

管道截面的流速分布参数及其在涡街 流量计标定中的应用

何龙德

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

摘要 本文讨论了标定实验对涡街流量计所在截面流速分布的要求、拟合公式的选用和数据处理, 以及使用标定结果时所要注意的问题。提出了一种以测试手段和分析办法相结合的关于标定涡街流量计的新的技术途径, 以缩短标定装置的轴向尺寸, 降低标定费用。对于充分湍流的圆管流动, 根据 Nikuradse 的实验结果, 给出了截面平均流速与最大流速之比随雷诺数变化的简洁计算公式。

关键词 涡街流量计, 管道流动, 流速分布参数, 标定实验, 频率测量

1 引言

涡街流量计是一种近20年来迅速发展起来的流量计量仪表, 与当前在流量计量中广泛应用的节流式流量仪表相比, 有一系列独特的优点。它在使用过程中, 损耗低, 性能好, 而且适用范围广, 是很有发展前途的节能计量仪表^[1]。因此, 生产、选用和标定涡街流量计, 具有很大的现实意义。

中科院力学所曾受流量计生产厂的委托, 对其产品涡街流量计进行过标定, 现已具备基本标定设备和仪器。通过标定实验我们积累了经验, 也有一些体会和设想。本文将这些整理成文, 以便同从事涡街流量计标定工作的同事进行交流和磋商, 使标定工作有所改进和提高。

2 对截面流速分布的相似性要求

在一定的雷诺数范围内, 流体流过柱体时, 产生卡门涡街现象。涡街流量计是根据卡门涡街原理研制的一种流体振荡仪表, 当流体流过与介质流向垂直的旋涡发生体时, 在其后方两侧交替产生两列旋涡。旋涡脱落频率 f 和流速 U 之间有如下关系式

$$f = StU/d \quad (1)$$

式中, U 为旋涡发生体前方的流速, d 为旋涡发生体的迎流面最大宽度, St 为 Strouhal

数。研究表明,当旋涡发生体几何形状确定时, St 在一定的雷诺数范围内为常数。因此,当特征长度一定时,对流速、流量的测量,归结为对旋涡脱落频率的测量。为了避免或减少管壁边界层的影响,必须使涡街流量计的旋涡发生体位于管道截面的中心位置。

一般来说,涡街流量计出厂后,在管道上安装使用前应进行标定。然而将涡街流量计标定结果用于实际管流的流量计量是有条件的。根据流体力学的相似准则,对于涡街流量计及其所在截面的管道流动,标定时的流动状态和实际的流动状态要满足几何相似、运动相似和动力相似条件。由于对流量计实物进行标定,因此其几何相似能自动保证,动力相似便要求流动雷诺数相等,运动相似则要求在标定和实际管流中涡街流量计所在截面的流速分布几何相似,即

$$\left[\frac{u(\bar{r})}{U} \right]_{\text{标定}} = \left[\frac{u(\bar{r})}{U} \right]_{\text{实际}} \quad (2)$$

式中, u 为截面流速分布,它是从截面中心量起的无量纲矢径 $\bar{r} = r/R$ 的函数, U 为截面中心附近最大流速, R 为管道半径。一般情况下,涡街流量计安装、使用时要求上游直管段长度 $L \geq 20D$, 下游直管段长度 $l \geq 5D$ (D 为管道直径),以保证流体流过旋涡发生体时能达到产生稳定涡街所必要的流动条件。此时在涡街流量计安装截面上已形成稳定的流速分布,且管道内的流动为充分发展的湍流。为了能够模拟该截面的流速分布,标定装置的上下游直管段长度和管道直径应与实际管道相一致。运动相似条件式(2)表明,标定时仅仅给出流量 Q 与旋涡频率 f 的定量关系是不够的,同时还要保证涡街流量计所在截面上,标定的和实际管流的

