



中国海洋大学

海洋技术专业开放实验

结题报告书

项目名称： 可编程波阵面操控导管

指导老师： 郁高坤

所在院系： 信息科学与工程学院

参与人：

武凯 17854229092

350977929@qq.com

牛小宇 17854228305

734497706@qq.com

时间 2016年12月20日

1.引言	4
1.1 研究背景	4
1.2 研究现状	4
1.3 研究目的	5
1.4 研究应用	5
2.理论基础	5
2.1 声现象	5
2.2 声压 声能量 声能量密度	6
2.3 声强 声功率	7
2.4 声阻抗 声阻抗率 媒质特性阻抗	8
3.实验装置制作	9
3.1 可编程波阵面操控导管的原理	9
3.2 可编程波阵面操控导管设计	11
3.2.1 概要设计	11
3.2.2 详细设计	12
1.动力部分	12
2.驱动部分	13
3.控制部分	13
3.2.3 器材选择	14
1.动力部分	14
2.驱动部分	16
3.控制部分	18
3.2.4 组装设计	19
(1) 组装一	19
(2) 组装二	20
(3) 组装三	20
4、可编程波阵面操控导管声学性能测试实验	21
4.1 实验目的:	21

4.2 实验仪器	21
4.3 实验原理	21
4.3.1 声波导管理论	21
4.3.2 声波导管的工作频率	22
4.3.3 基于传递函数法的阻抗管吸声系数的测量	22
1.传递函数法	22
2.传递函数法与驻波法比较	23
3.传声器灵敏度校准	24
4.3.4 阻抗图及管中输入阻抗	24
1.阻抗图	24
2.管中输入阻抗	25
4.3.5 可编程反射管	25
4.4 实验步骤	26
4.5 实验数据的处理和分析	27
4.5.1 实验数据	27
4.5.2 实验数据处理—MATLAB 程序	27
4.5.3 实验数据处理结果	30
1.可编程波阵面操控导管的声波反射系数图	30
2.管子实际长度与理论长度对比图（单位：m）	31
3.声波反射相位与管长变化图	32
4.实验结果总结	33
4.6.实验注意事项	33
5、分析总结	34
6、时间进程	36
7、参考文献	37
8、致谢	38

1. 引言

1.1 研究背景

在声学研究中常会用到管道的传声问题。其中平面声波具有一个重要的特性，就是其振幅是不随距离变化的，但在实际的自由空间里利用一般声源往往获得的不是平面波，而是波阵面随距离逐渐减弱的球面波。而我们现在所研究的管道就是平面声波传播的一种良好环境，因此管道已成为目前声学研究的较为重要的研究环境。例如，吸声材料的声阻抗与吸声系数的测量，传声器灵敏度的校正以及对一些其他声学参量的测量与一些声学现象的研究观察。除此之外，管道消声问题也成为管道传声研究的一个重要课题。

我们目前常用的声波导管主要有均截面管和变截面管。均匀截面声波导管的主要优点之一是当声波频率低于管的截止频率时能够获得良好的且没有几何损失的平面声波，因此其应用价值很高应用范围也很广；变截面声波导管是在均匀截面声波导管上的发展，可以通过改变截面面积之比来实现对相关声学系数的影响，其中一个重要的应用就是利用变截面声波导管的滤波原理设计消声器。但目前存在的一个问题就是，声波导管的长度一旦确定就无法改变，我们只能通过固定长度的声波导管来研究相应频段的声波，或者通过其他措施比如上面提到的改变截面面积来扩大它的应用范围。这不仅造成资源的浪费，同时也限制了声波导管的使用范围，对声波的研究造成了不便影响。所以我们希望通过研究设计出一种可伸缩的即可编程的声波导管，通过改变声波导管的长度来实现对声波相位的控制，日后将它与其他元件相结合扩大它的应用范围。

1.2 研究现状

目前对均截面管和变截面管的研究和应用较多，但在长度可变即可编程管子方面的研究较少。虽然我们能通过一些人工的方法实现它的长度可变，但却存在很多的不便以至于无法实现它更大范围的应用，而目前我们想要实现主动控制仍

没有太大的进展，需要我们继续的探索和研究。

根据声波在声波导管中的传播特性以及平面波理论，设计一种长度可伸缩即可编程的声波导管，实现它的主动控制。将管子的长度变化与声波在管子中的反射和透射原理结合起来，设计出最优的声波导管结构，争取实现对它的精确性控制。

1.3 研究目的

根据声波在声波导管中的传播特性以及平面波理论，设计一种长度可伸缩即可编程的声波导管，实现它的主动控制。将管子的长度变化与声波在管子中的反射和透射原理结合起来，设计出最优的声波导管结构，争取实现对它的精确性控制。

1.4 研究应用

可编程波阵面操控导管的研究，只在为波阵面的操控探索一种新的技术上的可能性。如果对于波阵面的操控能实现较为理想的主动控制，进一步发展下去的话，微穿孔共振吸声、声波聚焦、复反射等波阵面操控的实际应用，将能实现主动控制。

2.理论基础

2.1 声现象

设想在一弹性介质（如空气）里，有若干个毗邻的小区域。介质由许多微小粒子所组成，原来它们都处于相对静止平衡状态，现由于某种原因，使某物体产生振动，从而在弹性介质的某局部地区激起一种扰动，使该局部地区的媒质质点A开始运动。而A的运动必然推动A点的相邻媒质质点B运动，或者说压缩了这部分相邻媒质。由于介质的弹性作用，被压缩媒质会产生一种反抗压缩的弹力，

使 A 产生一种要恢复原来平衡状态的运动。然而，介质是具有惯性的。所以当 A 区域的前侧面的恢复平衡位置的运动经过原来的平衡位置时，它不会停止下来，而出现“过冲”。这使得最初受到扰动的质点 A 就在平衡位置附近来回振动。由于同样的原因，被 A 推动的媒质质点 B, C, D, ... 等也都在平衡位置处振动，只是时间上依次滞后。这种媒质质点的机械振动由近及远的传播就称为声振动的传播或称为声波。可见声波是一种机械波。下面就对常用的声学名词作简要的介绍。

2.2 声压 声能量 声能量密度

在声波的传播过程中。媒质各处存在疏密的交替变化，因而媒质各处的压强也相应的变化。设无声波作用时，媒质中的压强为 p_0 ，称为静态压强。当媒质受到声扰动时，媒质中某处的压强为 p' 。由声扰动产生的逾量压强 $p' - p_0$ 称为声压。即声压 p 为 $p = p' - p_0$ 。声压一般为空间位置和时间的函数，其单位为牛顿/米或帕。

声波的传播过程实质上声振动能量的传播过程。声波传播到原静止的媒质时，一方面使媒质质点在平衡位置作往复振动，获得振动动能；同时在媒质中产生疏密的交替过程过程，使媒质具有形变势能。这两部分能量是由于声扰动引起的，其总和称为声能量。

设想在声场中有一足够小的体积元，取其静态的体积为 V_0 ，压强为 p_0 ，密度为 ρ_0 ，由于声扰动使该体积元得到的动能为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0)u^2,$$

式中， u 为体积元的振动速度。由于声扰动，该体积元的压强由 p_0 升高到 $p_0 + p$ ，于是该体积元具有了势能

$$\Delta E_p = -\int_0^p p dV,$$

式中，负号表示体积元内压强和体积的变化方向相反。如压强增加时体积将

缩小，此时外力对体积元做功，使其势能增加，即压缩过程使系统储存能量；反之，当体积元对外做功时，体积元里的势能会减小，即膨胀过程使系统释放能量。

由理想气体的物态方程 $p = c^2 \rho'$ ，两边微分得到 $dp = c^2 d\rho'$ 。考虑到体积元在压缩和膨胀的过程中质量保持一定，即 $\rho V = \text{常量}$ ，进而得到体积元体积变化和密度变化之间存在着关系 $\frac{d\rho'}{\rho} = -\frac{dV}{V_0}$ ，将其代入 $dp = c^2 d\rho'$ 得

$$dp = -\frac{\rho_0 c^2}{V_0} dV$$

由此解出 dV ，代入式 $\Delta E_p = -\int_0^p p dV$ 中，再对 p 积分得

$$\Delta E_p = \frac{V_0}{\rho_0 c^2} \int_0^p p dp = \frac{V_0}{2\rho_0 c^2} p^2$$

