

第一章 钢琴调音理论探索的回顾

第一节 钢琴发展简史

通常人们认为真正的第一架现代钢琴是由意大利羽键琴制造者克里斯朵夫 (Bartolomeo Cristofori) 于 1709 年研制的被人们称为 “gravicembalo col piano e forte” (一台既能演奏柔和音色又能演奏强烈音色的大拨弦古钢琴) 的乐器。在 2000 年 3 月初于美国华盛顿西蒙索尼恩国家历史博物馆举办的 “钢琴 300 年” 展览中, 人们得以再次回顾它三个世纪来所走过的光辉的历史。但值得一提的是, 据 “钢琴 300 年” 展览的承办人之一帕特里克·拉克尔 (Patrick Rucker) 介绍: “在佛罗伦萨保存的梅蒂奇 (Medici) 家族的文献中, 提到了关于一件新乐器被发明的事件, 并称 ‘该键盘乐器能够发出或轻或重的声音’。其日期标注为 1700 年。因此, 我们可以得知, 早在 1700 年克里斯朵夫就已经制作出了至少一架这种新式的乐器。18 世纪, 英国人用 “pianoforte” 和 “fortepiano” 两个短语来描述这件乐器。18 世纪以后直到 19 世纪初, 一些学者仍然愿意用 “fortepiano” 这个名字。但是这个名字在一些斯拉夫 (Slavonic) 国家中, 也是指现代钢琴的意思。在德语中, “Hammerklavier” 是指一般的钢琴, 通常是指立式钢琴而不是指三角钢琴。

当然所谓的现代钢琴也不是凭空出现的, 钢琴最早的起源, 可以追溯到古埃及与古希腊的弦音计 (一弦琴 Monochord)。将弦音计增加琴弦数量, 发展出两种形式的多弦乐器: 一种是手拨式多弦乐器, 14 世纪与键盘结合形成拨弦古钢琴 (harpsichord); 另一种形式是槌击式多弦乐器, 在发展中演变成多种击弦乐器, 其中和键盘结合的一种, 在 15 世纪初逐渐形成并被称为击弦古钢琴 (clavichord)。这两种古钢琴是现代钢琴的前身, 同时钢琴的发展也受到竖琴和管风琴的影响。

拨弦古钢琴和击弦古钢琴是以键盘演奏为共同特征, 以琴弦振动为共同音源的乐器。

一 拨弦古钢琴 (Harpsichord)

拨弦古钢琴除了键盘的演奏形式同现代钢琴有相似之处外, 在外观上同现代卧式钢琴大体相似。虽然拨弦古钢琴同为以键盘为演奏特征, 但激发琴弦的方式有所不同, 它是在键尾端装置由皮革裹制成的拨子, 拨弦发音 (也有用羽毛作拨子的, 故亦称羽管键琴) 这种激发琴弦的方式, 有其不可克服的弱点: a. 拨弦时

产生噪音 b. 音量太小且变化较少 c. 声音短促。这些决定了它的音乐表现力不足，但它的音色有其独特之处，在以宫廷室内乐为代表的音乐形式盛行的古代，它有着无可替代的功能。

二 击弦古钢琴 (Clavichord)

击弦古钢琴与现代钢琴有着更近似之处。它是在键盘尾端装置金属物，按动琴键击弦。由于它没有今天的击弦机构，金属物击弦后不能及时脱开琴弦，并影响了琴弦的自由振动，其音量较小，但它可以通过按键力度的变化来改变击弦的力度，因此弦的音量变化较拨弦古钢琴稍好。令人称奇的是，击弦古钢琴可以在小范围改变音高而产生如古筝揉弦的音响效果，它是以琴键尾端的金属物顶住琴弦，制音器止住琴弦的上半部分，琴弦下半部分继续发音，通过改变手指对弦的压力，使琴弦发生曲折，改变张力导致音高有所变化。击弦古钢琴与拨弦古钢琴就像同一家族中的两姐妹，以琴弦发音的共同特征、共同的演奏形式、稍有不同的音色特点，在欧洲音乐史上繁荣了 300 多年。（金先彬、冯高昆、芦桂芳，2002：第 2 页）

三 现代钢琴的诞生与发展

1698 年，意大利管风琴制作师巴尔托洛梅奥·克里斯朵夫（1655-1731 年）为佛罗伦萨的贵族菲迪南德·梅蒂奇（Ferdinand Medici）制作了一架与羽管键琴外形和结构相似的钢琴。1709 年，克里斯朵夫又制作了一架能同时演奏弱音和强音的钢琴，从此开始了钢琴艺术的历史纪元。在意大利语中，“钢琴”就是指能同时发出强音和弱音的羽管键琴。后来，克里斯朵夫将闲暇时间完全投入在钢琴的革命性发明中，从 1709 年到 1732 年逝世为止，他一共做出了 25 架钢琴。^①

人们普遍认为现代钢琴的发明者是克里斯朵夫，他是意大利佛罗伦萨梅蒂奇家族的一位乐器制作师。18 世纪初，他以拨弦古钢琴为原形，制作出一架被称为具有“强弱音变化的古钢琴”他在钢琴上采用了以弦槌击弦发音的机械装置，代替了过去拨弦古钢琴用动物羽管拨动琴弦发音的机械装置。从而使琴声更富有表现力，音响层次更丰富，并能通过手指触键来直接控制声音的变化。在克里斯朵夫的第一架现代钢琴出现后的一百年里，拨弦古钢琴仍为人们所应用，但更多地是为演奏特定作品而使用。1709 年后，克里斯朵夫又进一步改革了原来击弦机的结构，他在这部机械中安装了一种与现代击弦机的复震杠杆系统近乎完全一致的起动杠杆，使击弦速度比原来加快了 10 倍，而且可以快速连续弹奏；音域

^① <http://piano300.si.edu/bios/rucker.htm>

也增加为4组；可以说这就是现代钢琴的雏形。他的这一发明为以后的钢琴制作师们打开了通往成功之路的大门。但遗憾的是，克里斯朵夫的发明并没有得到他的意大利同行及当时演奏家们的注意，却在异乡得到了继承和发展。

德国管风琴师、制作师戈特弗里德·西尔伯曼^①(Gottfried Silbermann)，在1730年根据一份绘制极不准确的意大利钢琴草图，借鉴克里斯朵夫的发明，制造出德国第一架钢琴。他把这架琴送到音乐大师巴赫那里鉴定，巴赫却不屑一顾，只是说道：“触键太重，高音音色太弱。”但他还是提出了一些建议。在采用了巴赫的建议之后，经过14年的革新，于1747年使这架钢琴更加完善。同年，巴赫在波茨坦进宫晋见腓特烈大帝时弹奏了西尔伯曼的新型钢琴。

西尔伯曼对钢琴改革的主要贡献在于对钢琴制音器的运用。他利用手动音栓使全部制音器离弦，以使钢琴的音响效果更丰富并具有神秘色彩。对于我们今天的演奏家来说，这种性能在现在钢琴中是用脚迅速而敏捷地控制着，很难想象当时是用手来操作的。

钢琴虽诞生在意大利，却在德奥和英国得以发展成长。至18世纪中叶，人们对钢琴的制作工艺实行革新，以使其演奏性能日益完善。这一时期，西尔伯曼及其子弟在钢琴的变革中起着主导作用。

西尔伯曼的名徒被称为“十二弟子”，他们分别制造出两种不同风格的钢琴，即“维也纳式击弦机钢琴”和“英国式击弦机钢琴”。他们具有不同的机械性能和不同的音响效果，由此形成两大不同的钢琴制作流派。这两种流派，也对当时的音乐家们产生了具有历史意义的影响。“维也纳式击弦机钢琴”的键盘触感较轻，能够弹出快速的音符，音色变化细微，在与管弦乐队协奏时，音色对比清晰。这正符合莫扎特温文尔雅又富有歌唱性的快板的音乐需要。

约翰内斯·楚姆佩(Johannes Zumpe)是西尔伯曼的名徒之一，他于1760年来到英国，成为著名钢琴制作师；他的产品被称为“英国式击弦机钢琴”。这种钢琴触感感觉较重，但声音浑厚深沉，正适合于克莱门蒂那坚实有力的音乐风格。莫扎特和克莱门蒂当时是名声同噪的钢琴演奏家，由于他们演奏风格的不同，他们分别使用结构各异的维也纳式和英国式钢琴。1789年1月，莫扎特和克莱门蒂在维也纳奥国国王的王宫里举行了世界上第一次钢琴演奏比赛，成为轰动一时的大事。这次比赛对提高钢琴在诸乐器中的地位起了重要的作用。

虽然在克里斯朵夫1709年创制的现代钢琴中就有了早期击弦机，它能够让手指通过对琴键的控制，随心所欲地增强和减弱击弦的力度，使音量、音色得以控制，而大大地丰富了现代钢琴的音乐表现能力。但那时的表现力远不及今日完善，今日的击弦机是自那100多年后，于1821年由法国人塞巴斯蒂安·埃拉尔

^① 现在“西尔伯曼”(Silbermann)这个名字已经成为德国一个著名钢琴品牌。

(Sébastien Erard, 1752-1831)^①改进后才臻于完善。

钢琴在它诞生的头一个世纪中经历多次改良。虽然开始它被形容为是锅炉工制造出的粗陋机械，少有优雅之色，在表现细腻的情感上逊于拨弦古钢琴和击弦古钢琴；但随着时代的变迁，音乐由巴洛克风格向古典主义演变，声音尖锐、古板、缺乏生机的拨弦古钢琴被音响丰富、细腻、洪亮的钢琴所替代。

1780年，瑞士人舒迪（Burkhard Tschudi）创制了制音踏板，从而提高了音乐的和弦连接能力，增强了共鸣效果，同时也使音乐获得清晰的顿音效果。

19世纪初，法国人埃拉尔开始在琴架上使用金属支撑杆。1809年，埃拉尔改进了钢琴机械，可以使小槌迅速地重复击弦，在这样的钢琴上就能弹奏比较复杂的乐曲了。这种结构形式至今还使用于卧式钢琴上。1822年，埃拉尔又迈出了重要的一步，那就是在钢琴中使用了双重擒纵装置，这就使演奏者能够迅速地连奏同一个音，于是就可以用钢琴来演奏各种旋律。现在的钢琴都是采用双重擒纵装置，因此埃拉尔被誉为“现代钢琴之父”。

1811年立式钢琴诞生了，它使得钢琴放下了它几百年的华贵身价，进入了寻常百姓家，为钢琴的广泛传播铺就了广阔的道路。

1825年，使用铸铁支架的钢琴问世了，这一改革对钢琴的发展也极为重要，铸铁支架（铁骨）的出现为钢琴使用钢丝弦提供了可能，为加大钢琴琴弦的张力奠定了基础，使改善音色、加大音量成为可能。

1826年，美国工程师霍金斯（John Isaac Hawkins）采用了轴钉、轴架和攀带改进了击弦机构。在这一时期内还有不少制造者对钢琴的支撑结构、弦列的安排以及小槌材料等进行了改进。

1826年，德国人亨利·帕普（Henri Pape）想出了一个很有创意的办法，那就是用尼绒垫代替琴槌上的皮垫。

1850年，支撑结构、弦列的交叉排列和复震奏式击弦机三要素相结合，从此确立了现代钢琴结构最理想的基本形式。从那时开始到现在的100多年，钢琴的内部结构几乎没有作过多少改动。

音乐创作的发展进一步推动了钢琴制作工艺的进步。从1860年起，人类进入了真正的钢琴时代。英国的乐器制作大师布罗德伍德（John Broadwood）对立式钢琴的琴弦设计进行了改进，使低音音域更加宽广，同时还用踏板代替了操纵旋钮和漆板。布罗德伍德还对三角钢琴也进行了改进，使钢琴的声音增加了强度和共鸣性，但同时又使声音的清晰度有所减弱。此外，三角钢琴和立式钢琴也出现了一些重要的发明，比如琴弦交叉安装，既加长了琴弦，同时又使摆放琴码的位置变得更加合理，而低音琴弦和高音琴弦的重叠，使钢琴获得了更加理想的共

^① “埃拉尔”（Erard）这个名字成为法国巴黎最早的钢琴品牌之一。

鸣效果。^①

随着社会文明的发展，钢琴在上流社会越来越受欢迎，新的钢琴品牌应运而生。19 世纪，工业革命推动了机械制造业的发展，钢琴制作技术又有了新的改进，乐器制造商们不遗余力地改进制作技术，为钢琴注入了更丰富的音色。

20 世纪钢琴进入了现代化阶段。20 世纪的作曲家在创作钢琴音乐时，尝试写作各种风格的钢琴作品，尤其是在开拓钢琴的乐器演奏功能方面，一些全新的演奏因素被引进到作品中去。比如，相当一部分作曲家将钢琴当作纯粹的打击乐器来看待；还有些作曲家出于对浪漫主义美学思想的反叛，运用一些激烈、尖锐的情绪到钢琴创作中，使得某些钢琴音响偏于尖锐、明亮。在这些作曲家中，克劳德·德彪西（Achille-Claude Debussy, 1862~1918）表现得最为突出。德彪西不仅是一流的钢琴演奏家，同时又是杰出的钢琴作曲家。他在音乐创作中进行了许多新的探索，把钢琴当作一种可以制造丰富的色彩和独特的音响效果的调色板，激进的和声语言是他为 20 世纪音乐创作带来的新鲜活力，也为钢琴制造提出了更高的要求。

从第一架古式钢琴的出现到现代钢琴的广泛运用，经历了近 300 年的历史。经过历代制琴大师的不断改进，钢琴的构造日趋完善，音色更加完美，它已经成为现代乐器中音域最广阔、表现力最丰富的键盘乐器。三百年钢琴的历史发展不仅反映了人们在音响审美上的追求，还勾勒出了乐器和演奏者之间的相互促进关系。然而钢琴家在将自己的情感与心境投入钢琴作品时，完成的不仅仅是对作品的二度创作，更多的是演奏家在追求琴人合一的境界，实现钢琴作为自我情感媒介的功能。钢琴历史的三百年，就是人类文化所经历的三百年。钢琴之所以伟大，就因为它是人类酸甜苦辣三百年的象征。^②

第二节 钢琴调律史

说到钢琴的调律，那就不得不提起其他键盘乐器的调律史。我们都知道现代钢琴调音是以十二平均律为基础的，但是十二平均律调音法并不是同现代钢琴一同产生的，而是经过漫长的时间逐渐在其他键盘乐器调律的基础上缓慢发展而来的。直到 19 世纪，十二平均律才成为钢琴的标准调音法，并广为流传，成为现代音乐的一种典范律制。

^① 引自：<http://www.pianoweb.cn/culture/gangqinfazhan.htm>

^② “钢琴艺术三百年”系列之三，——钢琴的诞生，三百年内制造工艺与钢琴音乐的发展。央视国际（2005 年 3 月 22 日 10：52）

一 中庸全音律

键盘乐器调律的基础律制是纯律和各种中庸全音律。欧洲约自 15 世纪至 17 世纪,大致相当于“文艺复兴”时期,这一时期是纯律的发展阶段。受文艺复兴运动的激发,音乐在内容和体裁以及乐器应用和制造等方面,都起了新的变化。宗教音乐得到了显著的提高,复调音乐进入到了新的阶段,人们在音乐实践中对纯律音程有了渐渐系统化的认识,并总结出“纯律”(just intonation)理论,“除了用纯八、五、四度生律,再增添纯正协和大三度音程(即谐音列上第 4、5 号谐音之间的距离)作为生律法的依据,从而形成的律制,称为纯律。”(李玫, 2007: 第 28 页)正是由于这种特定的生律法,也使得纯律产生一个特定的“普通音差”(common comma)约计 22 音分。由于纯律特殊的生律法,使得纯律中产生了大小不同的全音、半音,这也令纯律不得不面对不能自由转调的尴尬。

