

# 一种适用于实验室造影应用的高声强发生器

王志诚

(中国科学院东海研究站 上海 200032)

经声振后的造影剂能提高声学成像的清晰度,有可能提高超声临床诊断的质量。用实验室现有的超声设备制剂时其操作要十分小心且声强低而时间长,为克服这些缺点,研制了一台换能器工作在并联谐振点的高声强发生器。文中叙述了电路的主要设计方法。初步实验的结果表明,效果良好,能满足实验室造影剂声振的要求。

关键词: 造影剂,高声强,发生器

## A high-power ultrasound generator for sonicating ultrasound contrast agents

WANG Zhicheng

(Shanghai Acoustics Lab, Academia Sinica, Shanghai 200032)

Ultrasound contrast agent can improve distinctness of the formation of acoustic imaging, and it is possible to improve the quality of ultrasonic clinical diagnosis. It needs carefulness to make ultrasound contrast agent using existing ultrasound devices in lab, and the produced sound intensity is low, and it takes more time. To overcome these shortcomings, a generator with high intensity of sound was developed that works on the point of parallel connection resonance. This paper describes the main way of designing circuit. The results of experiment evince that the generator has good effects and can meet the demand of sound vibration of ultrasound contrast agents in lab.

**Key words:** ultrasound contrast agent, high sound intensity, generator

### 1 引言

液体造影剂经声振后注入病灶区,可提高声学成像的清晰度,故人们对它的研究兴趣日益增加。而清晰的主要原因是在空气进入造影剂中的同时被超声分散、粉碎,其中数  $m$  至  $20 \sim 30 m$  直径的微气泡能暂时存在

几分钟,给声学成像造成有利条件。为使其有较多的微气泡,制剂时需要操作人员把换能器的辐射面在液面附近上下不断地来回运动,以提高制剂速度和微气泡含量。否则要另外用气管导入空气,这会增加设备的成本、体积和重量且增加操作的复杂性。故换能器工作在串联谐振点上就显得不恰当,过去开发的实验室用的这种小型超声发生器就属于这

作者:王志诚,男,1940年12月生,助理研究员

收稿日期:97-11-17;修回日期:98-1-12

一类。虽然它在许多科研、大专院校和大企业的中心实验室中得到了较为广泛的应用,但它来作为实验室造影过程中的设备,因不能空载而操作时必须小心谨慎。其最高声强只有 $40 \sim 60 \text{ W/cm}^2$ 。另外它的电路也较陈旧,效率低。本文所述造影用的高声强发生器调谐在换能器的并联谐振点上,空载时发生器功率下降,加载时功率又自动相应地增加。其末级放大采用准D类电路,效率高,且有过压、过流和瞬态抑制3种保护,安全可靠,声强可达 $100 \sim 200 \text{ W/cm}^2$ 。初步使用的结果说明,和原有设备相比,不仅声强高、制剂时间短,且操作十分方便。工具头可以拆卸,能适合多种场合使用,是一种较好的实验室应用超声设备。文中只对电路和实验作了初步分析,换能器和工具头不在这里讨论。

## 2 发生器工作原理及电路

### 2.1 发生器原理

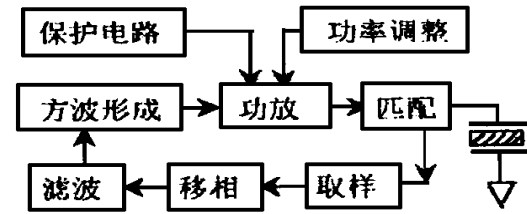


图1 发生器原理框图

发生器工作原理见图1,和一般的发生器似乎没有差别。开机时,由于功放级产生的电扰动,次级的匹配网络和换能器上也相应地得到了扰动电压。由于网络和换能器对频率的选择性,只有在 $f_p$  并联谐振点附近的电压最大,取样后经适当的相移,送回放大器的输入端,并满足自激振荡的两个基本条件即环路的总增益大于等于1,总相移为 $2n$  ( $n$ 为0, 1, 2, 3,.....为正整数)。那么该频率的信号会因正反馈而越来越大,大到一定幅值,功放级的输入端由于基极导通期间的整流作用而形