体积元里的总能量为动能与势能之和，即

$$\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_k = \frac{V_0}{2} \rho_0 \left(u^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c^2} p^2 \right)$$

单位体积里的声能量称为声能量密度 ε ，即

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_0} \rho_0 \left(u^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c^2} p^2 \right).$$

ΔE 代表体积元内声能量的瞬时值，将其对一个周期取平均，则得到声能量的平均值 $\Delta \bar{E} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta E dt$ 。单位体积里的平均声能量称为平均声能量密度 $\bar{\varepsilon}$ 。

2.3 声强 声功率

单位时间内通过垂直于声传播方向的面积 S 的平均声能量就称为平均声能量流或称为平均声功率。由于声能量是以声速 c_0 传播的，因此平均声功率应等于声场中面积 S 、高度 c_0 的柱体内所包含的平均声能量，即

$$\bar{W} = \bar{\epsilon}c_0S$$

声场中某点处，与质点速度方向垂直的单位面积上在单位时间内通过的声能称为瞬时声强，它是一个矢量，为：

$$I(t) = p(t)u(t)$$

式中， $I(t)$ 是瞬时声强， $p(t)$ 是瞬时声压， $u(t)$ 是瞬时质点速度。

稳态声场中，声强 I 为瞬时声强在一定时间 T 内的平均值。声强的表示式：

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re}[p(t)] \text{Re}[u(t)] dt = \frac{1}{2} \text{Re}[pu^*]$$

式中， T 是周期的整倍数，或长到不影响计算结果的时间。

在自由平面波或球面波的情况，在传播方向的声强是： $I_0 = \frac{p_e^2}{\rho c}$ ，式中， p_e^2

是有效声压平方的时间平均 (Pa)， ρ 是媒质密度 (kg/m^3)， c 是声速 (m/s)。

2.4 声阻抗 声阻抗率 媒质特性阻抗

声阻抗等于界面声压与通过该面的声通量(质点流速或体速度乘以面积)之比。与电路理论类比，声压相当于电压，体速度相当于电流。声阻抗以复数表示，实部相当于电阻，虚部相当于电抗。一般表示声波在介质中传播的状况，常使用声阻抗 Z_a 、声压 p 和体积速度 U 3 个参数。声阻抗是声波传导时介质位移需要克服的阻力。体积速度是穿过一面积 S 的介质流动速度，声阻抗越大则推动介质所需要的声压就越大，声阻抗越小则所需声压就越小。声阻抗、声压和体积速度三者之间的关系如下式所示：

$$Z_a = \frac{p}{U} = R_a + jX_a$$

声场中某位置的声压与该位置的质点速度的比值为该位置的声阻抗率，即

$$Z_s = \frac{p}{v} = R_s + jX_s$$

式中， p 为声场中某点声压， v 为该位置媒质质点振动速度。 Z_s 的实部 R_s 反映

了能量的耗损。在相同声压作用下，对于声阻抗率大的媒质，其媒质质点振速小，而对于声阻抗率小的媒质，其媒质质点振速就大。因此，声阻抗率的意义可理解为声场中某位置媒质的限速能力。

根据 Z_s 的定义，在平面波情况下，根据声压与声速之间的关系，我们可以求得正向平面波的 $Z_s = \rho_0 c_0$ ，同理可求反向平面波 $Z_s = -\rho_0 c_0$ 。

由此可以注意到乘积 $\rho_0 c_0$ 是媒质的一个固有常数，该数值对声传播的影响比媒质密度或声速的单独作用要大，所以 $\rho_0 c_0$ 在声学中地位特殊。考虑到 $\rho_0 c_0$ 具有声阻抗率的量纲，所以称 $\rho_0 c_0$ 为媒质的特性阻抗。根据以上分析，可以看到平面波的声阻抗率在数值上恰好等于媒质的特性阻抗，即平面波处处与媒质的特性阻抗相匹配。

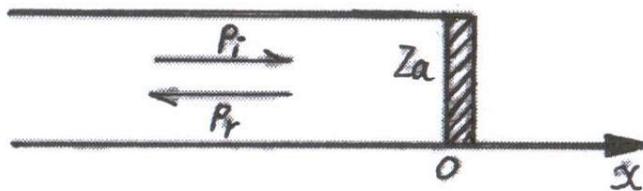
3.实验装置制作

3.1 声波反射导管的原理

入射波与反射波的形式分别为

$$P_i = P_{ar} e^{j(\omega t - kx)}$$

$$P_r = P_{ar} e^{j(\omega t + kx)}$$



反射波 P_{ar} 的产生是由管端的声学负载引起的，它同入射波 P_{ai} 之间不仅大小不同，而且还可能存在相位差，一般可表示为

$$\frac{P_{ar}}{P_{ai}} = r_p = |r_p| e^{j\sigma\pi}$$

这里的 r_p 称为声压反射系数, $|r_p|$ 表示它的绝对值, ($\sigma\pi$) 表示反射波与入射波

在界面处的相位差。将 P_i 与 P_r 相加可得管中总声压

$$P = P_i + P_r = P_{ai} \left[e^{-jkx} + |r_p| e^{j(kx+\sigma\pi)} \right] e^{j\omega t} = |P_a| e^{j(\omega t+\psi)}$$

其中 $|P_a| = P_{ai} \left| \sqrt{1+|r_p|^2} + 2|r_p| \cos 2k(x + \sigma \frac{\lambda}{4}) \right|$ 为总声压振幅,

ψ 为引入的一个固定相位。当 $2k(x + \sigma \frac{\lambda}{4}) = \pm(2n+1)\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) 时, 总声压有极小值, 当

$2k(x + \sigma \frac{\lambda}{4}) = 2n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) 时, 总声压有极大值。我们用 G 来表示声压极大值与极小值的比

值, 称为驻波比, 可得

$$G = \frac{|p_a|_{\max}}{|p_a|_{\min}} = \frac{\sqrt{1+|r_p|^2} + 2|r_p|}{\sqrt{1+|r_p|^2} - 2|r_p|} = \frac{1+r_p}{1-r_p}$$

或写成如下形式

$$|r_p| = \frac{G-1}{G+1}$$

可以通过对驻波比的测量来确定声负载的声压反射系数。我们还可以确定管中声压极小值的位置, 由

$$\cos 2k(x + \sigma \frac{\lambda}{4}) = -1$$

可得

$$(-x) = [(2n+1) + \sigma] \frac{\lambda}{4} \quad (n=0,1,2,\dots),$$

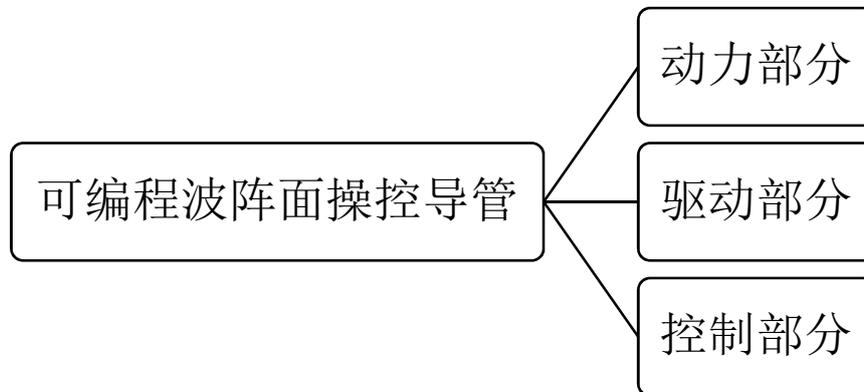
这里 x 前面引入一负号, 是因为我们坐标取在管的末端, 随意管中的任意位置 x 都是负值, 而 $(-x)$ 就是取正值的意思。 $n=0$ 对应着一个最靠近声负载处的极小值, 我们成为第一个极小值, 它等于

$$(-x) = (1 + \sigma) \frac{\lambda}{4}$$

由此我们可以通过第一个极小值位置的测量，来求得管口端反射波与入射波的相位差 ($\sigma\pi$)。所以反射波与入射波的相位差 $\sigma\pi = 2kx$ 会随着声波反射导管长度 x 的变化而变化。从而实现声波相位差的控制，即可以实现声波波阵面的主动操控。

