

蒸汽带水对涡街流量计的影响

叶海青 陈伟琪（杭州正和计量校准有限公司，杭州 310004）

纪 纲（上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070）

提 要 蒸汽经过长距离输送后往往因为损失热量而出现部分蒸汽凝结成水滴，产生两相流的问题。湿蒸汽中含有水滴，使涡街流量计输出偏低。按公式进行湿度补偿，能使这一问题得到解决。蒸汽严重带水会使涡街流量计出现“漏脉冲”现象，严重时甚至全无输出脉冲。在涡街流量计的上游进行充分疏水，能使这一问题得到解决。

关键词 湿蒸汽 涡街流量计 漏脉冲 湿度补偿 疏水

1 概述

涡街流量计在蒸汽流量测量中扮演着重要角色，尤其是在管径不是特别大，温度不是特别高的中低压蒸汽的流量测量中，更是有“半壁江山”之誉。

干蒸汽在长距离输送过程中，会因热量损失而出现部分凝结，导致蒸汽干度降低，变成湿蒸汽。

没有过热器的锅炉，则在锅炉出口的蒸汽中，就带有少量的水。

人们用干度 X 来描述湿蒸汽中气相与湿蒸汽总量的质量比，也用湿度 Y 来定义湿蒸汽中水滴与湿蒸汽总量的质量比。

当 $x = 100\%$ 时， $y = 0$ ，这时的蒸汽为干蒸汽。当 $x < 100\%$ 时， $y > 0$ ，这时的蒸汽为湿蒸汽。湿蒸汽中的水滴是液相，而湿蒸汽的干部分是气相，显然，湿蒸汽属两相流体。

目前使用的流量计都是在单相流动状态下评定其测量性能，现在还没有以单相流标定的流量计用来测量两相流时系统变化的评定标准。但是，两相流是客观存在的，它对流量测量的影响也是无法避免的，尽管困难较多，人们还是在想方设法研究其对流量测量影响的机理，并采取相应的对策，提高流量测量精度。

2 蒸汽湿度及其对涡街流量计测量结果的影响

2.1 湿蒸汽中体积比同质量比的关系

湿蒸汽中的水以饱和水的形式存在，它对流量测量的影响究竟有多大，以及影响的机理如何，下面举例说明^[1]。

有一常用压力为 1.0MPa 的过热蒸汽测量对象，其流量为 q_m ，假设经长距离输送后有 $10\%q_m$ 冷凝成水滴，令其为 q_{mL} ，而保持气态的部分为 q_{ms} ，从定义知，此时湿蒸汽的干度为

$$X = \frac{q_{ms}}{q_m} = \frac{q_m - q_{mL}}{q_m} \quad (1)$$

目前，测量蒸汽质量流量的方法仍以间接法为主，饱和蒸汽的密度用查表法得到，在此例中，按照临界饱和状态查表，得到此时的蒸汽（干部分）密度为 $\rho_s = 5.6808 \text{ kg/m}^3$ ，查饱和水密度表知此时水滴的密度为 $\rho_L = 882.47 \text{ kg/m}^3$ ，显然水滴与蒸汽干部分的体积流量为

$$q_{VL} = q_{mL} / \rho_L \quad (2)$$

$$q_{VS} = q_{ms} / \rho_s \quad (3)$$

式中 q_{VL} 水滴的体积流量， m^3/h ，

q_{VS} 蒸汽干部分的体积流量， m^3/h 。
 L 饱和蒸汽中气相密度， kg/m^3 ；
 S 饱和蒸汽中液相密度， kg/m^3 。

由定义知，蒸汽干部分体积流量占湿蒸汽总体积流量 q_V 之比 R_V 为^[1]

$$R_V = \frac{q_{VS}}{q_V} = \frac{q_{VS}}{q_{VS} + q_{VL}} = \frac{1}{\frac{\rho_S}{\rho_L} \cdot \frac{q_{mL}}{q_{mS}} + 1} \quad (4)$$

因为

$$\frac{q_{mL}}{q_{mS}} = \frac{q_m - q_{mS}}{q_{mS}} = \frac{1}{q_{mS}/q_m} - 1 \quad (5)$$

所以

$$R_V = \frac{1}{\frac{\rho_S}{\rho_L} \left(\frac{1}{X} - 1 \right) + 1} \quad (6)$$

