◇ 研究报告 ◇

电动式换能器声源级起伏改善实验研究

杨 洋¹ 桑永杰^{1,2,3†} 刘茂伊¹ 蓝 宇^{1,2,3}

(1 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)
 (2 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部 哈尔滨 150001)
 (3 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要:电动式换能器由于存在内部声腔,导致辐射面上的负载在频域上出现极值,使得电动式换能器的声源级 响应出现起伏,给电动式换能器在宽带噪声模拟领域的应用带来了挑战。依据电动式换能器含有声腔的等效 电路分析结果,针对无声腔、有声腔、在声腔底部设置吸声棉和在声腔内充入氦气4种情况,使用加速度计测试 了辐射面的输出振速,归算出声源级曲线并加以比较。实验结果验证了声腔谐振导致电动式换能器频响曲线 出现起伏;在声腔内充入特性阻抗小的气体可有效地将声腔的谐振频率调节至工作频段以外,从而实现电动 式换能器在质量控制区平坦的响应输出。

关键词: 电动式换能器; 声腔; 声源级; 氦气; 测试

中图法分类号: O427.9; O421+.2; O421+.4 文献标识码: A DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.013

Experimental research on improving source level fluctuation of

文章编号:1000-310X(2023)01-0100-07

moving coil projector

YANG Yang¹ SANG Yongjie^{1,2,3} LIU Maoyi¹ LAN Yu^{1,2,3}

(1 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2 Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security Harbin Engineering University, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

(3 Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Due to the acoustic cavity in moving coil projector, the load on the radiation surface has extreme values in the frequency domain, which makes the source level response of the projector fluctuate. It is harmful to the application of the projector in the field of broadband noise simulation. Base on the analysis result of the equivalent circuit of moving coil projector containing the acoustic cavity, experimental research is carried out in this paper. The output vibration velocity on the radiation surface was tested with the accelerometer for the four cases: without acoustic cavity, with acoustic cavity, setting sound-absorbing cotton at the bottom of the acoustic cavity, and filling helium gas in the acoustic cavity. Then the source level curves for the four cases are calculated and compared. The experimental results verify that the resonance of the acoustic cavity can lead to source level fluctuations; filling low characteristic impedance gas in the acoustic cavity can effectively improve the fluctuation of the source level in the quality control area.

 ${\bf Keywords:}$ Moving coil projector; Acoustic cavity; Source level; Helium gas; Test

²⁰²¹⁻¹¹⁻⁰⁶ 收稿; 2021-12-17 定稿

作者简介:杨洋(2000-),男,山东人,本科生。

[†]通信作者 E-mail: sangyongjie@hrbeu.edu.cn

0 引言

电动式换能器具有体积小、重量轻、超低频发 射的特点,在舰船噪声模拟、声呐系统校准等领域 得到广泛应用[1-3]。传统的电动式换能器设计理论 中,只考虑了换能器中驱动振子自由状态下的振动 特性[4],未考虑换能器中的声腔对驱动振子输出振 速的影响,导致实测的电动式换能器的声学性能与 理论预报结果不符[5-8]。桑永杰等[9]提出了含有声 腔结构的电动式换能器等效电路,提出声腔输入端 的声阻抗在某些频率处具有极值,导致驱动振子中 辐射面的声负载在这些频率处产生剧烈变化,引起 了辐射面的输出振速在这些频率处发生变化,从而 导致了声源级曲线在这些频率处出现起伏;研究了 声腔的结构尺寸、声腔底部边界条件及腔内气体的 声学特性对电动式换能器的声源级曲线起伏的影 响,提出在声腔内充入特性阻抗比空气小的气体来 消除工作频段范围内电动式换能器的声源级起伏, 理论计算和有限元仿真结果显示效果良好。

