

文章编号:1007-3124(2001)04-0059-06

动态差压检测系统的共模误差研究

劳力云¹,郑之初¹,吴应湘¹,张宏建²

(1. 中国科学院力学研究所应用流体力学研究室,北京 100080;2. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要:主要针对以差压变送器为核心的动态差压检测系统的特点,应用流体网络分析方法,提出了动态差压检测系统中的共模误差问题。理论分析和仿真计算结果表明:共模误差与检测系统两侧引压管路的不一致性直接相关,为了获得动态差压信号的准确检测,必须对动态差压检测系统的共模误差予以抑制。

关键词:动态差压;共模误差;流体网络

中图分类号:TH701 **文献标识码:**A

On the common mode error of pressure drop fluctuation measuring systems

LAO Li-yun¹, ZHENG Zhi-chu¹, WU Ying-xiang¹, ZHANG Hong-jian²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. The National Lab. of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on fluidic network analysis method, the conception of common mode error (CME) of pressure drop fluctuation measurement system was investigated. The theoretical analysis, digital simulation and relative experimental researches were presented. The CME was mainly determined by the inconsistency of the parameters of both pressure ducts in the measurement system. It was necessary to repress the CME for the accurate measurements of pressure drop fluctuations.

Key words: dynamic pressure drop; common mode error; fluidic network

收稿日期:2000-03-06

基金项目:中国科学院“九五”重大项目(KZ951-AI-405)和工业控制技术国家重点实验室开放基金资助

作者简介:劳力云(1963-),男,浙江龙游县人,中国计量学院副教授,现为中国科学院力学研究所博士后研究人员。

0 引言

差压(压力降)是流动系统中的主要流体力学参数之一。对动态差压信号的检测是获取各种流动系统中流体状态信息的重要手段。为了检测动态差压信号,一般需利用差压传感器或压力传感器构成检测系统。具体方法主要有以下两种^[1,2]:一是双压力传感器法。两个压力传感器分别安装在两个差压引压点上,传感器输出的信号进行相减运算后,可以得到这两个点之间的差压。二是比较常用的差压传感器法。两个取压点的压力经引压管分别送至差压传感器的两个压力腔室。差压传感器将两腔室内的压力差转换成与之成线性关系的标准电信号输出。这种方法既简单方便,对于静态或缓变的差压信号又能保证足够的精度,因此应用极为普遍。

然而对于变化速度较快的动态差压信号的检测,这种方法的困难在于差压变送器腔室内的动态压力差与两引压点间的动态差压往往是不一致的。一方面是因为引压管路的动态响应是有限的,它的存在必然会引起取压点的压力信号和传感器实际感受到的压力信号的不一致;另一方面两引压管的动态特性也不可能完全一致,因而将会产生附加的动态测量误差,笔者称之为差压检测系统的共模误差(简称共模误差)。下面将应用流体网络方法分析这种误差的机理及其抑制方法。

1 差压检测系统及其流体阻抗模型

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两侧的引压管路和

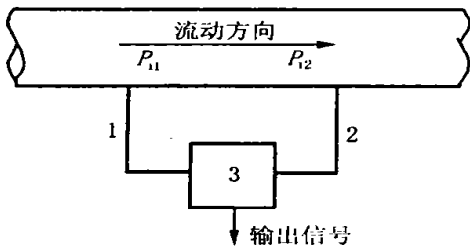


图1 利用差压变送器构成的差压检测系统
(1,2—引压管 3—差压变送器)

Fig.1 The differential pressure measurement equipment based on differential pressure transmitter

(1,2—pressure ducts 3—differential pressure transmitter)

