

体波非色散中频延迟线

李安良 杜 真

(上海有线电厂研究所)

本器件与国内外同类器件的性能相比较,具有宽带、低损耗、低杂波等显著优点。文中对器件的设计、调试、作了较为详细的论述。

一、前 言

体波非色散超声波延迟线在雷达、导航、通信、卫星、航天、电子对抗、仪器仪表和各种无线电设备中均有应用。例如用于:动目标雷达的对消延迟器件、雷达回波的模拟测试目标、距标、延迟式振荡器件、距离欺骗式电子对抗器件、信号自适应接收机延迟器件等方面。

由于声波在介质中传输的速度要比电磁波的传输慢五个数量级,因此可以在一个较小体积的导声体介质中获得较长的延迟时间,从而比LC延迟网络和用电缆延迟等其他延迟信号的方法体积小得多。例如要将中频信号延迟 $140\mu\text{s}$,若用电缆来实现,需用长为4万米以上,重约10吨的电缆。而用我们现在研制的超声波延迟线,其外形尺寸仅为 $0.148 \times 0.055 \times 0.021$ 米³。延迟介质加上双层封装外壳总重量为0.55公斤。从而可知,使用超声波延迟线不仅可使体积和重量都大大减小,便于装备整机,而且安装使用方便,性能可靠、稳定。

二、体波延迟线的一般组成

体波延迟线主要由换能器和导声体两大部分组成,另外还有将换能器与导声体连接

在一起的粘接层。

换能器的作用是将输入到延迟线的电信号转换成超声信号(输入换能器),再将经过一定的传输路径后到达输出端的声信号转换成电信号输出(输出换能器)。在四十年代中期刚出现超声波延迟线时,是使用天然石英来作为超声延迟线的换能器。五十年代后发明了压电陶瓷,使换能器的电-声传输效率得以提高。至五十年代末出现的人造水晶和1964年贝尔实验室研制成功具有高机电耦合系数的铌酸锂单晶,又使换能器的性能进一步得到提高,从而成为目前普遍使用的换能器材料。近几年来又发展了低 ϵ 、高频率常数的铌酸钠锂压电陶瓷材料和氧化锌、硫化镉压电薄膜,使延迟线的使用频率扩展到了微波频段。

导声体(又称延迟介质)的作用在于传输声波信号。延迟线的延迟时间与声速及传输路径满足关系式:

$$T = \frac{L}{V} \quad (1)$$

也就是说延迟线的延迟时间与声波所经过的传输路径 L 成正比,与导声体材料的声速 V , 成反比。

导声体的种类也很多,例如有:金属、塑料、橡皮、玻璃、熔石英、水银、水等。研究证明,这些材料中熔石英的传输损耗最低。

通常，体波非色散延迟线有直通式（图1）、反射式（图2）两种，反射式中又有梯形、矩形、多面体形之分。在延迟时间大于 $50\mu\text{s}$ 时，一般都不采用直通式，而用反射式以减小体积。

