

Comparison and Analysis of Measurement Methods for Flow Stability

Tao Meng^{1,2}, Chi Wang², Xiaopeng Li², Chao Xing², Bo Wu³

¹School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing

²Chinese Academy of Metrology Science, Beijing

³Guangzhou Energy Testing Institute, Guangzhou Guangdong

Email: mengt@nim.ac.cn

Received: Jun. 1st, 2018; accepted: Jun. 19th, 2018; published: Jun. 26th, 2018

Abstract

The technical level of the water flow facility is usually determined by the quality of the water pump and valve, the method of steady flow or steady pressure and the design of the pipe structure, and is directly reflected in the key parameter flow stability. However, the existing stability measurement methods are difficult to distinguish between the actual flow fluctuation and the noise of the flowmeter, and the test results are easily affected by the principle of the flowmeter, the sampling rate and the response time. Compared with all the test results of the flowmeter, the turbine flowmeter has the highest sampling rate and the fastest response time. However, compared with the pressure sensor, the response time of the turbine flowmeter is still slower about 0.1 s, and there is a good phase between the measurement results of the turbine flowmeter and the Coriolis flow meter. The results show that the test results reflect the actual flow fluctuation of the facility. In addition, one of the advantages of using two different types of pressure sensors is the ability to detect high frequency flow fluctuations.

Keywords

Water Flow Facility, Flow Stability, Turbine Flowmeter, Electromagnetic Flowmeter, Mass Flowmeter

流量稳定性测量方法的对比与分析

孟涛^{1,2}, 王池², 李晓鹏², 邢超², 吴波³

¹北京航空航天大学, 仪器科学与光电工程学院, 北京

²中国计量科学研究院, 北京

³广州能源检测研究院, 广东 广州

Email: mengt@nim.ac.cn

收稿日期: 2018年6月1日; 录用日期: 2018年6月19日; 发布日期: 2018年6月26日

摘要

水流量装置的技术水平通常由所采用的水泵和阀门质量、稳流或稳压方法以及管道结构设计来决定,并直接反映在流动稳定性这项关键参量之中。然而,现有的稳定性测量方法很难区分实际的流量波动和流量计的噪声,并且测试结果易受流量计工作原理、采样率及响应时间的影响。针对所有安装流量计的测试结果进行比较后发现,涡轮流量计具有最高的实际采样率和最快的响应时间,然而与压力传感器相比,涡轮流量计的响应时间仍然慢约0.1 s;涡轮流量计和科里奥利流量计的测量结果之间有着良好的相关性,表明该试验结果反映了设备的实际流量波动。此外,使用两种不同类型压力传感器的一大优势是能够检测高频的流量波动。

关键词

水流量装置, 流量稳定性, 涡轮流量计, 电磁流量计, 质量流量计

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在工业过程控制仪表行业中,流量计的发展非常迅速[1],为了适应各种用途和需求,各种类型的流量计不断涌现,如典型的差压流量计、电磁流量计、超声波流量计、质量流量计等[2] [3]。针对流量稳定性的测量一直以来都是流量测量领域的热点和难点,在使用流量计测量装置稳定性时,需要了解流量计的动态响应特性,即了解流量计是否能快速地跟上瞬时流量的变化[4]。具体来说,动态流量测量的特点是要求流量计对流量的变化具有良好的响应特性,能够较为准确地反映出流量变化幅度,与测量的准确度相比,更注重流量计在单次测量过程中的短期稳定性,而对长期稳定性要求不高[5] [6] [7]。

流量仪表在设计 and 生产阶段,为了获得较好的测量准确度和信号输出效果,都会在处理原始信号时加入大量后处理算法,这样做不仅会产生延时,而且会滤掉部分有用的动态信号,但厂家往往并不会针对有关参数进行说明。因此,为了确定装置真实的流量稳定性,采用实验的方法筛选出合适的稳定性测试仪表就显得至关重要。

