

第 15 届流量测量国际会议 (FLOMEKO 2010) 述评

中国仪器仪表行业协会

蔡武昌

1 会议概况

第 15 届流量测量国际会议 (FLOMEKO 2010) 于 2010 年 10 月 13~15 日在台北举行了 3 天报告会, 由台湾工业技术研究院量测技术发展中心 (CMS/ITRI) 组织, 16 日上午参观了 CMS/ITRI 所属流量和能量研究实验室。会议还举办了有 9 个单位参展的小型展览会。

组织委员会主席 CMS/ITRI 段家瑞主任在全体会议上致欢迎词, 英国工程实验室 (NEL) Michael Reader Harris 博士作《流量测量和能源》的主旨报告, 然后分两个会场作学术报告。

参加会议的有各大洲代表 100 余人, 其中中国大陆代表 30 人左右, 台湾东道主也有不少代表以及来自各国的华人代表。虽然未有非洲国家人士提出论文, 但也见到若干非洲裔代表。

2 论文概况

会议论文集有 108 篇论文, 其中 93 篇在会上宣读, 15 篇为张贴论文。

按论文性质分析, 属①测量方法和仪表研究开发方面占 82.4%, ②管理方面 (如标准装置实验室间比对, 标准的修制订) 占 11.1%, ③应用和选用方面占 21.3%。有若干篇可分析两种性质归纳, 因此总数 > 100%。

按论文讨论内容分析, 分①流量标准装置占 22.9%, ②流量测量方法和仪表占 88.9%, ③其他相关参量测量 (如液体密度等), 占 2.8%, 在流量标准装置中如采用标准流量计, 则分别归纳进①、②, 因此总数也大于 100%。

按论文作者界别分析, 来自①计量等研究机构占 47.2%, ②大学占 30.3%, ③仪表供应制造企业占 19.7%, ④终端用户和工程设计占 2.8%。计量等研究机构和大学是研究开发的主力军, 大学偏重于原理性前沿研究, 生产企业也投入相当开发力量。有若干论文是由学研产联合提出。

按论文作者所属国家或地区分析: 美德日等工业发达国家占 46.3%, 论文较多的有美国 22.5 篇, 德国 9 篇; 发展中国家占 39.8%, 中国大陆因地缘近, 参加较多, 有 31 篇, 巴西也参加较多, 有 7.5 篇, 印度 3 篇; 东道主台湾有 8 篇。发展中国家发表论文与 1978 年第 1 届 81 篇中占 4.6%, 1979 年第 2 届 60 篇中占 14.2% 相比, 增加了许多。

这些论文反映了国际流量测量业界近期关注领域和活动热点, 总结新进展, 并展望今后发展趋势。

3 论文议题

论文按流量标准装置, 流量测量方法和仪表, 其他相关参量三大类细分小类如表 1。

表 1 论文分类

分类	流量标准装置		流量测量方法和仪表										其他相关参量
	液体用	气体用	差压式	超声式	热式	科里奥利式	电磁式	涡街式	涡轮式	浮子式	容积式	其他	
篇数	14	16	34	15	8	7	7	6	6	2	1	10	3
	28												

3.1 流量标准装置 流量标准装置是传递量值、校准和研究流量仪表性能的重要设备。流量测量业界就如何改进提高准确度和工作效力

作了不懈努力。28 篇装置论文中液体装置 14 篇, 气体 16 篇, 7 篇是实验室空间量值比对, 下文择要阐述。

3.1.1 标准表法流量标准装置 流量标准装置有采用原级标准容积法/质量法(称重法)和传递标准标准表法两大类,20~30年前采用容积法/质量法居多,近10年采用标准表法或标准表/称重组合法逐渐增多。本次会议标准表法或组合法论文有8篇,用作标准表的品种有音速喷嘴、超声流量计、涡轮流量计、电磁流量计和层流流量计。气体装置中较多采用音速喷嘴作标准表,计有6篇,其中1篇与涡轮流量计组合^[1],1篇是音速喷嘴+层流流量计+称重法组合^[2]。

