

# Vocal Aerodynamics Modeling Based on Male and Female Difference

Linjing He\*, Lili Zhang, Changwei Zhou, Kun Li, Xiaojun Zhang#, Zhi Tao#

School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou Jiangsu  
Email: #zhangxj@suda.edu.cn, #taoz@suda.edu.cn

Received: Sep. 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to investigate the distribution of pressure field in the both sides of the vocal cord and the influence of flow field with different vocal cord structure between males and females, vocal cords of aerodynamic simulation model were established by using the theory of vocal cord vibration mechanism and aerodynamics. The two kinds of typical glottis Angle ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ) were set up in the model respectively, explored the differences of key aerodynamics parameter. The experimental results show that the pressure on the surface of the female vocal cord was higher than that of the male, but has the lowest pressure in the aspect of vocal cord stress. In terms of glottic flow field changes, the airflow in female glottis is lower than that in male vocal cords. Under the same vocal condition, male vocal cords are more prone to vibration than female vocal cords. It can be seen that the male and female have differences in the phonation, which helps to provide a reliable theoretical basis for the gender-based diagnosis.

## Keywords

Phonation Differences between Men and Women, Aerodynamics, Surface Pressure on Vocal Cords, The Glottis Flow Field

---

# 男女发声的空气动力学差异研究

何林静\*, 张莉丽, 周长伟, 李 坤, 张晓俊#, 陶 智#

苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州  
Email: #zhangxj@suda.edu.cn, #taoz@suda.edu.cn

收稿日期: 2019年9月6日; 录用日期: 2019年9月20日; 发布日期: 2019年9月27日

---

\*第一作者。  
#通讯作者。

## 摘要

为了探究男女发声时声带结构差异对声带两侧受力及流场的影响,运用声带振动机制和空气动力学理论,建立声带的空气动力学仿真模型,并对模型设置2种典型的声门倾角( $0^\circ$ 、 $20^\circ$ ),将男女发声时的空气动力学参量进行对比研究。实验结果表明,在声带受力方面,女性声带表面压力值通常比男性高,但其压力极低值低于男性;在声门流场变化方面,女性声门内表现出的气流量值均低于男性,在相同的发声条件情况下,男性声带相较于女性更容易产生振动。可知,男女发声存在着明显差异,这对嗓音疾病的分性别诊疗提供可靠理论依据。

## 关键词

男女发声差异,空气动力学,声带表面压力,声门流场

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

语音是通过三个发声子系统互相复杂作用产生,由肺部发出的气流是发声的动力,这股气流会通过支气管和气管传达到喉部,然后从喉部向上经过口腔或鼻腔后,从嘴或者鼻孔向外辐射形成语音。其中喉部包含着声带这一重要的发声器官,语音的产生即是源于声带的振动。由于男女性声带存在着长短、厚薄、组织形态和黏弹性等方面的差异[1],因此对男女发声空气动力学进行差异性研究,不仅客观而全面地阐述人类发声机制,而且相对于传统人类发声研究,通过分析空气动力学参数的变化能够将男女声带病变表现出来,因此更具临床意义。

由于在活体组织中无法直接获取声门及声门附近流体速度和压力的生理值,建立声门气流分布模型和声带振动模型得到声带参数的仿真值[2]。在1972年,Ishizaka和Flanagan首次提出声带振动的二质量块模型[3],后经Steineck和Herzel进行优化[4],使该模型能很好的捕捉声带振动特征。但二质量块模型忽略了气流的粘性作用,很难用于描述声带运动时的非线性现象,并且二质量块模型也无法获得声门内和声门附近的重要参数值。Cranen和Boves通过米勒管,以实验的形式测量人类声带压力[5],但由于声带所处的运动状态不同,导致数据并不准确[6]。后来发现声带的物理模型可以根据声门[7]和声带的精确尺寸制成,通过严格地控制声带参数和声带运动,得到声门附近实际的气流参数。利用模型得到声带参数差异对临床质量有着重大研究意义,TANG Jun-nong [8]研究了儿童、妇女和成年男性嗓音源特性的差异。于萍等采用Dr. Speech for Windows嗓音评估软件对临床病例和正常成人进行的嗓音对比研究中发现嗓音客观检测参数存在性别上的差异[9]。Li ning从男女发声客观参数方面研究,采用SPSS13.0统计分析软件对测量结果进行t检验,结果得出,女性深呼吸后单韵母的发音持续时间低于男性,女性发音的共振峰频率高于男性[10]。

