



# 涡街流量计

## 一、概述

在特定的流动条件下，一部分流体动能转化为流体振动，其振动频率与流速（流量）有确定的比例关系，依据这种原理工作的流量计称为流体振动流量计。目前流体振动流量计有三类：涡街流量计、旋进（旋涡进动）流量计和射流流量计。流体振动流量计具有以下一些特点：

- 1) 输出为脉冲频率，其频率与被测流体的实际体积流量成正比，它不受流体组分、密度、压力、温度的影响；
- 2) 测量范围宽，一般范围度可达 10: 1 以上；
- 3) 精确度为中上水平；
- 4) 无可动部件，可靠性高；
- 5) 结构简单牢固，安装方便，维护费较低；
- 6) 应用范围广泛，可适用液体、气体和蒸气。

本文仅介绍涡街流量计（以下简称 VSF 或流量计）。

VSF 是在流体中安放一根（或多根）非流线型阻流体（bluff body），流体在阻流体两侧交替地分离释放出两串规则的旋涡，在一定的流量范围内旋涡分离频率正比于管道内的平均流速，通过采用各种形式的检测元件测出旋涡频率就可以推算出流体的流量。

早在 1878 年斯特劳哈尔（Strouhal）就发表了关于流体振动频率与流速关系的文章，斯特劳哈尔数就是表示旋涡频率与阻流体特征尺寸，流速关系的相似准则。人们早期对涡街的研究主要是防灾的目的，如锅炉及换热器钢管固有频率与流体涡街频率合拍将产生共振而破坏设备。涡街流体振动现象用于测量研究始于 20 世纪 50 年代，如风速计和船速计等。60 年代末开始研制封闭管道流量计--涡街流量计，诞生了热丝检测法及热敏检测法 VSF。70、80 年代涡街流量计发展异常迅速，开发出众多类型阻流体及检测法的涡街流量计，并大量生产投放市场，像这样在短短几年时间内就达到从实验室样机到批量生产过程的流量计还绝无仅有。

我国 VSF 的生产亦有飞速发展，全国生产厂达数十家，这种生产热潮国外亦未曾有过。应该看到，VSF 尚属发展中的流量计，无论其理论基础或实践经验尚较差。至今最基本的流量方程经常引用卡曼涡街理论，而此理论及其一些定量关系是卡曼在气体风洞（均匀流场）中实验得出的，它与封闭管道中具有三维不均匀流场其旋涡分离的规律是不一样的。至于实践经验更是需要通过长期应用才能积累。一般流量计出厂校验是在实验室参考条件下进行的，在现场偏离这些条件不可避免。工作条件的偏离到底会带来多大的附加误差至今在标准及生产厂资料中尚不明确。这些都说明流量计的迅速发展需求基础研究工作必须跟上，否则在实用中经常会出现一些预料不到的问题，这就是用户对 VSF 存在一些疑虑的原因，它亟需探索解决。

VSF 已跻身通用流量计之列，无论国内外皆已开发出多品种。全系列、规格齐全的产品，对于标准化工作亦很重视，流量计存在一些问题也是发展中的正常现象。

## 二、工作原理与结构

### 1. 工作原理

在流体中设置旋涡发生体（阻流体），从旋涡发生体两侧交替地产生有规则的旋涡，这种旋涡称为卡曼涡街，如图 1 所示。旋涡列在旋涡发生体下游非对称地排列。设旋涡的发生



频率为  $f$ ，被测介质来流的平均速度为  $U$ ，旋涡发生体迎面宽度为  $d$ ，表体通径为  $D$ ，根据卡曼涡街原理，有如下关系式

$$f = SrU/d = SrU/md$$

(1)

式中  $U$ --旋涡发生体两侧平均流速，m/s；

$Sr$ --斯特劳哈尔数；

$m$ --旋涡发生体两侧弓形面积与管道横截面面积之比

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \frac{d}{D} \sqrt{1 - (d/D)^2} + \sin^{-1} \frac{d}{D} \right]$$

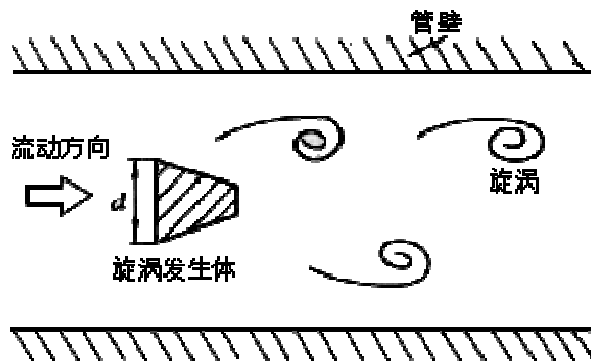


图 1 卡曼涡街

管道内体积流量  $qv$  为

$$qv = \pi D^2 U / 4 = \pi D^2 m d f / 4 Sr$$

(2)

$$K = f / qv = [ \pi D^2 m d / 4 Sr ]^{-1}$$

(3)

式中  $K$ --流量计的仪表系数，脉冲数/ $m^3$  ( $P/m^3$ )。

$K$  除与旋涡发生体、管道的几何尺寸有关外，还与斯特劳哈尔数有关。斯特劳哈尔数为无量纲参数，它与旋涡发生体形状及雷诺数有关，图 2 所示为圆柱状旋涡发生体的斯特劳哈尔数与管道雷诺数的关系图。由图可见，在  $Re_D = 2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6$  范围内， $Sr$  可视为常数，这是仪表正常工作范围。当测量气体流量时，VSF 的流量计算式为

$$qv_n = \frac{p_n I_n Z_n}{p_n T Z} = \frac{f}{K} \frac{p_n I_n Z_n}{p_n T Z} \quad (4)$$

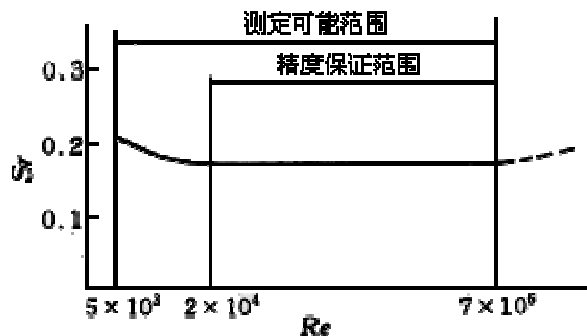


图 2 斯特劳哈尔数与雷诺数关系曲线



式中  $q_{vn}$ ,  $q_{v--}$  分别为标准状态下 ( $0^{\circ}\text{C}$  或  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $101.325\text{kPa}$ ) 和工况下的体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  
 $P_n$ ,  $P_{--}$  分别为标准状态下和工况下的绝对压力,  $\text{Pa}$ ;  
 $T_n$ ,  $T_{--}$  分别为标准状态下和工况下的热力学温度,  $\text{K}$ ;  
 $Z_n$ ,  $Z_{--}$  分别为标准状态下和工况下气体压缩系数。

由上式可见, VSF 输出的脉冲频率信号不受流体物性和组分变化的影响, 即仪表系数在一定雷诺数范围内仅与旋涡发生体及管道的形状尺寸等有关。但是作为流量计在物料平衡及能源计量中需检测质量流量, 这时流量计的输出信号应同时监测体积流量和流体密度, 流体物性和组分对流量计量还是有直接影响的。

## 2. 结构

VSF 由传感器和转换器两部分组成, 如图 3 所示。传感器包括旋涡发生体 (阻流体)、检测元件、仪表表体等; 转换器包括前置放大器、滤波整形电路、D/A 转换电路、输出接口电路、端子、支架和防护罩等。近年来智能式流量计还把微处理器、显示通讯及其他功能模块亦装在转换器内。

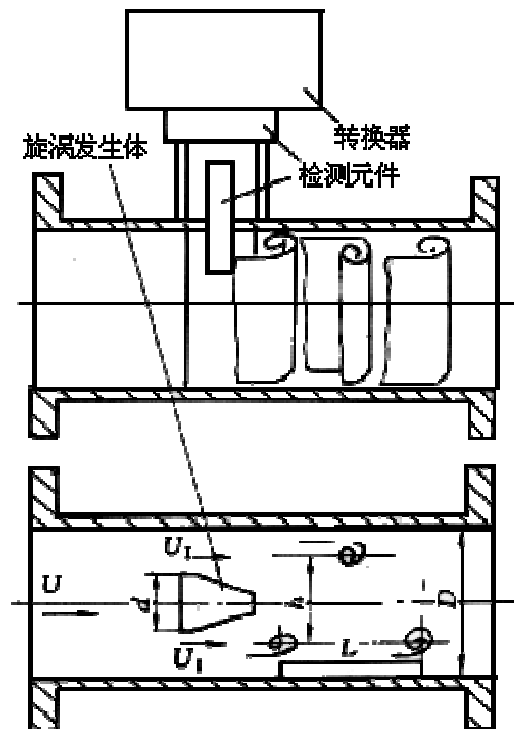


图 3 涡街流量计

### (1) 旋涡发生体

旋涡发生体是检测器的主要部件, 它与仪表的流量特性 (仪表系数、线性度、范围度等) 和阻力特性 (压力损失) 密切相关, 对它的要求如下。

- 1) 能控制旋涡在旋涡发生体轴线方向上同步分离;
- 2) 在较宽的雷诺数范围内, 有稳定的旋涡分离点, 保持恒定的斯特劳哈尔数;
- 3) 能产生强烈的涡街, 信号的信噪比高;
- 4) 形状和结构简单, 便于加工和几何参数标准化, 以及各种检测元件的安装和组合;
- 5) 材质应满足流体性质的要求, 耐腐蚀, 耐磨蚀, 耐温度变化;
- 6) 固有频率在涡街信号的频带外。