2. 实验平台和方法

2.1. 实验装置

流量稳定性测试实验在德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 简称 PTB)的热水标准装置(缩写为 WZP)上进行,该装置以水为流动介质,主要用于测量或校准 DN80~DN400 口径范围的流量传感器其相对测量不确定度达到 0.04% ($k = 2$),是公认的世界上最先进的水流量装置之一。装置的技术指标见表 1。

2.2. 测试管段布置

WZP 装置拥有超过 25 m 的测试管段,并允许串联安装多个测试设备,管道结构示意图如图 1 所示。

如图 1 所示, 所有的仪表都安装在 DN80 口径的测试管道上, 从左至右依次标记为 1~8。第一台设备为 LDA (1), 它被安装在距离管道入口端 4 m (即 50 D) 远处(2), 这样就能避免入口处扰流引起的干扰; 外夹式时差法超声波流量计(3)和电磁流量计(4)都安装在涡轮流量计的上游(7), 对本实验中采用的激光多普勒测速系统而言, 要求这种安装方式不会对各流量仪表附近管路的流场分布产生影响; 科里奥利质量流量计安装在所有测试设备的最下游(8), 这是因为质量流量计对流场影响较不敏感, 此外, 由于实验用的科里奥利质量流量计为 DN50 口径, 因此还需要使用变径管将该段测试管道从 DN80 口径减小为 DN50 口径。在随后的实验过程中, 还额外使用了一台文丘里管流量计来进行测试。

各测试仪表的性能参数如表 2 所示。

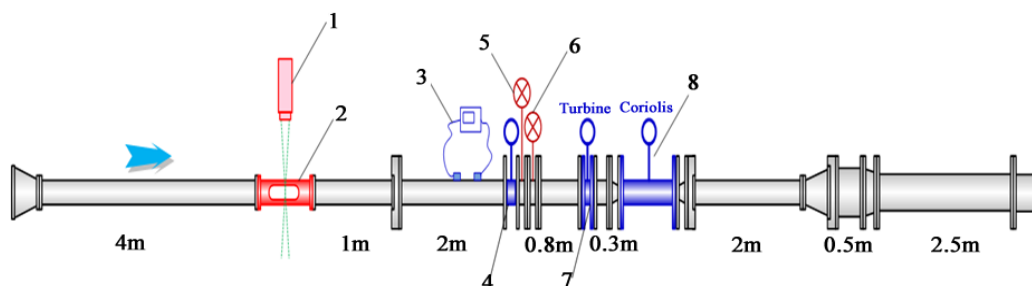


Figure 1. A schematic diagram of a test instrument and a pipe connection. 1-LDA, 2-LDA measuring chamber, 3-External clamp time difference ultrasonic flowmeter, 4-Electromagnetic flowmeter, 5-Pressure sensor 1, 6-Pressure sensor 2, 7-Turbine flowmeter, 8-Coriolis mass flowmeter

图 1. 测试仪器及管路连接示意图。1-LDA, 2-LDA 测量腔, 3-外夹式时差法超声波流量计, 4-电磁流量计, 5-压力传感器 1, 6-压力传感器 2, 7-涡轮流量计, 8-科里奥利质量流量计

Table 1. Main technical parameters of WZP facility

表 1. WZP 装置主要技术参数

| 管路口径与流量 | 测量温度范围 | 温度漂移 | 流体雷诺数 |
|-------------------------------------|--------|----------|--|
| DN80~DN400 3~1000 m ³ /h | 3~90℃ | <50 mK/h | $0.16 \times 10^4 \sim 5.42 \times 10^6$ |
| 称重罐容量 | 测试管路长度 | 管路粗糙度 | 相对测量不确定度 |
| 20 Mg | 25 m | <0.5 μm | $<4 \times 10^{-4}$ ($k=2$) |

Table 2. Parameters for flow measurement instruments tested

表 2. 测试的流量测量仪表参数

| 仪表 | 口径 mm | 最大流量 m ³ /h | 输出信号类型 | 输出信号单位 | 最大输出 |
|-----|-------|------------------------|--------|--------|--------|
| TFM | 80 | 180 | 频率 | Hz | 680 |
| CMF | 50 | 180 | 频率 | Hz | 1000 |
| EMF | 80 | 180 | 频率 | Hz | 10,000 |
| UFM | 80 | 200 | 频率 | Hz | 1000 |
| LDA | 80 | / | 流量示值 | Hz | 100 |
| VFM | 100 | 140 | 电流 | mA | 20 |