本文从实验角度对该结论加以了验证。首先基 于加速度计测试了仅有驱动振子情况下的辐射面 输出振速,归算得到了无声腔时的声源级曲线;然 后测试了含有声腔并在声腔底部设置吸声棉时辐 射面的输出振速,得到了含有声腔时的声源级曲线; 最后在电动式换能器的声腔内充入了特性阻抗较 小的氦气,得到了声腔内冲入氦气时的声源级曲线。 实验结果验证了理论预测的正确性,即声腔谐振可 导致电动式换能器频响曲线出现起伏,通过在声腔 底部敷设吸声棉抑制声源级起伏并不可行,而在声 腔内充入特性阻抗较小的气体则能有效地消除声 源级起伏现象。

1 电动式换能器改善输出响应起伏实验的 理论基础

电动式换能器主要包括驱动振子和压力补偿 系统两部分。其中驱动振子是电动式换能器的核心 部件,其振动性能决定着换能器的声输出性能,驱动 振子的基本结构如图1所示。永磁体和软磁体组成 驱动振子的磁路;线圈与辐射面连接,置于磁路的气 隙中,线圈通交流电后产生交变的安培力驱动辐射 面,辐射面在悬挂弹簧的恢复力作用下输出交变的 振速,辐射面与水介质接触则将振动的机械能转化 为声能辐射出去。



图1 驱动振子结构示意图



为了适应在一定深度下安全工作,电动式换能 器通常采用被动式压力补偿系统平衡换能器内外 的静水压,即在驱动振子后面的壳体内设置可压缩 橡胶囊,如图2所示。橡胶囊内一般充入常压空气, 当电动式换能器置于水中后,随着深度逐渐增加,橡 胶囊的底面逐渐向图示中左边移动,直至橡胶囊底 面接触到驱动振子的底面,则此时深度达到了电动 式换能器的极限工作深度。由图2可知,电动式换 能器内部存在3段不同截面的腔体,第一段起到提 供辐射面自由振动空间的作用,第三段起到压力补 偿的作用,第二段则起到连通第一段和第三段腔体 的作用。第一段和第二段腔体的体积恒定不变,第 三段腔体体积则随着工作深度发生变化,工作深度 与第三段腔体的体积满足如下关系:

$$(V_1 + V_2 + V_3)P_0 = (0.1h + 1)P_0(V_1 + V_2 + V_3'), \quad (1)$$
$$V_3' = \frac{V_3 - 0.1h(V_1 + V_2)}{0.1h + 1}, \quad (2)$$

其中,V₁、V₂分别为第一段、第二段腔体的体积,V₃为第三段腔体的初始体积,即未入水前的体积,V₃为在水深为*h*时的第三段腔体的体积。



图2 电动式换能器中的声腔示意图



传统的电动式换能器在理论预报声源级曲线时,一般基于经典的单自由度质量-弹簧-刚度振动系统模型的机械输出特性和单面活塞声辐射模型。 首先将驱动振子(包含磁路、线圈、悬挂弹簧、辐射 面等)等效为如图3(a)所示的集中参数模型,其中 *M_m*为驱动振子的振动质量,包含驱动振子中的线

2023年1月

圈、辐射面的质量,如果使用的弹簧质量较大,还包含1/3的弹簧质量^[10]; *C_m*为驱动振子中悬挂弹簧的柔顺系数, *R_m*为悬挂弹簧的机械阻尼; *F*为驱动振子输出的安培力。驱动振子置于封闭的刚性壳体内,仅留出自由振动的辐射面与水介质接触,将机械振动的能量转换为声能量辐射到水介质中,这样,其声辐射模型一般等效为如图3(b)所示的单面活塞辐射。



图 3 传统的电动式换能器的机械及声辐射模型 Fig. 3 Traditional mechanical vibration model and acoustic radiation model of moving coil projector

在上述机械振动模型和声辐射模型下,在振动 系统的质量控制区,辐射面的振速可表示为

$$v = F/[\omega(M_m + M_a)], \tag{3}$$

其中, ω 为角频率, M_a 为辐射面上的同振质量,在电动式换能器工作的低频段内 $M_a = \frac{8}{3}\rho_w r^3$, ρ_w 为水的密度,r为辐射面的半径。

