

# “招鹤回鸣”：布拉格共振声学景观

林建恒<sup>1,3</sup>, 高大治<sup>2,3</sup>, 衣雪娟<sup>1,3</sup>, 张新耀<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266023; 2. 中国海洋大学, 山东青岛 266100; 3. 山东省声学学会, 山东青岛 266023)

**摘要:** 自然界存在各种各样的声学现象, 譬如著名的天坛回音壁、三音石。这些现象一般与当地的自然声学环境密切相关, 形成独特的声学景观。为解开青岛即墨鹤山声学景观“招鹤回鸣”之谜, 进行了三次现场试验和测试。测试数据谱分析结果表明: 当在景点北面 47 级石阶正前方 16~20 m 区域击掌或发射一定频率的 CW 脉冲声波时, 石阶所构成的准周期性结构形成布拉格声反(散)射体回波, 在某些频率附近相长干涉, 明显加强, 另一些频率则相消干涉而削弱, 回波各频率叠加后形成宛如“鹤鸣”声。采用布拉格散射原理分析该石阶结构的回波, 数值计算所获得的接收点回波增强频带和回波削弱“带隙”频带区, 和上述测试分析结果完全一致。声学景观“招鹤回鸣”源于准周期结构回波特性, 不同于天坛回音壁的声学机理。文章所述方法可为类似声景观的设计及分析提供借鉴。

**关键词:** 招鹤回鸣; 布拉格声散射; 声学滤波; 声景观

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-02-0087-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.02.001

## Calling crane echo: acoustic landscape caused by Bragg resonance

LIN Jian-heng<sup>1,3</sup>, GAO Da-zhi<sup>2,3</sup>, YI Xue-juan<sup>1,3</sup>, ZHANG Xin-yao<sup>2,3</sup>

(1. Qingdao Branch, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266023, Shandong, China;

2. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 3. Shandong Acoustical Society, Qingdao 266023, Shandong, China)

**Abstract:** There are all kinds of acoustic phenomena in nature, such as the famous Tiantan Echo wall and Three Sound Stone. Generally speaking, these phenomena are closely related to the local natural acoustic environment, which results in the unique acoustic landscape. In order to explain the cause of the famous landscape called “Calling Cranes Echo” occurred at Crane Mountain in Qingdao, three experiments were performed. The analysis results of the experimental data show that, the 47-stone steps in the north of the sight spot forms a scatter with quasi-periodical structure, which satisfies the condition of Bragg Scattering; at some frequencies which are related to the width of each step, the echo in the horizontal direction at the clapping-hand site will form constructive interference, which is strengthened; however, the low-frequency echo caused by stone steps at the clapping-hand site will be weakened for the sound diffusing to all directions, all the frequency components compose the echo like “crane ring”. The echoes of the stone step structure are analyzed based on Bragg scattering principle, the echo enhanced bands and echo weakened band (called “band gap”) at receiving point by numerical calculation are entirely consistent with the analysis results by measurement and test. Acoustic landscape “Calling Crane Echo” originating from the echo characteristics of quasi periodic structure is different from the acoustic mechanism of Tiantan echo wall. This method can provide reference for similar sound landscape design and analysis.

**Key words:** calling cranes echo; bragg sound scattering; sound filter; acoustic landscape

## 0 引言

自然界存在大量奇特的声学现象, 譬如: 天坛著名的回音壁、三音石等, 形成独特的声学景观。这些声学现象一般由于当地的特殊声学环境, 声波

衰减缓慢、加之特殊的传播、反射路径形成异于一般的声学环境<sup>[1-4]</sup>。准周期建筑结构是自然界常见的结构, 由于周期结构会形成明显的频率选择性, 具有独特的声学特性。声子晶体正是利用了这类特性, 是当今物理声学方向的一个研究热点<sup>[5-7]</sup>。本文报道了一种布拉格共振散射主导的自然声学景观现象。

道教名山——鹤山位于青岛即墨市东, 濒临大海, 三清殿道观座落于近山顶, 殿东墙后砌有 47 级岩石石阶, 游客拾阶而上, 可望鹤山山顶或游览

收稿日期: 2015-10-22; 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11374270)

