

叶轮式水流量测量仪表技术

宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院） 姚灵

在水的流量或累积流量测量方面，当前用的最多的仪表是带叶轮传感结构的流量仪表，它们主要由涡轮流量计、螺翼式水表和旋翼式水表等组成。这些叶轮式流量仪表的共同特点是流量传感器采用了带有旋转叶轮的机械运动机构作为流体的传感（测量）部件，通过叶轮在水流中的旋转速度来感知管道内水流体的流速、流量或累积流量等被测量。

叶轮式流量测量仪表是一种速度式仪表，在一定的流量测量范围内其叶轮转速与被测流体的流速成正比。叶轮转轴直接或间接带动仪表中的机械减速机构工作，通过转速变换将水流体的被测量在机械计数器上指示出来，或通过电磁、光电、电容等传感方法将叶轮的转速（转数）等量值传递给后续信号处理电路进行运算处理，并将测量结果在电子显示器上显示或作远传通信之用。

1. 涡轮流量计

涡轮流量计是速度式流量仪表中最为常见的形式之一，它是以动量矩守恒原理为基础进行测量工作的。当封闭管道中的流体冲击涡轮叶片使其旋转时，涡轮转速将随流体的流速改变而变化，转速的大小或转数的多少则可反映出流过流量计的流量值或累积流量值。它的基本结构见图 1。

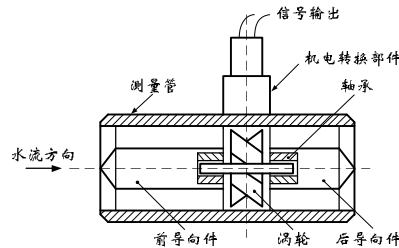


图 1 涡轮流量计基本结构图

涡轮流量计的特点是结构简单，流通能力大，可适用于高、低温和高压流体的测量，它的测量准确度较高。对于水流量测量，其准确度一般可达 $\pm 0.15\% R \sim \pm 0.5\% R$ ；涡轮流量计的短期测量重复性也很高，一般可达 $0.05\% \sim 0.2\%$ 。由于具有很高的测量准确度和重复性，因此在以前的用水贸易结算中常被优先选用。

1.1 测量原理

当被测流体流经涡轮流量计的涡轮时，流体的动能作用于涡轮的叶片而产生主动力矩并使涡轮旋转；流量计检测元件在测量管外通过一定的传感方式检测到叶片的转速（即旋转频

率 f)，通过下式即可计算出被测流体的流量 q ，

$$q = f/K \quad (1)$$

式 (1) 中的仪表系数 K 是与涡轮流量计结构和流量参数有关的系数。对结构一定的涡轮流量计及被测流体介质， K 值由标定求得，并可表示成流量的关系曲线，称为涡轮流量计的特性曲线。

1.2 基本特性

典型的液体涡轮流量计特性曲线如图 2。特性曲线可分成四个区域，即高准确测量区域、准确测量区域、扩大测量区域、低流量测量区域。

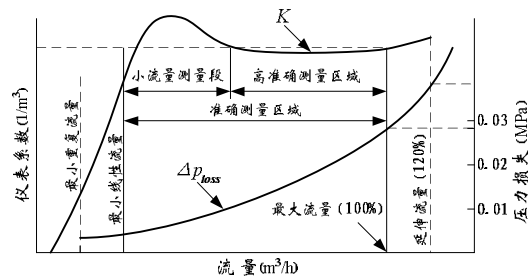


图 2 涡轮流量计典型特性曲线

1. **高准确测量区域**：该区域涡轮流量计测量准确度最高，其最大允许误差值最小。

2. **准确测量区域**：包括了高准确度测量区域和小流量测量段，在小流量测量段存在着叶轮式流量仪表所特有的“单峰”特性。流量计在准确测量区域内其误差特性应满足标准规定的最大允许误差的要求（该区域范围一般被确定为流量计的“额定工作范围”）。

3. **扩大测量区域**：最大流量与延伸流量之间的测量范围。流量计不能长时间在该区域段工作，但仍应满足最大允许误差的要求（该区域范围一般被确定为流量计的“极限工作范围”）。

