

Camp 公式的实验修正

杨 周 铜

(电子工业部第十研究所)

1983 年 1 月 7 日收到

工作中发现,按 Camp 公式设计的磁致伸缩换能器,有载或空载时的工作频率低于设计频率。对 Camp 公式进行实验修正后,可以使换能器的工作频率基本等于设计频率,从而简化了声学振动系统的设计程序,保证换能器处于良好工作状态。

一、前 言

在超声技术中,常用的换能器件有磁致伸缩换能器和压电换能器两大类。在磁致伸缩换能器中,按 Camp 公式^[1]设计的窗形结构用得较多。但实际工作中发现,用 Camp 公式设计的换能器,其有载或空载时的工作频率低于设计频率,这给声学振动系统的设计带来麻烦。为了使按 Camp 公式计算出来的换能器的设计频率基本等于有载工作频率,并能用此频率作为设计其余声学振动部件的频率依据,本文提出了一种实验修正方法。

二、修正方法的推导

用标准 Camp 公式设计换能器时,要得到较好的声学振动系统,一般是先按 Camp 公式设计出换能器,加工好后在空载小信号条件下测出换能器的工作频率,再以此频率作为设计其余振动部件的频率依据。这样做不但烦琐,而且是小信号无负载情况测量,所得频率也不是换能器的有载工作频率。

标准 Camp 公式为

$$\lg\left(\frac{2\pi f}{c} a\right) \lg\left(\frac{2\pi f}{c} b\right) = \frac{d}{D} \quad (1)$$

式中 c 为换能器材料中的声速; f 为设计频率; a 、 b 、 d 和 D 如图 1 所示。

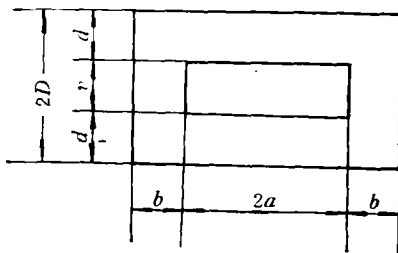


图 1 厚度为 0.1—0.2mm 的窗形换能器叠片

在(1)式中,当换能器材料选定后,声速 c 可以确定,但 a 、 b 、 d 和 D 及 f 仍为未知。在实际设计中,工作频率和声功率由应用目的来选定;所以,只要使用目的明确,工作频率和声功率是确定的。根据 $S = P_a/P_{as}$ 的关系,可得

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{P_a}{2P_{as}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中 S 为换能器的辐射总面积; P_a 为换能器输出的声功率; P_{as} 为声功率密度。因此 D 也是确定的。

为了确定 d 和 b , 引入两个经验公式

$$d = (0.3-0.8)D \quad (3)$$

$$b = (1-1.5)d \quad (4)$$

把频率 f 和按(2)、(3)、(4)三式得到的 D 、 d 、 b 代入(1)式,整理后得

$$a = \frac{c}{2\pi f} \lg^{-1} \left[\frac{d}{D} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi f}{c} b \right) \right] \quad (5)$$

到此,得到按 Camp 公式计算换能器叠片的全部尺寸。按此尺寸加工成换能器,测其以水为负载的工作频率 f' 。可发现 $f' < f$ 。这是

按 Camp 公式得到的结果。

把 f' 代入(5)式得

$$a' = \frac{c}{2\pi f'} \lg^{-1} \left[\frac{d}{D} \lg \left(\frac{2\pi f'}{c} b \right) \right] \quad (6)$$

令 $a/a' = h$, 则

$$a' = a/h \quad (7)$$

上式中的 h 可称为 Camp 公式的修正常数。

把 $a' = a/h$ 代入(6)式, 并把(6)式中的 f' 换成 f , 整理后得

$$\lg \left(\frac{2\pi f}{c} \cdot \frac{a}{h} \right) \lg \left(\frac{2\pi f}{c} b \right) = \frac{d}{D} \quad (8)$$

上式可称为修正的 Camp 公式。式中 a 是由(1)式算出来的, h 假设可由实验定出。利用(8)式算出来的换能器频率就基本等于设计频率 f 。

三、用实验求 h 值

由上述推导可知, 要得到正确的 h 值, 需要对换能器实际工作频率进行测量。但在工作中影响换能器工作频率的因素较多, 这给 h 值的推算带来一定的影响。在表 1 中给出了一组换能器谐振频率的设计值和实际测量结果。测量中除 5 号换能器采用三瓦超声发生器外, 其余均用二百五十瓦超声发生器推动。磁化电流按 $I_H = (B \sim l_\phi) / (0.8 \sqrt{2\pi N \mu})$ 选择, 其中 $B \sim$ 为磁感应强度, N 为换能器单臂上的匝数, l_ϕ 为

表 1 几种换能器的设计频率与水中实际测量结果

换能器序号		1	2	3	4	5
换能器尺寸 (mm)	a	16.5	16	43.5	26.9	13.3
	b	15.2	16	10	20	5
	d	5.3	9	9	11.25	4
	D	15.8	25	15	22.5	5.5
设计频率(kHz)	f	25	25.7	20	20	60
实测频率(kHz)	f'	24.5	24.6	19.4	19.15	58
按实测频率的计算值	a'	17.31	17.3	45.5	29.1	13.92
每种换能器的修正常数	h	0.953	0.925	0.956	0.924	0.955

平均磁路长度, μ 为材料导磁率。阻抗用改变输出变压器次级抽头的方法来匹配。声负载为水。调整发生器的工作频率, 以振动最佳时的频率为换能器的工作频率。

表 1 中的 a 由 Camp 公式算出, a' 是把换能器的实测频率 f' 代入(6)式后得到。由(7)式计算每种换能器的 h 值, 然后求出 5 种换能器的 h 平均值, 作为今后的修正常数值。 h 的平均值为

$$h = 0.943$$

四、讨 论

负载对换能器谐振频率的影响可以从理论上进行计算。另有人提出一种在不同频率范围采用不同修正常数的经验修正方法^[2]。本文提出的修正方法来源于实验, 对不同频率采用同一修正常数可以得到同样的修正效果。此外, 修正常数可以直接引入 Camp 公式, 修正简单, 效果良好。

实际工作中影响换能器谐振频率的因素很多, 要全面修正各种因素产生的影响很难做到, 也不必要, 因为超声振动系统工作状态的微小变化或工作条件的稍许改变, 均能引起换能器工作频率的变化。所以在实际工作中允许工作频率在适当范围内有小的变化。

本修正方法是为使换能器的设计频率能够直接作为有载工作频率及其余声学振动部件的设计频率依据而提出, 修正的精度取决试样的种类和测试条件。如果试样种类多, 测试条件接近实际工作环境, 修正效果就好, 否则影响修正结果。此外, 本文试样实际工作频率的测量是以水为负载, 若换能器的负载是变幅杆, 想进一步提高修正效果, 试样应在变幅杆为负载的条件下测量实际工作频率。

参 考 文 献

- [1] L. Camp, J. Acoust Soc Amer, 20(1948), 616.
- [2] 赵惠田等, 超声波处理钢液, 上海科学技术出版社, 1960, 20—23.