纯律主要应用在管风琴这种键盘乐器上,由于纯律音阶有大、小全音,一经转调,这大、小全音的差异就到处可见,使律制变得非常复杂,尤其在键盘乐器上突出地体现了这一矛盾,纯律要在键盘乐器上实现就必须解决这个矛盾。15、16 世纪欧洲有人提出“中庸全音律调律法”(mean-tone temperament),把大、小全音加以折中平均。拉莫斯在他的论文《音乐实践》(Musica practica, 1482 年)中已经记述了当时使用中庸全音律的情况。(李玫, 第 181 页)

各种“中庸全音律”的主要优点是能够产生纯律的效果,解决和弦发音和谐的问题。音乐家们通过划分普通音差、或最大音差的不同方法,产生了形形色色的中庸全音律,这其中包括德国管风琴家阿诺尔德·施利克(Arnold Schlick, 1460-1521 年)于 1511 年提出的“四分之一普通音差中庸全音律”(李玫, 第 180 页)、扎利诺(Giosepe Zarlino)提出的“七分之二音差中庸全音律”、意大利音乐理论家兰夫兰科(Giovanni Maria Lanfranco)提出的“五分之一音差中庸全音律”、西班牙音乐理论家萨利纳斯(Frabcusci de Salinas)提出的“三分之一音差中庸全音律”、还有意大利音乐理论家、数学家兼哲学家罗西(Lemme Rossi)提出的“九分之二音差中庸全音律”等等一系列中庸全音律。^①(缪天瑞, 1996: 第 188 页)

在各种中庸全音律中,当时众多音乐理论家最推崇的是阿诺尔德·施利克的“四分之一音差中庸全音律”。16 世纪初,德国管风琴家阿诺尔德·施利克著书《管风琴制造者及管风琴家之镜》(成书于 1511 年),在书中,他从理论上提出,四分之一音差中庸全音律调律法的优点在于使和弦发音和谐,其调整方法是:大全音和小全音之间有一个“普通音差”,是第四次五度相生,一次三度相生而产生

^① 这里所说的“音差”都是指“普通音差”

的，所以把普通音差分为 4 个小音差，每五度生律一次，减去“四分之一普通音差”。不过，法国声学家索维尔（Thomas Sowell）发现，管风琴家和羽管键琴家们却更喜欢五分之一音差中庸全音律。（李玫，第 181 页）

无论怎样，中庸全音律在当时键盘乐器上的使用已经是很方便的了，毕竟它只有一种全音和一种半音，同时又能产生纯律效果，并在一定范围内解决和弦发音和谐的问题，因而在欧洲中世纪至近代的键盘乐器上盛行了数百年之久。但这种律制能用的调域有限，只能适用于 7 个大调和 5 个小调，当乐曲转调超出这个范围时，音阶中就会出现明显不准的音程，俗称“狼音”（wolf tone）。^①

二 巴赫“调节律”

尽管人们采用何种中庸全音律，仍无法解决在大小调上自由转换的问题，17 世纪便有很多人提出多种解决方案。人们不停地实验对“普通音差”和“最大音差”做各种等分的不规则律，演奏家们自己动手，根据演奏的经验，琢磨出恰当的调节律，虽然没有理论的解释，但却是较为实用的。巴赫曾采用了德国音乐理论家、管风琴制造家韦克迈斯特（Andreas Werckmeister, 1645-1706 年）的调节律，（李玫，第 185 页）并创作出了系统运用 24 个大小调的键盘曲 *Das Wohltemperierte Clavier* [德]。现代研究巴赫的专家 Kellner, Herbert Anton 先生认为巴赫的“调节律”是在五度相生律的基础上进行的。他将五度相生律所产生的“最大音差”平均五等分，然后选择五个纯五度分别减去这五分之一的“最大音差”，这样就形成了巴赫的“调节律”。在巴赫的“调节律”中会出现七个纯五度和五个调节五度。整个调节步骤如下：

第一步：从中央 C 出发，向下属方向五度相生，得到最初六律，如：

$^b g \leftarrow ^b d \leftarrow ^b a \leftarrow ^b e \leftarrow ^b b \leftarrow f \leftarrow C$

第二步：以等音观念调整这个结果， $^b g = ^\# f$

第三步：从 $^{\#} f$ 继续向下属方向生律，得：

$^b g \leftarrow ^b d \leftarrow ^b a \leftarrow ^b e \leftarrow ^b b \leftarrow f \leftarrow C \dots \dots b \leftarrow ^{\#} f$

由于是向下属方向连续 7 次生律，此时的 B 音已经比十二平均律的 B 音低 14 音分。于是，就有调节 B 音的必要，将 B 音升高 4.7 音分，得到调节律 B 音，然后由此 B 音再向下属方向进行一个纯五度，得到 E 音，继而由 E 音下生，得到 A、D 和 G 音，此三音各自调高 4.7 音分，这样便形成了巴赫的调节律中的十二个音，同时也产生了七个纯五度和五个调节五度这种独特的音程关系。

^①狼音(wolf tone)在所有会共鸣的乐器上基本上都会出现，实际是该乐器自身的共鸣频率，产生一个额外的大音量声音，这个听起来令人不快的声音就是狼音。尤其在弦乐器上，这些共鸣效果可能导致谐波范围(harmonic spectra)内的泛音消失。

$^b g \leftarrow ^b d \leftarrow ^b a \leftarrow ^b e \leftarrow ^b b \leftarrow f \leftarrow \square \leftarrow g \leftarrow d \leftarrow a \leftarrow e \leftarrow b \leftarrow \# f$

这就是 Kellner, Herbert Anton 在他的著作 *The Tuning of my Harpsichord* 中给我们展示的巴赫“调节律”的具体调节步骤。当然这只是众多解读巴赫“十二平均律”方法中的一种，它也是目前音乐界比较赞同的一种解释。

尽管人们设想了各种对普通音差的划分，都不能解决这样一个问题，即无论多么小的微差，在循环相生若干次以后，这个微差都会像滚雪球般越滚越大。在调性变化越来越丰富的音乐现实中，中庸全音律不是终极解决之路。因此说，十二平均律是历史的要求，只有十二平均律才可以解决自由转调的问题。（李玫，第 183 页）

三 十二平均律

从 16 世纪起，在欧洲，为了解决普通音差所造成的繁杂局面和中庸全音律的不足，不断有人从事十二平均律的研究。荷兰数学家兼工程师斯台文（Simon

Stevin, 约 1548~1620）于 1596 年用 $\sqrt[12]{\frac{1}{2}}$ ^① 计算出了十二平均律半音，但是由于

他对音乐的陌生，自己也没有真正意识到这个成果的重要性，因此这个成果的命运也如朱载堉的成果一般，并没有被应用到音乐实践中去。（李玫，第 188 页）

直到 1756 年才由德国音乐理论家、作曲家马普格（Friedrich Wilhelm Marpurge, 1718~1795 年）倡导运用十二平均律（书面的发表迟到 1776 年），对当时盛行的无规则律设计提出质疑，告诫人们无规则律不可穷尽，键盘乐器应该使用同一种概念和“语言”。到 19 世纪，十二平均律则成为键盘乐器的标准调音法。（李玫，第 185 页）

第三节 现代钢琴调音的基础理论

世界上以弦为音源的乐器有成千上万种，大多都是演奏者自己调整乐器的音准，只有钢琴是专业调律师进行调音。大多数弦乐器都是以纯四度、纯五度为依据进行调弦，因为这两种音程都是准确、纯净的，没有不协和的“拍音”出现。由于这些弦乐器琴弦的张力相对较小，弦轴的力度比较松，演奏者直接用手或工具就可以转动弦轴，按照自己的音律观念调音。而钢琴却需要专业的钢琴调音师，这是因为：首先钢琴是依据十二平均律来调音的，十二平均律中除了八度是纯正协和的，其他所有音程都不纯正协和，而且它们的不协和程度也不同，这就给调

^① 李玫，《相遇未曾谋面——比较朱载堉与斯台文破解十二平均律的方法》，《中国音乐》2006 年第二期（第 16-26 页）。

律师的音准判断带来了困难。没有经过专门培训和较长时间实践练习的调律人员，很难判断出琴弦的正确音准。其次，钢琴的机芯有近乎 8000 个小零件，没有经过正规培训的人很难进行操作。鉴于以上几点，钢琴调律是一门需要专门培训的职业。

现代钢琴调音的方法有三种，一是听觉调音；二是视觉调音；三是听觉与视觉相结合调音。

1、听觉调音。这是传统钢琴调音方法，即调音师以国际标准音高，以十二平均律为调节目标，按照一定的生律程序、以听觉分辨“拍音”为判断依据，以特定的方法使用专用工具对琴弦的强力及机件的合理运动进行调整的，有艺术性质的专业技能。（金先彬、陈重生、张茂林，2002 年：第 2 页）听觉调音的优点在于，所调出的钢琴音准比较符合人类的音乐审美和听觉标准；但不足的是，这种方法掌握起来比较难，缺乏客观检验标准。

2、视觉调音。这是在音准仪产生后出现的一种现代调音方法，即调音师以音准仪作为判断音高的依据，以视觉观察仪器的指示针来确定音高。视觉调音的优点在于，操作简单，准确性高；但也有其自身的弱点，那就是它忽视了音乐是听觉的艺术，抹杀了人类听觉自身的审美取向。

3、听觉调音与视觉调音相结合。鉴于以上两种调音方法的优缺点，人们采取了最简便的方法，那就是将二者结合。这样既能尊重调音师的听觉习惯又能随时检验并纠正正在听觉调音过程中由于各种原因导致的误差。

当然对于这几种调音方法的优缺点，仁者见仁，智者见智。但有一点我们必须认识到，音乐是一门听觉的艺术，失去了听觉，音乐也就失去了它原有的意义。因此，听觉调音必然是钢琴调音的基本方法和主要方法，这一点我们不置可否。

在钢琴调音中，调音师的听觉，并不是我们平时所说的一般意义的听觉，而是在一般音乐听觉基础上更加“理性化”的听觉。即不但要听出声音的高低，更重要的是要能够听出不同两个音频率和频率之间所形成的“拍音”来，并以拍音来判断音高。通俗地说就是：调律师的听觉是经培训而形成的“理性化”的听觉。换言之，音高的感觉本来是人的主观感觉，而调律师的耳朵却是以听拍音为手段，使对音高的听觉判断有了可把握的客观依据。

当然，这并不是一件容易的事情，即使是很有经验的钢琴调音师也不会保证自己调整的钢琴绝对的符合“十二平均律”，我们相信，只要在进行主观听觉调音时采取有效而科学的方法，并在调音过程中及时进行检验，我们便可调出符合人类听觉习惯和审美习惯的钢琴音准来。

一 理论基础

在讨论听觉调音基本方法前，让我们先来了解一些与钢琴调音相关的基本定义。

1、纯音和复合音

从振动角度，我们可以把所有声音分为“纯音”和“复合音”两大类。

“纯音” (pure tone)，是指由单一振动成份构成的声音，即单一的正弦振动波，它也是最简单的声波（例如：音叉发出的声音）。“复合音” (complex tone)，是指由一种以上振动成份构成的声音，即是由多种正弦波叠加而成的复合声波。自然界中，纯音比较少见，通常情况下，物体在振动时，除了整体振动外，同时还有分段振动，因而都属于复合振动。例如，琴弦在振动时，除了弦的整体在振动，其它部分，如 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 段等，同时也在振动。（韩宝强，2003：第 103 页）复合音中各谐音之间的振动频率成简单整数比，而该复合音的振动波又呈周期性，称为乐音。在音乐实践中，绝大多数使用的都是复合音。

纯音频率与其音高：如果将纯音频率从小到大逐渐变化，听感上就会产生一种与此相对应的逐渐变化，对声音从“低”到“高”的逐渐变化进行描述，这就是音高 (pitch) 的变化。

复合音音高：复合音音高因其构成成分的不同而不同。对于包含有一定数目谐音，并且它们之间的频率差又是一个不太小的恒定频率差的复合声，其音高于组成这一复合声的各频率成分中最低频率的音高，即基频的音高。如果某一复合声的各组成成分频率间隔很大，并且它们又不满足谐音关系，听到的很可能是各个组成成分频率的音高。

2、泛音列与谐音列

在复合音中每一个纯音成份都有特定的称谓。在音乐中，物体做复合振动时产生的声音称为复合音。其中，物体做整体振动时产生的声音称为“基音”，而振动体作分段或局部振动时产生的其他分音，又可以统称为“泛音” (overtones)，所有泛音按顺序排列，就形成“泛音列”。不同振动体的泛音列并不完全相同，差异主要体现在泛音之间的频率关系上。不同的振动体之间的泛音关系都不相同，例如，弦振动的泛音列，各个泛音之间是一种整数比的关系，即 $1:2:3:4\cdots$ ，由于这种呈整数比关系的泛音列听起来更具有明确的音高感和协和感，人们就称这种泛音列为“谐音列” (harmonic serial)。

但并非所有的泛音列都可以称之为谐音列。例如膜振动产生的泛音列之间不构成整数比的关系，而是一种非整数比，具体为 $1:1.59:2.14:2.30\cdots$ 。板振动产生的泛音列之间也不构成整数比的关系。（韩宝强，第 17 页）因此我们得知，谐音列只是各种泛音列中的一种形式，它并不能代表所有的泛音列形式。世界上

的乐器也并非都能产生谐音列，音乐是由各种形式的泛音列组成的。

当然在音乐声学 and 音乐理论研究中，为了便于大家理解复合音的构成，人们只能选取泛音列中相对比较容易掌握的“谐音列”，将其形象化和理想化，即把基音和泛音按照音高顺序排列起来。

通常情况，一个乐音在理想的状态下都会有一个谐音列，当然，现实中的乐音并非都如此理想。但是为了便于理解，我们还是将理想中的谐音列具体化，下面我们以大字组 C 音为例，列举其谐音列中的一部分（前 11 个谐音）：

谱例 1



从谱例 1 中能够看出在谐音列中，第一谐音与第二谐音之间是一个纯八度，第二谐音与第三谐音之间是一个纯五度，第三谐音与第四谐音之间是一个纯四度，第四谐音与第五谐音之间是一个大三度，第五谐音与第六谐音之间是一个小三度……。虽然每个音具体的谐音列都不相同，但其谐音列中各相邻谐音之间的关系是相同的。值得一提的是，谐音列中各谐音号不仅有标明各谐音身份的作用，还有着更深刻的意义。

首先，从物理声学的角度来看，可以将谐音号之间的比值看作是各谐音之间的频率比。例如谱例一中，若第一号谐音，也就是基音 C（大字组 C）的频率数为 65.407Hz，第二号谐音 c（小字组 c）的频率数为 130.815 Hz，那么第二号谐音与第一号谐音之间的频率比为 $130.815 : 65.407 = 2 : 1$ ，此比值与两音的谐音号正好符合。

