

菱形声带振动模型远场声场特性研究

赵 晓, 曹 辉, 徐 晨

(陕西师范大学 应用声学研究所, 超声重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要:根据声带的生理结构和振动特性, 提出用换能器来模拟声带振动。依据活塞声源辐射声场研究特性, 提出中间开孔的菱形声带的振动模型, 运用声学基本理论, 采用瑞利积分法计算了声带模型振动的远场声压分布及指向性公式, 仿真数值计算了声压分布规律, 并分析了此声带模型辐射声场的指向性。结果表明, 在音频范围内, 声带宽度相同时, 即在改变模型空隙宽度条件下, 此声带模型声源的辐射远场声压分布与理论相符。

关键词:菱形声带; 远场分析; 声压分布

中图分类号:R767. 92 **文献标识码:**A

Research on Characteristics of Far-field Sound Field of the Diamond Model of Vocal Cord Vibration

ZHAO Xiao, CAO Hui, XU Chen

(Shannxi Key Lab. of Ultraphonics, Applied Acoustic Institute, Shannxi Normal University, Xi'an 710100, China)

Abstract: According to the physical structure of the vocal cords and the vibration characteristics, transducer is proposed to simulate the vocal cord vibration; and according to the study of radiation sound field characteristics, the middle hole of the vocal cord vibration model of diamond is also proposed. Based on the acoustics theory and Reily-integration, the model of vocal cord vibration far field sound pressure distribution and the directivity formula are calculated; pressure distribution is calculated by numerical simulation, and the vocal cord model radiation sound field directivity is analyzed. The results show that in the audio frequency range and at the width of the same vocal condition, even on the condition of changing the model of gap width, the vocal fold model radiated far field sound pressure distribution are consistent with the theory.

Key words: diamond model of vocal cord; far-field analysis; pressure distribution

0 引言

人类的发音并非是一个简单的信号传递,而是要发出抑扬顿挫有韵律的声音。人类的发声系统主要由3部分组成,即动力器官——呼吸系统,振动器官——声带,共鸣器官——胸腔、咽腔、口腔、鼻腔及鼻窦^[1]。其中声带是发声系统的核心器官和生理基础,其位于喉腔中部,有声带肌、声带韧带和粘膜3部分组成,左右对称。声带的固有膜是致密结缔组织,在皱襞的边缘有强韧的弹性纤维和横纹肌,弹性大。两声带间的矢状裂隙为声门裂。发声时,两侧声带拉紧,声门裂缩小,甚至关闭,声带与肺部高压驱动下的高速气流在声门处发生作用,从声带间经

过的空气产生一种伯努利(Bernoulli)效应^[2],产生振动并激发声门波,在喉内肌肉调节作用的支配下,声门波被声道调制,产生噪音。故声带的长短、松紧和声门裂的大小均能影响声调高低。可以说声带在很大程度上决定了人类噪音的基本特征^[3]。因此,声带振动始终是发生机理研究的重要课题之一,它有助于揭示声带振动特性及理解声带振动的生理病理特征。

早期有 Flanagan 和 Landgraf^[4]提出使用一个质量块弹簧振荡器模拟声带,建立了声带振动的一质量块模型,之后相继有国、内外许^[5]多研究者用质量块模型进行修正和扩展,康晓丽等^[6]也提出了

收稿日期:2012-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11074159),陕西师范大学研究生培养创新基金资助项目(2012CXS034)

作者简介:赵晓(1987-),女,陕西西安人,硕士,主要从事应用声学的基础研究。E-mail:709770356zz@163.com。曹辉(1969-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事应用声学的基础研究。

一种双弹簧对称振动模型用于研究声带。1985年, Alipour 等也首次将有限元法引入声带模型。对声带振动研究的另一重要思路是将声带视作弹性连续体, 它让研究者能研究很多采用离散思路所不能研究的声带振动现象。

研究表明, 声带在整个发声过程中扮演了一个“气流-声能转换换能器”的角色。本文研究的目的是采用声换能器来描述声带组织, 用理论计数值法研究声带振动时产生的声场特性。结合文献[7-9], 提出了选择与人体组织相近的人工材料来模拟声带振动。