以上研究主要集中于分析实验得出声带参数差异,并没有从群体本身发声动力学差异进行研究。本文在以上研究的基础上,利用空气动力学研究方法和理论建立的男女性发声过程中声带的空气动力学仿真模型,来研究男女性声带的发声机理,并分析声带的振动特性及效能。结果表明,男女性发声客观参数应用于临床治疗存在明显差异,男性声带表面所受压力比女性低,但在声门处女性所产生的压力极值

低于男性，并且所产生的声门气流小于男性。

## 2. 声带振动的动力学特征

人类发声需要通过三个子系统互相复杂的作用[11]，呼吸系统作为动力器官，声带作为振动器官，声道作为共鸣器官，发声系统结构图如图 1 所示。其中声带是人体发声系统的核心器官和生理基础，位于喉的中部，且左右对称。声带通过振动将由动力器官产生的气流转化为声能，因此声带在很大程度上决定了人类嗓音的基本特征[12]。声带本身的组织结构特性和喉腔内部空气压力的分布情况共同决定了声带组织振动的动力学特征。

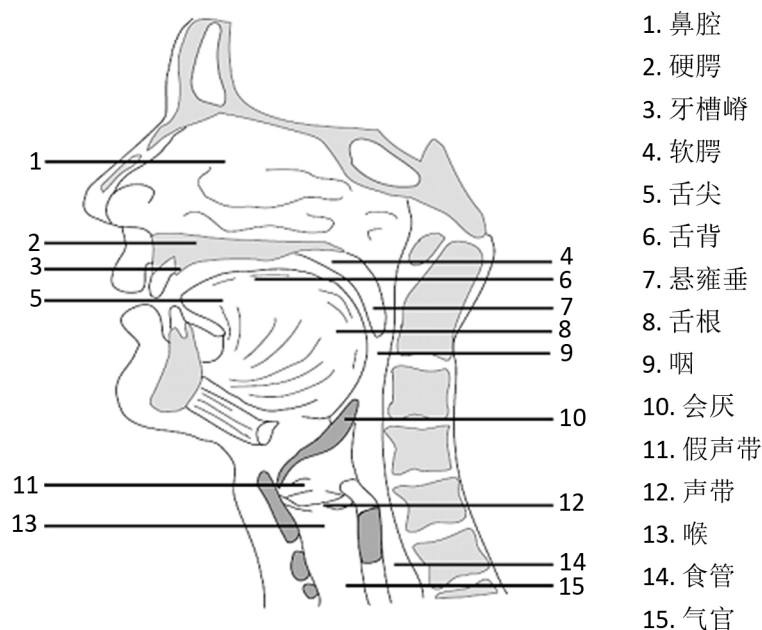


Figure 1. Vocal system structure

图 1. 发声系统结构图

### 2.1. 声带振动机制

声带振动是呼出发声动力系统产生的气流时声带所产生的一种被动运动。当肺部的气流流经闭合的声带时，声门受到过量压力使声带被迫分开，从声带之间经过的气流遵循伯努利效应[13]，声门的压力差使声带闭合后又再次被迫分开，从而使声带不断产生振动将空气波送入共鸣器官。声带振动频率  $f$  为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{K/M}} \quad (1)$$

式中， $K$  为摩擦系数， $M$  为振动声带质量。

在正常发声时，声门闭合，从声带下沿闭合瞬间开始，两侧声带下沿前连合处开始接触振动，这一接触振动过程以拉链式方式从前至后，从下至上进行，紧接着两侧声带上沿也以此方式进行接触振动。当气流从肺部呼出并冲向靠拢的声带时，两侧声带拉紧，气流不断冲击声带，在喉内肌协调支配下，使声带振动从而有规律地发声。由于声门下压降低和伯努利效应，促使声门趋向闭合，声带振动周期由开放相转为闭合相。闭合时，原先被推向外上方的组织向内下方运动，便在此形成下缘，声带下缘先闭，此运动向上缘推进，上缘也闭合，完成一个振动周期。

## 2.2. 空气动力能与喉阻力

喉阻力及空气动力能是喉部空气动力学的两个新的测量指标, 由气压指标与气流指标结合产生[14]。空气动力学参数的变化相比于传统的声学分析来说, 更具有差异性和比较性。

空气动力能定义为:

$$P_A = P \times U \quad (2)$$

公式(2)中,  $P_A$  是空气动力能,  $P$  是气压,  $U$  是气流。空气动力能是空气颗粒从肺部向嘴鼻移动产生的能量, 在声带振动作用下转化为声学能量。