成一个准方波。这样末级便成为一个准D类功放。

为了分析方便,简化了发生器电路,见图2。图中虚线框内部分为换能器的等效电路, $C_0$ 为静电容, $L$ 和 $C$ 分别为动态电感和电容, $R_i$ 为等效内阻。 $R_L$ 为外部等效负载电阻。

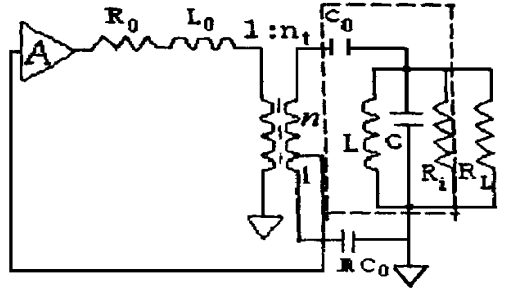


图2 电原理图

由图2可得到换能器阻抗的拉氏变换表达式为:

$$Z_T(s) = \frac{1}{sC_0} + \frac{s/C}{s^2 + s/RC + 1/LC}$$

$$= \frac{1}{C_0} \frac{s^2 + s \frac{p}{Qp} + \frac{p^2}{p^2}}{s(s^2 + s \frac{p}{Qp} + \frac{p^2}{p^2})}$$

式中  $p = 1/\sqrt{LC}$ ,  $Qp = R \sqrt{C/L}$ ,  $= C/(C + C_0)$ ,  $R = R_i R_L / (R_i + R_L)$

环路增益的拉氏变换表达式为:

$$LG(s) = A \frac{n_1}{n+1} \frac{1}{C_0}$$

$$\left\{ \frac{s^2(1 - \frac{n}{m}) + s \frac{p}{Qp}(1 - \frac{n}{m}) + (1 - \frac{n}{m}) \frac{p^2}{p^2}}{s^2 + L_0 C u^2 (s^2 + s \frac{p}{Qp} + \frac{p^2}{p^2})(s^2 + s \frac{R_0}{L_0} + \frac{1+m}{m L_0 C_0 n^2})} \right\}$$

用 $j p$ 替代上式的 $s$ :

$$LG(j p) = A \frac{n_1}{n+1} \frac{1}{C_0}$$

$$\left\{ \frac{p^2(1 - \frac{n}{m}) - p^2(1 - \frac{n}{m}) + j p \frac{p}{Qp}(1 - \frac{n}{m})}{-p^2 + j L_0 C u^2 \frac{p^2}{Qp} (\frac{1+m}{m L_0 C_0 n^2} - p^2 + j p \frac{R_0}{L_0})} \right\}$$

为了满足振荡条件,环路增益必须大于等于1,经运算得:

$$A (1 + R_0 n^2 / R) (n+1) / n_1 = A_c$$

$A_c$ 为临界放大量。

相位移应为  $\varphi = 2n$ ;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

正整数, 上式分子为实数得:  $m = n$ , 分母为实数得:  $L_0 = [(1 + m)LC / mC_0n^2]$ , 此时, 振荡频率为<sup>[2]</sup> :

$$\omega_{osc} = \left( \frac{0}{Q} \frac{2}{P} + \frac{0^2}{Q^2} \frac{P}{Q} \right) / \left( \frac{P}{Q} + \frac{0}{Q} \right)$$