注: 表中仪表缩写字母含义(本文中均使用该缩写), 如 TFM-涡轮流量计; CMF-科里奥利质量流量计; EMF-电磁流量计; UFM-外夹式时差法超声波流量计; VFM-文丘里管流量计。

2.3. 数据采集装置

实验采用的数据采集系统主要由主机、测试和采集板卡组成，其中机箱为美国 NI 公司研制的 PXIe-1071 型机箱，采集硬件则使用 NI 公司的 PXI6341 和 PXI6614 型高速采集板卡来对传感器信号进行实时采集，测量时各流量与压力测量仪表将记录的频率或模拟量信号通过数据线传递至板卡，再从板卡传送并储存在机箱中。它们都是通过 Lab VIEW 软件来进行控制，数据采集单元的程序界面见图 2。

2.4. 实验方法

根据各流量计的最佳工作范围，本次流量稳定性实验将主要在 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量进行测试，每次实验时间不小于 3 min。

3. 流量计输出信号特性

3.1. 涡轮流量计

实验中使用了 1 台由 Smith Meter 公司生产的涡轮流量计，其频率信号输出如图 3 所示。

图 3 中每个数据点都是涡轮发出的每个脉冲的频率值，左侧纵坐标为频率，右侧纵坐标为与频率对应的流量值。图中曲线波动较大且呈现明显的周期性，如被红色虚线分割开的每 16 个采样点为一完整周期，这与涡轮的叶片数相同。

3.2. 科里奥利质量流量计

科里奥利质量流量计的频率信号输出形状由一连串大小不等的恒定值构成，见图 4。

由图 4 可知，在不同流量条件下，每个“台阶”的示值几乎相等，其宽度约为 0.1 s，这就意味着每隔 0.1 s 流量计即可输出一个新的流量值。因此，10 Hz 即可认为是科里奥利质量流量计在采集瞬时流量过程中的最高采样率，这一数值要远远低于其在 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量条件下的频率输出信号 287 Hz。

3.3. 电磁流量计

电磁流量计的频率信号输出曲线与科里奥利质量流量计的相似，都表现为大小不等的阶梯状图形，如图 5 所示。每个“台阶”的宽度大约是 0.06 s，这与电磁流量计内部的磁场极性转换周期相吻合。值得注意的是，实验过程中的监测信号质量较差，故存在一定程度的噪声干扰。

