

流量测量技术及仪表 学术交流会

論 文 集

(一)

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会
中国计量检测学会 流量专业委员会

一九八七年六月

前 言

本次学术交流会由中国计量测试学会流量专业委员会和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会流量测量技术及仪表专业委员会联合召开。论文集由过程检测控制仪表学会编印。论文集分五个专题：流量试验装置及标定方法12篇；流量测量节流装置及转子流量计16篇；水表、电磁、漩涡、涡轮流量计及其应用11篇；双相流量测量及微机在流量测量中的应用18篇及其他流量测量方法7篇共64篇论文。

论文均是近几年各单位的研究项目，在各领域里都具有一定的代表性，可供各单位选用，有些文章尚未在生产实际中应用，请读者仔细审阅，提出意见，予以改进。关于统一编印论文集可节约作者单位的时间和费用，保证印刷质量和统一完整，容易保存查阅。并通过论文集使不能到会者也能得到完整的信息使交流的面更广等优点。在内容编排、印刷质量等方面请提宝贵意见，以利改进。

我们希望通过这次联合的学术会议和这本论文集能起到互通信息、交流经验的作用。使学会活动发挥更好的效益。

最后，希望我们从事流量测量、仪表制造、计量标定、系统应用工作的同志们，能加强联系，团结一致，共同奋斗，不断创新，为发展我国计量和仪表事业作出新的贡献。

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会
中国计量测试学会 流量专业委员会

一九八七年六月

目 录

(一) 流量试验装置及标定方法

- 1、 船用流量计检定装置的研究 谢纪绩 蒋鑫森 付天德 刘 瑛 李学俊 (1)
- 2、 用压缩空气标定 LFX 型蒸汽流量计的代换原理与误差分析 李诗久 肖井贵 马连轩 (7)
- 3、 一种大流量临界文丘利管测试方法——外流场法 . . 顾炎武 沈 莹 (21)
- 4、 流量装置的换向器和系统稳定性问题的研究 . . . 苏彦勋 范 砧 (28)
- 5、 恒液位水箱侧槽水面线的数值计算和实验研究 . . 吴国玠 戴 薇 (41)
- 6、 非稳压水源大管径水流量标准装置的现状 蔡武昌 孙淮清 (51)
- 7、 试论流量测量的动态追溯性 吴国玠 (63)
- 8、 水流量标准装置的容器稳压源 张作铨 (74)
- 9、 差压式流量仪表的精密差压测量装置 严 明 李传经 (81)
- 10、 标定节流装置时对差压测量方法, 试验的分析 . . 杨根生 严 明 (86)
- 11、 SLC-II 型水工试验流量自控系统 蒋 冰 (93)
- 12、 水流量标准装置国际比对试验 李传经 严 明 (107)

(二) 流量测量节流装置及转子流量计

- 13、 弯管流量计的实验研究及其在工业上的应用的可能性 张鸿珍 张驾翔 余晓东 苏彦勋 (117)
- 14、 工质参数变化引起的流量示值误差及其校正 凌荫泽 (126)
- 15、 天然气孔板计量与节流装置标准化 黄明昌 (134)
- 16、 孔板流量计几何尺寸检测方法的研究 张满河 (141)
- 17、 气体流量的计量和远传问题 何明轩 (148)
- 18、 标准孔板节流装置的设计计算和流量计算 游明定 (156)
- 19、 多路蒸汽、给水流量、热量计的研制 凌荫泽 方宏曾 (163)

20、饱和蒸汽能量计量方法的探讨·····	程 贺 纪兴权 李春甫	(171)
21、介质粘性对小口径转子流量计示值的影响及其修正方法的探讨·····	郑荣根 吴安意 张庆海	(177)
22、节流法测量流量的误差估算·····	韩廷瑶	(187)
23、大管径采样计量的流量系数变化规律探讨·····	石金武	(195)
24、入口斜面式孔板流量系数与其参数的计算程序·····	李亚魁	(206)
25、低压损孔板流量计·····	陆祖祥	(211)
26、音速文丘利喷嘴在天然气输气工程中的应用·····	方宗良	(218)
27、测量高粘度及悬浮液的楔形流量计·····	彭淑琴	(224)
28、金属管转子流量计线性化和数字化的研究·····	林振锋	(230)

