

通风孔对压电麦克风低频响应的影响研究

华 晴¹, 沈 拓^{1,3}, 焦云菲², 张轩雄¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 领科教育上海校区, 上海 201615;

3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 根据压电麦克风的工作原理建立压电传感器的集总元件等效声电模型, 分析通风孔结构对压电麦克风灵敏度的影响。通过有限元建模, 研究通风孔的几何尺寸对压电麦克风低频输出的影响。通风孔位于硅基的位置不影响麦克风的低频输出。通风孔的横截面积一定时, 长度越长, 低频响应越快。通风孔的长度一定时, 横截面积越小, 低频响应越好。如果要达到相同的低频位移输出, 通风孔的横截面积比为 2 倍时, 长度比应为 4 倍。

关键词: 压电麦克风; 通风孔; 集总元件模型; 等效电路模型

中图分类号: TP 212 **文献标志码:** A

Effects of Vents on the Low Frequency Response of Piezoelectric Microphones

HUA Qing¹, SHEN Tuo^{1,3}, JIAO Yunfei², ZHANG Xuanxiong¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Ulink College of Shanghai, Shanghai 201615, China; 3. Key Lab of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the working principle of piezoelectric microphones, the equivalent lumped element acoustic electric model of a piezoelectric sensor was established, and the influence of the vent structure on the sensitivity of the piezoelectric microphone was analyzed. Through finite element modeling, the effects of the vent's geometrical sizes on the low frequency output of the piezoelectric microphone were studied. The locations of ventilating holes at different positions of the silicon base have no effect on the low frequency output of the microphone. When the cross sectional area of the venting holes keeps constant, the longer the vents length, the higher the low frequency response. When the length of the vent keeps constant, the smaller the cross-sectional area, the better the low-frequency response. When the cross-sectional area ratio of the vent holes is 2, if the same low-frequency displacement output is to be achieved, the length ratio should be 4.

Keywords: piezoelectric microphone; vent; lumped element model; equivalent circuit model

收稿日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U734211); 上海市科委科研项目(17DZ1100106)

第一作者: 华 晴(1993-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 检测装置与自动化. E-mail: 2232264726@qq.com

通信作者: 沈 拓(1976-), 男, 博士研究生. 研究方向: 检测与自动化装置. E-mail: 78722001@qq.com

微机电系统(MEMS)麦克风是一种将声信号转换为电信号的声学设备,主要分为电容式和压电式。目前市场上大部分的MEMS麦克风是电容麦克风。采用这种双层设计,无法避免背板和隔膜之间的空气阻尼,因此,信噪比参数保持在65 dB水平^[1]。近年来,随着微纳米制造方法的不断改进,使得压电麦克风的制造工艺不断提高。由于单层膜的设计架构不受空气阻尼的限制,因此,信噪比参数会更高^[2]。目前市场上的压电麦克风具有灵敏度低、低频响应不理想、声音泄露等缺点,阻碍了压电麦克风在市场上的广泛应用。

本文研究压电麦克风的通风口尺寸对麦克风的灵敏度和低频输出性能的影响,为压电麦克风设计的性能优化提供理论基础。根据压电麦克风的工作原理,建立等效电路模型,为设计参数的确定提供依据。建立通风孔的有限元模型,分析压电麦克风的低频输出。结合有限元与等效电路分析,得出通风孔位置和几何尺寸对压电麦克风低频响应的影响情况。

1 压电麦克风的结构

压电麦克风主要是由压电材料和膜片(梁或者膜)组成^[3]。压电材料能够快速响应膜片在声压作用下产生的形变,膜片位移产生的应变能转变成膜片内部的电荷转移。压电材料一般采用PZT(锆钛酸铅)、PVDF(聚偏二氟乙烯)等,整个结构以硅基作为衬底,在压电材料两侧沉积2个薄的铂(Pt)金属层作为电极。压电麦克风的输出电压与输入声压的强度成正比,同时与压电材料的面积成正比。圆形膜片的受力位移比方形膜片更敏感,因此,采用圆形膜片作为研究对象^[4]。

