

# Pattern 时延差编码四信道 水声通信技术研究

殷敬伟<sup>1†</sup> 韦志恒<sup>1</sup> 惠俊英<sup>1</sup> 姚直象<sup>1,2</sup>

(1 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

(2 海军工程大学信息与电气工程学院 武汉 430033)

**摘要** 本文所研究的是基于 Pattern 时延差编码 (PDS) 体制下的水声通信技术。PDS 水声编码体制利用 Pattern 码片出现在码元窗的时延差值进行时延编码, 通过码元分割, 有效的降低了水声信道的多途干扰; 通过频率分割划分四个通信信道, 增加通信速率至 1000bit/s。在接收端利用带通滤波器来实现通信信道分割, 每个信道再应用拷贝相关器实现码元分割并估计出时延差值, 完成译码。仿真实验表明, 该系统适合于大量不同水声信道高可靠性工作, 为水声通信网络化打下坚实基础。

**关键词** Pattern 时延差编码, 时延估计, 多径干扰, 水声通信

## Study of 4-channel underwater acoustic communication based on pattern time delay shift coding system

YIN Jing-Wei<sup>1</sup> WEI Zhi-Heng<sup>1</sup> HUI Jun-Ying<sup>1</sup> YAO Zhi-Xiang<sup>1,2</sup>

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

(2 College of Information & Electric, Navy Engineering University, Wuhan 430043)

**Abstract** The underwater acoustic communication based on the Pattern Time Delay Shift (PDS) system is studied. PDS system uses the time delay shift values of the pattern to code the information. The system decreases the multi-path interference by code division, and has 4 communication channels by frequency division. The rate of communication is 1000bits/s. The receiver separates the channels by means of band-path filters, and performs decoding by 4 correlators to estimate the time delay shift. The simulation experiments show that the PDS system could adapt many underwater acoustic channels for high data rate and high reliability. This study provides the foundation for underwater acoustic networks.

**Key words** Pattern time delay shift coding, Estimation of time-delay, Multi-path interference, Underwater acoustic communication

2004-11-17 收稿; 2005-09-12 定稿

作者简介: 殷敬伟 (1980-), 男, 黑龙江省尚志市人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要从事水声通信技术研究。

韦志恒 (1982-), 男, 硕士生。惠俊英 (1939-), 男, 教授, 博士生导师。姚直象 (1976-), 男, 博士生。

† 通讯联系人 Email: jingweiyin@163.com

## 1 引言

水声通信是一个快速发展的科研领域。它的工程应用不仅限于军事,而且也在向商业领域延伸。许多当前正在发展的应用,都要求进行实时通信,这不仅是点对点的链路,而且要成网络配置的形式<sup>[1]</sup>。当今水声通信的前景就是由活动和静止节点共同构成的水声数据通信网。国外一些机构已经开始组建水下通信网络,如建立的水下自治采样网络(Autonomous Oceanographic Sampling Network, AOSN)<sup>[2]</sup>,可以提供多个网络节点间交换数据的功能;美国性能最好的水下信息作战系统 DADS (Deployable Autonomous Distributed System),迄今已完成三次定型海试,该系统可用于全球信息化海战,也可用于信息化的海洋研究与开发。但是国内在这方面的研究几乎是一片空白。建立高速水声数据通信系统,在军、民两方面均日益具有重要的应用价值。

水声信道是时间弥散的慢衰落信道,伴随有多普勒不稳定性,其可用带宽只有几千赫兹<sup>[3,4]</sup>。因此在带宽受限的水声信道中要获取高的数据吞吐量取决于所采用的高效利用带宽的调制和编码技术<sup>[5]</sup>。多载波调制<sup>[6]</sup>(MCM)在水声通信中的应用备受关注,其基本思想是将高速数据流分配到多个子载波上并行传输,这样以降低子载波的数据传输速率来抵制码间干扰。

本方案采用“Pattern—时延差编码”通信体制<sup>[7]</sup>,将信息编码技术和信道编码技术融于信号码元的设计中,使得每个携带信息的基本码元均具有抗水声多途干扰的能力,能可靠的传输信息。文献<sup>[7]</sup>对单通信信道通信作了研究,本文通过频率分割划分四个通信信道同时工作,增加通信速率至 1000bit/s,为建立水声通信网络化打下坚实基础。最后通过对实测水声仿真研究,验证了该方案的可行性及可靠性。