3.2 声波反射导管设计

3.2.1 概要设计



图表 3.2.1 可编程波阵面操控导管的概要设计

可编程声波发射导管，总体上看是由三部分构成：动力部分、驱动部分、控制部分。

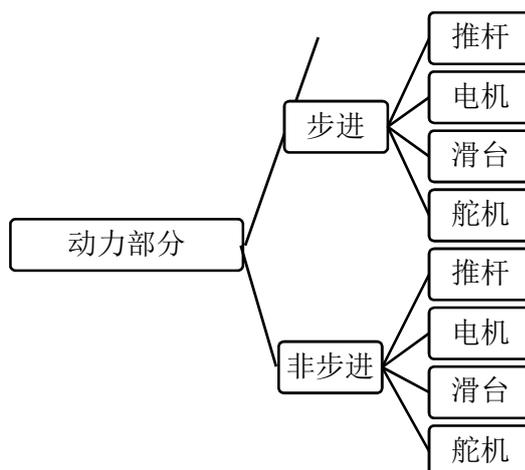
- 动力部分：为声波反射导管的伸缩提供动力。
- 驱动部分：负责给予动力部分相应的激励，协调动力部分，实现管的伸缩功能。
- 控制部分：定量指令的输入，实现声波反射的导管的定量伸缩。

3.2.2 详细设计

1.动力部分

关于动力部分采用何种装置，我们首先做了，动力部分的相关调查研究工作。

研究结果如下：



图表 3.2.2.1 可编程波阵面操控导管动力部分详细设计

通过对动力部分的研究学习，了解到有如上的动力装置可以被我们采用，但是哪一种动力方案才是最佳选择呢？我们对每个动力装置的特点（优缺点）进行了分析研究。研究结果如下：

	推杆	电机	滑台	舵机
步进	步进电动推杆	步进电机	步进滑台	步进舵机
非步进	电动推杆	电机	滑台	舵机

图表 3.2.2.2 动力部分备选装置分析

装置分类	推杆		电机		滑台		舵机	
	步进	非步进	步进	非步进	步进	非步进	步进	非步进
考察指标								
旋进推动	否		是		是		与动力转换结构有关	

集成难度	易	易	难	易
组装难度	易	难	易	难
运动方式转换	平动变平动	转动变平动	转动变平动	转动变平动

图表 1-1-3 动力部分备选装置功能特点分析

分析：

对于可编程波阵面操控导管，我们的功能需求是，串行接口指令输入，使反射导管能实现定量的伸缩。而且还要考虑到，为以后的集成工作打下基础，方便后期其它实验的拓展。

综合上述分析：

动力部分拟定采用的装置为——步进电动推杆。

2.驱动部分

步进电动机和步进电动机驱动器构成步进电机驱动系统。步进电动机驱动系统的性能，不但取决于步进电动机自身的性能，也取决于步进电动机驱动器的优劣。

步进电动机不能直接接到直流或交流电源上工作，必须使用专用的驱动电源（步进电动机驱动器）。原因就在于，步进电动机直接接到交流或者直流电源上会产生低频振荡，为了消除这种低频振荡就需要通过驱动器的细分来实现。

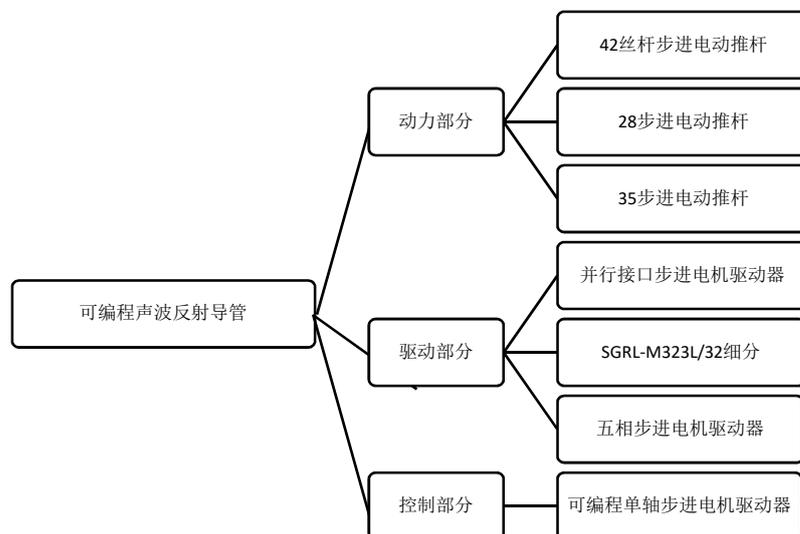
而在“可编程波阵面操控导管”的设计中，只需要选择与步进电动推杆相匹配的驱动器即可。

3.控制部分

步进电机控制器是一种能够发出均匀脉冲信号的电子产品，它发出的信号进入步进电机驱动器后，会由驱动器转换成步进电机所需要的强电流信号，带动步进电机运转。步进电机控制器能够准确的控制步进电机转过每一个角度。

3.2.3 器材选择

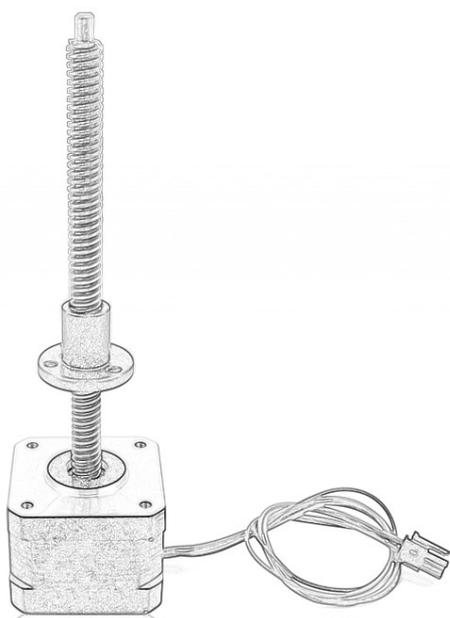
通过对以上器材的特点和我们实验装置的需求分析，我们选择以下器材作为我们的可编程波阵面操控导管的组成部分：



