

4.3 涡街流量计超上限流速的危害性研究

王深 扬州供热有限公司（江苏扬州 225000）

纪波峰，曾令飞 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200940）

摘要：涡街流量计的应用已相当广泛，但当流过涡街流量计的流体超过上限流速后会发生什么问题，仪表制造厂讳莫如深，专业刊物和书籍中也很少触碰。而超上限流速的现象又是客观存在的事实。而且超上限流速是在不知不觉之间发生的。事件发生时，涡街流量计本身既无征兆也无任何提示，只能用间接的方法洞察判断。文中阐述了与串联安装的不同原理的另一台流量计测量结果比较法；总表示值与相关联的各分表示值之和比较法；基于质量守恒定律的分析算法；基于 SCADA 系统的管损统计数据 and 趋势图波形关联分析法，并在现场诊断分析中取得成功。众多实例和实验表明，对于中外各种品牌涡街流量计来说，上限流速虽有不同，但一旦超上限流速，都表现为流量示值严重偏低，超流速太严重时甚至冲断旋涡发生体。

关键词：涡街流量计；超上限流速；危害性；示值偏低；发生体折断

4.3.1 引言

在蒸汽供热网和其他用于贸易交接的蒸汽计量中，绝大多数使用的是标准差压流量计和涡街流量计^[1]。其中涡街流量计因其量程比宽，所以占有一定份额，尤其是管径较小时。

关于涡街流量计的特性及使用，已经有不少文献作专题讨论，例如受流动脉动伤害问题^{[2][3]}；严重带水漏脉冲问题^[4]；抗电磁干扰和振动干扰问题^[5]。但是超上限流速的影响问题，讨论的还不多。尤其是制造厂，对此问题讳莫如深。

在制造厂的产品说明书中以及有关的书刊中，多给出卡门涡街斯特罗哈尔数 S_r 与雷诺数 Re_D 之间的关系，如图 1 所示^{[6][7]}。

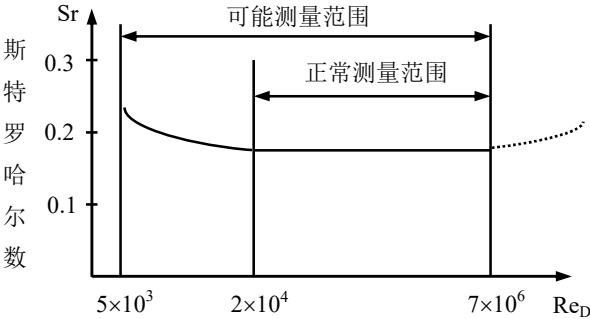


图 1 斯特罗哈尔数与雷诺数的关系

从这幅图可看出，只有 $Re_D < 20000$ 和 $Re_D > 7 \times 10^6$ 时， S_r 才略有升高，而在 $20000 \leq Re_D \leq 7 \times 10^6$ 区间， S_r 是一根水平直线，因此即使雷诺数在 350 倍范围之内变化，也都应该能得到很高的精确度，从而不用提超流速使用会出现流量示值严重偏低的事。

然而，涡街流量计超上限流速使用会严重偏低，是客观存在的事实，来自使用现场的很多事例也证明了这一点，想回避也回避不了。即使是用户使用不当，最终给用户带来损失，制造厂不作告知也是有责任的。

为了论证这一问题，下面按不同的分析判断类型举实例说明。

4.3.2 通过汽水平衡关系进行判断

上海浦东某热力公司增设一台锅炉，项目中共有 9 套涡街流量计，施工图中均为日本某品牌，但总包单位为了节省投资，擅自修改为某全国产涡街流量计。

锅炉投运初期，负荷较小，锅炉的产汽流量与进水流量基本相符。运行一年后锅炉负荷逐渐增大，运行人员发现产汽流量比进水流量低得越来越严重，直至 24 小时总量偏低 16%（扣除排污后）。怀疑锅炉负荷增大后，蒸汽流速超上限流速导致示值偏低。业主单位遂令总包单位将产汽流量用涡街流量传感器拆下送第三方检定。

