前 言

除了各门学科本身的不断发展、深化、提高、扩展以外，当前的科学、文化发展有以下三个显著的特点：

一是各种学科的交叉渗透达到了一个新的阶段。如果说两门自然科学之间的交叉，如生物物理、地球化学等可称之为第一类交叉学科，自然科学向社会科学的渗透，数理统计用于经济学、社会学等可称之为第二类交叉学科，而进入本世纪六、七十年代以后，则是自然科学、技术科学、社会科学、人文科学以至于艺术和哲学等各种门类的学科的交汇和融合，这是第三类交叉学科。当前，无数交叉性的新学科如雨后春笋般出现，已经分不清楚是属于哪种科学的门类了。越来越多的跨不同门类学科的专家在一起合作，并且出现了不少兼通两种或多种学科的专家学者。

当代科学发展的第二个特点是主体与客体的统一，而这种统一是以人为中心的。本来，不论是科学、技术以至全部文化艺术，都是人类所造、为人类所用的。随着人类社会生产力水平的迅速提高和精神文明的不断进步，人们已有更多的时间和能力，在满足不断提高的物质生活的同时，接受更好的教育，从事精神文明的创造，获得艺术享

需要全本请访问 www.ertongbook.com

受。人们越来越清楚地看到自身的价值。“人是世界上最复杂的真理的结晶”(马克思)。

当代科学文化发展的第三个特点是计算机渗入所有的学科领域。

音乐与物理的关系，加上人们对音乐的创造和接受，正好体现了这三个特点。

音乐是一种声波，可以把他称作为音乐声波。因此，它具有机械纵波的一切属性。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、音乐声的传远和衰减等等问题；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；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。乐器本身是一种产生音乐声的物理仪器，它的分类、材料的性质、结构、振动的模式、声学参数、调试、维护、测量、表演等无不涉及物理问题，电声乐器的发声原理及调试加工、音响设备、音乐在厅室里的传播、歌唱发声的原理以及研究音乐的方法等，也都离不开物理。

很久以前就准备写一本有关音乐与物理之间关系的小册子。但是，究竟应该怎样写才能既生动活泼、新颖，又有一定的深度。直到最近我把这几年在北京大学对学生开设的“音乐声学概论”课程的内容成书以后，才重新着手此事。

本书力图通过音乐的外在表现讲明其物理基础，包括与音乐有关的主要物理内容，既能包括有关音乐声的比较

经典的内容，又包括新的发展内容，有深有浅，适合不同程度的读者。本书还试图从当前科学与艺术发展的特点和共同规律，来讨论音乐与物理的关系。

本书涉及内容范围较广，一定会存有不当之处，衷心希望批评指正。

在写作本书过程中得到和明霞、孟祥鹏、毕思胜、孟瑶等同志的大力协助，在此向他们表示诚挚感谢。

第一章
绪论

§1 音乐与自然界

音乐是什么？这是自古以来人们不断探索的一个课题. 不同的时期，从不同的角度，人们有不同的见解.

可以说音乐是人们心灵的呼唤，人类感情的升华，科学与艺术的结合，也可以说音乐不过是声波的一种而已.

古人曾经认为，音乐是一种自然的反映。古希腊人曾把音乐的标志画成一张弓,上面有弦,有箭. 弓箭是一种狩猎的工具，而其本身又是一种乐器。这种标志作为一种音乐的象征一直演变流传至今，如(图 1-1). 中国古代也传说,黄帝命一位名叫伶伦的乐官到西山采集竹子，作为十二律的律管. 这些都反应出音乐来自自然. 在人类掌握自然规律不足时期，喜欢任意的类比，在我国古代就有人曾把音乐中的六律和六吕，即黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑洗、仲吕、蕤



图 1-1 音乐的标志

宾、林钟、夷则、南吕、无射、应钟依次对应从十一月到次年十月的十二个月份，如下表，这当然是无科学根据的.

应钟	无射	南吕	夷则	林钟	蕤宾	仲吕	姑洗	夹钟	太簇	大吕	黄钟
十月	九月	八月	七月	六月	五月	四月	三月	二月	一月	十二月	十一月

不管是西方还是东方，都有人把音乐与颜色对应起来.就算是大科学家在未知事物面前也不免流俗，如牛顿曾以赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫对应于 C、D、$^{\flat}E$、F、G、A、$^{\flat}B$ 七个音名：



自然界司空见惯的声响：潺潺的小河流水，唧唧的虫声细语，或是自然界有节奏的回声，阵阵的海浪拍岸，声声的林涛起伏……都已经进入了我们的音乐之中，而且还用电子合成器来模拟和仿制.

