

高声压、宽频带电容传声器分析和设计

郭淑菊¹, 郑浩鑫², 李建民³, 王 高³, 周欣欢⁴

(1. 中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学机械与动力工程学院, 山西太原 030051;
3. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051; 4. 江南工业集团有限公司, 湖南长沙 411207)

摘要: 为了满足声学测试提出的技术指标, 即设计出频响范围更宽、动态范围更大的 1/4 in 电容传声器。采用电容传声器的集中参数模型, 根据工作原理导出其输出电压变化与电容两板极间距离变化成正比的公式和灵敏度计算公式, 而后又通过所导出的电容传声器传输函数分析了频响特性。通过对灵敏度和动态范围的计算以及对动态范围的估计, 最终设计出开路灵敏度为 1.9 mV/Pa、频响范围为 2 Hz~79 kHz、最高声压级不低于 160 dB 的电容传声器, 该性能满足该系列传声器频响范围 5 Hz~70 kHz、最高声压(有效值)不低于 160 dB 的电容传声器的性能指标。上述结果表明设计方法可行, 并提出了进一步改进此传声器性能的几点考虑。

关键词: 电容传声器; 传输函数; 频响特性; 高声压

中图分类号: TN614.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-0-0188-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.02.018

Analysis and design of a wideband high sound pressure condenser microphone

GUO Shu-ju¹, ZHENG Hao-xin², LI Jian-min³, WANG Gao³, ZHOU Xin-huan⁴

(1. School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 4. Jiangnan Industries Group Co, Ltd, Changsha, 411207, Hu'nan, China)

Abstract: In order to meet the technology indicators of acoustic testing, namely to design a 1/4 inch condenser microphone with wider frequency range and wider dynamic range, the lumped parameter model of the condenser microphone is adopted, and the formula of the output voltage variation proportional to the variation of the distance between two plates of capacitor is derived based on the system principle as well as the sensitivity formula. Furthermore, the characteristics of frequency response are analyzed with the derived transmission function of the condenser microphone. Through the calculations of sensitivity and dynamic range and the estimation of dynamic range, the condenser microphone with an open circuit sensitivity of 1.9 mV/Pa, a frequency response range of 2 Hz~79 kHz and the highest sound level not less than 160 dB is developed, the performance of which meets the index requirements for the series of microphones, *i.e.* a frequency response range of 5 Hz~70 kHz and the highest sound pressure (RMS) not less than 160 dB. The above-mentioned results show the feasibility of the design. In addition, some consideration to further improve the performance of the microphone is proposed.

Key words: condenser microphone; transmission function; frequency response; high sound pressure

0 引言

测量电容传声器广泛用于工业噪声、广播音响以及军工产品等的测试中^[1]。虽然近年来国内电容传声器行业技术发展迅速, 但是与国外先进水平比仍有很大差距^[2]。目前国内已有数家公司能够生产外径为 1/4 in、频率响应范围为 20 Hz~20 kHz, 动

态范围为 40~140 dB 的稳定可靠产品。但这些电容传声器主要用于民用领域, 在有关军品性能研究的声学测试中, 发现这些电容传声器在动态范围、频率响应和传感器指向性等指标尚不能满足需要^[3]。某系列曾明确提出需要频响范围 5 Hz~70 kHz、最高声压(有效值)不低于 160 dB 的电容传声器, 此类需求具有一定普遍性, 为此进行了本文的研究。

1 工作特点

电容传声器的敏感元件实际上是周围张紧的圆形薄膜在声波压力作用下的振动, 圆形薄膜和背极板所构成的电容相应发生变化从而信号输出波

收稿日期: 2015-09-11; 修回日期: 2015-11-19

基金项目: 国家安全重点基础研究计划、山西省回国留学人员科研经费资助项目。

作者简介: 郭淑菊(1988—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为电容传声器设计。

通讯作者: 郭淑菊, E-mail: guoshujhappy1988@126.com

动^[4-7]。对周围张紧的圆形薄膜在声波压力作用下的振动规律研究得出几个相关结论：在假设条件下，它可以简化为集中参数振动系统^[8]，例如等效集中参数系统在声压作用下的平均位移 $\bar{\xi}_a$ ；它的等价固有频率 f_0 等。实践表明，将分布参数振动系统等效为集中参数振动系统不仅将电容传声器的分析和设计大为简化，而且更为合适^[9-10]；据此，本文进行电容传声器分析和设计。集中参数电容传声器工作原理见图 1。

