

消声室测量法研究弦槌对钢琴声音的影响*

古利堂[†] 谢志文

(华南理工大学声学所 广州 510460)

摘要 为研究弦槌性能,有很多研究者采用了各种机械测量方法,而本论文则通过声学测量方法来研究。我们实测了两套不同弦槌对钢琴声音频谱的影响,具体做法是在消声室中使用 3 种力度弹奏 88 个琴键并进行录音。频谱分析的结果表明两套弦槌在中力度弹奏时得到的频谱基本一致,但在大力度和小力度弹奏时差别较大,其差别表现为:在低频端,珠江钢琴弦槌激发的高次谐波分量要大于并多于德国 Abel 公司生产的弦槌;随着频率的升高,该现象逐渐减弱,并出现相反的现象。根据 Donal E. Hall 的弦槌理论可知,造成这些差异的原因是弦槌硬度和初始能量的影响效果在不同力度下有所不同。因此,如欲考察弦槌宽度和质量的影响宜用大力度弹奏钢琴,而欲考察弦槌硬度的影响则适合用小力度弹奏。实验结果还表明,这种声学测量实验方法主要使用常规的声学仪器,具有简单、易行的优点,可以作为辅助弦槌的设计和改进工作的一种有效方法。

关键词 弦槌,消声室,力度,高频谐波

中图分类号: TB52.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)05-0369-06

Measurements in anechoic chamber to investigate the effects of chord hammers on piano sound

GU Litang XIE Zhiwen

(Acoustic Lab, South China University of Technology, Guangzhou 510460, China)

Abstract Many researchers used mechanical measurement devices to investigate chord hammers, but the paper used usual acoustical measurement devices to do it. Firstly, the sound pressure while all 88 keys were being performed under 3 different dynamics were recorded, then the effects of 2 kinds of chord hammers on spectrum of piano sound were investigated. It is suggested by the results that the spectrums of these 2 chord hammers were identical under medium dynamic and the difference showed up only under weak dynamic and strong dynamic. In detail, Pearl River Piano chord hammer stimulated more and stronger higher harmonic waves than the Abel(German chord hammer brand) chord hammer at the bass end. As frequency increases, such phenomenon weakened gradually and the contrary situation appeared finally. According to Donald E. Hall's chord hammer theory, the reasons for these differences are the different effects of hammer compliance and initial energy under different dynamics. To investigate the effects of wideness and mass of chord hammers, strong dynamic is more suitable. However, to investigate the effects of hammer compliance, weak

2012-11-21 收稿; 2013-04-25 定稿

*广州市科技攻关项目(2008Z1-D091)

作者简介: 古利堂 (1987-), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 研究方向: 电声学。

谢志文 (1962-), 男, 教授。

[†] 通讯作者: 古利堂, E-mail: gultang@foxmail.com

dynamic is more appropriate . It can also be concluded that the experimental method proposed in the paper is a doable and simple way to help designing and improving chord hammers.

Key words Chord hammer, Anechoic chamber, Dynamic, Higher harmonic wave

1 引言

钢琴发出乐音的过程是弹奏者敲击琴键从而引发击弦机械的运动，击弦机械的末端是弦槌，它以一定的速度敲击在弦的特定位置上，将运动传递给琴弦，而马桥再进一步将琴弦的振动传递给音板，音板振动继而引起空气振动，这便形成了观众听到的乐音。捷亚柯诺夫的《钢琴制造》一书中曾提到，钢琴的音质 50%由弦列决定，25%由音板决定，25%由小槌决定^[1]。由此可见，弦槌对于一台钢琴的良好品质是非常重要的。通常，弦槌的构造主要包括了硬木制成的槌柄和毛毡制成的槌头，槌柄的一端呈楔形，楔形端部包裹一到两层毛毡，其质量通常在 5 g 至 12 g 之间^[2]。