差压变送器共三部分,如图1所示。每侧的引压管路又由引压管和腔室两部分构成,如图2所示。根据流体网络理论,这种形式管路直管段输入端的压力及流量信号的拉氏变换 $p_i(s)$ 和 $Q_i(s)$ 与输出端的压力及流量信号的拉氏变换 $P_o(s)$ 和 $Q_o(s)$ 之间可以表示为以下的阻抗矩阵形式^[3~5]:

$$\begin{bmatrix} P_o(s) \\ Q_o(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(l) & -Z_c \sinh(l) \\ -\frac{\sinh(l)}{Z_c} & \cosh(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 l 为引压管直管段的长度; \sqrt{ZY} 为直管段单位长度的传播常数; $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ 为直管段的特性阻抗;而 Z 和 Y 分别为单位管长串联阻抗和并联导纳。同时根据流体阻抗的概念,腔体的容抗 Z_v 为 $P_o(s)$ 与 $Q_o(s)$ 之比,即

$$\frac{P_o(s)}{Q_o(s)} = Z_v \quad (2)$$

综合(1)、(2)两式可得:

$$P_o(s) = P_i(s) \frac{Z_v}{Z_c \sinh(l) + Z_v \cosh(l)} \quad (3)$$

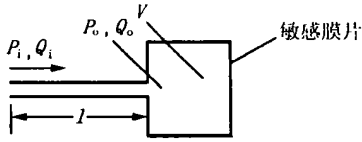


图 2 引压管路结构
Fig. 2 The structure of the pressure duct

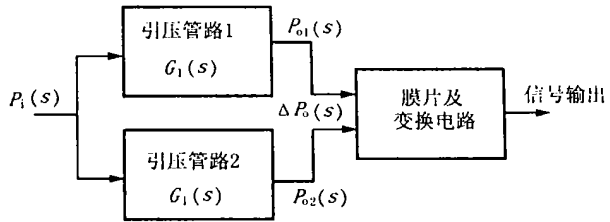


图 3 动态差压检测的共模误差示意图
Fig. 3 The common mode error within a differential pressure fluctuation measuring system

上式说明,差压变送器腔体内的动态压力不仅与引压管入口处的动态压力有关,还与引压管路的流体阻抗密切相关。由此易知,如差压变送器两侧的引压管路阻抗特性不一致,则尽管两入口处的动态压力(包括幅度和相位)一样,但在差压变送器敏感膜片两侧的腔体中将产生动态压力差,这就是笔者所说的共模误差,如图 3 所示。

下面对动态差压共模误差与变送器两侧引压管路参数的一致性之间的关系作一分析。令引压管路的传递函数为

$$G_k(s) = \frac{Z_{vk}}{Z_{ck} \sinh(s l_k) + Z_{vk} \cosh(s l_k)} \tag{4}$$

式中下标 $k = 1$ 与 2 时,各参数分别对应于两侧引压管路的相应参数; $k = 0$ 时,各参数对应于两侧引压管路相应参数的均值(下同)。在动态共模压力 $P_i(s)$ 的作用下,差压变送器所感受的压力差为:

$$P_o(s) = P_{o1}(s) - P_{o2}(s) = P_i(s) [G_1(s) - G_2(s)] \tag{5}$$

考虑到在实际应用中,两侧引压管路的参数不能完全一致,但差异不会很大,因此对上式进行级数展开,并忽略二阶及其以上的高阶项,可得:

$$P_o(s) = P_i(s) G_0(s) \left\{ \frac{Z_{v0} \sinh(s l_0)}{Z_{c0} \sinh(s l_0) + Z_{v0} \cosh(s l_0)} \left[\frac{Z_v}{Z_{v0}} - \frac{Z_c}{Z_{c0}} \right] - \frac{Z_{v0} \sinh(s l_0) + Z_{c0} \cosh(s l_0)}{Z_{c0} \sinh(s l_0) + Z_{v0} \cosh(s l_0)} \left[s l_0 \left(\frac{1}{Z_{v0}} - \frac{1}{Z_{c0}} \right) \right] \right\} \tag{6}$$

上式中的各个参数误差 $\mathbb{R} = \mathbb{R}_1 - \mathbb{R}_2$, 代表了两侧引压管路参数差异的绝对量;而 $\mathbb{R} / \mathbb{R}_0$ 则表示了参数差异的相对值。从式(6)中可以看出,共模压力误差的大小与两侧引压管路的长度、直管段单位长度的传播常数、直管段的特性阻抗以及腔体的容抗等参数的相对差异程度密切相关。而传播常数、直管段的特性阻抗以及腔体的容抗这些参数不仅与管路的几何尺寸及材料机械性能有关,更与管路内流体介质的物理特性和分布状态密切相关。因此,为了抑制共模误差,应使两侧的引压管路在上述方面尽可能地保持一致。

