

音乐 声学

YINYUE
SHENGXUE
JICHU
ZHUQIDONG
ZHU

基础

上海音乐出版社
朱起东 著



音乐声学基础

朱起东著

510.7

上海音乐出版社

责任编辑：李丹芬

封面设计：谢蓓蓓

音乐声学基础

朱起东 编著

上海音乐出版社出版、发行

(上海绍兴路74号)

新华书店经销 吴县文艺印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 2.25 字数 45,000

1998年6月第1版 1998年6月第1次印刷

印数：1—9,000册

ISBN 7-80553-029-7/J·25 定价：0.43元

前 言

我们生活在声音的世界中，在我们周围无时无刻都会发出各种各样的声音。有婉转的鸟语声，有悦耳动听的音乐声。这些声音使人们的生活更富于乐趣。但也有各种机械的振动声，汽车的引擎声，飞机的呼啸声，以及给人们带来烦恼和危害健康的噪音。噪音的危害极大，它摧残人的生理机能。西德的一个监狱中，曾采用噪音来惩罚犯人。噪音除危害人的健康外还能形成巨大的“声震”，给建筑物造成破坏。据英国的“医学世界”杂志记载，倘若人类不设法控制噪音，到2000年我们都可能变成聋子了。为此我们必须采取各种措施，如用吸音、消声、隔音、面罩等防范设施以控制噪音，使我们生活的世界成为一个声音悦耳的世界。由此可见声音与人类生活有着密切的关系。而研究声音的学问——声学也就显得十分重要了。无论在工业和农业以及人们的日常生活中都牵涉到声学的知识。例如在工业上，工人们使用振动器搅拌混凝土，利用超声波制造各种医疗器具和探测仪器，运用次声波的接收器预测天气，以及勘察地质等等。我们所用的电话、电报、广播和电视等都是声学原理的产物。近年来人们更进一步利用发射人造卫星来转播，使更大范围的地区能接收到电视的节目。过去我们不能看到国外的电视节目而今天便可见到国外的体育比赛和精彩的音乐、舞蹈等节目，使我们的生活更丰

富多采。这些都离不开声学原理和声学科学的发展。美国有一位汽车厂里的工程师在检验一辆新出产的汽车时，发现在行驶到一定速度时，就会发出一个低而强的声音。大家都认为这个声音是从齿轮里发出来的。但这位工程师却认为是从其它方面所发。大家还是不以为然，仍从齿轮方面检查，结果总是检查不出毛病的所在。后来这位工程师发现这个声音是从轮胎的转速达到每秒钟 2 次时才发生，而且这个声音有固定的音高，相当于中央“C”下面的“*F”音，从而知道这个音是由每秒钟 180 赫兹所产生。于是他想起轮胎上的纹路是否是 90 条，一数正好是 90 条，这样每秒钟轮胎转动两次，恰恰是 180 赫兹。再加上车身上某一部分的共鸣，使这个声音大大地加强。简单得很，当轮胎调换后，声音立刻不见了。再例如农业上用超声波处理麦种，可使小麦耐寒，提高发芽率。苏联科学家发现十分钟的高频超声波“音乐会”可以激发麦种的耐寒和提高发芽率等生物特性。从音乐发出的声波还能刺激乳牛产奶增加，母鸡生蛋更多，蔬菜生长更茂盛。音乐且能使人延年益寿。据有人统计交响乐队的指挥较长寿。例如世界著名的意大利指挥家托斯卡尼尼活到 89 岁，还差两个月左右就是 90 岁了，而法国的一位女钢琴家玛尔格丽特·普勒沃特比他还活得长，她在 104 岁那年，还在波尔多医学院的一百周年纪念大会上即席演奏，听众为之折服。以上诸例均说明声学的重要性。

声学又称音响学。声学的种类分纯正声学和应用声学两种：纯正声学有物理声学，心理声学；应用声学包罗建筑声学，军事声学，电气声学和音乐声学。本书主要论述音乐声学，诚然也涉及到一些物理、生理和心理声学方面的范畴。

