

天坛声学现象的新发现——对话石声学现象

俞文光 吕厚均 周克超

(黑龙江大学 哈尔滨 150080)

[关键词] 天坛, 对话石, 回音

1 天坛皇穹宇概况

天坛是世界上现存规模最大的祭天建筑群。她以精湛的建筑艺术,丰富的文化内涵成为东方古老文明的一个象征和人类的艺术瑰宝。天坛回音壁、三音石、圜丘台以及一音石、二音石等几处著名的声学现象更使天坛增添几分神秘,几分情趣。正是她的这些奇妙声学现象被列为我国山西“普救蟾声”、河南“蛤蟆塔”、以及四川“石蹬琴声”等四大回音建筑之首^[1]。我们自1993年开始,历时两年对天坛的上述声学现象进行了研究,并逐一揭开了这些声学现象形成的机理。1994年3月26日上午,作者在天坛皇穹宇内意外发现了一个奇妙的声学现象——天坛对话石声学现象。

天坛的几个主要声学现象都发生在皇穹宇内。皇穹宇原是天坛圜丘祭神牌位的供奉所。它位于天坛的南部,圜丘台的北侧,始建于1530年,清乾隆年间(1752年)重修,改成今天的形制。皇穹宇的四周是一高约3m、厚约1m,内半径约为32.5m的近似圆形的光滑砖质围墙。这个围墙就是著名的回音壁。回音壁采用山东临清特产优质“澄浆砖”磨砖对缝砌成,因此对声音有极好的反射作用。正是这座基本上为圆形的砖质围墙的反射和会聚才形成了著名的回音壁、一音石、二音石、三音石等声学现象。在回音壁南端有宫门可进入皇穹宇,进宫门可见对面是一座高19.2米,直径15.6米的单檐蓝琉璃筒瓦顶,鎏金宝顶式圆形大殿,大殿东西各有配殿五间。从宫门到皇穹宇大殿前有一条由20块石板组成的甬道。在甬道上自北向南数,第一块石板称一音石、在此击掌会听到一个回声;第二块石板称二音石,击掌可以听到二个回声;第三块石板称三音石,击掌可以听到三个回声。我们通过实验和分析,详细地解释了这些回音现象的形成机理^[2-5],完善了40年前中国科学院院士汤定元先生关于回音壁、三音石的科学假设,并首次全面地揭示了与三音石近在咫尺的一音石和二音石的回声形成机理。

2 天坛对话石声学现象

在皇穹宇甬道第18块石板(图1)A处和东配殿东北角B处(或者A与西配殿西北角B')之间,不需用电话,就可以直接进行双向对话,即使在现场游人较多,环境噪声较大也无妨。游人较多时皇穹宇内的噪声可达到50—60dB, \overline{AB} 或 $\overline{AB'}$ 之间的直线距离约为36m,它们之间又被配殿墙壁所阻挡,一般情况下在A处说话,在B(或B')处是听不到的,可是在皇穹宇内在A与B(B')之间说话却可以听到。我们称AB间(或AB'间)可以双向通话

本文于1995年10月19日收到。

的现象为“天坛对话石声学现象”，甬道上第18块石板命名为“对话石”。

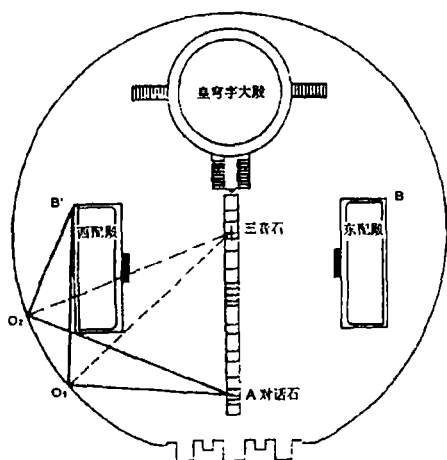


图1 对话石声学现象测试图

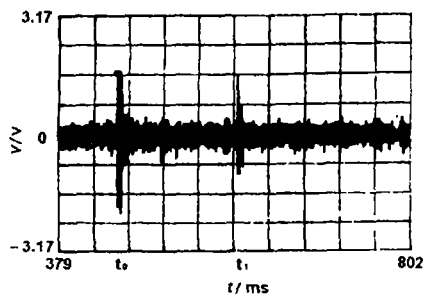


图2 对话石击掌回波波形图

3 实验测试与分析

3.1 时程测量与分析

首先确定自A处发出的声音经何途径传到B(或B')处。为此在图1中A处以击掌为声源,在B'处放置声级计和磁带记录仪,记录击掌声脉冲自A传播到B'所需时间,从而确定它走过的路程S。图2即是其中通过测量所绘制的在对话石击掌,在B'处接收的波形时域图。在A处击掌的时刻为 t_0 ,在B'处接收到击掌波的时刻为 t_1 ,由此算出时差,换算成距离S。以1994年10月24日晚的一次测量为例, $t_0=449.71\text{ms}$, $t_1=595.31\text{ms}$,声速 $v=339.4\text{m/s}$ 得:

