

水声换能器原理

路德明 编著

序

在 21 世纪,人类为了能美满生活,需要获取更多的资源。人们必须对海洋进行开发,这是因为浩瀚的海洋占有地球面积的 71%,庞大的海底蕴藏着丰富的金属、非金属、石油和天然气等矿藏,它们等待着人们去勘探和开采,数不尽的海洋动植物让渔民们去养殖和捕捞。水声技术是开发海洋最有效的手段。例如,海洋石油及天然气的勘探就需要水声地震仪;海洋鱼类的高效捕捞离不开鱼群探测仪。当今世界,强权政治称霸天下,军事斗争仍很激烈。回顾历史,自鸦片战争到抗日战争,侵略军绝大部分是从海上入侵我国。为了保卫海疆,发展海军是我国的重要任务。水声信息对抗是海上作战的首要手段,水声换能器及声基阵是收发声信息的重要装备,它们与电子设备是决定水声对抗成败的主要武器。为了满足军民科技发展的需要,我们必须掌握水声换能器及声基阵这门学科的知识。

本书作者广泛收集了国内外这门学科的技术文献资料,经过精心编辑,写成本书。

本书包含七部分内容:绪论,它简要介绍了水声换能器及声基阵的含义、分类、研究方法和主要的性能指标。第一章讲述压电晶体和压电陶瓷的力学、电学及压电特性,详细导出了各类压电方程的表达式,并说明其相关常数的物理意义。第二章阐明了各种压电材料的固有特性。值得指出的是作者详尽地收集了新型压电材料的性能资料,以供读者参考使用,并对压电材料在高温、高压条件下引起材料老化作了说明,且对材料的介电常数、频率常数、压

电系数、损耗因子所产生的变化作了介绍。对换能器设计者在遇到上述情况下作优化设计时提供了有效的数据。第三章讲解了压电换能器,它是本书的重点内容。作者详细而又精辟地对各种类型压电换能器的理论进行了推导,如长度振动型、复合棒型、圆柱型、球型及弯曲型等换能器均作论证,并通过典型实例分析了它们的特性及其设计计算方法。第四章讲明了磁致伸缩换能器的工作原理、设计思路及制作工艺的注意事项。第五章介绍了压电陶瓷、 $PVDF_2$ 薄膜,光纤及光栅等水听器。第六章对各类声基阵原理进行了研究和探讨。特别介绍了对换能器和声基阵方向性改善的各种办法,以及对声基阵的波束控制,它们对声呐优化设计有着重大作用。书末附有附录,并列出了换能器常用材料的物理性能的参数表,以便换能器设计者参考使用。

本书由路德明教授编写,概述了当前实用换能器及声基阵的理论、设计方法及制作工艺。书中所叙述的概念清晰,条理分明,理论联系实际,是一本良好的教材。

本书适合作为高等院校海洋水声专业的教材。对于从事海洋声学的科研单位,厂矿企业中的工程技术人员来说,它亦是一本很好的参考书。

周福洪

2001年3月

前 言

自 20 世纪 50 年代以来,我国水声设备的研制工作从无到有,不断发展,特别是自改革开放以来,为适应我国海洋科学事业的发展、满足海军建设的需要,我国科技工作者研制出许多高水平的水声设备。

各种声呐设备是水面舰艇、潜艇以及水下防御系统的耳目,起着“水中雷达”的作用。

目前水声设备已成为海军水下作战的主要工具之一,它承担着水下警戒、搜索、跟踪、定位、识别、通讯、导航等重要任务。随着海军在现代战争中的战略地位的提高,特别是高速核潜艇及水下导弹的出现、反潜战的迅速发展以及现代化立体海战的形成,对水声设备提出了更高的要求。同时,水声设备已成为海洋科学研究、开发海洋资源的有力和不可缺少的工具。

水声换能器是指在各种水声设备中所使用的换能器,它是水声设备中的极其重要的组成部分,它的地位和任务将在绪论中具体讲述。

本书在一般理论知识的基础上,通过典型事例分析水声换能器的性能和计算方法、生产工艺过程等。

本书分六章:第一章压电晶体与压电陶瓷;第二章压电材料;第三章压电陶瓷水声换能器;第四章磁致伸缩水声换能器;第五章水听器;第六章水声换能器的方向特性和基阵。通过本书的学习,能使读者掌握有关水声换能器的理论分析、设计方法和生产工艺,为从事水声设备的研制工作打下初步基础。