一般来说, 影响流体在孔喉中流动阻力的因素有流体的流变性和孔喉的结构特征。与喉阻力最密切相关的就是粘性阻力, 是在呼吸做工所需要克服气体流动通过气道时摩擦所消耗的阻力, 因此也常常被称为气道阻力。气道阻力等于维持一定呼吸气体流量所耗的压力差与该流量的比值, 测量其数值亦比较容易, 临床使用非常广泛。

## 3. 声带空气动力学模型

成年男女喉部的解剖结构具有显著差异。甲状软骨是喉部最大的软骨块, 它由颈前左右对称的两部分四边形甲状软骨以一定的角度联合而成。研究发现男性联合角度偏小, 上端向前突出, 女性的联合角度偏大, 近似钝角。女性甲状软骨前角为  $63^\circ \sim 104^\circ$ , 平均为  $81^\circ$ ; 男性甲状软骨前角为  $59^\circ \sim 96^\circ$ , 平均为  $73^\circ$ , 且该角度越大声带越短。此外, 甲状软骨水平径线男性平均  $41.5 \text{ mm}$ , 女性平均  $32.2 \text{ mm}$ ; 垂直径线男性平均  $31.2 \text{ mm}$ , 女性平均  $22.4 \text{ mm}$ , 女性尺寸均较之男性要短, 男女声带黏膜的尺寸大小同样存在差异。

本文根据典型的声带尺寸比例对声带进行建模, 建立的男女发声空气动力学模型如图 2 所示。

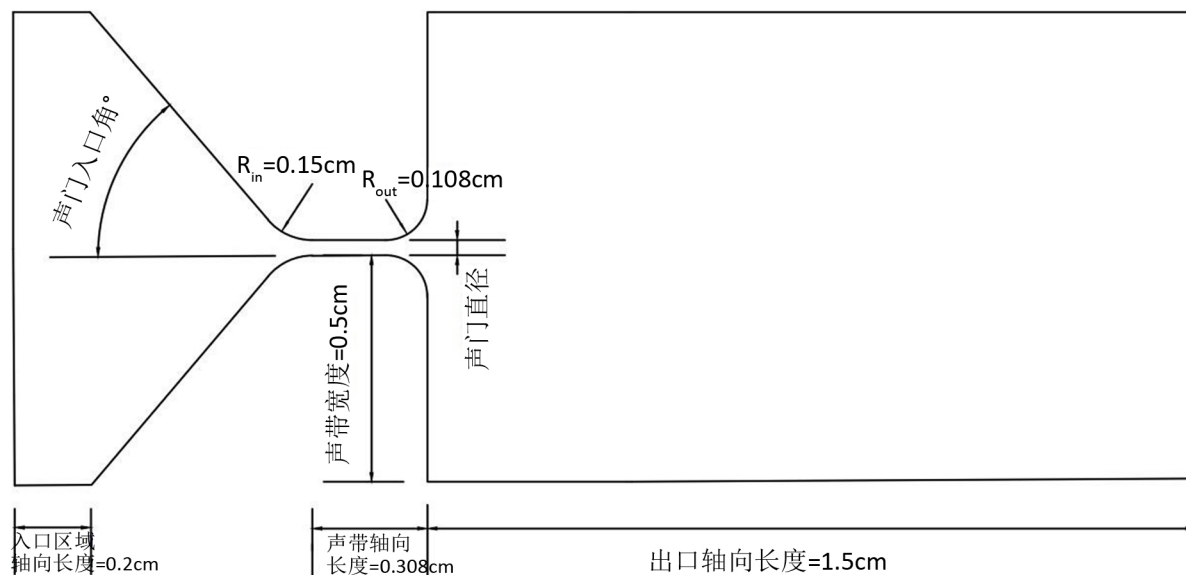
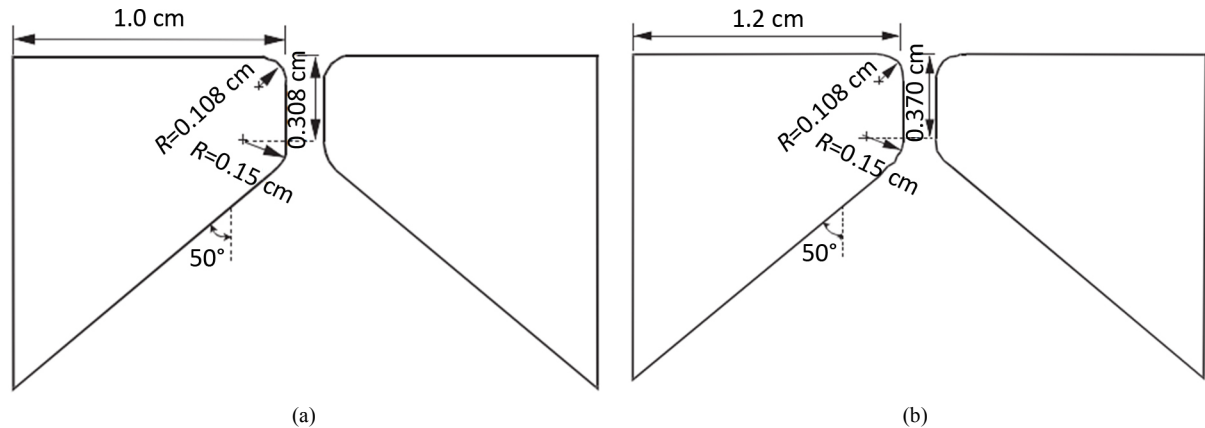


