

引压管路对动态差压检测影响的分析^{*}

劳力云

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

陈 珙 张宏建 李海青

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室,杭州 310027)

摘要 本文应用流体阻抗法的有关理论,分析了动态差压检测系统中引压管路的相关参数对测量动态特性的影响。理论分析和有关实验结果表明:检测系统的固有频率主要决定于两引压管路的基本频率,当引压管路终端腔体很小时,该频率反比于管路的长度。由于实际中存在两引压管路的不一致,两引压管入口端压力之和的脉动将影响差压检测(表现为压力脉动影响系数)而产生一定的动态误差。

关键词: 动态差压 检测系统 流体阻抗法

1 引言

差压检测技术广泛应用于流量测量、液压控制系统及流体力学研究等领域。当需要测量流动系统中差压瞬态变化过程时,由于瞬态差压信号往往包含有从低频到高频各种谐波,为了尽可能不失真地测出这些信号,就必须考虑差压检测系统的动态响应特性。一般而言,检测系统频率响应特性越高,则产生的动态误差就越小。检测系统的动态响应特性又主要决定于检测系统的固有频率。该固有频率除了与传感器中的敏感元件(如膜片、压电元件等)以及测量电路的动态响应特性有关外,很大程度上还与引压管路有关。实践证明,引压管路的动态响应常常成为整个差压检测系统动态响应特性的决定性因素^[1,2]。这一点与文献^[2]所提出的引压管路对压力传感器动态特性的影响相似。然而,由于差压检测系统分别存在有两个取压管路,因而又有其特殊性。本文应用流体阻抗法的有关原理,重点研究了引压管路系统对动态差压测量的影响。

2 差压检测系统的结构及固有频率

一般差压检测系统的整体结构根据信号的传递路径可大致分为引压管路、敏感元件以及变换/显示电路三大部分,如图1所示。

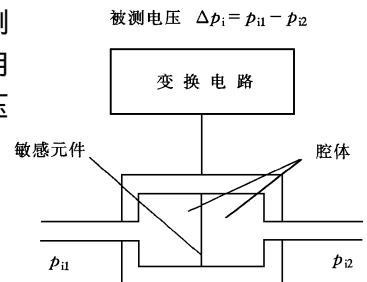


图1 差压检测系统的构成

本文于 1998 - 05 - 04 收到,1999 - 04 - 05 修改定稿。

^{*} 工业控制技术国家重点实验室开放基金资助项目。

2.1 差压引压管路的动态特性分析

差压传感器的引压管路一般由两部分构成,分别引入压力 p_{i1} 和 p_{i2} 。每部分又由引压管和腔室两部分构成。如图 2(a) 所示。

根据流体阻抗法的有关理论,这种形式管路的直管段可以看成由一系列无限小长度 x 的集中参数线路模型组成,如图 2(b) 所示^[1,3,4]。

设 x 处的压力和流量分别为 $p(x)$ 和 $q(x)$,且在 $x + x$ 处,压力和流量分别为 $p(x + x)$ 和 $q(x + x)$,则有:

$$\begin{cases} p(x + x) = p(x) + \frac{\partial p}{\partial x} x \\ q(x + x) = q(x) + \frac{\partial q}{\partial x} x \end{cases} \quad (1)$$

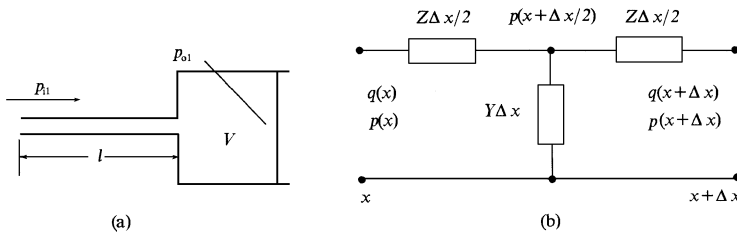


图 2 引压管路结构及其阻抗模型

同时根据网络的回路定律和节点定律有:

$$\begin{cases} p(x) - p\left(x + \frac{1}{2} x\right) = q(x) \cdot Z \cdot \frac{x}{2} \\ q(x) - q\left(x + \frac{1}{2} x\right) = p\left(x + \frac{1}{2} x\right) \cdot Y \cdot x \end{cases} \quad (2)$$