另外,若共模压力 $P_i(s)$ 为静态压力,即 $s = 0$,则易知此时管路的传播常数亦为 0。由式(6)易得 $P_o(s) = 0$,即此时不存在共模误差。换句话说,只有在压力动态变化时,才有共模误差存在。而在实际系统中,压力波动或多或少都是存在的,因此,差压测量中总是伴随有动态共模压力误差,只不过是大小的问题而已。

2 阶跃压力下的共模误差

为了进一步了解共模误差的动态特性,研究在阶跃压力作用下共模误差的时域响应是很有帮助的。原则上说,对于特定的测量系统,根据流体阻抗等参数,利用(6)式应用拉氏变换,就可得到在阶跃压力作用下共模误差的时域响应。但考虑到式(6)的复杂性,直接利用该式有较大的困难。比较方便的方法是利用式(3)分别求得在阶跃压力作用下变送器敏感膜片两侧压力的时域响应,再把这两者相减,得到共模误差的时域响应。

由于输入压力是阶跃信号,故 $P_i(s) = p_i/s$, p_i 为阶跃高度;又根据流体阻抗的概念,引压管路直管段单位长度的串联阻抗 $Z = R + sL$, 并联导纳 $Y = sC$;腔体的容抗 $Z_v = 1/(sC_v)$ 。这里 R 、 L 、和 C 分别为直管段单位管长的流阻、流感、流容, C_v 为腔体的流容,它们决定于管路的几何尺寸和材料机械性能以及管路内流体介质的物理特性和分布状态。若假设管路中的流体为均匀分布的牛顿流体,即压力波动为线性小扰动,则上述流体阻抗参数可以由下列式子给出:

$$R = (8 \mu) / (A^2), L = l/A, C = A/a^2, C_v = V/a^2$$

上列式中, A 、 V 分别为直管段的截面积和腔体体积; μ 分别为流体的密度和粘度; a 为波速。

将上述关系代入式(3),并进行拉氏反变换,可得腔体中压力的阶跃响应为^[3]:

$$p_o(t) = p_i \left\{ 1 - 4 \exp(-\gamma t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n t}{\gamma_n + \sin 2\gamma_n} \left[\frac{\exp(-\gamma_n t)}{1 - \frac{\gamma_n}{\gamma}} + \frac{\exp(-\gamma_n t)}{1 - \frac{\gamma_n}{\gamma}} \right] \right\} \quad (7)$$

其中 $\gamma = R/2L$, $\gamma_n = (1/LC) \cdot (\gamma_n/l)^2$, 而 γ_n 由方程 $\cot \gamma_n = \gamma_n / (Cl/C_v)$ 给出。由于式(7)是利用驻波法得到的,实际的响应还应考虑阶跃波在管路中传播所需的延时时间 $= l/c$, 因此实际的压力阶跃响应为:

$$p_{oa}(t) = u(t - l/c) p_o(t - l/c) \quad (8)$$

把两侧引压管路的参数分别代入式(7)和(8),得到两侧腔体中的压力阶跃响应 $p_{oa1}(t)$ 和 $p_{oa2}(t)$, 进而可得到共模误差的阶跃响应:

$$p_{oa}(t) = p_{oa1}(t) - p_{oa2}(t) \quad (9)$$

对于一般的计算,式(7)中的 n 只要取前面几项就足够了。

3 仿真计算及实验结果

为了对有关结论进行验证,我们分别进行了仿真计算和实验测试。

仿真计算主要针对下列两种不同的情况进行:1. 变送器两侧的引压管路具有不同的长度。计算中两侧的长度分别取 1.0m 和 1.2m;其它参数两侧均一致,管路的直径、变送器的腔体体积分别为 2mm 和 30mm³;引压管路中的介质为水。为与后面的实际测试结果比较,考虑引压管路为塑料软管,根据文献[4,5]的有关数据,其弹性模量较水的弹性模量低两个数量级,压力波速设定为 20m/s。2. 变送器两侧的引压管路具有不同的截面积。计算中两侧管路的直径分别取 2.0mm 和 1.5mm;其它参数两侧均一致,管路的长

