

引用格式: 郭天艺, 孟子厚. 动态乐音谐波调制的听感谐和性分析[J]. 声学技术, 2023, 42(3): 326-330. [GUO Tianyi, MENG Zihou. Harmony analysis of harmonic modulated music signals[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(3): 326-330.] DOI: 10.16300/j. cnki. 1000-3630.2023.03.009

动态乐音谐波调制的听感谐和性分析

郭天艺, 孟子厚

(中国传媒大学传播声学研究所, 北京 100024)

摘要: 使用正弦加剩余噪声模型对不同乐器的乐音信号进行动态谐波调制, 通过主观评价实验对不同调制模式下乐音的谐和感、粗糙感、自然感、尖锐感四项听感指标进行对比打分。结果表明, 谐波调制所带来的谐和相关听感的影响以及合奏的协和感变化, 在不同音色类型中具有一致性, 谐和听感结果与调制方式有关。

关键词: 谐和性; 主观听感; 谐波调制; 正弦模型

中图分类号: TN912.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-03-0326-05

Harmony analysis of harmonic modulated music signals

GUO Tianyi, MENG Zihou

(Communication Acoustics Lab of Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: The sinusoidal plus residual noise model is used to modulate harmonic components of dynamic music signals of different instruments. The subjective evaluation experiment is carried out to compare the auditory sensation indicators of consonance, roughness, naturalness and sharpness with different modulation modes. The results show that the effect of harmonic modulation on the sense of consonance is consistent in different timbre types, and the sense of consonance is related to the mode of harmonic modulation.

Key words: harmony; subjective sense; harmonic modulation; sinusoidal model

0 引言

声信号的非线性失真指输出信号出现了输入信号中没有的、新的频率成分。扬声器系统的非线性失真主要体现在扬声器的谐波失真等方面, 不同的谐波失真对于谐和听感具有不同程度的影响。心理声学中提出了听感不谐和的观点^[1]。听感不谐和性与粗糙感、尖锐感、音调强度和响度这四种影响听感悦耳度的心理属性存在一定的数值关系^[2]。张婧颖等提出了反映扬声器系统的主要失真特性谐和性评测方法, 并证明了扬声器的失真特性与重放声听感谐和性具有明显关联性^[3]。

针对这种扬声器非线性失真所引起的谐和听感影响有着不同的改善和补偿方法。通过信号处理方法对信号源的谐波成分进行预处理的方式, 不仅能够实现重放端的谐波失真补偿, 并且和一般的物理补偿方法相比, 更具有结果多样性和可操作性的优势。赵苗苗等结合主客观分析, 提出了对输入信号

进行谐和性调制可以弥补微型扬声器谐波失真的缺陷, 提高微型扬声器重放信号的谐和感^[4]。

乐音谐和性问题是声音谐和性的重要分支, 其探究的内容涉及到哲学、数学、物理学以及心理学等众多学科。自 20 世纪以来, 乐音谐和理论从物理学、心理学的角度得到了进一步的探究。中国传统音乐在律制、音乐体系、体裁以及乐器制作工艺等方面和西方传统器乐有着较大的差异, 尤其对于民乐器的交响协和问题, 需要对中国传统民乐单独进行谐和性的探讨^[5]。

由于乐音信号的谐波信息是随时间改变的, 因此需要根据谐波变化进行时变的动态调制。在对乐音信号进行物理建模、分析和合成的基础上, 能够实现修改原信号谐波成分的目的。李仁杰等对乐音单音进行谐波调制并对调制单音的谐和听感规律进行了探究^[6]。但目前针对乐音的动态调制以及旋律听感谐和性的研究较少, 单声部乐音信号相对于复调乐音信号的基频以及谐波结构更简洁规律, 在进行建模分析时更具有基础意义。本文通过使用频谱建模合成中的“谐波+剩余噪声”模型^[7], 对单声部乐音信号进行动态谐波调制, 并通过主观评价实验结果对谐波调制带来的乐音谐和听感影响进行了讨论。