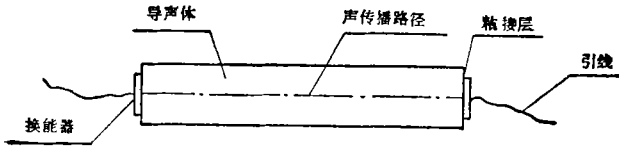


图1 直通式延迟线

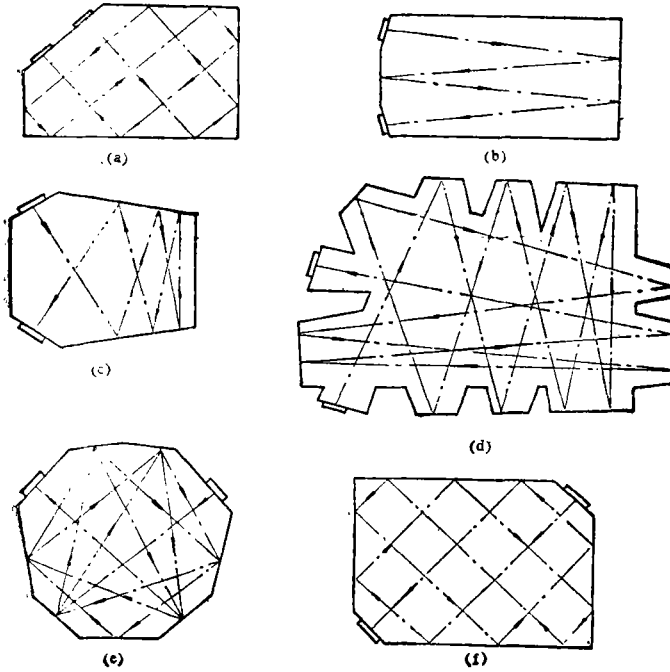


图2 反射式延迟线

三、延迟线的设计

1. 导声体的选择

在延迟线中如何正确地选取作为延迟介质的导声材料，和准确地计算导声体的外形参数，是能否研制出高性能指标延迟线的关键。在选择导声体材料时有以下三个因素要着重考虑。

1) 器件的插入损耗

即在所确定的工作频率范围内声衰减要小。因为对器件来说，插入损耗包括以下几个方面：

- (1) 换能器的失配损耗（包括电—声转换损耗，波束展宽损耗等）；
- (2) 导声体的传输损耗。

在高频延迟线中，导声体的传输损耗是主要的。这是因为当延迟线工作频率较低时，传输损耗主要是由机械滞迟效应引起的。损耗随频率的增加而线性增加。而当延迟线工作在高频时，即波长与导声体的晶粒尺寸可以相比拟时，传输损耗将随频率的增高而成平方增加，即损耗与频率的二次方成正比。因此，工作频率越高，延迟线的插入损耗越大。表1例出了部分导声体在不同工作频率时的插入损耗。从表中可看到工作频率越高，插入损耗越大。

表1中4、5、6是同一延迟介质，可以看出用相同的换能器时，在相同的延迟时间下，当工作频率较高时，插入损耗急剧增加。

2) 器件的体积

从式(1)中可看到，当需要的延迟时间确定以后，材料的声速越低，为满足所需延迟时间而需要的声传输路径越短，也就是说，所需要的

体积可以越小。

3) 加工性能和成本

对一个器件来说，要能使之推广应用，除性能良好，使用可靠外，成本也是一个需要考虑的因素。另外，还需考虑材料的加工性能这一因素。

根据以上几点因素综合考虑，我们选择了熔融石英为导声体。熔融石英的声学参数横波声速为 3.77km/s ，在 100MC 以下工作时，

表 1 固定延迟线性对比

| 编号 | 材 料 | 体波模式 | 时延 (μs) | 工作频率 (MC) | 插入损耗 (db) | 换能器 |
|----|----------------------------|------|-------------------------|--------------|---------------|--|
| 1 | 硬质玻璃棒 | 剪切 | 140 | 6~8 | >40 | 压电陶瓷(PZT ₋₇ ⁻⁵) |
| 2 | F ₃ 低膨胀玻璃 | 剪切 | 40 | 6~8 | 28 | " " |
| 3 | F ₆ " " " " " " | " " | 60 | 6~10 | 27 | " " |
| 4 | F ₀₅ 等延时玻璃 | " " | 133 | 5~6 | 12 | " " |
| 5 | " " " " " " | " " | 133 | 12~13 | 24 | " " |
| 6 | " " " " " " | " " | 133 | 30 | 最佳54, 一般60~65 | 铌酸锂 166°Y 切割 |
| 7 | 钢带 | " " | 110 | 2 | 25~30 | 压电陶瓷(PZT ₋₇ ⁻⁵) |
| 8 | 铝-镁带 | 纵波 | 55 | 6~8 | 最佳16 | " " |
| 9 | 镍铬钢带 | 剪切 | 40 | 6~8 | 30 | " " |
| 10 | " " " " | " " | 84 | 30 | 65 | 铌酸锂166°Y 切割 |
| 11 | 铌基薄带 | 纵波 | 25 | 6~8 | 25 | 压电陶瓷(PZT ₋₇ ⁻⁵) |
| 12 | 镍" " " | " " | 25 | 6~8 | >35 | " " |
| 13 | 钽硅银非晶延迟样线 | 剪切 | 126 | 30 | 最佳27 | 铌酸锂 166°Y 切割 |
| 14 | " " " " " " " " | 剪切 | 74 | 30 | 最好43~46 | " " |

传输损耗 $<0.06\text{db}/\mu\text{s}$ ，声阻抗为 $8.29 \times 10^6 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ ；材料的价格为2800元/kg。虽然价格较贵，但每根线实际使用的材料只有50g（毛坯为55g），约需70元左右，而加工性能良好，合格率高，反比用其他材料合算得多。

