

亥姆霍兹共鸣器的发展

马大猷

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

约 150 年前, 亥姆霍兹用他发明的共鸣器在历史上第一次做了乐音和语音的频谱分析, 并提出音乐理论和听觉理论, 这是 19 世纪的重大科学贡献. 亥姆霍兹共鸣器一直是频谱分析和选频接收、测量和控制的利器. 理论上的发展更扩大了它的应用范围. 单个共鸣器或共鸣器组合在乐器制造、厅堂建筑、噪声控制等方面都起很大作用. 由共鸣器组合发展的穿孔板结构不仅在民用范围内起重要作用, 在大型喷气飞机制造中也是不可替代的防止噪声污染的手段. 本文对亥姆霍兹共鸣器的原理、应用和发展作一概述.

Abstract

Some 150 years ago, Herrmann von Helmholtz, for the first time in the history, made frequency analysis of musical tones and speech sounds with the help of his newly-invented resonators. The results were his theories of music and hearing—great contributions in the 19th century physics. Helmholtz resonators have always been the important tools in frequency analysis and in selective reception, measurement and control of sounds. Progress on the theoretical understanding of Helmholtz resonator has enlarged its usefulness. Individual resonators and group of resonators are important in musical instrument manufacture, room acoustics and noise control. The perforated panel constructions, developed from the groups of resonators, are important in civilian use as well as indispensable to the noise pollution control in large jetliners. It is the purpose of the present article to review the principle, applications and development of the Helmholtz resonators.

大约 150 年前, 亥姆霍兹(1821—1894)对乐音和元音做了频谱分析, 研究了结合音和拍音, 提出和声理论和听觉理论, 其结果在 1863 年出版的划时代著作《音的感知》中发表. 当时距精密声学仪器、声学分析设备等的出现还有 100 年, 亥姆霍兹怎么做出精密频谱分析, 因而能总结出正确的和声理论和听觉理论呢? 他使用的利器就是他发明的、并且后来以他的名字命名的共鸣器. 一个空心的玻璃球或金属球, 前面加一短管(颈)通到外边, 后面做成漏斗形可放在耳壳内并加以密封, 这就是亥姆霍兹所用的共鸣器了(图 1). 形状也不限于圆球, 任何形状、有颈无颈都可以^[1]. 声源在共鸣器前发声时, 如果频率合适, 听到的声音就会大大加强, 甚至可以在一般噪声, 如交通声、喧哗声中, 选

听个别频率. 选择性非常尖锐. 普通容器都能共鸣, 一个普通酒瓶的共鸣频率大约是 100Hz 左右, 一斤的茅台酒瓶在 200Hz 左右共鸣.

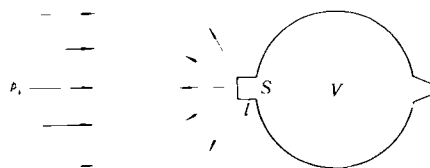


图 1 亥姆霍兹共鸣器

亥姆霍兹共鸣器的基本应用是作选择性接收. 以前用热线传声器或瑞利盘测量声强时, 就常把它们放在亥姆霍兹共鸣器的颈内, 以显著提高它们的灵敏度. 这种用途直到今天还很重要. 一个成功的例子就是控制厅堂音质. 在 70 年代, 伦敦建成了“节日大厅”, 建好后发现演奏

音乐时,声音不丰富、太干,问题是低频率混响时间过短.补救方法是受援共振.取若干共鸣器,器中放传声器接收频谱中某一小部分,接收后经放大反馈到厅堂放大器,便混响时间有效地延长,用多个通道可以避免啸叫.在节日大厅中共用了172个通道,提高了100—700Hz的混响时间,效果极其令人满意.以后其他厅堂中使用这个方法的还不少,通道数则有所减少.占时,用埋藏的共鸣器(瓮)以增加剧场气氛的办法,中外都有.

