

稀土 IV 型弯张换能器研究

李宽^{1,2,3}, 蓝宇^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001;
3. 中电科海洋信息技术研究院有限公司, 北京 100041)

摘要: IV 型弯张换能器低频发射时具有尺寸小、重量轻的特点, 是一种常用的水下低频大功率声源。稀土超磁致伸缩材料相较于压电陶瓷拥有更大的应变量和能量密度, 并且杨氏模量较小, 可以有效降低换能器谐振频率。利用稀土超磁致伸缩材料作为激励材料, 设计了一种低频 IV 型弯张换能器, 对其静态磁场和动态磁场进行了分析, 构建出双棒式磁路, 并使用有限元分析软件进行了换能器的结构建模与计算。根据计算结果制作了稀土 IV 型弯张换能器样机, 测试结果表明所设计的换能器与仿真结果吻合较好, 水中谐振频率为 370 Hz, 最大声源级为 196 dB, 能够实现低频、大功率发射。

关键词: 稀土材料; 磁致伸缩; 弯张换能器; 有限元

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-05-0467-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.05.016

Research of a Class IV rare-earth flextensional transducer

LI Kuan^{1,2,3}, LAN Yu^{1,2}

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

3. CETC Ocean Co., Ltd, Beijing 100041, China)

Abstract: Class IV flextensional transducer with features of small size and light weight is a common underwater low frequency and high power source. Compared to piezoelectric ceramic, the rare-earth magnetostrictive material has larger strain and energy density, and lower young's modulus, which can effectively reduce the resonant frequency of the transducer. A low frequency IV flextensional transducer driven by using rare-earth magnetostrictive material is designed. Through the analyses of static and dynamic magnetic fields, a magnetic circuit structure of dual rods type is built, and the transducer is modeled and calculated with finite element software. Based on the calculation results, a Class IV flextensional transducer is manufactured, and the simulation and experimental results are in good agreement. It is shown that the transducer is characterized by low frequency and high power, which means that the resonant frequency in water is 370 Hz, and the sound source level achieves 196 dB.

Key words: rare-earth material; magnetostrictive; flextensional transducer; finite element

0 引言

稀土超磁致伸缩材料(Terfenol-D)近些年备受青睐, 被视为水声换能器极具潜力的一种激励材料, 因其不仅拥有较高的耦合系数, 而且应变比传统镍或压电材料大得多, 此外还具有能量密度高、杨氏模量低的特点, 此种材料制成的换能器很适于在远程声呐及其他低频水声系统中应用^[1,2]。稀土超磁致伸缩材料在纵振式以及圆环等换能器中都得到了较为广泛的应用, 可有效降低换能器的工作频率^[3-5], Butler 的研究团队还将多个由稀土材料激励

的纵向活塞结构组成柱状换能器, 利用不同活塞的极性组合形成多种指向性, 和同尺寸压电陶瓷激励的换能器相比功率更高^[6]。

IV 型弯张换能器具有典型的位移放大特性, 并且低频发射时具有尺寸小、重量轻的特点, 是一种常用的水下低频大功率声源。对如何应用稀土超磁致伸缩材料激励 IV 型弯张换能器, 中国科学院声学研究所、哈尔滨工程大学以及 715 研究所等科研单位都展开了相关研究, 并在相对较低的频段内收获了较好的测试结果^[7-9]。本文采用稀土超磁致伸缩材料作为 IV 型弯张换能器的激励源, 设计了一种低频、大功率水下发射器。换能器采用的是空气背衬式结构, 这样有利于提高仿真值的准确度, 并实现更高的声源级。

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-06

作者简介: 李宽(1985-), 男, 黑龙江佳木斯人, 博士研究生, 研究方向为水声换能器及换能器基阵。

通讯作者: 蓝宇, E-mail: lanyu@hrbeu.edu.cn

1 稀土 IV 型弯张换能器设计

1.1 稀土 IV 型弯张换能器结构

稀土 IV 型弯张换能器的结构示意图如图 1 所示, 包含壳体、过渡块、稀土振子、线圈和纯铁块几个主要部分。换能器外部为椭圆形壳体, 稀土振子置于壳体内部, 外部缠绕着线圈。稀土振子与两端的纯铁块以及外部线圈一同构成磁路部分, 纯铁块通过过渡块与壳体长轴方向刚性连接。换能器工作时其外部缠绕的线圈提供交变电流, 稀土振子在交变磁场中伸缩变化, 激励出外部壳体的弯曲振动, 向外辐射声能。