Figure 2. Vocal aerodynamics model

图 2. 声带的空气动力学模型图

按照男女性典型声带尺寸比例, 将男女性甲状软骨尺寸比例定为 1.2:1, 将男女性声带黏膜尺度定为 1.6:1, 同时根据男女性声带厚度的典型尺寸, 将男性声带长度设定为  $0.370 \text{ cm}$ , 女性声带长度设定为  $0.308 \text{ cm}$ 。在此基础上, 构建声门倾角分别为  $0^\circ$  和  $20^\circ$  典型的发声空气动力学模型。图 3 为男女声带结构细节尺寸图。

根据空气动力学理论, 对于人类声带而言, 声门内的气流可以看作是不可压缩的粘性介质, 因此声



**Figure 3.** Detail vocal cord structure. (a) Male and (b) Female  
**图 3.** (a) 男性声带结构细节尺寸图; (b) 女性声带结构细节尺寸图

道内流场的气流必须遵循动量守恒方程, 即纳维 - 斯托克斯方程[15]。

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

对二维对称喉物理模型内流场的 Navier-Stokes 方程进行求解计算中采用稳态、不可压缩的  $k-\omega$ SST 气流场, 从而得到喉腔内气流场分布的详细而完整的结果。

采用直接迭代法对该有限元方程求解, 并对每次求解进行校正, 直到标准误差比收敛标准  $\varepsilon$  小时, 则总方程的迭代完成。收敛准则如公式(4)所示。其中迭代次数用  $n$  表示, 求解向量用  $U$  表示, 被预先设定的数为收敛标准  $\varepsilon$ , 且这个设定的数应该足够小来确保实验的准确度。其中,  $\varepsilon$  可以取为 0.0001。

$$\frac{\|U_n - U_{n-1}\|}{\|U_n\|} \leq \varepsilon \quad (4)$$

公式(4)中,  $U$  为求解向量,  $n$  为方程的迭代级数, 收敛标准  $\varepsilon$  是一个预先设定的数值。

## 4. 实验结果与分析

### 4.1. 男女发声时声带受力差异

男女性不同声门倾角声带两侧受力的仿真结果如图 4 所示, (a) (b) 分别对应声门倾角  $0^\circ$  时男女生的发声情况, (c) (d) 男女对照的声门倾角设置为  $20^\circ$ 。此外, 研究对比男女不同声门倾角无气流偏转一侧声带受力, 如图 5 所示。不同的声门倾角条件下, 男女性无气流偏转一侧与有气流偏转一侧的声带压力具体值, 见表 1 和表 2 所示。

由图 4 声带两侧压力分布图可知: 声门倾角不同, 男女发声时声带两侧受力呈现不同的差异性。当声门倾角为  $0^\circ$  时, 男女在声门出口之前无气流偏转一侧与偏转一侧所受到的声带压力值都基本上保持一致, 左右声带可以同步对称运动。由于气流偏转, 声门出口位置存在显著差异, 女性无气流偏转一侧声带受力变化较平缓, 并且压力稍大于气流偏转一侧声带受力, 男性气流偏转一侧受力变化率较大, 并且远远小于女性的最

低声带压力，声门出口处 0.2 cm 至 0.3 cm 声带压力都为负值。当声门倾角为 20°时，男性在声门腔内有气流一侧压力变化率比女性稳定，男性声门腔内的压力值都比女性要低，但女性的声带压力极值低于男性。

