

平遥超山庙古戏台声学效应初探

杨 阳^{1 2} 高 策¹ 丁 宏³

(1. 山西大学科学技术哲学中心科学技术史研究所 太原 030006; 2. 山西大学音乐学院 太原 030006;
3. 太原理工大学政法学院 太原 030024)

摘 要 首次发现平遥小胡村超山庙古戏台“十字窑洞”及其声学现象,用现代声学的测量方法对其测量,结果表明“十字窑洞”具有扩大音量,美化音色,优化乐音结构的作用。基于“复合式古戏台”的数量、地域分布及其声学特征,推测这种形制的古戏台是山西特色建筑,是建筑艺术和戏曲音乐艺术在民间不断发展并融为一体的经验结晶。

关键词 复合式古戏台 十字窑洞 建筑史 声学史 戏曲音乐史
中图分类号 N092:04-092
文献标识码 A **文章编号** 1000-1224(2014)04-0427-18

0 引 言

因地制宜

近年来,我们在对山西古戏台的调研中,在晋中、吕梁一带发现了大量“表演场地(木构建筑前台)和窑洞(砖石建筑)连为一体”的古戏台建筑(下文称这种砖窑和木结构共同组成的古戏台为“复合式古戏台”),如临县黑龙庙古戏台、柳林龙王庙古戏台、平遥超山庙古戏台等。在普查古戏台过程中,发现这类形制的建筑具有良好的声音效果,以超山庙古戏台为特殊。该戏台今虽已半毁,但站在其洞口讲话,七八十米内清晰可闻。查阅相关文献得知,黄维若教授曾指出“明清时期,无名的剧场建筑师们,想了许多办法,来使舞台音效达到比较理想的境地。”^[1]廖奔教授也指出“明清戏台在建筑时更加注意他的音响效果,采取了许多不同的措施来进行试验,……如利用拱洞的回声原理,把后台砌成窑洞形”。^[2]然而学界对此尚未有专门的论述。在国外文献资料中,迄今还未发现类似戏台的记载,与窑洞弧形表面声学特性相关的研究也仅是教堂内穹顶声聚焦和教堂混响时间较

收稿日期: 2014-08-14; 修回日期: 2014-11-06
作者简介: 杨阳,1978年生,山西太原人,博士生,教师,研究方向为地方科学技术史;高策,1958年生,山西乡宁人,教授,博士生导师,研究方向为地方科学技术史;丁宏,1979年生,山西乡宁人,研究方向为地方科学技术史。
基金项目: 山西省优势特色重点学科:山西传统工艺技术开发与旅游产业发展(项目编号:020252013);山西省自然科学基金:山西古戏台声学问题研究(项目编号:2014011011);山西省文物局研究课题:山西古戏台声学问题研究与保护(项目编号:2014058010)

长等问题的探讨,其建筑形式与声音效果与本文涉及的复合式古戏台大相径庭^①。为解决此疑问,我们选出其中典型代表——山西平遥小胡村超山庙古戏台进行田野实测,综合分析其形状、结构和材料等因素对戏台音量和音色的影响,同时也涉及该类型戏台与地方戏曲发展的关系,以求对戏台建筑史、声学史、戏曲音乐史的研究有所助益。不当之处,请识者指正。

1 平遥超山庙复合式古戏台

1.1 复合式古戏台



图1 窑洞与表演场地呈上下关系(临县黑龙庙古戏台)

第二种类型,戏台和窑洞呈前后关系。这类戏台数量较多,窑洞和表演场地处于同一水平面,窑洞位于戏台后方。从窑洞的建筑材质看,主要有砖券和石券两种,以砖券为主。窑洞可为单孔或多孔组合,结构最复杂的窑洞由四孔窑洞横联砌筑而成。代表性的如柳林龙王庙古戏台(图2)、中阳县众神庙古戏台、平遥县狐仙庙古戏台、灵石县关帝庙古戏台等。

经初步梳理,现查明第二种类型

据车文明教授近年统计,山西现存清代戏台 503 座。^[3]结合第三次全国文物普查的结果,我们在田野考察中发现山西乡村有大量具有地方特色的复合式古戏台遗存。从戏台表演场地与窑洞的空间位置关系看,复合式古戏台主要分为两种类型。

第一种类型,戏台和窑洞呈上下关系。这类戏台数量较少,多属于山门戏台,上层戏台演戏,下层窑洞供人行走。代表性的如临县黑龙庙古戏台(图1)、洪洞县水神庙古戏台等。^②



图2 窑洞与表演场地呈前后关系(柳林龙王庙古戏台)

① 教堂穹顶虽有与复合式古戏台相类似的声学特性,但由于其容积太大,且观众位于教堂之内,与复合式古戏台窑洞容积较小、观众位于窑洞之外而大不相同。就像人站在喇叭腔内和喇叭腔外说话之差异类似。

② 在河南、山东等省也有少数下层窑洞无通行功能的表演场地和窑洞呈上下关系的古戏台实例,如河南新密关帝庙古戏台和青岛天后宫古戏台。参见薛林平《中国传统剧场建筑》,中国建筑工业出版社,2009年,第186、197页。

的复合式古戏台共有 204 座,其中约 170 座尚未在其他著作或杂志中公开。表 1 为该种复合式古戏台分布情况统计表。^①从地域分布上看,这类复合式古戏台主要分布在晋中、吕梁等地区的平遥、汾阳、灵石、孝义、中阳、柳林、交口、石楼等县市。

表 1 山西第二种类型复合式古戏台分布情况统计表

区域	离石区	中阳县	柳林县	石楼县	交口县	汾阳市	孝义市	灵石县	平遥县
第二类复合式古戏台总数	4	22	13	22	44	3	11	51	34
古戏台总数	34	37	72	50	145	62	60	108	167

复合式古戏台大多数破坏严重。通过现场直观测量,第二种类型的复合式古戏台声学效果较好,本文将该种类型的古戏台作为主要研究对象。其中,平遥小胡村超山庙古戏台是该类型古戏台的典型代表。

1.2 平遥超山庙古戏台

超山庙古戏台坐落在山西省平遥县正南约 9.4 公里处的小胡村,隶属卜宜乡。超山庙位于小胡村村北,坐北朝南,单进四合院布局,长 84.28 米,宽 22.71 米,占地面积约 1914 平方米,创建年代不详。超山庙正殿坐北朝南,为三孔砖券窑洞连通的“枕头窑”^②,供奉着“祷雨立应”的“应润侯”。正殿两边为侧殿,各有直筒砖券窑洞两孔。正殿和侧殿均带前廊,前廊多年前毁于火灾。超山庙古戏台(图 3)坐南朝北,与正殿相对,距离正殿 27.6 米。戏台左侧有房屋二间,供演员休息(超山庙平面图如图 4 所示)。戏台演戏时间不固定,只在干旱时祷雨应验后才为“应润侯”唱还愿戏。



