

非对称基准物与被测物差压检漏系统试验研究

喻新发, 闫荣鑫, 孟冬辉, 郭欣
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文章分析了环境温度变化对差压检漏系统的影响。通过建立差压检漏系统试验平台, 研究了非对称基准物和被测物差压检漏系统零漂试验和被测物接标准漏孔试验。试验结果表明: 对非对称基准物与低漏率的被测物产生的差压在滞后温度补偿后进行最小二乘拟合可以消除环境温度变化产生的干扰, 同时线性补偿的效果更好, 误差更小; 不同容积的基准物对相同漏率的被测物差压曲线在温度补偿前没有线性, 但温度补偿后都能获得明显的线性; 滞后温度补偿与即时温度补偿获得的线性基本相同, 但滞后温度补偿比即时温度补偿产生的标准差更小, 误差更小; 多点平均温度补偿比单点温度补偿的效果更好, 误差更小。

关键词: 差压检漏系统; 滞后温度补偿; 最小二乘拟合; 线性补偿

中图分类号: TB774

文献标识码: A

文章编号: 1673-1739 (2007) 04-0248-05

1 引言

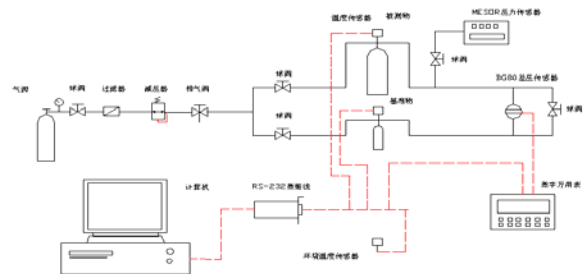
文章在差压检漏系统仿真试验研究^[1]的基础上, 通过搭建差压检漏系统试验平台, 研究在真实环境温度变化条件下非对称基准物与不同漏率的相同被测物的试验结果, 然后进一步研究在环境温度变化的条件下不同基准物对相同漏率被测物的试验结果, 同时研究差压检漏的温度补偿方法和数据处理方法, 为原理样机研发作试验与理论支持。

2 差压检漏系统随环境温度变化零漂试验

2.1 试验方案

试验过程分为充气、平衡、检测和排气 4 个阶段。充气阶段开启充气阀对被测物和基准物充到 0.2 MPa 的测试压力, 基准物和被测物选用同种材质的 2 L 和 40 L 气瓶。为了避免试验过程中对差压传感器冲击损坏, 充气 and 排气阶段应开启 BG 80 差压传感器旁路阀, 用 Mensor 压力计观测是否到达额定的测试压力。平衡阶段关闭控制充气阀, 保证被测物和基准物连通平衡。检测阶段关闭 BG 80 差压传感器旁路阀, 以 BG 80 差压检漏仪作为差压传感器采集、显示、输出信号的载体。在基准物和被测物的中间位置各放置一温度传感器, 通过电连接器连接 SWJ 高精度温度计,

用以测基准物和被测物内部气体的温度。以数字万用表作为绝对差压输出载体, 计算机通过 RS-232 数据线串口通讯实现对压力、温度的实时采集和存储。24 h 后, 根据记录数据分析一定测试压力下差压系统随环境温度变化的零漂。系统试验平台的结构如图 1 所示。



差压检漏系统零漂试验平台结构图

图 1 差压检漏系统零漂试验结构示意图

Fig. 1 The frame work of zero excursion experiment of pressure leak detection system

2.2 试验结果与讨论

通过试验测定环境温度为一直周期性的正弦信号, 周期大约为 1 800 s, 振幅为 1℃, 假设环境温度参数为: $T_a = 22 \pm \sin\left(\frac{1}{900} \cdot \pi \cdot t\right) \text{ } ^\circ\text{C}$, 分别对 2 L 和 40 L 气瓶输入相同条件的环境温度变化参数, 同时对气瓶设定相应物理参数, 用系统仿真计算其内部气体的温度在环境温度周期性变

收稿日期: 2006-12-20; 修回日期: 2007-02-08

作者简介: 喻新发 (1980-), 男, 硕士学位, 主要从事航天器总装检漏系统研究工作。联系电话: (010) 68747413。
闫荣鑫 (1964-), 男, 研究员, 中国真空学会质谱与检漏委员会主任委员。联系电话: (010) 68747418。