让自然的某种存在，如色彩、温度以至于人的呼吸来调制音乐，甚至把复杂的生物分子结构利用计算机与音乐对应起来等等. 这也许是人类回归自然的一种表现，也是当前科学与艺术发展的一个趋势.

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§2 音乐声学——科学与艺术结合的宁馨儿

科学与艺术的关系在近几年又被不少人重新提出来了. 事实上它是一个一直被前人先哲们争议不休的古老课题. 自古至今，多少科学家、艺术家、哲学家对此发表过他们的真知灼见. 有人强调他们之间的差别，认为“科学探索大自然,而艺术则探索人的心灵”;“科学著作的生命很短，而艺术则永葆青春”. 有人则强调它的共性，认为“艺术家的猜想与科学家的发现多么相似”. 直到现在，人们仍在争论：未来属于科学还是属于艺术？

早在古希腊时代，科学与艺术就是相互沟通、相互渗透、并存发展的. 在声学的发展过程中，音乐与物理、数学一直密切相关. 许多科学家、哲学家认为，科学的谐和与艺术的谐和都是美的体现.

然而到了中世纪以后,科学与艺术在形式上分了家,并各自向着自己学科的深入方向发展，内容也越分越细，这当然是一种进步. 但是，一道不可逾越的鸿沟在科学和艺术之间形成了，并且在人类发展的相当长的时间里，人们对它们的共性没有作更多的强调.

随着近代科学的发展，人类又重新认识了科学与艺术之间不可分割的内涵所在. 正如 19 世纪法国文学家福楼拜所说:“艺术越来越科学化,科学越来越艺术化,两者在山麓分手，有朝一日，将在山顶重逢”. 而今天这种重逢已并

非是一种简单的握手，而是有着更深更广的内涵，更新的形式和表现. 这也正说明了人类文明正在攀登一个新的高峰。

当前，科学与文化的发展，除了有各门学科各自的前沿以外，还有三个特点：一是各种门类学科，包括自然科学、社会科学、技术科学、哲学和艺术等学科的交叉与渗透；二是作为主体的人和客观世界的融汇和结合，人们越来越看到自身的价值；三是计算机的渗入. 音乐就处在这三个特点的交汇处. 以往以研究音乐的客观基础及乐器发声为对象的科学——音乐声学，现在已涉及到物理学、音乐艺术、电子学、计算机科学、生理学、心理学、美学等学科. 因此，现代的音乐声学已经是一门与高科技结合的新的交叉学科. （图 1-2）

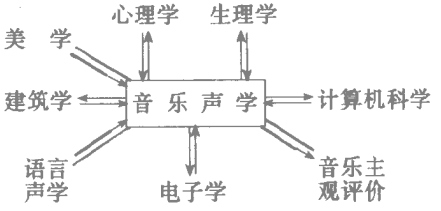


图1-2 音乐声学与各学科的关系

科学与艺术有许多共同的规律. 比如：

要素构成规律：即每个学科的各个层次，都是由一些要素构成的. 音乐的物理实质是振动的传播. 振动由强弱、频率、时间等要素构成. 反映到主观听感上,又有音调、响度、音色和时值等要素. 而这些要素的汇合又形成了高一层次的旋律、节奏、和弦、曲式等. 这些高一层次的要素又进一步形成了不同的音乐风格和体裁. 又如物理学的各

个分支也无不由一些基本物理量汇合而成。

形式规律：包括对称、节律、统一、对比、均衡、比例、变化、主从、运动、装饰、符号规律学等。例如：构图要均衡,物体结构要均衡,心理要平衡;音乐有节律,天体有运动周期，经济发展也有节律；音乐有装饰，美术也有装饰等。

量的规律：自然科学是定量的，这不容置疑。社会科学，如国力评估、物价指数等，也是定量的。在艺术的范围里，如：音色的感觉、音乐的评价等等都是朝着定量的方向发展，电子计算机应用于艺术，更促进了量化的过程。

创造规律：音乐与物理及其他学科一样，需要创造性思维。如归纳，抽象、演绎，多元化的思维触角，信息反馈等，这些都是普遍的。形式方法、结构方法、移植方法、模拟方法等发明创造方法，不管在哪里都是行之有效的。

