第 35 卷 第 3 期
2016 年 5 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 35, No.3
May, 2016

◇ 研究报告 ◇

一种用于大坝混凝土声层析成像的水听器线阵

温建强† 朱厚卿

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 声层析成像技术可以用图像的方式精确完整地反映层析面上检测体内部质量，是一种有效的无损检测手段，在大坝混凝土的安全隐患检测中发挥着越来越重要的作用。本研究旨在研制成像用的接收声波的水听器线阵，该水听器线阵由12个水听器阵元组成，阵元间隔2 m，水听器由直径40 mm的接收型压电圆管和前置放大器组成。水听器在低于20 kHz的频率范围内，自由场接收电压灵敏度为 -173 ± 3 dB，在2 MPa静水压力下灵敏度下降不超过2 dB。制作了2例具有清晰接收波形、一致性和可靠性好的水听器线阵，最终为客户在现场实地获得了高质量的层析图像。

关键词 声层析成像，水听器，水听器线阵

中图分类号: TN9TU3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2016)03-0195-04

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.03.002

Development of hydrophone line array for ultrasonic computed tomography in dam concrete

WEN Jianqiang ZHU Houqing

(*Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract Acoustic computed tomography (CT) can reflect the quality of tested across section in an object precisely and integrally as one of effective non-destructive test methods. In the paper, we investigated the hydrophone line array for imaging of received acoustic waves, which was composed of 12 hydrophone units, the distance between adjacent hydrophones is 2 meters. The hydrophone was composed of a diameter 40 mm receiving piezoelectric tube and a preamplifier. In the frequency range below 20 kHz, the free field receiving voltage sensitivity of hydrophone is -173 ± 3 dB. Under hydrostatic pressure of 2 MPa, the receiving voltage sensitivity falls less than 2 dB. The 2 sets of hydrophone line arrays with clear reception waveform, good consistency and high reliability had been produced, finally the high quality tomography images were obtained for customers on-site field.

Key words Acoustic computed tomography, Hydrophone, Hydrophone line array

2015-07-09 收稿; 2016-04-11 定稿

作者简介: 温建强 (1976-), 男, 江西赣州人, 副研究员, 研究方向: 压电材料与器件。

† 通讯作者 E-mail: wjq@mail.ioa.ac.cn

1 引言

声波在不同材料或结构中传播时会产生不同的反射、散射、吸收和波形畸变等一系列声学现象，因此，声波可以作为混凝土内部特性信息的载体。采用声波获取大坝混凝土的声层析成像技术(Computed tomography, CT)，利用的就是混凝土内部透射接收到的声波信号，通过选用适当的数学模型和重建成像技术，重现大坝混凝土的内部物性或状态参数的分布图像。声学层析成像能快速无损地反映大坝内部混凝土的结构强度、隐患位置与大小，可以实现对大坝混凝土老化区、坝体渗漏、坝址地质构造及断裂带等情况的检测和诊断，其应用前景备受关注。

在大坝混凝土声层析成像的实际应用中，通过多次移动换能器的位置获得混凝土CT图像[1]，而接收声波的水听器线阵能快速高效地获取反演成像的数据，尤其是高灵敏度的水听器线阵可以一次性地获取到足够清晰的不同深度的声信号，从而改善成像效果和分辨率，进而提高声CT技术的实用化程度。本文研究了一种针对大坝混凝土声层析成像用的水听器线列阵，通过前置放大器内置于厚壁的压电陶瓷管，制作出接收波形清晰、一致性和可靠性好的水听器线阵，最终在现场获得高质量的层析图像。

2 水听器的研制

混凝土缺陷通常体积不大且形状不规则，因此，在混凝土超声层析成像应用中要求水听器具有灵敏度高、自噪声小、可靠性高、耐一定静水压力、信号传输衰减小、工作频率范围内无指向性等特点。根据上述要求，并结合实际井径尺寸的限制，水听器采用PZT-5压电圆管作为换能元件进行设计[2]，压电圆管尺寸为ϕ40 mm × ϕ33 mm × 25 mm，并采用透声聚氨酯橡胶进行水密封装，水听器封装后外径45 mm，高度92 mm。水听器增加一FET型前置放大器，以满足现场测试灵敏度需求。FET前置放大器具有低噪声、高输入阻抗的特性。在10 Hz–1000 Hz频段的放大倍数为20 dB，在外接100 m电缆时，放大倍数下降3 dB左右(电缆电容为150 pF/m)，能较好地满足了整个信号采集系统的需求。图1为水听器的结构示意图，图2为封装后的水听器外观图。