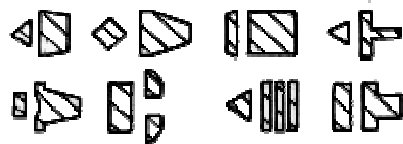
已经开发出形状繁多的旋涡发生体, 它可分为单旋涡发生体和多旋涡发生体两类, 如图



4 所示。单旋涡发生体的基本形有圆柱、矩形柱和三角柱，其他形状皆为这些基本形的变形。三角柱形旋涡发生体是应用最广泛的一种，如图 5 所示。图中 D 为仪表口径。为提高涡街强度和稳定性，可采用多旋涡发生体，不过它的应用并不普遍。



(a) 单旋涡发生体



(b) 双、多旋涡发生体

图 4 旋涡发生体

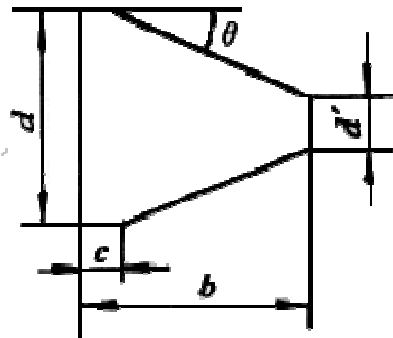


图 5 三角柱旋涡发生体

$d/D=0.2\sim0.3$ ;  $c/D=0.1\sim0.2$ ;

$b/d=1\sim1.5$ ;  $\theta = 15^\circ\sim65^\circ$

## (2) 检测元件

流量计检测旋涡信号有 5 种方式。

- 1) 用设置在旋涡发生体内的检测元件直接检测发生体两侧差压；
- 2) 旋涡发生体上开设导压孔，在导压孔中安装检测元件检测发生体两侧差压；
- 3) 检测旋涡发生体周围交变环流；
- 4) 检测旋涡发生体背面交变差压；
- 5) 检测尾流中旋涡列。

根据这 5 种检测方式，采用不同的检测技术（热敏、超声、应力、应变、电容、电磁、光电、光纤等）可以构成不同类型的 VSF，如表 1 所示。

表 1 旋涡发生体和检测方式一览表

序号	旋涡发生体截面形状	传感器		序号	旋涡发生体截面形状	传感器	
		检测方式	检测元件			检测方式	检测元件



1		方式 5)	超声波束	9		方式 2)	反射镜/光电元件
2		方式 2)	悬臂梁/电容, 悬臂梁/压电片 热敏元件 超声波束 应变元件	10		方式 5)	膜片/压电元件
		方式 3)		11		方式 3)	扭力管/压电元件
3		方式 1) 方式 2)	压电元件 压电元件	12		方式 4)	扭力管/压电元件
4		方式 1)	膜片/电容 热敏元件 振动体/电磁传感器	13		方式 4)	振动片/光纤传感器
		方式 2) 方式 2)		14		方式 5)	超声波束
5		方式 1)	膜片/静态电容	15		方式 2)	应变元件
6		方式 1)	磁致伸缩元件	16		方式 1)	压电元件
7		方式 1)	膜片/压电元件	17		方式 4)	应变元件
8		方式 2)	热敏元件	18		方式 5)	超声波束

(3) 转换器

检测元件把涡街信号转换成电信号, 该信号既微弱又含有不同成分的噪声, 必须进行放大、滤波、整形等处理才能得出与流量成比例的脉冲信号。

不同检测方式应配备不同特性的前置放大器, 如表 2 所列。

表 2 检测方式与前置放大器

检测方法	热敏式	超声式	应变式	应力式	电容式	光电式	电磁式
前置放大器	恒流放大器	选频放大器	恒流放大器	电荷放大器	调谐-振动放大器	光电放大器	低频放大器

转换器原理框图如图 6 所示。

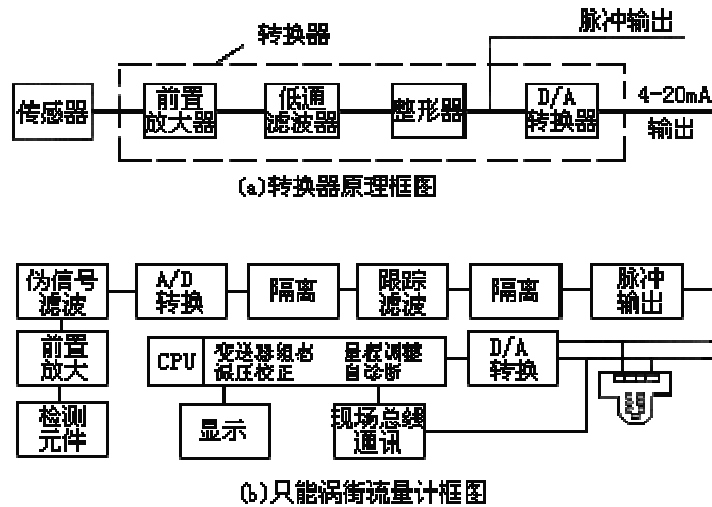


图 6 转换器原理框图

#### (4) 仪表表体

仪表表体可分为夹持型和法兰型，如图 7 所示。

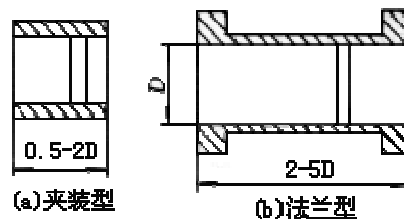


图 7 仪表表体

### 三、 优点和局限性

#### 1. 优点

VSF 结构简单牢固，安装维护方便（与节流式差压流量计相比较，无需导压管和三阀组等，减少泄漏、堵塞和冻结等）。

适用流体种类多，如液体、气体、蒸气和部分混相流体。

精确度教高（与差压式，浮子式流量计比较），一般为测量值的（ $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ ）R。

范围宽度，可达 10: 1 或 20: 1。

压损小（约为孔板流量计  $1/4 \sim 1/2$ ）。

输出与流量成正比的脉冲信号，适用于总量计量，无零点漂移；

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，即仪表系数仅与旋涡发生体及管道的形状尺寸有关，只需在一种典型介质中校验而适用于各种介质，如图 8 所示。

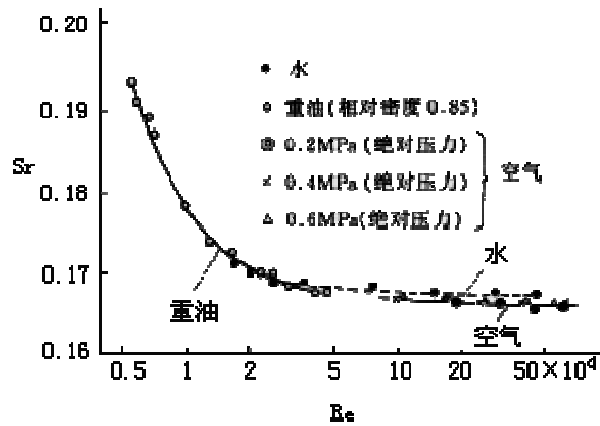


图 8 不同测量介质的斯特劳哈尔数

可根据测量对象选择相应的检测方式，仪表的适应性强。

VSF 在各种流量计中是一种较有可能成为仅需干式校验的流量计。

## 2. 局限性

VSF 不适用于低雷诺数测量 ( $Re_0 \geq 2 \times 10^4$ )，故在高粘度、低流速、小口径情况下应用受到限制。

漩涡分离的稳定性受流速分布畸变及旋转流的影响，应根据上游侧不同形式的阻流件配置足够长的直管段或装设流动调整器（整流器），一般可借鉴节流式差压流量计的直管段长度要求安装。

力敏检测法 VSF 对管道机械振动较敏感，不宜用于强振动场所。

与涡轮流量计相比仪表系数较低，分辨率低，口径愈大愈低，一般满管式流量计用于 DN300 以下。

仪表在脉动流、混相流中尚欠缺理论研究和实践经验。

## 四、分类与凡种类型产品简介

### 1. 分类

涡街流量计可按下述原则分类。

按传感器连接方式分为法兰型和夹装型。

按检测方式分为热敏式、应力式、电容式、应变式、超声式、振动体式、光电式和光纤式等。

按用途分为普通型、防爆型、高温型、耐腐型、低温型、插入式和汽车专用型等。

按传感器与转换器组成分为一体型和分离型。

按测量原理分为体积流量计、质量流量计。

### 2. 几种类型产品简介

各类涡街流量计性能比较如表 3 所示。

表 3 不同检测方法涡街流量计比较

名	检测	检测技术	口径	介质	范围	雷诺数	简	牢	灵	耐	耐	耐	应用范围
---	----	------	----	----	----	-----	---	---	---	---	---	---	------



