

◇ 研究报告 ◇

电磁激励器屏幕发声系统的数理模型

耿丽^{1†} 屈胜²

(1 南通理工学院电气与能源工程学院 南通 226002)

(2 上海诺基亚贝尔股份有限公司 南京 210000)

摘要 目前,全面屏手机已经成为一种趋势。为提升全面屏的用户体验效果,业界开发了屏下指纹识别、伸缩式摄像头等技术,对于音频(主要是语音通话),则开发了基于压电陶瓷和电磁激励器的两种屏幕发声方案,其代表产品分别为小米 MIX 与 VIVO NEX。该文针对电磁激励器屏幕发声技术,分别从平板弯曲振动、平板声辐射、电磁激励器阵列驱动等模型出发,推导电磁激励器驱动屏幕振动发声的原理以及简化的力电类比等效电路图;给出仿真与实测频响曲线以及某型号手机语音通话测试数据;最后简要归纳电磁激励器屏幕发声的设计指南以及进一步的研究方向。

关键词 电磁激励器,平板弯曲振动,平板声辐射,电磁激励器驱动阵列

中图法分类号: TB5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2019)06-0969-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.009

The mathematical-physical model of electro-magnetic actuator screen sound system

GENG Li¹ QU Sheng²

(1 School of Electrical and Energy Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

(2 Nokia Shanghai Bell Company Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract Full screen or full display mobile phone has become a trend. In order to improve user experience effect, the industry has developed some specific technologies, such as fingerprint recognition under screen, telescopic camera etc. For audio (mainly voice calls), two kinds of screen voice schemes based on piezoelectric (PZT) and electro-magnetic actuator (EMA) have been developed. The representative products are MI MIX and VIVO NEX respectively. This paper, aiming at EMA screen sound technology, deduces the EMA screen sound principle and simplified mechanical-electrical analog equivalent circuit from flat-panel bending vibration, flat-panel sound radiation, EMA array-driven and other models. Then the application of frequency response (FR) simulation in EMA screen vocalization and the actual measurement data of a certain mobile phone are introduced. Finally, this paper concludes the design guidelines of the EMA screen sound and the further research direction.

Key words Electro-magnetic actuator, Flat-panel flexural vibration, Flat-panel sound radiation, Electro-magnetic actuator array-driven

2019-01-10 收稿; 2019-09-11 定稿

作者简介: 耿丽 (1978-), 女, 江苏宿迁人, 硕士, 讲师, 研究方向: 信号处理、应用电子技术。

† 通讯作者 E-mail: m13913998581@163.com

0 引言

随着手机、Pad等电子消费产品外观造型越来越轻薄,基于全面屏设计的产品也越来越普及,随之而来对传统扬声器也提出了更高要求。但是,轻薄化的扬声器在音质、工艺、可靠性等方面存在诸多问题。因此,解决全面屏产品声学痛点有两条路径,一条是基于常规扬声器的设计,采用更好的振膜、更合理的腔体来实现更好的音质;另一条是基于平板振动原理,采用屏幕振动的方式来实现发声(事实上也可以采用中框振动的方式,但一般统称为屏幕发声)。

手机上首次运用屏幕发声技术的是小米MIX(2016年11月发布),它采用压电陶瓷(PZT)与悬臂梁结构,将压电单元粘贴在悬臂上,压电单元的振动通过悬臂传导至中框,从而使中框振动发声。而第一款基于电磁激励器(Electromagnetic actuator, EMA)技术的屏幕发声手机是VIVO NEX(2018年6月发布),它通过在受话器(Receiver, RCV)位置处粘贴EMA,直接带动中框振动发声。两款手机内部的屏幕发声组件如图1所示。

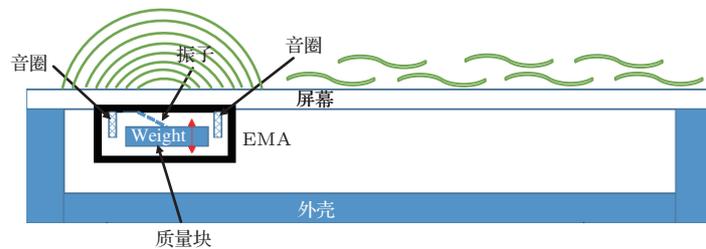
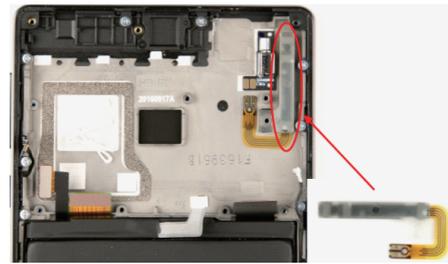


图2 EMA屏幕发声系统框图

Fig. 2 System architecture of EMA screen sound

EMA单体为“动磁式”原理,通常由密闭铁壳、音圈、弹簧和带磁性的质量块等部件组成,其中质量块与弹簧构成复合振子。将EMA通过胶水或螺钉固定于手机屏幕下方,对音圈输入交流电信号,则音圈产生交变磁场并与磁性质量块相互作用,引起复合振子振动,复合振子再带动屏幕、中框、外壳等部件振动,从而推动空气发出声音,故称为“屏幕发声”。

本文主要分析EMA屏幕发声方案的技术原理,通过平板弯曲振动、平板声辐射、EMA阵列驱动等模型,推导出EMA屏幕发声原理及简化的力电



(a) 小米MIX基于PZT的屏幕发声



(b) VIVO NEX基于EMA的屏幕发声

图1 两款屏幕发声手机

Fig. 1 Two kinds of mobile phone adopting screen sound technology

PZT小巧轻薄,但需要高压驱动且对低频信号响应不足。从用户体验效果看,基于PZT的屏幕发声手机普遍存在声音尖、音质差的缺陷,因此业界多倾向于EMA方案,相应的手机架构如图2所示。

类比模型与某手机实测数据;最后简要归纳EMA屏幕发声方案设计指南以及进一步的研究方向。

1 平板振动

1.1 四边简支平板的自由振动

手机屏幕宽度通常为60~80 mm,长度为120~160 mm,厚度为0.8~1 mm。因此,可以将手机屏幕近似看成一块薄板,其厚度方向应力为常数,以简化板振动方程的推导。因为屏幕为矩形,所以取直角坐标系,则自由振动状态下的平板方程

