

蒸汽流量测量中的压损与节能效益分析

叶海青 杭州市质量技术监督检测院（杭州，310019）

邱宣振 中石化上海工程有限公司（上海，200120）

纪波峰，纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司（上海，200070）

提 要：有文献谈到，在相同的流量和相同的直径比 时，喷嘴的压力损失只有孔板的 30%~50%，并进而计算某口径的孔板，在一年之内损耗的能量折算到人民币高达几十万元。这似乎有一个推论，即孔板压损比喷嘴大一倍以上。文中以国际标准和国家标准为工具，对上述论点进行分析计算，发现在相同流量、相同工况条件和相同差压上限的条件下，孔板压损不是比喷嘴大，而是略小，因此上述条件下，相同这一假定不成立。本文还从系统的角度分析了流量计上压损减小所节省的能量损耗，绝大多数不能转化成经济效益。文中还分析了喷嘴和孔板在直管段要求、超过限制条件、节流件变形、耐磨性、经济性和不确定度方面的差异。

关键词：喷嘴 孔板 压力损失 节能 直径比 直管段 节流件变形 不确定度

Pressure Loss and Energy efficiency analysis in the steam flow measurement

Ye haiqing Hangzhou Institute of Quality and Technical Supervision and Inspection(Hangzhou,310019,China)

Qiu xuanzhen Sinopec Shanghai engineering Co., Ltd. (Shanghai, 200120, China)

Ji bofeng, Ji gang Shanghai Tontion automation instrumentation Co., Ltd. (Shanghai, 200070, China)

Abstracts: Reference mentioned that nozzle has only 30%~50% pressure loss of what orifice has, with same flow and same diameter ratio. And therefore made conclusion that an orifice consume energy up to several hundred thousand of RMB within a year. It seems that orifices have double pressure loss than nozzles. We analyze and calculate the above argument by international standard and national standard. And find that orifices have less pressure loss than nozzle, at the same flow rate, same working conditions and same differential pressure upper limit. Under these conditions, the assumption which has same diameter ratio is not valid. The article also analyzes energy consumption saving by reducing pressure loss can't convert into economic benefits from the perspective of system. The article analyzes difference between orifice and nozzle in straight pipe requirements, exceed limits, throttling device deformation, wear resistance, economy and uncertainty.

Keywords: nozzle orifice pressure loss energy saving diameter ratio straight pipe
throttling device deformation uncertainty

1. 从一篇论文说起

用来测量蒸汽质量流量的流量计，总是有一些压力损失，不管是涡街流量计还是差压式流量计，而压力损失就意味着能量损耗，因而引起人们的关注。

流体流经差压装置，在正端取压口和负端取压口之间产生压差 P ，而当流体流过节流件继续向下游流动时，静压得到部分恢复，但总比上游静压要低一些，由此产生压力损失。这种压力损失是永久性的^[1]。

已经实现标准化的差压装置有孔板、喷嘴和文丘里管，各种不同类型的差压装置，各具特色，各有所长^[2]，也各有所短，设计选型时应扬其所长，避其所短，为我所用。

曾经看到过一篇文章，讨论的是关于孔板的压损与能耗。主要论点是：在相同的流量和相同的直径比 时，喷嘴的压力损失只有孔板的 30%~50%。并进而计算某口径的孔板，在一年之内损耗的能量高达几十万元^[3]。

这里面包含两个问题，第一个问题是在实际使用中，喷嘴的压力损失真的能比孔板小一半吗？

第二个问题是差压装置上损耗的能量如果不损耗了，哪里工程系统能拿到这些效益。

2. 喷嘴和孔板的压力损失分析

在国际标准 ISO 5167-2003(E)和国家标准 GB/T2624-2006 中，喷嘴（这里指 ISA1932 喷嘴）和标准孔板压力损失计算用的是同一个公式^{[4][5]}，

$$\Delta\varpi = \frac{\sqrt{1-\beta^4(1-C^2)}-C\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4(1-C^2)}+C\beta^2} \Delta p \quad (1)$$