称	变化量	检测原理	检测元件	/mm	温度 °C	度	范围	单程 度	固程 度	敏度	热性	振性	污力 能力		
热敏式涡街流量计	流速变化	加热体冷却	热敏元件	25~200	-196~+205	15~30	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	△	√	√	×	√	×	清洁、无腐蚀液体、气体	
超声式涡街流量计		声束被调制	超声换能器	25~150	-15~+175	30	3×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup>	×	△	√	△	√	√	小口径液体、气体	
电容式涡街流量计	压力变化	压差检测	膜片/电容	15~300	-200~+400	30	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	×	△	√	√	△	△	液体、气体、蒸汽	
应力式涡街流量计			膜片/压电片	50~200	-18~+205	16	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	×	△	√	√	×	√	液体、气体、蒸汽	
振动体式涡街流量计			压差检测	圆盘/电磁	50~200	-268~-48	10~30	5×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup>	√	×	△	√	×	×	极低温液态气体
				棱球/电磁		-40~+427									高温蒸汽
光电式涡街流量计			压差检测	反射镜/光电元件	40~80	-10~+50	40	3×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>	√	△	√	×	×	×	低压常温气体
应变式涡街流量计	升力作用	应变检测	应变元件	50~150	-40~120	15	10 <sup>4</sup> ~3×10 <sup>6</sup>	△	√	×	△	△	√	液体	
应力式涡街流量计			应力检测	压电元件	15~300	-40~+400	10~20	10 <sup>4</sup> ~7×10 <sup>6</sup>	√	√	√	√	×	√	液体、气体、蒸汽

注：√-较好、△-一般、×-差。

以下简介几种类型 VSF。

(1) 应力式 VSF

如图 9 所示, 应力式 VSF 应用检测方式 1) ~4) (见二、2.), 它把检测元件受到的升力以应力形式作用在压电晶体元件上, 转换成交变的电荷信号, 经电荷放大、滤波、整形后得到旋涡频率信号。压电传感器响应快、信号强、工艺性好、制造成本低、与测量介质不接触、可靠性高。仪表的工作温度范围宽, 现场适应性强, 可靠性较高, 它是目前 VSF 的主要产品类型。

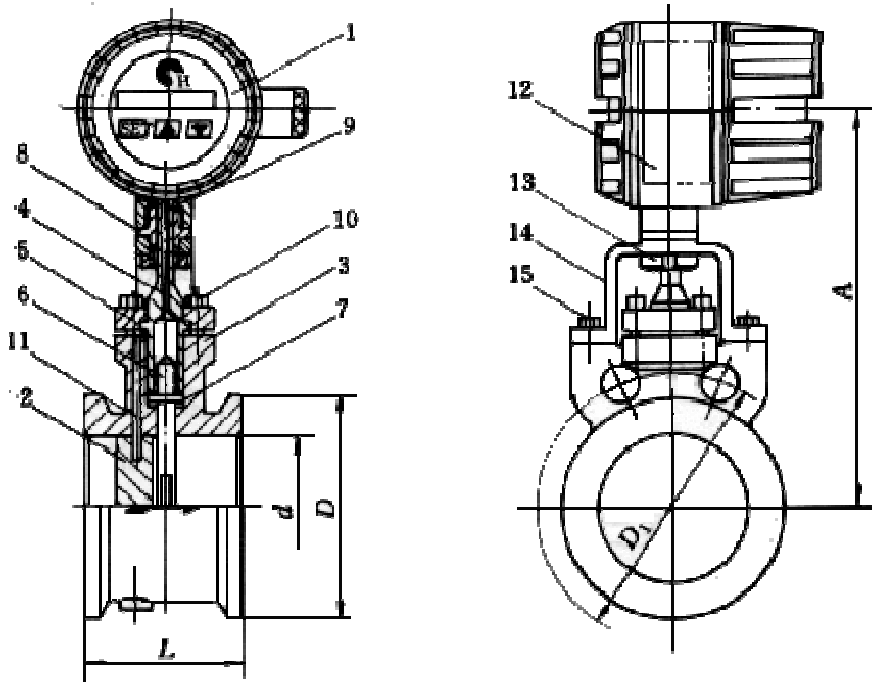


图 9 应力式涡街流量计

- 1-表头组; 2-三角柱; 3-表体; 4-联轴; 5-压板; 6-探头; 7-密封垫; 8-接头;  
9-密封垫圈; 10-螺栓; 11-销; 12-铭牌; 13-圆螺母; 14-支架; 15-螺栓

但是, 它对管道振动较敏感, 是其主要缺点, 几年来, 生产厂家做了大量工作以弥补此缺陷: 如对仪表本身结构, 检测位置以及信号处理等采取措施; 在管道安装减震方式下功夫; 向用户提供选点咨询指导等, 已经取得一定的进展, 当然如测量对象有较强的振动还是不用为好。

## (2) 电容式 VSF

电容式 VSF 应用检测方式 1)、2), 安装在涡街流量传感器中的电容检测元件相当于一个悬臂梁 (见图 10)。当旋涡产生时, 在两侧形成微小的压差, 使振动体绕支点产生微小变形, 从而导致一个电容间隙减少 (电容量增大), 另一个电容间隙增大 (电容量下降), 通过差分电路检测电容差值。当管道有振动时, 不管振动是何方向, 由振动产生的惯性力同时作用在振动体及电极上, 使振动体与电极都在同方向上产生变形, 由于设计时保证了振动体与电极的几何结构与尺寸相匹配, 使它们的变形量一致, 差动信号为零。这就是电容检测元件耐振性能好的原因。虽然由于制造工艺的误差, 不可能完全消除振动的影响, 但大大提高了耐振性能。试验证明, 其耐振性能超过 1g。电容式另一个优点是可耐高温达 400°C, 温度对电容检测元件的影响有两方面: 温度使电容间介电常数发生变化和电极的几何尺寸随温度而变, 这些导致电容值发生变化, 另一方面由于温度升高金属热电子发射造成电容的漏电

流增大。试验证明，当温度升高至 400°C 时无论电容值变化或漏电流增大都未影响仪表的基本性能。

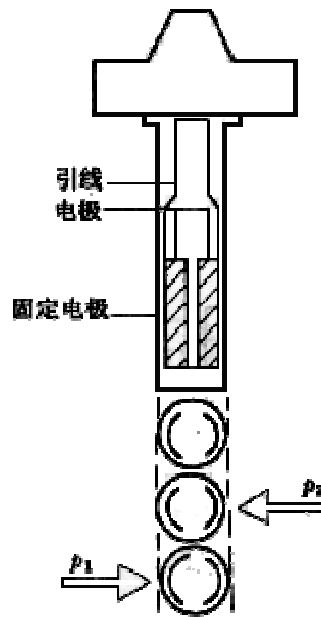


图 10 电容式检测元件

### (3) 热敏式 VSF

热敏式 VSF 采用检测方式 2)、3)，如图 11 所示。旋涡分离引起局部流速变化，改变热敏电阻阻值，恒流电路把桥路电阻变化转换为交变电压信号。这种仪表检测灵敏度较高，下限流速低，对振动不敏感，可用于清洁、无腐蚀性流体测量。

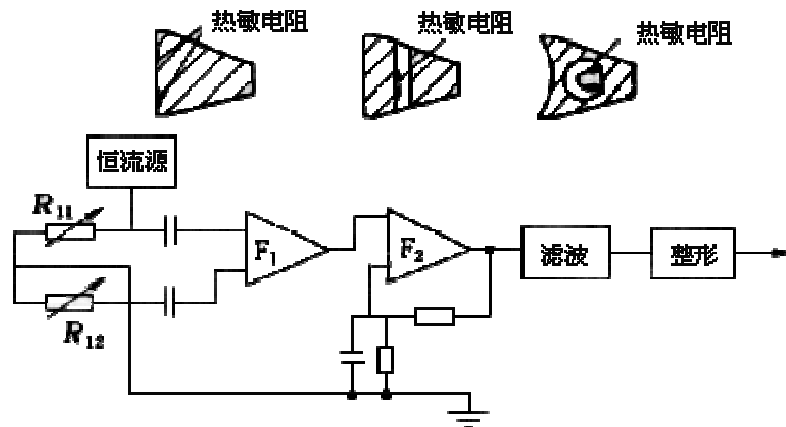


图 11 热敏式涡街流量计

$R_{11}$ ,  $R_{12}$ -热敏电阻

### (4) 超声式 VSF

超声式 VSF 采用检测方式 5)，如图 12 所示。由图可见，在管壁上安装二对超声探头  $T_1$ ,  $R_1$ ,  $T_2$ ,  $R_2$ ，探头  $T_1$ ,  $T_2$  发射高频、连续声信号，声波横穿流体传播。当旋涡通过声束时，每一对旋转方向相反的旋涡对声波产生一个周期的调制作用，受调制声波被接收探头  $R_1$ ,  $R_2$  转换成电信号，经放大、检波、整形后得旋涡信号。仪表有较高检测灵敏度，下限流速较低，

