

# 实验四十五 探究乐音

## 一、实验任务

1. 比较同一音高的几个不同音色乐音的时域/频域物理特征，给出异同点；
2. 探索乐音间的关系——音律；
3. 探索和弦原理与特征；
4. 扩展内容(任选):
  - a. 探索“三分损益法”或“五度相生法”产生乐音构建乐器原理；
  - b. 探究一端封闭的细管轻吹、超吹时的音色变化；
  - c. 探究亥姆霍兹腔频率与相应几何参数关系。

## 二、实验内容

本实验可用电子琴模拟产生不同乐器的乐音，或用真实乐器（如笛子、小提琴、吉他等）产生乐音。乐音信号有两种观测方式：对于所有乐音，都可以通过麦克引入计算机，用计算机虚拟仪器 LabVIEW 软件读取计算机声卡信息，做时域显示和频谱分析；对于电子琴，也可将音频信号直接输入示波器，在示波器上显示时域信息。

注：本实验要对乐音信号的波形和频谱分析和拍照记录。记录信号的时域信息，主要包扩信号的整体图形（波形）特征，幅度、周期（基频）等信息；记录信号的频域信息，主要包括信号一定范围的频率成分分布图（频谱）及特征，基频，主频率等信息。

### 1. 探究不同乐器的音色与波形、频谱关系

(1) 用电子琴模拟产生不同乐器的乐音，或用真实乐器（如笛子、小提琴、吉他等）产生乐音，在计算机虚拟仪器界面显示时域和频谱信息。

(2) 拍照记录同一音高下 3 种以上不同乐器乐音的时域和频域信号，要求显示时域信号的周期性和频域信号成分间关系的特征。

自拟表格并记录实验结果，包括：时域波形幅度和周期（基频），频谱基频和主频。

### 2. 探究不同音阶之间的数理关系

(1) 用电子琴模拟产生某一乐器的乐音，分别用示波器和虚拟仪器记录有八度音程关系的高低两音的时域和频域信号，拍照记录时域周期性和频域成分关系。

(2) 用虚拟仪器分析一个乐器在一个八度内各个音阶的频谱，记录基频频率并填表 1。

### 3. 研究乐音组合——和弦

用电子琴模拟产生某种乐器的乐音组合，在虚拟仪器界面显示时域和频谱信息，研究构成和弦的协和特征，要求至少两个二和弦（dyad）、至少一个三和弦（triad）。

(1) 构成有八度、五度、四度或三度关系的二和弦（如 C-C', C-G, C-F, C-E），研究两个音调单独演奏和合奏（和弦）时的时域波形和频谱变化规律，拍照记录波形和频谱图。也可比较任何不和谐的两个音调组合与上述和弦的不同之处。

(2) 构成一个三和弦（如 C-E-G 或 D-F-A），研究三个音调单独演奏和合奏（和弦）时的时域波形和频谱变化规律，拍照记录波形和频谱图。也可比较任何不和谐的三个音调组合与上述和弦的不同之处。

### 4. 选做内容

(1) 利用实验室提供的吉他或琴弦，在张力不变情况下，改变弦长构成音阶，探索基于“三分损益法”或“五度相生法”构建弦乐器的原理。

(2) 利用实验室提供的吸管，改变管长构成音阶，探索基于“三分损益法”构建管乐器的原理。

尝试分析细管轻吹、超吹的音色变化（半开腔模式特征是只允许基频的奇数倍成分存在，轻吹和超吹时主频、基频位置不会变化，但能量成分占比变化，导致音色变化），请回答：如原来轻吹是某调 Do，超吹变成了哪个音？为什么？

(3) 利用自带纯净水瓶子，探究亥姆霍兹腔频率与相应几何参数的关系。

### 三、操作要点

1. 在“探究不同乐器的音色与频谱关系”实验中，建议先选择由电子琴模拟产生发声音的乐器（如“15”小号或“19”长笛），然后再使用脉冲式的乐器（如“00 钢琴”），其它模拟乐器可任选，也可用真实乐器，如吉他、小提琴等。