共鸣器的近代应用主要是用来吸收声音.厅堂中有“余音绕梁”、“虚堂雪听”的效果,主要是由于混响时间过长,所发声音互相干扰所致,所以需要增加吸收.单个共鸣器吸收本领很大,但频率范围很窄,频带外就不能吸收了.所以用共鸣器改进音质,需要很多共鸣器.有的工厂把砖做成共鸣器(有空腔、有开口),用这种砖砌墙,可以很好地吸收声音.但这种构造不好看,只能用在工厂车间或体育馆中降低噪声.另一种办法是穿孔板结构,这不但可用于厅堂、播音室等,在大型喷气客机中也是降低风扇噪声的唯一途径.

关于亥姆霍兹共鸣器的理论,瑞利第一个提出力学类比方法.如果共鸣器,特别是它的颈比有关波长短得多时,颈内空气就可以看成一个质量整体因声波入射而振动,而容器内的空气则因颈内空气振动而作胀缩变化,这样共鸣器的运动就和一个质量弹簧系统一样.近代用电路类比的更多,颈中质量代表惯性,类比于电感,容器内的空气代表弹性,类比于电容.等效电路即如图2所示^[2].

输入为 $2p_1$,可看作是颈周围球面反射的结果.共鸣器的固有频率约为

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{eV}}, \quad (1)$$

式中 c 是声速(340m/s), S 是颈的截面积(m^2), V 是容器的容积(m^3), l 是颈长(m).颈口要辐射声能,因此有效颈长要加上末端修正 $0.85r$, r 是圆颈的半径(m).也可以用圆筒形空腔作为容器,好处是容易调谐,共振频率与容积物理

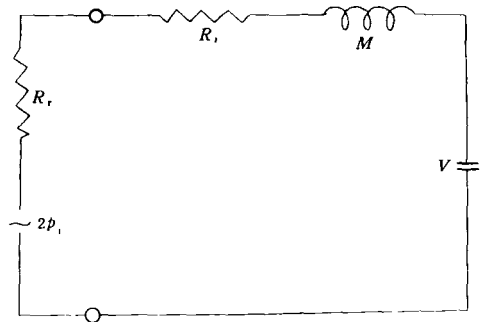


图2 亥姆霍兹共鸣器的类比电路

或空腔长度的平方根成反比.共鸣器有能量损失,反映为声阻

$$R = R_i + R_r, \quad (2)$$

式中 R_i 是共鸣器内部摩擦(粘滞性)阻, R_r 是颈口的辐射阻,

$$R_r = 2\pi\rho c \left(\frac{S}{\lambda}\right)^2, \quad (3)$$

式中 ρ 是空气密度, λ 是声波波长(m), ρc 称为空气中的声阻抗率,等于自由空间中声压与质点速度的比. R 值决定共鸣器的品质因数,后者为

$$Q = \frac{\omega M}{R}, \quad (4)$$

M 是颈中振动空气的质量,在匹配时($R_i = R_r$ 时),这个值有时可达到500,即颈内振动将放大500倍(与入射声波比),或半功率频带宽度 $\Delta\omega/\omega = 1/500$.在共振频率为100Hz时,声压或质点速度可能放大500倍,但在99.9或100.1Hz(共振频率加减1/1000),功率放大已减半.这说明共鸣器共振的尖锐程度.

用共鸣器吸收声音时,它的吸声能力用有效吸收面积 A 表示,即共鸣器的吸收相当于面积 A 的完全吸收.在匹配($R_i = R_r$)时,有效吸收面积最大,为

$$A_{\max} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi}. \quad (5)$$

如共振频率为100Hz,这个面积等于 $0.46m^2$,比瓶口大多了.但有效吸收面积 A 也服从 Q 的作用,在 $100 \pm 0.1Hz$ 时, A 已降至 $0.5A_{\max}$.为加宽吸收频率范围(同时降低最大吸收),可在颈口或腔内增加多孔性吸收材料.