但温度对声调制有影响，流场变化及液体中含气泡对测量影响较大，故仪表适用于温度变化小的气体和含气量微小的液体流量测量。

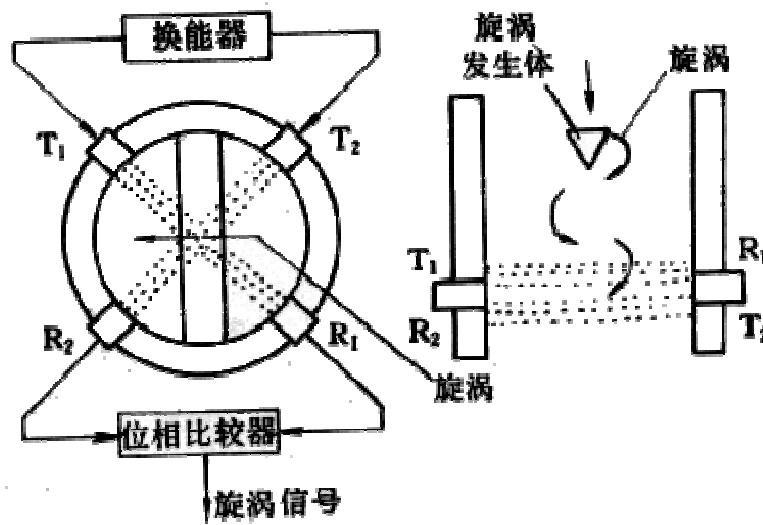


图 12 超声式涡街流量传感器

#### (5) 振动体式 VSF

振动体式 VSF 采用检测方式 2)，如图 13 所示。在旋涡发生体轴向开设圆柱形深孔，孔内放置软磁材料制作的轻质空心小球或圆盘（振动体），旋涡分离产生的差压推动振动体上下运动，位于振动体上方的电磁传感器检测出旋涡频率。它只适用于清洁度较高的流体（如蒸汽），可用于极高温（427°C）及极低温（-268°C），这是其特点。

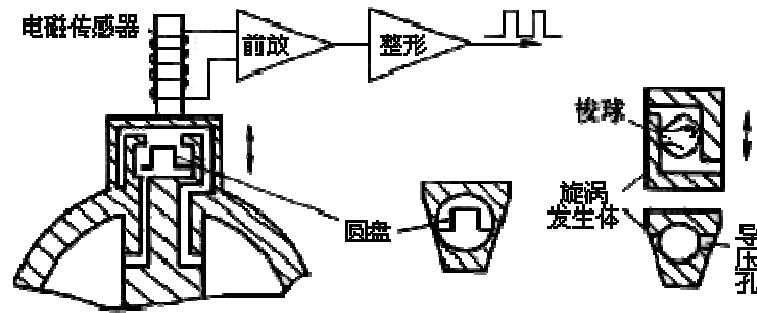


图 13 振动体式涡街流量计

#### (6) 升力式涡街质量流量计

旋涡分离的同时，旋涡发生体受到流体作用的升力，升力  $F$  的大小为

$$F = C_L \rho U^2 / 2$$

(5)

式中  $C_L$  - 旋涡发生体升力系数。

以式 (5) 除以式 (1)，经整理后可得质量流量  $q_m$

$$q_m = \rho U (\pi / 4) D^2 = \pi D^2 S r / 2 C_{md} \times F / f$$

(6)

由式 (6) 可看出，质量流量  $q_m$  与升力  $F$  成正比。图 14 为原理框图。从压电检测元件取出旋涡信号，经电荷转换器后分两路处理：一路经有源滤波器、施密特整形器和  $f/V$  转换

器，获得与流速成正比的信号；另一路经放大器、滤波器获得信号幅值与  $\rho U^2$  成正比的信号。这两路信号经除法器运算，获得质量流量。

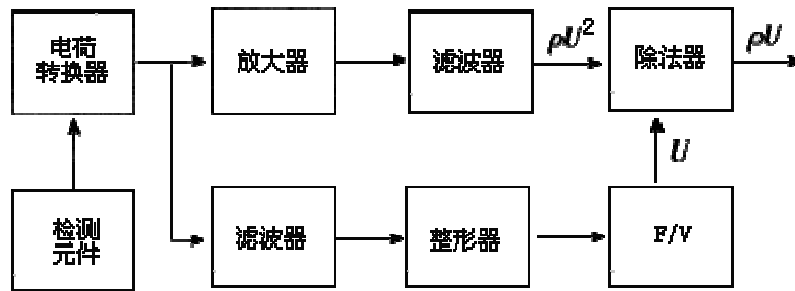


图 14 升力式涡街质量流量计原理框图

该方法结构简单，但信号幅值与压电元件稳定性、放大器稳定性、现场安装条件、被测介质温度等多种因素有关，测量精确度难以提高。

#### (7) 差压式涡街质量流量计

流体通过旋涡发生体，产生旋涡分离和尾流震荡，部分能量被消耗和转换，在旋涡发生体前后产生压力损失

$$\Delta p = C_0 \rho U^2 / 2$$

(7)

式中  $C_0$  - 涡街流量传感器阻力系数。

以式 (7) 除式 (1)，经整理后得质量流量  $q_m$

$$q_m = \rho U (\pi / 4) D^2 = (\pi D^2 S r / 2 m d C_0) (\Delta p / f)$$

(8)

图 15 示为差压式涡街质量流量计原理框图，传感器输出与体积流量成正比的频率，差压单元测出旋涡发生体前后特定位置的差压  $\Delta P$ ，经计算单元计算，获得质量流量  $q_m$ 。选择阻力特性和流量特性俱佳的旋涡发生体，确定取压孔位置，建立  $C_0$  的数学模型是技术关键。

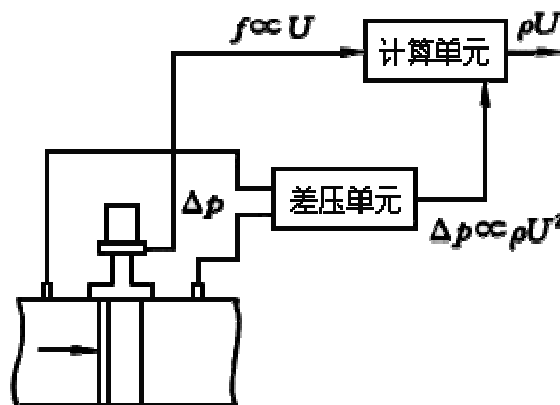


图 15 差压式涡街质量流量计

## 五、选用考虑要点

### 1. 应用概况



VSF 自 20 世纪 70 年代在工业上应用以来,由于它具有一些突出的特点,受到用户欢迎,并得到迅速发展。像它这样开发只有 20 多年即已跻身通用流量计之列,在流量计中是少有的。由于应用时间短,无论理论研究或实践经验都比较薄弱,不免出现一些问题,这是不足为怪的。多年实践证明,VSF 的选用(选型和使用)是用好流量计的关键环节,因此仪表制造厂应加强售前服务,即帮助用户选型,并在安装投用上给予指导。只要抓住这一环节,该流量计不失为一种性能不错的流量计。

20 世纪 90 年代中后期世界范围内 VSF 在流量仪表总量中,台数约占 3%~5%,每年 5 万~6 万台,金额占 4%~6%;在我国销售台数约占流量仪表总量(不包括家用燃气表和水表及玻璃管浮子流量计)的 6%~8%,每年 1.5 万~2 万台。

## 2. VSF 的口径选择

VSF 的仪表口径及规格选择很重要,它类似于差压流量计节流装置的设计计算,要遵循一些原则进行选择。仪表口径选择步骤如下。

首先必须明确以下工作参数。

- 1) 流体名称,组分;
- 2) 工作状态的最大、常用、最小流量;
- 3) 最高、常用、最低工作压力和工作温度;
- 4) 工作状态介质的粘度。

VSF 的输出信号是与工作状态的体积流量成正比的,因此如已知气体流量是标准状态体积流量或质量流量时,应把它换算成工作状态下的体积流量  $q_v$

$$q_v = q_n (p_n T Z / p T_n Z_n) \text{ m}^3 / \text{h}$$

(9)

式中  $q_v$ ,  $q_n$ --分别为工作状态和标准状态下的体积流量,  $\text{m}^3 / \text{h}$ ;

$P$ ,  $P_n$ --分别为工作状态和标准状态下的绝对压力, Pa;

$T$ ,  $T_n$ --分别为工作状态和标准状态下的热力学温度, K;

$Z$ ,  $Z_n$ --分别为工作状态和标准状态下的气体压缩系数。

工作状态下介质的密度  $\rho$  和体积流量  $q_v$

$$\rho = \rho_n (p T_n Z_n / p_n T Z)$$

(10)

式中  $\rho$ ,  $\rho_n$ --分别为工作状态和标准状态下的介质密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

其余符号同上。

$$q_v = q_m / \rho$$

(11)

式中  $q_m$ --质量流量,  $\text{kg}/\text{h}$ 。

下面需要选择传感器口径。传感器口径选择主要是对流量下限值进行核算。它应该满足两个条件:最小雷诺数不应低于界限雷诺数 ( $Re_c = 2 \times 10^4$ ) 和对于应力式 VSF 在下限流量时旋涡强度应大于传感器旋涡强度的允许值(旋涡强度与升力  $\rho U^2$  成比例关系),对于液体还应检查最小工作压力是否高于工作温度下的饱和蒸气压,即是否会产生气穴现象。

