

# 音乐与物理<sup>1)</sup>

龚镇雄

(北京大学物理系, 北京 100871)

**摘要** 从音乐是一种声波出发,从物理上介绍了音乐物理学——音乐声的产生、接收、传播,它的性质及与其他物质的相互作用。从音乐声的物理基础成分频率、声强和时值及其对应的主观量出发,构成了音色、旋律、节奏、和声等音乐的诸要素。说明了音律学,和声的协和性,乐器的分类、结构、振动模式,歌唱中的物理,音乐表演中的物理,音乐电声中的物理问题,室内音乐声的传播以及研究音乐的物理方法等。

**关键词** 音乐,物理,音乐声,音乐物理学

1987年开始,我从从事单纯的物理及物理实验的研究和教学工作转入音乐声学领域,通过几年的学习、实践以及参加国内、国际交流等活动,愿将音乐与物理关系的认识探讨一下,以与读者共同研究。

## 1 音乐是一种声波

音乐是一种声波,可以把它称作音乐声波。因此,它是一种振动随时间的传播,而且是机械振动的传播即机械波,是一种纵波即压缩波,它具有机械纵波的一切属性。例如,波的几个要素,即振幅、周期(或频率)、相位、波长(或波速)及时间等自然是音乐声波的属性。在研究音乐声的时候,自然有与振幅有关的能量问题,如声强、声压、声能分布形成的声场、音乐声的传递和衰减等等问题;有频率域、时间域、相位域问题,如各种声谱、旋律、节奏、立体声等问题;或与声的传播速度有关的一系列问题,如音乐声波在各种介质中的传播,音乐声波与温度的关系等问题;还有波的传播和叠加问题,如音乐声的反射、吸收、独立传播、拍的现象等等。让我们在下面结合具体情况予以阐明。

声学是研究声的产生、传播、接收,它的性质以及与其他物质的相互作用,而音乐声学是研究音乐声的产生、传播、接收,它的性质以及与其他物质的相互作用。传统的音乐声学多研究

乐器的发声机制及其与声音质量的关系。随着音乐声范围的扩展,计算机的普及,高新技术的发展,以及有关音乐的研究工作的发展,现代音乐声学已成为一门包括音乐的物理构成,音律学,乐器声学,歌唱发声的生理、物理规律,音乐电声,室内音乐声,音乐听感的主观评价及其客观基础,音乐声的测量,以及计算机音乐等内容的新兴学科。这个认识同国际同行是一致的。它是一门跨物理学、数学、音乐、生理学、心理学、电子学技术、计算机技术及美学等,包括自然科学、技术科学、艺术、哲学等不同门类学科在内的交叉科学。它正处于不同门类学科、主客体的交汇点上,突出体现了现代科学和文化发展的特点。

## 2 从物理角度理解音乐

### 2.1 音乐声

研究音乐声学,有必要把音乐声的概念重新确定一下。根据听觉的科学史,也从日本学者和我们自己的实验证明,20kHz以上的谐波对音色是有明显影响的。因此,应该认为音乐声包括三个部分:一是传统的乐音,即在物理上振动是周期性的,频谱是分列的,主观听感上有一定音高的;二是在音乐中出现的,没有

1) 1993年11月19日收到初稿,1994年3月29日收到修改稿。

一定音高的,振动是非周期的,频谱是连续的,如锣、鼓等打击乐器声或一些合成效果声等“噪声”;三是一部分对听感有影响的“超声”。

## 2.2 音乐的物理构成

音乐构成的基础是物理构成。音乐是一种声波,其物理要素是频率、强度和时值。与此对应的是音乐声的音高、响度、时值和音色四个主观量(要素)及其在空间和时间上的组合和运动。音高的距离就是音程,音高的排列构成调式,音高的叠合构成和弦,音高与时值构成旋律,响度与时值构成拍子或节奏,和弦的连接、配器、合唱、合奏等也无非是这些要素在时间、空间中的运动。旋律、调式、节奏、拍子、和弦、速度、音型、曲式的不同,构成了不同风格的音乐,这些已经不是简单的要素的叠加,而已经升华到艺术和美的境界。加上人的心理对音乐的感受,我们讨论了音乐的旋律美、节奏美、和声美、动态美、整体美等,形成了客观的和主观的音乐世界。这样来理解音乐,就非常容易了。当然,这样认识音乐并不能代替音乐作为一门艺术的本身。

## 2.3 音律学

音律学本身是一个数学问题也是物理问题。从一开始,不论中国或外国,三分损益或五度相生律都是从弦或管上实现的,这是一个物理实验。如在音律学上,平均律就是把八度音程用等比分为1200音分,用音分值等于 $1200\lg_2(f_2/f_1)$ 这一个式子,把音分与频率的关系全都包括了,不仅解决了十二平均律,还解决了所有平均律的问题。五度相生律只需用3倍频(含 $1/3$ 倍频)生律,纯律只需用3倍频和5倍频(含 $1/3, 1/5$ 倍频)生律,就可以解决全部自然音阶的音律问题,而不必在纯律中再加上一个纯律小三度的频率比为 $6/5$ 的生律方法。这样,从物理上理解律制就非常简单明了了。