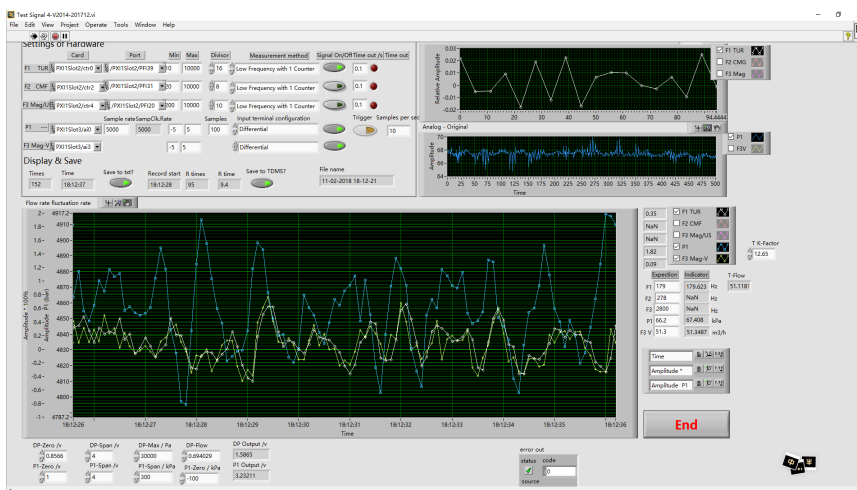


Figure 2. Interface of data acquisition program
图 2. 数据采集程序界面

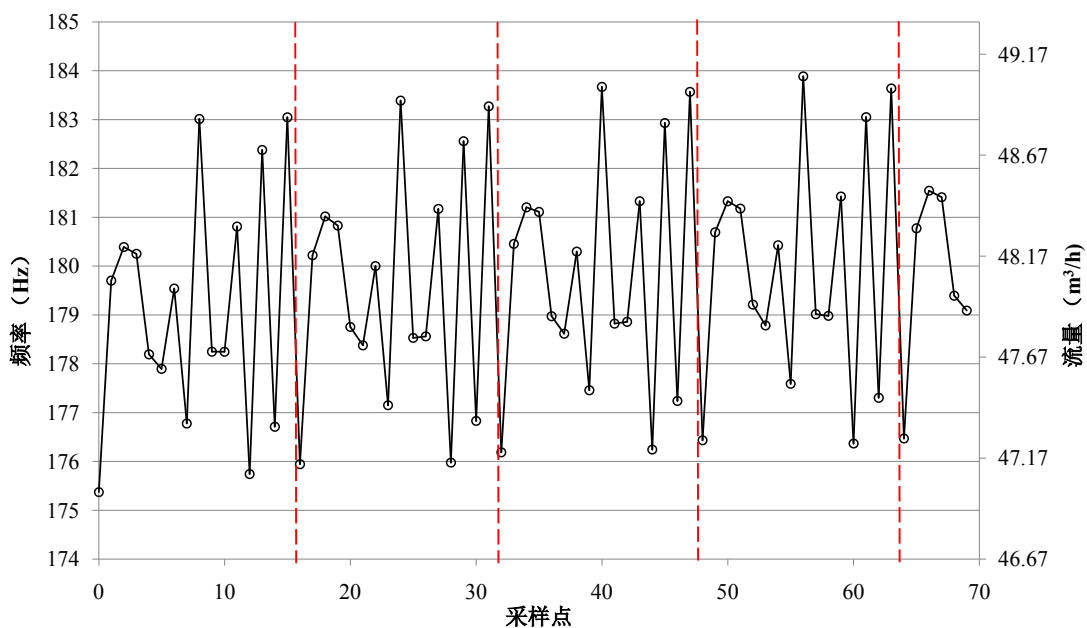


Figure 3. The frequency output signal of a turbine flowmeter

图 3. 涡轮流量计频率输出信号

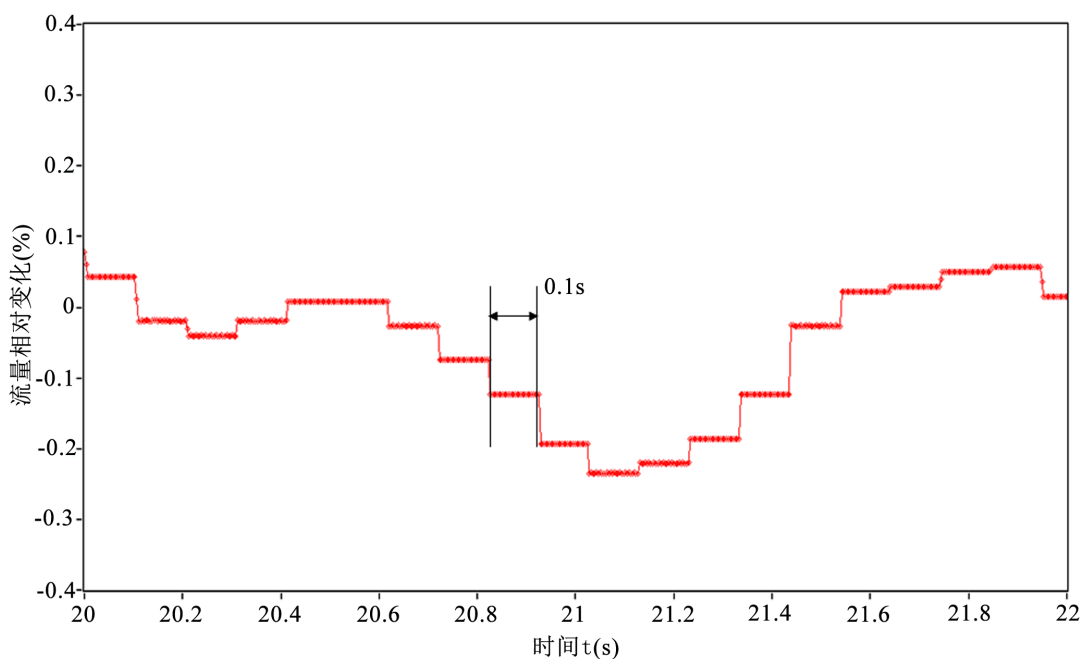


Figure 4. Frequency output signal of Coriolis mass flowmeter

图 4. 科里奥利质量流量计的频率输出信号

3.4. 时差法超声流量计

如图 6 所示, 在时差法超声流量计的频率输出信号中也能够观察到阶梯形状, 并且此次每个测量周期里包含一个长“台阶”和三个短“台阶”。然而“台阶”的宽度却都很长(大于 1 s), 这表明超声流量计的响应速度太慢, 无法真实地反映出管路流量的实时变化。

3.5. 多普勒测速仪

如图 7 所示, 采用多普勒测速仪(LDA)测得的信号曲线波动比较剧烈, 振幅超过 $\pm 5\%$ 。即使对其进行滤波处理, 与涡轮流量计相比, 它仍不能清楚地显示出波动模拟实验条件下 $q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $(1 \pm 5\%)f_{ps}$ (f_{ps} 为水泵的设定频率)波形的规律。这主要由于激光的测量针对的是一个非常小区的域内粒子的速度, 而没有实现单点流速到流量的积分, 所以信号过于分散。

3.6. 文丘里管流量计

为了提高实际采样率, 本实验选用瑞士 Keller 公司生产的 PD23 型差压传感器, 该传感器最高频响可达 5 kHz。截取其测试时间为 1 s 的实验数据, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 该流量计具有良好的动态性能, 但具有明显的噪声信号。

