Qiu C W 2021 *Prog. Electromagn. Res.* **171** 1
- [31] Xu Q R, Shen C, Han F, Lu T J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 244302 (in Chinese) [胥强荣, 沈承, 韩峰, 卢天健 2021 物理学报 **70** 244302]
- [32] Liao G X, Wang Z W, Luan C C, Liu J P, Yao X H, Fu J Z 2021 *Smart Mater. Struct.* **30** 045021
- [33] Hazra S, Ghosh B, Sarkar P P 2019 *J. Opt.* **48** 375
- [34] Bharti G K, Sonkar R K 2022 *Opt. Quantum Electron.* **54** 176

# Broadband acoustic triggers based on multiport waveguide structures\*

Pang Nai-Qi<sup>1) #</sup> Wang Yin<sup>1) #</sup> Ge Yong<sup>1)</sup> Shi Bin-Jie<sup>1)</sup>  
Yuan Shou-Qi<sup>1)</sup> Sun Hong-Xiang<sup>1) 2) †</sup>

1) (*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

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

( Received 13 April 2023; revised manuscript received 23 May 2023 )

## Abstract

The study of acoustic information processing has attracted great attention owing to its advantages of anti-electromagnetic interference and low energy consumption. Acoustic logic device, as a fundamental component, plays an important role in designing integrated acoustic systems. In the past few years, with the rapid development of sonic crystals, acoustic metamaterials and metasurfaces, researchers have demonstrated a variety of acoustic logic gates based on different mechanisms, and have devoted their efforts to the promotion of the practical applications. The more complex acoustic triggers with broad bandwidth and subwavelength size are very important for developing integrated sound devices, but it is difficult to realize them. In this work, we design two types of acoustic triggers based on the mechanisms of linear interference and phase modulation. The acoustic trigger with a width of  $0.32\lambda$  and length of  $0.82\lambda$  is composed of phased unit cells and multi-port waveguide structures, showing a subwavelength structure. Based on the phase modulation of the phased unit cells and the mechanism of linear interferences, the acoustic T-type trigger and D-type trigger with the same threshold are designed and demonstrated experimentally. The corresponding working bands of the T-type and D-type triggers are 3.293–4.069 kHz and 3.400–4.138 kHz, and their fractional bandwidths (the ratio of the bandwidth to the center frequency) can reach about 0.23 and 0.22, respectively, showing a broadband characteristic of both triggers. The mechanism of the T-type trigger is attributed to the linear interference caused by two phased unit cells with a phase difference of  $\pi$ . However, the realization of the D-type trigger is closely related to the incident sound energy and the phase modulation caused by the phased unit cell in the control port. The measured results and simulated results agree well with each other. Compared with other types of acoustic logic devices, the designed acoustic triggers have the advantages of broad bandwidth, subwavelength size, same threshold, and passive structure, as well as being easy to integrate, thus providing great potential applications in acoustic computing, acoustic communication, acoustic information processing and integrated acoustics. Our experimental demonstration of acoustic triggers can further promote the theoretical and experimental investigations of basic acoustic components.

**Keywords:** acoustic metamaterials, acoustic trigger, phase modulation, linear interference, waveguide

**PACS:** 43.35.+d, 43.25.+y

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230594

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12274183, 12174159) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC1512403).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: jsdxslx@ujs.edu.cn



## 基于多端口波导结构的宽频带声触发器

庞乃琦 王垠 葛勇 施斌杰 袁寿其 孙宏祥

### Broadband acoustic triggers based on multiport waveguide structures

Pang Nai-Qi Wang Yin Ge Yong Shi Bin-Jie Yuan Shou-Qi Sun Hong-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 164301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230594

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230594>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

声学超构材料及其物理效应的研究进展

Research advances in acoustic metamaterials

物理学报. 2019, 68(19): 194301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190850>

基于导波驱动相变材料超构表面的基波及二次谐波聚焦

Fundamental wave and second-harmonic focusing based on guided wave-driven phase-change materials metasurfaces

物理学报. 2022, 71(3): 034208 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211596>

声学超材料与超表面研究进展

Research advances in acoustic metamaterials and metasurface

物理学报. 2018, 67(19): 194301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180963>

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明均匀性

Active illumination uniformity with narrow spectrum laser based on ladderlike phase modulation

物理学报. 2021, 70(15): 154207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210228>

互易波导模式耦合理论

Reciprocal waveguide coupled mode theory

物理学报. 2020, 69(15): 154206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200194>

含间隔层的增益导引-折射率反导引平面波导激光器中高阶模式抑制研究

Suppression of higher order modes in gain-guided index-antiguide planar waveguide laser

物理学报. 2018, 67(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180138>