

软包装液体体积测量技术

吕海峰¹, 牛凯强¹, 刘静², 耿彦章¹

(1. 中北大学, 太原 030051; 2. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 实现软包装内液体体积的快速、非侵入测量。**方法** 在研究亥姆霍茨共振器原理的基础上, 分析共振腔体积改变对声学系统的影响; 采用 Virtual Lab 软件对所设计的测试系统进行仿真计算, 求取传递损失最大值频率与被测液体体积的关系; 搭建软包装液体体积声学测试系统, 采用 Labview 软件对管道入口、出口处的声音信号进行采集; 采用声波分解法对信号进行分析, 得到声学系统的传递损失。**结果** 测试结果表明, 软包装内液体体积由 25 增大至 200 mL 时(即共振腔腔体体积减小), 测试系统传递损失的峰值所对应的频率由 256 上升至 278 Hz。实验结果与仿真结果具有相同的趋势; 系统的灵敏度为 7.4 mL/Hz。**结论** 所设计的基于亥姆霍茨共振器理论的声学测试装置可以实现对软包装液体体积的测量。

关键词: 软包装; 体积; 测量; 噪声

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)07-0061-05

Measurement Technology for the Volume of Liquid in Soft Package

LYU Hai-feng¹, NIU Kai-qiang¹, LIU Jing², GENG Yan-zhang¹

(1. North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. No.59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This study was aimed to measure the volume of liquid in soft package in a fast and non-invasive manner. Based on the research of theory of Helmholtz resonator, the effect of resonator cavity volume on the acoustic system was analyzed. The Virtual Lab software was used to simulate the measurement system designed, and the relationship between the maximum frequency of transmission loss and the detected volume was obtained. The acoustic testing system for the volume of liquid in soft package was established and the Labview software was applied to acquire the acoustic signals at inlet and outlet of the tunnel. The acoustic decomposition method was used to analyze the signals acquired and the transmission loss of the acoustic system was obtained. The test results indicated that when the volume of liquid in the soft package increased from 25 to 200 mL, and the frequency of maximum transmission loss increased from 256 to 278 Hz. The experiment and the simulation possessed the same trend and the sensitivity of the measuring setup was 7.4 mL/Hz. In conclusion, the acoustic measurement system based on the Helmholtz resonator can be used to measure the volume of liquid in the soft package.

KEY WORDS: soft package; volume; measurement; noise

塑料软包装^[1](或称软塑料包装)是指用塑料薄膜或塑料复合材料加工成型,可以在充填或取出内装物后,容器形状(体积)发生明显变化的软质包装,具有质轻、柔软、易折叠、成本低、占用空间少、使用简单方

便和成本有效性高(单位质量包装的体积和质量)等优点,正不断取代其它材料的包装,广泛应用于各行各业。由于软包装内的液体具有流动性,因此软包装整体呈现非规则性,常规测量无法实现。软纸包装的

收稿日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51305409); 山西省青年科技研究基金(2013021020-2); 山西省高等学校优秀青年学术带头人计划

作者简介: 吕海峰(1981—),男,河南信阳人,博士,中北大学副教授、硕导,主要研究方向为噪声测试与控制。

液体体积测量已经成为一个急需解决的问题。现有的软包装液体体积测量方法主要有溢水测量法和倾倒测量法。溢水法就是将被测物体放进一个盛满液体的容器内,通过测量被排出容器的液体体积获得包装袋的体积。倾倒法是将软纸包装损坏,将内部的液体倒入有刻度的容器内测量其体积。传统测量法具有测试装置简单方便,易于快速测量等优点,缺点则是测量精度低。当被测液体为具有价格昂贵或易挥发、具有毒性时,倾倒法测量并不适合。

