

# 低雷诺数下涡街流量计线性度的试验\*

张 涛 郑丹丹

(天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072)

**摘要:** 在 DN25 水流量标准装置上对装有梯形漩涡发生体的涡街流量计在低雷诺数下进行试验研究, 利用数字信号处理方法(频谱分析方法)得到涡街脱落频率, 较传统模拟信号处理方法在保证较好线性度的基础上, 有效地扩展了测量下限。绘制雷诺数—仪表系数曲线, 发现梯形发生体在低雷诺数下仪表系数  $K$  呈递减趋势, 当  $Re > 2000$  时  $K$  趋于常数, 这与圆柱发生体在低雷诺数时曲线递增的趋势截然相反。通过分析得知, 管道内流速分布的影响、发生体形状的影响和流速与频率关系的影响是导致上述变化趋势的 3 个主要影响因素。

**关键词:** 涡街流量计 仪表系数 雷诺数

**中图分类号:** TB126

## 0 前言

涡街流量计是一种振动式流量计, 利用流体振动来实现流量测量。与其他流量仪表相比, 涡街流量计具有以下优点: 测量流体种类多、精确度高、压损小且内部无可动部件, 使用寿命长以及在一定雷诺数范围内输出频率信号不受流体物性(密度, 粘度)和组分的影响, 可直接输出数字脉冲信号, 因此近 20 年来涡街流量计发展迅速。但是, 涡街流量计的应用也具有一定的局限性, 如不适用于低雷诺数测量, 在高粘度、低流速、小口径情况下应用受到限制, 即在此范围内仪表系数( $K$ )线性度变差, 信号微弱, 使仪表在实际测量中存在一个下限死区。

国内外有许多学者都对上述问题进行了研究, ROSHKO<sup>[1]</sup>早在 1954 年在低湍流度的风洞中对圆柱形漩涡发生体进行试验发现, 当  $40 < Re < 300$  时, 雷诺数( $Re$ )—斯特罗哈数( $St$ )呈非线性增长趋势; 当  $300 < Re < 2 \times 10^5$  时,  $St$  基本保持在 0.2 左右。随后, WILLIAMSON<sup>[2]</sup>又从漩涡脱落机理出发, 通过大量试验绘制了  $Re-St$  关系曲线, 不仅验证了 ROSHKO 试验曲线的正确性, 也对试验中出现的  $Re=40 \sim 300$  范围内曲线的间断给出了合理解释。近几年, 又有大量学者针对圆柱发生体在低雷诺数下的  $St$  进行研究, 通过试验和数值仿真的方法, 最终给出了  $Re-St$  非线性拟和公式<sup>[3]</sup>。

前人对低雷诺数下涡街特性曲线的研究大都是针对圆柱发生体, 而现在商业用涡街流量计的漩涡发生体大都是梯形发生体, 在中高雷诺数条件下,

其  $St$ (或  $K$ )为一恒定值, 已为公认。但是对梯形发生体在低雷诺数下的  $St$ (或  $K$ )变化情况研究甚少。因此, 本文采用先进的试验方法, 对这种梯形发生体在低雷诺数流动下进行研究, 绘制出  $Re-K$  关系曲线, 并对试验结果进行了分析和解释。

## 1 涡街流量计工作原理

如图 1 所示, 在流体中安放一根梯形柱状漩涡发生体, 当流体流过发生体时, 会在其两侧交替地分离释放出两串规则的漩涡, 在一定的流量范围内, 漩涡分离频率正比于管道内的平均流速, 通过压电元件检测出漩涡频率就可以算出流体的体积流量。

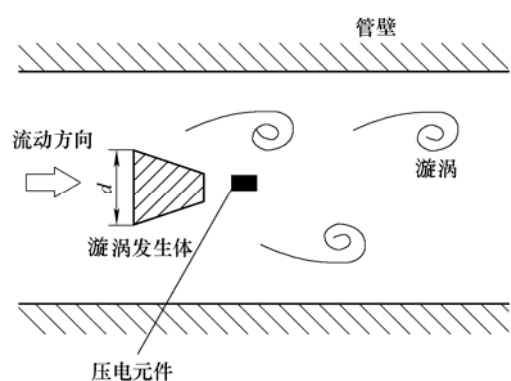


图 1 管道内涡街示意图

大量试验证明<sup>[4]</sup>, 在一定雷诺数范围内, 稳定的漩涡分离频率与漩涡发生体两侧流速及宽度有以下确定的关系式

$$f = St \frac{v_1}{d} \quad (1)$$

\* 天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC11400)。20061207 收到初稿, 20070708 收到修改稿

