

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.21

# 基于双差压的脉动流测量方法仿真研究

张永胜, 刘彦军, 于小丽

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 通过对脉动流工况下差压式流量计理论模型进行分析, 提出基于双差压测量以消除流量导数项影响的算法, 利用 FLUENT 软件对经典文丘里管内动态流场进行仿真, 进而对脉动流量计算方法进行验证。仿真结果表明, 利用传统单路压差法计算脉动流量时, 由于遗漏流量导数项可产生很大测量误差, 最大误差甚至可达 -100%; 而通过双路差压法计算脉动流量, 能够有效消除流量导数项的影响, 算例中最大误差降至 5% 左右。验证结果表明基于双路差压测量的计算方法可有效提高脉动流量测量准确度, 具有技术借鉴价值。

**关键词:** 差压式流量计; 脉动流量; 导数项**中图分类号:** TB937**文献标识码:** A**文章编号:** 1674-5795(2021)02-0144-05

## Simulation of Pulsating Flow Measurement Based on Double Differential Pressure

ZHANG Yongsheng, LIU Yanjun, YU Xiaoli

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Based on the theoretical model analysis of differential pressure flowmeter under pulsating flow condition, the algorithm of eliminating the influence of flow derivative term based on the double-channel differential pressure is given. The flow field in Venturi tube is simulated by FLUENT software, and then the calculation method of pulsating flow is verified. The simulation results show that the maximum error can be up to 100% when calculating the fluctuating flow using single-channel pressure, and the maximum error can be reduced to about 5% when calculating the pulsating flow using double-channel differential pressure. The results show that the calculation method of double-channel differential pressure method can effectively improve the accuracy of pulsating flow measurement, and has the value of further popularization and application.

**Key words:** differential pressure flowmeter; pulsating flow; derivative term

## 0 引言

工业生产中系统管道内的流动一般处于较高的雷诺数状态, 且为湍流。湍流流动情况下工作介质的流速、压力及温度等参数都是无规则变化或波动的<sup>[1]</sup>。众多的旋转机械都会引发系统管路内流动脉动, 包括泵源、阀门等设备; 同时管路振动也是引发流体脉动的原因之一, 特别是共振。脉动流动一旦形成, 会在管道系统中连续传播, 导致流量传感器的测量误差增大, 甚至使其无法正常工作, 在 ISO 5167《Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full》和 GB/T 2624《用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量》等标准中, 明确指出标准孔板、文丘里管等差压式流量计无法应用于存在流量脉动的场合<sup>[2-3]</sup>。

文丘里管是一种非常典型的节流件<sup>[4-6]</sup>, 广泛应

用于封闭管道中水、油品、气体等单相流体介质的稳定流量测量。文丘里管流量测量模型基于伯努利方程和质量守恒方程, 但是采用上述模型进行脉动流量计算会因未考虑流量导数项的影响而造成很大误差<sup>[7]</sup>。本文利用一维流动模型对正弦脉动流瞬时流量测量误差进行分析, 提出采用双差压测量消除导数项影响的算法, 并利用流体仿真软件对该方法的效果进行验证。

## 1 测量误差分析

### 1.1 脉动流模型

流体流经节流件时, 假设流体为不可压缩的理想流体, 在流量存在脉动但无旋的场合下, 可采用一维流动模型进行简化分析<sup>[8-10]</sup>, 则流体运动方程可表示为

$$\frac{du}{dt} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中:  $u$  为流向速度;  $t$  为时间;  $x$  为沿流向坐标;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为压力。

由于质量流量可由式(2)表示, 则式(1)可进一步转化为式(3)。

$$q_m = \rho A_x u \quad (2)$$

$$\frac{dq_m}{A_x dt} + q_m \frac{\partial q_m}{\rho A_x^2 \partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中:  $q_m$  为质量流量;  $A_x$  为横截面积。

设节流件上下游取压孔分别处于截面 I 和截面 II 上, 在截面 I 和截面 II 之间沿流线对式(3)进行积分, 可得

$$\int_{x_{I}}^{x_{II}} \frac{1}{A_x} dx \cdot \frac{dq_m}{dt} + \frac{1}{2\rho C^2} \left( \frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right) q_m^2 = \Delta p \quad (4)$$

