

乐音研究

一、实验内容与要求

1. 信号的产生、接入与显示复习

观察信号发生器的正弦波、方波、三角波等信号，以此熟悉示波器的功能。

要求：①调出稳定波形；②分别估测各种波形的峰峰值；③分别估测各种波形的周期和频率；将观测结果与信号源显示及面板标值对照，纠正操作错误。

2. 利萨如图合成与频率测量方面的应用复习

待测信号和已知信号：信号发生器输出的两个正弦波（两同学配合）。

分别调出三种不同 f_Y/f_X 值的李萨茹图形，记录所调李萨茹图的示意图、X 方向和 Y 方向的切点数/割点数，若已知信号频率可为 f_X ，验证 f_Y 应为多少。

3. 任意非电信号的观察与测量技术的使用

用电子琴或一种乐器研究（如笛子、小提琴、吉他等）产生的乐音，经过转换，接入示波器，研究内容：

使用示波器研究乐音

a. 任意一个乐音的信息记录（形状，幅度，周期，频率等，可画图或拍照备用），分析不同音质乐音的差异

b. 研究一个八度的关系的任意高低两音的频率关系

c. 研究某调下（如 C 调）一个八度音阶内各个音符频率和间隔，总结特点。

d. 尝试用接近正弦波的乐音与信号源合成利萨如图，并得到乐音的频率信息，研究各个乐音间的关系！

乐音的存储记录、播放与显示

Mike，扩音器（音箱），计算机，波形文件的采录与回放，与直接录入（Labview 界面使用）

4. 基于 Labview 界面的乐音的时域与频域分析

特定乐音观察与分析

研究内容：

a. 任意一个乐音的时域/频域信息记录，分析不同音质乐音的差异，如研究弦乐和管乐的发音异同，注意主频与泛音的观察与确定方法

b. 研究一个八度各个音阶（基频音或有时是主音）的频率关系

c. 研究几个和弦音。看看其频谱有什么有趣的东西？探究和弦音动听的原理

5. 研究“三分损益法”构成排箫

提供一些试管利用“三分损益法”研究怎样加减水构成音阶；或给定一根软管定出一个八度音阶

二、示波器操作要点

1. 模拟示波器（参见上学期有关资料）

2. 存储示波器使用要点（略）

3. 信号发生器使用要点（略）

三、注意事项

本实验使用的示波器及函数发生器以 LabView 界面功能较多，听教师讲解后再操作。

电器短路与进水应避免！

四、讨论题

1、2。

附录 乐音研究 讲义

实验目的：

1. 了解声音的产生，分类，描述方法及参数群；研究乐音的物理定义，频率关系；探究乐音悦耳和谐的机理；
2. 熟悉电学常用工具—示波器、信号发生器的使用；熟悉常用声音输入输出器具—麦克、耳机（喇叭）的使用，学会利用利萨如图测频率；
3. 熟悉 Labview 模拟仪器分析声音信号的方法。

提供器材：

发声装置（乐器，琴弦，电子琴），示波器，声频信号发生器，耳麦，有源音箱，计算机（配有声卡和 Labview 软件），导线若干，软管一根。

实验原理：

声音是一种振动波，是在特定介质中传播的机械波，可为我们的耳朵所感知。乐器一般要借助共振结构如共鸣腔等使特定声波得以增强或放大。

声音可以是杂乱无章无固定相位关系的波的叠合，如噪音，也可以是悦耳单纯音，或者是简单谐音的叠合，如和弦。

乐音是一种有特定中心频率的（准）周期振动。描述乐音有音高（音调）、响度、时值和音色几个要素。这几个量与机械波振动的波包的中心频率、幅度、波的持续时间、和频谱形状直接相关或对应。各种乐器发音时，上述几个要素可能都不相同，即便演奏同一音调的音时其音色也不尽相同，因此我们可以体会得到各种乐器的差别和特色。