学科思想规律：各个学科的各个局部均有其具体的指导思想，如物理思想、建筑思想、发明思想、文学创作思想、音乐创作思想等。

美的规律:人间万物充满着美,有自然美、音乐美、技术美等。一切美好的事物总是人类所向往的。追求美是人的天性。

在这本小册子里，我们把音乐声学作为科学与艺术结合的产物来对待，把它放到当今时代的列车上，站在纵观当前科学、文化发展特点的高度，从科学与艺术结合的角度，自觉地应用科学与艺术的共同规律，以发展的眼光去叙述音乐与物理的关系。在以后的章节中，我们将选择一些问题来一一进行讨论。

§3 是音乐还是物理
——声学发展的历史

声学是自然科学中最古老的学科之一. 在人类诞生以前，自然界即有声源的存在，如雷声、风声以及海浪拍击声、山崩地裂声等.



图 1-3 希腊毕达哥拉斯和他的学生们从事音乐研究

声学从一开始就与音乐分不开。从古希腊时代起，毕达哥拉斯就研究重量不同的铁锤敲击能发出不同的音，得出重量与发声的高低有关的结论（图 1-3）。继后，伽利略用不同弦线的振动研究音的高低。18、19 世纪的克拉尼研究膜、竿、板的振动图案。19 世纪的亥姆霍兹提出的和声理论，至今仍是声学研究中的重要基础。亥姆霍兹认为,乐音是空气的周期振动引起的，乐音可以用音调、响度和音色区分，由泛音的数目及强度决定音色。19 世纪爱迪生发明记录声音的机器，用来记录声音。如今，英国的音响博物馆还有世界上第一次记录下来的“玛丽有只小羊羔”的珍贵资料。

我国声学发展史中，主要的成果是乐器制造。曾侯乙编钟集中反映了我国在几千年前声学的成就。编钟跨有五个八度的音域；用十二律并兼有五度、三度关系；有六个调记录；有标准音高；而且发展了有两个基频的编钟。另外，我国古代对于共鸣的研究，弦的振动、管的音调的研究等都是通过乐器来进行的。

从近代的声学发展来看，在电声发展中，音乐电声占有很大的比重。建筑声学中音乐厅、歌剧院、电影院、多功能场馆的建筑都是与音乐离不开的。语言声学的研究与音乐声学有许多处是相重叠的。心理声学与生理声学当然与人的歌唱发声、嗓音结构及对音乐的接收和感受分不开。声学学科中对乐音的测量始终是一个不可缺少的内容。计算机科学中，计算机音乐是一个正在兴起的分支。不仅是可听声，谐波中的超声部分对音乐也是起作用的。

声学无非是研究声的发生、传播、接收、声的性质以

及声与其它物质的相互作用．无论国内外，从历史到现在，研究发声常常是用弦和管的发声来进行的．在声源的研究中，音乐又常常是重要的．声的传播也用钟、弦的传声远近以及室内乐音的传播来研究．对于提高音质的要求也莫过于音乐声．共振、驻波的研究也用的是琴弦、琴室等．因此可以说，声学的发展离不开音乐．

§4 一件人人皆有的乐器
——人体乐器与歌唱

会演奏一件乐器还不如有一副好嗓子．从婴儿降临人世的第一响哭声，就使用了“人体乐器”，从此参与了人生生命历程的“大合唱”．

歌唱是人声唱出的音乐，这是一种最古老而又最自然的音乐．按传统观点，人的歌唱与乐器发声并列，是音乐的两大组成部分．

人体的各个与发声有关的器官就好像是一件乐器的各个部件．有人把“人体乐器”比喻为一件管乐器，另一些人比喻为簧振乐器，还有人则比喻为簧管乐器．现在，让我们先看一看“人体乐器”的结构和组成吧．

无论哪一种乐器发声，都要有个动力即能源．不管把人体看作管乐器或簧振乐器，“人体乐器”有一个声能源，它也在“乐器”本身里面．歌唱是用横隔膜把肺部中的空气“顶”上去，使声带振动，或者是在咽腔、鼻腔、口腔里发声和共振．我国古代民间常用词“丹田之气”，“以气

需要全本请访问 www.ertongbook.com

托声”等亦属此意.

