

压电声透通信的研究进展*

余紫莹 吴 鸣 许 勇 杨 军[†]

(中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室、通信声学实验室 北京 100190)

摘要 由于电磁屏蔽效应,传统的无线通信技术受限于金属障碍物的遮挡而无法应用。压电声透通信能够克服电磁无线通信方式的这一缺陷,在不破坏金属障碍物物理结构的前提下,通过声波穿透障碍物实现通信。本文在介绍金属隔物通信的基本原理和实现方式的基础上,总结阐述了压电声透通信目前国内外的研究进展,包括传输系统模型的建立、参数的设计、系统的搭建以及该技术中独特的能量传输方式,最后对影响压电声透通信系统性能的因素进行了分析。

关键词 金属障碍物, 声波, 压电换能器, 声透通信, 超声

中图分类号: O429

文献标识码: B

文章编号: 1000-310X(2013)05-0419-06

Progress in penetration-free piezoelectric acoustic communication through metal barriers

YU Ziying WU Ming XU Yong YANG Jun

(Key Laboratory of Noise and Vibration Research and Communication Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The Faraday shielding makes traditional wireless electromagnetic radiation through metal barriers ineffective. Co-axially aligned piezoelectric transducers could transmit signals through metal walls in the form of acoustic waves. By using this promising technique, data transmission could be achieved without physical penetrations. In this paper, principles and implementation methods of nondestructive communication through metal channels are introduced. Recent progress in penetration-free piezoelectric acoustic communication through metal barriers is reviewed, including system model, parameter design, practical applications as well as special power harvesting techniques in the system. Finally, influencing factors on piezoelectric acoustic communication system performances are investigated.

Key words Metal barriers, Acoustic waves, Piezoelectric transducer, Acoustic communication, Ultrasound

2012-12-18 收稿; 2013-01-08 定稿

*国家自然科学基金(11074279, 11004217)资助项目

作者简介: 余紫莹 (1988-), 女, 福建莆田人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

吴鸣 (1982-), 男, 副研究员, 硕士生导师。

许勇 (1973-), 男, 副研究员。

杨军 (1968-), 男, 研究员, 博士生导师。

[†]通讯作者: 杨军, E-mail: junyang.ioa@gmail.com

1 引言

利用声波进行通信，在水声领域中早已得到十分广泛的应用，而在空气中主要的通信手段还是电磁波。由于法拉第电磁屏蔽效应，电磁信号无法通过金属障碍物，人们通常使用电线穿透障碍物以实现通信。但是穿透障碍物的方法会带来很多问题：首先，它破坏了环境的密封性，在一些特殊的应用场景，如压力舱或存储特定化学物质的密封舱等，会造成气体、化学物质的泄漏或污染；其次，穿透障碍物破坏了其原有的物理结构，若该设备需要多次使用或式样翻新时，将带来昂贵的额外费用；再者，这一做法破坏了金属物体的整体性和坚固性，大大降低了其使用寿命。因此，实现金属的隔物通信是十分有必要的。采用超声波可以将信号或能量以声波的方式穿透金属，从而在避免物理破坏的同时达到通信的目的。

本文首先介绍了金属隔物通信的两种方式——感应电能传输（Inductive Power Transfer）和声学能量传输（Acoustic Energy Transfer），并对声学传输的各种手段进行了比较。随后介绍了声学传输中的压电声透传输，包括系统模型的建立、参数的设计和应用，使用压电声透进行数据传输的研究，以及与压电俘能相结合的研究情况。最后进行了文章总结。

2 金属隔物通信

金属隔物通信是指将信号从金属的一侧传输到另一侧，同时不破坏其物理结构的通信技术。目前实现金属隔物通信的方法主要有两种：采用电感耦合技术的感应电能传输和采用超声技术的声学能量传输。

感应电能传输是在障碍物一侧的两个点之间制造交变电流以激发磁场，从而达到穿透障碍物，同时避免物理和电路上的连接的目的。由于电场的趋肤效应，整个系统所能实现的传输效率非常低（20 mm 厚的不锈钢两侧能量传输效率仅为 4%），因此该传输只适用于薄层金属或者是趋肤深度 δ 很小的情况^[1]。此外，在一些具有消磁设计的特殊应用装置中，这种基于磁场传输能量和信号的方式也不行。