化的条件下的响应^[1], 如图 2 所示。可以看出: 2L 气瓶比 40 L 气瓶对环境温度响应快, 并且响应的振幅更大, 其根本原因是基准物的比热容小, 所以造成二者一定的温度差; 并且温度差相对二者的压力差有滞后效应, 滞后时间大约为 150 s; 不同基准物与被测物的滞后时间是不同的。

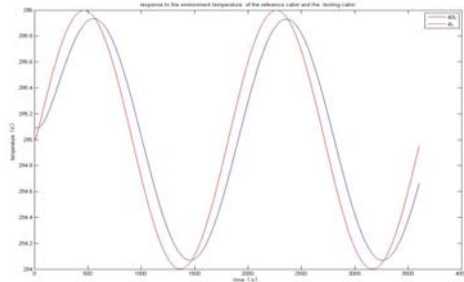


图 2 非对称基准物和被测物内部气体对周期性环境温度波动的计算响应曲线

Fig. 2 The temperature of non-symmetrical reference and the periodical temperature change inside test container

温度差相对于差压的滞后效应如图 3 所示, 因此差压的温度补偿采用一定的时间滞后补偿比同一时刻补偿更合理。从图 4 可以看出, 滞后补偿前的峰-谷最大值为 110 Pa, 滞后补偿后的峰-谷最大值为 70 Pa, 并且主要集中在 -50~0 Pa 之间。可以看出, 滞后温度补偿可以减小因环境温度波动引起的差压, 因此非对称基准物与被测物在都无泄漏的情况下因为环境温度的扰动产生差压的波动为系统零漂, 相同输入条件下的环境温度变化对二者温度影响不等且不同步, 大容积被测物相对于小容积基准物有一定的滞后效应同时温度差相对于差压有滞后效应, 滞后温度补偿可以减小差压波动的振幅。滞后补偿时间与环境温度信号和基准物与被测物的物理参数有关。

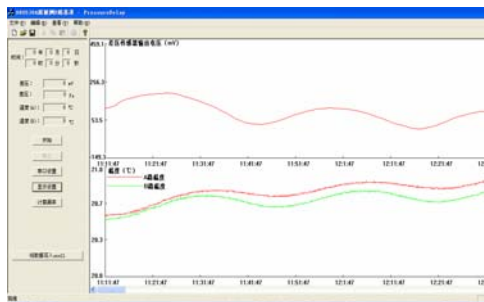


图 3 零漂差压试验实时曲线

Fig.3 The test curve of zero excursion experiment of differential pressure leak detection system

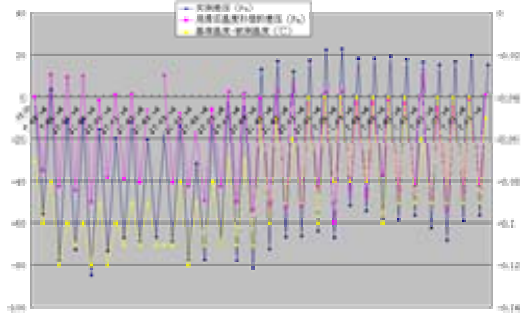


图 4 用滞后温度补偿转化的峰-谷曲线与原曲线比较
Fig.4 Comparison between the wave crest and trough curve with lag-temperature compensation and the primary curve

3 非对称基准物与被测物差压检漏系统试验研究

3.1 试验方案

由于检测回路不能做到两侧完全对称, 外界环境变化对被测物和基准物会造成非对称影响。为了减少环境变化对检漏结果的影响, 最大限度提高差压检漏的精度, 本试验采用高精度差压传感器测差压, 精度为 5 Pa; 采用高精度 SWJ 温度计进行测温, 精度为 0.03℃; 基准物与被测物内部各引一个温度传感器, 位置在气瓶的正中间位置, 用温度补偿模型^[1,2]对测试差压进行温度补偿。系统结构与零漂试验系统不同的是改变基准物大小, 同时增加一个标准漏孔。系统结构图如图 5 所示。

