

平遥真武庙“开字形”后台设洞古戏台声学效应初探

杨 阳^{1 2} 裴家丽¹

(1. 山西大学科学技术史研究所, 太原 030006; 2. 山西大学音乐学院, 太原 030006)

摘 要 通过现代声学测量分析仪对首次发现的山西省平遥县真武庙古戏台的“开字形”后台窑洞进行实测和分析。分析结果表明“开字形”后台窑洞空腔扩声传声效应明显,与“设瓮助声”技术同源同理,是古戏台共振扩声技术的成功尝试,不仅可“助声”,还可“助音”,甚至“助调”“助乐”。它是山西晋中地区窑洞式民居建筑技术和戏曲艺术、共振扩声技术发展一定程度高度融合的经验结晶。

关键词 古戏台 开字形 窑洞空腔 峰值频率 声学效应

中图分类号 N092:O42

文献标识码 A **文章编号** 1673-1441(2018)01-0213-23

近年来,我们在山西晋中和晋西地区发现了200余座“后台设洞”的古戏台^①,综合其遗存数量、结构特征和地域分布等情况看^[1 2],古戏台后台结构较为复杂的“卅字形”窑洞^②应该是古人进行大量“后台设洞”古戏台实践后的奇特创造。在对山西省平遥县超山庙古戏台的“小胡唱戏城墙上听”和“戏台唱戏不费力”两个声学效应的成因进行科学分析,特别是将该古戏台对戏曲音乐的影响进行了声学考量后,发现其后台结构复杂的“卅字形”窑洞空腔可改善当地中路梆子戏的演出效果。

将声学效应
和当地戏曲结合

关于后台窑洞空腔的扩声问题,黄维若曾指出河北省井陉县南张村龙王庙戏台和山西省平遥县林泉村子蝗庙戏台后台窑洞空腔的可助声^[3];廖奔也认为古人将古戏台的后台砌成弧形窑洞以空腔助声^[4];车文明在对后台窑洞空腔助声问题的口述过程中也肯定了后台窑洞空腔对声音的积极影响^③。至于古戏台与戏曲关系的研究,诸多学者从其它视角关注已多年。如刘文峰对古戏台的形制与观演的关系进行阐述^[5];车文明对古戏台

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-11-09

作者简介: 杨阳,1978年生,山西大学科学技术史研究所、山西大学音乐学院副教授,硕士生导师,研究方向为艺术史和音乐考古;裴家丽,1993年生,山西大学科学技术史研究所硕士研究生,研究方向为地方科学技术史。

① 后台设窑洞的初衷是为了节约建筑成本,为演职人员提供化妆、换场、休息的场所。之后,建设者将其结构复杂化,使其肩负起换场和空腔扩声的双重功能。在平遥县、汾阳县一带,还有不少结构复杂的“后台设洞”古戏台实例。

② “卅字形”窑洞指四孔窑洞横联砌筑后的形状像中国汉子“卅”。在《平遥超山庙古戏台声学效应初探》一文中称为“十字窑洞”,“卅字形”窑洞是笔者发现的更为形象的称谓,见[2]。

③ 笔者于2016年3月采访车文明时,谈及“后台设洞”古戏台,他认为后台窑洞对古戏台的扩声传声有帮助。

形制和戏曲演出规模的关系进行研究^[6,7]。国外文献中暂未发现相关论述。

最近我们在田野考察中发现除“卅字”窑洞空腔之外,平遥阮庄村真武庙古戏台后台窑洞空腔^①为“开字形”,结构较为复杂,声学效应明显。故本文通过几何测绘和声学测量,综合分析其材料、形状和结构等因素来探索这种形制的窑洞其声学效应对戏曲音乐的影响,以求贯通戏台建筑史、声学史和戏曲音乐史的研究。不当之处,还祈识者正之。

1 真武庙古戏台

1.1 建筑特点

阮庄村位于山西平遥古城南约 15.9 公里处,隶属段村镇。真武庙位于阮庄村东北最高处,占地面积约 1672 平方米,为明末清初建筑风格,2010 年重修。二进院布局(二进院院墙现已拆除)。内院设正殿和配殿(图 1)。正殿坐北朝南,硬山顶,两层,主要供奉真武大帝。庙会时间为每年农历十一月十九,通常献演三天山西中路梆子戏。

铺垫



图 1 阮庄村真武庙正殿和配殿

戏台建在庙门之外,与庙门相对,相距约 50 米。其建筑结构不同于平遥超山庙古戏台,主要由两孔跨度较大、高度较高的纵窑和一孔半跨度较小、高度较低的横窑交错组成,结构呈“开”字形。窑洞的券形为四心圆^②,内壁涂抹白石灰。台顶为硬山顶,正脊两端设龙形吞脊兽两只,宽 0.67 米,高 1 米;垂脊设龙形垂兽两只。条石台边的台基高 1.24 米,长 11.58 米,宽 12.6 米。戏台的前台和后台共处于一孔纵窑,前台为窑洞加前廊式,面阔三间,明间移柱造(图 2)。后台窑洞为双孔交叉“枕头窑”^③的变体(图 2)。戏台总面积为 107.3069 平方米,其中前台表面积为 44.49 平方米,前台之外窑洞表面积为 62.8169 平方米。古戏台通面阔 8.57 米,其中明间 4.45 米;通进深 10.67 米,其中前台 6.465 米,

① 真武庙“开字形”后台窑洞空腔,其“开字形”窑洞主要由后台的窑洞组成,并非仅由后台窑洞组成,事实上也有前台窑洞在内。此称谓仅为方便论证。

② 山西窑洞拱券多为四心圆结构。此结构的荷重能力优于清代雍正十二年(1734 年)清工部颁布的《工程做法则例》中记述的双心圆拱券结构。

③ 当地一种高度不等、跨度不同的纵窑和横窑相互交叉的窑洞建筑形式,民间形象地称其为“枕头窑”。

廊檐 2.55 米。前廊设直径 0.23 米檐柱四根,鼓镜柱础高 0.27 米,直径 0.3 米。前台纵窑阔(即明间距离)4.45 米,深 3.915 米;台顶设天花,距离台面 3.892 米,天花完好。前台和后台由木隔断分开,木隔断设出将入相门。前台两侧均辟一东西向小窑洞(即前台横窑,阔 2.25 米,深 7.38 米,高 2.812 米),后台设东西向砖窑一孔(即后台横窑,阔 2.55 米,深 7.41 米,高约 3.1 米),与前台垂直交叉。戏台东侧还设有一孔砖券窑洞(即东侧休息室纵窑,阔 3 米,深 7.4 米,高 3.737 米),为演员的休息室,前台东侧小窑洞与之相连,后台东西向窑洞与之直通。前台西侧小窑洞的北侧辟砖券小门(阔 0.67 米,深 0.87 米,高 1.835 米)可通后台横窑。休息室北侧另青砖并列券筑小窑洞一孔半,半孔窑洞(即休息室北侧半孔窑,宽 1.85 米,深 2.425 米,高 2.979 米)斜靠在休息室外墙上;另一孔小窑洞(即半孔窑北侧窑洞,宽 1.9 米,深 2 米,高 2.9 米)与之北侧相连。这一孔半窑洞为厨房,与休息室相通,小窑洞辟门通外,门阔 0.962 米,高 1.974 米(见表 1 图 4—6)。

表 1 “开字形”后台窑洞尺寸表

	深(m)	宽(m)	高(m)	穹顶曲率半径约(m)	开分 ^① 约(m)	起拱高度约(m)
前台纵窑	8.11	4.47	4.45	2.4475	0.445	1.7388
前台横窑	7.38	2.20	2.79	1.2375	0.225	1.7388
后台横窑	7.41	2.55	3.10	1.3875	0.225	1.5732
右侧休息室纵窑	7.40	3.00	3.74	1.65	0.3	/
休息室北侧半孔窑	2.425	1.85	2.98	1.0175	0.185	1.656
休息室北侧窑洞	2.00	1.90	2.46	1.04	0.18	/



图 2 阮庄村真武庙古戏台



图 3 真武庙古戏台后台

① 雍正十二年(1734)颁布的清工部《工程做法》载“平水墙,以券口面阔并中高定高。如面阔一丈五尺,中高二丈,将面阔尺寸折半,得七尺五寸;又加十分之一,得七寸五分;并之,得八尺二寸五分。将中高二丈内除八尺二寸五分,得平水墙高一丈一尺七寸五分。平水墙上系发券分位”(〔33〕,页166)。开分,即面阔尺寸折半的十分之一(半径的十分之一)。

