

流动脉动对流量测量仪表影响的几个实例

宋文伟（上海金茂物业管理公司金茂大厦管理处，上海 200120）

纪 纲（上海宝科自动化仪表研究所，上海 200940）

关键词：脉动流 流量计 阻尼器 孔板流量计 旋涡流量计

提 要：流量测量中经常遇到脉动流，它对容积式流量计之外的绝大多数种类的流量计产生影响，使之误差增大，将脉动源消除或在流量计与脉动源之间装上阻尼器，能有效克服这种影响。文中举了三个实例。

1. 引言

流量计参比条件下的准确度是基于定常流，并按照 ISO / TR 3313:1998^[1]的定义，定常流是在测量管段中流量不随时间而变化的一种流动状态。国际标准 ISO 5167(1991)^[1]和国家标准 GB/T 2624-93^[3]中也提到：“本标准只适用于下列条件：流体必须是充满圆管和节流装置；流体通过测量管段的流动必须是保持亚音速、稳定的或仅随时间缓慢变化的”。但是实际上几乎所有的管道流动都是不稳定的，不论是层流状态还是湍流状态，总存在各种干扰。

如果流体流动的某个参数如压力、速度或密度等不停地发生变化，就把这种流动叫做脉动流。

2. 脉动流的产生

脉动常见于工业管流，它多由旋转式或往复式压气机、鼓风机和泵产生。管道中流体的共振和流量控制设备的周期振荡，例如控制阀的振荡，也是脉动的主要起因。流体在以较高的流速流过 T 型接头中的直线管段时，常会引发三通中的第三只口内流体脉动。脉动一旦形成就会在流体中传播，不但可向脉动源的下游传播，也可向其上游传播^[1]。脉动经一段距离的传播常因压缩作用而强度减弱。

脉动的强度常用脉冲的幅度与平均流量之比来描述，这一比值可在百分之几到百分之一百之间，甚至更大。

脉动的频率范围一般从几分之一赫兹到几百赫兹，有些由机泵引发的脉动具有固定的频率，只要观察流体压力和流量的变化，就可测出脉动频率。但有些随机脉动，其存在很难察觉，只是在流量计示值出现较大误差，对系统进行分析时，才感到脉动仿佛存在。

3. 脉动流对流量测量仪表的影响

对于有固定周期的脉动流，可用周期来描述其脉动出现的频繁程度。完成一个周期的时间有的可能要数小时，有的可能只需几秒钟。对于周期长、幅值较小的脉动，一般说来各种流量计都能跟踪这种变化，同时保持它们参比条件下的准确度^[4]。

对于周期短、幅值较大的脉动，除容积式流量计之外，绝大多数种类流量计都有较显著影响，出现较大误差。ISO / TR 3313:1998 介绍了脉动流对孔板流量计、涡轮流量计和旋涡流量计的影响。

3.1 脉动流对差压式流量计的影响

在脉动流状态下，孔板流量计示值误差的影响来自两个方面，一是对孔板流量计一次元件所产生的影响，即孔板流量计在测量脉动流时存在的原理上的误差；二是对孔板流量计的差压信号传递和转换系统所产生的影响，以及流量计二次仪表中所采用的流量计算方法的影响。

对于不可压缩流体，流量和差压之间的关系可用式（1）表示^[1]：

$$\Delta P_p = K_1 \frac{dq_m}{dt} + K_2 q_m^2 \quad (1)$$

式中： P_p —— 脉动流状态下一次元件所产生的差压；

q_m —— 流体质量流量；

K_1 、 K_2 —— 系数。

从式(1)可以看出，在脉动流条件下，一次元件的输出 P_p 除了同质量流量平方 q_m^2 保持着对应关系之外，还同流量对时间的变化率有关系。由于流体存在惯性，当流体流过孔板时需要有附加的能量转换，以实现流体的瞬时加速作用。这部分附加的能量消耗，反映为孔板前后差压的增大。这个附加的差压值同频率有密切的关系，也同 q_m 值有关。式(1)中第一项代表了正负端取压口之间的那段流体的惯性影响。除此之外，在脉动流条件下，管道横截面上流速分布廓形可能不同于相同平均流量的定常流动状态下的流速分布廓形形状，也对仪表示值造成一定影响。

工业上使用的差压变送器，通常响应比较慢，频率上限约 1Hz，其输出信号代表的是 $\overline{P_p}$ ，二次表将此信号经开平方即作为流量值显示，但是在脉动流条件下，

$$\left(\overline{\Delta P_p}\right)^2 \neq \overline{\left(\Delta P_p\right)^2} \quad (2)$$