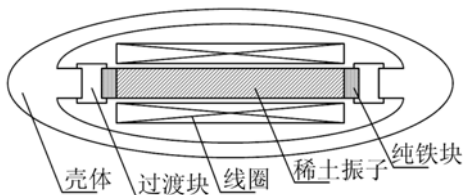


图 1 稀土 IV 型弯张换能器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of Class IV rare-earth flextensional transducer

1.2 双棒式磁路设计

稀土超磁致伸缩材料需要在良好的磁场环境中工作, 这样才能发挥最佳的性能, 所以对磁路结构进行合理的设计可以提升磁场均匀度, 减少磁漏和磁性材料内部的涡流损耗, 以提高换能器的工作效率^[10]。单棒式磁路和双棒式磁路都是比较常用的磁路形式, 稀土 IV 型弯张换能器的结构特点更适合使用双棒式磁路。而双棒式磁路的分析比单棒式磁路更为复杂, 进行磁路设计的同时还要考虑到空间可操作性以及工艺实现难度等问题。

图 2 是根据换能器内部空间所设计的双棒式磁路结构, 上下共有两组稀土振子, 每个稀土振子外部都缠绕着一个独立的线圈。每根稀土棒两端为永磁片, 两侧的纯铁块与两排振子共同构成了闭合式

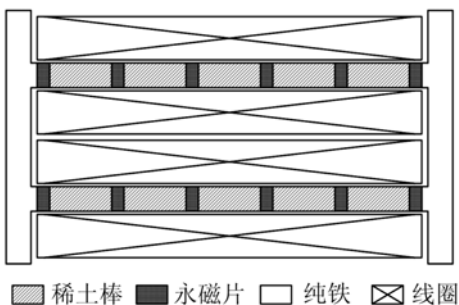


图 2 双棒式磁路结构

Fig.2 Magnetic circuit structure of dual rods type

磁回路。永磁片提供恒定的静态磁场, 并且上下两排振子中静态磁场方向相反。

根据磁路的对称性, 建立的磁路 1/2 有限元模型如图 3 所示, 在图 2 中磁路的外部建立出空气单元。稀土棒内部中空, 这样可以降低稀土材料内的涡流损耗, 中空部分用绝缘材料填充, 其在模型中的单元也可视为空气单元。在有限元模型的所有开放平面上施加边界条件, 磁力线垂直条件自动满足, 但必须有磁力线平行条件。双棒式磁路的静态磁场和动态磁场分析要分别用到静态分析和谐波分析, 而 ANSYS 有限元软件中对于三维磁场的这两类分析提供了两种适用方法, 即矢量位法和棱边单元法, 当存在非均匀介质以及自由度发生变化时, 用基于节点的连续矢量法来进行有限元计算得到的解不够精确, 而棱边单元法可以有效消除这种理论上的缺陷。

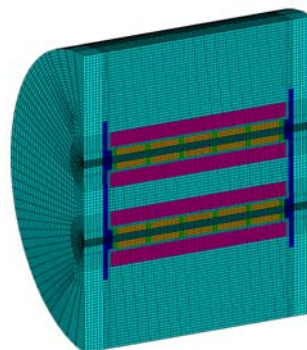


图 3 磁路有限元模型

Fig.3 Finite element model of magnetic circuit

由于静态磁场中不考虑随时间变化的电流, 线圈部分可看作是普通的导体, 等同为空气。所有材料都要设置相应的磁导率, 而永磁片还要给出矫顽力矢量, 并控制好极化方向。图 4 所示为双棒式磁路静态磁场下的磁感应强度分布情况, 由于磁路结构本身具有对称性, 这里为了表现得更加清晰, 所以只给出上半部分磁路的计算结果, 正负号表示磁感应强度 B 的方向, 由图 4 可知, 稀土棒内部径向磁感应强度分布比较均匀, 而轴向均匀度还有提高的空间。