其次，从乐律学角度来看，不同谐音号之间的数字关系显示出了与之相对应的各音程之间的本质关系。古人就已经发现了发音体（管或弦等）的有效长度比与音高变化之间的关系，即在相同条件下，发音体之间的有效长度与音高之间的关系是，长度越长，音高就越低。例如，两根弦的有效长度比为 $2 : 1$ ，那么两根弦所发出的音高之间呈纯八度关系，其音程系数^①便是 2；如果两根弦的有效长度为 $3 : 2$ ，那么两根弦所发出的音高之间呈纯五度关系，其音程系数为 $\frac{3}{2}$ 。谐音列中，第一谐音与第二谐音之间的音程关系为纯八度，二者的音程系数便为 2，而第二号谐音与第三号谐音之间的音程关系为纯五度，二者的音程系数是 $\frac{3}{2}$ ，这样的结果正与谐音号数相一致。正是基于谐音列内蕴含着丰富的内容，人们才

^① 赵宋光：《理论律学的基本方法》，原载《音乐艺术》1984 年第 3 期，现收入《赵宋光文集》第二卷，广州花城出版社 2001 年第 1 版，第 300-314 页。

如此重视，并通过谐音列去不断挖掘和发现更多音乐中的奥秘。

当然在现实生活中，受各种条件的限制，发音体的复合振动及其所能产生的天然泛音，不可能象理论分析的那样完整。由于发音体的固有条件不同，振动的初始条件不同等这样或那样的客观原因也会导致谐音列产生这样或那样的改变，这一点我们将在后面的“钢琴音准曲线”中讲到。

3、吻合谐音

既然我们知道弦振动后都会产生很多相互间呈整数频率比的谐音，那么任何两根弦之间都会存在频率一致的谐音，这就是两根弦的“吻合谐音”（即共泛音）。下一个比较严密的定义，那就是：如果乐音 f_1 的某次谐音与乐音 f_2 的某次谐音的频率相等，称这两个谐音为乐音 f_1 和乐音 f_2 的吻合谐音。从理论上讲，任何两个音之间，都存在吻合谐音，只不过频率比不同时，共泛音分布的密度不同而已。从钢琴调音的实用角度而言，我们所关注的只是那些频率呈简单整数比的四度、五度、三度、六度音程中序数最低的那一组吻合泛音。（金先彬、陈重生、张茂林，第 41 页）我们 c^1-g^1 这个纯五度为例：

谱例 2



根据谐音列我们能够看出，纯五度 c^1-g^1 中两音的最低一组吻合泛音是 c^1 的第三谐音与 g^1 的第二谐音，它们的音高完全重合。

下面我们总结一下几种常见音程中序数最低的那一组共泛音。最直观的方法就是对比几种音程的谐音列。

谱例 3

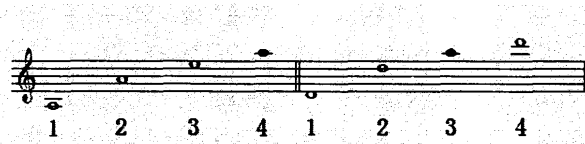
纯八度 $a-a^1$



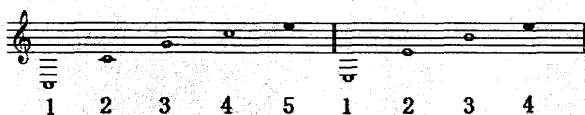
纯五度 $a-e^1$



纯四度 $a-d^1$



大三度 c-e



大六度 c-a



根据上述谱例我们可以总结出：

音程	根音与冠音最低序列的一组共泛音	频率比
纯八度	根音第二谐音 冠音第一谐音	2 : 1
纯五度	根音第三谐音 冠音第二谐音	3 : 2
纯四度	根音第四谐音 冠音第三谐音	4 : 3
大三度	根音第五谐音 冠音第四谐音	5 : 4
大六度	根音第五谐音 冠音第三谐音	5 : 3

4、拍音

“拍音”(beats)^①，是当两个高度比较接近的乐音同时发声时，产生的一种有规律的强弱变化的声音效果。严格地讲，拍音不是真正意义的“音”，而是人耳对声音强弱变化产生的一种“抖动”的感觉，其“抖动”的频率为两音振动频率的差。假如一个音的频率为 440 赫兹，另一个音为 442 赫兹，当它们同时发声时，就会产生一个 2“拍”的拍音。单位时间内的拍的数量称作拍频。

需要注意的是，不是任何两个音在一起都会产生拍音，若想产生拍音必须符合以下条件：

- 1) 两个音在音高上相当接近（仅对纯音而言）。
- 2) 两个音在音强、音色和音长上要比一致。（韩宝强，第 80 页）

当然，以上结论是基于纯音的实验，而在实际音响中，拍音产生的情况更为复杂。譬如，当两个相距超过半音的复合音同时发声时，虽然两个复合音的基音

^① 在 Hermann L.F.Helmholtz, *On The Sensations of Tone*. New York:Dover Publications, Inc.1954, pp.159-173. 首次提到了“拍音”的概念，他从拍音的角度提出了协和感的产生机理。

之间的频率已经超过产生拍音的范围，但是二者的基音与泛音、以及泛音与泛音（共泛音）之间却有可能产生拍音。

钢琴调音就是根据音程中两个音的“吻合谐音”之间产生的拍音进行调音的，当然在钢琴调音中拍音的应用并不是如此简单，它还有各种特殊情况。如果一根琴弦上面生锈、或与弦码间有缝隙、琴弦的质量问题等都会使弦不同程度的出现假拍的现象，这样就导致有假拍的音调不准。因此当同时出现拍频不同的几种拍音干扰听辨时，便要注意把握最低序列的一组吻合谐音。

5、十二平均律

人类在自身的进步与发展中，经常出现某些令人不可思议的巧合，正如十二平均律的产生这般。16 世纪后半叶，中国明朝的朱载堉（1536-1611 年）与远在欧洲荷兰的斯台文（Simon Stevin, 1548-1620 年）几乎是在同时提出了十二平均律这一对后世影响极大的律制。

朱载堉在 1596 年完成的《律吕精义》中详细公布了“新法密律”的方法与数据，使十二平均律成功地得到了数学公式化的表达。朱载堉对十二平均律半音的数理规定用现代数学表达为 $\sqrt[12]{2}$ ，即应钟倍律与黄钟正律之间的音程关系。（李玫，第 116-169 页）

与此同时，荷兰数学家斯台文与 1596 年也提出了十二平均律，他的平均律

半音用现代数学公式表达为 $\sqrt[12]{\frac{1}{2}}$ 。（李玫，2007：第 188-189 页）十二平均律首次解决了十二个半音的循环问题，这样使得各种转调都成为可能，解决了以前多种律制无法解决的矛盾，在实践中，平均律是作为各种不同性质的自然律的简便易行的仿制品、代用品而通用于世，并在实际演唱演奏中随时予以必要的调节；在理论上，平均律音程提供了一种方便的尺度（或以平均律半音为 100 音分，或以平均律半音为 0.5 全音），以简捷明了地量度与比较各种各样的自然律音程，并成为音律测定与计算中的数学框架。

二 基准音组的平均律调整

听觉调音法虽然在具体的操作上有许多不同的地方，但是其基本方法和基本顺序却是相同的。钢琴调音简单工艺流程：

- (1) 音叉取音，确定钢琴标准音的高度
- (2) 调整基准音组各音的中弦^①，进行平均律分割

^① 现代钢琴的弦列可以分为三组（不同型号的钢琴，其弦列排列并不完全相同），最低的几个音的缠是每个音一根弦，大字组到小字组低音的弦为两根弦一个音高，中高音则是三根弦一组，发出一

(3) 调整基准音组各音的同度弦，使其与各音中弦相和谐

(4) 以基准音组为基准，下行八度调整低音区各组同名音的某一根弦，随即调整同度

(5) 以基准音组为基准，上行八度调整中、高音区各组同名音的某一根弦，随即调整同度

(6) 总体检验与微调（金先彬、陈重生、张茂林，第 128 页）

其中前两个步骤是最基础也是最重要的工作，首先音叉取音是钢琴调音过程中一个十分重要的步骤，它关系到整个钢琴的音高在什么高度这样一个问题。因此，音叉取音要引起钢琴调音师的特别重视与关注。而基准音组的平均律分割则是钢琴调音过程中最重要和最关键的阶段，它的准确与否直接关系到整个钢琴的音准。因此，我们着重讨论一下这两个步骤。

1、音叉取音

所谓“音叉取音”是指以音叉的音高为标准来确定钢琴标准音高的调音过程。而音高的标准是什么呢？17 世纪的“古典高度”是 415—430Hz（接近于现在的标准音小字一组 a^1 ），18 世纪中期音乐家们所使用的音高标准是小字一组 $a^1=416\text{Hz}$ ，到了 19 世纪初，海顿、莫扎特等大音乐家们使用的标准音高为 $a^1=422\text{Hz}$ 。标准音高的变化可能与当时乐器制造的水平有关。1834 年在德国斯图加特召开的声学大会确立了小字一组 a ，也就是 $a^1=440\text{Hz}$ 为第一国际高度。1859 年法国会议又确立 $a^1=435\text{Hz}$ 为国际高度。1939 年，在英国伦敦举行的国际会议上，又决定恢复斯图加特会议所提出的高度（即 a^1 为 440Hz，温度为 22℃）。现在多数情况下音乐家们仍然更喜欢使用 $a^1=440\text{Hz}$ 作为音高标准，因此 $a^1=440\text{Hz}$ 被称为“音乐会标准”或“第一国际高度”。钢琴作为国际通用的乐器，其自然也选择 A 作为调音的标准音和起始音。通常情况下，钢琴的标准音选择的是第一国际高度 $a^1=440\text{Hz}$ ，而钢琴调音的起始音则选择的是其低八度小字组的 a ，即 $a=220\text{Hz}$ 。

音叉取音有两种方法，一种是同度取音法；另一种是八度取音法。

①同度取音法：用止音工具止住 37A 键^①即小字组 a 键同音弦组的左弦或者右弦，随后选择剩余两根没有被止住的其中一根弦调整，使之音高与音叉相同后，再将另两根弦与之调平直至无拍音。

②八度取音法：用止音工具将 37A 和 49A 键音的同音弦组的左右边弦都止住，只留中弦，将 49A 即 a^1 中弦音的音高调至与音叉相同、无拍。随后将 49A 下行八度调整 37A，使其无拍，获取一个纯八度。

个音称固定弦组。基准音组中的各音都由三根弦组成。

^①现代钢琴大部分都是 88 个琴键，其中白键 52 个，黑键 36 个。第 1 号键是大字二组的 A，即 A2。第 88 号键是小字五组的 c，即 c5。

如果我们充分理解了这两种取音法，不难发现它们是雷同的。实际上八度取音法，是用 49A 的中弦替代了同度取音法 37A 的一根边弦；反过来说，同度取音法用 37A 的一根边弦替代了八度取音法的 49A 的中弦。（金先彬、陈重生、张茂林，第 169-172 页）

2、基准音组的平均律分割

现代钢琴是以十二平均律为基础的乐器，而十二平均律是对八度音程系数进行开方运算的结果，即将八度频率比值 2 开 12 次方，所得数值便是平均律半音音程系数的频率比值，八度音程就被均匀地分为 12 个相等的间距。需要强调的是十二平均律通过这种开方的方式得到的对数领域均等高度的 12 个半音，它们相对应的音程系数却都是无理数。由此可知钢琴所发出的音，除了同度和八度完全协和以外，其他各种音程都不同程度地偏离纯律。因此若以某一音为起点直接一个一个地分别将每个音调成符合十二平均律的音高，其难度可想而知。

国际钢琴调音界普遍采取的方法是，先在钢琴中音区内科学地选择一个合适的八度作为基准音组，采用严格的方法来确定标准音高度，并严格按照十二平均律将其精确分割，使其能够成为调整其他音组同名音的基准。这一步骤是钢琴调音过程中最基础的一个步骤，也是最重要和最关键的步骤，它的准确程度直接关系到整个钢琴的音准程度。

(1) 基准音组的设置

目前国际上钢琴基准音组一般设置在 33F—45F 这个八度之间，即：小字组 f 到小字一组 f¹(f—f¹)。在钢琴调音史上，基准音组所处的音域，各国、各地区、各人的定位不尽一致，基准音组音域的变化是随着调律理论的发展而变化的。

起初，调律的初始音为中央 C (40C)，因此基准音组一般设置在 40C—52C。后来由于国际标准音被确立为小字一组 A，因此基准音组也随调律初始音的变化而移设至 37A—49A。

当然根据调律法的不同，基准音组的设置也随之不同，基准音组设在 37A—49A 的，多采用的是“四、五度调律法”；基准音组设在 39B—56E，则采用的是“五、八度调律法”等等。

如今，国际上通行的基准音组选择的是 33F—45F 之间的 13 个音，即小字组 f—小字一组 f¹，这样划分是有其科学道理的。

首先，在这个音域内，音色比较统一，有利于听辨。现代立式钢琴 33F 以上的键音配置的琴弦统一为裸弦，而 33F 以下的键音所配置的琴弦就不完全统一了，既有裸弦又有缠弦。由于琴弦配置统一，因此音色也就较为统一。

其次，此音域内，音的衰减速度相对较慢，因此有足够的时间进行听觉判断。音的衰减速度主要与频率、弦的质量和弦的张力等因素有关。由于 33F—45F 之

间各键音其弦的质量和张力差异不大,因此频率的差异就成为影响音的衰减速度的主要因素了,与其他基准音组相比,33F—45F各键的频率相对较慢,因此音的衰减速度也相对较慢。

第三,在此音域中,低次倍音其音响强度适中,有利于拍音的分辩和估算。在基准音组的分割过程中,调音师的听觉主要听辨音程中两个音的共同倍音,也就是共泛音。这些共同倍音均属于低次倍音。33F—45F的振动频率在175~349Hz之间。有关研究表明,此间多数音的初响阶段其基音的音响强度稍弱,低次倍音的音响强度稍强,而且各倍音强度均匀适中。因此有利于对拍音的分辩和拍数的估算。

第四,此音域中琴弦的状态比较理想,各音的谐音之间协和度较高。由于33F—45F这个八度内的各音的谐音的不协和性的参数比其他稍高一点的八度的参数要小,因此其对分割精确度的影响也要比其他稍高一点的八度的影响要小一些。根据计算,在33F—45F之间获得的平均律各音音高与理论数值相比,最多偏差在1音分左右。

当然还有最重要的一点是,在这段音域间,四度、五度的拍频几乎都在1拍/秒左右,因此容易分辩也便于掌握。(金先彬、陈重生、张茂林,第138-140页)

(2) 基准音组中各音的十二平均律理论数值

上面我们提到了,十二平均律半音的比值为 $\sqrt[12]{2} = 1.0594630943593$,人们可以根据这个比值,求得钢琴任意一音频率的平均律数值。

当我们知道标准音的频率为440赫兹时,如果想求得比标准音高的音的频率时,就用标准音的频率440赫兹乘以1.0594630943593得到的便是比标准音 a^1 高半音的 $\sharp a^1$ 音的频率;若相求得比标准音低的音的频率时,就用标准音的频率440赫兹除以1.0594630943593得到的便是比标准音 a^1 低半音的 b^1 音的频率。用此法我们可以求出整个基音组中每一个音的理论频率值。为了便于计算,我们取小数点后2位数。

表1

基准音组各音	代数表达式	相对音高(平均律全音数)	频率数(Hz)
标准音 a^1	2	6	440
f	$1 \div (\sqrt[12]{2})^4$	-2	174.61
$\sharp f$	$1 \div (\sqrt[12]{2})^3$	-1.5	185.00
g	$1 \div (\sqrt[12]{2})^2$	-1	196.00