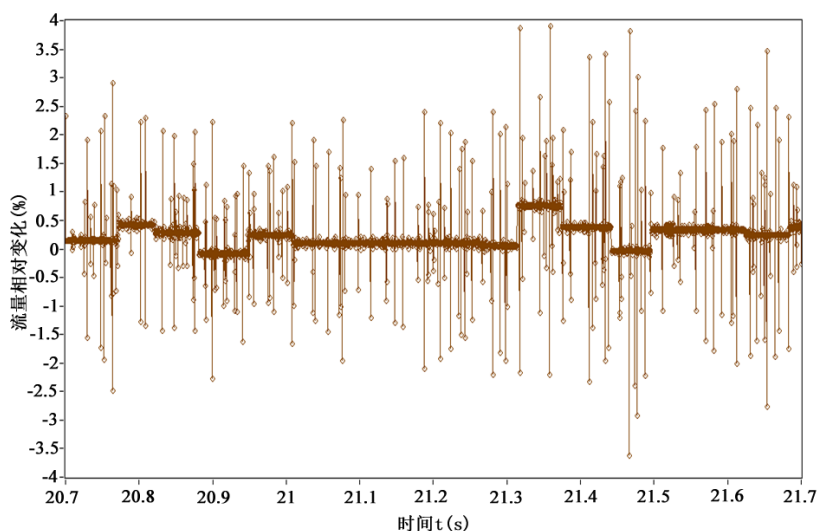


Figure 5. Frequency output signal of electromagnetic flowmeter

图 5. 电磁流量计的频率输出信号

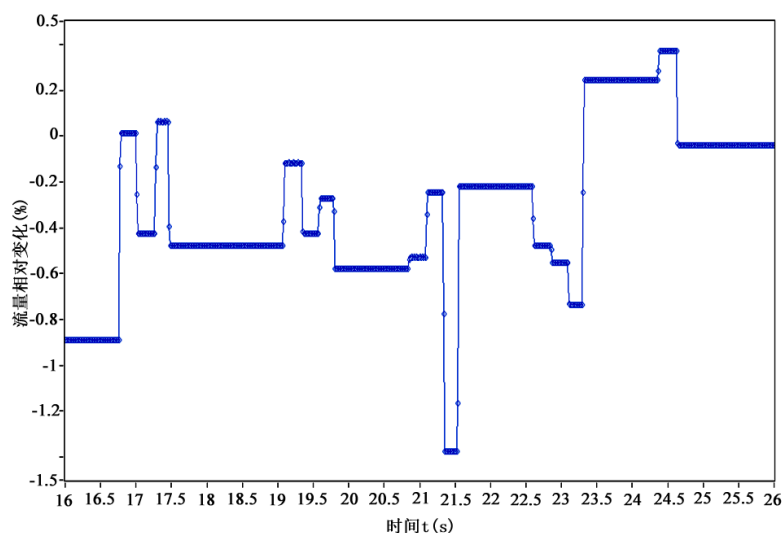


Figure 6. Frequency output signal of time difference ultrasonic flowmeter

图 6. 时差法超声流量计的频率输出信号

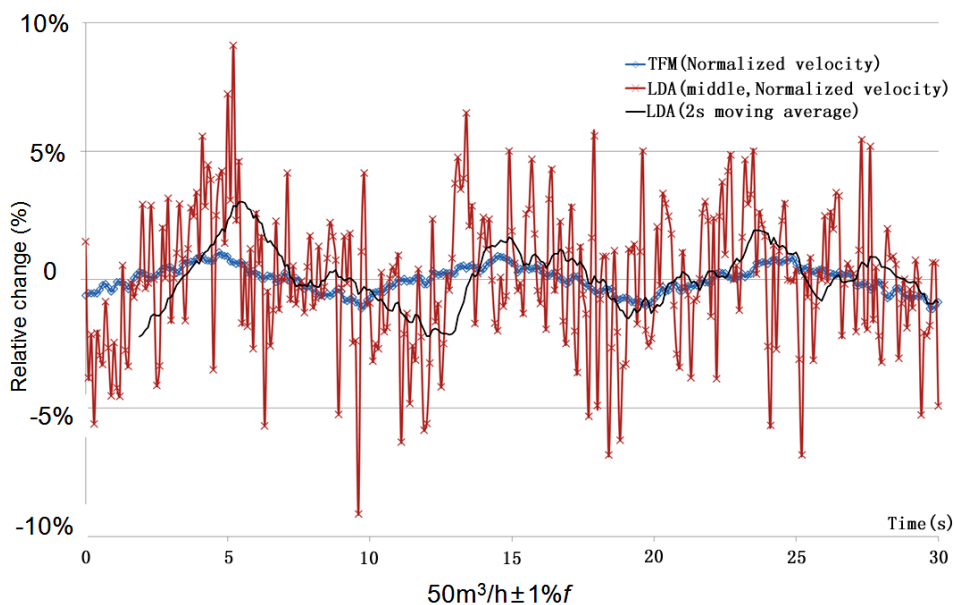


Figure 7. Comparison of measurement results of LDA and turbine flowmeters for fluctuating signals
图 7. LDA 与涡轮流量计对波动信号测量结果对比