1.2 建造年代

关于古戏台的建造年代不详,在平遥县志中无相关记载,真武庙也无发现任何相关碑刻等。幸运的是,我们在后台的墙壁上发现许多戏班在此演出时留下的题记。题记虽不能明示古戏台建造的具体年代,却能说明该戏台建造时间的下限^[8]。

最早的题记为道光十八年三月二十四日(图7),可见最早道光十八年(1838)此台已有演出。此外,来这里演出的班社有三庆班^①、安乐社、8天合班、□大班、□梨园合班、大庆班等,演出的剧目有《□酒□》《□龙袍》《金玉□》《长坂坡》《玉雁□》《五□宫》《乾坤锁》《麟骨床》《十五贯》《红梅阁》等^②。



图7 后台题记

2 声学效应及其测量

2.1 声学效应

在对山西古戏台进行专题考察的过程中,我们发现真武庙古戏台的扩声传声效果非同一般。在前台讲话毫不费力,不仅音量大,声音还好听;站在距离古戏台近百米的真武庙内,清晰可闻古戏台内的对话声。本村、邻村村民对此戏台的声音效果赞不绝口,甚至邻村村民经常集资将原本应在本村演出的戏借用阮庄村真武庙古戏台演出。曾在此演出

全凭主观感受和口述
并无相关史料依据

- ① 该戏班为祁县渠家苏兴财主财主于咸丰晚期所承的娃娃班,曾培养出了彭根、宋兴儿、张公、臭小、八斤儿、彭村有、德海等优秀中路梆子人才[34],页20)。
- ② 剧目《麟骨床》和《红梅阁》为徐坤等人于乾隆末年至嘉庆初年改变的蒲州梆子南路大戏[35],页83—84)。“□”为不能识别的字。

的艺术家也称在此台唱戏不费力气,非常“得劲”,声音好听还传得远,不仅可传遍本村的每个角落,在距离此地近十里的普洞村也可听见。此声学现象可从音量和音色两方面解释。从音量方面看,对于演员而言此台具有“戏台唱戏不费力”的声学效应,即在此台轻松演唱就可获得较强的舞台支持度;对于观众而言此台具有“阮庄唱戏普洞听”的声学效应,即在距离此台数里外的普洞村,坐在家中也可听戏,有“夜戏十里”之效。从音色方面看,无论是对于演员还是观众,此戏台的演戏声清晰饱满、圆润动听,有“腔音袅袅”“余音绕梁三日不绝”之效。

2.2 声学指标的选取与测量

根据数年的考察经验,结合真武庙古戏台的形制结构特征,我们发现后台窑洞不仅是演员换场、化妆和休息之所,还是古戏台声学效应形成的重要建筑构件。按照霍恩博特尔(Erich M. von Hornbostel)和萨克斯(Curt Sachs)对乐器声学结构的分类方法,演员的气息类似马林巴的琴槌,属于激发系统;演员的声带类似马林巴的琴键,属于振动系统;两侧山墙、天花等建筑构件类似马林巴的琴键和共鸣管间组成的空气传导部分,属于传导系统;窑洞弧形空腔与打击乐器马林巴(Marimba)的共鸣管类似,多孔交叉的窑洞弧形空腔犹如将多共鸣管交错组成的耦合共振空腔,属于共振系统^①。

墙面多为圆弧形的后台窑洞空腔,其声学性能以声音汇聚和共振为主。表征现代音乐厅声学特性常用的混响时间、G 值、侧向反射声等声学参数在古戏台声学中虽可表达顶部缺失的观众席的声学特性,但却无法表达非观众席的后台窑洞空腔的声学特性。固有频率是表达闭合空腔声学特性的主要物理量。作为相对闭合的后台窑洞空腔,其空腔固有频率的测量方法如同小提琴固有频率的测量类似^[9]。

测量标准

参照中国国家标准 GB/T4959-2011《厅堂扩声特性测量方法》,测量时我们采用瑞士 NTi 声学公司(NTi Audio AG)生产的 Minirator MR-PRO 模拟信号发生器,将声学信号输入丹麦 BK Power Amplifier 2716,经放大后的信号再传给丹麦 BK OmniPower Sound Source-Type 4292-L 音源,然后由瑞士 NTi 声学公司生产的 M4260 测量麦克风接收声音信号再由 XL2 音频与声学分析仪分析。

由于后台建筑结构完整,声学性能未遭到破坏。在实测过程中,我们将声源放置在后台和前台两个不同位置进行对比测试,试图得到不同声源点的频率响应对比数据。

根据真武庙的结构特征和前后台面积,参照相关国家标准中的设点规范,我们选取了两个声源点,一个接收点(图 8)^②。横向看,两个声源点一个位于后台隔断和后山墙中间位置(图中位置①),另一个位于前台中央靠近隔断一米处(图中位置②);传声器位于距离台口 0.3 米处(图中位置③)。音源和传声器的摆放高度均符合国家标准。测量的时间为 2015 年 12 月 15 日和 16 日,气温为 8 摄氏度。古戏台周围较为安静,对测量结果影响较小。

关于测量频段的设定,考虑到山西梆子戏中男角儿最低音不会低于男低音的 72Hz,

① 参见 Erich M. von Hornbostel and Curt Sachs. 'Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch'. *Zeitschrift für Ethnologie*, xlv 1914, pp. 553—590. Translated by Anthony Baines and Klaus Wachsmann as 'Classification of Musical Instruments'. *Galpin Society Journal*, xiv 1961, p. 329.

② 由于台口小,距离前台窑洞洞口两侧平水墙(指窑洞两侧直立平行的承重墙)的距离较近,故只设一个测点。若在台外设测点,测测点两边建筑的反射声影响太大。

测量频段根据
戏曲音乐频率而定

文武场伴奏乐器中的最低音不会低于大提琴的 65.4Hz;也考虑到山西中路梆子戏中女角儿最高音的基频虽不会高于花腔女高音的 1152Hz,文武场伴奏乐器中最高音的基频虽然不会高于板胡的 3537Hz,但考虑到乐音结构中倍频音的频率特征,(引论音感)我们将本次测量的频段设定为 50Hz—6500Hz。基于后台窑洞的声学特性,我们先使用白噪声测量,大致确定其峰值频率后再使用扫频信号测量其固有频率。测量时,Minirator MR-PRO 信号发生器的输出电平为 2dBv,扫频时间为 99 秒。BK Power Amplifier 2716 的输出值恒定不变,XL2 音频与声学分析仪的频率宽度调整为最高分辨率。

2.3 测量结果分析

我们对真武庙古戏台先后进行了 159 次扫频测量,现从每次测量结果中选取一个 NTI 分析仪的实测截图(见图 9),以说明截图中各项参数的意义:该截图中横轴表示分析仪测量的频率范围,纵轴表示分析仪测量的声压级范围,曲线标识测量对象的频响曲线,扫频时间为 99 秒。具体而言,横轴表示本次测量的频带为 41.39Hz 至 93.39Hz,频率宽度为 52.0Hz;纵轴表示本次测量声压级的显示范围为 40dB 至 120dB;左上角的 FFT + Tol 指傅里叶分析加公差;Max 107.4dB 指本次测量中峰值频率的最大声压级为 107.4dB,A 86.802Hz 指本次测量在 86.802Hz 处达到最大峰值(共振峰值),即 107.4Hz 为峰值频率(共振频率)。截图中右下角 CAT 00:03:40 指本次测量历时 3 分 40 秒。本截图数据整理见下文表 2 中序号 5。

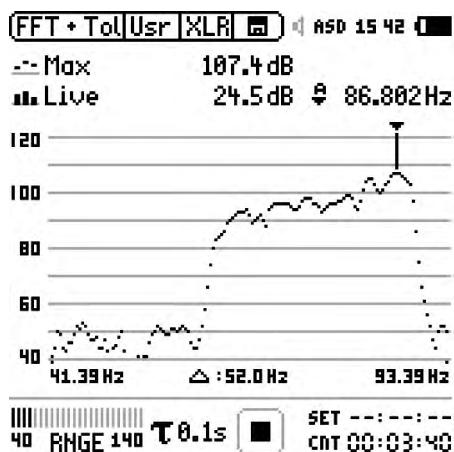


图9 峰值频率实测截图

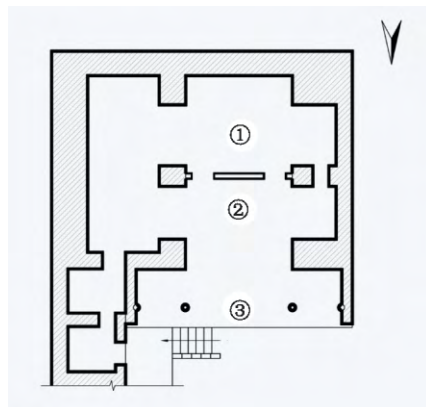


图8 声学测量设点图

分析所有扫频结果,发现声源设在后台时共有 54 个与乐音相关的峰值频率^①(表 2);声源设于前台靠近隔断中间一米处时共有 57 个与乐音相关的峰值频率(表 3)。