较大规模地使用亥姆霍兹共鸣器吸收声音,常采用穿孔板形式^[1].薄板(材料不拘,胶合板、纸板、金属板均可,要根据使用环境选择)上均匀地穿以厘米级的孔,固定在墙壁前,就成为穿孔板结构,见图3.每个孔和它周围就是一个亥姆霍兹共鸣器,穿孔板结构等于并联的大量亥姆霍兹共鸣器.如每一共鸣器的振动质量、内声阻和声顺分别为 $M, R,$ 和 $C,$ 穿孔板结构每单位面积的振动质量、内声阻和声顺就是 M/n

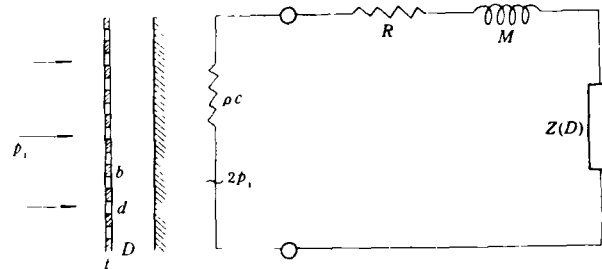


图3 穿孔板结构及其类比电路

其最大值

$$\alpha_{\max} = 4r/(1+r)^2 \quad (7)$$

出现在共振频率 $f_0,$ 后者满足

$$\omega_0 m - \text{ctn} \omega_0 D/c = 0, \text{ 或}$$

$$f_0 \approx (1/2\pi) \sqrt{(m + D/3c)(D/c)}. \quad (8)$$

吸声系数为最大值之半时的频率满足

$$\omega m - \text{ctn} \omega D/c = \pm (1+r),$$

或半吸收频带宽度

$$\Delta f/f_0 \approx (1+r)\omega_0 D/c. \quad (9)$$

由以上各式可以看出,最大吸声系数为1时,要求 $r=1,$ 吸收带宽也要求 r 大. 所以,一般穿孔板结构要求填入大量多孔性吸声材料. 吸收既靠吸声材料,共鸣器的共振特性反倒是一个障碍(限制带宽),所以平常使用时,尽量减少其障碍作用,穿厘米孔,穿孔面积占35%以上,使其完全透声,穿孔板成为简单的保护面板了.

穿孔板结构的另一发展方向是微穿孔板^[1],把穿孔的直径缩小到毫米或毫米以下,孔内的摩擦阻就可以大到可观程度,而结构不需要另加吸声材料. 小孔可以看做一个短管,其长度为板厚 t (m). 瑞利-基尔霍夫定律给出细管内声波传播、衰减的规律,克兰道耳(Irving B.

$= \rho c m, R_1/n = \rho c r$ 和 $nC = D/c$ [严格说顺性声抗为 $-j\rho c \text{ctn} \omega D/c,$ D 是穿孔板到后壁的距离(m)],而每单位面积的辐射声阻则为 $\rho c, n$ 为每单位面积中的穿孔面积. 这时可以把穿孔板结构当做吸声材料,声波正入射时的吸声系数(用相对阻抗表示: $r = R/n\rho c, m = M/n\rho c$)为

$$\alpha = 4r/\{(1+r)^2 + (\omega m - \text{ctn} \omega D/c)^2\}. \quad (6)$$

Crandall)具体推导出短管的声阻抗公式和管半径小于和甚大于附面层厚度时的极限值. 根据这些结果可求得统一的微穿孔板的相对声阻抗如下(另加末端修正,声阻抗除以 ρc):

$$r = \frac{32\mu t}{d^2 c n} \sqrt{1 + x^2/32}, \quad (10)$$

$$\omega m = \frac{\omega t}{c n} (1 + 1/\sqrt{3^2 + x^2/2}), \quad (11)$$

式中 d 为穿孔直径(m), $x = (d/2) \sqrt{\omega/\mu}, \mu$ 为空气的运动粘滞系数($1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$),因而 $x \approx d \sqrt{f \times 10^5}$. 由于声阻与穿孔直径的平方成反比,而声质量只与穿孔面积有关,可选择 d 和 n 使 r 近于1而 ωm 尽量小,这种高声阻、低声抗的微穿孔板结构的吸声系数可近于1,而吸声频带宽度的相对值

$$\Delta f/f_0 \approx 2 \text{ctg}^{-1}(\omega_0 m) \quad (12)$$

可达到一、两个倍频程. 进一步发展宽吸收频带,可用双层微穿孔板结构,见图4.