## 2 PDS 通信体制

本通信方案采用“Pattern 时延差编码”(Pattern Time Delay Shift Coding, 简称 PDS)通信体制,信息并非调制在码元波形中,而是利用信息码元的时延值调制信息,不同的时延值代表不同的信息。每种 Pattern 脉宽 8ms,信息编码时间窗宽为 12ms,即每个码元共占用 20ms(图 1)。在发射端利用 Pattern 脉冲的时延值进行时延编码;在接收端采用时延估计技术进行时延解码。时延估计的精度越高,则编码量化层可分得越细,每个码元所携带的信息量也就越大;每个通信信道的 Pattern 码种类越多,则抗水声多途扩展的能力越强。本系统每个码元携带 5bit 信息,所以量化层  $\Delta\tau = 12\text{ms}/2^5$ 。

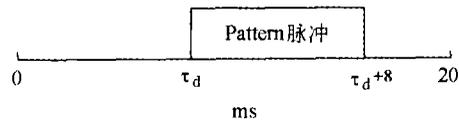


图 1 Pattern 脉冲时延差编码示意图  
时延差  $\tau_d = k \cdot \Delta\tau$ ,  $k = 0, 1, \dots, 2^5 - 1$ ;  
 $\Delta\tau$ : 量化层

### 2.1 Pattern 码型选取

PDS 通信体制利用码元的多种波形(Pattern)来进行码元分割,采用 Pattern 时延差编码,即信息调制在码元出现码元窗的时延差信息中。码型选择至关重要,直接关系到 PDS 体制抗码间干扰的能力。既要求所选的 Pattern 码型自相关峰尖锐,又要保证 Pattern 码彼此间的互相关性弱,这样才可以保证足够好的抑制码间干扰效果。

Pattern 码采用移相、移频编码,码串有 7 个码片,总长为 8ms。每个通信信道的 Pattern 码占用带宽约为 2kHz,此即本通信方案的一个频带带宽。7 个码片位置随机排序,有 7! 种组合,并且每个码片可选取 0 或  $\pi$  作为初始相位,这样总共可得到  $7! \times 2^7$  种组合形式。在所有

的可能组合形式中选取一组互相关系数小(归一化相关系数小于 0.31)的作为水下数据传输系统的 Pattern 码波形。Pattern 码之间的互相关系数越小,则信息码元之间的交叉干扰影响就越小,通信的可靠性就越高。图 2 给出了通信信道 I 的 5 种 Pattern 码型的归一化自相关系数和互相关系数。

本通信系统选用这样一组互相关系数小的多种不同波形 Pattern 码作为系统的码元,可以有效的克服信道多途扩展干扰。每个通信信道有 5 种 Pattern 码,每个码元占宽 20ms,这样相邻的同一 Pattern 码型出现时间间隔为  $5 \times 20\text{ms} = 100\text{ms}$ ,即最大抗多途时延扩展的能力为 100ms。另外,该系统将经过信道的校正码存储作为接收端拷贝相关器的参考信号。该参考信号包含了信道的多途扩展信息,只要信息码与其具有对应相同的 Pattern 波形,即可认为由缓慢时变水声信道对它们引起的波形畸变作用是相同的,增强了它们的波形相似性,即增强了它们的相关性,因此可以减小多途扩

展干扰影响。

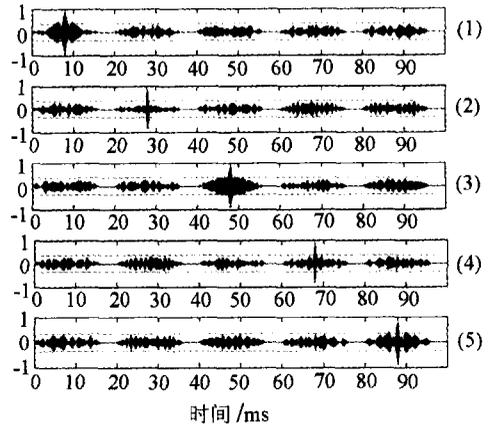


图 2 码元  $P_i$  与信道 I 所有码元  $P_j$  的归一化相关系数 ( $i, j = 1, 2, \dots, 5$ )