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-02-22

作者简介: 郭天艺(1998—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为乐音信号的谐波调制。

通信作者: 孟子厚, E-mail: mzh@cuc.edu.cn

1 实验素材与实验方法

1.1 实验素材制作

中国民族乐器的音色具有特殊的个性，不同乐器之间的时频特征和表现力差异较大。根据文献[8]中对于乐音音形的分类方法，从民族乐器的基本发音形态出发，将4种民族乐器分类为音形为“线形”的线形组和“点状”的弹拨组。本文实验选用制作素材的音色及分组如表1所示。原始音频信号使用应用较广、乐器种类较多的KongAudio软音源插件在数字音频工作站中制作，音源中使用的是真实乐器采样声音，使原信号听感尽可能接近于真实乐器音色。为排除乐曲的速度、调式等旋律特征对音色谐和性的影响，通过MIDI片段生成如图1所示的同一段无意义短乐句旋律，采用中速的同一演奏速度，演奏模式使用音源中的单音长音连奏模式，力度选择音源采样中3/4的中强力度大小并保持不变。此外，另选用一段二胡演奏的《良宵》实录干声音频作为原始信号的一部分，同时作为真实乐器的参考。

表1 素材选用音色及分组
Table 1 Timbre and grouping of material selection

音色分组	乐器A	乐器B
线形组	二胡	笙
弹拨组	琵琶	筝



图1 素材制作使用的短乐句
Fig.1 Short phrases used in material

使用“谐波+剩余噪声”算法模型对上述原始信号进行分析和合成，得到重建的合成信号，然后对合成信号进行如表2所示的12种调制处理，并进行响度归一化处理。最终将每种音色包括原始信号、重建后的合成信号以及12种调制信号作为实验1中的素材。将两组乐器的合成素材分别进行如表3所示的6种组合调制处理，调制量均为12 dB，并将处理后的调制信号进行组内混合，得到分别包含原始音色混合信号、6个调制音色混合信号在内的两组相似音形乐器进行同度合奏的合奏信号，作为实验2中的实验素材。

1.2 评价指标选择

声音的“谐和”指在谐音列中分音间的相互关系及“和谐”的主观感知，概念较为宽泛。而“协

表2 调制处理方式
Table 2 The modulation modes

序号	处理对象	调制量/dB	序号	处理对象	调制量/dB
1	高次谐波	-12	8	三次谐波	+12
2	低次谐波	-12	9	四次谐波	-12
3	奇次谐波	-12	10	四次谐波	+12
4	偶次谐波	-12	11	剩余噪声	-6
5	二次谐波	-12	12	剩余噪声	+6
6	二次谐波	+12	13	合成原信号	0
7	三次谐波	-12			

表3 各组乐器调制处理方式
Table 3 The modulation modes of different instruments

序号	乐器A	乐器B
1	高次衰减	低次衰减
2	低次衰减	高次衰减
3	奇次衰减	偶次衰减
4	偶次衰减	奇次衰减
5	剩余部分增强	剩余部分衰减
6	剩余部分衰减	剩余部分增强

和”指同时发声的复合音之间的关系及“协调”的主观感受，其描述对象一般为组合音^[9]。对于实验的主观评价指标，实验1的评价指标与音色整体的“谐和”感知相关，参考谐和性相关评价参量，选择与谐和听感、音色特征相关的具有代表性的四个指标，分别为谐和感、自然感、粗糙感、尖锐感，具体的指标解释如表4所示。其中，谐和感指旋律独奏总体听感上的音色悦耳感受，属于整体指标。自然感是为了评价旋律中音色整体的稳定性和建模音色的真实度。粗糙感、尖锐感是为了描述音色听感效果的具体指标。实验2中的评价对象为组合乐器的合奏旋律，因此评价指标选择合奏协和感，解释为音色组合协调、平衡、稳定、融合、听感舒适。

