

空间有源消声实验研究

朱海潮 施 引

(海军工程学院振动噪声研究室 武汉 430033)

1995 年 1 月 24 日收到

摘要 本文分别在半消声室和普通房间进行有源消声实验。证明了作者以前提出的算法^[7]是收敛的、稳定的,以此算法构成的多通道有源消声系统对直达声和混响声都能进行有效的控制。

关键词 有源噪声控制, 三维空间, 自适应滤波, 自适应算法

Experimental study of active noise control in space

Zhu Haichao, Shi Yin

(Noise & Vib. Lab., Naval Academy of Engineering, WuHan 430033)

Abstract Active noise control experiments were performed in both a semi-anechoic chamber and an ordinary room. They confirmed that the algorithm proposed by the first author in Reference^[7] is convergent and stable. The multi-channel active control system using the algorithm can efficiently control the direct sound as well as the reverberant sound.

Key words Active noise control, Three-dimensional space, Adaptive filtering, Adaptive algorithm.

1 引言

近年来,有源噪声控制发展很快.其研究重点有两个,一是控制方法问题,即如何实现有源消声,另一个是换能器问题,对次级声源、传声器、扬声器等进行研究^[1].对于控制方法,目前普遍采用自适应滤波技术,并用高速信号处理器来实现.采用自适应技术可以避免复杂的声学环境及物理条件所带来的限制(尤其是三维空间有源消声),为有源消声的工程应用提供了可能性,这一点已为理论和实验证明^[2,3].

在自适应有源控制系统的设计中,最重要的是算法问题.对其要求是收敛速度快、稳定

性好;同时又要计算量小,便于实时实现.滤波- U 算法^[4]是一种成功的算法,已被用于管道有源消声器中^[2].这种算法用于空间消声也是可以的,但是其消声空间有限.而 S. J. Elliott 等人提出的多误差 LMS 算法^[5,6],对扩大消声空间是非常有效的,这种算法用一个传感器检测初级声源信息(其结果为输入信号),送入 M 个 FIR 滤波器,经处理后驱动 M 个扬声器发声,用 L 个传声器检测误差信号以调整滤波器参数,使其性能趋于最佳.算法准则为 L 个误差传声器输出信号的平方和最小.这种算法已被成功地用于螺旋桨飞机机舱的噪声控制中^[3].很显然,这种算法对消减简谐声场或当次级声源对输入信号没有影响时是非常有效

的,例如在其应用^[3]中,初源信息直接来自发动机.但是对于非简谐声场或次源对输入信号有影响,即有反馈存在时,这种算法就不适用了.因此,作者在前文^[7]中提出了一种算法,这种算法由 P 个 IIR 滤波器构成,其输入信号来自检测传感器,算法收敛后 q 个误差传声器处的声压均方和最小.初步的计算机模拟结果表明,该算法是收敛的.本文继续前文^[7]的工作,将其算法应用于空间有源消声中,分别在半消声室和普通房间进行了实验,取得令人欣慰的结果.

2 算法

控制系统用一个传感器(称输入信号传感器)检测初源信号,其结果送入 P 个滤波器用于驱动 P 个次级声源.每个滤波器均为具有 N 个前馈权值和 L 个反馈权值的 IIR 滤波器. q 个误差信号传声器构成了消声空间,第 i 个滤波器的权值向量为

$$\begin{cases} y_1 = W_1^T Z_1 \\ y_2 = W_2^T Z_2 \\ W_1(k+1) = W_1(k) - 2\mu\{e_1[Z_1(k) * h_{11}(k)] + e_2[Z_1 * h_{12}(k)]\} \\ W_2(k+1) = W_2(k) - 2\mu\{e_1[Z_2(k) * h_{21}(k)] + e_2[Z_2 * h_{22}(k)]\} \end{cases} \quad (5)$$