4. **低流量测量区域**：最小重复流量与最小线性流量之间的范围。该区域内各种阻力矩占主导地位，流量计的性能不很可靠。

涡轮流量计特性曲线中出现的“单峰”现象，从理论上可以证明是由于涡轮叶片后缘流动边界由紊流到层流的转折点移动而引起，同时也已证明削去叶片剖面的后缘，即可削弱“单峰”特性。

涡轮流量计的压力损失可表为

$$\Delta p_{loss} = \frac{1}{2} \rho v^2 k \quad (2)$$

式中 Δp_{loss} —流量计的压力损失, MPa; ρ —流体的介质密度, kg/m^3 ; v —叶片前平均流速, m/s ; k —系数 (其值一般在 0.4~0.9 之间, 与流量计的几何尺寸有关)。

1.3 数学模型

理想的涡轮流量计其仪表系数 K 为常数, 即 K 不随体积流量 q_v 的变化而变化。但实际使用中的涡轮流量计, K 与 q_v 之间是函数关系, 即 $K=f(q_v)$, 通常把这一关系称为流量计的数学模型。为较深入分析讨论涡轮流量计的工作特性, 建立相应的数学关系, 应对作用于流量计涡轮上的各种力矩作出分析, 以便定性确定各种因素对流量计工作特性的影响。

根据牛顿运动定律, 建立涡轮流量计的运动方程如下

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_m - M_z - M_c \quad (3)$$

式中 J —涡轮的转动惯量; ω —涡轮旋转角速度; M_t —流体通过涡轮时对叶片产生的推动力矩; M_m —涡轮轴与轴承之间由摩擦产生的机械摩擦力矩; M_z —流体通过涡轮时对涡轮产生的流动阻力矩; M_c —电磁转换器对涡轮产生的电磁阻力矩。

正常测量情况下, 可假设涡轮流量计测量管内流量不变, 即涡轮叶片以恒定角速度 ω 旋转, 且电磁阻力矩影响可忽略不计, 则有

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 ; \quad M_c = 0 \quad (4)$$

将上式代入式 (3), 得稳定流量条件下的合力矩

$$M_t = M_m + M_z \quad (5)$$

用进出口流动速度三角形分析法对进出涡轮的流体作出流速分析, 见图 3 所示。

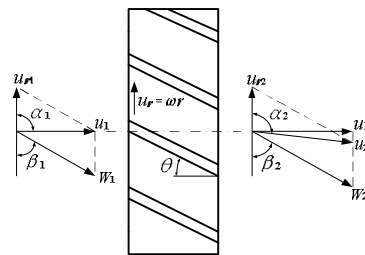


图 3 涡轮叶片进出口流动速度三角形

经分析并省略中间过程可推算得到流体通过涡轮时对叶片产生的推动力矩

$$M_t = r \rho q_v (u_1 \tan \theta - r \omega) \quad (6)$$

式中 ρ —流体密度; u_1 —叶片进口绝对速度的轴向分量; θ —叶片结构角; r —叶片平均半径; q_v —流体体积流量。

将式 (6) 代入运动方程 (5), 并考虑到 u_1 可表成 $u_1 = q_v / S$ (S 为水表测量管截面积) 有下式

$$\frac{\omega}{q_v} = \frac{\tan\theta}{rS} - \frac{M_m}{r^2 \rho q_v^2} - \frac{M_z}{r^2 \rho q_v^2} \quad (7)$$

仪表系数 K 和涡轮旋转角速度 ω 的关系为

$$K = \frac{m}{2\pi} \cdot \frac{\omega}{q_v} \quad (8)$$

式中 m —涡轮的叶片数。

将式 (8) 代入式 (7) 得水表流量测量特性 $K = f(q_v)$ 的表达式

$$K = \frac{m}{2\pi} \left[\frac{\tan\theta}{rS} - \frac{M_m}{r^2 \rho q_v^2} - \frac{M_z}{r^2 \rho q_v^2} \right] \quad (9)$$

