

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107619

# 科里奥利质量流量计传感器零点模型研究及应用\*

罗凡,甘蓉,赵普俊,陈桥兵,熊茂涛  
(中国测试技术研究院 成都 610021)

**摘要:**科里奥利质量流量计以其直接测量质量流量的特点,成为近年来发展最为迅速的流量仪表之一,已经成为贸易结算的首选计量器具。虽然科里奥利质量流量计的测量精度很高,但是其存在零点漂移的缺陷,降低了仪表的长期稳定性。本文以典型的U型振动管传感器为例,基于振动管的幅频和相频特性,分析了传感器的各阶模态对于工作频率的响应,以此建立了传感器的初始相位模型。通过样机实验证明,该理论模型在应用于薄壁振动管时具有较高的计算精度和适用性,并将科里奥利质量流量计在低温介质测量中的测量误差降低到 $\pm 0.3\%$ 以内,也为抑制科里奥利质量流量计零点漂移提供了理论依据。

**关键词:**科里奥利;质量流量计;零点;幅频特性;相频特性

**中图分类号:** TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Research and application of the zero-point model of the sensor in Coriolis mass flowmeter

Luo Fan, Gan Rong, Zhao Pujun, Chen Qiaobing, Xiong Maotao  
(National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China)

**Abstract:** Due to the virtue of directly measure mass flow, the Coriolis mass flowmeter is the first choice of international trade settlement in recent years. It has become one of the most rapidly developing flowmeters. Although the accuracy of Coriolis mass flowmeter is relatively high, it has the weakness of zero-point drift, which could result in long-term instability. Based on the characteristics of amplitude-frequency and phase-frequency of the classic U tube in the sensor, this article analyzes the responses of each order to the working vibration frequency. The model of the initial phase of the sensor is formulated. By prototypes testing, this zero-point model is suitable for thin-walled pipe structure and can be widely used. It reduces the error of Coriolis mass flowmeter in cryogenic flow measurement to be within  $\pm 0.3\%$ , and also provides a theoretical foundation to reduce the zero-point drift of Coriolis mass flowmeter.

**Keywords:** Coriolis; mass flowmeter; zero-point; amplitude-frequency characteristic; phase-frequency characteristic

## 0 引言

科里奥利质量流量计具有高精度、宽量程、低压损、长寿命等优点,被广泛地应用于石油、化工、医药、食品、能源、生物工程等领域,也是贸易结算首选流量计量器具。

尽管科里奥利质量流量计拥有相较传统流量计更为突出的优点,但同时也存在明显的不足,既是仪表的零点易受介质变化或者安装条件的影响,产生较为严重的漂

移,从而降低测量精度。为了减少零点漂移,须用被测介质充满流量计,然后定期对流量计进行零点调整。

对于一些特殊的被测介质,如液化天然气(LNG),首先,由于低温介质的易气化特性,需要持续流动以保证介质的单相性,因此,无法为流量计提供低温静止的调零条件;其次,国产科里奥利质量流量计尚未建立传感器零点的数学模型,也就无法提供对于零点的修正。在实际工作中,只能以空气状态下的零点代替低温时的零点。显然,室温时的空气和低温时的LNG具有完全不同的物理性质,因此,传感器的零点变化必然会对流量计的精度产

收稿日期:2021-03-16 Received Date: 2021-03-16

\* 基金项目:四川省科技基础条件平台项目(18PTDJ0120)、四川省中央引导地方科技发展专项(2018TZYD0002)、成都市技术标准研制项目(2016-BZ00-00008-ZG)资助

生影响,使得国产科里奥利质量流量计无法在重要的贸易交接中替代进口产品。

科里奥利质量流量计的零点由传感器的机械零点和变送器的电零点共同组成,其中变送器部分的电零点特性已有比较充分的认识和解决方案<sup>[1-4]</sup>。国内外对于传感器的机械零点特性以结构和动态特性分析为主,比如不同管型的结构建模<sup>[5-7]</sup>、不同介质下的密度效应<sup>[8-9]</sup>、高压气体介质测量时的节流效应<sup>[10]</sup>、测量管非线性振动<sup>[11-12]</sup>、动态响应特性<sup>[13-15]</sup>和工艺缺陷的影响<sup>[16]</sup>,而缺乏对于传感器零点更深入的理论模型研究,这就导致无法提出有效的、普适的零点漂移控制策略。本文以典型的U型振动管传感器为例,从分析振动管各阶振动模式的幅频和相频特性入手,建立了传感器的初始相位模型,并通过样机测试和实例应用,验证了理论模型的正确性,明确了理论计算精度和适用范围。