使用单个共鸣器时,可以在共鸣器后再加一共鸣器或四分之一波长管,做成双共鸣器,这样可提高共鸣器的吸收或扩大频率范围. 在微穿孔板结构前再加一块固定的微穿孔板,就成了双微穿孔板结构. 两层微穿孔板的参数可完

全相同,特性变化由两个空腔调节. 根据等效电路可求得双层微穿孔板结构的相对声阻抗为

$$Z = r_1 + j[\omega m_1 - \text{ctg}(\omega D_1/c)]$$

$$+ \frac{\text{ctg}^2(\omega D_1/c)}{r_2 + j[\omega m_2 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \text{ctg}(\omega D_2/c)]} \quad (13)$$

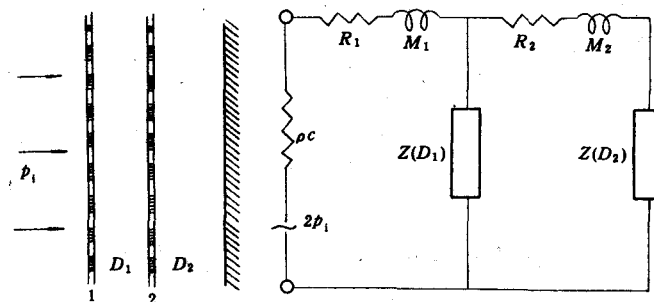


图4 双层微穿孔板结构和类比电路

由(13)式中可以看出,前面一部分是前共鸣器(微穿孔板加前腔)的相对声阻抗,这是主要部分,后共鸣器通过前腔 $\text{ctg}^2(\omega D_1/c)$ 的耦合作用而发生影响. 双共鸣器的吸收、共振和频带由(6)至(9)式决定,其中的阻抗值取(13)式的实部和虚部. 在高频的主要共振(r_1, m_1, D_1)频率附近和以上,双层结构下不大受后共鸣器的影响,这是因为频率较高,耦合因数 $\text{ctg}^2(\omega D_1/c)$ 很小的缘故. 后共鸣器的作用是有效地把频率响应向低频率扩展. 可以证明,在低频率,这时余切函数非常大,接近其宗量的倒数,有效后腔的深度接近 $D_1 + D_2$,与主共振时的后腔深度比为 $(D_1 + D_2)/D_1$,吸收频率带宽也相应增加. 双层穿孔板结构的声阻在高频时接近 r_1 ,在低频时大约是 $r_1(1 + D_1^2/(D_1 + D_2)^2)$. 由于微穿孔板的声阻稍随频率增加而增加,如 r_1 是按高频共振时设计的,双层结构的低频增加稍许抵消 r_1 的变化. 图5为一些微穿孔板结构的频率

特性,双共鸣器加宽频带的作用很明显.

由图可见,板厚和穿孔直径各 0.4mm,孔距 4mm,腔深 40mm 所做成的微穿孔板结构(曲线1)最大吸声系数近于1,在 800Hz 稍高,半吸收在 500Hz 和 1500Hz,频带约 1.8oct. 加一块同样的微穿孔板,后留 40mm 的空腔(曲线2),吸收频带的高频限不变,低频限降低至 280Hz. 如第二空腔改为 80mm(曲线3),低频限进一步降低至 180Hz)频带为 3.1oct. 使用多孔性吸声材料时,在最佳情况,厚度要在低频限等于四分之一波长,现在低频限为 180Hz 时,微穿孔板结构的总厚度 120mm,大约只有十六分之一波长. 在这个例子中,穿孔直径 0.4mm,孔距 4mm,穿孔面积为 0.785%,用双层结构加宽吸收频带很有效,不过在频带中某处要出现声阻峰值(超过1),因而形成吸收低谷,所以加宽频带也要有限度.