式中 Z 和 Y 分别为单位管长的串联阻抗和并联导纳。

综合(1)、(2)式,并令 $x \rightarrow 0$,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = q(x) \cdot Z \\ \frac{\partial q}{\partial x} = - p(x) \cdot Y \end{cases} \quad (3)$$

解此方程,可得:

$$\begin{cases} p = A_1 e^{-x} + A_2 e^{x} \\ q = \frac{A_1}{Z_c} e^{-x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{x} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\gamma = \sqrt{ZY}$ 为直管段单位长度的传播常数, $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ 为管路的特性阻抗, A_1, A_2 为由边界条件决定的常数。对长度为 l 的直管段,设其输入正弦脉动压力和流量分别为 p_i 和 q_i ,输出正弦脉动压力和流量分别为 p_o 和 q_o ,其终端导纳为 Y_l ,则可得:

$$p_o = \frac{1}{\cosh \gamma l + Y_l Z_c \sinh \gamma l} p_i \quad (5)$$

差压传感器所测量的差压为入口处的压力差 $p_i = p_{i1} - p_{i2}$,而传至敏感元件处的差压为 $p_o = p_{o1} - p_{o2}$ 。一般差压传感器的两引压管的材料和管径是一致的,因而具有相同的特性阻抗和传播常数。

$$p_o = p_{o1} - p_{o2} = \frac{p_{i1}}{\cosh l_1 + Y_{l1} Z_c \sinh l_1} - \frac{p_{i2}}{\cosh l_2 + Y_{l2} Z_c \sinh l_2} \quad (6)$$

式中 l_1 和 l_2 、 p_{i1} 和 p_{i2} 及 Y_{l1} 和 Y_{l2} 分别为两引压管的长度、入口处压力和终端导纳。又设 $l_0 = (l_1 + l_2)/2$, $p_{i0} = (p_{i1} + p_{i2})/2$, $Y_{l0} = (Y_{l1} + Y_{l2})/2$, 代入式(6), 当 $l \ll l_0$, $Y_l \ll Y_{l0}$ 时, 进行一阶级数展开可得:

$$p_o = \frac{p_i}{\cosh l_0 + Y_{l0} Z_c \sinh l_0} \quad (7)$$

$$(p_{i1} + p_{i2}) \cdot \frac{(Z_c \sinh l_0) Y_l + (\sinh l_0 + Y_{l0} Z_c \cosh l_0) l}{(\cosh l_0 + Y_{l0} Z_c \sinh l_0)^2} \quad (8)$$

对于(6)、(7)两式, 有以下两种情况:

(1) 若两引压系统的管长及相应腔体完全一致时, $l_1 = l_2 = l_0$, $Y_{l1} = Y_{l2} = Y_{l0}$ 。此时 $= 0$, 说明在一定的频率下, 差压传感器的膜片感受压力与被测差压呈线性关系。当终端为闭合管路且腔体小到与管路体积相比可以忽略时, $Y_{l0} = 0$, 则

$$p_o = \frac{p_i}{\cosh l} \quad (9)$$

其无阻尼固有频率由 $\cosh l_0$ 决定。此时, $l_0 = j(\omega/c)$, ω 为差压信号角频率, c 为引压管中介质的声速^[1,3], $\cosh l_0 = \cos(\omega/c)$, 谐振发生的条件为 $\cosh l_0 = 0$, 即 $\cos(\omega/c) = 0$ 。因此各阶固有角频率 满足:

$$= (2n + 1) \frac{c}{2l_0}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

当 $n=0$ 时, 其基本角频率(即最低固有角频率) $\omega_0 = c/(2l_0)$ 。

而当终端为体积 V 的腔体时, 终端导纳 $Y_{l0} = j\omega V/c^2$, 其中 ρ 为腔体内介质密度, 此时

$$p_o = \frac{p_i}{\cosh l_0 + Y_{l0} Z_c \sinh l_0} \quad (11)$$

其无阻尼固有角频率由上式中分母为 0 的情况得到, 此时 $Z_c = j\omega/cA$, A 为引压管的截面积^[1], $\sinh l_0 = -j\sin(\omega/c)$ 。