式中:  $x_I, x_{II}$  分别为轴线上截面 I 和截面 II 的位置;  $A_x$  为节流件某轴线位置横截面面积;  $A_I$  为节流件截面 I 处截面积;  $A_{II}$  为节流件截面 II 处截面积;  $C$  为节流件流出系数;  $\rho$  为流体密度;  $\Delta p$  为截面 I 和截面 II 之间的差压。

设导数项系数为  $k_1$ , 平方项系数为  $k_2$ , 则  $k_1 = \int_{x_I}^{x_{II}} \frac{1}{A_x} dx$ ,

$k_2 = \frac{1}{2\rho C^2} \left( \frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right)$ , 可将式(4)简化为

$$k_1 \frac{dq_m}{dt} + k_2 q_m^2 = \Delta p \quad (5)$$

### 1.2 脉动流量测量误差

以差压式流量计测量正弦脉动流量进行误差分析, 脉动瞬时流量可表示为

$$q_m = q_0 + Aq_0 \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

式中:  $q_m$  为某时刻质量流量, kg/s;  $q_0$  为平均质量流量, kg/s;  $A$  为脉动幅值;  $f$  为脉动频率;  $t$  为运行时间, s。

定常流动下, 可通过式(7)计算稳定质量流量

$$q_{mc} = \sqrt{\frac{\Delta p}{k_2}} \quad (7)$$

对式(6)求导可得流量导数式(8), 如果利用式(7)计算任意时刻质量流量, 则误差可通过式(9)计算

$$\frac{dq_m}{dt} = 2\pi f A q_0 \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

$$E = \frac{q_{mc} - q_m}{q_m} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2} \frac{2\pi f A \cos(2\pi ft)}{q_0 [1 + A \sin(2\pi ft)]^2} + 1} - 1 \quad (9)$$

## 2 双差压流量计算方法

由于流动的随机性, 流量导数项无法预知, 无法

通过对式(7)进行修正降低导数项的影响。为解决此问题, 本文提出了双差压流量计算方法, 即分别测量两对截面之间的两路差压, 形成如式(5)所示的两个独立的方程, 进而消除流量导数项的影响。

在节流件内共设置四处取压截面, 分别定义为截面 I, II, III, IV。可通过截面 I 和截面 IV 获得差压  $\Delta p_{(I-IV)}$ , 对应的导数项系数和平方项系数分别为  $k_{1(I-IV)}$  和  $k_{2(I-IV)}$ ; 通过截面 II 和截面 III 获得差压  $\Delta p_{(II-III)}$ , 对应的导数项系数和平方项系数分别为  $k_{1(II-III)}$  和  $k_{2(II-III)}$ , 可分别得到微分方程式(10)和式(11)。

$$k_{1(I-IV)} \frac{dq_m}{dt} + k_{2(I-IV)} q_m^2 = \Delta p_{(I-IV)} \quad (10)$$

$$k_{1(II-III)} \frac{dq_m}{dt} + k_{2(II-III)} q_m^2 = \Delta p_{(II-III)} \quad (11)$$

由于流体为不可压流体, 各位置流量导数项相同, 联立式(10)和式(11), 消除流量导数项, 可得质量流量与双路差压的函数式(12)。

$$q_{mc} = \sqrt{\frac{k_{1(II-III)} \Delta p_{(I-IV)} - k_{1(I-IV)} \Delta p_{(II-III)}}{k_{1(II-III)} k_{2(I-IV)} - k_{1(I-IV)} k_{2(II-III)}}} \quad (12)$$