式 (9) 虽经充分简化, 但用它定性描述涡轮流量计的流量测量特性还是具有一定指导意义的。

1.4 流量测量特性分析

1) 理想流量特性

设被测流体处于恒定流速状态, 且涡轮流量计的机械摩擦力矩及流体阻力矩均可忽略, 则有

$$M_m = 0 ; \quad M_z = 0 \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9) 得

$$K = \frac{m}{2\pi} \left[\frac{\tan\theta}{rS} \right] \quad (11)$$

可见涡轮流量计的理想流量测量特性仅与仪表结构参数有关, 与流量变化无关, 因此仪表系数 K 为常数。

2) 始动流量特性

开始测量时涡轮必须克服轴系的静摩擦力矩后才能转动, 现定义涡轮克服静摩擦力矩所需的最小流量值称为始动流量 q_{vs} 。涡轮流量计处于始动流量时, 涡轮开始转动, 但角速度很小, 因此可忽略流体阻力矩影响, 即 $M_z = 0$ 。代入式 (9) 有

$$K = \frac{m}{2\pi} \left[\frac{\tan\theta}{rS} - \frac{M_m}{r^2 \rho q_v^2} \right] \quad (12)$$

在涡轮被推动瞬间, 其转速 ω 可视为零, 根据式 (8) 有 $K = 0$ 。代入式 (12) 解得始

动流量为

$$q_{vs} = \sqrt{\frac{M_m S}{r \tan \theta}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}} \quad (13)$$

由式(13)可知, 涡轮轴系摩擦力矩 M_m 越小, 涡轮流量计就越灵敏, 同时流体介质密度变化也会影响始动流量的特性。

3) 实际流量特性

当被测流量大于始动流量后, 随着流量增加, 流体阻力矩 M_z 将成为影响涡轮流量计流量测量特性的主要原因。与此同时, 轴系摩擦力矩变得很小, 因此可设定机械摩擦力矩 $M_m = 0$ 。

处于层流流动状态时, 流体阻力矩 M_z 可写成

$$M_z = C_1 \eta q_v \quad (14)$$

式中 C_1 —常数; η —流体粘度。

将式(14)及 $M_m = 0$ 代入式(9)得

$$K = \frac{m}{2\pi} \left[\frac{\tan \theta}{rS} - \frac{C_1}{r^2 \rho} \cdot \frac{1}{q_v / \eta} \right] \quad (15)$$

此时仪表系数随流量和粘度而变化。流量增加, 仪表系数亦同步增加。

处于紊流流动状态时, 流体阻力矩 M_z 可写成

$$M_z = C_2 \rho q_v^2 \quad (16)$$

式中 C_2 —常数。

将式(16)及 $M_m = 0$ 代入式(9)得

$$K = \frac{m}{2\pi} \left[\frac{\tan \theta}{rS} - C_2 \frac{1}{r^2} \right] \quad (17)$$

此时仪表系数仅与自身结构参数有关, 可近似为常数。

当处于两种流动状态分界处时, 由于紊流时流体阻力矩 M_z 较层流时大, 仪表系数 K 就会出现“单峰”状。经上述分析可得出涡轮流量计流量测量特性曲线 $k = f(q_v)$, 见图4。

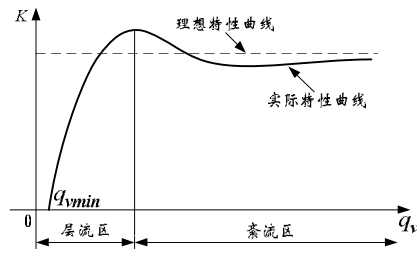


图 4 叶轮式仪表流量测量特性曲线

上述运动方程和流量测量特性分析同样适用于螺翼式水表情况。

2. 叶轮式水表

叶轮式水表是用于测量流过封闭管道中水的体积量的一种速度式仪表，目前使用较多的有水流以轴向流动方式冲击水表叶轮的螺翼式水表和水流以切向流动方式冲击水表叶轮的旋翼式水表两大类。水表作为供排水企业、用水单位、以及居民的用水量贸易结算和水计量工具，不仅可用于饮用水、直饮水的计量，还可用于中水、部分无杂物污水、以及消防和农用灌溉用水等的计量。由于它只用于水流体的测量，因此通常称它为水表。