音乐之神奇

提起音乐，大家都会感受到它的无穷魅力。有人说“音乐是一种美妙的宇宙语言”，它能描述出世间万物，传达出万种情感，它很容易让你感染上喜怒哀乐，紧张和放松，让你体会到雄伟与悲壮，感受到缠绵和无奈，甜美和苦涩；“它是一只神奇的魔笔”，它能给你以形象，描绘出一个场景，展示出一幅画卷，让你“看到”事物美与丑，刚与柔，它能展示出气势的恢弘与凄凉，让你感受阳光的明媚、以及黑暗的阴森和恐怖。它让人徘徊在梦幻与现实之间，可让人压抑、或者亢奋、亦或是紧张，它也会给人以无尽的向上的力量……。

音乐是个乐音的集合体，它是发自不同乐器的不同高低、不同强弱、不同时长的乐音按着一定顺序如河流般的流淌，它可以是涓涓溪流，亦可以是奔腾怒吼的大江。乐音它的魅力到底来自何处？

乐音与数学

古希腊哲学家、数学家毕达哥拉斯在研究竖琴时较早揭示了琴弦的长短与音高有一定的数学关系。他发现一根长为 l 的琴弦，它所发的音高与把它截去一半的琴弦所发的音高相差一个八度。可以用长度分别为 l 、 $16/15l$ 、 $6/5l$ 、 $4/3l$ 、 $3/2l$ 、 $16/9l$ 、 $2l$ 的七根琴弦构造七声音阶，能弹奏动人的旋律。

在我国作为一种古代乐器的敲击乐器的磬是一些大小长短有规律的石料按一定顺序悬挂排列的打击乐器，其每个单元音频率不同。

爱因斯坦在很小的时候就已经察觉到这个世界可以由音乐的音符来组成，也可以用数字公式来组成。因为宇宙间的每一种物体都是按照一种特殊的频谱在振动着。而频谱正是音乐的基础之一。

小知识：

音程：乐音的跨度。

乐音的度：两个乐音的间隔（见下表）。如从 1 到高音 1 的跨度为八度，内涵 12 个半音，7 个音阶（Do; Re; Mi; Fa; Sol; La; Ti(Si); 高音 Do）。

乐音频率的整数比

毕达哥拉斯的发现：

公元前 6 世纪毕达哥拉斯发现同样力度绷紧的两根弦，其长度为小整数比（1:2, 2:3, 3:4....）时人听起来觉得悦耳和谐。

拨弦时，在弦上产生的双向传播的波经端点反射会形成驻波，弦长 L 决定可听见的频率 ν_n ，弦长为半波长的整数倍，即 $L = n \frac{\lambda}{2}$ ，有

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\nu_n = \frac{u}{\lambda} = n \frac{u}{2L}$$

其中 u 为波速（与弦的材质和环境有关）， n 为正整数，当 $n=1$ 时为基频（有时为一根琴弦最强的发声频率），可见发声频率与弦长成反比。琴弦 L 越长，发声频率 ν 越低；反之琴弦越短，产生的频率越高。一根弦可能支持若干个

实际上一个根琴弦发出基频可写为：

$$\nu_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

其中 ρ 为弦的线密度， T 为弦的张力。从公式中我们还能看出什么？

事实上，吹奏乐器（如箫、笛、号等）发声多是空气柱或腔振动产生的，其中波也形成了驻波，只是波为空气密度变化波或压力波。对不同吹奏乐可是两端双封闭腔或者单封闭腔，如长号。