#g	$1 \div \sqrt[12]{2}$	-0.5	207.65
a	1	0	220.00
#a	$\sqrt[12]{2}$	0.5	233.09
b	$(\sqrt[12]{2})^2$	1	246.95
c ¹	$(\sqrt[12]{2})^3$	1.5	261.63
#c ¹	$(\sqrt[12]{2})^4$	2	277.19
d ¹	$(\sqrt[12]{2})^5$	2.5	293.67
#d ¹	$(\sqrt[12]{2})^6$	3	311.13
e ¹	$(\sqrt[12]{2})^7$	3.5	329.63

(3) 钢琴调音中拍频的计算方法

由于十二平均律各种音程的频率比不像纯律音程那样呈简单整数比,因此在纯律音程中原来存在的吻合谐音,在十二平均律的对应音程中就不再吻合了,它们的频率也不再相同,这样就在这两个所谓的“吻合谐音”中产生了我们前面所说的“拍”音。

根据纯律谐音列,我们可以看到,第一号谐音与第二号谐音之间是一个纯八度关系,第二号谐音与第三号谐音之间是一个纯五度关系,第三号谐音与第四号谐音之间是一个纯四度关系,因此纯五度音程根音和冠音两音之间最低序号的“吻合谐音”是根音的第三号谐音与冠音的第二号谐音。(见谱例 3)例如纯五度 a—e¹,根音 a 的频率为 220Hz,纯五度的音程系数为 3:2, e¹ 频率=220×3/2=330Hz,其高八度音 e² 频率为 330×2=660Hz;但在上表中可以查到平均律五度根音 a 的冠音为 329.63Hz,其高八度 e² 频率为 329.63×2=659.26Hz,后者与前者的差为 659.26-660=-0.74Hz,因此平均律五度 a—e¹ 的吻合谐音 e² 就产生了拍频为-0.74 拍/秒的拍音。这里出现负数是因为调平均律上行五度时,需要调得比“纯点”低一些,如果是正数的话,就是要调得比“纯点”高一些,正数的拍频就成为正拍,负数的拍频就称为负拍。

(4) 基准音组的平均律分割方法

基准音组的分律方法与程序多种多样,并没有统一规定。各种不同的方法都有各自的优势与不足,下面我们列举其中几种方法,供大家参考。

①四度、五度循环法:

而纯四度音程根音和冠音两音之间最低序号的共泛音是根音的第四号谐音与冠音的第三号谐音。以纯四度 $a-d^1$ 为例，(见谱例 3) 根音 a 的第四号谐音 a^2 频率为 $220 \times 4 = 880\text{Hz}$ ，冠音 d^1 的第三号谐音 a^2 频率为 $220 \times 4/3 \times 3 = 880\text{Hz}$ 。当然这里我们讲得是纯五度和纯四度，而在十二平均律中，五度和四度并不“纯”，因此它们的共泛音也并不完全吻合，它们之间所形成的微小的频率差，便是钢琴调音师赖以调音的“拍音”。即根音 a 的第四号谐音 a^2 频率为 $220 \times 4 = 880\text{Hz}$ ，冠音 d^1 的第三号谐音 a^2 频率为 $293.67 \times 3 = 881.01\text{Hz}$ 。因此 $a-d^1$ 的拍频为 $881.01 - 880 = 1.01$ 拍/秒。

【上五下四】

上五下四，就是上行五度与下行四度交替进行，以完成基音组十二平均律调整。(具体步骤见下)

$$a^1 \rightarrow a \rightarrow e^1 \rightarrow b \rightarrow \#f \rightarrow \#c^1 \rightarrow \#g \rightarrow \#d^1 \rightarrow \#a(\#b) \rightarrow f^1 \rightarrow c^1 \rightarrow g \rightarrow d^1 \rightarrow a$$

上五度 下四度 下四度 上五度 下四度 上五度 下四度 上五度 下四度 下四度 上五度 下四度

【上四下五】

上四下五，就是上行四度与下行五度交替进行，以完成基音组十二平均律的调整。(具体步骤见下)

$$a \leftarrow e^1 \leftarrow b \leftarrow \#g(\#f) \leftarrow \#d^1 \leftarrow \#a \leftarrow \#c^1 \leftarrow \#g \leftarrow \#d^1 \leftarrow \#a \leftarrow a^1$$

②五度、八度分律法：

五度、八度分律，是根据五度音程中根音的第三号谐音与冠音的第二号谐音之间微小的频率差所形成的拍音，以及纯八度之间的纯正无拍，完全协和的方法调节出准确的十二平均律。

$$a \rightarrow e^1$$

上五

$$a \rightarrow a^1 \rightarrow d^1 \rightarrow g \rightarrow g^1 \rightarrow c^1 \rightarrow f \rightarrow f^1 \rightarrow \#b \rightarrow \#b^1 \rightarrow \#e^1 \rightarrow \#a \rightarrow \#a^1 \rightarrow$$

纯八度 下五度 下五度 纯八度 下五度 下五度 纯八度 下五度 纯八度 下五度 下五度 纯八度 下五度

$$\#d^1 \rightarrow \#g \rightarrow \#g^1(\#f^1) \rightarrow b \rightarrow b^1$$

下五度 纯八度 下五度 纯八度

③三度、五度循环法：

三度、五度循环法，采取的同样是“共泛音”的原理。三度是指纯律大三度，三度音程根音与冠音两音之间最低序号的共同泛音是根音的第五号谐音与冠音的第四号谐音。以纯律大三度 $a-\#c^1$ 为例(见谱例 3)，根音 a 的第五号谐音是 $\#c^3$ ，其频率为 $220 \times 5 = 1100\text{Hz}$ ，冠音 $\#c^1$ 的第四号谐音也同样是 $\#c^3$ ，其频率为 $220 \times 5/4 \times 4 = 1100\text{Hz}$ 。同样在十二平均律中的大三度也并非纯律大三度，根音与冠音的共同泛音之间存在一定频率差。即根音 a 的第五号谐音是 $\#c^3$ ，其频率为

$220 \times 5 = 1100\text{Hz}$ ，冠音 $\#c^1$ 的第四号谐音也同样是 $\#c^3$ ，其频率为 $277.19 \times 4 = 1108.76\text{Hz}$ ，因此 $a - \#c^1$ 的拍频为 $1108.76 - 1100 = 8.76$ 拍/秒。

$$a^1 \rightarrow a \rightarrow f$$

纯八度 大三度

$$a \rightarrow \#c^1 \rightarrow \#f \rightarrow \#a(\flat b) \rightarrow d^1 \rightarrow g \rightarrow b \rightarrow \#d^1 \rightarrow \#g(\flat a) \rightarrow c^1 \rightarrow e^1$$

大三度 五度 大三度 大三度 五度 大三度 大三度 五度 大三度 大三度

④三度、六度循环法：

三度、六度循环法中的六度是指大六度，大六度音程根音与冠音两音之间最低序号的共同泛音是根音的第五号谐音与冠音的第三号谐音。例如纯律大三度 $a - \#f^1$ ，根音 a 的第五号谐音是 $\#c^3$ ，其频率为 $220 \times 5 = 1100\text{Hz}$ ，冠音 $\#f^1$ 的第三号谐音也同样是 $\#c^3$ ，其频率为 $220 \times 5/3 \times 3 = 1100\text{Hz}$ 。同样在十二平均律中的大六度也并非纯律大六度，根音与冠音的共同泛音之间存在一定频率差。即根音 a 的第五号谐音是 $\#c^3$ ，其频率为 $220 \times 5 = 1100\text{Hz}$ ，冠音 $\#f^1$ 的第三号谐音也同样是 $\#c^3$ ，其频率为 $370.00 \times 3 = 1110.00\text{Hz}$ ，因此 $a - \#f^1$ 的拍频为 $1110.00 - 1100 = 10$ 拍/秒

$$a^1 \rightarrow a \rightarrow \#c^1$$

纯八度 大三度

$$a \rightarrow f \rightarrow d^1 \rightarrow \flat b \rightarrow \flat g \rightarrow \flat e^1(\flat d^1) \rightarrow b \rightarrow g \rightarrow e^1 \rightarrow c^1 \rightarrow \flat a$$

小六度 大六度 大三度 大三度 大六度 大三度 大三度 大六度 大三度 大三度

基准音组的建立方法与程序可以说五花八门，除了上述者外，还有许多变通的方法。还有些方法基本属于上四下五或上五下四的循环方法，只是多了一些音，增加了一些转位音程及八度的检验。

在我国，上述的各种分律法，虽见于不同的文献资料，但实际应用上主要是四五度循环法，其中上五下四循环法应用较为普遍。即把五度相生 12 次所产生的最大音差均布于各律之中，这样分出的 12 个半音基本上符合十二平均律的要求。看看下面的四度、五度拍频表（表）就一目了然了。

表 2：四度、五度（共泛音）拍频表：

五度（收窄）拍频		四度（放宽）拍频	
$f \rightarrow c^1$	-0.60	$f \rightarrow \flat b$	+0.79
$\#f \rightarrow \#c^1$	-0.62	$\#f \rightarrow b$	+0.85
$g \rightarrow d^1$	-0.66	$g \rightarrow c^1$	+0.89
$\#g \rightarrow \#d^1$	-0.72	$\#g \rightarrow \#c^1$	+0.93
$a \rightarrow e^1$	-0.74	$a \rightarrow d^1$	+1.01

$\flat b \rightarrow f^1$	-0.79	$\sharp a \rightarrow \sharp d^1$	+1.03
		$b \rightarrow e^1$	+1.09
		$c^1 \rightarrow f^1$	+1.01

通过这个四度、五度拍频表我们可以看出：在基准音组这个区间中，各四度、五度的拍频在 0.60—1.01 拍/秒，在经过四舍五入后，都可以化为 1 拍/秒，这种微小的不和谐，并不妨碍演奏听觉对音准的要求，同时这个数据对于钢琴调音师来说是相对比较容易操作的，这在音乐实践中已经得以证实。

目前中国钢琴调音界除了“四五度分律法”以外，还比较推崇“三六度分律法”^①

所谓“三六度分律法”包括两个方面，一是主要按大三、六度音程关系分律，二是力求按十二平均律中既定的大三、六度或纯四、纯五度的拍频，在各步骤中进行更多的检验。

“三六度分律法”的产生要从“四五度分律法”中的传统检验法说起，“四五度分律法”中多是纯四、五、八度的同级互检，参考的拍频只有一拍，这样在钢琴音色质量不高、听觉环境不佳等因素的影响下，所谓一拍的误差是较大的，即便是开始的一律与结尾的一律能对得上，其中的频率比仍达不到十二平均律的要求。而“三六度分律法”中的大三、小六度参考拍频均不少于约七拍，七至十拍的拍频较明亮、清晰，通过一定训练完全可分得清。另外，误差控制在一拍之内，误差积累不大，对于频率比没有太大影响，下面举例来说明一下：

1、已知 a 频率为 220Hz，f 频率为 174.614Hz，那么大三度 a-f 的共泛音为 a 的第四号谐音和 f 的第五号谐音，其拍频为 $220 \times 4 - 174.614 \times 5 = 880 - 873.07 = 6.93$ 拍/秒，当 a-f 间共泛音的拍频增加 1 拍时（a 频率不变），也就是大三度 a-f 之间共泛音的拍频为 7.93，那么这个已经被改变的 f（标记为 f'），其频率是多少？它与原 f 频率差是多少？

已知 a 的频率不变，故 f' 的频率 = (a 的第四号谐音频率 - a 与 f 共泛音的拍频) ÷ 5，即：f' 的频率 = $(880 \text{ Hz} - 7.93 \text{ Hz}) \div 5 = 872.07 \text{ Hz} \div 5 = 174.41 \text{ Hz}$

$$f - f' = 174.614 \text{ Hz} - 174.41 \text{ Hz} = 0.2 \text{ Hz}$$

2、已知 c^1 频率为 261.625hz，f 频率为 174.614hz，那么五度 f- c^1 的共泛音为 f 的第三号谐音和 c^1 的第二号谐音，其拍频为 $174.614 \times 3 - 261.625 \times 2 = 523.842 - 523.25 = 0.59$ 拍/秒，当 f- c^1 拍频增加 1 拍时（ c^1 频率不变），也就是五度 f- c^1 之间共泛音的拍频为 1.59，那么这个已经被改变的

^① “三六度调律法”是金先彬与 1979 年研究出来的钢琴调律新方法，并与 1981 年将此成果发表于《乐器》第二期

f (标记为 f'), 其频率是多少? 它与原 f 频率差是多少?

已知 c¹ 的频率不变, 故 f' 的频率 = (c 的第二号谐音频率 - f 与 c¹ 共泛音的拍频) ÷ 3, 即: f' 的频率 = (523.25 Hz - 1.59 Hz) ÷ 3 = 521.66 Hz ÷ 3 = 173.89 Hz

$$f - f' = 174.614 \text{ Hz} - 173.89 \text{ Hz} = 0.72 \text{ Hz}$$

通过上两例的对比可以看出, 在同样的条件下, 大三度 (大六度同理) 的误差较小, 纯五度 (纯四度同理) 的误差偏大, 对频率比的影响自然也就大。这应该是有些调音师比较推崇“三六度分律法”的原因之一。

当然, 一些人认为“三六度分律法”是听不准、练不到的, 但推崇者认为凡事应该辩证地看, 唯物辩证法告诉我们, 凡事物都是相对性的, 就调音而言, 世上没有一个也没有一次是绝对的准确, 也就是说所谓已调准的钢琴每一部、每一次都不会绝对相同的, 这里的“准”只是调到了听觉所允许的误差之内而已, 是事物的普遍性。每秒十个左右的拍频的大三、六度听辨, 通过一定时间的磨练可以基本达到的。但要说明的是, 在调律市场大量需求的情况下, 盲目练习这种特殊技艺是不足取的, 对多数人来讲, 还是要理性一些, 踏踏实实的寻求一些听得着、练得到的更科学而理性的调律方法, 这或许也是前辈们推崇“三六度分律法”的另一原因吧。

这么多的分律法我们该选择哪一种呢? 这还要因人而异, 正所谓“法不同而道同”, 不论选择哪一种分律法, 其目的都是为了将钢琴调整成为一件既能够自由转调, 又尽量符合人类听觉审美要求的完美乐器。

三 钢琴听觉调音的工艺流程

1、听觉调音的基本方法

钢琴听觉调音在具体操作上虽然有许多不同的方面, 但其基本方法和基本顺序却是相同的。听觉调音的基本方法是:

首先, 基准音组的设置与调整。这一步骤又称“平均律分割”, 它是在中音区科学地选择一个适合的基准音组, 采用调律法来确定标准音的音高高度, 并严格按照十二平均律来调整基准音组中各音, 使其成为调整其它音组的标准音。这一步骤为调律过程中最初和最基础的阶段, 也是最重要和最关键的阶段。

其次, 以基准音组中各音为基准音, 按八度音程关系下行和上行一次调整其余各个音组的同名音, 俗称“调八度”。

再次, 以同音弦组的基准音为基准, 调整同音弦组的其余琴弦的音。这一步骤俗称“调同度”。

2、听觉调音简单工艺流程

- (1) 音叉取音, 确定钢琴所需音高。
- (2) 调整基准音组中弦, 实施平均律分割。
- (3) 调整基准音组各音的同度。

- (4) 以基准音组为基准下行八度调整低音区各组同名音的某一根弦，然后以其它音程校正，随即调整八度。
- (5) 以基准音组为基准上行八度调整中、高音区各组同名音的某一弦，然后以其它音程校正，随即调整同度。
- (6) 总检验与微调。(金先彬、陈重生、张茂林，第 128 页)