台湾CMS/ITRI阐述从原标准到现场使用超声流量计可溯源的标定^[5]。在CMS有陀螺衡器原标准(primary standard)的高压空气流量标准装置上,传递量值给一组音速喷嘴,再从音速喷嘴传递给4台Instromet DN150超声流量计(USF),其扩展不确定度为0.18%。4台DN150USF作为位于台湾南部中国石油公司一套高压空气循环流量标准装置的标准表传递标准。在中国石油公司装置上标定4台Sick DN300 USF,作为Da-Tan分配和测试站的标准表,其扩展不确定度为0.24%。在Da-Tan站的装置上校准6台现场应用的Daniel DN300 USF,扩展不确定度为0.26%。经二次超声流量计量值传递,不确定度仅增加0.08%。

3.1.2 小流量流量标准装置 随着生物医药工程、精细化工等微小流量测量需要增加,新建或改建已有小流量标准装置,有4篇文章。

法国CETIAT(Centre Technique des Industries Aeratiques et Thermiques)新建

一台流量范围1~10000mL/h(0.0167~16.7mL/min)微水流量标准装置,由称重系统原标准和层流差压件为传递标准组成^[3]。经排除空气过滤微粒制备的水源,在10℃~50℃温度范围内保持某稳定温度(变化小于0.1℃),控制上游压力(变化小于0.05%)的水流过不同内径(100~325μm)和长度(1~4m)一组毛细管中的一支,监测其在层流条件下流动,称重计时求取流量。装置的流量不确定度为0.1%(k=2,95%置信度)。论文描述了装置研究、设计架构和实施。

日本国家计量院(NMIJ)新建一套小流量轻油流量标准装置^[4]。该装置采用静止启停静态称重法为原标准和科里奥利流量计为传递标准组成流量范围10~100kg/h(0.167~1.67kg/min)。

美国Fluke公司对原有气流量标准装置(流量范围 $2 \times 10^{-5} \sim 100 \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ (1Ncc·min⁻¹~5000NL·min⁻¹))作了改进,以降低传递流量的不确定度^[2]。改进的措施是用新的美国NIST REFPROP气体性能数据、新的雷诺数-压力特性,降低监测绝对压力和差压的不确定度,改善过滤件设计等,降低系统整体不确定度和提高可靠性。

泰国国家计量院(NIMT)和台湾CMS/ITRI联合提出活塞式容积原标准的低压气体流量标准装置论文^[6]。容积原标准由3套内径为19、44、143.7mm的玻璃和水银密封活塞组成,用干涉仪测量活塞位移,流量范围0.005~24L/h(296.15K和101.325kPa时)。装置的质量流量相对不确定度小于0.13%。

表2 论文按差压发生器分类

品种	音速喷嘴	文丘里管	层流件	内锥体管	孔板	弯管	均速管	各差压式综述
篇数	15	4	4	3	3	2	2	1

3.1.3 钟罩式气体流量标准装置的标定和不确定度评估 有3篇论文。

斯洛伐克计量院用一套分辨力为1μm数字千分尺和步进电机等组成的专门测量设备,标定测量钟罩内腔几何尺寸作为气体流量标准装置的容积原标准。系统流量相对扩展不确定度为0.116%。在2002~2005年间与德国PTB原标准多次比对和稳定性监测后,在2007年宣布为

斯洛伐克国家气体流量标准^[7]。论文阐述了专门测量设备结构、几何测量的实施、不确定度评估计算。

中国计量科学研究院新建一套1m³钟罩式气体流量标准装置,用激光跟踪仪和激光干涉仪测量标定钟罩容积,100dm³容积的测量扩展不确定度(k=2)为0.018%。钟罩内外表面经精密机械加工以获得良好的圆度和低的粗糙度。装置

的主要参数：容积 1m^3 ，流量范围 $0.5\sim 60\text{m}^3/\text{h}$ ，压力 2kPa ，压力波动 $\pm 5\text{Pa}$ ，装置的不确定度 $\leq 0.1\%$ 。论文阐述测量标定过程，内径和行程实测数据和不确定度的评估计算^[8]。