其中:  $\omega_0 = (1 + n) / nL_0C_0$ ;

$$Q = L_0 / C_0 / R_0$$

这样我们可以根据换能器的参数来计算匹配电感和电容  $mC_0$  以及选择放大量  $A$ 、变比  $n$  和抽头比  $n_0$ 。

### 2.2 与通常发生器不同点

(1) 通常发生器调谐在串联谐振点上, 而本发生器调谐在并联谐振点上。从图3换能器阻抗曲线可见, 当发生器工作频率在大于  $f_s$  而略小于  $f_p$  的范围内, 换能器相当于一个很大的电感。此时, 比工作在  $f_s$  附近电路相移增加了近  $90^\circ$ ; 这是最本质的区别;

(2) 由于工作在  $f_p$  附近阻抗远高于

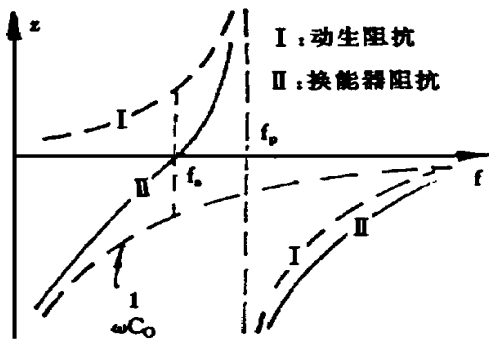


图3 理想换能器的频率-阻抗曲线

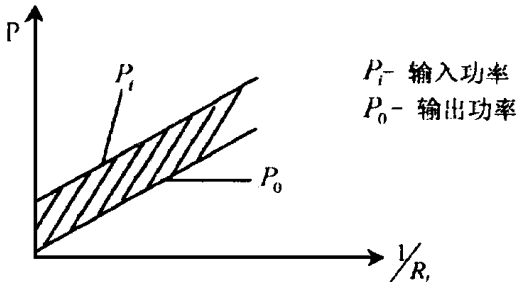


图4 输入输出功率和  $1/R_L$  之间的关系

$f_s$  附近阻抗, 故发生器的输出变压器的初次级之比较一般超声发生器大很多。次级电压高, 绕制时要注意;

(3) 当  $1/R_L$  为0时, 换能器只有内部耗能。当它愈来愈大时, 输入功率随着增大, 内部损耗几乎保持不变, 见图4。

### 2.3 换能器参数的测量

为了确定电路参数, 必须先测量它的并联谐振频率  $f_p$ 、内阻  $R_i$  和静电容  $C_0$ 。 $C_0$  可用电桥测得,  $f_p$  和  $R_i$  可用图5的电路测得。

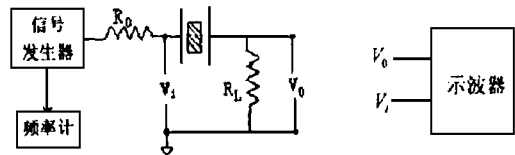


图5 换能器基本参数的测量

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_L}{R_L + Z_T} = M e^j$$

$M$  为  $V_o/V_i$  的模,  $\tau$  为幅角, 可用示波器测得的时间差来换算。于是换能器的阻抗  $Z_T$  可由下式求得。

$$Z_T = Z_T \quad \tau = \frac{R_L}{M} \frac{1}{1 - 2M \cos \tau + M^2 e^{j\tau}}$$

$$= \tan^{-1} \frac{\sin \tau}{\cos \tau - M}$$

慢慢改变发生器的频率保持  $V_i$  不变并使  $V_o$  最小, 也就是  $Z_T$  达到最大值时的频率即为该换能器的并联谐振频率  $f_p$ 。同样, 保持  $V_i$  不变逐渐向两边改变发生器的频率使其输出为  $f_p$  时的  $\sqrt{2}$  倍, 记下这两个频率  $f_1$  和  $f_2$ , 这两者之差就是换能器3dB的带宽。为了保持一定的测量精度, 此时的  $R_L$  应远小于换能器的  $Z_T$  最大值。

动态电容  $C = 1 / (R_i BW)$ ; 动态电感  $L = 1 / C P^2$ ;  $R_i$  为  $Z_m$  的最大绝对值,  $Z_m = Z_T - 1 / C_0$  (测量时, 把  $C_0$  近似看作一个常数),