从而产生平方根误差。

3.2 脉动流对旋涡流量计的影响

脉动流对旋涡流量计的影响主要取决于脉动的幅值和脉动频率同旋涡剥离频率之比。当脉动幅值较小，在旋涡探测器上产生的信号幅值低于旋涡流量计门限值时，这种脉动被旋涡流量计中的噪声鉴别电路当作噪声而滤除。当脉动幅值足够大时，与脉动频率相对应的干扰同旋涡产生的信号混在一起而无法分离，最后被当作旋涡去计算流量，使得仪表示值偏高。当然脉动频率有高有低，如果脉动频率与旋涡剥离频率之比很小，则对仪表示值影响也小，反之影响则大。

4. 脉动流量的测量

由于流动脉动对绝大多数流量计均带来误差增大的严重后果，所以近几十年以来，吸引了很多研究者对脉动流进行大量的研究。

对付脉动流的方法主要有两个，一是配置合适的低通滤波器将脉动阻尼掉，使之残存的脉动不足以影响流量测量仪表或只对流量测量造成很小的误差，二是当这种阻尼在实际系统中实施有困难时，利用研究者所提供的公式对脉动所引起的误差进行估算，从而基本满足测量精度的要求。

人们在测量往复式压气机出口流量时，无一例外地都要遇到流体脉动问题，汽缸每往复一次，其排气流量就出现一个方波，幸运的是往复式压缩机出口一般都装有一个缓冲罐，上述脉动经缓冲罐的滤波，在缓冲罐的出口管上，流量就变得较平稳。因此，合理选择测量点的位置，避开脉动源的影响，是个简单而有效的方法。

下面的几个例子是笔者在实际工作中碰到并且得到妥善解决的实际例子。

5. 实例

5.1 往复泵引入的脉动及其克服

在聚甲醛连续聚合流程中，精单体、共单体、催化剂等均需保持恒定的流量，这一任务就交由往复式计量泵来完成。这种泵使用一段时间后，常因活门的卡滞、泄漏而出现流量失控现象，为生产酿成重大损失。为了对计量泵输送的流量进行监视，于是安装了流量计。图 1 所示为其中的二氧五环（共单体）流量计系统图。

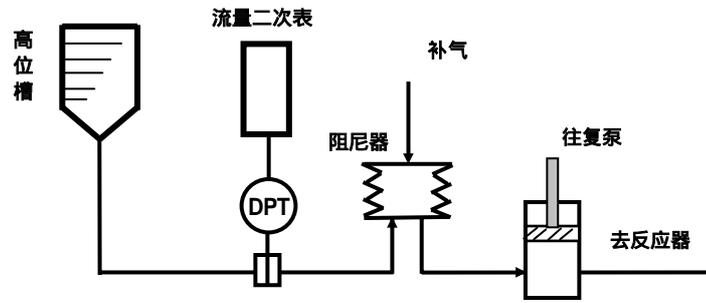


图1 二氧五环流量测量系统图

图1中流量计为FT 900型内藏孔板流量计^[5]，测量范围：0~25 kg/h，用机械储能元件（波纹管）吸收往复泵引起的流动脉动，从而减小其对流量计的影响。为了改善阻尼效果，波纹管内充压缩空气。由于阻尼器设计、安装合理，系统投运后，仪表示值稳定准确。在阻尼器内充以洁净的压缩空气是保证阻尼效果的必要条件，但是由于阻尼器内压力比高位槽内气相压力（大气压）高，所以阻尼器中的液体对其上方的气体存在吸收现象，大约每隔两个星期就需（通过减压阀）补一次气。如果忘记补气，阻尼器中的气体耗尽后，脉动就会严重影响流量计的工作。例如有一段时期，阻尼器正常工作，流量二次表示值稳定在37% FS，后因波纹管卡牢和内部缺气，完全丧失阻尼作用。瞬时流量在0~74% FS之间摆动，其波形如图2所示。将流量二次表内阻尼时间常数加大后，二次表示值稳定在52% FS，比正常示值升高2/5。