### 1 科里奥利质量流量计原理

如图1所示,科里奥利质量流量计是利用流体在旋转体系中作直线运动,产生与质量流量成正比的科里奥利力而制成的一种能直接测量质量流量和密度的仪表。

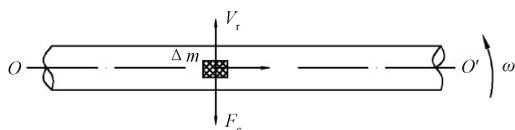


图1 科里奥利原理

Fig. 1 The principle of Coriolis effect

因为旋转运动并不适于实际应用,所以科里奥利质量流量计通常是以振动代替旋转运动,即两端固定的薄壁振动管,如图2所示,在中心处施加振动管固有频率或接近固有频率的激励。如果把测量管看作是从中心分开的两段,那么这两段就相当于分别围绕两端固定点作来回旋转运动。当流体从一端流向另一端时,科里奥利力将使前后两段产生方向相反的扭曲,进而产生如图3所示的相位差。测出两段管通过中心平面的时间差  $\Delta t$ ,就可以得知质量流量<sup>[17-20]</sup>。

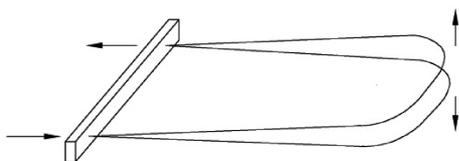


图2 传感器工作状态

Fig. 2 The working status of the sensor

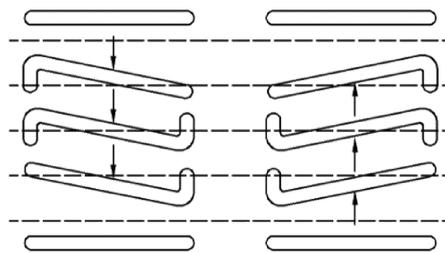


图3 相位差原理

Fig. 3 The principle of the time difference

### 2 传感器零点建模

如图4所示,科里奥利质量流量计是运用传感器在固有频率下的共振替代回转运动,从而获得科氏力相位差,其核心是振动管的简谐振动。从振动理论可知,振动模式存在正交性,且存在无限个模式,以典型的U型振动管为例,其前5阶振动模式如图5所示。

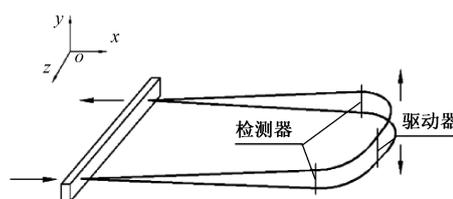
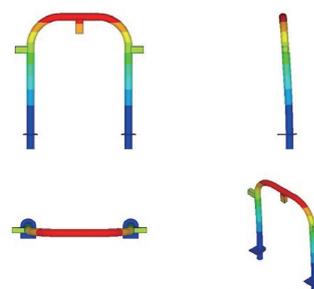


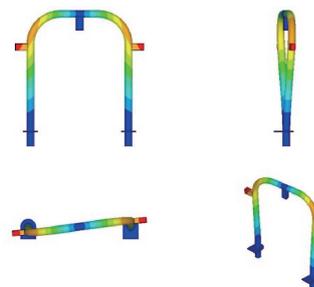
图4 传感器结构

Fig. 4 The structure of the sensor



(a) 一阶振动模式

(a) The model of the first order



(b) 二阶振动模式

(b) The model of the second order

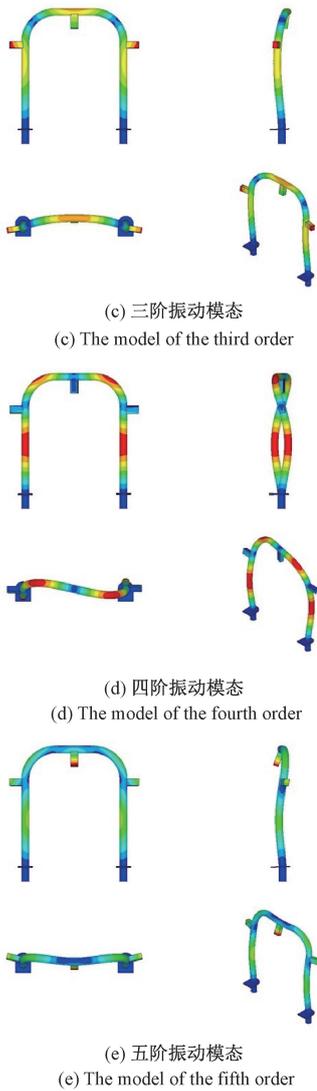


图 5 传感器振动模态

Fig. 5 The vibration models of the sensor

图 5(a)为 U 型振动管基频的振动模态。对比图 3 和图 5(b)可知,二阶模态与科氏力所产生的振动管变形相同。

如图 6 所示,由振动幅频特性可知,任一振动模态对激励的响应满足下面公式。

$$Z(x, y, \omega, t) = A \sum_{i=1}^{\infty} W_i(x, y) |H_i| \cos(\omega t - \varphi_i) \quad (1)$$

$$|H_i(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_i)^2]^2 + (2\xi_i\omega/\omega_i)^2}} \quad (2)$$

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{2\xi_i\omega/\omega_i}{1 - (\omega/\omega_i)^2}\right), i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

其中,  $A$  表示激励幅值;  $W_i(x, y)$  表示第  $i$  阶模态的形状系数,代表振动管上各点在第  $i$  阶模态时偏离振动管结构平面的程度;设处于第  $i$  阶模态的振动管上偏离