在该例中， $R_V = 99.93\%$ ，由此可见，在湿蒸汽中，水滴所占的体积比可忽略不计。

2.2 蒸汽的湿度对涡街流量计测量结果的影响

在用涡街流量计测量湿蒸汽流量时，由于其输出仅与流过测量管的流速成正比，即与工作状态下的体积流量成正比，由于水滴在湿蒸汽中所占的体积比可忽略不计，故可认为涡街流量计的输出完全由湿蒸汽的干部分所引起，所以，此输出中漏计了湿蒸汽的液相部分。

这是用物料平衡的方法所作的分析，其实，蒸汽带水后对涡街流量计的影响还远不只这些。

(1) $X = 95\%$ 时的情况

研究人员的研究结果认为，蒸汽干度较高 ($X = 95\%$) 时，流体表现为均相流动，蒸汽中的小水滴悬浮在气相中，这时，涡街流量计能正常工作。

(2) $X < 95\%$ 时

蒸汽的干度在小于 95% 后若进一步降低，除了悬浮在气相中的约 5% (质量比) 的水滴外，过量的水滴。在蒸汽中的分布将失去均匀性，它们在圆形截面管道中的流动状况更加复杂。

在水平管道中的流动

水平管中气液两相流动结构同气液两相体积比及流动速度有关，在蒸汽管道中，由于凝结水在湿蒸汽中的体积比毕竟很小，所以常表现为分层流动结构如图 1 (a) 所示，这使得从水平管道底部引出的疏水管，能收到很好的疏水效果。

当流速特别高的时候，也会表现为环状流动，即管壁上有液膜，管道中心部分为带液滴的气核，由于水平流动时重力的影响作用，下部液膜要比上部管壁的厚，如图 1 (b) 所示。

在垂直上升管道中的流动

实验研究证明^[2]，在垂直上升管道中，气液两相流动的基本结构有细泡状流动结构、弹状流动结构、块状流动结构、带纤维的环状流动结构和环状流动结构。但是由于凝结水在湿蒸汽中的体积比较小，所以

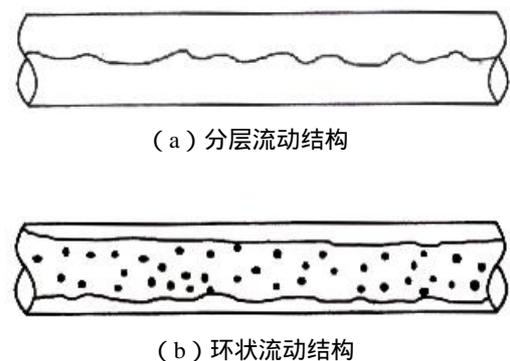


图 1 水平气液两相流的流动结构

过量的水在上升管道中的流动常表现为环状流结构,如图 2 (b) 所示,但当带水量特别大的情况下,也会表现为带纤维的环状流动结构,如图 2 (a) 所示。其中,纤维状流体其实是连成条的凝结水。

在垂直升降管道中的流动

在垂直下降管道中,气液两相流动的结构与作垂直上升流动时的结构很相似,但有所不同,不仅流动方向相反,而且在平均流速相同的情况下,垂直下降管道中液体的流速比垂直上升管道中液体的流速快得多。

这种环状流动结构,人们在凝结水疏水现场很容易得到证实。

凝结水疏水器一般均并联安装一只旁通阀,疏水器的出口往往配有一段垂直向下的短管,如果将疏水器关闭,改用走旁通疏水,则会观察到气液混合物从垂直管道口中流出的表现,液体有明显的附壁现象,但同时,气体从管中央喷出时,也夹带有一些液滴。

流动结构分析的复杂性

上面只是粗略地分析带水的蒸汽在管道中流动时的表象,而且知道不同的流动结构同流体的流速和带水量有关。而要进一步弄清楚这方面的数量关系却是困难的。因为到目前为止,人们在这方面做的实验研究还很少,而它们之间的关系又是极其复杂。

但是,这些粗略的分析对涡街流量计的一个特有的现象——漏脉冲,能提供一定的帮助。

3 涡街流量计的“漏脉冲”现象

人们很早就发现蒸汽带水较多时,涡街流量计会出现“漏脉冲”现象,即在蒸汽流速平稳的情况下,涡街流量计应有与流速成正比的稳定的脉冲输出。但是有时却发现仪表的输出脉冲莫名其妙地少了,从记录到的输出脉冲在二维坐标上的分布情况也能清楚看出,应当近似均匀分布的脉冲却在某一处少一个脉冲,严重的时候,是少了很多脉冲,最严重的时候是完全没有脉冲。这可能同分布不均匀的体积较大的液滴撞击旋涡发生体上,抑制了涡列的形成有关。