当障碍物的厚度大于趋肤深度时，就需要采用声学能量进行传输，这一方法的性能优于感应电能传输，且适用的信号带宽较宽。按照使用的换能器不同，声学传输又可以分成两种：采用电磁声学换能器的电磁声传输（Electro-Magnetic Acoustic Transfer）和采用压电换能器的压电声透传输（Piezoelectric Transfer）。

电磁声传输是利用磁弹性和金属障碍物表面的洛仑兹力来激发超声波，从而达到传输信号和能量的效果^[2]。其采用的线圈可以不和金属障碍物直接接触，对于接触面和耦合状况的要求较宽松。在不允许传输设备与金属障碍物接触的情况下，具有其独特的应用价值。然而这一方法产生的声波也受到激发磁场的方向和线圈类型的影响，传输效率很低且不适用于能量的传输。

压电声透传输主要包括压电俘能和声透通信。声透通信以超声为载体采用数字通信技术完成数据传输。压电俘能即从环境中提取或回收能量来为微电子器件供能，它可以为声透通信系统提供能量。压电声透通信在数据传输速率方面明显优于以上两种方法，并且也适用于能量传输。在对数据传输速率有一定要求和一些需要避免频繁更换电池的密闭容器的应用中，这一方法具有很大的优势。

3 压电声透传输

1997 年，Connor^[3]首次提出了利用安装在船壳两侧的压电换能器将连续声波信号从金属障碍物的一侧传到对侧的声透传输设想。一种典型的二维压电声透系统采用如图 1 所示的“三明治结构”，它由两个正对的压电换能器和中间夹层（金属障碍物，通常为平板或者有弧度的壳体）构成。激励换能器在外电场的作用下产生超声波，穿过金属障碍物，由接收换能器接收并转换成电信号，从而实现能量或信息的传递。

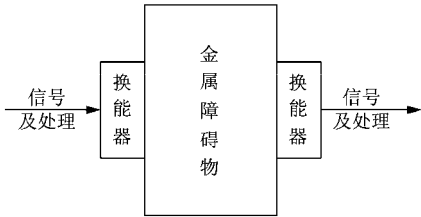


图 1 压电声透传输的三明治结构

3.1 模型设计和参数计算

我国华中科技大学、中南大学和美国 Nebraska 大学、California 大学，在数学和物理方面进行了压电声透系统的建模和分析研究。2003 年，Hu 等人^[4]采用双层压电板来模拟发射和接收声波用的压电换能器，可以将声波从平板的上方传送到下方并带动负载 Z_L （如图 2 所示）。他们建立了压电声透系统的动力学模型，通过声波方程和线性压电介质的基本方程，分析了厚度方向的振动，并指出换能器间的电能传输关系：系统的输出电压在前两阶共振频率处会达到峰值，但最大放大倍数并未发生在基频处。文章中模拟的系统，最大放大倍数在二阶共振频率处，若参数改变，最大放大倍数还可能出现在更高阶的共振频率处。系统能量传输的效率在驱动频率处达到峰值，但驱动频率并不完全等于系统的共振频率。

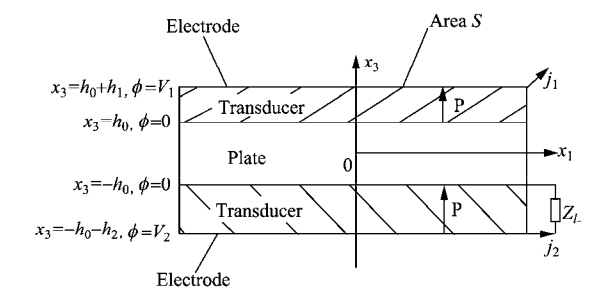


图 2 压电声透系统的数学模型示意图^[4]