结构平面为  $1 \text{ mm}$  的位置点,其  $W_i = 1$ 。  $|H_i(\omega)|$  表示第  $i$  阶模态对激励  $\omega$  的机械放大倍数。  $\varphi_i$  表示第  $i$  阶模态滞后于激励的相位差;  $\xi_i$  表示第  $i$  阶模态的等效阻尼系数。

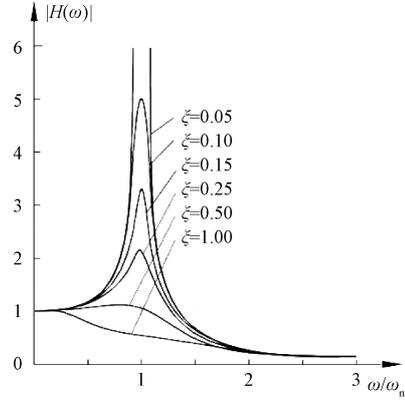


图 6 幅频特性

Fig. 6 The amplitude-frequency characteristic

当传感器稳态工作时,振动管将以基频  $\omega_1$  的模态和频率为主振动形式进行谐振,而其余各阶模态则进入受迫振动,所有的模态都会对基频的激励产生响应,因此,振动管在基频激励下产生的幅值响应  $Z$  是所有模态响应的叠加。由于振动管在平衡位置时是二维平面结构,所以,设振动管模态频率为  $\omega_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ ,激励力为  $A \cos(\omega_1 t)$ ,则总的响应幅值为:

$$Z(x, y, \omega_1, t) = A \sum_{i=1}^{\infty} W_i(x, y) |H_i| \cos(\omega_1 t - \varphi_i) \quad (4)$$

$$|H_i(\omega_1)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega_1/\omega_i)^2]^2 + (2\xi_i\omega_1/\omega_i)^2}} \quad (5)$$

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{2\xi_i\omega_1/\omega_i}{1 - (\omega_1/\omega_i)^2}\right), i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

由于阻尼的存在,振动管的模态响应不会无限增大。同时,频率比  $\omega_1/\omega_i$  随着模态阶数的升高而逐渐减小,使得对应的机械放大倍数  $|H_i(\omega_1)|$  下降,当  $\omega_1/\omega_i < 0.5$  时,  $|H_i(\omega_1)| \approx 1$ 。

如图 7 所示,再由相频特性曲线可知,当  $\omega \approx \omega_i$  时,  $\varphi_i \approx \pi/2$ ,所以,  $\varphi_1 \approx \pi/2$ ; 又因激励频率  $\omega = \omega_1 < \omega_i (i = 2, 3, \dots)$ ,所以  $0 < \varphi_i \approx \pi/2 (i = 2, 3, \dots)$ 。

一般情况下,为了提高振动品质因数和抗干扰性能,振动管的其他模态会远离基频,并保证  $\omega_1/\omega_i < 1/\sqrt{2}$  时,而金属振动管的等效阻尼系数非常小,当频率比  $\omega_1/\omega_i < 0.5, \varphi_i \approx 0$ 。由此得到任意时刻  $t$  的总响应为:

$$Z(x, y, \omega_1, t) = A (W_1(x, y) |H_1| \sin(\omega_1 t) + \cos(\omega_1 t) \sum_{i=2}^{\infty} (W_i(x, y) |H_i|)) \quad (7)$$

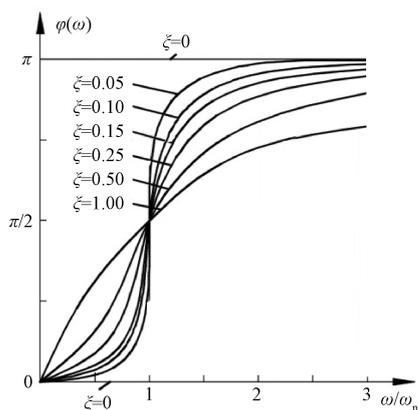


图7 相频特性曲线

Fig. 7 The phase-frequency characteristic

科里奥利质量流量计通过振动管两侧的信号检测器检出信号,其位置通常设置在振动管左右两侧对称、且尽可能靠近科氏力最大变形量的位置。设左右信号检测器的各阶模态响应分别为:  $Z(x_r, y_r, \omega_1, t)$  和  $Z(x_l, y_l, \omega_1, t)$ , 则检测器的模态响应差为  $\Delta Z$ :

$$\Delta Z = Z(x_r, y_r, \omega_1, t) - Z(x_l, y_l, \omega_1, t) = A((W_1(x_r, y_r) - W_1(x_l, y_l)) |H_1| \sin(\omega_1 t) + \cos(\omega_1 t) \sum_{i=2}^{\infty} ((W_i(x_r, y_r) - W_i(x_l, y_l)) |H_i|)) \quad (8)$$

