

◇ 研究报告 ◇

笙的簧片物理参数与音色相关性的初步研究*

旷 玮 姬培锋 杨 军[†]

(中国科学院噪声与振动重点实验室(声学研究所) 北京 100190)

摘要 为了改善笙的声音品质,本文研究了笙的簧片物理尺度与笙的音色之间的相关性。在提出笙的物理模型并验证其有效性的基础上,固定音高,改变簧舌的厚度、长度以及缝隙宽度,合成一组笙的声样本。通过对偶比较法以及多维尺度法分析笙的音色空间,根据簧舌参数及音色特征量解释该音色空间的物理意义,并从发声原理比较簧舌参数对音色的作用。结果表明,音高一定时,簧舌宽度对音色的作用可忽略,厚度(及长度)和缝隙宽度对音色的作用相似,但影响方式不同。改变簧舌物理参数所形成的二维音色空间与声音的对数起振时间、频谱丰富性以及频谱不规则度有关。起振特征与频谱丰富性特征存在共变关系,通过改变这两个特征,能够改变音色的明亮度和柔软度。

关键词 笙,自由簧,音色,多维尺度分析,物理模型

中图分类号: O423

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)06-0494-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.06.004

A study of the relationship between the physical parameters of Sheng reed and the timbre

KUANG Wei JI Peifeng YANG Jun

(Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China)

Abstract The relationship between the physical dimensions of Sheng reed and the timbre of Sheng was studied to improve the sound quality of Sheng. A physical model of Sheng was proposed and validated. With this model, constant-pitched tones varying in the thickness, length and the slit width of reed tongue were synthesized. The perceptual timbre space was analyzed through paired comparison method and multidimensional scaling method. Its physical meaning was interpreted in terms of reed parameters and timbre descriptors. Moreover, the effects of reed parameters on the timbre were compared in mechanical perspective. The results show that in constant pitch tones, the effect of the reed width on the timbre is negligible. While the thickness, length and slit width play similar roles in timbre perception but through different ways. The analyses reveal a 2-dimensional timbre space, whose dimensions are well correlated to the log attack time, the spectral richness and the spectral irregularity. The descriptors representing the attack and the spectral richness are covariant. By changing both, the softness and brightness of Sheng timbre could be modified.

Key words Sheng, Free reed, Timbre, Multidimensional scaling, Physical model

2016-03-01 收稿; 2016-04-14 定稿

*国家自然科学基金项目(11174317), 中国科学院青年创新促进会资助项目(2015019)

作者简介: 旷玮(1988-), 女, 广东韶关人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

[†]通讯作者 E-mail: jyang@mail.ioa.ac.cn

1 引言

笙是我国典型的簧管类乐器,它由吹嘴、笙斗和笙管组成。其中笙管包括笙脚、簧片以及共鸣管三部分,簧片的主要部分为簧舌。笙具有“一簧一管发一音”的特点,簧舌的做工对笙的音色有重要影响,其材料特性以及物理尺度的差异都会改变笙的音色。研究簧舌的物理尺度与笙的音色之间的关系,对于规范笙的制作、提高笙的声品质都具有参考意义。

音色是一种主观的听觉属性,它使人们能够分辨那些具有相同音高、时长以及响度的声音。音色不是由单一属性所决定的,它与多维感知属性有关。关于音色的研究主要致力于从声音的声学特征方面解释音色的多维属性,且普遍采用一种将音色差异度评价(Dissimilarity ratings)实验与多维尺度分析(Multidimensional scaling,以下简称MDS)相结合的方法^[1-4]。该方法通过主观实验获得被试对一组声样本的音色差异性(或相似性)评价,采用MDS方法分析,得到具有一定维数的音色空间及声样本在空间中的坐标。进一步,将各维度与从声样本中提取的声学特征进行关联,从而解释音色空间的物理意义。总结已有的研究成果得到,音色一般可用2~4维感知属性表示,其中两个维度与声音的起振特性以及频谱质心有关,其它维度的物理意义取决于声样本的类型以及多样性。

除了从乐器的声音特征研究音色,还可从乐器的物理参数和发声机制方面进行音色的研究。对于吹奏乐器,主要研究声源的特性(如簧片的弹性模量、密度)与声音的音色感知特征之间的关系^[5-7]。这些研究表明,乐器的物理结构、材料特性等性质是决定乐器音色的关键,研究它们之间的关系对于改进乐器制作工艺、提高乐器生产品质具有十分重要的意义。关于簧舌的物理尺度对音色的影响,可参考的文献较少,主要采用主观和定性方法进行描述^[8-9],对于簧舌参数如何引起音色差异,以及各参数对音色的影响是否相同等问题仍缺乏深入探究。

本文采用物理模型方法合成笙的声样本,通过主观实验和MDS方法研究了笙簧片的簧舌参数与笙的音色之间的相关性。首先提出笙的物理模型,并通过音色特征量说明该模型的合成效果。其次,对簧舌的四个参数进行筛选,保持音高一定,改变簧

舌的长度、厚度以及缝隙宽度合成声样本。然后音色差异度的主观评价实验,并通过MDS方法分析得到笙的音色空间。进一步,计算声样本的音色特征量、物理尺度以及音色空间之间的相关性,就音色空间的物理意义作出解释,并从发声原理上比较簧舌参数对音色的作用。

2 笙的物理模型

2.1 理论

簧片的结构如图1(a)所示。通过在一片响铜上抢制出三条缝隙,形成簧舌与簧框。图1(a)中,簧舌仅一端与簧框相连,另一端可做自由往返运动,因此笙的簧片是一种自由簧,吹吸都可发声。笙的工作原理如图1(b)所示,演奏者通过吹嘴向笙斗内吹(吸)气,同时用手指按住需要发声的笙管的指孔,则对应的笙管发声。此时,笙斗内压强 $p_0(t)$ 与笙脚(即笙管底端)内压强 $p_{in}(t)$ 形成的压差作用于簧舌两侧使其振动,簧舌与簧框间的缝隙面积 $S_{reed}(t)$ 也发生变化。因此,从笙斗经簧片缝隙进入管内的气流 $U_{in}(t)$ 受到调制,经共鸣管作用后在音窗处形成辐射声压 $p_{out}(t)$ 。