传统的水表只能测量水流体的累积流量，不能用于瞬时流量的测量。随着科学技术的发展，人们在传统水表上安装了具有转换、运算、通信等功能的转换元件、电子电路和相应处理软件，使水表使用功能有了很大拓展，不但可以测量累积流量，还能测量一段时间的瞬时（平均）流量，并可通过远传方式将测量数据传输到控制终端。

水表的工作原理与涡轮流量计非常相似。在管道水流体的作用下，水表叶轮旋转，其转速与水的流速或流量成正比，

$$n = C u = C (q_v / A) \quad (18)$$

式中 n —水表叶轮转速，r/s； u —管道水流体速度，m/s； C —比例系数，r/m； q_v —流过水表的水的体积量， m^3/s ； A —水表进水口截面积， m^2 。

水表中的机械机构将叶轮旋转量以直接或间接方式传递给表中积算机构进行转数累计，并在其机械计数器上指示测量结果。水表积算机构在一定时间内获得的累计数即代表了该段时间流经水表的水的体积值。可以用下式来表示流经水表的水的体积值，

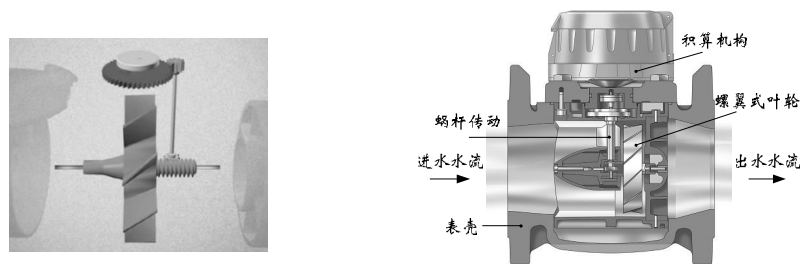
$$V = \frac{1}{C} n A t \quad (19)$$

式中 V —流经水表的水的体积值， m^3 ； t —管道内水的流动时间，s。

2.1 螺翼式水表

螺翼式水表通常分为水平螺翼式水表和垂直螺翼式水表两种结构形式。它们的内部结构

及外形见图 5 和图 6。

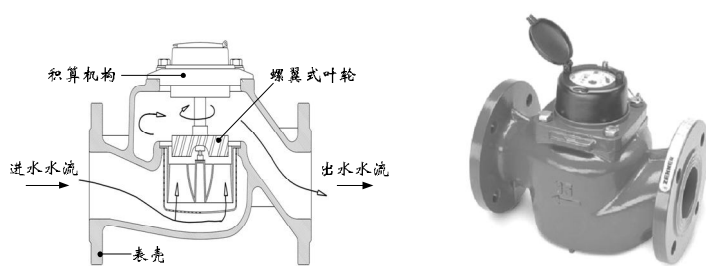


(a)



(b)

图 5 水平螺翼式水表内部结构及外形图



(a)

(b)

图 6 垂直螺翼式水表内部结构及外形图

螺翼式水表的特征是水流沿叶轮轴的方向流入，管道内水流体的流速完全加到叶轮上，使得叶轮的叶片在水流驱动下均匀转动。

在水平螺翼式水表中，叶轮轮轴的方向和管道中轴方向是平行的，从流体技术看，水表的外壳构成直行管道的一部分。叶轮的旋转运动由其轴上的涡轮零件通过蜗杆传递到一个与叶轮轴垂直的中轴上，进而带动积算机构工作。该型水表流通能力强，压力损失小，常在用

水量比较大且流量相对稳定的场合使用。水平螺翼式水表的常用测量口径规格为 DN40 ~ DN500 之间。

垂直螺翼式水表的叶轮轮轴方向垂直于管道的中轴方向,因此水表外壳在结构上要让水流方向发生 90° 偏转。这样设计的好处是,由于叶轮是垂直放置的,叶轮的旋转运动可直接带动积算机构计数,而不像水平螺翼式水表那样需要通过蜗轮-蜗杆来传动。该类水表在能量传递过程中损耗比较小、测量灵敏度较高,可以用来测量管道中较小的流量值。但该类水表的压力损失比较大,结构相对复杂些,常用在中小流量且流量波动较大的场合。垂直螺翼式水表的常用测量口径的规格为 DN50 ~ DN150 之间。

