

# 利用科氏流量计测量凝析天然气的气液流量

Using Coriolis Flowmeter as Wet Gas Meter

耿艳峰 华陈权 王微微 邢兰昌

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院,山东 青岛 266580)

**摘要:** 通过研究基于科氏流量计的气液两相流计量技术,提出了科氏流量计的凝析天然气测量模型。该模型较好地表征了科氏流量计的振动频率与阻尼系数的变化规律、振动管与两相流体之间的相对运动关系等。利用 E+H 公司的微弯科氏流量计开展了一系列试验研究,并结合试验结果对流量计的参数波动特性、安装形式、两相混合物密度测量和质量流量测量等问题进行了深入分析。分析结果为利用科氏流量计实现凝析天然气的高精度计量奠定了基础。

**关键词:** 科氏流量计 计量模型 凝析天然气流量计 气液两相流 流量测量

**中图分类号:** TP216 **文献标志码:** A

**Abstract:** The research works of Coriolis meter in two-phase flow metering were reviewed, a new model of Coriolis meter for wet gas metering was proposed. The variational characteristics of Coriolis meter's parameters, such as damping, vibration frequency and the interactions between Coriolis tube and two-phase flow could be explained very well based on the proposed model. A series of experiments was carried out and some primary experimental results were analyzed, which includes the statistical features of Coriolis meter's parameter, the installation methods and the output of Coriolis meter. All of the works laid the foundation for accurately metering wet gas flow by Coriolis meter.

**Keywords:** Coriolis meter Metering model Wet gas meter Gas-liquid two-phase flow Flow measurement

## 0 引言

凝析天然气也称湿气,是指在一定气井井口温度、压力等条件下,体积含液率小于 10% 的气井产出物,其液相成分以 C5 以下的烷烃类组分为主,是非常宝贵的化工原料。现有的天然气计量以计量分离器为主,部分海上气田应用了凝析天然气流量计,这两种方式都能达到 5% ~ 10% 的生产计量要求,但无法满足产品交接、气藏管理等精度要求较高的应用需求<sup>[1-2]</sup>。

随着海上资源的深入开发,凝析天然气的分离在线计量技术研究引起了国内外研究人员的普遍关注<sup>[3]</sup>。采用凝析天然气流量计代替昂贵、笨重的计量分离器,可简化海洋油气生产平台和陆上油气输送工艺设计,降低生产与建设成本,从而提高气田开发的经济效益。

## 1 技术现状与发展动态分析

### 1.1 湿气计量技术现状

基于节流元件具有的简单实用、维护成本低等特

点,研究人员采用了各种形式的节流元件,如槽式孔板、多孔孔板、文丘里管及其改进型、V-Cone 等作为流量传感器,辅以必要的信号处理与流动模型技术,实现了凝析天然气的在线不分离计量。

目前,基于节流元件的凝析天然气计量技术可以达到±10% 以内的气液相计量精度,基本满足生产计量的精度要求。但由于节流元件的输出受流体温度、压力、密度、气液两相流流型等参数的影响,很难进一步提高计量精度。

科氏流量计是目前精度较高的单相质量流量计,其计量精度远高于节流元件<sup>[4,6]</sup>。其气体流量测量精度优于 0.35%,且基本不受流体物性、温度、压力与管道截面流速分布等因素的影响。特别是科氏流量计 1 000 : 1 的量程比能够很好地适应气液两相流动的瞬态质量流量波动,为气液两相流的高精度计量提供了可能性。

### 1.2 科氏流量计与两相流

Baker R C 和 Martin A 分别对 1994 年前后的科氏流量计的研究进展与技术进步进行了全面综述<sup>[5-6]</sup>。围绕流量计本身的性能,国内的太航仪表厂、中国测试技术研究院、北京航空航天大学、合肥工业大学、中国科技大学、西北工业大学等单位先后开展了大量的研究工作,为我国科氏流量计的研制、生产及应用奠定了坚实的基础<sup>[4,7-8]</sup>。国外的 Micro Motion、E+H、Krohne、

国家自然科学基金资助项目(编号:61071041,60672003);

山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2010FL005)。

修改稿收到日期:2012-09-28。

第一作者耿艳峰(1969-),男,2006年毕业于中国石油大学油气储运工程专业,获博士学位,教授;主要从事多相流计量技术、随钻测控技术等方面的教学与科研工作。

Foxboro 等公司则先后实现了科氏流量计的商品化,英国 Oxford、Cranfield,德国 Erlangen-Nuerenburg 等大学为科氏流量计原理作出了很多原创性的贡献<sup>[5,9]</sup>。