式中 $\Delta\varpi$ —— 压力损失，Pa；
—— 直径比， $\beta = d/D$ ；
 d —— 节流件开孔直径，m；
 D —— 管道内径，m；
 C —— 流出系数，纯数；
 P —— 差压，Pa。

对于相同的测量任务，介质相同、流量相同、工况条件相同、管径相同，如果采用不同的差压装置去测量，由于流出系数不同，所以计算得到的直径比也不同。

在第 1 节所述的论文中，说到在 β 值相同的条件下，压力损失孔板最大、喷嘴次之、文丘里管最小，这是因为孔板有 90° 直角边，而喷嘴的入口为圆弧廓形，文丘里管的收缩段阻力更小。但是相同 β 在相同条件下所产生的差压也是孔板最大、喷嘴次之、文丘里管最小。文章中关于三种差压装置的压力损失的结论没有错，但是相同的直径比 β 只是假设，在工程选型和设计没有实际意义。因为在三种差压装置中作选择时，没有人强调要用相同的 β 值，作为用户来说，他对制造厂提供的差压流量计选多大的 β 值毫不关心，只要不超过限制条件就行，关心的倒是压力损失或与此密切相关的满量程差压 P_{\max} 。因为 P_{\max} 取得太大，将会使差压装置上损失的能量增大，而 P_{\max} 取得太小，又担心差压信号传递失真带来问题。

根据这一基本情况，我们可以举个实例来计算一下两种差压装置上压力损失的确切数值。

已知某一流量测量对象，主要数据如下：

介质：水蒸汽

常用压力 P_1 ：4.5MPa G

常用温度 t ：450

满刻度流量 q_{\max} ：260000kg/h

管道内径 D_{20} ：493mm

差压上限 P_{\max} ：100kPa

上计算机计算后得，若选 ISA 1932 喷嘴，则

$$\beta = 0.4687$$

$$C = 0.9798$$

若选标准孔板，则

$$\beta = 0.5855$$

$$C = 0.6041$$

都在比较理想的范围内（计算书从略）

将这些值分别代入式（1）就可得到满刻度时，压力损失

$$\text{喷嘴压力损失 } \Delta\varpi = 0.6469 P$$

$$\text{标准孔板压力损失 } \Delta\varpi = 0.6459 P$$

显然，孔板压力损失略小于喷嘴压力损失。

究其原因是孔板直径比 β 比喷嘴直径比 β 大一些，与论文中所做的假定不一致。

3. 涡街流量计压力损失分析

涡街流量传感器上压力损失计算公式与喷嘴、孔板不相同，以横河公司提供的 DY 型涡街流量传感器为例，其公式为^{[6][7][8]}

$$\Delta\varpi = 1.08\rho V^2 \quad (2)$$

式中 $\Delta\varpi$ —— 压力损失, Pa;
 ρ —— 流体密度, kg/m³;
 V —— 流速, m/s。

假定上述测量任务选用的为 DN300 涡街流量计 DY300, 并假定流体最高温度条件下仪表能够承受, 则满刻度时流速为 70.64m/s, 从已知条件知: $\rho = 14.463 \text{ kg/m}^3$, 所以代入式 (2) 得

$$\Delta\varpi = 77955 \text{ Pa}$$

与喷嘴和孔板上的压力损差不多。

4. 差压流量计允许压损由工艺管路设计决定

4.1 一个典型的流体控制回路

作为仪表制造厂来说, 能使自己的产品在使用时所产生的能量损耗小一些, 当然是好事, 但是认为流量计上的能量损耗节省下来后, 就是经济效益了, 这也有失偏颇, 因为经济效益与能量损耗是两个不同的概念。有的系统适用, 很多系统还不适用, 在调节系统就不适用了。

例如在一家大型石化厂, 都要配备一个低压蒸汽系统, 额定压力约为 1MPa; 一个中压蒸汽系统, 根据流程需要, 确定额定压力。每个系统可能都有几十个用户, 各个用户与总管的关系如图 1 所示。