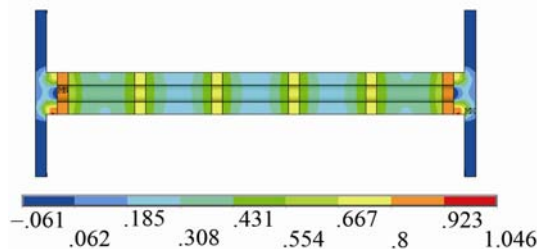


图 4 静态磁场磁感应强度分布

Fig.4 Magnetic induction intensity distribution in static magnetic field

在动态磁场分析中，主要目标是降低驱动材料内部的趋肤效应，提升磁场均匀度，从而减小涡流损耗，更有效地利用磁场能量。动态磁场分析中需要线圈提供交变磁场，所以不再将其当作一般导体处理。对稀土棒进行开缝处理是一种有效减小涡流损耗的方法，图 5 为动态磁场下稀土棒开缝前后横截面磁感应强度分布，由图可知外部进行开缝处理后，截面上的磁感应强度最大值与最小值的差值为 0.013 T，而未开缝时的差值为 0.016 T，均匀度有所提升。

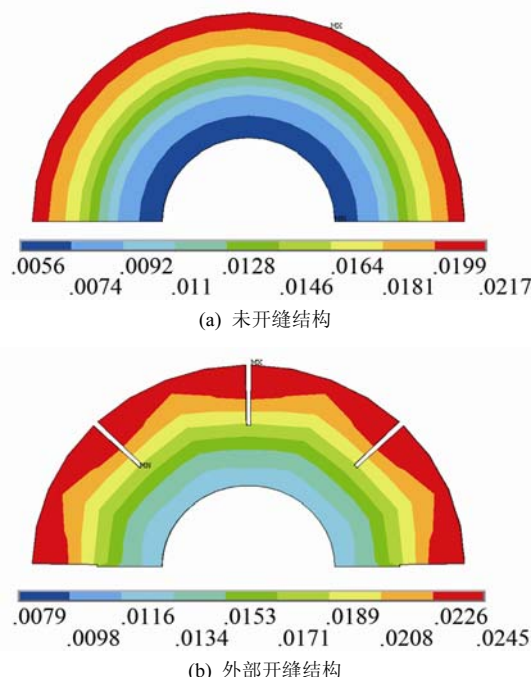


图 5 动态磁场稀土棒横截面磁感应强度分布
Fig.5 Magnetic induction intensity distribution of rare-earth cross-section in dynamic magnetic field

1.3 稀土 IV 型弯张换能器有限元分析

在 ANSYS 有限元软件中对稀土 IV 型弯张换能器进行建模，利用模型所具有的空间对称性，在空气中以及后面的水中均构建 1/4 模型。换能器空气中有有限元模型如图 6 所示，激励材料为 10 根 $\phi 20\text{ mm}$ 的稀土棒，壳体 and 过渡块的材料选取硬铝合金，稀土部分采用的是 SOLID5 单元，其余部分

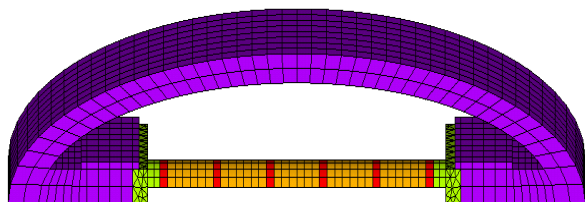


图 6 换能器空气中有有限元模型
Fig.6 The finite element model of the transducer in air

都采用 SOLID45 单元，模型中共包含 3113 个节点，2426 个单元。

换能器的主要设计目标是在小尺寸下实现低频发射，所以需要着重考虑如何通过结构优化来降低换能器的谐振频率，此外还要保证换能器具有较高的发送电压响应值。在优化过程中将每个变量进行独立分析，计算结果显示弯张换能器的壳体变化对频率的影响比较明显，尤其是换能器壳体的长短轴比及壳体厚度等重要参数，当增加长短轴比例时换能器频率有明显的下降趋势，壳体厚度的改变同样能够实现频率的有效调节。壳体的长短轴比和厚度对换能器发送电压响应值也有影响，例如长短轴比过大或过小都不好，适中时响应值最高，所以要综合考虑。此外，参数的选择还要考虑到稀土振子外部缠绕的线圈需要足够的空间，以及换能器装配时预应力的施加等相关限制，最终确定的模型长短轴比约为 3:1，壳体厚度 10 mm。