$$\nu_n = (2n-1) \frac{u}{4L}$$

其中 u 为空气中的声速，一般在压力、温度、湿度一定情况下为定值，如常压下海平面 $u=334$ m/s。上式可见空气柱长 L 决定基频和倍频。

频谱理论：

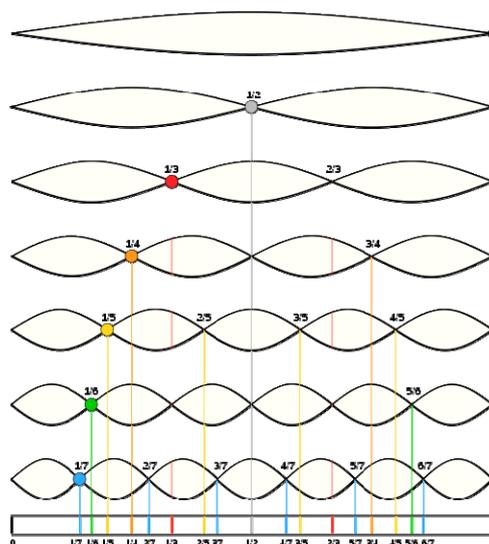
19 世纪法国科学家傅里叶认为，每一个乐音都是由一些具有不同幅度、不同频率（成倍数关系的）、不同位相的简谐的周期振动（纯音）合成的结果，用公式写出来为：

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

其中正弦或余弦形式的波发出的声音叫纯音。 $n=1$ 叫基频音，而 $n \neq 1$ 叫谐波或谐波音或泛音。一般基频具有较大的能量（或发音更突出），但也有高频发生强的情况，这和琴的共振发声结构（如共鸣腔、管）有关。

各种频率组合方式不同决定乐器发音的音色差异。我们可以听到不同乐器发出的乐音，分析出其各个谐波成分的强度，进而得到一个频谱。显然不同乐器发声不同，同一个音调音色不尽相同，其频谱图自然不同。尽管如此，各种乐器在弹奏标准音阶 1,2,3,4,5,6,7 时，其最强的中心频率都相差不多。

国际上为某调各音赋予了唱名并有频率标准对应，如 C 调中音 1，念 Do(261.6Hz，记为 C 或 c)；2，念 Re(293.7Hz，D 或 d)；3 念 Mi(329.6Hz，E 或 e)；4 念 Fa(349.2Hz，F 或 f)；5 念 Sol(392.0Hz，G 或 g)；6 念 La(440.0Hz，A 或 a)；7 念 Ti(493.9Hz，B 或 b)； $\dot{1}$ 高



音 Do(523.2Hz, \dot{C} 或 \dot{c})。

小知识:

音律: 音律描述乐音的准确高度和相互关系, 即音调的高低与频率跨度关系。制定乐音的高度方法叫定律法。从古至今, 主要有“五度相生律”、“纯律”和“十二平均律”。

我们知道, 一个八度音实际上有 12 个半音的跨度, 或者是 6 个全音距离, 从键盘乐器的黑白键数便可知, Do, Re 间 Re, Mi 间为全音(可加黑键), 又叫大二度, Mi, Fa 间为半音(小二度), Fa, So, La, Ti 相邻又都是全音, Ti, Do 又是半音。

既然 Do 和高音 Do 频率相差 2 倍, 而且半音频率是等比数列关系, 故相邻半音的比例应为 2 的 12 次方根, $\sqrt[12]{2} \sim 1.0594632$ 。

乐音间隔度数、频率比与半音数

度	半音个数	频率比(近似)	例子
同度	0	1:1	1 与 i
小二度	1	16:15	3 与 4 或 7 与 i
大二度	2	9:8	1 与 2 或 2 与 3
小三度	3	6:5	3 与 5 或 6 与 i
大三度	4	5:4	1 与 3
纯四度	5	4:3	1 与 4 或 2 与 5
减五度/增四度	6		低音 7 与 4
纯五度	7	3:2	1 与 5
小六度	8	8:5	3 与 i
大六度	9	5:3	1 与 6
小七度	10	7:4	2 与 i
大七度	11	15:8	1 与 7
纯八度	12	2:1	1 与 i

乐音和谐的秘密

大家都知道, 不同频率的音越多越躁, 尤其是位相无规律的音合起来。但频率有一定关系的音却不一样。为何频率比为小整数关系的乐音合听起来感到悦耳, 因为它们间总能找到更多的合适公共倍频, 该倍频也能在一根弦上发声(只是一般弱一些)。