(三) 水表、电磁、旋涡、涡轮流量计及其应用

29、用内插涡轮测量管流流量的初步分析和实验·····	张小章 龚家彪	(240)
30、用涡轮流量计作为标准流量计标定涡轮流量计的实验·····	杨明昱	(246)
31、涡轮流量计系数修正方法的初步研究·····	封元华	(257)
32、涡轮流量变送器检定使用中若干问题——兼评《涡轮流量变送器》规程·····	郁 成	(266)
33、悬浮式涡轮流量变送器的设计·····	邱 森	(271)
34、旋翼式水表的流量方程式和特性曲线方程式·····	吴国玠	(280)
35、涡轮流量计叶轮内部流场及特性曲线的计算·····	郑荣根 胡培新 赵学端 黄 涛	(292)
36、用于明渠流量测量的潜水电磁流量计·····	郭耀东 吴安意 潘祥明 王继忠	(307)
37、矩形波励磁的电磁流量计·····	潘祥明	(319)
38、漩涡流量计在液氮计量中的应用·····	王长生	(324)
39、无轴承涡轮流量计·····	阮文娟	(329)

(四) 双相流量测量及微处理机在流量测量中的应用

40、LXZ-1型智能式双相流量计的研制·····	纪树康 陆卫平 崔知进 付志中 王 靖	(337)
41、用PC-1500袖珍计算机计算标准孔板、标准喷嘴孔径的程序·····	罗 海	(353)
42、湿饱和水蒸汽的干度在线测量浅析·····	韩廷瑶	(361)

船用流量计检定装置的研究

北京市能源计量测试中心 谢纪绩

交通部标准计量所 蒋鑫森 付天衡 刘瑛 李学俊

(一) 前言

船是我国海上重要交通工具,我国的海域辽阔,海岸线很长,发展海运和航运一直受到十分重视。随着国民经济的进一步发展,海上交通运输发展很快,船只数量与日俱增,燃油消耗在交通部门的能耗中占有很大比例。各港、船、车、油库等广泛开展了油品计量。这些计量工作,有的作为能源计量,也有不少作为内外贸易计量,对计量精度要求较高。但如何根据不同的计量目的,不同工况条件,合理选择计量设备,按规程进行周期检定,已成为交通运输部门急待解决的重要技术问题,是加强交通运输部门计量管理和计量定级升级工作的重要环节。

以往的油品计量多采用大罐检尺和舵容检尺。由于人为随机性误差大,容易造成计量事故和计量纠纷。近几年来不少船都陆续安装了流量计,但使用情况很不理想,主要原因:一是流量计选型不合理,不适应船舶在摇晃振动等复杂工况条件下工作。二是缺少在工况条件下使用的流量计进行在线检定的标准计量器具,难以进行周期检定,不能合法使用,造成很多人力、物力的浪费。开展船用流量计检定工作的研究,是交通运输部门的一项专业性计量工作,由于投资大,技术性强,试验条件复杂,在国内还仅仅是开始。为了满足运输生产的急需,这项研究工作已列为交通部重点研究课题之一,将对船用流量计的造型,使用,周期检定提供科学依据。

(二) 装置的设计思想和结构

1 设计思想

考虑到船用流量计在线标定的需要,装置应安装在船上并且随船的颠簸中开展检定工作,因此对装置提出如下几项要求:

(1) 精度要求:考虑到用于能源计量的船用流量计精度应优于 0.5% ,用于内外贸易的流量计精度应优于 0.2% ,而用于检定这些流量计的标准器精度应更高些,一般高3至5倍,最好高一个数量级,因此,要求装置的精度优于 0.05% 就完全可以满足要求。

(2) 体积小,重量轻:由于船舶机舱内空间小,进出舱口困难,应将检定装置设计为轻便式或可移动式。

(3) 装置必须具有防震防摇摆的功能,不仅能在陆地做静态检定,也适于在船舶航行中做动态检定。

(4) 流量范围大：船舶航行过程中，顺水逆水总车，快车油耗差别很大。要求被检流量计和检定装置从小流量到大流量至少要有1:1.0的变化范围，仍满足精度要求。

(5) 船舶燃油管路压差小，要求检定装置具备一定的调压功能，才能对流量计进行不同流量的检定。

(6) 电器仪表和微机系统要有较强的抗干扰能力，保证装置能在恶劣工况条件下可靠工作。

(7) 检定装置应有一定的先进性，通过程序控制自动检定计算、显示、打印检定结果。

根据上述要求结合标准体积管的工作原理，设计了由同轴双活塞式液压缸——标定缸组合机构，高精度磁开关检测系统，微机系统，液压，动力系统及辅助部分组成的总体设计方案。及液压驱动缸可伸缩的结构，在整机不工作时，缩回标定缸内，使装置的结构更紧凑。

2 装置的结构

整个装置由以下几个部件组成(见图1)