这些条件用数学式可表示如下(12-14)

$$(Q_{vmin})_{\rho} = Q_{vmin} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$$

$$(Q_{vmin})_{\nu} = Q_{vmin} \frac{\nu}{\nu_0}$$

$$P_{min} = 2.7 \Delta P + 1.3 P_v$$



式中  $q_{Vmin}$ ,  $q_{V0min}$ --分别为工作状态和校准状态下的最小体积流量,  $m^3/h$ ;

$(q_{Vmin})_{\rho}$ --满足旋涡强度要求时最小体积流量,  $m^3/h$ ;

$(q_{Vmin})_{\nu}$ --满足最小雷诺数要求时最小体积流量,  $m^3/h$ ;

$\rho$ ,  $\rho_0$ --分别为工作状态和校准状态下介质的密度,  $kg/m^3$ ;

$\nu$ ,  $\nu_0$ --分别为工作状态和校准状态下介质的运动粘度,  $m^2/s$ ;

$P_{min}$ --最小工作压力, Pa;

$\Delta p$ --最大流量时传感器的压力损失, Pa,

$$\Delta p = C_D (\rho U^2 / 2), C_D \approx 2$$

$U$ --管道平均流速,  $m/s$ ;

$P_V$ --工作温度下液体的饱和蒸气压, Pa。

比较  $(q_{Vmin})_{\rho}$ , 和  $(q_{Vmin})_{\nu}$ :

若  $(q_{Vmin})_{\nu} \geq (q_{Vmin})_{\rho}$ , 可测流量范围为  $(q_{Vmin})_{\rho} \sim q_{Vmax}$ , 线性范围为  $(q_{Vmin})_{\nu} \sim q_{Vmax}$ ;

若  $(q_{Vmin})_{\nu} < (q_{Vmin})_{\rho}$ , 可测流量范围和线性范围为  $(q_{Vmin})_{\rho} \sim q_{Vmax}$ 。

流量测量范围的确定还应检查是否处于仪表的最佳工作范围(即上限流量的 1/2~2/3 处)。表 4 示有某型号涡街流量计特定校准条件下各种口径的流量测量范围。

表 4 某型号涡街流量计特定校准条件下流量测量范围

口径 DN/mm	液体/( $m^3/h$ )		气体/( $m^3/h$ )	
	标准测量范围	可选测量范围	标准测量范围	可选测量范围
20	1.2~12	1~15	6~50	5~77
25	1.6~16	1.6~18	8~60	8~120
40	2~30	2~48	18~180	18~310
50	3~50	3~70	30~300	30~480
80	15~150	10~170	70~700	70~1230
100	20~200	15~270	100~1000	100~1920
125	36~360	25~450	150~1500	140~3000
150	50~500	40~630	200~2000	200~4000
200	100~1000	80~1200	400~4000	320~8000
250	150~1500	120~1800	600~6000	550~11000
300	200~2000	180~2500	1000~10000	800~18000

注: 校准条件如下:

1. 液体: 常温水,  $t=20^{\circ}C$ ,  $\rho=998.2kg/m^3$ ,  $\nu=1.006 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

2. 气体: 常温常压空气,  $t=20^{\circ}C$ ,  $P=0.1MPa$  (绝),  $\rho=1.205 kg/m^3$ ,  $\nu=15 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

根据上述原则选择的仪表口径不一定与管道通径相一致, 如不同时应连接异形管并配置一段必要的直管段长度。

#### 【例 1】空气流量测量

(1) 已知条件 最大流量:  $2000m^3/h$  ( $20^{\circ}C, 101.325kPa$ )

最小流量:  $300m^3/h$  ( $20^{\circ}C, 101.325kPa$ )

管道内径: 80mm



工作压力: 0.5MPa (绝)

工作温度: 60°C

## (2) 辅助计算

$$q_{Vmin} = q_{Vmax} = 2000 \frac{101.325 \times (273 + 60) \times 1}{500 \times (273 + 20) \times 1} = 2000 \times 0.230 = 460 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{Vmin} = 300 \times 0.230 = 69 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_n = 1.205 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \rho_n \frac{p_n T_n Z_n}{p T Z} = 1.205 \frac{500 \times (273 + 20) \times 1}{101.3 \times (273 + 60) \times 1} = 1.205 \times 4.342 = 5.232 \text{ kg/m}^3$$

$$v_n = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$v = 19.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

## (3) 口径选择

$$(q_{V0min})_\rho = q_{Vmin} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = 69 \sqrt{\frac{5.232}{1.205}} = 143.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$(q_{V0min})_v = q_{Vmin} \frac{v}{v_0} = 69 \frac{15}{19.12} = 54.13 \text{ m}^3/\text{h}$$

比较  $(q_{V0min})_\rho$  和  $(q_{V0min})_v$ ,

$$(q_{V0min})_\rho > (q_{V0min})_v$$

故可测流量范围为  $(q_{V0min})_\rho \sim q_{Vmax}$ 。即可测流量范围为 143.7~2000m<sup>3</sup>/h, 由表 4 查得 DN100 可满足要求, 这样 VSF 口径与管道通径不一致, 应设置异径管(扩散管)并配置一段直管段。**【例 2】热水流量测量**

## (1) 已知条件

最大流量: 18m<sup>3</sup>/h最小流量: 6 m<sup>3</sup>/h

工作压力: 0.25MPa

工作温度: 90°C

介质密度: 965 kg/m<sup>3</sup>介质粘度: 3.32×10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s

## (2) 口径选择

$$(q_{V0min})_\rho = q_{Vmin} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = 6 \sqrt{\frac{965}{998.2}} = 5.899 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$(q_{V0min})_v = q_{Vmin} \frac{v}{v_0} = 6 \frac{1.006 \times 10^{-6}}{3.32 \times 10^{-7}} = 18.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

比较  $(q_{V0min})_\rho$  和  $(q_{V0min})_v$ ,

$$(q_{V0min})_\rho \leq (q_{V0min})_v$$

可测流量范围为  $(q_{V0min})_\rho \sim q_{Vmax}$ 。查得 DN40、ND50 皆可满足要求, 选择 DN40 更合适些。



## (3) 检查压力损失

最大流量时平均流速  $U_{\max}$  为

$$U_{\max} = \frac{4Q_{V\max}}{3600\pi D^2} = \frac{4 \times 18 \times 10^6}{3600 \times 3.1416 \times 40^2} = 3.98 \text{ m/s}$$

查生产厂提供的资料得  $C_D$ : 2.2

则  $\Delta p = 1.1\rho U_{\max}^2 = 1.1 \times 965 \times 3.98^2 = 0.168 \times 10^5 \text{ Pa}$

不发生气穴的最低工作压力

$$p = 2.7\Delta p_{\max} + 1.3p_v = 2.7 \times 0.168 \times 10^5 + 1.3 \times 0.7149 \times 10^5 = 0.138 \text{ MPa}$$

故由计算可知不会发生气穴现象。

饱和水蒸气的流量测量范围可由表 4 所示气体流量测量范围用下式求得

$$Q_m = 1.5 Q_{V\text{空}} \rho \times 10^{-3} \sqrt{\rho_0 / \rho}$$

## (15)

式中  $q_m$ --水蒸气的质量流量, t/h;

$q_{V\text{空}}$ --空气的体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$\rho$ --水蒸气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_0$ --空气的密度,  $\rho_0 = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

饱和水蒸气的流量测量范围如表 5 所示。

试计算 DN100 饱和水蒸气 0.8MPa 时的流量范围。

- 1) 由表 4 查得 DN100 流量范围 100~1000  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- 2) 由饱和水蒸气密度表查出 0.8MPa 时,  $\rho = 4.162 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;
- 3) 计算得

$$Q_{\min} = 1.5 \times 100 \times 4.162 \times 10^{-3} \times \sqrt{1.205/4.162} = 0.336 \text{ t/h};$$

$$Q_{\max} = 1.5 \times 1000 \times 4.162 \times 10^{-3} \times \sqrt{1.205/4.162} = 3.36 \text{ t/h}_0$$

表 5 饱和水蒸气质量流量范围

单位: (kg/ h)

绝压 p/MPa 温度 T/°C 密度 p/(kg/m <sup>3</sup> )	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
DN20 $Q_{\min}$	11	13	15	16	18	19	20
$Q_{\max}$	89	130	150	160	180	190	200
可扩展最大上限	89	130	171	211	250	290	329
DN25 $Q_{\min}$	14	17	19	22	23	25	27
$Q_{\max}$	140	170	190	220	230	250	270
可扩展最大上限	140	204	267	330	391	453	541
DN40 $Q_{\min}$	31	38	44	48	53	57	60
$Q_{\max}$	310	380	440	480	530	570	600
可扩展最大上限	357	522	684	844	1003	1160	1317