音乐声学是专门研究音乐中所采用的音以及感受这些音的规律，是一门非常重要的学科。国外的音乐学院专门开设这门课程。凡一切音乐爱好者都必须具有一定的声学知识，这样才不至于只知其然而不知其所以然。对于专业的音乐工作者，更无论是理论、演奏、演唱、民乐等专业都必须具备丰富的声学知识。歌唱人员学了音乐声学后就能了解声带的功能和共鸣腔的运用。知道声音从肺部的空气由气管呼出，激起喉部的声带振动而发声。声音通过喉腔、咽腔、口腔、鼻腔各共鸣腔的共鸣而增强音量。咽喉腔不但能够伸长缩短，且能扩大缩小，可调节多种位置的发音。由于口腔、舌、齿、唇和下巴的各种动作、调节，获得音色的变化和传远能力。因此声学知识有助于科学的发声，以唱出珠圆玉润的歌声。演奏人员有了声学知识才能通晓各种乐器的发音原理，掌握正确的口型、手形等演奏方法，便于发出更优美嘹亮的音响。乐器制作者则更需要掌握全面的声学知识，这样才能正确地计算乐器的尺寸、形状、合适的共鸣箱以及用料等；才能制造出科学的、高质量的乐器；才能改良及创造出新品种的乐器来。例如德国的著名乐器制作家波姆(1794—1881)他曾在1832年首创了波姆体系的长笛，已经得到了公认和好评。但他自己并不就此自满，他认为长笛的音量还不够宏亮，音色还不够完美，经过多次的试制、改进，仍不够理想。后来他认识到单凭自己的经验是制造不出最完美、最理想的长笛来，非全副武装声学知识不可，于是他特地去跟随德国慕尼黑大学教授夏夫豪特尔(Schafhautl)学习了两年声学，终于开了窍，在1847年根据声学原理进行制作，制造出真正以科学为基础的波姆体系的长笛。

音乐声学目前在我国还鲜为人知，撰写这个小册子旨在

用通俗的文字简要介绍音乐声学的有关知识，供专业音乐工作者和广大音乐爱好者阅读，为普及声学知识作微薄贡献。

朱起东

一九八六年十二月

目 次

前言.....	(1)
声音的发生.....	(1)
弦乐器的发声.....	(13)
管乐器的发声.....	(18)
声音的共鸣.....	(34)
声音的反射——回声.....	(37)
声音的聚焦反射.....	(40)
音乐厅和剧场内的混响.....	(43)
隔音.....	(45)
声音的传播.....	(46)
声音的散播.....	(48)
声波的折射.....	(50)
多普勒效应.....	(53)
声音的干涉.....	(55)
“拍音”.....	(57)
“差音”与“和音”.....	(59)

声音的发生

音乐是用声音来表达人的思想感情的一种艺术。犹如文学用文字，绘画用颜色、线条来表现一样。声音的产生是由于物体的振动，当振动着的有弹性的物体，发出音波，再由空气传播至人或其它动物的耳朵，感觉成音响。因此，如果要感觉到声音，必须具备下列三个条件：

(1) 振动体 任何声音的发生，首先要有物体的振动，产生音波，没有物体的振动，就不可能有声音。人声的振动体是声带；鼓的振动体是皮；弦乐器的振动体是弦；管乐器的振动体是簧；蟋蟀、知了的振动体是翅膀，甚至击桌成声，也是由于肉眼所看不见的桌面振动所致。

振动着的物体是产生声音的必要条件。但并不是所有振动着的物件都能产生声音。振动的物体必须达到一定的速度（即频率）才能发生声音。电灯上的电线用手拨一下，虽然是振动了，但仍不发生声音，这是由于它的振动太慢、振动的频率太低的缘故。如果将线拉得很紧，使振动的速度增加，便能听到一个很低的声音。一般人耳的可听率，平均是从每秒钟振动 16.4 赫兹^①（周次）至 20,000 赫兹。16.4 赫兹所发出比中央 C 低四个八度的 C₂，即管风琴上最长的一根 32

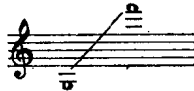
^① 物体在 1 秒钟内完成全振动的次数称为频率，它的单位叫做赫兹。赫兹是以德国物理学家赫兹(H. R. Hertz)命名。

吹开管所发的 C_2 音，低于这个数字就不能发出一个清晰而完整的乐音。犹如影片的速度，每秒钟少于 24 张片子，就要发抖一样。不到 16.4 赫兹的叫做“低声”；15,000 至 20,000 赫兹以上的叫做“超声”。人耳都听不到声音。

“超声”和“低声”在人的耳朵中，虽然听不到声音，在音乐中也无实用的效果，但在工业中却用途极广。近年来，随着祖国建设和科学研究工作的蓬勃发展，超声波用于生产和人们的日常生活中，与日俱增了。比如它能检查出金属部件内部的缺陷；能切割金刚石、玻璃和硬度很高的合金钢等坚硬的材料；并能钻出各种形状的洞来。超声波还能诊疗及治疗；能探测海中鱼群的动向，以帮助捕鱼。还能探测潜水艇的活动情况。此外，它还能给牛奶消毒，使油和水混合，甚至还能洗衣服等等。它的用途正在日益扩大。