1 模型的建立与理论分析

根据声带的特点, 采用厚度忽略不计的人工材料设计成的模型如图1所示, 将其镶嵌于无限大障碍板上, 其中中间菱形槽孔 $2a'$ 是可变的, 如图1中虚线所示。

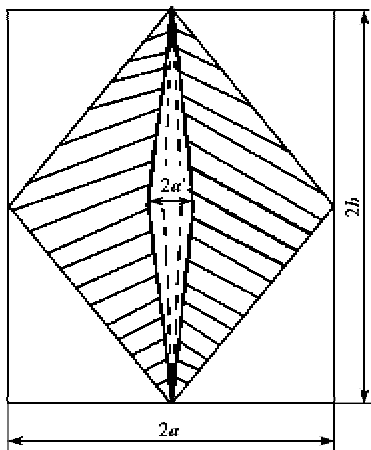


图1 声带模型

令其模型外侧菱形的对角线分别为 $2a$ 、 $2b$, 内侧槽孔菱形对角线分别为 $2a'$ 、 $2b'$ 。根据声带振动特性, 令其中内侧槽孔菱形的一条对角线 $2b$ 保持不变, 只改变另一条对角线 $2a'$, 给此模型一定频率的电激励, 使其以速度 $u = u_a e^{j\omega t}$ (其中 ω 为声源简谐振动的圆频率, u_a 为振速幅值) 振动时, 可向障板前面的半空间辐射声波。

在图1的模型中, 建立坐标系如图2所示。选取模型中心为坐标原点, 模型所在平面为 xOy 平面, x 、 y 轴分别为模型的两条对角线, 垂直于模型平面中的为 z 轴。在柱坐标系中, 声场中一点 Q 位于距坐标为 r , 与 z 轴夹角为 θ , 旋转角为 φ 的位置, Q' 为点 Q 在 xOy 平面内的射影。

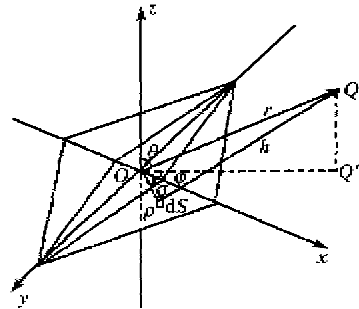


图2 声带模型空间声压坐标

将此模型表面分成无限多个小面元, 每个小面元都可看作一个点源, 位于极径为 ρ , 极角为 σ 处的面元 dS 在观察点, 产生的声压为

$$dp = j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi h} u_a e^{j(\omega t - kh)} dS \quad (1)$$

式中: k , ρ_0 , c_0 分别为声音在空气中传播的波数、媒质密度、声速; dS 为积分微元; h 为 Q 点到 dS 微元的距离。

将所有这些点源辐射的声波叠加, 即可得到空间某一点的声压为

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi r} u_a e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk r \cos(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho})} dS \quad (2)$$

其中 $dS = dx dy$, 由几何关系

$$h^2 = r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) \quad (3)$$

可知, 当 $r \gg 2a$ 区域, 即 $r \gg \rho$ 时,

$$h \approx r - \rho \cos(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) \quad (4)$$

对于远场从模型各面发出的声波到观察点时振幅差异很小, 故式(1)、(2)中振幅部分的 h 可近似用 r 代替, 但相位部分的 h 应由式(4)代替, 则声压为

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk \rho \cos(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho})} dS \quad (5)$$

又因为:

$$\mathbf{r} = |\mathbf{r}| (\sin \theta \cos \varphi \mathbf{i} + \sin \theta \sin \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \mathbf{k}) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\rho} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} \quad (7)$$

$$\cos(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) = \frac{\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{r}}{|\boldsymbol{\rho}| |\mathbf{r}|} = \frac{x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi}{\rho} \quad (8)$$

所以声压为

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk (x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)} dS = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left(\int_{-a}^a \int_{-\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} + \int_0^a \int_{\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} - \int_{-a'}^0 \int_{-\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} - \int_0^{a'} \int_{\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} \right) e^{jk (x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)} dx dy \quad (9)$$

式中: a 为模型声带单侧宽度; a' 为声带单侧张开宽度。

积分后得

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left\{ 4ab [\cos(bk \sin \varphi \sin \theta) - \cos(ak \cos \varphi \sin \theta)] / [k^2 \sin^2 \theta (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi - b^2)] - [4a'b [\cos(a'k \cos \varphi \sin \theta) - \cos(bk \sin \varphi \sin \theta)] / [k^2 \sin^2 \theta \cdot (a'^2 \cos^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi - b^2)] \right\} \quad (10)$$