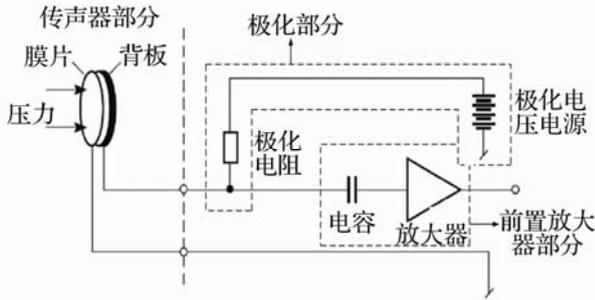


图 1 电容传声器工作原理
Fig.1 Working principle of condenser microphone

图 1 中，声波压力使膜片发生位移，则平板电容器的电容变化；因其上施加有静电荷，故电容的变化产生电压变化输出。这里请注意，极化电阻应较大，其典型值为 1~10 GΩ，以确保极化电压不变；通过电容隔直输出，以防止电荷泄漏，因为电容传声器是高阻抗输出，故放大器部分应包含阻抗转换器。为了计算传声器输出的电压变化，设 A 为电容器极板面积， C 为两极板间瞬时电容， D_0 为两极板间初始距离， d 为受压膜片变化距离， U 为两极板间瞬时电压， U_0 为极化电压， u 为膜片位移引起的电压变化， Q_0 为平板电容器的恒值电荷， ϵ 为空气的介电常数，根据静电学原理，有

$$U \cdot C = Q_0 \tag{1}$$

代入电容公式，得

$$(U_0 + u) = Q_0 / \left(\frac{\epsilon \cdot A}{D_0 + d} \right) = Q_0 / \left(\frac{\epsilon \cdot A}{D_0 \left(1 + \frac{d}{D_0} \right)} \right) = \frac{Q_0}{C_0} \left(1 + \frac{d}{D_0} \right) = U_0 + U_0 \cdot \frac{d}{D_0} \tag{2}$$

故电容传声器的电压变化输出为

$$u = U_0 \frac{d}{D_0} \tag{3}$$

由式(3)可知，电容传声器中膜片位移引起的电压变化与膜片位移成正比，即使位移变化很大亦如此。文献[11]实验证实了丹麦 B&K4144 电容传声器在 0~100 dB 声压级内灵敏度不变。它表明电容传声器在相差 $10^0 \sim 10^5$ 倍的动态范围内灵敏度保持

不变，这种大动态范围内的线性特性正是声学测量所需要的，同时它也为电容传声器单点声压(例如 94 dB)校准提供了依据。下文将阐述电容传声器的结构设计，它可以设计成临界阻尼和强阻尼状态，避免了频响特性的尖锐“共振峰”，可以有效地展宽电容传声器的平直工作带宽。

设计满足新要求的电容传声器需要指出，在驻极体电容传声器中引入驻留在极薄介质上电荷代替极化电压，也是电容传声器中广泛使用的方法。根据静电学计算，这种驻极体电容传声器可以相当于等效极化电压、等效电容和等效间距，因此电容传声器的分析、计算和设计公式等完全一致。故本文不再专门讨论驻极体电容传声器。

2 传输函数及幅频响应

集中参数线性系统其完整特性可用传输函数描述：

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \tag{4}$$

式(4)中： ω 为角频率， $\omega = 2\pi f$ ， f 为频率； $H(j\omega)$ 为传声器的传输函数； $Y(j\omega)$ 为传声器输出的傅立叶变换； $X(j\omega)$ 为传声器输入的傅里叶变换。