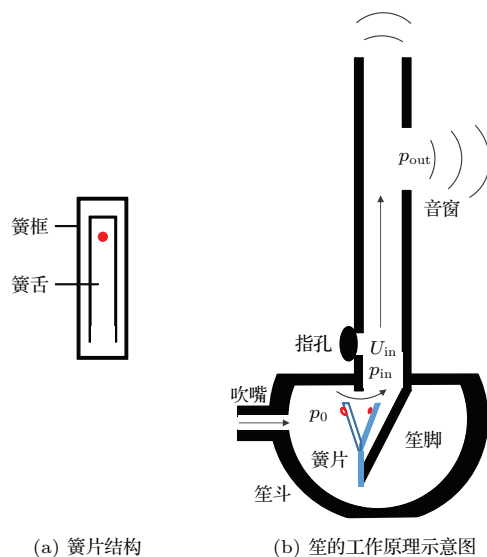


图1 笙的结构

Fig. 1 Structure of Sheng

下面通过方程描述笙的物理模型。根据簧片结构,可假设簧舌为截面均匀的悬臂梁。令 $\xi(s,t)$ 表示簧舌上任意一点 s 处的质点位移随时间 t 的变化,则该质点的振动方程为

$$\rho_r W h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + R \frac{\partial \xi}{\partial t} + K \frac{\partial^4 \xi}{\partial s^4} = W (p_0(t) - p_{in}(t)), \quad (1)$$

式(1)中, ρ_r , W , h , R , K 分别表示簧舌的密度、宽度、厚度、衰减系数以及弯曲刚度。

在计算时, 仅考虑簧舌的一阶横振动模式^[10], 从而简化公式(1)。簧舌任一点 s 处的位移为 $\xi(s, t) = [x(t) - x_0] \Psi(s)$, 其中, $x(t)$ 为簧舌自由端位移, 具有初始位移 x_0 , $\Psi(s)$ 表示一阶模式的特征函数。将式(1)简化为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\omega_r}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_r^2 (x - x_0) = \frac{1.5WL}{m} (p_0(t) - p_{in}(t)), \quad (2)$$

式(2)中, ω_r , Q , m , x_0 , L 分别表示簧舌的一阶共振角频率、品质因数、质量、初始位移以及长度。

采用 Bernoulli 方程描述簧舌两侧压强差 $p_0 - p_{in}$ 和气流体积速度 $U(t)$ 的关系:

$$p_0(t) - p_{in}(t) = \frac{\rho}{2} \left[\frac{U(t)}{S_{slit}} \right]^2 + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho \delta U(t)}{S_{slit}} \right], \quad (3)$$

式(3)中, ρ , δ , S_{slit} 分别表示空气密度、缝隙在气流方向的有效长度以及缝隙开口面积。采用公式 $S_{slit} = C \left\{ W [x^2 + b^2]^{1/2} + 2L [a(x)^2 + b^2]^{1/2} \right\}$ 计算缝隙开口面积, C 为流收缩系数, $a(x)$ 为簧舌的平均位移。

根据 Schumacher 的理论^[11], 可以通过笙脚处的反射函数计算笙脚内声压 $p_{in}(t)$:

$$p_{in}(t) = Z_0 U_{in}(t) + r(t) * (p_{in}(t) + Z_0 U_{in}(t)), \quad (4)$$

式(4)中, $*$ 号表示卷积运算, 反射函数 $r(t)$ 由笙管的输入阻抗 Z_{in} 以及特征阻抗 Z_{P0} 计算得到

$$r(t) = \text{ifft} \left\{ \frac{Z_{in} - Z_{P0}}{Z_{in} + Z_{P0}} \right\}, \quad (5)$$

$U_{in}(t)$ 是笙脚处的总气流体积速度, 除了 Bernoulli 效应引起的 $U(t)$, 还包括簧片自身运动引起的气流变化 $U_{reed}(t)$, 因此 $U_{in}(t) = U(t) + U_{reed}(t)$ 。

为了得到音窗处的辐射声压(即合成声样本), 卷积笙脚处体积速度和笙管的传递函数如下,

$$p_{out}(t) = \text{trans}_U(t) * U_{in}(t), \quad (6)$$

其中, $\text{trans}_U(t)$ 为笙管的传递函数时域形式。计算笙管的传递函数以及输入阻抗 Z_{in} 时, 需要考虑指孔和音窗的作用, 建立笙管的等效电路, 并将等效电路用传递矩阵的级联形式表示。

综合公式(2)~(6), 已知吹气压强 $p_0(t)$ 以及簧片和共鸣管的物理参数, 采用有限差分法求解^[12], 可以得到笙管的辐射声压 $p_{out}(t)$ 。

2.2 模型的效果验证

由于笙的簧片采用手工制作, 这使得簧片的物理参数随意性较大, 难以按照要求的方式变化。相比之下, 采用物理模型合成的声样本能够更加系统的调整关注的物理参数, 同时保证其他参数不变。因此, 合成声样本更切合本文的研究目的。以下将验证物理模型的效果, 从音色感知特征方面说明模型能够有效地模拟真实乐器的发声原理, 适合用于后续实验。

首先采集真实笙的声样本。通过设计一套输入可调节的、针对单根笙管的发声测量系统, 在半消声室内同步测量了笙管在吹奏情况下的多个物理量(笙斗内压强 $p_{in}(t)$ 、簧舌振动速度 dx/dt 、笙脚内声压 $p_{in}(t)$ 以及音窗辐射声压 $p_{out}(t)$)。此外, 还测量了笙管的物理参数(簧片和共鸣管)。系统的输入为吹气压强 $p_0(t)$, 包括上升、稳态和下降三个阶段。 $p_0(t)$ 的时长控制在 5 s 左右, 稳态阶段压强设置为 800 Pa~1400 Pa, 并以 200 Pa 为步长。实验采样率为 40 kHz。实验完成后, 将测得的 $p_0(t)$ 作为物理模型的输入、笙管的物理参数作为控制参数代入模型, 计算得到合成声样本 $p'_{out}(t)$ 以及其他物理量 (dx'/dt 和 $p'_{in}(t)$)。