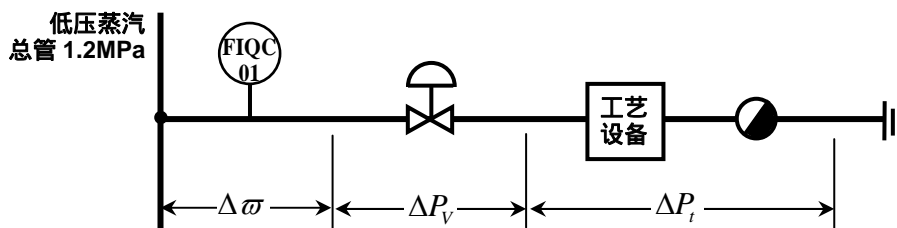


图 1 低压蒸汽用户示意图

在图 1 所示的回路中, 总管上所提供的总压力被分配在流量计、调节阀和工艺设备上, 分配的原则是工艺设备、调节阀和流量计都要具有能维持正常工作所必需的最小压降。工程上, 管路系统的压损占整个系统压损的一部分而孔板的压损只占管路系统压损一部分。如果流量计上的压力损失可以小一些, 那么调节阀上的压降就得大一些, 最后将多余的压差平衡掉, 工艺设备一般是不承担平衡压差的任务的, 因此, 并不会因为流量计上减小了能量损耗而获得相应的经济效益。

4.2 适当降低总管压力会有一定效益

在由工业锅炉供汽的热力公司, 有的设法将总管压力降低, 会有一些经济效益。在一个供热网有很多用户, 例如一个热力公司可能有一百个用户, 每个用户对蒸汽压力的要求都不相同, 有的甚至嫌热力公司供的蒸汽压力太高, 于是在蒸汽管进入用户界区后, 另外增设自动减压阀, 将压力降低, 再进生产设备。

在这样的系统中, 决定供汽最低压力的只是很多用户中的一两家, 如果供汽压力低于这个下限值, 就会影响生产, 于是这一两个用户就需想方设法降低流量计上的压力损失, 不仅仅是流量计, 其他如调节阀、管路上一切造成压损的管件都得精打细算, 有时不得不牺牲一点流量测量精确度以满足系统设计的需要。这时候, 流量计的压损才与效益挂钩。

5. 压力损失小并非总是好事

巴类流量计和弯管流量计也都属于差压式流量计，这两种流量计由于不象标准差压流量计那样有节流件，因此也就失去了根据需要通过调节直径比来使 P_{\max} 达到理想值，以致在低密度低流速的测量对象中， P_{\max} 只有几百帕甚至几十帕，供应商的销售人员说这是好事，大大降低了动力损耗，但是现场的实际使用表明，带来的问题很多。其一是由于差压上限小，只能选配微差压变送器，与大家熟悉的中差压、低差压变送器相比，这种变送器测量精确度要低得多，零点的短期稳定性和长期稳定性都差很多。其二是由于 P_{\max} 太小，正常测量时的差压值也太小，三阀组内的一个气泡（测量气体时是一滴冷凝液），都会使流量显示值面目全非^[8]。

上海某机场在基建阶段安装了 35 台各种不同口径的弯管流量计，用于能源的计量，仪表投运后普遍不好用。空调冷冻水用的流量计，冬令季节冷冻水已停，仪表还指示很大的流量，以至最后无法通过政府授权机构的检定，仪表全部报废。

由于这个原因，人们就在想方设法提高此类流量计的传感器输出差压，其中罗斯蒙特公司的 T 形阿牛巴，能使其输出的差压值比菱形截面检测杆高 80%^[9]，从而受到同行的赞许^[8]。

6. 喷嘴和孔板其他方面的差异

前面讨论的都是压力损失与节能方面的内容，除此之外，在喷嘴与孔板的选用中，还有其他几个问题要考虑。

（1）直管段要求的差异

在前面第 4 节的实例中，完全相同的使用条件，由于喷嘴的 β 比孔板小，所以直管段要求也有很大差异，查阅 GB/T 2624-2006 中的表格，喷嘴直管段只要 14D 就够了，而孔板要 39D。