现结合表 2 中序号 5 说明各参数的意义。峰值频率,表示截图中所示频响曲线中峰值所处的频率为 86.8Hz,即后台窑洞可对 86.8Hz 的声音放大;共振峰值,指峰值频率 86.8Hz 所达到的最大声压级为 91dB;参考乐音指以国际标准音高 440Hz 为参考值,采用十二平均律(twelve-tone equal temperament)律制与 86.8Hz 最近的乐音为 F2 音,F2 音的频率为 87.31Hz。频率差指峰值频率和乐音频率的差值,即峰值频率 86.8Hz 与

① 各音频率以国际标准音 440Hz 为参考值。此外,峰值频率仅选取与乐音相近的频率是为了简化研究。事实上,伴奏乐器中武场打击乐器的共振峰值大多非乐音频率。

乐音频率 87.31Hz 的差值为 -0.51Hz 。

表 2 后台声源扫频结果

序号	峰值频率 Hz	共振峰值 dB	参考乐音	乐音频率 Hz	频率差 Hz
1	65.3	91	C2	65.41	-0.11
2	72.15	96.4	D2	73.42	-1.27
3	75.08	98.1	$\sharp D2/\flat E2$	77.78	-2.7
4	83.14	105.3	E2	82.41	0.73
5	86.8	107.4	F2	87.31	-0.51
6	93.81	104.2	$\sharp F2/\flat G2$	92.5	1.31
7	97.1	103.3	G2	98	-0.9
8	103.69	110.9	$\sharp G2/\flat A2$	103.83	-0.14
9	109.19	105.6	A2	110	-0.81
10	122.37	112.1	B2	123.47	-1.1
11	130.06	119.8	C3	130.82	-0.76
12	139.86	107.8	$\sharp C3/\flat D3$	138.59	1.27
13	147.91	113.1	D3	146.84	1.07
14	153.27	118.5	$\sharp D3/\flat E3$	155.57	-2.3
15	166.82	112	E3	164.82	2
16	176.43	110.3	F3	174.62	1.81
17	194.01	104.2	G3	196	-1.99
18	209.39	108.5	$\sharp G3/\flat A3$	207.66	1.73
19	220.79	103.8	A3	220.01	0.78
20	233.06	106.6	$\sharp A3/\flat B3$	233.09	-0.03
21	246.97	105.9	B3	246.95	0.02
22	263.45	103.8	C4	261.63	1.82
23	278.1	103.6	$\sharp C4/\flat D4$	277.19	0.91
24	293.3	104.7	D4	293.67	-0.37
25	370.07	106.2	$\sharp F4/\flat G4$	370	0.07
26	413.28	108.4	$\sharp G4/\flat A4$	415.31	-2.03
27	441.75	104.5	A4	440.01	1.74
28	466.75	101.3	$\sharp A4/\flat B4$	466.18	0.57
29	553.22	104.8	$\sharp C5$	554.38	-1.16
30	584.71	100.2	D5	587.34	-2.63
31	742.18	102.5	$\sharp F5$	740.01	2.17
32	833.28	97.3	$\sharp G5/\flat A5$	830.63	2.65
33	882.62	101.1	A5	880.02	2.6

续表 2

序号	峰值频率 Hz	共振峰值 dB	参考乐音	乐音频率 Hz	频率差 Hz
34	929.32	96.6	$\sharp A5 / \flat B5$	932.35	-3.03
35	982.78	94.2	B5	987.79	-5.01
36	1046.78	95.4	C6	1046.53	0.25
37	1107.11	98.4	$\sharp C6 / \flat D6$	1108.76	-1.65
38	1174.22	96.9	D6	1174.69	-0.47
39	1238.12	103.1	$\sharp D6 / \flat E6$	1244.54	-6.42
40	1315.76	93.3	E6	1318.54	-2.78
41	1402.19	101.6	F6	1396.95	5.24
42	1478.36	99.3	$\sharp F6 / \flat G6$	1480.01	-1.65
43	1568.72	93.6	G6	1568.02	0.7
44	1666.5	102.6	$\sharp G6 / \flat A6$	1661.26	5.24
45	1973.75	99.4	B6	1975.58	-1.83
46	2100.83	98	C7	2093.06	7.77
47	2212.34	99.6	$\sharp C7 / \flat D7$	2217.52	-5.18
48	2345.64	92.4	D7	2349.38	-3.74
49	2635.68	96.9	E7	2637.09	-1.41
50	2794.61	97	F7	2793.89	0.72
51	2962.15	91.1	$\sharp F7 / \flat G7$	2960.03	2.12
52	3134.46	96.1	G7	3136.04	-1.58
53	3524.24	92.6	A7	3520.09	4.15
54	4693	96.2	D8	4698.75	-5.75

表 3 声源在前台时扫频结果汇总表

序号	峰值频率 Hz	共振峰值 dB	参考乐音	乐音频率 Hz	频率差 Hz
1	63.59	96.3	C2	65.41	-1.82
2	69.45	95	$\sharp C2$	69.3	0.15
3	74.58	95.7	D2	73.42	1.16
4	82.09	99.4	E2	82.41	-0.32
5	86.85	93.7	F2	87.31	-0.46
6	92.34	98.5	$\sharp F2 / \flat G2$	92.5	-0.16
7	96	97.5	G2	98	-2
8	102.14	92.7	$\sharp G2 / \flat A2$	103.83	-1.69
9	111.66	97.1	A2	110	1.66
10	115.69	97.8	$\sharp A2$	116.54	-0.85
11	121.91	99.7	B2	123.47	-1.56

续表 3

序号	峰值频率 Hz	共振峰值 dB	参考乐音	乐音频率 Hz	频率差 Hz
12	130.34	92.7	C3	130.82	-0.48
13	138.12	104.8	$\sharp C3 / \flat D3$	138.59	-0.47
14	156.79	108.8	$\sharp D3 / \flat E3$	155.57	1.22
15	164.12	112.1	E3	164.82	-0.7
16	171.17	110.4	F3	174.62	-3.45
17	185.08	108.5	$\sharp F3$	185	0.08
18	221.52	105	A3	220.01	1.51
19	237.82	106.3	$\sharp A3 / \flat B3$	233.09	4.73
20	246.61	106.7	B3	246.95	-0.34
21	309.96	106.6	$\sharp D4$	311.13	-1.17
22	370.75	105.9	$\sharp F4 / \flat G4$	370	0.75
23	395.11	96.6	G4	392.01	3.1
24	413.42	98.9	$\sharp G4 / \flat A4$	415.31	-1.89
25	442.71	103.4	A4	440.01	2.7
26	464.14	92.8	$\sharp A4 / \flat B4$	466.18	-2.04
27	490.5	102.5	B4	493.9	-3.4
28	526.58	103.6	C5	523.26	3.32
29	584.44	94.9	D5	587.34	-2.9
30	622.8	95.7	$\sharp D5 / \flat E5$	622.27	0.53
31	660.15	97.4	E5	659.27	0.88
32	693.93	97.6	F5	698.47	-4.54
33	737.15	99.1	$\sharp F5 / \flat G5$	740.01	-2.86
34	788.51	93.5	G5	784.01	4.5
35	835.38	89.8	$\sharp G5 / \flat A5$	830.63	4.75
36	885.37	97.6	A5	880.02	5.35
37	934.44	94.8	$\sharp A5 / \flat B5$	932.35	2.09
38	987.82	90.1	B5	987.79	0.03
39	1050.81	92.1	C6	1046.53	4.28
40	1105.92	89.1	$\sharp C6 / \flat D6$	1108.76	-2.84
41	1171.93	92.7	D6	1174.69	-2.76
42	1243.89	91.8	$\sharp D6 / \flat E6$	1244.54	-0.65
43	1319.51	91.1	E6	1318.54	0.97
44	1396.42	98.4	F6	1396.95	-0.53
45	1479.91	97	$\sharp F6 / \flat G6$	1480.01	-0.1
46	1570.73	96.1	G6	1568.02	2.71