目前有关弦槌的理论研究并不少，国内的田泽林发表了一系列探讨钢琴物理机理的文章，其中对弦槌击打琴弦的细微过程作了比较详尽的描述^[3]。在国外，Chandrika P. Vyasarayani 等人在大量前人工作的基础上，建立了一个全面的琴弦和弦槌相互作用的模型，其中不但考虑了槌头的硬度、质量等因素带来的影响，并且还考虑到弦槌在击弦机械的驱动下其运动状态是一种转动^[4]。另外，为研究弦槌系统的性能，国外有很多研究者做过各种相关的实验测量，大部分是直接测量弦槌和琴弦的运动情况。Donald E. Hal 在其论文^[5]中回顾了前人所做的一些测量工作：Raman 和 Banerji 使用弹道检流计来记录琴弦与槌头的相互作用时间，但其准确度不够理想；George 和他的学生则使用一种高速成像设备拍摄了弦槌和琴弦相互作用的过程，从而得到了琴弦达到最大位移的时间和位置；George 还使用杜德耳示波器证明了槌头与琴弦之间存在 2 到 3 次接触，接触时间为毫秒级；Davy 等人则将一压电晶体装在槌头处以记录槌头与琴弦相互作用时的应力。Donald E. Hall 在测量中也使用了小质量的加速度传感器和经过巧妙设计的一种磁铁装置。

由上文的描述可知，用于研究弦槌与琴弦之间相互作用的测量仪器基本上不是常规的声学仪器，

其主要是机械测量设备。这些方法本身有其优点，但与声学实验室常用的方法有所不同，大多数声学工作者并不熟悉这些仪器的性能和使用方法。因此，如能使用常用的声学实验方法来研究弦槌性能，在实际的生产和科研中是很有意义的。本文作者希望通过录取弹奏装配有对应弦槌的钢琴的声音信号从而得到其频谱信息，以此来检验弦槌的使用效果，并提出弦槌设计的改进建议。尽管这种方式不能得到弦槌与琴弦相互作用过程的许多具体细节信息，但是能够较好地反映出弦槌的实际使用效果。同时，这种方式涉及到的实验操作更为一般的声学研究者所熟悉，相关的实验资源更容易获得，操作更加简便。因此，如能从该实验中提取用于改进和设计的有用信息，不失为研究弦槌性能的一个好方法。

2 影响弦槌使用效果的因素

由于本文的目的在于从录音信号的频谱入手来研究弦槌的性能，并为弦槌参数的优化设计提供一种实验方法，而 Donald E. Hall 的研究成果将弦槌参数和琴弦振动频谱联系起来，与本文的研究目的一致。同时，他的理论与测量结果相吻合，被证明是正确的^[5]。他比较早发表了一系列详细讨论弦槌物理机理的文章^[5-9]，其中对影响弦槌使用效果的多个因素进行了探讨，给出了详细的理论推导过程。根据 Donald E. Hall 的研究，各个因素在频域的影响效果可以用图 1 来概括，这些因素主要包括：

(1) 对于高音琴弦，由于弦细且短，质量很轻，故通常弦槌质量会大于弦的质量。在这种情况下，琴弦对槌头的阻碍作用不明显，这导致槌头要在与琴弦接触较长时间后才会被反弹从而与琴弦分离。这时，由槌头激发的弓形包络行波到达弦的固定端点后形成的反射波将在槌头离开琴弦前到达槌头处，并被槌头再次反射。如果槌头与琴弦的接触时间较长，在该处将引起二次反射、三次反射乃至更高次的反射。另外，由于弦较短，槌头激发的弓形

波包络也不能被近似视为脉冲波。这种效应带来的影响是使得琴弦上被激发的振动在频域上随着频率增大有很大的衰减（在基频就可以达到 12 dB/oct），图 1 中的“BOW-AND-ARROW”曲线以上的部分可以看做是这种效应的作用区域^[5-6]。

(2) 对于低音琴弦，情况则相反。在理想情况下，弦槌受到的反射波的影响可以忽略，并且可以将其激发的波形包络视为脉冲波。在这种情况下，除了波节恰好在击弦点的谐波不能被激发以外，被激发的其他谐波是不会随着频率增大而衰减的。图 1 中的“PULSE-DECAY”线以下的范围可以看作是满足该理想条件^[6-7]。在该线以上的部分，则该效应开始起作用，带来频域的衰减。弦槌的质量越大，激发的波形包络宽度越大，则衰减率越大。