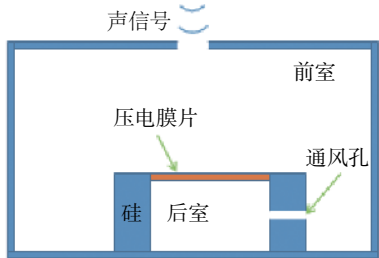


图1 压电麦克风的结构

Fig.1 Piezoelectric microphone structure

压电麦克风的输出性能与传感器的结构和封装有关。通风孔的尺寸、前腔和后腔的体积的变化都会导致输出信号的变化。通风孔连接压电麦克风的

前腔和后腔,用来维持隔膜两侧的静压力平衡。但是,通风孔尺寸过大会导致声音信号的泄露,尺寸过小则无法达到平衡两侧静压力的目的。出于工艺角度来考虑,在不破坏膜片完整的前提下,从硅基侧面开孔连接前腔与后腔,通风孔的结构如图1所示。

2 声电类比

传声孔与空腔连接的结构在被声波激发时将产生共振。在声学系统中,如果声学元件远小于声学波长,假设腔壁是刚性的,则由短管和空腔组成的声学模型被称为亥姆霍兹共振器。如图2所示。 M_A 为声质量, R_A 为声阻, C_A 为声顺。

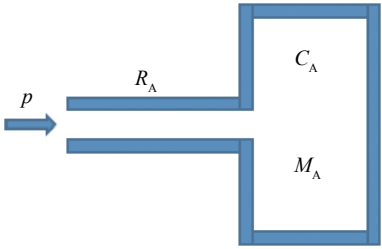


图2 亥姆霍兹共振器

Fig.2 Helmholtz resonator

当声孔感受到声信号时,其声压的微分形式表达式为

$$p = p_A e^{j\omega t}$$

式中: p 为声压; p_A 为声压大小; ω 为角速度; t 为时间。

通风孔中声音的运动方程为

$$M_M \frac{dv}{dt} + R_M v + \frac{1}{C_M} \int v dt = S p_A e^{j\omega t} \quad (1)$$

式中: M_M 表示通风孔的质量; R_M 为通风孔的声阻; C_M 为通风孔的声顺; v 为声速; S 为通风孔的横截面积。

在声振动系统中,方程(1)可以转化为

$$\frac{M_M}{S^2} \frac{dU}{dt} + \frac{R_M}{S^2} U + \frac{1}{C_M S^2} \int U dt = p_A e^{j\omega t} \quad (2)$$

式中, U 为体积流量。

假设声质量 $M_A = \frac{M_M}{S^2}$,声阻 $R_A = \frac{R_M}{S^2}$,声顺 $C_A = C_M S^2$,代入方程(2),可以得到声学平衡方程

$$M_A \frac{dU}{dt} + R_A U + \frac{1}{C_A} \int U dt = p_A e^{j\omega t} \quad (3)$$

在电气领域,最基本的串联谐振电路(图3)的电学平衡方程为

$$L_e \frac{dI}{dt} + R_e I + \frac{1}{C_e} \int I dt = E_{e^{j\omega t}} \quad (4)$$

式中: L_e 为电感; R_e 为电阻; C_e 为电容; E 为电压; I 为电流。

通过比较方程(3)和方程(4),可以发现描述声振动的声学平衡方程和电学平衡方程在形式上类似,这两种现象之间存在一些共性,即它们具有相似的运动定律。因此,在声电类比过程中,声学质量可以转换成电感,声阻抗可以转换成电阻,声学顺应性可以转换成电容,声压可以转换成电压^[5]。