第二章 钢琴调音实践中的一些具体问题

第一节 钢琴音准曲线

钢琴调音采取了十二平均律调音法。理论上，一台所谓真正“调准”的钢琴，应该完全符合十二平均律计算出来的理论值，其音准线应该是一条直线，与十二平均律完全吻合。这一点我们可以从电子琴的音准线上看出。同样是键盘乐器的电子琴，拥有和钢琴一样宽广的音域和丰富的音色，电子琴的音准如果完全按照十二平均律的要求设定好，并能始终如一地保持音高的稳定性，那么，它的音准线就是一条直线。但实际上由于琴弦物理方面的一些属性以及人类自身一些生理心理因素，钢琴音准呈现的并不是一条直线，而是一条曲线。但是，实验表明，调律师认为已经调准的钢琴，也经音乐家们确认后，再以音准仪器进行确定，其数据显示的却是一条曲线，被称为“钢琴音准曲线”。所谓钢琴音准曲线，是由调律师的“主观”音准感觉和用音准仪器实测取得的“客观”音准数据；科学家们通过对多架“调准”的钢琴进行测音，都得出这样的音准曲线结果，Thomas D. Rossing 收集了大量音准曲线，取其平均值，得到了下面这样一个钢琴音准曲线图。

图中，横坐标是钢琴音组所对应的频率，纵坐标是音分数，二条曲线则是测出来的钢琴实际音高。我们可以看到图中所示的钢琴实际音高并非想象中的一条

^① 此图引自 Rossing *The Science of Sound* : pp 292 该曲线所显示的所有数据都是基频的频率数

直线，而是一条有规律锯齿形的曲线。该曲线的中间部分，也就是钢琴的中音区（ $c-c^2$ ）基本呈水平直线，这说明钢琴在调音时，中音区基本上可以按照比较标准的十二平均律调试而成。曲线的两端则与直线有所偏离，越趋向两端，偏离度就越高，最高音、最低音的最大偏差可达 30 音分左右。

对于这样并非完全按照十二平均律调试的钢琴，人们却没有任何音准不“准”的感觉，这一现象到底是由什么原因引起的呢？这是一个长久未决的问题。无论著名的演奏家还是一般的初学者，不管是广大的音乐爱好者还是耳音敏锐的调律师，均十分关注这个问题。优质的钢琴只有调准了音律才能表现出其声学品位和音质特点，出色的演奏员要通过准确的音律才能演奏出动听的曲目。因此调准、调好音律是钢琴调律师毕生的追求。

经过科学家们的长期研究，人们逐渐认识到钢琴调音中这种低音偏低、高音偏高的现象只是一种客观存在，而非人有意使然。那么，钢琴的这种音准曲线是如何形成的呢？琴弦的非理想性、弦的非谐性以及不同的钢琴、不同的调律师乃至调律师在不同时间、地点的心理、生理因素等诸多条件下的综合体现。

总结起来有两个原因：一是琴弦所固有的物理属性使然；二是人的生理、心理因素。

一 琴弦的物理属性

1、琴弦的复合振动

根据科学仪器检测，就理想的弦而言，在其总振动中含有 4 种振动方式。

(1)横振动 这是弦的最基本、最重要、最显著的振动方式，是感官可以粗略觉察到的。当弦受到与弦线方向相垂直的力作用时，弦就沿着与弦长垂直的方向往复振动，这就是弦的横振动。比起其他振动模式，横振动的能量最大，它决定弦振动发声的基频以及主要的谐波成分。

弦在全长振动的同时，还作一系列分段振动，弦的全长振动产生基音，其频率决定该弦音高；各分段振动产生一系列谐音，频率均整数倍于基音。谐音系列的序次：基音为第 1 谐音；1/2 段振动为第 2 谐音，频率是基音的 2 倍（高八度）；1/3 段振动为第 3 谐音，频率是基音的 3 倍（高 1 个八度加五度）；依次类推。

弦的振动幅度决定音的强弱。一般来说，由于乐音的基音振幅比泛音大，因此，所听到的该弦音高，即为其基音的音高（也有例外的特殊现象，例如，打击乐器大锣，由于其泛音的能量超过基音，人耳对这种基音与泛音的结构，只能产生一种模糊的音区感觉）。

公式一：弦横振动的基频计算公式（韩宝强，第 178 页）

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

公式中，L=弦长，T=弦的张力，ρ=弦的线密度。由公式可知：弦的长度越短，张力越大，弦线密度越低，则基频越高，也就是音高越高；反之亦反。

(2)纵振动 是随横振动引起的沿弦长方向的周期性伸缩位移运动。即有弹性的弦在力的作用下有所张弛，当力的作用停止时又恢复原状。纵振动也含谐音系列，基音频率比横振动高几倍，振幅很小。纵振动的能量很小，因此对音高的影响也很弱，但对横振动起增强某些谐音振幅的作用，对音色有一定影响。（例如金属弦和尼龙弦之间的音色差别）

公式二：弦的纵振动的基频计算公式（韩宝强，第 178 页）

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

公式中，Y=制作弦的材料的杨氏模量（弹性模量 modulus of elasticity，在实际工程结构中，材料弹性模量的意义通常是以材料的刚性体现出来的）。

由上述公式可知：假设弦长越短，硬度越强，弦线密度越小，则弦的纵振动的基频越高；反之亦反。

(3)扭转振动 是随激发方式产生的一种振动形态。在提琴上用弓擦弦和用手指拨弦，都迫使弦产生扭转振动。扭转振动也很微弱，其基音也伴有谐音列，频率一般低于横振动，起一定程度改变音色的作用。

公式三：弦的扭转振动的基频计算公式（韩宝强，第 179 页）

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

公式中，G=弦材料的刚度系数（Stiffness Coefficient）。扭转振动与纵振动一样，能量很微弱，对弦发声的音高基本不产生影响，但会影响音色。例如擦弦乐器的弦振发声中含有一定的扭转振动成份，而击弦乐器的弦振发声中几乎没有扭转振动的频率成份。因此，擦弦乐器的音色变化一般要比击弦乐器的音色变化更丰富。

(4)倍频振动 与横振动同时发生，即弦每振动一周，与弦相连的音板随之振动两次，由此产生音高倍于横振动基音的音。其在弦与音板非直接相连的提琴上也存在，但影响不明显。这种振动在弦一端直接拴结于音板的竖琴和吉他等乐器上最为明显。倍频振动的谐音系列对音色也有一定作用。

上述几种振动方式往往是同时产生，相互作用，它们共同影响着弦乐器的音高与音色。当然以上系理想的、柔顺的弦而言。实际的弦因受种种内外因素的影

响，振动形态更为复杂，其谐音系列往往存在不同程度的不和谐的非自然整数倍关系。鉴于这种情况的实际存在，所以声学上常把谐音更适宜地称为分音。分音中既包括谐音，也包括不和谐成分的音。

影响弦振动的内因：弦受本身某些内在因素的影响，如材料的性质、均匀度及制作工艺等，发音会产生明显变化。重要因素之一是弦本身难免会有劲度，其柔顺性和张力作用因而降低，从而使弦发生横向弯曲和扭曲等畸变现象，影响谐波频率的比例关系，高次谐波与基频失去自然谐音系列关系，因频移而出现不和谐成分。单根的钢弦之所以比肠弦不和谐成分多，原因主要在此。

影响弦振动的外因：弦在受不同方法的外力激发时，也会影响其自然分音系列的组成而影响音质。例如琴槌敲击点若位于某分音的波腹上，该分音即被加强；若在波节点上，该分音即被抑制。针对弦振动的这一特性，选择适当的激发点，对改善音质有重要作用。一般选择弦的振动长度的 $1/7$ 、 $1/9$ 、 $1/11$ 等处为激发点，可起到抑制或削弱其不和谐的第7、9、11等分音的效果。实际在弦上激发的不仅是一点，而往往是一段（如琴槌的宽度），因此分音组成的变化就更为复杂了。

2、琴弦在非理想状态下，泛音具有非谐性

理论上的十二平均律是根据“理想弦振动”计算出来的。就像质点是力学中的理想模型一样，“理想弦”则是声学理论中的一种理想模型。“理想弦”是指弹性固体材料构成的均匀、柔韧的细线。现实生活中没有绝对的理想弦，只有相对理想的弦。例如，较刚硬的弦，一旦增加其长度，总体就会变得柔韧；而较粗的弦，一旦令其足够长，也会相对看起来变细。按照这种相对性，现实中弦乐器的大多数琴弦都接近于理想弦，钢琴的中音区弦也近似看作理想弦。人们常说的“柔软、细长、轻质弦”或“柔顺弦”就指那些近似“理想模型”的弦。由于钢琴高音区琴弦偏短，而低音区琴弦又过于粗重，因而它们都偏离了理想模型，如果按照“理想弦振动”的理论去计算钢琴的高、低音区的基频，势必造成结果的偏离。这就是导致高音区和低音区的各音基频明显偏离十二平均律理论值(高音偏高，低音偏低)的物理原因。

“高音偏高，低音偏低”是现代钢琴音律的一个突出特点。古钢琴时期，琴弦大都使用动物肠衣或筋皮制成，由于工业技术和材质的限制，琴弦不能张得太紧，因此，总体音律偏低。羽管键琴时期，虽然已经使用金属弦，也因制弦，张弦技术的限定使琴弦偏于细长，当时这类乐器的音域远比现在的钢琴音域要窄，因此“高音偏高，低音偏低”现象并不明显。

自从“斯坦威”琴奠定了现代钢琴的“铁骨钢弦”结构以来，不但钢琴音域扩展到近八个八度，集体音高也比古钢琴大为上升。这不但使现代钢琴的音色，音量发生了巨大的变化，同时也提出了“高音偏高，低音偏低”以及钢琴音律偏

离十二平均律理论值的问题。

声学中讲述到，弦的张力、弹性模量（elastic modulus）、刚性和材料密度不仅对发音高度有直接影响，同时对弦的谐音列成份也起一定作用。通俗地讲，弦乐器的发音音高除了与弦的振动情况有关外，还与琴弦的密度，直径，长短这三个特性有关。由于密度大，柔韧性就会受到限制，因此钢琴琴弦在振动时，琴弦两端固定的位置实际上有一段（很小的一段）不参与振动，那么实际有效振动弦的长度就会比弦的实际长度短，在理论上同样拉力，同样直径，同样密度的弦有效振动长度越短频率越高，每根弦都会有上述的现象，在向上（向下）扩展时产生的累计误差，就出现了相对于理论计算的音偏高的现象，形成钢琴音准曲线。

一条理想的琴弦，理论上，基音的频率如果是 f ，那它的 $1/2$ 段理论振动频率应该是 $2f$ ， $1/3$ 段振动频率为 $3f$ ， $1/4$ 段振动频率应该是 $4f$ ，这是理想状态弦的横振动结果。其频率可用以下公式表达：

公式四：理想状态下弦振动的频率数

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

其中 f = 频率数， $n = 1, 2, 3, \dots$ （即 f_1 为基频数， f_2 为第二谐音频率数， f_3 为第三谐音频率数，以此类推） L 为弦长； T 为弦张力； ρ 为弦密度。公式表明，理想弦的各次泛音的频率为基频的整数倍。但实际上钢琴弦的振动却不是理想化的，它的柔顺度不足，受张力以及均匀度等影响，其泛音频率与基频之间呈现为比较复杂的关系，即琴弦泛音的“非谐性”。也就是说，泛音会略高于基频的整数倍。尤其是在二端的高低音区，小规格琴，低音弦粗而短，高音弦过于坚硬，都劲度很大，于是造成弦的失谐现象。

许音先生曾提出琴弦振动各次谐音的频率关系修正式^①：

公式五：

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\rho_1}} \cdot \sqrt{1+n^2 E} = n f_1 \sqrt{1+n^2 E}$$

其中 f_1 为基频； E 是琴弦的弹性模量（纵向应力与纵向应变的比例常数就是材料的弹性模量 E ，也叫杨氏模量^②），弦直径、长度、张力等因素，对于某一定

^① 许音《正确理解钢琴的音准曲线》，载《钢琴维修调整与钢琴调律》，中国轻工业出版社，2002年，第241页

^② 杨氏模量就是弹性模量，这是材料力学里的一个概念。杨（Thomas Young 1773~1829）英国物理学家。1807年 T. 杨提出弹性模量的概念。他指出剪切和伸缩一样，也是一种弹性变形。虽然杨氏模量的形式与现代定义不一样，但杨的工作成为弹性理论建立的前奏。

好音高的琴弦而言是一常量。由该式看出， n^2E 就是针对不同谐波次数振动频率的修正项。由于调律师在调好基准音组后向上和向下扩展时均以八度方法去调，这样在一组组扩展调音时，修正值就会不断积累，因此而形成音准曲线。^①

许音先生提出：因为琴弦振动存在谐音非谐性，根据 49A 上行调试的八度音 61A 修正值为 881.01Hz（而不是理想的 880 Hz）。根据上面修正公式，我们可推出：

$$881.01 = 2 \times 440 \times \sqrt{1 + 2^2 \cdot E},$$

$$E \approx 0.00058 \left(E = \frac{\Delta PL_0}{\Delta(\Delta L)A_0} \right), \Delta P \text{——载荷增量, KN; } A_0 \text{——试件的横截面面积,}$$

cm)。

由修正公式可知：49A（440.00Hz）四次谐音的频率为 $f_4 = 4f_1\sqrt{1+4^2E} = 4 \times 440.00\sqrt{1+4^2E} = 1768.1475\text{Hz}$ 。61A（881.01 Hz）的二次谐音的频率为 $f_2 = 2f_1\sqrt{1+2^2E} = 2 \times 881.01\sqrt{1+2^2E} = 1764.0628\text{ Hz}$ 。即，现实中八度音程的吻合谐音在“根二冠一”“纯”的情况下，“根四冠二”等高序列吻合谐音仍存在着偏离。

根据该公式我们还可以看出，琴弦在非理想状态的振动时，谐音数越高，离散越远，谐音频率也会比理论值略高，谐音与基音并不能构成严格意义上的倍频关系。有关研究证明：琴弦长，张力大时，泛音的频率偏移量相对小些，谐和度相对较高；琴弦粗时，泛音的频率的偏移量相对大些，谐和度相对较差。

理论上，十二平均律的律制给定的纯八度音程应该呈现纯倍频关系，但是用仪器检测现实中被调准音律的任何一架钢琴，会发现钢琴的每一个“和谐无拍”的八度音程，其两音基频都出现了微弱且多少不等的超倍频现象，从而使钢琴的八度出现了基频向外略微扩张的现象。

例如， a^1 的基频为 440Hz， a^2 的基频为 881Hz， a^1 — a^2 之间相隔 1201.97 音分， a^3 则为 1763Hz， a^2 — a^3 相隔 1200.98 音分。

这一现象在基准音组的中音区并不明显，而在高、低音区就相对突出。反之，如果按照仪器显示的基频数据将钢琴的八度音程调制成纯倍频关系，则会产生八度不纯而含“拍”的感觉。这就是钢琴特有的“八度扩张”现象，曾有文献将这样生成的钢琴音阶称为“扩展音阶”。钢琴的“八度扩张”现象也是钢琴琴弦材