通过声学方法实现软包装液体体积测量,在医疗卫生、食品以及计量科学等领域具有重要的应用价值。同时,对相关测量方法的理论研究可以扩展声学理论的应用范围。在医学领域,随着一次性医疗器械的广泛应用,药液往往储存在标记有刻度的塑料包装袋内,将药袋倒置进行输液,随着液体的减少,液面下降,通过观察刻度判断液体的体积,读数过程中存在较大的误差。在食品工业中,软包装内液体的体积通过液体注入包装的时间、流量来控制,与包装上的标称体积存在一定的差异。在计量科学领域,在测定软包装液体体积时往往采用量筒或量杯,读数过程中易受人为经验的影响,造成测量结果存在一定的误差,影响计量结果的准确性。

文中提出一种基于亥姆霍兹共振器原理的软包装液体体积测量装置与方法,可以在不破坏包装的情况下实现体积测量,不会污染原有液体,在生产、生活以及科学研究中具有广阔的应用前景。

1 测量原理

亥姆霍兹共振腔消声器是由一段开有若干消声孔的管道和管外一个密闭的空腔所组成^[2-5]。消声孔与所连接的闭腔体组成一个弹簧-质量-阻尼系统,当激励频率(即噪声频率)与该弹簧-质量-阻尼系统的固有频率相同时,系统将发生共振^[6]。小孔颈部的流体类似于质量块,当共振发生时,其振动速度加快,与孔壁的摩擦阻力增大,加剧由动能到热能的转化,从而实现噪声能量的降低,达到抑制噪声的效果^[7-8]。

亥姆霍兹共振器的共振频率表达式为:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{V}} \quad (1)$$

式中: c 为声速,在此取340 m/s; V 为亥姆霍兹共振腔体积; G 为传导率,是一个以长度为单位的物理量。

由式(1)可以看出,体积的改变将对亥姆霍兹共振频率产生影响,体积越大,共振频率越低;体积变

小,共振频率则升高^[9]。传导率为:

$$G = \frac{n\pi d^2}{4(t + 0.8d)} \quad (2)$$

式中: d 为孔径; t 为板厚; n 为消声孔个数。

通过测量传递损失,可以确定传递损失最大值所对应的频率与被测液体的体积,从而实现对软包装液体体积的测量。

2 测量装置

为了对软包装内液体体积进行测量,设计了一套声学测试装置,采用双传声器对流经管道内的噪声的传递损失进行测试。该装置由声学管道、壳体、软质包装、扬声器、传声器、信号发生器、功率放大器等部分组成,见图1。

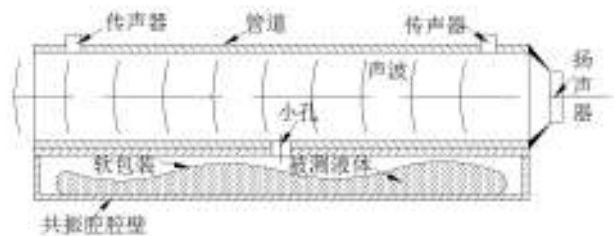


图1 软包装液体体积测量装置

Fig.1 The schematic of measurement device for liquid volume in soft package

测试装置中的扬声器用于产生声音,信号发生器用于产生不同频率的正弦信号,采用功率放大器对信号发生器输出的信号进行放大以驱动扬声器,传声器用于测量管道内的声音信号。装置应完好密闭,以防止声泄漏。

将被测的软质包装放入壳体内,传声器与扬声器安装在声学管道上,管道与共振腔壳体通过小孔连通。测量时,扬声器发出一定频率的声音信号,声音通过由管道、小孔和共振腔腔体组成的亥姆霍兹共振系统后,声音的强度会有所变化。当软包装内的液体体积发生变化时,共振腔的腔体体积随之改变,声学系统的共振频率发生偏移,传递损失将在共振频率处取得最大值。由此,通过测量传递损失的峰值以及与之对应的系统共振频率,可以建立起峰值频率与被测液体体积的函数关系,从而实现软包装液体体积的无损测量。

