

压电陶瓷球形换能器耐电压与 抗拉极限辐射声功率研究

赵 颀

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650051)

摘要: 对目前常用的压电陶瓷球形换能器辐射声功率进行研究, 分别从压电陶瓷球振动时动态抗拉强度极限和退极化电压两方面分析其极限辐射声功率, 两者中选择较小值, 为极限辐射声功率计算提供部分技术指导; 同时给出了特定尺寸下压电陶瓷球的宽带极限耐压辐射声功率, 其结果可为球形换能器设计、使用提供参考。

关键词: 压电陶瓷球; 抗拉强度极限; 退极化电压; 声功率

中图分类号: TB561

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-01-0094-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.01.017

A study of the maximum radiated sound power of spherical piezoelectric ceramic transducer constrained by depolarization voltage and ultimate tensile strength

ZHAO Xie

(Kunming Shipborne Equipment Reseach and Test Center, Kunming 650001, Yunnan, China)

Abstract: This paper researches the problem of the sound power radiated by spherical piezoelectric ceramic transducer, analyzes the maximum radiated sound power from the two aspects of ultimate tensile strength and depolarization voltage and chooses the smaller value between the two for practical uses, which can provide some technical guidance for the calculation of utimate radiated sound power. At the same time, the broadband sound power radiated by the piezoelectric ceramic ball with specific size under ultimate voltage is given; this result can provide a reference for the spherical transducer design.

Key words: piezoelectric ceramic ball; utimate tensile strength; depolarization voltage; sound power

0 引 言

声波是目前人类发现的能在水中远距离传播的最有效载体, 但相对而言, 由于海水的声吸收和声波的扩散损失等, 其传播距离有限, 尤其高频传输时, 传播距离更短。因此科研人员在进行声源研究时, 为了获得远距离传输, 一般在降低辐射频率的同时尽可能地提高声源的辐射声功率, 即提高换能器两端的电压。但换能器最大辐射声功率是有限的, 其大小与换能器的尺寸与材料有关。球形压电换能器的辐射声功率主要由压电陶瓷球的直径、壁厚以及材料特性等决定。如果无限制地提高换能器两端的电压, 换能器就会损坏, 表现为换能器辐射

声功率的严重下降或性能指标的变化, 这主要是由于压电陶瓷退极化或破裂引起。如典型的钛酸钡压电陶瓷, 室温情况下, 在 400 V/mm(有效值)的电场作用下开始有明显的退极化, 到 800 V/mm(有效值)时基本已完全退极化^[1]; 锆钛酸铅压电陶瓷中的 PZT-4 材料, 其交流退极化场约为 350 V/mm(有效值)。此外, 即使未达到退极化程度, 当压电陶瓷机械交变应力超过某一值时, 材料就要破裂, 即使低于此值, 应变的反复变化也会导致机械疲劳^[2]。陶瓷的额定动态抗张强度规定了在交变应力作用下不发生断裂和机械疲劳的上限值。不同材料额定动态抗张强度不同, 最大辐射声功率也不同, 而且额定动态抗张强度与换能器的辐射声功率有着直接关系。此外, 在工程应用时, 为了使用便捷, 往往用一个特定尺寸的压电陶瓷球在很宽的频带内实现发射, 此时一般是通过提高陶瓷球两极的电压实现大功率的目的, 很容易出现退极化现象, 尤其在低频段, 退极化现象更严重。本文主要解决上述问题。

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-08-13

作者简介: 赵颀(1982—), 男, 陕西榆林人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水声换能器。