$$\xi = \bar{u} / U \quad (3)$$

值相等。式中 $\bar{u} = Q/S$ 为平均流速, S 为管道截面积。从本质上说,涡街流量计是一种流速测量仪表,旋涡频率只与流速有关。在一定的雷诺数下,当速度剖面较为饱满时,旋涡频率主要依赖于最大流速 U ,因此只要 U 相等则旋涡频率也就大致相等,即使是截面的流速分布有较大差异。而流经某一截面的介质体积流量则取决于该截面的平均流速 \bar{u} 。因此,要从 U 与 f 的基本测量数据导出 Q 与 f 的关系需引进无量纲流速分布参数 ξ 。为便于叙述和讨论,考虑一维定常不可压等截面管流情形。显然沿管流的轴线方向截面平均流速 \bar{u} 、流量 Q 和雷诺数 $Re = \bar{u} D \rho / \mu$ 都是不变的。然而当涡街流量计位于管流的不同轴向位置时,流量计仪表所显示的旋涡脱落频率却是不同的。这是由于截面中心附近最大流速 U 在管道轴线方向变化所致。因此,将实验室标定的涡街流量计用于现场时由于 ξ 值不一致而引起的计量误差是必须予以注意的一个重要问题。

当然,我们也可以设计一种吸气式的组合式标定装置,使其上游和下游直管段长度符合标定要求,并在其下游直管段后部装接不同喉部直径的文丘利音速喷管与真空罐连通。当管道稳定流场建立后测量喷管喉部的气流总压 P_0 和总温 T_0 。(已知喷管喉部面积 A^*),便可求出管流的质量流量,再除以喷管前方粗管段低速流的空气密度而得到体积流量 Q ;与此同时,测量涡街流量计的旋涡频率 f ,使流量 Q 与旋涡频率 f 一一对应,经数据拟合便给出 Q 与 f 的关系式。这种标定方式似乎不必求参数 ξ 而直接建立起 Q 与 f 的关系,然而它对涡街流量计上游和下游的直管段长度却有严格的要求,这样才能模

拟实际管流的流速分布。

3 标定公式的选用及数据处理

关于涡街流量计的标定公式, 目前计量部门 and 用户普遍使用的公式为

$$Q = f/K' \quad (4)$$

事实上, 式(4)是理想化了的结果, 频率 f 为零时, 流量 Q 也为零。而实际情况总是偏离上式。对涡街流量计的测量数据表明, 采用式(4)时, 对低速即低频情况数据的拟合误差较大。故本文认为标定公式应该采用不经过坐标原点的直线方程, 并给出其适用范围。

标定实验时, 将涡街流量计竖直地插入实验装置的来流中, 使旋涡发生体的迎流面垂直于流向。用皮托管或热线风速仪测量截面最大流速 U , 用计数器测量所对应的流量计旋涡频率 f , 然后对所得数据用最小二乘法进行拟合, 给出^[2]

$$U = a + bf \quad (5)$$

和 b 分别是直线方程(5)的截距和斜率, 其数值分别由下式求得

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\sum U_i \sum f_i^2 - \sum f_i U_i \sum f_i}{N \sum f_i^2 - (\sum f_i)^2} \\ b &= \frac{N \sum f_i U_i - \sum f_i \sum U_i}{N \sum f_i^2 - (\sum f_i)^2} \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

下面导出流量 Q 与旋涡频率 f 的关系式。对式(5)两边乘以管道截面积 S , 得到

$$US = S(a + bf) \quad (7)$$

并利用式(3)

$$\bar{u} S = S\xi(a + bf)$$

因为 $Q = \bar{u} S$, 所以

$$Q = K_0 + Kf \quad (8)$$

式中 $f \geq f_0$, f_0 是对应于下临界雷诺数的旋涡频率。当雷诺数 Re (特征长度取为旋涡发生体迎流面最大宽度 d) 大于此临界雷诺数时, Strouhal 数 St 保持不变。

从上述讨论和公式推导可以看出, 对于标定涡街流量计, 最主要的有两点: 一是经测试提供最大流速 U 与旋涡频率 f 的关系; 二是以测试或分析办法提供 ξ 值。而 ξ 则以计入流速分布、管道形状及雷诺数的影响。因此, 若已确定 ξ 值, 标定工作便可大为简化, 只需给出 U 与 f 的关系而没有必要再去考虑流速分布的影响。如前所述, 当截面速度剖面较为饱满时, 旋涡频率只与截面最大流速有关, 且为线性。因此, 对于某一流量计, 原则上旋涡频率 f 对最大流速 U 的变化率即 df/dU , 在沿标定装置的轴线方向, 其数值是基本不变的。这对于适当缩短标定装置的轴向尺寸, 降低标定费用是很有实际意义的。