2.2 旋翼式水表

旋翼式水表一般分为多流束水表和单流束水表两种类型。

多流束旋翼式水表中,多股流束沿叶轮切线方向驱动叶轮。水流沿着叶轮盒外围环流,在其下方进水腔流入,然后从叶轮盒上部出水腔以相似的方式流出,见图 7。由于水表表壳内有测量部件底座的阻隔,进水和出水两部分被完全隔绝开,其结构及外形见图 8。

多流束旋翼式水表将叶轮旋转的转数通过直接传动方式(通常称其为湿式或液封水表)或磁力间接传动方式(通常称其为干式水表)传递给水表积算机构中的计数部件进行水流量的累计运算。多流束水表的常用流量 Q_3 一般从 2.5 m³/h 到 16 m³/h,口径多数为 DN15 ~ 40 之间。

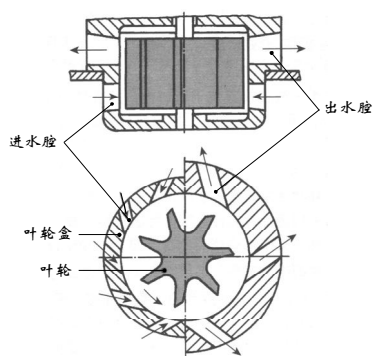


图 7 多流束旋翼式水表原理图

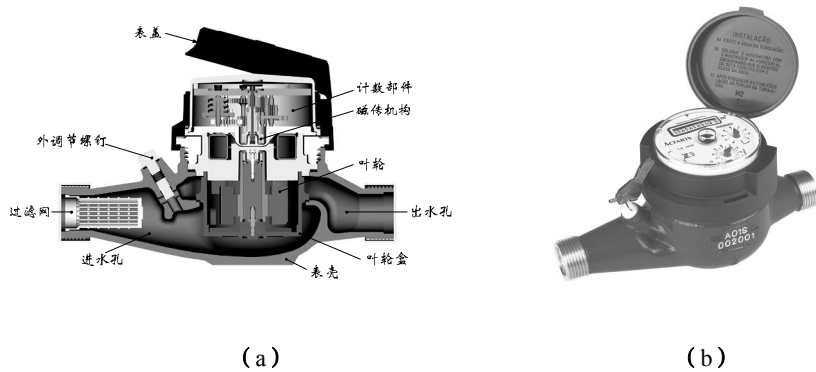


图 8 多流束旋翼式水表结构及外形图

单流束旋翼式水表的叶轮由单流束切向驱动,水的流束及冲击力大小由水表表壳进水孔的孔径和水流切线角决定。与多流束水表不同的是单流束水表叶轮的轴承在旋转过程中始终承受单边负荷的作用,叶轮上的不均匀受力把叶轮推向一边,见图 9。这样长期运转的结果会使叶轮的轴和轴承产生严重磨损,使单流束水表的使用寿命比多流束水表要短得多。单流束水表常用流量 Q_3 值最为常见的是 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 两种。其结构及外形见图 10。