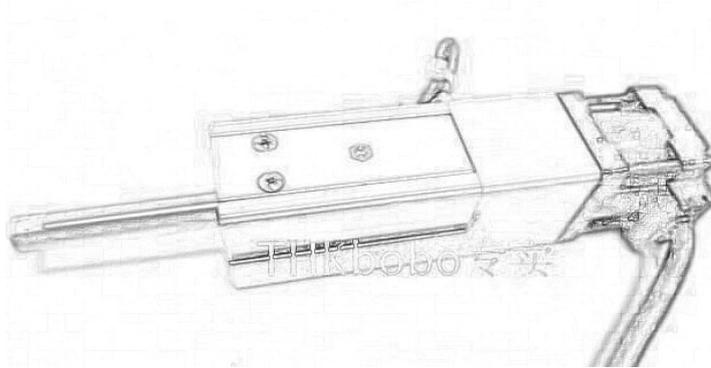
图表 3.2.3.1 可编程波阵面操控导管组装设计

1.动力部分

(1) 42 丝杆步进电动推杆



(2) 28 步进电动推杆

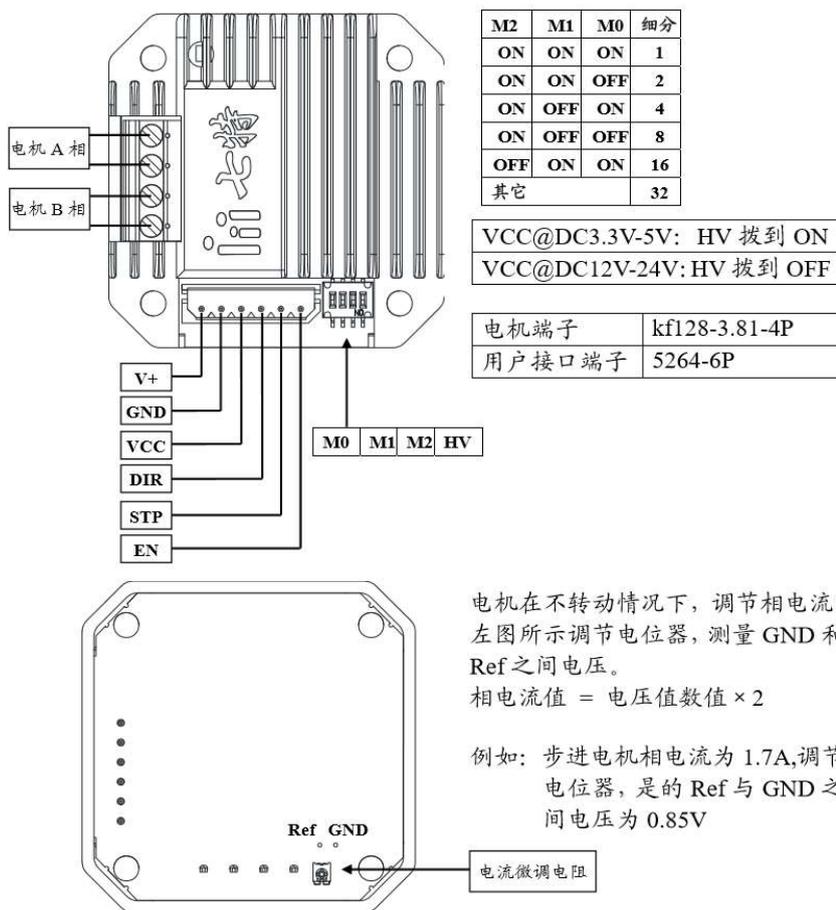


(3) 35 步进电动推杆

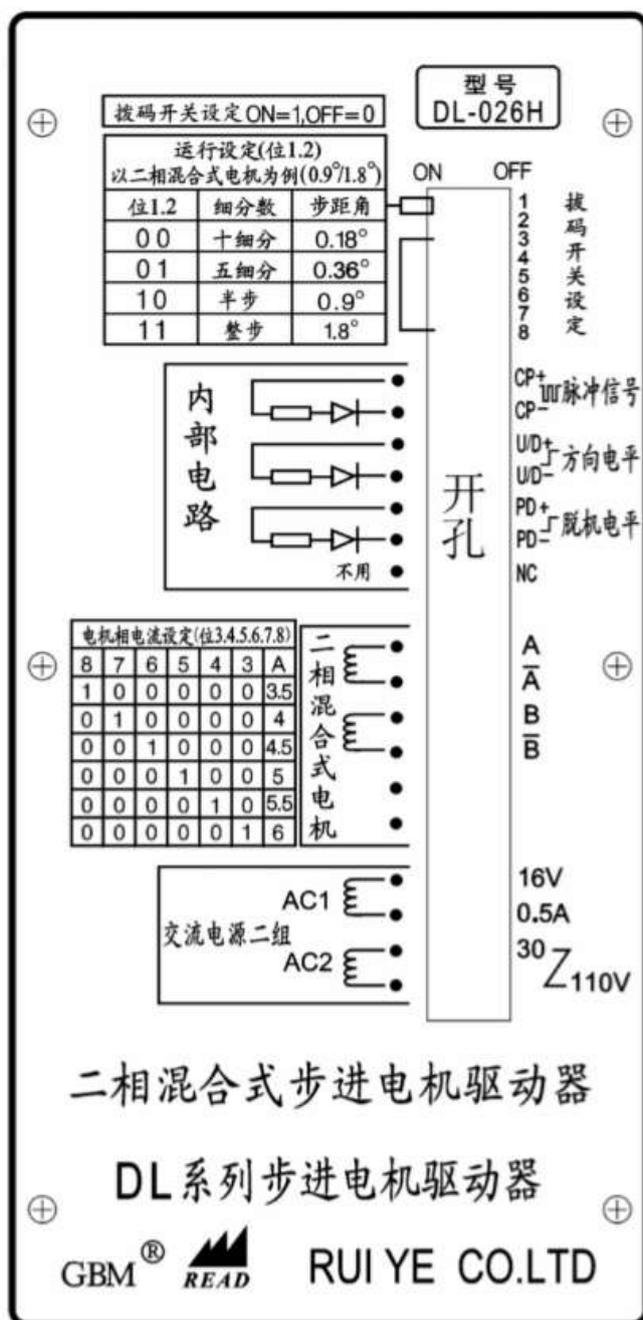


2. 驱动部分

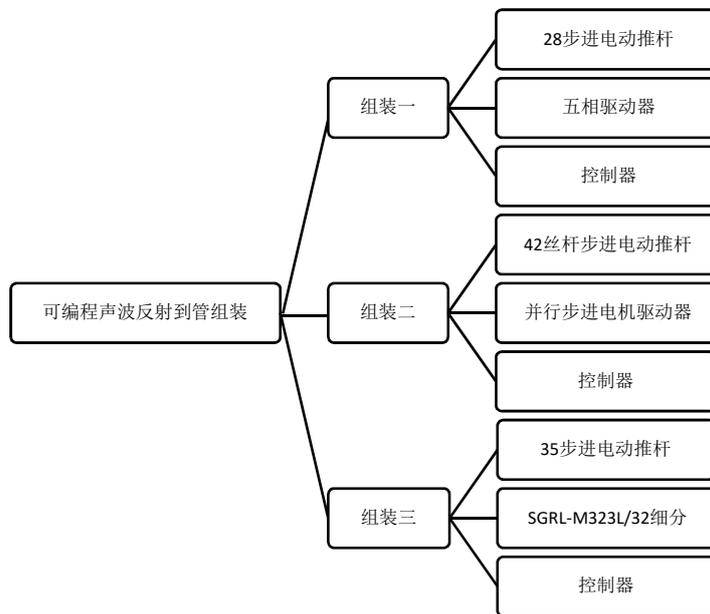
(1) 并行接口步进电机驱动器



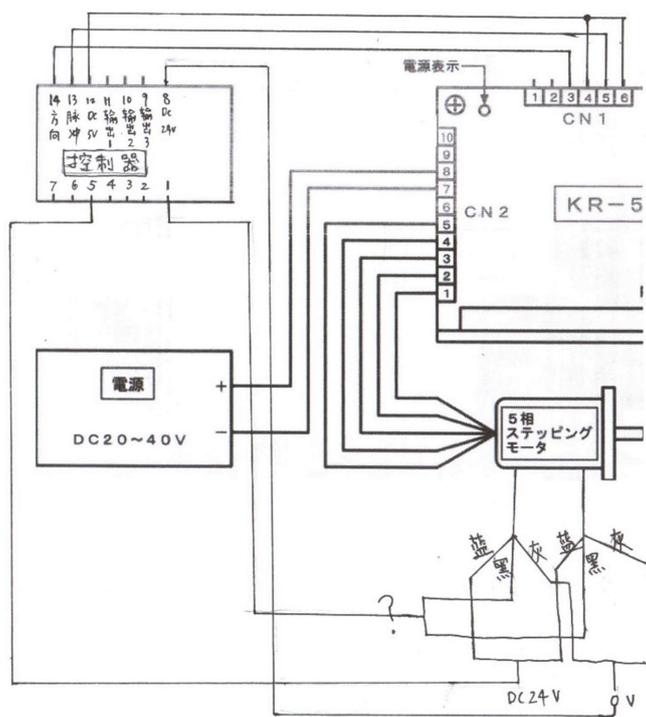
(2) SGRL-M323L/32 细分



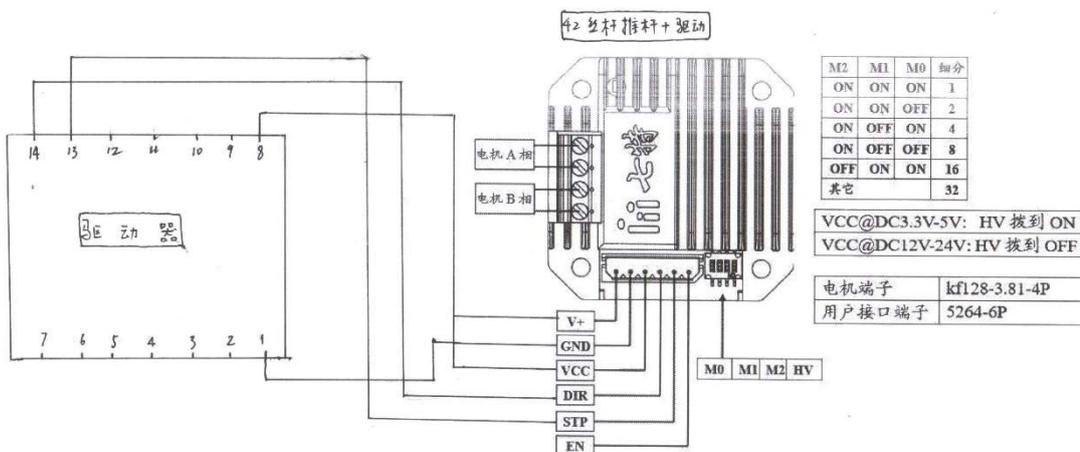
3.2.4 组装设计



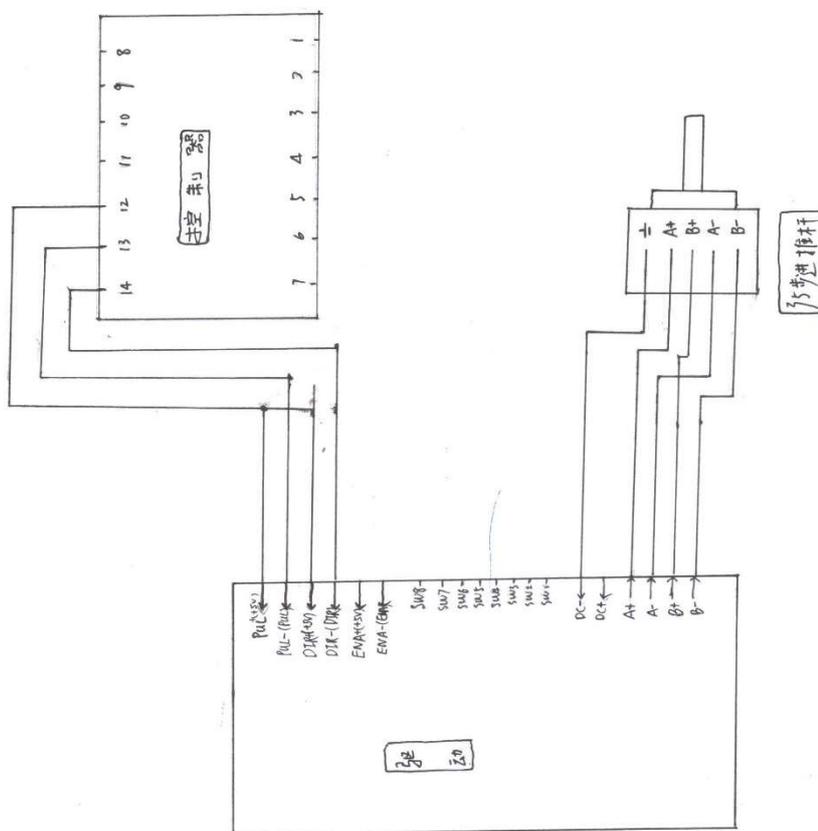
(1) 组装一



(2) 组装二



(3) 组装三



4、可编程波阵面操控导管声学性能测试实验

4.1 实验目的:

- (1) 了解并自主完成声学实验的具体流程
- (2) 测试可编程声波反射管的声学性能, 即反射管长度变化与入射波、反射波相位差之间的关系
- (3) 了解 NI 数据采集系统并掌握对数据的处理方法

4.2 实验仪器:

可编程波阵面操控导管、波导管、扬声器、两个传声器、功率放大器、信号采集设备、信号分析设备、多功能声校准器

4.3 实验原理:

4.3.1 声波导管理论

波导是能够约束波并使它沿某种特定的路径进行传输的一种器件。在、声学测量技术领域里常常要用到驻波管即声波导管,如对吸声材料的声阻抗及材料吸声系数的测量、传声器灵敏度的校正以及对一些其他声学参量的测量。

我们实验采用的是均匀矩形截面声波导管,它的一个主要优点就是当声波频率低于管的截止频率时能够获得良好的且没有几何衰减的平面声波。同时要求驻波管的长度足够长,以便在声源和器件之间产生平面波,保证传声器所在位置在平面声波场中。

4.3.2 声波导管的工作频率

设有一边长为 a 的矩形管，则该声波导管的截止频率为

$$f = \frac{c_0}{2a}$$

c_0 为声波在声源管中对应的声速

如果声源的频率高于管中的截止频率，则管中会激发相应的高次波，因此实际的声场就变得极复杂。如果希望在声管中获得一种比较纯净的平面声场，那么声源的频率要比声管的截止频率低。声源的频率愈低，在管中获得纯净的平面声场区域愈大。