辐射面在水中产生的声压可表示为

$$p = \frac{\rho_w f v \pi r^2}{d} D(\theta), \qquad (4)$$

其中, d为距离辐射面声中心的距离, $D(\theta)$ 为指向性函数, 在电动式换能器工作的超低频段内, $D(\theta) \approx 1$ 。

在质量控制区电动式换能器的声源级可表示为

$$SL = 20 \lg(pd) + 120.$$
 (5)

结合式(3)和式(4),则式(5)可写为

$$SL = 20 \lg \left[\frac{F \rho_w r^2}{2(M_m + M_a)} \right] + 120.$$
 (6)

由式(6)可以看出,传统的电动式换能器设计理论 中,在质量控制区的声源级是与频率无关的量,在驱 动振子的输出安培力、辐射面半径、辐射面的质量 确定的情况下,质量控制区的声源级频响曲线是平 坦的。然而,电动式换能器的声源级测试曲线在质 量控制区出现了不同程度的起伏现象,表明传统的 电动式换能器理论设计方法在预报其性能方面存 在不足。这些极值的出现,在舰船噪声信号模拟应 用中增加了输入信号均衡的难度。

电动式换能器的3段腔体构成了突变截面的声腔,声腔作为一种重要的声学元件,作为负载施加 在辐射面的背面,必然对驱动振子辐射面的输出带 来影响。基于波导管的四端等效网络电路图给出的 含有声腔结构的电动式换能器等效电路,如图4所 示。图4中左端为驱动振子的等效电路。相比起传 统的电动式换能器等效电路,图4中增加了右端的3 段腔体的等效电路,各部分的阻抗元件的表达式分 别为^[11]

$$Z_i = j \frac{\rho_a c_a}{S_i} \tan\left(\frac{k_a l_i}{2}\right),\tag{7}$$

$$Z_{0i} = \frac{\rho_a c_a}{\mathrm{j}S_i} \frac{1}{\mathrm{sin}(k_a l_i)},\tag{8}$$

其中, ρ_a 为腔内气体的密度, c_a 为腔内气体的声速, S_i 为各段腔体的截面积, l_i 为各段腔体的长度, k_a 为 腔内气体的波数。

依据图4得到的电动式换能器级曲线在质量控制区明显出现了多个极值,声源级曲线出现了起伏现象。文献[9]中研究了声腔的结构尺寸、声腔底部边界条件、声腔内气体的声参数对声源级响应起伏的影响作用,给出了在工作频段内抑制或消除声源级起伏的方法:在声腔底面敷设吸声材料可以抑制声源级起伏;在声腔内充入阻抗特性小的气体则可以将起伏出现的频率移至工作频率之外。



图 4 含有声腔的电动式换能器等效电路 Fig. 4 Equivalent circuit of moving coil projector with acoustic cavity

本文接下来从实验上对上述两种方法进行了 验证。由于电动式换能器的工作频段范围一般在几 赫兹到几百赫兹,在实验水池或有限开阔的水域中 难以满足自由场测试条件,测得声场中的声压难以 满足测量精度的要求,因此实验中选择了通过加速 度计测量辐射面的输出振速,然后通过圆面活塞辐 射面的声压公式(4)求解声场声压的方式归算出声 源级。

为了验证声腔谐振可导致声源级响应起伏这 一结论,测试中分别测试了无声腔(即只有驱动振 子)和含声腔(包括声腔内充入空气、声腔内充入空 气并在底部敷设吸声棉、声腔内充入氦气3种情况) 的辐射面振速。

由于不含声腔的驱动振子无法入水测试,因此 为了便于比较结果,上述实验均在空气介质中完成。 为了验证在空气中测试结果对水中结果具有借鉴 作用,基于一个电动式换能器模型,理论计算了辐射 介质分别为空气和水时,声腔底面为刚性面和吸声 棉以及声腔充入氦气时两种介质中的声源级对比, 如图5所示。