1、计量系统； 2、液压系统； 3、操作控制系统。

(1) 液压系统

液压系统由液压油箱、液压泵、液压换向阀和调节阀及其管路系统和液压缸所组成，调节液压调节阀可以改变液压缸内活塞的运动速度达到改变流量大小的目的，操作液压换向阀使液压缸内活塞上升和下降。

(2) 计量系统

计量系统包括计量缸、连接计量缸活塞和液压缸活塞的联轴。计量缸活塞：固定在联轴上的装有磁头的测杆及固定在计量缸体上的磁开关所组成。为提高装置的计量准确度采用分辨率在1—3 μ 以内的磁开关。

(3) 微机控制系统

微机控制系统的作用是自动控制液压系统的操作，换向阀的换向，磁开关信号的检测，温度、压力参数的采集，并对装置的标定结果和对流量计的检定结果及温度、压力等修正的计算、打印输出全部测量结果。

装置的工作原理如下：按图1连接各部件，并使之处于正常工作状态。关闭截止阀和放气嘴，启动液压系统使液压缸活塞向后撤带动计量缸活塞后撤，这时系统处于封闭状态。随着液压缸活塞后撤，贮油缸中的油经逆止阀进入计量缸内，当液压缸活塞到达最终位置时，关闭液压阀，这时为了防止空气吸入应打开放气嘴并使液压缸活塞前推，这时随之活塞也推出，由于逆止阀的作用，使计量缸内的油不能返回贮油缸，只能迫使计量缸内的气体从放气嘴里排出，直至有油液排出时，再关闭放气嘴，并关闭液压阀，这时整个装置处于检定前的状态。当检定流量计时，将截止阀打开，打开液压阀使液压缸活塞推出，这时计量缸活塞也随之推出。由于逆止阀的作用，油液只能经流量计流出，调节液压缸推出速度并使之均匀，使流量计工作恒定。这时，随着活塞推出，测距杆也徐徐前进，当磁头I到达磁开关时发出开关信号，使流量计的计数脉冲显示在微机控制系统的显示盘上，当磁头II到达磁开关时，磁开关发出信号，停止记入流量计脉冲。这

样可根据计量缸两磁头之间的已知体积 V 和微机记入的脉冲数 N ，可根据下式求得流量计的仪表常数。 $\varepsilon = \frac{V}{N} (m^3/P)$ 达到检定流量计的目的。

(三) 装置的性能测试及容积示值检定

为确保装置在计量测试过程中给出示值的准确性，对装置作了如下性能测试

1、 活塞与缸体的密封性能。当活塞在计量缸体内运行时活塞与缸体之间是通过 \bigcirc 形密封圈密封的，为使活塞前的液体不泄漏到活塞后面要求活塞在缸体内任意位置上都有良好的密封性能。为此，我们分段作了密封试验。由于在设计时为减小活塞与缸体之间的磨阻，对缸体内壁作了研磨处理，内表面的加工精度为 $\Delta 7$ 。在分段密封性试验时采用在活塞起始位置和终止位置以及其它三个位置作了试验，加压至 600KPa 观察 10 分钟，上述各点均无泄漏现象。

2、 计量缸流量调节试验。调节液压系统的旁通线，可以改变活塞运行速度，从而达到调节计量缸流量的目的。经反复操作调试，压力调节阀具有良好的调节性能，装置的最大流量 $Q_{\max} = 2.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

3、 测杆在联轴平面内的平移性。这是保证示值计量准确度的重要环节，根据该装置的设计原理，活塞的移动是靠液压缸内活塞带动的。为保证液压缸体和计量缸体的同心度，液压缸活塞与计量缸活塞之间一端用固定连接，一端用球铰连接。液压缸的压力是通过联杆与计量缸活塞的球铰连接传递的。但由于是点接触传递，不可避免地导致活塞的旋转，而且旋转力很大，用一般的导向杆难以胜任。

根据单球铰连接很难避免活塞旋转的特点，为保证装置的准确计量，必须保证测杆在与联轴一起构成的平面内的平移性。对测杆的联接部位和联接方法作了相应改动以后，保证了测杆的平移性。使测杆上磁头的移动距离能体现活塞端面的移动距离，在计量过程中，由于计量缸活塞的前进和后退所引起的活塞旋转量是不一致的，对旋转对称的活塞端面由此引起的变动量是可以忽略的，而且由测杆不平移性和活塞旋转造成的误差都反映在示值检定的复现性中。