有关这方面的实验研究,尚未见到文献报道,但是人们在使用现场已碰到不少,而且,处理这一问题的方法,人们也早已在应用。

3.1 关于“漏脉冲”现象的实例之一

作者在为上海的一家药业公司组建全厂蒸汽计量网的项目中,碰到了令人费解的故障,这个故障发生在一个测量过热蒸汽流量的系统中,这个系统的管道连接如图 4 所示。

该工厂的锅炉房除了向全厂供应中压过热蒸汽外,还经减温减压系统向全厂供应 0.4MPa (g)、160 低压过热蒸汽。FIQ303 就是对这路蒸汽进行计量的仪表。

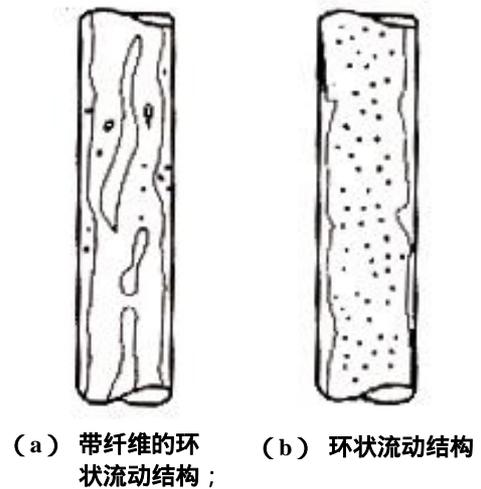


图 2 垂直上升气液两相流的流动结构

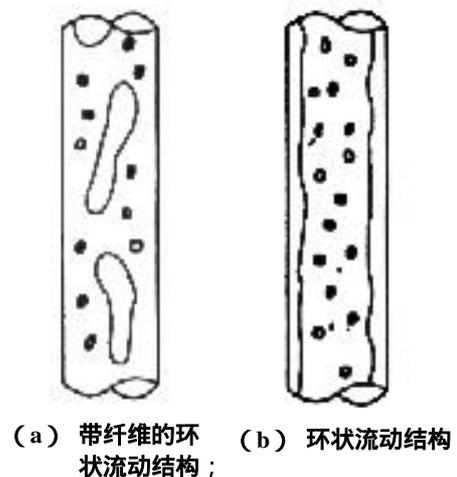


图 3 垂直下降气液两相流的流动结构

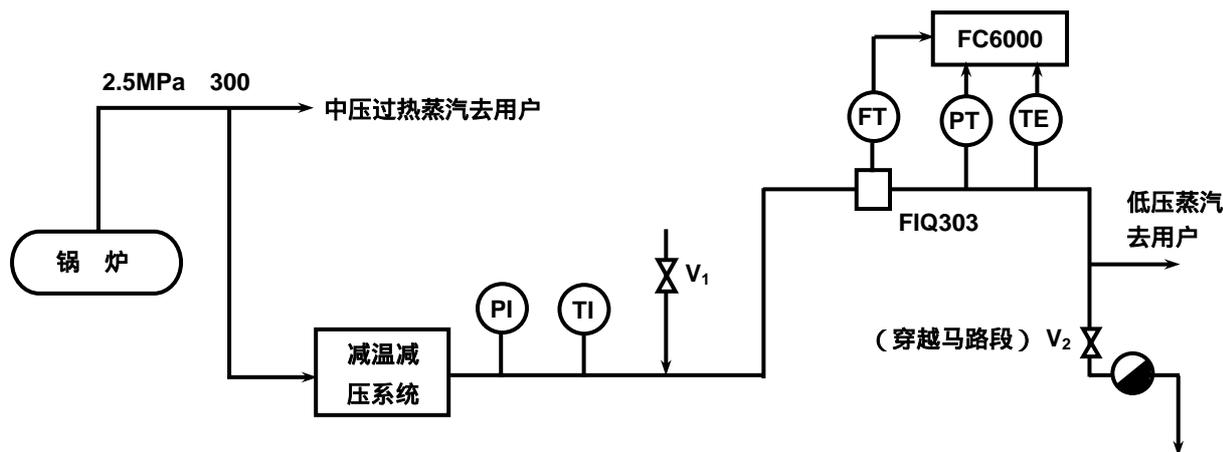


图4 低压蒸汽流量测量系统图

该套仪表与其他多台分表组成的低压蒸汽计量网，在投运后的半年内，一直运行正常，总表示值与各分表之和也基本相符。这一情况在年度停车大检修之后发生了变化，原来进出平衡的计量数据出现了负的管损，该厂能源科根据低压蒸汽网的数据平衡关系和锅炉的能量平衡关系作出了FIQ303指示偏低的判断。

作者在检查了各台仪表之后，发现各台仪表均正常。于是请涡街流量计制造厂上门服务，经检查发现这台DN350的涡街流量计有“漏脉冲”现象存在，在正常的流量范围内，记录到数次如图5所示的输出波形。



图5 示波器记录到的波形

根据制造厂的经验，这种情况的存在可能是蒸汽带水引起。

能源科工程师否定涡街流量计安装处蒸汽带水的可能性，理由是减温减压系统都有自动调节来保证其运行参数，于是一时没有结论。又过一个星期，事态有了进一步的发展。从FC6000型流量演算器中的海量存储器查阅到的历史数据表明，该路流量示值逐渐减小，甚至有时减小到零，而这时，全厂生产照常进行，蒸汽一点不少用。