### 2.2 通信流程

该系统采用 Pattern 码作为水下数据传输的信息码元,数据码元结构如图 3 所示。

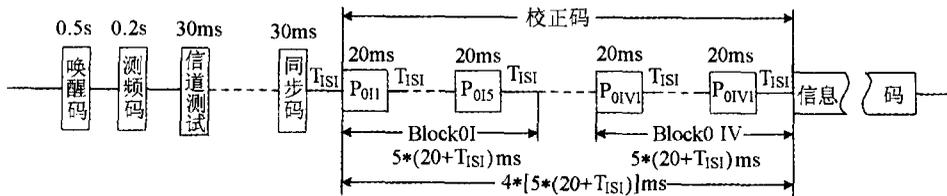


图 3 数据码元结构图

唤醒码用于唤醒系统工作。测频码用于测量信道多普勒系数  $\sigma$ ,当与活动节点通信时,相关器的参考信号均须依据  $\sigma$  实时计算。

信道测试是发射一段线性调频信号,接收端通过拷贝相关处理,得到一系列相关峰,即可测试出多途扩展时间  $T_{ISI}$ ,如图 4 所示。

当系统获得信道多途扩展信息后,便可发送同步码,同步码给出译码窗开窗时基。同步码与后面的校正码应留有时隙  $T_{ISI}$ ,以减小同步码的多途信号对后面校正码的影响。

校正码是一码串,它包括本体制中使用的

所有 Pattern 码型,它们的代码均为“0 0 0 0”即零时延,是为修正多途信号对译码的影响而设置的,它提供接收端拷贝相关器参考波形及译码的时延差修正量。拷贝相关器将含有海洋信道信息的校正码作为参考信号,有助于减小多途扩展的影响。设校正码  $P(t)$  经海洋信道传输至接收机得到信号  $R(t)$ 。由于受到海洋信道作用,接收信号  $R(t)$  波形已不同于发射信号  $P(t)$ , $R(t)$  包含了海洋信道对  $P(t)$  的作用,是各多径信号的叠加。接收端的拷贝相关器以  $R(t)$  作为参考信号,与信息码作相关以测量时

延差。与此校正码对应相同 Pattern 波形的信息码  $S(t)$  到达接收端, 在信道相干时间内, 可认为多途信道对  $P(t)$  和  $S(t)$  中的 Pattern 波形作用是一致的, 因此采用校正码可克服信道

多途扩展干扰影响。为了准确接收校正码, 每个校正码元之间留有时隙  $T_{ISI}$ , 以便减小各个校正码元之间的多途干涉。信息码是多组的, 这取决于海洋信道相对稳定的时间。

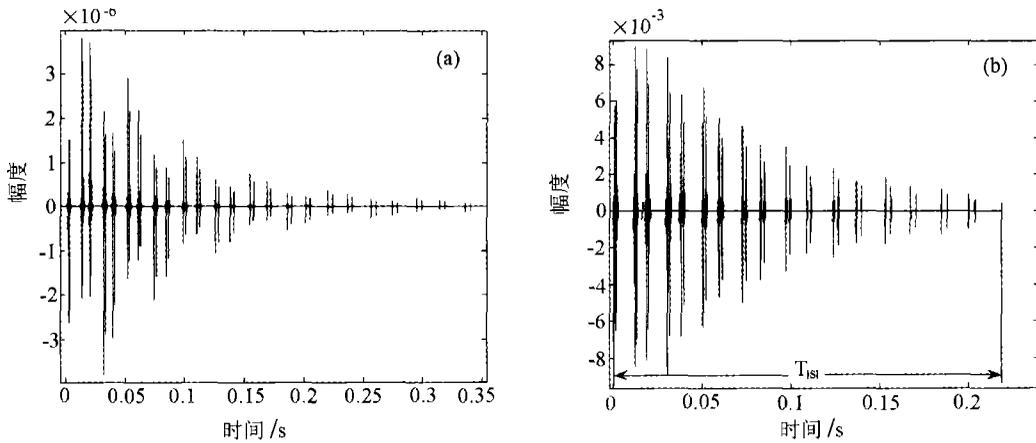


图 4 信道多途扩展估计 (a) 信道冲激响应 (b) LFM 信号经信道后拷贝相关输出

PDS 水声通信系统主要包括信源编码、信道编码和译码三大模块, 系统通信流程框图如

图 5 所示:

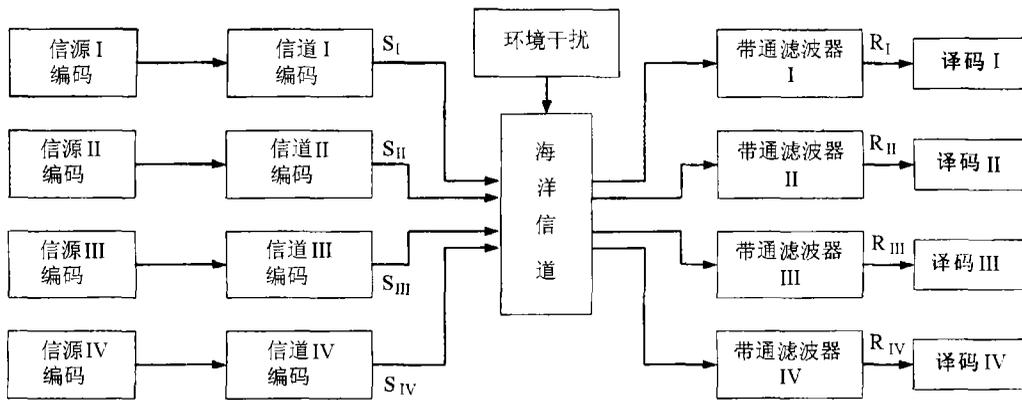


图 5 PDS 水声通信系统框图

接收机在收讯开始时先搜索同步信号, 通过相关计算得到相关峰时刻并以该时刻为基准开时间窗, 在相应的时间窗内接收校正码信号 Pattern 并存储, 作为拷贝相关器的参考信号。时延估计译码采用工程上常用到的相关法, 该

技术已相当成熟, 这里就不在赘述。

### 3 仿真研究

#### 3.1 多途信道建模

海洋是水下声传播的介质, 水下声信道特

性决定了水声通信系统的设计和性能。系统方案需要大量实验来验证其性能,欲用于工程,更是需要考察该系统方案所能适用的水声信道。多途信道仿真模型为研究水下声场特性提供了方便而有力的工具,便于在实验室获得大量不同水文分布条件和环境参数的海洋信道模型。文献 [8] 利用射线声学理论,系统地给出了多途信道建模算法,并给出了理论推导公式,这里给予简要叙述。

海洋声信道可看作是对发射波形进行变换的一个滤波器,是时变、空变的随机滤波器。但在大多数应用场合,实验证明海洋声信道可看作是缓慢时变的相干多途信道,在相干时间内,海洋声信道可以合理地用线性、时不变的滤波器来描述 [9]。多途信道中的声场强度及接收波形由本征声线的特征声线参数决定。本征声线是指所有到达接收点的、各种对声场有重要贡献的声线的集合。本征声线的特征声线参数决定了多途信道的系统函数。

通过物理模型的合理简化,计算从声源到接收点处的本征声线的特征声线参数(本征声线途径数量、声线传播时间和声压),可以确定多途信道的冲激响应函数  $h(t)$ :

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

式中参数  $N$  为对声场有贡献的声线途径的总数;  $A_i$ 、 $\tau_i$  分别为第  $i$  途径到达接收点的信号幅度及信号时延。

多途信道模型参数包括海深、声源深度、接收点深度、水平距离、声速分布、本征声线在海底与海面的反射次数、初始掠射角、归一化声压值和相对时延值,它们可以确定某一声学环境下的多途传播效应。通过湖试、海试实验,验证了该多途信道仿真系统能较准确的给出实际信道模型。

### 3.2 仿真实验结果

本通信系统采用四个通信信道同时工作方案,系统占用频带 5~13kHz,将其均匀分给四个通信信道。采样频率 48kHz,信噪比为 15dB。

每个通信信道 5 种 Pattern,共 20 种 Pattern 码型。每个码元占宽 20ms, Pattern 脉冲宽度  $T_p = 8\text{ms}$ , 编码最大时延  $T_c = 12\text{ms}$ 。负梯度声速分布,海深 100m,声源位于水下 50m,接收机位于水下 78m,收发相距 10km 水文条件下,海洋信道冲激响应如图 6 所示。