形状系数  $W_i(x, y)$  与时间无关,仅由振动管几何参数决定,如图5(a)所示,U型振动管的基频振动模态呈左右对称状态,既有:

$$W_1(x_r, y_r) = W_1(x_l, y_l) \quad (9)$$

而当  $i \neq 1$ , 即非基频模态时,振动管必存在振动模态,使得:

$$W_i(x_r, y_r) - W_i(x_l, y_l) \neq 0 \quad (10)$$

又因  $|H_i(\omega)|$  是单调递减函数,且不为0,则左右信号检测器的总模态响应差为:

$$\Delta Z \neq 0 \quad (11)$$

振动管左右两侧信号检测器在任意时刻  $t$  的线速度为:

$$V_l = \frac{dZ_l}{dt} \quad (12)$$

$$V_r = \frac{dZ_r}{dt} \quad (13)$$

设平均速度:

$$\bar{V} = \frac{V_l + V_r}{2} \quad (14)$$

因  $|H_1(\omega_1)| \gg |H_i(\omega_1)|$ , 所以:

$$\bar{V} \approx \frac{d(A |H_1| (W_1(x_r, y_r) + W_1(x_l, y_l)) \sin(\omega_1 t))}{2dt} =$$

$$\frac{A |H_1| (W_1(x_r, y_r) + W_1(x_l, y_l)) \omega_1 \cos(\omega_1 t)}{2} \quad (15)$$

综合式(8)~(15),得到振动管左右两侧信号检测器处的总响应时间差:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta Z}{V} =$$

$$\frac{2 A \cos(\omega_1 t) \sum_{i=2}^{\infty} |H_i| (W_i(x_r, y_r) - W_i(x_l, y_l))}{A |H_1| (W_1(x_r, y_r) + W_1(x_l, y_l)) \omega_1 \cos(\omega_1 t)} = \frac{2 \sum_{i=2}^{\infty} |H_i| (W_i(x_r, y_r) - W_i(x_l, y_l))}{\omega_1 |H_1| (W_1(x_r, y_r) + W_1(x_l, y_l))} \quad (16)$$

由于各阶模态阻尼的存在,使得  $|H_i(\omega)| \neq \infty$ , 令  $K$  为零点系数,且:

$$K = \frac{2 \sum_{i=2}^{\infty} |H_i| (W_i(x_r, y_r) - W_i(x_l, y_l))}{|H_1| (W_1(x_r, y_r) + W_1(x_l, y_l))} \quad (17)$$

则式(16)变为:

$$\Delta t_s = \frac{K}{\omega_1} = \frac{K}{2\pi f_1} \quad (18)$$

因时间差  $\Delta t_s$  是在振动管内被测介质未流动的情况下产生的,所以,式(18)代表了振动管的初始相位构成,也即是传感器的机械零点模型。

由此,我们可以得到科里奥利质量流量计传感器零点的特性:

1) 由式(17)可知, $K$ 系数是无量纲的。

2) 由于式(17)中没有包含幅值参数  $A$ , 因此,  $\Delta t_s$  的大小与激励幅值无关。

3) 由式(18)可知,传感器的零点  $\Delta t_s$  与主振动频率  $f_1$  呈倒数关系。

4)  $K$ 系数包含各阶模态在基频下的机械放大倍数、结构阻尼以及响应形式等参数,因此, $K$ 系数是传感器设计合理性和制造缺陷的综合反映,也是性能的重要参考指标。

5) 由于  $\omega_1 > 0$ , 因此,  $\Delta t_s$  与  $K$  同符号; 又因  $K$  系数的符号由振动管的结构决定, 所以, 传感器零点的漂移不会发生符号变化。

### 3 实验方案

#### 3.1 方案原理

对于已知尺寸的传感器而言,  $\omega_1$ 、 $\omega_i$ 、 $W_i(x_r, y_r)$  和  $W_i(x_l, y_l)$  皆可直接计算, 唯有各阶等效阻尼系数  $\xi_i$  难以获得理论值。

当传感器内充满单相被测介质时, 如果被测介质的等效阻尼系数远远小于传感器, 则被测介质对零点系数

$K$  的影响可以忽略。那么,在等效阻尼极小的不同介质条件下,传感器的零点系数  $K$  可以维持不变。利用这一假设,本文设计了如下实验方案:

以空气作为基础介质,测量传感器工作频率  $f_a$  和零点  $\bar{Z}_a$ ,再应用(18)计算出零点系数  $K$ ;然后,以此零点系数  $K$ ,结合传感器充满水时的实测工作频率  $f_w$ ,计算出零点理论值  $Z'_w$ ,即:

$$Z'_w = \frac{\bar{Z}_a f_a}{f_w} \quad (19)$$

最后,与传感器充满水时的零点实测值  $\bar{Z}_w$  进行比较,从而验证传感器零点模型的准确性和适用范围。另外,本文还将对传感器进行变振幅下的零点测试,以验证零点与振幅的无关性。