先是放在水流量标准装置上检定，得到的流量系数与铭牌上标出的数值相符。这一点也不奇怪，因为用水检定时流速较低，最多也只有 6m/s 左右，而实际使用时，流速却高达每秒几十米。于是，再将该台仪表放在空气流量标准装置上检定，检定结果令人吃惊，在 60m/s 流速时，误差竟达到 -24%。从而使问题有了正确的答案。最后总包单位只得重新采购，将用于蒸汽测量的三台涡街表换成施工图上指定的品牌，使问题得到解决。但总包单位蒙受重大损失。

4.3.3 一根管道四台流量计说明了什么

4.3.3.1 问题描述

江苏江阴某热电公司与两个用户之间为流量计量问题发生纠纷。

该公司分别经 DN100 管道和 DN250 管道向这两个用户供过热蒸汽。供方在两根管的上游各装有一套孔板流量计，作为收费计量手段，用户在下游安装了一台江苏某厂生产的涡街流量计，作为监督计量手段。前后两

套仪表均经当地计量机构检定合格。仪表运行二年以来，总是上游仪表计得多，下游仪表计得少，下游仪表计量总量只有上游仪表的 70%左右。上下游表之间距离只有几十米。

由于需方只肯按下游表计计量结果付费。从而发生纠纷。

供方提出，需方说他下游的涡街流量计准确，我上游的孔板流量计不准，要搞清楚究竟哪个准确。

其次，在同一根管道上另外装一套孔板流量计和一套涡街流量计，如图 2 所示，要证明究竟是孔板流量计好还是涡街流量计好。此项工作所发生的费用实事求是计收。

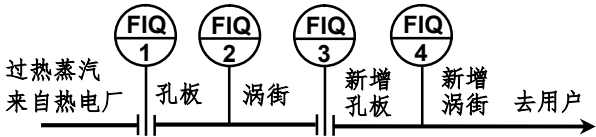


图 2 一根管道四套流量计的例子

4.3.3.2 分析

1) 量差原因估计

作者根据以前所接触的此类涡街流量计的经验，初步估计上下游表计量差是由所安装的涡街流量计品质欠佳引发的。但在有充分的证据之前，不能做结论。

2) 对新增的（一根管道上）两套表的承诺

① 新增的孔板流量计和涡街流量计各一套（两根管道共 4 套）。每一套表均应符合国家标准或行业标准。

② 每一套表均经政府授权机构计量检定合格，其中孔板流量计经实流检定合格。

③ 同一根管道上新增的两套表（一套是孔板流量计，另一套是 DY 型涡街流量计）在瞬时流量不小于满量程流量 20% 的考核条件下，24 小时计量结果相互之间的量差不大于 3%。

④ 新增的两套表与原有的两套表之间，误差多少不作承诺。

4.3.3.3 运行结果与讨论

1) 新增的两套表相互之间的计量误差

一星期的统计数据，每天的计量误差均小于示值的 2%。原有的孔板流量计计量结果与新增的两套表基本相符^[8]。

2) 关于谁是谁非问题

关于提问者急于知道的谁是谁非问题，结论是明确的。原有两套表中，孔板流量计是准确的，涡街流量计偏低。

3) 关于孔板流量计和涡街流量计哪一种更好的问题

这个案例表明，蒸汽质量流量用孔板流量计测量和用涡街流量计测量，都能得到较准确的结果，都能满足国家标准 GB 17167-2006 的要求^[9]。

4) 原有的两套流量计检定均合格但实际使用后，涡街仍严重偏低

目前，涡街流量计的流量系数，一般是在水流量标准装置上标定得到的。标定时水的流速最高只有每秒几米，而测量蒸汽时，流速要高达每秒几十米，从涡街的工作原理可知，涡街流量计流量系数是不受流体物性（密度、粘度）和组成影响的，但这一特点并不能保证其在超上限流速条件下不偏低，因为标定得到的流量系数，只有在允许的流速范围之内才是可用的^[10]。

5) 为什么新增的涡街表改为日本品牌的 DY 型可以不偏低

各种不同品牌的涡街流量计，允许的上限流速各不相同，例如^[8]

横河公司	80m/s;
E+H 公司	77.5m/s;
罗斯蒙特公司	76m/s;
菲波公司	70m/s;