式中  $v_1$ ——漩涡发生体两侧平均流速  
 $d$ ——发生体的特征宽度  
 $f$ ——漩涡分离频率  
 $St$ ——量纲一数，对于一定形状发生体，在一定流量范围内是雷诺数的函数，由试验给出

由式(1)可见，只要测出  $f$ ，即可得到  $v_1$ ，进而得到流量

$$q_v = S\bar{v} = S \frac{v_1}{c} = S \frac{df}{cSt} = \frac{f}{K} \quad (2)$$

式中  $q_v$ ——体积流量  
 $S$ ——流通面积  
 $\bar{v}$ ——在  $S$  上的平均流速  
 $K$ ——仪表系数

$$K = S \frac{cSt}{d} \quad (3)$$

$$c = \frac{v_1}{\bar{v}} \quad (4)$$

涡街在漩涡发生体下游形成以后，一面以平行于轴线方向运动，一面还在垂直于轴线的方向上振动。根据儒可夫斯基升力定理，漩涡发生体将受到一个升力，该升力垂直于来流方向。设作用在发生体每单位长度上的升力为  $F_L$ ，有

$$F_L = b\rho du^2 \quad (5)$$

式中  $\rho$ ——流体密度  
 $u$ ——来流速度  
 $b$ ——漩涡发生体几何参数

由式(5)可以看出，涡街的升力与流速的平方成正比，也就是说，当流速降低时涡街的升力是以流速的平方减小，当流速很小时检测到的涡街信号就很微弱了，容易被噪声干扰淹没。因此，本文研究的低雷诺数情况，采用频谱分析的方法，从干扰中将涡街信号有效地提取出来。

## 2 数字信号处理方法

由于目前大部分涡街流量计广泛采用的信号处理方法是一套基于模拟电路的处理方法(图2)，即由电荷放大、滤波、整形电路组成，将涡街交变的频率信号转变成方波电压输出，得到涡街频率。实践证明<sup>[5]</sup>，在中高雷诺数、高信噪比的情况下，这种模拟信号处理方法能得到较好的效果。但是，在小流量低雷诺数、信噪比较低的情况下，由于检测信号中包含了幅值较大的周期性和冲击噪声，这种处

理方法不能有效地滤除噪声，容易造成整形时的误触发，产生错误的测量结果。因此，试验采用数字信号处理方法(图3)，利用快速傅里叶变换经典谱估计分析将时域上受噪声干扰强烈的涡街信号变换到频域研究，直接利用傅里叶变换对有限时间序列计算功率谱，再根据最大似然方法，将功率强度最大点对应的频率提取出来即为涡街有用信号的频率，这种方法能够有效且准确地反映涡街分离频率。

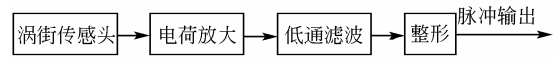


图2 基于模拟电路的信号处理方法

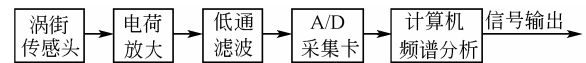
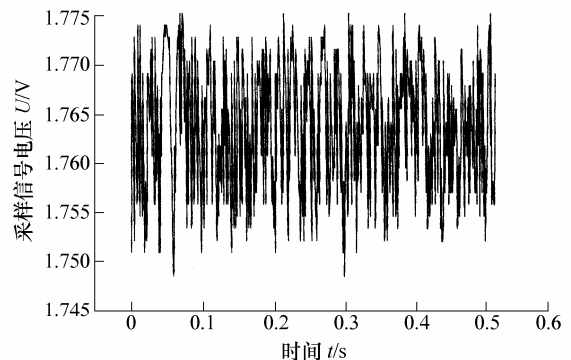
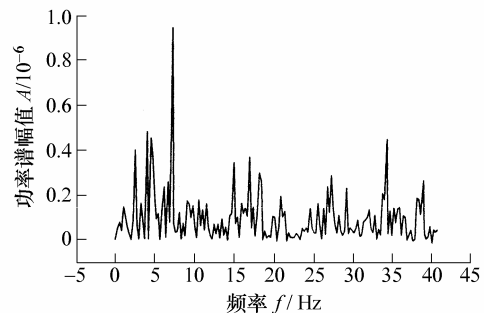


