

# 超声传输特性和超声传感系统研究

许天增<sup>1</sup>, 许克平<sup>2</sup>, 许茹<sup>2</sup>, 许水源<sup>1</sup>, 程恩<sup>2</sup>, 童峰<sup>1</sup>

(1. 厦门大学海洋学系; 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 研究了空气介质中超声波的辐射、传播、散射和接收等规律性, 作为超声传感系统设计的理论基础和具体参数选择的依据。简述 3 种具有创新性的超声传感系统: 混凝土喷射机械手超声测距测向系统、超声地形障碍检出传感系统和移动机器人超声传感系统的设计和实验结果等。

**关键词:** 超声传输; 超声传感器; 移动机器人

**中图分类号:** TB 551

**文献标识码:** A

通常频段超声波传输不受烟雾、粉尘的影响。超声测距仪的测量距离和精度能满足一般工程上的需要, 且具有成本低、使用方便等优点, 已广泛地使用于工矿、水文等领域的定向测距。但通常的超声测距仪难以形成移动机器人的超声传感系统, 因为这类超声传感系统要有高的稳定性和可靠性, 测量的精度也要求很高。有些传感器必须工作于诸如坑道混凝土喷射现场或风沙雨雪的野外环境, 声波传输条件和受感目标复杂而多变, 膜片式超声换能器无法使用, 通常的信号处理方式也不适用。因此, 设计使用于特殊要求的移动机器人超声传感器, 就成了当前被广泛关注的一个研究课题。本文从超声传输特性的研究入手, 寻找影响超声传感器性能的原因和解决的途径, 研制了具有独创性的 3 种超声传感系统: 混凝土喷射机械手、地形障碍和自动导引车超声传感系统。这些超声传感系统的设计原则和实验结论等在文中作了简要的论述。

## 1 混凝土喷射机械手超声传感系统

在现代快速施工, 特别是野战工事快速构筑等作业中, 混凝土通过输料车、湿喷机并最终由喷射机械手上的喷嘴直接喷射于受喷基底面上。实验证明, 当喷嘴与受喷面距离 80 cm, 且喷射流与基底面垂直时, 混凝土反弹而溅落在地面的比例最少。以往是依靠人力来操作的, 这是一项极费体力而且定距和定向均很难精确控制的操作。如何实现喷射机械手的智能化, 使得喷嘴基本上处于最佳工作状态, 就成了一个亟待解决的国际难题。

从原理上说, 采用超声传感器有可能解决此难题。但由于喷射机械手作业条件的恶劣和受

收稿日期: 2000-02-15

基金项目: 国家 863 计划(863-512-10-21)和国家自然科学基金(69385006)资助项目

作者简介: 许天增(1936- ), 男, 教授

感目标(如坑道爆破面)的复杂和多变,具体的实现却很困难,需要对超声传输特性和传感器进行仔细的分析和研究。根据施工作业的具体要求,混凝土喷射机械手超声传感系统——超声测距定向仪的具体指标如下:1) 基底取样线度:25 cm 左右;2) 测距范围及精度:0.7~3 m,  $\pm 5$  cm;3) 垂直和水平测角范围及精度:0 $^{\circ}$ ~45 $^{\circ}$ ;  $\pm 5$ ; 大于45 $^{\circ}$ 以45 $^{\circ}$ 计;4) 避障探测:喷嘴前方小于70 cm、左右方向小于50 cm 的障碍物。为了探测喷嘴至受喷面的距离,只需测量装于喷嘴上的超声换能器辐射声脉冲并经受喷面反射来的声波传输的时间,在声速已知的条件下,就可算得距离的数值。为了测量喷射方向与受喷面在水平和垂直方向的倾角,就要由指向性很尖锐的几个换能器布阵来实现,以便由水平方向和垂直方向上的相对声程差换算成倾角。在阵列中,距离可取多个换能器的测距平均值。有时喷射方向与受喷面的倾角有较大的突变,测距范围要加大,留有余地地取3 m。在实际的操作中,当测量距离大于或小于80 cm,就给控制系统传递喷嘴“前进”或“后退”的信息;当喷射方向与受喷面有大于5 $^{\circ}$ 的倾角时,就传递使喷嘴左、右或俯、仰转动的信息,而无需传送具体的倾角值。