澳大利亚国家计量院(NMIA)用一组高流率不确定度为 0.13% ($k=2$)，流量为 $1\sim 25\text{m}^3/\text{h}$ 的音速喷嘴，评估测试钟罩式气体流量标准装置的再现性和线性度。在最大流量和标准不确定度降低到 0.07% 时，非线性为 0.07% ^[9]。

3.2 差压式流量计 差压式流量计论文有 34 篇，其中探索开发专题研究 10 篇，校准检定和标准研究 5 篇，环境影响量研究 2 篇，用作标准表 9 篇，应用 3 篇。按差压发生器品种分类有 8 种，各有论文如表 2 所示，下文择要分节阐述。

3.2.1 音速喷嘴 涉及音速喷嘴的论文中有 8 篇是用作标准表，有 2 篇音速喷嘴性能研究，有 2 篇是标定或检定音速喷嘴，1 篇是应用拓展。

3.2.1.1 音速喷嘴性能研究 日本计量院研究临界喷嘴内流场与压力比的相关性^[10]。以非常细的热偶对 ($10\sim 50\mu\text{m}$) 按 RTA (Recovery Temperature Anemometry, 恢复温度测量法) 测量喷嘴内表面流速分布场，探索压力比相关性，还研究评估边界流速分布的可能性。

台湾高苑科技大学与 CMS/ITRI 合作研究小音速喷嘴流出系数的特性^[11]。本课题对硅刻蚀角锥状收缩进口，喉径约 $100\mu\text{m}$ ， 5° 扩散角圆锥状扩散段的音速喷嘴，以 3 种扩散段长度进行实验。实验雷诺数范围为 $5.8\times 10^2\sim 4.5\times 10^3$ ，其中一个喷嘴 $Re=4.4\times 10^3$ 时测得临界背压比为 0.486 。还用 FLUENT 6 仿真探索上游 20.3kPa 时的流动场。

3.2.1.2 音速喷嘴的标定和检定 河北测试技术院和丹东兰新(音)仪器公司探索用钟罩气体流量标准装置标定小喉径(流量为 $0.016\sim 6\text{m}^3/\text{h}$) 音速喷嘴。实验证明和误差分析计算为 0.15 级精度等级的钟罩装置标定，可获得 0.35 级精度的音速喷嘴^[12]。

印度流体控制研究所(FCRI)用 PVTt 法和钟罩法原标准标定标称流量 $25\text{m}^3/\text{h}$ 的 2 英寸 NB 临界流文丘里喷嘴，评估其性能^[13]。PVTt 法容积

为 2m^3 ，最大流量为 $90\text{m}^3/\text{h}$ ；钟罩法容积为 500L ，最大流量为 $40\text{m}^3/\text{h}$ 。两种方法取得的流出系数与 ISO 9300:2005 标准的公式计算数据比较确认，低雷诺数(约 83000)时偏差最大，为 $\pm 0.43\%$ ；较高雷诺数(约 124000)时偏差为 $\pm 0.15\%$ 。

3.2.1.3 音速喷嘴的应用拓展 德国物理技术院(PTB)提出一篇音速喷嘴应用性研究的论文，串联小音速喷嘴以测定流量和产生混合气体^[14]。两只喷嘴串联，气体进入第一只喷嘴，在两只喷嘴连接点上加入气体 a，流量分别为 q_{m1} 和 q_{ma} ，在第二只喷嘴出口得混合气流量 q_{mt} 。选择合适两喷嘴喉径和进口压力，便可获得所需配比的混合气体。文章还对不确定度作了分析。

3.2.2 文丘里管 有 4 篇文丘里管流量计性能研究和应用拓展等方面的论文。CEESI (Colorado Engineering Experiment Station Inc)分析压缩空气标定 76 台文丘里流量计实验数据，评判与 ISO5167 规定流出系数的接近程度^[15]。德国 Duisburg-Essen 大学数值仿真研究在文丘里管与孔板流量计中旋转扰动流动，详细分析仿真结果^[16]。其余 2 篇下文专节阐述。