(3) 弦槌上毛毡的特性使得弦槌受到挤压时所产生的应力是回滞型的，其硬度越小，回滞效应越明显，这也使得弦槌与琴弦的接触过程更加复杂、时间更长。该效应带来的影响同样是频域的衰减，并且随着频率的升高，衰减率增大。图 1 中的虚线即代表该临界值，越过该临界值，衰减从 6 dB/oct 增加至 12 dB/oct。要注意的是，这条临界线的位置并不是固定不变的，对于不同的系统，该线的位置也不同。另外，该性质又与击弦的力度有关，力度越小，该效应越明显。在前面几组低音弦上，击弦力度过小时，还会带来非线性的问题。在某个硬度数值下，击弦力度过小时，可将系统视为是非线性的。这种非线性效应带来的影响也是加大了幅频特性的衰减率^[6,8]。

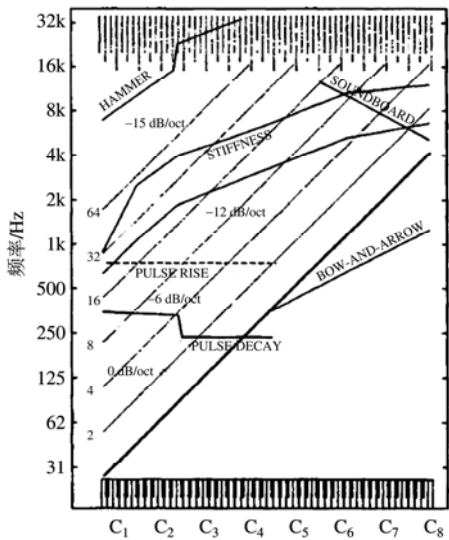


图 1 各种因素对频谱的影响示意图^[6]

(4) 如果弦槌的初始能量（或初始速度）太大，也会导致系统带有一定的非线性性质，带来频域的衰减。这是由于弦得到较多的能量后，初始位移较大，导致弦的绷紧程度显著增加，改变了弦的张力，这会使得各阶谐波频率往上移，而随着弦的往复振动，各阶谐波频率也不断地随之变化^[6,9]。

3 实验测量方法

图 2 是本文采用的实验测量系统的框图。实验在半消声室环境下进行，实验目的在于对比两套不同弦槌系统（一套为 Abel 弦槌系统，一套为珠江钢琴弦槌系统）的使用效果。实验系统的各个部分如图 2 所示：使用两个传声器进行录音，分别布置在钢琴背面的两角，距离钢琴 1 m，两个传声器之间距离 1 m，一个靠近高音琴弦在马桥上的激励点，另一个靠近低音琴弦在马桥上的激励点。根据前面的讨论，部分弦槌参数的影响效果与击弦力度有关。因此在本实验中，由有经验的弹奏者使用大、中、小三种力度依次弹奏钢琴的 88 个琴键，录取不同弹奏力度下的声压信号以供数据分析使用。先在安装 Abel 弦槌的钢琴上弹奏并录音，然后将之拆去，将珠江钢琴弦槌安装在同一台钢琴上，再次进行同样的录音过程。

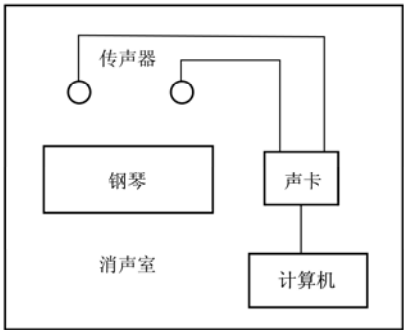


图 2 实验测量装置框图

有不少研究者指出弦槌与琴弦的接触时间非常短^[3,5]，故其带来的影响主要是反映在录音信号的信号的起始段，由此往后的衰减过程主要取决于琴弦与马桥的相互作用。而如前所述，Donald E. Hall 的理论论述的是弦槌参数在频域的影响。根据以上两点，我们分析录音信号时，主要是截取其音头部分，并通过离散傅里叶变换得到其频谱信息。截取音头部分时，给录音信号施加一平滑时间窗以截去