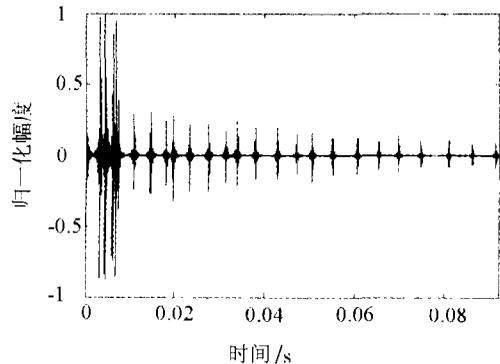


图 6 信道冲激响应

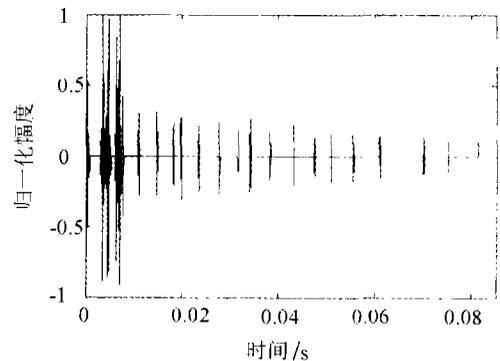


图 7 同步码拷贝相关估计信道

下面简述通信仿真过程。

信源、信道编码后(图 8),经海洋信道(图 6)传输至接收机(图 9)。接收机通过拷贝相关处理,检测同步码(图 7)并估计出信道多途扩展  $T_{ISI}$ ,峰选测得到达接收点最强信号的时刻峰值。以该时刻为基准开窗,接收校正码并存储。

在此之后接收到的就是信息码了。信号分别通过四个通信信道的带通滤波器,对每路信

号 ( $R_k, k = 1, 2, 3, 4$ ) 采用相关法估计时延。再经过信源译码, 即可得到信源信息。

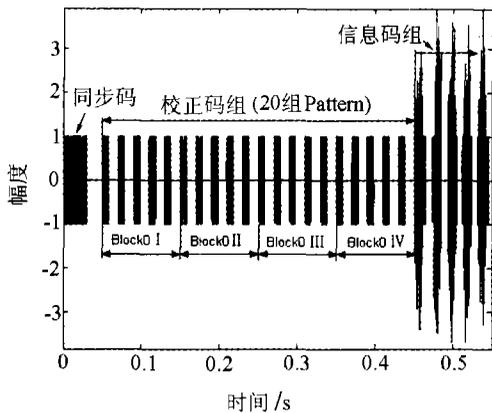


图 8 信道编码后信号波形仿真图

本文对不同海洋信道做了大量仿真研究, 验证了该体制的高可靠性。本系统四信道同时

工作, 通信速率 1000bit/s。下表简单列举海深 100m 的几种典型海洋信道, 针对每种信道仿真 100 次, 每次传输 3200bit 信息, 统计相应各通信信道的误码率 (%)。

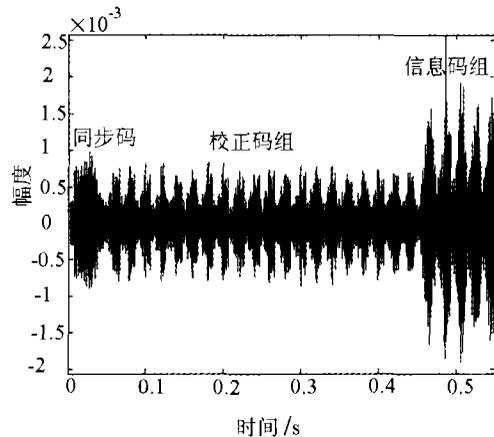


图 9 接收到的信号波形图

表 1 不同海洋信道通信的仿真结果

声源深度 (m)	接收机深度 (m)	水平距离 (km)	正梯度声速分布				负梯度声速分布			
			bit 误码率 (%)				bit 误码率 (%)			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
50	50	5	0	0	0	0	0	0	0	0
50	80	5	0	0	0.0350	0	0.0760	0.0135	0.1750	0.0980
60	70	5	0	0	0	0	0	0	0	0
50	50	10	0	0	0	0	0	0	0	0
50	75	10	0.0010	0	0	0	0	0.0238	0.0227	0
60	50	10	0.9120	0	0	0	0	0	0	0
60	70	10	0	0	0	0	0.0080	0.2770	0.0455	0
70	50	10	0	0	0.0640	0	0.0150	0.0430	0.0080	0
70	90	10	0	0	0.0045	0	0.0010	0.0020	0.0100	0
80	60	10	0	0.0021	0	0	0	0.0020	0.1730	0.0010
80	80	10	0	0	1.0013	0	0.1558	0.0128	0.3638	0.0638
90	80	10	0	0	0	0	0.2520	0.8400	1.0725	0.3660
90	90	10	0	0	0	0	0.0735	0.0280	0.3530	0.0350

注: I, II, III, IV 表示通信信道序号。

#### 4 结论

PDS 通信体制, 信息调制在码片出现码元窗的时延差信息中, 利用信息码元的时延差值进行时延编码, 采用码元的多种不同波形 (Pattern) 来进行码元分割, 另外还采用频率