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left\{ \frac{4ab[1 - \cos(ak \sin \theta)]}{a^2 k^2 \sin^2 \theta} + \frac{4a'b[1 - \cos(a'k \sin \theta)]}{a'^2 k^2 \sin^2 \theta} \right\} =$$

$$j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left[2ab \left[\frac{\sin \frac{ak \sin \theta}{2}}{\frac{ak \sin \theta}{2}} \right]^2 + 2a'b \left[\frac{\sin \frac{a'k \sin \theta}{2}}{\frac{a'k \sin \theta}{2}} \right]^2 \right] \quad (11)$$

辐射远场的指向性:

$$D(\theta, 0) = \frac{p_i}{p_{\theta=0}} = \frac{a}{a+a'} \times \left[\frac{\sin \left(\frac{ak \sin \theta}{2} \right)}{\frac{ak \sin \theta}{2}} \right]^2 + \frac{a'}{a+a'} \times \left[\frac{\sin \left(\frac{a'k \sin \theta}{2} \right)}{\frac{a'k \sin \theta}{2}} \right]^2 \quad (12)$$

由此可见,指向性函数值与此声带模型的频率及声带模型的宽度大小有关,而与声带的长度无关。

2 理论结果的模拟与分析

为了揭示模型中声压的变化规律,假定声带振动频率 $f=500$ Hz(其他频率也有类似变化),声带模型单侧宽度定值为 2 mm,即 $a=2$ mm,空隙单侧宽为 0.1 mm,即 $a'=0.1$ mm 时的声压分布如图 3 所示。

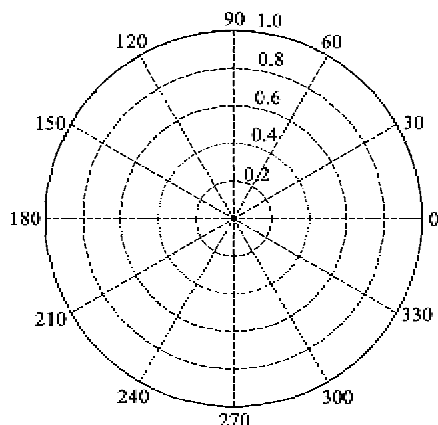


图 3 声压指向性的极坐标表示

由图 3 可知,此声带模型声源的远场声压得指向性分布与理论相符。为了进一步获得模型声压幅值的变化规律,用 origin 软件将图 3 所得数据进行

处理可得结果,如图 4 所示。

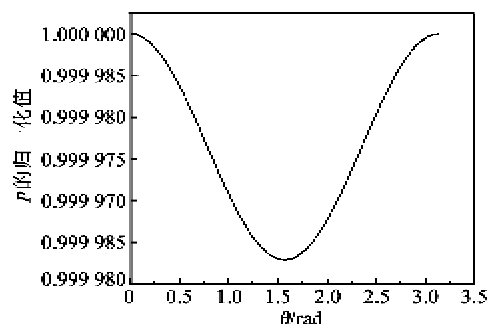


图 4 菱形声带振动辐射的方向性函数

由图 4 可知,声压的变化与 θ 有关,虽然变化缓慢,但还是出现了一定的规律性:声压随 θ 的增大出现先减小后增大的趋势。在 $\theta=\pi/2$ 处声压幅值最小。

为了进一步研究,再次假定声带模型振动频率 $f=500$ Hz, a 定值为 2 mm,使声带孔隙从 0 逐渐增大到 2 mm 的过程中,在 $\theta=\pi/6, \pi/3, \pi/2$ 处得到声压的变化规律如图 5~7 所示。由图 5~7 可观察到,孔隙的大小也直接影响着声压的变化,在 $\theta=\pi/6, \pi/3, \pi/2$ 方位上声压的幅值统一先增大,后减小,在 $a'=1$ mm 处声压最大。