首先对换能器进行模态分析，计算得到的换能器空气中谐振频率为 686 Hz，模态位移矢量图如图 7 所示，长轴方向收缩，短轴方向扩张，其中心点处位移量最大。对于稀土超磁致伸缩材料激励的换能器要利用压磁-压电类比的方法进行谐响应分析^[11]，得到的空气中阻抗曲线如图 8 所示，在谐振点处的最大电阻值为 12.2 Ω 。

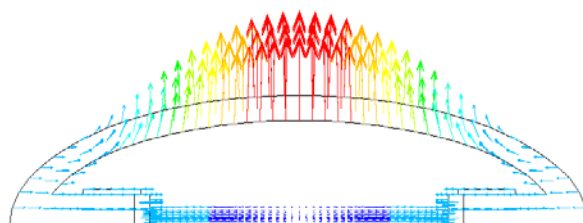


图 7 换能器模态位移矢量图
Fig.7 The figure of displacement vector for the transducer mode

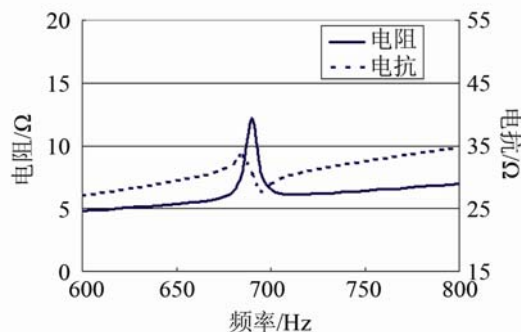


图 8 换能器空气中阻抗仿真曲线
Fig.8 The simulative impedance curve of transducer in air

图 9 所示为稀土 IV 型弯张换能器的水中有有限元模型，换能器外部建立流体域，使用的是 FLUID30 单元，在流体域与壳体接触的表面施加流

固耦合条件,在流体的外边界还要加载无限远吸收边界条件。稀土 IV 型弯张换能器仿真计算得到的发送电流响应曲线如图 10 所示,最大发送电流响应值为 180 dB。

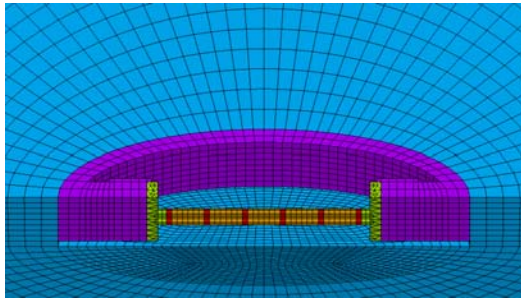


图 9 换能器水中有限元模型
Fig.9 The finite element model of the transducer in water

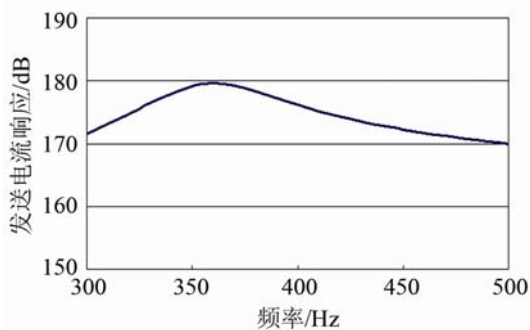


图 10 换能器水中发送电流响应仿真曲线
Fig.10 The simulative transmitting current response curves of the transducer in water

2 换能器样机的制作与测试

根据分析结果制作的换能器样机如图 11 所示,其最大线度尺寸为 400 mm,未加电缆的总重量为 15.8 kg。



图 11 稀土 IV 型弯张换能器样机
Fig.11 The prototype of the class IV rare-earth flextensional transducer