如上所述,这类超声传感系统的工作原理虽然较简单,但在具体实现上却碰到许多技术难题,必须仔细地逐一解决,才能实现稳定、可靠的超声传感。

1) 本传感系统工作于坑道中的湿喷机上,换能器表面受到混凝土(特别是石块)的冲击和堆积。使用通常的纸质或薄金属振动膜片作声波的辐射和接收面是不可能的。考虑采用压电陶瓷片并作必要的钢片粘合,以获不同的工作方式和频率。但由于钢片和空气的声阻抗相差达 $10^5$ ,二者的阻抗匹配极为困难。为解决此难题,除提高发射功率和接收灵敏度外,着重研究了耦合层的特性和应用,从而大大地提高了空气介质中超声的辐射和接收性能,并作为换能器防碰和防腐的隔离层。

2) 余振的克服:本装置需采用多个换能器的阵列,以收、发合一为宜。但气介中换能器负载轻,加上高增益接收电路的拖延和换能器支架等的耦合,在较大功率激励下,将产生较长的余振,使近距离探测成为不可能。采取适宜的振动方式,降低Q值和去机械耦合以及采用灵敏度时间控制电路等综合措施,可使余振大大减小,符合整机要求。

3) 锐指向性的获得:喷射面取样判断的面积为线度25 cm,因此换能器的指向性必须很尖锐,以提高方向分辨率和提高测距精度。并且要抑制旁极大,以免产生误判。为此要采用较大发射面的换能器,工作于较高的频率,特别要注意换能器的安装方式,就可获得半功率全角为2 $^{\circ}$ ~3 $^{\circ}$ 的尖锐指向性,满足本传感器的要求。

4) 小掠射角下回波的获得:在反射壁起伏大的情况下,超声波有时以小掠射角入射。如有关参数选择不当,入射声能将在通常反射方向行进,反向散射波很弱,检测就很困难。解决办法除提高功率外,尚需提高工作频率,使声波波长远小于壁面起伏线度,这时可把表面视为粗糙的,漫散射起主导作用,就有一定分量的反向散射被接收。当然,工作频率的提高,传输衰减,特别是信道中散射效应提高了。功率提高也使余振加宽。这些相互制约的因素要在实践中仔细调整而最后确定。

5) 换能器工作于垂直向上及附近时,混凝土在其表面堆积可达几厘米厚,严重地影响超声波的辐射和接收,必须及时给以清除。

6) 混凝土喷射产生的回声干扰信号及其影响的抑制:上述的干扰信号在某些工况下是很强的,特别是在喷射顶面反射的混凝土落在距离换能器较近时,因此就有一个在强干扰背景下

如何正确地检测受喷面的回声信号问题, 否则, 机械手将会发生频发性错控事件。为此, 采用了数字滤波及数据处理予以解决。与此相配套的技术环节是采用快速的 A/D 完成对回波脉冲信号进行离散采样。

7) 受喷面的回波幅度将随声波掠射角和表面粗糙程度等的不同而改变。因此, 若采用固定振幅门限来检测回波脉冲将影响测距和测向的稳定度和精度。为此, 采用自适应振幅门限的措施予以解决。

混凝土喷射机械手超声传感系统进行了多方面的实验。有关测距和测向的典型数据如表 1~3 所示。

在静态测距、测向符合设计要求的基础上, 本传感系统在坑道中进行了一系列

的现场实验, 证明了本系统有很强的抗干扰性能, 包括电声干扰和混凝土溅落形成的回波干扰。当进行竖直面喷射时, 换能器表面没明显的混凝土堆积, 回波幅度大; 但进行坑道顶端喷射时就有堆积现象, 经清除后能获得稳定回波。传感系统测距精度与上述数据一致, 测向指示正确。随后本传感系统在坑道中与机械手进行自动操作联机实验, 工作正常, 从而实现了混凝土喷射机械手的全自动化工作。