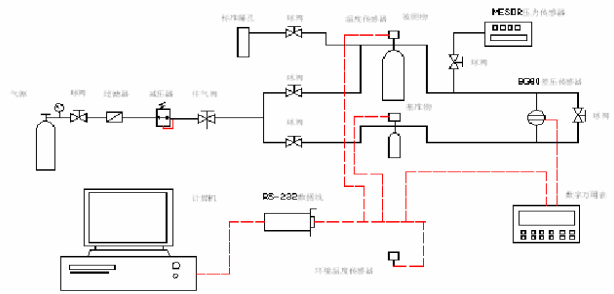


图 5 差压检漏系统试验平台结构图

Fig.5 The experimental frame work of differential pressure leak detection system

3.2 2L 基准物与不同漏率 40L 被测物的差压试验数据与分析

试验压力为 0.2 MPa, 基准物为 2 L 的气瓶, 被测物为 40 L 的气瓶, 标准漏孔的漏率分别为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 差压试验结果如图 6 所示。从图 6 可以看出: 漏率为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生的差压是

一明显的线性曲线；漏率为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生的差压是带有微小振荡的线性曲线；而漏率为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生差压是一斜率更小、振荡很大的近似线性曲线。以上现象的主要原因是由环境温度变化引起基准物和被测物的温度不等而产生的干扰覆盖了因泄漏产生的差压。因此应该尽量剔除环境温度变化产生的差压，提取因泄漏产生的差压。可以把环境温度看作随机干扰信号，而泄漏差压为真实信号，通过对差压试验数据温度补偿后进行最小二乘拟合获得因泄漏产生的差压信号。

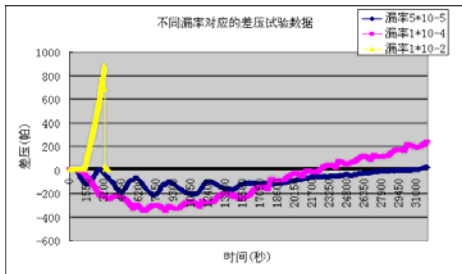


图 6 不同漏率对应的差压数据曲线
Fig. 6 The differential pressure curve for different leakage

温度补偿前与温度补偿后的试验数据比较如图 7 所示。温度补偿后数据进行最小二乘拟合后的曲线如图 8 所示。

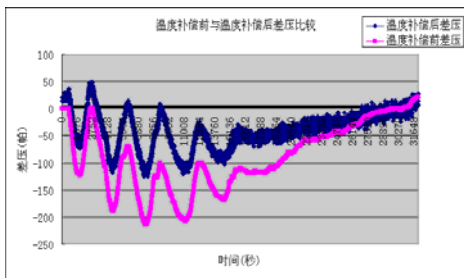


图 7 温度补偿前与温度补偿后试验数据比较。
Fig.7 The comparison between the data before and after temperature compensation

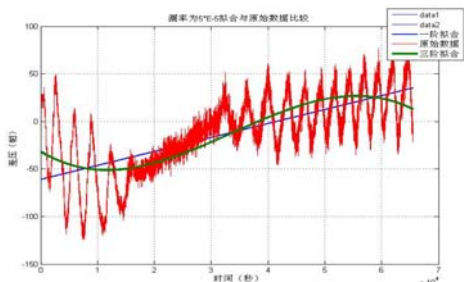


图 8 温度补偿后数据进行最小二乘拟合的曲线
Fig. 8 The differential pressure curve by least squares fitting method after temperature compensation

对于一阶拟合：
$$Q = \frac{\Delta p \times V}{\Delta t} = \frac{[35 - (-60)] \times 0.04}{65536} =$$

$5.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；对于三阶拟合：

$$Q = \frac{\Delta p \times V}{\Delta t} = \frac{[15 - (-30)] \times 0.04}{65536} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}.$$

由一阶拟合数据计算漏率产生的误差为 16%，由三阶拟合数据计算漏率产生的误差为 46%。因此一阶拟合数据计算漏率与理论漏率的误差较小（小于 20%）。综上所述，温度补偿后用最小二乘拟合的方法能消除由环境温度产生的随机干扰的影响；而且一阶拟合即线性补偿效果更好，误差更小。

3.3 不同容积基准物与相同漏率 40 L 被测物的试验数据及分析

基准物分别为 2L、4L 的气瓶，被测物为 40L 的气瓶接漏率为 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔，差压试验数据如图 9 所示。在同一环境中，不同容积的基准物与相同被测物的差压响应有明显的不同：4 L 基准物对应的差压波动比较小，振幅在 50 Pa 以内；而 2L 的振幅很大，超过了 80 Pa，二者都没有明显的线性。