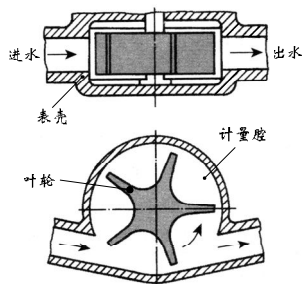


图 9 单流束旋翼式水表原理图

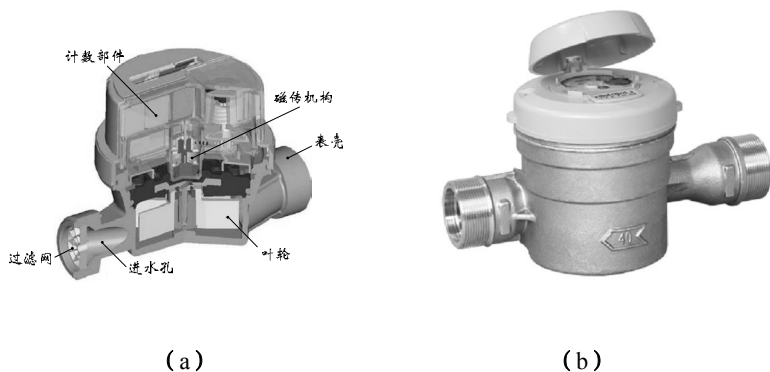


图 10 单流束旋翼式水表结构外形图

2.3 组合式水表

组合式水表通常是由两个水表并联组成，在结构形式上可以分为整体式和分体式两种。整体式结构是将大流量水表和小流量水表装在同一壳体中，见图 11 (a)；分体式结构是将小流量水表面单独傍接安装，见图 11 (b)。整体式组合水表内部结构见图 12。

组合式水表中大流量的测量通常由水平螺翼式水表担任，小流量测量则由旋翼式水表担任。当管道中水流量比较小时（即管道流量小于等于关闭流量 Q_{x1} 时），置于大流量水表叶轮后侧的流量转换阀关闭，管道中的流体只通过小流量水表，由其进行累积流量计量；当管道中的水流量大于某一设计流量时（即管道流量大于等于开启流量 Q_{x2} 时），流量转换阀打开，大流量水表和小流量水表同时计量，总的用水量由两个水表的计量值相加而得到。流量转换阀的转换状态示意图见图 13。

组合式水表的量程是大流量水表和小流量水表两者量程的和，因此该类水表拥有特别大的测量范围。组合式水表常被用于消防管道的大流量测量或管道防滴漏的小流量测量，同时也可用于流量很大、范围很宽的管道流量计量，如医院、宾馆等单位。其常用口径规格通常在 DN50~150 之间。

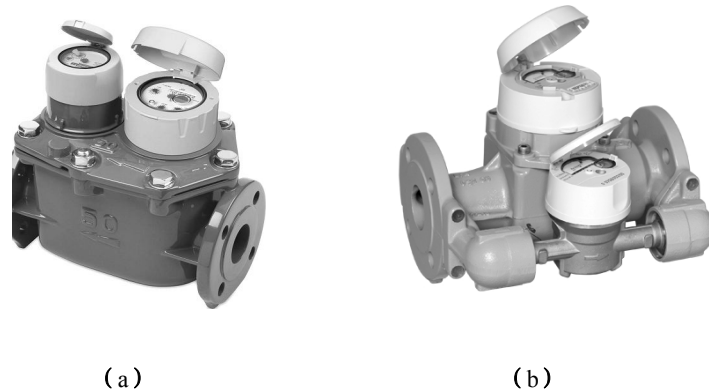


图 11 组合式水表外形图

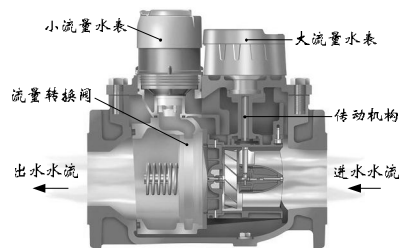


图 12 组合式水表内部结构示意图

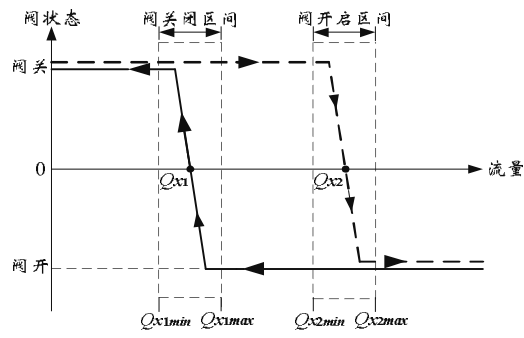


图 13 组合式水表流量转换阀转换状态图

目前在国外用的较多的水表还有按容积测量方式计量用水量的旋转活塞式水表和章动圆盘式水表等。