开展利用科氏流量计测量气液两相流研究的国内外机构有:美国 Micro Motion<sup>[9]</sup>、Foxboro 公司<sup>[10]</sup>,英国 Oxford<sup>[11]</sup>、Cranfield 大学<sup>[12]</sup>,瑞士 E+H 公司,以及我国的浙江大学<sup>[13]</sup>、西安交通大学等。由于受到二次仪表的驱动与控制能力、信号检测灵敏度与信号处理算法等方面的限制,早期认为科氏流量计只能适用于含气率小于 10% 的场合,国内外绝大多数研究集中在油水两相流、低含气稠油等被测介质。本文尝试将科氏流量计应用于含气率大于 90% 的凝析天然气计量技术研究。

在理论研究方面,Cranfield 的 Hemp J 提出了科氏流量计应用于气液两相流测量的第一个理论模型 Bubble Model<sup>[12]</sup>。E+H 的 Alfred R 等进一步将其发展成为 Moving Resonator Model。GiDRA 的 Gysling 提出了 Aeroelastic Model,用于说明由于气相存在引起的科氏流量计误差与两相流体的声速变化规律<sup>[14]</sup>。随后 Hemp J 和 Goeke J 分别从理论分析和试验研究两方面对科氏流量计的气液两相流测量特性进行了深入讨论<sup>[15]</sup>。上述理论模型较好地预测了含气率小于 10% 的气液两相流测量误差,但由于流动结构、相间作用等方面的显著差别,科氏流量计仍无法应用于含气率大于 90% 的凝析天然气计量。

在实际应用方面,Micro Motion 与 Foxboro 公司分别将科氏流量计成功地应用于油水两相流、低含气稠油的计量;Foxboro 公司正在研究将其科氏流量计应用于凝析天然气计量<sup>[16]</sup>。相比较而言,科氏流量计在油水两相流、含悬浮物的固液两相流测量中效果较好。在气液两相流测量中,流量计输出信号波动很大,有时甚至无法正常工作。为此,绝大多数研究采用了基于数据驱动的神经网络、数据融合等智能算法,以达到较高的测量精度。

现有技术存在的问题主要有以下几个方面。

① 尽管应用了智能算法的网络集成、奇异点处理等技术,仍无法解决其推广性不足的缺陷。

② 由于商品化的科氏流量计适用对象是单相流测量,气液两相流引起的内部信号波动经流量计厂家的单相流数据处理算法平滑和滤波后,不可能通过智能算法得到完全补偿。

③ 流量计输出信号的波动既是由气液两相流动的不稳定性造成的,也是由单相流信号处理算法处理两相流测量数据造成的,智能算法无法从根本上解决该问题。

综上所述,只有在充分了解气液两相流流经科氏

流量计的流动规律以后,才能建立科氏流量计的气液相流量、激振电流等输入参数与振动频率、幅度、阻尼、相位差等输出参数之间的理论模型,进而获得科氏流量计的气液两相流测量模型和更为准确的流量计信号处理算法与控制方法,从而利用科氏流量计实现气液两相流高精度计量的目的。

## 2 凝析天然气的测量模型

为简化理论分析,同时不失一般性,以单直管科氏流量计为例,根据参考文献<sup>[17]</sup>的研究结果,本文提出科氏流量计气液两相流测量模型<sup>[17]</sup>,其单相流测量模型如图 1 所示。