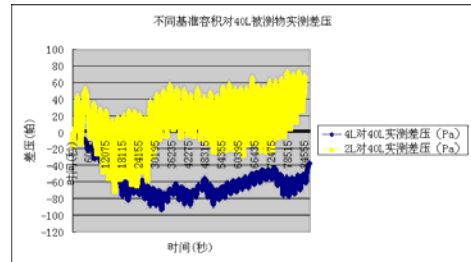
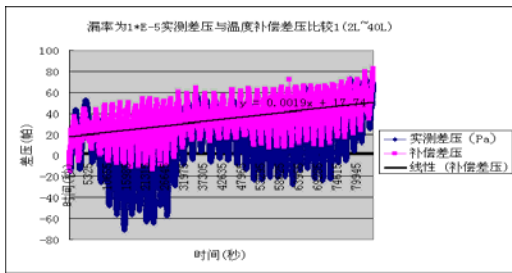
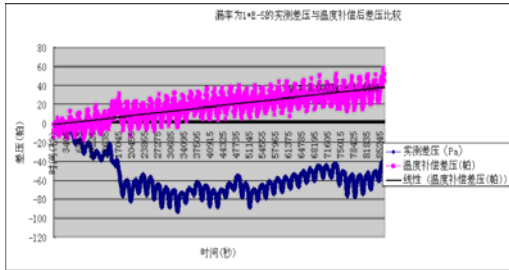


图 9 不同基准物与相同漏率被测物的试验数据比较
Fig.9 A comparison between different bases of references and the test specimen with identical leakage

2L、4L 基准物和 40L 被测物温度补偿后的差压曲线和线性补偿曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出，温度补偿后，无论是采用哪种基准容积都能得到线性很明显的差压曲线，线性补偿后二者的斜率基本相等，24h 的累积差压为 30Pa 左右。经过多次重复性试验，效果基本相同。线性补偿后二者的斜率在 0.001 9~0.002 3 范围内，线性补偿的误差对于 4L 基准物最大为 8 Pa，而对于 2L 基准物为 18 Pa。可见，基准容积与被测容积越接近，差压波动振幅越小，线性补偿误差越小。



(a)

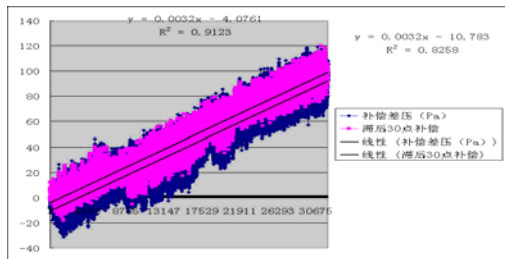


(b)

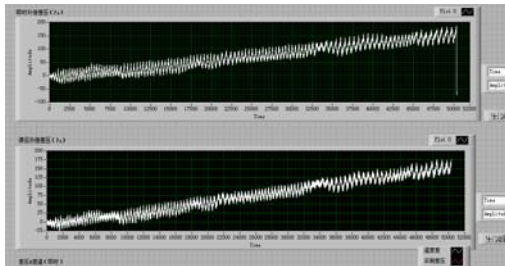
图 10 2 L 和 4 L 基准物与 40 L 被测物接同一标准漏孔的试验数据与线性补偿数据比较

Fig.10 A comparison between experimental curves with and without temperature compensation

图 11 所示的是 2 L 基准物与 40 L 被测物接 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 标准漏孔即时温度补偿和滞后温度补偿的试验数据比较, 可以看出二者的补偿效果基本相同, 斜率相等, 但标准差不同。



(a)



(b)

图 11 即时温度补偿与滞后温度补偿数据比较

Fig.11 A comparison between instant and lagged temperature compensation

即时温度补偿差压的标准差为 13.63 Pa, 滞后补偿的标准差为 9.36 Pa, 滞后温度补偿的标准差更小。用 LabView 软件对试验数据进行温度补偿也可以看出滞后温度补偿与即时温度补偿线性

相等, 但前者振幅更小。

3.4 1 L 基准物与 40 L 被测物引多测点温度补偿试验数据及分析

1 L 的基准物与 40 L 被测物引多测点温度补偿试验布置如图 12 所示。在 40 L 被测物内部引 4 个温度传感器, 在 1 L 基准物内部接 2 个温度传感器, 通过各点温度与多点平均温度进行温度补偿。在 40 L 气瓶中上区域放置 3 个传感器而在底部放置 1 个温度传感器, 其主要原因是地表大热容对气瓶底部的影响比较大, 底部区域与中上区域温度差比较大, 同时中上区域的温度差很小, 因此中上区域的温度占权重较大, 通过对中上部多布置温度测点计算其平均温度更能代表气体的真实温度。试验结果表明: 40 L 气瓶内部 4 点温度在 24 h 环境温度变化过程中差异较大; 而 1 L 气瓶中 2 点温度相差在 0.03℃ 范围内, 所以对基准物不进行多点温度补偿, 取 2 点温度平均值即可。

