并联接入式气体泄漏量的测量方法

黄 亮 蔡茂林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 并联接入式流量测量方法与串联式测量方法相比,接入简单,装卸不需要破坏管道. 引入基准流量,根据基准流量发生前后压缩气体的压力变化率可以求解泄漏流量;采用基于非线性微分跟踪器的滤波方法对压力信号滤波,有效消除了噪声的影响. 实验结果表明:并连接入式的测量方法测量精度可达到满量程3%,重复精度可达满量程3%,适用于气动节能工业.

关 键 词: 气体流量; 跟踪; 泄漏量; 流量测量

中图分类号: TH 701

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0799-05

Parallel access leakage flow rate measurement of compressed air

Huang Liang Cai Maolin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An instantaneous method for measuring leakage flow rate was proposed by employing a standard flow. Measuring equipment was connected to the pipeline, which promised the convenience and non-destruction. Standard flow was used to determine the internal volume of measured equipment. And a nonlinear discrete-time tracking differentiator had been designed to track the differential pressure. Furthermore, an algorithm was formulated to describe, the relationship between leakage and standard flow rate. The method deviates from the theoretical leakage values by less than 3% full scale (FS), and shows a good precision and scope compared with traditional flow measurements. In addition, the proposed parallel connection based on standard flow makes operation easy and measuring fast possibly, thus the method can be applied in the new area of pneumatic energy saving industry.

Key words: flow rate; tracking; leakage; flow measurement

在气动节能工业,流量计量是一项关键的技术,目前在工业现场使用的涡街、孔板和热式流量计都属于串联接入式流量计,使用时需要破坏用气管路,安装拆卸复杂,不适合在节能工业诊断现场使用. 并联接入式流量测量方法最大的优点是接入简单,装卸方便.

超声波流量计通过测量超声波管路中传播的时间频率特性可以计算管路气体的流量[1-5],虽然有些高频大功率探头可以并联安装在管路两端,但是价格昂贵,不适用于工业现场. 文献[6-7]提出通过超声波和红外线来计算气体泄漏量的方法,但是精度受测量距离的制约. 文献[8-9]提出了一种利用等温容器的差压法测量气体的泄漏,但是需要测量被测设备的容积,不适用于实际工业现场. 压力的测量受到管路的粗糙度、管路气压的波动以及随机测量误差的影响,文献[10-11]提到的线性微分跟踪器(TD, Tracking Differentiator)可以实现任意信号的跟踪和滤波,但是收敛速度较慢,算法稍显复杂.

本文的研究目的是设计并联接入式的气体泄

收稿日期: 2011-03-24; **网络出版时间**: 2012-06-15 15:43

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1543.026.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(57045004); 高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20070006041)

作者简介: 黄 亮(1980),男,湖北通城人,博士生,huang1liang2@gmail.coml.

漏量测量方法. 为了消除容积的影响,引入了基准流量,根据基准流量发生前后的压力变化率计算泄漏流量. 在压力信号的滤波处理中设计了一种快速非线性跟踪微分器(NTD, Nonlinear Tracking Differentiator),该方法具有较强的跟踪和滤波能力.

1 测量原理

本文阐述的泄漏测量方法主要是根据气体压力的变化率来求解流量. 据理想气体状态方程,可以得到泄漏发生时被测设备容腔内部的气体压力微分方程为

$$V\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = GR\theta + mR\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中,G 为质量流量;θ 为气体的温度;P 为气体的压力;R 为理想气体状态常数,等于 287 J/(kg·s);V 为被测容腔的体积.

由于泄漏孔的尺寸远小于容腔直径,因此可以把泄漏过程中容腔内气体的每一个变化状态看作准静态,尽管空气进出控制体,但容腔内原有的空气可以考虑成一个封闭的质量系统,它的状态可以表示为

$$P\theta^{\frac{n-1}{n}} = 常数 \tag{2}$$

对式(2)进行微分,可得

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{1-n}{n}\frac{\theta}{P}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中,n 为多变指数,等温过程时 $n=1$,绝热过程时,$n=\kappa=1.4$.