图 3 现存超山庙古戏台实物

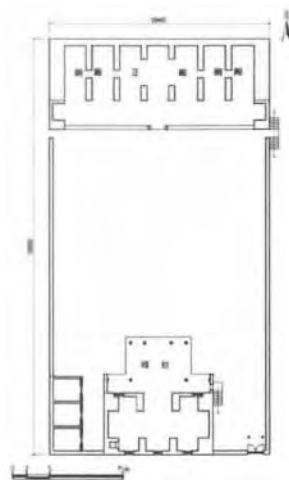


图 4 小胡村超山庙平面图

① 此次统计的古戏台总数也包括现存复合式古戏台基址。

② “枕头窑”,指窑洞的结构好似枕头的样子,其高度不等,跨度不同。方山县、柳林县、中阳县、孝义市、隰县、蒲县、交口县、石楼县、汾阳市、灵石县、平遥县等地有许多神庙正殿采用“枕头窑”建筑结构的实例。



图5 超山庙古戏台后台复原平面图

超山庙古戏台前台为木梁架结构,后台为砖券窑洞。前台木结构部分因年久失修坍塌之后,连同部分台基在1980年左右被拆除。现存戏台建筑仅为部分前台台基、山墙和砖券窑洞,砖券窑洞即原超山庙古戏台的后台(图3)。戏台台基高1.5米,面阔五间,平面呈“凸”字形。明间、次间的凸出部分为表演区,长约8.73米,宽约5米,占地面积约43.65平方米。现存部分前台长14.63米,宽2.5米,占地面积为36.575平方米。后台长14.63米,宽8.23米,占地面积为120.4049平方米。两侧山面风火墙由青砖卧砌而成,白灰砌筑,为细淌白墙体^[4],墙面工整可防虫蛀,砖缝平整无开裂。左侧山墙设门,门高1.85米、

宽0.7米。经估算,原戏台总占地面积约为200.6299平方米(图5)。

据长期居住在超山庙的雷双林介绍,小胡村戏台是段村镇东安社娘娘庙戏台的蓝本,后者规模较小,且局部细节有所调整。东安社娘娘庙戏台保存较为完整,我们参考它绘制了小胡村超山庙古戏台复原图(图6,图7)。戏台的明间、次间为单檐歇山顶,稍间又出两翼角,与歇山顶飞檐成重檐之势。

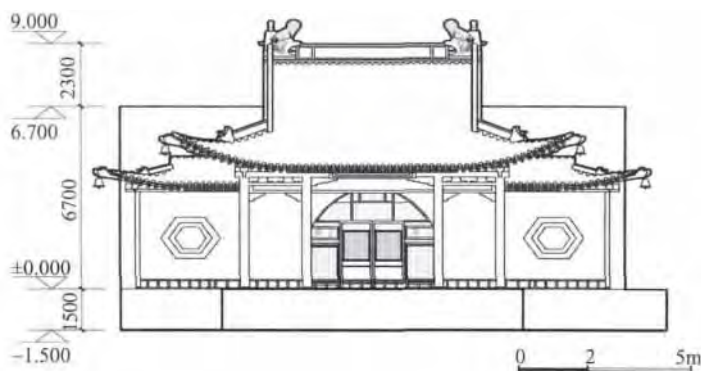


图6 超山庙古戏台复原正面图

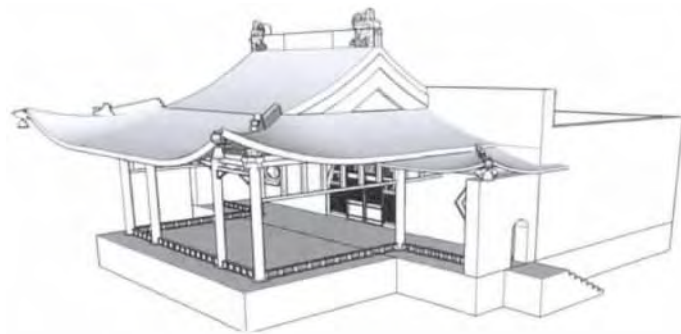


图7 超山庙古戏台复原3D示意图

经观察和测量,超山庙古戏台后台的窑洞建筑结构复杂。它由一孔横窑和三孔纵窑纵联砌筑^①而成,其中中间纵窑和横窑构成一个“十字窑”,两侧纵窑和横窑分别构成两个“枕头窑”,中间纵窑的尺寸明显大于两侧纵窑。中间纵窑和横窑的高度相等、跨度相近,在窑洞顶部的交叉部分呈十字,俗称“十字窑”(其顶部结构如图8)。两侧纵窑和横窑高度不等、跨度不同,俗称“枕头窑”(十字窑洞具体尺寸如下表2^②,后台窑洞复原图见图9)。



图8 超山庙后台“十字窑”顶部图片

表2 十字窑洞尺寸表

	深(米)	宽(米)	高(米)	穹顶曲率半径约(米) ③	开分约(米) ④	起拱高度(米) ⑤
中间纵窑(前)	2.415	3.860	3.989	1.930	0.3860	1.20
中间纵窑(后)	1.725	3.195	3.962	1.5975	0.3195	1.08
左侧纵窑(前)	1.910	2.420	3.311	1.210	0.2420	1.08
左侧纵窑(后)	1.727	2.724	3.295	1.362	0.2724	1.08
右侧纵窑(前)	1.910	2.400	3.311	1.200	0.2400	1.08
右侧纵窑(后)	1.720	2.720	3.295	1.360	0.2720	1.20
横窑	13.464	3.15	3.980	1.7575	0.3150	1.20

从山西古建筑建造技术的演变来看,高度相等、跨度相同的十字交叉窑洞建造技术难度较大,但技术早已成熟。这类十字交叉窑洞技术最早用于鼓楼建筑,如建于北宋时期的临汾市尧都区鼓楼、建于明代嘉靖年间的蒲州鼓楼和建于明万历四十三年(1615)的太谷鼓楼中的十字交叉拱洞均使用了此种建筑结构。高度不等、跨度不同的“枕头窑”多见于山西部

- ① 目前发现纵联砌筑三孔纵窑的古戏台仅3座,其他2座为平遥东安社娘娘庙古戏台和侯冀村关帝庙古戏台,后两者全为高度不等、跨度不同的枕头窑,声学效果以超山庙古戏台最佳。
- ② 实际上每一纵窑都是外大里小,文中给出的数据以洞口尺寸为准。
- ③ 超山庙后台窑洞为“四心圆”结构,穹顶曲率半径只能取约数。具体分析见下文和图19。
- ④ 受穹顶曲率半径值的影响,开分也只能为约数。
- ⑤ 见图19,起拱高度指窑洞底边到 O_1 点或a点的垂直距离。