纯国产的涡街流量计，都未给出上限流速数据，一般高于 45 m/s 就显著偏低。但也有例外。

新装的 DY 型涡街虽然其公称通径与原有的一台涡街表相同，但上限流速是老表的 2 倍，所以老的涡街表超上限流速，新的不超。

6) 这一案例说明了什么

说明了两点：

① 涡街流量计和标准孔板流量计，只要使用得当，都能获得准确的结果；

② 不同品牌的涡街表，允许的上限流速差异较大，但超过上限流速都表现为严重偏低。

4.3.4 分表示值之和与总表示值比对发现问题

4.3.4.1 现象描述

上海某体育中心引进两台 10t/h 燃油自动锅炉，为游泳池及其他设施供热，由于锅炉产生饱和蒸汽，故流量计只进行压力补偿。表计配置及设计参数如图 3 所示。由于工艺专业提自控条件时确认锅炉常用操作压力为 1.0MPa (表压，下同)，所以锅炉出口流量选用 DN100 已足够。

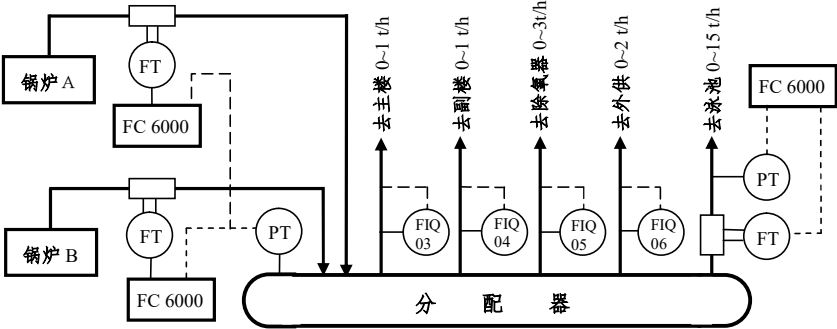


图 3 锅炉房蒸汽计量系统图

交工验收时，需方提出蒸汽流量计有时准确有时不准确，要求做平衡测试并查找原因。测试方法是分表示值之和（总耗汽量）与总表示值（发汽量）平衡，发汽量与锅炉进水量平衡。

现场测试工作开始后，作者发现该单位锅炉采用间歇运行操作法，即锅炉喷油置“手动”位置，而且开到最大，测试时锅炉单台运行，耗汽总量小于 10 t/h，所以锅炉自动点火后蒸汽压力几乎是等速上升。当压力升高到所设置的上限压力 1.1MPa 后，自动熄火停炉。于是压力近似等速下降，当压力降到 0.25MPa 后，锅炉自动点火开炉，如此周而复始地循环。

在平衡测试中，压力等于 0.4MPa 时，分表之和与总表读数（累积值）最多只差 1%，但是压力低于 0.4 MPa 后，分表之和与总表读数之差逐渐增大，压力为 0.25MPa 时，总表读数低 5%。这时根据当时的运行数据计算，总表（YF110*E 型）测量管内的流速已超过 100m/s，又分别计算了各台分表低压运行时的流速，均未高于 75 m/s，显然，这一误差是由总表流量计超上限流速（80m/s）运行引起的^[10]。

作者向业主单位提出操作压力应不低于 0.4MPa，需方不同意，理由有两个：

其一，他们的锅炉属生活锅炉，对供汽压力要求不高，0.25MPa 压力也不影响他们的热用户使用。

其二，间歇生产有利于节能，而且点火起动压力越低，起—停周期越

长对节能越有利。

分析这一事件的起因，应属工艺设计者提自控条件时未想到如此低的操作压力，而运行人员却偏偏在如此低的压力条件下运行。

这一事件虽然完全不属仪表选型的责任，但给选型者一个启示，即除了请提条件人员写明最大流量、常用压力、最低压力之外，还需对流量为最大，压力为最低时，流过涡街流量计的流速进行校核，不得高于上限值。

4.3.4.2 分析

① 本实例中，锅炉操作压力降低后，产汽流量计大幅度偏低，是因操作压力偏离设计值太多，涡街流量计在超上限流速条件下运行。

② 其实，这样的运行方式对锅炉的寿命也不利。因为操作压力低时，汽包和炉管内介质温度也低（0.25MPa 对应 139℃）；操作压力高时，汽包和炉管内介质温度也高（1.1MPa 对应 188℃）^[8]，冷热交替变化，长此以往，材料容易产生蠕变，引发连接处泄漏等问题。

