

科氏质量流量计在外输原油自动计量中的应用

刘志成 陈祥光

北京理工大学化工与环境学院 北京 100081

摘要 科氏质量流量计是一种多功能仪表,在液体计量方面有着广泛的应用前景。本文从其工作原理出发,建立了科氏质量流量计的直接测量参数与间接测量参数之间的关系模型,分析了其间接测量的不确定度,提出了采用科氏质量流量计和低含水分析仪构成原油外输动态油量自动计量系统。计算表明,该自动计量系统具有较高的测量精度,可满足原油外输计量精度的要求,为外输原油自动计量方式的正确、合理选择提供了理论依据。

关键词 自动计量;密度;质量流量;含水率;计量精度

中图分类号: N945.23 **文献标识码:** B

The Application of Coriolis Mass Flow Meter
in automatic Measurement of Transporting Crude Oil

Liu Zhicheng, Chen Xiangguang

School of Chemical Engineering and the Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract— Coriolis mass flow meter is a multi-function measurement instrument; it will be widely applied in liquid measurement field. The working principle of Coriolis mass flow meter was analyzed, and the relationship model between direct measurement parameters and the indirect measurement parameters was built. The uncertainty of the indirect measurement parameters was analyzed; the automatic measuring system for dynamic quantity of crude oil that employs a Coriolis mass flow meter and an analysis instrument for low water content ratio was presented. The calculation results show that the system can achieve higher measurement precision and accord with the requirement of automatic and accurate measurement of transporting crude oil, providing the principle basis for reasonable and optimal selection of automatic measuring method for transporting crude oil.

Keywords— Automatic, Computation, Density, Quality Flux of Oil, Water Content Ratio, Measuring Precision

1 引言

外输原油参数检测与油量自动计量,为油田贸易结算工作提供现场数据,计量的准确性直接关系到油田生产部门的经济利益和信誉,该项技术指标一直受到了有关方面的高度重视。传统的计量方式是体积流量计、密度计、原油含水分析仪组合在线测量法^[1]。多年来,为了保证其计量的准确性和可靠性,广大科技工作者围绕体积流量计的选型做了不少试验研究工作,着重研究涡轮流量计、涡街流量计及腰轮流量计等,但其检测效果仍不够理想,其主要问题是上述几类流量计的稳定性较差,要求配备标准体积管标定装置,在现场对流量计进行定期标定^[2]。虽然,计量的准确性和可靠性提高了,但投资和运行成本也明显增加。近年来,随着信息获取和处理技术的发展,科氏质量流量计的准确性、稳定性及可靠性也随之提高^[3-5]。由于科氏质量流量计可以在线测量原油(混合液)的质量流量、密度及温度,并由此可计算出纯油的质量流量、水的质量流量、含水率等参数^[6-7]。然而,单独将该仪表用于外输原油计量时,仍存在较大的误差。本文通过分析科氏质量流量计的测量原理,建立直接测量参数和间接测量参数与测量不确定度的定量关系,提出了改善外输原油自动计量精度的可行方案。

2 科氏质量流量计的工作原理

科氏质量流量计由两部分组成:一是振动管(传感器);二是电子组件组成的转换器。转换器包括激振器、拾

振器、位移检测器、时间差检测器及放大电路等几个部分，其作用是使振动管产生振动并处理来自振动管的信息，以实现参数检测。流体流经振动管时，流体的质量流量参数和密度参数分别被转换成时间变量和频率变量，由转换器检测并处理。振动管有U形、环形、直管形等多种形状，但基本原理相同，这里以U形管式为例说明质量流量计的测量原理。

2.1 液体密度的测量

U形振动管用恒弹合金制成，它的两端被固定在基座上，在流量计工作时，U形振动管在激振线圈的作用下做简单振动，又在反馈电路的作用下使之总是振动在谐振频率上，其原理类似于单自由度理想的质量—弹簧—阻尼系统，如图1所示。由达朗贝尔原理，单自由度理想的质量—弹簧—阻尼系统的自由振动频率为^[8]：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