进一步的检查焦点主要集中在蒸汽是否带水方面。能源科主要强调减温减压系统出口处的温度压力参数。经查，减温器出口温度压力显示正确。但是作者根据FC6000型仪表显示的温度压力数据分析，涡街流量计安装处的蒸汽的确已进入饱和状态，于是要求打开疏水器验证。能源科人员坚持认为疏水器不可能排出水，但为了说服仪表人员，还是同意打开疏水器的切断阀（图4中的V₂）试一试。

疏水阀打开后，大量凝结水喷出，二十分钟也未排光，于是真相大白。

至于大量凝结水是从哪里来的，我们随即进行了调查。经查在减温器出口到流量计之间只有一根装有阀门V₁的管道与外界相通，能源科人员解释，这根管道里有水，大检修之后，V₁阀可能有泄漏，导致冷水入侵。

这一事情的最后处理方法是在穿越马路前的管道最低处，增设一个疏水器，从而使流量计恢复正常测量。

3.2 关于“漏脉冲”现象的实例之二

上海某热力公司新增一个热源厂，该厂生产的是饱和蒸汽，锅炉投运后对一个远在2公里处的用户供汽。其管网如图6所示。

热力公司怀疑流量计不准，因为锅炉房出口的流量计FIQ01稳定显示2.5 t/h左右的流量，而用户端流量计FIQ02显示时有时无，流量最大时也只有0.75 t/h。

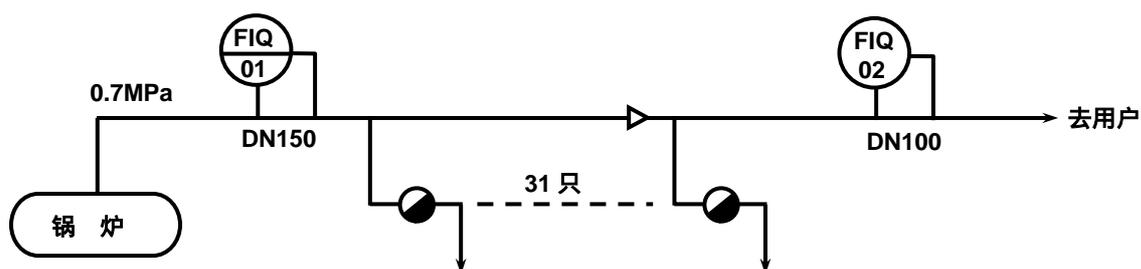


图 6 锅炉供汽系统图

作者通过电话为热力公司提供咨询服务，了解到，热力公司为了减少热量损失，将沿途的 31 只疏水器全部关掉，显然流经 FIQ02 仪表处的蒸汽中含有大量凝结水。作者建议将靠近用户表计处的几只疏水器打开，排掉管道中的凝结水，这样做了之后，流量计示值在 1t/h 以下较稳定，至于该示值同 FIQ01 显示的 2.5t/h 之间的差值，应该是 2 公里长的管道热损耗引起的，热力公司接受了这一结论。