谐振发生的条件为:

$$\tan(\omega/c) = \frac{cA}{V} \quad (12)$$

特别地, 当 $(\omega/c) \ll 1$ 时, 因 $\tan(\omega/c) \approx (\omega/c)$, 从而其基本角频率为:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{A}{Vl_0}} \quad (13)$$

上式说明, 当腔体有一定体积不能忽略时, 为提高固有角频率应设法缩短管路并增加其截面积。

(2) 若引压系统的管长及相应腔体不完全一致时, 则差压测量将存在有绝对误差 如式(8)所示。令压力脉动影响系数

$$K_p = \frac{(Z_c \sinh l_0) Y_l + (\sinh l_0 + Y_{l0} Z_c \cosh l_0) l}{(\cosh l_0 + Y_{l0} Z_c \sinh l_0)^2} \quad (14)$$

除非 $p_{i1} + p_{i2}$ 成为一恒定压力, 此时 $\omega = 0$, $K_p|_{\omega=0} = 0$ 。因而将使 $\omega = 0$ 而不引入误差, 否则

将与 $p_{i1} + p_{i2}$ 的脉动幅度呈正比关系,如式(8)所示。尤其当该幅度较大时,引入的差压误差是相当可观的。这一结论的物理意义也是明显的:设两入口处为完全相同的压力脉动信号,即 $p_i = 0$,但由于两引压管路不匹配,导致在入口处相同的压力信号到达传感器膜片时有相位差异而产生附加差压,压力波动越大,则该附加差压也就越大。图 3 给出了 $l_0 = 0.34\text{m}$ 、 $l = 0.01\text{m}$ 、 $V = 0$ 、压力腔内为空气介质时 K_p 随压力脉动角频率变化的曲线。由图可见,当脉动角频率 低于管路的基本频率时, K_p 随 的增加而显著上升。说明脉动压力引入的差压测量误差也将随之增大。

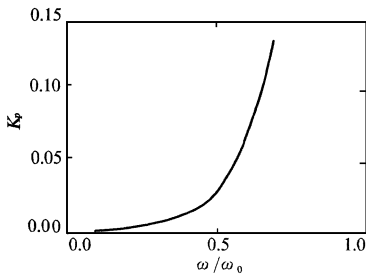


图 3 K_p 和压力脉动角频率之间的关系

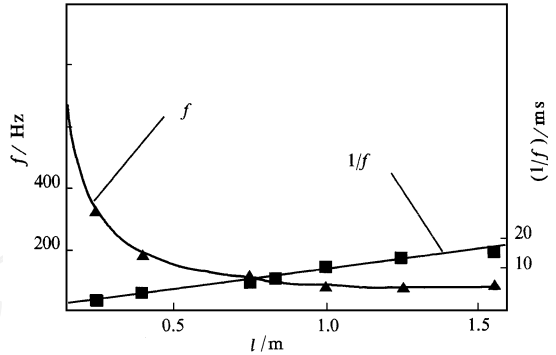


图 4 引压管长度 l 和频率 f 及 $1/f$ 的关系曲线

2.2 敏感元件的固有频率分析

差压传感器的敏感元件由于存在着一定的质量和刚度,因而有其自身的谐振频率。下面以常见的周边固支圆形膜片为例作一分析。

设膜片的半径为 R ,厚度为 h ,膜片材料的弹性模量为 E ,泊松系数为 μ ,密度为 ρ ,则其固有频率为^[5]:

$$f_0 = \frac{32.16 h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1 - \mu^2)}} \tag{15}$$

一般而言,膜片的固有频率远高于引压管路的固有频率,以 $R = 12.7\text{mm}$, $h = 0.34\text{mm}$ 以及 $E = 1.9 \times 10^{11}\text{Pa}$ 为例,其固有频率可高达 100kHz 以上。而引压管路的固有频率一般不会超过几千赫兹,有些长引压管路中只有几十赫兹。

