

The Basic Physical Principles of Vocal Instrument

Fuyun Ji^{1*}, Guotong Sun^{2*}, Boxuan Yuan³, Yong Wan^{1#}

¹College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong

²No. 58 High School, Qingdao Shandong

³No. 1 High School, Qingdao Shandong

Email: #wanyongqd@hotmail.com

Received: Jul. 5th, 2018; accepted: Jul. 18th, 2018; published: Jul. 26th, 2018

Abstract

Musical instruments can be divided into stringed instruments, wind instruments and percussion instruments and other types. Because the sound principle of musical instrument is different, the physics principle behind it is also different. In this paper, the classification and corresponding principles of musical instruments are introduced, and some basic physical principles are systematically explained, and then the physical principles of vocal sounds of several typical musical instruments are analyzed in detail.

Keywords

Musical Instrument, Wave Velocity, Standing Wave, Musical Sound, Resonance

乐器发声的基本物理原理

季福云^{1*}, 孙国同^{2*}, 袁博轩³, 万 勇^{1#}

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛

²青岛58中学, 山东 青岛

³青岛1中学, 山东 青岛

Email: #wanyongqd@hotmail.com

收稿日期: 2018年7月5日; 录用日期: 2018年7月18日; 发布日期: 2018年7月26日

摘 要

乐器可分为弦乐器、管乐器和打击乐器等类型。由于乐器的发声原理不同, 其背后的物理原理也不尽相

*第一作者。

#通讯作者

文章引用: 季福云, 孙国同, 袁博轩, 万勇. 乐器发声的基本物理原理[J]. 应用物理, 2018, 8(7): 336-341.

DOI: 10.12677/app.2018.87043

同。本文首先介绍乐器的分类和相应原理，系统说明了乐器发声的一些基本物理原理，然后具体分析几种典型乐器发声的物理原理。

关键词

乐器，波速，驻波，乐音，谐振

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

很多同学都喜欢乐器，这是因为不仅乐器演奏出来的声音使人愉悦，弹奏乐器的过程也使人专注或放松。这些声音是如何产生的，大家都知道与物理学知识有关。

确实，不同的物理发声机制决定了不同乐器的分类：1) 弦乐器：包括钢琴、吉他、提琴、琵琶、古筝等。其发声原理为：弦乐器的发音方式是使拉紧的弦振动发音，弦乐器通常用不同的弦演奏不同的音，有时则须运用手指按弦来改变弦长，从而达到改变音高的目的。2) 管乐器：包括长笛、萨克斯等。其发声原理为：吹孔气鸣乐器管体为圆柱型，嘴唇振动时，气流冲击在吹孔锋利的边缘上而分开，进入管中的气流就引起管内空气柱振动而发音。3) 打击乐器：包括架子鼓、云锣、编钟等。其发声原理为：乐器受打击时，发生振动，从而产生声音。

可见，三种乐器的发声原理不同，其背后的物理原理也不尽相同。但是现在的大学物理中[1]，很少系统地介绍发声的相关知识，使人难以系统了解乐器发声的基本物理原理。现有的文献中也多以乐器展开[2] [3] [4] [5]，没有系统介绍乐器发声的物理原理，使人遇到相关物理知识时感到有些凌乱。本文首先系统介绍基本物理原理，然后依据物理原理具体分析几种典型乐器发声的不同机理，从而对乐器发声的基本物理原理有比较全面的认识，真正认识到物理学是乐器原理的基础。

2. 乐器发声的基本物理原理

2.1. 拉紧弦的波速公式

由杨氏模量公式，拉紧弦中的波速 v 传播公式为公式(1)。

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad (1)$$

其中， F_T 为弦的张力， μ 为弦的线密度。显然，弦一定时，张力越大，波速越大；张力一定时，弦的密度越大，波速越小。

2.2. 弦的驻波解

考虑到弦乐器的弦是两端固定的，其波动只是在这个区间，是驻波解。假定弦两端的距离是 L ，最大驻波解的波长 $\lambda_1 = 2L$ ，二级驻波解的波长 $\lambda_2 = L$ ，三级驻波解的波长 $\lambda_3 = 2L/3, \dots, n$ 级驻波解的波长 $\lambda_n = 2L/n$ 。这一结论可由图 1 表示。