表4 谐和听感的评价指标
Table 4 Evaluating indicators of auditory sensation

指标名称	指标解释
谐和感	音色悦耳、圆润、听感舒适
自然感	是否像从真实乐器中产生的声音听感
粗糙感	声音波动、起伏、不稳定的感觉
尖锐感	尖锐、刺耳的感觉，反之为沉闷感

1.3 实验方法和过程

实验1采用系列范畴法^[10]，对比每组信号的谐和评价指标差异，结果划分为5级尺度，1~5分对应的详细划分范畴为：差异感很小、差异感较小、差异感一般、差异感较大、差异感很大5个主观范畴。由于调制对组合乐音影响的差异度较不明显，

因此实验2选用对偶比较法,需要被试对不同调制处理的结果进行成对比较。

本次实验共有30名被试,男女人数各半,年龄为18~22岁,听力水平均正常。为了保证被试对真实乐器的声音具有一定的熟悉度,并能够明确谐和感与偏爱度的差异,被试需经过一定程度的听音训练,并且有听觉心理实验的经验,满足《演出用专业音响设备音质主观评价方法》^[14]中的基本要求:对音乐基础知识有一定的了解、无明显音乐风格偏好,经常观看现场自然声音乐排练和演出。实验使用封闭式监听耳机重放听音,听音设备提前通过人工耳进行统一响度校准,实验素材播放时的听音声压级约为75 dB(A),采取多人同时进行实验的方式。

被试需要经过充分熟悉实验信号及评价指标的准备阶段后再正式开始实验,实验总时长约为1 h。实验1中将制作的调制信号以及原始信号与重建合成信号进行对比评价,每种乐器均进行13种处理方式的对比,共65对信号分为5组进行随机顺序播放,被试需将每对实验信号进行主观听感对比,并根据评价指标进行打分,分值范围为-5~+5分,其中0分表示无变化,分值的正负表示该指标听感属性的增加或降低,分值的数值为变化差异的心理范畴值。实验2中将各音色组中7个混合信号进行无序地成对排列组合,每个音色组共21对信号,进行随机顺序播放,被试需要在每对信号中进行主观合奏旋律协和性的判断并进行相应标记。

2 实验结果及分析

2.1 数据有效性分析

本实验采用重测信度检验方法进行信度检验^[10],在不同时间重复进行两次实验,剔除稳定系数值得分较低的10名被试数据。并对所筛选出的20名被试的数据进行内在一致性检验,计算得到每个指标所对应的克隆巴赫系数如表5所示。表5中的数据均大于0.85,因此筛选出的被试数据通过一致性检验。

表5 各指标的克隆巴赫系数

Table 5 Cronbach's α of each evaluating indicator

指标	谐和感	自然感	粗糙感	尖锐感
α 系数	0.896	0.934	0.883	0.910

通过对每个指标的实验数据进行单因子方差分析,检验不同音色以及不同调制方式对于实验结果是否有显著差异。选择95%的置信区间,将 P 值小

于0.05视为有显著性差异,通过计算得到实验1中不同音色之间的听感结果 P 值如表6所示。由表6中结果可知,不同音色之间的听感结果 P 值均大于0.05,因此不同音色间的调制影响听感结果没有显著差异,并且通过采样音源制作音频和实录乐器演奏的结果之间同样没有显著性差异。因此谐波调制所带来的谐和相关听感的影响,在不同音色类型中具有一致性。实验2中计算得到的拉弦组和弹拨组间 P 值结果为0.56,所以合奏旋律的协和性在拉弦乐器或弹拨乐器两种组合间也不存在显著性差异。