4、 行车颠簸试验和船在航行中实标试验

在实验室内完成装置容积示值试验的基础上，我们把整套设备用汽车运到塘沽，安装在 1000 吨油舱的后甲板上进行了实际航行标定和检流量计试验，试验是在 6—7 级海浪下，在塘沽—秦皇岛及秦皇岛返回塘沽的航程中进行的。由于船小，颠簸厉害，测试人员晕船致使测试数据不是很全，其测试结果列于表，与实验室间容积示值相比只差 0.02%。

5、 计量缸容积示值标定

计量缸容积示值检定系统如图 2 所示。

为提高计量缸容积示值不确定度，标定时采用物理性能稳定，热膨胀系数小的介质——水。容积示值标定可以用容积法，也可以用称量法。这里我们是用容积法标定的。标定程序如下：

启动液压泵给装置提供动力，关闭标定阀和放气阀，打开截止阀，按下起动按钮，

通过三位四通阀使计量缸活塞回收，这时随着活塞回收水箱内的水被吸入计量缸内，当活塞停在终端位置时，关闭截止阀，打开放气阀，推动活塞进行排气，当气体排尽后，关闭放气阀，打开截止阀和标定阀。启动三位四通阀使活塞推出。这时，计量缸内的水经截止阀、标定阀、换向器流回水箱。当测杆上的磁头 I 到达磁开关时，磁开关发出信号，使换向器动作，将水流导向量器侧，开始计量，这时微机系统自动检测计量缸的温度，压力和测杆的温度。以备容积示值的温度、压力修正用。当测杆上的磁头 II 到达磁开关时，磁开关发出信号使换向器动作。将水流导向水箱侧，计量工作完成。读得流入量器内的水量 V_t 值。

按上述方法反复操作控制系统和量器就可以得到一组 V_{t_i} 值。用下式将测值换算到标准条件下 $V_{20.1}$ 值。

$$V_{20.1} = V_t \left(1 + \beta_s (t_s - 20) - 2 \alpha_m (t_m - 20) - \alpha_m (t_a - 20) + \beta_w (t_m - t_s) - P \left(\frac{D}{Et} + F_1 \right) \right)$$

式中 β_s — 标准量器材质的体胀系数 $1/^\circ\text{C}$;

α_m — 计量缸体和测杆材质的线胀系数 $1/^\circ\text{C}$ 。

t_s, t_m, t_a — 分别为量器、计量缸体和测杆的温度。 $^\circ\text{C}$ 。

P — 计量缸内水压。 P_a

D, t — 分别为计量缸体的内径和壁厚 (mm)。

E — 计量缸材质的纵弹性模量， P_a 。

F_1 — 液体的压流系数 $1/P_a$ 。

取多项测量的平均值作为本装置的标准容积值。

$$\bar{V}_{20.1} = \sum_{i=1}^n V_{20.1.i} / n$$

用贝塞尔公式算出单项测定值的标准误差 δ_n ，有

$$\delta_n = \pm \sqrt{\frac{\sum (V_i - \bar{V}_1)^2}{n-1}}$$

用信度为 0.05 的 t 分布系数算出极限相对误差 δ_V 作为本装置的复现性误差。

$$\delta_V = \frac{t_\alpha(K) \cdot \delta_n}{\bar{V}_{20}} \times 100\%$$

(四) 结果讨论

1、本装置的结构和工作原理是符合油用油流量计现场检定需要的，这种装置为

节省占地面积，还采取了液压缸体在不计量的时候，可以缩入计量缸内的形式。同时这种装置也可以作为实验室内小油流量的标准。有一定的独到之处。

2、本装置作为检船用流量计的标准设备，作了船上工况条件下的标定试验。试验结果见表1，从表1可见船上标定结果和实验室标定结果示值和复现性相差无几。在航行中复现性明显变差。这一点主要是由容积法标定系统不适合动态下使用所致。但尽管如此，本装置的总的示值不确定度还是达到了设计要求。

标定结果汇总比较表

表1

标定条件	标准容积值 (1)	测定次数	标准误差 δ_n	$t_{0.05}$ (K)	$\delta_V(\%)$
实验室	51.109	10	± 0.0046	2.26	0.020
船上(停)	51.101	10	± 0.0050	2.26	0.022
航行中	51.099	7	± 0.0067	2.45	0.032

另外，从表1还可以看到，由于本装置采用了分辨率极高的磁开关(1~3 μm)，而且磁头和磁开关之间采取精密设计、装配，使航行中的颠簸和船舱甲板上机器振动所造成的影响可以忽略。从而保证了本装置在船上的适用性。