即无阻尼的自由振动频率只与振动元件的刚度和质量有关。

在科氏质量流量计中，为了保证U形振动管在其谐振频率上振动，设计了如图2所示的正反馈系统。

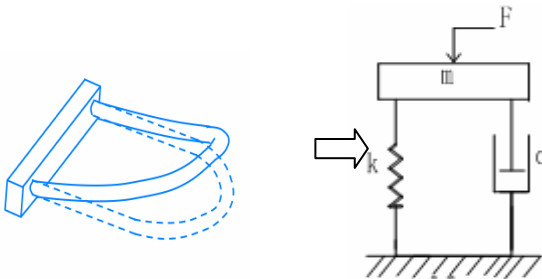


图1 U形振动管及其力学模拟示意图

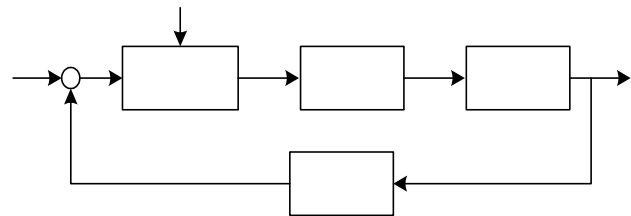


图2 维持U形振动管谐振的系统方块图

被测介质流经振动管时，被测介质随着U形振动管一起振动，由于振动质量的有效部分附加了介质的质量，因此使振动系统的总质量发生变化，从而改变了系统的固有振动频率。此频率由拾振器检测、放大器放大并输出，其输出也是激振器的输入，激振器据此产生激振力以平衡阻尼力，使U形振动管在其谐振频率上作等幅振动。显然不同的介质密度将产生不同的系统固有振动频率，测出系统的固有振动频率，即可确定被测介质的密度值。

对于U形振动管而言，振动的频率与流体密度的数学模型如下^[9]：

$$\rho = K_1 \left(\frac{K_2}{f^2} - 1 \right) \quad (2)$$

式中 f 为振动管振动频率；

ρ 为被测液体在工作状态下的密度；

在一定的温度条件下， K_1 、 K_2 是与U形振动管结构参数和材质有关的常量。在仪表设计中，为了保证测量精度，在振动管外壁贴有一个铂电阻，用来测量介质温度，并对 K_1 、 K_2 进行补偿，因此，密度的测量精度就取决于频率的测量精度。目前国产质量流量计的密度测量精度为 $\pm 0.003 \text{ g/cm}^3$ ，国外的精度可达 $\pm 0.002 \text{ g/cm}^3$ 。

2.2 液体质量流量的测量

当U形管内充满流体而流速为零时，如前所述，在激振器的作用下，U形振动管要绕Z轴，按其本身的性质和流体的质量所决定的固有频率做简单的等幅振动（见图3）。

当流体的流速为 u 时，流体质点在旋转参照系中做直线运动，由力学理论可知，此时流体质点要同时受到旋转角速度 ω 和直线速度 u 的作用，对管壁产生一个反作用力 F ，即科里奥利力^[10]。

$$F = 2mu \times \omega \quad (3)$$

式中 F 、 u 、 ω 都是向量； m 为流体的质量。

由于入口侧和出口侧流体的流向相反，由右手定则可知，在U形振动管向上振动时，流体作用于入口侧管端的向下力为 F ，作用于出口侧管端的向上力亦为 F （向下振动时，受力方向正好相反），如图3所示。由于在U形振动管的两侧，受到大小相等、方向相反的作用力，使U形振动管在等幅振动上叠加了扭曲运动，如图4所示。