图 2 所示的模型需要满足多个约束条件，如两介质界面的边界条件是声压连续且速度连续，界面需光滑且无摩擦力，因此在实际应用中具有局限性。为此，Sherrit 等人^[5]考虑了其它声学参数和电路连接的影响，提出了“无线声电直通”（Wireless Acoustic-Electric Feed-throughs, WAEF）技术。文献[5]中建立了网络等效电路模型，可用于在中心频率及更高阶共振频率处的能量和数据传输的仿真计算，并指出高 Q 值的压电换能器可以提高传输效率。2006 年，该团队指出适用传统的低熔点焊料在 WAEF 中并不能达到很好的耦合和能量传输效果^[6]，因此重点研究了换能器与钢板之间三种不同连接方式的性能：（1）背面压力钳定方式（如图 3 所示）；（2）横跨障碍物的夹具固定和油脂耦合方式（如图 4 所示）；（3）导电性环氧树脂耦合粘连方式（如图 5 所示）。经过测试，能量传输效率依次为 12%，53%和 40%。

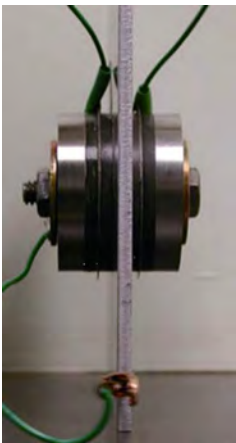


图 3 背面压力钳定方式^[6]

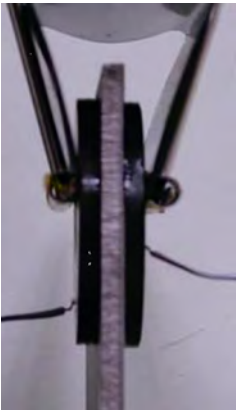


图 4 夹具固定油脂耦合方式^[6]

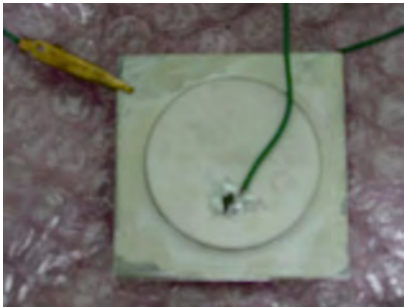


图 5 电性环氧树脂耦合方式^[6]

2007 年，Yang^[7]对压电传输的结构学建模方面的研究进展做了详尽的综述和理论分析。2008 年，Bao 等人^[8]采用等效电路模型法和有限元法建模方法对大功率压电声透系统进行了仿真和参数取值分析。2010 年，Wilt^[9]用有限元方法研究了影响超声通道能量传输效率的各种构造设计方面的原因，包括：（1）换能器和钢板间直接的耦合因素；（2）换能器和钢板的共振模式；（3）换能器尺寸；（4）障碍物的组成和尺寸。

3.2 压电声透通信

1999 年, Welle^[10]利用声透镜换能器的特性将声能进行聚焦, 并采用此结构实现了数据的双端通信。2000 年, 为了将志愿者观察系统计划(volunteer observing ship)中采集到的气象和海洋数据透过船体进行传输, Hobart^[11]提出一种名为“HullCom”的声学调制单元, 采用压电换能器和频移键控方法进行调制, 但传输速率仅能达到 20 baud/s。2003 年, Payton 的专利中采用两对工作在 MHz 频段的压电换能器分别实现了双端通信^[12]。2010 年, 哈尔滨工程大学曾武^[13]采用 2FSK 调制, 在 20 mm 厚的不锈钢板两侧达到了 1 kbps 的传输速率。但该研究主要集中在硬件电路的设计上, 均衡算法方面并未做特殊处理。需要指出的是, 传输速率和所选用的换能器的中心频率及带宽有关, 并不能单纯从其数值大小来判断算法的优劣。国外学者们研究了影响传输速率的各个因素, 并做了一系列的优化。