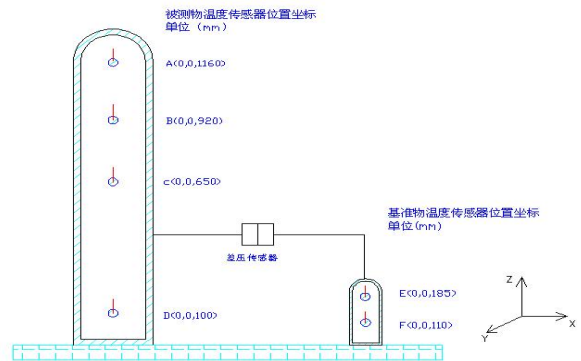


图 12 多温度测点差压检漏系统试验布置图

Fig.12 The frame work of differential pressure leak detection system with many temperature measurement points

由于系统连接温度传感器的电连接器本身的泄漏率及焊接受热不均产生材料疏松导致的泄漏, 系统有一定本底漏率, 通过氦质谱吸枪与标准漏孔比对, 40 L 气瓶电连接器的本底漏率为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 1 L 气瓶电连接器的本底漏率为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 24 h 不接标准漏孔的理论泄漏差压为 -165 Pa。通过 5 次重复性试验并进行温度补偿得到各点及平均温度的补偿差压如图 13 所示。从图 13 可以看出: 平均温度补偿的差压为 -175 Pa, 线性非常明显; A 点温度补偿的差压为 -195 Pa, 线性也很明显, 但连续性不好, 有突变现象; B 点补偿差压为 -190 Pa, 线性及连续

性与 A 点一样；C 点补偿差压为-185 Pa，线性比较好，但连续性不好；D 点补偿差压为-150 Pa，线性和连续性都比较差。从 5 次重复性的试验结果看，4 点平均温度补偿的效果比其他各点单独补偿的线性和连续性好，误差更小。

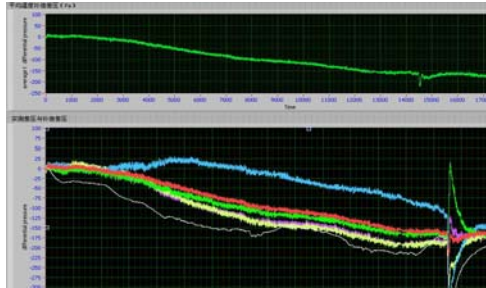


图 13 各点温度补偿与四点平均温度温度补偿差压比较之一

Fig.13 A comparisons between individual temperature compensation and average temperature compensation (case 1)

第二组试验在被测物上接一漏率为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔，24 h 理论泄漏差压为 -125 Pa，重复试验 6 次，其试验结果如图 14 所示。从图 14 可以看出，采用平均温度补偿的差压为 -120 Pa，其他各点补偿结果同不接漏孔时一样，误差大，且线性和连续性不如 4 点平均理想。

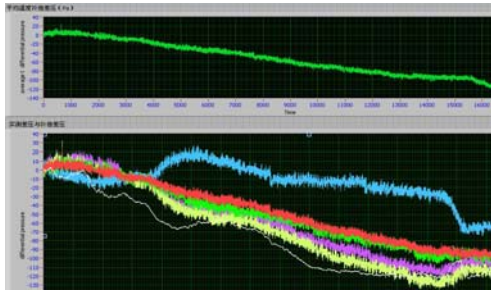
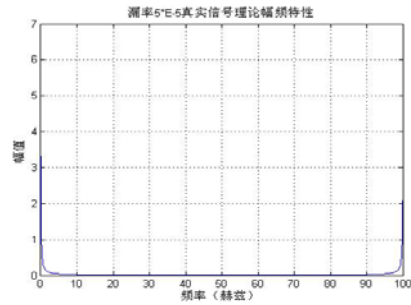