本书是作者根据多年来讲授水声换能器课的讲义和有关科研成果的积累经修改和补充而成。我国著名水声换能器专家、哈尔滨工程大学周福洪教授审阅了书稿,提出了宝贵的修改建议,并热情为本书作序,在此表示深切的感谢。中国船舶工业总公司第七研究院第七一五研究所曾厚弟同志多年来对作者在水声换能器数十年教学工作中的一贯支持,俞宏沛和中科院声学所孙德兴等同志提供了许多论文成果,使作者受益匪浅。

郭玉红同志对本书进行了详细的校对、修正,绘图,作了大量工作。杨伟荣、唐潞等同志也为本书付出了辛勤劳动。马君、李学民等同志为本书也作出了贡献。在此一并表示衷心的感谢。

为了使作者能把更多的精力、时间投入到教学科研工作中去,李桂凤同志几十年如一日的为作者分担困难,在作者撰写此书过程中亦作出了奉献。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

如果本书的出版,使读者对水声换能器和基阵的了解和进一步深化有所裨益的话,作者将不胜喜悦。

作者

2001年4月

目 录

绪论	(1)
第一章 压电晶体与压电陶瓷的物理性质	(12)
第一节 压电陶瓷的铁电性	(12)
第二节 压电陶瓷力学特性	(19)
第三节 压电陶瓷的介电性	(36)
第四节 压电效应与压电方程	(43)
第二章 压电材料	(63)
第一节 压电材料的参数	(68)
第二节 压电材料	(81)
第三章 压电陶瓷水声换能器	(114)
第一节 长度振动压电陶瓷换能器	(114)
第二节 复合棒纵振压电换能器	(153)
第三节 圆管型压电陶瓷换能器	(203)
第四节 球形压电陶瓷换能器	(243)
第五节 弯曲振动压电陶瓷换能器	(251)
第四章 磁致伸缩水声换能器	(272)
第一节 铁磁物质的性质	(274)
第二节 迭片式棒型磁致伸缩换能器	(292)
第三节 稀土超磁致伸缩水声换能器	(331)
第五章 水听器	(343)
第一节 压电陶瓷水听器	(343)
第二节 PVF ₂ 水听器	(353)

第三节	光学水听器	(356)
第六章	水声换能器的方向特性和基阵	(366)
第一节	水声换能器的方向特性	(366)
第二节	换能器基阵	(375)
第三节	均匀线列基阵的补偿	(385)
第四节	圆柱管组成的圆形基阵及任意形 基阵的方向特性	(388)
第五节	连续声学系统的方向特性	(394)
第六节	复合声学系统的方向特性	(402)
第七节	可变方向性声学系统	(411)
第八节	频谱接收时的方向特性	(415)
第九节	改善换能器方向性的方法	(421)
第十节	束控	(429)
第十一节	水声换能器方向特性的设计	(445)
附录	导纳圆图	(447)
附表		(455)
参考文献		(460)

绪 论

一、水声换能器简介

在陆地上或在水面上进行观察和通讯时,目前普遍应用电子设备,例如雷达、无线电广播、电视、电报、无线电话等。这些都是利用电磁波来传递信息的,利用它们可以观察到几千里之外的目标,可以在全世界范围内进行通讯联系。近几年来光学的通讯技术在空气中也得到了越来越多的应用。但是在海水中,电磁波传播时衰减很快,因而,到目前为止电磁波除掉蓝绿光水下观察在水中尚未得到普遍使用,而在水中声波得到了广泛的应用。利用声波在海水中进行观察和通讯的设备叫做水声换能设备,显然这种观通设备必须有一个产生发射和接收声波的器件,这个器件叫水声换能器。一般所说的换能器是指那些能将某种形式振动的波动能量转换成另一种形式的波动能量的装置或器件。例如,能实现电声能量互换的装置叫电声换能器;实现机械能与声能互换的装置叫机声换能器;实现光电波动能量间互换的设备叫光电换能器等。由于电声换能器比其他换能器有更大的优越性,例如能量转换率高、产生和转换电的振荡信号比较方便、所产生的信号频率也可以控制的比较准确等,因此,现代的各种水声观通设备中,最常使用的换能器就是一种适用于水下工作的电声换能器,即水声换能器。