^①许音《正确理解钢琴的音准曲线》，载《钢琴维修调整与钢琴调律》，中国轻工业出版社，2002年，第241页

质特性的产物，并不是人为主观使然。

由于钢琴这种特有的“八度扩展”以及“高音偏高，低音偏低”现象，使钢琴的音律偏离了理论的十二平均律标准，其所呈现出来的只是近似的“准平均律”状态。可见，钢琴的“八度扩张”现象以及钢琴的“高音偏高，低音偏低”问题都与琴弦偏离“理想模型”（相对粗，硬）密切相关。

在“理想弦振动模型”中，一根弦的基频波与它的谐波满足线性倍频关系为 $1:2:3:4:5\cdots$ 不难看出，理想弦的纯八度不仅“根二冠一”和谐无拍，而且各基频波，各同次谐波都有着较高的和谐度。因此，只要“根二冠一”调纯了，也就有了八度纯。而在调中音区的实际操作中，虽然各八度基本与此接近，但仍然存在误差（尤其是高、低音区）。图 2 中所显示地便是一根弦的基频波与它的谐波则满足“非纯倍频”即非线性关系。

图 2: 钢琴标准音 a^1 频谱

从上图可以看出，标准音 a^1 的基频为 442.98hz，理论上讲，其第二谐音的频率应为 $442.98 \times 2 = 885.96\text{hz}$ ，但实际测量出来的第二谐音的频率却为 886.72hz，与理论值（物理量）相差 0.76hz。由于钢琴的中音区琴弦接近理想弦，偏离纯倍频的量值（物理量）不明显，而钢琴高低两端琴弦的“非理想”因素较明显，八度根冠两音的基频出现偏离线性的“非倍数”关系，当顺次递推累积到钢琴两侧时即出现了渐次加强的“高音偏高，低音偏低”现象。因此，钢琴

的 88 个音调准后就形成了一个以十二平均律为基础的扩展音阶。

3、击键对音准曲线的影响

另外弦槌的击弦历时也会影响到琴弦刚性的展现。击弦历时短，弦就会被充分激发，刚性得到充分表现，谐音得以充分释放，音色偏亮，频率累计偏差更夸张一些；击弦历时长，则反之。因此，击键力度直接影响弦槌的击弦历时，无疑也就会对音准曲线产生影响。简单说，大力度击键，则击弦历时较短，音准曲线稍偏陡一些；反之会使音准曲线稍偏平一些。

二 人的生理心理因素

钢琴音准曲线的成因除了上述公式反映出的物理原因，也不能排除人的主观因素，以及调音师自身的生理心理因素。

1、音高感知

人耳对振动频率和声压级的感受有一定限度，“人耳可感音域，低音在 16-20 赫兹之间，高音在 16000-20000 赫兹之间”（韩宝强，第 32 页），而音乐常用的频率范围则在 27-4186 Hz（即一架普通钢琴的音域）之间。

“或许有人认为钢琴最低音 A^2 （大字二组 A）的频率已经达到 27.5 赫兹，我们仍然很容易听到，再低十几个赫兹难道就听不见了吗？这里有一个误解：我们听到的钢琴声是一个复合音，而听音实验所用的信号则是纯音，二者有本质的不同。当我们听较低的音时，听觉主要凭借复合音中的高频泛音来判别声音的性质，而不是基音。同样是 A^2 ，钢琴的声音比较容易听到，是因为其中的泛音在起作用，如果把泛音去掉，只保留基音，感觉起来就非常困难了。”（韩宝强，第 32 页）

我们知道，钢琴调音师是用自己的听觉来完成整个调音工作的，建立正确的音准概念，是调音的先决条件，如何将抽象的音程概念，变成人的易于理解的具体印象，是学会听音的难点。^①

人类的听觉系统是怎样把含有众多分音的复合音形成一个统一的音高，科学界还不能给我们一个准确的理论解释，但有一点我们必须弄清楚，那就是并不是每一个复合音的基频都能完全决定这个乐音的主观音高。

虽然在一般情况下，复合音中的基音振动能量较强，泛音能量相对较弱，因此基音振动频率往往就决定着这个乐音的主观音高。但有时也有泛音能量强于基音的情况，那么这个较强的泛音音高就决定了这个复合音的整体高度。

值得注意的是，在音乐测音实践中所记录的数据，通常是以该复合音的基音音高为标准，因此可能出现测音结果与音乐实际情况“不符”的现象。钢琴音准

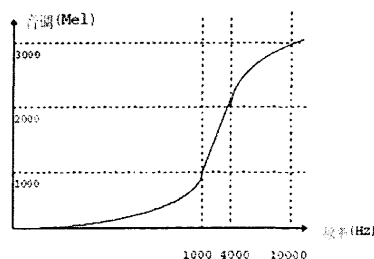
^① 金先彬 如何掌握正确的“听音”方法，乐器，2004（3）：12-13

曲线同样存在这样的问题，调音师听觉上已经对非理想的琴弦做出了准确的修正，但是测音结果却只是所有音的基频的数据，故产生音准曲线。

2、音高曲线

尽管声音的频率是决定音高的主要因素，但声音强度对音高也有作用。Sterens 和 J. Volkman 为了表达音高这一主观心理物理量，引入了一个量度音高的单位，称之为美(Mel)。定义响度为 40 方(phone)和频率为 1000 赫兹(Hz)的纯音（即标准音），其音高为 1000 美。以此为基础，对各种不同声音的音高做出了标度。确定音高的方法显然要采取主观听辨的办法。

图 3 主观音高与客观音高的关系



实验证明，随着频率的增加，音高也将提高，不过，以美为单位的音高增长率，逐渐小于以赫兹为单位的频率增长率，这就是说以美为单位的音高与以赫兹为单位的频率之间是对数关系。从图上可以看出两者之间并不是简单的线性关系。在1, 000-4, 000Hz范围内，两者之间基本上是线性相关的；当频率大于4, 000Hz时，基本上呈对数关系；而当频率小于1, 000Hz时，则近似于指数关系。（彭聃龄，2003：第112页）

另外，实验心理学的实验结果表明：一般来说，音调的区分阈限(DL, Distinct Limit)随音调的频率的变化而变化。频率越低，人耳对频率的变化越敏感，即DL值较小。在强度为40dB时，2, 000Hz的音调只要改变3Hz即可被察觉；而当音调频率达到10, 000Hz时，DL值已上升到30Hz。实验表明，只要音调频率高于1000Hz，能察觉到的频率差异所需频率变化是相对恒定的，大约是0.3%。

现代研究表明，人耳对音乐声的感觉符合费希纳（Fechner, 1801—1887）^①提出的客观刺激量与主观感觉量之间的相互关系， $S=K\log R$ ，（即费希纳定律， S = 感觉强度； R = 刺激强度； K 为费希纳常数）他认为感觉的强度随刺激强度对数的变化而变化。后人进一步的实验又发现，这种对数关系只适合于中庸音区，而在极高或极低音区，二者的对数关系会发生一定偏离。一般规律是，在音高感

^①费希纳，德国著名的物理学家、心理学物理学的创始人。他对心与物作了精确的数学测量并试图确定它们的关系。1860年他的《心理物理学纲要》的出版奠定了他在心理物理学上的创始人的地位。

觉上，主观量在极端音区会向两个不同方向偏移。其规律是：以中音区为中心，在低音区，客观量要比正常值偏低才能与主观感觉量相符；在高音区，客观量要比正常值偏高才能与主观感觉量相符。（韩宝强，第 32-34 页）这也正好符合钢琴两端的音高偏离十二平均律的现象，即高音区偏高，低音区偏低。

3、等响曲线

我们做个实验，相同音量的声音出现在不同音区时，我们听起来响度（音强）会有差异。一般规律是中、高音区声音显得比较强，低音区显得比较弱。

Fletcher 与 Munson 两人便将声音大小的物理量与人耳听感加以结合，经过实验统计后提出等响曲线图（Equaloudness Contour），并在 1933 年与《美国声学学报》上发表了他们的研究报告《响度，定义，测量与计算》。（韩宝强，第 44 页）经过多年后由 Robinson 及 Dadson 二人修正与提倡后，整个等响曲线图可说达到成熟阶段，最后经国际标准化组织（International Standardization for Organization, ISO）建议，将人耳之最小可听值定为 4.2phon 之后，而有了标准等响曲线图。

图 4:等响曲线图

上图中纵坐标是声压级，横坐标是频率，两者均为客观物理量。这里，仿照声级的概念提出一个新概念，即响度级，其单位定义为“方”(phon)，以 L_N 表示。等响曲线以 1000Hz 的纯音作为基准音，若一个噪声源发出的声音听起来与频率为 1000Hz 的纯音一样响，则其响度级“方”值就等于该 1000Hz 纯音声压级的分贝数。例如，某声源发出的声音听起来与 1000Hz、声压级为 90dB（分贝）的纯音一样响，则此声源的响度级为 $90L_N$ 。

在等响曲线中，每一条曲线上的各点代表不同频率和声压级的纯音，但是人耳的主观响度感觉是一样的，即响度级是一样的，所以称为等响曲线。在等响曲线图中，最下面的一条曲线是人耳刚能感觉到的不同频率纯音的等响曲线，称为

闻阈曲线，相当于 $120L_N$ 的响度曲线称为痛阈曲线。

从等响曲线可以看出，人耳对低频率的声音较为迟钝，频率越低的声音，人耳能感觉出时，它的声压级就越高。反之，人耳对高频声较为敏感，人耳对大约 500-7000Hz（相当于 b^1 - a^5 ）音区的声音反应最为敏锐。譬如，要想让比 b^1 低两个八度的 B（大字组 B）听起来与 b^1 一样响，B 要提高 15dB，如果再低一个八度，则要提高 30dB。由于主观量与客观量在极端音区不呈严格的线性关系，因此在对实际音乐进行测量和数据分析时不能用简单的公式加以推断。“具体讲，如果用两架钢琴演奏一个从 C 到 c^4 的音阶（其频率皆在 2000Hz 以下），一架用 80dB 的强度演奏，另一架用 40dB 的强度演奏，其结果，二者之间会产生 20 多音分的音高差异（80dB 的偏低，40dB 的偏高）。”（韩宝强，第 47 页）

现在我们大致清楚了钢琴音准曲线形成的原因了，它的形成不是任何人的刻意为，而是在琴弦的客观物理属性与调音师的主观心理生理因素相互作用下，必然产生的一种音准效果。

只有取得较多的数据，才能减少在测试中不可避免的偶然现象，取得带有规律性的、可信度较高的数据。

调律师在工作时，为了克服谐音的离散，做到听觉上的八度音程和谐，在不自觉中，会做出某种修正，听觉上不会有偏高偏低的感觉，只要有调平调纯的感觉就可以了，这时用音准仪测就可以看出，低音基音是偏低的，高音基音是偏高的。调律师绝不可有意将音调高调低，这样做会造成八度不纯的结果。

但是钢琴音准曲线并非是固定不变的，不同规格的钢琴甚至不同调音师调出的同一台钢琴都会表现出不同的曲线特征（即高音偏高、低音偏低的程度会有所差异）。每个数据对每一个琴键、每一个音都不具有严格的对应性，当然，总的趋向还应该是一致的。

也就是钢琴调音师在调整钢琴时不一定非要教条地按照这个曲线调律，要根据自己的心理生理情况，以及乐器的质量情况而定。因此说，钢琴调音是一项带有艺术性的特殊技能。

我们还应该知道，钢琴调音所生成的音准，终极检验目的是为了供人们欣赏的，而不是供科学实验仪器检测的，所以钢琴的音准属于主观音高的范畴。总之，钢琴的音准，还是以人耳鉴别为主，仪器可以使用，音准曲线可以参考，但终极目标是演奏者与欣赏者都感到舒服。

第二节 钢琴调音师与演奏者的对立统一

钢琴家不能分离的两位好朋友，一位是钢琴技师，另一位是钢琴调音师，大

多数时候这两者其实是一个人，因为想要得到一个稳定而动听的钢琴音准，不懂得修整钢琴是万万不可能的事情。

每一架钢琴，特别是手工制作的钢琴，它们都是独一无二的，各不相同。每一架钢琴都有其独特的特性，独特的“声音”，钢琴家们对此很是敏感，因为这不仅影响到他们的演奏水平是否能够正常发挥，而且还关系到他们的演奏是否具有特色。这一切只有优秀的钢琴技师才能够把钢琴本身的独特个性挖掘出来。

一个好的钢琴技师不仅要懂得如何维护、修整钢琴，更要懂得如何与钢琴演奏者们沟通、配合。因为钢琴演奏是一个很主观性的事情，钢琴家们对于钢琴具体音准和具体音色的要求各不相同，只有积极与钢琴演奏者们配合沟通，才能使钢琴演奏者们最大限度地发挥自己的水平，展现个性的特色。

那么，钢琴调音师与钢琴演奏者之间的关系到底是怎样的呢？他们对于钢琴的调整标准是否能达到一致呢？如果产生歧义的时候，二者谁起决定作用呢？我们将带着这些问题来讨论下面的内容。

一 调音师与演奏者对音准的不同认识

在钢琴调音时偶尔会发生这样的问题，那就是调律师在精心调试一架钢琴后，钢琴演奏者却认为“音不准”，那么此时，我们是要相信钢琴调音师的技术还是要遵循自己的听觉印象呢？之所以会出现这样的现象，笔者大致将其归为两方面原因。一是，钢琴调音师与钢琴演奏者对于音准的判断方式不同；二是，十二平均律给现代音乐带来的困惑。

1、客观音高与主观音高的碰撞

“音高”（pitch），顾名思义就是指声音的高度。音高感是人们欣赏音域的最重要的一种感觉，衡量一个人有没有音乐感，往往就看他对音高的认知能力。

音高有主观音高与客观音高之分。人类凭借自己的听觉感受到并表达出来的音高就是主观音高，它是听觉系统对声音高度的一种认定；而用声学测量设备得到的音高数值就是客观音高。音高在人类听觉中的映像是一种主观的东西。费希纳定律已经表明主观音高与客观音高呈对数关系，即主观音高量以算术级数增长，而客观音高量是以几何级数增长。但在极端音区，音强的物理量则产生影响并使主、客观听觉之间发生对数关系的偏离，主观音高与客观音高之间并非成严格的对应关系，即便是最灵敏的听觉系统也不可能与仪器测量的结果完全吻合，这是由人的听觉特性决定的，与其他原因无关。（韩宝强，第26页）人类的第一件乐器应该就是自己的嗓音，人类嗓音发出的声音并不是一个纯音，而是完全符合自然规律的复合音，它自身携带了众多的泛音，因此，人类天生就会与一些音高产生共鸣，并形成一定的音准审美取向。

主观音高与客观音高的最大区别在于，主观音高会受到外界因素的影响而改变，它是一种易变的、多重性的标准。即使是同一个人，如果实践、环境和心境发生了变化，其音高感觉也可能会随之改变；而客观音高则不会随着环境的改变而改变，它是固定不变的。

在音乐实践中我们所感知的声音的音高，基本上都是主观音高。“音高准确性由人们的音准感所控制，既然人与人之间的音高感觉不会完全一致，那么在音准感方面必然也存有差异。当一个人听到不符合自己音准感的音高时，就会产生‘音不准’的感觉，此时他是以自己的音准感作为衡量的尺度作出的判断”。（韩宝强，第34页）