作者简介: 林建恒(1968—), 女, 山东烟台人, 研究员, 研究方向为水下噪声研究。

通讯作者: 林建恒, E-mail: linjh@mail.ioa.ac.cn

其他景观。殿前地面铺设花岗岩石。殿前东南侧约 10 m 处侧立一碑——“招鹤回鸣”(见图 1)。此碑与第一级石阶相距约 16 m, 人们站立于碑前直径约 2~3 m 范围内, 双手击掌后, 即闻“吱”一声仙鹤般鸣叫回声, 称为“招鹤回鸣”景观。相似的现象在国外也有报道<sup>[4]</sup>: 在 great pyramid of Chichen Itza 前面的台阶鼓掌声会产生明显的线性调频回波, 听似格查尔鸟鸣声。



图 1 青岛即墨鹤山“招鹤回鸣”景点

Fig.1 Sight spot called "Calling Cranes Echo" at Crane Mountain in Qingdao

## 1 现场试验和测试

现场试验选择游客稀少时节, 开展了两类测试实验: 击掌声回波和 CW 脉冲回波实验。CW 声脉冲脉宽为 0.05 s, 填充频率为 500 Hz~2.5 kHz, 共选取了 70 个频率。实际实验时, 方脉冲中填充的是中心频率为  $f_0$  的窄带信号, 即填充信号带宽为  $(f_0-50)$  Hz~ $(f_0+50)$  Hz。在“招鹤回鸣”石碑前、距第一个石阶约 16 m 处布放扬声器, 它距离地面 0.5 m, 朝向 47 级石阶发射; 传声器距离地面 1.2 m, 在扬声器正前方 1 m 处接收。大功率扬声器发出 CW 声脉冲后, 由传声器接收入射波和回波, 并记录于数字录音机中, 供实验室观察入射波和回波的时域波形图, 进行频谱分析。估计碑前测点处, 不同频率下石阶回声与入射声强度比, 以此观察石阶对不同频率声波反(散)射波的选择性和滤波作用。

测试分析用仪器设备如图 2 所示。在“招鹤回鸣”碑前进行现场测试。主要测试仪器的型号如下: Sonic-pro 公司的 TB10 型音箱, Agilent 公司的 33220A 型信号发生器, SKC 公司的 MNP20 型传声器, TASCAM 公司的 DA-P1 型录音机, 以及普通的家用型号功率放大器。现场测试内容主要包括: (1) 击掌回波效应及其谱分析; (2) CW 脉冲波回声测试和谱分析。

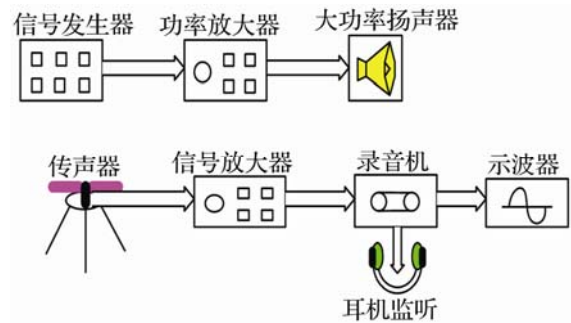


图 2 “招鹤回鸣”现场声学测试设备  
Fig.2 Testing equipment of "Calling Cranes Echo"

## 2 测试数据分析和现象解释

图 3 是碑前击掌声及石阶回声的时域波形图。由图 3 可见, 击掌声持续时间约 0.05~0.09 s, 从拍掌声起始时刻后约 0.09 s 出现石阶的“回波”, 此后是周围山体的回波。在对击掌声和其回波接收信号进行频谱分析时, 为了保证频域的频率分辨率, 对信号做频谱分析时均截取了 0.08 s, 得到两种信号的频谱图, 如图 4 所示。图 4 表明, 石阶回波“鹤鸣声”的频谱和击掌入射声脉冲频谱明显不同。

发射和接收点位于石阶前约 16 m, 考虑到空气中的声速  $c_{\text{air}}$  约为 340 m/s, 经石阶反射后的声波与入射声的时间差约为  $\Delta t=2L/c\approx 0.09$  s, 故图 3 中约为 0.09 s 后的波形应为接收点接收到的可加区分的石阶的回波。