3.2.2.1 文丘里流量计测量湿气体流量^[17] 天津大学发表开发一台文丘里仪表测量湿气体流量方法的论文。两台差压计分别测量文丘里管收缩段差压(ΔP_1)和扩散段差压(ΔP_2)，从比值 $K(=\Delta P_1/\Delta P_2)$ 求解湿气体液相含率，因液相含率与 K 有一定的函数关系。本课题对此作深入的理论和实验研究。原型样机文丘里管进口 80mm ，喉径 30.4mm ， β 为 0.38 ，以透明有机玻璃制成，便于观察流动状态。实验表明在压力范围 $0.1\sim 0.16\text{MPa}$ 、Froude 数范围 $0.4\sim 0.7$ 、液气质量比 $0\sim 1$ 的条件下，气体流量相对误差小于 $\pm 2\%$ ，液相小于 $\pm 10\%$ 满度值。

3.2.2.2 文丘里流量计自诊断系统^[66] 美国 DP Diagnostic LLC 提出文丘里流量计诊断方法的论文，不仅测量进口与喉径间差压 ΔP_t (总差压)，还测量喉径与出口间差压 ΔP_r (恢复差压)和进口与出口间差压 ΔP_{pL} (总压力损失)。这些实时测量值的相互间比值和偏差值，与校准时

相对应的值相比较，作逻辑判断或数据核对，从而判断出存在操作错误或测的是湿气体：①进口直径误设置；②喉径误设置；③流出系数误设置；或④运行时给出所测气体是湿气(如测饱和蒸汽，测天然气进入轻油和水)引起各流量-差压比值的偏移。本文阐述一系列实验数据，证明本法的可行。

3.2.3 层流流量计 层流流量计(LFM)与其他差压式流量计差压与流量平方成正比不同，它的差压是与流量成正比。论文集有5篇涉及LFM，其中[3]在流量标准装置中用作标准表，前文3.1.2已有所述，另一篇只是在实验室中应用，其余3篇如下文所述。

台湾CMS/ITRI开发以玻璃毛细管为层流件(LFE)的LFM，用作传递标准^[18]。LFM由多根4种规格(内径 μm ×长度mm, 100×50, 200×200, 225×125, 300×150)直毛细管LFE并联，与差压计、压力计、温度计一起组成。差压在2~100kPa时、气体流量范围1~1000 cm^3/min (参比条件273.15K, 101.325kPa)，范围度20:1~50:1。LFE的再现性<0.02%，重复性<0.03%，说明这种LFE组成的LFM可用作传递标准。用玻璃活塞式原标准的流量标准装置校准，相互间差别<0.13%。

IPTB(巴西Pesquisas技术院)和NIST(美国National Institute of Standard and Technology)联合发表用于流程气体LFM建模的论文^[19]。IPTB用NIST原标准装置和物理模型公式，对3种型号LFM商品(具有不同形状层流件)在100、200、300和400kPa压力下，范围度为10:1时校准。LFM在相同压力和流量范围可以不作实流校准，测量3种(Ar, He, CO₂)流程气体，误差仅为0.5%。LFM的流量标定和测量用NIST REFPROP 8.0数据库的气体特性数据。每种型号仪表的物理模型包含有黏性压力降、压缩性和非理想气体特性，滑流(slip flow)效应、动能效应、气体膨胀效应、热效应等诸因素。3种LFM有设计上差别，表明模型公式的修正由仪表结构和所测气体而定。

美国Fluke公司发表改善以LFM和音速喷嘴为传递标准的、流量范围在1Ncc/min

~500Nl/min的流量标准装置不确定度的论文^[2]。采取措施有采用新的雷诺数-压力特性等NIST PEFPROP气体数据、降低绝对压力和差压监测的不确定度、改进过滤器设计，使其直接接进仪表等。不确定度的改善同时也提高其可靠性。

3.2.4 孔板流量计 涉及孔板的论文有4篇。论文[16]对孔板仿真研究旋转流动扰动。论文[20]阐述CFD仿真和实验研究孔板锐边(角)保持清洁而迎流面近锐角受油脂污秽的影响。论文[21]阐述由孔板和调节阀组成一体尺寸紧凑的流量调节器。论文[22]论述用真实气体绝对黏度和等熵指数作孔板流量测量计算的效果。对天然气工业建议采用NIST PEFPROP 8.0气体特性数据。