另外,测量电路的固有频率由电路元件参数确定,一般均能远高于管路系统的固有频率。它对差压检测系统动态特性的影响也很小。

3 试验结果

为了验证有关结论,我们利用 MPX10DP 差压传感器,分别采用不同长度的引压管路,在冲击差压的作用下测出了一系列相应的自由振荡信号,并由此得到检测系统引压管的自由振荡频率。引压管中介质为空气,温度约为 15℃,管径 6mm。数据如表 1 所示,其中理想状态值是根据式(10)取 $n = 0$ 、声速 $c = 340\text{m/s}$ 得出的。

图 4 示出了频率 f 及 $1/f$ 和引压管长度 l 的关系。从 $1/f-l$ 的曲线能更好地看出 $f-l$ 之间的关系。通过对 $1/f-l$ 关系的线性拟合,得到其关系为:

$$1/f = 1.196 \times 10^{-3} l + 1.768 \times 10^{-4} \quad (16)$$

相关系数 R 为 0.9906。式中, l 的单位为 m, f 的单位为 Hz。从该关系式也可以看出, 当引压管长度为 0 时, 差压取压系统的固有频率并不能达到无穷大, 约为 565 Hz。因为在实际情况下, 由于敏感元件和电路的影响以及腔室的存在(虽然由于元件内部的两压力腔很小, 可近似认为 $V=0$), 限制了响应频率的无限增大。所以实际情况和理想状态存在一定的区别, 并不能完全用理想情况来代替实际情况。从表 1 也看出了它们之间存在一定程度的差异。

另外, 我们也对 4mm 管径的引压管进行了实验。实验结果表明, 其固有谐振频率与管径为 6mm 时相比相差不大, 这也与理论分析的结论相吻合。

表 1 自由振荡频率 f 与引压管长度 l 之间的关系

引压管长 l (m)	1.55	1.25	1.00	0.85	0.75	0.40	0.25
自由振荡频率 f (Hz)	55	62	72	94	110	181	325
理想状态值 f_i (Hz)	54.8	68.0	85.0	100.0	113.3	212.5	340

4 结论

(1) 差压检测系统的引压管路固有频率对系统整体的固有频率有极其重要的影响。考虑到传感器的固有频率远高于引压管路的固有频率, 因此, 差压系统的固有频率主要取决于引压管路的固有频率。一般管路越长, 其固有频率越低。当腔室体积约为零时, 对长度为 0.25 ~ 1.55m 引压管路的实验结果表明, 固有频率与引压管长度成反比关系。

(2) 当差压传感器压力腔很小时, 引压管径对检测系统的固有频率基本不产生影响。

(3) 当差压引压管路不一致时, 且两引压管入口端的压力之和呈脉动状态时, 将引入与脉动幅值成正比的附加压差而产生测量误差。

参 考 文 献

- 1 罗志昌. 流体网络理论. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 2 柳兆荣等. 压力传感器的频率响应分析. 力学学报, 1980; (4): 363 ~ 372
- 3 盛敬超. 液压流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980
- 4 McCloy *et al.*. Control of Fluid Power. London: Ellis Horwood Ltd., 1980
- 5 袁希光. 传感技术手册. 北京: 国防工业出版社, 1985

The Effect of Pressure Ducts on Dynamic Characteristics of Pressure Drop Measuring System

Lao Liyun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Chen Gong, Zhang Hongjian, Li Haiqing

(The National Lab. of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract —Based on the fluidic impedance method, the effect of the pressure ducts on the dynamic characteristics of pressure drop measurement system was analyzed. The theoretical analysis and relative experimental investigations are presented. The frequency characteristics are mainly determined by the resonance frequency of the pressure ducts, and the frequency is inversely proportional to the length of the duct provided that the duct outlet cavity is very small. Also, because there are some differences in two ducts, the dynamic error of pressure drop measurement exists when the sum of the pressure in two duct inlets is fluctuated.

Key words: Dynamic pressure drop; Measurement system; Fluidic impedance