人体乐器的发声部分是气流经喉管中的声带的调制并经咽腔、鼻腔和口腔等的共振. 而口腔还包括有舌头、舌根、下巴的影响.

人体乐器有三个共鸣腔，即咽腔、鼻腔和口腔（至於民间艺人的语言,可能还有别的说法),它们直接起共鸣的作用.

不管怎样，人体乐器是世界上最复杂的乐器：它有众多的部件，而且所有的部件包括声带、咽腔、鼻腔、口腔以及舌头、下巴等都是活动的、可调节的；在唱歌时差不多全身的肌肉、肢体都在运动，而且视觉系统、神经系统也在协调工作,寻找自我配合、自我完善,并参入合唱、伴奏配合；它是一件没有定形的乐器，因为每一部件都可以随时调节而处于不同的运动状态；它是一件可以自由控制的乐器，可以控制真假嗓音及各种唱法，如西洋美声唱法，中国美声唱法，中国戏曲唱法，通俗唱法等；而且人体乐器是因人而异，每个人都是不同的.

因此，人体乐器的潜力是无限的，它可以开发出无穷无尽的新功能，创造出越来越好的音色，使人们越来越方便地掌握它.

§5 美好音乐享受的背后
——一场音乐会中的音乐物理问题

到现场去听一场音乐会，在一个具有高度物质文明和

精神文明的社会里，对于一个普通劳动家庭来说，是一个节日。这是一种文化，一种享受，也是一种感情的交流，还可以说是一种美的升华。然而你知道吗？在音乐中还包含了许许多多的物理问题.

报幕员出来了,如果是一个不用扩音设备的音乐厅,那他站的地方一定是舞台正中偏前的位置，在这个位置上讲话，全场听起来最清晰，声音也最响. 北京中山公园音乐堂的舞台干脆做成一个扇面，报幕员站在扇面的焦点上.

音乐厅的听众大厅，有的做成长方形，有的是扇形。顶棚有的高，有的低. 四边的墙壁常常用木板做成“孔隔”、“窝状”. 这些都是通过声音的反射来控制声音的音质及其在大厅内的分布。还有，帷幕、座椅、顶板、墙壁、地毯等都有吸声的问题.

乐队上来了。为什么第一小提琴、第二小提琴、中提琴、大提琴和大贝司之间有一定数量比例？为什么弦乐器与管乐器之间又有一定数量比例？所谓单管制、双管制、三管制的管弦乐队配置又意味着什么？乐队在舞台的位置如何？同一类乐器处在一起是为了什么等等. 这里包括有音量问题和音色问题，即声音的叠加和强弱的配比，而在强弱的比例中又还有音色的配比.

各种乐器的发声机理当然是物理问题，不同的乐器有不同的音色，因此，乐器之间都有着传统的“搭配”。乐器的分类方法最普遍的也是最科学的是按其发声的物理机制分类。

和声、和弦、声音的协和以及中国唢呐的‘不合群’等也是一种物理现象. 而配器，也无非是各种音色、音量

搭配和穿插。你能同时听到并分辨出不同乐器，这是由于声波独立传播的性质造成的。

如果剧场用了扩音器，或者是录音设备，那么，舞台上分布的、乐队前摆放的、歌唱者手里的传声器，俗称“麦克风”,无论从其类别、性能、放置位置、高度、相互间的距离等都是不同的。这些都是音乐电声问题。音乐电声问题还有音箱的类别、性能、个数、放置位置等。弄得不好，还会有反射声与歌唱声脱节，扬声器发出尖叫声等。

舞台上现在有声控的音乐灯光，也是靠声音的强弱去控制的。

§6 音乐的自然科学基础——音乐的物理内容

既然我们明确了音乐是声音的一种，现在，让我们从学科的角度来看一看音乐的物理内容。由于声音是振动的传播，因此，物理学就是音乐的自然科学基础，音乐中包含着许多的物理内容。

音乐的产生,也就是音乐声源,如弦振动、簧振动、膜板体振动、人的歌唱以及电振荡等属物理声学问题。

音乐在各种场合的传播，涉及声的反射、折射、绕射、吸收和隔声等也是物理内容。

电声音乐中的换能是把音乐的振动转换成电的振动，然后进行加工、控制，这是电学和声学的换能，也包括信号处理、调制、放大等物理内容。

乐器制造实际上是一件发声的物理仪器的制造.

音乐的测量，包括频率、强度、时间、频谱、动态等都是物理测量. 制造乐器的许多材料性能测量也都是物理测量.