通讯作者: 赵颀, E-mail: zhaoxie750@163.com

1 辐射声功率计算

1.1 耐压辐射声功率计算

建立如图 1 所示的径向极化压电薄壳陶瓷球分析模型, 假设压电陶瓷球处于自由状态, 其外半径为 c , 内半径为 b , 厚度为 t , 则平均半径 $a=(b+c)/2$ 。对于薄球壳, 当工作频率低于球壳厚度模的基频时, 球壳内在径向仅存在振动而不存在伸缩波。当压电陶瓷薄壳球是径向极化并沿径向加交变外电场 E_r 激励时, 由于球的对称性, 在球壳内仅存在沿 θ 和 φ 方向的应变 $S_{\theta\theta}$ 及 $S_{\varphi\varphi}$ 以及它们相对应的应力 $T_{\theta\theta}$ 及 $T_{\varphi\varphi}$, 并且 $S_{\theta\theta}=S_{\varphi\varphi}=\xi_r/a$, $T_{\theta\theta}=T_{\varphi\varphi}$, ξ_r 为径向位移。则根据牛顿第二定律, 沿径向振动方程为^[3]

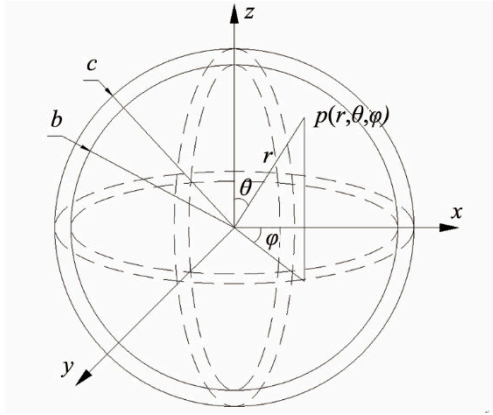


图 1 压电陶瓷球分析模型
Fig.1 Piezoelectric ceramic ball

$$\rho_c \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} = -\frac{T_{\theta\theta} + T_{\varphi\varphi}}{a} \quad (1)$$

式中: ρ_c 为压电陶瓷的密度。

当陶瓷球作简谐振动时, 则

$$\dot{\xi}_r = \xi_r j\omega \quad (2)$$

式中: ω 为角频率。

将式(2)代入式(1), 并简化得

$$\dot{\xi}_r = -\frac{2T_{\theta\theta}}{j\omega\rho_c a} \quad (3)$$

根据球壳的工作状态, 球壳振动的压电方程可简化为

$$S_{\theta\theta} = S_{\varphi\varphi} = \frac{\xi_r}{a} = S_{11}^E T_{\theta\theta} + S_{12}^E T_{\varphi\varphi} + d_{31} E_r \quad (4)$$

式中: S_{11}^E , S_{12}^E 为柔顺系数; d_{31} 为压电常数。

$$D_r = \epsilon_{33}^T E_r + d_{31}(T_{\theta\theta} + T_{\varphi\varphi}) \quad (5)$$

式中: D_r 为电位移; ϵ_{33}^T 为自由介电系数。

令 $\sigma = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$, 则由式(4)与式(5)可得

$$D_r = \epsilon_{33}^S E_r + \frac{2d_{31}}{S_{11}^E(1-\sigma)} \frac{\xi_r}{a} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_{33}^S = \epsilon_{33}^T \left(1 - \frac{2d_{31}^2}{S_{11}^E(1-\sigma)\epsilon_{33}^T}\right)$ 。

根据式(6)可得球壳在振动时的交变电量 Q 为

$$Q = \iint D_r dS = \epsilon_{33}^S E_r 4\pi a^2 + \frac{4\pi a 2d_{31}}{S_{11}^E(1-\sigma)} \xi_r \quad (7)$$

所以, 球壳上的电流为

$$I = \frac{dQ}{dt} = j\omega\epsilon_{33}^S \frac{4\pi a^2}{t} V + \frac{8\pi a d_{31} a}{S_{11}^E(1-\sigma)} \dot{\xi}_r \quad (8)$$

式中: V 为球壳内外表面电压。

将式(3)与式(4)代入式(8), 化简得

$$I = V \left(j\omega C_0 + \frac{N^2}{jm\omega - j\frac{1}{C_m\omega}} \right) \quad (9)$$