起始阶段的部分信号，时间窗的长度选择以播放经过截除的信号时作者恰好不能听到急促的敲击音为准。其中截去的信号就是音头部分。

4 实验结果与分析

在 Donald E. Hall 的理论中，弦槌参数带来的影响主要是琴弦振动在频域的衰减率，在一定程度上，琴弦振动的频谱特征经过马桥和音板的滤波作用后保留在观众耳朵处的声压信号中。因此我们分析对比两套弦槌的异同时，主要是观察其声压录音信号中包含高次谐波的高频频谱之间的差异，典型的频谱图如图 3 所示。本文在做频谱分析时选取的汉明窗的长度是 1024 点，信号的采样率为

44.1 kHz。图中的实线代表靠近高音弦激励点的左传声器，虚线代表靠近低音弦激励点的右传声器。从图中可以看到，两个不同拾声点的声压信号的频谱具有基本一致的对比规律。

频谱分析的对比结果如表 1 所示。经对比各个琴键录音频谱之间的差异后发现，前 30 个键的具有单一的规律，在该键区内，两者之间但凡存在差异的情况，均是珠江钢琴弦槌激发的高频成分要多于并大于 Abel 弦槌，无一出现相反的情况。后 58 个琴键录音频谱中，两者之间的差异则既有前者的高频成分大于并多于后者的情况，也有与此相反的情况。因此，表 1 中的统计数据分为琴键“1~30”和琴键“31~88”这两个键区。表格中“Z”代表珠江钢琴弦槌，“A”代表 Abel 弦槌；“Z>A”的