由图 1 可以看出：驻波的基波($n = 1$)波长最大，级数 n 越高，波长越短。弦长与 n 级驻波解的波长的关系为公式(2)。

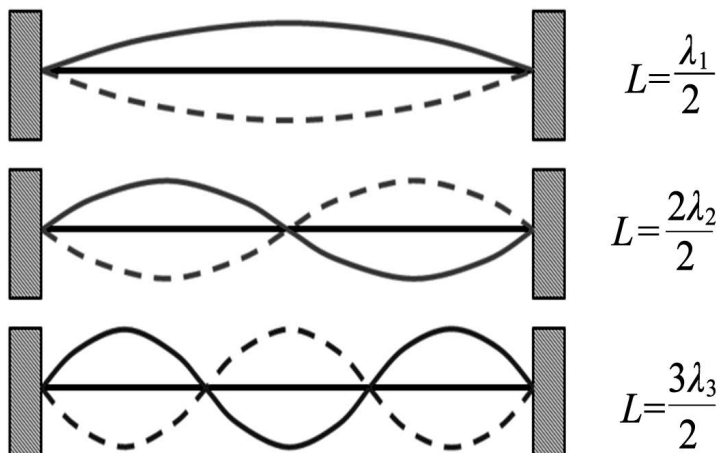


Figure 1. Solution of standing wave with fixed chord
图 1. 固定弦长的驻波解

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

由公式(1)得知, 对于同一根没有改变的弦, 各种频率振动的传播速度相同, 由频率 $f = v/\lambda$ 得知, 驻波的基频($n = 1$)最小, 级数 n 越高, 频率越大。 n 级驻波解的频率与基频的关系为公式(3)。

$$f_n = n f_1 \quad (3)$$

2.3. 乐音(或拍频)

拍频是声波干涉加强或减弱的结果, 假定两声波在空间某点相遇时的振动为公式(6), 则其合成的振动为公式(7):

$$\begin{aligned} x_1 &= A \cos 2\pi f_1 t \\ x_2 &= A \cos 2\pi f_2 t \end{aligned} \quad (4)$$

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos[\pi(f_1 - f_2)t] \cos[\pi(f_1 + f_2)t] \quad (5)$$

其中, x_1 、 x_2 分别是两声波在某点相遇时的振动位移, A 为振幅, f_1 、 f_2 分别是两声波的频率。这样, 拍频 f_b 的大小为公式(6):

$$f_b = |f_1 - f_2| \quad (6)$$

图 2 是拍频形成示意图。其中, $f_1 = 10 \text{ Hz}$ 、 $f_2 = 10 \text{ Hz}$, 拍频 $f_b = 10 \text{ Hz}$ 。

2.4. 声波的谐振(共鸣)

声波是纵波, 所以无所谓波峰或波谷, 只要波程差半个波长, 声波叠加就是最大, 形成谐振。但这一现象又分为封闭管和开放管, 见图 3。

1) 封闭管: 封闭管中声波需要经过一个往返形成半个波长的波程差, 形成共鸣。这样, 形成驻波的最大波长是:

$$\lambda = 4L \quad (7)$$

2) 开放管: 开放管中声波需要经过半个波长的波程差, 形成共鸣。这样, 形成驻波的最大波长是:

$$\lambda = 2L \quad (8)$$

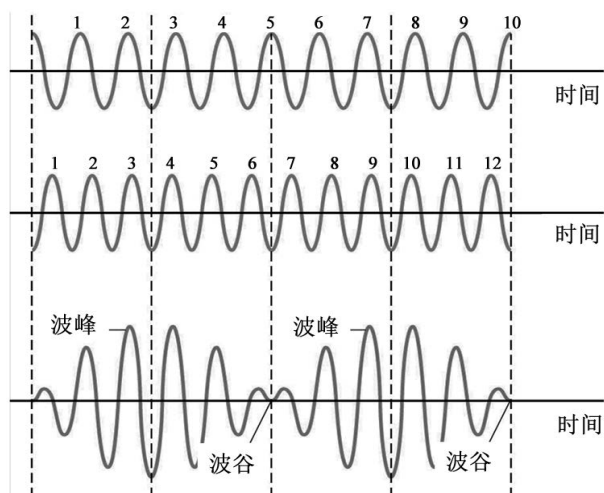


Figure 2. Schematic diagram of beat frequency formation
图 2. 拍频形成示意图

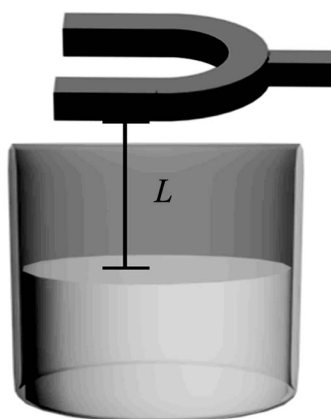


Figure 3. Propagation of sound waves in closed tubes
图 3. 封闭管中声波的传播

以上的波长是共鸣的最大波长，其频率称为基频，乐器产生的频率可以是基频整数倍。另外，如果管长 L 发生变化，波长也会变化，从而导致频率变化。向暖瓶里倒水，空气管长 L 变小，由公式(7)，声波波长变小，频率变大。有经验的人，根据声调的变化，就能判断出暖瓶水快满了。

2.5. 其他经验公式

实际过程中，影响声波传递和频率的因素很多，以下常见的两个公式。

1) 声波在空气中的传播速度与温度有关，温度越高，传播速度越大。以摄氏为例， 0°C 时，声速约为 331 m/s ，温度每升高 1°C ，速度增加 0.6 m/s ，可用公式(9)表示。

$$v(t) = v(0)(1 + \alpha t) \quad (9)$$

其中， $v(t)$ 是 t 摄氏度时声波的传播速度， $v(0)$ 是 0 摄氏度时声波的传播速度， $\alpha = 0.6$ 是一常数，由公式(9)可知，温度为 20°C 时，声速度增加为 334 m/s 。