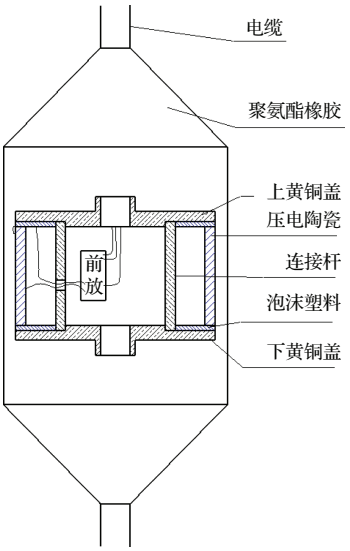

图1 水听器的结构示意图

Fig. 1 Structure of hydrophone unit

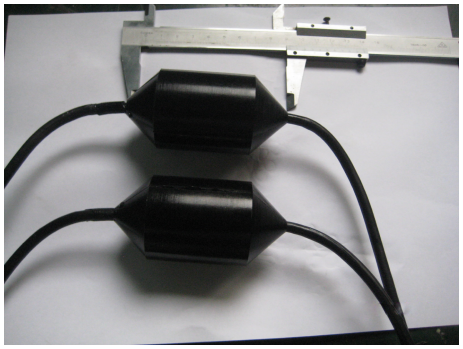

图2 封装后的水听器外形图

Fig. 2 Packaged hydrophone units

采用有限元分析软件FEML对水听器进行仿真，FEML是专门针对声学和力学问题特别是换能器问题而设计的大型有限元软件[3]，能够分析影响换能器性能的几乎所有因素，具有很高的计算精度。图3是空气中压电陶瓷导纳曲线的理论计算值与实测值的比对图，误差小于10%。

在中国科学院声学研究所的长15 m、宽7 m、深5 m的水池中，采用声学测试系统自动测量5–25 kHz频率范围内的接收灵敏度，其实测结果为-175 ± 2 dB。图4是自由场接收电压灵敏度理论值和实测值的对比结果(带20 dB前放)，可以看出，理论和实际吻合得比较好。

5 Hz–630 Hz 频率范围内，水听器的接收电压灵敏度采用密闭腔比较法测量，为了验证水听器的抗压性，分别在 0.1 MPa 和 2 MPa 静水压力下对水听器进行测试，结果如图 5 所示。测试结果表明在 5 Hz–630 Hz 范围内常压下的接收灵敏度为

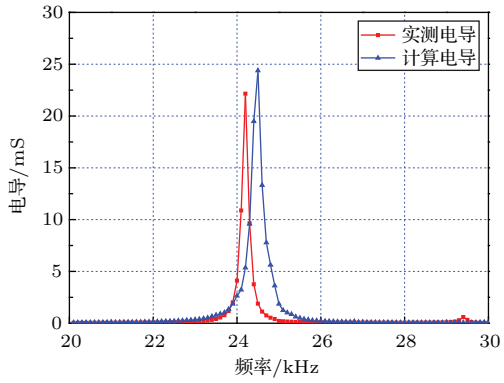

图 3　空气中水听器的理论和实测导纳曲线

Fig. 3　Theoretical and experimental admittance curve of hydrophone in air

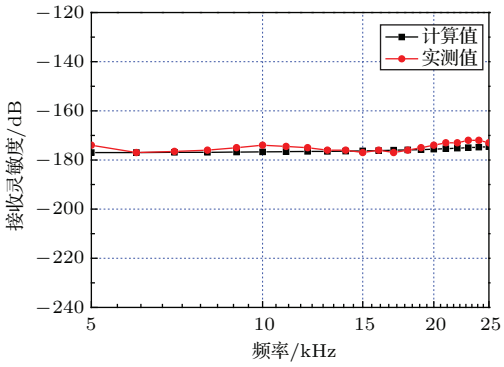

图 4　水听器的水下接收灵敏度曲线 (带前放)

Fig. 4　Curve of the receiving voltage sensitivity in water (With preamplifier)

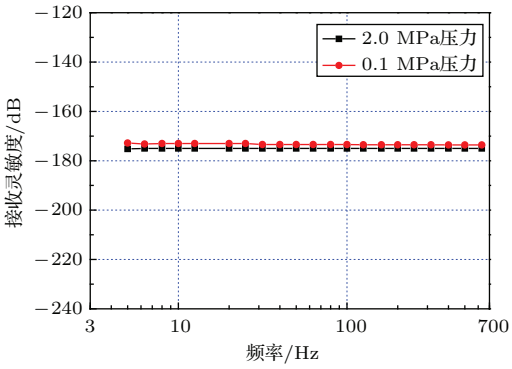

图 5　水听器在 0.1 MPa 及 2 MPa 压力下的水下接收灵敏度曲线 (带前放)