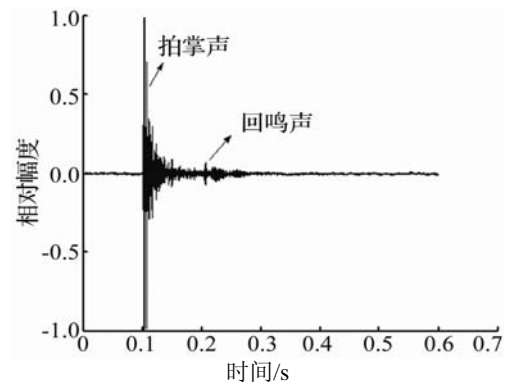
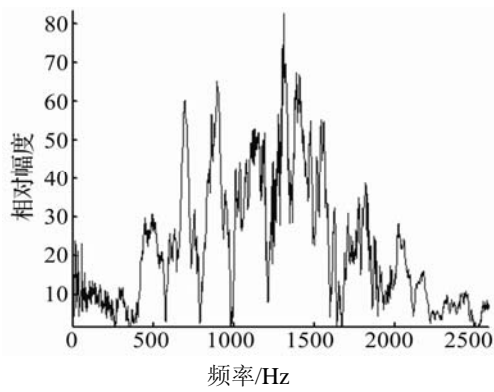
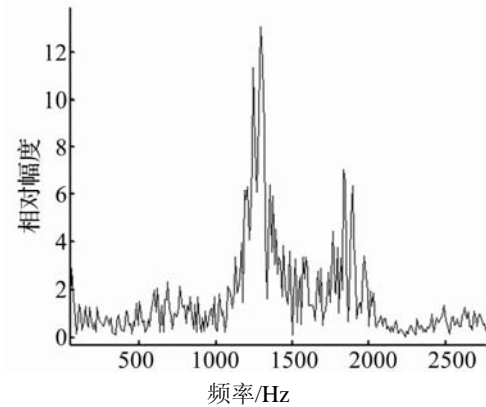


图 3 碑前拍掌声及石阶回声的时域波形图  
Fig. 3 Time domain wave forms of clap sound and echo

47 级石阶形成一种准周期性结构的声反(散)射体, 如图 5 所示, 其每一阶高约  $h\approx 0.18$  m, 阶宽约 0.25~0.27 m, 它对声波的反(散)射具有频率选择特性。石阶对声波的散射如图 6 所示, 每级石阶的平均宽度为  $d\approx 0.26$  m。设波长为  $\lambda$ (对应频率为  $f$ ) 的声波以入射角  $\theta$  入射到 47 级石阶上, 见图 6。空气中的声速为  $c\approx 340$  m/s, 则相邻级石阶两条反射声线



(a) 击掌声频谱



(b) 回鸣声频谱

图 4 碑前击掌声(a)及石阶回声(b)的频谱分析结果  
Fig.4 Spectra of clap sound and echo

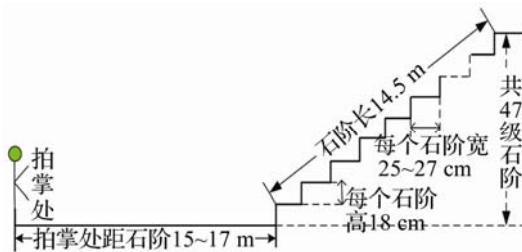


图 5 47 级石阶结构示意图

Fig.5 Diagrammatic sketch of the structure of 47 stone steps

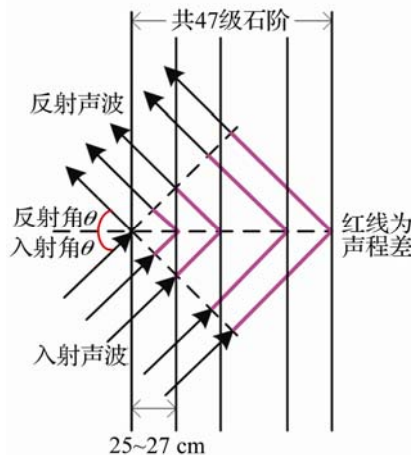


图 6 石阶对声波散射的示意图

Fig. 6 Sketch of acoustic waves scattering from stone steps

的声程差为  $\Delta=2d \cos \theta$ ，依据布拉格散射原理<sup>[8-11]</sup>，对于周期性结构的反结构，当反射波声程差为波长的整数倍时，即满足

$$2d \cos \theta = n\lambda, \quad n=1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

时，反射声波发生相长干涉；而当声程差为半波长的奇数倍时，即满足

$$2d \cos \theta = (2n-1)\lambda/2, \quad n=1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