## 3 流体仿真实验

### 3.1 仿真模型

图 1 为文丘里管几何模型图。文丘里管口径为 30 mm, 喉径为 19.5 mm, 在模型中设置四个取压截面, 分别为截面 I, II, III, IV, 其中截面 I 和截面 II 在收缩段上游, 截面 III 和截面 IV 在收缩段下游, 上述四个取压截面与文丘里管入口中心的距离分别为 25, 46, 78, 90 mm。仿真计算中可求取各位置的静压, 进而计算得到收缩段上下游四组截面之间的差压, 分别表示为  $\Delta p_{25-90}$ ,  $\Delta p_{46-78}$ ,  $\Delta p_{25-78}$  和  $\Delta p_{46-90}$ 。

流体仿真中忽略重力加速度对流场的影响, 认为文丘里管内流场分布是轴对称的, 可将计算网格简化为二维轴对称网格。文丘里管上游直管段为 10D, 下游直管段为 5D, 其中 D 为文丘里管口径, 壁面附近划分 5 层边界层网格。

仿真中流体介质为水, 入口设置为速度入口, 出口设置为自由出口, 选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 通过自定义函数设置入口质量流量, 并通过式(6)计算, 平均质量流量  $q_0 = 2$  kg/s, 入口流速通过式(13)计算。

$$V_t = \frac{q_m}{\rho A_{in}} \quad (13)$$

式中:  $V_t$  为瞬时入口速度, m/s;  $\rho$  为流体介质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $A_{in}$  为入口截面积, m<sup>2</sup>。

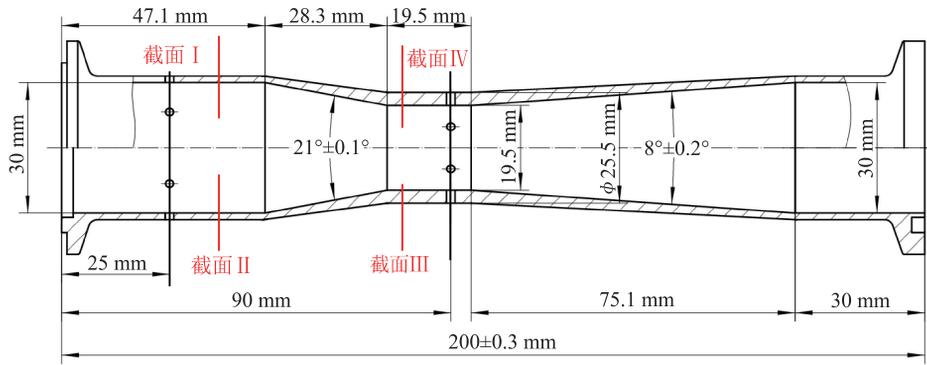


图1 文丘里管几何模型

### 3.2 流体仿真结果

仿真中首先设置入口为稳定流量，质量流量  $q_0$  为 2 kg/s，获得模型内稳态流场，可获得  $\Delta p_{25-90}$ ， $\Delta p_{46-78}$ ， $\Delta p_{25-78}$ ， $\Delta p_{46-90}$  四组差压，进而计算四组差压对应的流出系数  $C_{25-90}$ ， $C_{46-78}$ ， $C_{25-78}$ ， $C_{46-90}$ ，之后计算导数项系数  $k_1$  和平方项系数  $k_2$ 。

表1为四组取压孔对应的理论模型系数。对于  $k_1$  而言，四组取压孔有  $k_{1(25-90)} > k_{1(46-90)} > k_{1(25-78)} > k_{1(46-78)}$ ， $\frac{k_1}{k_2}$  的大小具相同的变化趋势。

表1 理论模型系数

$Pos_U / \text{mm}$	$Pos_D / \text{mm}$	流出系数 $C$	$k_1$	$k_2$	$k_1 / k_2$
25	90	0.9815	141.8	4788.8	0.030
46	78	1.0070	71.86	4549.7	0.016
25	78	1.0013	101.6	4601.6	0.022
46	90	0.9772	112.0	4831.7	0.023