4.3.3 基于传递函数法的阻抗管吸声系数的测量

1. 传递函数法

传递函数测量法的理论基础是通过测量测试样品前两个传声器位置上的声压，然后计算两个传声器声压的复传递函数来确定法向入射声反射因数，从而计算得到测试样品的法向入射吸声系数。原理示意图如图 1 所示，

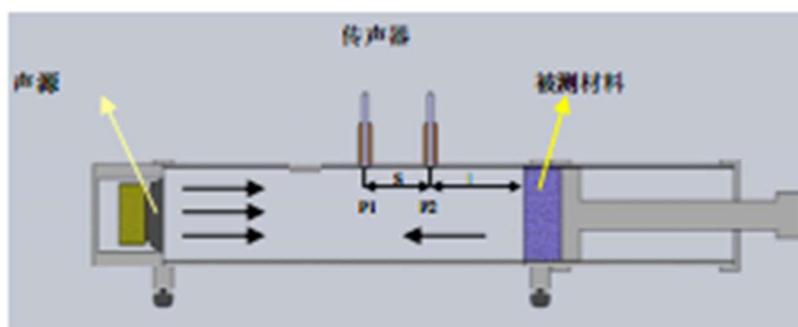


图 1 传递函数法测试原理示意图

入射声压 P_i 和反射声压 P_R 分别可以写为

$$P_i = P_i e^{jk_0 x} \quad P_R = P_r e^{-jk_0 x}$$

式中： P_i 为基准面 ($x=0$) 上 P_i 的幅值； P_r 为基准面 ($x=0$) 上 P_R 的幅值； k_0 为波

数，可通过下式解出

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c}$$

f 为测试频率，c 为测试管中声波传播速度，实验时取值 344 m/s ；

设两个传声器到吸声材料的距离分别为 x_1, x_2 ，则两个传声器位置上的声压 P_1, P_2 分别为：

$$\begin{aligned} P_1 &= P_i e^{jk_0 x_1} + P_r e^{-jk_0 x_1} \\ P_2 &= P_i e^{jk_0 x_2} + P_r e^{-jk_0 x_2} \end{aligned}$$

则有入射波的传递函数 H_I 为：

$$H_I = \frac{P_{1I}}{P_{2I}} = e^{jk_0(x_1 - x_2)}$$

同理，反射波的传递函数 H_R 为：

$$H_R = \frac{P_{1R}}{P_{2R}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)}$$

由于 $p_r = r_p p_i$ ，(r_p 是法向反射系数)，因此总声场的传递函数

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}}$$

根据上述，可以求出 r_p 的表达式：

$$r_p = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} = \frac{\frac{P_2}{P_1} - e^{jk_0(x_1 - x_2)}}{e^{-jk_0(x_1 - x_2)} - \frac{P_2}{P_1}} e^{2jk_0 x_1}$$