限							
DN50 $Q_{min}$	52	63	73	81	88	95	101
$Q_{max}$	520	630	730	810	880	950	1010
可扩展最大上限	558	816	1069	1320	1568	1813	2058
DN80 $Q_{min}$	122	148	170	188	205	221	235
$Q_{max}$	1220	1480	1700	1880	2050	2210	2350
可扩展最大上限	1429	2090	2738	3379	4013	4642	5269
DN100 $Q_{min}$	175	212	242	269	293	315	336
$Q_{max}$	1750	2120	2420	2690	2930	3150	3360
可扩展最大上限	2233	3266	4278	5279	6270	7254	8233
DN125 $Q_{min}$	262	317	363	404	440	473	504
$Q_{max}$	2620	3170	3630	4040	4400	4730	5040
可扩展最大上限	3489	5103	6685	8249	9798	11334	12864
DN150 $Q_{min}$	350	423	484	538	586	631	672
$Q_{max}$	3500	4230	4840	5380	5860	6310	6720
可扩展最大上限	5025	7348	9627	11879	14019	16321	15824
DN200 $Q_{min}$	700	846	969	1076	1173	1261	1344
$Q_{max}$	7000	8460	9690	10760	11730	12610	13440
可扩展最大上限	8933	13064	17115	21119	25083	29016	32993
DN250 $Q_{min}$	1050	1269	1453	1641	1759	1892	2016
$Q_{max}$	10500	12690	14530	16410	17590	18920	20160
可扩展最大上限	13958	20412	26742	32998	39193	45337	51457
DN300 $Q_{min}$	1750	2116	2422	2690	2932	3153	3359
$Q_{max}$	17500	21160	24220	26900	29320	31530	33590
可扩展最大上限	20100	29394	38509	47518	56438	65286	74099
DN350 $Q_{min}$	2624	3174	3632	4035	4397	4730	5038
$Q_{max}$	26240	31740	36320	40350	43970	47300	50380
可扩展最大上限	27359	4008	52415	64677	76818	88862	100857
DN400 $Q_{min}$	3149	3808	4359	4842	5277	5676	6047
$Q_{max}$	31490	38080	43590	48420	52770	56760	60470
可扩展最大上限	35734	52256	68461	84477	100334	116064	131732



DN500 $Q_{min}$	4374	5289	6054	6725	7329	7883	8398
$Q_{max}$	43740	52890	60540	67250	73290	78830	83980
可扩展最大上限	55834	81650	106971	131995	156772	181351	205831
DN600 $Q_{min}$	5599	6770	7749	8608	9381	10089	10749
$Q_{max}$	55990	67700	77490	86080	93810	100890	107490
可扩展最大上限	80401	117576	154038	190073	225752	261146	296397
绝压 p/MPa	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
温度 T/°C	175.36	179.88	187.96	195.04	201.37	207.11	212.37
密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	4.655	5.147	6.127	7.106	8.085	9.065	10.05
DN20 $Q_{min}$	21	22	24	26	28	30	31
$Q_{max}$	210	220	240	260	280	300	310
可扩展最大上限	368	407	484	562	639	717	794
DN25 $Q_{min}$	28	30	33	35	37	40	42
$Q_{max}$	280	300	330	350	370	400	420
可扩展最大上限	575	636	757	878	999	1120	1242
DN40 $Q_{min}$	64	67	73	79	84	89	94
$Q_{max}$	640	670	730	790	840	890	940
可扩展最大上限	1473	1629	1939	2249	2559	2869	3180
DN50 $Q_{min}$	107	112	122	132	140	149	157
$Q_{max}$	1070	1120	1220	1320	1400	1490	1570
可扩展最大上限	2302	2545	3030	3514	3998	4483	4970
DN80 $Q_{min}$	249	261	285	307	328	347	365
$Q_{max}$	2490	2610	2850	3070	3280	3470	3650
可扩展最大上限	5893	6515	7757	8996	10235	11476	12723
DN100 $Q_{min}$	355	374	408	439	468	496	522
$Q_{max}$	3550	3740	4080	4390	4680	4960	5220
可扩展最大上限	9208	10181	12120	14057	15993	17932	19880
DN125 $Q_{min}$	553	560	611	658	702	743	783
$Q_{max}$	5530	5600	6110	6580	7020	7430	7830
可扩展最大上限	14388	15908	18938	21964	24990	28018	31063
DN150 $Q_{min}$	711	747	815	878	936	992	1044
$Q_{max}$	7110	7470	8150	8780	9360	9920	10440



可扩展最大上限	20719	22909	27270	31628	35985	40347	44732
DN200 $Q_{min}$	1421	1494	1630	1756	1873	1983	2088
$Q_{max}$	14210	14940	16300	17560	18730	19830	20880
可扩展最大上限	36834	40727	48481	56228	63794	71729	79523
DN250 $Q_{min}$	2132	2241	2445	2634	2809	2974	3132
$Q_{max}$	21320	22410	24450	26340	28090	29740	31320
可扩展最大上限	57553	63636	75752	87856	99960	112077	124225
DN300 $Q_{min}$	3553	3736	4076	4389	4682	4958	5220
$Q_{max}$	35530	37360	40760	43890	46820	49580	52200
可扩展最大上限	82876	91636	109083	126513	143943	1613911	178928
DN350 $Q_{min}$	5329	5603	6114	6538	7023	7436	7830
$Q_{max}$	53290	56030	61140	65380	70230	74360	78300
可扩展最大上限	112804	124726	148457	172199	195923	219671	243541
DN400 $Q_{min}$	6395	6724	7336	7901	8427	8923	9396
$Q_{max}$	63950	67240	73360	79010	84270	89230	93960
可扩展最大上限	147336	162908	193926	22491	255899	286918	318094
DN500 $Q_{min}$	8881	9339	10189	10973	11705	12394	13050
$Q_{max}$	88810	93390	101890	109730	117050	123940	130500
可扩展最大上限	230213	254544	303010	351472	399843	448309	497022
DN600 $Q_{min}$	11368	11954	13042	14046	14982	15864	16704
$Q_{max}$	113680	119540	130420	140460	149820	158640	167040
可扩展最大上限	331506	366544	436335	506055	575774	645565	715712

### 3. VSF 的精确度

VSF 的精确度对于液体大致在  $\pm 0.5\%R \sim \pm 2\%R$ ，对于气体在  $\pm 1\%R \sim \pm 2\%R$ ，重复性一般为  $0.2\% \sim 0.5\%$ 。由于 VSF 的仪表系数较低，频率分辨率低，口径愈大愈低，故仪表口径不宜过大（DN300 以下）。

范围度宽是 VSF 的特点，但重要的是下限流量为多少。一般液体平均流速下限为  $0.5\text{m/s}$ ，气体为  $4 \sim 5\text{m/s}$ 。VSF 的正常流量最好在正常测量范围的  $1/2 \sim 2/3$  处。

VSF 的仪表系数不受测量介质物性的影响，这是很大的优点，可以用一种典型介质校验而应用到其他介质去，对于解决校验设备问题提供便利。但是应该看到由于液、气的流速范围差别很大，因此频率范围亦差别很大。处理涡街信号的放大器电路中，滤波器的通带不同，



电路参数亦不同，因此，同一电路参数是不能用于不同测量介质的。介质改变，电路参数亦应随之改变。

另外，气体和液体的密度差别很大，旋涡分离时产生的信号强度与密度成正比。因此信号强度差别亦很大，液、气放大器电路的增益，触发灵敏度等皆不一样，压电电荷差别大，电荷放大器的参数也不同。即使同为气体（或液体、蒸汽）随着介质压力、温度不同，密度不同，使用的流量范围不同，信号强度亦不同，电路参数同样要改变。因此一台 VSF 不经硬件或软件修改，改变使用介质或改变仪表口径是不可行的。

#### 4. 主要问题

VSF 大量使用已有十余年，使用效果不理想，总结起来主要有以下几点原因。

1) 产品质量问题，设计原理或设计方案有严重缺陷，产品材料、工艺质量不良。尤其近年来，一些生产厂片面追求利润，产品粗制滥造，败坏了 VSF 的声誉。

2) 仪表选型和使用问题，用户给定工艺参数不准确，使得选型不当；安装地点选择有问题，安装不符合规定要求。

3) 现场调整问题，现场投运缺乏调整或调整不当，正确的调整是用好的关键。

#### 5. 适用的情况

VSF 不适用于测量低雷诺数 ( $Re_0 \leq 2 \times 10^4$ ) 流体。低雷诺数时斯特劳哈尔数随着雷诺数而变，仪表线性度变差，流体粘度高会显著影响甚至阻碍旋涡的产生，选型的一个限制条件是不能使用于界限雷诺数之下。

VSF 适用的流体比较广泛，但对于流体的脏污性质要注意。含固体微粒的流体对旋涡发生体的冲刷会产生噪声，磨损旋涡发生体。若含有的短纤维缠绕在旋涡发生体上将改变仪表系数。

VSF 在混相流体中的应用经验还少，一般可用于含分散、均匀的微小气泡，但容积含气率应小于 7%~10% 的气、液两相流，若超出 2% 就应对仪表系数进行修正。可用于含分散、均匀的固体微粒，含量不大于 2% 的气固、液固两相流。可用于互不溶解的液液（如油和水）两组分流等。

脉动流和旋转流会对 VSF 产生严重影响。如果脉动频率与涡街频率频带合拍可能引起谐振破坏正常工作和设备，使涡街信号产生“锁定 (lock-in)”现象，这时信号固定于某一频率。“锁定”与脉动幅值、旋涡发生体形状及堵塞比等有关。VSF 的正常工作的脉动阈值尚待试验确定。80 年代以来国内外流量测量工作者已对 VSF 在混相流、脉动流中的应用开展许多试验研究，国际标准化组织 (ISO) 已发布的技术报告中亦关注这方面内容。