由于存在热交换,n 在实际泄漏过程中不断变化. 为了简化计算,在设计的误差范围内,泄漏过程中 n 按常数 κ 来处理,式(1)改写为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \kappa\frac{GR\theta}{V} \tag{4}$$

根据节流口的流量特性参数,泄漏处的流量为

$$G = \begin{cases} CP\rho_0\sqrt{\dfrac{\theta_0}{\theta}} & \dfrac{P_a}{P} \leqslant b \\ CP\rho_0\sqrt{\dfrac{\theta_0}{\theta}}\sqrt{1-\left(\dfrac{P_a/P-b}{1-b}\right)^2} & 1 \geqslant \dfrac{P_a}{P} > b \end{cases} \tag{5}$$

式中,C 为声速流导 $\mathrm{dm^3/(s\cdot bar)}$;$b$ 为临界压力比,即元件内达到声速时,下游管道内静压力与上游管道内静压力之比,对于一般气动元器件 b 通常等于 0.2 ~ 0.5;泄漏孔下游压力 P_a 为大气压;θ_0,ρ_0 分别为室温和室温下空气的密度.

在保证测量压力满足 $P_a/P \leqslant b$ 的前提下,式(4)可改写为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\kappa C_1 R P_1 \rho_0}{V}\sqrt{\theta_0\theta} \tag{6}$$

式中,C_1 为泄漏孔的声速流导.

需要指出的是,测量过程中是根据压力的变化来判断测量的起止时刻,由于整个测量过程的压强损失只有 20 kPa,远小于 P,将泄漏过程看作绝热变化过程,气体温度根据式(2)得

$$\theta = \theta_0 P_0^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \Big/ P^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \tag{7}$$

根据式(6)和式(7)可以得到泄漏过程的气体压力微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\kappa C_1 R\theta_0\rho_0}{V}P_0^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}}P^{\frac{3\kappa-1}{2\kappa}} \tag{8}$$

如果 V 已知,根据压力的变化率可以求出气体的泄漏量. 为了消除未知的体积的影响,设计中引入了一段基准流量,基准流量产生之后,管路中的压力为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\kappa(C_1+C_s)R\theta_0\rho_0}{V}P_0^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}}P^{\frac{3\kappa-1}{2\kappa}} \tag{9}$$

式中,C_s 为基准流量发生装置的声速流导. 联立式(8)和式(9),可以求得泄漏量为

$$Q_1 = RPC_s\left[\left(\frac{P_{SEnd}^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}} - P_{SBgn}^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}}}{P_{1End}^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}} - P_{1Bgn}^{\frac{1-\kappa}{2\kappa}}}\right)\frac{t_1}{t_s} - 1\right]^{-1} \tag{10}$$

式中,P_{1Bgn} 为泄漏产生后测量初始时刻的压力;P_{1End} 为测量终止时刻的压力;t_1 为泄漏时间;P_{SEnd} 为基准流量发生后测量初始时刻的压力;P_{SEnd} 为基准流量发生后测量终止时刻的压力;t_s 为基准流量持续的时间.

泄漏测量原理如图 1 所示,3 个电磁阀控制直径分别为 1,2 和 3 mm 的基准孔,产生不同的基准流量来匹配实际泄漏,V 为 10 L 的气罐用来模拟实际被测设备,电磁阀的最大工作压力为 1.0 MPa,泄漏流量的大小由调速阀控制,在室温、压力为 500 kPa 状态下,调速阀的最大流量为

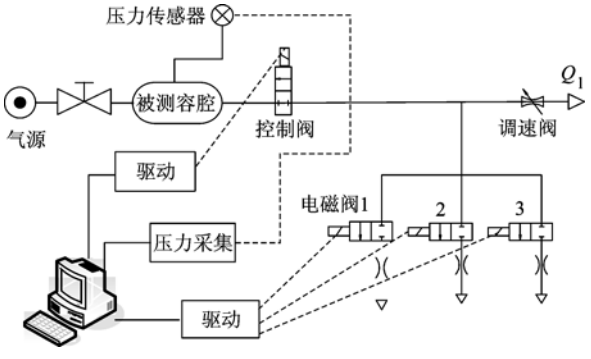


图 1 测量系统原理图

1 000 L/min(ANR, Atomosphere Normale de Reference),ANR 表示基准状态,此时温度为 20℃,大气压力 100 kPa,ρ_0 为 1.185 kg/m^3. 压力传感器测量范围为 0 ~ 1 MPa,测量精度为 0.2% FS(Full Scale),采样频率为 1 kHz. 整个测量过程操作步骤如下:

1) 打开供气阀门为测量管路供气,直到管路中的压力不再变化;

2) 关断供气阀门,停止供气,记录泄漏产生后测量起止时刻的管路压力与测量时间:P_{lBgn},P_{lEnd}和 t_{l};

3) 打开基准流量,记录基准流量与泄漏同时发生后测量起止时刻的管路压力与测量时间:P_{SBgn},P_{SEnd}和 t_{s};

4) 求解 Q_{L}.