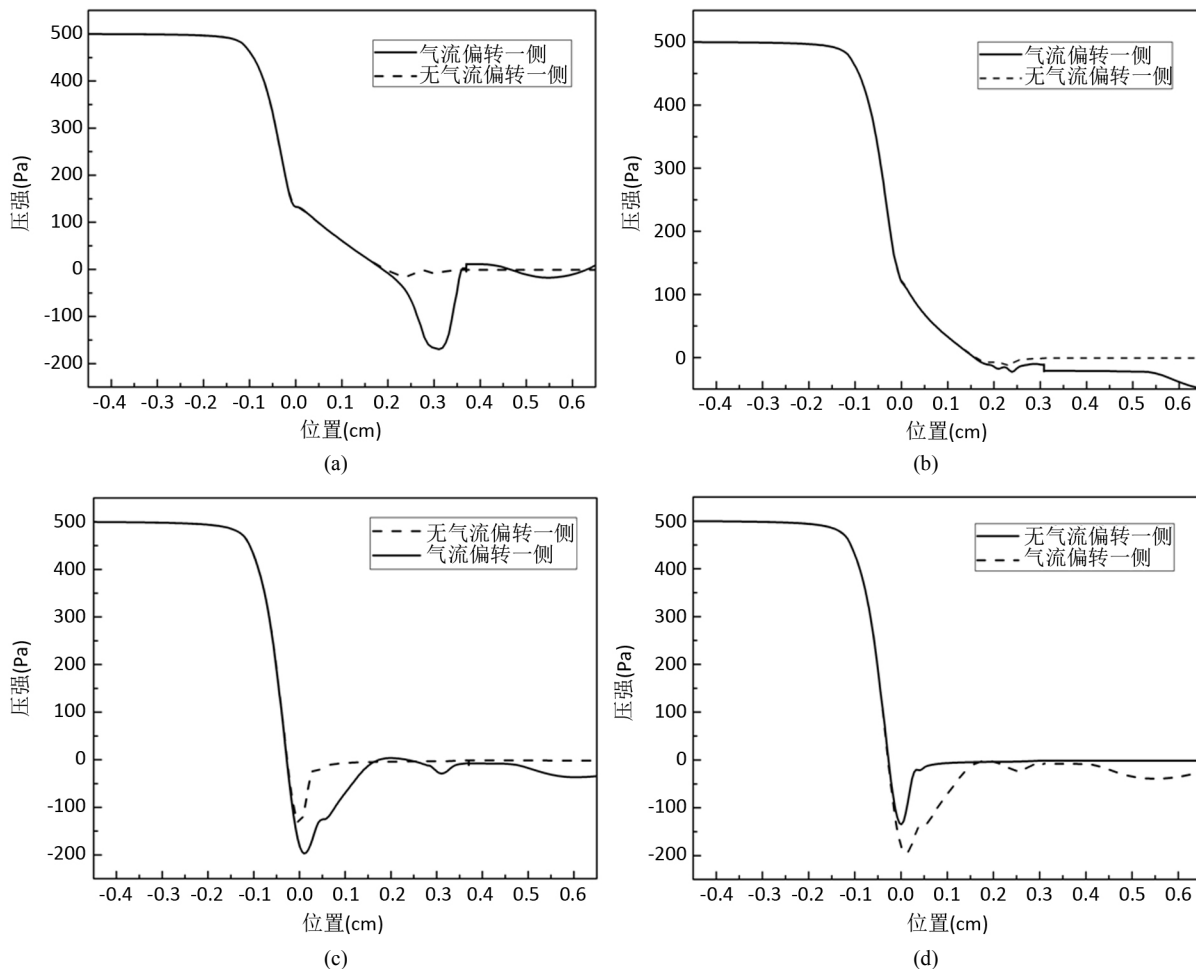


Figure 4. Both sides pressure distribution of vocal cords. (a) 0° male, (b) 0° female, (c) 20° male and (d) 20° female  
图 4. 不同声门倾角男女声带两侧受力图。(a) 0°男性, (b) 0°女性, (c) 20°男性 and (d) 20°女性