通过比较实验和仿真的对应物理量得到(篇幅所限, 本文未列出详细的对比过程), 当输入以及笙管的物理参数相同时, 笙的物理模型能够准确模拟对应笙管的音高 f_0 , 相差值小于人耳最小可分辨频率差(约为 5 音分)。物理模型中, 采用一阶模态振动近似簧舌振动的假设是有效的, 簧舌振动速度 dx/dt 的时域波形和主要频率分量都具有较高的相似度。另外, 笙脚内声压 $p_{in}(t)$ 的变化过程较为一致, 幅度相当。以上现象表明, 笙的物理模型能够较好的模拟真实笙的簧舌振动以及发声过程。但同时注意到, 由于模型中采用的假设和简化与真实情况有所出入, 误差不可避免。以下将通过两个重要的音色特征——对数起振时间(Log attack time, LAT)和频谱质心(Spectral centroid, SC)进一步验证模型。这两个特征被证实对音色感知具有重要作用, 并且被试对于它们的变化具有较高的敏感度。

对数起振时间(LAT)反映了声音能量在上升

阶段的速度,上升速度越快,值越小。其计算公式为

$$\text{LAT} = \lg(t_e - t_s), \quad (7)$$

其中, t_s 和 t_e 分别为声音起振阶段的起始时间点和结束时间点,这两个时间点可采用自适应门限方法确定^[13]。

频谱质心(SC)反映了声音的明亮程度,是在一定频率范围内通过能量加权平均得到的频率值。值越大表明声音越明亮,频谱越丰富。其计算公式为

$$\text{SC}(n) = \frac{\sum_{k=1}^K f_k a_k(n)}{\sum_{k=1}^K a_k(n)}, \quad (8)$$

其中, f_k 为第 k 次谐波对应的频率, $a_k(n)$ 表示短时傅里叶变换中的第 n 帧信号频谱中第 k 次谐波的幅度。

图2为测量声样本与合成声样本的部分时域波形($p_{\text{out}}(t)$ 的起振到稳态阶段)以及频谱质心随时间的变化,此处仅以 $p_0 = 1000 \text{ Pa}$ 的结果作为例子,其他吹气压强情况下有类似的结果。图2中,频谱质心出现波谷的时刻近似对应声音的起振阶段的起始点(20 ms左右),此时声音中仅以基波成分为主。在声音的起振阶段(20 ms~60 ms),除基波外的其他谐波依次出现,此时频谱质心快速上升;进入稳态阶段后(60 ms左右),各频率成分量基本不发生变化,频谱质心保持不变。对比实验值和仿真值可知,合成笙采样的频谱质心与真实笙采样变化趋势一致,极小值和上升阶段出现的时间点仅超前实验值5 ms左右。表1列出了在不同输入下,对数起振时间和稳态阶段频谱质心的平均值。合成声样本

的对数起振时间仅略长于真实声样本(相对偏差小于2%),该偏差远小于人耳可觉察阈值^[14],可忽略不计。另外,合成声样本的的频谱质心仅略高于真实声样本,相对偏差在3%以内,差异很小。

综上可得,尽管存在一些差异,合成声样本的重要音色特征仍与真实声样本具有较高的相似度,模型能够较准确的反映输入变化对真实笙音色的影响,适合用于后续的主观实验。值得说明的是,应用物理模型的目的不在于精准的建立物理参数与声样本音色之间的对应关系(当然这是最终目的),而是在该物理模型具有一定准确度且能反映笙的基本发声规律的情况下,利用它探究物理参数对音色的影响,以及这种影响的变化趋势。

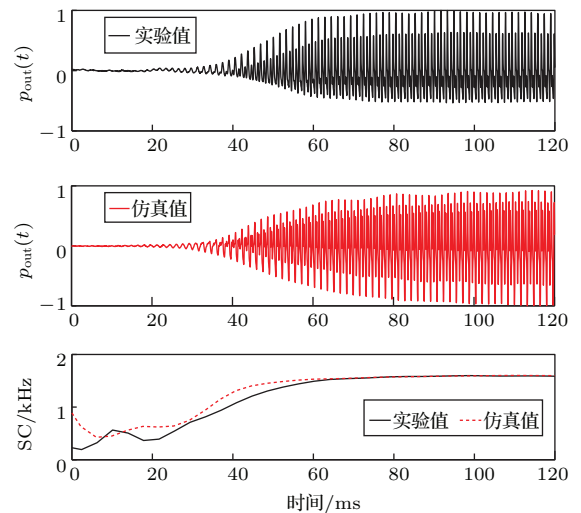


图2 频谱质心(SC)的时域对比

Fig. 2 Comparison of the evolution of SC as a function of time

表1 对数起振时间(LAT)和频谱质心(SC)对比

Table 1 Comparison of LAT and SC

	$p_0(\text{Pa})$	800	1000	1200	1400
仿真	LAT (ms)	1.98	1.99	1.98	1.98
实验	LAT (ms)	1.97	1.96	1.96	1.95
差值	$\Delta\text{LAT}(\text{ms})$	0.01	0.03	0.02	0.03
相对差值	$\Delta\text{LAT}/\text{LAT}$	0.6%	1.3%	0.8%	1.4%
仿真	SC(Hz)	1474.6	1576.5	1661.5	1737.7
实验	SC(Hz)	1431.5	1565.6	1672.5	1765.0
差值	$\Delta\text{SC}(\text{Hz})$	43.1	11.0	-10.9	-27.3
相对差值	$\Delta\text{SC}/\text{SC}$	3.0%	0.7%	-0.7%	-1.5%

3 实验方法

3.1 簧片参数选择与声样本合成

根据簧片的结构(图1(a))可知,簧片对音色的影响主要是由簧舌引起的。簧舌的四个物理尺度(包括长度 L 、宽度 W 、厚度 h 以及簧舌缝隙宽度 b ,以下用相对值表示)相互独立,对音色的影响各不