2　压力信号滤波

测量过程中由于噪声的干扰,压力信号在局部范围波动,影响测量重复精度. 图 2 显示了泄漏测量过程气体压力的特征,基准流量产生前后,管路中的压力变化速率变化明显,实验中的 Q_{l} 在 0.5 MPa 下分别为 50 和 150 L/min (ANR). 表 1 统计了未经滤波处理得到的测量结果,数据表明在 50 L/min 的基准流量下,测量的重复误差达到了 8% FS,超过了 3% FS 的设计标准.

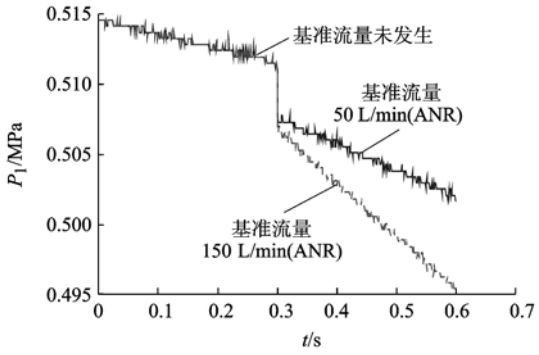


图 2　基准流量发生前后的压力曲线

表 1　泄漏测量结果　　L/min(ANR)

基准流量	实际泄漏	1#测量值	2#测量值	3#测量值	4#测量值	5#测量值	6#测量值
50	50	51.3	48.1	52.4	51.7	54.1	47.5
150	50	49.7	52.3	51.4	52.6	51.4	48.4

为了提高测量的重复精度,设计中采用跟踪微分器对压力信号进行滤波. TD 动态系统:对其输入一个信号 $v(t)$,给出两个输出信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$,其中 $x_1(t)$ 跟踪输入信号 $v(t)$,而 $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的微分.

NTD 在保持 TD 响应快速的前提下,有效的减小了颤振现象,为设计跟踪微分器算法,引出定理.

定理 1

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_1R^2\{[\beta(x_1-v)]^{p/q}+x_1-v\}- \\ &\quad a_1R^2[(\beta x_2/R)^{p/q}-x_2/R] \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

如果 $R>0, a_1>0, a_2>0, \beta>1$,并且 $p>q>0$,p 和 q 为奇数,则系统在原点是渐进稳定的.

证明　构造李雅普诺夫函数:

$$V(x_1-v,x_2)=\frac{a_1q}{p+q}\beta^{p/q}(x_1-v)^{(p+q)/q}+\frac{1}{2}a_1(x_1-v)^2+\frac{1}{2}x_2^2>0$$

对该函数求导,并代入式(11)的微分解,满足:

$$\begin{aligned} &\dot{V}(x_1-v,x_2)= \\ &a_1\beta^{p/q}(x_1-v)^{p/q}\dot{x}_1+a_1(x_1-v)\dot{x}_1+x_2\dot{x}_2= \\ &\quad -a_1\beta^{p/q}x_2^{(p+q)/q}-a_2x_2^2\leqslant 0 \end{aligned} \tag{12}$$

如果 $\dot{V}(x_1-v,x_2)\equiv 0$,由式(12)得 $x_2\equiv 0$,代入式(11)得 $x_1-v\equiv 0$. 所以只有在平衡点 $V(0,0)$ 处,李雅普诺夫函数导数才为 0,即式(11)只在(0,0)处是渐进稳定的.　　**证毕**

当 $R>0, a_1>0, a_2>0, \beta>1, p>q>0$,且 p 和 q 为奇数,该跟踪器可以在有限时间内跟踪任意输入信号,即 $\forall T>0, v(t)\in L[0,\infty]$,$\lim\limits_{R\to\infty}\int_0^T|x_1(t)-v(t))|\,\mathrm{d}t=0$.

与 TD 相比,NTD 采用了线性与非线性工作区域自动切换的模式,算法形式简单,易于实现,在跟踪误差较大时,采用非线性环节,以加快趋向平衡点的速度;而在误差较小时,为避免发生颤振现象,采用线性环节.

根据式(11)可以发现,当 $|\beta x|>1$ 时,由于 $p>q$,非线性环节在系统中起主导作用,式(11)可以简化为

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x \\ \dot{x}_2 &= -a_1\{[\beta(x_1-v)]^{p/q}\}-a_2[(\beta x_2)^{p/q}] \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

同理,当 $|\beta x|<1$ 时,线性环节在系统中起主导作用,式(13)可以简化为

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_1(x_1-v)-a_2x_2 \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

改进型跟踪微分器中,一般可取 $a_1>1$,$a_2>1$,$p/q\geqslant 9$,$\beta\geqslant 1$,β 的改变可以控制线性区间的大小,增大 R,可以加快跟踪速度,同时也会放大噪

声,参数的具体选择可以根据过渡过程要求进行. 设计中压力跟踪微分器采样频率为 1 kHz,相关参数分别取值为 $a_1=4$, $a_2=2$, $p=9$, $q=3$, $R=4$, $\beta=1$.