如下^[1]:

$$D\nabla^4\xi(t,x,y) + M\frac{\partial^2\xi(t,x,y)}{\partial^2t} = 0, \quad (1)$$

其中, $\xi(t,x,y)$ 表示板上任一点 (x,y) 在时刻 t 的位移, 又称“挠度”; D 为板的弯曲刚度 (Bending stiffness); M 为平板单位面积质量; ∇^4 为四阶微分算子, 又称“双调和算子”。

令 $\xi(t,x,y) = \xi(t)W(x,y)$ 代入式 (1), 其中 $\xi(t)$ 仅与时间相关, $W(x,y)$ 为振形函数, 有

$$\begin{aligned} D\xi(t)\nabla^4W(x,y) + M\frac{\partial^2\xi(t)}{\partial^2t}W(x,y) &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\nabla^4W(x,y)}{W(x,y)} + \frac{M}{D}\frac{\partial^2\xi(t)}{\partial^2t} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

再令 $\xi(t) = Ce^{j(\omega t + \varphi)}$ (其中 C 为系数, ω 为角频率, φ 为初相位) 代入式 (2), 有

$$\begin{aligned} \nabla^4W(x,y) - \frac{\omega^2M}{D}W(x,y) &= 0 \\ \Rightarrow \omega^2 &= \frac{M}{D}\frac{\nabla^4W(x,y)}{W(x,y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 就是平板自由振动状态下, 角频率 ω 所应满足的条件。由于 $W(x,y)$ 取决于平板的固有属性, 因此对应的 ω 也称“本征频率”。

考察手机屏幕的装配, 常采用四边粘胶的方式贴装在中框支架上, 除边框外, 屏幕大部分区域与机壳内部电路板留有一定间隙, 整个屏幕接近四边简支方式 (如图 2 所示)。简单起见, 假设所装配的中框为一无限大障板, 取坐标系如图 3 所示, 则可将振形函数取为^[2]

$$\begin{aligned} W(x,y) \\ = \sum_{m,n=1}^{\infty} W_{mn}(x,y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \sin\frac{m\pi x}{L_x} \sin\frac{n\pi y}{L_y}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, L_x, L_y 表示屏幕长宽; (x,y) 表示屏幕上任一点坐标; $m, n = 1, 2, \dots$ 为振形函数在 x, y 轴方向的模态序号。

将式 (4) 代入式 (3), 可得

$$\omega_{mn} = \left[\left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{D}{M}}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \xi(t,x,y) &= \sum_{m,n=1}^{\infty} \xi_{mn}(t)W_{mn}(x,y) \\ &= \sum_{m,n=1}^{\infty} C_{mn}e^{j(\omega_{mn}t + \varphi_{mn})}W_{mn}(x,y), \end{aligned} \quad (6)$$

式 (5) 表示矩形平板每一种振形 $W_{mn}(x,y)$ 对应一个本征频率 ω_{mn} ; 式 (6) 则表示板上任一点的总挠度是每一种振形下的挠度叠加, 其中系数 C_{mn} 和 φ_{mn} 由平板的初始条件决定。

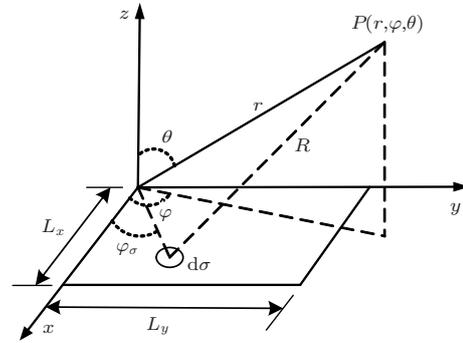


图 3 装配在无限大障板上的四边简支矩形平板

Fig. 3 Rectangular panel screen simply supported in an infinite baffle

代入手机屏幕玻璃参数, 密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 55 \text{ GPa}$, 泊松比 $\sigma = 0.2$, 厚度 $h = 0.8 \text{ mm}$, 长 $L_x = 160 \text{ mm}$, 宽 $L_y = 80 \text{ mm}$ 。则各本征频率为 $f_{mn} = \omega_{mn}/2\pi \approx 65.3(m^2 + 4n^2) \text{ Hz}$, 其中 $m = n = 1$ 对应屏幕最低本征频率 $f_{\min} = f_{11} \approx 326 \text{ Hz}$ 。

图 4 是将某 EMA 置于某屏幕顶部的模态仿真结果 (取 1~6 阶)。由于 EMA 单体本身可视为弹簧振子, 所以屏幕振动的总模态中不仅包含屏幕自身的振动模态, 还包含 EMA 单体的振动模态 (纵坐标表示位移, 颜色越深表明位移越大)。

一个不容忽视的问题是本征频率的分布密度。由式 (5) 可知, 增大屏幕尺寸、降低屏幕弯曲刚度、降低屏幕厚度 (减小屏幕质量) 都可有效降低最低本征频率。一方面有助于把屏幕本征频率向低端扩展以提高屏幕对低频振动的响应能力, 另一方面也有助于增加中高频的分布密度, 使 EMA 屏幕发声的频响曲线范围更宽也更平滑^[3]。但如果屏幕长宽比恰为整数倍时, 会出现本征频率的“简并化”现象^[1], 如 $L_x = 2L_y$ 时有 $\omega_{42} = \omega_{23}$, 表明 (4,2) 模态和 (2,3) 模态的本征频率是同一个值。显然, 简并化现象越严重, 频率特性就越不均匀, 在实际设计中应尽量避免。