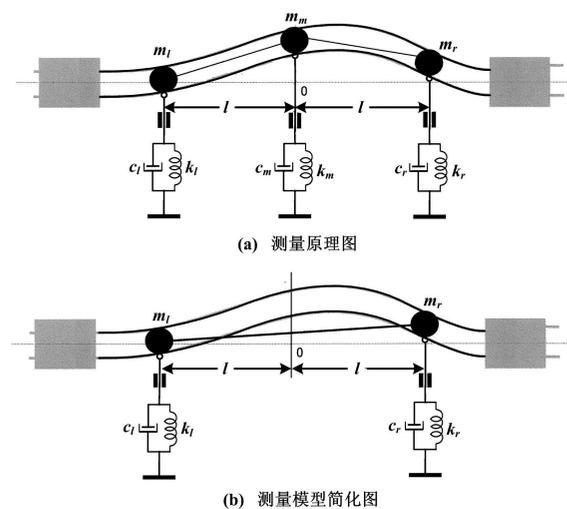


图 1 科氏流量计的单相流测量模型

Fig. 1 The model of Coriolis meter for single-phase flow

图 1 将科氏流量计等效为三个连接在一起的二阶欠阻尼振动系统,三个位置分别对应流量计的一个激励源和两个检测点的位置。若仅考虑振动系统的一阶模态,可以由图 1(a) 中的  $c_m$ 、 $k_m$ 、 $m_m$  来代替整个科氏流量计的振动状态,因为除了振幅不同以外,图 1(a) 中三个振动系统的相位、频率均相同。振动系统的二阶模态可以等效为左右两个绕中心点的小幅旋转振动,这两个振动的幅值与频率相同,但相位相反。这样,科氏流量计的工作状态就可以等效为两个检测点处的一阶振动模态与相位相反的二阶振动模态的叠加。

在单相流测量条件下,振动管内的流体被认为是不可压缩的,管内被测流体与振动管振动速度相等,故两个等效的质量块  $m_l = m_r$ ,且均正比于振动管与管内流体质量之和, $k_i$ 、 $c_i$  ( $i=l, r$ ) 分别表示振动管扭转弹性系数与机械阻尼系数。在正常工作状态下,流量计的机械阻尼由电磁激振力完全补偿,从而实现理想的等幅振动与高

精度流量测量。

在凝析天然气测量条件下,水平安装的振动管内气液两相流的流型如图 2 所示,分别是分层光滑流、分层波浪流、段塞流与环状流四种流型。

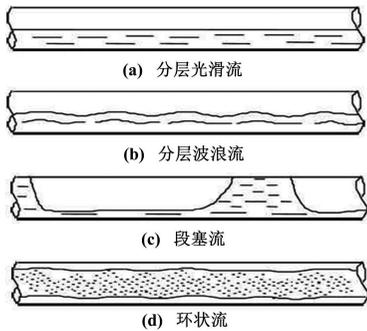


图 2 凝析天然气的常见流型  
Fig. 2 Flow regimes of wet gas

由于气相的存在,科氏流量计的测量模型不再等效为图 1(b)的简单形式。首先可能出现  $m_l \neq m_r$  的现象;其次是等效的  $c_l, k_l$  不再是常数,其数值大小受气液两相流相关参数的影响;第三,由于气体的可压缩性,气液相的振动速度与振动管的振动速度之间出现了差异,也会影响等效科氏力与阻尼系数的大小。

参考流体力学中 Sloshing Dynamics 的内容<sup>[18]</sup>,本文提出了科氏流量计测量凝析天然气模型,其示意图如图 3 所示。

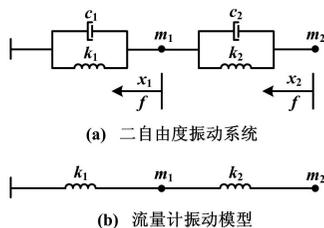


图 3 凝析天然气测量模型  
Fig. 3 The model of wet gas flow measurement

首先,将振动管的振动与被测流体的振动分开考虑,两者之间通过一个二阶振动系统进行耦合;其次将不同的凝析天然气流型等效为不同的振动参数。为简化起见,图 3(a)只画出了图 1(b)左边振动系统的等效图,右边类同。图 3(a)中,  $c_1, k_1, m_1$  分别表示振动管本身的阻尼系统、弹性系数和质量;  $c_2, k_2, m_2$  分别表示由管内两相流体等效的阻尼、弹性系数和两相质量之和;  $f$  表示流量计的激振电磁力;  $x_1, x_2$  分别表示振动管与管内流体的位移。流量计的振动方程如下:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

图 3(a)是一个二自由度振动系统,振动参数除了与振动管本身的结构、材料有关以外,还与凝析天然气流型、气液相截面含率、管道压力、流体黏度等流动参数有关。其中,由两相流体与振动管的相对运动引起的阻尼系数  $c_2$  和由气相的可压缩性引起的弹性系数  $k_2$  无法忽略。