上式中重要的一点是如何确定 $h_{ij}(i, j=1, 2)$, 但很复杂.为简便起见,本文将其视为时不变即如何给出第 i 个次源至第 j 个误差信号传声器之间电声系统建模.用在线建模是可行的,

$$W_i(k) = [a_{i,0}(k), a_{i,1}(k), \dots, a_{i,N-1}(k), b_{i,1}(k), b_{i,2}(k), \dots, b_{i,L}(k)]^T \quad (1)$$

其中 k 为采样时刻.第 i 个滤波器的广义输入向量为

$$Z_i(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1), y_i(k-1), \dots, y_i(k-L)]^T \quad (2)$$

其中, $x(k)$ 为输入信号传感器的输出信号.第 i 个滤波器输出为

$$y_i(k) = W_i(k)^T Z_i(k) \quad (3)$$

则第 i 个滤波器的递推迭代公式为

$$W_i(k+1) = W_i(k) - 2\mu \sum_{j=1}^q e_j(k) [Z_i(k) * h_{ij}(k)] \quad (4)$$

其中 μ 为收敛步长因子, $*$ 为卷积符号, $e_j(k)$ 为第 j 个误差传声器的输出信号, $h_{ij}(k)$ 为第 i 个次源到第 j 个误差信号传感器之间的脉冲响应函数(其对应的传递函数为 H_{ij}),设可用 R 阶 FIR 滤波器来模拟.

取 $p=q=2$ 时,则算法为

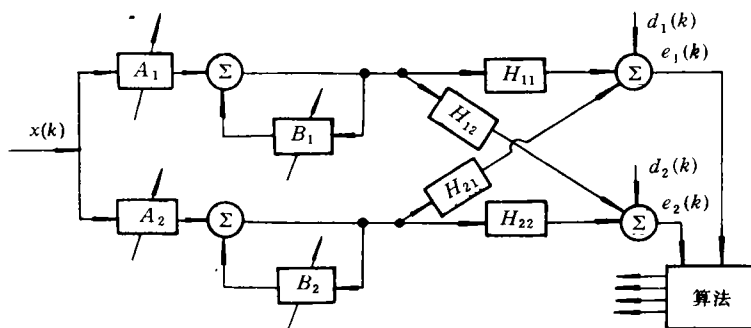


图1 控制系统框图

3 实验装置

组成:

(1) 初级声源. 信号发生器的信号经过低

图 2 为实验装置框图. 实验装置由三部分 通滤波, 由功率放大器放大后驱动初源扬声器,

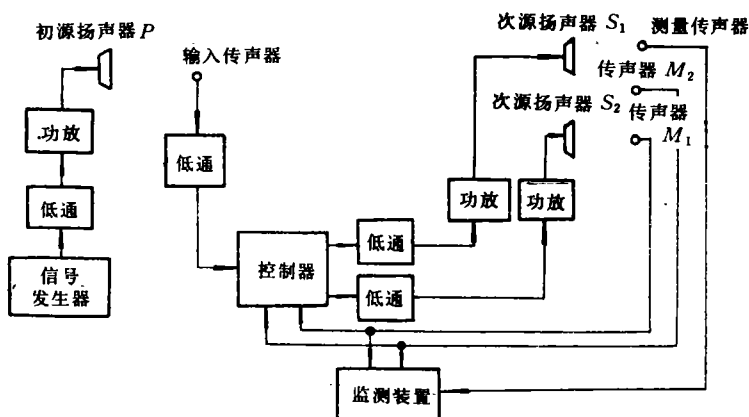


图 2 实验系统框图

模拟噪声源.

(2) 控制部分. 输入传声器的信号经抗混滤波后送入控制器中处理. 控制器的功能由 TMS320C30 高速处理芯片完成, 这是整个控制部分的核心. 控制器的两路输出信号经重构滤波、功率放大后驱动次源扬声器发声, 与初源的噪声相抵消, 使两误差传声器处的声压的平方和最小, 从而达到降噪目的. 两个误差传声器的输出信号反馈给控制器, 不断修正控制器参数, 使其性能始终趋于最佳.