通过求得式中的变量，就可以求出声反射系数 r_p 。

2. 传递函数法与驻波法比较：

采用驻波比法时，需要移动测试传声器或声源得到谷峰值，在移动传声器时，人为因素的存在，不可能完全准确的得到谷峰值。由于谷值和峰值都有误差，得到的吸声系数值也存在误差。采用传递函数法，如果求传递函数时采用先求校准

因素，就不用多次安装传声器。因此采用传递函数法可以有效地减少操作误差，从而提高了测量的准确性。

3.传声器灵敏度校准

考虑到传声器之间的灵敏度差异（包括相位和幅值），我们可以利用两种方式对传感器的灵敏度进行校正

（1）交换传声器位置，做两次测量的方法加以纠正。

我们取 $H = \sqrt{H_{12}H'_{21}} = \sqrt{\frac{p_2 \times p'_1}{p_1 \times p'_2}}$ ，用 H 替换式中的 H_{12} ，这样就可以消除

传声器之间的灵敏度差异，其中 p_1, p_2, p'_1, p'_2 分别表示传声器 1, 2 前后两次测得的声压。

（2）多功能声校准器

多功能声校准器可以在校准和非校准两种工作状态下工作，当在校准状态下工作时，它能在较宽的频率范围内得到准确而稳定的声压级。在非校准状态下，用于对声级计及其他声学测量仪器时间计权特性和有效值特性进行声性能测试，克服目前只能用电信号检定的不足。

4.3.4 阻抗图及管中输入阻抗

1.阻抗图

我们知道，管末端声学负载的声学特性是由其表面法向声阻抗 Z_a 来表征的，管末端的声波反射系数自然与声负载的声阻抗有关。如果建立这样的关系，可以反过来通过对声压反射系数的测量来确定负载的表面法向声阻抗。

管中的质点速度为,

$$v = \frac{p_{ai}}{\rho_0 c_0} [e^{-jkx} - |r_p| e^{j(kx+\sigma\pi)}] e^{j\omega t}$$

得到管中的声阻抗,

$$Z_a = \left(\frac{1 + |r_p| e^{j\sigma\pi}}{1 - |r_p| e^{j\sigma\pi}} \right) \frac{\rho_0 c_0}{S}$$

进而求出

$$r_p = \frac{Z_{a0} - \frac{\rho_0 c_0}{S}}{Z_{a0} + \frac{\rho_0 c_0}{S}}$$

2. 管中输入阻抗

假定在管末端 $x=l$ 处有一声负载,其声阻抗率为 Z_l 。显然,由于声负载的存在

必然会影响管入口或管的输入端的声阻抗或声阻抗率。设管口输入阻抗为

Z_{a0}

$$Z_{a0} = \frac{\rho_0 c_0}{S} \frac{Z_{al} + j \frac{\rho_0 c_0}{S} \tan kl}{\frac{\rho_0 c_0}{S} + j Z_{al} \tan kl}$$

可编程波阵面操控导管的末端被刚性封闭,即在 $x=l$ 处有 $Z_{al} \rightarrow \infty$, 这样得到,

$$Z_{a0} \approx -j \frac{\rho_0 c_0}{S} \cot(kl)$$

4.3.5 可编程波阵面操控导管

可编程波阵面操控导管, 总体上看是由三部分构成: 动力部分、驱动部分、控制部分。

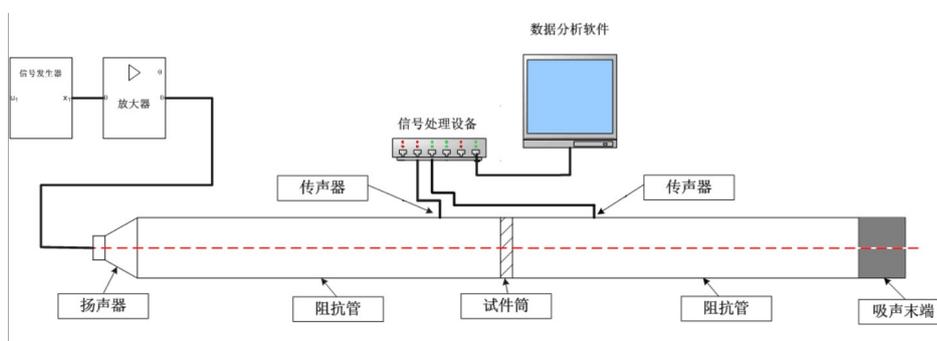
驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定方向转动一个固定角度。可以通过脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的。同时可以控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速和定位的目的。

因此，有了以上的理论基础和具体的实验装置，我们通过控制脉冲个数来定量地改变反射导管的长度，利用传递函数法测得其特定长度下的管口输入阻抗，进而反演出管子的长度，与实际长度相比较，得出实验结论

4.4 实验步骤:

(1) 传声器灵敏度校准，保证两个传声器之间的频响特性尽可能一致，然后校准两个传声器。

(2) 实验装置的连接。根据测试目标将各个试件连接起来并安装入测量系统中，检查测量声管的密封性。为了防止漏声和声反射，在大管和小管的连接处装有吸声棉。声源喇叭的选择采用能覆盖阻抗管管径的低频率扬声器，并且振膜与阻抗管横截面平行。装置图如图所示：



(3) 为减小噪声干扰，将信号放大器、NI 数据采集系统进行接地处理

(4) 信号处理设备以及相关信号线的连接，保证线路连接的正确，打开数据处理软件。

(5) 信号发生器的调节，使其按照测量设计要求产生稳定的连续脉冲信号，注意发射脉冲信号的频率要低于声波导管的截止频率。

(6) 依次打开信号发生器、音频放大器等，调节好管子的长度，使其处于一个较合适的位置并记下初始位置。

(7) 发射连续的脉冲信号，使用 NI 数据采集系统收集测量数据

(8) 通过可编程控制器发射 1000 个脉冲，使管子的长度定量地变化 0.147mm，再次记录数据，改变 13 次管子的长度，记录相应管长的实验测量数据。

(9) 对测量数据用 MATLAB 软件进行处理分析。得出反射系数变化图、反射波和入射波相位差随管长变化图，反演出反射管的长度，与实际长度进行对比，验证我们对可编程声学反射管的声学特性的前期预想。

4.5 实验数据的处理和分析

4.5.1 实验数据

4.5.2 实验数据处理—MATLAB 程序

```
clear;
clc;
for n=0:13
    data1=sprintf('F:\\桌面\\开放实验\\后期：实验测试\\实验数据\\实验数据四
\\1208niu\\%d-1214.txt',n);
    data=load(data1);
    x1=-0.99;
    x2=-0.91;
    f=1000;
    k=2*pi*f/344;
    datax2=data(:,2)/0.83;
    datax1=data(:,1)/0.63;
    dataX2=fft(datax2);
    dataX1=fft(datax1);
    [a b]=max(abs(dataX2));
```

```

H12=conj(dataX2(b)/dataX1(b));
% data1=sprintf('D:\gkyupad\开放实验\niu1208\%d-1412.txt',n);
% data=load(data1);
% x1=-0.99;
% x2=-0.91;
% f=1000;
% k=2*pi*f/344;
% datax2=data(:,1);
% datax1=data(:,2);
% dataX2=fft(datax2);
% dataX1=fft(datax1);
% [a b]=max(abs(dataX2));
% H12plus=conj(dataX2(b)/dataX1(b));
% if angle(H12)<0
%     angleH12=angle(H12)+2*pi;
% else
%     angleH12=angle(H12);
% end
% if angle(H12plus)<0
%     angleH12plus=angle(H12plus)+2*pi;
% else
%     angleH12plus=angle(H12plus);
% end
% H12total=(abs(H12*H12plus))^0.5*exp(i*(angleH12+angleH12plus)/2);

r(n+1)=((H12)-exp(i*k*(x2-x1)))/(exp(-i*k*(x2-x1))-(H12))*exp(2*i*k*x1);
%
rplus(n+1)=((H12plus)-exp(i*k*(x2-x1)))/(exp(-i*k*(x2-x1))-(H12plus))*exp(2*i*k*x1);