2. 延迟方案的确定

在前言部分和图1、图2中，虽然介绍了已实际使用的延迟线的各种形式，但根据具体使用条件和指标并不是任意选择一种形式就可满足要求。通常根据实际情况，有以下几个特定的条件需要考虑。

1) 按使用要求，整个器件的外形尺寸必须小于规定的尺寸要求；

2) 由于使用频率高，对漏信号的抑制措施必须加以考虑；

3) 按现有的加工条件，不能选取复杂的外形结构。

对使用熔石英作为导声介质，延迟130~140 μs 延迟线，实际传输路径需500mm以上才能获得。如采用直通式，虽然结构形式简

单，但500mm长延迟线的安装、使用都很不方便，并经受不住振动和冲击（除非采取相当复杂的防振措施）。显然，采用直通式延迟线结构是不适宜的。

图2a所示的形式，其体积可以做得较小，但两换能器在同一面上，距离太近，漏信号较强，且抑制困难，也不宜采用。

图2b所示的形式，为了缩小体积，反射角不能取得很大，但当反射角取得小时，加工误差对器件的性能影响就不能忽略。对器件的加工精度就要高得多。所以也不宜采用。

图2e所示的多边形延迟线，为了使信号能准确地到达输出换能器，对各反射角的加工精度都要求很高，否则会使信号偏离很大，甚至完全接收不到。而且多边形的体积较大，往往不能满足尺寸的要求。

其他如单楔形(图2c)和双楔形(图2d)，也由于加工精度要求高、体积大而不宜采用。

通过对几种方案的比较，认为采用图2f矩形反射形式比较合宜，它有如下几点优点：

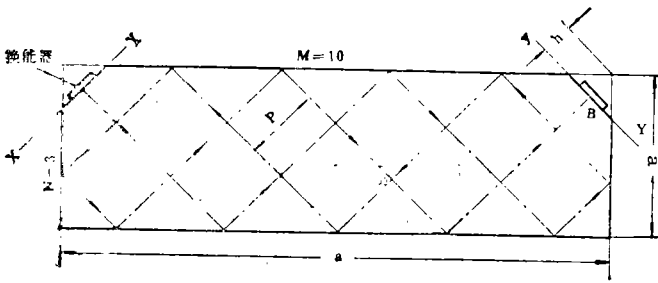


图3 矩形延迟线的外形

- a, b ——矩形的边长;
 M, N ——两者不能通约的整数;
 P ——声波束中心线的间距;
 h ——从矩形顶点到焊接换能器的X-X面和Y-Y面的距离。

(1) 反射角为 45° , 当选用图2b和2e的相同加工精度时, 矩形结构的相对精度误差要小得多。如图2b和2e形式为 15° 反射角, 加工误差为 $10'$ 时, 则相对精度误差达1%; 而矩形式的加工误差为 $10'$ 时, 其相对精度误差则仅有0.37%;

(2) 换能器可以选在矩形的两长边上, 使漏信号较易被抑制;

(3) 体积较小, 容易满足尺寸要求。

3. 延迟线线体尺寸的确定

从几何学中可知:

$$l + 2h = a \cdot N \cdot \sec 45^\circ = b \cdot M \cdot \sec 45^\circ; \quad (2)$$

$$a = M \cdot P \cdot \cos 45^\circ = M \cdot P / \sqrt{2}; \quad (3)$$

$$b = N \cdot P \cdot \cos 45^\circ = N \cdot P / \sqrt{2}; \quad (4)$$

$$P = (l + 2h) / (M \cdot N) = \sqrt{2} a / M \\ = \sqrt{2} b / N; \quad (5)$$

$$\text{令: } P' = a / M = b / N, P' = P / \sqrt{2} \quad (6)$$

式中: l ——从A到B的有效声传输路径。

声波在导体中的反射次数为 $M + N - 2$ 。当 M 和 N 均为奇数时, 换能器设在导声体的两对角上。

P' 值不能取得太小, 否则会使杂波明显增加, 而太大又会使整个器件的尺寸大大增加, 因此对 P' 值的确定要合理、慎重。

考虑到器件要满足小于规定尺寸的要求, 经计算和实验, 取 $M=10, N=3, P'=12\text{mm}$ 。

4. 换能器参数的选择

换能器是延迟线的一个重要组成部分。换能器性能的好坏, 将直接影响器件的性能。在确定换能器时有以下几个因素要加以考虑:

(1) 所用换能器的机电耦合系数 k 值要高。当 k 值高时, 电—声转换效率就越高, 换能器的转换损耗越小;