在正常工作条件下,流量计两个振动系统的阻尼系数由激振电磁力完全补偿,振动管工作在等幅振动状态,流量计振动模型转变为如图 3(b)所示的模型。此时的振动方程式由(1)简化为:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)仍然是一个二自由度振动系统,对式(2)进行求解,即可得到振动系统的两个共振频率  $\omega_{1,2} = \sqrt{\lambda_{1,2}}$ 。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

设两个共振频率  $\omega_1 < \omega_2$ 。当流量计正常工作时,  $\omega_1$  小于相同压力的单相气体共振频率,但大于单相液体共振频率,其表示振动管与两相流体作同方向运动,  $\omega_1$  是流量计的工作频率;  $\omega_2$  大于相同压力的单相气体的共振频率,表示振动管与两相流体之间作相对运动。

当  $c_2 \rightarrow 0, k_2 \rightarrow \infty$  时,即忽略流体与振动管管壁的相对运动、假设管内流体是不可压缩流体,上述模型就是文献[17]给出的科氏流量计单相流测量模型。

### 3 试验研究

#### 3.1 试验装置简介

试验研究工作是在英国 Cranfield 大学的多相流试验装置上进行的,试验装置的组成和基本功能介绍参见文献[19]。

试验测试数据分布如图 4 所示。

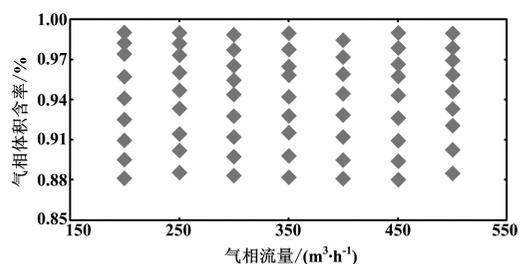


图 4 试验数据分布  
Fig. 4 The experimental data set

试验选用了两台 E+H 公司的 Promass 83F 微弯科氏流量计(研究工作获得了 E+H 公司的技术与资金支持),采集并记录了流量计内部的振动阻尼、激振电流等信号。试验管路直径为 50.8 mm,试验的气相流量为  $200 \sim 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;液相流量为  $0.11 \sim 1.5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;压力为  $100 \sim 300 \text{ kPa}$ ;折算的气相体积含率为  $88\% \sim 99\%$ ,属于凝析天然气的参数范围。两台质量流量计顺序串联,分别为垂直安装和水平安装。

### 3.2 试验结果分析

为便于叙述,以下称垂直安装的科氏流量计为  $\text{CMF}_{01}$ ,称水平安装的科氏流量计为  $\text{CMF}_{02}$ 。除专门对

比两种安装方式的测量结果以外,主要介绍  $\text{CMF}_{02}$  的凝析天然气测量特性。

#### ① 流量计参数的波动特性

气液两相流测量条件下,科氏流量计参数波动很大。流量计输出频率( $f_{\text{CMF}_{01}}$ 、 $f_{\text{CMF}_{02}}$ )、激振电流( $I_{\text{CMF}_{01}}$ 、 $I_{\text{CMF}_{02}}$ )和阻尼系数( $C_{\text{CMF}_{01}}$ 、 $C_{\text{CMF}_{02}}$ )三个参数在三种不同测量条件下的实测值如表 1 所示。测试过程中,单相气体流量为  $150 \sim 700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;压力为  $300 \text{ kPa}$ 、温度为室温;单相液体流量为  $0.2 \sim 7.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;气液两相流由  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的空气流量和  $0.45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  的水流量组成,气相含率为  $97.7\%$ 。

表 1 测量方式

Tab. 1 Data comparison of flow meter

测量方式	$f_{\text{CMF}_{01}}/\text{Hz}$	$f_{\text{CMF}_{02}}/\text{Hz}$	$I_{\text{CMF}_{01}}/\text{mA}$	$I_{\text{CMF}_{02}}/\text{mA}$	$C_{\text{CMF}_{01}}/(A \cdot \text{m}^{-1})$	$C_{\text{CMF}_{02}}/(A \cdot \text{m}^{-1})$
气相测量	$562.185 \pm 0.112$	$562.648 \pm 0.108$	$3.047 \pm 0.099$	$3.179 \pm 0.200$	$316.01 \sim 445.06$	$321.05 \sim 517.51$
液相测量	$465.230 \pm 0.005$	$465.097 \pm 0.004$	$3.358 \pm 0.047$	$3.389 \pm 0.023$	$345.46 \sim 426.15$	$345.30 \sim 394.47$
凝析气测量	$558.818 \pm 0.477$	$559.178 \pm 0.441$	$63.275 \pm 6.893$	$64.863 \pm 7.177$	$6805.74 \pm 800.40$	$6798.94 \pm 781.75$