```

```

%
rtotal(n+1)=((H12total)-exp(i*k*(x2-x1)))/(exp(-i*k*(x2-x1))-(H12total))*exp(2*i*k*x1
);
end
figure;
plot(abs(r))

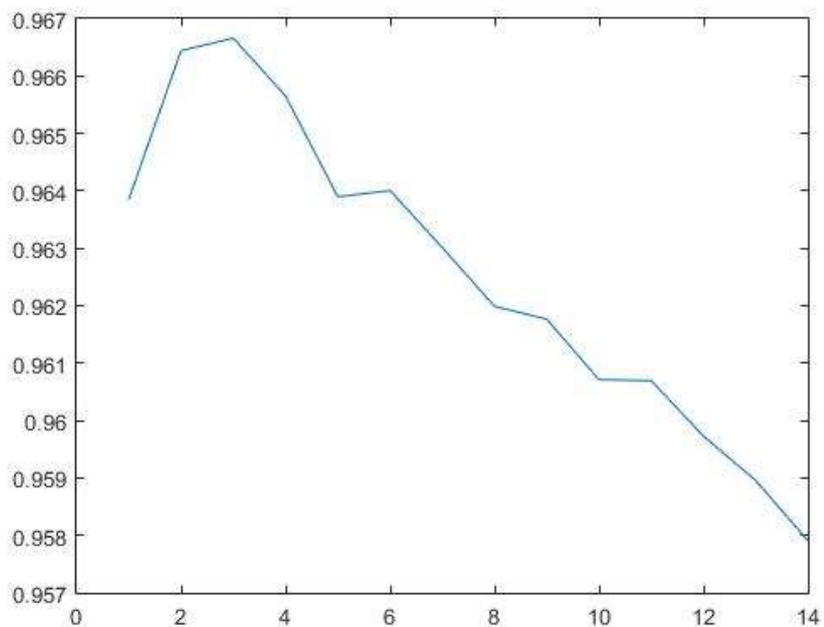
figure;
plot((angle(r))/2/k)

l=[0.001:0.001:0.05];
phase=(i*10*cot(k*l)-1)./(i*10*cot(k*l)+1);
figure;
plot(l,(angle(phase))/2/k)

```

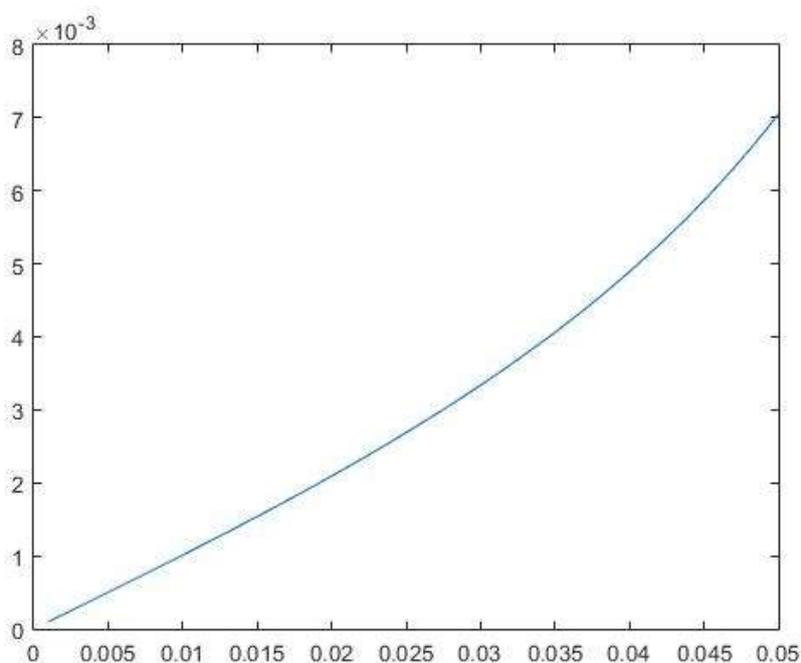
4.5.3 实验数据处理结果

1. 可编程波阵面操控导管的声波反射系数图



可编程声波导管的理论反射系数应该在 1 附近，从图中我们可以看出，声波反射系数维持在 0.96 附近，误差较小

2.管子实际长度与理论长度对比图（单位：m）



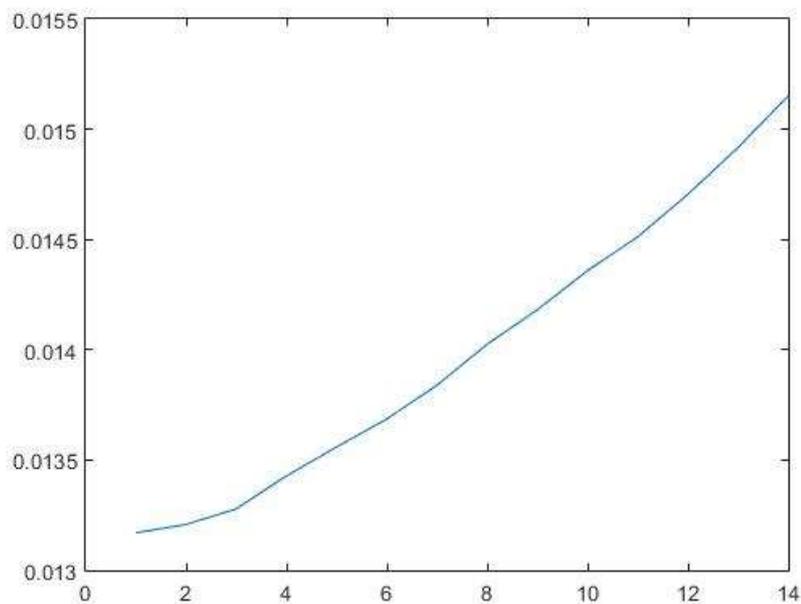
由于实验所用的长波导管的截面积与可编程声波导管的截面积之比为十倍的关系

根据公式

$$Z_{a0} \approx -j \frac{\rho_0 c_0}{S} \cot(kl)$$

$\cot(kl)$ 近似等于 kl ，当两者面积之比为 10 时，实验数据处理所得结果应比实际值小 10 倍，所以上述实验数据处理图中，管子实际值与理论值将有一个十倍的关系。

3. 声波反射相位与管长变化图



声波反射相位与管长之间具有线性关系，所以我们可以通过反射波相位的变化得出管子长度的变化。

可编程步进电机驱动器发射一个脉冲可以使管子移动 0.000147cm ，我们在实验中发射了 13000 个脉冲，理论上管子长度应变化 1.9cm ，通过实验数据处理我们看到管子长度由 0.013m 变化到 0.015 左右，相对误差较小。

4.实验结果总结

(1) 我们通过实验测得实验数据，利用 MATLAB 进行试验数据的处理，旨在证明管子长度与反射波、入射波相位差之间具有线性关系。所以我们只要得到管子的转移阻抗，便可以反演出管子的具体长度，再与管子真实长度进行对比，只要实验值与理论值能在一定的误差范围内相吻合，便证明了我们理论的正确性

(2) 我们通过实验数据所得的管子长度与真实管子长度之间的误差在 5.2% 左右，误差较小，可以认为管子长度与反射波、入射波相位差之间具有线性关系。

- (3) 误差来源分析：
- ①整个实验装置的密封性不够好
 - ②测量环境有一定的噪声干扰
 - ③传声器的校准有一定的误差

4.6.实验注意事项

(1) 数据采集设备。在实验中发现，如果数据采集仪的两通道存在相位差，即采集同步性差，会出现测量错误。所以在实验开始前要认真检查并测试 NI 数据采集系统通道的性能。

(2) 本次试验发射信号必须是连续的脉冲信号，且脉冲信号频率必须低于声波导管的截止频率。

(3) 发射信号的半波长要避开两传声器之间的距离，因为若两者相同将会导致测量误差大大提高。所以本次实验发射频率为 1kHz 的信号。

(4) 测量时尽量保持室内环境的安静，不要用手去触碰管壁，以免产生振动，从而影响测量结果。

(5) 声源扬声器的选取。扬声器对声源的影响较大，需严格测试。本次实验选取了频率较低的扬声器喇叭。

(6) 因声波导管与可编程声波反射管的截面积之比为 10，所以在数据处理时要考虑两者截面积之比的影响。

5、分析总结

本文首先介绍了声波导管的研究背景、研究现状，提出通过改变声波导管的长度来控制入射波和反射波相位差的想法，进而制作出能实现该想法的可编程波阵面操控导管，希望在此基础上能将其原理应用到微穿孔共振吸声、波振面的操控和声波聚焦等方面。