续表 3

序号	峰值频率 Hz	共振峰值 dB	参考乐音	乐音频率 Hz	频率差 Hz
47	1657.25	90.7	$\sharp G6/\flat A6$	1661.26	-4.01
48	1759.88	95.6	A6	1760.04	-0.16
49	1973.11	97.2	B6	1975.58	-2.47
50	2213.34	98	$\sharp C7/\flat D7$	2217.52	-4.18
51	2351.04	94	D7	2349.38	1.66
52	2642.18	95.2	E7	2637.09	5.09
53	2795.8	92.6	F7	2793.89	1.91
54	3139.67	88.3	G7	3136.04	3.63
55	3322.78	89.4	$\sharp G7/\flat A7$	3322.52	0.26
56	3524.93	89.6	A7	3520.09	4.84
57	4973.47	92.4	$\sharp D8/\flat E8$	4978.15	-4.68

分析表 2 和表 3 ,可以得出如下结论:

(1) 峰值频率的听感分析

从峰值频率和乐音频率的频率差值看,表 3 中声源在后台时峰值频率和乐音频率的最小差值为 0.11Hz,最大差值为 7.77Hz;表 4 中声源在前台时峰值频率和乐音频率的最小差值为 1.82Hz,最大差值为 5.35Hz(图 10、图 11)。根据听觉对音高的感知特性,频率波动范围在 5-8Hz 时,仍会感觉到是一个固定音高([10] p. 44)。可见听觉会将这些遴选出来的峰值频率感知成为乐音频率,从而也说明这些峰值频率可与乐音频率产生共振,放大古戏台上演唱(奏)的这些乐音。

主要原理

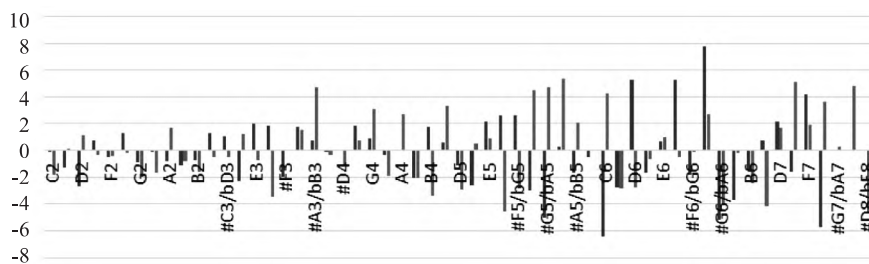


图 10 后台声源共振频率的听感分析

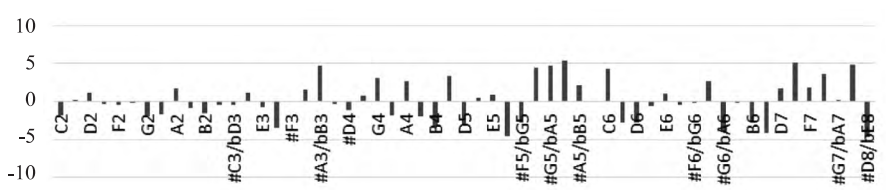


图 11 前台声源共振频率的听感分析

(2) 不同声源点的共振强度比较

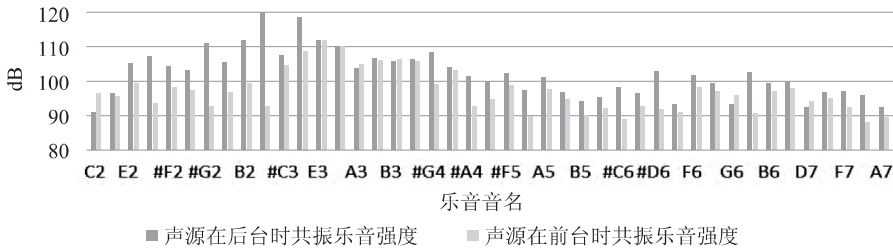


图 12 声源分别在前台和后台时共振乐音强度对比图

从声源分别在前台和后台时共振乐音强度对比图(图 12)可知,当声源分别置于前台和后台时激发的乐音有 43 个相同,它们分别是: C2、D2、E2、F2、 $\sharp F2/\flat G2$ 、G2、 $\sharp G2/\flat A2$ 、A2、B2、C3、 $\sharp C3/\flat D3$ 、 $\sharp D3/\flat E3$ 、E3、F3、A3、 $\sharp A3/\flat B3$ 、B3、 $\sharp F4/\flat G4$ 、 $\sharp G4/\flat A4$ 、A4、 $\sharp A4/\flat B4$ 、D5、 $\sharp F5/\flat G5$ 、 $\sharp G5/\flat A5$ 、A5、 $\sharp A5/\flat B5$ 、B5、C6、 $\sharp C6/\flat D6$ 、D6、 $\sharp D6/\flat E6$ 、E6、F6、 $\sharp F6/\flat G6$ 、G6、 $\sharp G6/\flat A6$ 、B6、 $\sharp C7/\flat D7$ 、D7、E7、F7、G7、A7。声源在后台时激发乐音的共振幅值绝大多数大于前台,增幅最大的乐音是 C3,为 27.1dB,增幅最小的乐音是 D2,为 0.7dB。尤其是 E2- $\sharp D3/\flat E3$ 、 $\sharp A4/\flat B4$ - $\sharp F6/\flat G6$ 段共振幅值增长较大,仅有乐音 C2、E3、F3、A3、B3、G6、D7 的共振幅值例外。这说明后台激发效果好于前台,也间接说明充分激发后台窑洞的峰值频率,其共振幅值会升高。

(3) 后台窑洞的乐音共振

综合分析表 2、表 3,声源位于前台或后台时相同的共振乐音有 43 个(表 4)。这说明真武庙古戏台 50Hz-6500Hz 频段的共振乐音共有 43 个。

表 4 前后台同时共振的乐音

序号	标准乐音		后台实测		前台实测	
	音名	频率	峰值频率	强度	峰值频率	强度
1	C2	65.41	65.3	91	63.59	96.3
2	D2	73.42	72.15	96.4	74.58	95.7
3	E2	82.41	83.14	105.3	82.09	99.4
4	F2	87.31	86.8	107.4	86.85	93.7
5	$\sharp F2/\flat G2$	92.5	93.81	104.2	92.34	98.5
6	G2	98	97.1	103.3	96	97.5
7	$\sharp G2/\flat A2$	103.83	103.69	110.9	102.14	92.7
8	A2	110	109.19	105.6	111.66	97.1
9	B2	123.47	122.37	112.1	121.91	99.7
10	C3	130.82	130.06	119.8	130.34	92.7
11	$\sharp C3/\flat D3$	138.59	139.86	107.8	138.12	104.8
12	$\sharp D3/\flat E3$	155.57	153.27	118.5	156.79	108.8
13	E3	164.82	166.82	112	164.12	112.1

续表 4

序号	标准乐音		后台实测		前台实测	
	音名	频率	峰值频率	强度	峰值频率	强度
14	F3	174.62	176.43	110.3	171.17	110.4
15	A3	220.01	220.79	103.8	221.52	105
16	$\sharp A3 / \flat B3$	233.09	233.06	106.6	237.82	106.3
17	B3	246.95	246.97	105.9	246.61	106.7
18	$\sharp F4 / \flat G4$	370	370.07	106.2	370.75	105.9
19	$\sharp G4 / \flat A4$	415.31	413.28	108.4	413.42	98.9
20	A4	440.01	441.75	104.5	442.71	103.4
21	$\sharp A4 / \flat B4$	466.18	466.75	101.3	464.14	92.8
22	D5	587.34	584.71	100.2	584.44	94.9
23	$\sharp F5 / \flat G5$	740.01	742.18	102.5	737.15	99.1
24	$\sharp G5 / \flat A5$	830.63	833.28	97.3	835.38	89.8
25	A5	880.02	882.62	101.1	885.37	97.6
26	$\sharp A5 / \flat B5$	932.35	929.32	96.6	934.44	94.8
27	B5	987.79	982.78	94.2	987.82	90.1
28	C6	1046.53	1046.78	95.4	1050.81	92.1
29	$\sharp C6 / \flat D6$	1108.76	1107.11	98.4	1105.92	89.1
30	D6	1174.69	1174.22	96.9	1171.93	92.7
31	$\sharp D6 / \flat E6$	1244.54	1238.12	103.1	1243.89	91.8
32	E6	1318.54	1315.76	93.3	1319.51	91.1
33	F6	1396.95	1402.19	101.6	1396.42	98.4
34	$\sharp F6 / \flat G6$	1480.01	1478.36	99.3	1479.91	97
35	G6	1568.02	1568.72	93.6	1570.73	96.1
36	$\sharp G6 / \flat A6$	1661.26	1666.5	102.6	1657.25	90.7
37	B6	1975.58	1973.75	99.4	1973.11	97.2
38	$\sharp C7 / \flat D7$	2217.52	2212.34	99.6	2213.34	98
39	D7	2349.38	2345.64	92.4	2351.04	94
40	E7	2637.09	2635.68	96.9	2642.18	95.2
41	F7	2793.89	2794.61	97	2795.8	92.6
42	G7	3136.04	3134.46	96.1	3139.67	88.3
43	A7	3520.09	3524.24	92.6	3524.93	89.6