由图5可以看到,辐射介质不同时,由于辐射 阻、共振质量和声压参考值不同,驱动振子的输出振 速、驱动振子的谐振频率、机械品质因数及电动式 换能器的声源级大小在两种介质中均发生了变化, 但声腔引起的起伏对应的频点没有改变,图5(b)、 图5(d)显示加入吸声棉后起伏变化的幅度规律也 相似。因此在空气中通过改变声腔边界条件及声腔 内气体声参数等措施改善声源级起伏获得的结论 可以应用到水中。





Fig. 5 The theoretical effect of two methods in improving the fluctuation of source level in water and air

2 电动式换能器改善响应起伏实验

用于实验测试的电动式换能器为哈尔滨工程 大学研制的ULF-2型超低频宽带电动式换能器,如 图6 所示;实验中使用的仪器设备包括信号发生器、功率放大器、加速度计、电荷放大器、示波器等,实验仪器设备连接示意图如图7所示。测试中对电动式换能器施加1A的恒定电流,测试频率为10~1200 Hz。



图 6 ULF-2型电动式换能器 Fig. 6 ULF-2 moving coil projector



图 7 实验仪器设备连接示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental equipment connection

2.1 声腔底部敷设吸声棉后声源级

在声腔底部敷设吸声材料抑制声源级起伏,其 原理是通过吸声材料吸收到达声腔底面的声波,达 到声腔内传播平面波的目的。此时声腔可等效为无 限长波导管,声腔输入端的声阻抗为恒值ρ_ac_a不随 频率变化,因此辐射面的输出振速不会出现极值,从 而可以消除声源级起伏。

在辐射面上粘接加速度计,如图8(a)所示,并 在声腔底面敷设吸声棉,如图8(b)所示。吸声棉为 聚酯纤维材质,厚度50mm,以1/3倍频程测得的各 频点吸声系数如表1所示。



(a) 加速度计粘接位置



(b) 橡胶囊底部敷设吸声棉

图 8 加速度计及吸声棉设置方式 Fig. 8 The accelerometer and sound-absorbing cotton used in the test

首先拆除电动式换能器的壳体和橡胶囊,只保 留驱动振子,测量辐射面上的输出振速,基于式(4) 和式(5)得到归算后的声源级曲线,这里式(5)中的 声压基准值修改为空气中的2×10⁻⁵ Pa。然后分 别测试了带有声腔及在声腔底部敷设吸声棉时的 辐射面的振速并归算了声源级曲线,归算的声源级 结果如图9所示。由3条曲线可以看出,声源级在约 100 Hz处均出现了起伏,考虑到仅有驱动振子情况 下不会出现声腔导致的起伏,因此此处起伏是由该 电动式换能器驱动振子设计缺陷导致的。除去该处 起伏,无声腔结构的电动式换能器的声源级测试曲 线与传统的理论预报曲线一致:在质量控制区声源 级曲线平坦无起伏,在高频处由于辐射面自身的弯 曲模态显现,逐渐出现弯曲振动导致的声源级峰值。 这也表明通过测量辐射面振速计算声源级的测试 方法,相比起在有限区域内测试声压计算声源级更 加准确,在电动式换能器校准技术中是值得推荐的。

表1 吸声棉的吸声系数

Table 1 Sound absorption coefficient of the sound-absorbing cotton

频率/Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
吸声系数	0.1	0.16	0.22	0.3	0.4	0.65	0.73	0.83	0.89	0.9	0.85





由含有声腔但无吸声棉时的声源级归算曲线, 在约200 Hz处出现了极小和极大值,声源级起伏达 到了8dB。对比第一条无声腔时的声源级曲线,可 以推断该处起伏是由引入了声腔导致的,也从实验 角度验证了声腔谐振可导致电动式换能器频响曲 线出现起伏。由第三条在橡胶囊底面敷设吸声棉的 声源级曲线可以看出,在200 Hz处的声源级起伏 仍达到了6.8dB,起伏现象没有得到明显的抑制。 分析其原因,主要在于目前市场上适合敷设橡胶 囊底部的吸声材料在200 Hz处的吸声系数一般在 0.2~0.3之间,远无法满足理论上全吸收的理想吸 声情况,因此目前的条件下在橡胶囊底面敷设吸声 棉改善电动式换能器的声源级起伏现象,效果有限。