传输函数为复数变量，其绝对值即传声器的幅频响应，见图 2。

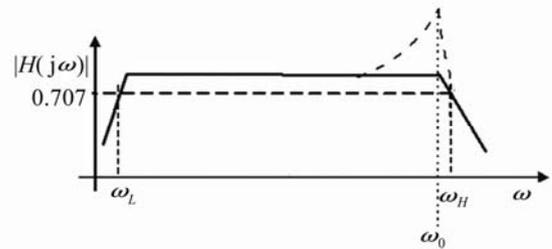


图 2 传声器的幅频响应
Fig.2 Amplitude-frequency response of the microphone

图 2 中，工作频率范围内输出特性平坦、与频率无关。一般情况下高频截止频率 ω_H 尽可能高，低频截止频率 ω_L 尽可能低，平坦部分尽可能宽。采用不同的传声器的原理、结构设计、机械工艺等，以追求理想的幅频响应。需要注意的是是一般线性系统会在固有频率处发生“共振”，形成尖峰(图 2 中虚线所示)，从而幅频响应的平坦部分将会显著收窄。电容传声器的优点之一是可以设计为强阻尼，当为临界阻尼时没有共振峰，此时 $\omega_H \approx \omega_0$ 。因此展宽了幅频响应的平坦部分。

电容传声器是高阻抗输出，其后应接阻抗转换器，如图 3 所示。

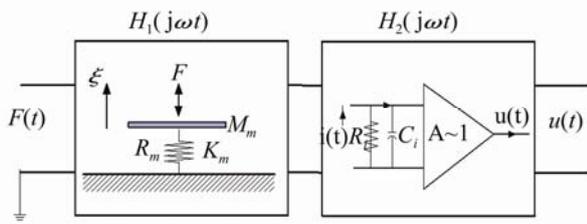


图3 电容传声器后接阻抗转换器组成复合系统
Fig.3 A compound system formed by an impedance converter connected behind a condenser microphone

复合系统的传输函数 $H(j\omega)$ 为

$$H(j\omega) = \frac{u(j\omega)}{F(j\omega)} = H_1(j\omega)H_2(j\omega) \quad (5)$$

系统 1 是一个机械振动系统，从原理上看其低频响应可直至 0 Hz，但高频响应却受其固有频率的限制。对于系统 1，其微分方程为

$$\frac{d^2 \xi(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{d\xi(t)}{dt} + \omega_0^2 \xi(t) = \frac{F_a}{M_m} \cdot f(t) \quad (6)$$

式(6)中： ξ 为振动位移，以弹簧未受重力时刻为 0 点； t 为时间； β 为阻尼因子， $\beta = R_m/2M_m$ ； ω_0 为振动系统无阻力时固有角频率， $\omega_0^2 = (2\pi f_0)^2 = K_m/M_m$ ； M_m 为薄膜刚体质量； R_m 为薄膜刚体振动时与速度相关的阻尼系数； K_m 为弹簧的弹性系数； F_a 为强迫力幅度。

令 $s = j\omega$ ， j 为虚部单位。对式(6)两边作拉普拉斯变换，根据微分的拉普拉斯变换性质，有

$$s^2 \xi(s) + 2\beta s \xi(s) + \omega_0^2 \xi(s) = \frac{F_a}{M_m} \cdot F(s) \quad (7)$$

故系统 1 的阐述函数为

$$H_1(j\omega) = \frac{\xi(s)}{F(s)} = \frac{F_a/M_m}{s^2 + 2\beta s + \omega_0^2} = \frac{F_a/M_m}{(j\omega)^2 + 2\beta(j\omega) + \omega_0^2} = \frac{F_a/M_m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j2\beta\omega} \quad (8)$$

传输函数的绝对值(模)为系统 1 的幅频响应

$$|H_1(j\omega)| = \frac{F_a/M_m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \quad (9)$$

系统 1 的相频响应与传输函数的虚部、实部的比值有关：

$$\phi(\omega) = \tan^{-1}\left(-\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (10)$$

当 $\omega \ll \omega_0$ 时，系统的幅频响应与频率无关；调整结构设计参数可使阻尼因数 β 增大而显著降低共振峰，从而就拓宽了幅频响应的平坦部分，使得复合系统的高频响应更为理想，这正是我们设计

的目标之一。

系统 2 是一个阻容电路系统，相对于机械振动系统 1，它的高频响应可以很高而不影响复合系统的高频响应。以下仍从传输函数角度分析其对复合系统低频响应的影响，由图 3 可知

$$u(t) = i(t) \cdot (R_i // C_i) = i(t) \cdot \frac{R_i \cdot \frac{1}{j\omega C_i}}{R_i + \frac{1}{j\omega C_i}} = i(t) \cdot \frac{R_i(1 - j\frac{1}{\omega R_i C_i})}{1 + (\frac{1}{\omega R_i C_i})^2} \quad (11)$$