式中: $m = 4\pi a^2 t \rho_c$; $C_m = \frac{S_{11}^E(1-\sigma)}{8\pi t}$; $N = \frac{8\pi d_{31} a}{S_{11}^E(1-\sigma)}$;

$C_0 = \frac{4\pi a^2 \epsilon_{33}^S}{t}$ 。

式(9)即为压电陶瓷薄球在空气中的等效电路公式。压电陶瓷球在水中辐射声波时, 需要推动声波振动, 因此, 水对陶瓷球有一个辐射阻 R , m_s 为共振质量, 同时陶瓷球振动时有机械损耗 R_m , 等效电路图如图 2 所示。

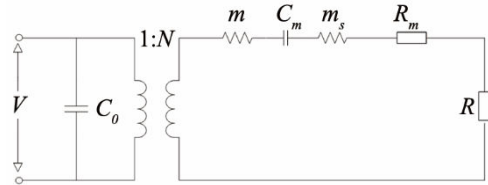


图 2 水中球形压电陶瓷换能器等效电路图
Fig.2 The equivalent circuit of the spherical piezoelectric ceramic transducer in water

根据水中等效电路图, 结合空气中的振动特性, 压电陶瓷球的辐射声功率为

$$P_w = \frac{N^2 V^2 R}{\left[R + R_m + j(m+m_s)\omega - j\frac{1}{C_m\omega} \right]^2} \quad (10)$$

式中: $R = \frac{4\pi a^2 (ka)^2}{1+(ka)^2} \rho c$; $m_s = \frac{4\pi a^3 \rho}{1+(ka)^2}$; k 为波数;

ρ 为水的密度; c 为水中声速。

从式(10)可知, 换能器要实现谐振, 需要满足

$$j(m+m_s)\omega - j\frac{1}{C_m\omega} = 0 \quad (11)$$

因此, 陶瓷球在水下的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(m+m_s)C_m}} \quad (12)$$

通过式(12), 可以求出不同谐振频率对应的压电陶瓷球半径 a 。另外, 等效电路谐振时, 电容或电感上的电压约为总电压的 Q_m 倍, Q_m 为压电陶瓷球在径向谐振频率时的机械品质因数, 则该陶瓷球在水下的谐振辐射声功率为

$$P_{rw} = \frac{N^2 V^2 R}{(R+R_m)^2 Q_m^2} \quad (13)$$

利用图 2 还可以求出:

$$Q_m = \frac{(m+m_s)\omega_0}{R_m+R} \quad (14)$$

式中: ω_0 为水下谐振角频率。

1.2 抗拉辐射声功率计算

以陶瓷球的球心为原点, 建立球坐标系, 则在该坐标系中的某点 r 处的声压 p 可表示为

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (15)$$

式中: 待定系数 A 可能为复数; $\frac{A}{r}$ 的绝对值为声压振幅。

水中质点的运动方程为

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (16)$$

式中: u 为质点振速。

将式(15)代入式(16), 得:

$$u(r, t) = \frac{A}{r\rho c} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (17)$$

式中: $\frac{A}{r\rho c} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right)$ 的绝对值即为速度的振幅。

声功率可以通过声场强度对包围声源的封闭面的积分求得。若球源的表面振速峰值为 u_0 , 则表面球源的边界条件可写为

$$u(r, t)|_{r=a} = u_0 e^{j\omega t} \quad (18)$$

将式(17)代入式(18), 可求得待定系数 A :

$$A = \frac{\rho c k u_0 a^2}{\sqrt{1+(ka)^2}} e^{j\varphi_0} \quad (19)$$

其中: $\tan \varphi_0 = \frac{1}{ka}$ 。

将式(19)代入式(15), 声压可表达为

$$p(r, t) = \frac{k\rho c u_0 a^2 e^{j\varphi_0}}{r\sqrt{1+(ka)^2}} e^{j(\omega t - kr)} \quad (20)$$