表 1 中的数据说明,科氏流量计可以在凝析天然气测量条件下正常工作,但流量计输出参数与内部参数波动较大。

相关数据表明,两相流测量时振动频率的波动约大于气相测量的四倍,约为液相测量的 100 倍,这就必然要求对流量计的采集与控制电路、控制算法与数据处理算法作出相应的改进。

#### ② 水平安装与垂直安装的测量结果比较

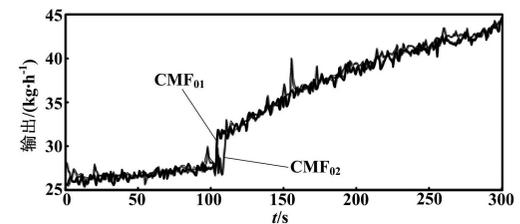
在单相流测量条件下,流量计水平安装和垂直安装区别不大。对于气液两相流测量,以上两种安装方式有很大差别。

由于垂直管道中气液两相的截面含率分布均匀,流型种类少,使得密度测量值相对稳定可靠,因此,利用伽马射线、电容/电阻等传感器进行含率测量的多相流量计更倾向于垂直安装;利用节流元件的多相流测量系统倾向于水平安装,回避垂直安装时重力压降与节流压降的难以区分的问题。

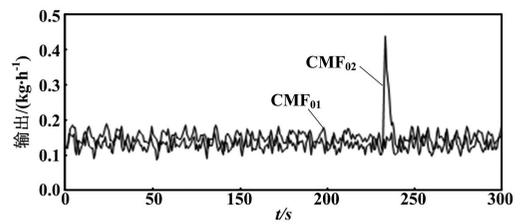
两台流量计不同安装形式的测量结果如图 5 所示。其中:图 5(a)是科氏流量计用于单相液体的测量结果,测量过程中液体流量从  $25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  变化到  $45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;图 5(b)是凝析天然气的测量结果,气相流量为  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,液相流量为  $0.11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图 5 可以看出,在单相流测量中,两种安装方式的测量结果基本相同。由于  $\text{CMF}_{01}$  安装在  $\text{CMF}_{02}$  前,图 5(a)中  $\text{CMF}_{01}$  的流量变化超前于  $\text{CMF}_{02}$ ,流量计输出信号波动是由于单相流管线中混入了少量的

气体;图 5(b)的两相流测量中,水平安装的流量计  $\text{CMF}_{02}$  输出数据大于垂直安装的  $\text{CMF}_{01}$ ,且其波动较大。



(a) 单相流测量结果



(b) 两相流测量结果

图 5 两种安装形式的测量结果对比

Fig. 5 Comparison results of two installation methods

#### ③ 两相混合物密度测量结果

流量计输出的气液两相流体密度测量值与科氏流量计的振动频率有关。

在不同气相流量下,  $\text{CMF}_{02}$  的密度输出结果与由单相气液流量换算得到的两相真实密度之间的关系如图 6 所示。

由图 6 可知,在气相流量一定的情况下,真实密度与流量计读数之间近似呈线性关系。

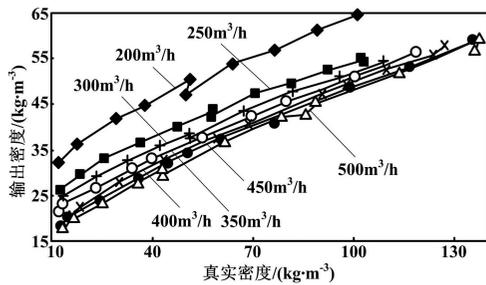


图6 流量计输出密度与真实密度  
Fig.6 Density output and true density

④ 两相混合物质量流量的测量结果

在整个测量参数范围内,流量计输出的混合物质量流量与由气液单相计量结果换算所得的两相真实质量流量之间的关系如图7所示。

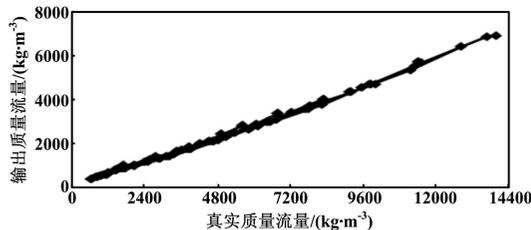


图7 输出质量流量与真实质量流量

Fig.7 Mass flowrate output and true mass flowrate

由图7可知,流量计输出值总体上低于两相真实质量流量的理论计算值,但两者之间近似呈线性关系。这种简单的线性关系说明,对流量计输出结果进行校正是可行的,并有望达到较高的校正精度,对此需要进一步研究影响线性关系斜率的主要因素。