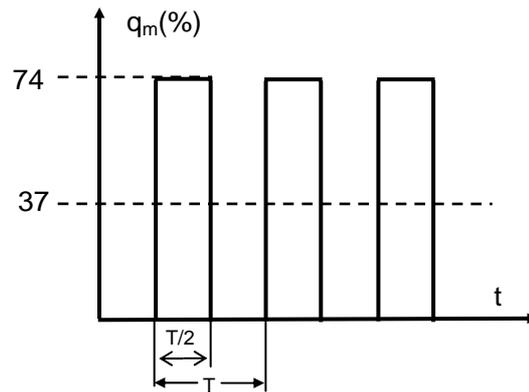


图2 往复式计量泵出口流量

在这个例子中，脉动流的平均流量 $\bar{q}_p = 37\% \text{ FS}$ ，其最大流量为 $q_{p\max} = 74\% \text{ FS}$ ，它对应的差压 $p_{p\max} = 54.78\%$ ，则 $\bar{P}_p = p_{p\max} / 2 = 27.39\%$ ， $(\bar{P}_p)^{1/2} = 52.33\%$ ，与式(2)相符。

显然，在测量脉动流量时，合适的阻尼器是至关重要的，而阻尼器的正常工作具有同等重要性。

5.2 调节系统振荡引入的脉动及其克服

上海轮胎橡胶股份有限公司下属的某轮胎厂新建两台35 t/h锅炉供3.9 MPa饱和蒸汽，蒸汽计量仪表的配置如图3所示。锅炉投入运行后，各路蒸汽分表示值之和与总表经平衡计算，差值1%R，发汽量与进水量平衡测试结果也令人满意，运行三个星期后出现了新情况，即去除氧器的一套蒸汽流量计示值有时突然跳高，从而使分表之和比总表示值高约20%。

正在听运行人员介绍之际，笔者观察到流量计示值跳高现象突然发生，从记录纸上也可清楚看出，测量范围为0~10 t/h的除氧器耗汽流量，正常时在3 t/h左右波动，最高时也未高于5 t/h，但是异常情况发生后，流量示值突然跳到10 t/h以上并长时间维持此值。

笔者立即到蒸汽分配器处观察，发现去除氧器的一路蒸汽管有异常的振动，管内压力有周期性的小幅度

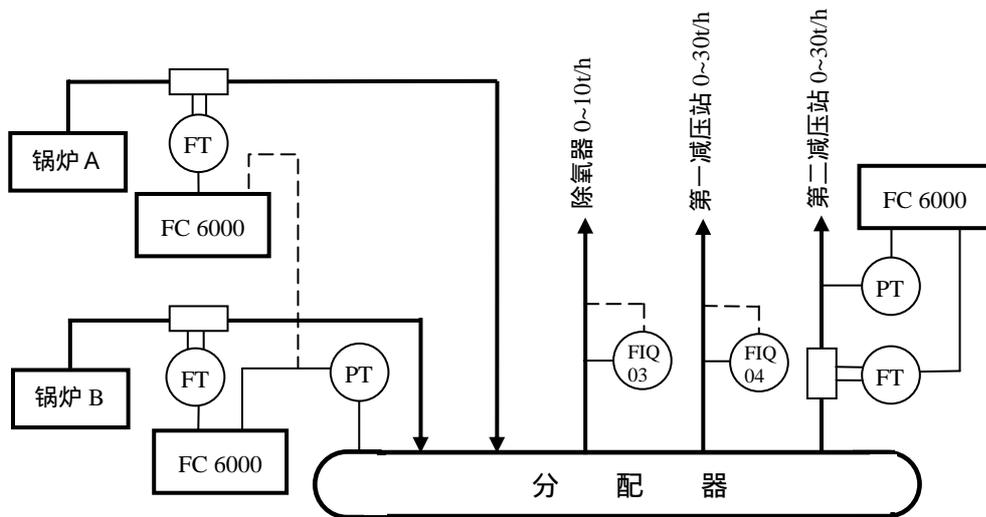


图3 锅炉房蒸汽计量系统图

摆动。作者又到除氧器处观察，其配管如图4所示。3.9 MPa 蒸汽经直接作用压力调节器减压到 0.6 MPa 后，再经用于除氧温度控制的偏心旋转阀送除氧头。笔者发现，减压阀后蒸汽压力在 0.1~0.8 MPa 之间大幅度、周期性摆动，周期约 4 s，而偏心旋转阀阀位并无明显摆动，显然，压力振荡是由直接作用式压力调节系统振荡引起的。

笔者建议热力工程师将减压阀前的切断阀缓慢关小，直至振荡停止，流量示值也恢复正常。

事后有关人员进行了分析，达成五点共识：

- 流量示值突然跳高是由于流体从定常流突然变为脉动流。
- 脉动流的形成源于减压阀振荡。
- 减压阀振荡是因其两端压差大，阀门开度小，阀芯还可能存在一定的干磨擦。
- 关小上游切断阀后，减压阀开度增大，振荡停止，是因为阀门开大后，减压阀两端压差减小，等效放大系数相应减小。
- 减压阀应尽早拆开检查，清除卡滞改善干磨擦，以彻底消除产生脉动的根源。