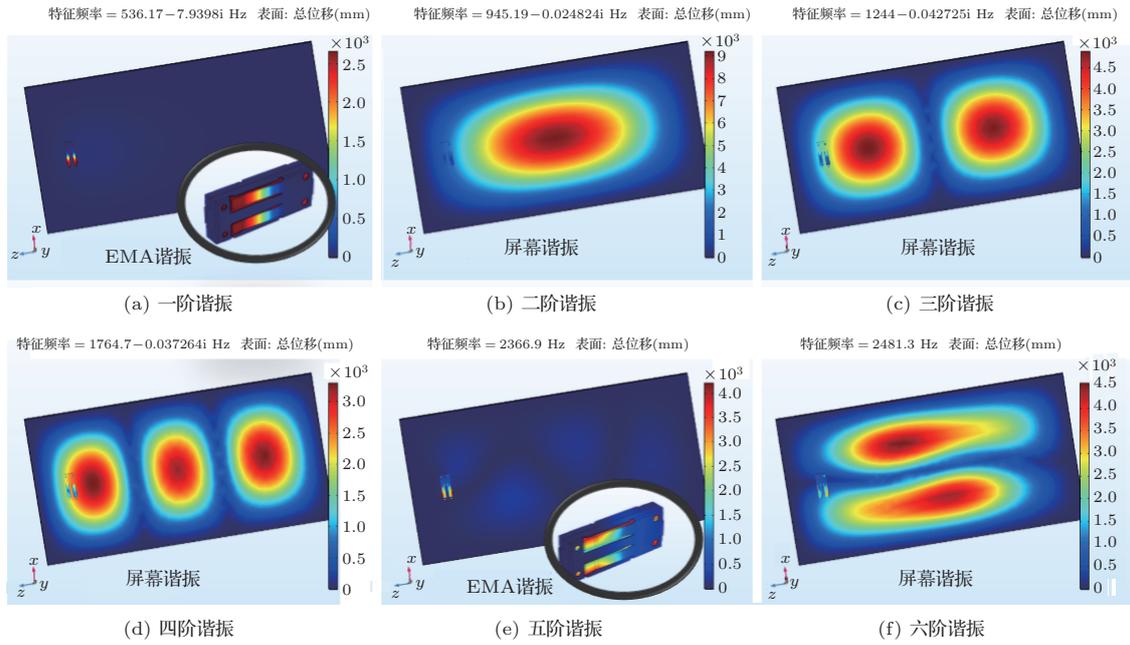


图4 某EMA驱动某屏幕振动的模态仿真结果(1~6阶)

Fig. 4 Mode simulation of EMA driving screen vibration (1st~6th order)

1.2 四边简支平板的受迫振动

在平板上施加一个动力载荷 $q(t, x, y) = q(x, y) e^{j\omega t}$, 则式(1)改写为

$$D\nabla^4 \xi(t, x, y) + M \frac{\partial^2 \xi(t, x, y)}{\partial t^2} = q(t, x, y). \quad (7)$$

将 $q(t, x, y)$ 展开成 $W_{mn}(x, y)$ 的级数,

$$q(t, x, y) = q(x, y) e^{j\omega t} = \sum_{m,n=1}^{\infty} F_{mn}(t) W_{mn}(x, y), \quad (8)$$

$$F_{mn}(t) = \frac{4}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} q(x, y) e^{j\omega t} \times W_{mn}(x, y) dx dy. \quad (9)$$

设动力载荷由 N 个点力构成, 相当于 N 个EMA驱动器在平板不同位置施加驱动力, 则有

$$q(x, y) = \sum_{i=1}^N q_i(x_i, y_i) \delta(x - x_i, y - y_i), \quad (10)$$

其中, $\delta(x - x_i, y - y_i) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ 为狄拉克函数(Dirac function)。

将式(10)代入式(9)可得

$$F_{mn}(t) = \frac{4 e^{j\omega t}}{L_x L_y} \sum_{i=1}^N q_i(x_i, y_i) W_{mn}(x_i, y_i) = \frac{4 f_{mn} e^{j\omega t}}{L_x L_y} = \frac{4 f_{mn}(t)}{L_x L_y}, \quad (11)$$

其中, $f_{mn}(t) = f_{mn} e^{j\omega t}$ 表示对应 (m, n) 阶振形函数的模态力。通常, EMA驱动力均匀分布于单体与屏幕的接触区域, 并非点力, 式(10)原则上应采用阶跃函数 $\varepsilon(x, y)$ 做叠加, 但根据积分中值定理, 对区域的积分等于区域某点函数值乘以区域的度量, 故采用更为简洁的点力描述。

将式(6)、(8)代入式(7), 可得

$$\sum_{m,n=1}^{\infty} \left[D \psi_{mn}^4 \xi_{mn}(t) + M \frac{\partial^2 \xi_{mn}(t)}{\partial t^2} \right] \times W_{mn}(x, y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{4 f_{mn}(t)}{L_x L_y} W_{mn}(x, y), \quad (12)$$

其中,

$$\psi_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2},$$

故本征频率亦可记为 $\omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{M}} \psi_{mn}^2$ 。两边同时除以 $W_{mn}(x, y)$, 则式(12)为常系数二阶非齐次方程, 齐次解即为式(6), 需求其特解。事实上, 给定驱动力表达式(10)就能得到式(11), 再代入式(12)后就可以求出对应 (m, n) 阶模态下的特解 $\xi_{mn_P}(t)$, 因此可将式(6)直接推广到受迫振动的情况。

$$\xi(t, x, y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} [\xi_{mn_H}(t) + \xi_{mn_P}(t)] \times W_{mn}(x, y), \quad (13)$$

其中, $\xi_{mn_H}(t)$ 、 $\xi_{mn_P}(t)$ 分别表示齐次解与特解, 而式(6)中的 $\xi_{mn}(t)$ 就是此处的 $\xi_{mn_H}(t)$ 。

另外由式(11)可知, 模态力与驱动力之间可通过振形函数关联。若令 $R = m \times n$, 并将模态力的模值 f_{mn} 、振形函数 W_{mn} 按照本征频率 ω_{mn} 从低到高的模态顺序排列, 则有(忽略系数 $4/L_x L_y$ 及 $e^{j\omega t}$ 项)

$$\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_R]^T, \quad \mathbf{Q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} W_1(x_1, y_1) & W_1(x_2, y_2) & \dots & W_1(x_N, y_N) \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ W_R(x_1, y_1) & W_R(x_2, y_2) & \dots & W_R(x_N, y_N) \end{pmatrix}_{R \times N}, \quad (15)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}\mathbf{Q}. \quad (16)$$

式(16)表明, 由驱动力向量 \mathbf{Q} 通过振形函数矩阵 \mathbf{G} 可以产生模态力向量 \mathbf{F} 。反之, 已知模态力向量 \mathbf{F} 和振形函数矩阵 \mathbf{G} , 亦可反推驱动力向量 \mathbf{Q} 。

一种比较简单的情况是 $R = N$ 时 (\mathbf{G} 为方阵), 若满足 $\text{rank}(\mathbf{G}) = \text{rank}(\mathbf{G}, \mathbf{F}) = N$ (此时 \mathbf{G} 可逆), 则 \mathbf{Q} 可直接表示为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{F}. \quad (17)$$