一般说来,水声观通设备主要由两部分组成,一是电子设备——产生、放大、接收和指示电信号的部分,它具体包括发射机、接收机、指示器等;二是水声换能器——它的作用是完成电声信号的转换。图1是几种常用的水声设备的工作示意图。

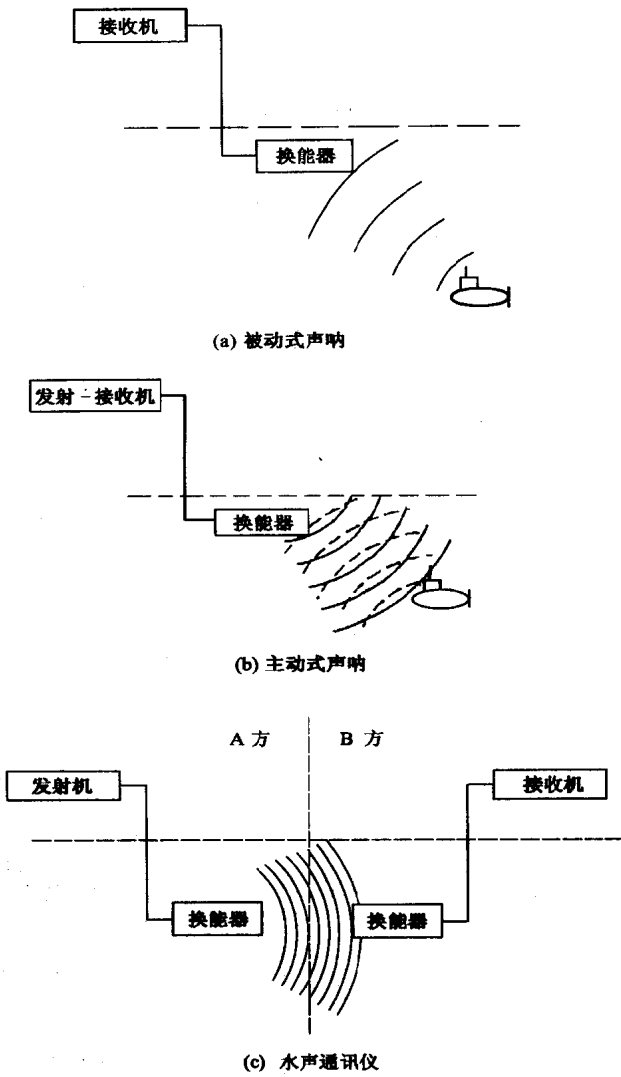


图 1 几种水声设备的工作示意图

由示意图可以看出:水声换能器乃是电子设备与水下信号声场间相互联系的纽带,实际上水声观通设备中的换能器就像无线电、雷达的天线一样,都是起着耳目的作用,不同之处在于换能器是发射和接收声信号,而天线是发射和接收电磁波信号。因此水声换能器不仅是水声观通设备的重要组成部分,也是水声设备区别于一般无线电设备的标志之一。

当水声换能器工作在发射状态时,它的任务就是把电的振荡能转换为机械系统的振动能,再推动水介质向外辐射声能量。当水声换能器工作在接收状态时,它的任务和发射状态时相反,即先把水介质中的声信号通过机械振动系统耦合到电路中并变成电信号,然后再把电信号送到接收或指示设备上。

二、水声换能器的分类

水声换能器按其能量的转换原理可分为两大类:一类是具有磁场的换能器,它是借助于磁场的磁-力效应来实现电声能量互换的;一类是具有电场的换能器,它是借助于电场的电-力效应来实现电声能量互换的。在这两大类换能器中又根据其工作原理或换能器器件的具体形式不同又分为若干小类。

- | | | |
|------------|---|---------|
| 具有磁场的水声换能器 | } | ① 电动式 |
| | | ② 电磁式 |
| | | ③ 磁致伸缩式 |
| | | ④ 超导式 |
| 具有电场的水声换能器 | } | ① 压电式 |
| | | ② 电容式 |
| | | ③ 电致伸缩式 |