## 2 超声地形障碍传感系统

国内外有各类超声测距测向仪产品。如上所述, 这类仪器依靠目标回波来测定目标的距离, 并依换能器的指向性来探测目标的方位。超声测距仪已广泛地使用于工矿、交通和水文等领域<sup>[1]</sup>, 也有使用于某些战车及移动机器人的报导<sup>[2,3]</sup>。

通常的超声测距测向仪作用距离较近, 如 10 m 左右, 测向的精度很低, 如 20°~30°。典型的产品如美国波拉公司的超声测距仪, 其最大测距为 10.6 m, 测向精度为 23°<sup>[4]</sup>。特别是此类仪器所使用的超声换能器采用了膜片振动方式, 虽然易于与空气介质耦合, 发射效率和接收灵敏度均较高, 但其稳定性较差, 更不能使用于风沙、雨雪的野外等恶劣的环境中。

本文论述的超声地形障碍检出传感系统要求能工作于野外恶劣的环境, 具有两种既独立又互相联系的功能: 地形障碍物的测距、测向和障碍物某些参数的测量, 其具体指标如下:

1) 超声测距、测向仪: (1) 最小识别面积: 18 m 位置上的 35 cm × 35 cm 的硬质目标; (2) 纵向检测范围: 可同时检测 3 m~18 m 内的上述目标; (3) 纵向检测精度: 检测距离的 0.5%; (4) 横向检测范围: 由几个横向开角为 4° 的换能器阵列而成; (5) 横向角度分辨率: 4°~6 db 作为判断标准)。

2) 超声地形障碍要素检测系统: (1) 凸起障碍物: 对于宽度 > 0.5 m 的障碍物, 高度范围

表 1 测距(18°)

Tab 1 Ranging values (18°)

米尺读数/cm	165	154	100	80
测量数值/cm	164	153	101	79

表 2 水平测向

Tab 2 Horizontal bearing values

测角器读数/(°)	0	4	8	11	15	18	22	28	31	37	47
测量值/(°)	3	3	5	7	11	17	25	28	30	37	48

表 3 垂直测向

Tab 3 Vertical bearing values

测角器读数/(°)	0	3	8	11	15	19	26	31	34	40
测量值/(°)	4	6	9	9	16	19	22	26	31	37

在 0.4~0.7 m, 最大相对误差小于 10%; (2) 突变下凹地形(如沟): 最小分辨宽度为 0.5 m, 宽度在 1 m 以内的最大相对误差小于 15%. 深度在 0.4~0.7 m 范围内, 误差小于 10%.

系统的探测过程为: 先进行障碍目标存在及其距离、方位的探测, 然后使机器人靠近障碍目标(如 5 m 左右)进行静态的有关地形要数的测量, 从而为某些智能机器人提供近距离障碍目标的有关信息

本超声地形障碍传感系统探测距离较远, 特别是地形要数的探测与障碍物和地面的散射特性密切相关. 因此, 必须深入地研究超声辐射、传播、散射和接收等特性, 研究声信号的起伏规律和统计检测方案, 作为此类超声传感器设计和具体参数选取的依据

设计本超声传感系统首先要选取其最佳工作频率, 它在一定程度上决定了本系统的性能. 为此, 仔细地研究了超声反向散射强度与不同路面(柏油路、沙土路和石板路等)粗糙度、工作频率和掠射角等的变化关系, 研究了超声传播衰减与温度、湿度和工作频率的变化关系, 并根据本传感系统工作距离的要求, 经过综合分析和折衷, 最后确定了最佳工作频率. 在已知超声传播衰减的条件下, 所需的辐射声功率就可估算出来