4 结束语

理论分析与试验研究均表明,利用科氏流量计实现凝析天然气的高精度计量既是可能的,也是可行的。本文提出的科氏流量计二自由度振动模型综合考虑了气液两相流流型和科氏流量计的工作原理<sup>[20-23]</sup>,为流量计工作特性与控制方法研究提供了依据;气液两相的质量流量测量值与真实值之间存在较好的线性关系,气液两相的密度测量值能够线性地跟踪真实值的变化,可简化测量结果的修正算法,奠定了流量计实际应用基础。

参考文献

[1] 江怀友,赵文智,张东晓.世界天然气资源及勘探现状研究[J].天然气工业,2008,28(7):21-28.  
[2] Bieker P, Slupphaug O. Real-time production optimization of oil and gas production systems; a technology survey[J]. SPE Production & Operations, 2007, 22(4):382-391.  
[3] Geng Yanfeng, Zheng Jinwu, Shi Tianming. Study on the metering characteristics of slotted orifice for wet gas flow [J]. Flow

Measurement and Instrumentation, 2006, 17(2):123-128.  
[4] 樊尚春,张轩.科氏流量计的非线性影响机理分析与抑制[J].科学技术与工程,2005,5(9):569-571.  
[5] Martin A, Wolfgang D. Coriolis mass flow meters; overview of current state of the art and latest research [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6):317-323.  
[6] Weinstein A, Kassoy R. Experimental study of oscillatory motion of particles and bubbles with applications to Coriolis flow meters[J]. Physics of Fluids, 2008, 20(10):306-315.  
[7] 倪伟,徐科军.科里奥利流量计数字信号处理方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2004.  
[8] 全猛,陈明.科氏流量计理论与应用研究[D].西安:西北工业大学,2003.  
[9] Baker R. Coriolis flow meters; industrial practice and published information [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1994, 5(4):229-246.  
[10] Seeger M. Coriolis flow measurement in two phase flow [J]. Computing and Control Engineering, 2005, 16(3):10-16.  
[11] Henry M, Tombs M. Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis meter; a case study [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6):399-413.  
[12] Hemp J, Kutin J. Theory of errors in Coriolis flow meter reading due to compressibility of the fluid being metered [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6):359-369.  
[13] 马龙博,张宏建,周洪亮,等.基于 Coriolis 流量计和 SVM 的油水两相流质量流量测量的研究[J].高校化学工程学报,2007, 21(2):200-205.  
[14] Gysling L. An aeroelastic model of Coriolis mass and density meters operating on aerated mixtures [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(2):69-77.  
[15] Goeke J, Stock M. New parameters for analysis of distortions of a Coriolis mass flow meter [J]. Technisches Messen, 2007, 74(11):577-588.  
[16] Lansangan R, Skinner J. Coriolis mass flow metering for wet gas [J]. Measurement and Control, 2008, 41(7):213-216.  
[17] Storm R. Coriolis mass flowmeter and method for operating a Coriolis mass flow meters [P]. US 7136777, 2006.  
[18] Takashi I, Shin M. Auto parametric resonances in a structure/fluid interaction system carrying a cylindrical liquid tank [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005(285):517-546.  
[19] Cao Y, Hoi Y. The instruction of multiphase flow loop in Cranfield University [D]. Shrivensham: Cranfield University, 2004.  
[20] Chisholm D. Two-phase Flow Through Sharp-Edged Orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1977, 19(3):128-130.  
[21] Lin Z H. Two-phase Flow Measurement with Sharp-edged Orifices [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(6):683-693.  
[22] Huang Zhiyao, Xie Dailiang, Zhang Hongjian, et al. Gas-oil two-phase flow measurement using an electrical capacitance tomography system and a Venturi meter [J]. Flow Measurement and Instrument, 2005, 16(2):177-182.  
[23] 林宗虎.气液固多相流测量[M].北京:中国计量出版社,1988:82-86.