(3) 监测记录部分. 由 CF-500、测量传声器和 CRAS 监测系统构成, 主要进行消声过程的监测及消声效果的记录.

4 实验结果及讨论

实验分别在半消声室和普通房间进行, 声

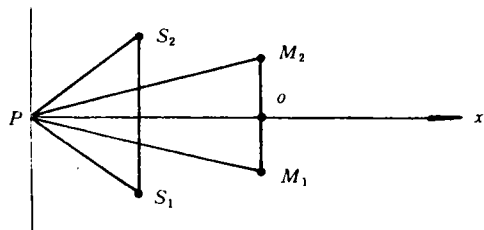


图 3 声系统布放图

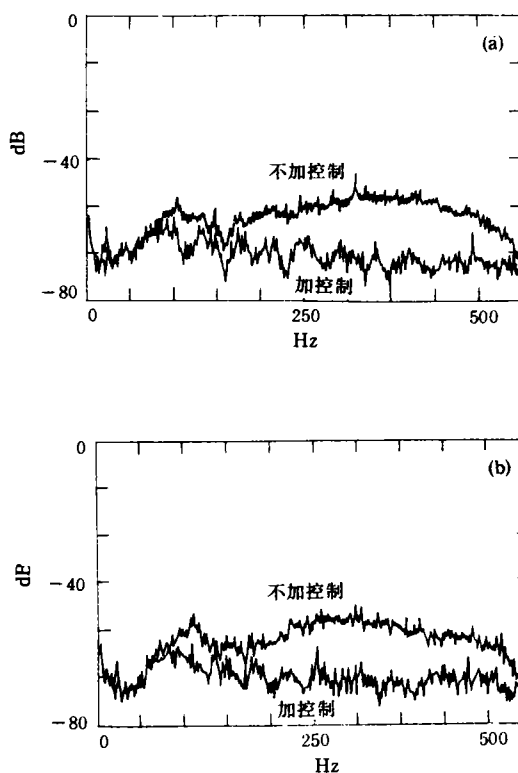


图 4 降噪前后的声压级频率分布曲线

(a) M_1 点, (b) M_2 点

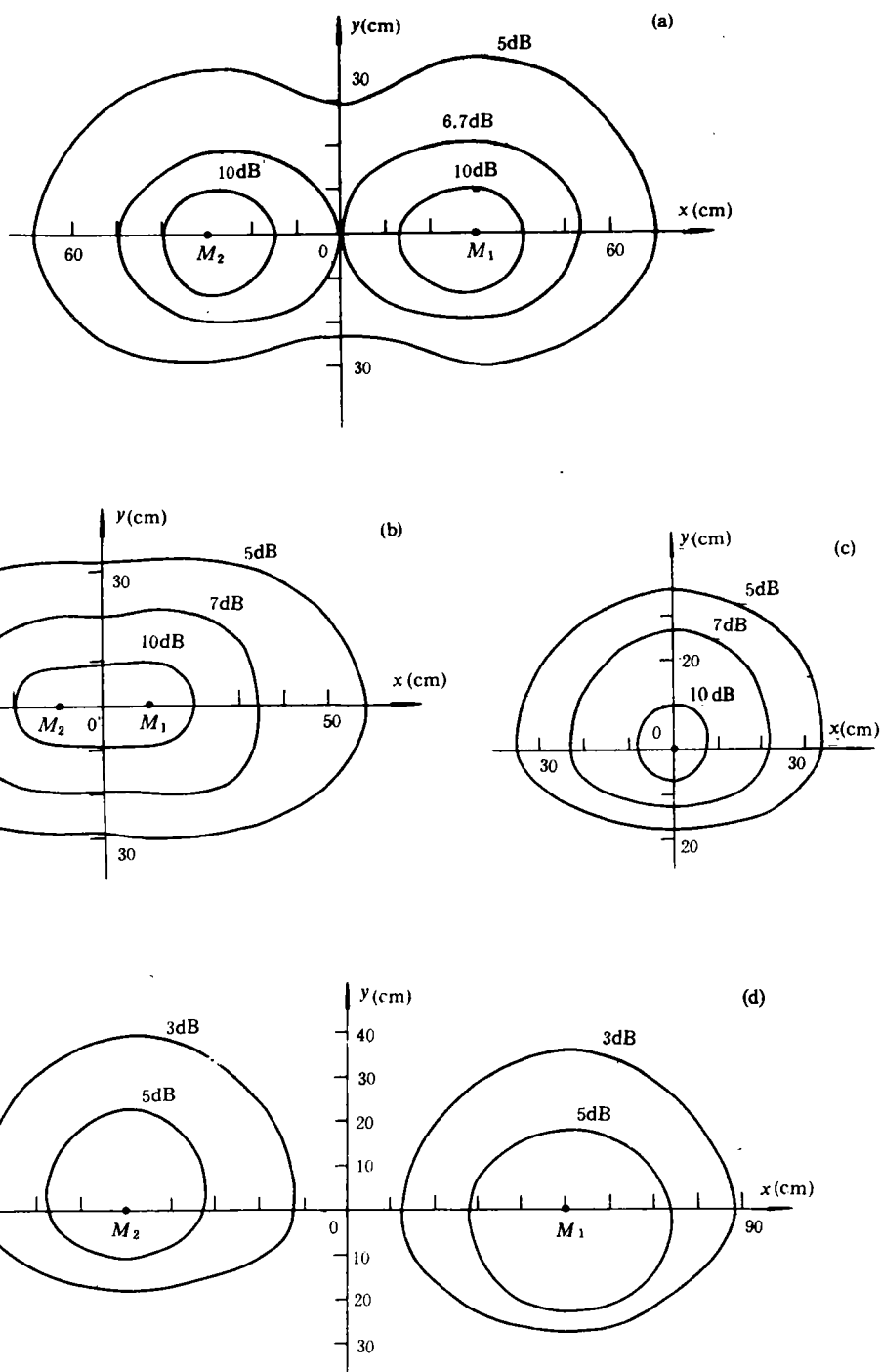


图5 水平面内等降噪指数曲线

(a) $M_1 M_2 = 0.6 \text{ m}$, (b) $M_1 M_2 = 0.2 \text{ m}$, (c) $M_1 M_2 = 0.0 \text{ m}$, (d) $M_1 M_2 = 1.0 \text{ m}$

表 1 误差传声器处的降噪指数

降 噪 指 数 置	M_1M_2 (dB)				
		1.0	0.6	0.2	0.0
M_1		14.3	14.7	15.8	13.6
M_2		13.3	13.8	15.6	13.6