相同。本文重点关注对音色影响较大的参数,因此,首先研究各参数单独变化对音色特征量的影响,从中选择影响较大的参数作为主观实验的控制参数。在选择各参数的变化范围时,以一根普通笙管(音高 $\#d2, f_0 = 623.6$ Hz)的簧片参数作为参考,并结合各参数的经验值^[8]以及多个簧片的实际测量结果,得到参数的变化范围如表2所示。

表2 簧舌参数的变化范围

Table 2 Variation range of parameters of Sheng reed tongue

参数	物理意义	参考值	经验范围	相对变化范围
L	簧舌长度(相对值)	$L_0 = 18.3$ mm	[11 mm, 27 mm]	[0.6, 1.5]
W	簧舌宽度(相对值)	$W_0 = 2.8$ mm	[2.5 mm, 3.5 mm]	[0.9, 1.3]
h	簧舌厚度(相对值)	$h_0 = 296$ μ m	[220 μ m, 460 μ m]	[0.7, 1.6]
b	缝隙宽度(相对值)	$b_0 = 25$ μ m	[5 μ m, 45 μ m]	[0.2, 1.8]

根据表2,仅改变其中一个参数(保持另外三个参数以及笙管的参数不变),代入模型合成声样本。提取声样本的音色特征量^[13],并计算其与该参数的Pearson相关系数。两个特征量之间的Pearson相关系数定义为这两个特征量之间的协方差与标准差的商,即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (9)$$

r 的变化范围为 $[-1, 1]$,它反映了两个变量之间的线性相关性。 $|r|$ 越接近1,线性相关性越强, $|r|$ 越接近0,线性相关性越弱。

比较四个参数对应的相关系数得到: W 与多个重要的音色特征量存在较强的相关性,但 W 变化时,各音色特征的相对改变量远小于 L 、 h 以及 b 。以频谱质心SC和起振时间AT为例,它们都与 W 呈线性负相关($r(\text{SC}, W) = -0.867$, $p < 0.001$; $r(\text{AT}, W) = -0.999$, $p < 0.001$)。然而,当 W 从2.5 mm变为3.5 mm时,SC的变化量仅为21 Hz(相对变化为1%),AT的变化率仅为1.6 ms(相对变化为1.6%)。相比之下, L 、 h 、 b 变化量相同时,与其显著相关的音色特征的相对变化量均大于20%,变化十分显著。此外,非正式试听实验表明,改变 W 合成的声样本在听感上的差异令人难以分辨。因此,

以下的实验和分析将固定 W 为参考值,进一步考察 L 、 h 和 b 对音色的影响。

尽管参数 L 、 h 和 b 是相互独立的,但在合成本文所需的声样本时,却存在一定的约束条件。这是因为,在音色的差异度评价实验中,通常选择音高(采用基频 f_0 表示)相同的声样本作为实验素材,从而避免被试在评价过程中仅以音高的差异作为主要的评价标准,而忽略了音色差异^[1]。当共鸣管不变时,笙管的音高仅取决于簧舌的共振频率 ω_r 。假设簧舌为一截面均匀的悬臂梁, ω_r 的计算公式如下

$$\omega_r = \frac{\alpha_1^2 E h}{12 \rho_r L^2}, \quad (10)$$

其中, α_1 为常量, E 为杨氏模量。若要保持 ω_r 不变,必须同时改变 L 和 h ,因此 L 和 h 存在共线性关系,不再相互独立。在统计分析中, L 和 h 的共线性现象会导致参数估计不准确,方差变大,且无法正确反映每个自变量对因变量的单独影响^[15]。因此,采用变量变换法以避免这一问题,将 h 和 L 合并为一个参数,

$$\gamma = hL, \quad (11)$$

γ 为簧舌侧面面积(相对值)。在以下的分析中,将采用相对值 γ 、 b 表示簧舌参数,其中 γ 的变化范围是 $[0.6, 1.8]$, b 的变化范围是 $[0.2, 1.8]$ 。

为保证实验的声样本之间仅存在音色差异,要求统一声样本的时长、响度和音高。针对时长的一

致性,合成声样本采用统一的输入吹气压强 p_0 。 p_0 随时间的变化包括三个阶段,分别为0.15 s的指数上升阶段,1 s的稳态阶段,以及0.15 s的指数衰减阶段。其中,稳态阶段的压强设置为1000 Pa,此时笙处于正常工作状态。合成的声样本时长为1.3 s。为统一声样本的响度,利用Zwicker的响度模型对声样本进行等响度处理^[16]。

在上述范围内改变 γ 和 b ,采样率设为40 kHz,合成117个笙的声样本。当主观实验中声样本数量过多,会造成被试的实验时间过长、被试出现疲劳效应,从而导致实验结果可靠性降低。此外,非正式试听实验显示,当 γ 和 b 变化步长较小,声样本听感差异较小,评价难度增加。综合考虑以上因素后,从117个声样本中选择14个用于音色的主观评价实验,每名被试的实验时间在1 h以内,每30 min休息5 min。所选声样本对应的参数值如图3所示,声样本在参数空间中分布较均匀,覆盖范围较广,且听感差异较明显。

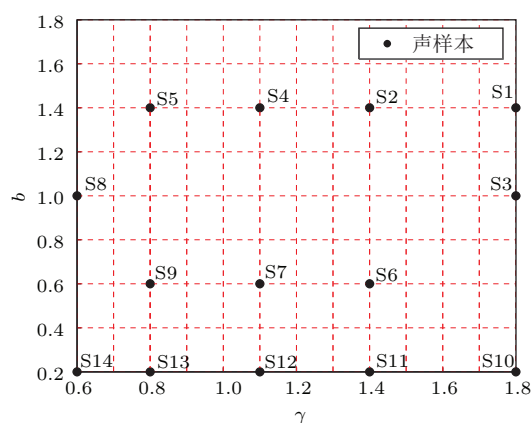


图3 (γ, b) 参数空间及声样本分布

Fig. 3 Control parameter space (γ, b) and the distribution of stimuli

3.2 被试与实验设备

主观评价实验的被试为无听力障碍的研究生共12人,年龄范围为22~30岁,男女比例为1:1。实验在有效隔绝外界噪声的房间中完成,声样本通过计算机重新编组后由Fireface UC声卡输出至AKG K550监听耳机进行重放,被试通过Matlab用户界面进行评价操作。