3 实验结果与分析

图 3 给出了标定实验原理,在室温和压力为 0.5 MPa 的条件下,用 3 个标准孔作为泄漏源,Q_1 的实际值分别为 10,50 和 200 L/min(ANR),标定所用的流量计采用 ALBORG GFM47 系列热式流量计,其测量精度为 1% FS,V 为 10 L,泄漏测量装置并联接入设备管路. 测试系统的采样频率为 1 kHz. 标定流程分 3 个步骤:

1) 打开气源供气,导通 1#泄漏孔,在上游压力稳定时读取并记录标定流量计的读数;

2) 打开测量仪器,待容器压力稳定后,关断供气阀门,记录测量仪器的读数;

3) 重复步骤 1)和 2),分别导通 2#和 3#泄漏孔,记录流量计与测量仪器的读数.

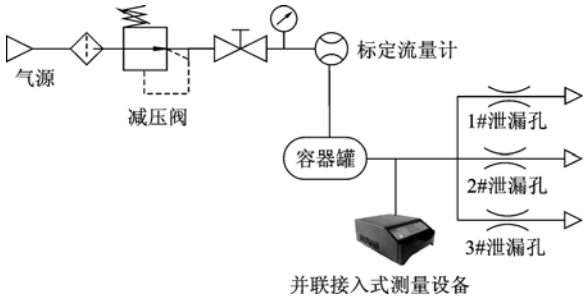


图 3 标定实验原理图

为了验证滤波效果,对 50 L/min(ANR)泄漏孔,设计中采用 50 和 150 L/min(ANR)的基准流量进行测量,基准流量通过 ALBORG GFM 系列热式流量计在 0.5 MPa 的压力下标定,流量误差分别为 0.5 和 1 L/min. 图 4 和图 5 的压力曲线表明基准流量产生后,压力变化速率更快. 表 2 统计了原始压力信号和经过卡尔曼滤波以及 TD 和 NTD 滤波处理后各自的方差,计算结果表明 NTD 滤波效果最明显,NTD 处理后的信号方差为处理前的 3% ~5%. 表 3 统计了在 0.5 MPa 的压力下,不同泄漏量的测量结果,结果表明该测量方法的精度达到了设计要求.

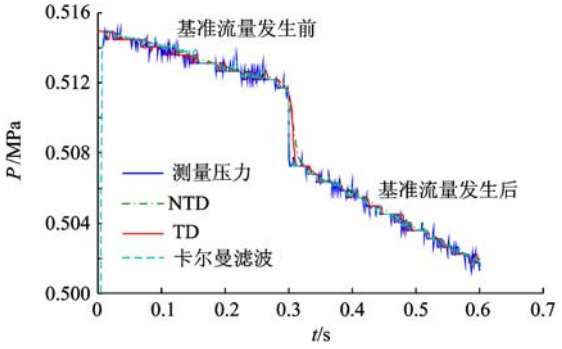


图 4 基准流量为 50L/min(ANR)时 P 曲线

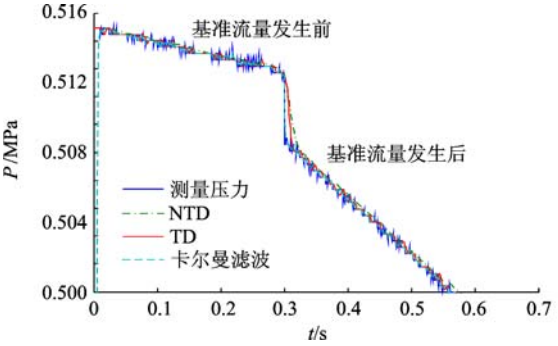


图 5 基准流量为 150 L/min(ANR)时 P 曲线

表 2 压力测量结果的方差 kPa

基准流量/(L·min^{-1})	P	卡尔曼滤波	TD	NTD
50	7.704	2.243	0.71	0.04
150	7.267	2.03	0.78	0.02

表 3 Q_1 测量结果 L/min(ANR);0.5 MPa

Q_1 实际值	基准流量	Q_1 测量值	相对误差/%
10	20	9.8	3
20	50	20.5	2.5
40	50	41.2	3
50	50	50.9	1.8
100	150	102.4	2.4

4 结 论

研究表明:基于基准流量的并联接入式测量方法能有效地测量气体的泄漏量,主要结论有:①本文设计了一种适用于声速流动状态下的泄漏量测量方法,为了保证测量精度,规定测量点的绝对压力通常不低于 0.4 MPa;②导入基准流量,可以消除未知的体积的影响,为并联接入式的测量方法提供了理论依据;③采用改进的非线性跟踪微分算法能快速跟踪压力信号,并且具有良好的滤波效果;④本文设计的测量方法测量精度可达 3% FS.