水声换能器按其工作状态可分为发射换能器和接收换能器。

目前在水声观通设备中最常用的是电致伸缩式换能器、压电式换能器和磁致伸缩式换能器。

三、水声换能器的研究方法

换能器的内部电路系统,通常包含一个电容 C_0 或一个电感 L_0 的储能元件,当换能器工作在发射状态时,从发射机的输出级送来一个电振荡信号,使其储能元件的电场或磁场发生变化,而借助电场或磁场的某种“力效应”,产生了一个对换能器的机械振动系统的推动力,使之进入振动状态,从而向水介质中辐射出声波信号,这就是发射声信号的全部过程。当换能器处在接收状态时,其能量的转换过程与上相反,首先是声场的信号——声压作用在换能器的振动面上,使其机械振动系统进入振动状态,此时就引起换能器的电路储能元件的电场或磁场发生相应的变化,借助于系统的某种“电效应”,就在其电路系统中产生一个相应于声信号的应电动势或应电流,这就是接收声信号的全部过程。

由上述可知,水声换能器包含了电路系统、机械振动系统和声学系统,并且三者换能器工作时,有机地结合在一起成为一个统一的整体。这样就决定了对它的研究方法是融合了电子学、力学、声学等诸方面的研究方法,并且通过电-力-声类比,使三者能够用统一的等效机电图和等效方程式,方便地进行对其深入的研究。

对应电子学的研究方法,例如电的耦合网络、传输线、等效图和等效方程式,在水声换能器中就有机电耦合网络、机械传输线、机电等效图和机电等效方程式等。实际上水声换能器就是一个机电耦合网络。

水声换能器中的电声能量互换均是借助于电场或磁场的物理效应来实现的,而且不论是那种类型的换能器,这种效应都包括两个方面:一个是力效应,把作用在换能器电路系统中的电流或电压转换为作用在机械振动系统的推动力的物理效应,即实现把电学量(电流、电压)转换为力学量(振速或力)的效应,例如电动力效应;另一个是电效应,把作用在换能器机械振动系统上的力或振速

转换为电路系统中的应电势或应电流的物理效应,即实现把力学量(或声学量)转换为电学量的效应,如电磁感应定律等。所以根据各种换能器的“力效应”和“电效应”,我们就能得到它们的机电参量转换关系式(也叫机电相关方程式),这是分析研究换能器应首先建立的一组关系式。

为了确定换能器的工作状态,还须求出它的机械振动系统的状态方程式和电路系统状态方程式。当这些关系式都确立之后,换能器的工作状态也就完全确定了。换能器机械系统的状态方程式(简称为机械振动方程)是换能器处于工作状态时,描写它的机械振动系统的力与振速的关系式,也就是说该方程式是描写机械系统振动特性的,而电路系统的状态方程式(简称电路状态方程式)是描写电路系统的振动特性的,即具体描写电路系统中的信号电压与信号电流间的关系。由于换能器的机械系统和电路系统是互相耦合的,所以机械系统的振动会影响到电路的平衡,而电路的变化也会影响到机械系统的振动,因此我们总是利用这些方程组分析、讨论换能器的工作特性。

由上述换能器的三组基本关系式,可以对应地作出换能器三种形式的等效图。第一种是等效机械图,将换能器等效为一个纯机械系统的等效图;第二种是把机械一边的元件和参量,通过机电转换化为电路一边的元件和参量,即把一个换能器等效为一个纯电路系统,称此为等效电路图;第三种称为等效机电图,同时包含电路一边和机械一边的等效图。利用这些等效图可以简便地求出换能器的若干重要的性能指标。

上面只简略地谈了对换能器的分析研究方法,至于如何推导三组基本方程、建立等效图和计算换能器的一系列的工作特性,将在以后详细讨论。

前面已经提到换能器本身是一个机电耦合网络,为了更好地了解它,我们可把它同变压器的若干方面作一简要的比较。

一般说来总是要求换能器在相同频率下进行能量互换的,变压器也是在同一频率下实现低压电振荡能与高压电振荡能之间互换的,两者不同之处在于,变压器是通过磁耦合来实现电振荡能的互换的,而换能器是通过机电耦合系统来实现机电声能量互换的。

当变压器的初级电压通过磁路使次级有一电压时,相当于换能器中,机械一边通过机电耦合给电路一边一电压或电流,或电路一边通过机电耦合给机械一边一推动力或振速。所以变压器的次级与初级有一电压(或电流)的转换关系式,而换能器中电路一边与机械一边也有一转换关系式。