回波的存在是阻碍压电声透通信系统性能提升的一大重要因素, 因此早期的研究中, 数据传输速率都很低。2006 年, 美国 RPI 的 Murphy^[14]研究了各种不同的压电换能器的几何形状以及对应的数字通信方法的性能和回波传输情况, 并讨论了系统复杂度集中在发射端一侧的系统的优化方法。文献[14]实现了三种结构: (1) 单方向进行能量和信号传输的“单反射结构”, 将 burst 数字信号通过 DBPSK 调制, 传输速率可达到 500 bps; (2) 由一个通道自发自收的“双反射结构”, 用脉冲载波和 PAM 调制方式, 通信速率可达到 500 bps; 用连续波载波和 DBPSK/OOK 调制, 结合 LMS 自适应干扰抑制方法, 在钢板(148.5 mm 厚)两侧可以达到 5 kbps 传输速率; (3) 采用不同的声学阻抗脉冲载波调制数字信号的“反射能量结构”(又称“混合单反射结构”), 用反射的连续脉冲技术, 速率可达到 300 bps。随后, 该团队的 Saulnier 等人^[15]进一步讨论了后两种系统并综合二者的优势提出了一种新的“混合”系统。文献[15]研究了脉冲调制和连续波调制, 在 152.4 mm 厚的钢板中传输速率可提高至 500 bps。2007 年, 美国 Drexel 大学的 Primerano 等人^[16]针对压电声透系统中严重的回声问题以及传输速率高于 100 kbps 时产生的显著的码间干扰问题, 提出了采用一些预矫正滤波器和回声抵消的算法, 理论上在 6.35 mm 厚的钢板两侧将传输速率从

50 kbps 提高至 1 Mbps, 但这种方法局限于较简单的通道模型。2009 年, 该团队使用系统辨识算法进行了改进, 提出了一种更加准确的通道模型, 使用 IIR 滤波器实现去混叠预滤波器, 在原有系统上采用 PAM 编码就能达到 5 Mbps 的传输速率(提高了 5 倍)^[17]。2010 年, Primerano^[18]详细研究了各种数字通信算法和通道均衡技术。作者提出, 采用 OFDM 技术, 可以获得 30 Mbps 的传输速率。

回波的存在, 不仅限制了传输速率, 还限制了带宽。2011 年, Bagshaw 在他的专利“Apparatus and method for data transfer through a substrate”^[19]中, 提出了针对宽带数字信号的压电声透传输方式, 将信号调制到连续波载波上, 可达到 1 MHz 的传输速率。作者提出, 采用 40 MHz 左右的载波可把传输速率提高到 15~18 MHz。

2011 年, Hosman^[20]研究了大型船的角铁之间的压电声透通信(如图 6 所示, 在角铁长度方向依次安装了 4 对换能器对)。采用频移键控和均衡算法可在较低功率驱动下获得高信噪比的接收信号, 目前实现的宽带信号(260~330 kHz)传输速率可达到 360 bps。码间干扰仍是妨碍传输速率的一大因素。此外, 作者还发现该设备可以实现在相邻角铁之间的通信。



图 6 大型船角铁间的压电声透系统^[20]

3.3 压电声透通信中的能量传输

信息的传递是伴随着能量的传输而进行的。若传递的能量太过微弱, 接收端接收的信号就无法传递足够的信息。当压电俘能装置等能量传输效率达到一定程度可以满足通信要求时, 通信系统的研究重点在于如何优化系统和提升传输速率。在信息的传输过程中, 在接收端的富余能量可为其供能, 从而使接收端无需电源供电, 在传输数据的同时也实

现能量的传递，并可以把系统的复杂度集中到同一侧（如发射端）。能量传输的进展介绍如下：

2007 年, Shoudy 等人^[21]在 Murphy 研究^[14]的基础上, 改进并提出了一种加强的“反射能量”模型, 实现了在 57 mm 厚的钢板两侧可以达到 55 kbps 的数据传输速率, 同时获得 0.25 W 的能量。2011 年, Lawry 等人^[22-23]提出了一种通过超声同时传输高能量和高速数据的系统(如图 7 所示), 在 63.5 mm 厚的钢板两侧分别使用了两对换能器形成独立的数据和能量通道, 为提高频带利用率并降低通道间的影响, 采用了一种同步多载波通信策略(OFDM), 该系统能实现 12.4 Mbps 的数据传输速率及功率为