系统 2 的传输函数的幅频响应为

$$|H_2(j\omega)| = \left| \frac{u(j\omega)}{i(j\omega)} \right| = \frac{R_i}{\sqrt{1 + (\frac{1}{\omega R_i C_i})^2}} \quad (12)$$

式(12)中：输入电容 C_i 为阻抗变换器输入电容、分布电容等的叠加，约 10 pF 量级；输入阻抗 R_i 须大于等于 $10^{10} \Omega$ ，复合系统的低频截止频率才能低于 5 Hz。

3 结构和设计参数

本次设计的 1/4 in 电容传声器结构示意图如图 4 所示，有几点需要说明：基于通用性和互换性，外径及安装螺纹尺寸等遵从国际、国内标准；振膜采用镍合金，它与壳体材料一致，具有相同的热膨胀温度系数，以提高温度的稳定性；背板、支撑体、绝缘体制成模块结构有利于装配；空气腔大小有调整空气阻尼的作用，压力平衡孔能适当平衡静态压力变化，作为一个声学部件，空气腔还能和电容传声器耦合、复合共振，延伸共振频率；表面喷涂硅脂、氟油类，有利于防潮，等等。

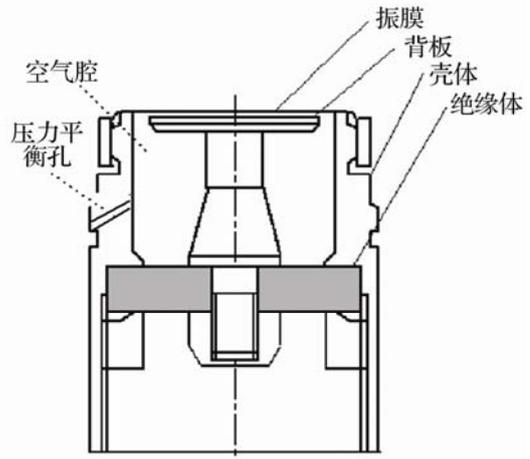


图4 电容传声器结构示意图^[12]
Fig.4 Structure diagram of the condenser microphone

表 1 列举了主要设计参数，这些参数中，采用 1/4 in 直径(6.35 mm)系列有利于提高传声器的固有频率；振膜张力取决于材料和工艺，最大张力 $T_m = P_m h$ ，其中 P_m 为镍合金极限应力，其会受到应力的限制，不同镍合金的相应值差别很大，表中张力数据和镍合金的密度由实际情况核定；根据需求背景和配套电源，本设计中极化电压取 200 V；为计算低频响应，设阻抗转换器输入电阻 $R_i = 10^{10} \Omega$ ，输入电容 $C_i = 10 \text{ pF}$ ；其它参数基于设计计算而定。

表 1 1/4 in 电容传声器的主要设计参数

Table 1 The main reference parameters of the 1/4 inch condenser microphone

| 参 数 | 取值 | 备注 |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| 振膜半径 a/M | 2.000×10^{-3} | 2 mm |
| 振膜厚度 h/m | 2.000×10^{-6} | 2.0 μm |
| 极板间初始距离 D_0/m | 1.800×10^{-5} | 18 μm |
| 振膜张力 $T/(\text{N/m})$ | 3.000×10^3 | |
| 振膜密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$ | 8.800×10^3 | |
| 极化电压 U_0/V | 2.000×10^2 | |
| 腔体容积 V/m^3 | 3.170×10^{-8} | |

4 主要性能参数

4.1 灵敏度

已指出等价集中参数系统在声压作用下的平均位移^[12]为

$$\bar{\xi}_a \approx \frac{p_a a^2}{8T} \quad (13)$$

它的等价固有频率^[13]为

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2.4048}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (14)$$