图3 数字信号处理方法

图4、5所示，分别为小流量和正常流量点下信号的时域和频域图。可以看出，在很小的流量点(0.1386 m<sup>3</sup>/h)，信号的信噪比很低(图4a)，利用模拟信号处理的方法根本无法得到涡街的频率，但是变换到频域就可以较清晰地得到频率值。在正常流量点(1.417 m<sup>3</sup>/h)，信噪比增强(图5)，频域的方法和时域的方法均能辨别出涡街频率。因此，试验采用频谱分析的方法得到涡街频率信号，有效地拓展了试验范围，实现了低雷诺数下的试验研究。



(a)  $q_v=0.1386 \text{ m}^3/\text{h}$ 时信号时域图



(b)  $q_v=0.1386 \text{ m}^3/\text{h}$ 时信号频域图

图4 小流量点时信号的时域和频域图

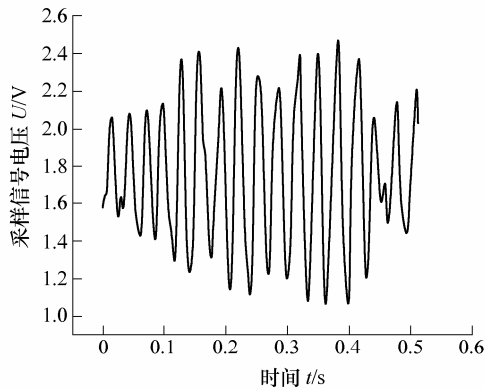
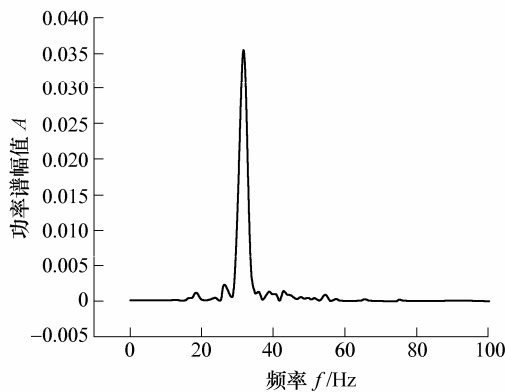
(a)  $q_v=1.417 \text{ m}^3/\text{h}$ 时信号时域图(b)  $q_v=1.417 \text{ m}^3/\text{h}$ 时信号频域图

图5 正常流量点时信号的时域和频域图

### 3 涡街流量计试验装置

如图6所示,整个试验系统分为两大部分:水流量试验装置和涡街信号采集系统。水流量试验装置为整个试验提供了标准流量值。由于试验研究的是低雷诺数下的流动情况,因此选择直径为25 mm的涡街在低流速下进行试验,通过称重法得到真实的流量值 $q_v$ 。装置可测的流量范围 $0.05\sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,精度为0.4%,重复性达到0.2%。图6中所示计算机1为水流量标准装置的控制系統,实现称重法流量信号的采集、计算、显示功能以及换向器、电磁阀的控制。涡街信号采集系统主要由涡街流量计的表头部分、信号放大、滤波电路和计算机信号采集系统组成。当流体流过涡街流量计时,产生微弱的交变正弦信号,经放大、滤波后被计算机2采集进计算机,再经过频谱分析最终得到涡街的分离频率 $f$ 。

### 4 涡街流量计试验数据

试验的涡街表体口径为25 mm,漩涡发生体的特征宽度为8.36 mm,流量范围 $0.0723\sim 1.417 \text{ m}^3/\text{h}$ 。共测试25个流量点,每个流量点采样