表6 不同音色之间的听感结果显著性 P 值

Table 6 P-values of notable auditory sensation between different timbres

听感	显著性 P 值			
	二胡-笙	二胡-琵琶	二胡-箏	笙-琵琶
谐和感	0.653	0.274	0.691	0.126
自然感	0.401	0.779	0.415	0.265
粗糙感	0.165	0.091	0.510	0.752
尖锐感	0.622	0.640	0.161	0.980
音色	显著性 P 值			
	笙-箏	琵琶-箏	二胡音源-二胡实录	
谐和感	0.398	0.483	0.698	
自然感	0.102	0.592	0.393	
粗糙感	0.459	0.292	0.470	
尖锐感	0.061	0.065	0.836	

由于表1中的调制方式为成对出现,因此对调制方式两两分组进行显著性差异比较,得到的 P 值如表7所示,表中有显著性差异的数据用下划线标出。从不同调制方式的显著性计算结果可以看出,针对高低次谐波的调制在谐和感和尖锐度两个指标中具有显著性差异,针对奇偶次谐波的调制在谐和感和自然度两个主观指标中存在显著性差异,而对二次谐波、三次谐波的调制在自然感和尖锐感指标中存在显著性差异,四次谐波调制在谐和感和自然度两个方面存在显著影响,而非谐波成分的改变会引起谐和、自然以及粗糙听感上的显著差异。因此谐波调制所带来的谐和相关听感的影响与谐波调制方式有关。

表7 不同调制方式的听感结果显著性 P 值

Table 7 P-values of notable auditory sensation between different modulation modes

听感	显著性 P 值					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
谐和感	<u>0.008</u>	<u>0.042</u>	0.645	0.144	<u>0.022</u>	<u>0.000</u>
自然感	0.102	<u>0.026</u>	<u>0.018</u>	<u>0.013</u>	<u>0.000</u>	<u>0.000</u>
粗糙感	0.203	0.320	0.689	0.954	0.281	<u>0.000</u>
尖锐感	<u>0.006</u>	0.552	<u>0.001</u>	<u>0.030</u>	0.374	0.787

2.2 实验数据统计分析

由显著性分析可知，不同音色间的调制影响听感结果没有显著差异。因此通过对同一调制方式不同音色的结果进行平均计算，通过计算得到相应的五种范畴尺度，各调制方式坐落在各主观评价指标范畴尺度的位置如图2所示，图中纵坐标数值代表对应调制方式，横轴为指标对应的心理评价尺度。