本超声传感系统最关键的器件是超声换能器. 它除了能辐射上述估算的声功率外, 还要有符合本系统要求的特殊指向特性和能工作于风沙、雨雪的恶劣环境. 本超声换能器除了可用上述喷射机械手超声传感系统的压电陶瓷加上耦合层的方案外, 专门研制了由纵向复合振子、变幅杆和弯曲振动阶梯圆盘组成的超声换能器<sup>[5]</sup>, 它不但有较高的发射效率和接收灵敏度, 其主极大很尖锐, 达 ±2°; 特别是旁极大的衰减可达 18 db, 为抗侧向回波干扰创造了极为有利的条件.

本超声传感系统将安装于野外工作的移动机器人上, 背景噪声较高. 对于数字化的超声传感器的抗干扰问题就很突出, 因为每一个噪声都可能形成一个误判, 整机的虚警概率就很高. 此外, 本系统工作于恶劣的野外条件, 信道中气流的影响大, 回波信号的起伏也很大, 如可达 15 db 左右. 因此, 系统的检测概率也可能很低. 为了提高整机的可靠性和稳定性, 仔细地研究了声信号起伏和噪声的统计规律, 采取了相应的自适应信号处理方案和统计判决方式<sup>[6,7]</sup>, 这时发射 M 次脉冲, 取 K 次统计平均, 就可容许 (M-K) 个脉冲丢失, 这样就大大地提高了整机的检测概率. 由于在 M 个脉冲的期间内出现同周期的 K 个噪声的概率很低, 因而增强了系统抗干扰水平. 此外, 测量的精度也有很大的提高, 因为这类测距误差遵从于高斯分布率.

本超声传感系统进行了多次的实验, 其典型结果如表 4~7 所示

1) 纵向测距: 测距值已依声速随温度变化进行了自动校正. 目标为 35 cm × 35 cm 的木质平面

表 4 测距数值  
Tab 4 Ranging values

米尺读数/m	5	10	15	20	23
测量数值/m	4.99~5.01	9.95~9.97	14.95~14.98	19.88~20.12	23.13
最大相对误差/%	0.2	0.5	0.33	0.60	0.56

2) 地面凸起障碍物高度测量: 以木板为模拟障碍物. 典型的数据如表 5 所示

表 5 高度测量数据

Tab 5 Height measurement

米尺读数/cm	35	40	50	60	70
测量数值/cm	33~ 37	37~ 39	46~ 48	64~ 65	67~ 68
最大相对误差/%	5.7	7.5	8	8.3	4.3

3) 凹坑深度: 把障板放于坑沿, 改变其高度模拟深度值 测量结果如表 6 所示

表 6 深度测量值

Tab 6 Depth measurement

米尺读数/cm	42	54	60	70
测量数值/cm	43~ 45	51~ 53	55~ 57	68~ 71
最大相对误差/%	7.1	5.6	8.3	2.9

4) 凹坑宽度: 典型测量数值列于表 7.

表 7 宽度测量数值

Tab 7 Width measurement

米尺读数/cm	50	70	90	110	130	150	170	190	200
测量数值/cm	50~ 57	60~ 77	77~ 96	99~ 111	116~ 131	135~ 158	175~ 182	192~ 210	202~ 219
最大相对误差/%	14	14	14	10	11	10	7.1	9.5	10.5

实验表明, 本传感系统中的超声测距测向仪可在恶劣的野外环境中灵敏、可靠地探测障碍目标, 测距较远, 方向分辨率较高 现已开发了通用的远距离高精度的超声测距测向仪<sup>[8]</sup>.