(4) 后台窑洞的共振峰值曲线

取前台实测峰值和后台实测峰值的均值,与 43 个乐音对应,可得其趋势线(图 13)。图中横坐标为各乐音音名,纵坐标为各乐音的声压级。实线为声强包络线,虚线为趋势线。由共振峰值的包络线可知在频段 B2 音 123.47Hz 至 $\sharp F4$ 音 370Hz,为古戏台后台窑

洞共振峰值中声压级最高的频段,明显高于频段[#]F4音370Hz至F6音1396.95Hz。由趋势线可知,其共振峰值整体强度呈下降趋势。

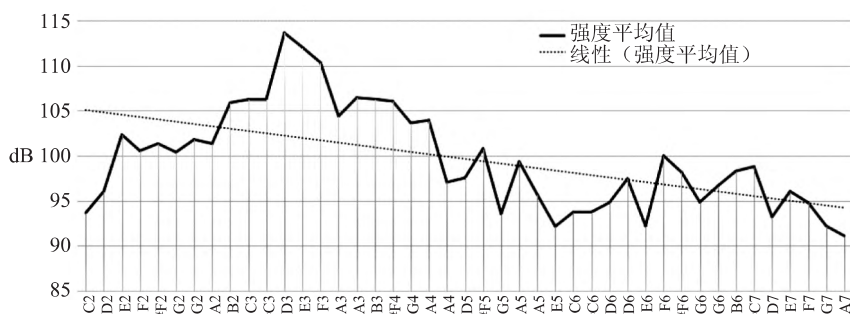


图13 真武庙古戏台后台“开字形”窑洞共振峰值包络图

3 声学效应分析

真武庙古戏台的声学效应,主要表现在其后台窑洞空腔对音量、音质乃至地方戏曲的影响。

3.1 音量分析

从音量看,“戏台唱戏不费力”和“阮庄唱戏普洞听”两个声学效应与真武庙古戏台后台窑洞空腔的材料、形状、结构等因素有关。

从材料看,真武庙古戏台后台窑洞表面的建筑材料易使声反射。窑洞表面由硬度和密度较高的清代砖砌筑,易反射声波。清代砖的硬度和密度略低于现代砖,在125Hz到4000Hz之间现代砖吸声系数为0.03到0.07。窑洞砖墙内壁涂抹白石灰,已石化,硬度和密度极高,在125Hz到4000Hz之间其吸声系数为0.013到0.05^[11]。因此,内壁为砖券的真武庙古戏台后台窑洞吸声系数低,反射系数高,可将90%以上的声能反射。

从几何形状看,窑洞内部形状利于扩声、传声。与方形相比,有一定弧形内壁的窑洞平行面较少,不易形成驻波,利于声音传播^[12]。不仅如此,弧形表面还可对声波形成汇聚,汇聚后的声波经反射后向外传播(图14)。此时声汇聚处的声压级较高。

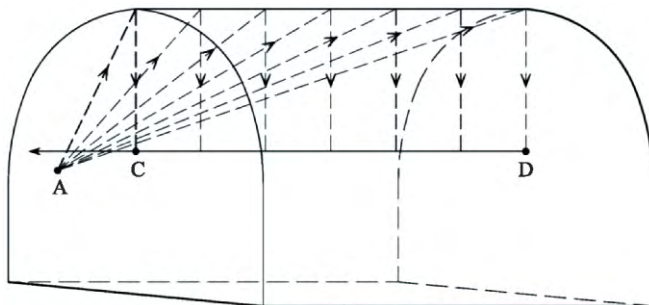


图14 窑洞声波几何汇聚示意图

从结构看,演员和乐队伴奏演唱(奏)的声音可以传入后台“开字形”窑洞。对于演员而言,通常其背对窑洞演唱,传入窑洞的声波以衍射声和来自屋檐等建筑构件的反射声为主;对于乐队而言,由于其面向演员演奏,声波可直射入演员两侧的窑洞口,当然也有衍射和屋檐等建筑构件的反射声。在考察过程中,位于“开字形”窑洞内完全可以听清位于台口处的讲话声,这也说明前台的声音可以传入后台窑洞。

单个窑洞空腔类似一个亥姆霍兹共鸣器,真武庙后台“开字形”窑洞多个空腔犹如多种乐器的空腔耦合而成的一组亥姆霍兹共鸣器,存在多个固有频率,可与频率相同的入射波产生共振,积累该频率的声能量,提高其声压级并增加响度。从表5可知,在50Hz—6500Hz中,真武庙古戏台后台“开字形”窑洞空腔可与43个乐音共振,结合空腔的结构特点,说明后台“开字形”窑洞多个空腔耦合后在此频段可放大这43个乐音,这些乐音可通过后台窑洞空腔积累声能,提高声压级并增加响度。根据平方反比定律可知,声强与声源的距离成反比,与声源功率成正比。乐音声压级的提高和响度的增加即意味着传播距离的增加。

从后台“开字形”窑洞和演员的位置关系看,“开字形”窑洞耦合空腔的共振声加强了声源的直达声,强化了声音方位感,延长了混响时间。对于正殿中的真武大帝而言,传入耳朵的首先是演员或乐队的直达声,其次是戏台隔断、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声,最后是经过窑洞弧形表面汇聚声和耦合空腔的共振声。由于直达声、反射声和窑洞耦合空腔共振声的传播距离相差不大,它们到达真武大帝耳朵的时间差小于50ms,所以不会产生回声。较强的直达声率先到达,确定了声音方位感和清晰度;戏台隔断、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声随后到达人耳,加强并延长了直达声^[13];最后到达的共振声位于声源后部,继续强化了声音方位感,同时也延长了混响时间(图15)^[14—17]。

对于演员而言,歌唱声首先通过骨传导和衍射进入自己的耳朵,其次是戏台隔断、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声,最后是后台“开字形”窑洞耦合空腔的共振声。乐队声传入演员耳朵则首先是直射声,其次也是反射声和后台“开字形”窑洞耦合空腔的共振声。反射声和共振声加强了演唱声,增加了演员和乐队之间的协调度,即提高了舞台的支持度,对于演员而言即“戏台唱戏不费力”。

究其声音清晰度、传远性和声强关系的声学原理,可简化为一个简谐运动的声波一探究竟。简谐运动的表达式为:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi)$$

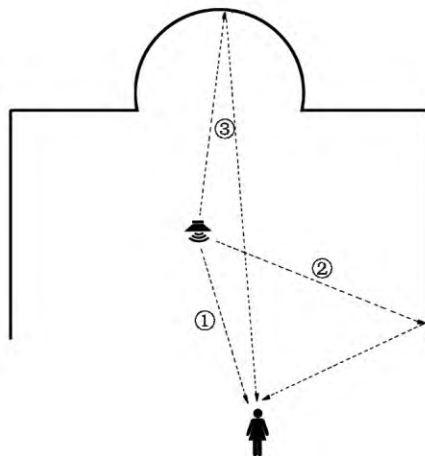


图15 “后台设洞”古戏台声音传播示意图^①

声音传播路径

① 图取自[2]。

其中, x 为位移 A 为振幅 $\omega = 2\pi f$ 为角频率, 表示简谐运动的快慢。 f 为振动频率或音高 t 为振动时间 ϕ 为初相位。 在古戏台声音设计中, 古人不能调整声源的振动频率 f 、声源的相位 ϕ 和振动时间 t , 能调整的参量仅为 A 值, A 在此代表声音的强度。 A 值的增大, 直接导致 x 值的增加, 即声音清晰度、传远性的增加^[18-21], 同时对混响感等音质参量的改善也有较大影响^[22-23]。 从真武庙实例看, 戏台隔断、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声和窑洞弧形表面汇聚、窑洞耦合空腔共振声都会使 A 值增大, 所以唱戏声可以传遍全村, 甚至是近十里外的普洞村。