50 W 的能量传递（效率为 50%）。
2008 年, Kluge 等人^[24]实现了 7 mm 厚的铝质金属罩内外的信号和能量传输（如图 8 所示）, 系统在半双向双端方式下的数据通信传输速率可达到 1 kbps 且能传递 30 mW 功率的能量。

2010 年, Moss 等人^[25]在设计的压电声透系统中将换能器安装在永磁体上, 并可从铁磁体上拆下, 这种独特的固定方式更加方便换能器的装卸。此系统可达到 115 kbps 的传输速率并同时传输 340 mW 能量（效率为 34%）。

最后, 将压电声透通信方面代表性的系统研究参数归纳如表 1 和表 2 所示。



图 7 Lawry 等人的压电声透系统实物图^[23]

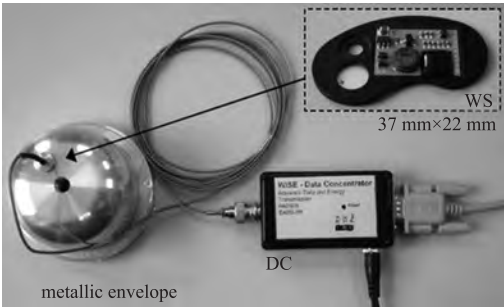


图 8 铝罩内外压电声透通信系统^[24]

表 1 压电声透通信代表参数归纳（数据传输）

来源	障碍物材料	厚度（mm）	传输速率（bps）	备注
Hobart 2000 ^[11]	未提及	未提及	20	FSK 调制
Murphy 2006 ^[14]	钢板	148.50	500	单反射结构, DPSK 调制
Murphy 2006 ^[14]	钢板	148.50	500	双反射结构, PAM 调制
Murphy 2006 ^[14]	钢板	148.50	5 k	双反射结构, DBPSK/OOK 调制, LMS 自适应干扰抑制方法
Murphy 2006 ^[14]	钢板	148.50	300	反射能量结构, 连续脉冲技术
Saulnier 2006 ^[15]	钢板	152.40	500	脉冲调制/连续波调制
Primerano 2007 ^[16]	钢板	6.35	1 M	预矫正滤波器, 回声抵消算法
Primerano 2009 ^[17]	钢板	6.35	5 M	去混叠预滤波器, PAM 调制
Primerano 2010 ^[18]	钢板	6.35	30 M	OFDM
曾武 2010 ^[13]	钢板	20.00	1 k	2FSK
Bagshaw 2011 ^[19]	船壳	36.00	1 M	预测采用 40 MHz 载波可提高至 15~18 MHz
Hosman 2011 ^[20]	角铁	未提及	360	MFSK 和均衡算法

表 2 压电声透通信代表参数归纳（数据和能量传输）

来源	障碍物	厚度（mm）	传输速率(bps)	能量（W）	效率（%）	备注
Shoudy 2007 ^[21]	钢板	57.00	55 k	0.25	未提及	加强的“反射能量”模型
Kluge 2008 ^[24]	铝罩	7.00	1 k	0.03	未提及	封闭金属空间
Moss 2010 ^[25]	铝板	1.60	115 k	0.34	34.00	采用永磁体便于拆卸
Lawry 2011 ^[22]	钢板	63.50	12.4 M	50.00	50.00	OFDM

4 总结

采用压电声透传输，可以在金属障碍物两侧实现非穿透性的隔物通信。本文对该领域做了综述，介绍了数学物理和电路模型的设计，并对数据传输以及带能量的数据传输的发展进行了分析。影响压电声透通信传输速率的主要因素为：通道的衰减作用，边界多次发射造成的回波以及高速传输时的码间干扰。

参 考 文 献

[1] GRAHAM D J, NEASHAM J A, SHARIF B S. Investigation of methods for data communication and power delivery through metals[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2011, 58(10): 4972-4980.

[2] GRAHAM D J, NEASHAM J A, SHARIF B S. High bit rate communication through metallic structures using electromagnetic acoustic transducers [C]. OCEANS 2009-EUROPE, 2009, Bremen: 1-6.