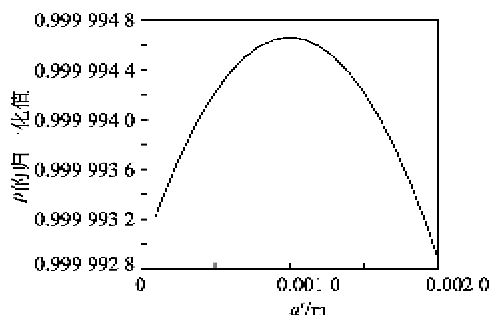


图 5 在 $\theta=\pi/6$ 方向上声压随孔隙改变的变化规律

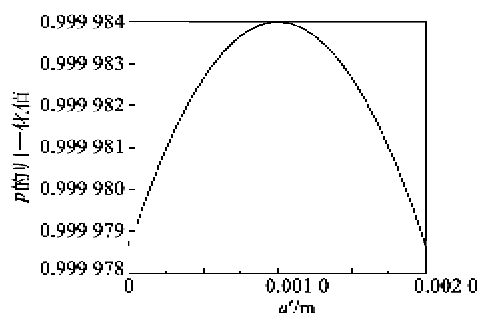


图6 在 $\theta=\pi/3$ 方向上声压随孔隙改变的变化规律

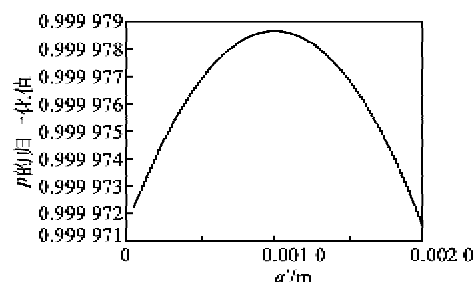


图7 在 $\theta=\pi/2$ 方向上声压随孔隙改变的变化规律

通过分析可知,在声带振动频率范围内,声带辐射处的声压的细微变化与辐射方向及声带的闭合程度有密切关系。

3 结束语

声带在整个发声过程中扮演了一个“气流-声能转换换能器”的角色。本文采用声换能器来描述声带组织在空间产生辐射声压幅值变化,模拟了声带的振动。声带模型在音频振动范围内,声压随角度的增大出现细微的先减小后增大的现象,同时模型的孔隙大小也直接影响声压幅值的变化。

参考文献:

- [1] 于萍,王荣光. 嗓音疾病与嗓音外科学[M]. 北京:人民军医出版社,2009:10-16.
- [2] BLESS D M, HIRANO M, FEDER R J. Videostroboscopic evaluation of the larynx[J]. Ear Nose Throat J, 1987, 66(7):48-58.
- [3] 赵守国,孙义和,王素品. 基于复倒谱的声门下噪音源研究[J]. 生物物理学报, 2002, 18(4):434-439.
ZHAO Shouguo, SUN Yihe, WANG Supin. A study on sub-glottal voice source based on complex cepstrum[J]. Acta Biophysica Sinica, 2002, 18(4):434-439.
- [4] FLANAGAN J L, LANGRAF L L. Self-oscillating source for vocal tract synthesizers[J]. IEEE Trans on Audio and Electroacoustics, 1968, 16(1):57-64.
- [5] ALIPOUR F, BERRY D A, TITZE I R. A finite element model of vocal fold vibration[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(6):3003-3010.
- [6] 康晓丽,曹辉. 声带的双弹簧对称振动模型的研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2011, 39(6):31-35.
KANG Xiaoli, CAO Hui. Research on the model of vocal cord vibration[J]. Journal of shaanxi Normal University, Natural Science Edition, 2011, 39(6):31-35.
- [7] 李锦,任中杰,林书玉. 环状活塞换能器辐射声场研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2003, 31(4):28-31.
LI Jin, REN Zhongjie, LIN Shuyu. Radiated sound field of ring plunger[J]. Journal of Shaanxi Normal University, Natural Science Edition, 2003, 31(4):28-31.
- [8] 张永元,吴胜举,张涛. 六边形活塞声源辐射远场研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2005, 33(3):43-46.
ZANG Yongyuan, WU Shengju, ZHANG Tao. Radiant far field of hexagonal piston sound source[J]. Journal of Shaanxi Normal University, Natural Science Edition, 2005, 33(3):43-46.
- [9] 封子阳,曹辉,魏阿妮. 声带振动产生的声场的近场分布[J]. 压电与声光, 2011, 33(6):867-869.
FENG Ziyang, CAO Hui, WEI A'ni. Near-field analysis of sound field produced by vocal cord vibration[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2011, 33(6):867-869.