3.3 主观实验方法

实验采用对偶比较法,将14个声样本以两两成对方式进行组合,不考虑先后顺序以及重复的

声样本,共得到 $14 \times 13/2 = 91$ 对声样本组。被试根据每一对声样本中两个声音的音色差异程度进行评价,评价分值范围为0~10。其中,声音完全相同或差异程度最小评为0分,声音差异程度最大为10分,评分最小单位为1分。被试可以通过拖动用户界面中的滑动条进行评分,并能实时看到评分分数。实验共分为三个环节:熟悉、训练和实验环节。熟悉环节的目的在于帮助被试熟悉所有声样本,了解声样本的差异程度范围,以此建立评价的心理尺度。训练环节中,随机抽取10对声样本作为训练样本,要求被试尽可能保持心理尺度的一致,根据每组的差异程度进行评价。实验环节与训练环节过程一样,按随机顺序播放91对声样本组,被试在评价一组声样本时,可以反复播放,直至做出评价。

3.4 音色特征量

根据文献[25]中所列的多类音色特征量的定义和计算方法,计算117个合成声样本的音色特征量。表3中给出了部分音色特征量的物理含义,它们在其他文献中亦被证实与音色感知空间具有较强的相关性^[3-4,17]。采用短时傅里叶变换方法计算信号频谱以及与频谱相关的特征量时,选择窗函数为1024点的汉宁窗(在当前采样率下约为25 ms),帧重叠率为85%,傅里叶变换点数为8192点(频率分辨率约为4.8 Hz)。在声样本较为平稳的情况下,采用平均值代表时变的频谱特征量。

4 结果分析

4.1 分析方法

4.1.1 被试的检验和筛选

实验获得12份 14×14 的差异性矩阵数据,在进行MDS分析之前,首先对实验数据进行筛选,排除与其他被试的评价结果存在根本差异的被试数据。计算被试评价结果的Pearson相关系数,以此作为被试差异度的度量方法,对被试进行系统聚类(采用组间联接法)。经分析得到,12名被试中,除1名被试评价结果与总体存在较大差异,其余11名被试的评价结果均显著相关($\text{mean}(r) = 0.78, p < 0.01$),评价方法较一致。因此,剔除该被试的评价结果,对剩余11份数据进行MDS分析。

表 3 音色特征量的描述
Table 3 Description of the timbre descriptors

音色特征量	英文名称	物理含义
对数起振时间	Log attack time (LAT)	反映声音能量在上升阶段的速度, 上升速度越快, 值越小。
频谱质心	Spectral centroid (SC)	反映声音的明亮程度, 是在一定频率范围内通过能量加权平均得到的频率值。值越大表明声音越明亮, 频谱越丰富。
谱扩展	Spectral spread (SS)	描述频谱围绕均值的变化程度, 频谱越丰富, 值越大。
谱偏斜	Spectral skewness (SSK)	描述频谱在均值附近的对称程度, 值越大, 频谱在均值左侧的能量分布越多。
谱峭度	Spectral kurtosis (SKU)	描述频谱在均值附近的陡峭程度, 值越大, 频谱在均值附近分布越陡峭。
谱斜率	Spectral slope (SSL)	通过线性回归方法描述频谱幅度的下降斜率。
谱下降值	Spectral roll-off (SRO)	频谱总能量达到 95% 时对应的截止频率, 值越大, 频谱高频丰富性越小。
谱不规则度	Spectral irregularity (IRR)	通过计算相邻谐波之间的相对幅度差获得。相对差值越大, 频谱不规则度越高。
三刺激值 -1	Tristimulus, 1 st coefficient (TR1)	基波幅度与总幅度的比值。
三刺激值 -2	Tristimulus, 2 nd coefficient (TR2)	2、3、4 次谐波幅度之和与总幅度的比值, 反映中频分量。
三刺激值 -3	Tristimulus, 3 rd coefficient (TR3)	5 次及以上谐波幅度之和与总幅度的比值, 反映高频分量。
奇偶谐波比	Odd-Even Ratio (OER)	奇次谐波与偶次谐波能量的比值。

4.1.2 MDS 分析方法和维度的选择

由于被试评价结果和评价方法一致性较好, 在选择 MDS 分析方法时不考虑被试的个体差异, 采用实际距离的非计量多维尺度分析 (Non-metric MDS)。该方法通过标准化原始应力系数 (Normalized raw stress) 衡量拟合模型与真实模型之间的匹配程度: 应力系数越接近 0, 拟合模型越接近真实模型^[18]。在选择拟合模型的维数时, 增加维数能够降低应力系数, 但维数过高可能会导致各维度物理意义不明确。综合以上考虑, 选择笙的音色空间维数为 2, 此时应力系数约为 0.04, 拟合度较好。

4.2 相关性分析

4.2.1 簧舌参数与音色空间的相关性

图 4 为二维音色空间以及实验声样本在空间中的位置, 各样本点之间的距离反映了它们的音色差异: 距离越大, 被试所感知的音色差异越大。为了便于观察参数 γ 和 b 独立变化对声样本位置的影响, 将参数 (γ 或 b) 相同的声样本点相连。结合图 3 声样本对应的参数空间可知, 当 γ 保持不变, 声样本的第一维坐标值随 b 的增加而增加 (图 4(a)); 同样, 当 b 保持不变, 声样本的第一维坐标值随 γ 的增加而增加 (图 4(b))。而 γ 和 b 与第二维均表现出非线性关系, 第二维坐标可以用 γ 和 b 的三次多项式拟合 ($R^2 = 0.95$)。

为了更客观的说明 γ 和 b 与音色空间的关系, 表 4 计算了 γ 和 b 与空间维度之间的偏相关系数。

偏相关分析在控制其他对结果产生影响的变量的情况下, 考察两个变量之间的相关性^[15]。由于 γ 和 b 都是合成声样本的自变量, 因此采用偏相关系数能够更真实的反映它们与声样本之间的关系。表 4 中, γ 和 b 都与第一维呈高度线性正相关, 但与第二维均没有明显的线性相关性, 这一结论与图 4 中观察得到的结果是一致的。