3.2.5 内锥体流量计 内锥体流量计有3篇论文。

论文[23]分析研究在CEESI标定31台内锥体流量计的数据。

内锥体流量计是常被用做测量天然气流量的经济型仪表。CEESI发表DN100, $\beta=0.63$ 仪表气/水/液烃湿天然气一组综合数据，并与已有 $\beta=0.75$ 的数据进行比较，使人们在天然气应用不再局限于 $\beta=0.75$ 而扩大到 $\beta=0.63$ ；还发表了稀有气体(氦, 氩, 氙等)/水/液烃气体的一组数据[24]。

美国VorTek和DP Diagnostic联合发表由内锥体流量计和涡街流量计组成一体具有诊断功能的气体质量流量计^[25]。内锥体流量计除测量传统进口端与内锥体下游低压端差压 ΔP_t 外，增加测量进口端与出口端差压 ΔP_{PPL} ，并计算出恢复差压 ΔP_r 。这3个信号通过与涡街流量计的流量信号，分别计算出3组流体密度 ρ_t , ρ_{PPL} , ρ_r ，若三者差别超过一定限值，表示仪表出现故障。论文还详示由 $\beta=0.75$ 内锥体流量计和涡街流量计组成DN100原型样机的实验数据，例举诊断受污染、堵塞等故障。原型样机体积/质量流量不确定度为0.5%，气体密度的不确定度为1%。

3.2.6 其他差压发生器仪表 CEESI在[26]中讨论几种新型差压发生器流量计(下简称新型

仪表), 如内锥体流量计、均速管、多孔孔板(国内时常称作调整孔板、多孔平衡调节流装置), 环状楔形仪表(Torus Wedge Meter)以及诊断型差压仪表。制造厂宣布了这些新型仪表的优点以及准确度, 所需前后置直管长度的指标, 但与经典标准化了的孔板、文丘里流量计不同, 必须实流校准。本文试图帮助用户如何在其中选择最合适的仪表, 并提出防止跌入“陷阱”的忠告; 还议论了这些仪表能否纳入标准文件、发展成标准应收集哪些数据、制订哪些标准可以推动新型仪表的发展等等。

弯管流量计有 2 篇论文, [27]是 CFD 仿真和实验研究上下游连接管直径偏差与弯管流量计流量系数间的相关性; [28]是 CFD 仿真和实验研究 V 型弯管流量计的测量性能, V 型弯管流量计是安装于直行管道上具有 V 型状弯管的仪表。

[29]是研究以 FJPE 型测量管改善大管径气体流量测量准确度的测试。FJPE 型是一种多点测速管组成的差压流量计。

均速管截面形状确定仪表性能。[30]以 CFD 仿真和原型样机实验, 研究 3 种带不同形状流动调整翼的均速管测试性能, 其中 FCW II 型的线性度、重复性和产生差压最佳, 均优于其他两种和传统圆型和菱形截面的仪表。

3.3 超声流量计 涉及超声流量计(USF)的论文, 原理上都属传播时间法, 没有多普勒法, 其中 USF 开发、检定等研究 9 篇, 流场等环境影响研究 3 篇, 用作标准表 3 篇, 应用研究 2 篇。下文择要阐述。

3.3.1 USF 研究开发和检定 瑞典 Lulea 工业大学发表名为火花隙发射(gap discharge)超声的低压气体超声流量计(下简称 GDUSF)原型样机阶段性研究论文[31]。GDUSF 是以火花隙产生超声波, 按常用传播时间差法原理测量。它的流量传感部分是由装在管内壁火花隙超声发生器和装在对面上下游一段距离分置的一对压电晶体接收器组成, 流量信号传送到电子转换处理部分。原型样机在实验室作性能测试和严酷工业现场试用考验。实验室性能测试求得的仪表误差为(1~2)%测量值。试用现场是造粒工厂的