3、本装置在船上检流量计和航行中检流量计的对比试验表明，流量计的仪表系数在 $\pm 0.2\%$ 的范围内是一致的。停航时检流量计结果从-1.39~-0.99，最大差0.4%。而航行中检流量计是从-1.25~-0.85，最大差0.4%。(该流量计用水检定结果与油标定结果有一个系统差。另外，试验时装置的设定容积与实际容积差0.15%)。

(五) 结束语

本装置的设计研究和一系列性能测试获得了比较满意的结果。为今后船用流量计检定装置的进一步开发打下了基础，积累了经验。本装置采用主动式结构，为无压源的场所开展流量计检定提供了方便，但同时也有不足之处，即流量范围受到很大的限制。这一点将在今后的装置开发中给予解决。

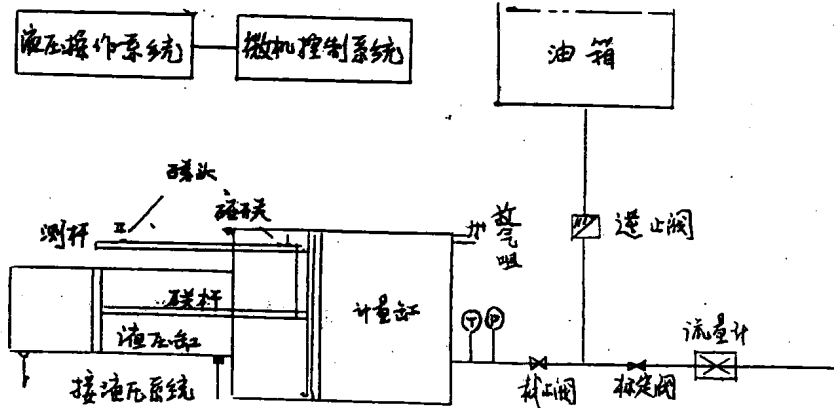


图1 船用油流量计检定装置结构原理图

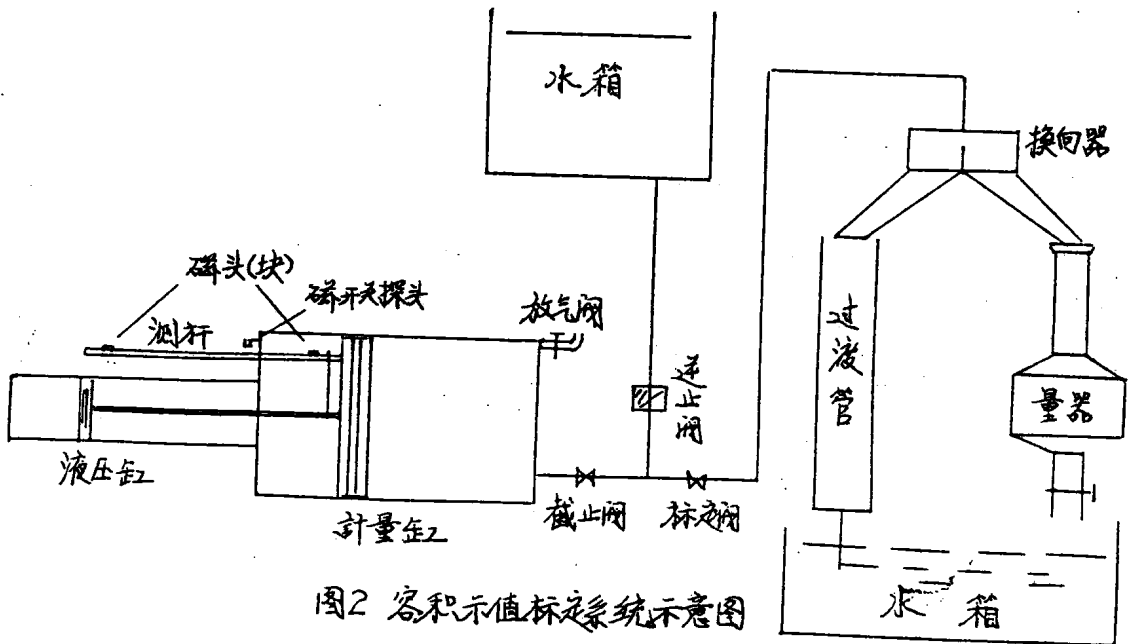


图2 容积示值标定系统示意图

用压缩空气标定LFX型蒸汽流量计 的代换原理与误差分析

东北工学院 李诗久
辽阳自动化仪表厂 肖井贵
辽宁省计量局 马连轩

提要 用压缩空气代替蒸汽来标定蒸汽流量计，只有空气压缩机提供气源，便可代替生产蒸汽的动力系统，使投资费和标定成本显著降低，在节能上有重大意义。因此，用代换介质标定，在国际上受到普遍重视，将成为今后发展方向。