（2）孔板有可能会超过限制条件

在电厂的蒸汽流量测量中，高温、高压、高流速的条件比较多。由于压力高，对应的流体密度就大，在初选了 P_{\max} 后计算得到的 β 有时会 > 0.75 ，因而超过限制条件，为了将 β 缩小，可将 P_{\max} 适当增大，但是这又增大了能耗。这种情况下如果改选喷嘴，大多数不会超过 $\beta > 0.8$ 的限制条件（喷嘴和孔板的限制条件不相同）。万一还是超过限制条件，那就只有适当放大 P_{\max} 或扩大管径了^[10]。

（3）关于节流件的变形

节流件变形是由多方面的因素决定的，其中，喷嘴由于圆弧廓形的结构特点，具有极高的抗变形能力，所以这种节流件与管道之间，不论是采用法兰连接还是焊接，都不会因热膨胀导致损坏。而孔板如果与环室之间或与法兰之间预留的径向间隙不够大，却会因热膨胀导致板片变形，由平板变形碗形，甚至由此引起密封垫片处介质外泄，所以，设计制造时要特别注意。

（4）节流件的耐磨性

喷嘴的耐磨性明显好于孔板，这是因为喷嘴没有直角边，而孔板有直角边。由于这个原因，JJG 640-1994 差压流量计检定规程规定，标准孔板检定周期为 2 年，而喷嘴检定周期可达 4 年^[11]。

在被测介质为河水及含有固体颗粒时，使用一段时间，孔板直角边会出现 r 变大的痕迹，而中低压蒸汽和一般气体，未见明显的磨损。

（5）不确定度的差异

喷嘴最好能达到 0.8%（与 β 有关），而标准孔板能达到 0.5%^[5]。

（6）经济性的差异

生产一台喷嘴的材料要比孔板多若干倍，所以喷嘴的生产成本比孔板高一倍是正常的。

7. 结束语

小结：在选用差压流量计中，在永久性压损不大于允许值的前提下，主要考虑的是测量精确度

和价格，在这两方面，孔板占有明显的优势，所以市场占有率也雄居首位。

(1) 在相同的流量和相同的直径比时，喷嘴的压力损失只有孔板的 30%~50%这一论点是对的，但其隐含的推论是错的，因为差压装置计算中，有多个因素可改变，设计时可采用不同直径比。

(2) 在相同流量、相同工况条件和相同差压上限的条件下，孔板的直径比 比喷嘴大得多，这是由于喷嘴的流出系数大约比孔板大 60%引起的。

(3) 在一个典型的流体控制系统中，通常包含工艺设备、用于控制的阀门以及流量计等，流量计上节省的能量损耗通常要控制阀来平衡，因此这种节省不能转化成经济效益，只有个别情况才会有经济效益，因此设计时应根据具体情况区别对待，不要不问青红皂白一味追求低压损。计量仪表还是要以确保测量精确度为主。

(4) 喷嘴和孔板在直管段长度要求、超过限制条件、节流件变形、耐磨性、不确定度以及制造成本等方面都有差异，设计选型时应扬长避短、趋利避害合理决策。

参考文献

1. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社, 2003
2. 苏彦勋, 梁国伟, 盛健. 流量计量与测试. 第二版. 北京: 中国计量出版社, 2007.
3. 赵颖麟, 赵文. 用弯管流量计取代孔板流量计节能效益分析. 《工业计量》, 2007(A01): 22~23.
4. ISO5167-2(2003E) Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full-part2: orifice Plates
5. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量
6. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006
7. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2009.
8. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社. 2012
9. 贺正勤, T型阿牛巴流量计. 第六届工业仪表与自动化学术会议论文集, 上海: 2005年6月
10. 孙淮清, 王建中. 流量测量节流装置设计手册. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2005.
11. JJG640-1994 差压式流量计检定规程

本文发表在《石油化工自动化》2016年第4期