当 $R > N$ 时 (模态力向量维数通常要大于驱动力向量维数), \mathbf{G} 非方阵不可求逆。但若满足 $\text{rank}(\mathbf{G}) = \text{rank}(\mathbf{G}, \mathbf{F}) = N$ (即 \mathbf{G} 列满秩), 则 \mathbf{Q} 可表示为

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} (\mathbf{G}^T \mathbf{F}). \quad (18)$$

式(18)表明, 在给定 \mathbf{F} 的情况下, 只要满足 $\text{rank}(\mathbf{G}) = \text{rank}(\mathbf{G}, \mathbf{F}) = N$, 则 \mathbf{Q} 有唯一解, 且不难验证, 式(17)就是式(18)在 \mathbf{G} 可逆情况下的特例。

第二种情况是 $\text{rank}(\mathbf{G}) = \text{rank}(\mathbf{G}, \mathbf{F}) < N$, 此时 \mathbf{Q} 有无穷多个解。

第三种情况是 $\text{rank}(\mathbf{G}) \neq \text{rank}(\mathbf{G}, \mathbf{F})$, 此时 \mathbf{Q} 无解。但无论 \mathbf{Q} 是无解还是有无穷多个解, 实际上都可以求 \mathbf{Q} 的最小二乘解^[4]

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbf{G}^+ \mathbf{F} + (\mathbf{I} - \mathbf{G}^+ \mathbf{G}) \mathbf{Y} \\ &= \mathbf{Q}_0 + (\mathbf{I} - \mathbf{G}^+ \mathbf{G}) \mathbf{Y}, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, \mathbf{G}^+ 是 \mathbf{G} 的 Moore-Penrose 逆, \mathbf{I} 是单位阵, \mathbf{Y} 是任意 R 维列向量, \mathbf{Q}_0 称为 \mathbf{Q} 的极小最小二乘解。

因此, 若给定一个驱动力向量 \mathbf{Q} , 要求屏幕必须激发出某个特定的模态力向量 \mathbf{F} , 则需要通过调整驱动力的位置实现, 即改变振形函数矩阵 \mathbf{G} 。由此, 按照某种规则设定驱动力位置是应用 EMA 屏幕发声方案的一项重要技术, 论文第3节将做进一步探讨。

2 屏幕声辐射

2.1 辐射声压

如图3所示, $P(r, \varphi, \theta)$ 为远场某观察点, $d\sigma = (\sigma \cos \varphi_\sigma, \sigma \sin \varphi_\sigma, 0)$ 为平板上某面元, 由 Rayleigh 积分可知, $d\sigma$ 在 $P(r, \varphi, \theta)$ 点产生的声压为^[1]

$$dP(r, \varphi, \theta) = j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi R} u_\sigma e^{j(\omega t - kR)} d\sigma, \quad (20)$$

其中, $d\sigma$ 表示面元 $d\sigma$ 的面积, u_σ 表示面元 $d\sigma$ 的振动速度幅值, R 为面元到观察点的距离, ρ_0 为空气密度, $k = \omega/c_0$ 为波数, ω 为面元振动角频率, c_0 为声波在空气介质中的传播速度。由于是远场, 分母中的 R 近似用观察点到坐标原点的距离 r 来代替, 但指数中的 R 须考虑相位影响。由几何关系知,

$$\begin{aligned} R &\approx r - \sigma \cos(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{r}) = r - \sigma \frac{\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{r}}{r} \\ &= r - \sigma \sin \theta (\cos \varphi \cos \varphi_\sigma + \sin \varphi \sin \varphi_\sigma). \end{aligned} \quad (21)$$

再考虑到面元坐标 $d\sigma = (\sigma \cos \varphi_\sigma, \sigma \sin \varphi_\sigma, 0) \triangleq (x, y, 0)$, 代入式(21)中可得

$$R \approx r - \frac{1}{k} \left(\frac{\alpha x}{L_x} + \frac{\beta y}{L_y} \right), \quad (22)$$

其中, $\alpha = k L_x \sin \theta \cos \varphi$, $\beta = k L_y \sin \theta \sin \varphi$, 再代入式(20)中可得

$$\begin{aligned} dP(r, \varphi, \theta) &= j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi r} u_\sigma e^{j(\omega t - kr)} e^{j(\alpha x/L_x + \beta y/L_y)} d\sigma. \end{aligned} \quad (23)$$

面元 $d\sigma$ 的振动速度幅值 u_σ 用振形函数表达如下:

$$\begin{aligned} u_\sigma &= u_\sigma(x, y) = \frac{\partial \xi(t, x, y)}{\partial t} \\ &= \sum_{m,n=1}^{\infty} u_{mn} W_{mn}(x, y), \end{aligned} \quad (24)$$

其中, u_{mn} 表示平板在 (m, n) 模态下的振动速度幅值。再将式(24)代入式(23)并对整个平板做积分, 可得平板在任意 (m, n) 模态下对观察点产生的声压:

$$P_{mn}(r, \varphi, \theta) = ju_{mn} \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \frac{L_x L_y}{mn\pi^2} \left[\frac{(-1)^m e^{j\alpha} - 1}{(\alpha/m\pi)^2 - 1} \right] \times \left[\frac{(-1)^n e^{j\beta} - 1}{(\beta/n\pi)^2 - 1} \right]. \quad (25)$$

2.2 模态辐射效率

为研究各模态的辐射效率, 即各模态辐射阻的相对关系, 对式(25)做进一步处理, 定义各模态辐射声强 $I_{mn}(r, \varphi, \theta)$ 为

$$I_{mn}(r, \varphi, \theta) = |P_{mn}(r, \varphi, \theta)|^2 / (2\rho_0 c_0). \quad (26)$$

则平板向半空间辐射的总功率 PW_{mn} 为

$$PW_{mn} = \int I_{mn}(r, \varphi, \theta) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{|P_{mn}(r, \varphi, \theta)|^2}{2\rho_0 c_0} r^2 \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (27)$$

平板的辐射阻 R_{mn} 定义为

$$R_{mn} = PW_{mn} / u_{mn}^2, \quad (28)$$

其中,

$$u_{mn-r}^2 = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \frac{1}{2} [u_{mn} W_{mn}(x, y)]^2 dx dy = \frac{1}{8} u_{mn}^2,$$