系统布放水平面见图 3。所有扬声器、传声器距地面 1.1 m

4.1 半消声室的实验结果

实验是在中船总噪声振动检测中心的半消声室中进行的。取 $PS_1=1.07$ m, $S_2=1.11$ m, $P_1S_2=0.73$ m, $M_1M_2=0.6$ m, $PO=2.0$ m, 采样频率 2.8 kHz, 滤波器阶数取 $N=L=R=32$ 阶, 初源信号为白噪声经过截止频率 500 Hz 低通滤波所得。在 M_1 、 M_2 处的消声效果如图 4 所示, 在 M_1 、 M_2 点噪声声压级分别降低 14.7 dB、13.8 dB。另外, 在 M_1M_2 分别为 1.0 m, 2.0 m, 0 m (PO 不变) 时进行了实验, M_1 、 M_2 处的降噪指数见表 1, 上述四种情况的有效空间范围绘于图。

由表 1 和图 5 可以看出, 在次级声源的位置确定之后, 误差信号传声器有一个最优布放问题。当 M_1M_2 太大时消声空间分成了两个独立的区域, 且降噪指数有所降低; 而当 M_1M_2 太小, 消声空间缩小, 且降噪指数也有所降低, 例如 $M_1M_2=0$ 时, 只有一个误差传声器, 此时多通道系统的优势完全丧失, 不过此时系统仍能稳定运行。