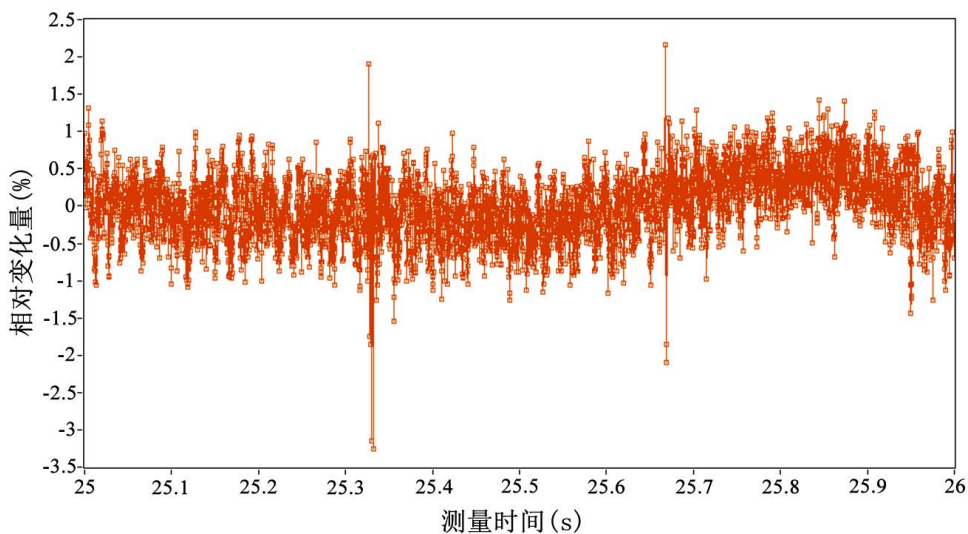
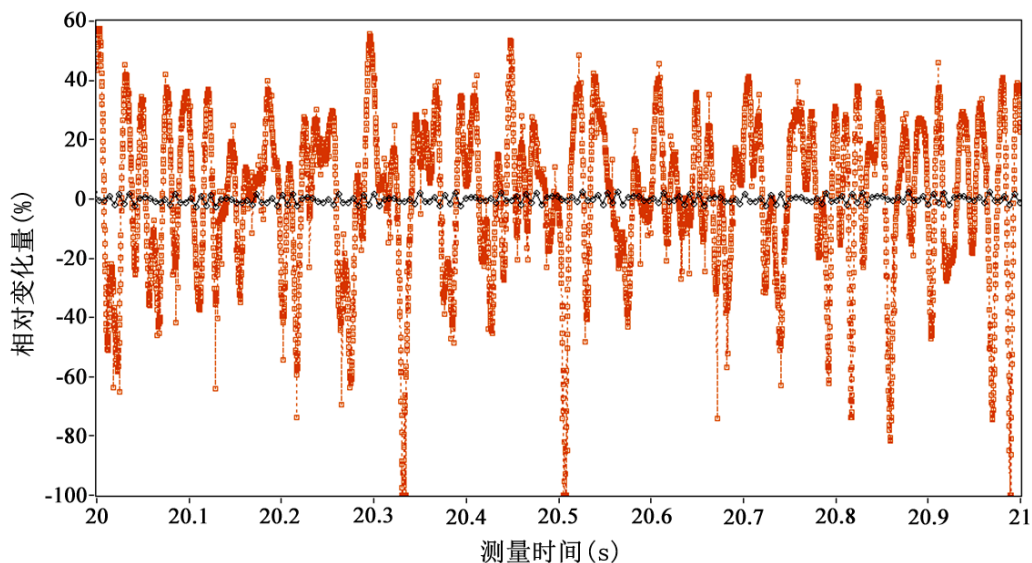


Figure 8. Output signal of venturi tube flowmeter under normal condition
图 8. 正常状态下文丘里管流量计的输出信号

上图中的噪声信号是可以通过取平均值降频或均值滤波等方法滤除的。但在实际应用中，我们也发现差压传感器非常容易受到外界的信号干扰，如使用同一台文丘里管流量计在另外一套流量装置的实验中，差压传感器受到了管道振动强烈干扰，其实验数据如图 9 所示。该实验采用文丘里管流量计与涡轮流量计串联，涡轮流量计测到的流量波动幅度仅为 1% 左右的水平，而文丘里管流量计信号呈现巨幅振荡，已无法正常工作。

4. 实验结果分析与结论

经过上述实验得到各测量仪表的实际采样率对比如表 3 所示。



菱形图标：涡轮流量计信号；方形图标：文丘里管流量计信号。

Figure 9. Output signal of Venturi tube flowmeter affected by vibration
图9. 受振动干扰的文丘里管流量计输出信号