用代换介质进行标定，在理论上就涉及到“代用介质的代换与修正原理”。目前英、日等国已采用压缩空气标定，但有关代换原理和误差分析等，均未公开尚处于专利阶段。

本文对分流、旋翼的流体力学原理以及代换介质的修正原理，进行了分析阐述；对标定测试误差作了分析探讨；并就实际标定测试数据，进行了误差计算，结果表明精度为2.5级。

(一) 前 言

近年来在节能和成本核算的推动下，对小口径蒸汽流量仪表，提出了用量大精度高的要求。蒸汽流量计，对于用汽部门进行汽量分配，测定用汽效率，使锅炉在最佳状态下运行，实现各环节或领域节省蒸汽和有效地利用能源中，是必不可少的仪表。

用压缩空气代替蒸汽来标定蒸汽流量计，是在常温下标定，可使测试仪表精度提高，且操作调校方便。更为重要的是节省了生产蒸汽的动力系统，投资和成本显著降低，一般可节省数十万元。

用压缩空气代替蒸汽进行标定，在理论上就涉及到“代用介质的代换与修正原理”。据文献介绍英国和日本已采用压缩空气标定，有关代换与修正原理以及标定测试装置等技术数据，均未公开仍处于专利状态。这就迫切需要对分流、旋翼的工作原理，代换与修正原理以及标定测试误差等，进行有关流体力学和仪表等方面的分析研究。

(二) 标定系统

1、标定装置

本文的分析研究,是以我国辽阳自动化仪表厂首创的标定测试装置系统为基础进行的。其标定装置系统,如下图 1 所示。

此装置系统是由压缩空气源、稳压罐、可供安装不同口径的 L F X 型蒸汽流量计的测试段以及收集气量的标准容器等四部分所组成。

2、分流旋翼型工作原理

L F X 型即分流旋翼型蒸汽流量计,如图 1 中所示:进入流量计的总流量 G ,分为经过主管孔板的流量 G_1 和经过两个喷嘴喷射气体冲击旋翼叶片(使旋翼轴转动)后,沿分管的流量 G_2 两部分,然后二者汇合流出流量计。

分流气流使旋翼(轴流式叶轮机)旋转,按轴流式叶轮机理论,可以确定转动力矩与流量(G_2)或转速(n)之间的关系式。为使旋翼轴转速降低且保持稳定,而装设水阻尼叶轮,它也是叶轮机,其水阻尼力矩与旋翼的理论是相同的。因此,根据旋翼轴输出的转速(n),便可确定分流流量(G_2)。同时再根据分流比的流体力学原理便可确定主管流量(G_1)。所以最终可以指示出总流量(G)。这就是分流旋翼型流量计的计量原理。

(三) 分流比及叶轮力矩理论

1、分流型流量计的原理

分流型流量计的工作原理,实际上就是主管与分管构成的并联管路。如下图 2 所示。A、B 为两个管线共有的起终节点,因而节点间两个管路的压力损失必相等,则有

$$\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} = \lambda_2 \frac{l_{e2}}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

按两管中流动均为阻力平方区,则 $\lambda_1 = \lambda_2$, 由上式可得速度比

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{d_1}{d_2} \frac{l_{e2}}{l_1}} \quad (2)$$

分流比(β):是指主管流量 Q_1 与分管流量 Q_2 之比。即

$$\beta = \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot 5 \sqrt{\frac{l_{e2}}{l_1}} \quad (3)$$

这是根据并联管路压力损失相等,所确定的分流比表达式。但目前在流量仪表行业中,为简化起见而取作两管中流速相等。结果,分流比只是过流断面比,即

$$\beta = \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (4)$$

对于LFX分流旋翼型蒸汽流量计的分流比,按断面比,则取为主管孔板(直径D)开孔面积与分流通管中两个喷嘴(直径d)面积之比,即

$$\beta = \frac{D^2}{2d^2} \quad (5)$$

这个分流比,在以后的理论和误差分析中,经常用到。

如果主流与分流的密度相同,则体积流量比与质量流量比是相等的,即

$$\beta = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho Q_1}{\rho Q_2} = \frac{G_1}{G_2} \quad (6)$$