原文中此式有明显的印刷错误

BW 为3dB 带宽, 单位为弧度/秒。

用这种方法测量本文所述的换能器, 其测量结果如下:

$$f_p = 19.770\text{kHz}; R_i = 38.2\text{k} \Omega; C_0 = 2600\text{pF}; C = 0.521\text{F}; L = 124.4\text{H}$$

### 2.4 发生器主电路

为了制作的方便, 我们把变压器分压改为电容分压, 以取得反馈电压。这样当改变变压器抽头而改变输出功率时, 不至于引起较多的相移[ $m$  和  $n$  之比保持不变]而引起频率的变化。图6为发生器主电路简图, 只画出了主电路和保护电路。图中  $L_f$  为移相电感,  $L_f$  和  $C_f$  组成杂波抑制电路,  $C_2 = mC_1$ ,  $L_0$  因已移到次级去, 同时又因  $C_1$  与  $C_2$  的介入, 所以要作相应的改变。功放级采用过压、过流和瞬态抑制3种保护, 不论哪个超过门限值, 经过或门和电子继电器, 便立即去掉基极激励, 迅速有效地保护了功率器件。

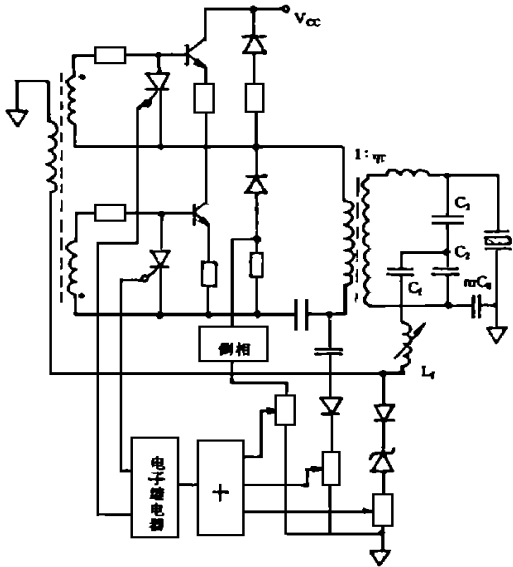


图6 发生器主电路图

### 3 设备的主要技术性能

工作频率: 19.70kHz;  
 最大输出功率: 90W;  
 最大电源消耗: 100W。

本设备对几种材质进行了负载实验, 得到了表1的结果。

从中可以看出, 输出功率随着材质的变化而不同。机油对换能器的力阻抗最大, 所以输出功率也最大。这里需要说明的是, 空载时消耗功率较大是由于电路中的高频电压和电

表1 输出功率与负载之间的关系

	空气	自来水	10# 柴油	机油	
电流(A)	0.3	0.40	0.42	0.47	1.2
电压(V)	100	99	99	98	95
输出功率(W)	23	33	35	40	102
相位差(°)	30	22	20	15	5

流的相位差较大(30°)。空载功耗和相位差可以调小, 但液体中送出的功率也相应地变小。表中最右边一列的数据是在换能器辐射端面施加1.2kg 左右纵向阻力的结果, 当阻力增加到2.5kg 以上时发生器就自动停振。电压和电流的相位差随着负载的增大逐渐减小。由于工作时引起液体的强烈空化, 因此负载相当不稳定, 相位差的数据只是大体上的平均值。表1所列的实验结果与图4的曲线相比较, 总的趋势是一致的。由于工具头辐射端面直径为4mm, 若电声转换效率为50%, 则在水中的声强达148W/cm<sup>2</sup>。