另外, 适当增大滤波器的阶数时, 系统的性能有改善, 如取 $N=L=64$ 时, M_1M_2 处的消声量约增大 1~2.0 dB, 再高的阶数受微处理器速度的限制而不能进行, 而减少滤波器阶数时, 系统性能变差, 如取 $N=L=R=16$, 此时 H_1 的建模已较差, 系统性能大为降低。这说明, 对于自由空间, 在上述的布放条件下, 滤

波器的阶数也有最优选取问题, 阶数太小时, 系统性能下降明显, 这是因为此时滤波器已不足以模拟相应的电声系统。而增加时系统性能虽有改进, 但计算量显著增加, 因此其选取往往受到微处理器速度和信号频率的限制, 而且, 阶数增加, 收敛后的稳态误差要增大, 因此可以想象阶数增加到一定数值时, 上述两方面综合作用的结果, 系统性能再不能增加。

4.2 普通房间的实验结果

实验在 4.75 m×3.00 m×3.00 m 的矩形房间进行, 此房间有一门一窗, 实验时门窗均关闭。表 2 给出了该房间在中心频率为 63 Hz、125 Hz、…、8000 Hz 八个倍频程的混响时间。图 3 中的 $PS_1=0.33$ m, $PS_2=0.35$ m, $PO=0.5$ m, $M_1M_2=0.3$ m。取 $N=L=R=64$, 采样频率为 2.8 KHz。初、次源置于房间中央, M_1 、 M_2 处降噪指数分别为 11.0 dB、9.9 dB, 降噪前后的声压级频率分布曲线见图 6(a)、(b), 其有效空间范围如图 7 所示。另外, 对房间的基角处的声压级也进行了测量, 图 6(c)是一个基角的降噪前后的声压级频率分布曲线, 降噪指数为 5.2 dB。取 $N=L=R=32$ 时, M_1 、 M_2 处声压级分别低 10.5 dB、9.5 dB, 与前述相同的基角处降 4.5 dB。普通房间中声场应为直达声与混响声之和。而混响声场是驻波场, 可认为是房间各次声模态的叠加, 而基角是所有模态的全息点, 也就是说基角是各次模态的压腹点, 因此基角的声压降低说明整个混响声场得到了抑制。为证明此点, 在初级声源周围与初级声源相距 1.2 m 处测降噪前后的声压级, 结果绘于图 8 中。在误差传声器处, 直达声还占相当的比重, 此处仅有混响声场声压级的降低, 还有直达声声压级的降低, 因此不降噪指数较大。上述实验结果表明, 本文的系统对控制混响声是有效的。

表 2 房间的混响时间

倍频程中心频率(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
混响时间(s)	1.4	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7