描述变压器能量传输时,有三个关系式:①初级电路关系式;②次级电路关系式;③初级与次级间的转换关系式。如前面所讲,在研究换能器的能量转换与传输时也需要三组基本方程式:①机械振动方程式;②电路状态方程式;③机电转换关系式。另外在研究变压器时常把初级元件反映到次级一边建立次级等效电路图或把次级元件反映到初级建立初级的等效电路图,这与水声换能器的“等效机械图”、“等效电路图”也是相对应的。

四、水声换能器的主要性能指标

描述一部水声换能器的性能指标有工作频率、机电耦合系数、机电转换系数、品质因数、方向特性、发射功率、效率、灵敏度等。根据实际用处不同,以及使用场合的不同对不同的换能器性能提出不同的要求,例如对军事上用的换能器与对水声测量仪器上用的换能器所提出的要求不一样,对发射和接收用的换能器所提出的要求也不一样。

(一) 发射换能器和接收换能器共同要求的性能指标

1. 工作频率

一部水声换能器的工作频率的选择是很重要的,它不仅直接关系到换能器的频率特性和方向特性,也影响到换能器的发射功

率、效率和灵敏度等重要性能指标,换能器的工作频率应该与整个水声设备的工作频率相一致。一般情况下,它是根据对整个水声设备的技术论证通过声呐方程来确定的。

对发射换能器工作频率就等于它本身的谐振基频,这样可以获得最佳工作状态、取得最大的发射功率和效率。主动式水声换能器处在接收状态下的工作频率是与发射状态下的工作频率近似相等的,而对被动式接收换能器而言它的工作频率是一个较宽的噪声频带,同时要求换能器自身的谐振基频要比噪声频带的最高频率还要高,以保证换能器有平坦的接收响应。

2. 换能器的机电转换系数 α 和机电耦合系数 k_e

水声换能器的机电转换系数 α ,是指在机电转换过程中转换后的力学量(或电学量)与转换前的电学量(或力学量)之比,即

$$\text{对于发射换能器} \quad \alpha = \frac{\text{力或振速}}{\text{电压或电流}}$$

$$\text{对于接收换能器} \quad \alpha = \frac{\text{应电势或应电流}}{\text{力或振速}}$$

换能器的机电耦合系数 k_e ,是描述它在能量转换过程中,能量互相耦合程度的一个物理量,其定义:

$$\text{对于发射器} \quad k_e^2 = \frac{\text{机械振动系统因力效应而获得的交变机械能}}{\text{电磁系统所储藏的交变电磁能}}$$

$$\text{对于接收器} \quad k_e^2 = \frac{\text{电磁系统因电效应而获得的交变电磁能}}{\text{机械振动系统因声场信号作用而储藏的交变机械能}}$$

对各种不同形式的换能器,其 α 与 k_e 均有具体的表示形式,我们将在有关章节里具体给出它们的表达式。

3. 换能器的阻抗特性

换能器作为一机电四端网络,它具有一定的特性阻抗和传输常数。由于换能器在电路要与发射机的末级回路和接收机的输入电路相匹配,所以在换能器设计时计算出换能器的等效输入电阻抗是十分重要的。

同时,还要分析它的各种阻抗特性,例如等效电阻抗、等效机械阻抗、静态和动态的阻抗、辐射阻抗等。

4. 换能器的品质因数 Q

我们在电子学课与声学课里已经学过电路的电品质因数 Q_E 和机械系统的机械品质因数 Q_M ,由于换能器本身是由机械系统和电路系统两大部分组成,所以人们也常用电路系统的品质因数 Q_E 和机械系统的品质因数 Q_M 来共同描写换能器的品质因数。通常是利用换能器的等效电路图和等效机械图,来求出换能器等效的 Q_E 和 Q_M 。

换能器的 Q 值与其工作频带宽度和传输能量的效率有密切的关系, Q 值的大小不仅与换能器的材料、结构、机械损耗的大小有关,还与辐射声阻抗有关。所以同一个换能器处于不同介质中的 Q 值是不相同的。

5. 方向特性

水声换能器不论是用做发射还是接收,本身都具有一定的方向特性。对声呐换能器做定向测位时,则要求它的方向特性曲线主花瓣尖锐些;当用来搜索目标时,就要求它的方向特性曲线扁平些。对于一个发射换能器,其方向特性曲线的尖锐程度决定了它的发射声能的集中程度。而对一个接收换能器,它的方向特性曲线的尖锐程度决定了其探索空间方向角的范围。所以水声换能器的方向特性的好坏直接关系到水声设备的作用距离。