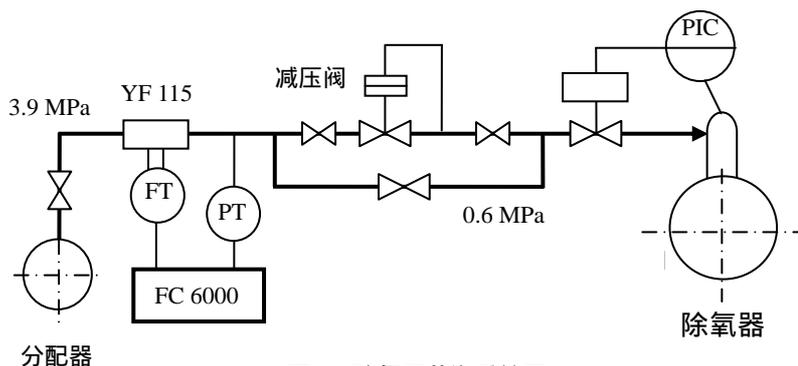


图4 除氧器蒸汽系统图

5.3 蒸汽喷咀引入的脉动及其克服

上面的两个例子，流体不同，脉动引发的方式大不相同，所使用的流量计也不同，但是有一点是共同的，即有固定不变或基本稳定的脉动周期，下面的一个例子，脉动完全是随机的。

大家知道，锅炉的除氧器是用蒸汽将进水加热到规定温度，于是水中氧的饱和溶解度相应减小，从而达到除去水中部分氧的目的。

国产锅炉除氧器，蒸汽是从除氧头下部引入，进水从除氧头上部引入，汽水在除氧头内的筛板段进行热量

传递和质量传递。这样的结构形式，对除氧器蒸汽流量测量毫无影响。但是笔者在中国最高的一幢大厦遇到的却是另一种情况。该大厦安装有德国 ROS 公司生产的蒸发量为 10 t/h 的四台锅炉，除氧器随锅炉带来。该台除氧器加热方法与上面所述不同。它是在卧式热水箱接近底部的高度横卧一根蒸汽喷管，在喷管上密密麻麻打了很多小孔，全部蒸汽均从这些小孔中喷出同周围的水接触，完成热量传递，并带着水中的氧上升，浮出水面，达到除氧目的。

这种结构的除氧器对蒸汽流量测量带来严重威胁。因为蒸汽从小孔中喷出后，马上同温度较低的水接触，导致汽泡破裂，仿佛水箱底部每秒钟都有许多小气球在爆破。这种爆破产生的流动脉动经蒸汽管路传递到安装在蒸汽管上的旋涡流量计，使流量计示值比热平衡计算得到的理论值高 150~170%，显然，问题是严重的，后与业主单位协商，在流量计与除氧器之间加装了一台阻尼器，使汽泡破裂产生的脉动在阻尼器中得到衰减，从而使流量计示值与理论计算值基本相符。阻尼器的结构如图 5 所示。

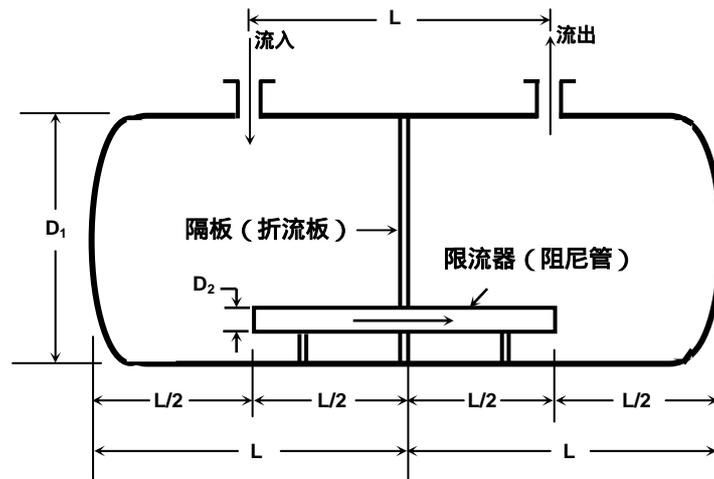


图 5 阻尼器结构

在设计蒸汽（气体）阻尼器时，两个气容容积大小和限流管内径的设计是关键，因为容积太小，阻尼效果不好，而容积做大，效果好了，但体积和成本均增大。限流管的内径也如此，管径取得太大，阻尼效果不佳，而管径取得太小，阻力大，压损大。因此需合理计算。