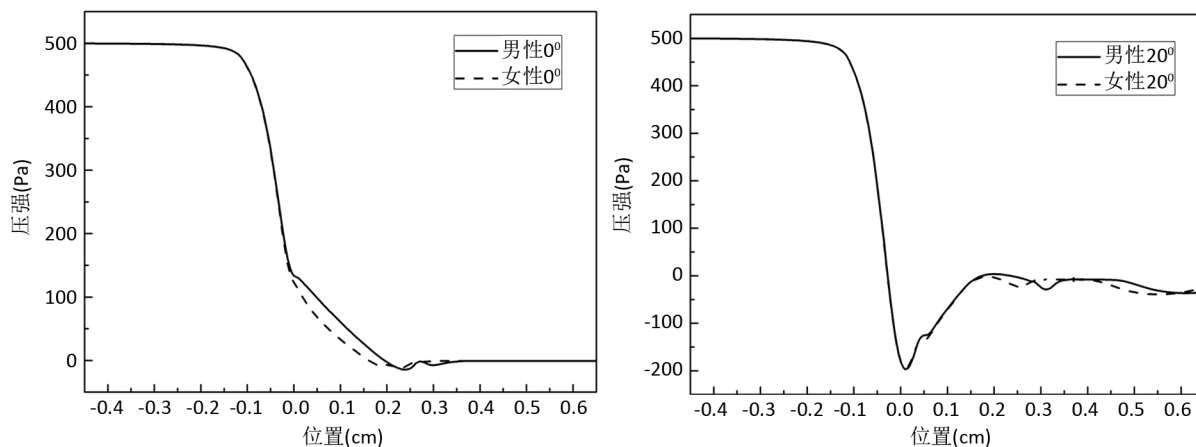


Figure 5. On one side without airflow deflection pressure distribution of male and female vocal cord  
图 5. 声带的空气动力学模型图男女不同声门倾角无气流偏转一侧声带受力



**Table 1.** Glottic angle of  $0^\circ$   
**表 1.** 声门倾角为  $0^\circ$

	-0.1 cm	-0.05 cm	0 cm	0.05 cm	0.1 cm	0.2 cm	0.3 cm
男性无气流偏转一侧	462.0 Pa	337.7 Pa	133.5 Pa	96.6 Pa	61.0 Pa	-2.2 Pa	-7.4 Pa
男性有气流偏转一侧	462.0 Pa	337.8 Pa	132.7 Pa	96.9 Pa	61.3 Pa	-7.5 Pa	-167.8 Pa
女性无气流偏转一侧	460.6 Pa	336.6 Pa	122.2 Pa	66.6 Pa	113.9 Pa	-7.3 Pa	-1.38 Pa
女性有气流偏转一侧	460.6 Pa	335.6 Pa	122.2 Pa	66.7 Pa	112.4 Pa	-14.5 Pa	-11.1 Pa

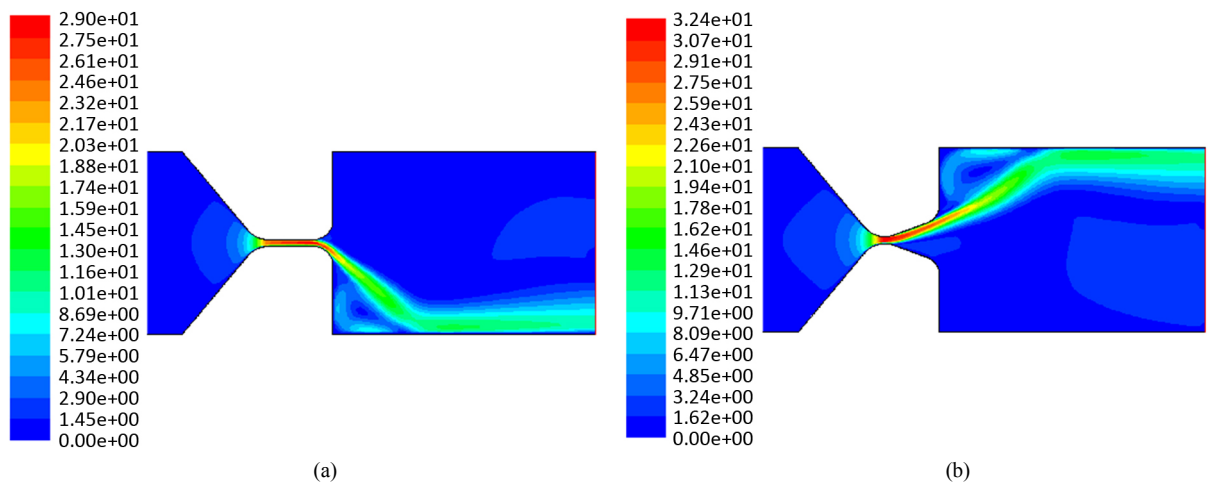
**Table 2.** Glottic angle of  $20^\circ$   
**表 2.** 声门倾角为  $20^\circ$