当已知 β 后,则总流量可表示为

$$G = G_1 + G_2 = (1 + \beta)G_2 \quad (7)$$

这就是分流型流量计,计量总流量的理论根据。

2. 旋翼与阻尼叶轮的力矩理论

旋翼与阻尼叶轮均属于轴流式叶轮机械。轴流式叶轮如下图3a所示,可展成平面叶栅如图3b所示。

图中 t — 叶片间距; u — 圆周切线速度; w_1, w_2 — 入、出口气流相对速度; α_1, α_2 — 气流入、出口角; c_1, c_2 — 入、出口气流绝对速度; p_1, p_2 — 气流入、出口压强。

现在取包含一个叶片的虚线轮廓为控制体。设叶片对流体的作用力为 R , 间距 t 内的流量为 q 。应用动量定律,对于单位长叶片可得

$$\begin{aligned} R_x - (p_1 - p_2)t &= \rho q (c_2 \sin \alpha_2 - c_1 \sin \alpha_1) \\ R_y &= \rho q (c_2 \cos \alpha_2 - c_1 \cos \alpha_1) \end{aligned} \quad (8)$$

根据图3b入、出口速度三角形及所取坐标 y , 可知所设 R 的方向是对的, 即 R_y 为正的。根据作用与反作用原理, 气流对叶片的作用力 P 与 R 数值相等方向相反。则气流对一个叶片(长为 L)的作用力在 u 方向分力为

$$P_u = \rho q L (c_2 \cos \alpha_2 - c_1 \cos \alpha_1) \quad (9)$$

若叶轮具有2个叶片, 则总流量 $Q = z \cdot q L$, 故气流对整个叶轮在 u 方向的作用力为

$$z P_u = \rho Q (c_2 \cos \alpha_2 - c_1 \cos \alpha_1) \quad (10)$$

若此作用力的作用点半径为 r_0 (见图3a), 则得叶轮的转动转矩

$$M = z P_u r_0 = \rho Q r_0 (c_2 \cos \alpha_2 - c_1 \cos \alpha_1) \quad (11)$$

注意到:

$$\text{速度: } c_2 = c_{2x} / \sin \alpha_2, \quad c_1 = c_{1x} / \sin \alpha_1 \quad (12)$$

流量: $Q = c_{2x} z t L = c_{1x} z t L$, 则有

$$c_2 x = c_1 x = \frac{Q}{z t L} \quad (13)$$

将上二式关系代入式(11)中, 可得

$$\left. \begin{aligned} M &= A Q^2 \rho \\ \text{其中 } A &= r_0 \frac{c t g \alpha_2 - c t g \alpha_1}{z t L} \quad (\text{为叶轮几何常数}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

因为叶轮的流量 Q 与转速 n 成正比时, 即有 $Q = K n$, 故上式可写成

$$\left. \begin{aligned} M &= B n^2 \rho \\ \text{其中 } B &= A K^2 \quad (\text{为叶轮几何常数}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

上二式就是叶轮机械力矩理论关系式。

应用于旋翼叶轮, 其转动力矩为

$$M = A Q_2^2 \rho_{\text{汽}} \quad (16)$$

应用于阻尼叶轮, 其阻力矩为

$$M' = B n^2 \rho_{\text{水}} \quad (17)$$

旋翼系统其它阻力远比 M' 为小, 故取 M 与 M' 相等, 可求出

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= \sqrt{\frac{B}{A} \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{汽}}}} = C \cdot n \sqrt{\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{汽}}}} \\ G_2 &= Q_2 \rho_{\text{汽}} = C n \sqrt{\rho_{\text{汽}} \cdot \rho_{\text{水}}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\text{总量 } G = (1+\beta) G_2 = C(1+\beta) n \sqrt{\rho_{\text{汽}} \cdot \rho_{\text{水}}} \quad (19)$$

或写成

$$n = \frac{G}{C(1+\beta) \cdot \sqrt{\rho_{\text{汽}} \cdot \rho_{\text{水}}}} \quad (20)$$

上二式就是 L F X 分流旋翼型蒸汽流量计, 计量质量流量的理论公式。

从公式中可以看出, 只要采用压缩空气的密度与蒸汽的密度值相等, 再经过对其它差异的修正补偿, 就实现了用压缩空气代替蒸汽来标定蒸汽流量计。这就是通常所说的“等密度代替介质”的问题。

(三) 干饱和水蒸汽与压缩空气的等密度关系

1、水蒸汽的密度

根据《水和水蒸汽的热力学性质》专著中, 可知: 饱和温度在 $95 \sim 374.15^\circ\text{C}$ 范

围时，饱和压强 p 与饱和温度 t 的实验近似关系为

$$\left. \begin{aligned} \lg p &= 5.44 - \frac{2005 \cdot 1}{273+t} \\ p &= 10^{5.44 - \frac{2005 \cdot 1}{273+t}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