3 声学特性仿真

在 Virtual.Lab 软件中,根据消声器的结构对声流

体进行建模,网格划分过程中采用的是四面体单元,同时将网格类型设置为声学网格。定义流体材料为空气,流体属性为声音在空气中的物理参数,然后进行前处理操作,形成实体网格的包络网格^[10]。再将系统的入口端和出口端分别定义成组,入口端定义振动边界条件,出口端定义吸声属性。入口端的速度边界条件设置为-1 m/s。由于消声器的出口直接接着大气,声音通过出口直接传播到大气中,所以可以模拟声音在出口处没有反射效果,定义一个全吸声属性。在声阻抗中输入实部值为 416.5 kg_m2_s,虚部值为0^[11]。最后进行声场分布计算。根据上述步骤对实验装置进行建模,当共振腔内的被测软包装液体体积发生变化时,通过去除对应的腔体体积进行模拟,所建立的模型见图2。

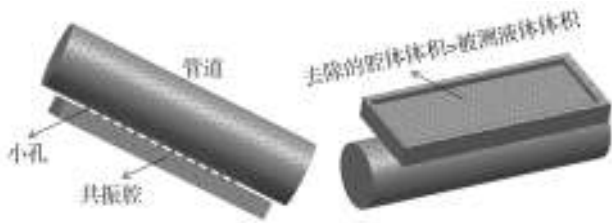


图2 实验系统声学有限元模型

Fig.2 Finite element model of the experimental acoustic system

由于在频率输入时,开始值不能为0,所以取200,范围为200~350 Hz,步长取2 Hz。

由图3可以看出,测量系统的传递损失在一固定频率处为最大值,该频率即为亥姆霍茨共振腔的共振频率。随着软质包装液体体积的增大,共振腔腔体体积减小,共振频率向着增大的方向发展。当管道内噪声的频率与共振频率吻合时,由小孔内空气,腔体内空气组成的弹簧质量系统发生共振,孔颈内的空气柱发生剧烈运动与孔壁发生摩擦产生热量,从而削弱噪声能量,因此传递损失在这一频率处最大。

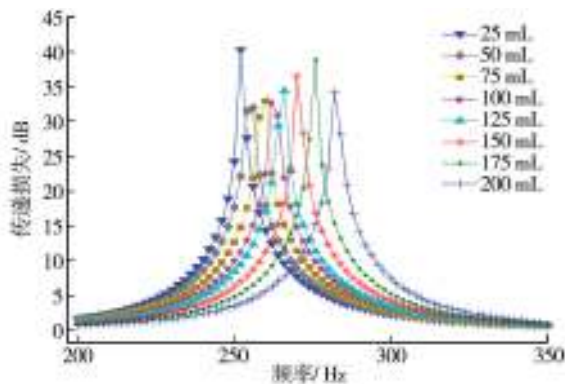


图3 测试系统仿真结果

Fig.3 The simulation results of the test system

4 测试系统与结果分析

4.1 传递损失测量原理

通过以上分析可知,该体积测试系统的关键是获取系统的传递损失。传递损失是声学系统的一个固有特性,仅与结构参数有关,而与声源无关。文中采用声波分解法^[12-14]对测试系统的传递损失进行测量。

声波分解法测量系统传递损失的基本原理见图4^[15]。安装于管道异端的扬声器所发出的平面波在管道内传播,根据声波分解理论得知,该系统中入射声波的自功率谱 S_{AA} 能够通过传声器1和2测得的信号经过分解得出,分解公式为:

$$S_{AA} = \frac{S_{11} + S_{22} - 2C_{12}\cos(kx_{12}) + 2Q_{12}\sin(kx_{12})}{4\sin^2(kx_{12})} \quad (3)$$