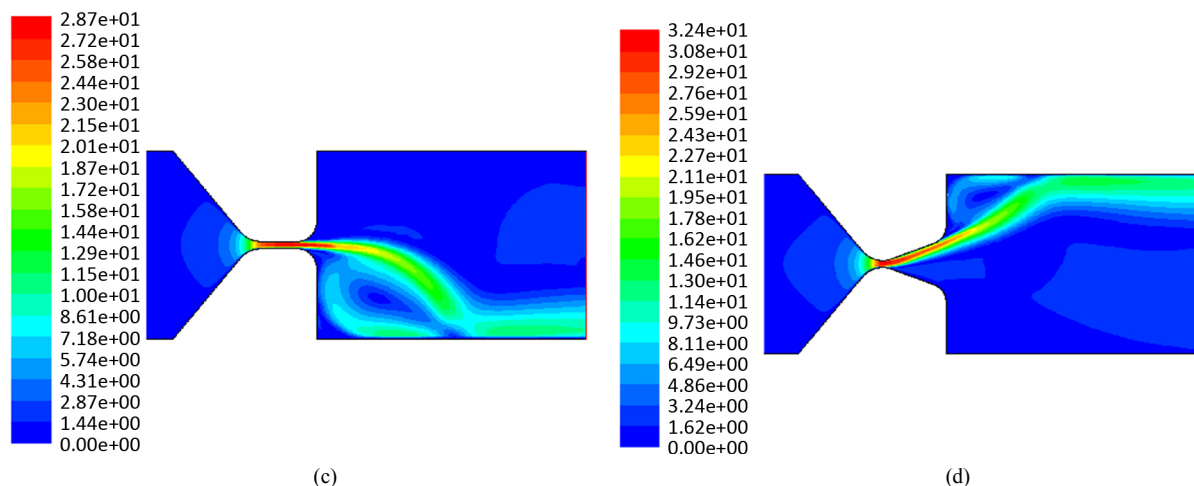
	-0.1 cm	-0.05 cm	0 cm	0.05 cm	0.1 cm	0.2 cm	0.3 cm
男性无气流偏转一侧	436.5 Pa	176.5 Pa	-130.3 Pa	-16.3 Pa	-6.8 Pa	-4.0 Pa	-3.3 Pa
男性有气流偏转一侧	436.1 Pa	174.0 Pa	-167.3 Pa	-125.5 Pa	-70.1 Pa	3.5 Pa	-23.2 Pa
女性无气流偏转一侧	427.5 Pa	174.3 Pa	-182.6 Pa	-134.8 Pa	-72.3 Pa	-3.2 Pa	-8.0 Pa
女性有气流偏转一侧	427.6 Pa	174.6 Pa	-134.9 Pa	-19.1 Pa	-6.6 Pa	-3.9 Pa	-1.5 Pa

由图 5 可知, 当声门倾角为  $0^\circ$  时, 男女无气流偏转一侧声带受力情况近乎相同, 但在出口位置前, 女性声带所受到压力值稍低于男性。在声门倾角为  $20^\circ$  的条件下, 男女声带受力情况整体差不多一致。但与声门倾角为  $0^\circ$  时相比, 出口前压力值低于 0 Pa, 说明在无气流偏转情况下, 不同声门倾角会导致声带压力极值的不同。

#### 4.2. 男女发声时声门内流场差异

男女性在不同声门倾角条件下声门内速度云图如图 6 所示, 分别比较  $0^\circ$  和  $20^\circ$  声门倾角男女性声门内流场情况。由 Coanda 效应和比较图 6 得知, 气流顺着声壁流动, 并且由于声门倾角的存在会导致气流加速偏转。在同样的发声条件下, 当声门倾角为  $0^\circ$  时, 男女性的声门气流量都达到各自的最小值, 而当声门倾角均为  $20^\circ$  时, 男女性声门内气流量又到达各自的最大值。由图可知, 男性声门内气流量明显要高于女性, 这说明在同样的发声条件下, 男性声带所产生的声门气流大于女性。





**Figure 6.** Velocity contour image with different glottis inclination angle (a)  $0^\circ$  male, (b)  $20^\circ$  male, (c)  $0^\circ$  female and (d)  $20^\circ$  female