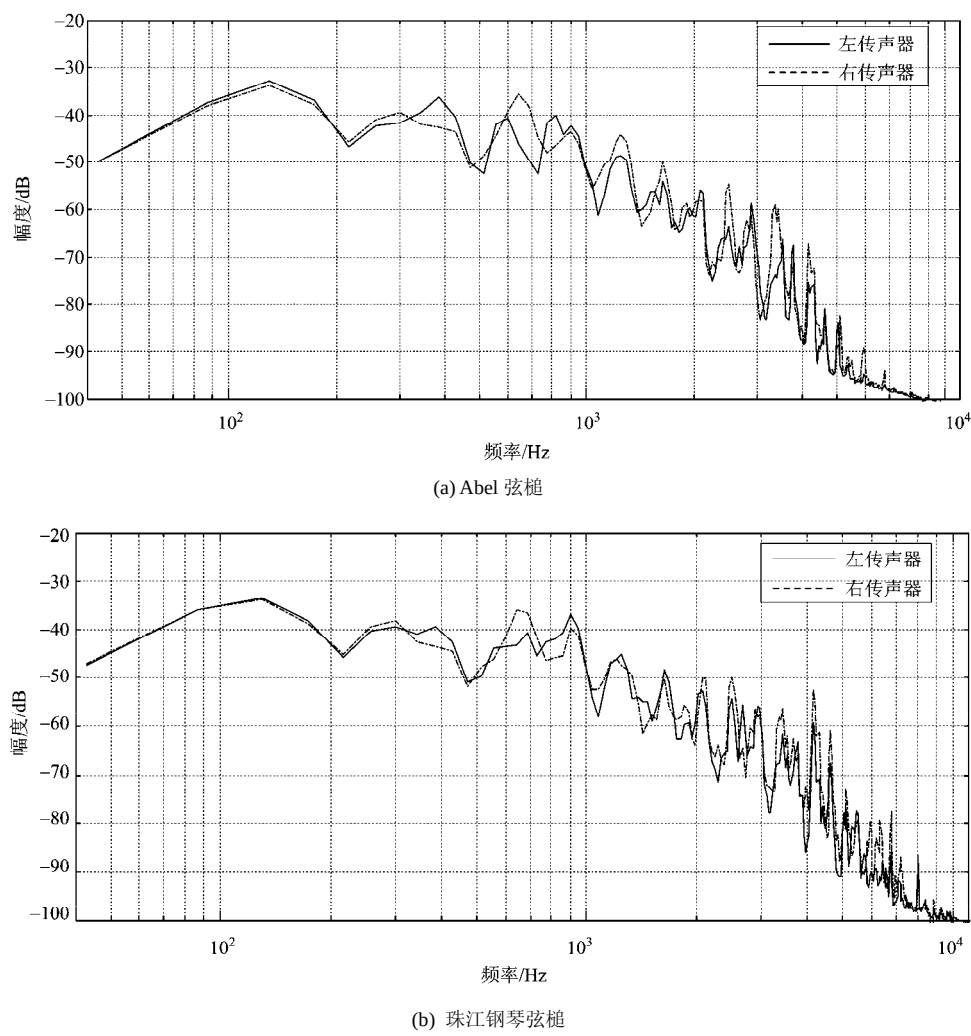


图 3 琴键 1 在大力度下的频谱图

表 1 两套弦槌的频谱差异统计

	键区 1~30		键区 31~88	
	Z>A	A>Z	Z>A	A>Z
中力度	4	0	3	2
大力度	30	0	11	4
小力度	21	0	6	14

一系列数据是珠江钢琴弦槌激发的高频成分大于并多于 Abel 弦槌的琴键数目，“A>Z”代表相反的情况。由表 1 数据可看出两套弦槌系统的使用效果在频域上的异同具有如下特点：

(1) 在使用中力度弹奏时，两套弦槌的使用效果较为一致。具体表现为两者的录音频谱存在差异的琴键数目明显比小力度和大力度情况下少，数目在 10 个以下。而在使用大力度和小力度弹奏时，两套弦槌的音色则具有较大的差别，两者的录音频谱存在差异的琴键数目均在 40 个以上。同时，在中力度弹奏的情况下，频谱之间即使出现差异，差异的幅度也较其他两种力度下的大部分存在差异的琴键要小。

根据 Donald E. Hall 的理论，这应是由于弦槌的硬度和弦槌击打琴弦前获得的初始能量这两个因素的影响效果在不同力度下有所差别而引起的。如前所述，非刚性弦槌的回滞效应在小力度下更加明显，这就使得两套弦槌在小力度弹奏情况下显示出比中力度弹奏情况下更大的差别。而随着弦槌的初始能量增大，其引起的非线性效应带来衰减也加剧，因此，在大力度弹奏的情况下同样会表现出比中力度情况下更大的差别。由此可知，在实验中采用多种力度进行弹奏是非常必要的。

(2) 对于“1~30”键区中珠江钢琴弦槌比 Abel 弦槌激发数量更多、幅度更大的高频成分这一规律，在大力度下较小力度下明显。在大力度情况下，符合这一规律的琴键数目是 30，在小力度下是 21；并且在小力度情况下两者之间虽然同样存在差异，但差异的幅度较大力度情况下小。该结果说明要对比分析低频区弦槌的性能差异，在大力度弹奏的情况下录音，将更易于观察分析其差异性。

根据 Donald E. Hall 的理论，在低频区的影响因素主要是弦槌的宽度及其质量，其中弦槌的宽度主要是取决于楔形槌柄的尖细程度和毛毡的厚度。

在弦槌的设计和改进工作中，观察其在大力度弹奏情况下的频谱特征，更适合于为这两个参数提供设计和改进的参考信息。

(3) 对于“31~88”键区中 Abel 弦槌比珠江钢琴弦槌激发数量更多、幅度更大的高频成分这一规律，在小力度下较大力度下明显。在小力度情况下，有 14 个琴键符合这一规律，而在大力度情况下是 4 个。

由 Donald E. Hall 的理论可知，在小力度弹奏的情况下，弦槌在硬度上的非刚性性质带来的影响更加明显，这可能是出现这一规律的原因。同样，在小力度弹奏的情况下，更适合于为弦槌硬度这一参数的设计和改进提供参考信息。