两个排放管, 是直径 3m 常压管, 处于 5~20m/s 流速的强烈湍流, 仪表前设置 10D 直管, 一个场所流体主要是空气以及 CO₂, SO₂, NO_x, 温度为 75℃, 含有 < 10μm 粒子, 流体密度为 1.2~1.3mg/m³; 另一场所粒子浓度较低, 温度为 60℃接近 100%湿度。两者因电子组件损坏, 分别运行了 135h 和 53h。实验室测试和现场试运行证明在工业环境下应用是可行的, 改进后再作下一阶段试验研究。

美国 CEESI 发表利用流速分布比 VPR(velocity profile ratio)诊断 USF 运行状态的论文^[32]。在 4 声道沿弦平行传播的 USF 中, 定义 $VPR = (V_b + V_c) / (V_a + V_d)$, 式中 V 是气体流速, 下标 a, b, c, d 是声道编号。b, c 较近管轴。VPR 的细微变化说明管壁有污物或锈层, 大的变化表示仪表邻近有异物或流动调整器。有些仪表制造厂的 USF 设置 VPR 变化限值。本文统计分析 2 台 DN300 4 弦声道 USF 运行 3 年积累数据, 以检查流速分布变化对 USF 测量值的影响。

美国 Cameron Cald 超声公司论述测量产生旋涡油流多声道 USF 补偿响的方法^[33]。以前所作 USF 有关旋涡的测试是在较高雷诺数(Re)区, 缺失低 Re 的测试数据, 而实际上重油测量常在 Re=100, 000 以下, 甚至紊-层流转变区或层流区。利用公司 8 声道 X 弦布置, 8/4 声道单平面 Z 弦布置, 4 声道双平交叉 Z 弦布置的各种 USF, 测试旋转率(swirl rate)。在 6 弯管、3 弯管不同组态以及装/不装 CPA 流动调整板的下游, 作各种声道组合的 USF 流动扰动影响试验。试验结果表明多声道双平面布置 USF 有较好旋涡补偿功能, 各种流动扰动 8 声道仪表测量值平均变化为 ±0.25%, Re=2000~5000 为 ±0.5%, Re > 40000 为 ±0.15%; 4 声道单平面布置高 Re 时测量值变化为 ±0.4%, Re=10000~50000 为 ±1%, 不同声道布置各 USF, Re < 15000~18000 时, 按流体速度计算的旋涡率随 Re 增加而增加, 超过此值则随 Re 增加而减小。

GE-传感与测量部发表运行于高流速宽量程火炬气 USF 的论文^[34]。迄今已在全球流程工业装用超过 3000 台火炬气和烟道排放气 USF。应用中尚存在紧急状态高流速(>80m/s)的测

量问题。高流速导致声束漂移,流动噪声猛增,超声信号下降。本课题研究火炬气超声的传播和气流引起声束漂移,经力学方面和换能器的改进,使最大流速提高到 123.7m/s,典型仪表的实流校准证明,测量值的标准偏差在 1.2%以内,整体的准确度为 3%~4%。

现还未有重新校准 USF 标准化的间隔年限规定,CEESI 在[35]文中讨论评估 USF 使用多少时间需重新校准的方法。曾选未更换配件的 35 台现场使用 4 年以上 DN100~DN300 气体 USF,在 CEESI 衣阿华州的流量标准装置上重新校准,这些仪表未作任何清洗。将各仪表校准数据点绘成使用年-现有偏差图、流速-初始偏差图、流速-现有偏差图、不同流速点 0~8 年间各年偏差图等。从图上可以看出各流速初始偏差在 0.3%~0.5%之间;使用后起初几年高流速时(80~100ft/s, 1ft/s=0.305m/s)偏差在 1%以内,8 年在 1.5%以内;在低流速时(5~10ft/s)起初几年偏差在 1.6%以内,3 年以后在 1.5~3%之间。从这些图上还可以看出两个现象,即①随着流速增加偏差减小,②随着使用时间增加偏差增大,得出使用中 USF 性能随时间而变的定性结论。下一步作变化量的定量和选定重校准间隔时间的研究,最后再更换原配件仪表的确认程序。