(2) 换能器激励的声信号模式要纯, 否则会因模式转换而产生杂波信号;

(3) 频率常数高;

(4) 换能器的声阻抗应尽可能与导声体的声阻抗相近, 以改善声阻抗匹配。

根据以上因素, 我们选择 $Y163^\circ$ 切 LiNbO_3 单晶, 作为延迟线的电—声转换部分。 $Y163^\circ$ 切 LiNbO_3 的声学参数为:

频率常数: $2280\text{MC} \cdot \mu\text{m}$;

耦合系数: 0.62;

声阻抗: $21.4 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$;

相对介电常数: 43;

外形尺寸: 长·宽·厚 = $8 \times 4 \times 0.07\text{mm}^3$

四、器件的调试

在器件的调试中, 我们采取了一系列行之有效的措施, 使器件的各项指标都达到了相当好的水平。众所周知, 在延迟线中, 杂波、带宽及损耗是衡量一个延迟线好坏的主要指标, 而这三项指标又是互相牵连的, 通常都是以牺牲损耗来降低杂波和增加带宽。要使这三项指标在一个器件上达到较好的水平是相当困难的。而且它们之间的关系都不是线性的。要求杂波、三次反射越小, 带宽越宽, 所增加的损耗值就越多。为了尽可能降低杂波和三次反射信号, 并增加带宽, 而又要使能量尽可能少损失, 经过探索, 采取了以下各项措施来保证器件的性能。

1. 直通信号的消除

1) 首先在设计上保证两换能器相距一定的距离, 在我们的设计中两换能器处于矩形的长边上。实验证明, 当两换能器相距大于 20mm 以上, 就能很好地抑制直通信号。

2) 采用良好的屏蔽措施。

当采用以上两个措施后, 漏信号可达到小于 -40dB 以下。

2. 三次反射信号的抑制

由于换能器与导声体的声阻抗不匹配, 输出信号有一部分会被反射回去, 再经过输入端反射到输出端被测检后输出。由于这个反射信号的来回反射的路径和主信号一样。而在路径上比主信号长两倍, 所以在时间上是主信号延迟时间的三倍, 称为三次反射信

号。为了抑制这一不需要的信号采取将输出换能器倾斜一个小角度的方法, 可使三次反射这一不需要的信号小于主信号 -40~-60dB。

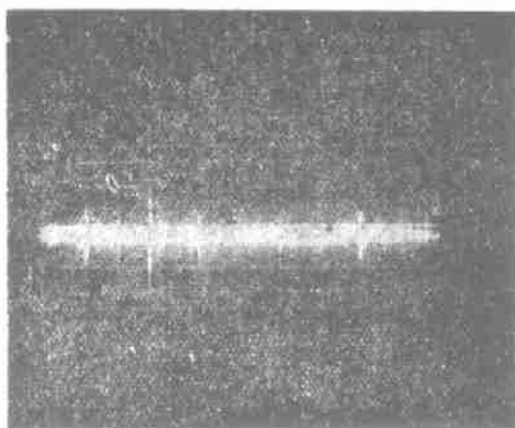
3. 其他杂波信号的抑制

1) 选取适当的 P 值; P 值选取是否合适对杂波信号影响很大, 选得太大会使延迟线的线体尺寸大大增加, 选得太小会使杂波增加;

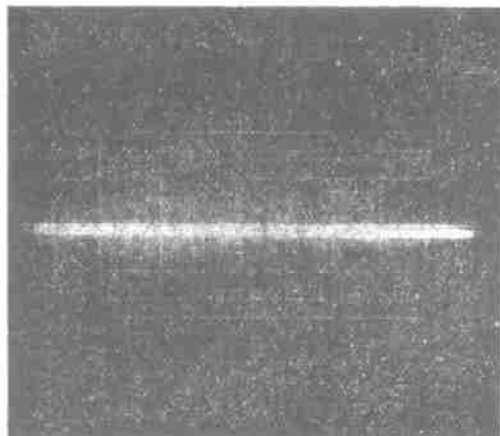
2) 在反射点以外的区域涂复吸声橡胶;

