

无工频变压器准开关模式超声清洗机

张镜澄 凌鸿烈

(中国科学院声学所东海研究站)

本文介绍一种工作频率为40KHz的无工频变压器准开关模式超声清洗机。其电发生器为一内含桥式自动频率跟踪电路的闭环自振系统，功效部分设计在准开关状态，且省去了笨重的工频变压器，故有高效、节电、频率跟踪可靠等优点；对换能器振幅进行调制，进一步提高了清洗效果；清洗容器可与换能器分离，故更换清洗液容易，便于多工序操作。本机主要用于清洗几何形状复杂的小型精密物件，也可用于乳化、分散及杀菌、消毒处理等。

一、引言

近年来，超声清洗技术发展迅速，应用日趋广泛，已渗透到工业、农业、国防、食品、医药卫生乃至日常生活等许多领域。但超声清洗的优越性在国内尚未被更多的部门充分认识，有待进一步开发、推广。本文阐述的 UC4050—Ⅱ型无工频变压器准开关模式超声清洗机即是配合超声清洗技术的开发应用而研制的，其主要清洗对象是各类几何形状复杂的小型精密零部件。

二、结构特点

UC4050型双缸超声清洗机采用双缸结构(见图1照片)。两缸由同一超声频电发生器供电，通过工作开关切换，交替进行洗、漂等工序。清洗容器采用两个600毫升玻璃烧杯，分别置于盛有清水的两个不锈钢浅缸内，换能器辐射面则粘牢于缸的底面(见图2)。这种结构的优点是：更换清洗液容易；便于多工序清洗；不锈钢浅缸只盛放纯水(耦合介质)，而不和各种化学清洗剂接触，故无腐蚀之忧，使用寿命延长。此外，烧杯



内液位变化对换能器等效负载电阻的影响较小(见表1)，故功率输出较为平稳。此种结构的缺点是：超声在穿透杯底时，强度有所减弱，故清洗效率有所降低。杯底愈薄，其透声性能愈好。当杯底厚度为2毫米，工作频率等于40KHz(声在玻璃中波长约130mm)时，透声率(βt)约70%。若选用聚苯乙烯或聚丙烯作清洗容器，因其声阻抗率与水

较为接近，故透声率比玻璃高得多。但其化学稳定性不如玻璃，不适宜盛放有机性清洗液。（如美国BRANSON公司生产的超声清洗机多配有玻璃的和聚丙烯的两种烧杯）。

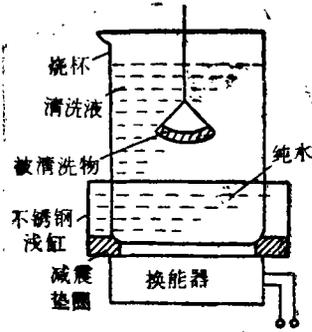


图2

表1

清洗杯液 (ml)	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
等效负载阻 (Ω)	700	670	700	700	670	730	670	700	760	670	700

三、设计要点

1、工作频率的选定。超声清洗主要利用超声的空化效应，而空化产生所需的声强（空化阈）与超声频率有关（见图3）。当频率超过10KHz后，空化阈急剧增大。故频率愈低，达到一定清洗效果所需的功率愈小。但另一方面，实验表明对于清洗几何形状复杂的精密零件而言，却又频率高些有利。兼顾两者，本机工作频率选得较高，为40KHz。（一般商品清洗机的频率多在17—44KHz）。此外，工作频率选得高些有利于降低对人体健康有害的空化噪声。

2、功率的确定。由图3可见，当工作频率等于40KHz时，空化阈约为0.5W/cm²（含气水）。根据换能器耦合块辐射面面积，即可确定空化所需的声功率。考虑到杯底的穿透损失βt以及压电换能器大振幅运行下的电声转换效率ηea（一般取70%），则不难计算

出换能器所需的输入电功率。本机的设计值为50W。应当指出，如功率不足，清洗效果将明显下降。

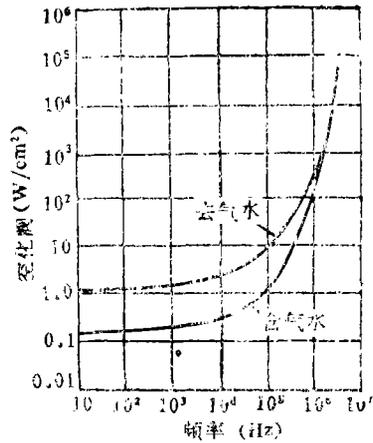
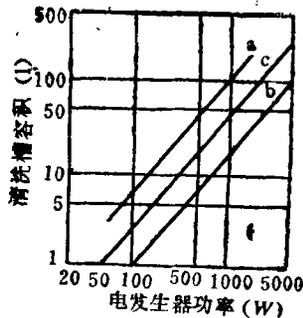