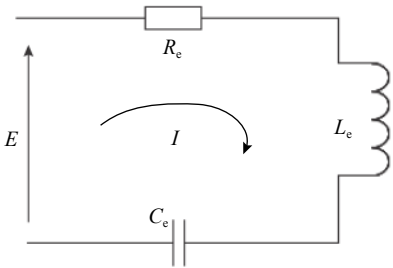


图3 串联谐振电路
Fig.3 Series resonant circuit

3 集总元件等效模型的建立

在集总元件模型中,各种能量域之间的耦合是通过物理系统的等效双端口模型实现的^[6]。在电场中,电阻代表能量耗散,而电感和电容分别代表动能和势能的存储。声压和电压是力变量,而体积流量和电流是流变量。共享共同力的元素并联连接,共享共同流的元素串联连接^[7]。通过将分布式能量存储和耗散集中到理想的通用单端口电路元件中来构建等效电气模型^[8],利用该原理,可以获得压电麦克风的集总元件等效电路。如图4所示, R_{rad} , M_{rad} , C_{ad} , M_{ad} 和 R_{ad} 分别是隔膜的辐射阻抗、隔膜的辐射质量、隔膜的声顺、隔膜的声质量和隔膜的声阻抗。辐射阻抗是振膜因声辐射产生的阻抗,因此,被认为是损耗(即电阻)。辐射质量表示随着隔膜移动的流体的惯性质量中的动能存储。隔膜的声顺表示膜片弹性应变储存的势能,表现为隔膜中的弹性应变。隔膜的声质量表示膜片运动的动能。隔膜声阻抗表示热弹性耗散和支撑损耗。

另外, M_{acf} , C_{acf} , M_{acb} 和 C_{acb} 分别表示前室的总质量、前室的声顺、后室的总质量和后室的声顺。 R_{acf} 表示连接麦克风的前室与进声孔的粘度损失, R_{acb} 表示连接前室和后室的通风口的阻尼。

ϕ , C_{eb} 和 R_{ep} 分别为声电转换系数、阻塞电容和介电损耗阻抗。声电转换系数表示从声能到电能的转换率。阻塞电容可以通过耦合因子与自由电容相关,耦合因子表示耦合在声能域和电能域之间的能量的转换率。介电损耗是由与压电材料内的耗散机制有关的几个因素引起的^[9]。

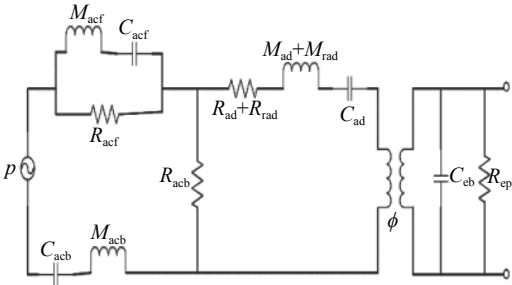


图4 压电麦克风的集总元件等效电路图
Fig.4 Lumped element equivalent circuit diagram of the piezoelectric microphone

4 压电麦克风的等效电路分析

压电麦克风的性能取决于麦克风的结构和材料^[10-11]。压电麦克风的低频响应主要由通风口的几何尺寸以及后室的容积来决定。后室的体积越大,声波可以更容易地推动膜片,更容易使麦克风产生响应。频率响应可以由输出电压 v_0 与输入声压 p 的比率表示。

$$S_{en}(f) = \frac{v_0}{p} = \frac{1/\phi}{\left(1 + \frac{Z_{ac}}{R_{acb}}\right) \left(1 + \frac{Z_{ad}}{Z_{ep}\phi^2}\right) \left(\frac{Z_{ac}}{Z_{ep}\phi^2}\right)} \quad (5)$$

式中: Z_{ac} 为前腔的声学阻抗; Z_{ad} 为隔膜上的声学阻抗; Z_{ep} 为电气端的阻抗; S_{en} 为灵敏度。

分析式(5)和等效电路,可以得出通风孔几何尺寸的变化引起的麦克风低频输出的变化。材料的泊松比和杨氏模量是已知的。由于声电转换系数与膜片半径和弯曲刚度有关,而弯曲刚度与材料的泊松比、杨氏模量和隔膜厚度有关,因此,声电转换系数与振膜的半径和厚度有关,并且振膜的声顺越大,低频响应越平坦。