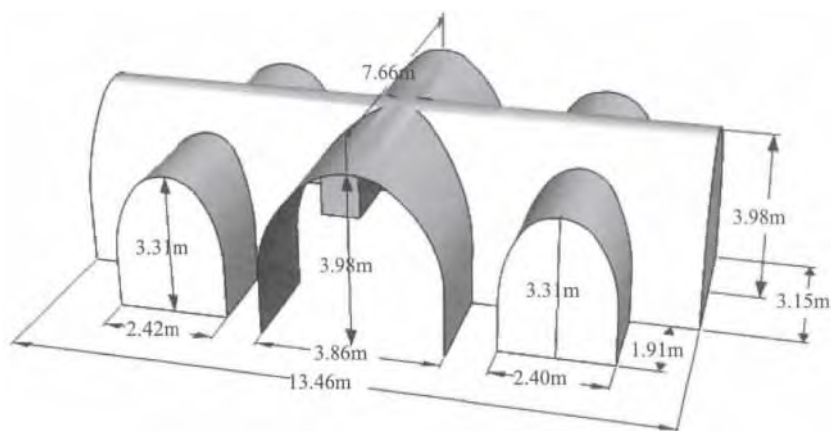


图9 超山庙古戏台后台窑洞模拟图

分地区的神庙正殿中。应用纵联砌筑多个拱洞的技术将“十字窑”和“枕头窑”融合建造，在古戏台建筑乃至古建筑中都极其罕见。超山庙古戏台是目前发现 200 多座复合式古戏台之中的唯一实例，它在戏台建筑史上当有极其重要的学术价值。

虽然超山庙古戏台前台尽毁，但后台窑洞保存完好（如图 3、图 8），中间纵窑和横窑交叉部位稍有破损，墙面有裂缝。仅中间纵窑在隔断处设出将入相门通外，洞口为二券二伏。两侧纵窑前边均设六边形窗户，窗户边长为 0.87 米。三孔纵窑后面也均设六边形窗户，窗户边长为 1.043 米。左侧纵窑后部设有通往窑顶的通道。

1.3 小胡村超山庙古戏台的建造年代

我们从窑洞建造技术特征和寺庙中相关实物对超山庙古戏台的建造年代进行推测。

从拱券砌筑技术的发展情况来看，“双心圆”拱券技术提高了拱券荷重能力，是超山庙古戏台后台“十字交叉窑洞”拱券技术的基础^[5]。山西现存较早的建造于明代嘉靖年间的蒲州鼓楼为典型应用双心圆拱券技术的建筑，由此推测，超山庙古戏台应为明嘉靖之后的建筑。

除了窑洞拱券技术外，还可以从超山庙现存的匾额、镜鼓柱础和龟趺碑座等实物对超山庙古戏台的建造年代进行推断。

实地发现长 1.81 米，宽 0.56 米的匾额一副，正面书“曲渡尘飞”四字（图 10），背面有题记（图 11）。匾额背面题记为：



图10 匾额正面



图 11 匾额背面

平遥城门衙门东□钟庆和班在此二□ 旌永班 钟庆和班
花报国 旌永班 宁武关 观灯 送灯 □山 过江 楚王□ 对玉□
□□塔 班主还□
咸丰四年又七月初八四□□□□ 下台起介□山庄起

题记内容不够连贯,“□”为不能辨识的字。据匾额题记可断定当时的戏班钟庆和班和旌永班曾在此演出,演出的曲目有《宁武关》、《观灯》、《送灯》、《□山》、《过江》等。其中钟庆和班演出时间为咸丰四年又七月初八,即 1854 年农历闰七月初八。由此可知,超山庙古戏台至少为咸丰四年前建造。

镜鼓柱础 8 个,均设有嵌设栏杆的卡槽,直径 40 厘米,上下表面直径 30 厘米,四周图案精美,活灵活现,为清代风格。

龟趺碑座 1 个,碑座的花纹图案也为清代风格,碑身文字是推测寺庙和戏台建造年代最可信的实物,可惜在建国初期兴修水利工程时被埋在村南一小桥下做基石,其上文字暂不可考。

2 超山庙古戏台的声学效应及其测量

2.1 超山庙古戏台的声学效应

当我们在该戏台实地考察中,偶然发现它的扩声效果非同一般。在距离戏台七八十米的广场上能清晰听闻台面人的对话声。调查中获悉,著名中路梆子表演艺术家丁果仙(1909~1972,艺名“果子红”)经常在超山庙古戏台演出,祁太秧歌表演艺术家王基珍(1933~2009,艺名“盖汾阳”)在此成名。曾在此演出过的艺术家和当地民众说在此戏台唱戏声音饱满圆润,不费力就可获得好声音,声音震天响,“能治倒嗓子”。诸如此类声学现象,可从音量和音色两个方面来解释。就音量方面而言,又可从演员和观众两个角度来理解:对演员而言,具有“戏台唱戏不费力”的声学现象,指在此戏台演剧不用费力即可获得在其他戏台上用力后才能获得的音量;对观众而言,具有“超山庙戏台震天响”的声学效果,即戏台上的演剧声能向外传播很远,在没有现代电声扩音设备时,有“夜戏十里”的效果。就音色方面而言,在此戏台演剧不仅能获得较大音量,还可延长混响时间,增加声音清晰度和饱满度,有“腔音袅袅”的声学效应。

2.2 声学指标的选取与测量

通过直观测量,我们发现超山庙古戏台的后台窑洞具有特殊的声学性能,主要是因为其空腔对声音产生了影响。从功能上看,可以将超山庙古戏台4孔窑洞交叉组成的后台视为多乐器组合而成的共振器。乐器的声学结构可以分为激励系统、振动系统、传导系统和共鸣系统4个部分。当在古戏台上演剧时,人的演唱和乐器演奏构成激励和振动两个系统;出将入相门、六边形窗户及声反射的建筑构件构成传导系统;后台窑洞构成前台演剧声的共鸣系统,其空腔起着放大演剧声的作用。

按照戏台测量的一般方法,如果用描述闭合空间中观众席声音效果的物理量,如混响时间、清晰度、早期侧向反射声能比LF、双耳互相关系数IACC^[6]等声学指标不能完全准确描述后台窑洞和广场相结合的声学特性。诸如,前者的混响时间RT60是当声源在密闭空间内达到稳定状态后停止发声,残余声能在房间内往复反射,经吸声材料吸收,其声能密度衰减60dB所需的时间^[7],而在我们的研究对象中并非闭合空间。我们仿效学界对乐器空腔声学性能的测量方法,主要是测量复合式古戏台共振频率(即固有频率)^[8,9]。共振频率是表征系统固有特性的物理量,是能准确表征后台窑洞空腔声学性能的物理参数,以此探寻其声学效应的成因。

参照国家标准GB/T4959-2011《厅堂扩声特性测量方法》,在测量时,我们采用瑞士NTi Audio AG公司生产的Minirator MR-PRO模拟信号发生器,对超山庙后台窑洞使用特定信号激发,然后使用瑞士NTi Audio AG公司生产的M4260测量麦克风以及XL2音频与声学分析仪,对其共振频率的响应结果进行测量。

在实测过程中,我们按照后台完整时的声音效果对后台进行还原,用石膏板对中间纵窑洞口进行了封闭处理,留出出将入相的两道门,门宽0.8米,高1.8米。然后对打了石膏板后的后台窑洞进行声学测量(图12)。