3.2 音色分析

从音质上讲, 真武庙后台“开字形”窑洞空腔可延长混响时间, 其与乐音相关的峰值频率可构成较多协和音程, 优化乐音的泛音结构, 实现从“助声”到“助音”的转变, 产生“腔音袅袅”“余音绕梁三日不绝”的声学效应。

由上文可知, 戏台隔断、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声和窑洞弧形表面汇聚声、耦合空腔共振声可延长混响时间以美化听感。 参考表 5 和图 12, 被真武庙后台“开字形”窑洞空腔的放大乐音峰值的强度趋势线呈下降态势, 即低频段乐音 (75—350Hz) 的声压级强于高频段乐音 (350—1400Hz) 的声压级, 致使声音的温暖感增加 ([24], p. 30, 512), 平衡感和力量感提高^[25]。 高频率的声波比低频率的声波波长短, 在空气中传播易被吸收而衰减, 所以低频的增加也可提高声音的传远性。

被“开字形”窑洞空腔放大的 43 个乐音, 可以构成许多极完全协和音程、完全协和音程和不完全协和音程^①。 现将一个八度内可构成的协和音程列举如下 (表 5)。

表 5 一个八度内构成的协和音程 (包括等音程)

音程协和度	音程	频率比 (纯律)	窑洞空腔共振峰值构成的协和音程
极完全协和音程	纯八度 18	1:2	C2-C3、E2-E3、F2-F3、B2-B3、A3-A4、 $\sharp A3/\flat B3-\sharp A4/\flat B4$ 、 $\sharp F4/\flat G4-\sharp F5/\flat G5$ 、A4-A5、 $\sharp A4/\flat B4-\sharp A5/\flat B5$ 、D5-D6、 $\sharp F5/\flat G5-\sharp F6/\flat G6$ 、 $\sharp G5/\flat A5-\sharp G6/\flat A6$ 、B5-B6、 $\sharp C6/\flat D6-\sharp C7/\flat D7$ 、D6-D7、E6-E7、F6-F7、G6-G7
完全协和音程	纯五度 20	2:3	C2-C2、D2-A2、F2-C3、 $\sharp F2/\flat G2-\sharp C3/\flat D3$ 、 $\sharp G2/\flat A2-\sharp D3/\flat E3$ 、A2-E3、 $\sharp D3/\flat E3-\sharp A3/\flat B3$ 、E3-B3、B3- $\sharp F4/\flat G4$ 、D5-A5、 $\sharp F5/\flat G5-\sharp C6/\flat D6$ 、 $\sharp G5/\flat A5-D6/\flat E6$ 、A5-E6、B5- $\sharp F6/\flat G6$ 、C6-G6、 $\sharp C6/\flat D6-\sharp G6/\flat A6$ 、E6-B6、 $\sharp F6/\flat G6-\sharp C7/\flat D7$ 、G6-D7、D7-A7
	纯四度 16	3:4	C2-F2、D2-G2、E2-A2、 $\sharp F2/\flat G2-B2$ 、G2-C3、 $\sharp G2/\flat A2-\sharp C3/\flat D3$ 、B2-E3、C3-F3、F3- $\sharp A3/\flat B3$ 、A4-D5、 $\sharp F5/\flat G5-B5$ 、G6-D7、 $\sharp G6/\flat A6-\sharp C7/\flat D7$ 、B6-E7、D7-G7、E7-A7
不完全协和音程	大三度 24	4:5	C2-E2、D2- $\sharp F2$ 、E2- $\sharp G2/\flat A2$ 、F2-A2、G2-B2、 $\sharp G2/\flat A2-C3$ 、A2- $\sharp C3$ 、B2- $\sharp D3/\flat E3$ 、C3-E3、 $\sharp C3/\flat D3-F3$ 、F3-A3、 $\sharp F4/\flat G4-\sharp A4/\flat B4$ 、 $\sharp A4/\flat B4-D5$ 、D5- $\sharp F5$ 、 $\sharp F5/\flat G5-\sharp A5/\flat B5$ 、A5- $\sharp C6$ 、 $\sharp A5/\flat B5-D6$ 、B5- $\sharp D6/\flat E6$ 、C6-E6、D6- $\sharp F6/\flat G6$ 、 $\sharp D6/\flat E6-G6$ 、E6- $\sharp G6/\flat A6$ 、G6-B6、F7-A6

① 音乐理论中将音程按照协和度分为协和音程和不协和音程, 协和音程又分为极完全协和音程、完全协和音程、不完全协和音程以及不协和音程。

续表 2

音程协和度	音程	频率比(纯律)	窑洞空腔共振峰值构成的协和音程
不完全协和音程	小三度 23	5:6	D2-F2、E2-G2、F2- \sharp G2/ \flat A2、 \sharp F2/ \flat G2-A2、 \sharp G2/ \flat A2-B2、C3- \sharp D3/ \flat E3、 \sharp C3/ \flat D3-E3、 \sharp F4/ \flat G4-A4、 \sharp F5/ \flat G5-A5、 \sharp G5/ \flat A5-B5、A5-C6、B5-D6、C6- \sharp D6/ \flat E6、 \sharp C6-E6、D6-F6、 \sharp D6/ \flat E6- \sharp F6/ \flat G6、E6-G6、F6- \sharp G6/ \flat A6、 \sharp G6/ \flat A6-B6、B6-D7、 \sharp C7/ \flat D7-E7、D7-F7、E7-G7
	大六度 24	3:5	C2-A2、D2-B2、E2- \sharp C3/ \flat D3、 \sharp F2/ \flat G2- \sharp D3/ \flat E3、G2-E3、 \sharp G2/ \flat A2-F3、A2- \sharp F4/ \flat G4、B2- \sharp G4/ \flat A4、C3-A3、 \sharp C3/ \flat D3- \sharp A3/ \flat B3、A3- \sharp F4/ \flat G4、B3- \sharp G5/ \flat A5、A4- \sharp F5/ \flat G5、D5-B5、 \sharp F5/ \flat G5- \sharp D6/ \flat E6、 \sharp G5/ \flat A5-F5、A5- \sharp F6/ \flat G6、 \sharp A5/ \flat B5-G6、B5- \sharp G6/ \flat A6、D6-B6、E6- \sharp C7/ \flat D7、F6-D7、G6-E7、 \sharp G6/ \flat A6-F7
	小六度 24	5:8	C2- \sharp G2/ \flat A2、E2-C3、F2- \sharp C3/ \flat D3、G2- \sharp D3/ \flat E3、 \sharp G2/ \flat A2-E3、A2-F3、 \sharp C3/ \flat D3-A3、 \sharp D3/ \flat E3-B3、 \sharp A3/ \flat B3- \sharp F4/ \flat G4、 \sharp F4/ \flat G4-D5、 \sharp A4/ \flat B4- \sharp F5/ \flat G5、D5- \sharp A5/ \flat B5、 \sharp F5/ \flat G5-D6、 \sharp G5/ \flat A5-E6、A5-F6、 \sharp A5/ \flat B5- \sharp F6/ \flat G6、B5-G6、C6- \sharp G6/ \flat A6、 \sharp D6/ \flat E6-B6、F6- \sharp C7/ \flat D7、 \sharp F6/ \flat G6-D7、 \sharp G6/ \flat A6-E7、B6-G7、 \sharp C7/ \flat D7-A7

如表 5 所示,真武庙古戏台后台“开字形”窑洞空腔在 50Hz—6500Hz 可以放大的 43 个乐音共构成 18 个纯八度音程、20 个纯五度音程、16 个纯四度音程、24 个大三度音程、23 个小三度音程、24 个大六度音程、24 个小六度音程。这说明戏台峰值频率之间的比值为简单整数倍。从乐音的泛音列可知,峰值频率之间的比值越简单,音响效果越和谐([26],页 6—7)。可知,“开字形”窑洞空腔峰值频率可构成协和音程的数量较多,在此戏台上演戏音质较好。

山西中路梆子的文场伴奏乐器所发出的声音与人声相同,全部为乐音。如果在真武庙古戏台演唱(奏)单一乐音,可以同时激发多个泛音与其响应(表 6—12)。由表可知,在 50Hz—6500Hz 中,演唱 C2 音可同时激发 18 个泛音,演唱 D2 音可同时激发 19 个泛音,演唱 E2 音可同时激发 19 个泛音,演唱 F2 音可同时激发 17 个泛音,演唱 G2 音可同时激发 16 个泛音,演唱 A2 音可同时激发 16 个泛音,演唱 B2 音可同时激发 13 个泛音。这意味着这些被同时激发的泛音的振动幅值会增加。