实验也指出, 在障碍目标较规则, 地面粗糙度相对于声波波长还较大等条件下, 本传感系统可在近距离静态下测量障碍物的高度等地形要素 但对于复杂而多变的障碍物和地面, 采用实验性的单波束探测方案就很难适应, 而要采用锐指向性、多波束的综合传感和融合才有可能实现, 包括如喷射机械手超声传感器对路面倾斜度的探测

### 3 移动机器人超声传感系统

计算机集成制造系统(CMS)的广泛应用成为现代工业的一个迅猛发展的趋势 而自动导引车(AGV)是CMS工程中的一个关键组成部件 国内外都强调了自动导引车及其自动物流输送装置和面向应用环境的新型传感器的开发研究

当前国内外移动机器人, 特别是AGV 实用的导引方法主要有埋式的电磁导引和激光导引, 并形成了相应的产品 使用最广泛的电磁导引方式虽有导引精度高、通讯及控制方便等优点, 但这种导引方式缺乏机动性和灵活性, 不适用于自由路径模式的AGV, 即使使用于固定路径模式, 也不具备车体定位及停车控制和避障功能, 还要采用诸如光学传感器和超声传感器等的融合 激光导引方式则存在需配置高精度的机械扫描控制带来的复杂和耗时的问

从原理上说, 采用超声传感器有可能实现AGV 路径导引、车体定位、工作站停靠和避障等多种功能, 无需采用多种传感器的融合技术; 而且超声探测不受光照、烟雾等影响, 成本低,

使用方便,具有推广应用的前景 但至今国内外尚未实际使用超声传感器于 AGV 导引上,其主要原因在于不能真正解决超声导引的稳定性、可靠性和精确性 我们把解决这些问题作为技术关键处理,就有可能研制成实用化的移动机器人超声传感系统

通常的超声测距是采用如雷达的回波探测方式,回波信号波形就与目标特性有关 碰到与波长相对而言的粗糙表面的目标,就要产生漫反射;碰到平整的表面,就产生近于镜面反射,因此,回波信号起伏很大,以至于完全被背景噪声掩盖,整机的检测概率就很低,可靠性差 本文采用收发分开超声被动测距方案,接收直达的声信号并作相应的信号处理,就可从方案上解决因目标特性差异产生的信号起伏,提高了整机可靠性 而且,这方案无余振问题,盲区小,更适宜于移动机器人近距离高精度的超声传感

对于一般超声换能器,其指向性较宽,主极大一般为 20 以上 因此,采用上述回波探测方案,测向的精度就很低,与移动机器人的定向要求相差甚远;而且通常的超声测距的信号处理方式是基于回波形状基本不变这一理想前提的 但实际的回波波形受到换能器及其布局、信道特性等的影响,波形是复杂而多变的 因此,测距的精度较低,也不能满足移动机器人导引的要求

我们仔细地考虑超声信号的发射、传播和接收过程对信号检测的影响,研究了超声换能器频率响应较窄和不平坦以及发射、接收换能器角度偏向、空气介质吸收、散射等信道特性产生的波形畸变 在此基础上进行了超声换能器和传输信道的均衡处理

一种采用 LMS 自适应时延估计(LMSTDE)适用于全向高精度测距处理方法,如图 1 所示<sup>[9,10]</sup>.

LMSTDE 的基本原理是用 LMS 算法对不同延迟值对应的输入信号进行自适应滤波,搜索出与参考信号有最小均方误差的延迟值即为延迟估计值 其输入信号、误差表

达式、自适应滤波器系数更新公式及均方误差表达式为

$$X_k(\tau) = S_k(n - \tau)$$

$$e_k(\tau) = y_k - W_k^T(\tau) \cdot X_k(\tau)$$

$$W_{k+1}(\tau) = W_k(\tau) + 2\mu \cdot e_k(\tau) \cdot X_k(\tau)$$

$$\zeta(\tau) = \sum_{k=0}^n e_k(\tau)$$

其中,  $\mu$  为收敛因子;  $\tau$  为延迟;  $S_k$  为输入信号,  $y_k$  为参考输出信号;  $X_k$  为 LMS 滤波器输入信号;  $W_k$  为滤波器权重系数

LMSTDE 算法通过求出使均方误差  $\xi(\tau)$  ( $n$  为自适应滤波器输入信号长度) 为最小的延迟值  $\tau$  来进行延迟估计.