C 大调由 Do, Mi, So(1,3,5)构成一个大三和弦, 它是由大三度的两个音 1,3 加上与 3 差小三度的 5 构成, 其频率比接近 4:5:6, 就很中听。举例来说, Do 的 5 倍频是 Mi 的 4 倍频(约 1.31kHz); 同理 Do 的 15 倍频是 Mi 的 12 倍频, 也是 So 的 10 倍频, 即约 3.92kHz, 上述频率乐音是可以共振激发出来的, 是可听得见的, 因为人耳可听到的范围约 20Hz~20000Hz! 可以想见, 其它恰当的公共倍频音也是可以感知的! 公共的频率越多听起来越来越和谐, 这些倍频谱音可以和谐相处的!

“五度相生律”和“十二平均律”

“五度相生律”:

2500 多年前毕达哥拉斯取一根弦的弦长三分之二(约黄金分割比例)得到了和这根弦相差 5 度的另一个音, 再取三分之二弦的三分之二, 如此操作十二次可以遍及所有乐音, 只是高低不同。

中国古代的“三分损益法”:

中国春秋战国时期的《管子》、《吕氏春秋》曾记载过竹管乐器制造过程。有人以一根

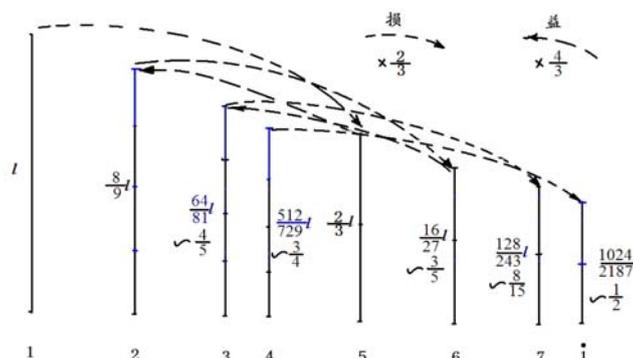
长约八寸的发音竹管为标准，记为“黄钟”音（相当于 Do），再截取长约为其三分之二（长约五寸二）的另一竹管，可以吹出另一个高五度的音，记为“林钟”（相当于 Sol），再将这五寸二的竹管接上其三分之一对应长度约七寸的竹管吹响可以得到比“林钟”低四度“太簇”音（相当于 Re），如此循环操作，做三分之一比例的“损”和“益”，便可以得到八度内发所有乐音（Do, Re, Mi, Fa...）的竹管（如图所示，结合频率公式从中能看出什么？频率整数比）。

“十二平均律”的发现：

我国明代的朱载堉，他最早看出了乐音间存在等比关系（八度 12 个半音相邻高度关系差 2 的 12 方根，即 1.0594632），它是中国人对现代音乐做出杰出贡献的又一例证，现代键盘乐器如钢琴就以其为基础设置。

很明显许多乐器，如管风琴琴管长、竖琴弦长、钢琴弦长都呈现指数关系！

音乐与“黄金分割”有关系！



实验内容与基本要求：

1. 乐音的产生，接入与电域显示
2. 用示波器观察和 LabView 界观察记录面不同乐音的差异，如记录弦乐和管乐的发音异同
3. 乐音的时域与频域分析方法的掌握
4. 研究特定调中各乐音的频率关系，如任意两乐音频率间隔
5. 研究和弦动听原理
6. 探究“三分损益法”的应用

思考：

1. 高低音频率不同的同一乐音间有什么关系，如各个 Do, l 与 1 与 i , Re? Fa...?
2. 我们现在所接受的乐音为何是某些固定的频率，而不是其它任意频率？
3. 乐队演奏前为什么要定弦或定调？以谁来定？
4. 你可否同意如下观点：认为“钢琴”为音乐之王(King)，小提琴为音乐之皇(Queen)？你能从实验中看到什么？你的最爱是什么？从你的性格看你为什么喜欢这种乐器？