以上现象表明, 音高一定时, 改变簧舌的厚度和长度或改变缝隙宽度都会在二维空间内改变笙的音色。其中第一维与簧舌参数线性相关性较强, 第二维则与参数的非线性组合有关。值得说明的是, 此处的二维空间是通过改变簧片参数形成的音色空间, 并不代表笙的音色空间即可由二维定义。改变笙管的其他参数 (如音窗的大小、位置等), 可能会得到更多维度的音色空间, 并且笙的起振特征与频谱特征也可能相互独立。

表 4 参数与音色空间维度的偏相关系数
Table 4 Partial correlation between the control parameters and the timbre space

参数	维度 1	维度 2
γ	0.82**	—
b	0.97**	—

注: 相关性不显著的结果未列出, 以 — 号表示。* 号表示显著性检验概率, 其中 * 表示 $p < 0.05$ (显著), ** 表示 $p < 0.01$ (十分显著)。

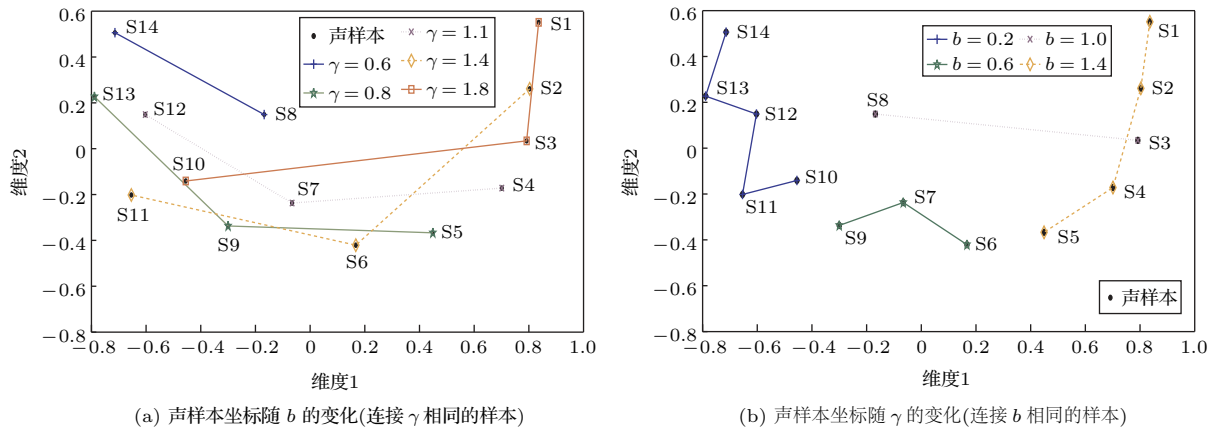


图4 二维MDS空间
Fig. 4 The MDS space with 2 dimensions

4.2.2 音色特征量与音色空间的相关性

为了进一步明确音色空间对应的感知属性，提取声样本的重要音色特征量，并计算其与音色空间的Pearson相关系数，如表5中第2、3列所示。表5中，音色空间第一维与反映频谱丰富性的特征量(SC、SS、SSK、SKU、SSL、SRO、TR3)具有很强的线性相关性($|r| > 0.85, p < 0.01$)，与反映声音起振特性的特征量(LAT)具有较强的线性相关性($r = 0.75, p < 0.01$)。结合图4(b)中声样本分布可知，起振较慢、频谱质心较低的声样本(S1~S5)与起振较快、频谱质心较高的声样本(S10~S14)分布于第一维坐标轴两侧，而处于中等水平的声样本(S6~S9)则分布在坐标轴中间。此外，音色空间的第二维与频谱不规则度(IRR)具有较强的相关性($r = 0.79, p < 0.01$)，与2~4次谐波能量占比(TR2)以及奇偶谐波比(OER)相关性一般($|r| > 0.6, p < 0.05$)。

因此，笙的音色空间，可用声音的起振特征(LAT)、反映频谱丰富性的特征(SC、SS、SSK等)以及反映频谱不规则度的特征(IRR)表示。这一结论与针对其他乐器的音色研究结果基本相符，其中声音的对数起振时间和频谱质心是两种较显著的感知属性^[4]。需要指出的是，在音色多维属性研究中，起振特征和频谱丰富性特征一般对应两个相互独立的维度^[4]。在本实验中，它们相互关联(互相关系数为 $r(\text{LAT}, \text{SC}) = -0.79, p < 0.01$)，对应同一维度。这种共变关系与簧片的振动原理有关，4.3节中将进一步分析。

表5 音色特征量与音色空间维度及 γ 、 b 的相关系数

Table 5 Correlation between the timbre descriptors, the timbre space and the control parameters

音色特征量	Pearson 相关系数		偏相关系数	
	维度 1	维度 2	γ	b
LAT	0.75**	—	0.66**	0.71**
SC	-0.99**	—	-0.95**	-0.98*
SS	-0.99**	—	-0.62**	-0.87**
SSK	0.93**	—	0.84**	0.93**
SKU	0.88**	—	0.79**	0.90**
SSL	-0.97**	—	-0.88**	-0.95**
SRO	-0.98**	—	-0.80**	-0.94**
IRR	—	-0.79**	0.40**	-0.49**
TR1	0.87**	—	0.66**	0.77**
TR2	—	-0.61*	—	—
TR3	-0.99**	—	-0.91**	-0.98**
OER	—	0.65*	—	—

注：相关性不显著的结果未列出，以—号表示。*号表示显著性检验概率，其中*表示 $p < 0.05$ (显著)，**表示 $p < 0.01$ (十分显著)。

4.2.3 簧舌参数与音色的相关性

表5最后两列给出了参数 γ 和 b 与音色特征量的偏相关系数。可见，表中所有与音色空间第一维显著相关的特征量，都与 γ 和 b 呈较强的线性相关

($\gamma: |r| > 0.62, p < 0.01$; $b: |r| > 0.71, p < 0.05$); 而表中与第二维相关的特征量, 与 γ 和 b 仅弱相关 ($|r| < 0.50, p > 0.01$) 或无明显相关性。结合 4.2.1 和 4.2.2 的分析, 可初步将簧舌参数与音色的关系分析如下。