乌克兰 SEMPAL 公司论述 CFD 研究涡轮流量计和传播时间法 USF^[36]。在研究 USF 方面用 CFD 软件 FLUENT 获取沿传播声道流速分布,观察各测量通道形状的流速分布变化。仿真多种几何形状组态对 USF 测量性能的影响,并实验验证。采用 k-ε 模型说明扰动,重点研究换能器罩形状、收缩和选择测量通道尺寸间正确关系。

3.3.2 三峡工程应用 USF 的研究 中国计量科学研究院(NIMC)近年开展三峡电站水轮机性能测试大型管道用 USF 的流量测量课题。本次会议上提出有关的 3 篇论文。

[37]一文论述针对三峡电站安装的 DN12.4m18 声道 USF 的准确度,实施实验和 CFD 仿真两种方法,分析复杂流场对测量的影响。建立了按 1:24 缩小的实验系统,在国家水大流量站(开封)流量标准装置上校准实验,调查考

察了一系列事例,显示在进入水轮机蜗壳进口前的复杂流场,USF 测量误差在 0.3%~0.6%之间;CFD 仿真调查不同尺寸流道的流动。最后结合现场数据,得出安装于三峡电站 USF 准确度优于 1%的结论。

[38]一文阐述按比例缩小三峡电站至 500mm 直径管道和 USF 模型系统的实验。测试 USF 不同位置声道的流速,其流速分布的差别,可以表示出流场扰动的程度,描绘流速分布特性,实验数据还呈现双测量平面声道布置能减小横向流动扰动影响的现象。比较几组不同实验条件测试结果,可明显地观察到流速分布是非对称性的。在管道模型这一特定流场,仪表误差约为+0.3%。

[65]一文阐述以 CFD 数值计算方法分析估计大管径 USF 在扰动流动条件下测量准确度。流场分析得到 X 轴向和 Y、Z 两个横向流速分布,计算了 1~5m/s 范围内 3 种流速的流量误差和 5m/s 流速时多种声路布置对流量误差的影响。计算流量误差接近模型实验误差,两者偏差小于 0.5%。

3.3.3 USF 环境影响和影响因素研究 有 3 篇文章讨论流体污秽、流体旋涡、流体温度和前置弯管的影响。

荷兰 Krohne Oil&Gas 阐述污秽和锈蚀对气体 USF 的影响,思考仪表设计上改进和运行中的诊断^[39]。文章分析污秽有 5 种类型,及其不同影响测量的途径:①使底部流动变慢沉淀于底部部的污秽;②断续地粘沾于管壁的污秽;③均匀粘附于管壁的污秽;④粘附于换能器,特别是迎流表面的污秽;⑤换能器腔室(transducer pocket)内有液滴。污秽影响测量的主要途径是:①流通截面减小;②增加管壁粗糙度;③缩短声程长度;④反射系数下降引起超声信号衰减;⑤换能器迎流面污秽吸收超声信号;⑥换能器腔室液滴增加对话(cross talk)干扰。

Krohne 公司考虑了各种污秽形成的影响,新设计 Altosonic V12 型 USF,其声路布置着眼于能检测出污秽,由 6 条 V 反射声路组成,2 条是相互垂直的直径声路,4 条是与其中一条直径

平行的弦声路。在上述 5 类不同污秽类型条件下，在气体流速 2~30m/s 时作了实验，从图上读得 5 种类别污秽影响的变化，分别不超过① 0.2%、②0.6%、③0.5%、④0.1%、⑤高流速时 0.1%，低流速时 0.7%。

天津大学和中国计量科学研究院联合对 90 单弯管下游传播时间法 USF 作 CFD 仿真研究^[40]。USF 按不同口径(0.1, 1, 10m), 1~18 声路不同声路布置，置于弯管下游 1~20D 位置，仿真计算测量误差，还分析管道粗糙度的影响。这些研究结果可作为仪表制造者和使用者参考。论文主要结论为①单测量平面声路布置至少要 4 条，且仪表置于弯管下游 5D 才能获得±0.5%准确度，有 9 条声路在下游 3D 可获得±0.2%准确度，声路平面安装角度为 0（即与流向平行效果最好，90°时最差）；②交叉双测量平面与单平面相比，测量准确度相同，只是不十分敏感于安装角度；③只有弯管下游仪表前 3D 内管壁粗糙度才会影响准确度，超过 3D 可予忽略；④在 3D 内管壁临界相对粗糙度是 2×10^{-4} 。