其物理意义是对平板上各点速度求均方根值, 即平板在 (m, n) 模态下的等效活塞振动速度。

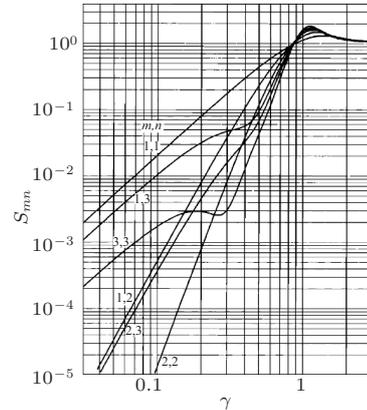
最后, 将 R_{mn} 对空气介质和平板面积进行归一化, 可得辐射效率 S_{mn} 为

$$S_{mn} = \frac{R_{mn}}{\rho_0 c_0 L_x L_y} = \frac{64k^2 L_x L_y}{m^2 n^2 \pi^6} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{|(-1)^m e^{j\alpha} - 1|}{(\alpha/m\pi)^2 - 1} \right]^2 \times \left[\frac{|(-1)^n e^{j\beta} - 1|}{(\beta/n\pi)^2 - 1} \right]^2 \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (29)$$

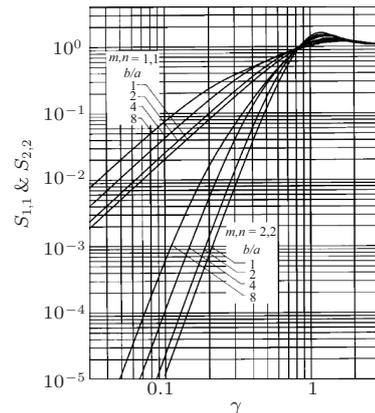
对式(29)进一步处理, 将 (m, n) 按照(奇, 奇)、(奇, 偶)、(偶, 奇)、(偶, 偶)四种状态分类并假设波数比 $\gamma = k/\psi_{mn} \ll 1$, 则可将 S_{mn} 表示为 (m, n) 、 γ 、外形比 L_x/L_y 的函数并绘制曲线。

$$S_{mn} = S((m, n), \gamma, L_x/L_y). \quad (30)$$

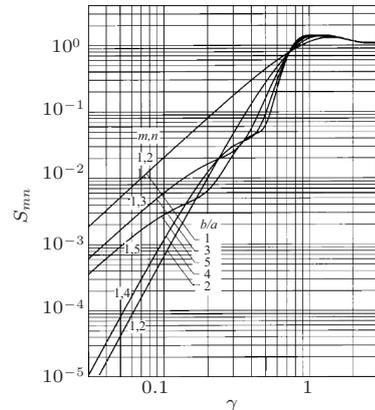
图5引自文献[5], 横坐标为波数比 γ , 纵坐标为辐射效率 S_{mn} 。总体而言[6], (奇, 奇)模态的辐射效率最高, 而(偶, 偶)模态最低, (奇, 偶)或(偶, 奇)模



(a) 正方形板的低阶模态



(b) 改变外形比



(c) 外形比和模态序号相同

图5 若干条件下的辐射效率

Fig. 5 Radiation efficiency under some different conditions

态的辐射效率居中；在(奇,奇)模态中,低阶模态的辐射效率要高于高阶模态；另外,大外形比的辐射效率要高于小外形比,但手机屏幕的外形比由整机造型决定而不能更改,所以在设计EMA屏幕发声方案时通常不考虑外形比。

3 EMA屏幕发声模型

3.1 建模与频响仿真

现在考察如何设定驱动点力的位置。如前所述,平板(奇,奇)模态的辐射效率最高,且模态序数越小(按 ω_{mn} 的大小排序)辐射效率越高。因此,提高EMA屏幕发声的响度,尤其是低频响度,应尽量激发平板振动的低阶(奇,奇)模态。

给定 \mathbf{F} ,即可由式(17)~(19)求解所需的 \mathbf{Q} ,但须先确定 \mathbf{G} 。简单起见,设 \mathbf{G} 为可逆方阵。先考虑只有一个驱动力 q_1 的情况,显然此时只有一个模态力 f_1 ,并且满足 $q_1 = \mathbf{G}^{-1}f_1$ (\mathbf{G}^{-1} 退化为一个数,用 h_1 表示)。对于固定的 f_1 ,若 h_1 越小则表明所需的 q_1 越小,也即驱动力到模态力的耦合效率越高。如(1,1)模态,将 q_1 置于中点($L_x/2, L_y/2$)时 $h_1 = 1$,表明其耦合效率为100%;但若将 q_1 置于平板边沿,则 $h_1 = \infty$,耦合效率为0,即平板边沿对于(1,1)模态是节线(Node line);对(2,2)模态,将 q_1 置于($L_x/2, L_y/2$)时 $h_1 = \infty$,耦合效率为0,但将 q_1 置于($L_x/4, L_y/4$)或($3L_x/4, 3L_y/4$)时 $h_1 = 1$,耦合效率为100%。可见,某个特定位置对激发某个特定模态力的效率最高,而对其他模态力的激发效率可能是最差的。因此,当用 N 个驱动力去激励 N 个模态力的时候,须综合考虑单个驱动力激励各模态力的效率以及所有驱动力激励所有模态力的总效率,不妨将 \mathbf{G}^{-1} 写为如下形式:

$$\mathbf{G}^{-1} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} & \dots & h_{N1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ h_{1N} & h_{2N} & \dots & h_{NN} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

其中, h_{lr} 的下标 l 表示模态力序号, r 表示驱动力序号,并且由此可得

$$q_r = \sum_{l=1}^N h_{lr} f_l, \quad \eta_r = \frac{1}{\Omega_r} = 1 / \sum_{l=1}^N h_{lr}, \quad (32)$$

其中, η_r 表示由第 r 个驱动力耦合出全部模态力的总效率,因此提高 η_r 等价于最小化 Ω_r 。但一般并不对 Ω_r 最小化,而是改为最小化 $\sum_{l=1}^N h_{lr}^2$ 。因为 h_{lr}