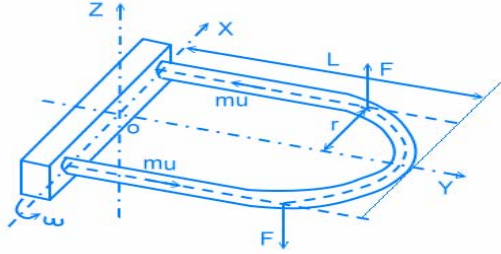


图3 U形振动管受力分析

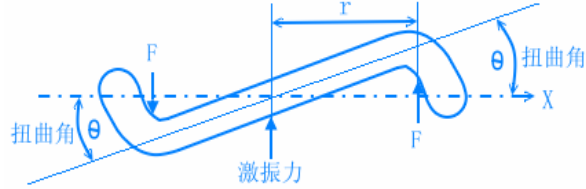


图4 U形振动管扭曲运动示意图

由于扭曲变形是伴随着U形管的振动运动发生的，使得在振动过程中，入口端先于出口端越过中心线，其时间差 Δt 随着流量的增大而增大，其数学关系如式（4）所示：

$$q = \frac{K_s}{8r^2} \Delta t \quad (4)$$

对于确定的U形管，上式中 K_s 、 r 为常数。因而流过科氏质量流量计的质量流量 q 与时间差 Δt 成正比。这个时间差由转换器检测并整形放大，然后通过对时间积分得出与质量流量成比例的信号。目前，广泛使用的质量流量计的测量精度在0.15%~0.5%之间。

2.3 含水率的测量及不确定度分析

2.3.1 含水率测量

从以上分析过程不难看出，通过流量计直接测量的只有质量流量、密度及温度这三个参数，其余参数是根据这三个参数计算的结果得到。当质量流量计应用于原油计量时，含水率就是由混合液密度计算而来。含水率的计算是基于混合液的密度随含水率的变化而变化这一原理的，设在油水混合液中，矿化水的密度为 ρ_w ，纯油的密度为 ρ_o ，混合液的密度为 ρ ，质量含水率为 C_w ，则其数学模型如式（5）所示：

$$C_w = \frac{\rho_w(\rho - \rho_o)}{\rho(\rho_w - \rho_o)} \quad (5)$$

所以，在纯油和纯水（实际上是矿化水）的密度一定时，根据测出的混合液的密度就可计算出质量含水率。

2.3.2 测量不确定度分析

由（5）式不难看出，含水率的计算精度取决于混合液密度 ρ 的精度及矿化水密度 ρ_w 和纯油密度 ρ_o 的输入精度。由于属于间接测量，且各影响量 ρ 、 ρ_o 、 ρ_w 不相关，所以 C_w 的标准不确定度 $u_c(C_w)$ 可按下式计算：

$$u_c(C_w) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_w}{\partial \rho}\right)^2 u(\rho)^2 + \left(\frac{\partial C_w}{\partial \rho_o}\right)^2 u(\rho_o)^2 + \left(\frac{\partial C_w}{\partial \rho_w}\right)^2 u(\rho_w)^2} \quad (6)$$

式中 $u(\rho)$ 、 $u(\rho_o)$ 、 $u(\rho_w)$ 分别为 ρ 、 ρ_o 、 ρ_w 的标准不确定度， $\frac{\partial C_w}{\partial \rho}$ 、 $\frac{\partial C_w}{\partial \rho_o}$ 、 $\frac{\partial C_w}{\partial \rho_w}$ 分别为 ρ 、 ρ_o 、 ρ_w

对 C_w 的灵敏系数。

一般外输原油的含水率允许极限值为1%，即 C_w 取0.01；纯水的密度 ρ_w 取 1.000 g/cm^3 ；纯油的密度 ρ_o 分别取 0.800 g/cm^3 （轻质原油类）、 0.900 g/cm^3 （中质原油类）、 0.950 g/cm^3 （重质原油类），由式（5）计算各灵敏系数。

根据密度的测量精度，极限误差为 0.002 g/cm^3 ，纯油和纯水的密度极限误差为 0.001 g/cm^3 ，并按均匀分布考虑，那么 $u(\rho) = 0.002/\sqrt{3}$ ； $u(\rho_o) = 0.001/\sqrt{3}$ ； $u(\rho_w) = 0.001/\sqrt{3}$ ，代入（6）式计算标准不确定度，结果见表1。