③ 本案例中所用的涡街流量计均为日本品牌，虽然品质较好，但超上限流速后，示值同样表现为偏低。

4.3.5 通过压损计算流速

江苏扬州某热电公司，所属区域有一家热水店买该热网的蒸汽生产开水，然后用槽车运送到洗浴中心等热用户。

该蒸汽计量点及相关管道如图 4 所示。其中涡街流量计采用 DY080 型，并在 FC6000 流量演算器中完成温度压力补偿。

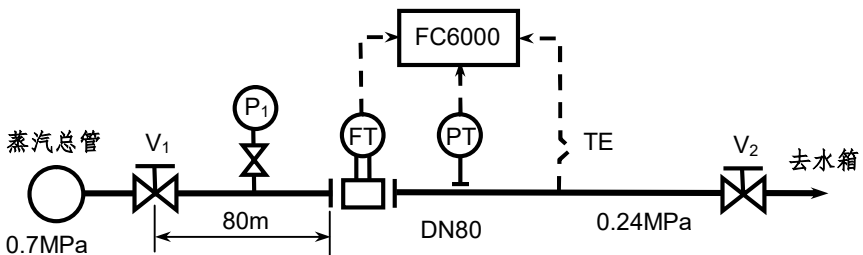


图 4 热水店用户计量系统图

开水店的老板不是等闲之辈，他摸索了每生产 1 吨开水所耗蒸汽量同加热时蒸汽瞬时流量的关系。发现将阀门 V_2 开足，单耗最低，这时 1 吨汽可烧 30 吨开水。为此，老板赚得了丰厚的利润。

热电公司的管理人员去现场巡查时发现，蒸汽总管内压力为 0.7MPa，而流量计出口处压力在 0.22~0.26 MPa 之间变化，温度为 260℃，此时的蒸汽流量显示值为 1.5t/h，而且涡街流量计处有啸叫声，显然流过涡街流量计的蒸汽流速非常高，又听说开水店的蒸汽单耗如此先进，初步判断这套流量计严重偏低。

热电公司处理这件事先从流量计出口端压力偏低入手，于是在流量计上游的 DN80 管道旁又增设了一路 DN65 的管道，两根管道并联使用，以降低管道上的压力损失。但运行效果不显著，只是流量计前面和后面的压力略有升高，计量值偏低的情况并无改观。

热电公司为此事向作者咨询。

作者先从流量计前后压力计算流过涡街流量计的平均流速。因为流体流过涡街流量计时，流量计前后压差同流速之间有下列的关系^[11]：

$$\Delta p = 1.1 \times 10^{-6} \rho V^2 \quad (1)$$

式中： Δp —— 压力损失，MPa； ρ —— 流体密度， kg/m^3 ； V —— 流速， m/s 。

流量计出口处压力以 0.24 MPa 计，在温度为 260℃时，蒸汽密度为 $\rho=1.4 \text{ kg/m}^3$ ，蒸汽总管压力为 0.7MPa，扣除沿途压力损失，到流量计上游约为 $P_1=0.5\text{MPa}$ ，然后计算压损

$$\Delta p = 0.5 - 0.24 = 0.26 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{代入式 (2) 得} \quad V &= \left(\frac{\Delta p}{1.1 \times 10^{-6} \cdot \rho} \right)^{1/2} \\ &\approx 410 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2)$$

显然已经超过上限流速 4 倍，示值偏低是必然结果。后来热电公司经局部扩管；换上大口径涡街表解决问题。

4.3.6 借助趋势图进行分析判断

江苏常州某热电厂供热网所属的两台大口径涡街流量计，超上限流速引起的严重偏低，是从管损趋势图发现的。

该供热网通过四路总管对用户供汽。每一路总管和全厂总管损在 SCADA 系统上均用趋势图显示。其管理人员告知，从 2013 年 4 月 2 日起，发生管损陡增的现象，如图 5 所示。