表 6 演唱 C 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	7	9	11	13	14	15	16	18	20	22	24	30	36	40	48	52
音名	C2	C3	\flat B4	D5	\sharp F5	A5	\flat B5	B5	C6	D6	E6	\sharp F6	G6	B6	D7	E7	G7	A7

表 7 演唱 D 音时同时激发的泛音

阶次	1	3	5	6	8	10	12	13	14	15	16	18	20	22	26	30	32	36	48
音名	D2	A3	\sharp F4	A4	D5	\sharp F5	A5	B5	C6	\sharp C6	D6	E6	\sharp F6	\sharp G6	B6	\sharp C7	D7	E7	A7

表 8 演唱 E 音时同时激发的泛音

阶次	2	3	5	7	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	24	26	28	32
音名	E3	B3	$\sharp G4$	D5	$\sharp F5$	$\sharp G5$	$\sharp A5$	B5	$\sharp C6$	D6	$\sharp D6$	E6	$\sharp F6$	$\sharp G6$	B6	$\sharp C7$	D7	E7

表 9 演唱 F 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	5	10	11	12	13	14	15	16	18	22	26	30	32	36	40
音名	F2	F3	A4	A5	B5	C6	D6	$\flat E6$	E6	F6	G6	B6	D7	E7	F7	G7	A7

表 10 演唱 G 音时同时激发的泛音

阶次	1	9	10	11	12	13	14	15	16	20	22	24	26	28	32	36
音名	G2	A5	B5	$\sharp C6$	D6	E6	F6	$\sharp F6$	G6	B6	$\sharp C7$	D7	E7	F7	G7	A7

表 11 演唱 A 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	4	8	9	10	11	12	13	14	15	18	20	24	28	32
音名	A2	A3	A4	A5	B5	$\sharp C6$	$\sharp D6$	E6	$\sharp F6$	G6	$\sharp G6$	B6	$\sharp C7$	E7	G7	A7

表 12 演唱 B 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	3	6	7	8	9	10	12	13	16	18	28
音名	B2	B3	$\sharp F4$	$\sharp F5$	A5	B5	$\sharp C6$	$\sharp D6$	$\sharp F6$	$\sharp G6$	B6	$\sharp C7$	A7

从原理上看,乐音的数学形式是一个周期函数,都可以表示为无数多个不同系数的、呈谐波关系的正弦波之和。用傅里叶定理表示为:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

其中 $f(t)$ 为周期性时间函数 n 为谐波次数 ω_0 为周期性函数的角频率 $2\pi f_0$, a_n 为周期函数第 n 次余弦波的振幅, b_n 为周期函数第 n 次正弦波的振幅。 a_n 、 b_n 表达声波的振幅,与简谐运动声波表达式中的 A 相同。换言之,声强 a_n 、 b_n 值的增加,可改变乐音的频谱结构,即可改善音质 [27], pp. 231—274; [28], 页 25; [29], 页 9)。乐音频谱结构的主要组成部分为泛音的数量及其振幅。演出时,乐音频率 $2\pi f_0$ 的大小和数量的多少由音源(演员或乐队)决定,属古戏台后台“开字形”窑洞空腔的共振无法改变的参量,但是声强 a_n 、 b_n 的幅值变化却会受到古戏台后台“开字形”窑洞空腔峰值频率的影响, a_n 、 b_n 幅值的改变使乐音的结构发生了变化,从而改变了 $f(t)$, 即改变了乐音的音色。

3.3 古戏台与戏曲音乐

不同地域流行着不同的戏曲,承载这些戏曲演出的古戏台的形制、结构也各不相同,不同形制、结构的古戏台其声学效应也有差异^[1]。那么,确切地讲,平遥真武庙古戏台的声学效应与戏曲音乐有没有关系?如果有,有什么关系?

真武庙后台“开字形”窑洞空腔可以放大 43 个乐音,当演唱(奏) C 音时,在 50Hz—6500Hz 频段可同时激发的 19 个泛音中前 7 次谐波共有 3 个,为第 1 次、第 2 次和第 7 次;当演唱(奏) D 音时,可同时激发的 19 个泛音中前 7 次谐波共有 4 个,为第 1 次、第 3 次、第 5 次和第 6 次;当演唱(奏) E 音时,可同时激发的 19 个泛音中前 7 次谐波共有 5 个,为第 1 次、第 2 次、第 3 次、第 4 次和第 7 次;当演唱(奏) F 音时,可同时激发的 18 个泛音中前 7 次谐波共有 3 个,为第 1 次、第 2 次和第 5 次;当演唱(奏) G 音时,可同时激发的 17 个泛音中前 7 次谐波共有 1 个,为第 1 次;当演唱(奏) A 音时,可同时激发的 17 个泛音中前 7 次谐波共有 3 个,为第 1 次、第 2 次和第 4 次;当演唱(奏) B 音时,可同时激发的 13 个泛音中前 7 次谐波共有 5 个,为第 1 次、第 2 次、第 3 次、第 6 次和第 7 次(表 13—表 16)。将 D 音、E 音和 B 音同时激发的前七次泛音用五线谱表示,见图 16—图 18。由于泛音的强度随着阶次的升高而强度减弱,同时听觉对前 7 次泛音的频率容易识别 [30], pp. 137—138; [10], p. 28), 故前 7 次泛音对音色的影响较大。因此,徵音、羽音和角音^①在真武庙后台“开字形”窑洞空腔的共振下会有被强调的感觉。这三音由于奇数倍泛音(odd partials)加强,会产生一个有覆盖感(a covered tone)的音色 [10], p. 33)。

表 13 演唱 D 音时同时激发的泛音

阶次	1	3	5	6
音名	D2	A3	$\sharp F4$	A4
	D	A	$\sharp f^1$	a ¹

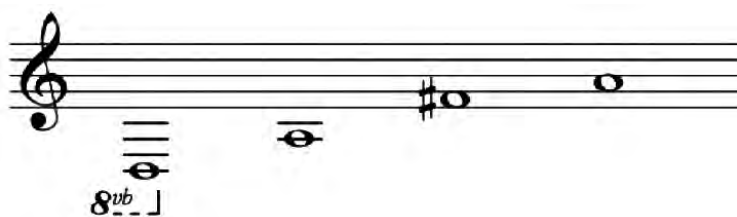


图 16 演唱 D 音时同时激发的注音的五线谱音高标示

表 14 演唱 E 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	3	5	7
音名	E2	E3	B3	$\sharp C4$	D5
	E	E	B	$\sharp g^1$	d ²

① 徵音、羽音和角音为中国五声调式中音级的名称。在五声调式体系中,五声指宫、商、角、徵、羽五音(与欧洲音乐体系中的 do、re、mi、sol、la 相对应),此五音为正音级。除正音级外,还有四个偏音级,即清角(fa)、变徵($\sharp fa$)、闰($\flat si$)、变宫(si)。

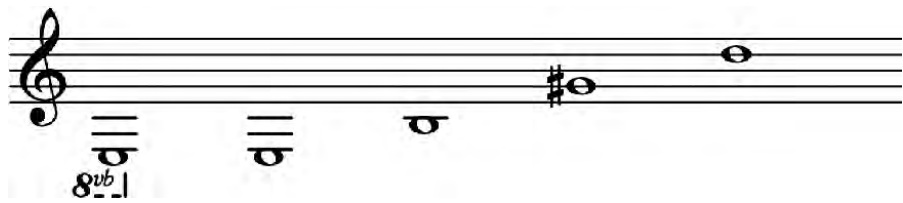


图 17 演唱 E 音时同时激发的泛音的五线谱音高标示

表 15 演唱 B 音时同时激发的泛音

阶次	1	2	3	6	7
音名	B2	B3	$\sharp F4$	$\sharp F5$	A5
	B	B	$\sharp f^1$	$\sharp f^2$	a^2



图 18 演唱 B 音时同时激发的泛音的五线谱音高标示

表 16 共振泛音汇总表

音名	C	D	E	F	G	A	B
前八次谐波总数	3	4	5	3	1	3	5
前八次谐波级数	1、2、7	1、3、5、6	1、2、3、5、7	1、2、5	1	1、2、4、	1、2、3、6、7
同时激发泛音总数	19	19	19	18	17	17	13
G 徵调正声音阶	清角	徵 zhi	羽	闰	宫	商	角 jue

从音乐理论的角度看,古戏台利用其建筑声学构件所形成的声学效应强化戏曲音乐调式调性感的方法,与作曲技术中强调调式主音的方法原理相同。作曲家通常采用强化其他音级向主音的进行、延长主音的时值或将主音置于强拍等方法来达到强调调式主音的目的,而古戏台声学效应是采用增加主音的响度或优化主音的音质的方法来实现的,与作曲家采用的将主音置于强拍的方法原理相同。