图 14 各点温度补偿与 4 点平均温度温度补偿差压比较之二

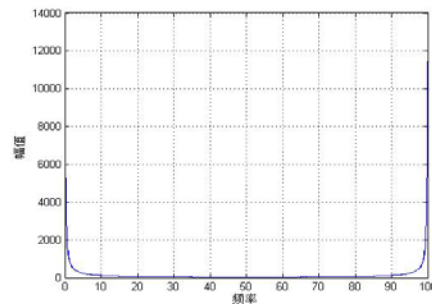
Fig.14 A comparisons between individual temperature compensation and average temperature compensation (case 2)

4 滤波和相关滤波的设想

滤波是由被测信号中提取感兴趣的那部分信号，滤除噪声信号和虚假信号。信号的特性包括时域分析和频域分析，测试信号中间往往有多种频率成分，为了对信号进行进一步的处理和分析，可以将有用的成分提取出来，而将其他频率成分衰减掉^[3]。对漏率为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的理论信号和实际测试信号进行了频谱分析，结果如图 15 所示。



(a)



(b)

图 15 漏率为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的理论信号和实际测试信号频谱图

Fig.15 The spectrum of the theoretical signal and the actual signal with the leak rate of $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

通过频谱图局部放大信号可以看出，理论信号的主要频谱集中在 $9.5 \times 10^{-5} \sim 0.05 \text{ Hz}$ 范围内，而环境温度干扰信号的频谱主要集中在 $7.5 \times 10^{-3} \sim 50 \text{ Hz}$ 范围内，且干扰信号的幅值远远高于理论信号，信噪比为 -30 dB 的信号难以用滤波的方法提取微弱信号，采取低通滤波的方法可以滤除一定频率的干扰信号，但对于重叠频率部分的有用信号也大量衰减。通过 FIR 低通滤波器后得到的信号不能有效消除干扰信号的影响，但可以对温度差信号和差压信号作有效平滑处理，使用温度滞后补偿方法选择波峰与波谷点更精确。

相关函数描述随机信号在不同时刻瞬时值之间的关联程度：自相关函数描述同一样本在不同瞬时值之间的依赖关系，可以用自相关函数来检测随机信号中是否包含有周期信号成分；互相关函数描述两个随机信号在不同瞬时值幅值之间的相关性，是波形相似性的度量。可以以基准物和被测物的差温及差压信号为相关输入量，它们只有时间上的延迟，而变化的频率基本相同，因此可以提取干扰信号，同时可以检测差压与差温的延迟时间。

5 结论

(1) 非对称基准物与被测物在均无泄漏的情况下, 由于环境温度的干扰而产生差压的波动, 此为系统零漂。相同输入条件下的环境温度变化对二者温度影响不等且不同步, 大容积被测物相对于小容积基准物有一定的滞后效应, 即产生温度差相对于差压的滞后效应, 通过滞后温度补偿可以减小差压波动的振幅。

(2) 漏率为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生的差压是一明显的线性曲线; 漏率为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生的差压是带有微小振荡的线性曲线; 而漏率为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生差压是一斜率更小、振荡很大的近似线性曲线。

(3) 对于低漏率如 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准漏孔产生差压用滞后温度补偿后进行最小二乘拟合可以消除环境温度产生的干扰, 能提取有用差压信号, 同时用线性补偿产生的效果更好, 误差更小。

(4) 不同容积的基准物与相同漏率的被测物差压曲线在温度补偿前不呈线性, 温度补偿后都

能获得明显的线性, 并且在截距为零的情况下线性基本相同, 但与被测容积更接近的基准容积的标准差更小、误差更小。

(5) 滞后温度补偿与即时温度补偿获得的线性基本相同, 但滞后温度补偿比即时温度补偿产生的标准差更小、误差更小。

(6) 多点平均温度补偿比单点温度补偿的线性和连续性更好, 误差更小。

参考文献 (References)

- [1] 喻新发, 闫荣鑫, 孟冬辉. 差压检漏系统仿真试验研究[J]. 航天器环境工程, 2006(5):297-301 [Yu Xinfu, Yan Rongxin, Meng Donghui. Simulation experiment of differential pressure leak detection system[J]. Spacecraft Environment Engineering. 2006(5): 297-301]
- [2] 肖祥正. 环境温度对压降法漏率测试的影响[J]. 真空与低温, 2002(3) [Xiao Xiangzheng. The effect on total leakage measurement using the pressure decrease method because of environmental temperature[J]. Vacuum and Cryogenics . 2002(3)]
- [3] 李强, 赵伟. MATLAB 数据处理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001 [Li Qiang, Zhao Wei. Data processing and application by MATLAB[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001]