式中: S_{11} 为传声器1测量信号的自功率谱; S_{22} 为传声器2所测信号的自功率谱; C_{12} 为传声器1和2所测信号互谱的实部; Q_{12} 为传声器1和2所测信号互谱的虚部; k 为波数; x_{12} 为传声器1和2之间的距离。

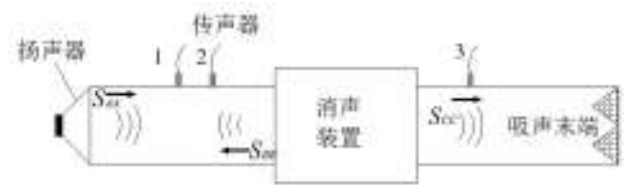


图4 声波分解法测量传递损失原理

Fig.4 The principle of measuring transmission loss using acoustic decomposition theory

假设管道下游为无反射端(即无反射边界条件),因此传声器3可以直接测量无反射条件下透射波的自功率谱 S_{CC} 。入射声波声压的有效值 $p_i = \sqrt{S_{AA}}$,透射声波声压有效值 $p_t = \sqrt{S_{CC}}$,因此该消声器传递损失的计算公式为:

$$T_L = 20\lg \frac{p_i}{p_t} + 10\lg \frac{S_i}{S_o} \quad (4)$$

式中: S_i, S_o 分别为管道入口和出口处的横截面积。

测试过程中为了减少反射末端的影响,采用延长末端管道的做法。

4.2 传递损失测试装置

根据测试原理搭建的测试装置见图5。



图5 软包装液体体积测试装置

Fig.5 The experiment setup of liquid volume measurement in soft package

测试分析选用的参数如下:声速近似为 340 m/s, 小孔厚度 $l=5$ mm, 直径 $d=3$ mm, 在腔体上有 13 个小孔, 即 $n=13$, 实验腔体体积 $V=25.2$ cm \times 9.6 cm \times 2.1 cm, 经过简化计算得到共振腔的体积为 485 cm³。扬声器与管道之间采用过渡连接, 所有连接处均采用硅胶进行密封, 防止声泄露。管道的内径为 72 cm, 长度为 40 cm, 共振腔外壳与管道之间通过小孔进行连接, 组成亥姆霍茨共振器系统。传声器采用 4 支相位匹配的 ϕ 12.7 mm (1/2 英寸) 预极化测试传声器配合 AWA14604 型 ICP 前置放大器进行阻抗变换与前置放大。采集卡采用 NI9234 4 通道动态信号采集模块, 对音频信号进行测量。使用信号发生器产生不同频率的正弦信号, 通过功率放大器驱动扬声器, 产生不同频率的正弦波。采集软件采用 LABVIEW 编制, 传声器的灵敏度为 43 mV/Pa。

4.3 实验结果与分析

测试在半消音室中进行, 采样频率设置为 12.8 kHz, 采用信号发生器产生 200~360 Hz 的正弦信号, 经过功率放大驱动扬声器产生上述频率的声波, 步长为 10 Hz。每个噪声频率记录 1 s, 然后利用公式(3)~(4)对传递损失进行测量。计算当软包装内液体体积不同时, 测试系统对应的传递损失见图 6。

软包装内液体体积不同时, 测试系统的传递损失见图 6。可以看出, 当软包装内液体体积由 25 mL 增大至 200 mL 时(即共振腔腔体体积减小), 测试系统传递损失的峰值所对应的频率由 256 Hz 上升至 278 Hz。当液体体积为 25 mL 和 50 mL 时, 传递损失在 40 dB 以上。当体积继续增加时, 传递损失维持在 30 dB 左右。

该趋势与有限元仿真结果是吻合的。通过对比图 3, 6 可以发现, 当液体体积不同时, 测试得到的共振频率频带宽于仿真得到的共振频带。其原因是由于仿真过程理想化, 环境参数均按照标准环境进行设