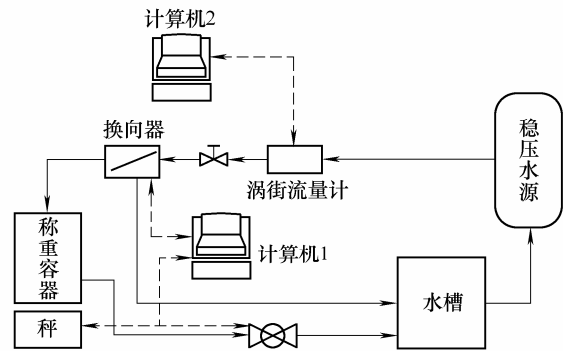


图6 涡街流量计试验系统

8次,将8次求平均得到涡街的频率值。试验进行3次。下表给出了一次试验的部分数据。

表 10 个典型流量点试验数据

体积流量 $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	频率平均值 $f/\text{Hz}$	雷诺数 $Re$	仪表系数 $K$	不确定度 $\sigma_r/\%$
0.072 3	5.704 42	261.696	284 037	37.971
0.138 6	5.763 10	501.674	149 690	48.966
0.203 0	5.931 01	734.775	105 180	23.846
0.317 0	7.351 11	1 147.410	83 482	2.973
0.504 0	11.444 25	1 824.270	81 744	2.545
0.691 0	15.863 38	2 501.130	82 645	2.163
0.877 0	19.842 12	3 174.370	81 450	2.274
1.008 0	22.766 63	3 648.540	81 309	2.268
1.206 0	27.350 75	4 365.210	81 644	1.478
1.417 0	31.690 25	5 128.940	80 511	1.251

其中,不确定度是根据一次试验同一流量点下8个频率值得出的,计算公式如下

$$(\sigma_r)_i = \pm \frac{1}{f_i} \left[ \frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (f_{ij} - f_i)^2 \right]^{1/2} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $(\sigma_r)_i$ ——第*i*个流量点的不确定度  
 $f_{ij}$ ——第*i*个流量点第*j*次测量值  
 $f_i$ ——第*i*个流量点的平均值

对于涡街流量计,其 $Re$ 定义为

$$Re = \frac{\bar{v}d}{\nu} \quad (7)$$

式中  $\bar{v}$ ——管道内的平均流速(m/s)

$\nu$ ——运动粘度,10℃时水的运动粘度为

$$1.307 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

由上表绘制 $Re-K$ 关系曲线,图7所示为三次试验结果。

可以看出,在低雷诺数条件下,虽然试验数据的不确定度较大,但是三次试验结果的趋势是基本一致的。当 $Re < 970$ 时 $K$ 呈非线性递减趋势,此后,随着雷诺数的增大, $K$ 趋于常数,即此范围为涡街流量计正常的工作范围。

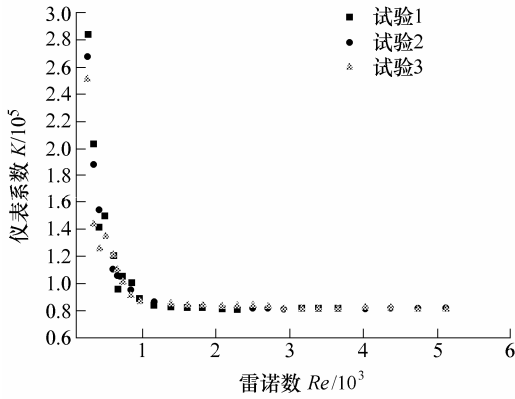


图 7 三次试验的  $Re-K$  关系图

### 5 涡街流量计试验分析

由于试验所用涡街发生体形状是梯形， $Re-K$  曲线在低雷诺数下呈递减趋势。而许多前人、学者都是针对圆柱发生体进行研究，得到的  $Re-St$  曲线是递增的<sup>[1]</sup>，分析其原因，可以从以下三方面进行考虑。

#### 5.1 管道内流速分布的影响

在低雷诺数下，流动状态是层流，其流速分布为<sup>[6]</sup>

$$v = \frac{\Delta p}{4\mu l}(R^2 - r^2) \quad \bar{v} = \frac{q_v}{S} = \frac{\Delta p}{8\mu l} R^2$$

$$\frac{v}{\bar{v}} = \frac{2(R^2 - r^2)}{R^2} \tag{8}$$

- 式中  $v$ ——管道中距中心半径为  $r$  点处速度
- $R$ ——管道半径
- $l$ ——管道中任取一个圆柱体的长度
- $\Delta p$ ——圆柱体两端面的压差
- $\mu$ ——动力粘度

在高雷诺数下管道中的流动状态为湍流，其流速分布为<sup>[6]</sup>

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^n \quad n = \frac{1}{6} \quad \frac{v_{\max}}{\bar{v}} = 1.26$$

$$\frac{v}{\bar{v}} = 1.26 \left(\frac{y}{R}\right)^{1/6} \tag{9}$$

- 式中  $v$ ——距管壁为长度  $y$  处的速度
- $v_{\max}$ ——管道轴心处的最大速度
- $n$ ——指数

在流量计中装有漩涡发生体的条件下，上述流速分布公式虽然不再适用，但可用其估算一下变化趋势。

将所用涡街流量计的几何参数分别代入式(8)、

(9)，得到

$$c_1 = \frac{v_{11}}{v_1} \approx 1.8 \quad c_o = \frac{v_{1o}}{v_o} \approx 1.2$$