近四五十年来人们又发现了低声波。它对人们的作用不亚于超声波。低声波能预测天气。例如根据空中反射回来的次声，可以知道大气中暖流的位置，利用接收低声波的仪器，可以知道远处海面上风暴的情况。次声波还可以用于地质勘察。由于它在通过不同的地层时，速度不相等，因此根据它反射回来的时间长短，可以知道地底下蕴藏的矿藏。它的用途也越来越广泛了。

音乐中所用到的音域约占人类耳官可听率的五分之四。自 29.2 赫兹至 4186 赫兹(小提琴上的泛音例外)。人声的平均音域约为二个半八度。虽然个别的歌唱家如姗姆勃列赫 (Sembrich, 1858—1935)，奥地利的华彩女高音，能达到将近三个八度的音域



，意大利的女歌唱家

阿顾亚里 (Agujari, 1743—1783) 甚至超过三个八度, 俄



罗斯大教堂的男低音歌唱家可低至 F_1 。



但这些只能说是例外。大钢琴上的音域, 自 27.5 赫兹 (A_2) 至 4186 赫兹 (c^5)。管乐器的音域与人声相近, 最高的短笛, 能达到 4186 赫兹。最低的倍低音大号 (Contrabass Tuba) 能低到 29.2 赫兹 (bB_2)。

振动的频率决定音高, 频率愈大声音愈高, 反之则愈低。

振动的幅度(振幅)决定音的强度, 振幅愈大声音愈强, 反之则愈弱。下面的音波图中, 甲波的频率是每秒 100 赫兹, 乙波是每秒 50 赫兹, 因此甲比乙高一个八度。两音的振幅相同, 因此它们的音量相等。

丙波与乙波的频率同为 50 赫兹, 因此音高相等。但丙的振幅比乙大, 可知丙的音量大于乙。(如图 1)

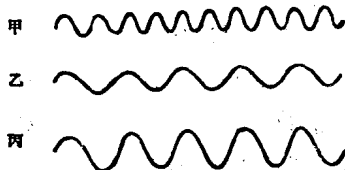


图 1

计算音量的单位是贝

注: 为简便起见, 每波代表 10 赫兹

尔(Bel)。得名电话发明人的姓 Bell (Alexander Graham Bell)。贝尔的十分之一称为分贝 (db), 表示耳朵能够觉察到的最小音量变化。人的耳朵能承受音量的能力自 1 分贝至 120 分贝。1 分贝是耳朵刚刚能感到的声音, 120 分贝能使耳朵感到疼痛、难受。耳朵经常经受 85 分贝对人的健康有害。在音乐上实际应用的音量约从 25 分贝 (小提琴的最弱音) 到 100

分贝(乐队全奏时的最强音)。音量随强度(Intensity)的对数而变化。这就是说 20 只小提琴用同样强度齐奏,只有同样强度的 10 只小提琴的 1.3 倍,100 只小提琴只有 10 只小提琴的两倍($\log 20 = 1.301$; $\log 100 = 2$)。声强单位与振幅的平方成比例。

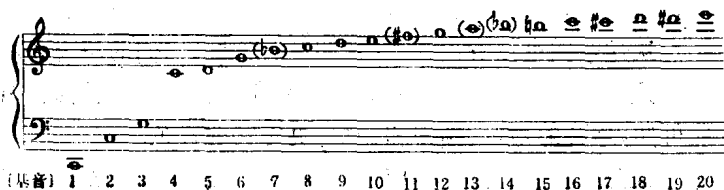
振动的成分决定音色(音品)。要知道几乎一切声音,实际上都是由许多纯音,按着一定的规律组成,称为复合音。这些纯音只是乐音中的一个振动部分,又叫做分音。组成乐音的各个分音(纯音),各有不同的频率,因此各音的高度也就不同,分音中频率最低的是第一分音,又叫基音。乐音的高度,一般是由基音的频率(基频)决定。基频也就是乐音的频率。其它分音的频率都比基频为高,统称泛音。乐音的音色,往往是由泛音的数量、频率和强度的不同所决定,也就是说,音色是由乐音中的振动成分不同,即所含分音的数量、高低与振幅的大小不同所决定的。

泛音的频率,有与基音的频率成整倍数的,也有与基频不成整倍数的。与基频成整倍数的泛音,称为谐和泛音,非整倍数的,称为非谐和泛音。乐音中基本上都是谐和泛音,也就是各分音的频率,都是第一分音(基音)频率的整倍数。分音的频率是基频二倍的,叫做第二分音或第一泛音;①是基频三倍的,叫做第三分音或第二泛音;是基频四倍的,叫做第四分音或第三泛音,余类推。