以稳定流场为初始流场，计算不同脉动频率和幅

度下的瞬时流场，脉动幅度包括6种工况 ( $A = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ )，脉动频率包括7种工况 (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 Hz)，共获得42组不同工况组合的脉动流场，获得入口的瞬时质量流量  $q_m$ ， $\Delta p_{25-90}$ ， $\Delta p_{46-78}$ ， $\Delta p_{25-78}$ ， $\Delta p_{46-90}$  四组差压。通过式(14)~式(16)将流量脉动与压差脉动无量纲化。

$$q_m^* = \frac{q_m}{q_0} \quad (14)$$

$$\Delta p_{\text{mean}} = \frac{1}{2} (\Delta p_{\text{max}} + \Delta p_{\text{min}}) \quad (15)$$

$$\Delta p^* = \frac{\Delta p}{\Delta p_{\text{mean}}} \quad (16)$$

式中： $\Delta p_{\text{mean}}$ ， $\Delta p_{\text{max}}$ ， $\Delta p_{\text{min}}$  和  $\Delta p^*$  分别为压差中值、最大值、最小值和无量纲差压。

图2为无量纲脉动流量与差压之间的实时关系曲线，由于流量导数项的影响，脉动流量与差压输出并不同步，两者之间存在相位差。脉动幅度对相位差基本无影响，相位差主要受到脉动频率的影响。

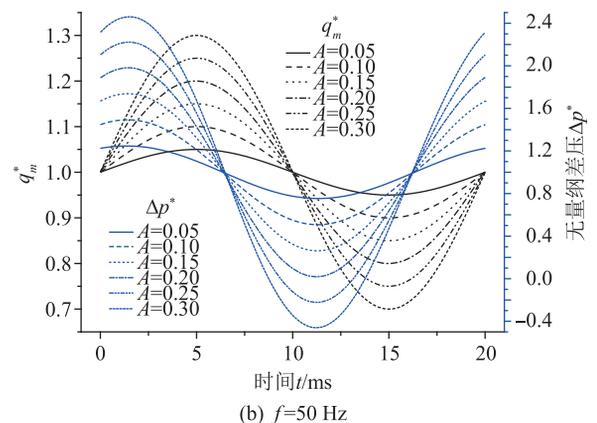
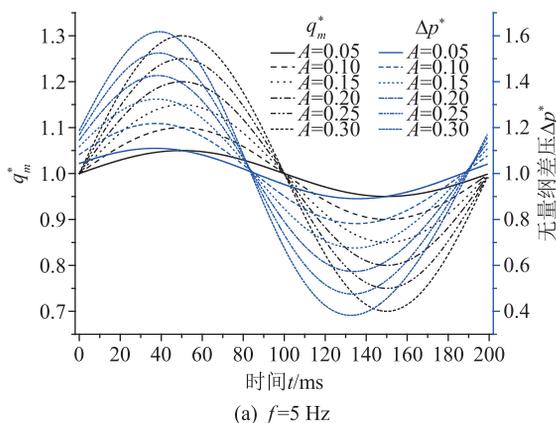


图2 无量纲流量脉动与差压脉动关系曲线

### 3.3 脉动流量测量误差计算

利用流量仿真获得各取压孔组合的实时差压，通过式(7)计算瞬时脉动流量，由于遗漏导数项而产生误差，图3为通过 $\Delta p_{25-90}$ 计算的瞬时流量误差曲线。

图4为理论公式与流体仿真计算误差曲线，两者一致性很好。由式(9)可知测量误差主要受到 $\frac{k_1}{k_2}$ 、脉动频率 $f$ 、脉动幅度 $A$ 和流量平均值 $q_0$ 的影响。流体

仿真中流量平均值 $q_0$ 恒定，脉动流量测量误差随着 $\frac{k_1}{k_2}$ 、 $f$ 和 $A$ 的增大而增大。特别是在脉动频率较高、幅度较强的工况下，误差曲线出现中断，这是由于流量导数项影响差压为负值，无法进行开方运算造成的，如图3(b)中所示， $A > 0.15$ 工况时计算误差已经达到 $-100\%$ 。缩短两取压孔之间的距离，可在一定程度上减小 $\frac{k_1}{k_2}$ 值，进而减小误差，但无法根除遗漏导数项固有影响。