如以理想换能器(平坦、宽带)的输出信号为自适应滤波器的输出参考信号,LMSTDE 算

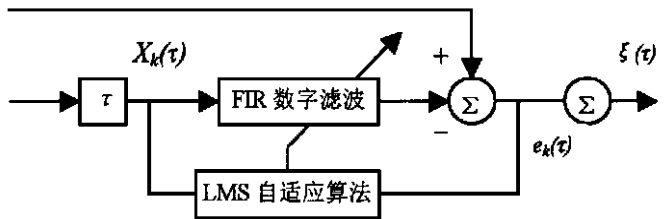


图 1 LMSTDE 算法原理框图

Fig 1 The basic principle of LMSTDE

法实际上是一个自适应的换能器-信道均衡器,它通过LMS自适应滤波消去了实际换能器与理想换能器的频率特性差及信道由于斜向入射产生的传递特性对输出信号产生的影响,使整个系统保持平坦的频率响应,而输出均方误差最小即均衡效果最好时的输入信号时延值当然就是信号的真实时延值

由此可知,LMS TDE 算法不仅可克服斜向入射产生的波形畸变,而且可以使实际换能器的频率特性接近理想换能器,从而获得高精度的延时估计结果

LMS TDE 算法每个时延值迭代周期的乘法运算量与自适应滤波器阶数的平方成正比,而时延值寻优时需对搜索范围内所有的时延值进行搜索,这样就造成了LMS TDE 算法运算量大,特别是滤波器阶数大时甚至达到不能容忍的程度,从而降低了系统的实时性

为了减少运算量,我们从减小时延值的搜索范围来考虑,因为基于信号波形的处理方法在垂直入射时精度高,斜入射时由于波形畸变精度下降,入射角度越大,影响越大,考虑到普通处理方法运算量远小于LMS TDE 的运算量,故可以用普通方法先初定LMS TDE 的时延搜索范围,再进行最佳时延值的搜索,这样可有效地减少其计算量

适用于AGV 超声系统高精度测距(如达几毫米)信号处理方法的研究和采用是需确实解决的一个问题,在高精度测距的条件下,就可依一定的测向算法获得高精度的测向值(如1°)。我们探讨了脉冲波和连续波工作方式、相关测距和可变阈值检测等方案<sup>[11,12]</sup>。这些信号处理方案各有其特殊性,对于AGV 低精度的避障、中等精度的车体定位和路径导引以及高精度的工作站停靠等不同要求,可灵活地选用

抗干扰是提高超声传感系统稳定性和可靠性的另一问题,由于AGV 上的超声传感系统的工作距离较远,如20m 以上,信号幅度将较小,而且AGV 工作环境的噪声,如来自AGV 自身和各类生产设备产生的噪声级有可能较高,因此,这类超声传感器可能工作于较低的信噪比条件下,降噪处理就显得特别重要。在分析了典型工业设备超声背景的基础上,分析和研究了多种降噪特别是抑制窄带噪声的处理方法在移动机器人上应用的可能性,包括了硬件降噪和软件降噪处理,如累加法、小波降噪和基于神经网络的窄带高斯噪声处理等<sup>[13]</sup>。

在上述研究工作的基础上,开发了采用本导引方案的实验性AGV 平台,进行了定位、固定路径导引、自由路径导引、工作站停靠、避障等功能的各项实验工作。实验性AGV 的主要性能指标如下:

- 1) 10 m 范围内固定路径导引精度为: 横向 $\pm 5$  cm, 纵向 $\pm 3$  cm;  
5 m 范围内固定路径导引精度为: 横向 $\pm 1$  cm, 纵向 $\pm 2$  cm;
- 2) 10 m 范围内自由路径导引精度为: 横向 $\pm 10$  cm, 纵向 $\pm 5$  cm;  
5 m 范围内自由路径导引精度为: 横向 $\pm 5$  cm, 纵向 $\pm 3$  cm;
- 3) 定位及停靠距离控制精度为: 横向 $\pm 5$  mm, 纵向 $\pm 3$  mm;
- 4) AGV 车体停靠偏角测量精度:  $\pm 1^\circ$ ;
- 5) 避障能力: 能探测距正前方 $\pm 30^\circ$  距离4 m 内能形成障碍的目标

实验结果表明,本导引方案可以满足固定路径和自由路径AGV 导引的各种功能需要,并具有安装使用方便、成本低的特点,除可用于CMS 中的AGV 导引外,本系统还可用于室内结构性环境中工作的各类服务类移动机器人

由于以上实验工作是在实验室进行,尚须在AGV 使用现场进行相应的实验,此外,系统

的一些信号处理方案和性能指标也还有进一步开发和提高的潜力, 还需今后继续总结和提高

参与本研究并做出许多重要工作的人员还有王清池教授、许肖梅、许鹭芬副教授和杨海华讲师等人

## 参考文献:

- [1] Barshan B, Kuc R. A sonar-like sonar system for obstacle localization[J]. IEEE Trans On System Man and Cybernetics, 1992, 22(4): 636- 646
- [2] Bill Triggs Model-based sonar localization for mobilb robots[J]. Robotics and Autonomous System, 1994, 12: 173- 186
- [3] Rom an Kuc Three-dimensional tracking using qualitative bionic sonar [J]. Robotics and A utonomous System, 1993, 11: 213- 219
- [4] Biber C, Ellin S, Shenk E, et al The Polaroid ultrasonic ranging system, Audio Engineering Society Preprint 1696(A - 8)
- [5] 王清池, 吴在勋 超声地形障碍检出系统换能器的研制[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1997(3): 229 - 233
- [6] 许天增 数字时间相关积累(I)-自相关积累[J]. 声学学报, 1990(3): 208- 214
- [7] 许天增 数字时间相关积累(II)-互相关积累[J]. 声学学报, 1990(4): 241- 245
- [8] 童峰, 许水源, 许天增 一种高精度超声波测距处理方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1998, 37(4): 507- 512
- [9] 童峰, 许天增 一种用于移动机器人导航的全向高精度超声测距处理方法 中南工业大学学报, 中国 2000 年机器人学大会专辑[C]. 2000(Spec 1): 292- 295
- [10] 童峰, 许肖梅, 许天增 基于遗传算法的超声 LMS 自适应时延估计[J]. 应用声学, 2000, (4): 292- 295
- [11] 杨劲松, 王敏, 黄心汉 超声波可变阈值测距装置[J]. 电子技术应用, 1998, (7): 7- 9
- [12] 翟国富, 刘茂恺 一种实时高精度的机器人用超声波测距处理方法[J]. 应用声学, 1996(1): 35- 38
- [13] 涂国勇, 杨乐平, 崔吉俊 基于小波的信噪分离方法[J]. 国防科技大学学报, 1999(4): 40- 43

## Study on the U ltrasonic T ransm ission and U ltrasonic Senors

XU Tian-zeng<sup>1</sup>, XU Ke-ping<sup>2</sup>, XU Lu<sup>2</sup>, XU Shui-yuan<sup>1</sup>,  
CHEN G En<sup>2</sup>, TONG Feng<sup>1</sup>

(1. Dept of Oceanog, Xiamen Univ.,

2. Dept of Elec Eng, Xiamen Univ, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The properties of ultrasonic radiation, propagation, scattering and recieve in air medium are analyzed in this paper. Three new kinds of ultrasonic senors used in robots have been developed. The basic design considerations of the senors and experimental results are described in brief.

**Key words:** ultrasonic transm ission; ultrasonic senor; mobile robot