5 有限元分析

假设非压电材料都具有单晶硅的特性,压电材料都具有锆钛酸铅(PZT)的特性,电极都足够薄以至于可以忽略不计,忽略残余应力以简化分析

并强调一般几何效应。

有限元分析建立压电麦克风通风孔等效模型如图5所示。图5中给出连接前室和后室的通风孔长度从200 μm增大到800 μm的模型结构，以及

及振膜在受到声压时各个膜片区域产生的位移情况。显然，振膜在受到力作用时，膜片的中心区位移最大。因此，后面讨论振膜位移量就是振膜的

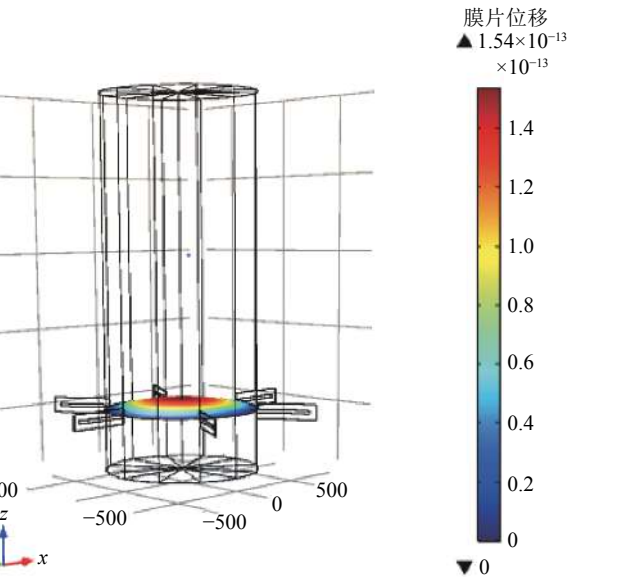


图5 压电麦克风的通风孔有限元等效模型

Fig.5 Finite element equivalent model of ventilation hole of the piezoelectric microphone

5.1 通风孔位置对低频响应的影响

当连接压电麦克风的前室和后室的通风孔位于硅基衬底的不同高度时，压电膜片的低频位移如图6所示。 H 表示通风孔在硅基上的位置高度。

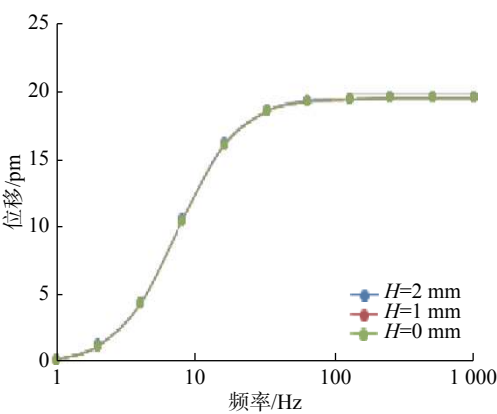


图6 通风口在前腔的不同位置时压电膜片的位移情况
Fig.6 Displacement of the piezoelectric diaphragm when the vent is located at different positions of the front cavity

从图6中可以看出，无论通风孔是开在前腔的上部、中部还是下部位置，通风口对麦克风的低频输出没有影响。

5.2 通风孔尺寸对低频响应的影响

当通气孔高度 H 为5 μm时，长度 L 分别为25，

50，100，200，250 μm，宽度 W 分别为5，10，15 μm时，压电麦克风的低频响应位移如图7所示。

从图7中可以看出，当通风孔的横截面积恒定时，通风孔的长度越长，低频响应越高。当通

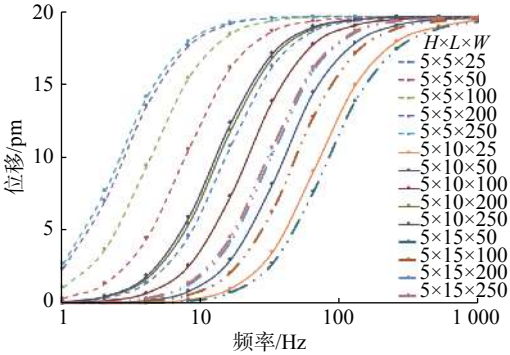


图7 不同尺寸的通风孔压电膜片的位移情况
Fig.7 Displacement of the piezoelectric diaphragm when the vent hole is of different sizes