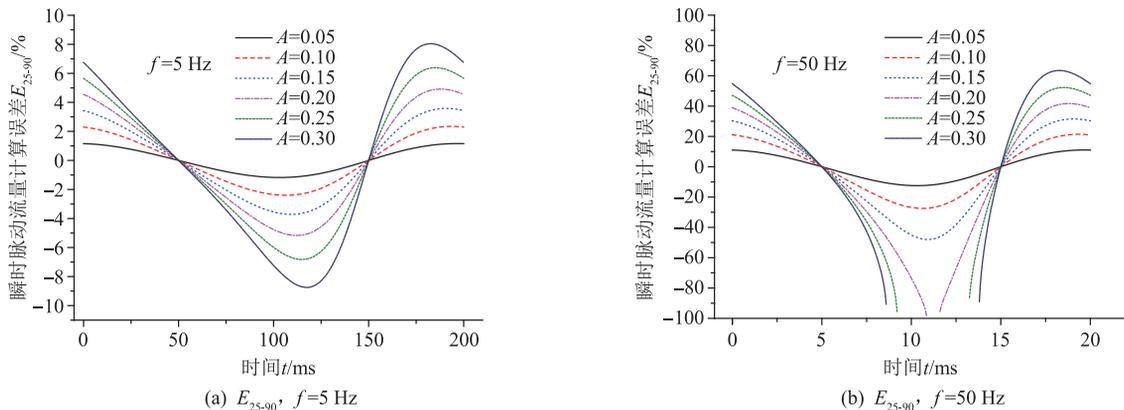


图3  $\Delta p_{25-90}$ 瞬时脉动流量误差曲线

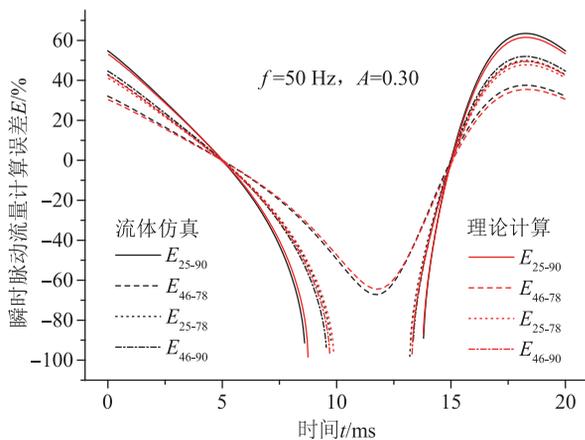
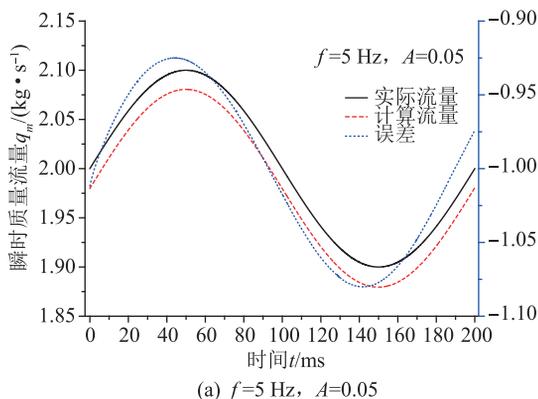


图4 理论分析与流体仿真误差曲线对比



### 3.4 双差压流量计算方法验证

选择 $\Delta p_{25-90}$ 和 $\Delta p_{46-78}$ 两路差压计算脉动流量，由表1可知 $k_{1(25-90)} = 141.8$ ， $k_{1(46-78)} = 71.86$ ， $k_{2(25-90)} = 4788.8$ ， $k_{2(46-78)} = 4549.7$ ，通过式(12)计算瞬时脉动流量，图5为 $f=5$  Hz， $A=0.05$ 和 $f=50$  Hz， $A=0.30$ 两工况双路差压流量计算误差曲线。与图3相比，在 $f=5$  Hz， $A=0.05$ 工况下，误差范围由 $-2.4\% \sim 2.3\%$ 缩小至 $-1.0\% \sim -0.97\%$ ；在 $f=50$  Hz， $A=0.30$ 工况下，误差范围由 $-100\% \sim 70\%$ 缩小至 $-4.5\% \sim 0.8\%$ 。利用双差压模型计算瞬时流量，误差上限变小，误差下限变大，误差的分布范围明显减小，在较高脉动频率和较大脉动幅度场合尤为突出。