一个乐音所发生的全体音,即包括基音与泛音,叫做“谐

① 基频可以称为第一分音但不能叫它第一泛音,同样第二分音决不能叫它第二泛音,不能混淆。

音列”。①用C为基音，它的开始二十个分音（基音和十九个泛音）如下：



记有括弧的音比谱上所记稍低

图 2

上列各音是同时发生的一个“复合音”，但泛音一般较基音为弱，单凭听觉，不易觉察。因此泛音的效果并不影响基音的音高。仅使基音的音色有所变化。泛音的数量多的音色丰满，泛音数量少的音色单纯。木管乐器中，双簧管能产生较多的泛音，音色因之较为丰富，长笛所产生的泛音较少，音色因而较为单纯。即使在同一个乐器中，所含的泛音，低音比高音多，强音比弱音多。

图3是钢琴和单簧管发出的声谱图。它们的基音频率都是100赫兹。用亥尔姆荷尔兹共鸣器分

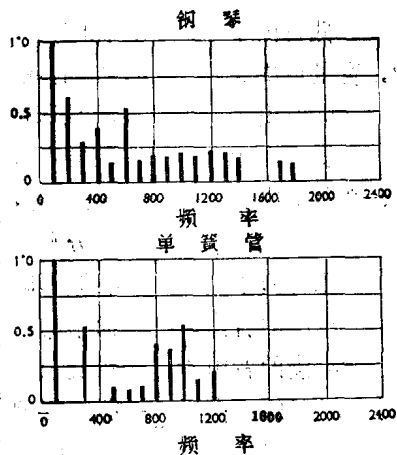


图 3

① “谐音列”俗称“泛音列”不合理，因基音不是泛音。

析,发现钢琴音是由16个分音(纯音)组成。单簧管是由10个分音组成。基音的振幅最大,各泛音的振幅较小,且各不相同。横坐标表示各分音的频率,纵坐标表示分音的振幅。

从这个图可以看出,钢琴音和单簧管音,它们的泛音各不相同,不仅泛音的数量不同,而且频率和振幅也各不相同。由此可知,乐音的数量、频率和振幅,决定它的音色。

综上所述,一切振动具有三种属性:频率、振幅和振动成分(形式),导致听者在感觉上产生心理上的三种属性:音高、音量和音色。为了简明起见,现列表如下:

心理上的名词	物理上的名词
1. 音高取决于 高音由于 低音由于	基音或占优势(泛音)的振动。 高的频率。通常由较小的物体产生。 低的频率。通常由较大的物体产生。
2. 音量取决于 强音由于 弱音由于	振幅,或心理上的“强度”。 较强和幅度较宽的振动。 较弱和幅度较小的振动。
3. 音色取决于 乐音由于 单纯的音由于 丰满的音由于 光彩的音由于 噪音由于	振动的成分(泛音的数量,频率和强度分配)。 有规律的周期性的振动。 简单的振动形式。 较复杂的振动形式。 非常复杂的振动形式。 不规则和非周期性的振动,常有不协和泛音存在。

其实,振动的频率、振幅和振动的形式决定音高、音量和

音色只是从物理上而言。从心理上说并不尽然。例如我们说振幅决定音量，但振幅的变化并不跟音量的变化成简单的比例。同样，我们说频率决定音高，最近实验发现，这条经典定律必须有所修改。心理上的听觉除中音区外，音高的变化并不直接由频率决定。在特别高的音区中，频率必须增加一倍以上才能得到高八度的音；在特别低的音区中，频率减少不到一倍就能得到低八度的音。变化的程度因人的听觉而异。音高也受振幅和振动形式的一定影响。弗列巧(Fletcher)发现，一个纯音譬如说是 200 赫兹的音，如果将它大大地加强，它就不再是原来的音高了。一个 200 赫兹的音，在 40 单位强度时，它的音高等于 222 赫兹在 100 单位强度的音高。一个 400 赫兹的音，在 40 单位强度时，它的音高等于 421 赫兹在 100 单位强度的音高。据报导，在 120 单位强度时，假定一个纯音从 200 赫兹增加至 400 赫兹，听到的音高等于从 158 赫兹到 368 赫兹，增加超过一个八度的频率变化。