风孔的长度固定时，横截面积越小，低频响应越好。

选取合适的尺寸参数，通过仿真获得低频输出位移数据，对数据进行对比分析，可以验证不同尺寸的通风孔对压电麦克风的低频位移输出的影响。

图 8 表示对于不同尺寸的通风孔, 压电麦克风在 1, 4, 126 Hz 频率下的位移。孔的高度固定, 均为 5 μm 。

比较图 8(a), 8(b)和 8(c)可知, 通风孔的长度

越长, 低频位移越大, 频率响应越低。从图 8(d)可以看出, 当通风口的横截面积比为 2 倍时, 如果要想实现相同的低频位移输出, 则长度比应为 4 倍。

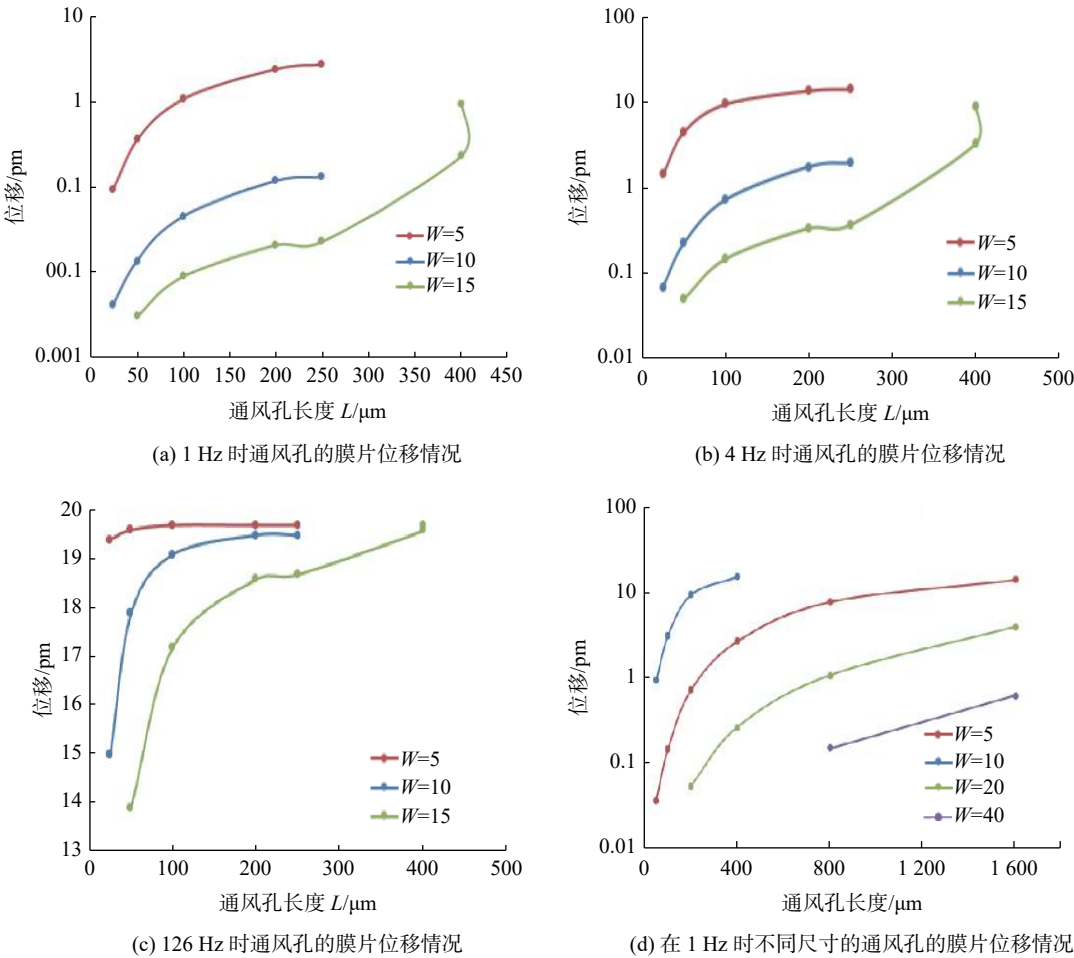


图 8 不同低频率下不同尺寸通风口时压电膜片的输出位移

Fig.8 Output displacement of the piezoelectric diaphragms with different sizes at different low frequencies

6 结束语

结合压电麦克风的集总元件声电等效模型和有限元方法建立了通风孔的等效模型。通过改变通风孔的位置、长度、横截面积的尺寸, 得出通风孔对低频输出响应的影响情况。研究表明, 通风口的不同位置对麦克风的低频响应没有影响, 通风口尺寸大小影响低频性能。如果通风孔的长度确定, 则横截面积越小, 压电麦克风的低频输出越高; 如果横截面积固定, 则长度越长, 低频输出越好。当压电麦克风达到相同的低频输出时, 如果横截面积比为 2 倍, 则长度比应达到 4 倍。

在压电麦克风的声电模型中考虑边缘噪声,

从而解释边缘噪声对压电麦克风的信噪比的影响是作者进一步研究的方向。

参考文献:

[1] 郑洁, 梁海, 朱彪. 压电传声器的设计与改进[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 453-455.