以 316 L 不锈钢管作为振动管材质,分别制作了 3 个不同尺寸的传感器,具体几何参数如图 8 和表 1 所示,样机实物如图 9 所示。

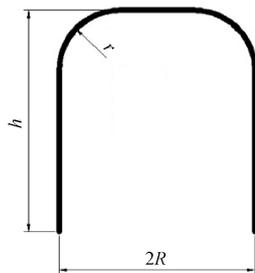


图 8 U 型振动管尺寸

Fig. 8 The structure diagram of U-shape tube

表 1 振动管几何参数

Table 1 The dimension of the U-shape tube

编号	管径	高 $h$	宽 $R$	圆角半径 $r$
A	10×1	148	65	40
B	6×1	120	50	25
C	25×1.5	278	180	100

### 3.2 安装方式要求

将被测传感器通过软绳悬挂于支架上,并置于空中,如图 10 所示。此种方式可以降低传感器与外界的振动耦合,使测得的传感器零点尽可能准确。

### 3.3 变送器的标定

因为科里奥利质量流量计的零点是由传感器机械零点和变送器电零点组成的,为了测得准确的传感器零点,需先对变送器的零点温度漂移量进行测定。程

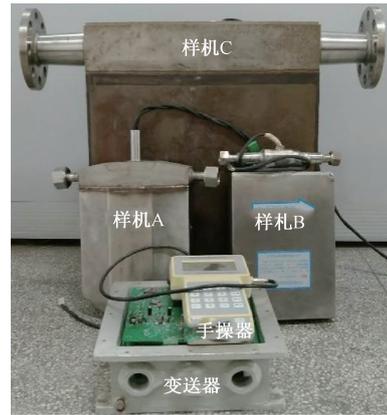


图 9 样机照片

Fig. 9 The photo of prototypes



(a) 样机A安装方式

(a) The installation method of the prototype A



(b) 样机C安装方式

(b) The installation method of the prototype C

图 10 传感器安装方式

Fig. 10 The installation method of the sensor

序如下:

- 1) 设定信号发生器的输出频率为 180 Hz,幅值为 160 mVrms,并联变送器左右信号的同符号输入端,使两路输入信号完全对称。
- 2) 选取 10 个变送器,以 1 min 为时间间隔,连续记录变送器的零点。
- 3) 根据记录结果,选取零点漂移和离散性最小的变送器作为标准变送器,并将最后读取的 10 个零点的平均值作为标准变送器的零点  $Z_T$ 。

## 4 实验结果

图 11 是 24 h 内标准变送器的零点值。如图 11 所示,变送器预热至稳定状态需 2 h 左右,且变送器的零点与环境温度的变化率呈正比关系。因此,为了尽减小变送器零点漂移,将实验时的环境温度变化控制在 1℃ 内,整个实验的完成时间限定在 2 h 内,在此条件下,变送器的零点视为恒定。

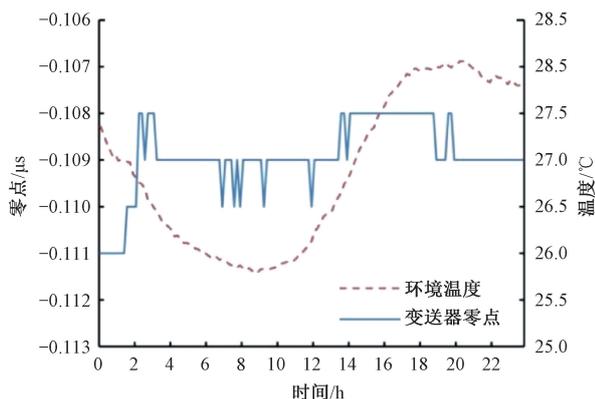


图 11 变送器稳定性测试

Fig. 11 The stability test of the transmitter

根据实践经验,大部分科里奥利质量流量计传感器的零点都小于 100 ns,而最大流量对应的相位差都大于 10 μs,若要保证达到 ±0.2% 的基本精度,则零点漂移需要控制在 ±2 ns,我们以此作为零点模型期望的误差限。

在充满空气的状态下,读取流量计的零点  $Z$ ,则传感器的空气零点实测值  $Z_a$  为:

$$Z_a = Z - Z_T \quad (20)$$

取 10 次  $Z_a$  的平均值作为该传感器的空气零点实测平均值  $\bar{Z}_a$ ,如表 2 所示。

表 2 空气介质时传感器工作频率和零点

Table 2 The working frequency and zero-point of the sensor with air

样机编号	变送器零点 $Z_T = -0.1099 \mu\text{s}$		
	$f_a/\text{Hz}$	$\bar{Z}_a/\mu\text{s}$	理论零点系数 $K/(\times 10^{-6})$
A	201.22	0.0405	51.204
B	157.89	-0.0771	-76.485
C	139.50	0.0117	10.254

在充满清洁水的状态下,读取流量计的零点  $Z$ ,则传感器在水介质下的零点实测值  $Z_w$  为:

$$Z_w = Z - Z_T \quad (21)$$

取 10 次  $Z_w$  的平均值作为该传感器的水介质零点实

测平均值  $\bar{Z}_w$ ,再由 (19) 式计算出充满水介质时的传感器零点理论值  $Z'_w$ ,最后,将  $Z'_w$  与  $\bar{Z}_w$  进行比较,并计算实际零点漂移值  $\Delta Z$ ,如表 3 所示。

$$\Delta Z = \bar{Z}_w - \bar{Z}_a \quad (22)$$

表 3 水介质时传感器理论零点计算误差

Table 3 The error of theoretical zero-point of the sensor with water

样机编号	变送器零点 $Z_T = -0.1099 \mu\text{s}$				
	$f_a/\text{Hz}$	$\bar{Z}_w/\mu\text{s}$	$\Delta Z/\mu\text{s}$	$Z'_w/\mu\text{s}$	误差/ $\mu\text{s}$
A	186.95	0.0429	0.0024	0.0435	0.0006
B	153.23	-0.0815	-0.0044	-0.0794	0.0021
C	118.61	0.0146	0.0029	0.0138	-0.0008