代表由驱动力 q_r 生成模态力 f_l 的转化效率,要求转换效率高(即 h_{lr} 要小)的同时,也希望 q_r 生成各模态力 f_1, f_2, \dots, f_N 的转化效率尽量接近,不要出现有的效率极高、有的效率极低的情况,因此用最小化平方和的算法更为合适。再考虑到全部 N 个驱动力,则优化方程可用式(33)表示:

$$\min \left(\sum_{r=1}^N \sum_{l=1}^N h_{lr}^2 \right). \quad (33)$$

至此,本文建立了EMA驱动力与平板振动模态之间的联系,并且找到了求解转化效率最高的最优位置方法。文献[7]基于式(33),分别对 $N=3, 4, 5, 6, 7, 8$ 的情况,根据所设定的 \mathbf{F} ,得到相应的最优 \mathbf{G} 。

对声辐射的仿真一般可以采用等效线路或有限元两种方法。等效线路通常基于力电类比,把力学模型转化为电学模型。手机通常只有一个EMA,可视为点力源,而屏幕作为拾振系统,系统如图6所示。

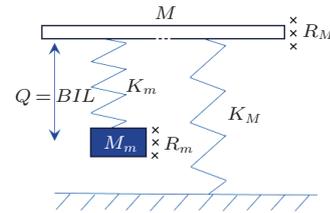


图6 EMA屏幕发声系统的等效力学模型

Fig. 6 Equivalent mechanical model of EMA screen sound system

图6中, K_m 为劲度系数, M_m 为振子质量, M 为屏幕质量, R_m 为屏幕的阻力系数, K_m 表示屏幕与中框之间的胶水, Q 表示驱动力,可通过式(16)转化为模态力 \mathbf{F} 。将图6转化为电学线路,如图7所示。

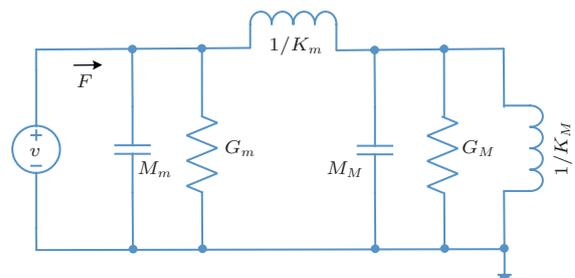


图7 力电类比图(导纳型)

Fig. 7 Mechanic-electric analogy circuit (admittance type)

其中, $G_m = 1/R_m$ 、 $G_M = 1/R_M$ 分别表示质量块和屏幕的力导, v 表示屏幕振动速度, F 表示模态力。文献[8-9]采用阻抗型力电类比,建立了平板振动的等效线路模型。但文献中的 F 是物理驱动力,且直接把屏幕振动视为点力驱动力下的活塞振动,这不符合实际物理过程,应改为模态力,把屏幕振动视为模态力驱动下的等效活塞振动,等效活塞振动速度及其辐射声压分别用式(24)和式(25)描述。

尽管可根据所需激发的模态力来设置EMA的位置,但用户在接听电话过程中会不自觉地耳朵靠近RCV位置,因此不妨设EMA(单体尺寸 $12\text{ mm} \times 6\text{ mm}$)横置于屏幕中轴线且中心点距离屏幕上边沿 8 mm 处,然后逐渐增加屏幕尺寸,但保持整机单位尺寸质量不变(0.025 kg/寸)。图8(a)为频响仿真结果,图8(b)为某6寸屏实测频响。

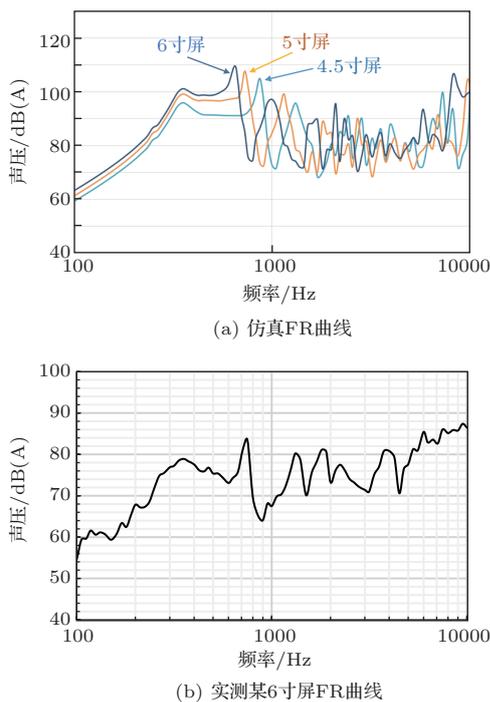


图8 不同尺寸屏幕的FR仿真与实测

Fig. 8 Simulation and measurement FR curves of different screen dimension

实测与仿真FR曲线包络接近(FR绝对值由于仿真和实测的距离设置不同而有些上下移动),各模态本征频率随屏幕尺寸增大均有所减小,符合式(5),且由于屏幕顺性增加,低频段FR幅度略有提升。

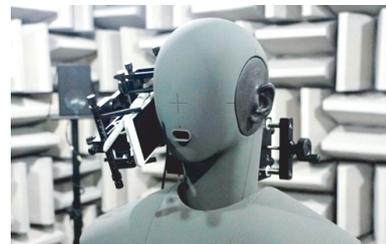
3.2 EMA屏幕发声整机测报

为验证整机通话效果,将某常规手机改造为EMA屏幕发声手机,采用Head公司ACQUA系统对其进行窄带语音通话测试(基于3GPP TS26.131/132国际标准^[10])。

首先选择最佳位置。为提高低频频响,应激发低阶振动模态;考虑到辐射效率,应选择(奇,奇)模态。故选定(1,1)模态,其最佳贴合位置是水平与垂直中轴线的交点。但受制于手机内部结构,需要对理论最佳位置进行调整。对该款手机顶部(靠近前摄)、底部(Speaker Box的位置)等位置进行验证后,最终选定底部横贴方式,如图9所示。



(a) 整机内部结构



(b) ACQUA测试系统照片

图9 整机内部照片及ACQUA测试系统照片

Fig. 9 Mobile phone internal structure and ACQUA test system photograph

图10(a)~(d)四个指标分别是最大响度值($-10 \pm 3\text{ dB}$ 为合格)、单频点扫幅失真(在淡蓝色Limit线以上)、等功率扫频失真(在淡蓝色Limit线以上)和TMOS(一般 ≥ 2.8 判为合格),文献[11]对这些指标有详细描述。测试结果表明该机型满足3GPP TS26.131/132规范要求,并且实测其主观听感也接近常规RCV。