[2] 杨楚威, 李俊红, 黄歆, 等. 圆形振动膜 ZnO 压电微传声器的研制[J]. 应用声学, 2006, 25(4): 197-200.

[3] WILLIAMS M D, GRIFFIN B A, REAGAN T N, et al. An AIN MEMS piezoelectric microphone for aeroacoustic applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 270-283.

[4] 李俊红, 汪承灏, 刘梦伟, 等. 基于圆形振动膜的 MEMS 压电传声器研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 85-88.

- [5] KAVIANI S, BAHRAMI M, ESFAHANI A M, et al. A modeling and vibration analysis of a piezoelectric micro-pump diaphragm[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2014, 342(12): 692–699.
- [6] BAUER R, ZHANG Y S, JACKSON J C, et al. Influence of microphone housing on the directional response of piezoelectric MEMS microphones inspired by *Ormia ochracea*[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(17): 5529–5536.
- [7] HUANG S Q, YANG Y, LIU S W, et al. A large-diaphragm piezoelectric panel loudspeaker and its acoustic frequency response simulation method[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 125(10): 176–183.
- [8] PRASAD S A N, GALLAS Q, HOROWITZ S, et al. Analytical electroacoustic model of a piezoelectric composite circular plate[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(10): 2311–2318.
- [9] OBERNDÖRFER J, SCHRAG G, WACHUTKA G. Efficient model for predictive MEMS microphone design: model derivation and experimental verification[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 47: 1327–1330.
- [10] HOROWITZ S, NISHIDA T, CATTAFESTA L, et al. Development of a micromachined piezoelectric microphone for aeroacoustics applications[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 122(6): 3428–3436.
- [11] HUANG C H, PAWAR S J, HONG Z J, et al. Earbud-type earphone modeling and measurement by head and torso simulator[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(5): 461–469.

(编辑: 石 瑛)

(上接第 421 页)

- [3] BRUALDI R A, SOLHEID E S. On the spectral radius of connected graphs[J]. *Publications De L'Institut Mathématique*, 1986, 39(53): 45–54.
- [4] CVETKOVIĆ D, ROWLINSON P, SIMIĆ S. An introduction to the theory of graph spectra[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [5] BROUWER A E, HAEMERS W H. Spectra of graphs[M]. New York: Springer, 2012.
- [6] CHANG A, TIAN F, YU A M. On the index of bicyclic graphs with perfect matchings[J]. *Discrete Mathematics*, 2004, 283(1/3): 51–59.
- [7] YU A M, TIAN F. On the spectral radius of bicyclic graphs[J]. *MATCH Communications in Mathematical and in Computer Chemistry*, 2004(52): 91–101.
- [8] YU A M, TIAN F. On the spectral radius of unicyclic graphs[J]. *MATCH Communications in Mathematical and in Computer Chemistry*, 2004(51): 97–109.
- [9] 张晓东, 李炯生. 树的 Laplace 矩阵的最大和次大特征值[J]. *中国科学技术大学学报*, 1998, 28(5): 513–518.
- [10] 郭曙光. 单圈图的 Laplace 矩阵的最大特征值[J]. *高校应用数学学报 A 辑*, 2001, 16(2): 131–135.
- [11] CHANG A, HUANG Q X. Ordering trees by their largest eigenvalues[J]. *Linear Algebra and its Applications*, 2003, 370: 175–184.
- [12] YUAN X Y, SHAN H Y, WU B F. On the spectral radius of unicyclic graphs with fixed maximum degree[J]. *Ars Combinatoria-Waterloo then Winnipeg*, 2011, 102: 21–31.

(编辑: 丁红艺)