式(13)~(14)中： p_a 为声压幅值； a 为振膜半径； T 为振膜张力； σ 为振膜面密度；数值 2.4048 为零阶贝塞尔函数的第一个根值(取五位有效数)。又设声压 $P = p_a e^{i\omega t}$ 均匀作用于传声器。以下估算传声器灵敏度 $S = u/p_a$ ，在输出电压变化表达式(3)中，令 $d = \bar{\xi}_a$ ，代入式(13)，得电容传声器开路灵敏度为

$$S = \frac{u}{p_a} = \left(U_0 \frac{d}{D_0} \right) / p_a = \left(\frac{U_0 \cdot p_a a^2}{D_0 \cdot 8T} \right) / p_a = \frac{U_0 a^2}{8D_0 T} \quad (15)$$

代入表 1 中参数，得电容传声器开路灵敏度： $S = 1.852 \text{ mV/Pa} \approx 1.9 \text{ mV/Pa}$ 。

传声器灵敏度最终由校准确定。实际校准中总需连接阻抗转换器测量电压，这时可用“插入电压法”^[14]进行校准，扣除阻抗转换器因数求得开路灵敏度 S 。

4.2 频响范围

将表 1 中响应参数代入式(14)得到频响上限(-3

dB)： $f_H \approx f_0 = 79008 \text{ Hz} \approx 79 \text{ kHz}$ (取临界阻尼因子 $\beta_c = \omega_0/2$ 时)，优于设计指标 70 kHz。又根据式(12)得频响下限(-3 dB)：

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_i C_i} = \frac{1}{2 \times 3.1416 \times 1 \times 10^{10} \times 10 \times 10^{-12}} = 1.5915 \text{ Hz} \approx 1.6 \text{ Hz} \quad (16)$$

由式(16)可见，优于设计指标 5 Hz。

4.3 动态范围

动态范围指的是传声器不失真的输出范围。本设计中为提高声压上限，采用了较小的振膜半径 2 mm、较厚的振膜厚度 2.0 μm ；就传声器本身而言，它在声压级 60 dB 时应有 0.1 mV 量级的输出，和一般 1/4 in 传声器(1.0~1.2) μm 厚度比较，在声压级为 160 dB 时也不会失真。

实际传声器总是和阻抗转换器、放大器等电路连接使用的，这时信号输出不失真范围的下限就受到电路噪声等限制，信号输出不失真范围的上限受到电源电压、放大倍数等限制；一般说来，对于后者的调整是容易的。

5 提高性能的分析

5.1 张力分析

在式(14)中，提高振膜的张力是提高传声器高频响应的重要途径。柔性物体在张紧状态时内部存在相互作用的内力，即张力。一旦张紧，张力 T 就是一个常数；人为的张紧的状态可能不同，对应不同张紧状态的张力 T 是不同的，即它可以由工艺而调整。张力可看成弹性体的应力在柔性体张紧状态下的表现形式，它受材料的屈服应力和极限应力的限制。本设计中振膜材料采用镍合金，可用振膜在弹性范围内的屈服应力估算最大允许张力。根据文献[15]，金属镍的屈服应力为 $(140 \sim 660) \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，张力变化范围很宽的原因可能与镍的纯度和镍合金的成分有关，则最大允许张力 $T_m = P_m \times h = (140 \sim 660) \times 10^9 \times (2 \times 10^{-6}) = (280 \sim 1320) \times 10^3 \text{ N/m}$ 。设计中选取实际张力为最大允许张力的 1/100，即 $T = 3 \times 10^3 \text{ N/m}$ ，又有面密度 $\sigma = \rho h = 8800 \times 2 \times 10^{-6} = 1.76 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ ，有较大余量，工艺上亦能实现。为进一步提高传声器的高频响应，提高张力 T 这一途径看似仍有潜力。

5.2 直径分析

根据式(14)，减小传声器直径对改进高频响应效果更为明显，本研究中将新设计的传声器直径减小到 1/4 in 就是基于上述分析，当然，这会降低传

声器的灵敏度。

根据国内目前的精密加工、工艺水平和经验,将传声器外径进一步减小到 1/8 in 尚有困难^[16];但随着科学和技术的进步,研制 1/8 in 电容传声器指日可待。

5.3 稳定性分析

温度的变化会影响性能的稳定性,主要是张力、极化电压或电荷会变化,这涉及材料选择和工艺改进。今后进一步探讨新材料,使振膜和壳体材料更为一致,具有相同的热膨胀温度系数,提高温度对性能的稳定性;背板、支撑体、绝缘体制成模块结构有利于装配;改进“脱胎镀膜”工艺、防潮工艺等。

