

测试大功率超声清洗机功率和效率的简易方法

周铁英 藏金明

(清华大学物理系) (清华大学机械厂)

1987年8月24日收到

从大功率超声清洗机电源输入到换能器的电流、电压波形皆非正弦波形。采用本文介绍的求和近似法,可以测试电流、电压的有效值以及平均功率。我们用求和近似法对大功率超声清洗机电源的电流、电压、电功率以及输入到超声换能器的电流、电压、电功率进行了测试,并用量热法对清洗槽获得的声功率也进行了测试。由测试结果计算出电源和超声换能器的效率,与已发表的结果^[1-2]比较接近。该方法可靠、直观、而且成本低,适合于生产厂家在现场进行测试与实验。

一、清洗机电源输出功率的测试

1. 测试线路

图1为测试线路,图中 R_3 和 R_4 分别为电压和电流的取样电阻。将 R_3 和 R_4 分别接到双线示波器的输入端,即可在示波器的屏上显示出输入到超声换能器清洗槽的电压、电流波形。(应注意调整示波器,使双线之间本身的相位差应为零。)

我们测取 R_4 为 0.30Ω , R_3 为 59.0Ω ,并取电压测试支路的总电阻 $R_0 = R_1 + R_2 + R_3 = 47.27k\Omega$ 。 $(R_1, R_2, R_3$ 全部采用大功率无感电阻。)测试时调整示波器的灵敏度分别为 $Y_1 =$

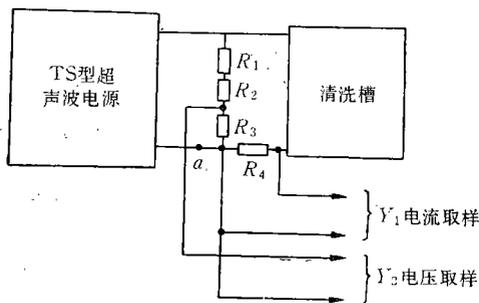


图1 测试线路

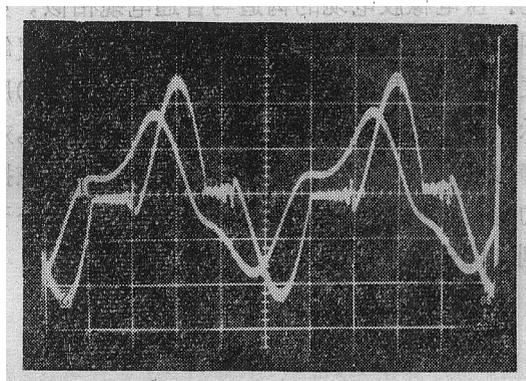


图2 电压波形(1)和电流波形(2)

$2V/cm$ 和 $Y_2 = 0.5V/cm$ 。将电流取样接到 Y_1 轴,这相当于电流灵敏度为

$$S_I = 2V/cm \div 0.30\Omega = 6.67A/cm$$

将电压取样接到 Y_2 轴,这相当于电压灵敏度为

$$S_u = \frac{R_0}{R_3} \times 0.5V/cm = \frac{47270}{59.0} \times 0.5V/cm = 400.6V/cm$$

超声换能器的中心频率约 $20.2kHz$,对应的周期为 $T = 49.5 \times 10^{-6}s$ 。我们调整示波器的 x 轴时间扫描为 $10^{-5}s/cm$ (见图2)。