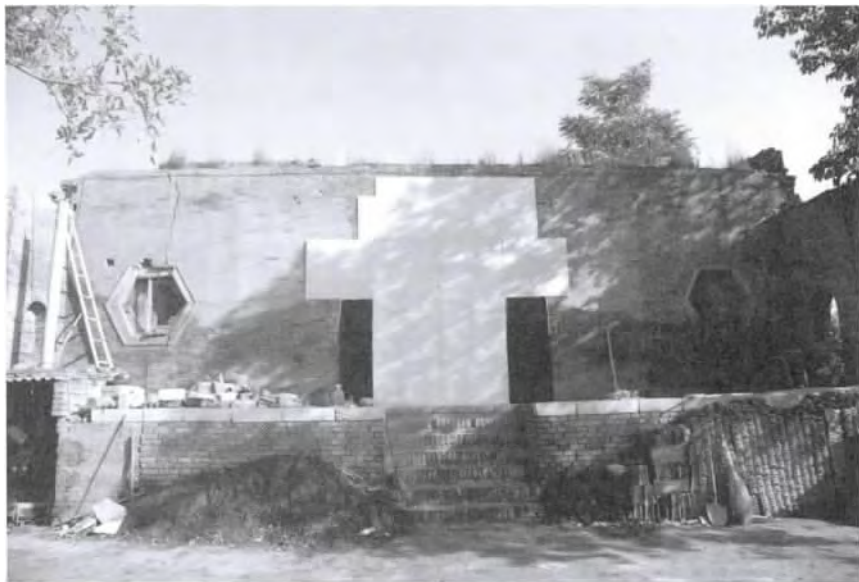


图12 测量时声学改装后的超山庙古戏台

根据超山庙古戏台的结构和面积,参照相关国家标准的设点要求规范,我们选取了5个测量点测量窑洞的频率响应情况,它们分别为:位于演剧场地距离出将入相口1.5米处各设置1个,后台均匀设置3个(图13)。传声器的高度和摆放位置均符合相关国家测量标准。

在测量频段的设定上,考虑到山西梆子中入声的音域通常不会低于男低音的最低频率72Hz,不会高于花腔女高音最高音的频率1152Hz;乐器的音域通常不会低于大提琴的最低频率65.4Hz,不会高于板胡最高音的频率3537Hz。^[10]结合声学分析仪的特点,我们将此次测量的频段设定在50~4000Hz。首先采用50~4000Hz的白噪声作为激励信号,测量窑洞的共振频率。分析初次测量结果后,得到一些频段上有较高的共振峰值,然后再选出有较高峰值的频段扫频,分析扫频结果,得出其共振频率。信号发生器输出电平为2dBv,扫频时间全部为99秒。由于每次测量声学分析仪只能取142个频点,所以尽可能将分析仪分析的频率宽度调到较小以提高其分辨率。

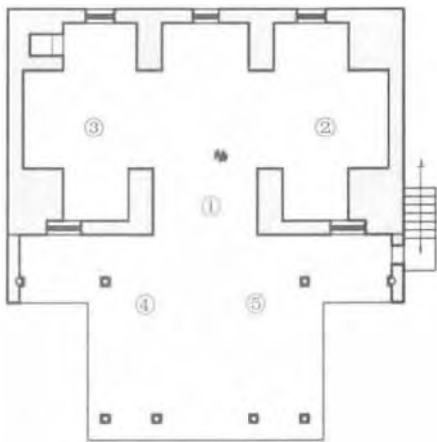


图13 超山庙古戏台测点图

2.3 测量结果分析

我们对有较高峰值的24个频段在不同的测点进行了127次扫频测量,分析扫频结果,发现23个峰值频率与山西梆子音乐涉及的频率相近^①。现摘取其中1个扫频峰值频率实测截图(图14)并说明截图中各项参数的意义:该图横坐标X轴表示分析仪测量的频率范围,纵坐标表示分析仪测量的声压级范围,曲线为测量对象的频响曲线。具体而言,X轴表示本次测量的频率从50.62Hz至466.64Hz,频率宽度为416.0Hz;Y轴表示本次测量声压级的范围为40dB至120dB;截图中左上角的FFT+Tol指傅里叶分析加公差;Max 115.9dB指本次测量中峰值频率的最大声压级为115.9dB,A103.36Hz指本次测量在103.36Hz处达到最大峰值(共振峰值),即103.36Hz为共振频率(峰值频率)。图片显示此次测量频响曲线在103.36Hz处出现最大峰值,声压级为115.9dB。截图中右下角CAT 00:03:28指本次测量历时3分28秒。本截图数据整理见下文表3中序号2。

将23个截图整理后见表3。现结合表3中序号2说明各参数的意义。扫频频段(Hz)表示信号发生器所选取的扫频信号设定在50~430Hz,扫频持续99秒;分析仪显示量测范围,指本次测量分析仪工作的频率范围为50.62~466.64Hz;共振频率,表示截图中所示频响曲线的峰值频率为103.36Hz,即窑洞可对103.36Hz的声音放大,此时峰值频率即指共振频率;共振峰值,指本次测量的共振频率103.36Hz所达到的最大声压级为115.9dB;与共振频率最近的乐音、乐音频率、共振频率和乐音频率的差值,指依照国际标准音高440Hz取值,采用十二平均律律制,与103.36Hz最近的乐音为大字组的 $^{\#}G$ 音, $^{\#}G$ 音的频率为103.83Hz,共振频率103.36Hz与F音频率103.83Hz的差值为-0.47Hz;本

① 各音频率按照国际标准音440Hz取值。

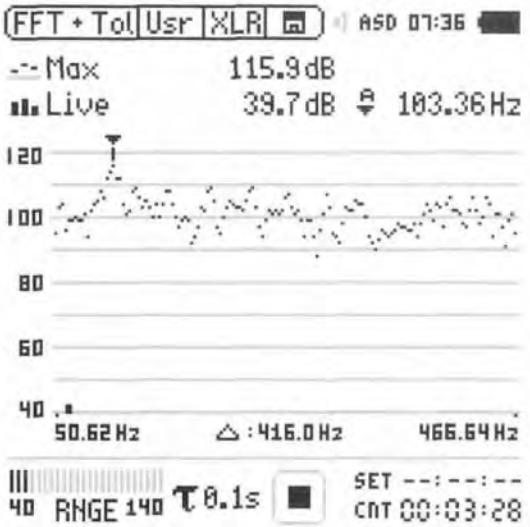


图 14 峰值频率实测截图

次测量的平均声压级 指本次测量中所有频率最高声压级的均值为 100. 88dB; 共振峰值和平均声压级的差值 ,指本次测量共振频率的最大声压级 115. 9dB 和平均声压级 100. 88dB 的差值为 15. 02dB。