理论已证明,在不同位置贴装EMA会有不一样的结果。同时实验也表明,受制于手机内部堆叠,部分机型的通话效果并不十分理想。以某手机互调失真(Inter-modulation distortion, IMD)测试为例,对比RCV的结果,如图11所示。

图11中,横坐标表示频率,纵坐标表示声压。对EMA/RCV分别输入400 Hz和1100 Hz双音信号,调整输入信号功率,使EMA/RCV分别在400 Hz和1100 Hz上的声压近似相等。可见,EMA屏幕发声有大量高次谐波及互调失真,并且由于这些谐波与互调正好落在人耳较为敏感的中高频段,所以会对用户主观听感产生严重影响。图12表明在整个音频频段,EMA屏幕发声的非线性都远超RCV。

互调失真与屏幕阻尼相关,增大屏幕的阻尼系数有助于降低失真。以常规RCV的振膜制作工艺为例,业界一般采用复合膜,通过在膜中添加一层或多层不同性质的材料,再配合一定形状的模头花纹,就可有效控制RCV的非线性失真。对于屏幕来说,可采用多层结构,层与层之间填充不同配方的胶水或其他有机材料,在保证屏幕轻薄与硬度的情况下,获得所需阻尼值。

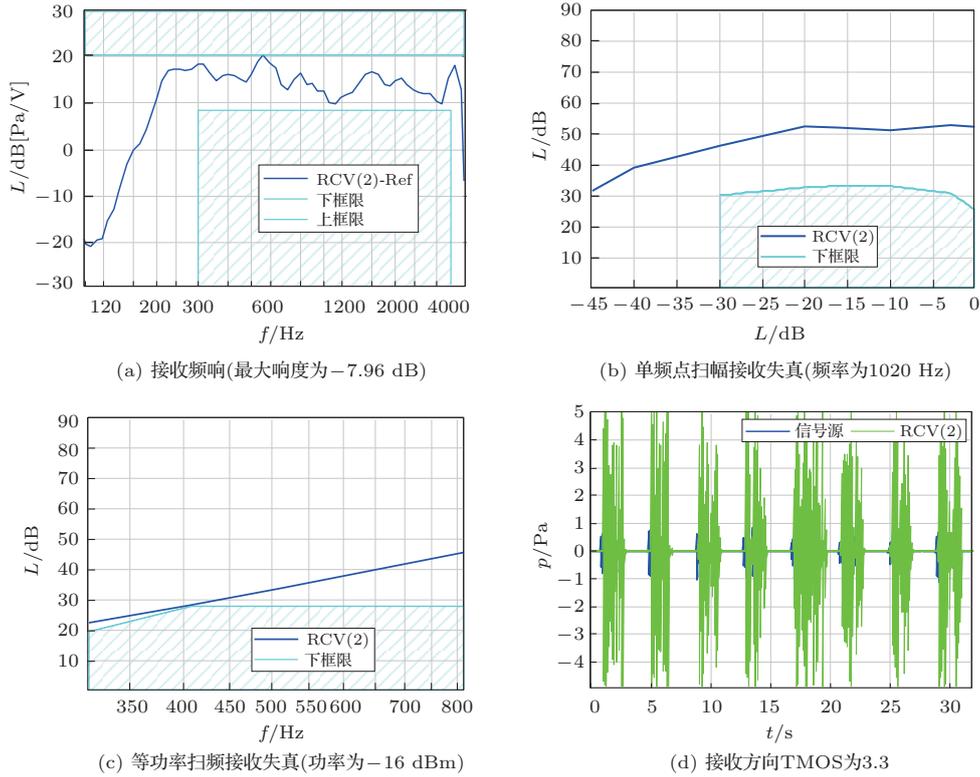


图10 基于3GPP TS26.131/132的窄带语音通话测试结果
Fig. 10 Narrow band voice call test results based on 3GPP TS26.131/132