用 WK6500 阻抗分析仪测试的换能器空气中和水中的阻抗曲线分别如图 12 和 13 所示,空气中谐振频率为 758 Hz,比仿真值高 72 Hz,这是因为仿真过程中无法模拟换能器上下盖板夹持带来的机

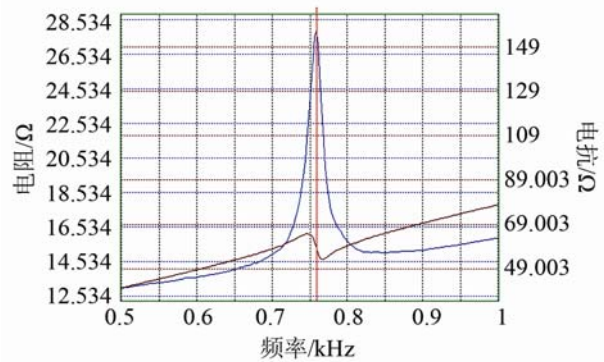


图 12 换能器空气中阻抗测试曲线
Fig.12 The tested impedance curve of the transducer in air

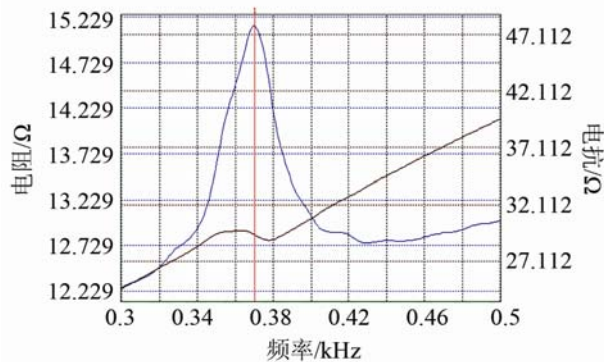


图 13 换能器水中阻抗测试曲线
Fig.13 The tested impedance curve of the transducer in water

械阻尼影响。谐振点处的电阻值为 27.9Ω 。水中谐振频率为 370 Hz,与计算结果基本一致,此频率下的电阻值为 15.1Ω 。

在消声水池测试的换能器发送电流响应曲线以及声源级曲线如图 14 所示,响应最大值为 175 dB。与图 10 相比较,仿真结果比实测结果高 5~8 dB,原因在于有限元建模未能考虑磁滞损耗、涡流损耗以及盖板夹持带来的机械阻尼等因素。测试声源级时功率放大器上加载了大小为 6 A 的电流有效值,在 300~500 Hz 的频率范围内,声源级的测试值均大于 180 dB,最大值为 196 dB,实现了换能器

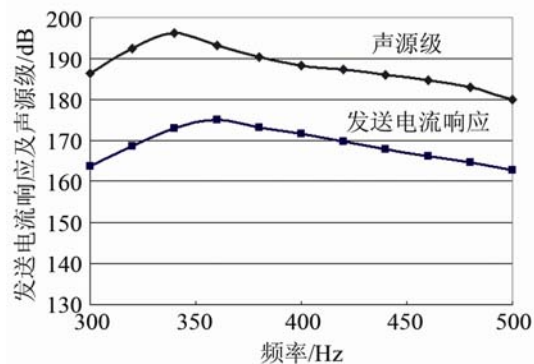


图 14 换能器发送电流响应及声源级测试曲线
Fig.14 The tested transmitting current response and sound source level curves of the transducer

的低频、大功率设计。如果对换能器进行逐点的阻抗匹配, 声源级还能够进一步提升。

3 结 论

利用 ANSYS 有限元软件仿真并设计了一种工作频率低于 400 Hz 的稀土 IV 型弯张换能器, 首先对提出的双棒式磁路的静态磁场和动态磁场进行了分析, 使得稀土材料内部磁感应强度分布更加均匀, 并减小了涡流损耗。然后通过压电-压磁类比的方法, 建立了换能器结构空气中和水中的有限元模型, 分别进行频率特性、阻抗特性和辐射特性的分析。根据分析结果设计的换能器样机水中谐振频率为 370 Hz, 最大声源级为 196 dB, 实现了小尺寸、轻量化、大功率的低频换能器设计目标。