分割来划分信道, 具有很强的抗水声多途干扰的能力, 保证低误码率前提下通信速率达到 1000bit/s, 应用于水下通信有着广阔的前景。

信道形式直接关系到水声通信质量, 由于接收点的声场是多途到达的干涉叠加结果, 因此信道的系统函数对声源和接收点的相对位

置、环境参数、声速分布等的变化十分敏感。信道的系统函数对于环境参数的敏感性次序分别为：接收点铅直位置变化，水层厚度变化，水平位置变化，水层中声速变化。为了使 PDS 通信体制更好的应用于工程，必须对不同水文分布条件和环境参数的海洋信道做大量研究，并且根据信道具体形式采用不同的工作方式。例如，当海洋信道多途扩展很大时，可以加大码元宽度以增强抗多途能力，即以选择牺牲通信速率来抑制多径干扰保证低误码率通信。

参 考 文 献

1 Milica Stojanovic. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1996, 21(2):125~136.

2 Turner R, Turner E. *Oceans 2000 Conference*, 2000, 2:905~911.  
 3 Quazi A, Konrad W. *IEEE Commun. Mag.*, 1982, 20(2):24~29.  
 4 Catipovic J. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1990, 15, 15(3):205~216.  
 5 Proakis J. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1991, 16, 16(1):66~74.  
 6 Yeung L F, Bradbeer R S, Law E T M. *et al. OCEAN'2003*, 3:1368~1375.  
 7 惠俊英, 刘丽, 刘宏, 冯海泓. *声学学报*, 1999, 24(6): 561~572.  
 8 范敏毅. *水下声信道的仿真与应用研究*. 博士学位论文, 哈尔滨工程大学, 2000.  
 9 惠俊英. *水下声信道*. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1992, 30~33.



88-1 型超声乳化、强化处理机 (研制产品)

88-1 型超声乳化、强化处理机是高强度超声处理设备,由中国科学院声学研究所研制。主要用于乳化、强化处理各类液体介质,包括超声乳化、混合、清洗、分散、破碎和强化化学反应等,系一机多用。由于本机在液体中能产生高声强并引起强烈的空化现象和效应,因而可大大加速上述各项乳化、清洗、强化工艺过程,带来提高生产效率(有的可提高几倍至几十倍)和改善产品质量的明显效果,受到各方用户、尤其是中青年科技骨干用户的关注和欢迎,成为他们科技创新的重要手段之一。例如:超声乳化用于制备燃油掺水乳液、硅油和水乳液、鸡疫苗、浮选剂、家具保护剂、高级液体鞋油、B 超耦合剂等,均取得了良好效果,所制乳液细度小(有的细度可达 1μm 以下)、稳定时间长(有的可达几个月至 1 年)。用于清洗微型电容传声器罩,清洗时间可缩短为原来的几十分之一,用于清洗带润滑微孔钢环,解决了原来清洗微孔的难题,用于清洗喷丝头,速度快,质量好,用于清洗二氧化硅,证明比其他方法效果更好。用于破碎各类细胞,性能和效果不亚于国外同类产品,价格仅为国外的 1/3 至 1/5,用于分散色素,细度小,稳定性高,用于分散碳纤维,可比原分散方法加快 15 倍以上,用于分散碳纤维强化浸铝,浸透好、速度快。尤其近几年用于分散纳

米材料,更是有良好效果,受到各方关注和采用。用于超声强化氰化法浸出黄金,可提高浸出速度几倍至几十倍。用于超声强化异丙醇铝水解反应,可加快反应速度几倍至几十倍,并促使溶液呈胶态,对溶液-凝胶法制备超细粉末、薄膜有潜在的应用前景。用于强化其它一些化学反应,也有极好效果(用户尚不愿公开),也可用于强化制备纳米材料和制备纳米乳液等等。

本机由超声电子发生器和 T-1 型高强度压电超声换能器组成,为降低噪声还配有相应隔音箱。超声电子发生器频率 14 至 20kHz 可调,电功率 0~250W 可调。带频率自动跟踪和定时控制装置。T-1 型高强度超声换能器,频率 18 ± 0.5kHz,电功率 ≤ 250W,最大声强 50~80W/cm<sup>2</sup>,聚能器(变幅器)由钛合金制成,可适合于处理各类带酸碱性液体介质(聚能器根据用户处理需要也可另配其它形式)。本机用于实验室小样处理,处理容量可为 1~2000ml。

本机主要特点是声强大、空化强、使用寿命长,本机自 80 年代研制成功以来(80 年代配电子管超声电子发生器,90 年代配晶体管超声电子发生器)已广泛用于国内各类用户,受到欢迎和好评。

(罗曾义)