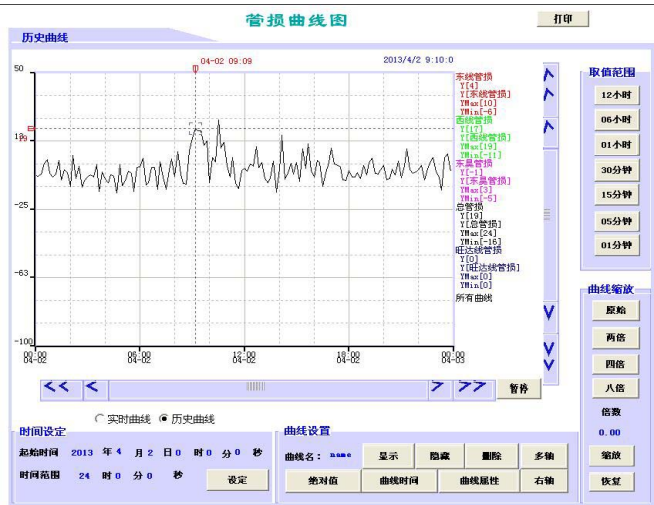


图5 供热网管损陡增

经因果分析，发现在4路总管中有3路，管损随时间变化的关系稳定不变，但第2路管损趋势图与图6所示的趋势图具有大致相同的波形，显然，这一天开始的管损陡增不是别的原因引发的，只是由于第2路总分管损陡增引起的。

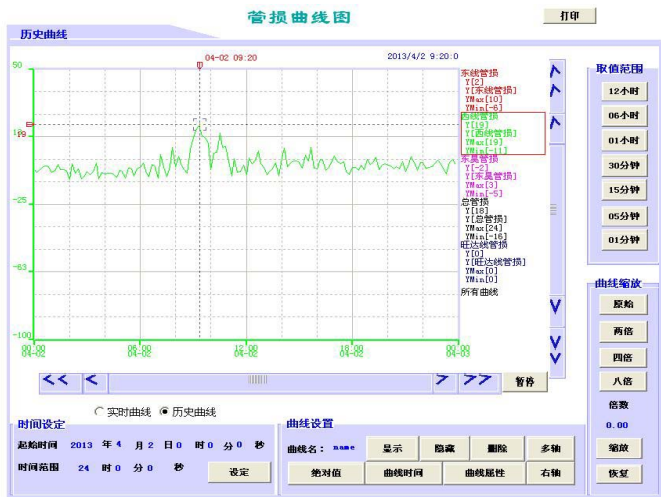
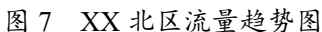


图6 第二路总分管损趋势图

查看该路总管上 8 个分表的流量趋势图,发现有一个用汽单位的两台流量计,因新增的一段流程启用,每天上午九时起用汽量大增,与该路总管管损图在时间上和波形上密切相关,于是就怀疑该路总管管损陡增是由于这两个计量点计量不准引发的。这两个计量点的流量趋势图如图 7 和图 8 所示。



经进一步调查研究发现,这两个计量点采用的测量方法是涡街流量计+压力变送器+温度传感器+流量演算器的方法,而具体选用的涡街流量计是国内某个品牌的产品。公称口径分别是 DN300 和 DN250,经调查,这个品牌的涡街流量计在测量气体和蒸汽时,保证测量精确度的上限流速是 40m/s,在进一步的分析计算中,9:00 后的第二路总管流量,减去 6 个小用户的流量,估算两台热风干燥用汽流量,然后计算流速,分别达到 68.3m/s

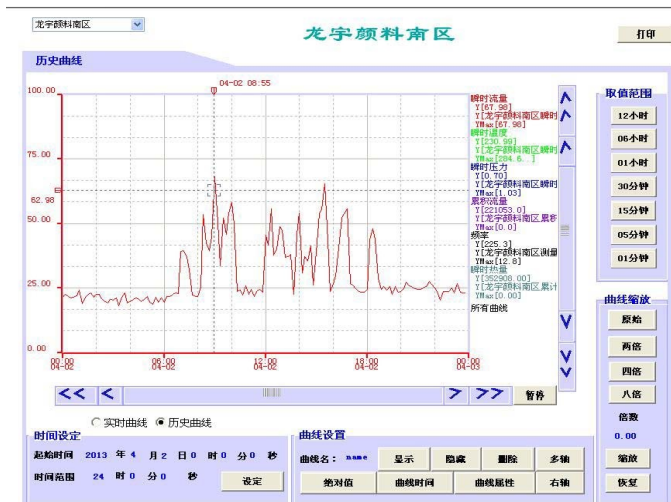


图 8 XX 南区流量趋势图

和 $56.3\text{m/s}^{[12]}$ ，从而判断其超上限流速使用。后来换上了两台通径与原先涡街相同，但上限流速允许 80m/s 的优质涡街流量计，解决了问题。