6 结 论

本文基于某系列的声学测试提出的技术指标,进行了新的 1/4 in 电容传声器设计的相关研究。基于所建立的电容传声器模型、所导得的传输函数和参数计算公式,最终设计出了开路灵敏度为 1.9 mV/Pa、频响范围为 2 Hz~79 kHz、最高声压级不低于 160 dB 的电容传声器,该指标满足军品系列传声器的性能要求。这种传声器的设计成功为电容传声器的下一步的研制生产、性能考核、校准试验奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 高瓴. 几款演播室用的新型电容传声器[J]. 实用影音技术, 2002(10): 77-79.
GAO Ling. Several new studio condenser microphone[J]. Practical Video Technology, 2002(10): 77-79.
- [2] 赵永在, 霍小刚. 重识国产传声器[J]. 音响技术, 2007(1): 6-7.
ZHAO Yongzai, HUO Xiaogang. Recognize domestic microphone[J]. AV Technology, 2007(1): 6-7.
- [3] 陶中达, 宋燕君, 康锡泉, 等. 测量用驻极体电容传声器[J]. 应用声学, 1987, 6(4): 16-20.
TAO Zhongda, SONG Yanjun, KANG Xiquan, et al. Measuring electret condenser microphone[J]. Applied Acoustics, 1987; 6(4): 16-20.
- [4] 杨磊. 电容式传声器腔体设计[J]. 电声技术, 2012, 36(8): 26-31.
YANG Lei. Cavity analysis of condenser microphone[J]. Audio Engineering, 2012, 36(8): 26-31.
- [5] 魏晓玲. 高声压驻极体电容传声器的设计[J]. 电声技术, 2013, 37(2): 14-16.
WEI Xiaoling. Design of high sound pressure electret condenser microphone[J]. Audio Engineering, 2013, 37(2): 14-16.
- [6] CHEN Jenyi, HSU Yuchun, LEE Shusheng, et al. Modeling and simulation of a condenser microphone[J]. Sensors and Actuators, 2008(145-146): 224-230.
- [7] 宋燕君. 设计电容驻极体换能器的新原理[J]. 声学学报, 1979(2): 155-156.
SONG Yanjun. The new design principle electret capacitive transducer[J]. Acta Acustica, 1979(2): 155-156.
- [8] 何亚宁. 通用电容传声器动态特性模型的建立与 SPICE 仿真[J]. 电声技术, 2003(11): 28-31.
HE Yaning. Dynamic behavior modeling for general condenser microphone and simulation using SPICE[J]. Audio Engineering, 2003(11): 28-31.
- [9] Anna Jaskolska, Pascal Madeleine, Artur Jasko lski, et al. A comparison between mechanomyographic condenser microphone and accelerometer measurements during submaximal isometric, concentric and eccentric contractions[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2007, 17(3): 336-347.
- [10] WU Chiayu, CHEN Jienming, KUO Chinfu. Low polarization voltage and high sensitivity CMOS condenser microphone using stress relaxation design[J]. SProcedia Chemistry, 2009, 1(1): 859-862.
- [11] D.L.H.Gibbings, 邱元高. 电容传声器声压级灵敏度的变化[J]. 国外计量, 1983(3): 79-81.
D.L.H.Gibbings, QIU Yuangao. SPL condenser microphone sensitivity variation[J]. Foreign metering, 1983(3): 79-81.
- [12] 庄国胜. 测试电容传声器的设计[J]. 电声技术, 1995(10): 16-19.
ZHUANG Guosheng. Test condenser microphone design[J]. Audio Engineering, 1995(10): 16-19.
- [13] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2010.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufeng. Acoustics Foundation[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2010.
- [14] 章汝威, 张柏玲. 高声强下传声器灵敏度校准[J]. 声学学报, 1983, 3(8): 135-139.
ZHANG Ruwei, ZHANG Bailing. Under high intensity calibration microphone sensitivity[J]. Acta Acustica, 1983; 3(8): 135-139.
- [15] 马大猷, 沈豪. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
MA Dayou, SHEN Hao. Acoustic manual[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [16] SKisenwether J S, Sataloff R T. The effect of microphone type on acoustical measures of synthesized vowels[J]. Journal of Voice, 2015: 1-4.