Table 3. Comparison of actual sampling rates of measuring instruments
表3. 测量仪表的实际采样率对比

| 流量 m ³ /h | 输出频率 Hz | | 最小采样周期 | 实际最大采样率 Hz | | 阻尼时间 s |
|----------------------|---------|--------|------------------------|------------|-------|--------|
| | 50 | 120 | | 50 | 120 | |
| TFM | 175.3 | 420.9 | 单个脉冲 | 175.3 | 420.9 | / |
| | | | 16 个脉冲为一组 ¹ | 11.0 | 26.3 | |
| CMF | 277.8 | 666.7 | 0.1 s | 10.0 | | 0.2 |
| EMF (f) ² | 2777.8 | 6666.7 | 0.06 s | 16.7 | | 0.0 |
| UFM | 250.0 | 600.0 | >1 s | 1.0 | | 1.0 |
| VFM | / | / | 0.2 ms | 5000 | | / |
| LDA | / | / | ≈0.1 s | 100 | | / |

注1：涡轮流量计的轴频；注2：EMF (f)为电磁流量计(EMF)的频率输出信号。

从表3中可以看出，在所有的流量计里文丘里管流量计拥有最快的采样速度，涡轮流量计次之，这是因为它们与流量相关的原始信号被直接测量，而其他几台流量计还需要一段很短的时间来进行信号的处理、计算和转换，这也是质量流量计、电磁流量计等输出信号曲线呈现出阶梯状的原因。

但从信号质量角度看，直接获取原始输出的文丘里管流量计和涡轮流量计易受噪声影响。涡轮流量计主要是由于其内部机械结构等因素产生的噪声，因此，在以牺牲一定采样速度的情况下(即采用涡轮流量计的轴频信号)，可有效消除该影响；而文丘里管流量计所使用的差压传感器非常容易受到外界因素的影响，如管道振动、信号干扰等，不易预测与消除；相比而言，科里奥利质量流量计、时差法超声流量计输出信号非常“干净”，具有较高质量，电磁流量计信号中含有明显的噪声成分。因此，信号质量从高到低可粗略排序为：CMF, UFM > TFM (轴频) > EMF > VFM > LDA。

此外，还应注意仪表内部阻尼时间的设定，该参数直接影响流量计对流量变化的响应速度，在上述

仪表当中, 科里奥利质量流量计和电磁流量计仪表内部设置中都有固定的阻尼时间, 而从时差法超声流量计的输出效果看, 其阻尼时间可能更大。

综合上述三方面因素, 涡轮流量计在综合性能上最符合流量稳定性测量的需求, 可作为下一步搭建的测量系统中的主力流量测量仪表; 科里奥利质量流量计在采样率及响应速度上略逊一筹, 但具有良好的信号质量, 文丘里管流量计具有超高的频响特征, 在可避免外界干扰的情况下可发挥其优势, 这两种仪表可作为备选流量计与涡轮流量计配合使用。而对于其它几种类型的流量计, 特别是上述实验中所用到的产品, 并不适用于流量稳定性的测量。

参考文献

- [1] 中国计量编辑部. 流量计量综述[J]. 中国计量, 2006(z1): 5-9.
- [2] 苏彦勋, 等. 流量计与测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 1993: 52-65.
- [3] 孙淮清. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 石油化工出版社, 2006: 5.
- [4] 周伟华. 浅谈流量计量的意义[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(8): 85-86.
- [5] Engel, R. and Baade, H.J. (2010) Model-Based Flow Diverter Analysis for an Improved Uncertainty Determination in Liquid Flow Calibration Facilities. *Measurement Science & Technology*, **21**, 025401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/025401>
- [6] Lederer, T. (2014) Application of a Novel Method for Validating the Uncertainty Estimation of a Flow Test Facility. *Tm-Technisches Messen*, **81**, 431-441.
- [7] Shinder, I.I. and Moldover, M.R. (2010) Feasibility of an Accurate Dynamic Standard for Water Flow. *Flow Measurement & Instrumentation*, **21**, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.01.008>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-6980, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: iae@hanspub.org