声场强度 I 为

$$I(r) = \frac{1}{d} \int_0^d \text{Re}[p(r, t)] \cdot \text{Re}[u(r, t)] dt \quad (21)$$

式中: d 为距离声场中某点到球中心的距离; Re 是对内部函数取实部。

将式(19)与式(20)代入式(21), 得

$$I(r) = \frac{u_0^2 \cdot \rho c a^2 (ka)^2}{2r^2 \cdot 1+(ka)^2} \quad (22)$$

因为以声源为球心的球面上声波强度相等, 所以在以 r 为半径的球面上的功率为

$$W_b = \oint_0^\pi I(r) ds = 4\pi r^2 I(r) = \frac{u_0^2 \cdot \rho c 4\pi a^2 (ka)^2}{2 \cdot 1+(ka)^2} \quad (23)$$

压电陶瓷球在谐振时, 类似电路谐振, 需考虑 Q_m 的贡献, 因此在计算其谐振时的辐射声功率时需要用 $T_{\theta\theta}$ 除以 Q_m 。同时式(3)给出了球壳表面的振速与沿 θ 和 φ 方向的应力 $T_{\theta\theta}$ 及 $T_{\varphi\varphi}$ 关系, 将其代入式(23), 得

$$W_b = \frac{8\pi\rho c (ka)^2}{1+(ka)^2} \cdot \left(\frac{T_{\theta\theta}}{\omega\rho c Q_m}\right)^2 \quad (24)$$

2 最大辐射功率

式(13)已经给出了压电陶瓷球在给定电压情况下的谐振辐射声功率。由于压电陶瓷薄壳球两个电极间的耐压是有限的, 当达到极限时陶瓷球会出现退极化现象, 因此知道退极化电压即可计算出该压电陶瓷球形换能器在谐振频率附近耐电压最大辐射声功率。

从式(24)可看出, 自由状态的压电陶瓷球辐射声功率与声波辐射的频率、半径以及陶瓷球内的应力有关。压电陶瓷是陶瓷的一种, 该材料抗压能力很强, 但抗拉性较差, 一般耐压是耐拉能力的 3~4 倍, 因此压电陶瓷球换能器的辐射极限由其抗拉强度决定。如 PZT4 压电陶瓷材料, 其动态抗拉强度为 27.4 MPa^[4]; 若用其制作球形换能器, 其极限辐射功率与陶瓷球的平均半径和工作频率有关。

综合式(13)与式(24), 取两者的最小值即为压电陶瓷薄壳球形换能器在谐振频率附近的最大辐射声功率。

以厚度为 2 mm 的压电陶瓷球为例, 陶瓷球材料为 PZT-4 型, 根据式(13)与式(24)得出不同尺寸陶瓷球在谐振频率附近的最大辐射声功率, 如图 3 所示。根据水声工程中发射换能器辐射声功率的计算方法, 图 3 中分析声功率时, 以声压级表述。从图 3 可看出, 2 mm 壁厚的压电陶瓷球在 36.2 kHz 时, 其耐压极限辐射声功率与抗拉极限声功率相等, 当小于此频率时, 其参考极限辐射声功率主要由陶瓷球的退极化电压决定, 反之则由陶瓷材料的抗拉强度决定。

在工程应用时, 为了使用便捷, 往往用一个特定尺寸的压电陶瓷球在很宽的频带内实现发射, 而

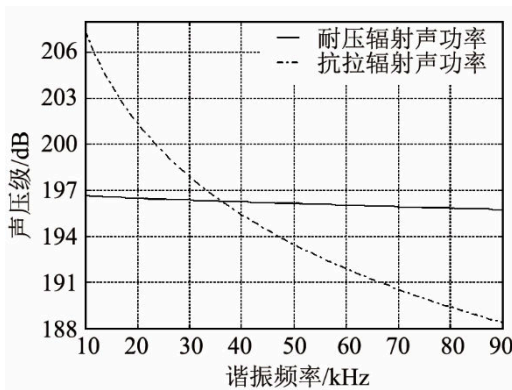


图 3 从耐电压和抗拉伸确定的极限辐射声功率图
Fig.3 The ultimate radiated sound powers determined by voltage-withstanding and anti-tensile