参考文献 (References)

[1] Raišutis R. Investigation of the flow velocity profile in a metering section of an invasive ultrasonic flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(4): 201 – 206

[2] Zhang Hongjian, Huang Yongmei, Sun Zhiqiang. A study of mass flow rate measurement based on the vortex shedding principle [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006 17(1): 29 – 38

[3] Clark C, Cheesewright R, Wang Shiwen. Prediction of the dynamic performance of fast response Coriolis meter systems[J]. IEEE

Transaction on Instrumentation and Measurement,2008,57(1):95 – 99

[4] Sahu O P,Anil K. Measurement of distance and medium velocity using frequency-modulated ultrasound[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement,2008,57(4):838 – 842

[5] Dharshanie V M,Roger C B,Jim W. Further studies of the accuracy of clamp-on transit-time ultrasonic flow meters for liquids [J]. IEEE Transaction of Instrumentation and Measurement, 2009,58(4):1602 – 1609

[6] 江洋,龚其春,叶骞,等. 气体泄漏量超声检测理论分析及实验[J]. 上海交通大学学报,2006,40(2):224 – 226
Jiang Yang,Gong Qichun,Ye Qian,et al. The theory analysis and experiments of using ultrasonic to inspect the leak amount [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2006,40(2):224 – 226 (in Chinese)

[7] 葛楠,彭光正,纪春华. 气体泄漏传热模型及其有限元分析[J]. 传感技术学报,2008,21(12):2005 – 2008
Ge Nan,Peng Guangzheng,Ji Chunhua. Heat transfer method of air leak and its finite element analysis [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2008,21(12):2005 – 2008 (in Chinese)

[8] Povey T,Beard P F. A novel experimental technique for accurate mass flow rate measurement [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2008,19(5):251 – 259

[9] Kawashima K,Kagawa T,Fujita T. Instantaneous flow rate measurement of idea gases [J]. Journal of Dynamic Systems,Measurement and Control,2000,122 (1):174 – 178

[10] Bascetta L,Magnani G. Velocity estimation:assessing the performance of non-model based techniques [J]. IEEE Transaction on Control System Technology,2009,17(2):424 – 433

[11] Su Y X,Zheng C H,Mueller P C,et al. A simple improved velocity estiamtion for low-speed regions based on position measurements only[J]. IEEE Transaction on Control System Technology,2006,14(5):937 – 942

(编　辑:刘登敏)

(上接第 798 页)

[2] Ikki S S,Ahmed M H. Performance analysis of adaptive decode-and-forward cooperative diversity networks with best-relay selection[J]. IEEE Transactions on Communications,2010,58(1):68 – 72

[3] Badia L,Levorato M,Librino F,et al. Cooperation techniques for wireless systems from a networking perspective[J]. IEEE Wireless Communications,2010,17(2):89 – 96

[4] Li Jiangyuan,Petropulu A P,Poor H V. Cooperative transmission for relay networks based on second-order statistics of channel state information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011,59(3):1280 – 1291

[5] Shi Jin,McKay M R,Zhong Caijun,et al. Ergodic capacity analysis of amplify-and-forward MIMO dual-hop systems [J]. IEEE Transactions on Information Thory,2010,56(5):2204 – 2224

[6] Tsai Yuh-Ren,Lin Li-Cheng. Optimal power allocation for decode-and-forward cooperative diversity under an outage performance constraint [J]. IEEE Communications Letters,2010,14 (10):945 – 947

[7] Savazzi S,Spagnolini U. Energy aware power allocation strategies for multihop-cooperative transmission schemes [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2007,25(2):318 – 327

[8] Mahinthan V,Lin Cai,Mark J W,et al. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative-diversity systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2008,57(1):511 – 520

[9] Goldsmith A. Wireless communications[M]. Cambridge,UK:Cambridge University Press,2005

[10] Annavajjala R,Cosman P C,Milstein L B. Statistical channel knowledge-based optimum power allocation for relaying protocolsin the high SNR regime[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2007,25(2):292 – 305

(编　辑:娄　嘉)