本文主要从可编程声波反射管的原理着手，进而探究出入射波、反射波相位差与反射管长度的依赖关系。在一定的理论基础之上，对反射管装置进行了设计和选取，最终组装成了一套完整的以步进电动推杆为控制系统的声波反射导管。以步进电动推杆为控制系统的主要优点就是我们能通过控制发射脉冲的数量和频率，定量地控制管子长度变化的多少和快慢，进而实现了可编程和主动控制。

本文亦根据可编程声波导管声学性能测试的原理对测试实验进行了设计，在实验条件准备充分的基础上，进行实验，多次优化实验之后所得实验结果与理论基本吻合，验证了本文理论的正确性。

整个研究我们大体分三步进行，第一步可编程波阵面操控导管的原理及应用，第二步可编程波阵面操控导管装置的设计、选取最优结构和组装，第三步可编程波阵面操控导管声学性能实验的设计、进行和最后结果的分析。由于目前我们理论知识的不完备，在研究的过程中遇到了一些困难，但都在老师的指导和我们的努力之下解决了。本此研究让我们对声学基础有了一定的了解，对于我们之后专业方向的选取有一定的帮助作用。我们在实验的过程中不仅仅收获了学术上的知识，同时提高了我们多方面的能力，收获了许多宝贵的经验。以下是我们在本次实验中的一些体会：

从郁老师身上，我们学到了要敢想敢做，敢于探索和开阔自己的思维，只有这样才会有进步。郁老师是一位热爱并专心于学术研究的老师，从他的身上我们可以感受到他对学术探索和研究的热爱，也正是他的这份热爱激励着我们大胆地在探索的道路上前进着。希望有一天自己也能真正地找到学术研究中的乐趣，感受老师在研究时的享受吧。

对于自己的同伴，相较于他很强的学习能力，我对于他对待任何事情都十分

认真的态度更加地敬佩。细节往往能体现出一个人的修养，而细节也往往能反映一个人的能力。在跟他合作的过程中，我收获了很多，不仅提高了自己多方面的能力，更重要的是认识到认真的态度和把握细节对一个人的重要性

同时我也认识到做任何事情都不是轻而易举的，而学术的研究和实验更是需要我们毅力和耐心。在学术研究的过程中，不因一点小小的挫折而放弃，也不因一时的失败而轻易地怀疑自己，我们不应该太计较最后的结果而是应该注重过程中的收获。只要我们有本着一份认真的态度，做任何事情都是会有收获的。

6、时间进程

时间	完成工作
9月29日	与郁老师讨论，确定可编程负反射的项目
10月10日	与郁老师讨论，明确我们前期需要学习的内容，自学声学基础第四、五章的相关理论知识
10月17日	向老师请教可编程声波导管的原理，阅读学习相关论文
10月24日	向老师请教主动控制目前的研究现状，明确相位差与管子长度以及波长的关系，探讨可编程反射管设计应注意的问题
11月3日	向老师简单介绍了我们开题答辩的内容，与老师讨论管子材料和口径的问题以及我们在设计管子的过程中遇到的问题
11月4日	与张凯临老师讨论管子设计问题时，得到了一种新的思路，用步进电动推杆控制系统来实现主动控制
11月7日	与郁老师确定下管子设计的具体方案，即用步进电动机推杆作为动力系统；找张凯临老师帮助，制作出了最基本的声波导管
11月14日	向郁老师请教管子声学性能测定实验的原理
11月24日	向郁老师展示了中期实验的 ppt，汇报了我们近期完成的工作并明确了下一步要做的事情
11月30日	向张凯临老师请教管子与动力装置的连接方法，并对所购买实验器材进行了组装
12月2号	向郁老师展示了我们的可编程声波反射管，找好了实验所需的仪器设备
12月3日	<ol style="list-style-type: none"> 1.完成实验设备的组装 2.在迟静学长的帮助下完成了，第一次测试实验 但由于 NI 仪器问题，实验数据误差太大
12月4日	用好的 NI 仪器进行实验，记录下实验数据 由于发射的是单个脉冲信号，实验数据无法处理
12月5日	<ol style="list-style-type: none"> 1.好的 NI 仪器 2.完成连续正弦信号测试 3.但这次的实验误差比较大，周二老师处理完数据之后，发现误差较大不能达到实验的预期效果
12月8日	为了修正周一实验数据的实验误差，周四下午又进行了实验测量 实验一：用多功能校准器校准了传感器的灵敏度后，进行了实验，这次实验较为理想。 实验二：这次没有用多功能校准器校准传感器的灵敏度，通过交换传感器的位置，测量两组数据进而消除传感器灵敏度误差 对实验数据进行了处理，所得实验数据误差较小，基本与理论相吻合。
12月19日	与郁老师讨论结题报告

7、参考文献

- (1) 杜功焕, 朱哲民. 《声学基础》第三版.南京: 南京大学出版社, 2012.166-167
- (2) 朱有剑, 张勇, 雄文波, “基于传递函数法的阻抗管吸声系数测量系统研究”, 声学与电子工程, 2012, 第 4 期, 27-31
- (3) 马大猷穿孔板吸声结构的理论和设计, 中国科学院, 1975,38-50
- (4) 徐成, 吴莉, 陈励军 声波导管传播特性实验评估研究 水声信号处理教育部重点实验室 东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096
- (5) Philipp del Hougne, Fabrice Lemoult, Mathias Fink, and Geoffroy Lerosey* Institut Langevin, CNRS UMR 7587, ESPCI Paris, PSL Research University, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France. Spatiotemporal Wave Front Shaping in a Microwave Cavity (Received 26 July 2016; published 22 September 2016)
- (6) Xing Chen, Xianchen Xu, Shigang Ai, HaoSen Chen, Yongmao Pei, and Xiaoming Zhou. Active acoustic metamaterials with tunable effective mass density by gradient magnetic fields Xing Chen, Xianchen Xu, Shigang Ai, HaoSen Chen, Yongmao Pei, and Xiaoming Zhou .Applied Physics Letters 105, 071913 (2014); doi: 10.1063/1.4893921
- (7) 马大猷穿孔板吸声结构的理论和设计, 中国科学院, 1975,38-50
- (8) 徐成, 吴莉, 陈励军 声波导管传播特性实验评估研究 水声信号处理教育部重点实验室 东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096

8、致谢

一个学期的开放实验在这里将要结束。回想这一个学期，从当初的选题，到实验一步步的向前推进，直到最后实验的顺利完成，这一路上离不开老师们、学长们和队友的帮助。在这个过程中我们收获了很多专业方面的知识，自己本身也得到了很多的锻炼。

首先，我们要感谢我们的指导老师郁高坤副教授。郁老师治学态度严谨，对学术研究有着极大的热情。是他告诉我们要敢想敢做，敢于探索，只有这样你才能成为一个“成功”的人。正是他的这份激励让我们在本次实验的研究探索中大胆地前进着，也正是他对学术研究的执着让我们对未知的探索充满着动力。在郁老师的指导下，我们收获的不仅仅是声学知识，更多的是作为一个科研工作者应持有的态度。

同时，我们也要感谢张凯临高级工程师，是他在我们陷入可编程波阵面操控导管设计难题的时候，给我们提供了新的思路。尽管张老师很忙，但在我们每次遇到装置难题的时候，他都会耐心地帮我们解决。所以如果没有张老师给我们提供的极大的帮助，我们本次的实验研究不会如此顺利地完成。

其次，我们要感谢声学专业的研究生学长们，是你们在声学性能测定实验中给我们的指导，帮助我们顺利完成了实验并进行了数据的处理。谢谢你们耐心的指导，因为有你们，我们才更加自信。