3.3 关于“漏脉冲”现象的实例之三

某热力公司有一个间歇用汽的用户，白天用汽，夜间停用，热力公司反映，该用户的表计在每天上午开工后，在开始的一段时间，如果阀门开得小，则显示正常；阀门逐渐开大后，示值反而减小，直到热管完毕，仪表显示才能恢复正常。

经现场察看，发现从蒸汽母管到用户表计之间有一段长约百米的管道，用户夜间停止用汽后，管道内仍有蒸汽。由于管道散热，一夜之间在管道底部积了很多凝结水，在阀门开度小的时候，管道上方的蒸汽流经涡街流量计，表计显示正常，阀门开度增大后，管内流体流速增大，凝结水被带走，流经涡街流量计时，导致严重的“漏脉冲”，但当管道中的凝结水被全部带到流量计的下游后，与旋涡发生体接触的全部为蒸汽，仪表显示又恢复正常。

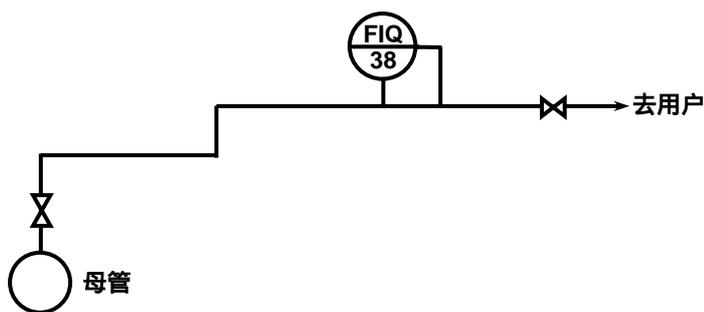


图 7 间歇用汽用户供汽系统图

4 对策

4.1 X > 95%情况下的对策

从第一节分析可知，在 $X > 95\%$ 的情况下，涡街流量计输出的脉冲数仅仅是湿蒸汽的干部分流量，因此，如果想将湿蒸汽流量全部测量出来，只需补入涡街流量计少计的部分。

4.1.1 脉冲输出的涡街流量计中的补偿方法

脉冲输出涡街流量计测量饱和蒸汽流量，是根据其输出的旋涡频率计算出体积流量 q_v

$$q_v = \frac{3.6f}{K_t} \quad (10)$$

式中 q_v 体积流量, m^3/h ;

f 涡街流量计输出频率, P/s;

K_t 工作状态下涡街流量计流量系数, P/L。

然后由蒸汽压力 (或温度) 查临界饱和状态密度表得到 ρ_s , 并在流量演算器中相乘得质量流量 q_{ms} , 即

$$q_{ms} = q_v \cdot \rho_s \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (1) 得

$$X = \frac{q_v \cdot \rho_s}{q_m} \quad (12)$$

所以

$$q_m = \frac{q_v \cdot \rho_s}{X} \quad (13)$$

因为 $x=1-y$, 所以

$$q_m = \frac{q_v \cdot \rho_s}{1-y} \quad (14)$$

将式 (13) 与式 (11) 相比, 湿蒸汽质量流量测量只需将临界饱和状态蒸汽密度除以蒸汽干度即可实现。

具体实施时, 在流量演算器中设置一个窗口, 由用户根据实际情况人工写入湿度值 y , 仪表运行后即可自动进行湿度补偿^[3]。

4.1.2 模拟输出涡街流量计测量湿蒸汽质量流量的原理

模拟输出涡街流量计测量饱和蒸汽质量流量, $0 \sim 100\%$ 输出对应 $0 \sim q_{m \max}$ 是建立在蒸汽密度为设计密度 ρ_d 的基础上的, 因此, 质量流量测量上限实际上是对应一个体积流量 $q_{v \max}$, 即

$$q_{v \max} = q_{m \max} / \rho_d \quad (15)$$

式中 $q_{v \max}$ 体积流量测量上限, m^3/h ;

$q_{m \max}$ 质量流量测量上限, kg/h ;