**图 6.** 不同声门倾角时男女声门速度云图。(a)  $0^\circ$ 男性, (b)  $20^\circ$ 女性, (c)  $0^\circ$ 女性 and (d)  $20^\circ$ 女性

## 5. 结论

本文主要研究了男女发声时的空气动力学差异。实验中首先通过男女声带的异同建立各自的声带动力学仿真模型,并设置了  $0^\circ$  和  $20^\circ$  的声门倾角,进行数值计算模拟出声带两侧压力和声门内流场的变化情况。实验结果表明:作用于男性声带表面的压力值通常低于女性,但在声门处女性会产生压力极低值,因此男性的声带比女性声带更易产生振动。从男女声带内速度流图中可看出,在相同的发声情况下,随着声门倾角的增大会导致声门气流的增大,并且男性声带产生的声门气流大于女性。因此,在男女发声空气动力学参量差异比较中能够揭露出男女发声的动力学存在明显差异,更加深层次的揭露出嗓音疾病分性别研究的重要性。

## 基金项目

国家自然科学基金(61271359)。

## 参考文献

- [1] Titze, I.R. (1998) Physiologic and Acoustic Differences between Male and Female Voices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **85**, 1699-1707. <https://doi.org/10.1121/1.397959>
- [2] Cranen, B. (1985) Pressure Measurements during Speech Production Using Semiconductor Miniature Pressure Transducers: Impact on Models for Speech Production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **77**, 1543. <https://doi.org/10.1121/1.391997>
- [3] Ishizaka, K. and Flanagan, J.L. (1972) Synthesis of Voiced Sounds from a Two-Mass Model of the Vocal Cords. *Bell Labs Technical Journal*, **51**, 1233-1268. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1972.tb02651.x>
- [4] Chan, R.W. and Titze, I.R. (2006) Dependence of Phonation Threshold Pressure on Vocal Tract Acoustics and Vocal Fold Tissue Mechanics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **119**, 2351-2362. <https://doi.org/10.1121/1.2173516>
- [5] Cranen, B. (1987) On Subglottal Formant Analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **81**, 734. <https://doi.org/10.1121/1.394842>
- [6] Scherer, R.C. (1983) Pressure-Flow Relationships in Two Models of the Larynx Having Rectangular Glottal Shapes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **73**, 668. <https://doi.org/10.1121/1.388959>
- [7] Mongeau, L., Franchek, N., Coker, C.H., et al. (1997) Characteristics of a Pulsating Jet through a Small Modulated Orifice, with Application to Voice Production. *Journal of the Acoustical Society of America*, **102**, 1121. <https://doi.org/10.1121/1.419864>



- 
- [8] Tang, J. and Stathopoulos, E.T. (1995) Vocal Efficiency as a Function of Vocal Intensity: A Study of Children, Women, and Men. *Journal of the Acoustical Society of America*, **97**, 1885-1892. <https://doi.org/10.1121/1.412062>
- [9] 于萍, 韩冰, 杨伟炎, 等. 不同性别嗓音客观检测参数的对比分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2004, 12(6): 390-392.
- [10] 李宁, 齐保健. 性别对嗓音客观参数测量结果的影响[J]. 中国现代医生, 2011(27): 27-28.
- [11] Alipour, F., Scherer, R. and Knowles, J. (1996) Velocity Distributions in Glottal Models. *Journal of Voice*, **10**, 50-58. [https://doi.org/10.1016/S0892-1997\(96\)80018-X](https://doi.org/10.1016/S0892-1997(96)80018-X)
- [12] Hirano, M., Kiyokawa, K., Kurita, S, *et al.* (1986) Posterior Glottis: Morphological Study in Excised Human Larynges. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, **95**, 576-581. <https://doi.org/10.1177/000348948609500607>
- [13] Chen, D.F., Gao, X., Chen, W.T., *et al.* (2011) Aerodynamics Analysis in a Human Vocal Folds Model. *Applied Mechanics and Materials*, **130-134**, 99-102. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.99>
- [14] McGowan, R.S. (1993) The Quasi Steady Approximation in Speech Production. *Journal of the Acoustical Society of America*, **94**, 3011-3013. <https://doi.org/10.1121/1.407335>
- [15] Leiderer, P. and Pobell, F. (1973) Sound-Modulated Flow of Superfluid Helium through a Small Orifice: An Attempt to Observe the ac Josephson Effect. *Physical Review A*, **7**. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.7.1130>