时，反射声波发生相消干涉。下面数值计算声波正入射( $\theta=0$ )情况下，在回波方向，各级石阶反射波产生的干涉效应，由于周期结构形成反射波相长干涉增强的频带区和相消干涉削弱的“带隙”频带区(相当于“禁带”区)。

击掌回声相当于声波正入射  $\theta=0$  的情况，反射波和入射波同方向，将声速、波长与频率的关系  $\lambda=c/f$  代入式(1)、(2)，则对应  $f \cong 654 \text{ Hz}$  ( $n=1$ ) 附近频率及其倍频处频率的反射波，形成布拉格散射相长干涉频带区，波相干“共鸣”频带。

而对于  $f=327 \text{ Hz}$  ( $n=1$ )、 $981 \text{ Hz}$  ( $n=2$ )、 $1635 \text{ Hz}$  ( $n=3$ )、 $2289 \text{ Hz}$  ( $n=4$ ) 等频率附近，则为反射波“相消”干涉频带，即相消“带隙”频带区。由于需在离开石阶一定距离范围，才能清楚地将反射波脉冲(击掌声回波)和入射波脉冲(击掌声)区分开，并能清晰听到，因此，击掌和回波接收点应安排在石阶正前方  $16 \sim 20 \text{ m}$  的区域。

图 7 是实测接收点处石阶散射体对不同频率方脉冲(CW 脉冲波)的散射(反射)强度与入射声脉冲强度的比值，由于每一频率的反射信号都用入射信号做了归一化处理，因此发射系统和接收系统的频响起伏对测量结果没有影响。图 7 清楚表明，和图 3 击掌声回波的频谱分析结果一样，周期性石阶结构对 CW 脉冲声的反(散)射具有频率选择性或滤波特性，证实了 47 级石阶对  $654 \text{ Hz}$  附近及其倍频声波来说，在接收点反射波构成了布拉格散射相长干

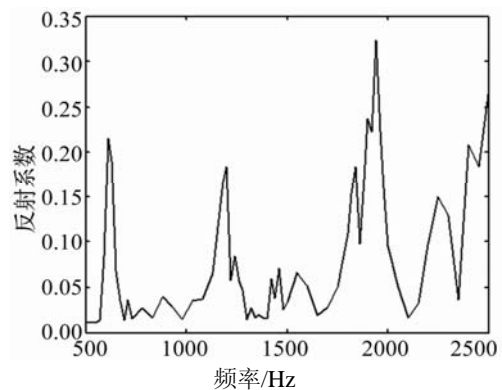


图 7 接收点处 500 Hz~5 kHz 频段 CW 脉冲声的回波与入射强度比  
Fig.7 The ratio of echo to incident intensity of CW sound pulse between 500 Hz~5 kHz at receiving point

涉区,而对 981、1635、2289 Hz 频率声波则因相消而被滤除。

为了考察拍手的回声与真正“鹤鸣声”的相似性,我们分析了真正的丹顶鹤“鹤鸣声”时域(图(8a))及其频谱(图(8b))。发现“拍掌回声”与“鹤鸣声”在频域上都具有典型的梳状结构,石阶的布拉格散射特性使宽带的拍掌信号的回声具有了基音和泛音的梳状结构,动物鸣叫声往往也具有类似结构;不同的是本次分析的鹤鸣声的基频在 900 Hz 左右(图(8b)),而“拍掌回声”信号的基频是由石阶宽度决定的,在 654 Hz 左右。实际上,实验考察人员现场听到的“拍掌回声”确实不太像鹤鸣声而更像频率更低的“鸭叫声”,“招鹤回鸣”的说法也许只是迎合“鹤山”的名字而已。