$$S = v\Delta t = 49.42\text{m} \quad (1)$$

再根据声反射定律,作出声线 $\overline{AO_1}$ 及 $\overline{AO_2}$ 的反射声线 $\overline{O_1B'}$, $\overline{O_2B'}$ 它们正好在B'处相交。这表明,由A发出的介于 $\overline{AO_1}$ 和 $\overline{AO_2}$ 声线之间的声音,经回音壁墙圆弧 $\widehat{O_1O_2}$ 间的声音经墙反射后基本上都会聚到B'处。我们称圆弧 $\widehat{O_1O_2}$ 为有效墙面。用皮尺直接测量,得:

$$S_0 = \overline{AO_1} + \overline{O_1B'} \simeq \overline{AO_2} + \overline{O_2B'} = 49.70\text{m} \quad (2)$$

S_0 称为理论值。比较(1)和(2)式的S和 S_0 ,我们可以确定:在对话石A发出的声音所经历的路程S和根据声反射定律得到路程 S_0 是一致的,因此,在对话石A上发出的声音传到回音壁有效墙面 $\widehat{O_1O_2}$ 圆弧,反射后会聚到西配殿西北角B'处。同理也可以解释东配殿东北角B与对话石A之间的互相通话。

3.2 对话石现象的声压级测量与分析

点声源在自由声场情况下的声压级有

$$L_B = L_A - 20\log\gamma_B/\gamma_A \quad (3)$$

式中 γ 为距点声源的距离,L为相应距离的声压级。根据(3)式我们可估算出当 $\gamma_B=36\text{m}$,即

自对话石 A 到西配殿 B' 处的直线距离, 与 $\gamma_A=5\text{m}$ 即距对话石为 5m 处声压级的差值:

$$L_B - L_A = -20 \log \gamma_B / \gamma_A = -17 \text{dB} \quad (4)$$

以 1995 年 10 月 4 日晚的一次测量结果为例, 声源采用音频振荡器, 频率 $f=1000\text{Hz}$, 经音频功率放大器, 测得距离对话石为

	5m	声压级	80dB	
	10m	声压级	70dB	(5)
$\overline{AO_1 + O_1B'}$	50m	声压级	73dB	(直线距离 36m)

测量声压级沿声线 $\overline{AO_1} \rightarrow \overline{O_1B'}$, 50m 即在西配殿西北角 B' 附近 (参看图 1)。比较式 (4) (5)。我们认为, 若由 (4) 式, 当 L_A (即 $\gamma_A=5\text{m}$) 处的声压级为 80dB 时, 在自由声场的 $\gamma_A=36\text{m}$ 处的声场应减少 17dB, 即为 63dB, 可是在皇穹宇内的情况并不这样。在对话石上发声, 测得 5m 处的声压级为 80dB; 10m 处的声压级为 70dB; 而直线距离为 36m 处的西配殿西北角 B' 处的声压级 73dB, 介于 80dB 和 70dB 之间, 即相当于距对话石 7m 左右接收一样。这说明在对话石上讲话 (图 1 A 点), 在西配殿西北角 B' 处的人感觉讲话人只离他 7 米左右。

同理, 也可以解释对话石和东配殿东北角 B 处之间的传声机理。

综上所述, 天坛对话石声学现象是在甬道的第 18 块石板和东配殿东北角 B (或西配殿西北角 B') 之间可以不用电话进行自由通话。它的物理机理则是由于回音壁有效墙面 $\widehat{O_1O_2}$ 圆弧的反射和会聚作用。

参 考 文 献

- [1] 俞文光等. 鸞塔声学问题的实验测试与综合分析. 黑龙江大学学报, 1991, 8 (3): 1—7.
- [2] 俞文光等. 天坛回音壁声学现象的首次实验测试及初步分析. 黑龙江大学学报, 1994, 11 (1): 78—81.
- [3] 周克超等. 天坛皇穹宇三音石声学现象的实验测试和初步分析. 黑龙江大学学报, 1994, 11 (1): 82—85.
- [4] 贾院生等. 天坛圜丘台声学现象的实验测试和初步分析. 黑龙江大学学报, 1995, 12 (1): 64—68.
- [5] 周克超等. 天坛声学现象的首次测试与综合分析. 自然科学史研究, 1996, 15 (1).

A NEW DISCOVERY OF THE ACOUSTICAL PHENOMENOIV OF Tiantan'S DIALOGUE-STONE

Yu Wenguang Lu Houjun Zhou Kechao
(Heilongjiang University, Harbin 150080)

Key words Tiantan (The Temple of Heaven), Dialogue-Stone, echo