4.3.7 旋涡发生体多次被折断

四川某化工厂买了 20 台北京知名品牌涡街流量计测量蒸汽流量，除了一台 DN40 仪表之外，都开得很好。这台 DN40 涡街流量计投运后不久发生体就被冲掉。后来供应商无偿换了一台相同规格的仪表，没几天又被冲掉。

发生体被打断或被冲掉的事件大多数品牌的涡街流量计都发生过。其中个别属品质问题，没有焊牢。但大多数是使用问题。

流体以很高的流速通过旋涡发生体时，在发生体背面产生强烈的旋涡，引发振动，对发生体造成强大的推力。该推力与流速的平方成正比，与流体的密度成正比。

当仪表用来测量蒸汽流量时，如果流量计进出口之间压差较大，流速很高，有的超过 200m/s ，甚至接近声速。对于间歇使用的对象，更是危险。如果白天用汽，夜间停用，那末第二天上班开阀时，管道是冷的，阀后的压力接近大气压，流速很容易升得太高。此时上游管道内的水被蒸汽夹带，以很高的线速度冲撞在发生体上，就像子弹一样。导致发生体损坏。因此，

冷管启动时应注意几点：

- ① 蒸汽进入流量计前应充分疏水；
- ② 热管过程应缓慢，切忌产生超流速；
- ③ 启动完毕应根据仪表前后压差计算最高流速，不要超过制造厂承诺的上限流速。因为超流速后，即使发生体没损坏，流量计也不准。

4.3.8 结束语

1) 对涡街流量计超上限流速使用的危害性，要有正确的认识，因为没有哪个涡街流量计制造厂会告诉你实际危害性是什么。

2) 制造厂给出的如图 1 所示的 S_r 随 Re_D 变化的关系并没有错。但对仪表用户起的是误导作用，因为从图中可看出，即使流速再怎么高，雷诺数再怎么大，涡街流量计输出也不应偏低。

3) 实际使用中，涡街流量计超流速是在不知不觉之间发生的，因为当前是否已经超上限流速，涡街流量计自身既无预兆也无状态报警，即无法从其输出信号直观作出判断。只能从其他相关联的信息作出分析研判。例如文中实例所讨论的：

① 与串联安装的不同原理的另一台流量计的测量结果比较，发现大幅偏低。

② 涡街表为总表时，其测量结果比相关联的各分表示值之和低很多。

③ 对生产过程或工艺设备中当前的过程变量进行基于质量守恒定律或能量守恒定律的分析计算，看涡街表是否严重偏低。

④ 通过涡街表进出口压差计算流速。

⑤ 基于 SCADA 系统给出的管损数据和趋势图波形进行关联分析，作出判断。

4) 不同品牌的涡街流量计，其允许的上限流速差异很大，有的竟差 1 倍之多，不能一概而论。设计选型前应做深入细致的调查研究。上限流速高的品牌，价格可能贵一点，但可以通过缩小仪表通径的方法节省投资。

参考文献：

- [1] 杨卫东，纪波峰，纪纲. 蒸汽关口计量表的设计选型. 石油化工自动化, 2021, 57(6): 70~74.
- [2] 宋文伟，纪纲. 流动脉动对流量测量仪表影响的几个实例. 石油化工自动化, 2002,

38(6): 75~78, 84.

- [3] 谭增显, 纪纲. 减压阀振荡对涡街流量计的影响. 自动化仪表, 2009, 30(9):74~75.
- [4] 余小寅, 夏维琳. 蒸汽严重带水对涡街流量计的影响. 医药工程设计, 2008(4): 51~54.
- [5] 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳编著. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [6] 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, 2001:59.
- [7] 王池, 王自和, 张宝珠, 孙淮清. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [8] 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [9] GB 17167-2006 用能单位能源计量器具配备和管理通则.
- [10] 钱汉成, 李强, 纪纲, 韦国胜, 程新生. 蒸汽流量测量系统故障三例. 自动化仪表, 2001, 22(5): 51~52, 54.
- [11] 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M] 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 55.
- [12] 何志俊, 殷胜军, 纪波峰, 纪纲. 管损统计在供热网 SCADA 系统中的应用. 自动化仪表, 2017, 38(6): 93~95.