5.4 搅拌器桨叶旋转引起的脉动及其克服

江苏仪征某化工厂，母液从前一设备送到母液罐，如图 6 所示，其中的 FT 377 选用的电磁流量计，仪

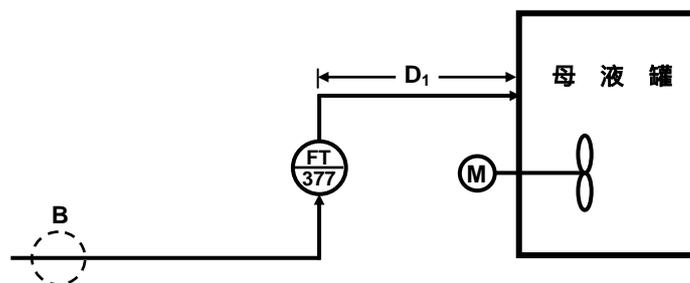


图 6 电磁流量计 FT-377 安装示意图

表投运后，流量示值以固定频率上下跳动。去现场检查，前后直管段长度及接地均符合要求，查不出原因。一个偶然的的机会，母液罐内的搅拌器停止运转，这时流量示值稳定。经进一步检查发现，此搅拌器是侧壁安装，而且其位置距安装流量计的进料管管口仅 1m 左右，很明显是搅拌器桨叶以固定的周期翻起浪波改变了进料口处的阻力导致管内流体脉动。电磁流量计测量管出口端到容器壁的距离 D_1 约 1.5m，由于距离太短，搅拌浪波

使管道出口压力波动，从而使流量计出口流速不稳，使流量示值产生有规则的摇摆。后将流量计从 A 位置改到如图 6 所示的 B 位置，距原安装位置约 10m，流量计示值趋稳定。

本例中所说的流动脉动对仪表示值影响还算幸运，因为所选用的是电磁流量计，而搅拌器桨叶引起的脉动频率较低，其数值远远低于流量传感器的激磁频率，所以流量示值尽管大幅度周期性摆动，但其准确度并无明显变化，其影响仅仅是示值难以读数，DCS 中趋势曲线无法制作。而下面所举的几个实例就没那么幸运了。

5.5 T 形管道引起的脉动及其克服

横河公司在其旋涡流量计选型资料中介绍，由图 7 所示的 T 形管道而引起的脉动压力，要对旋涡流量计产生干扰。当图中的阀门 V_1 关闭时，流体循 B 方向流动，对流量计 A 来说，流量为 0，但由于该脉动压力被流量计中的传感器检测到，以致流量计有相应的输出，出现所谓的“无中生有”现象。该公司建议将 V_1 的位置换到 V_1 位置，这时， V_1 关闭，能将脉动压力完全阻断，从而消除“无中生有”现象。而 V_1 保持一定开度时，由于 V_1 的节流作用，对脉动压力有一定的衰减效果。当然，流量计的安装位置如有可能，应尽量后移，远离脉动源，上述衰减作用会更好。

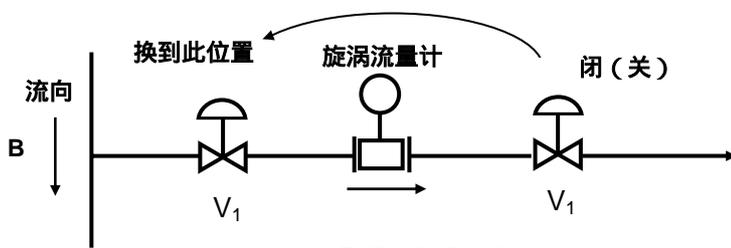


图 7 T 形管道引起的脉动

6. 结束语

脉动流体对流量测量仪表的影响是个十分复杂的问题，有时只知道流量示值误差大，并未察觉是流动脉动的影响，也未察觉脉动的存在，上面举的几个例子属于比较简单的情况，通过阻尼或消除脉动源，使问题得到解决。另外还有一些问题等待着我们去研究去解决。

参考文献

1. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits-Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments
2. ISO 5167(1991) "International Standard-Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles or Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full."
3. GB/T 2624-93 流量测量装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量
4. [美]R.W.米勒编著.孙延祚译.流量测量工程手册.北京:机械工业出版社, 1990.5
5. 上海宝科自动化仪表研究所.FT 900 型智能内藏孔板流量变送器.1997

(摘自《石油化工自动化》2003 年第 5 期 75~78)