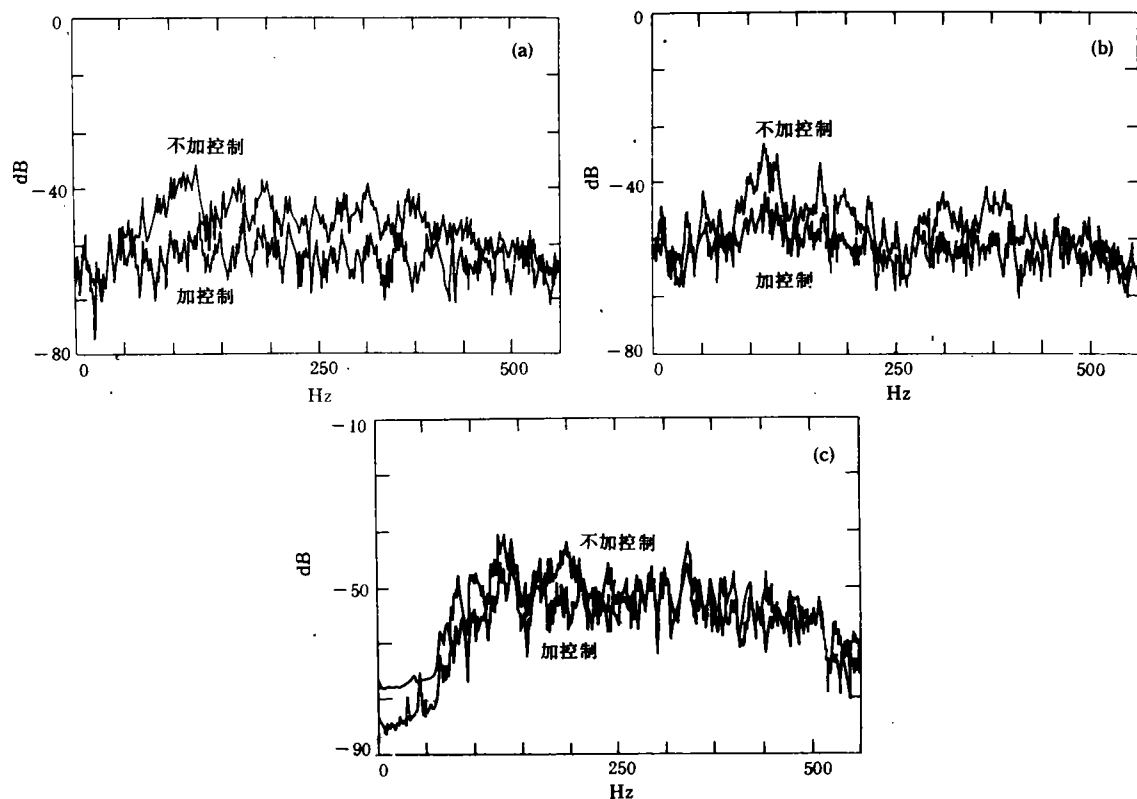


图6 降噪前后的声压级频率分布曲线

(a) M_1 点, (b) M_1 点, (c) 基角

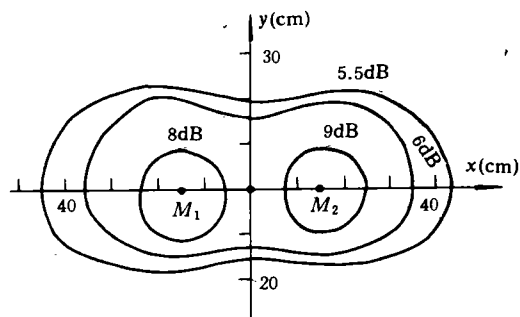


图7 水平面内等降噪指数曲线

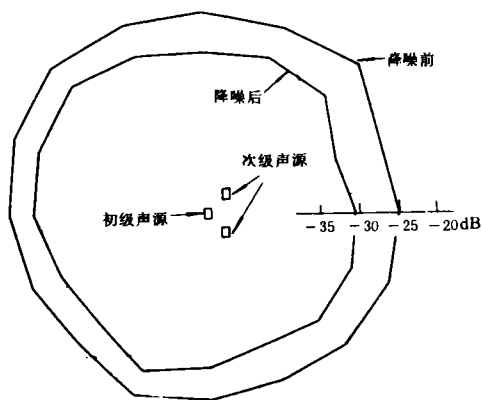


图8 初级声源周围1.2 m距离上
降噪前后的声压级

5 结论

通过前面的工作可以看出,文献[7]中的算法是收敛的、稳定的、以之核心构成的多通道系统不仅能消除直达声,而且能抑制混响声,从而实现全空间消声(尽管此时降噪指数还是有限的),具有普遍性的意义.在次源位置确定之后,误差传声器有最优布放问题.滤波器的应用声学

阶数也是影响系统性能的重要参数,其选取往往受微处理器的速度和信号频率的限制.如何进一步提高降噪指数、扩大有效空间范围、拓宽消声频带将是今后研究的方向.另外,适当增
(下转第36页)