4 湍流时圆管的流速分布参数

要确定流速分布参数 ξ 值主要有两种途径,即现场测量和分析办法,而后者又分为边界层理论分析办法和基于测量数据的半经验分析办法。下面分别予以叙述。

4.1 现场测量

现场测定大口径管流的 ξ 值,一个较为简单的办法是用传感器测量涡街流量计安装截面的流速分布,然后积分求出介质流量,再用管道截面积 S 除此积分值,给出其平均流速 \bar{u} ,而截面最大流速 U 则是由该截面流速分布的最大测量值给出,从而确定其某一流速下的 ξ 值。

4.2 边界层理论分析办法

标定涡街流量计时要求几何相似、运动相似和动力相似,这一切具体实施起来实属不易。例如,当管径较大时,由于受实验场地的限制,标定装置的上游和下游直管段长度难以达到标定要求。若在风洞中标定,因风洞实验段较短而气流接近于均匀流,与实际管流的流速分布差别较大。而现场测量不仅把所需的测量仪器和微机等要带到现场去,而且还应具备有必要的测试条件和环境(如电源、工作间等),因而常受到较大限制。因此,在很多情况下,我们却不得不借助于分析办法来确定 ξ 值。对于充分发展为湍流的圆管内的流动,由边界层理论给出^[3]

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5.751g \frac{\bar{R} u_* \rho}{\mu} + 1.75 \quad (9)$$

$$\frac{U}{u_*} = 5.751g \frac{\bar{R} u_* \rho}{\mu} + 5.5 \quad (10)$$

由式(9)、(10)

$$\xi = \frac{\bar{u}}{U} = \frac{5.751g \frac{\bar{R} u_* \rho}{\mu} + 1.75}{5.751g \frac{\bar{R} u_* \rho}{\mu} + 5.5} \quad (11)$$

并有关系式

$$\left. \begin{aligned} R_D &= \bar{u} D \rho / \mu \\ \lambda &= 0.0032 + 0.221 / R_D^{0.237} \\ \bar{u} / u_* &= 2\sqrt{2} / \sqrt{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 u_* 为摩阻速度, $\bar{R} = D/2$ 。若已知管道直径 D 、平均流速 \bar{u} 、介质密度 ρ 和粘性系数 μ ,则由式(12)分别确定 R_D 、 λ 、 u_* , 求出 $\bar{R} u_* \rho / \mu$, 最后由式(11)给出截面流速分布参数 ξ 值。

对于矩形截面的管流,目前还没有较为成熟而简便的理论分析方法可供使用。作为工程估算,以该矩形截面的水力学直径

$$D_k = 4S/C \quad (13)$$

来代替圆管直径, 然后按上述步骤计算即可。式中 S 为截面积, C 为截面周长。在圆截面情况下, 水力学直径等于圆的直径。

因为在推导式(9)时截面速度剖面包括粘性底层均用了代数律, 所以式(11)给出的 ξ 值在相同雷诺数下较之后面的半经验公式(15)略高2%左右。

4.3 半经验分析办法

Nikuradse 曾在很宽的雷诺数范围内, 即 $4 \times 10^3 \leq R_D \leq 3.2 \times 10^4$, 对光滑圆管的摩擦律和速度剖面进行了很全面的实验研究^[4]。表明当雷诺数增大时, 速度剖面更加饱满。当管道内的流动为湍流时, 在半径方向上距管道中心轴为 r 处的流速可用经验公式表示如下

$$\frac{u}{U} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (14)$$

其中指数 n 随雷诺数稍有变化。根据 Nikuradse 的测量结果制成了表 1^[5]。这里应该注意的问题是, 流体要流经足够长的直管段后, 才能成为式(14)表示的流速分布。在弯管和阀门的前后不会形成这样的流速分布。在涡街流量计的上游侧和下游侧需要适当长度的直管段, 其理由就在于此。