如表 4 所示,以三台样机的 1:10 的量程比为例,通过零点修正可以降低的误差为:

表 4 样机应用零点修正可降低的误差

Table 4 The errors corrected by the zero model of the sensor

样机编号	灵敏度/ $g/(s \cdot \mu\text{s})$	10%量程 的相位 差/ $\mu\text{s}$	未修正零	修正零点	可降低的 误差 /%
			点的误差 /%	后的误差 /%	
A	84.33	0.988	0.243	-0.061	0.304
B	28.42	0.977	-0.450	-0.215	0.235
C	277.15	4.011	0.072	0.020	0.052

如表 4 所示,3 台样机应用了零点修正后,其在 10% 量程点的误差明显降低,显著提高了科里奥利质量流量计在小流量时的测量精度。

如图 12 所示,传感器的零点漂移和  $K$  系数呈显著相关的正比关系,验证了  $K$  系数是评价传感器性能的重要指标。

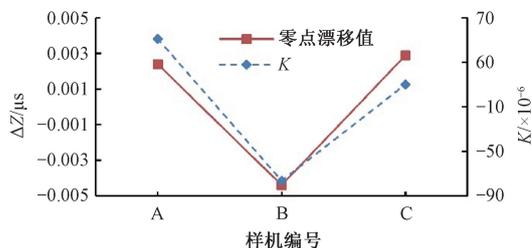


图 12 样机的零点漂移值和  $K$  系数的关系

Fig. 12 The relationship between the zero drift and constant  $K$

式 (17) 表明激励幅值与传感器零点无关,又因激励幅值正比于检测信号幅值,所以,我们以检测信号为控制点来进行不同激励幅值下的零点测试。我们从三个样机

中选取零点值最大的 B 号,记录空气状态下检测信号在 (100~200) mVrms 内每变化 10 mVrms 时的零点。

如图 13 所示,在(100~200) mVrms 内,尽管传感器的工作频率随检测幅值略有变化,但传感器的零点基本保持不变,证明了零点与激励幅值无关。

通过样机实验,证明了基于模态响应和幅频特性的传感器零点模型对于 U 型薄壁管结构的科里奥利质量流量计具有较高的精度和较好的适用性。

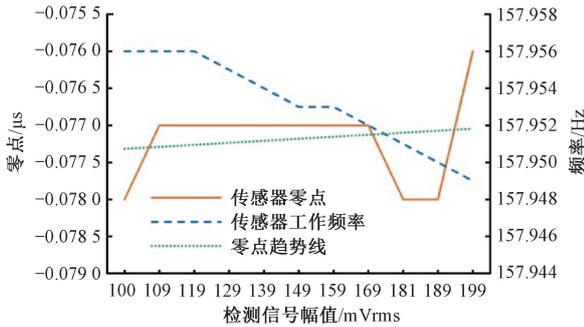


图 13 不同检测幅值时的传感器零点

Fig. 13 The zero point of the sensor according to the amplitude of the detected signal

### 5 应用实例

低温流量测量存在介质的气液状态转变,以及因易气化而无法提供静态调零条件的特点,是应用本文建立的传感器零点模型的最佳场合。

由于科里奥利质量流量计在气液两相流状态下会产生其他的测量误差,不便于准确评估零点漂移的影响,所以,本文采用单相液氮作为检定介质。液氮流量测试方案如下:

- 1) 用质量法水流量标准装置对样机进行标定,确定流量系数。
- 2) 预热被测样机和标准装置,并以充满空气介质的状态对被测样机进行调零。
- 3) 用 LNG 专用软管将被测样机、标准装置和低温液源串联成封闭环路,如图 14 所示。
- 4) 启动低温液体加注机对整个环路进行预冷,排除其中的气态氮气,确保环路中的介质为单相液氮。
- 5) 以 Emerson CMF100 为标准表,测试流量为 25 kg/min,动态截取同一时刻下被测样机和标准装置的累计流量,计算固定时间间隔的累计流量增量,通过对比得到被测流量计的误差,如图 15 所示。