表 3 扫频结果汇总表

序号	扫频频段 Hz	分析仪显示量测范围 Hz	共振频率 Hz	共振峰值 dB	与共振频率最近的乐音	乐音频率 Hz	共振频率和乐音频率的差值 Hz	本次测量的平均声压级 dB	共振峰值和平均声压级的差值 dB
1	50 ~ 430	50. 62 ~ 466. 64	85. 78	97. 9	F	87. 31	- 1. 53	86. 25	11. 65
2	50 ~ 430	50. 62 ~ 466. 64	103. 36	115. 9	#G	103. 83	- 0. 47	100. 88	15. 02
3	50 ~ 430	50. 62 ~ 466. 64	120. 93	105. 1	B	123. 47	- 2. 54	96. 02	9. 08
4	100 ~ 4000	117 ~ 3450	140. 44	92. 7	#c(b d)	138. 59	+ 1. 85	80. 36	12. 34
5	150 ~ 250	147. 93 ~ 251. 93	153. 79	104. 2	#d	155. 57	- 1. 78	94. 21	9. 99
6	100 ~ 4000	117 ~ 3450	210. 75	100. 8	#g	207. 66	+ 3. 09	90. 76	9. 74
7	200 ~ 315	226. 48 ~ 330. 48	233. 07	100. 2	#a	233. 09	- 0. 02	93. 60	6. 6
8	250 ~ 400	291. 94 ~ 395. 94	363. 72	90. 4	#f ¹	370	- 6. 28	83. 00	7. 4
9	315 ~ 500	370. 49 ~ 474. 50	412. 24	103	#g ¹	415. 31	- 3. 07	95. 62	7. 38
10	400 ~ 630	475. 23 ~ 579. 23	495	101. 1	b ¹	493. 9	+ 1. 1	90. 33	10. 77
11	500 ~ 800	578. 87 ~ 786. 87	627. 21	98. 8	#d ²	622. 27	+ 4. 94	89. 66	9. 14
12	500 ~ 800	578. 87 ~ 786. 87	662. 36	87. 9	e ²	659. 27	+ 3. 09	78. 20	9. 7
13	630 ~ 1000	746. 29 ~ 850. 30	785. 84	92. 7	g ²	784. 01	+ 1. 83	84. 26	8. 44
14	630 ~ 1000	746. 29 ~ 850. 30	829. 79	80. 8	#g ² (b a ²)	830. 63	- 0. 84	73. 00	7. 8

续表 3

序号	扫频频段 Hz	分析仪显示量测范围 Hz	共振频率 Hz	共振峰值 dB	与共振频率最近的乐音	乐音频率 Hz	共振频率和乐音频率的差值 Hz	本次测量的平均声压级 dB	共振峰值和平均声压级的差值 dB
15	800 ~ 1000	814.52 ~ 1020	936.1	95.6	$\#a^2$	932.35	+3.75	87.10	8.5
16	800 ~ 1250	950 ~ 1060	1051	94.3	c^3	1046.53	+4.47	83.58	10.72
17	1250 ~ 1600	1250 ~ 1670	1320.6	100.6	e^3	1318.54	+2.06	91.84	8.76
18	1600 ~ 2000	1570 ~ 1980	1863.4	95.3	$\#a^3$	1864.70	-1.3	87.94	7.36
19	2000 ~ 2500	2330 ~ 2530	2449.7	81.2	$\#d^4$	2489.08	-40.1	71.00	10.2
20	2500 ~ 3150	2430 ~ 2850	2773	83.5	f^4	2793.89	-20.89	73.95	9.55
21	2500 ~ 3150	2800 ~ 3210	3116.2	84.3	g^4	3136.04	-19.16	77.24	7.06
22	3150 ~ 4000	3110 ~ 3530	3325.6	85.6	$\#g^4$	3322.52	+3.08	76.23	9.37
23	3150 ~ 4000	3480 ~ 3900	3749	97.8	$\#a^4(\flat b^4)$	3729.40	+19.60	88.64	9.16

进一步比较分析表 3 中共振频率、共振峰值和乐音频率等参数,得出三个结论:

(1) 有 23 个乐音与峰值频率一一对应

与 23 个扫频峰值频率相对应的 23 个乐音分别是 F、 $\#G$ 、B、 $\#c$ 、 $\#d$ 、 $\#g$ 、 $\#a$ 、 $\#f^1$ 、 $\#g^1$ 、 b^1 、 $\#d^2$ 、 e^2 、 g^2 、 $\#g^2$ 、 $\#a^2$ 、 c^3 、 e^3 、 $\#a^3$ 、 $\#d^4$ 、 f^4 、 g^4 、 $\#g^4$ 、 $\#a^4$ (表 4),^①表 4 中乐音指表 3 中与共振频率最近的乐音。

表 4 23 个共振频率对应的乐音表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
共振频率 Hz	85.78	103.36	120.93	140.44	153.79	210.75	233.07	363.72	412.24	495	627.21	662.36
乐音	F	$\#G$	B	$\#c(\flat d)$	$\#d$	$\#g$	$\#a$	$\#f^1$	$\#g^1$	b^1	$\#d^2$	e^2
序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
共振频率 Hz	785.84	829.79	936.1	1051	1320.6	1863.4	2449.7	2773	3116.2	3325.6	3749	
乐音	g^2	$\#g^2(\flat a^2)$	$\#a^2$	c^3	e^3	$\#a^3$	$\#d^4$	f^4	g^4	$\#g^4$	$\#a^4(\flat b^4)$	

(2) 共振频率与乐音频率相近

在 23 个被放大的乐音中,大字组、小字组、小字一组、小字二组、小字三组中相关乐音频率较实测共振频率误差小,最大值为 7.84Hz,最小值为 0.02Hz,平均误差为 2.89Hz,小字四组中的相关乐音频率较实测共振频率误差偏大。(图 15)

(3) 共振峰值和平均声压级比较

6 个八度内 23 个共振频率峰值,最大为 115.9dB,最小为 80.8dB。共振峰值和每次测量平均声压级的最大差值为 15.02dB,最小差值为 6.6dB。(图 16)

① 23 个乐音 F、 $\#G$ 、B、 $\#c$ 、 $\#d$ 、 $\#g$ 、 $\#a$ 、 $\#f^1$ 、 $\#g^1$ 、 b^1 、 $\#d^2$ 、 e^2 、 g^2 、 $\#g^2$ 、 $\#a^2$ 、 c^3 、 e^3 、 $\#a^3$ 、 $\#d^4$ 、 f^4 、 g^4 、 $\#g^4$ 、 $\#a^4$ 为乐音分组的方法,其中大写字母为大字组,小写字母为小字组,右上角的数字为组别。如 F 表示大字组的 F 音, $\#d^4$ 为小字四组的升 d 音。