音高一定时, 变化簧舌的厚度 (和长度) 或缝隙的宽度, 主要改变了笙的两类音色特征。其中一类特征为声音的起振特征 (LAT), 它在主观评价中通常反映了音色的“柔软度”: 音色柔软的声音具有较长的起振时间^[19]。另一类特征反映了声音的频谱丰富性, 以频谱质心为代表。这类特征在主观评价中表现为音色的“明亮度”^[20]: 音色明亮的声音频谱质心及谱丰富性都较高。此外, 簧舌参数对于这两类音色特征的改变是同时的: 起振时间越长的声音, 其频谱质心以及谱丰富性也越低。

以上关系说明, 当簧舌共振频率一定, 将簧舌制作得更薄更短 (γ 值小), 或将缝隙制作得更细 (b 值小), 都能够使笙的音色更坚硬明亮; 反之, 则更柔软低沉。在笙的制作经验中, 主要突出了簧舌的厚度和长度对音色的作用, 对于缝隙宽度仅要求尽可能细长平直, 以保证音色纯净^[9]。这里在印证簧舌的厚度和长度作用的基础上, 通过实验进一步说明缝隙宽度对于调整音色也能起到与厚度和长度同样的作用。

除此之外, 簧舌参数的变化还改变了频谱包络的不规则度 (IRR), 与簧舌参数改变起振特征和频谱丰富性的方式不同, 簧舌参数对频谱不规则度的改变是非线性的。基于本实验的声样本, 频谱不规则度与参数的关系可用三次多项式拟合。这一感知特征在音色空间中的显著性也在其他文献中得到证实, 但其对应的主观描述还缺乏明确的结论^[4]。

4.3 簧舌参数的作用机制

前面提到, 保持簧舌共振频率不变时, 簧舌的厚度 (和长度) 或缝隙的宽度改变的声音特征是相同的, 以下将从簧舌的振动原理分析其中的原因, 并比较它们对音色特征量的影响。

根据笙的物理模型, γ 和 b 对音色的改变主要通过改变簧片开口面积 S_{slit} 实现, 但它们作用于 S_{slit} 的方式是不同的。图 5 为单独改变 γ 或 b (固定另一参数为参考值) 时, 对应的 S_{slit} 的极大极小值变化情况。 S_{slit} 的极值反映了簧舌的运动状态: 当簧舌位移最大时, S_{slit} 有极大值; 当簧舌经过簧框时 (或静止状态), S_{slit} 有极小值。

由图 5 可见, 当 γ 独立变化时, S_{slit} 的极大值变化程度大于极小值变化程度。这是由于在簧舌共振频率一定时, 增加簧舌的厚度和长度 (γ 增大) 导致簧舌质量增加。在输入 (吹气压强) 不变的情况下簧舌振动的加速度减小, 位移极大值也相应减小, 从而导致 S_{slit} 极大值降低。而 S_{slit} 极小值的小幅度上升则是由簧舌长度 L 增加引起的。在此情况下, 笙管建立稳定自激震荡所需时间变长 (LAT 增加), 所形成的辐射声的频谱丰富性降低 (SC 减小)。

当 b 独立变化时, 则出现相反的现象: S_{slit} 的极小值变化较大, 极大值变化较小。在输入 (吹气压强) 不变的情况下, 增加缝隙宽度 b , 虽未改变簧舌质量, 但缝隙的增大使得 S_{slit} 以及流经缝隙气流的直流分量增加, 实际作用于簧舌令其振动的交流分量减少, 从而降低了簧舌振动位移, 同样导致了稳定自激震荡建立时间变长 (LAT 增加), 声音频谱丰富性降低 (SC 减小)。

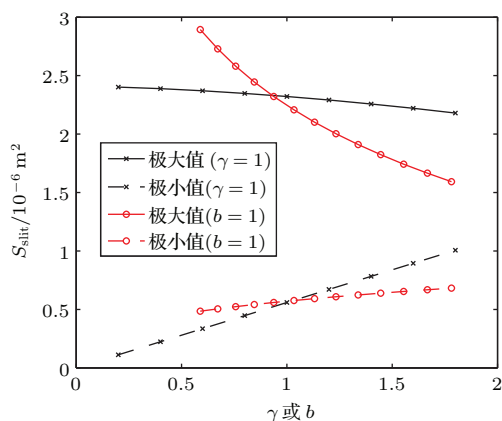


图 5 簧片开口面积极值与 γ 和 b 的关系

Fig. 5 Evolution of the extremum of reed opening area as a function of γ and b

为了比较 γ 和 b 对音色的相对影响, 图 6 给出了频谱质心 (SC) 和对数起振时间 (LAT) 随 γ 和 b 变化的曲线。由图 6(a) 可知, 频谱质心随 γ (或 b) 增加而降低, 其关系可用指数函数 $SC = Ae^{Bx} + C$ 拟合 ($R^2 > 0.99$), 其中 A 为常数, x 为 γ 或 b 。当 γ 和 b 相同 (如 $\gamma = b = 1.0$), 两条曲线基本重合, 说明 γ 和 b 对频谱质心的影响几乎相同。此外, 频谱质心曲线的下降速度随着参数相对值增加 (如从 $b = 0.6$ 到 $b = 1.4$) 而增加。

与 SC 和参数的关系不同, 在图 6(b) 中, LAT 与参数的关系可用幂函数 $LAT = A'x^{B'} + C'$ 拟合 ($R^2 > 0.99$), 其中 A' 、 B' 、 C' 为常数, x 为 γ 或 b 。当

γ 和 b 相同(如 $\gamma = b = 1.0$),改变 b 对应的曲线上升速率略大于改变 γ 对应的上升速率,表明在改变量相同的情况下,缝隙宽度对对数起振时间的影响略大于簧舌厚度和长度的影响。另外,对数起振时间的上升速率还与 γ 以及 b 的值有关,值较大对应的曲线(如 $\gamma = b = 1.4$ 对应的两条曲线)上升速率较大,此时对数起振时间变化较显著。