由于液氮的物理性质和清洁水有明显区别,会引起传感器机械放大倍数的改变,因此,需要在式(18)中加入  $|H_1|$  的变化率。

由科里奥利质量流量计的驱动原理可知:

$$|H_1| \propto \frac{1}{\text{Gain}} \tag{23}$$

其中, Gain 为驱动增益。

因此,通过测量驱动增益可以获得机械放大倍数的变化。



图 14 低温流量测试现场

Fig. 14 The testing field for flow measurement of LN

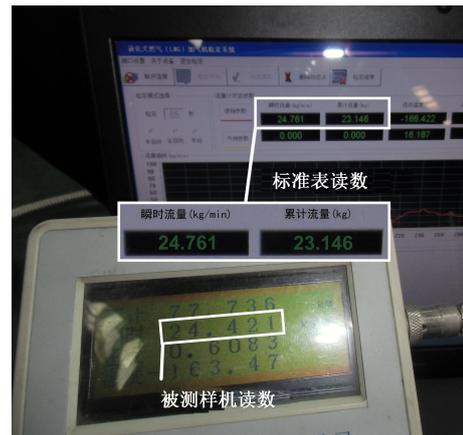


图 15 动态数据采集

Fig. 15 The dynamic data acquisition

传感器的低温零点预测值如表 5 所示。

表 5 低温状态时的传感器零点预测值  
**Table 5 The predicted zero point of the sensor at cryogenic**

空气 (20℃)			液氮 (-163℃)		
$f_a/\text{Hz}$	$\bar{Z}_a/\mu\text{s}$	Gain/%	$f_{LN}/\text{Hz}$	Gain/%	预测零点 $Z'_{LN}/\mu\text{s}$
204.70	-0.0376	2.48	198.74	3.89	-0.0607

采用表 4 的计算方法,结合表 5 中预测的低温零点,可得:

如表 6 和 7 所示,以充满空气介质状态下传感器零点为低温零点时,流量误差为-0.437%,而采用低温零点预测值可修正的误差为 0.474%,所以,应用本文所述传

感器零点模型后的流量误差为 0.037%,此结果已经达到国际上科里奥利质量流量计在低温介质测量时 $\pm 0.3\%$ 的最高精度水平,可以实现对进口产品的替代。

表 6 低温流量测试结果

Table 6 Test results of flow at cryogenic

序号	被测样机累计值/kg	标准装置累计值/kg	误差/%	平均误差/%
1	25.47	25.505	-0.137	
2	24.33	24.460	-0.531	
3	26.09	26.210	-0.458	
4	24.04	24.139	-0.410	
5	26.44	26.558	-0.444	-0.437
6	23.05	23.147	-0.419	
7	28.96	29.103	-0.491	
8	22.92	23.059	-0.603	
9	21.64	21.735	-0.437	

表 7 样机应用零点修正可降低的误差

Table 7 The error corrected by the zero model

灵敏度系数/ $g/(s \cdot \mu s)$	25 kg/min 的 相位差/ $\mu s$	零点漂移预 测值/ $\mu s$	误差修正值/ %
85.36	4.881	-0.023 1	0.474

## 6 结 论

本文从振动幅频和相频特性的角度,对科里奥利质量流量计传感器的零点进行建模,并通过样机实验验证了理论计算精度和适用范围,为抑制科里奥利质量流量计零点漂移提供了理论依据。在液氮流量测量的实例中,证明该零点模型可以显著提高科里奥利质量流量计对低温介质的测量精度,对于 LNG 贸易结算具有非常重要的应用价值。

从实验结果我们可以得到如下结论:

- 1) 传感器的零点  $\Delta t_s$  与激励幅值无关。
- 2) 传感器的零点  $\Delta t_s$  与主振动频率  $f_1$  呈倒数关系,振动管的基频越低,  $\Delta t_s$  越大,提高振动管的主振动频率,有利于减小模态响应对传感器零点的影响。
- 3)  $K$  系数是传感器设计合理性和制造缺陷的综合反映,也是性能的重要参考指标。
- 4) 传感器零点的漂移不会发生符号变化。
- 5) 3 台样机的实验结果说明本文建立的传感器零点模型应用于薄壁振动管时具有较高的计算精度。
- 6) 考虑到低温介质的气液两相流状态会显著增大

标准表 CMF100 的测量误差,从而影响传感器零点模型的验证,所以,本文只进行了单相液氮介质下的应用测试。在后续的工作中,将采用静态质量法对两相流状态下零点模型的适用性进行验证。