## 2.4 和声的谐和性

两个或两个以上的音叠加的谐和性,从物理上来看是一目了然的。八度音程是完全谐和的,因为它们的频谱是完全叠合的。纯律的大三和弦三个音的频率比为 $4:5:6$ ,是简单的小

整数比,因为其低次谐波有多处重合;纯律小三和弦三个音的频率比为 $10:12:15$ ,低次谐波的重合性较差些,谐和性也就较差些;钢琴的和声丰富,与它的非整数倍谐波即分音的存在有关。

## 3 乐器中的物理

### 3.1 乐器本身是一种物理仪器

乐器是什么,从物理上说,它是一种人们制造的或为人们所用的产生音乐声的仪器。30年代,我国著名的物理学史先驱吴南薰先生就认为世界上第一个被人类制造出来的物理仪器就是在兽骨上开一个孔吹奏出声的笛子。我认为这种说法不无道理。

### 3.2 乐器按发声的物理机制分类

自古至今,把形形色色的各国、各民族、各时代的乐器予以科学的分类是一件很复杂、困难的事情。我国古代有以制造乐器的材料分类的“八音”即金、石、土、革、丝、木、匏、竹;也有以发声体分类的即体鸣乐器、气鸣乐器、膜鸣乐器、弦鸣乐器等;也有以演奏方法和演奏机制分类的即吹奏乐器、拉弦乐器、弹拨乐器、敲打乐器、键盘乐器等。但是较为科学、合理的还是按乐器发声的物理机制分类,如弦乐器(又分拉弦、拨弦、打弦乐器),管乐器(又分无簧、有簧管乐器),簧振乐器,膜板乐器和电子乐器等。

### 3.3 乐器振动的物理模式

弦乐器的振动以横振动为主,并兼有纵振动、扭转振动和倍频振动,这就解释了拉弦、拨弦、打弦乐器及不同演奏方式产生的不同的音色;用波在弦上不同的运动模式可以说明拉弦与拨弦的不同;管乐器起振的激励模式有边棱式(如笛类)和簧片式(如单簧管和双簧管);从开管和闭管乐器中气柱形成的驻波不同可以说明管乐器发声的音高即管的定律;从自由簧和非自由簧的振动以及二维、三维的模板振动和琴箱振动的模式,可以分析、说明乐器的发声机制、声音质量等问题。乐器的振动模式还包括振动通过琴马等与琴箱的耦合等。把手风琴两

片中音簧调成频率差6—8Hz,是利用其拍频起振颤作用。

### 3.4 乐器的声学参数

乐器有许多性能指标,如外观、手感、功能的多少等,但主要是声学参数即物理参数。如表示音的高低有音域即音高或频率范围,音准即音高的允许误差,以及音准的稳定性即音高随外部条件的改变程度,音高的可调性即可改变性等。表示音的强弱有音量即能量,动态范围即音量的变化范围,激发阈值即使乐器发声需要的最低能量,指向性即乐器发出的音乐声波的能量按方向的分配以及声能的衰减和传远等。表示音色的有频谱、瞬态状况及频率响应。表示时间的有发音灵敏度即受到激励后到发声的时间长短等。

### 3.5 乐器材料的物理性质

乐器材料的物理性质很大程度上决定了乐器发声的质量。如用以制作提琴的木材要求轻即密度小,动态弹性模量大等;钢琴的音板要求波在其中的传播速度快,传播均匀(即各部分声波同步),声阻低(即能量在传播时的损失小);提琴的音板要求有较多的共振峰,即在较大频率范围内共鸣好。各种不同材料做成的琴弦如钢弦、肠弦、丝弦、尼龙弦,由于有不同的弹性模量、密度、张力,因此,其发声的音质和音色不同。钢琴的琴槌材料的硬度不同会使击弦后产生的谐波不同而影响音色。用银制作的铜管乐器,用硬木制作的木管乐器,其材料的密度、弹性、硬度都与发声质量有关。竹子的干湿度、内表面光洁度等也与音质有关。胡琴的蒙皮由于其弹性或干湿度不同会影响发声,显然,铁皮筒胡琴是不好听的,而板胡却有其特殊的音色。

### 3.6 乐器的结构

乐器作为一件发声仪器,其基本结构有发声体、传声体、共鸣体及附件等。显然,根据弦及管的规律,弦线越长、越粗,管体越长,琴箱越大,其振动频率就越低,能量就越大,反之亦然。许多乐器连同琴箱是个亥姆霍兹振子。提琴中的音柱,各种琴的马是声的传导器。琴弦的张力大小也会影响发声的高低及音色。管乐器