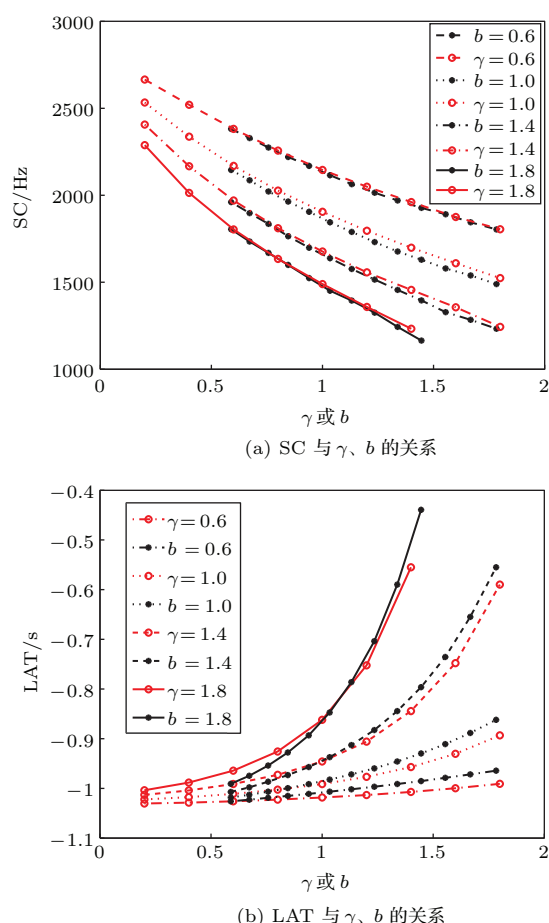


图6 γ 、 b 对音色特征量的影响

Fig. 6 The effect on timbre descriptors from γ and b

5 结论

本文以笙的物理模型为基础,合成实验声样本,通过音色差异度评价实验,对音色空间、音色特征量以及簧舌参数之间的关系进行定量分析,研究了笙的簧舌参数与音色的相关性。合成声样本所用的物理模型,在有效模拟笙发声过程的基础上,能够准确控制簧舌参数的变化。在簧舌的四个参数中(长度、宽度、厚度以及缝隙宽度),宽度对音色的影响最小,可以忽略。在音高一定时,改变其余三个簧舌参

数形成了二维的音色空间。第一维与对数起振时间和频谱质心相关,对应音色的柔软度和明亮度。第二维与频谱不规则度相关,参数对它的作用是非线性的。簧舌的厚度(和长度)和缝隙宽度对音色的影响程度相当,分别通过指数函数形式以及幂函数形式改变声音的频谱质心和对数起振时间。本文从音色差异度方面客观评价了簧舌参数对音色的影响,对于如何设定簧舌参数以达到期望的音色,还需在后续的工作中进一步探究。

参 考 文 献

- [1] MILLER J R, CARTERETTE E C. Perceptual space for musical structures[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1975, 58(3): 711-720.
- [2] MCADAMS S, WINSBERG S, DONNADIEU S, et al. Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes[J]. Psychological Research, 1995, 58(3): 177-192.
- [3] LAKATOS S. A common perceptual space for harmonic and percussive timbres[J]. Perception & Psychophysics, 2000, 62(7): 1426-1439.
- [4] CACLIN A, MCADAMS S, SMITH B K, et al. Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 118(1): 471-482.
- [5] GIORDANO B L, MCADAMS S. Sound source mechanics and musical timbre perception: Evidence from previous studies[J]. Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 2010, 28(2): 155-168.
- [6] MYERS A, PYLE JR R W, GILBERT J, et al. Effects of nonlinear sound propagation on the characteristic timbres of brass instruments[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131(1): 678-688.
- [7] CARRAL S. Relationship between the physical parameters of musical wind instruments and the psychoacoustic attributes of the produced sound[D]. The Towns of Edinburgh: The University of Edinburgh, 2006.
- [8] 庄晓庆. 民间乐器作坊及传统制笙工艺——天津静海小黄庄制笙作坊的调查与研究 [D]. 北京: 中国艺术研究院, 2007.
- [9] 刘瑜. 笙音色探究 [J]. 音乐探索, 2011, (2): 41-44.
- [10] LIU Yu. To probe into the timbre of Sheng[J]. Explorations in Music, 2011, (2): 41-44.
- [11] TARNOPOLSKY A, FLETCHER N, LAI J. Oscillating reed valves—An experimental study[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(1): 400-406.
- [12] SCHUMACHER R. Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet[J]. Acta Acustica United with Acustica, 1981, 48(2): 71-85.
- [13] CHATZIOANNOU V, VAN WALSTIJN M. Estimation of clarinet reed parameters by inverse modelling[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2012, 98(4): 629-639.

- [13] PEETERS G, GIORDANO B L, SUSINI P, et al. The timbre toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, 130(5): 2902–2916.
- [14] VAN DEN BROECKE M P, VAN HEUVEN V J. Effect and artifact in the auditory discrimination of rise and decay time: Speech and nonspeech[J]. Perception & Psychophysics, 1983, 33(4): 305–313.
- [15] 于俊年. 计量经济学 [M]. 北京: 对外经济贸易大学出版社, 2000.
- [16] ZWICKER E, FASTL H. Psychoacoustics: Facts and models[M]. US: Springer, 2013.
- [17] GORDON J W. The perceptual attack time of musical tones[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 82(1): 88–105.
- [18] COX T F, COX M A. Multidimensional scaling[M]. US: CRC Press, 2000.
- [19] WILLIAMS D, BROOKES T. Perceptually-motivated audio morphing: Softness[C]. Audio Engineering Society Convention 126. Munich, Germany: Audio Engineering Society, 2009.
- [20] WILLIAMS D, BROOKES T. Perceptually-motivated audio morphing: brightness[C]. Audio Engineering Society Convention 122. Vienna, Austria: Audio Engineering Society, 2007.