ρ_d 设计状态蒸汽密度, kg/m^3 。

其实, $q_{m \max}$ 还对应一个频率上限 f_{\max} , 从式 (10) 可知,

$$f_{\max} = \frac{1}{3.6} q_{v \max} \cdot K_t = \frac{1}{3.6} \cdot \frac{q_{m \max}}{\rho_d} \cdot K_t \quad (16)$$

式中 f_{\max} 测量上限对应的脉冲频率, P/s。

涡街流量计制造厂在仪表出厂前的流量标定中, 按用户提供的常用压力 (或常用温度) 数据查临界饱和状态蒸汽密度表得到 ρ_d , 并按式 (16) 计算 f_{\max} , 而实际使用时, 在相同的压力 (温度) 条件下, 湿蒸汽密度要比 ρ_d 大, 因此, 需进行密度补偿, 补偿公式为

$$q_m = A_t \cdot q_{m \max} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_d} \quad (17)$$

式中 ρ_f 工作状态蒸汽密度, kg/m^3 ;
 A_i 经无量纲处理的模拟输入信号, 0~100%。

当蒸汽为干度等于 100%的饱和蒸汽时, ρ_f 由蒸汽压力 (或温度) 查饱和蒸汽密度表得到; 当蒸汽为湿蒸汽时, $\rho_f = \rho_{sf}$, ρ_f 可用下式计算。

$$\rho_f = \rho_{sf} / X \quad (18)$$

式中 ρ_f 湿蒸汽平均密度, kg/m^3 ;
 ρ_{sf} 工作状态下气相部分密度, kg/m^3 。

在流量演算器的一个指定窗口中, 写入湿度值 y , 仪表运行后, 就可自动进行湿度补偿。

4.1.3 补偿后流量示值的验证

用涡街流量计测量蒸汽流量, 人们往往用凝结水称量的方法验证流量计的准确度。

在用 4.1.1 和 4.1.2 两条所介绍的方法对流量计的湿度进行补偿后, 只要 X 的数值估计无大的出入, 验证结果应是满意的。

4.2 X 95%情况下的对策

4.2.1 对策

上面所述 $X > 95\%$ 情况下的补偿, 如果不做, 仅仅是悬浮在蒸汽中的均匀分布的小水滴计不出, 但是在 $X < 95\%$ 的情况下, 如果不采取任何措施, 测量结果就有可能大幅度偏低, 甚至没有输出。

在 $X < 95\%$ 的情况下, 采取措施的目的是使流量计实现正常测量。采取的措施是在流量计前充分疏水。

疏水是否充分的标志是蒸汽管中是否排得出凝结水。如图 8 所示的配置中如果只有极少的水排出, 则表明管道内已无分层流动的水。

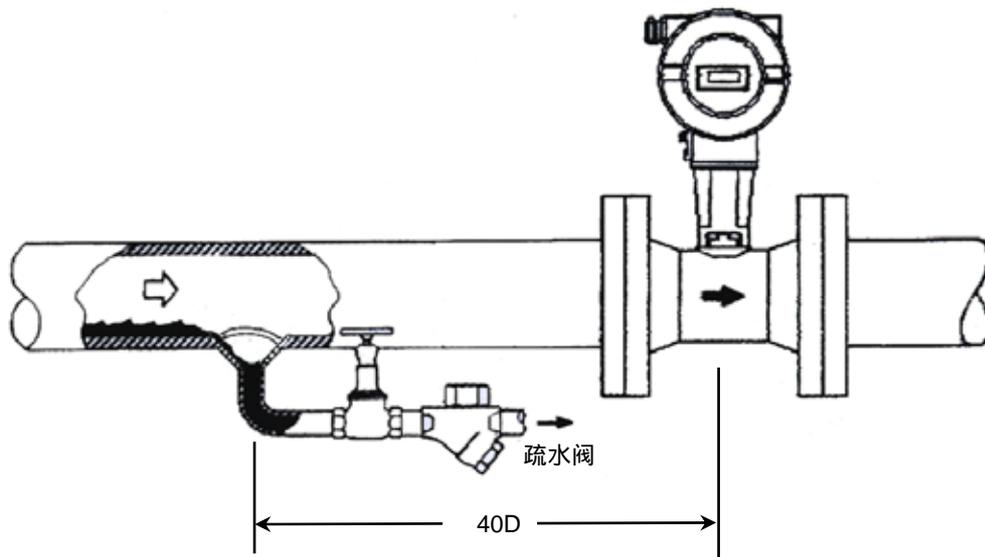


图 8 蒸汽是否严重带水的验证

4.2.2 疏水点的合理布置

疏水点的合理布置对充分疏水有关键性的作用。在图 9 (a) 所示的实例中, 凝结水的捕捉口太细, 与蒸汽一起高速流动的凝结水, 可能会有一部分不被捕捉口所收集, 而流到下游。