#### 6. 经济性

在众多的流量计中，VSF 的经济性较好，是一种经济实惠的流量计。VSF 的基本性能处于中等偏上水平，购置费低于质量式、电磁式、容积式等，而安装、运行、维护费低于节流式、容积式、涡轮式等，如仅作为控制系统检测仪表可采用干校方式节省周期校验费用。

## 六、 安装使用注意事项

### 1. 安装注意事项

VSF 属于对管道流速分布畸变、旋转流和流动脉动等敏感的流量计，因此，对现场管道安装条件应充分重视，遵照生产厂使用说明书的要求执行。

VSF 可安装在室内或室外。如果安装在地井里，有水淹的可能，要选用涎水型传感器。传感器在管道上可以水平、垂直或倾斜安装，但测量液体和气体时为防止气泡和液滴的干扰，安装位置要注意，如图 16 所示。

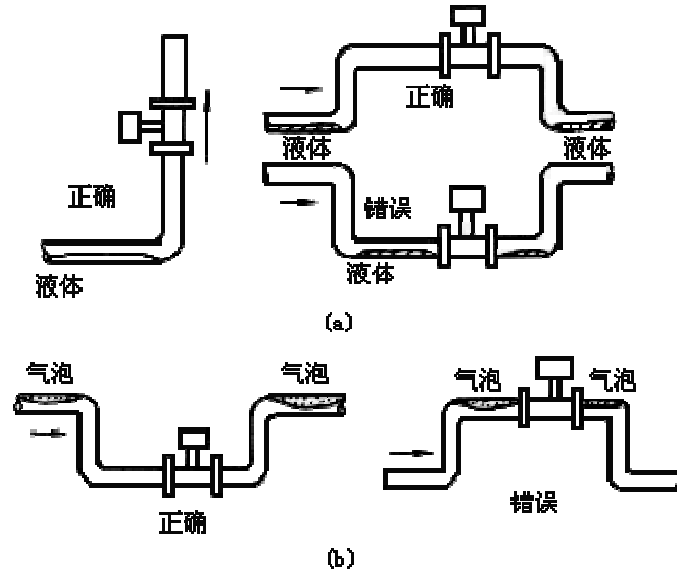


图 16 混相流体的安装

- (a) 测量含液体的气体流量仪表安装；  
 (b) 测量含气液体流量仪表安装

VSF 必须保证上、下游直管段有必要的长度，如图 17 所示。在各种资料中数据有差异，其原因可能是，旋涡发生体尚未标准化，形状尺寸的差异有多少影响尚待验证；对各类阻流件必要的直管段长度试验研究尚不够，即还不成熟，对比节流式差压流量计，这方面工作还处于初始阶段。

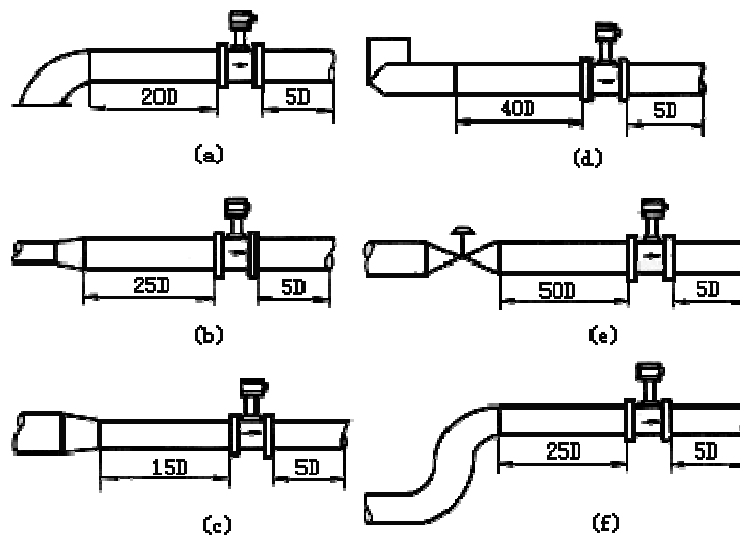


图 17 涡街流量计对上、下游直管段长度的要求

- (a) 一个  $90^\circ$  弯头；(b) 同心扩管；(c) 同心收缩全开阀门；(d) 不同平面两个  $90^\circ$  弯头；  
 (e) 调节阀半开阀门；(f) 同一平面两个  $90^\circ$  弯头

传感器与管道的连接如图 18 所示。在与管道连接时要注意以下问题。

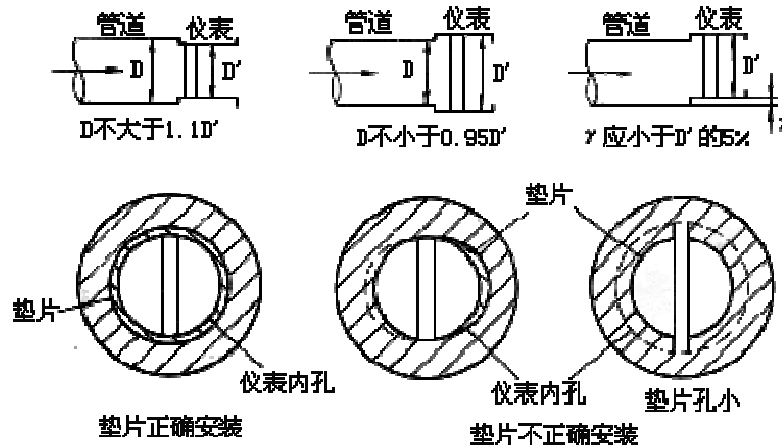


图 18 传感器与管道的连接

- 1) 上、下游配管内径  $D$  与传感器内径  $D'$  相同, 其差异满足下述条件:  $0.95D \leq D' \leq 1.1D$ 。
- 2) 配管应与传感器同心, 同轴度应小于  $0.05D'$ 。
- 3) 密封垫不能凸入管道内, 其内径可比传感器内径大  $1 \sim 2\text{mm}$ 。
- 4) 如需断流检查与清洗传感器, 应设置旁通管道如图 19 所示。

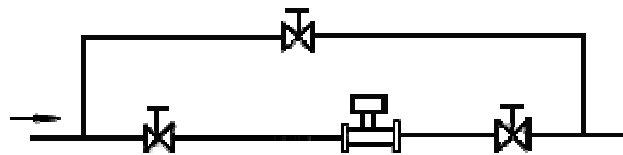


图 19 旁通管道示意图

5) 减小振动对 VSF 的影响应该作为 VSF 现场安装的一个突出问题来关注。首先在选择传感器安装场所时尽量注意避开振动源。其次采用弹性软管连接在小口径中可以考虑。第三, 加装管道支撑物是有效的减振方法, 一种管道支撑方法如图 20 所示。

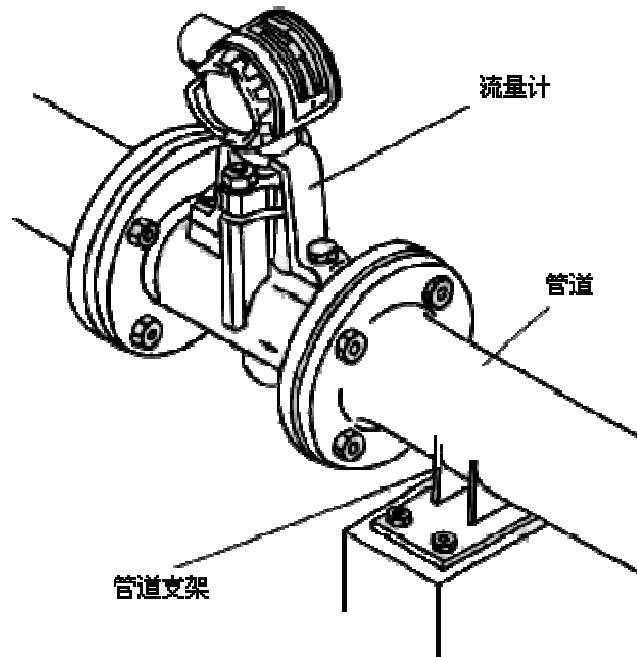


图 20 安装管道支持举例

成套安装，包括前后直管段，流动调整器等是保证获得高精度度测量的一个措施，特别这些装配在制造厂进行更能保证安装的质量，图 21 所示为一安装实例。

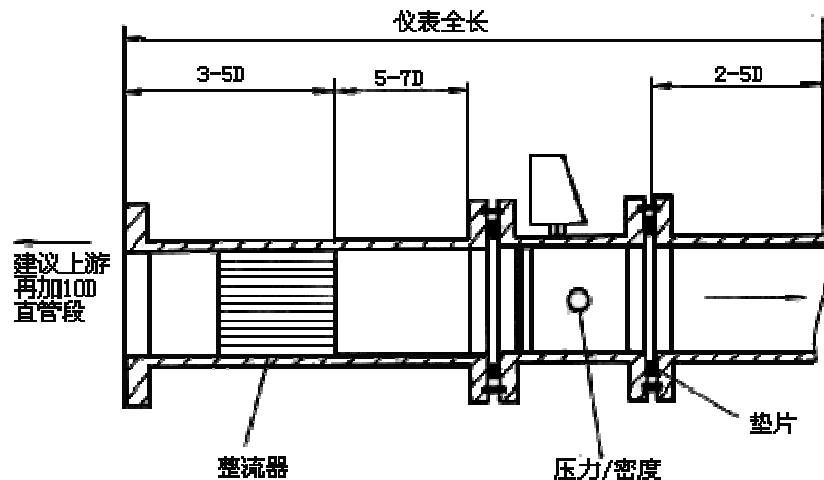


图 21 高精度测量的配管安装

电气安装应注意传感器与转换器之间采用屏蔽电缆或低噪声电缆连接，其距离不应超过使用说明书的规定。布线时应远离强功率电源线，尽量用单独金属套管保护。应遵循“一点接地”原则，接地电阻应小于  $10\Omega$ 。整体型和分离型都应在传感器侧接地，转换器外壳接地点应与传感器“同地”。