图3

3、清洗容器容积的确定。有人曾对许多国家生产的超声清洗机的电发生器输出功率与清洗槽容积之间的关系作了调查，结果示于图4(2)。图中直线a为超声较弱即能达到清洗要求时的功率与容积的关系；直线b为须有强超声才能有效地清洗时的功率容积关系；直线c则为最常用的中间情况。根据直线c，当功率为50W时，清洗容器容积当取1000毫升左右。考虑到穿透杯底时的声功率损失(βt=70%)，容积应再减小些，故选取标称容量为600毫升的玻璃烧杯。



四、电路原理

本机电路设计具有以下特点：a，电发生器为一内含桥式自动频率跟踪电路的闭环自振系统，其原理性框图见图5。这种电路结构简单，所用元件少，跟踪可靠，性能稳定；b，功放部分设计在准开关状态，集电极效率可达90%以上；c，不用工频变压器，而由220伏电网电压直接整流供电，故重量减轻，体积缩小，成本降低，且节电13~20%；d，通过对换能器振幅引入调制，使进入清洗液的超声波幅按一定周期起伏，进一步提高了清洗效果^[1]。空化产生的微冲击波对不清表面的污垢层的清洗作用可归纳为侵蚀、乳化、脱脂、剥离、分散等过程；而超声波波幅的低频脉动能加速表面及盲孔深缝附近的污垢的分散过程。现将其主要部分电路工作原理分述如下：

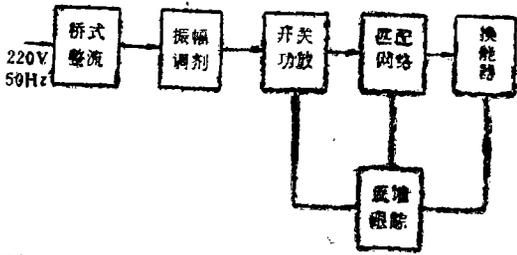


图5

1，桥式自动频率跟踪电路。众所周知，温升、空化、清洗槽液位及负载变化诸因素均会使换能器机械共振频率产生漂移。虽然清洗换能器的机械品质因数一般较低，但这对清洗效果仍将产生一定的影响。故自振系统内设有自动频率跟踪电路。这里采用“差动变量器桥式跟踪电路”^[1,3](见图6)，其工作原理主要是利用电桥平衡原理补偿换能器电学臂的电抗分量；借助于差动变量器提取与换能器机械臂振荡电流成正比的反馈电压，使闭环系统在换能器的机械臂串联共振

频率上自振，(这里，换能器既是自振系统负载，又是选频元件。)

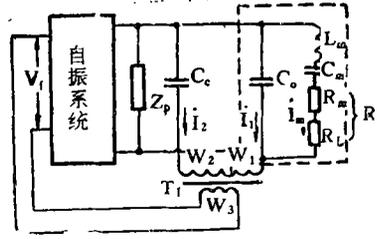


图6

图中虚线框内部分为换能器在共振频率附近的等效电路。其中 C_0 为电学臂的电抗分量； R 为机械臂的动生阻(R 等于声幅射阻 R_1 和机械损耗阻 R_m 之和)； L_m 和 C_m 为动生电感和动生电容； C_c 为补偿电容； W_1 、 W_2 和 W_3 分别为差动变量器 T_f 初次级绕组的匝数。换能器、补偿电容 C_c 与 W_1 、 W_2 分别构成电桥的四臂。假定 $R = \infty$ ，此时若满足条件：

$$W_1 I_1 = W_2 I_2, \text{电桥将获平衡, 次级绕组}(W_3)$$

的反馈电压 $\dot{U}_f = 0$ 。此平衡条件又可表为：

$$\frac{C_0}{C_c} = \frac{W_2}{W_1} = N$$

一般情况下 $R \neq \infty$ ，流经机械臂的电流 \dot{I}_m 使电桥失去平衡， W_3 上将感生出仅与换能器机械臂振荡电流 \dot{I}_m 成正比的反馈电压 \dot{U}_f ：

$$\dot{U}_f = \dot{I}_m \frac{W_1}{W_3} R_{in}$$

式中 R_{in} ——自振系统的输入电阻。显然，仅当系统的自振频率等于换能器的共振频率时，机械臂呈纯阻(R)， \dot{I}_m 最大，相角为0，反馈最强。即系统在换能器共振频率上自振。