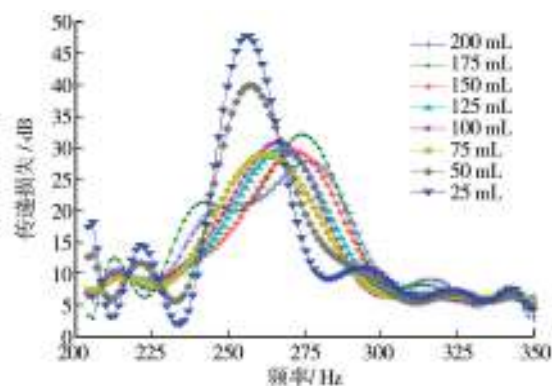


图6 多孔亥姆霍茨共振腔传递损失

Fig.6 The transmission loss of porous Helmholtz resonator

置。实际测试过程中, 不可避免地存在声泄露以及声波反射等现象。提取每条曲线传递损失最大值对应的声音频率, 建立起体积与频率的关系, 将有限元仿真结果与实验结果进行对比, 见图 7。

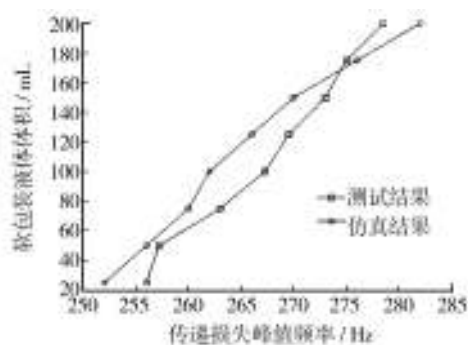


图7 实验与仿真结果对比

Fig.7 Comparison of experimental and simulation results

由图 7 可知, 对于软包装液体体积的测量, 仿真与测试结果具有相同趋势, 均随着软质包装液体体积的增大, 传递损失最大值对应的频率不断减小, 这是与理论分析完全一致的; 测试系统的灵敏度为 7.4 mL/Hz。2 条曲线并未完全重合, 分析原因可能是仿真过程中, 对于流体属性的设置理想化, 与实际测试过程中有所偏差。腔体体积的测量简化等可能与实际数值有所背离。腔体内的软质包装袋可能占据一定的空间(如软质包装袋的下面和腔体壁间的空气), 从而将共振腔内空间隔断。

5 结语

采用亥姆霍茨共振腔理论设计了一套用于软包装内液体体积测量装置与方法, 所开展的主要研究工作如下所述。

1) 分析了亥姆霍茨共振腔理论,论证了采用该理论进行体积测量的可行性。

2) 采用LabVIEW编制了声音信号采集程序,采用该程序对数据进行了时、频域分析。

3) 搭建了软包装液体体积测量装置,采用声波分解法测量了系统的传递损失。

4) 系统测试结果表明,采用多孔测试装置可以有效地测量软包装内液体的体积,测试装置的灵敏度为7.4 mL/Hz。

参考文献:

- [1] 李东立,张敬勇,许文才,等. 软包装材料微观结构与溶剂残留研究[J]. 包装工程,2013,34(7):1—6.
LI Dong-li, ZHANG Jing-yong, XU Wen-cai, et al. Research on Microstructure and Solvent Residue of Flexible Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 1—6.
- [2] 靳国永,张洪田,李玩幽,等. 基于可调频亥姆霍兹共振器的封闭空间噪声自适应半主动控制[J]. 声学学报,2010,35(3):309—320.
JIN Guo-yong, ZHANG Hong-tian, LI Wan-you, et al. Adaptive Semi-active Noise Control in Enclosure Using Self-tuning Helmholtz Resonators[J]. Acta Acustica, 2010, 35(3): 309—320.
- [3] BEDOUT J M D. Adaptive-passive Noise Control with Self-tuning Helmholtz Resonators[D]. West Lafayette: Purdue University, 1996.
- [4] HOROWITZ S B. Design and Characterization of Compliant Backplate Helmholtz Resonators[D]. Florida: University of Florida, 2001.
- [5] LUPEA I. Considerations on the Helmholtz Resonator Simulation and Experiment[J]. Proceedings of the Romanian Academy, 2012, 13(2): 118—124.
- [6] SELAMET A, LEE I. Helmholtz Resonator with Extended Neck[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(4): 1975—1985.
- [7] NUDEHI S S, DUNCAN G S, FAROOQ U. Modeling and Experimental Investigation of a Helmholtz Resonator With a Flexible Plate[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(4): 0411021—0411026.
- [8] 吕海峰,潘宏侠,黄晋英. 一种调频式共振消声器的设计[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(6):1021—1025.
LYU Hai-feng, Pan Hong-xia, Huang Jin-ying. Design of Tuned Helmholtz Resonator Muffler[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(6): 1021—1025.
- [9] GAWLIKOWSKI M, PUSTELNY T, ROMANKUSTOSZ, et al. Non Invasive Blood Volume Measurement in Pneumatic Ventricular Assist Device Polvad[J]. Molecular and Quantum Acoustics, 2006, 27: 97—106.
- [10] BILAWCHUK S, FYFE K R. Comparison and Implementation of the Various Numerical Methods Used for Calculating Transmission Loss in Silencer Systems[J]. Applied Acoustics, 2003, 64(9): 903—916.
- [11] 孙路伟,武秀东,海智渊,等. 基于LMS Virtual.Lab Acoustics的抗性消声器性能分析研究[J]. 计算机应用技术, 2014, 41(5): 57—60.
SUN Lu-wei, WU Xiu-dong, HAI Zhi-yuan et al. Based on LMS Virtual.Lab Acoustics Reactive Muffler Performance Analysis Investigation[J]. Journal of Computer Application, 2014, 41(5): 57—60.
- [12] TAO Z, SEYBERT A F. A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss[C]// Proceedings of the 03NVC-38, 2001: 1653—1657.
- [13] YOUSEFZADEH B, MAHJOOB M, MOHAMMADI N, et al. An Experimental Study of Sound Transmission Loss Measurement Techniques Using an Impedance Tube[C]// Proceedings of the Acoustics-08, Paris, 2008: 1715—1718.
- [14] 李海龙,季振林,闫欣. 消声器中频声学性能的计算测量方法[J]. 噪声与振动控制,2015,35(1):156—159.
LI Hai-long, JI Zhen-lin, YAN Xin. Computational and Measurement Methods of Middle-frequency Acoustic Performance of Mufflers[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(1): 156—159.
- [15] 徐航手,康钟绪,季振林. 排气消声器传递损失的实验测量与分析[J]. 噪声与振动控制,2009(4):128—131.
XU Hang-shou, KANG Zhong-xu, JI Zhen-lin. Experimental Measurement and Analysis of Transmission Loss of Exhaust Silencers[J]. Noise and Vibration Control, 2009(4): 128—131.
- [15] 杨冰,林逵. IP-HPLC法测定复合维生素B片中五种维生素的含量[J]. 福建医药杂志,2001,23(5):148—150.
YANG Bing, LIN Kui. The Method of IP-HPLC to Determine the Content of Five Kinds of Vitamin in Compound Vitamin B [J]. Journal of Fujian Medical Journal, 2001, 23(5): 148—150.
- [15] 刘红菊,闫冲,蒋晔,等. RP-HPLC同时测定复合维生素注射液三种维生素的含量[J]. 华西药学杂志,2007,22(3):318—319.
LIU Hong-ju, YAN Chong, JIANG Ye, et al. The RP-HPLC to Determine the Content of Three Kinds of Vitamins in Compound Vitamin Injection at the Same Time[J]. Journal of West China Pharmacy, 2007, 22(3): 318—319.

(上接第55页)

Vitamin Injection[J]. Journal of Chinese Medicine, 2008, 11(2): 417—419.