2. 为了保证后期实验数据分析和实验报告的绘图质量，建议所观察到的各类信号在课堂上用手机拍照备用。

### 四、注意事项

1. 电子琴音量不要超过“7”，以防互相干扰。
2. 麦克离声源尽量近一些，但不能触碰声源，以提高收音效果、避免噪音干扰。
3. 做选做实验内容时应注意安全，琴弦不要调得过紧，吸管不得重复使用，用完收走。

### 五、报告要求

1. 给出虚拟仪器显示的同一音高下 3 种以上不同乐器乐音信号的时域波形和频谱图（至少 3 个图），在频谱上标出基频和主频位置，填写自拟表格，分析不同音色乐器的频谱差异。

2. 给出示波器显示的同一乐器有八度音程关系的高低两音的时域波形（共 2 个图），分析其周期（基频）关系。

3. 给出虚拟仪器界面显示的同一乐器有八度音程关系的高低两音的频谱图（共 2 个图），分析其频率及频谱分布关系。

4. 记录由虚拟仪器测得的同一乐器在一个八度内各个音阶的基频频率，计算实测频率比值，与按照不同音律（“十二平均律”、“三分损益法”、“五度相生律”）计算的理论比值做比较，总结出比例关系，完成表附 1。

表 1 音阶的数理关系

音调		Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Ti	高音 Do	
$f_{x基}$ (Hz) 基频实验值										
频率比值 $f_{x基}/f_{Do基}$ (与 Do 的基频比值)	实验比值 $f_{x基}/f_{Do基}$	1								
	理论值	十二平均律	$(\sqrt[12]{2})^0$	$(\sqrt[12]{2})^2$						
		三分损益法	1	$(3/2)*(3/4)$			3/2			
		五度相生律	1	$(3/2)*(3/2)/2$			3/2			
		小整数比	1/1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1

5. 绘制二和弦和三和弦的波形与频谱图，分析它们的频谱特征，总结各音分立和合奏时波形与频谱的变化。

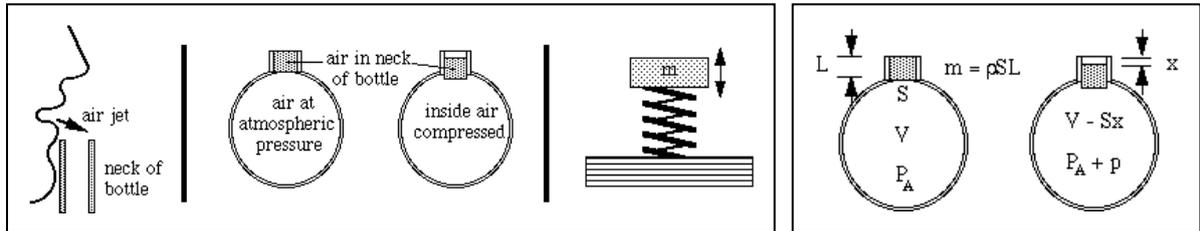
注：实验报告中要求的照片建议在 Word 里编辑（裁剪压缩），加上必要的注释和说明，B5 纸打印提交。也可提交手绘图，要求用坐标纸，同一图中的不同信号用不同颜色或不同线条加以区分，或者每种信号作为一幅图单独绘制。

### 六、讨论题

教材第 1 题，第 2 题。

## 附录：亥姆霍兹共鸣腔的发声规律

亥姆霍兹腔发声频率可以从空气的简谐振子模型（空气有压缩弹性）得到，原理如下图。



由理想气体状态方程，有

$$\frac{p}{P_A} = -\gamma \frac{\Delta V}{V} = -\gamma \frac{Sx}{V}$$

将压缩空气视为简谐振子，有

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{f}{m} = \frac{pS}{\rho SL} = -\frac{\gamma SP_A}{\rho VL} x$$

于是得到亥姆霍兹腔发声频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma SP_A}{\rho VL}} = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}$$

其中  $v$  为空气中声速， $V$  为其容积（空气部分）， $S$  容器孔（乐器音孔）面积， $L$  为容器孔脖长。