2. 计算方法和结果

以TS2KW/20KC晶闸管超声清洗机为例。此机为交流220V供电,消耗的总电功率经测量为 $P_0 = 2.64kW$ (此时清洗槽水位100mm,

水温 38℃)。机器工作时拍下的输入到换能器的电压、电流波形如图 2 所示。电压、电流有效值计算公式分别为：

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

平均功率的计算公式为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$

式中 $v(t)$ 、 $i(t)$ 分别代表电压、电流的瞬时值， T 代表周期。

由于电压、电流波形都不是正弦波形，因此采用求和近似法得以下各式：

$$V' = \sqrt{\sum_{n=0}^N \frac{1}{N} v^2\left(\frac{n}{N} T\right)} \quad (1)$$

$$I' = \sqrt{\sum_{n=0}^N \frac{1}{N} i^2\left(\frac{n}{N} T\right)} \quad (2)$$

$$P' = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N v\left(\frac{n}{N} T\right) i\left(\frac{n}{N} T\right) \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)是我们求和近似法的依据。 I' 、 V' 代表电流、电压的有效值， P' 代表平均功率， N 为一个周期内总的取值点数， $i\left(\frac{n}{N} T\right)$ 、 $v\left(\frac{n}{N} T\right)$ 代表在 n 点处电流、电压的瞬时值。

对于图 2 所示的波形，取 $N = 50$ ，这相当于把 $T = 49.5 \times 10^{-6} \text{s}$ 分成 50 份。每一份相当于 $T/50 = 9.9 \times 10^{-6} \text{s}$ 。当 $n = 1$ 时，(图 2 中第 4 大格处定为 $n = 0$)

$$i_1 = i\left(\frac{1}{N} T\right) = 0.667 \text{A/mm} \times 6 \text{mm} \cong 4.0 \text{A}$$

$$v_1 = v\left(\frac{1}{N} T\right) = 40.06 \text{V/mm}$$

$$\times (-4) \text{mm} \cong -160 \text{V}$$

$$P_1 = v\left(\frac{1}{N} T\right) i\left(\frac{1}{N} T\right) \cong -640 \text{W}$$

对不同的 n 求出相应的 i_n 及 v_n ，然后按公式(3) 求出电源输入到换能器清洗槽及取样电阻 R_s 的平均功率 P'

应用声学

$$P' = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N v\left(\frac{n}{N} T\right) i\left(\frac{n}{N} T\right) \\ \cong \frac{101859 \text{W}}{50} = 2037 \text{W}$$

再由公式(2)求得电流有效值

$$I' = 8.7 \text{A}$$

由公式(1)求得电压有效值

$$V' = 457 \text{V}$$

进而求得电流取样电阻 R_s 上消耗的电功率为 P_s

$$P_s = I'^2 R_s = (8.7)^2 \times 0.30 = 22.7 \text{W}$$

$R_0 = R_1 + R_2 + R_3$ 上消耗的功率为 P_V

$$P_V = \frac{V'^2}{R_0} = \frac{457^2}{47270} = 4.4 \text{W}$$

所以清洗机电源输出的电功率为 P_e

$$P_e = P' + P_V = 2037 + 4.4 = 2041 \text{W}$$

输入到换能器清洗槽的电功率为 P_T

$$P_T = P' - P_s = 2037 - 22.7 = 2014 \text{W}$$

由以上的测量和计算我们求得清洗机电源的效率 η_c

$$\eta_c = \frac{P_e}{P_0} = \frac{2041}{2640} = 77\%$$

二、换能器清洗槽电声效率的测试

将一定数量的水注入清洗槽中，并将清洗槽对外界绝热。开机运行，每隔一定时间间隔 Δt ，测量清洗槽内水的温升 ΔT ℃，再由物质的质量 M 和比热 C 求出物质吸收的热量 ΔQ

$$\Delta Q = C \cdot M \cdot \Delta T \quad (4)$$

利用热功当量求出 Δt 时间内，外界（超声电源）对清洗槽所作的功

$$W = 4.18 (\text{焦耳/卡}) \cdot C \cdot M \cdot \Delta T \quad (5)$$

计算得功率

$$P = W/\Delta t \quad (6)$$

实测时，我们向清洗槽注入了 39.2kg 水，让换能器向清洗槽辐射声波。每 $\Delta t = 10$ 分钟测出一组温升 ΔT 。经多次测量获得水的平均温升 $\Delta T = 6.0^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。已知水的比热为 1 卡/克·度，由公式(6)计算得 P_W

$$P_w = W/\Delta t = 4.18 \text{ 焦耳/卡} \times 1 \text{ 卡/克} \\ \cdot \text{度} \times 39.2 \times 10^3 \text{ 克} \times 6.0 \text{ 度}/600 \text{ 秒} \\ \cong 1.64 \text{ kW}$$