当工作频率远离谐振频率时, 陶瓷球的发送电压响应下降得很快, 此时一般是通过提高陶瓷球两极的电压实现大功率的目的, 但很容易出现退极化现象。通过式(13)可以求出谐振频率附近的特定尺寸压电陶瓷球的耐压极限辐射声功率。在远离谐振频率的低频段, 机械阻抗由 $-j\frac{1}{C_m\omega}$ 决定; 在远离谐振频率的高频段, 机械阻抗由 $j(m+m_s)\omega$ 决定; 因此, 在远离谐振频率的低频和高频段, 也可以通过简化式(10)计算其极限辐射声功率, 但是在谐振频率附近, 机械阻抗的决定因素较多。本文通过对 2 mm 壁厚、 $\phi 90$ mm 直径的压电陶瓷球实测的方法获得过度频段的 R_m 。图 4 为 2 mm 壁厚、 $\phi 90$ mm

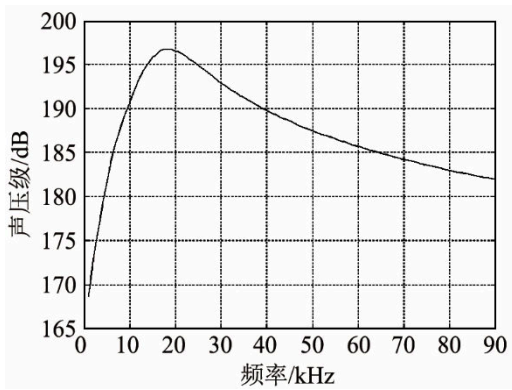


图 4 特定尺寸陶瓷球极限辐射声功率图
Fig.4 The ceramic ball limit radiation sound power figure

直径的压电陶瓷球的极限辐射声功率图。从图 4 中可看出, 在远离谐振频率处, 极限声功率下降得很快, 尤其低频段下降更快。因此在使用宽带换能器时, 尤其需要关注低频段耐压极限辐射声功率。

3 总结

本文分别从压电陶瓷球振动时动态抗拉强度极限和退极化电压两方面分析其极限辐射声功率, 得出理论公式。根据谐振频点, 两者中选择较小值作为其实际谐振工况下的参考极限辐射声功率。通过计算某一壁厚的 PZT-4 压电陶瓷球在 10~90 kHz 范围内谐振工况下的耐电压与抗拉极限辐射声功率, 得出低于某一频率时, 球形换能器参考极限辐射声功率主要由陶瓷球的退极化电压决定, 反之则由陶瓷材料的抗拉强度决定。并且在由退极化电压决定辐射声功率的低频段, 给出了特定尺寸压电陶瓷球的全频带极限辐射声功率, 结果可为球形换能器宽带设计与使用提供部分技术指导。由于压电陶瓷生产厂家工艺的不同以及陶瓷之间的个性差异, 建议在设计压电陶瓷球换能器时取一个 0.9 的安全系数。

参 考 文 献

- [1] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005:81.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducers and arrays[M]. Beijing: Peking University Press, 2005, 81.
- [2] 许光, 吴培荣, 刘振君. 高频换能器功率疲劳分析[J]. 声学技术, 2015, 34(3): 283-286.
XU Guang, WU Peirong, LIU Zhenjun. Research on the power fatigue problem of high frequency underwater transducer[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(3): 283-286.
- [3] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 85-86.
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Base theory of sound[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 85-86.
- [4] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 142-150.
WANG Rongjin. Handbook for underwater acoustic materials[M]. Beijing: Science Press, 1983: 142-150.