6. 换能器的频率特性

换能器的频率特性是指换能器的一些重要参数指标随工作频率变化的特性。例如一接收换能器的接收灵敏度随工作频率变化的特性,对一个发射器要看它的发射功率和效率随工作频率的变化特性。对不同的换能器我们对它的频率特性也提出了不同的要求,例如:对被动式的换能器,要求它的接收灵敏度频率特性曲线尽量平滑,使其不论是低频噪声,还是高频噪声,只要是它的幅度

差不多,则水听器产生的输出电压的大小是近似相等的。

(二) 对发射换能器特别要求的性能指标

1. 发射声功率

它是描写一个发射器在单位时间里向介质声场辐射声能多少的物理量,它的大小直接影响声呐的作用距离。换能器的发射声功率一般是随着工作频率而变化的,在其机械谐振频率时可以获得最大的发射声功率。

此外,我们还经常遇到另外两种功率概念:一是换能器所消耗的总的电功率 P_e ,二是换能器的机械振动系统所消耗的机械功率 P_m 。

2. 发射效率

换能器作为能量传输网络,其传输效率通常采用不同的三个效率概念来描写:机电效率 $\eta_{m/e}$,机声效率 $\eta_{a/m}$ 和电声效率 $\eta_{a/e}$,其定义分别如下:

机电效率 $\eta_{m/e}$ ——换能器本身将电能转换为机械能的效率,其大小等于机械系统所获得的全部有功功率 P_m 与输入换能器的总的信号电功率 P_e 之比:

$$\eta_{m/e} = \frac{P_m}{P_e}$$

式中, $P_e = P_{en} + P_m$ 。 P_{en} 是表示换能器的电路系统的有功电磁损耗功率。换能器的机电效率越高,表示其电损耗功率越小。

机声效率 $\eta_{a/m}$ ——换能器的机械振动系统将机械能转换成声能的效率,其大小等于发射的声功率 P_a 与机械振动系统所获得的有功功率 P_m 之比:

$$\eta_{a/m} = \frac{P_a}{P_m}$$

式中, $P_m = P_{mn} + P_a$ 。 P_{mn} 是表示机械振动系统的摩擦损耗功率。所以换能器的机声效率越高,表明它的机械损耗越小。

电声效率 $\eta_{a/e}$ ——换能器将电能转换成声能的总效率,它等于发射声功率 P_a 与输入换能器的总的信号电功率 P_e 之比:

$$\eta_{a/e} = \frac{P_a}{P_e} = \frac{P_a}{P_m} \frac{P_m}{P_e} = \eta_{a/m} \eta_{m/e}$$

显而易见,换能器的电声效率等于它的机电效率与机声效率的乘积。

换能器的诸效率不仅与其工作频率有关,也与换能器的类型、材料、结构等方面的因素有关。对于发射换能器有时也用发射响应(发射灵敏度)和非线性失真系数二种性能指标。

(三) 对接收换能器特别要求的性能指标

1. 接收换能器的灵敏度(接收声场的响应)

这是对接收换能器最重要的一个指标,又有电压灵敏度、电流灵敏度之分。

所谓接收换能器的自由场电压灵敏度,就是指接收换能器的输出电压与在声场中引入换能器之前该点的自由声场声压的比值:

$$M_u(\omega) = \frac{U(\omega)}{P_f(\omega)} \quad (\text{V}/\mu\text{Pa})$$

式中, $U(\omega)$ 表示接收换能器电负载上所产生的电压(V); $P_f(\omega)$ 表示接收换能器接收面处自由声场的声压(μPa)。

有时也用 dB 表示:

$$N_u(\omega) = 20 \lg \frac{M_u(\omega)}{M_{u_0}(\omega)} \quad (\text{dB})$$

其基准灵敏度取为 $M_{u_0}(\omega) = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ 。 $N_u(\omega)$ 称自由场电压灵敏度级。

所谓接收换能器的自由场电流灵敏度 $M_i(\omega)$ (自由场电流响应),是指接收换能器的输出电流与在声场中引入接收器之前的自由声场声压的比值,记为