参 考 文 献

- [1] 贺西平. 稀土超磁致伸缩换能器[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HE Xiping. Terfenol-D giant magnetostrictive transducer[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] Sharman C H, Butler J L. Transducers and Arrays for Underwater Sound[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] 莫喜平. 功能材料及其应用于换能器技术的研究进展[J]. 物理, 2009, 38(3): 149-156.
MO Xiping. Functional materials and their applications in acoustic transducers[J]. Physics, 2009, 38(3): 149-156.
- [4] 夏铁坚, 周利生, 范进良, 等. 一种大功率稀土纵向振动换能器的研究[J]. 声学技术, 2003, 22(1): 22-25.
- [5] XIA Tiejian, ZHOU Lisheng, FAN Jinliang, et al. Study on a high-power rare-earth longitudinal-vibration transducer[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(1): 22-25.
- [6] 李宽, 童晖, 蓝宇. 一种稀土纵振换能器的研究[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 410-412.
LI Kuan, TONG Hui, LAN Yu. A study of a rare-earth longitudinal-vibration transducer[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 410-412.
- [7] Butler J L, Butler A L. The modal projector[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2011, 129(4): 1181-1189.
- [8] 莫喜平. 水声换能器研究新进展[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 171-177.
MO Xiping. Development of underwater acoustic transducers[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(3): 171-177.
- [9] 范进良, 唐良雨, 沈铁东, 等. 一种低频 IV 型弯张换能器的设计[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 33-36.
FAN Jinliang, TANG Liangyu, SHEN Tiedong, et al. Design for a low frequency class IV flextensional transducer[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 33-36.
- [10] 蓝宇, 杨士莪, 王智元, 等. 开缝稀土 IV 型弯张换能器[C]// 福建: 全国水声学学术会议, 2005: 332-334.
LAN Yu, YANG Shie, WANG Zhiyuan. A slotted rare-earth flextensional transducer[C]// Fujian: The Underwater Acoustics Academic Conference, 2005: 332-334.
- [11] 柴勇. 磁致伸缩-压电联合激励弯张换能器研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 博士学位论文, 2007: 39-54.
CHAI Yong. The study of hybrid magnetostrictive piezoelectric flextensional transducers[D]. Beijing: Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences, PhD dissertation, 2007: 39-54.
- [12] 莫喜平, 朱厚卿, 刘建国, 等. Terfenol-D 超磁致伸缩换能器的有限元模拟[J]. 应用声学, 2000, 19(4): 5-8.
MO Xiping, ZHU Houqing, LIU Jianguo, et al. Terfenol-D giant magnetostrictive transducer simulation by finite element method[J]. Applied Acoustics, 2000, 19(4): 5-8.

中国科学院声学研究所东海研究站赴义乌开展听力健康科普活动

2015年9月24至25日, 中国科学院声学研究所东海研究站(简称东海站)组织仿生耳与声音技术研究室参加了由上海分院主办的“大手牵小手, 中科院博士义乌校园行”全国科普日系列活动, 东海站杨震亚等30余位分院科普工作人员一同赴义乌参与活动。上海学科交叉中心章文俊主任、滕小龙主管等出席活动。

期间, 东海站科普人员为廿三里第一小学的学生们介绍了东海站听力言语领域中的研究情况, 并利用多媒体技术从“耳朵的结构和生理、听力损失的分类及病因、听力损失的防治措施”三大方面进行了科学普及。

活动中, 东海站利用可拆卸的耳朵模型, 分步为学生们展示并讲述了耳朵器官的每个部分以及相应所承担的作用, 并让学生实际动手, 参与耳朵模型的拆卸与组装, 让孩子们充分了解了耳朵的功能, 加深保护意识。同时, 东海站携带了最新研发的“快速听力筛查仪”为每个参与的孩子做了听力检查, 受到现场学生和老师们的一致好评。

近年来, 东海站充分利用了自身的学科特色, 参与了全国科普日、上海市科普日、中国科学院科普活动、上海科教电影拍摄等多学科、多受众、多场次的科普活动, 尤其在围绕“听力保护”这一健康领域逐步找到了科学普及的切入点, 使东海站科普活动取得了实效发展。