音高对声源和听者间的相对速度也有关系。根据“多普勒”效应(参阅多普勒效应一节)，声源向听者迅速地驶来，音高就会升高。反之，声源从听者驶去，则音高降低。升高和降低的程度，视速度而异，速度愈快，升高愈多。速度愈慢，升高愈少。速度太慢，不能觉察出音高的差别。约在每小时 30 哩的速度时，就可很明显地听到音高的不同。声源不动，听者向声源驶去或离去情况亦同。

(2) 媒介物(媒质) 媒介物通常是空气。空气将音波传送给听觉器官——耳朵，才能听到声音。没有空气，如果在真空中，就听不到声音。试将旧式闹钟(铃和振子装置在外部的，便于看见振子的振动)放在玻璃罩内，然后抽气机将罩内

的空气逐渐抽出，闹钟的声音就逐渐减弱，直至空气全部抽出，音响也就完全停止。虽然仍可见到振子的振动。如果再将空气放入，复可听得闹声。从这个小实验，可见在真空中是无法将声波传播，自亦不可能听到声音了。

媒质除空气外，还可能是液体和固体。音波在液体或固体中传播的速度，快于空气中的传播。原因是由于它们的密度比空气大得多。空气在摄氏零度(0°C)传播的速度是每秒332米。液体如水，它的传播速度在 0°C 时为每秒1450米，比空气约快四倍多。固体如钢，它的传播速度在 0°C 时为5050米/秒。比空气约快15倍。试将左耳紧靠电线木杆上，在另一根电线木杆上用槌击之，两耳可先后听到二个敲击声。左耳先于右耳。原因是左耳听得的声音是由电线和木杆等固体传播，快于右耳由空气传播的声音。又如将左耳贴在自来水管上，在远距离处用槌击之，左耳可先后听到二个声音，然后右耳又听到第三个声音。左耳先听到的是由水管传来的声音，其次是由水中传来的声音，最后右耳听到由空气中传来的第三个声音。如果将小刀插在地上，再将耳朵靠在刀柄上，可以听到很远的马蹄声，将耳朵贴在铁轨上，可以听到五里以外的火车车轮声，倘用一根相当长度的木棍，一端紧贴耳朵，一端放在手表上，可以清晰地听到表的嘀嗒声。根据木棍长度的距离，单凭耳朵来听是不可能听到表声的。技工们检查发动机时，也常用木棍的一端紧靠发动机，另一头贴在耳朵上，可以听出机器内部有无发生故障。外洋轮在水中装置扩音器，可以探察远距离有没有冰山等危险。

二千多年前，我国著名的哲学家墨子在他的《墨经》一书中，曾叙述了防御城池的战术，即用土地的传声来探听敌军的

掘城。他说：“令陶者为罍，容四十斗以上，……置井中，使聪耳者伏罍而听之，审知穴之所在，凿内迎之。”意思是说，叫制陶器的人制造大腹小口的坛子，使听觉灵敏的人，伏在坛口上听，探知敌军所掘的地穴所在，就可迎敌了。这可说明当时已知声音在固体中传播的速度较快较远的道理。

音波在空气中传播的速度，因空气的温度而异。空气的温度增高，速度增加。反之则减少。气温每增高 1°C ，速度约增加0.6米。管乐器在夏天比冬天的音要高，就是由于空气的温度夏天比冬天高，温度高，振动的速度增加，音高也就升高。管乐器在开始吹奏时，比吹了一会后的高度要低。在刚吹奏时，管内空气较冷，吹了数秒钟后，管内的空气逐渐变暖，音高自亦逐渐升高。因此，在交响乐音乐会开始前，在幕内总能听到管弦乐器的各种声音。一方面是为了手指的灵活性；另一方面，也是为了使管乐器的音高稳定下来。我们发现冬天管乐器的音特别低，常对不上钢琴，钢琴的音特别高。相反，在夏天钢琴的音又特别的低。究其原因，是因为钢琴的钢丝是热胀冷缩的。在冬天钢琴的弦略有收缩，以致音高略有升高，而管乐器却因温度低，音高明显地降低，在夏天恰恰相反，这样管乐器和钢琴的音高，经常闹别扭。

空气的湿度增加，音速也适当地递增。在返潮天里，听远距离的声音，比晴朗天更清楚，这是由于水滴虽比空气重，但含有一定程度的水蒸气的空气却比空气轻。例如白云常浮在云的上层，它的空气分子较松，传音快。但到水蒸气变成水滴时，就比空气重了。因水滴和空气的密度不同，传音的速度也就慢了，因此，有雾天和下雨天，传声比晴天来得差，就是这个道理。据美国声乐家扬（R.W. Yang）报导：当湿度增加