2.2 声腔内充入氦气时的声源级

在声腔内充入特性阻抗小的氦气(特性阻抗约 为空气的0.35倍)取代常用的空气,其原理是使声 源级出现起伏的频率升高至工作频率范围之外,达 到在关注的频段内消除声源级起伏的目的。

将电动式换能器橡胶囊内的空气排出并充入 氦气,如图10所示,测得辐射面上的振速并归算得 到的声源级曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出,相 比起声腔内为空气的情况,充入氦气后在 200 Hz 处 的声源级起伏现象消失,所得结果与无声腔结果基 本一致,在工作频段内呈现了平坦的声源级响应特 性,表明在声腔内充入特性阻抗小的气体消除电动 式换能器的声源级曲线起伏是可行的。



图 10 在声腔中充入氦气 Fig. 10 Filling the acoustic cavity with helium



图 11 声腔内充入不同气体时声源级归算曲线 Fig. 11 Source level calculated curve in three cases

3 结论

在电动式换能器声腔底面敷设吸声材料及在 声腔内充入氦气,测量电动式辐射面的输出振速求 解电动式换能器在空气中的声源级曲线,实验结果表明:

目前的吸声材料由于在低频段的吸声系数低, 无法实现声腔中平面波传播条件,因此难以达到消 除或抑制声源级起伏的效果。

在声腔内充入特性阻抗比空气小得多的氦气, 可大幅度提升声源级出现起伏的频率,将该频率移 至关注的频段范围之外,能够达到消除工作频段内 声源级起伏的目的。

参考文献

- Sherman C H, Butler J L. Transducers and arrays for underwater sound[M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [2] Graber C. Submersible electro-dynamic acoustic projector: U.S.8,488,415[P]. 2013-07-16.
- [3] Sylvia R M, Kelly P J, Lewis M C. Underwater acoustic projector: U.S. 9,906,857[P]. 2018-12-27.
- [4] 刘振才. 一种水下电动式发射换能器的设计 [J]. 大连水产学 院学报, 1990, 5(2): 55-60.
 Liu Zhengcai. Design of a kind of underwater dynamic transmitted transducer[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1990, 5(2): 55-60.

- [5] Sims C C. High-fidelity underwater sound transducers[J]. Proceedings of the IRE, 1959, 47(5): 866–871.
- [6] 范进良,禹建,唐良雨,等.一种水下甚低频宽带声源:浙江, CN102075828A[P]. 2011-05-25.
- [7] 范进良, 唐良雨, 朱伟敏. 5-1000 Hz 甚低频宽带发射声源 [J]. 声学技术, 2013, 32(S1): 287-288.
 Fan Jinliang, Tang Liangyu, Zhu Weimin. Very low frequency wideband projector of 5 Hz-1000 Hz[J] Technical Acoustics, 2013, 32(S1): 287-288.
- [8] 桑永杰. 低频宽带水声换能器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程 大学, 2015.
- [9] 桑永杰, 蓝宇, 刘茂伊. 声腔对电动式换能器工作特性的影响 [J]. 声学学报, 2022, 47(1): 76-84.
 Sang Yongjie, Lan Yu, Liu Maoyi. The influence of acoustic cavity on operating characteristics of electrodynamic transducer[J]. Acta Acustica, 2022, 47(1): 76-84.
- [10] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京:南京大学出版 社, 2012.
- [11] 刘世清,林书玉. 等截面声波导管的等效电路研究 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2005, 30(4): 648-651.
 Liu Shiqing, Lin Shuyu. Study on the equivalent circuit of uniform cross section acoustic waveguide[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 2005, 30(4): 648-651.