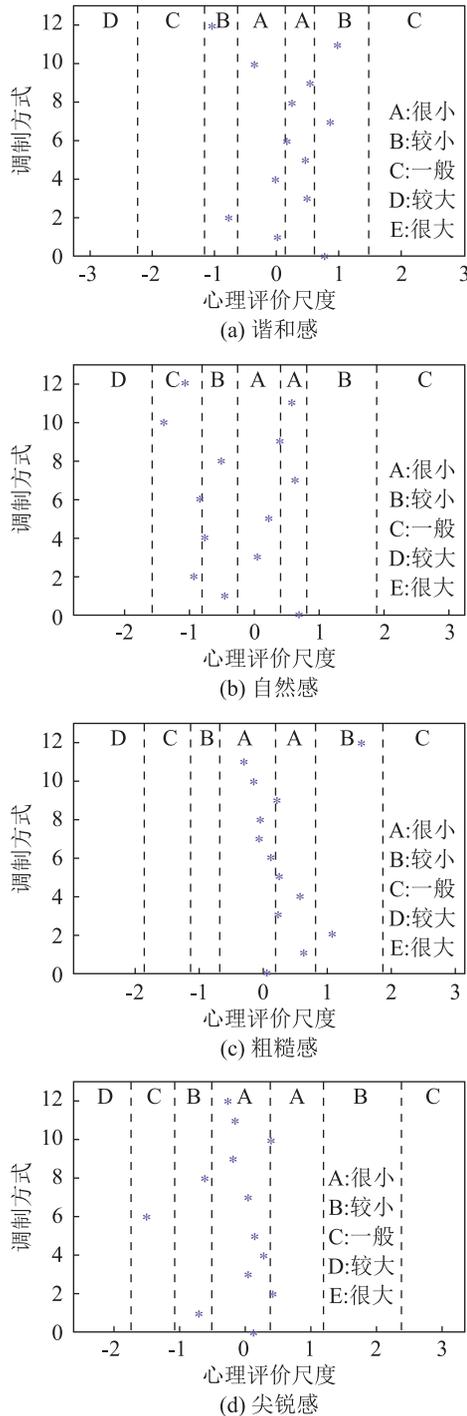


图2 不同调制方式下听感的范畴尺度
Fig.2 Categorical scales of auditory sensations for different modulation modes

从图2可以看出，通过对原始信号进行建模重建合成，生成的重建信号整体上的谐和听感比原始信号略差，除谐和感外的其余指标的差异均很小。重建合成后出现谐和感降低的现象，这可能是由于在对原始信号进行分析的过程中，需要进行分帧的短时傅里叶变换，频域的峰值跟踪需要较高的频域分辨率，剩余成分中的瞬态声需要较高的时域分辨率，存在时域分辨率和频域分辨率之间折中的问题，使得信号在变换过程中可能会产生可闻的音质损失。另一方面由于谐波成分的合成中是以初始零相位进行时间积分得到的相位值，没有保留原始相位信息，因此谐波成分会因为相位偏差而引入一定的失真。通过对重建合成信号进行不同方式的谐波调制，所有调制方式带来的主观影响都在“差异一般”范畴内，即通过以上几种谐波调制方式所带来的音色变化感知的差异整体不大。其中，高次谐波的衰减在自然感和尖锐感上存在较小的负面影响，即高次谐波成分的减少会导致音色听感的自然感和尖锐感有所下降，可能是由于高次谐波的减少使得整体的高频能量减少，所以削减了明亮尖锐的听感；而低次谐波成分的减少会使得谐和感和自然感降低，但粗糙感提高，可能是由于减少能量较大的低次谐波成分使得引起粗糙感的非谐波成分的能量占比增加。奇/偶次谐波的改变对谐和感的影响结果相反，衰减奇次谐波会增加谐和感而衰减偶次谐波会降低谐和感，但这种差异感都在很小的范畴内，并且衰减偶次谐波会影响音色的自然感。通过分别对单次谐波的调制变化可以看出，提高二次谐波的最有利于减小尖锐感，三次谐波的衰减最有利于增加谐和感，而增加四次谐波明显对音色的谐和感和自然度带来了负面影响。此外，剩余噪声成分的增加和衰减对于谐和感和粗糙度有显著影响，剩余成分的增加会导致粗糙感的提高和谐和感的降低，减少则反之。

乐器合奏的谐和性问题不仅源于配器规则，还受到乐器本身音色的影响。从实验1的结果中可以看到，不同模式的谐波调制能够不同程度影响音色本身的谐和听感。在实验1的基础上，实验2通过经过谐波调制的乐器组的同度合奏进行听感协和性的探究。对实验2进行结果统计分析，将合奏旋律协和感心理评价尺度得分转化到0~100分范围，结果如图3所示。图3中纵轴为合奏旋律协和感心理评价尺度得分，横轴序号对应组合调制处理方式，其中序号0为重建合成信号。

从图3中的结果可以看出，实验2所选用的调制方式不同程度地降低了合奏旋律的协和性。其中

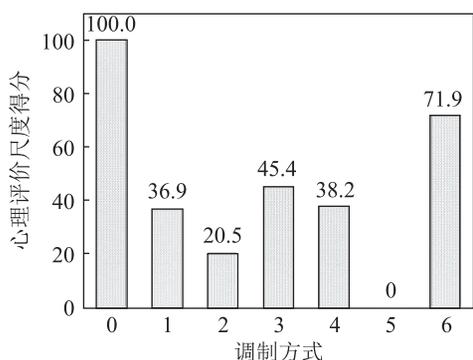


图3 组合乐器协和感的心理评价尺度得分结果

Fig.3 Scores of psychological evaluation scale of consonance sense for combination instruments