本方法的优点在于反馈电压在相当宽的频段内仅与机械臂振荡电流有关，故跟踪可靠，失调较小。设计时，通常可取 $N = 3 \sim 5$ 。本例取 $N = 4$ 。实测换能器的 $C_0 = 8700 \text{ pf}$ ，故补偿电容 $C_c = C_0/4 = 2150 \text{ pf}$ (取标称值

2200pf)。顺便指出,本跟踪方法同样适用于磁致伸缩换能器。

2,串并联匹配电路。本机功放电路输出电压为近似方波,故其高(奇)次谐波占有相当大的比重。为提高集电极频率,须加入适当的匹配网络^[4]。这里采用串并联复合匹配网络(见图7)。图中 L_S 、 C_S 及 L_P 、 C_P ($C_P \approx C_0 + C_C$)分别调谐在换能器的共振频率上。 L_S 、 C_S 组成串联滤波器,旨在减少集电极与换能器的谐波损耗; L_P 用来调整负载的基波功率因数,使其等于(或接近于)1,功率匹配则借助于改变输出变压器 T_0 的变比来实现。

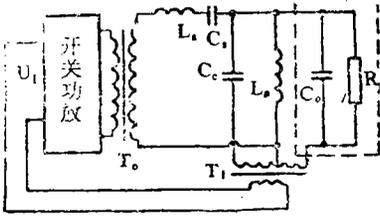


图7

3,准开关模式功放电路。图8为本机功放部分的电原理图。其中一对高压大功率硅管(T_1 和 T_2)组成半桥式推挽电路,它与自输出变压器中心抽头供电的推挽电路相比,在相同的电源电压下,管子承受的反向电压可降低一倍,从而降低了选管的耐压指标。加自跟踪电路的电压 \dot{U}_f (即 \dot{U}_{f1} 和 \dot{U}_{f2})分别正反馈至 T_1 、 T_2 的基极。 \dot{U}_f 为近似正弦电压。电路的设计保证 \dot{U}_f 足够大,使 T_1 、 T_2 处于过激励状态。此时,两管在一个周期的大部分时间内工作在开关状态(即饱和导通和截止状态),通常称此为准开关状态。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 C_1 、 C_2 和 D_1 、 D_2 组成偏置电路。 R_3 、 R_4 的作用是使两管在开机时有一定的电流放大系数,以保证电路起振,故不宜取得过大。但亦不宜取得过小,否则附加功耗增大。偏置元件参数的选取对正弦激励下的准开关模式功放电路的效率至

关重要。实验表明,设计和调整得当,集电极效率可达90%以上(甚至高于95%)。由于准开关电路的晶体管工作在过激励,大电流状态,故要求其开关参数 t_f 、 t_r 尽可能小些,饱和压降尽量低些,以确保高的效率。

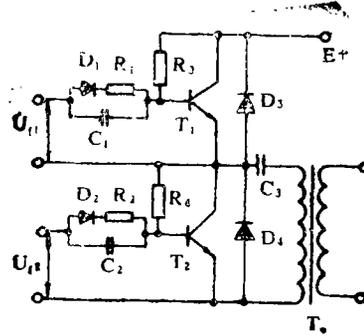


图8

值得一提的是因本机省去工频变压器,功放部分由220伏电网直接供电,故该部分元件和线路皆与电网火线相通。这里利用输出变压器 T_0 和反馈变压器 T_1 使带电的功放部分与清洗缸、外壳隔离。(这种方法通常称为“浮置”。)为保证安全,两变压器初、次级之间应有良好绝缘,(宜选用塑料骨架,层间须垫聚酯薄膜或聚四氟乙稀薄膜)。要求绕组与绕组、绕组与磁芯之间的绝缘强度达到1.5千伏(50赫兹)、1分钟不击穿。同时,整机外壳应可靠接地。

五、结束语

以上阐述的 UC—40 50 II 型超声清洗机具有高效、节电、低噪声、便于多工序操作等特点,且电路简单,元件少、成本较低。特别适用于清洗各类含有盲孔深缝、形状复杂的小型精密物件,如金银饰品、珠宝钻石、光学晶体、钟表眼镜、电子元件、医疗器械、微型轴承、……此外,亦可供实验室用于乳化、增溶、分散及杀菌消毒处理等。