4.3 湿度 Y 值估算

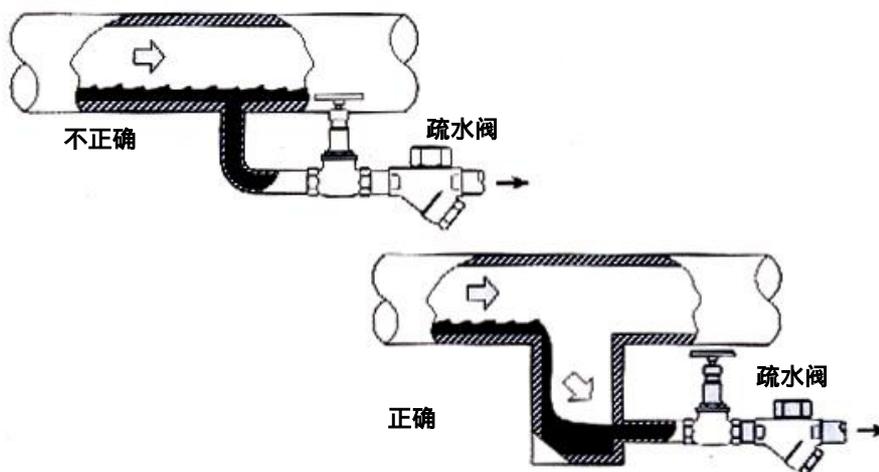


图 9 蒸汽管道疏水器布置实例

从上面的分析可知，湿蒸汽对流量测量结果的影响都与湿度 Y 有关，所以要进行湿度补偿须有当前的湿度值。

要用实测的方法得到 Y，目前还有困难，所以实施中还只能根据蒸汽的状况由人工估计。估计方法如下：

当设置在蒸汽管底部的疏水阀能排出水的情况下， $X < 95\%$ ；

当上述疏水阀排不出水，而蒸汽的温度压力的关系由流量显示表已经判定蒸汽为饱和蒸汽时， $95\% < X < 100\%$ 。

当疏水阀中有较多的水排出时，干度比 95% 低得多。

5 设备的安全

在 3.3 节所述的实例中，还可能存在着设备损坏的危险性。因为系统启动时，高速流动的蒸汽夹带着凝结水冲向涡街流量计的旋涡发生体，由于水的密度大，所以冲击力惊人，极易导致旋涡发生体损坏。

解决的办法是，在开阀前先将凝结水排放掉，而且开阀的速度应足够缓慢，避免撞击。

6 结束语

湿蒸汽就属性而言是两相流体，但在湿度不高的情况下，可将其当作单相流体并用一般的流量计进行测量。

当 $X > 95\%$ 的情况下，涡街流量计的输出脉冲仅代表湿蒸汽的干部分，如果想测量湿蒸汽的质量流量，可对涡街少计的部分进行补偿。

蒸汽严重带水，将使涡街流量计出现“漏脉冲”现象，更严重时，涡街流量计会完全没有脉冲输出。

对于蒸汽严重带水影响涡街流量计正常测量的情况，常用的处理方法是在涡街流量计上游的适当位置充分疏水。

合理布置疏水器，使湿蒸汽的干度尽量提高，能保证涡街流量计正常测量。

本文讨论的是蒸汽带水，在处于饱和状态的其他气体流量测量中，也有类似的现象。例如氨蒸发

器出口管氨气流量测量，液氯蒸发器出口管氯气流量测量等，气体中带液太多时，也会出现漏脉冲现象。

参考文献

1. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社. 2003
2. 林宗虎编著. 气液固多相流测量. 北京: 中国计量出版社, 1988
3. 上海同欣自动化仪表有限公司. FC6000 型通用流量演算器使用说明书

(摘自国家质检总局计量司等组编 2008 全国能源计量优秀论文集)

作者纪纲的联系方式

地址：上海市止园路 621 号 1 号楼 5 楼

邮编：200070

电话：021-66600941x219

传真：021-66600874

电邮：13901926182@139.com