道光以降,晋中流行中路梆子〔31〕,页 13),中路梆子大都采用 G 调的徵调式,结束音多为 D^[32]。由上文可知, D 音的加强感和覆盖感有助于明确结束音(即调式主音)在调式中的终止感。可见,在山西平遥真武庙古戏台可加强调式调性。

4 讨论

当经验式的窑洞拱券技术和声学技术的发展程度能满足古人的需求时,三者碰撞出了真武庙古戏台的声学效应。需要说明的是,亥姆霍兹共鸣器固有频率计算公式的前提条件是共鸣器的几何尺寸(指共鸣器的长宽高,而非共鸣器的容积)小于其固有频率的波长。真武庙的后台空腔作为亥姆霍兹共鸣器,其几何尺寸远大于其固有频率的波长,其耦合空腔的形状与标准的亥姆霍兹共鸣器形状相去甚远,故其声学原理虽与亥姆霍兹共鸣器类似,但其助声特性却无法用亥姆霍兹共鸣器固有频率的计算公式来计算,只能使用其固有频率的实测数据。对于此类共振空腔固有频率的计算公式,还有待有识之士研究。如果我们不将真武庙后台“开字形”窑洞作为共振空腔研究,参照现代音乐厅建造理论,其也可作为能延长混响时间的耦合腔体进行研究^[14-17]。

5 结论

依据本文的分析结果,至少在道光十八年(1838)之前,这种“开字形”后台窑洞空腔助声技术已经成熟。从战国设瓮守城、汉代琴台设瓮鸣琴、宋代钟鼓楼空腔助声,到清代古戏台“墙上设瓮”和“后台设洞”助声,中国古建筑中设腔助声技术的发展演变脉络较为清晰。“开字形”窑洞空腔与“卅字形”窑洞空腔结构有别,但均是山西传统民居窑洞在古戏台建筑中的特殊应用,也是中路梆子戏曲艺术繁荣的结果、建筑与艺术交融的奇葩,二者扩声技术同源同理、一脉相承^①。从音量分析看,“开字形”窑洞空腔可“助声”;从音色分析看,“开字形”窑洞空腔可“助音”;从古戏台与戏曲音乐的声学关系看,“开字形”窑洞空腔可“助调”乃至“助乐”,在一定的环境下,形成“戏台唱戏不费力”和“阮庄唱戏普遍听”的声学效应。由此,真武庙古戏台是“后台设洞”助声技术的又一成功尝试。

从真武庙古戏台的建筑价值、艺术价值、科学价值和历史价值看,它是山西晋中地区特有的声学建筑,在世界建筑史、艺术史和声学史上具有较为重要的意义。

致谢 本文初稿或相关内容于2016年7月在第十二届少数民族科技史学术研讨会暨第五届传统工艺论坛、2016年9月在the 7th International Conference of European Society for the History of Science上报告,笔者感谢与会者富有启发性的评论与建议。

参 考 文 献

- 1 杨阳,高策,丁宏.山西古戏台声学分类初探[J].自然科学史研究,2016,(2):175—190.
- 2 杨阳,高策,丁宏.平遥超山庙古戏台声学效应初探[J].自然科学史研究,2014,(4):427—444.
- 3 黄维若.明清时期中国北方农村戏台对音响效果的若干追求[J].戏剧,2000,(4):71—77.
- 4 廖奔.中国古代剧场史[M].北京:人民文学出版社,2012.25.

① 鉴于“开字形”和“卅字形”后台空腔古戏台的声场环境差别较大,故其声效比较拟采用声学模拟软件另文讨论。

- 5 刘文峰. 中国传统剧场的变革与戏曲发展的关系[J]. 戏曲研究, 2001 (2): 134—145.
- 6 车文明. 中国古代戏台规制与传统戏曲演出规模[J]. 戏剧艺术, 2011 (1): 4—18.
- 7 车文明. 中国古戏台调查研究[M]. 北京: 中华书局, 2011. 40—44, 110—114, 248—260.
- 8 冯俊杰. 中国古戏台的断代问题[J]. 戏剧, 2013 (2): 17—25.
- 9 杨阳. 一种小提琴空气峰频率测量装置[P]. 中国实用新型专利, ZL2014 2 0027679. 9.
- 10 Jürgen Meyer. *Acoustics and the Performance of Music* [M]. New York: Springer, 2009.
- 11 康玉成. 实用建筑吸声设计技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- 12 杨阳. 山西碛口黑龙庙山门戏台声学问题初探[J]. 科学技术哲学研究, 2014 (2): 78—83.
- 13 Barron M, Marshall A H. Spatial Impression due to Early Lateral Reflections in Concert Halls: The Derivation of a Physical Measure [J]. *Sound Vibration*, 1981, 77(2): 211—232.
- 14 王季卿. 耦合空间与厅堂音质[J]. 电声技术, 2005 (11): 7—9.
- 15 谭军安. 耦合空间在厅堂音质设计中的应用[J]. 电声技术, 2003 (4): 4—6.
- 16 浦宏杰. 耦合空间中不同衰变类型声场的边界研究[J]. 声学学报, 2009 (6): 533—538.
- 17 蒋国荣. 基于声辐射度的耦合空间声能衰变模拟方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008 (12): 1734—1738.
- 18 Cremer L, H. A. Muller. *Principles and Applications of Room Acoustics, Vols. 1 and 2* [M]. New York: Applied Science, 1982.
- 19 Haas H. The Influence of a Single Echo on the Audible Speech [J]. *Journal of the Audio Engineering Society*. 1972, 20(2): 146—159.
- 20 Reichardt W, Abdel Alim W, Schmidt. Clarity [J]. *Acoustics*, 1975, 32: 126.
- 21 Thiele R, E. Meyer. Acoustical Investigations in Numerous Concert Halls and Broadcast Studios Using New Measurement Techniques [C]. English summary (trans. T. D. Northwood) in *Benchmark Papers in Acoustics*, Vol. 10: Architectural Acoustics, edited by Thomas D. Northwood, 181—208, Stroudsburg, Pa.: Dowden, Hutchinson & Ross, 1977.
- 22 Johnson R. Reflections on the Acoustical Design of Halls for Music Performance [J]. *V. O. Knudsen Lecture*, presented at the 120th Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, California, November 1990.
- 23 Cervone Richard P. Subjective and Objective Methods for Evaluating the Acoustical Quality of Buildings for Music [D]. Florida: University of Florida, 1990.
- 24 Beranek L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* [M]. New York: Springer, 2004.
- 25 Izhaki R. *Mixing Audio: Concepts, Practices and Tools* (Second Edition) [M]. Leiwei. UK: Focal Press, 2012. 15.
- 26 缪天瑞. 律学[M]. 北京: 人民音乐出版社, 1996.
- 27 David M. Howard, Jamie A. Angus. *Acoustics and Psychoacoustics* [M]. UK: Focal Press, 2004.
- 28 P. M. 莫尔斯. 理论声学(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- 29 程贞一. 黄钟大吕——中国古代和十六世纪声学成[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2007.
- 30 David M. Howard, Jamie A. S. Angus, *Acoustics and Psychoacoustics* [M]. UK: Focal Press, 2009.
- 31 山西省戏曲研究所. 晋剧百年史话[M]. 太原: 山西人民出版社, 1985.
- 32 张燕丽. 山西四大梆子唱腔调式研究[J]. 南京艺术学院学报, 2012 (4): 49—55.

A Preliminary Study on the Acoustic Effect of the “开”-shaped Cave Stage in Zhenwu Temple Stage at Pingyao

YANG Yang¹ PEI Jiali²

(1. *Institute for History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, 030006, China;*

2. *The Academy of Music, Shanxi University, Taiyuan, 030006, China*)

Abstract This research carries out measurements and analysis of the “开”-shaped Zhenwu Temple stage in Shanxi Province, China with modern acoustic measurement analyzers. The results show that the “开”-shaped cave stage is based on the same acoustic principle as “earthen vases set to enhance sound” and has a noticeable acoustic effect. This is a successful attempt to design the ancient stage to enhance sound by resonance. Not only can the stage assist in sound enhancement and increase acoustic intensity and improve acoustic quality, but it also can strengthen the mode and tonality of music. From the standpoint of architectural, artistic, scientific and historic value, it is the perfect combination of cave dwelling building technology in central Shanxi, opera art, and resonance sound amplifying technology.

Keywords the ancient stage, the “开”-shaped cavity, acoustic effect