表3 高强度钢超声珩磨的部分试验数据

试件号	1	2	3	4	5	6
原始尺寸(mm)	x ϕ 121.84	x ϕ 121.795	x ϕ 121.805	x ϕ 121.80	x ϕ 121.79	x ϕ 122.08
原始粗糙度 Ra(μ m)	y ϕ 121.85	y ϕ 121.78	y ϕ 121.83	y ϕ 121.78	y ϕ 122.78	y ϕ 122.06
原始圆度误差(mm)	3.2	3.5	3.4	3.8	3.3	3.6
超声波发生器输出功率(W)	0.01	0.015	0.025	0.02	0.01	0.02
屏极电流(A)	300	300	500	700	700	700
油石数量(个)	0.35	0.35	0.4	0.42	0.42	0.44
谐振频率(KHz)	5	5	5	5	4	3
珩磨后的尺寸(mm)	18.952	19.95	18.912	18.863	18.96	19.014
珩磨后的粗糙度 Ra(μ m)	x ϕ 121.95	x ϕ 121.91	x ϕ 121.943	x ϕ 122.04	x ϕ 122.043	x ϕ 122.21
珩磨后的圆度误差(mm)	y ϕ 121.952	y ϕ 121.913	y ϕ 121.94	y ϕ 122.042	y ϕ 122.04	y ϕ 122.212
珩磨效率(mm/min)	1.7	1.6	1.6	1.8	1.8	1.7
磨屑	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002
备注	0.006	0.006	0.008	0.01	0.009	0.0075
	细长屑, 数量少	细长屑, 数量少	细长屑, 数量较多	细长屑, 数量多	细长屑, 数量多 一个油石座的 挠性杆断裂	细长屑, 数量较多 又一个油石座 的挠性杆断裂

握了超硬磨料油石超声珩磨高强度钢的规律,都证实了强力超声珩磨可以高效珩磨高强度钢。

4 结论

- (1) 强力超声珩磨装置工作可靠,操作方便。超声珩磨声学系统能满足珩磨负载要求。
- (2) 与普通珩磨相比,强力超声珩磨可提高加工效率1~3倍。
- (3) 同样条件下,超声珩磨的磨削比可提高1.34倍。
- (4) 表面粗糙度 Ra 达到 0.8~1.6 μ m。
- (5) 突破了“人造金刚石油石不能珩磨钢”

的结论,拓宽了人造金刚石的应用范围。

(6) 微晶 CBN 具有磨粒等高性的特点,可获得较低的表面粗糙度。同时,不需要修整即能在工作过程中自锐。

参 考 文 献

- [1] 孟少农, 机械加工工艺手册(第2卷第13章), 机械工业出版社, 1991. 270—291.
- [2] 林仲茂, 超声变幅杆的原理和设计, 科学出版社, 1987. 148—150.
- [3] 张云电, 超声加工及其应用, 国防工业出版社, 1995. 86—92
- [4] 张云电, 喻家英, 王纯, 声学学报, 1994, 19(5): 367—371
- [5] Elliott S J, Nelson P A, Stothers I M, et al, J. Sound and Vib 1990, 140(2): 219—238.
- [6] Eriksson L J. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(1): 257—265
- [7] Elliott S J, Stothers I m, Nelson P A. IEEE Transactions on ASSP, 1987ASSP-35(10): 1423—1434.
- [8] Elliott S J, Boucher C C, Nelson P A. IEEE Trnsaction on SP, 1992, 40(5): 1041—1052.
- [9] Zhu, Haichao. Proceedings of International Conference on Signal Processing, 1993, Beijing, 1240—1243.
- [10] 马大猷, 噪声与振动控制, 1994, 第一期: 2—7.
- [11] Erikson L J, Allie M C. Sound and Vibration, 1988, 22(2): 30—34.

参 考 文 献