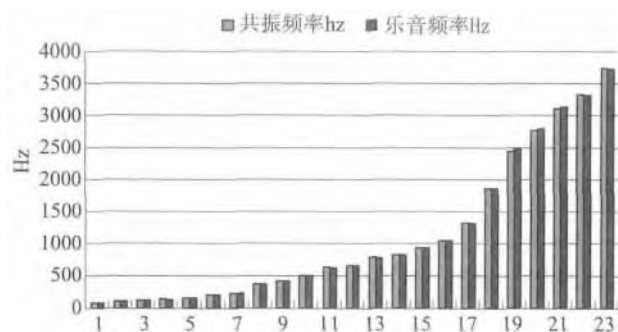


图 15 共振频率与乐音频率比较图

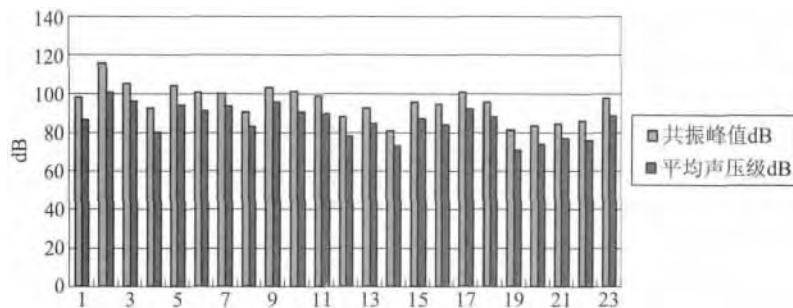


图 16 共振峰值和平均声压级的比较图

从被放大声音的声压级看,低频段略强于高频段,如图 17 所示。图中 X 轴表示 23 个乐音附近被十字窑洞放大的频率, Y 轴表示这些峰值频率所对应的声压级。

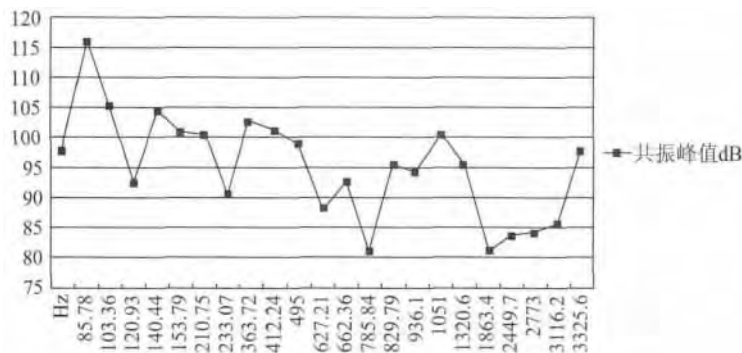


图 17 后台窑洞共振低频段声音强度大于高频段示意图

3 超山庙古戏台的声学效应分析

根据超山庙古戏台声学效应的测量分析,发现其主要表现在使戏台音量变大和音质变美两个方面。

3.1 从音量上讲,无论是“戏台唱戏不费力”还是“超山庙戏台震天响”都和窑洞的材料、形状、结构等因素有关

从材料上看,超山庙古戏台的建筑材料容易使进入其中的声音形成反射。超山庙古戏

台窑洞和地面都由**硬度和密度较高**的清代砖铺设。现代砖在 125Hz 到 4000Hz 之间其吸声系数为 0.03 到 0.07^[11]。清代砖的硬度和密度虽比现代砖稍低,但相差很小。因此,用砖做建筑材料累砌的后台窑洞吸声系数低,声音反射系数高,可将 90% 以上的声能反射。

从形状上看,窑洞形状对于传声、扩声起着关键作用。“十字窑洞”的弧形表面容易使进入其中的声波形成扩散。与方形相比,弧形和方形都能对声音形成扩散,但方形结构的空间容易形成**驻波**,使声波驻留在方形声场中。弧形表面的窑洞容易使声波扩散。^[12]超山庙的后台窑洞,其顶部的弧形表面可以对声波形成汇聚或聚焦,汇聚或聚焦后的声波经过焦点后又沿着原来的方向扩散(图 18)。^[13]使得声聚焦点处的声压级相对较高,而声聚焦点外的声压级相对均匀。同时,超山庙古戏台后台窑洞采用平遥盛行的“四心圆”拱券,即这种窑洞有四个圆心。从声学的角度看,“四心圆”拱券窑洞有四个声聚焦点。与“双心圆”^①窑洞相比,“四心圆”窑洞更有利于声音的扩散(图 19)。

从结构上看,“十字窑洞”可将前台声音放大。对十字窑洞而言,其声音来源主要由两部分构成。一部分为演员的声音。山西传统戏剧表演中不论是文戏还是武戏,演员演剧时,不会一直面向观众。当演员面向窑洞时,窑洞放大的声音主要来自演员的直达声;当演员不面向窑洞时,窑洞放大的声音主要来自演员自己的衍射声^②和戏台屋檐等建筑构件对演员的反射声。另一部分为乐队乐器的反射声音。在山西传统戏剧表演中,演奏者通常面向演员位于戏台山墙两侧。乐器发出的声波可直射入后台窑洞内。

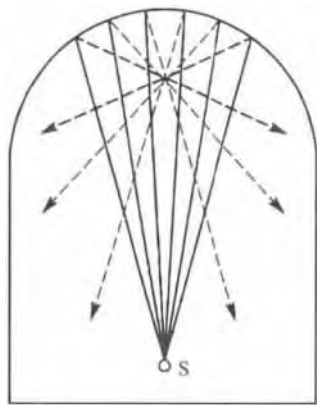


图 18 窑洞高度大于曲率半径两倍时的声波反射图

实际测量过程中,在没有屋檐等建筑构件反射的情况下,站在前台唱歌或说话,窑洞内清晰可辨,这也说明前台声音可传入窑洞,窑洞可将前台声音放大。

单个窑洞的空腔类似一个**亥姆霍兹共鸣器**,超山庙后台“十字窑洞”的多个空腔犹如多乐器组合而成的一组亥姆霍兹共鸣器,存在多个固有频率,可对频率相同的入射波产生共振,积累声能量,增加响度,提高声压级。

参考表 3、表 4 和图 15,测量结果中的 23 个峰值即“十字窑洞”的 23 个固有频率,说明“十字窑洞”可以有效放大 23 个乐音;参考表 3 和图 16,按照声压级计算的方法,两个相同声压级的声音叠加后的总声压级,只比原来一个声音的声压级增加 3dB。可以推测,超山庙后台“十字窑洞”将进入其中在峰值频率附近的声强强度放大了两倍多。按照声音的平方反比定律,声强与声源的距离成反比,与声源功率成正比,可知演剧声强的放大即意味着传播距离的增加;参考表 3 和图 17,被“十字窑洞”放大乐音在低频段的声压级略强于高频段,使得低频段混响时间与高频段混响时间相比,略微延长,增加声音的温暖

① 王其亨《双心圆:清代拱券券形的基本形式》,《古建园林技术》2013 年,第 1 期,第 3~12 页。

② 参阅里查孙主编《声学技术概要》(北京:科学出版社,1961 年),上册,第 195~195 页。

感,提升了音质,美化了声音的听感。^[14]