7) 本文没有直接计算样机的零点系数  $K$ ,所以没有得到传感器零点纯理论值,对  $K$  中等效阻尼系数的计算方法将是未来研究工作的重点。

## 参考文献

- [1] 李叶,徐科军,朱志海. 面向时变的科里奥利质量流量计信号的处理方法研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010,31(1):8-14.  
LI Y, XU K J, ZHU ZH H. Study and implementation of processing method for time-varying signal of coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(1):8-14.
- [2] 李苗,徐科军,侯其立,等. 数字科氏质量流量计正负阶跃交替激励启振方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 172-177.  
LI M, XU K J, HOU Q L, et al. Startup method of digital coriolis mass flowmeter using alternating exciting of positive-negative step signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(1): 172-177.
- [3] 郑德智,樊尚春,邢维巍. 科氏质量流量计相位差检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2005(5):441-443,477.  
ZHENG D ZH, FAN SH CH, XING W W. The novel method of phase difference detection in Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005(5):441-443,477.
- [4] HENRY M P, CLARKE D W, ARCHER N, et al. A self validating digital Coriolis mass flowmeter[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(5):487-506.
- [5] PAWLAS G, PATTEN T. Gas measurement using Coriolis mass flowmeter [A]. ISA/95 Advances in Instrumentation and Control, 1995,781-790.
- [6] SULTAN G. Single straight-tube Coriolis mass flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1992,3(4): 241-246.
- [7] 全猛,任萍,陈明. 单直管科氏质量流量计结构研究[J]. 航空计测技术, 2000,20(4):7-9.  
TONG M, REN P, CHEN M. Construction study of single and straight tube Coriolis mass flowmeter [J]. Aviation Metrology and Measurement Technology, 2000, 20(4):7-9.
- [8] 罗凡,廖俊必,杨杰斌,等. 科里奥利质量流量计密度效应研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(5):138-144.  
LUO F, LIAO J B, YANG J B, et al. Study on error

- caused by density effect of Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(5): 138-144.
- [9] 罗凡,孙玉声.不同介质对质量流量计的校准误差影响[J].中国测试技术,2007,33(6):52-54.  
LUO F, SUN Y SH. Effect on errors of mass flowmeter calibrated with different medium [J]. China Measurement Technology, 2007, 33(6): 52-54.
- [10] 阳叶,陈岳飞,罗凡.科里奥利质量流量计在高压气体标准装置中的应用研究[J].计量技术,2019(9):24-27.  
YANG Y, CHEN Y F, LUO F. Study of Coriolis mass flowmeter applied in calibration facility at high pressure [J]. Measurement Technique, 2019(9): 24-27.
- [11] 宋明刚,樊尚春.非线性对 Coriolis 质量流量测量管振动特性影响的理论研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(4): 361-365.  
SONG M G, FANG SH CH. Analytical study of the influence of nonlinearity on vibration of tube of Coriolis mass flowmeters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(4): 361-365.
- [12] 陈志勇,周斌,张嵘.微机械角振动谐振器在低气压下的非线性振动 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2482-2487.  
CHEN ZH Y, ZHOU B, ZHANG R. Nonlinear vibration of micromachined angular vibration resonator in low pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2482-2487.
- [13] 全猛,任萍,陈明,等.科里奥利质量流量计动态特性的研究 [J]. 自动化仪表, 2003, 24(11): 6-10.  
TONG M, REN P, CHEN M, et al. Study on dynamic characteristics of Coriolis mass flowmeter [J]. Process Automation Instrumentation, 2003, 24(11): 6-10.
- [14] 杨洁,叶春雷,叶峰,等.基于科里奥利质量流量计动态数据测量研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(S2): 517-519.  
YANG J, YE CH L, YE F, et al. The research of dynamic measurement based on Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(S2): 517-519.
- [15] CHEESEWRIGHT R, CLARK C, HOU Y Y. The response of Coriolis flowmeters to pulsating flows [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2004, 15(2): 59-67.
- [16] STEPHANIE E, JON J T, STEFAN N. Experimental investigation of zero phase shift effects for Coriolis flowmeters due to pipe imperfections [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011, 22(1): 1-9.
- [17] 罗凡,廖俊必,赵普俊,等. U 形管科里奥利质量流量计的灵敏度研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 255-262.  
LUO F, LIAO J B, ZHAO P J, et al. Study on sensitivity of U-shape Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 255-262.
- [18] 纪爱敏.科氏质量流量计的有限元建模及灵敏度分析 [J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(1): 78-81.  
JI AI M. Modeling and sensitivity analysis of Coriolis mass flowmeter with finite element method [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2006, 33(1): 78-81.
- [19] 蔡体菁,柳青,唐国建,等.科里奥利质量流量计  $\Omega$  形测量管的有限元分析 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 520-521.  
CAI T J, LIU Q, TANG G J, et al. Finite element analysis of  $\Omega$  tube Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(3): 520-521.
- [20] 唐国建,蔡体菁,祁立云,等.环形科里奥利质量流量计的有限元分析 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(S1): 3-4.  
TANG G J, CAI T J, QI L Y, et al. Finite element analysis of loop-tube Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(S1): 3-4.

### 作者简介



罗凡,分别在2006年和2014年于四川大学获得硕士学位和博士学位,现为中国测试技术研究院流量传感器实验室主任,副研究员,主要研究方向为流量传感器。

E-mail: 2934914@qq.com

**Luo Fan** received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Sichuan University in 2006 and 2014, respectively. He is currently an associate research fellow and the director of flow sensor laboratory at National Institute of Measurement and Testing Technology. His main research interests include flowmeter, sensor and calibration method.



甘蓉(通信作者),1991年于成都科技大学获得学士学位,2014年于成都电子科技大学获得硕士学位,现为中国测试技术研究院流量研究所副所长,副研究员,主要研究方向为流量计量与压力测试。

E-mail: lfking007@foxmail.com

**Gan Rong** (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from University of Science and Technology of Chengdu in 1991 and 2014, respectively. She is currently an associate research fellow and the deputy director of flow measurement department at the National Institute of Measurement and Testing Technology. Her main research interests include flow and pressure test technologies.