所谓音准（intonation）是指“歌唱和乐器演奏中所发出的音高，与一定的律制的音高相符”。“歌唱和乐器演奏过程中随时都要通过演唱者和演奏者的控制来解决音准”。“音准的取得有赖于敏锐的听觉、优良的乐器、精湛的演奏技巧与适宜的环境。”^①因此我们可以知道，音准的好坏取决于演奏者或演唱者对于符合一定律制的音高的控制能力。

“音准感”（Sense of intonation）是由“音准”的定义发展而来。所谓音准感是指“人们对音乐演奏或演唱中存在的音准状况的感觉”。“实际音乐中影响到音准的因素是多方面的。例如律制、演奏技巧、乐器质量，环境因素等等。然而，最重要和最基本的因素依然是人的音准感。因为其他因素最终都要在音准感的指挥、控制下产生作用。”（韩宝强，第36页）有了音准概念之后，我们就会对别人唱出或者奏出的音的音高做出“准”或“不准”的判断。

韩宝强在1988年对145位音乐家的音准宽容度测量后得出了这样的结果：多数音乐家的和声性音准感具有-38至+14音分的宽容性，这意味着对于多声部音乐来说，音准偏低一些更不容易被人觉察。

与其他音乐专业相比，指挥家的音准宽容度相对较窄一些，这意味着指挥对音准的要求是比较“苛刻”的。

从以上研究成果可以看出，在音准判断上，人的主观听觉不像测音仪器那样恒定、精确，存在一个宽容度区间，但有一个界限。（韩宝强，第38页）

在音乐实践中，人们所说的音准都是指主观音高，所谓音高“准”与“不准”，是指能否符合听辨人的主观听觉习惯，能否能在听觉审美上取得认同的。

在钢琴调音中，上文已经讲过调音师调音的工作原理，即根据两个音的吻合谐音之间所产生的拍音（频率差）进行调试。也就是说计算拍音的精准度决定着钢琴音准的精准度。拍音是由客观存在的频率差所产生的强弱变化，从这个层面上来讲，我们可以认为调音师是在客观音高的基础上进行钢琴调音工作的。

^①《中国大百科全书》音乐·舞蹈卷，第819页，音准概念

而演奏者对于钢琴音准的听辨则没有那么多逻辑性，而是不折不扣的主观判断。他们凭借多年形成的固定音高习惯对音准进行直觉地判定，要求音准符合他们的听觉习惯并达到欣赏角度的艺术要求。

总之调音师和演奏者的音准判断在感知上是所有不同的。当调音师与演奏者之间对音准判断产生歧义时，我们要从以下几个方面来检验孰是孰非：

- 钢琴调音师的技术是否过关；
- 演奏者长期以来形成的音高概念是否有所偏差；
- 调音师与演奏者当时的生理心理情况是否良好；
- 调试的这架钢琴的质量如何；
- 听辨钢琴音准时的声场环境如何。

只有全面了解这些内容，我们才能客观地评价调音师所调试的钢琴音准问题。

2、人工律制与自然律制的摩擦

不同的律制形成的音高概念会造成音准观念方面的差异。纵观人类音乐历史，“人类始终在探索丰富多彩的音乐音响与我们人类的听觉感受之间的关系，这既是律学诞生的基点，也是验证各种律学理论和假说的唯一标尺。”（韩宝强，第40页）

人类从有音乐产生开始，从未停止过对音乐本质的探索，因而产生了众多的律学理论，随着时代的发展和科技的进步，五度相生律、纯律以及十二平均律这三律成为现代律学理论关注的焦点。

这三种律制之所以能够沿用到今天，因为它们是人类听觉审美中最基本的规律。

五度相生律：适用于单声音乐的曲调，该律能最大程度地表现旋律的那种倾向美和向心美。

纯律：适用于多声部音乐，倾向于和弦结构，该律能将复调音乐中的和声美表现地淋漓尽致，它多使用在合唱及室内乐中。

十二平均律：适用于各种转调、离调，该律最大的特定就是能够自由转调，可以模拟前两种律制，因而可以作为前两种律制的代用品。

表 2、常用三种律制音阶音分数差异对比（以 c1 为生律起始律）

	c ¹	d ¹	e ¹	f ¹	g ¹	a ¹	b ¹	c ²
五度相生律大音阶	0	204	408	498	702	906	1110	1200
十二平均律大音阶	0	200	400	500	700	900	1100	1200
纯律大音阶	0	204	386	498	702	884	1088	1200

上表显示，十二平均律与五度相生律和纯律之间，最大音差只有 16 音分，

因此十二平均律在音乐进程中可以基本满足五度相生律对旋律的要求和纯律对和声的要求。

一个现象值得我们注意，电子琴是严格按照十二平均律调整的，但很多音乐爱好者都有这种感觉，电子琴的音准听起来“怪怪的、很生硬、不美……”这进一步证明了十二平均律作为一种非自然律与人的生理听觉习惯的明显冲突。

但是同样以十二平均律作为调音依据的钢琴，给人的感觉就没有那么糟糕，这是为什么呢？其中重要的一点就是，钢琴是由调音师根据听觉调试出来的，必然或多或少加入调音师个人的听觉习惯和审美取向，况且由于钢琴自身的物理属性以及人类听觉的生理因素，钢琴音准并不是严格按照十二平均律调整的，这些在钢琴音准曲线部分已经提过，这里不再详细说了。

尽管如此，很多演奏者对钢琴的“音准”还是表现出异议，这是一个普遍存在的现象。我们会有这样的经验，当我们用钢琴来演奏旋律时，我们并不觉得钢琴的音准有很多问题；而当我们用钢琴来演奏和弦时，钢琴音准问题就成了一个不可逃避的问题。为什么钢琴在演奏不同素材的音乐时，音准会有如此大的变化呢？那是因为当音乐呈旋律进行时，五度律所起的作用比较大，而当音乐用来表现和声时，纯律所起的作用就比较大。十二平均律与五度律和纯律相比较，其更接近于前者，而疏于后者，因此会出现上面所说的那种现象。

客观地讲，目前还没有一种律制能够同时满足“旋律”、“和声”、“自由转调”所有的要求。不同律制概念造成的“音准”观念差异只能协调而无法真正解决。大家所要做的就是去了解律制上的差异，更好地利用律制。

二 钢琴调音师与钢琴演奏者的关系

由于上述原因，在钢琴调音实践中，调音师与演奏者之间对于音准问题难免有不同意见，当二者发生分歧时，到底是演奏者顺从调音师的决定呢？还是要调音师尊重演奏者的建议呢？在钢琴调音过程中，调音师与演奏者之间的关系如何呢？作者认为这个问题要分阶段讨论。

1、钢琴调音师与钢琴初学者的关系

当演奏者是一位初学者时，由于其对于音乐还没有太深的了解，对于音准也没有准确的概念，此时调音师的音准判断就起着决定性的作用，调音师专业技术的优劣以及职业道德的好坏直接对初学者音准产生影响。

人耳辨别音高具有很大潜力，这种潜力可以通过音乐实践开发出来。对于一名钢琴初学者来说，开始阶段是他们形成敏锐良好的音准感和细腻的音乐感受的重要阶段。但一般琴童在初学钢琴时，往往音高概念还没有形成，此时其听觉系统的可塑性很大，如果经常弹一架不准的钢琴，甚至会破坏原本不错的音准感。

儿童的听觉比成人灵敏，是建立音高概念的最佳时期，他们所使用的钢琴应得到及时地维护和调修。当然绝大多数的琴主无法通过自己的肉耳辨别“走音”，一旦发现了，往往已经走得很厉害了。这将导致弹奏者固定音高概念失准，音乐效果缺乏生机。如果同音弦组内的音不统一，造成发音松散，单音凝不成一条线。使音色暗淡，没有光彩、没有透明度。琴主往往误以为钢琴的质量不好；如果音列不准，造成旋律出轨，和弦散架，弹奏者练琴兴趣下降，学习进度缓慢。

然而，许多家庭都对钢琴调音的重要性认识不足。有的家庭甚至从来没有给钢琴调过音却认为音准没问题。还有一些家庭随便请个人就来调琴，他们从未想过这样做不但不能调准音，反而会给钢琴造成不必要的损伤，同时也很大程度地伤害了琴童的听觉系统。

因此，对于钢琴初学者来说，选择一位优秀的调音师与选择一位优秀的钢琴教师同样重要。

2、钢琴调音师与钢琴演奏家的关系

当演奏者经过训练有素的音乐训练，逐渐形成自己的音准判断后，演奏者与调音师的关系就会发生微妙的变化。

世界上有些著名的钢琴家，包括国内的许多钢琴家，在举行钢琴演奏会时，随身都有一名调律师，这些调律师都是精通业务的专家，并熟知演奏家的一些具体要求。一流的钢琴演奏家能听出音准上微小的差别是因为他们在每次演奏之前，钢琴都由很好的调律师将音准调到最佳状态。当然优秀的调律师，往往能够根据钢琴家不同的性格，不同的曲目及不同的演奏风格，对钢琴进行手感、音色及音量等方面的精微处理，使演奏家在弹奏时得心应手。

当然对于钢琴演奏家这个级别的用户来说，调音师的工作不再仅仅是调准音那么简单了，他们更多的是充当着钢琴技师的角色，同时还要懂得如何与钢琴演奏家配合，调出使钢琴演奏家满意的钢琴。

我们知道即便是同一个品牌的钢琴，每一架钢琴都有其各自的特点，就如同一个大家庭中的孩子，虽然他们是同胞兄弟，但是彼此各不相同，每个孩子都有各自不同的才能，都需要区别对待。作为父母，要观察并帮助每个孩子在他们最有能力的领域中发挥特长、取得成就。这也是一个优秀的钢琴调音师对待钢琴的方法，他不仅要熟悉、研究他所调的每一架钢琴的特点，还要使这件乐器发挥出最佳的性能。

当然不同的钢琴演奏家对于钢琴也有不同的喜好，此时，钢琴调音师的工作就是调整出符合该钢琴演奏家要求的声音，尽管那种声音并非每个人都会喜欢。

弗兰茨·摩尔（Franz Mohr）——曾常年担任霍洛维茨（Vladimir Horowitz，1904—1989）和鲁宾斯坦（Artur Rubinstein，1887—1983）专职钢琴调音师，斯

坦威公司的“音乐会首席技师”——在其撰写的《与钢琴大师在一起的岁月》中写道：“霍洛维茨常说他的钢琴带那么点‘鼻音’，……他要求钢琴的击弦机反应很灵敏，也就是说下键时只需轻轻一触，指尖感觉不出键回弹力；与此同时，手指离键后又能迅速有力地返回原位。键盘的重量也要调整到霍洛维茨希望的状态。”“不仅每架钢琴有所不同，钢琴家之间也不同，而且区别更大——无论是在生理还是在其他方面。以阿图尔·鲁宾斯坦为例，他就绝不会弹霍洛维茨的钢琴。”“就‘触感’而言，鲁宾斯坦需要的击弦机键回弹力要比霍洛维茨的大。他喜欢下沉度较深的琴键，要求手指感觉到它的反弹，霍洛维茨钢琴的击弦机绝对不适合他。”（弗兰茨·摩尔，1999：第10页、第34页）

可见，钢琴调音师与钢琴演奏者之间的关系是多么微妙，他们既是亲密无间的战友，又是相互独立的个体。无论钢琴家的演奏水平多么高超，离开了调音师，一切都是徒劳，高明的调音师能够最大程度地发挥钢琴演奏者的优势，掩盖他的缺点，而调音师也正是通过演奏者表达出来的优美音乐来体现自身的价值。

三 “谐和”的音乐审美

对于钢琴调音，无论我们采取什么样的分律方法，也无论我们将它调成什么样的音准曲线，其最终都是要达到这样一个目标：既能任意转调，又符合人类的听觉审美要求。

那么什么样的音乐才是符合人类音乐审美要求的呢？或许我们可以借鉴修林海先生在《中国古代音乐美学》中的观点，那就是“和”或者说是“谐和”。“和”一直以来是人类追求音乐审美的理想境界，或者说是最理想化的审美范畴。它作为音乐艺术审美活动的最高境界，与自然、人类以及社会都紧密关联。它在人的音乐实践活动中，体现为建构在种种音乐审美活动基础上的审美关系。

音声之“和”，不仅具有乐律学的意义，同时也具有音乐心理学的意义。古今中外的音乐文化，在人的音乐听觉审美尺度的建立过程中，都是执意追求音乐的谐和感。尽管随着人的社会情感生活的变化以及音乐听觉思维模式的改变，对音乐谐和感的感知力也在逐渐地发生着变化，但无论如何，人们总是根据自己建立起来的音乐听觉审美尺度而不断追求音声的和谐。

就人类音乐听觉谐和感建立的一般规律而言，最早的音声之“和”，应是基于同度音程1:1与八度音程2:1建立的谐和感。当然，这种谐和感的紧张度是最小的，应当承认，这毕竟是人类音乐协和感产生发展中不可缺少的一步。人类最早的音乐协和感，是可以由其发声中感受到的。《旋律史》的作者匈牙利音乐学家萨波奇·本采曾谈到：“人类通过感官直接感受到自然或人类自身发出的声音，这些声音对人类产生强烈的影响。重要的是人类能自己发声，……实际上，

音乐的两大要素，音高和节奏，作为一种自然的、宇宙的现象都存在于人体之内。”（《旋律史》）由此看来，构成人类最早音乐听觉谐和感的纯五、纯四度音程不仅有其自然数理的声学基础，同时也具备作为人的音乐审美条件的听觉生理心理基础。

在人的音乐听觉尺度（如音程）的协和感建立之后，人对音乐谐和感性认识的进一步发展，便是音阶的谐和感，这已经意味着在人的音乐听觉思维模式中形成有一种结构，这种结构本身就有着谐和的意味。在古人的认识中，建立在纯四、纯五度谐和感基础上的音阶结构，即意味着一种“和”。古人以和音为乐，同样具有音乐听觉思维模式结构的含义。简单明了的数字形式及其生律方式本身就意味着一种美，这是一种由人的审美听觉尺度所肯定的谐和美。其萌生与发展，无疑伴随着千百年人的音乐实践活动，而人的“音乐的耳朵”及其听觉心理内在结构、模式，亦从中孕育、开发以至成熟起来。这是人的听觉心理的塑造，也是人的音乐智能的开发。“和”作为这一音乐审美成果最简洁、最集中的概括与归纳，它是由人的无数次音声谐和美的感受给予支持与肯定的。

音声之“和”，指的是人在音乐实践活动中于审美听觉心理上建立的谐和感，它包括人的各种音乐审美听觉尺度、结构模式的建立，并以此作为一种审美的评价标准。尽管这种审美听觉上的和谐感必然会随着人的音乐听觉心理的衍化、发展而改变其原有的审美听觉尺度与结构模式，但是，人在音乐审美中不断追求谐和的意志与倾向，并以此作为审美评价标准的要求，却是不会改变的。（修海林，2004：第52-68页）

第三节 音准仪的使用

Tonometer 是指专用于测量律音（note, tonic）声、电信号其音调 pitch 高低、音调是否准确、音调偏离音分量的各类机械、声光、电子数字或指针式的调谐、测量指示仪器的总称。^①而在音乐实践中用于测量或校准乐音音高的仪器被称为音准仪（electronic tuner）（韩宝强，第128页）目前，有关测量音准方面的仪器有闪光音准仪、数字显示式音准仪、表针指示式音准仪等。