5 结论

Donald E. Hall 提出的系列理论在一定程度上建立了弦槌的硬度、质量和槌头宽度等参数与琴弦振动的频谱之间的对应关系，以某一振动频谱为参考标准，该理论可以为弦槌参数的设计和改进提供方向性的指导。本实验将两套弦槌系统安装在同一架钢琴上弹奏，因此从琴弦振动到空气振动（即钢琴声音的声压）的过程中，两者是经过了相同的马桥和音板的滤波作用。由于两者的频谱经过的是同一种滤波变换，则钢琴声音频谱中将保留下其弦振动频谱之间的差异性，我们可以通过识别钢琴声音频谱的差异来识别琴弦振动的频谱差异。在本实验中，可以看到不同弦槌激发的钢琴声音的频谱特征能够有效地被区分开来。通过该方法来观察弦槌的使用性能是可行的，可以获得用于分析对比的有用信息。结合 Donald E. Hall 的理论，这种消声室录音的方法可以作为弦槌使用性能的一种宏观检验，用于弦槌的设计和改进工作。在本论文的例子中，若想对珠江钢琴弦槌进行改进，以 Abel 弦槌的性能作为标准，则可以根据 Donald E. Hall 的理论提供的改进方向进行相关参数的调整。在实际生产中，由于各种原因弦槌的某个参数不一定适合做成与参考标准的一致。这时，根据弦槌参数与钢琴声音之间的对应关系，通过调整其他参数也可以使得该弦槌的性能更加接近于参考标准。有必要指出，在实际测量工作中，为充分挖掘不同弦槌激发的钢

琴声音频谱中的信息，需在多种不同弹奏力度下进行实验测量。

参 考 文 献

[1] H. A. 捷亚柯诺夫钢琴制造[M]. 关肇元, 金菊生, 译. 北京: 轻工业出版社, 1960: 90.

[2] 刘晓楠. 钢琴机械机构的性能分析及对音质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7.

[3] 田泽林. 钢琴的声学原理 (一) [J]. 演艺设备与科技, 2005, 5: 58-64.

[4] CHANDRIKA P V, STEPHEN B, JOHN M. Modeling the dynamics of a compliant piano action mechanism impacting an elastic stiff string[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(6): 4034-4042.

[5] DONALD E H. Piano string excitation II: General solution for a hard narrow hammer[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 81(2): 535-546.

[6] DONALD E H. Piano string excitation V: Spectra for real hammers and strings[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 83(4): 1627-1638.

[7] DONALD E H. Piano string excitation in the case of small hammer mass[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 79(1): 141-147.

[8] DONALD E H. Piano string excitation III: General solution for a soft narrow hammer[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 81(2): 547-555.

[9] DONALD E H. Piano string excitation IV: The question of missing modes[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 82(6): 1913-1918.



第 4 届国际超声大会（ICU）在新加坡召开

2013 年 5 月 2 日至 5 日，第 4 届国际超声大会（ICU）在新加坡召开。本次会议在国际声学委员会的组织下，由新加坡声学学会主办，由澳大利亚声学学会、印度声学学会、香港声学学会和印度无损检测学会联合承办。会议致力于促进超声不同领域，包括基础研究、工程技术以及生物医学应用等方面的国际交流与合作。

本次会议吸引了来自中国、印度、法国、德国、英国等 38 个国家和地区的共 250 多人参加，其中学生 83 人，是超声领域组织的规模最大的国际会议之一。

本次会议为超声前沿进展提供了一个广泛的国际交流平台。其内容涵盖了从传统超声到新型研究热点等各个领域，共设置了 8 个专题，包括无损检测（导波、建模与仿真、工业应用等）、超声化学（声致发光、空化效应、造影剂等）、

生物医学超声（超声治疗、超声成像、弹性成像等）、超声物理（体声波和表面声波、非线性、热声学等）、材料（超材料、压电材料和设备、传感器等）以及技术方法（激光超声、声显微镜等）。在为期 4 天的时间里，参会者将他们在各自工作领域中的新发现、新进展和新应用与世界各地的参会代表进行了广泛的讨论。

国际超声大会的前身是超声国际会议（UI）以及世界超声会议（WCU），自 2005 年在北京合并组成国际超声大会以来，每两年组织召开一次，迄今为止已组织了 4 届。第 5 届会议将于 2015 年 5 月 11 至 15 日在法国城市梅茨召开。

（复旦大学电子工程系 他得安）