由式(14)容易推导出圆管流动中平均流速与最大流速之比

$$\xi = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (15)$$

ξ 与速度分布指数 n 的关系

n	6	7	8	9	10
ξ	0.791	0.817	0.837	0.853	0.866

为了便于分析和使用, 本文对表 1 数据进行最小二乘法拟合, 给出速度分布指数 n 与雷诺数 R_D 的简洁关系式, 即

$$n = -0.409649 + 0.696355 \ln R_D \quad (16)$$

$$2.56 \times 10^4 \leq R_D \leq 307.4 \times 10^4$$

n 是关于雷诺数 R_D 的单调函数, 随 R_D 的增大而增加。从图 1 可以看出, 在宽广的雷

表 1 雷诺数 R_D 与 n 的关系^[5]

$R_D \times 10^{-4}$	n	$R_D \times 10^{-4}$	n	$R_D \times 10^{-4}$	n
2.56	7.0	42.8	8.6	110.0	9.4
10.54	7.3	53.6	8.8	152.0	9.7
20.56	8.0	57.2	8.8	198.0	9.8
32.0	8.3	64.0	8.8	235.2	9.8
38.4	8.5	70.0	9.0	278.0	9.9
39.56	8.5	84.4	9.2	307.0	9.9

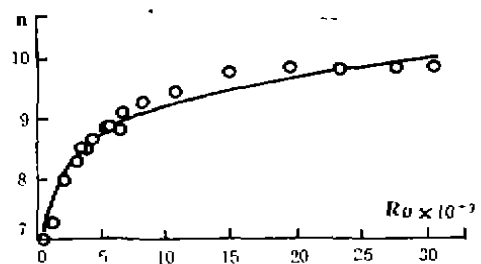


图 1 速度分布指数 n 与雷诺数 R_D 的关系
——拟合公式(16) ○ 表1实验数据

诺数范围内式(16)与表1 Nikuradse 实验数据的符合程度是使人能够接受的,是对实验数据的较好逼近,可与式(15)联用,求出 ξ 随 R_D 的变化。

5 结 论

根据上述详细的分析讨论,可得出如下主要结论:

(1) 对管流引进一相似参数,即截面平均流速 \bar{u} 与最大流速 U 之比 $\xi = \bar{u}/U$ 。运动相似则要求在涡街流量计所在截面上,标定的和实际管流的 ξ 值相等。

(2) 探讨了一种以测试手段和分析办法相结合的标定涡街流量计的新的技术途径,旨在缩短大口径管流标定装置的轴向尺寸,降低标定费用。

(3) 对于充分湍流的圆管流动,根据 Nikuradse 的实验结果,给出了截面流速分布参数 ξ 随雷诺数变化的简洁计算公式。

(4) 关于流量 Q 与旋涡频率 f 的标定公式,似应采用不经过坐标原点的直线方程,并给出其适用范围。

参 考 文 献

- 1 朱水乔,刘尚谕.涡街流量计用于蒸汽计量的经济效益比较.计量技术,1993,(8)
- 2 许可法,何龙德等.涡街流量计标定报告.中国科学院力学研究所,1993.
- 3 吴望一编著.流体力学(下册).北京大学出版社,1983,360~365
- 4 H.史里希廷著,徐燕侯等译.边界层理论(下册).科学出版社,1991,672~675
- 5 川田裕郎等编著,罗秦等译.流量测量手册.中国计量出版社,1982,14~18

THE DISTRIBUTION PARAMETER OF FLOW VELOCITY AT THE CROSS SECTION OF PIPE AND ITS APPLICATION TO THE CALIBRATION OF VORTEX FLOWMETER

He Longde

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract The several problems are discussed in this paper, those are the requirements of calibration tests to the distribution of flow velocity at the cross section of pipe, the selection of fit formula and data processing, and the noticeable problems as application the calibration coefficients of vortex flowmeter. A new technical way of the calibration of vortex flowmeter has been proposed by means of measurement with analytical method, in order to reduce the axial size of calibration equipments, and the calibration costs. This paper provides a simple and direct expression about mean velocity to maximum velocity ratio at the cross section of pipe throughout the range of the Reynolds numbers studies, by using Nikuradse's experiment data for the fully developed turbulent flow in the pipe of circular cross section.

Key words vortex flowmeter flow in a pipe distribution parameter of flow velocity calibration tests measurement of frequency