从整个庙院来看,“十字窑洞”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。原超山庙剧场是一个四周围合,顶部开放的四合院式剧场。对庙院中的观众而言,首先传入人耳的是来自表演区的直达声,其次是戏台后墙、两侧山墙和前台屋顶天花等建筑构件的反射声,最后是经过窑洞汇聚、共振后传出的戏剧声。由于直达声、反射声和窑洞共振声的传播距离相差不大,它们到达观众席处入耳的时间差小于 50ms,所以不会产生回声。较强的直达声率先到达人耳并衰减,保证了声音方位感和声音清晰度;戏台后墙、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^[15];最后到达人耳是窑洞汇聚和共振的声能。共振声位于声源后面很近的位置,强化了声音方位感,同时也延长了混响时间。^[16—19](图 20)

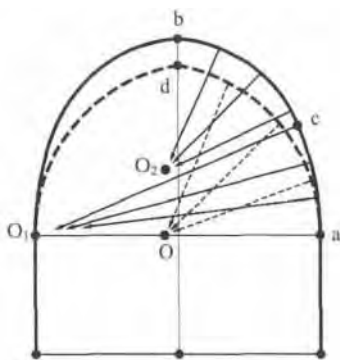


图 19 “四心圆”和“双心圆”拱券声波反射图^①

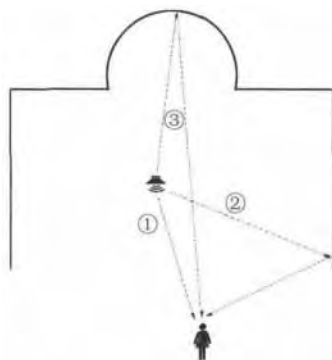


图 20 复合式古戏台声音传播示意图

3.2 从音质上讲,“十字窑洞”放大的乐音可构成较多协和音程,优化声音结构,使声音饱满圆润,产生“腔音袅袅”的效应

被十字窑洞放大的 23 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^②。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)	窑洞共振峰值构成的协和音程
极完全协和音程	纯八度	1:2	$\sharp G/\sharp g, \sharp g/\sharp g^1; \sharp g^1/\sharp g^2; e^2/e^3; \sharp a^2/\sharp a^3; \sharp a^3/\sharp a^4;$
完全协和音程	纯五度	2:3	$\sharp G/\sharp d; \sharp c/\sharp g; \sharp d/\sharp a; \sharp g^1/\sharp d^2; \sharp d^4/\sharp a^4;$
	纯四度	3:4	$\sharp G/\sharp c; \sharp f^1/b^1; b^1/e^2; g^2/c^3; \sharp a^3/\sharp d^4;$ $\sharp d^4/\sharp g^4; f^4/\sharp a^4(\sharp b^4);$
不完全协和音程	大三度	4:5	$B/\sharp d; b^1/\sharp d^2; e^2/\sharp g^2; \sharp g^2(\sharp a^2)/c^3; c^3/e^3;$
	小三度	5:6	$\sharp G/B; \sharp g^1/b^1; e^2/g^2;$
	大六度	3:5	$\sharp f^1/\sharp d^2;$
	小六度	5:8	$F/\sharp d(\sharp c); \sharp a/\sharp f^1; \sharp g^1/e^2; b^1/g^2; e^2/c^3; \sharp g^2/e^3;$

① 图中,仅画出了中轴线左边的圆心,中轴线右边也有圆心与左边圆心对称。圆心 O 为“双心圆”圆心, O₁、O₂ 为“四心圆”圆心。

② 音乐理论中将协和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。

如表 5 所示,十字窑洞可以放大的 23 个乐音共构成 6 个纯八度音程、5 个纯五度音程、7 个纯四度音程、5 个大三度音程、3 个小三度音程、1 个大六度音程、6 个小六度音程。这说明戏台共振频率间具有简单的整数比关系,声音协和程度较高。从乐音的泛音列可知,共振峰值所处频率的比值越简单,说明音响效果越和谐。^[20]“十字窑洞”协和音程的数量较多,说明其音质好。

考虑后台窗户开闭程度、窑洞与窑顶通道闭合情况、出将入相门的尺寸、后台窑洞内演职人员的数量、戏箱与道具的数量和体积等诸多因素的影响,测量结果和实际情况与理想状况存在误差。根据亥姆霍兹共鸣器原理,后台窗户开启较小、窑顶通道封闭太多、出将入相的门太小,都会减小共鸣器的开口面积,导致测量值偏高;实测时窑洞内放置物品较多,导致空腔容积减小也会造成测量值偏高。由于以上情形我们无法准确还原,在误差允许的范围内,我们对 23 个乐音进行了校正,全部降低半音,结果见表 6。

表 6 共振频率校正后的音高

序号	实测音高	校正音高	序号	实测音高	校正音高
1	F	E	13	g^2	$^b g^2$
2	$^{\#}G$	G	14	$^{\#}g^2(^b a^2)$	g^2
3	B	$^b B$	15	$^{\#}a^2$	a^2
4	$^{\#}c(^b d)$	c	16	c^3	$^b c^3$
5	$^{\#}d$	d	17	e^3	$^b e^3$
6	$^{\#}g$	g	18	$^{\#}a^3$	a^3
7	$^{\#}a$	a	19	$^{\#}d^4$	d^4
8	$^{\#}f^1$	f^1	20	f^4	e^4
9	$^{\#}g^1$	g^1	21	g^4	$^{\#}f^4$
10	b^1	$^b b^1$	22	$^{\#}g^4$	g^4
11	$^{\#}d^2$	d^2	23	$^{\#}a^4(^b b^4)$	a^4
12	e^2	$^b e^2$			

结合表 6 和山西梆子音乐的实际情况,山西梆子音乐中不会大量使用 $^{\#}G$ 、 $^{\#}c$ 、 $^{\#}d$ 、 $^{\#}g$ 、 $^{\#}a$ 、 $^{\#}f^1$ 、 $^{\#}g^1$ 、 $^{\#}d^2$ 、 $^{\#}g^2$ 、 $^{\#}a^2$ 、 $^{\#}a^3$ 、 $^{\#}d^4$ 、 $^{\#}g^4$ 、 $^{\#}a^4$ 等变化音,校正音高 G、c、d、g、a、f¹、g¹、d²、g²、a²、a³、d⁴、g⁴、a⁴等音级在山西梆子音乐中使用的概率很高,可见将音高校正后更符合山西梆子音乐的声学特点。

3.3 复合式古戏台的声学性能与中路梆子音乐相关,是中路梆子和地方建筑融合的见证

就人体的生理结构而言,说话或歌唱发出的声音都为复合音,复合音中各分音的结构与弦线振动时产生的复合音中分音结构相似。由表 6 校正音高的规律可知,中音区 g 音是一个很重要的音。如果在超山庙古戏台演唱 g 音,g 音中包含的分音可同时激发被后台十字窑洞扩大的 23 个乐音中的 9 个乐音参与共振,产生丰满、和谐的声音效果。被 g 音同时激发的 9 个乐音的序号和音名见表 7,在五线谱中 9 个乐音的记写见图 21。