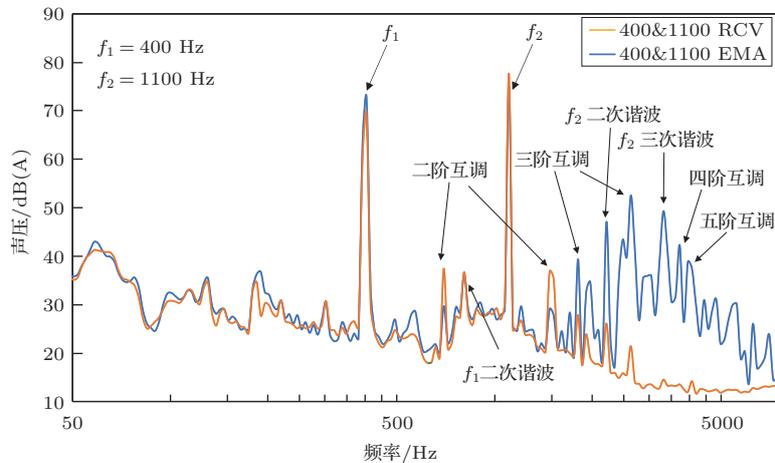


图11 EMA屏幕发声与RCV的IMD对比测试
Fig. 11 IMD contrast between EMA screen sounding and RCV

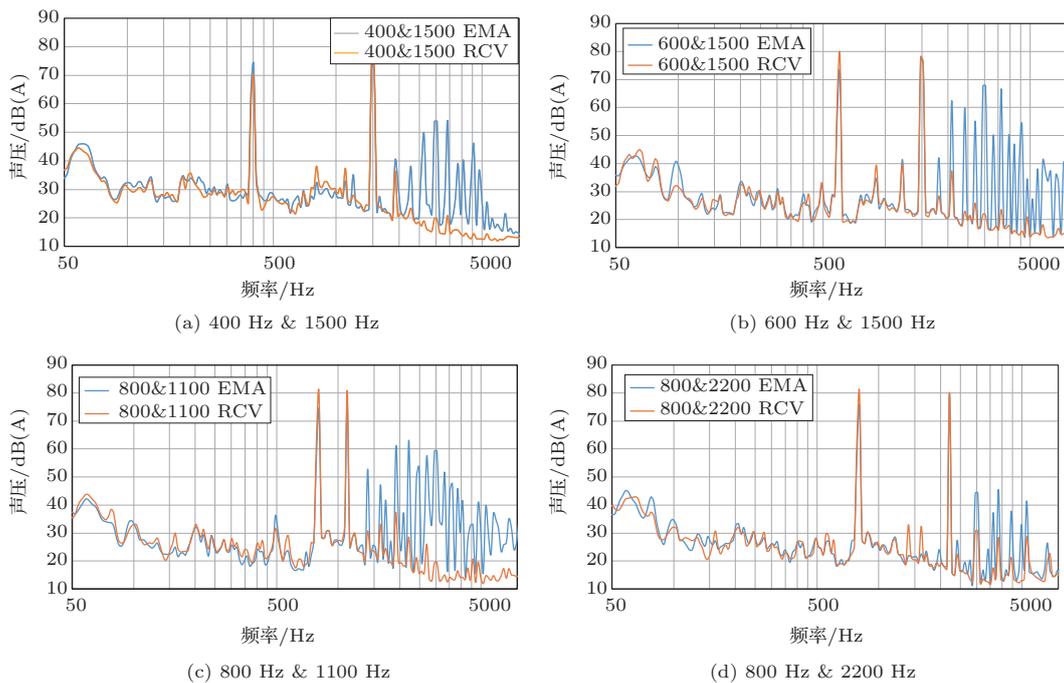


图12 EMA屏幕发声与RCV在音频频段的IMD对比测试

Fig. 12 IMD contrast between EMA screen sounding and RCV over voice band

4 结论

本文从平板弯曲振动理论出发,通过振形函数矩阵 \mathbf{G} 建立了EMA驱动力向量 \mathbf{Q} 与模态力向量 \mathbf{F} 之间的联系;然后分析了平板在不同振动模态下的声波辐射效率问题,指出低阶(奇,奇)模态的辐射效率要高于其他模态;之后基于最小二乘原理,分析了在给定所需 \mathbf{F} 的情况下如何求解最佳的 \mathbf{G} 以及如何由给定的 \mathbf{F} 和最佳的 \mathbf{G} 来反推 \mathbf{Q} 。最后,再利用电力类比把EMA驱动屏幕振动建模为不同模态下的等效活塞运动,并基于3GPP TS26.131/132国际规范进行了实际语音通话测试。

(1) 增大屏幕尺寸,降低屏幕玻璃弯曲刚度,有助于把本征频率向低端延伸,同时可提高中高频的模态密度,使频响曲线更为平滑。但要避免屏幕长宽比接近整数倍关系,防止出现筒并化现象。

(2) 优先激发屏幕振动的低阶(奇,奇)模态,可增加低频声波辐射,提升用户体验效果。

(3) 给定所需模态力后,通过优化振形函数矩阵,使驱动阵列中的单元效率更高,并且各单元间的驱动效率更加均衡,该方法可用于平板电脑等采用驱动阵列的产品设计中。

根据上述理论分析与实验验证,EMA屏幕发

声已经可以满足手机语音通话需求,但在非线性失真上与RCV尚有差距,其互调失真对用户体验的影响较大。另外,将EMA屏幕发声用于喇叭外放,在使用场景上属于远场声波辐射,但如果应用于手持通话场景,属于近场辐射。一些文献^[12-14]指出,平板弯曲振动的相位近似无规则,其远场辐射基本无方向性。但手持通话方式属于近场辐射,且由于人头相关传递函数的影响,其声波辐射在近场存在一定的方向性。对于非线性失真和近场辐射这两个问题,尚需学界和工业界做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 第二版. 南京: 南京大学出版社, 2001: 107-108, 344-347, 436-438.
- [2] Pan J, Snyder S D, Hansen C H, et al. Active control of far-field sound radiated by a rectangular panel—A general analysis[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 91(4): 2056-2066.
- [3] 王睿, 张永发. 薄板扬声器的声辐射特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 377-380, 450.
Wang Rui, Zhang Yongfa. Study on the sound radiation characteristics of panel loudspeaker[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5): 377-380, 450.

- [4] 张明淳. 工程矩阵理论 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1995: 172-182.
- [5] Wallace C E. Radiation resistance of a rectangular panel[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, 51(3): 946-952.
- [6] 仲维彬, 陈克安. 应用于自适应声学结构的平面声源特性研究 [J]. *振动工程学报*, 2004, 17(S): 1166-1169.
Zhong Weibin, Chen Kean. Acoustical performances of flat panel loudspeakers applied to adaptive acoustical structure[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(S): 1166-1169.
- [7] Anderson D A, Heilemann M C, Bocko M F. Optimized driver placement for array-driven flat-panel loudspeakers[J]. *Archives of Acoustics*, 2017, 42(1): 93-104.
- [8] Harris N J, Hawksford M O J. Introduction to distributed mode loudspeakers (DML) with first-order behavioural modelling[J]. *IEE Proceeding Circuits Devices and Systems*, 2000, 147(3): 153-157.
- [9] Panzer J, Harris N. Distributed mode loudspeaker simulation model[C]. *Proceedings of 104th AES Convention*, Munich, 1998.
- [10] 3GPP TS 26.131(v13.0.0)[EB/OL]. [2015-09-18] [2019-03-10]. http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/26_series/26.131/.
- [11] 陈皓. 手机硬件研发与设计 [M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 165-172.
- [12] 仲维彬, 陈克安, 李宏伟. 平板扬声器用于结构声有源噪声控制实验研究 [J]. *应用声学*, 2006, 25(4): 246-251.
Zhong Weibin, Chen Kean, Li Hongwei. Experimental study of flat panel loudspeakers applied to active noise control[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2006, 25(4): 246-251.
- [13] 李双, 陈克安, 赵树磊, 等. 基于平面声源进行结构声辐射有源控制的实验研究 [J]. *应用声学*, 2008, 27(5): 363-373.
Li Shuang, Chen Kean, Zhao Shulei, et al. Experimental study on active control of sound radiation based on planar sound sources[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2008, 27(5): 363-373.
- [14] 沈嶸. 弯曲振动型薄板扬声器的工作原理 [J]. *电声技术*, 2002(2): 43-47.
Shen Hao. Principles of the flexural vibration of the flat-panel loudspeakers[J]. *Audio Engineering*, 2002(2): 43-47.