饱和水蒸汽的状态方程，可近似取为

$$\left. \begin{aligned} pv &= RT - \frac{A}{v} \\ A &= 63 \cdot 2 + \frac{10005}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2 \cdot 468}} - 0 \cdot 04T \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

水蒸汽气体常数 $R = 47 \cdot 053 \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right)$ ，由上式可求出比容

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{汽}} &= \frac{RT \pm \sqrt{(RT)^2 - 4pA}}{2p} \\ \rho_{\text{汽}} &= \frac{1}{v} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

由(21)式给出温度(或压强)，则可求出压强(或温度)。于是依(23)式便可求出蒸汽密度 ρ 。

[注]关于饱和水蒸汽的干度：

饱和水蒸汽中有蒸汽和一部分水如图4所示，其中蒸汽部分为 $\bar{v}''\rho''$ ，水部分为 $\bar{v}'\rho'$ ，总量为 $\bar{v}\rho$ ，其中在容积及质量上满足

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= \bar{v}' + \bar{v}'' \\ \bar{v} \cdot \rho &= \bar{v}' \rho' + \bar{v}'' \rho'' \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

干度的定义：汽体部分质量 ($\bar{v}''\rho''$) 与总的质量 ($\bar{v}\rho$) 之比，称为干度 (x)。下面推求干度 (x) 的表达式：

按(24)式中质量关系式，以 $\bar{v}\rho$ 除之得

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{\bar{v}'\rho'}{\bar{v}\rho} + x \\ &= \frac{(\bar{v} - \bar{v}'')\rho'}{\bar{v}\rho} + x = \frac{\rho'}{\rho} \left(1 - \frac{\bar{v}''\rho''}{\bar{v}\rho} \cdot \frac{\rho}{\rho''} \right) + x \\ 1 &= \frac{\rho'}{\rho} \left(1 - x \frac{\rho}{\rho''} \right) + x \end{aligned}$$

结果

$$x = \frac{\rho''}{\rho} \frac{p - \rho'}{\rho'' - \rho'} \quad (25)$$

当蒸汽中不含有水时，即 \bar{v}' ， ρ' 为零，而为 $\bar{v} = \bar{v}''$ ， $\rho = \rho''$ 的完全为蒸汽情况，干度 $x = 1$ 。干度等于 1 时称为干饱和蒸汽或过热蒸汽。蒸汽流量计是测定干饱和蒸汽或过热蒸汽的。

2. 压缩空气的密度

空气按理想气体状态方程，其密度为

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (26)$$

空气气体常数 $R = 29.27 \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right)$ ， p 绝压 (kg/cm^2)，一般取技术标准 $t_0 =$

20°C ，则 $T = 273 + 20 = 293^\circ\text{K}$ ，故压缩空气的密度为

$$\rho_{\text{空气}} = \frac{10^4}{29.27 \times 293} p = 1.166p$$

这就是技术标准温度下，压缩空气密度与绝压 p 之间的关系式。

当干饱和蒸汽或过热蒸汽的密度 $\rho_{\text{汽}}$ ，按 (23) 式或其热力学数据表确定之后，根据 $\rho_{\text{气}} = \rho_{\text{汽}}$ ，则可由 (27) 式算出相应的压缩空气的绝压 p 。

3. 干饱和蒸汽与压缩空气等密度参数表

如表 1 所示。

(四) 用压缩空气标定的误差分析

用压缩空气代替蒸汽来标定蒸汽流量，按图 1 所示的标定装置系统；有旋翼的表测量值和收集容器的收集量标定中测量的参数为温度和压力；又由于测读参数时因波动或读值误差；以及测试通过的是 20°C 空气与通过蒸汽时在温度上的差异等。所以标定测试的总误差可表示为

$$\delta = \frac{G_{\text{表}} - G_{\text{收}}}{G_{\text{收}}} \times 100\% + \delta_s + \delta_e \quad (28)$$

式中 δ_s —— 系统误差的修正值代数和；

δ_e —— 随机误差。

1. 收集量及其随机误差

(1) 收集量 是指标容器内在测试前 p_1, T_1 状态下，到测试终了为 p_2, T_2 状态下所收集的空气质量 $G_{\text{收}}$ 。按理想气体状态方程 $\rho = p/RT$ 及容器容积为 \bar{v} ，则

$$G_{\text{收}} = \bar{v}(\rho_2 - \rho_1) = \frac{\bar{v}}{R} \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) \quad (29)$$

此式就是收集量的计算公式。