2) 打击乐器中板的振动频率。由于板可以看为二维刚体，其振动频率受板的形状、刚性、密度、尺寸和敲打方式等多重因素决定，其基频公式就是一个很复杂的形式，见公式(10) [3]。

$$f_{mn} = \frac{\pi h}{2r^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} (\beta^{mn})^2 \quad (10)$$

其中, f_{mn} 是第 mn 次的音频, 脚码 m 、 n 表示两维阶次, h 为板的厚度, r 为圆板半径, ρ 是材料的密度, μ 是泊松比, β_{mn} 是与第 mn 次的泛音有关的系数。

3. 几种典型乐器发声的基本物理原理

3.1. 弦乐器

吉他、小提琴、钢琴是弦乐器的代表。人们称钢琴为乐器之父, 小提琴为乐器之母, 古典吉他为乐器王子。

吉他和小提琴类似, 是靠琴弦发声, 主要依据公式(1)、(2)和(3)。首先, 依据公式(1)可以得出两个结论: 弦一定时, 张力越大, 波速越大, 对于基波或同级数的波, 其频率会变大; 张力一定时, 弦的线密度越大(琴弦变粗), 波速越小, 其频率会变小。其次, 依据公式(2)(3), 可以得出: 当整条琴弦都在振动发声时, 基频的波长长, 会发出频率比较低的声音; 当按住琴弦的某点, 琴弦与琴颈上的金属丝接触, 琴弦的下半段形成了一段新的可以产生震动的封闭区间, 即公式(2)中的 L 变小了, 这时拨动琴弦, 琴弦发出的基频波长变小, 频率变大, 因此音调也就要高一些。对于其他同级数的音也是如此。

钢琴作为“乐器之王”, 它具有音域非常广、音量很大, 一根琴弦被击打, 其他的弦会同时受到影响发出谐波, 使演奏有很好的表现力等特点。钢琴的奥妙虽然多, 但归根结底主要还是琴弦的功劳。钢琴有很多条琴弦, 不同的琴弦产生了不同的声音。由公式(1)和(3)可以得出: 弦长越短、张力越大、密度越小、直径越细, 音调越高。

弦乐器和其他乐器一样, 不仅会发出基频波, 也会发出高级数的谐波, 由公式(4)和(5), 这些波在空间叠加就会形成和谐的音乐, 音乐的频率由公式(6)决定。

3.2. 管乐器

管乐器也是乐器中的一大家族, 主要有各种形状的管状体和激声系统构成, 它们的共同特点是通过管中空气柱振动作为声源, 所以其主要依据是公式(7)或(8), 即通过改变空气柱振动的长度, 改变驻波的波长。

但是木管乐器和铜管乐器的机理还不尽相同: 木管乐器为了获得不同的音调, 通过在管体开孔, 手指的按压控制孔的开闭的方式, 可以改变管的内振动的空气柱长度, 从而改变驻波的波长。其中, 吹口与外界相连的是闭管乐器, 适应公式(7); 笛子与箫等乐器不止吹口处与外界相连, 属于开管乐器, 适应公式(8)。而铜管乐器多使用活塞, 通过活塞得伸缩, 灵活地空气柱长来控制。

当然, 若将闭管乐器简化为一段开口的管, 理论上管长应等于四分之一波长; 但管口外的一小段空气也会参与管内空气的震动, 使得实际参与震动的空气柱比管长要长。若根据理论计算值确定每个音高对应的空气柱长度, 音调会偏低。因此在制造管乐器时, 需要添加一个管口校正量 ΔL 。由公式(9)得知, 当温度变化时, 会导致振动传播的速度变化, 从而导致乐器的音调发生微小变化。

3.3. 打击乐器

借助捶打、敲击等方法可以使物体发声, 打击乐器就是利用这种方式发出乐音的乐器。典型乐器有各种各样的鼓, 木琴, 编钟等。那些是靠膜振动发声的传统的鼓, 振动方程很复杂, 公式(10)是假设板振动以刚性作用为主, 板的基频公式, 实际因素比公式(10)复杂的多。

4. 结束语

物理学是研究物质基本运动现象和规律的基础科学，在科技和生活中各个方面都有应用，在音乐方面也是一样。通过本文可以看到，乐器的发声、音调和音色，以及乐器的制作和调整方法，都与物理原理有关。了解乐器中的物理原理，对乐器不仅知其然，更知其所以然。同时，读者也领会到物理的基础作用。

参考文献

- [1] 马文蔚. 大学物理[M]. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [2] 龚镇雄. 音乐与物理[J]. 物理, 1995, 24(9): 543-547.
- [3] 马惠英, 余守宪. 管中的驻波: 管乐器和簧乐器——物理与音乐之三[J]. 物理通报, 2004(4): 42-45.
- [4] 马惠英, 余守宪. 打击乐器和膜、棒、板的振动——物理与音乐专题之四[J]. 物理通报, 2004(5): 43-46.
- [5] Valiaki, V. (2004) Physics-Based Modeling of Musical Instruments. *Acta Acustica United with Acustica*, **90**, 611-617.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org