Fig. 5　The receiving sensitivity curve under 0.1 MPa and 2 MPa pressure in water (With preamplifier)

-173.3 ± 0.3 dB，2 MPa 静压力下的接收灵敏度为 -175.0 ± 0.1 dB，下降不超过 2 dB，因此水听器能够在 100 m 水深工作。

3　水听器线阵

水听器线阵可以一次性收集多点信号，且相邻水听器间距固定，能够保证位置精度，提高 CT 探测效率。根据实际项目需求，水听器线阵采用 12 个水听器单元串联组成，相邻水听器之间间距 2 m，整体总长为 100 m。控制好水听器线阵中各水听器单元的质量是提高声波层析成像中数据采集质量的关键。为了提高成阵时的一致性，水听器制作前需对压电陶瓷圆管进行一致性挑选，挑选的原则是元件的谐振频率、电导以及电容、压电性能 d_{33} 尽可能地一致；另外前置放大器的一致性也要进行严格地筛选，最后对制作的水听器单元的一致性进行挑选；然后将 12 个水听器单元逐一地串联起来，由于工作环境恶劣，单元连接处需采用焊接，并灌注聚氨酯橡胶作为保护层，在真正要投入使用前，需要反复多次地对其可靠性进行验证。

采用对比法对 500 Hz 下的接收灵敏度进行了测试，实验测试示意图如图 6 所示，测试地点是中国科学院声学研究所水池。测试时由低频发射器以 500 Hz 频率发射信号，在 1.5 m 距离远的地方布放水听器线阵，然后控制每个水听器对准低频发射器一次；记录下每个水听器单元的接收信号幅值 V_i；然后在同一位置用标准接收水听器 CS-3B (其 500 Hz 的灵敏度为 -214.3 dB) 测试其接收信号有效值为 V_0。最后计算出每一水听器单元的接收电压灵敏度 $M_0 = 20\lg(V_i/V_0) - 214.3$ (dB)，表 1 为两套水听器线阵的接收电压灵敏度测试结果。由表 1 可知，水听器线阵具有较好的一致性，灵敏度起伏在 3 dB 范围内。

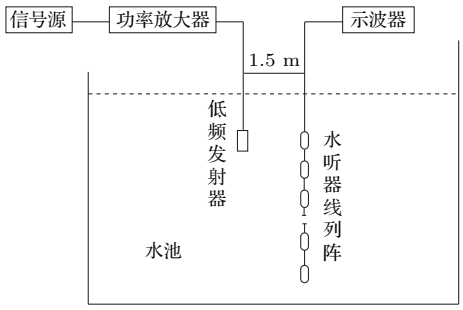

图 6　水听器线列阵的测试示意图

Fig. 6　The test diagram of hydrophone line arrays

表 1　水听器线阵的水下接收电压灵敏度测试表 (dB)

Table 1 The receiving sensitivity of hydrophone line arrays in the water (dB)

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水听器线阵 A	−174	−174	−173	−173	−174	−174	−172	−175	−175	−174	−175	−175
水听器线阵 B	−173	−171	−174	−174	−173	−173	−174	−174	−172	−172	−173	−173

4 结论

论文采用压电厚壁圆管设计大坝混凝土声层析成像用水听器，以满足耐静压的要求，并使用贴膜式低噪声的2SK3225的场效应跟随器作前放，解决了长距离电缆传输信号衰减问题，内置前放在减少体积、节约成本的同时还提高了水听器的耐用性，不过在单元数较多时，线阵水听器的制作和维修比较困难。

我们研制的水听器线阵由12个水听器阵元组成，阵元间隔2 m，水听器在低于20 kHz的频率范围内，自由场接收电压灵敏度为 -173 ± 3 dB，在2 MPa静水压力下灵敏度下降不超过2 dB。该接收水听器线阵首波幅度高、起跳清晰，可以迅速地测定混凝土的强度、内部缺陷的位置与大小，还可以判断遭受破坏的程度等，得到了应用客户的一致性好评，对于采用声波层析技术进行大坝混凝土结构的安全检测具有很好的研究价值。

参 考 文 献

[1] 申永利, 孙永波. 基于超声波CT技术的混凝土内部缺陷探测 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(4): 560–565.
SHEN Yongli, SUN Yongbo. Flaw detection in concrete based on ultrasonic wave computerized tomography (CT) technique[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(4): 560–565.

[2] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 157–170.

[3] LAN J, BOUCHER S G. Improvement in accuracy of FEM for ultrasonic transducers[C]. IEEE International Ultrasonic's Symposium, 1998: 1051–1055.