3) 换能器的焊接质量要高 (要求焊层薄、位置正确)。

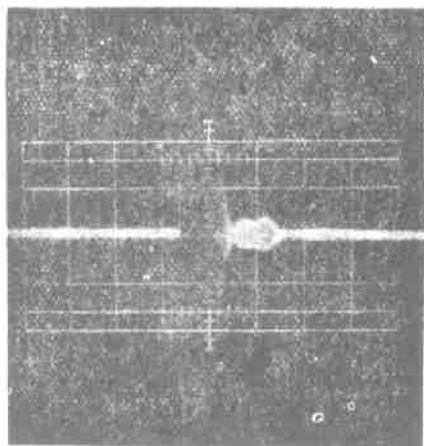
当采取以上三个措施后, 其他杂波信号可减小到 35~40dB。图 4 给出了调试前后的三次反射和其他杂波信号的对比照片。



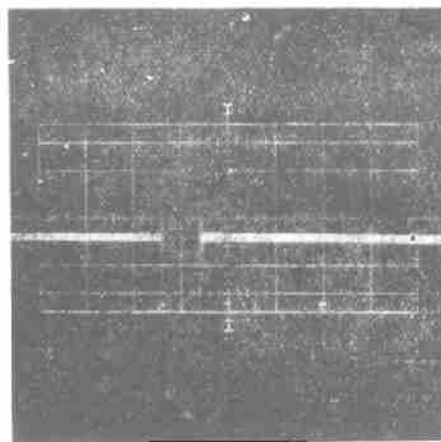
4a 调试前



4b 调试后



4c 调试前



4d 调试后

图 4 三次反射和其他杂波信号在调试前后的比较

4. 带宽的调试

由于 LiNbO_3 的 Q 值较高, 谐振曲线较尖锐, 带宽较窄, 要获得较平坦和较宽的带宽就比较困难。如此, 采用了换能器频率参差技术, 即输入、输出换能器采用不同的频率(一个偏高、一个偏低), 这样可使延迟线的相对带宽达到30%~40%。图5给出了实测延迟线的幅频照片。

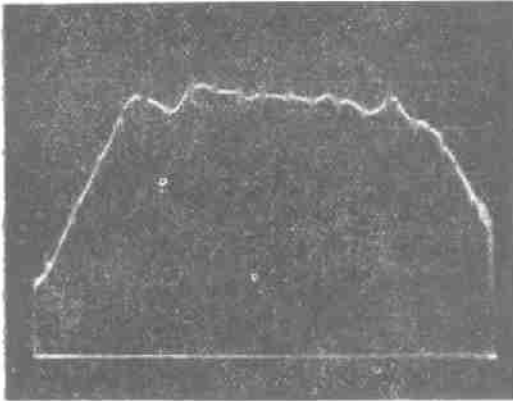


图5 延迟线的幅频

5. 插入损耗的调试

插入损耗是延迟线的主要指标之一。为了使插入损耗减到最小限度, 我们对换能器与熔石英之间的焊接层材料和换能器与熔石英的电极面的材料进行了仔细的选择, 使声阻抗的匹配尽可能得到改善, 以减小能量的损失和减小器件的插入损耗。所采取的措施是对换能器电极蒸金, 金的声阻抗为 $23.2 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ (LiNbO_3 的声阻抗为 $21.4 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$); 熔石英的电极是银, 其声阻抗为 $16.7 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ (熔石英的声阻抗为 $8.29 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$); 中间焊锡采用铟锡低

温合金焊锡, 其声阻抗为 $12.23 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ 。采取这些措施后, 加上换能器焊接质量的保证, 可使插入损耗可减小到仅12~14dB。

当从设计上和调试上采取这一系列措施后, 器件性能可达到相当好的水平。具体指标如下:

- $f_0 = 35 \text{MC}$,
- $\Delta f_{3\text{dB}} > 9 \text{MC}$,
- T_r 130~140 μs ,
- 插入损耗 < 14dB,
- 直通 < -40dB,
- 三次反射 < -50dB,
- 其他杂波 < -35dB,
- 阻抗: 50 Ω ,
- 温度系数: 80ppm/ $^\circ\text{C}$ 。

从以上测试数据可以看出, 该器件是一个宽带、低损耗、低杂波的优良器件。

五、结 束 语

本器件经过实际使用, 证明具有性能稳定、可靠、体积小、重量轻, 且安装、使用方便等特点。本文提及的调试方法也适用于其他不同延迟时间的体波延迟线。

参 考 文 献

1. 朱俊鑫等: “体波压电固体超声延迟线”——《压电与声光》, 1979, No.1~3。
2. “阻尼电声换能器技术”——《雷达技术》, 1974, No.2
3. “超声波延迟线”——《电视通讯》, 73, No.3。
4. 笠原征夫: “超音波延迟线”——NATIONAL TECHNICAL REPORT Vol.18, No.4, AVG, 1972