的粗细,管壁的厚薄,孔径的大小及孔间的相对距离,笛尾的长短,有没有笛膜等,都会影响音高和音色。管乐器喇叭口的形状则与声辐射的能量有关。

### 3.7 乐器制造工艺中的物理内容

制造乐器的材料的加工如烘烤、加湿、人工老化等都是改变其物理属性。材料的切割方向与声的传播速度和收缩率有关。提琴的上漆,除了起保护作用之外还有固结的作用,会改变振动状态和音色。管乐器内表面的粗糙程度会影响形成驻波或共鸣的质量。提琴加工的顺序(如用不用模具,用不用铁钉或楔钉)都会改变琴体的整体结构,从而也与音质有关。低音琴弦用缠弦能显著地改善谐波状况。

### 3.8 乐器调音中的物理

弦乐器采用改变弦的张力使音高改变,这是用得最普遍的。又如钢琴调律时听音,是利用五度相生律与十二平均律之间的音高差的拍频,如五度音的自然谐波为702音分而钢琴平均律为700音分,差2/700,对于1000Hz的音高就可能有每秒3次的拍频。

### 3.9 乐器维护所需的物理环境

保护乐器使之有良好的声学性能的主要措施之一是保持一个良好的物理环境。例如,乐器不能处于太潮湿或太干燥的场所,如胡琴蛇皮受潮就会影响其张力,使发声变疲;笛子太干燥则发声爆裂。又如果温度不适合,特别是管乐器,就会显著地改变音高,这是因为管乐器的音高正比于声速,每差1℃,音高的改变为0.2%,即约3音分。

## 4 歌唱中的物理

### 4.1 人体乐器

人唱歌与一个乐器发声是类似的:声带是起振器,周围上下的各种管腔是管体,胸腔、咽腔、喉腔、鼻腔、头腔等都是共鸣体。而这个乐器的能源即气息源则是通过呼吸控制的横膈膜的上下运动。所以唱歌的过程就类似于一个乐器发声的物理过程。

## 4.2 声带的振动

声带起振有如流体力学中很快通过声门的气流,根据伯努利原理产生负压把声带“吸”拢,一吸一放,产生振动。人控制声带边缘的厚薄,可以改变发音的高低;音量的大小取决于声带振动的振幅。女性的喉器管比男性的小,声带比男性的窄,因此发声的音高比男性高。

## 4.3 歌唱的共振峰

频谱上的某些能量比较集中的频段形成一个峰,称为共振峰。经过训练的歌唱家可以在一定频率区域如 500—3500Hz 内,形成比平常人多而高的共振峰,其歌声就优美动听。因此,这是歌唱声质量好的一种物理表示。

# 5 音乐表演中的物理

## 5.1 改变物理条件

在乐器演奏中改变物理条件,就会得出不同的声音效果。例如,提琴的不同把位,按管乐器的不同音孔,就可改变有效弦长和管长,就会发出不同音高的音。提琴的泛音奏法,管乐器的超吹,也是改变其波长。钢琴琴槌的不同击弦点可以抑制某些谐波。

## 5.2 弓法和吹法

连弓、跳弓是改变弦压、弦速和弓与弦的接触时间。弓的位置不同可以改变音色,如近马奏法呈现出玻璃金属色彩,近指板奏法呈现出羽毛状弱音,弓背奏法呈现出尖锐的金属声,拨奏则增加了扭转振动的成分。二胡的弓序不同即拉弓或推弓,显然会影响皮膜的张力,造成“弓序差”。管乐器吹气气流的强弱和方向都会改变振动模态,从而改变音量和音色。

## 5.3 触键和下弓

钢琴的触键和离键,提琴的下弓和收弓状态不同,显然会影响发声的瞬态波形,从而产生不同的效果。

## 5.4 钢琴的踏瓣

使用钢琴的延音踏瓣会改变其整体共鸣。在击键前、击键时、击键后踩板或离开,效果是不同的。钢琴的弱音踏瓣则是减低击弦的力度

和增长琴槌与琴弦接触的时间,从而使声强和音色改变。

## 5.5 颤音

弦乐器的揉弦,唱歌的颤吟都会造成颤音(*vibrato*),即音高的上下振动。除了音高的振动以外,还有声强的上下“振动”。如果颤音频率合适(约每秒 6—8 次)会给人以悦耳的感受。

## 5.6 音量的协调

在合唱和合奏中,各种乐器、各个声部间音量即能量比例的协调。各种和弦的协和及不协和效果,也都是物理问题,可以用谐波的重合状况来说明。

# 6 音乐与电学

## 6.1 换能

拾音器(话筒、麦克风)把声波转换成电信号,扬声器或耳机把电信号还原成声波,都是换能问题。不同种类的拾音器的工作原理不同,如电阻式、电容式、动圈式、压电式等拾音器的换能方式不同,其频响效果和换能质量也不同。