剩余噪声部分的调制对协和感影响的差异最大, 奇偶次谐波改变带来的影响小于高低次谐波调制带来的影响。这种通过谐波调制所造成的协和性差异, 可能是由于在对谐波成分进行衰减的同时, 增加了非谐波剩余噪声成分的能量占比。对比噪声成分调制的结果发现, 组合乐器的不同非谐波剩余噪声成分会对合奏协和感知带来不同程度的影响。

结合实验1中谐波调制对单个乐器的谐和听感的影响规律, 可以看到谐波调制对于合奏旋律协和性的变化与合奏乐器整体谐和感的变化影响不大, 如奇次谐波和剩余噪声的衰减均能提高谐和感, 但却不能改善合奏的协和性。因此只能证明谐波调制手段对于协和性的改变是有效的, 若要找到改善合奏旋律协和性的调制方案, 需要在此基础上通过大量实验进行进一步验证。

3 结论

本文通过对乐音信号进行模型化分析、分解及合成, 使用不同调制手段处理信号, 并采用系列范畴法和对比比较法进行了主观谐和听感实验。通过实验可以得出, 对原始信号进行重建合成和调制时, 重建合成处理会对原始信号的谐和听感带来一

定的负面影响, 谐波调制所带来的谐和相关听感的影响以及合奏旋律的协和感的变化, 在不同音色类型中具有一致性, 谐和听感结果与调制方式有关, 具体表现在高低次谐波的调制主要影响尖锐感, 奇偶次谐波的调制主要影响整体谐和感, 非谐波成分的增加会引起明显的粗糙听感。实验结果验证了乐音信号的建模合成和谐波调制一方面可以作为一种探究乐音谐和听感规律的方法, 另一方面可以作为一种优化处理工具, 是实现对于乐音信号源进行谐和性调制的有效手段。

参 考 文 献

- [1] TERHARDT E. The concept of musical consonance: a link between music and psychoacoustics[J]. *Music Perception*, 1984, **1**(3): 276-295.
- [2] AURES W. The sensory euphony as a function of auditory sensations[J]. *Acustica*, 1985, **58**(5): 282-290.
- [3] 张婧颖, 孟子厚. 扬声器系统的谐和性评测[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2016, **23**(6): 52-58.
ZHANG Jingying, MENG Zihou. Harmony measurement for loudspeaker system[J]. *Journal of Communication University of China (Science and Technology)*, 2016, **23**(6): 52-58.
- [4] 赵苗苗, 张婧颖, 谢凌云. 微型扬声器谐波失真的分析与调制[J]. *电声技术*, 2016, **40**(6): 28-32.
ZHAO Miaomiao, ZHANG Jingying, XIE Lingyun. Analysis and modulation for harmonic distortion of micro loudspeakers [J]. *Audio Engineering*, 2016, **40**(6): 28-32.
- [5] 王鑫. 民乐弹拨乐器谐和性评价方法研究[D]. 北京: 中国传媒大学, 2012.
- [6] 李仁杰, 张婧颖, 孟子厚. 谐波调制对乐音听感谐和性的影响[C]//中国声学学会2017年全国声学学术会议论文集. 哈尔滨, 2017: 725-726.
- [7] SERRA X. Musical sound modeling with sinusoids plus noise [J]. *Musical Signal Processing*, 1997: 91-122.
- [8] 孟子厚. 音乐声的谐和性分析与调制[M]. 北京: 中国传媒大学出版社, 2021.
- [9] 付晓东. 和谐与协和的探索: 和声学的本源追溯[M]. 北京: 人民音乐出版社, 2013.
- [10] 孟子厚. 音质主观评价的实验心理学方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [11] 中华人民共和国文化和旅游部. 演出用专业音响设备音质主观评价方法: WH/T 82—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.