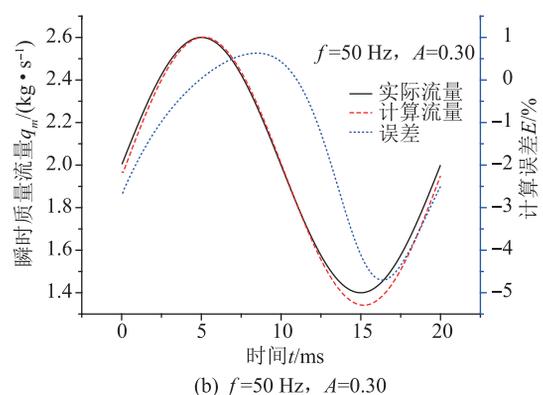


图5 双路差压模型脉动流量误差曲线

文中  $k_1$  通过横截面积倒数沿轴线积分得到, 一维理论模型与流体仿真模型的差异性使得  $k_1$  存在偏差; 而  $k_2$  通过稳态流场下流出系数计算, 稳态流场和脉动流场中流出系数的差异性导致  $k_2$  存在偏差, 上述两方面也将导致双差压流量计算产生一定的误差。

#### 4 总结

利用一维流动模型对正弦脉动流瞬时流量计算误差开展了分析研究, 针对如何消除流量导数项影响的问题, 提出双差压脉动流量计算模型, 通过流体仿真对计算模型进行了验证, 获得以下结论和建议:

1) 基于伯努利方程和质量守恒方程的稳态流量模型未考虑导数项对压差的贡献, 直接用于计算脉动流量会产生很大误差, 瞬时脉动流量误差随着  $\frac{k_1}{k_2}$ ,  $f$  和  $A$  的增大而增大;

2) 在高脉动频率和大脉动幅值的工况下, 由于导数项的影响, 可能存在上游压力小于下游压力的情况, 两者压差为负数, 无法对压差进行开方运算, 该情况下瞬时流量误差为  $-100\%$ ;

3) 通过双路差压建立微分方程组可有效消除导数项影响, 使得误差上限变小, 误差下限变大, 误差分布范围明显变小, 在高频率和大幅值情况下尤为突出;

4) 建议通过进一步试验分析, 深入研究截面选择、引压管、压力传感器动态性能等因素对脉动流量测量的影响, 并研究通过试验手段获得导数项系数和平方项系数的方法。

#### 参 考 文 献

- [1] 董峰, 徐苓安. 煤气输送管道中脉动流对孔板流量计的影响[J]. 自动化仪表, 1998, 19(5): 3-7.  
 [2] 何军山, 赵玲. 差压流量计测量脉动流综述[C]//全国反应堆热工流体力学会议. 中国核学会核能动力学会, 2007.

- [3] 苏彦勋, 杨有涛. 流量检测技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012.  
 [4] 王池. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.  
 [5] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 2624.4-2006 用安装在圆形截面管道中差压装置测量满管流体流量第4部分: 文丘里管[S]. 2006.  
 [6] International Standard. ISO 5167-4: 2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-part 4: Venturi tubes [S]. 2003.  
 [7] ISO/TC30. ISO/TR 3313-2018 Measurement of fluid flow in closed conduits. Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement[S]. 2018.  
 [8] Daev Z A. A method for the measurement of a pulsating flow of liquid[J]. Measurement Techniques, 2016, 59(3): 243-246.  
 [9] 张永胜, 张毅治, 王鹏. 利用流体仿真研究文丘里管流量计瞬变流动模型[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 10-13.  
 [10] 朱云. 脉动流对差压式流量计测量误差影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 894-897.

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2017205A005)

#### 作者简介

张永胜(1980-), 男, 河北雄安人, 高级工程师, 主要研究方向为流量测量校准技术研究。