## 6.2 声源

作为音乐电声的音源,就有记录、贮存、重现音乐的问题。磁带的记录和消音利用的是磁性材料的剩磁性能及磁滞回线的退磁原理。塑胶唱片利用机械记录和机械重放,而 CD 唱片则是机械记录和用半导体激光器重放,还有高密度磁盘或计算机软盘的磁记录。用收音机和电视机接收电台和电视台的广播则利用了天线的调谐接收原理。

## 6.3 音乐信号的调制和加工

音乐信号变成电信号以后的调制、加工、增益、滤波、分频、倍频、降噪等等都是电路(包括数字电路)的问题。

## 6.4 立体声

立体声是利用人耳的双耳效应,利用双耳距音源的声强差或时间差或位相差来处理问题。

## 6.5 音箱

音箱本身就是一个亥姆霍兹振子。音箱有各种不同的结构,用以阻隔音箱前后的声波,不

使其产生干涉, 并造成一个具有良好共振峰和频响的声学环境。

## 6.6 高保真

所谓“保真”, 就是要保持音源原来的频谱、波形、动态、频响等, 尽量少失真, 降低非本来的声音成分——噪声。

## 7 室内音乐声

### 7.1 室内声场和闭室的本征频率

中心问题是室内声场即声能的分布, 包括室内声场的形成过程、均匀性等。大的音乐厅室不能有盲点或焦点即声能密度过小或过大的区域。室内声场形成过程中把声波分成直达声、一次反射声、前期反射声、混响声即多次反射声, 这里包括了声波的反射和叠加问题。闭室的本征频率与房间的大小有关, 实际上是一种室内驻波的形成。

### 7.2 混响时间

描述室内声场性质的混响时间是一种能量的衰减时间, 是一个物理参数。其他还有混响半径、房间常数、早期衰减时间、侧向效率、室内声能比等等都是物理参数。

### 7.3 吸声

吸声材料和吸声机制等实际上是从材料本身的性质或结构上调整对于不同频率下的入射与反射能量的比例问题。

## 8 研究音乐声的物理方法

### 8.1 测量方法和测量仪器

作为音乐声的测量方法和测量仪器, 都是物理量的测量方法和物理仪器。例如, 利用声级计测量声压级, 利用频率计测量声频, 利用频谱仪记录频谱、包络, 分析静态音色, 利用示波器或音乐工作站观看瞬态波形、振动模态或作声音的实时记录、分析, 利用声级记录仪记录随时间变化的声强, 用三维语图仪分析频率、声强或包络随时间的变化, 用动态杨氏模量测定方法测定材料的弹性模量, 用声速仪测声速, 用天平测定材料的密度等。

### 8.2 测量技术

作为研究音乐声的各种测量技术都是物理技术, 如激光全息技术, 电子成像技术, 各种光敏、电磁、位敏传感器。拉弦乐器、管乐器、弹拨乐器的人工激励方法也都是物理方法。

### 8.3 物理模型

研究音乐声学时, 普遍采用物理模型。如研究乐器或音箱时, 常作为亥姆霍兹振子; 研究声带的振动时, 普遍采用双质量模型或平动加转动的二体模型; 研究大脑接收音乐后的活动时, 用大脑皮层运动模型; 研究乐器用“气路”或力、电模型或声、电模型; 合成器合成声音的不同方法实质上也是不同的物理模型; 计算机模型实际上也是以物理模型为基础, 而且要用物理实验去检验的。

### 8.4 把物理思想、实验思想、实验方法用于音乐研究

例如, 在音乐听感的实验研究中, “尽量减少主观心理因素的影响”是从“尽量减少不确定因素影响”的物理实验思想而来的; 利用“人耳对八度音的敏感性”是从“尽量提高测量灵敏度”的物理实验思想而来的; “零因子方法”是从物理学中“零实验”启发而来的。

实际上, 作为一个多年从事物理, 特别是物理实验研究的人员来说, 我做的工作, 其中一个指导思想就是把物理实验方法和实验思想用到音乐声学的研究中去。我在物理实验中所用的许多统计方法、数据处理方法、判据等都已用在音乐声学的研究工作中。

## 9 结束语——音乐的发展与物理学的前沿

(1) 从历史上讲, 声学的发展离不开音乐, 中国如此, 外国也是如此。我国的曾侯乙编钟就是一组杰出的声学仪器, 外国克拉尼、亥姆霍兹发展声学也是与乐器联系在一起。

(2) 物理学的发展, 包括理论上的、方法上的或技术上的都会用到音乐上。例如非线性理论、非平衡态理论、分形、瞬态分析, 从二体问题  
(下转第 542 页)