现在，音准仪被广泛运用在乐器调音中，音准仪实际上是测定声音频率的仪器，它能自动把频率转换成音高，并显示音的偏差（以音分为单位）。

在国际上借助音准仪给钢琴调律已有半个多世纪的历史。对于这一现象，人们有不同的看法，一部分人认为：钢琴音准是给人听的，因此调律师必须有音乐听觉，借助仪器调律是降低了对调律师的要求，也不可能把音调准；而另一部分

^① 张国庆、李翔：《在校准音准仪标准音高时的不确定度探讨》，《中国测试技术》，2005年06期，第16-17页。

人认为由于听音过于抽象，很难把握，既然有仪器可以帮助，应该借鉴；当然还有一部分人认为把两种方法结合起来才能达到钢琴调音的完美与统一。

作者的观点是既然多功能高精度电子音准仪已经出现，我们就不要急着去排斥它、反对它，而是要全面了解它的特性与功能，这样我们才能理性地识别多功能高精度电子音准仪到底是否适合用于钢琴调音中。

一 音准仪的工作原理

音准仪是一种涉及计算机科学、电子学、声学的电子产品，它的工作原理是在确立钢琴理想音律与各音实际物理音高的关系的基础上，将原始声波信号放大后滤去谐波等各种干扰，转换成方波脉冲，并使用内置定时器和计数器计时和计数，再通过高精度运算子程序与标准音高比较后计算出各项结果。

从音准仪的工作原理我们可以知道音准仪所能辨别的只是一个纯音，对于一个复合音来说，音准仪只能显示出它的基音的高度，而忽略了其他谐音对该音音高的影响，这就大大降低了测量钢琴音高的精准度。音准仪并不能像人类的听觉系统那样，将一个复合音的所有声波都接收，并在大脑中形成一个综合的声音效果。而这一点是目前任何一个音准仪都做不到的。

二 钢琴声音的特殊性

钢琴的声音具有较为突出的不谐和性并且有丰富的泛音，因此会出现假的拍频、机械的磨擦以及撞击声等一系列噪音，再加上外界的各种响声，都会变成信号输入音准仪，因此用音准仪来调校钢琴的音时，常常会出现显示窗条纹紊乱不清，以至难以辨认（尤其是低音区）的情况。由于高音的频率超出了仪器的测量范围，加上余音太短，用它来调校这部分的音也很困难。而我们人的耳朵可以区分钢琴的声音和外界的干扰，可以进行各种音程的检验。

三 钢琴音准“标准值”

前面我们已经提到，尽管钢琴的调音是以十二平均律为基础的，但是由于钢琴自身的特殊性以及人类生理心理的一些限制，钢琴的音准并不能像电子合成器那样完全符合十二平均律的音准要求，而是形成一条钢琴音准曲线。这条音准曲线并没有一个固定的标准值，而是由调音师根据所调钢琴的特点、当时的环境等因素决定的，那么这对于音准仪来说是致命的。

现在我们来问，音准仪的“标准值”是由谁来制定的呢？是制造音准仪的厂商定好的“值”，即定好的同一模式曲线上的各律率坐标值对吧？问题又来了，

什么厂家用什么型号的琴？以什么标准或以哪位大师调后所测值做“采样源”呢？就音准仪内部设置好了的曲线（理想化的）也有对应琴的规格呀，即便是这样，目前也只是在规模化、工业化生产钢琴的厂家才用啊（日、韩，包括他们境外的合作厂），还没听说那个演奏会是按设定曲线来进行“视觉”调音的。若对于普通学琴用户，若琴型对得上，也许能行？但有一个问题不能忽略，那就是在两台同品牌同型号的琴上，在相互对应的音位上，就弦的粗细、柔顺性、刚度与劲度也未必能绝对的一致，尤其是缠弦（因为这些都是决定基频高次谐波偏高离散幅度的关键），那么按设定同一曲线“视调”后，会不会在哪台琴上会出现弹听纯八度时却感觉纯度不够呢？那么双八度甚至三个八度怎样呢？你可以用视觉监视来调每个“单音”，但钢琴不止是用来弹奏单音或单音前后组成的音调，还要弹奏八度等音程还有各种结构的和弦。尽管目前有的音准仪厂商已经在所生产的音准仪内设置了十几条音准曲线，但是我们知道这还远远不够，而且通过这种方式来弥补音准仪的缺陷也是治标不治本的。

另外还有一些制作成本上的问题，根据音准仪的工作原理我们知道，每个音准仪中都有一个拾音器（也就是我们通常所说的话筒），拾音器质量的好坏决定着音准仪拾音的可靠性，一个质量较好的拾音器动辄就是上万元，而我们普通音准仪的价格只有几百元，这其中的误差可想而知了。

从以上各种情况综合分析可以得出结论，目前这种条件下用音准仪来普遍调校钢琴音律并不适宜，完全依赖于音准仪来调校钢琴更是不可取的。当然我们也不否认多功能高精度电子音准仪的出现不仅给初学者带来方便，也为高级调律师不断提高了的技艺提供了帮助，同时给他们的教学工作带来极大的方便。

钢琴调音是一项带有艺术性质的专业技能。也就是说这项专业技能其中包含着一些“非确定性”的因素，一个高明的调律师在调好一架琴给一位音乐家听，音乐家很满意，此时用音准仪测出音准的数据。同一时间、同一地点、同一架琴、同一个调律师把琴再调一遍，再给音乐家听，音乐家仍然很满意，但再用仪器测量一定会测出与第一次音准不同的数据。我们可以将其解释为钢琴调音的艺术性，若一定要把这其中的不确定性因素指标化，形成可重复、可检验的数学公式，必定会失去其应有的生命力。^①

第四节 目前我国钢琴调音行业的现状

钢琴传入中国的时间并不长，20 世纪初，随着学堂乐歌的兴起，钢琴才逐渐进入中国人的生活中。但是由于整个 20 世纪上半期，中国都是处于一个连年

^①金先彬：《论听觉与视觉调律——音准仪的应用》，《金先彬论文选》

征战的状态中，因此，钢琴在中国的发展非常缓慢。直到中华人民共和国建立以后，社会安定，经济发展，这时钢琴才重新在中国有所发展。改革开放以来，随着经济的快速发展，中国与世界的联系日益密切，钢琴事业也迅速发展起来，无论是钢琴生产、钢琴演奏还是钢琴教育都以惊人的速度前进，但遗憾的是与钢琴艺术息息相关的钢琴调音事业，在我国还处于一个较为低水平的发展期，其发展速度已经远远落后与钢琴艺术的发展速度，钢琴调音人员的水平良莠不齐，此外中国目前钢琴调音的学科基础理论还比较贫乏，调音实践与理论知识相脱节。

一 钢琴调音师现状

中国乐器协会理事长王根田先生在《钢琴调律与调整教程》序言中指出：……若以年平均投入 25 万台为基数计算，到 2050 年，我国钢琴社会拥有量约为 1500 万台。按最保守计算，届时，城市人口 4 亿，家庭户数为 1.3 亿个（每户 3 人），钢琴家庭占有率仅 8% 强，（远远低于日本现时钢琴家庭占有率的 28%），约需钢琴调律师 5 万人。而我国现仅有钢琴调律师 3000~4000 人，且绝大多数未受过正规的培训和教育。由此可见，扩大钢琴调律师队伍的重要性和紧迫性以及培训任务的艰巨性……。（金先彬、陈重生、张茂林，第 2 页）

以往，很多用户根本不注重钢琴音准的调试校正，也忽视对钢琴的维护，使钢琴音准严重“跑调”，钢琴寿命大大减少。甚至在国内的大部分音乐院校里，从事钢琴调律与维修这项特殊工作的人数也不多，更有甚者，有的院校根本不设此岗，仅每年定期请人进行修调。由于钢琴调律与维护工作普遍不受重视，同时又缺乏有效的组织管理机制，使得钢琴的不良损耗加剧，这直接影响到教学质量，不利于学生的音乐欣赏与学习。

值得欣慰的是，随着相关专业人士的不断呼吁以及人们音乐欣赏水平的不断提高，越来越多的音乐学习者逐步认识到钢琴调音和维修的重要性。钢琴调音市场，正呈现出基数大、增速快、潜力大的良好势头，钢琴调音师也成为炙手可热的行业，调律师严重供不应求。

但是目前中国的钢琴调音行业现在还不够规范，存在着这样那样的问题。钢琴调音市场也没有被充分开发。调音师的专业技术与职业道德水准良莠不齐，用户感觉社会上调音师不少，但想找到一位经验丰富，技术精良，诚实可靠的调音师却难上其难。在我国，优秀的调音师多集中在北京、上海等大城市中；而中小城市中的钢琴调音师则是鱼龙混杂。

中国的钢琴调音行业是一个新型行业，钢琴调音专业的基础理论还不够完善，调音实践还缺乏深厚的理论指导，大部分钢琴调音师在学过一些基础的概念后，便匆匆投入到实践中去，导致其基础理论知识贫乏，实践与理论相脱节。作

者经过调查发现很多调音师认为：钢琴调音是一件实践性很强的工作，它凭借的主要是调音师的个人经验。至于理论方面，只要掌握必要的一些基础知识就足够了，花费大量时间在理论研究上纸上谈兵，完全没有必要。作者认为，钢琴调音专业虽然是一件实践性很强的工作，但同时它也是一件科学性很强的工作，经验固然重要，但没有科学的理论作为指导，钢琴调音专业就会始终停留在这种原始阶段而不能快速发展，也不能得到整个社会的认可更不要说是普及了。加上目前并没有很好的办法来检验钢琴调音的音准问题，这也为钢琴调音蒙上了神秘的面纱。

作者认为一位优秀的钢琴调音师必须具备扎实的专业技术和优良的职业道德。具体而言，就是要不仅熟悉钢琴的结构，懂得钢琴的工作原理，具备过硬的操作技术，能够从音乐声学 and 律学等多个角度来分析这些钢琴调音的基本原理和钢琴调音的方法；更重要的是要有良好的职业道德，能够在维修过程中处处为客户着想并能时刻与用户保持沟通。

当然钢琴的音准问题也不全与调音师有关，它还与钢琴质量优劣有着密切的关联。通过测音能够看出，质量好的钢琴，其音准也相对标准一些；而质量稍差的钢琴，其音准的稳定性也相应地逊色很多，这在附录的测音结果中能够明显看出。

二 钢琴调音专业教育

据了解，目前我国钢琴调音师入行的途径大抵有三个：一是通过专业学校学习；二是所谓的“师承”下来，即师傅手把手教授，这也是最传统的学习方式；三是在钢琴厂学习，由于在钢琴厂从事设计、制造、维修等工作，有长期的经验积累，因此对调律等维修工作也很熟练。这三种方式中，通过专业学校学习出来的调音师最有优势，因为相对与其他两种方式，在专业学校中可以学习到更加全面而规范的理论知识。

近年来，有越来越多的青年人投入到的钢琴调音行业中来，各种教授钢琴调音技能的专业机构也相继建立起来，就北京而言就有多达 10 几家的专业学校。

1、专业机构

北京目前设有钢琴调律专业的教育单位大致有如下几家：

（排名按专业建立时间，括号内年份为专业开办时间）

北京市盲人学校钢琴调律职业高中钢琴调律专业（1991 年）

北京轻工职业技术学院艺术设计系、成教部钢琴调律专业（1998 年）

北京劲松职业高中钢琴演奏与调律专业（1998 年）

中国音乐学院成教部乐器修造艺术（钢琴调律）专业^①（1999年）
北京现代音乐研修学院音乐教育系钢琴调律专业（2000年）
北京钢琴厂钢琴调律培训班（2000年）
中央音乐学院成教部钢琴调律专业^②（2002年）
首都职工联合大学中国歌剧舞剧院分校钢琴调律专业（成教）（2002年）
北京联合大学特殊教育学院艺术系钢琴调律专业（盲人）（2002年）
北京市一轻高等技术学校钢琴制造与调律专业^③（2003年）^④

2、专业课程

由于钢琴调律在国内是一个相对较新的专业，众院校在专业课程设置，尤其是教材的选用方面，尚处于探索阶段。但总体来说，要学习钢琴调音技术，掌握以下几方面是必不可少的。

首先要作为一名合格的钢琴调音师，必须要有过硬的调音技术，因此学习调音理论知识是一门最关键的学科，目前有几本钢琴调律专业教材，作者罗列出来仅供大家参考。一本是由王可茂翻译的美国调律师威廉·布雷德·怀特（William Braid White）编著的《钢琴调律与有关技术》（*Piano tuning and allied arts*），这本书从1917年出版到1971年共13次印刷，已被译成多国文字，可称之为钢琴调音行业中的“圣经”；另外由我国著名钢琴调音师金先彬、陈重生、张茂林共同编著的《钢琴维修调整与钢琴调律》，也是目前学习钢琴调音的必读教科书；此外还有陈重生编写的《钢琴调律原理与应用》和张琨编写的《钢琴的调律及维修》等几本影响较大的理论专著。

当然，作为一名优秀的钢琴调音师，掌握一定的音乐声学 and 律学知识也是必不可少的，只有学习的音乐声学，才有可能了解钢琴的构造与发声原理，这样才能更好地发挥钢琴的优势，使其不愧于“乐器之王”这个称号；其次钢琴是十二平均律乐器，因此拥有一定的律学知识并了解不同律制的本质后，才能在保证自由转调的基础上最大限度地将十二平均律调整贴合人类的听觉习惯。目前大部分院校都采用缪天瑞先生所著《律学》一书作为律学学习的教材。

作者相信任何一位伟大的调音师都是一位优秀的音乐鉴赏家，而不单单是一位“能工巧匠”。因此为了提高调律师的音乐素养，大部分钢琴调律专业院校都把“钢琴演奏”作为必修课。只会听“拍音”调律的调音师并不是一个真正的好调音师。真正的好调音师应该具备很高的音乐素养，这样才会把钢琴调整得更符合人类的音乐审美习惯。

^①中国音乐学院还开设有钢琴调律进修班

^②从2003年起，中央音乐学院成教部钢琴调律专业及中央音乐学院钢琴调律进修班不再招生。

^③北京市一轻高等技术学校钢琴制造与调律专业由于刚刚开办，硬件设施及师资还在调整当中。

^④原文刊载于《中外乐器信息》2003年10、11、12期

令人高兴的是现在已经有越来越多的年轻调音师接受了正规专业学习,而这些调音师在长期的实践中已经成长为成熟的专业从业人员。我相信,在这些优秀钢琴调音师的带领下,中国的钢琴调音事业必将逐步走上规范与完善的道路!

小结

随着现代音乐的发展，钢琴这件乐器已经越来越多地被人们所熟悉，与之相应的钢琴调音也不再是一个陌生的话题，中国的钢琴调音事业迅速地发展起来。在这种情势下，发展与完善钢琴调音基础理论则显得尤为重要。虽然专业人士已经意识到这一问题的重要性，并且正在努力地填补这一空白，但是还有相当一部分人不以为然，只认为钢琴调音是一件熟能生巧的实践性很强的工作，并不强调理论的重要性。任何一门学科若想成为真正意义上的“学科”，那么完整的理论的阐述以及科学的方法论是必不可少的。

本论文积极采取理论与实践相结合的方法进行研究。运用了查找文献、律学计算、声学测音与采访等多种方法相结合的工作形式，对所研究的对象进行宏观到微观，从历史到现代等多方面的考察和研究。

以此希望能够得到一个较为全面而又相对具体的阐述，并能够为中国的钢琴调音事业添砖加瓦！