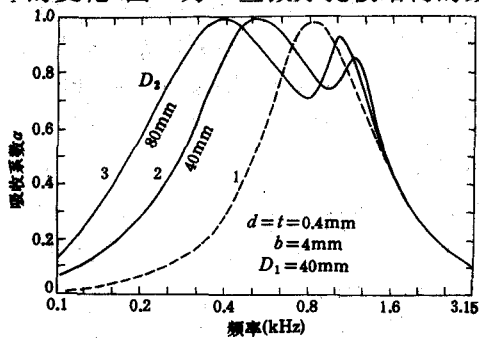


图5 双共鸣器的吸收特性

上面的例子给出一些关于微穿孔板结构的具体概念. 由(10),(11)二式知,宽频带的要求最好是 r 比 ωm 大,意味着 $f_0 d^2 < 10^{-4}$,这时带宽 Δf [(12)式]将大于 2oct. $r/\omega_0 m > 0.5$ 或 $f_0 d^2 < 2 \times 10^{-4}$ 时,频带宽度可大于 1oct. 所以共振频率为 100—200Hz 时, d 可取为 1mm,共振频率再高, d 就要小于 1mm. 孔距 b 的要求是使 r 接近于 1, D 则要使共振频率合适. 加第二共振腔可延伸低频率范围一、两个倍频程. 微穿孔板吸声结构除了简单、准确,不须另加多孔吸声材料外,它特别适合低频率吸收,同样低频特

性,它可能只需要多孔材料结构的四分之一空间,这是很可观的节省.

亥姆霍兹共鸣器虽然已发明了 100 多年,它在物理学发展中起了重要作用,意义至今未减. 共鸣器概念的进一步发展有重大的实际意义,值得认真注意.

- [1] L. E. Kinsler and A. R. Frey, *Fundamentals of Acoustics* Wiley, New York, (1962), 186, 194, 205.
- [2] 库特鲁夫著,沈曦译,室内声学,建筑出版社, (1982), 125—141.
- [3] 马大猷、沈曦,声学手册,科学出版社, (1987), 227, 228, 471.
- [4] 马大猷,中国科学, 18-1(1975), 38—51.

机械合金化研究与进展¹⁾

王景唐 沈同德

(中国科学院金属研究所,沈阳 110015)

本文简要介绍了国内外在机械合金化研究和新材料方面的概况. 扼要阐述了本实验室近年来在这方面取得的进展,例如机械合金化过程中的热力学、动力学及非晶转变机制,在无化学驱动力系统中的非晶转变,纯金属与非晶合金的机械合金化,球磨对晶态合金结构的影响,Fe 与 CuO 间的置换反应,Fe-SiC 复合纳米相的制备,制取纳米合金的新方法等.

Abstract

In this paper the study of mechanical alloying and its development in making new materials at home and abroad are introduced briefly. The progress of the study of mechanical alloying in our lab in recent years is also related. Descriptions will include (1) thermodynamics, kinetics and transition mechanism for amorphization during mechanical alloying, (2) the amorphization transition in a system without chemical driving force, (3) mechanical alloying of pure metals and amorphous alloys, (4) the influence of ball milling on the structure of crystalline alloy, (5) the displacement reaction between Fe and CuO, (6) the preparation of nanocrystalline Fe-SiC composites, (7) a new method for preparing nanocrystalline alloys, etc.

一、国内外发展概况

机械合金化(mechanical alloying)始于 60 年代后期,最初用来制备氧化物弥散强化合金^[1]. 近 20 年来,机械合金化方法和技术有了长足的进展,在理论研究和新材料的研制中越来越显示出其旺盛的活力. 近年来诸多重要的国际学术会议已将机械合金化列为会议中的专题,如第六、七两届急冷金属国际会议(RQ-6,

RQ-7)和第七届液态及非晶态金属国际会议(LAM-7)均将机械合金化列为专题,论文数量与日俱增. 此外,国际上还有专门召开的机械合金化学术会议,1991 年 5 月在日本京都召开了机械合金化国际会议,有 20 多个国家的学者参加并提交论文 150 余篇^[2]. 机械合金化研究的领域主要涉及基础研究和新材料的发展^[2-5].

1. 基础研究方面

基础研究包括机械形变非晶化的机制及微

1) 国家自然科学基金资助项目.