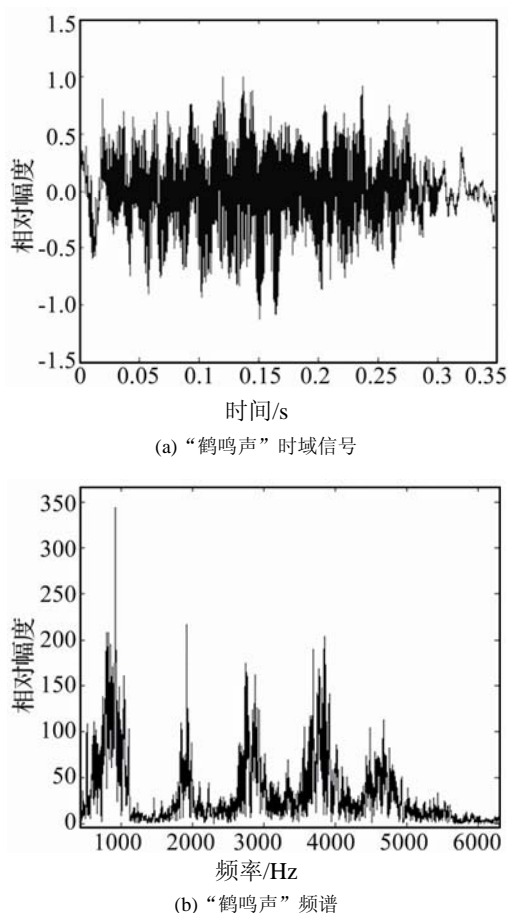


图 8 真正鹤鸣声的时域信号(a)和频谱(b)

Fig. 8 The temporal signal (a) and its spectrum (b) of real crane ring

上述的现场试验和测试,以及采用布拉格散射原理进行的分析和相应数值计算表明,鹤山道观石阶具备周期性结构声反(散)射特点,具有反射波相干增强频带和相消“带隙”频带效应,在一定测试距离上可清晰观测到该周期性声反射结构产生的回波现象,可借用布拉格散射概念和原理解释鹤山石阶这一“招鹤回鸣”现象。

### 3 结 语

依据上述对测试数据的谱分析,以及采用布拉格散射原理进行的分析和相应数值计算,对于即墨境内鹤山三清殿东后侧石阶正面处“招鹤回鸣”这一声学现象,可以得出如下初步结论:

(1) “招鹤回鸣”壁前拍掌声宛如“鹤鸣”,是在特定环境下产生的:三清殿三面环山,相距不太远(百余米至数百米),殿东后侧 47 级石阶构成一种准周期性结构声反(散)射体,石阶具备布拉格散射(Bragg Scattering)条件,石阶对声波的反射具有频率选择性或滤波性质,这是“鹤鸣”回声的主要成因。

(2) 三清殿东侧墙壁和岩石地面,以及石阶东侧不远处墙壁,构成了一种良好的回声传输通道,如果没有三清殿东侧墙壁,回声将向四周边发散,回波“鹤鸣”效果则会减弱。

应该说,青岛即墨鹤山“招鹤回鸣”景观的声学现象原则上是可以复制的。

#### 参 考 文 献

- [1] 李志军, 严立中, 王林. 再谈茅山革命纪念碑军号声成因[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1201-1204.  
LI Zhijun, YAN Lizhong, WANG Lin. Discussing the acoustic phenomenon at Maoshan Revolution Monument again[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1201-1204.
- [2] 张洁, 毛东兴. 苏南抗战胜利纪念碑军号成因分析[J]. 电声技术, 2007, 31(5): 13-15.  
ZHANG Jie, MAO Dongxing. Acoustic analysis of Horn call phenomenon observed at South Jiangsu N4A monument[J]. Audio Engineering, 2007, 31(5): 13-15.
- [3] NICO F Declercq, Cindy S A Dekeyser. Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvelous acoustics[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2007, 121(4): 2011-2022.
- [4] NICO F. Declercq, JORIS Degrieck. A theoretical study of special acoustic effects caused by the staircase of the EI Pyramid at the Maya ruins of Chichen-Itza in Mexico[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2004, 116(6): 3328-3335.
- [5] Yahlonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059.
- [6] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2486.
- [7] Kushwaha M S. Acoustic band structure of periodic elastic composites[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(13): 2022.
- [8] Birkel G, Gatzke M, Deutsch I H, et al. Bragg scattering from atoms in optical Lattices[J]. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(15): 2823-2826.
- [9] Weidemuller M. Bragg diffraction in an atomic lattice bound by light[J]. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(25): 4583-4586.
- [10] In-Ho Bae. Electromagnetically induced Bragg reflection with a stationary coupling field in a buffer rubidium vapor cell[J]. Applied Optics, 2008, 47(27): 4849-4855.
- [11] Donvalkar, Prathamesh S. Frequency translation via four-wave mixing Bragg scattering in Rb filled photonic bandgap fibers[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1557-1560.