故  $c_1 > c_o$ ，由式(4)可知

$$K_1 > K_o$$

因此， $Re-K$  曲线为递减趋势。

#### 5.2 发生体形状的影响

梯形发生体较圆柱发生体的显著不同是它在前缘两侧都有锐边，锐边起到了固定边界层分离点的作用。当雷诺数逐渐增大时，圆柱发生体的分离点逐渐后移，两列涡之间的作用更加强烈，漩涡脱落加快；而梯形发生体的分离点固定在锐边附近，不随雷诺数的变化而变化，分离点的位置直接影响了漩涡脱落频率，从而影响  $St$ 。因此，发生体形状，特别是锐边造成了  $Re-St$  曲线的差异。

#### 5.3 $\bar{v}-f$ 关系的影响

研究  $Re-St$  关系，实际上是研究  $\bar{v}-f$  关系。圆柱发生体的曲线递增，说明漩涡脱落频率的变化量大于平均速度的变化量；而梯形发生体曲线递减，说明漩涡脱落频率的变化量小于平均速度的变化量。前人大量的试验已经证明，圆柱发生体的  $St$  比其他形状发生体的  $St$  都要大<sup>[7]</sup>，说明相同平均速度变化量的前提下，圆柱脱落频率的变化量比梯形漩涡脱落频率的变化量大。从这个角度也可以说明两种形状的发生体  $Re-St$  曲线趋势会不同。

### 6 结论

(1) 具有梯形发生体的涡街流量计在低雷诺数下( $250 < Re < 2\ 000$ ) $Re-St$  关系曲线呈非线性，即  $St$  随  $Re$  的增大而非线性递减。当  $Re > 2\ 000$  时， $St$  趋于常数，此时为涡街流量计的正常工作范围。

(2) 利用数字信号处理技术——频谱分析方法处理涡街信号，能将低雷诺数、信噪比较低时的涡街频率准确提取出来，较传统的模拟信号处理方法，在保证较好不确定度的基础上有效地扩展了流量检测下限。

(3) 针对低雷诺数时圆柱发生体和梯形发生体  $Re-St$  关系曲线的差异，分析了三点原因，即管道内流速分布的影响、发生体形状以及锐边的影响、 $\bar{v}-f$  关系的影响。

(4) 本研究只是从试验角度给出了梯形发生体涡街流量计在低雷诺数下  $Re-K$  关系曲线，并进行了分析和解释。在今后的工作中，还需要进一步深入研究其产生机理。

## 参 考 文 献

- [1] ROSHKO A. On the development turbulent wakes from vortex streets[R]. NACA Report 1191, 1954.
- [2] WILLIAMSON C H K. Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder[J]. Phys. Fluids, 1988, 31(10): 2 742-2 744.
- [3] FERNANDO L P. Strouhal-Reynolds number relationship for vortex streets[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(8): 1-4.
- [4] 苏彦勋, 李金海. 流量计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.
- [5] 马凤英. 应力式涡街流量传感器的信号处理[J]. 自动化仪表, 1988, 9(3): 10-14.
- [6] 张也影. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [7] 夏学瀚. 工程分离流动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.

**EXPERIMENTAL RESEARCH ON  
LINERITY OF VORTEX FLOWMETER  
AT LOW REYNOLDS NUMBER**

ZHANG Tao ZHENG Dandan  
(School of Electrical and Automation Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Through experiments which are done on DN25 water calibration equipment, the vortex flowmeter with trapezoid cylinder bluff body at low Reynolds number is investigated. The frequency of vortex shedding is calculated by digital signal process—spectrum analysis, which has better performance on linearity than analogue signal process and can detect lower limit of measurement. Reynolds number-meter factor  $K$  relationship is provided. It is found that the relationship of trapezoid cylinder bluff body decreases at low Reynolds number which is different from the relationship of circular cylinder bluff body. And the meter factor  $K$  is driven to a constant when  $Re > 2\ 000$ . Three reasons are analyzed and proposed: velocity profile in pipe, shape of bluff body and relationship between velocity and frequency.

**Key words:** Vortex flowmeter  
Meter factor  
Reynolds number

作者简介: 张涛, 男, 1950 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为流量检测。

E-mail: zt50@tju.edu.cn

郑丹丹, 女, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为流量检测。

E-mail: redredzheng@hotmail.com