研究音乐性质如音质好坏、振动模式等，都是利用物理方法.

音乐声的心理、生理实验方法，实际就是物理实验方法在音乐中的运用。

音乐研究离不开物理，但是，物理又不是音乐的唯一内容,音乐声学还要把物理和生理、心理因素结合起来,例如 ：

音质的好坏，除了客观地用物理仪器测量以外，还要有主观评价。要把主观评价的客观基础与主观感受联系起来. 因此，音乐要反映主体与客体的关系，这里也有审美问题.

人对音乐的感知大多是通过耳朵的. 立体声效果是建立在双耳效应的基础上。耳朵的能分辨阈值，包括对音调的差别、声强的差别、时值的低限等，都要与客观的物理量结合起来考虑，这是音乐与生理的直接关系。还有，音乐反映人们的心理状态，传递人与人之间的感情，这又是音乐与心理学的关系.

现代音乐已经跨入计算机时代，这个问题在下节中将专门进行讨论. 音乐与激光、电子学、无线电等高科技都有着广泛的联系.

因而，我们介绍音乐物理基础的同时，还要与电子学、建筑学、计算机科学、心理学、生理学、美学等联系起来，

也就是说，现代音乐声学是一种多门类的学科交叉，是一门既古老而又崭新的边缘学科.

§7 音乐与高科技的结合
——计算机音乐的内容

当今的时代是高科技的时代。计算机的诞生促成了新的技术革命，已经深深地改变了世界的面貌．计算机已经进入人们生活的各个方面，因而，进入音乐也是不可避免的．同别的领域一样，计算机进入音乐，必将对音乐带来深刻的变革.

有一种说法是，认为我们下面讲的音乐电脑演奏系统或 MIDI 系统就是计算机音乐，这是不够的．计算机音乐包括的内容极为广泛，几乎传统音乐涉及的一切方面，计算机都可以渗入．计算机还使音乐开拓了前所未有的广阔天地．可以认为，凡是音乐与计算机有联系的各个方面都属于计算机音乐．从已有的材料来看，计算机音乐包括有以下内容：

音乐的数字合成．利用计算机技术，可以合成已有的各种音乐声和各种音色，也可以合成自然界中以及现有世界上还未有过的声音．音乐的数字合成可以用于电子合成器，音源块，鼓机（节奏发生器），电子琴中的音源片等.

音乐的数码录音，这是把音乐信号取样后，经过 A/D 转换把模拟信号数字化并编码，变成记录信号贮存；然后再放音，经 D/A 转换重现音乐．数字录音的优点是频响好，

保真度高，动态范围广，重放精度高，多次复制不会降低质量，记录密度高，体积小等等. 音乐的数码录音技术现在发展得很快，越来越简便，已经可以直接录、存、放和多次重录了.

音乐的数字控制．这是指对数字化了的音乐信号进行编辑加工，也可用于实时控制. 电脑音乐喷泉，色彩音乐等也是一种数控.

乐器数字接口．就是 MIDI,这是一种实时地传输音乐的定时信息和控制信息的一组数字编码，以及传输这些数码的硬件接口的技术规范. 80 年代后 MIDI 技术已经得到很大发展和被迅速推广使用. 利用 MIDI 技术制作音乐,一个人或很少人就可以做出有整个乐队的音乐效果来，从而使电子音乐更加迅速传播和被应用.

计算机作曲. 包括一是计算机的随机作曲,实际上,不可能是彻头彻尾的随机作曲，那将是无法入耳的，总是规定一些条件，然后让计算机在一定范围内随机作曲．二是按一定规则的逻辑作曲. 三是计算机作曲的最高形式即智能作曲，这是人们的期望. 利用计算机特有的音乐语言、技术性能和表现手法，可以作出有独创性的音乐作品.

计算机辅助作曲．可以用计算机输入，贮存、重放音乐. 由于可以用琴键输入，实时记录下来，并重放音乐或重现乐谱，所以可以算作辅助作曲. 如果你不会演奏琴键，还可用机键把音乐“键”(“敲”)入. 计算机辅助作曲也包括自动配和弦，配伴奏等. 还可以按一定曲式、调式、和弦变化、节奏型、旋律音型、音乐的织体等，根据你键入的几个音编成曲子. 目前已有这样现成的软件，可以奏出

需要全本请访问 www.ertongbook.com