### 4 试用效果

初步试验, 用肉眼观察几种造影剂制备情况, 其效果明显优于原来的设备且制备速度快, 见表2。由于不用担心空载会损坏设备, 故操作极容易。

表2 两种设备的制备时间

	50% 葡萄糖	泛影葡胺60%	泛影葡胺76%	消耗功率(W)
本设备	8s	7s	8s	36~40
原设备	26s	13~14s	21s	60

表3是另一组实验结果。声振后会提高液体的声学非线性参量  $B/A$  [3], 非线性声学工作者和医学超声工作者对此都感兴趣。

图7是用76%泛影葡胺经声振后利用显微镜照相摄得的照片, 图中各大小圆圈表示气泡, 其直径多为10~30  $\mu\text{m}$ 。

室有关制备造影剂的要求, 又有原来实验室

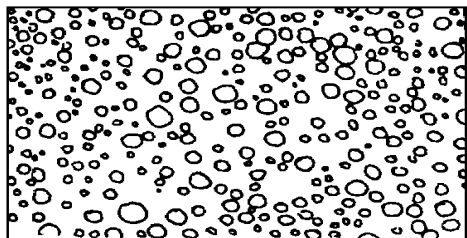


图7 76%泛影葡萄糖声振气泡分布图

表3 超声造影剂的声速  $C$ 、衰减系数 及非线性声参量  $B/A$

样 品	密 度 $\text{g/cm}^3$	声速 $\text{m/s}$	衰减系数 $\text{dB/cm}$		$B/A$
			2MHz	4MHz	
20% 甘露醇	1.07	1459.7	0.06	0.12	6.7
声 振 20% 甘露醇	1.07	1462.4	1.18	7.52	30.5
50% 葡萄糖	1.17	1461.0	0.35	0.4	6.9
声 振 50% 葡萄糖	1.17	1461.0	12.50	20.52	602.3
60% 泛影葡胺	1.31	1459.7	0.010	0.52	8.4
声 振 60% 泛影葡胺	1.31	1461.0	11.78	10.50	82.2
76% 泛影葡胺	1.44	1460.0	0.22	1.03	9.8
声 振 76% 泛影葡胺	1.40	1459.7	18.73	25.04	439.0

小型超声发生器的功能, 故有小批量生产的潜在前景。

本设备研制过程中得到冯绍松、王润田、章瑞铨等同志的大力支持, 换能器由凌鸿烈同志制作, 一部分试验在中山医院免疫室和B超室同志的支持下完成的, 在此一并表示感谢。

#### 参考文献

- 1 U. S. Patent 3,432,691
- 2 D, C, Bullis and A. Budah. Response of ultrasonic motional bridge circuits under resistive and Reactive Load
- 3 龚秀芬等. 超声造影剂的非线性参量研究. 声学技术, 1996; 15(4): 208~210

由此可见本设备能较好地满足当前试验

## 浙江省第2届噪声与振动控制技术交流会在湖州市召开

由浙江省声学学会、省环保产业协会噪声与振动控制专业委员会、省物理学会环境物理专业委员会、省环境学会噪声与振动专业委员会等4个学会联合举办的浙江省第二届噪声与振动控制技术交流会 1998年5月27~28日在湖州市召开, 参加会议的共50个单位76名代表, 交流论文25篇。

会议围绕省内外噪声与振动控制新技术、新材料、新工艺、新设备、新仪器以及发展动向展开研讨, 同时邀请了北京、上海等同行作专题报告。其中华东建筑设计院章奎生教授作的“上海大剧院声学设计”, 杭州大学潘仲麟教授作的“声环境与噪声控制”, 上海第九设计院吕玉恒高级工程师作的“热泵机组噪声治理实践”, 北京劳保所战嘉恺高级工程师作的“我国大型设备隔振技术现状与发展趋势”等报告引起与会者极大兴趣。

会议开得紧凑、热烈, 内容丰富, 学术气氛浓。省内主要大专院校、科研设计单位、噪声振动控制设备厂均派代表参加了会议, 出席会议的年轻工程技术人员占2/3以上。

吕玉恒