[3] CONNOR D J, CUMMINGS G F, STAR M J. Acoustic transformer with non-piezoelectric core[P]. U.S. Patent, 5,594,705. 1997-01-14.

[4] HU Y, ZHANG X, YANG J, et al. Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2003, 50(7): 773-781.

[5] SHERRIT S, BADESCU M, BAO X Q, et al. Efficient electromechanical network models for wireless acoustic-electric feed-throughs [C]. Smart Structures and Materials 2005: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, 2005: 362-372.

[6] SHERRIT S, DOTY B, BADESCU M, et al. Studies of acoustic-electric feed-throughs for power transmission through structures [C]. Proceedings of SPIE, 2006: 17102-17102.

[7] YANG J. Piezoelectric transformer structural modeling - a review[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(6): 1154-1170.

[8] BAO X Q, BIEDERMAN W, SHERRIT S, et al. High-power piezoelectric acoustic-electric power feedthru for metal walls [C]. Proceedings of SPIE, 2008: 69300z-1-69300z-9.

[9] WILT K R, LAWRY T J, SCARTON H A, et al. Mechanical design implications on power transfer through thick metallic barriers using piezoelectric transducers [C]. Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2010, Vancouver, British Columbia, Canada: 1-10.

[10] WELLE R P. Ultrasonic data communication system[P]. U.S., 5,982,297. 1999-11-09.

[11] HOBART E, ALLSUP G, HOSOM D, et al. Acoustic modem unit [C]. Proceedings of MTS/IEEE Oceans Conference and Exhibition on Where Marine Science and Technology Meet, 2000, Providence, RI: 769-772.

[12] PAYTON R M. System for acoustically passing electrical signals through a hull[P]. U.S., US 6,625,084 B1. 2003-09-23.

[13] 曾武. 用于金属密闭容器的超声通信系统研制[D]. 工学硕士. 哈尔滨工程大学. 2010.

[14] MURPHY T L. Ultrasonic digital communication system for a steel wall multipath channel: Methods and results[D]. M.S. Rensselaer Polytechnic Institute. 2006.

[15] SAULNIER G J, SCARTON H A, GAVENS A J, et al. Through-wall communication of low-rate digital data using ultrasound [C]. Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 2006: 1385-1389.

[16] PRIMERANO R, WANUGA K, DORN J, et al. Echo-cancellation for ultrasonic data transmission through a metal channel [C]. Proceedings of the 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2007, Baltimore, MD, United states: 841-845.

[17] PRIMERANO R, KAM M, DANDEKAR K. High bit rate ultrasonic communication through metal channels [C]. 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2009, Baltimore, Maryland, USA: 902-906.

[18] PRIMERANO R A. High bit-rate digital communication through metal channels[D]. Ph.D. Drexel University. 2010.

[19] BAGSHAW J M, KENT L W. Apparatus and method for data transfer through a substrate[P]. U.S. Patent, US 7,894,306 B2. 2011-02-22.

[20] HOSMAN T, YEARY M, ANTONIO J K. Design and characterization of an mfsk-based transmitter/receiver for ultrasonic communication through metallic structures[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2011, 60(12): 3767-3774.

[21] SHOUDY D A, SAULNIER G J, SCARTON H A, et al. An ultrasonic through-wall communication system with power harvesting [C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2007, New York, United states: 1848-1853.

[22] LAWRY T J, SAULNIER G J, ASHDOWN J D, et al. Penetration-free system for rransmission of data and power through solid metal barriers [C]. The 2011 Military Communications Conference, 2011: 389-395.

[23] LAWRY T. A high performance system for wireless transmission of power and data through solid metal enclosures[D]. Ph.D. Rensselaer Polytechnic Institute. 2012.

[24] KLUGE M, BECKER T, SCHALK J, et al. Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes [C]. IEEE Sensors, 2008: 41-44.

[25] MOSS S, SKIPPEN J, KONAK M, et al. Detachable acoustic electric feedthrough [C]. Proceedings of SPIE, 2010: 764745-1-764745-12.