清洗槽的内壁为不锈钢板,质量为 9.17kg,比热为 0.117 卡/克·度,由公式(6)计算出清洗槽内壁吸取的功率 P_s

$$P_s = 4.18 \text{ 焦/卡} \times 0.117 \text{ 卡/克} \cdot \text{度} \\ \times 9.17 \times 10^3 \text{ 克} \times 6.0 \text{ 度}/600 \text{ 秒} \\ \cong 45 \text{ W}$$

可以近似认为换能器振子向清洗槽输送的声功率为 P

$$P = P_w + P_s = 1.64 \text{ kW} + 0.045 \text{ kW} \\ \cong 1.69 \text{ kW}$$

于是可以求得换能器的电声效率 η_{ea}

$$\eta_{ea} = \frac{P}{P_T} = 1.69/2.014 \cong 84\%$$

超声清洗机总的电声效率 η_{oa}

$$\eta_{oa} = \frac{P}{P_0} = \frac{1.69}{2.64} \cong 64\%$$

三、测量误差分析

用上述近似求和法测试非正弦波功率,除了测试仪表本身的误差外,图 1 所示线路也带来误差.从线路分析 R_0 越大, R_4 越小,测试数据越接近实际值;但 R_4 过小,阻值不易测准,接触电阻的影响不容忽略.从目前所选的参数分析, R_4 接到 a 处,再加大 R_0 (见图 1) 会提高 P_c 的测试精度.

用求和近似法求 I' 、 V' 、 P' 时, N 的取值越大,意味着测点越密,所得结果越精确.为了保证 I' 、 V' 的测试精度,还必须降低视觉误差,因此应将图 2 放大若干倍.放大后,读数误

差可限制在 5% 之内.

用量热法测试声功率是目前使用较普遍的一种方法.我们在清洗槽不锈钢板壁外加了 20mm 厚的隔热层,以阻止热传递.由于空气的热导率比水小一个多数量级,比 Al 和不锈钢小 2—3 个数量级,因此计算清洗槽的声功率时,我们略去了向周围空间传递的声功率.换能器在振动辐射声功率的过程中,自身也消耗一部分功率并产生自身的温升.我们经多次测试得知换能器的温升略低于清洗槽内水的温升.我们是用环氧树脂将换能器粘在清洗槽底部的.粘结层的热导率也远小于 Al 和不锈钢,因此换能器与清洗槽间的热传递对于测试结果不会产生过大的误差.按照换能器与清洗槽中的水具有同样温升的假定,我们计算了换能器损耗的功率为 170W.前面已经测出输入到换能器清洗槽的功率 $P_T = 2014 \text{ W}$,清洗槽获得 1685W,除了换能器损耗 170W 之外,显然还有 $2014 \text{ W} - 1685 \text{ W} - 170 \text{ W} = 159 \text{ W}$ 其他功率损耗.这些其他功率损耗显然包括换能器和清洗槽向空气中传递的功率.

四、结束语

本机所用换能器为半穿孔夹心式宽带换能器,中心频率约 20.2kHz,测出的 $\eta_{ea} \cong 84\%$.此结果与已有文献报导^[1-2]是接近的.说明本文所介绍的简易方法具有一定的可靠性.此法也可推广到其他脉冲功率的测试中.

参 考 文 献

- [1] 林仲茂等,应用声学,4-4(1985),14—16.
[2] 林仲茂等,声学学报,7-4(1984),267—270.