## 2. 使用注意事项

### (1) 现场安装完毕通电和通流前的检查

- 1) 主管和旁通管上各法兰、阀门、测压孔、测温孔及接头应无渗漏现象；
- 2) 管道振动情况是否符合说明书规定；



## 3) 传感器安装是否正确? 各部分电气连接是否良好?

## (2) 接通电源静态调试

在通电不通流时转换器应无输出, 瞬时流量指示为零, 累积流量无变化, 否则首先检查是否因信号线屏蔽或接地不良, 或管道震动强烈而引入干扰信号。如确认不是上述原因时, 可调整转换器内电位器, 降低放大器增益或提高整形电路触发电平, 直至输出为零。

## (3) 通流动态调试

关旁通阀, 打开上下游阀门, 流动稳定后转换器输出连续的脉宽均匀的脉冲, 流量指示稳定无跳变, 调阀门开度, 输出随之改变。否则应细致检查并调整电位器直至仪表输出既无误触发又无漏脉冲为止。如仪表有故障可参照表 7 解决。

## (4) 仪表系数修正

VSF 的仪表系数是在实验室条件下校验的, 现场使用时工作条件偏离实验室条件应对仪表系数进行修正

$$K_{V0} = f/q_v \text{ 脉冲数/m}^3 \quad (16)$$

$$K_V = E_t E_R E_D K_{V0} \quad (17)$$

式中  $K_{V0}$ ,  $K_V$ --分别为实验室条件和现场工作条件下的仪表系数;

$E_t$ --温度修正系数;

$E_R$ --雷诺数修正系数;

$E_D$ --管径修正系数。

其余符号同前。

温度修正系数  $E_t$

$$E_t = 1/[1+(2\alpha_b + \alpha_x)(t-t_0)] \quad (18)$$

式中  $\alpha_b$ ,  $\alpha_x$ --分别为传感器表体和旋涡发生体的材料线膨胀系数,  $(^\circ\text{C} \cdot \text{mm})^{-1}$ ;

$t$ ,  $t_0$ --分别为工作温度和校验温度,  $^\circ\text{C}$ 。

雷诺数修正系数  $E_R$

在扩大测量范围使用时, 当测量超出规定的下限雷诺数时, 应对仪表系数进行雷诺数修正, 表 6 是某厂提供的数据 (由于旋涡发生体未标准化, 各插关内数据可能有差异)。

表 6 雷诺数修正系数  $E_R$

雷诺数范围	$E_R$	雷诺数范围	$E_R$
$5 \times 10^3 < \text{Re} < 6 \times 10^3$	1.12	$9 \times 10^3 < \text{Re} < 10^4$	1.047
$6 \times 10^3 < \text{Re} < 7 \times 10^3$	1.08	$10^4 < \text{Re} < 1.2 \times 10^4$	1.036
$7 \times 10^3 < \text{Re} < 8 \times 10^3$	1.065	$1.2 \times 10^4 < \text{Re} < 1.5 \times 10^4$	1.023
$8 \times 10^3 < \text{Re} < 9 \times 10^3$	1.065	$1.5 \times 10^4 < \text{Re} < 4 \times 10^4$	1.011

管径修正系数  $E_D$

配管直径应符合规定范围, 这时对配管与传感器表体内径的实际偏差可用管径修正系数  $E_D$  修正之。

$$E_D = (DN/D)^2$$

(19)



式中 DN--传感器表体实际内径, mm;

D--配管内径, mm。

(5) 故障现象、原因及排除方法

VSF 有多种检测方式, 传感器和测量电路差别也较大, 但仪表常见的故障有共性, 现列举若干仪表故障及其对策如表 7 所示。

表 7 故障处理

故障现象	可能原因	处理方法
通电后无流量 时有输出信号	1)输入屏蔽或接地不良, 引入电磁干扰 2)仪表靠近强电设备或高频脉冲干扰源 3)管道有较强振动 4)转换器灵敏度过高	1)改善屏蔽与接地, 排除电磁干扰 2)远离干扰源安装, 采取隔离措施加强电源滤波 3)采取减震措施, 加强信号滤波降低放大器灵敏度 4)降低灵敏度, 提高触发电平
通电通流后无 输出信号	1)电源出故障 2)输入信号线断线 3)放大器某级有故障 4)检测元件损坏 5)无流量或流量过小 6)管道堵塞或传感器被卡死	1)检查电源与接地 2)检查信号线与接线端子 3)检测工作点, 检查元器件 4)检查传感元件及引线, 检查阀门, 增大流量或缩小管径 5)检查清理管道, 清洗传感器
输出信号不规 则不稳定	1)有较强电干扰信号 2)传感器被沾污或受潮, 灵敏度降低 3)传感器灵敏度过高 4)传感器受损或引线接触不良 5)出现两相流或脉动流 6)管道震动的影响 7)工艺流程不稳定 8)传感器安装不同心或密封垫凸入管内 9)上下游阀门扰动 10)流体未充满管道 11)发生体有缠绕物 12)存在气穴现象	1)加强屏蔽和接地 2)清洗或更换传感器, 提高放大器增益 3)降低增益, 提高触发电平 4)检查传感器及引线 5)加强工艺流程管理, 消除两相流或脉动流现象 6)采取减震措施 7)调整安装位置 8)检查安装情况, 改正密封垫内径 9)加长直管段或加装流动调整器 10)更换装流量传感器地点和方式 11)消除缠绕物 12)降低流速, 增加管内压力
测量误差大	1)直管段长度不足 2)模拟转换电路零漂或满量程调整不对	1)加长直管段或加装流动调整器 2)校正零点和量程刻度 3)检查电源



	<ul style="list-style-type: none"> <li>3)供电电压变化过大</li> <li>4)仪表超过检定周期</li> <li>5)传感器与配管内径差异较大</li> <li>6)安装不同心或密封垫凸入管内</li> <li>7)传感器沾污或损伤</li> <li>8)有两相流或脉动流</li> <li>9)管道泄漏</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4)及时送检</li> <li>5)检查配管内径, 修正仪表系数</li> <li>6)调整安装, 修整密封垫</li> <li>7)清洗更换传感器</li> <li>8)排除两相流或脉动流</li> <li>9)排除泄漏</li> </ul>
测量管泄漏	<ul style="list-style-type: none"> <li>1)管内压力过高</li> <li>2)公称压力选择不对</li> <li>3)密封件损坏</li> <li>4)传感器被腐蚀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1)调整管压, 更改安装位置</li> <li>2)选用高一档公称压力传感器</li> <li>3)更换密封件</li> <li>4)采取防腐和保护措施</li> </ul>
传感器发出异常啸叫声	<ul style="list-style-type: none"> <li>1)流速过高, 引起强烈震动</li> <li>2)产生气穴现象</li> <li>3)发生体松动</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1)调整流量或更换通径大的仪表</li> <li>2)调整流量和增加液流压力</li> <li>3)紧固发生体</li> </ul>

## 七、标准和检定规程

虽然 VSF 在通用流量计中是很年轻的流量计, 我国早在 80 年代就制订了 VSF 专业标准 (ZBN 12008-89) 和检定规程 JJG 620-89, 说明它受到行业的重视。专业标准于 1998 年进行了修订, 改变为 JB/T 9249-1999。检定规程则与其他速度式流量计的检定规程合并为一个新的检定规程 JJG 198-94, 不过由于新规程包括了众多种类速度式流量计(达 8 种之多!), 在规程中 VSF 的一些特点就难以照顾到了, 因此感觉有的规定不具体或完全没有规定, 执行起来有些困难。JJG 620-89 还有一定参考价值。

国外对 VSF 标准制订亦很重视, 90 年代初国际标准化组织 (ISO) 即成立起草工作组起草 VSF 国际标准, 1993 年提出委员会草案 (ISO/CD 12764), 至 1997 年颁布为技术报告 (ISO/TR 12764: 1997)。由于种种原因 ISO 把不宜作为国际标准的一些文件列为技术报告, 例如得不到足够支持率的文件, 技术尚在发展还不够成熟或作为参考资料提供等等, 看来 VSF 文件还不够成熟暂时尚不能作为国际标准发布。工业发达国家如美、日皆制订有 VSF 国家标准 (ASME/ANSI MFC-6M-1987 和 JIS Z8766-1989)。