度、变送器的腔体体积分别为 1m 和 30mm³;其他条件与第一种情况相同。计算结果示于图 4。

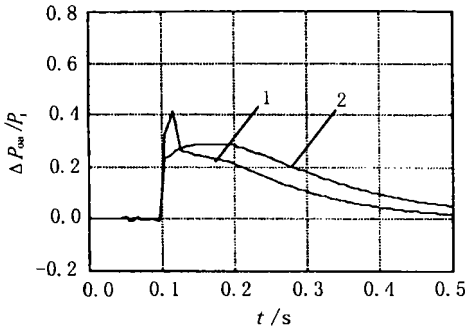


图 4 共模误差的阶跃响应仿真结果

- 1—两侧引压管路的长度不等
- 2—两侧引压管路的截面不等

Fig. 4 Step response simulations of common mode errors

- 1—the lengths of two ducts were not the same
- 2—the cross section areas of two ducts were not the same

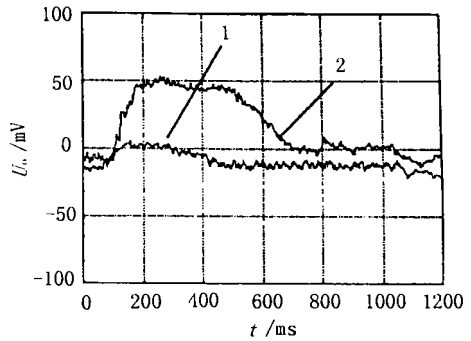


图 5 共模误差的阶跃响应实验结果

- 1—两侧引压管路的参数相同
- 2—两侧引压管路的参数不同

Fig. 5 Step response experimental results of common mode errors

- 1—the parameters of two ducts were the same
- 2—the parameters of two ducts were not the same

实际的共模误差测试实验是在利用 Honeywell 24pc 型差压元件构成的检测系统中进行的。实验结果示于图 5 中。曲线 1 为两侧引压管路参数对称的条件下得到的;曲线 2 是在两侧引压管路长度不等(分别为 1m 和 1.2m)的条件下得到的。很明显,系统对称性对于共模误差有显著的影响。同时,与仿真结果比较,共模误差的阶跃响应情况具有一定的相似性。

从仿真和实验结果看,由于动态差压检测系统两侧的不对称性,将会引入显著的动态共模误差。对于动态性能要求较高的场合,必须予以足够的重视,否则将直接影响到测量结果的可靠性。

4 结 论

(1) 由于差压检测系统两侧引压管路等的参数不一致,将导致在动态差压信号检测中存在有共模误差。

(2) 理论分析的结果表明,两侧管路参数如长度、截面面积、流体分布状态等的不一致,通过引起管路的流体阻抗特性参数和动态压力传递特性的不一致,是引起共模误差的主要因素。

(3) 对共模误差关于阶跃压力信号响应的仿真计算及实际测试,表明了共模误差在动态压力作用下是明显存在的。而降低共模误差的根本方法是改善差压检测系统中变送器两侧参数的一致性。

(下转第 69 页)

此风洞现已通过鉴定并正式投入使用。实践证明,它不仅能满足测力、测压、流态演示等教学需要,还可以进行相关科学研究工作,也能在飞机、导弹的型号研制和试验中发挥作用。

参考文献:

- [1] 恽起麟. 实验空气动力学. 国防工业出版社, 1991. 12.
- [2] NACA. TN-4041 ~ 4044, 1957.
- [3] 范洁川等译. 低速风洞实验. 空气动力实验与研究, 1988.

(上接第 63 页)

参考文献:

- [1] 李海青. 两相流参数检测及应用. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
- [2] 林宗虎. 气液固三相流测量. 北京: 中国计量出版社, 1988.
- [3] 柳兆荣, 陈金娥, 黄东群. 压力传感器的频率响应分析. 力学学报, 1980, (4): 363 ~ 372.
- [4] 罗志昌. 流体网络理论. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 盛敬超. 液压流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [6] 劳力云. 基于动态差压信号分析的两相流参数辨识方法研究:[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998.