表 7 被同时激发的 9 个乐音在以 g 音为基音的泛音列中的序号和音名

基音	第一分音	第二分音	第三分音	第四分音	第五分音	第十二分音	第十三分音	第十五分音	第十六分音
g	g	g ¹	d ²	g ²	b ²	d ⁴	e ⁴	#f ⁴	g ⁴

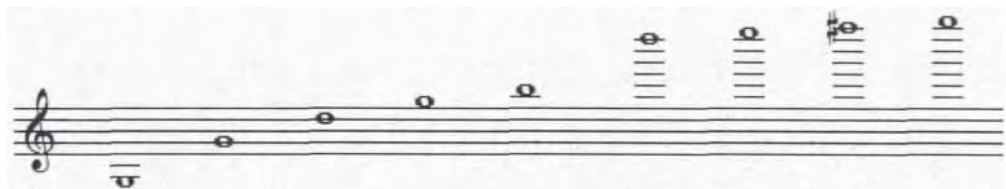


图 21 超山庙古戏台唱奏 g 音时同时激发的 9 个乐音

超山庙古戏台有利于晋昆、蒲州梆子和中路梆子的演唱。清初至乾隆年间,山西大部分地区流行“苏腔”(即昆曲,也称晋昆)^[21]。晋昆有上字调(^bB 调)、尺字调(C 调)、小工调(D 调)、凡字调(^bE 调)、六字调(F 调)、正宫调(G 调)、乙字调(A 调)。晋昆器乐曲牌 80% 以上使用正宫调,唱腔也以正宫调最多,然后是尺字调、小工调。^[22]尺字调徵调式、正宫调宫调式中 g 音都是调式主音。由于超山庙古戏台十字窑洞对 g 音共振效果最佳,所以在此戏台演晋昆的尺字调徵调式、正宫调宫调式唱段效果很好。乾隆以降,中路梆子开始盛行于晋中地区,经久不衰。中路梆子与蒲州梆子同宗同源,一脉相承,都采用徵调式^[23],普遍采用 G 调, g 音为 G 徵调式的宫音,为调式正音级。可见,在超山庙古戏台上演蒲州梆子和中路梆子,音响效果也佳。

复合式古戏台的分布区域与中路梆子盛行区域部分重合。中路梆子是在晋商鼎力支持下蒲州梆子地方化的产物,是晋商精神世界的外化,是晋商商业庆典、娱乐的主要方式之一。复合式古戏台集中建造于晋商兴盛的清代,遗存主要分布在清代汾州府曾管辖的州县^①,这些州县也是中路梆子的盛行区域。上文分析,在超山庙古戏台演中路梆子效果较好,“十字窑洞”可“优化”中路梆子音乐。从一定程度上说明,复合式古戏台的分布与中路梆子的发展密切联系。

4 结 论

从平遥超山庙复合式古戏台修造年代看,利用后台窑洞空腔共振扩声的技术在咸丰四年(1854)前已经成熟,具体时间尚难确定。

在中国声学史上,利用空腔共振扩声由来已久。战国时期,墨子就用中空的陶瓮作“地听器”扩声。宋代,人们在琴室或弹琴处之地下埋瓮助声。^[24]明清以降,晋中的古戏台出现了将陶瓮置于反射墙面扩声的技术^[25]。依据本文分析结果看,利用古戏台后台窑洞空腔扩声其效果明显优于设瓮。从复合式古戏台遗存总量及其声学特性来看,此类戏台建筑是山西窑洞式民居建筑技术高度发展,以及地方戏曲艺术繁荣兴盛的必然结果。

① 清代汾州府曾所辖州县有:汾州(辖汾阳县、孝义县、平遥县、介休县)、永宁州(辖宁乡县)、石楼县、兴县、岚县、临县、交城、文水、灵石等。

二者的结合诞生了诸如山西超山庙古戏台一样的建筑与艺术奇葩。

平遥超山庙复合式古戏台是山西特有的艺术建筑,在世界科学史上也是独特的,它理应在建筑史、声学史和戏曲史上占有一定地位。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 廖奔. 中国古代剧场史[M]. 郑州: 中州古籍出版社, 1997. 25.
- 3 车文明. 中国古戏台调查研究[M]. 北京: 中华书局, 2011. 118, 338~385.
- 4 王时伟. 清代官式建筑营造技艺[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2013. 78.
- 5 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 176~180.
- 6 石蓓, 等. 传统民宅戏楼声学特性测量[J]. 艺术科技, 2005 (2): 9~13.
- 7 马大猷, 等. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 579.
- 8 施松江, 等. 双通道氢脉泽腔体频率自动调谐器的设计和制作[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1980 (2): 186~201.
- 9 李子晋. 乐器声学品质评价方法研究[J]. 演艺科技, 2013 (83): 16~19.
- 10 韩宝强. 音的历程——现代音乐声学导论[M]. 北京: 中国文联出版社, 2003. 259, 302.
- 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. 195.
- 12 杨阳, 等. 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 Sabine. 实用建筑声学[M]. 马大猷, 译. 北京: 商务印书馆, 1953. 59.
- 14 Beranek L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*[M]. New York: Springer, 2004. 30, 512.
- 15 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.
- 16 王季卿. 耦合空间与厅堂音质[J]. 电声技术, 2005 (11): 7~9.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 缪天瑞. 律学[M]. 北京: 人民音乐出版社, 1996. 6~7.
- 21 车文明. 中国神庙剧场[M]. 北京: 文化艺术出版社, 2005. 167~169.
- 22 张林雨. 晋昆考[M]. 北京: 中国电影出版社, 1997. 135~630.
- 23 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.
- 24 戴念祖. 中国物理学史大系(声学史)[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2001. 176~181.
- 25 杨阳, 等. 山西石塔村龙天庙古戏台设置陶瓮的声学技术[J]. 自然科学史研究, 2014 (1): 70~82.

A Preliminary Study on Acoustic Effect of the Ancient Stage of Chaoshan Temple in Pingyao

YANG Yang^{1 2}, GAO Ce¹, DING Hong³

(1. *Institute for the History of Science and Technology, Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; 2. *The Academy of Music, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; 3. *Politics and Law Institution, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract The paper first found the acoustic phenomenon of the “cross cave” in the ancient stage of Chaoshan Temple in Xiaohu Village in Pingyao. With the modern acoustic measurement method, we measure the acoustic characteristics of the “cross cave”. The result shows that the “cross cave” has the functions of amplifying the volume, beautifying the timber and optimizing the structure of the musical structure. On the basis of the quantity, distribution and acoustic characteristics of the compound ancient stage, the paper speculates that the construction of the ancient stage is distinctive in Shanxi and is the result of the constant development and integration of architectural art and Chinese theatrical music in folk.

Keywords Compound Ancient Stage, “Cross Cave”, Architectural History, History of Acoustics, History of Chinese Theatrical Music