含水率误差也按均匀分布考虑，其可能极限误差 $\Delta C_w = \sqrt{3}u_c(C_w)$ ，计算结果也列入表1中。

g/cm^3	$u_c(C_w)$	ΔC_w
0.800	0.008	0.014
0.900	0.014	0.025
0.950	0.027	0.047

从表1中可以看出：含水率的测量精度较低，误差随着纯油密度的增大而显著增大。

3 原油流量计量准确度分析

当采用科氏流量计计量外输原油流量时，根据流量计测出的质量流量 q 和质量含水率 C_w ，按照下述公式计算出纯油流量：

$$M_a = q(1 - C_w)F_a F_m \quad (7)$$

表1 含水率测量不确定度计算表

根据国家标准“原油动态计量一般原则”和行业标准“油田油气集输设计规范”的规定，原油输量计量分为三级：一级计量是油田外输原油的交接计量，其计量准确度应在 $\pm 0.35\%$ 以内；二级计量是油田内部净化原油或稳定原油的生产计量，其计量准确度应在 $\pm 1\%$ 以内；三级计量是油田内部含水原油的流量计量，其计量准确度应在 $\pm 5\%$ 以内。油田单井计量的准确度应在 $\pm 10\%$ 。原油动态计量准确度的确定通常采用极限误差均匀分布法，其计算公式为：

$$A_a = \pm K_{0.01} \sqrt{\frac{e_1^2}{3} + \frac{e_2^2}{3} + \Lambda + \frac{e_n^2}{3}} \quad (8)$$

式中 A_a 为原油动态计量系统准确度； $K_{0.01}$ 为置信概率为99%时的置信因子； e 为极限误差。假设 $e_1 \geq e_2 \geq e_3 \geq e_n$ ，根据它们的比值近似确定 $K_{0.01}$ 。

在此，设 e_1 为含水率极限误差，按轻质原油考虑，其值为0.014； e_2 为质量流量极限误差，取其值为0.002， $K_{0.01}$ 取值为1.85代入（8）得：

$$A_a = 1.85 \sqrt{\frac{0.014^2}{3} + \frac{0.002^2}{3}} = 1.5\% \quad (9)$$

对照上述标准，显然单纯使用科氏质量流量计不能满足外输原油计量准确度的要求，为了保证计量精度，必须另配高精度低含水分析仪。假设低含水分析仪的精度为0.1%，代入（8）式得： $A_a = 0.24\%$ ，则完全满足外输原油计量准确度的要求。因此，为了提高检测精度，纯油流量计量公式（7）中的质量含水率 C_w 应通过低含水分析仪检测获得。

4 结论

通过分析科氏质量流量计的工作原理,建立了直接测量参数与间接测量参数之间的关系,定量分析了科氏质量流量计用于外输原油自动计量的不确定度,计算表明:只要合理选择低含水分析仪的精度,科氏流量计可以用于外输原油纯油量自动计量,能满足较高的计量准确度要求。本文的创新点是提出了采用科氏质量流量计和低含水分析仪计量外输原油纯油量的方案。该方案与传统的方案相比,有明显的优势和广泛的应用前景。如果能定期对纯油密度及纯水密度进行核查,并辅以温度、压力补偿,外输原油自动计量的准确度和可靠性会更好。此方案正在某油田试运行。

参考文献

- [1] 许战, 蒋焱. 质量流量计的应用[J]. 石油规划设计, 1998, 4, pp. 33~34
- [2] 高立新. 完善的净油监测技术[J]. 国外油田工程, 2001, 17(5), pp. 35~36
- [3] 于翠欣. 科里奥利质量流量计数字信号处理系统的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学自动化研究所, 2000
- [4] 徐科军, 倪伟. 一种科里奥利质量流量计的信号处理方法[J]. 计量学报, 2001, 22(4), pp. 254~259
- [5] 杨乐平. 质量流量计计算机远程监测系统的设计域实现[J]. 微计算机信息, 1997, 13(4), pp. 68~70
- [6] 高法会, 韩宝龙. 单井计量中的仪表选型[J]. 石油仪器, 2002, 17(5), pp. 53~55
- [7] Nichollson S, Coriolis Mass Flow Measurement[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Flow Measurement, Galsgow, July1994, pp. 13~17
- [8] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, pp. 44~45
- [9] 张鹏, 任建新, 任思聪. 质量流量计测量液体密度的特性分析[J]. 工业仪表与自动化装置[J], 1995, 5, pp. 3~6
- [10] 范玉久. 化工测量及仪表[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, pp. 203~208

作者简介:

刘志成, 男, 汉族, 山西离石人, 博士研究生, 主要从事智能测控技术、传感器技术研究。联系方式:

3569375@bit.edu.cn ;

陈祥光, 男, 汉族, 福建福安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能测控技术、建模与仿真、故障诊断与隔离技术研究。联系方式: xgc1@bit.edu.cn