中国计量科学研究院在 [64] 文中分析检定超声热量计的影响因素。影响因素有：①声速在热水中变化、②测量温度的位置、③热水中气泡。论文认为水温引起水中声速变化对检定影响最为显著。水温从 50℃增加到 60℃时，流量要增加 1.5%。

3.4 热式质量流量计

3.4.1 MEMS 热式质量流量计 本类仪表是由 MEMS(微机电系统, Micro Electro Mechanical System)微传感器组成。美国 Siago 公司和上海 Siago 发表了 6 篇相关论文。

[41]一文回顾了 Siago 研发 MEMS 流量仪表的历程，2003 年以其专利技术开发可替代家用膜式燃气表和商业、工业用贸易交接仪表；研发与传统热量型流量计 (calorimetric principle flow meter) 测量原理不同的渡越时间法 (time-of-flight) 热式流量计，它与传统热式流量计不同，不受被测流体成分变化影响，正在进行商品化过程中；研发应用于清洁、低黏度液体低流速微流量仪表。论文综合分析了市场上现有 MEMS 热式质量流量计的测量技术和

产品，展望其发展前景。

[42]文阐述所开发应用于城市燃气的 MEMS 流量仪表，仪表由专用设计多个传感件的 MEMS 质量流量传感芯片组成，由几种类型：①流量传感器直接伸入测量通道中心的燃气仪表，测量准确度优于±1.5%，范围度 20:1，电池寿命视工作条件而异，为 5~10 年；②家居住宅用仪表口径为 15~25mm，压力≤0.5MPa，流量最大到 4Nm³/h，商业用口径为 20~50mm，满度流量范围 6~160Nm³/h；③工业用燃气仪表最大口径 100mm，最大压力为 2.5MPa，满度流量范围 125~3600Nm³/h。

[43]文论述热渡越时间 (TOF) 技术传感器和组成的仪表。本技术仪表与传统热量型流量计不同，不受气体成分变化、水气、粉粒和其他污秽影响。本文描述了 MEMS 渡越时间流量传感器设计电路方案，列示了测试结果。本技术也适用于极低流速液体流量测量，应用于当前医药业的研究开发。

上海 Siago、成都国家测试技术院和上海测试技术院联合发表贸易交接用 MEMS 质量流量计的校准和检定^[44]。一般热式流量计的准确度是以满量程百分率 (%FS) 表示，不适用于贸易交接计量。本文针对以测量值百分率 (%R) 表示准确度的 MEMS 热式流量计研究设计校准的程序和分析测量不确定度的计算。实验结果表明，处理各种变量设计后的 MEMS 仪表，无论是热分布式原理或热消散 (金氏定律) 原理都能应用于贸易交接计量，能达到普遍接受的±1.5%R 的准确度。

[45]阐述价格可与浮子流量计媲美而有全数字数据处理，如流量测量和总量计量、用户可编程流量报警、数据存储等功能的 MEMS 热式质量流量计。仪表既可制成 DN4~DN100 固定安装型，也可制成手持型，安装到已有管道上，由使用者在现场按预校准组态编程。仪表还配备 RS485 通信接口，方便联网远程管理。

[46]阐述医疗用按热量原理设计的一次性小型 MEMS 流量传感器和原型样机。流量传感器可方便地设置在微通道医用塑料构件内，流量传感件置于药液流通通道平面。原型样机的流

量范围 0~500ml/h。

3.4.2 热分布型热式质量流量计 北京七星华创电子公司和清华大学联合提出 2 篇热分布型热式流量计(thermal profile flowmeter, 亦称毛细管型热式流量计)。

在[47]文中, 阐述了应用于燃料电池系统测量气体混合配比的新型号数字质量流量控制器, 由传感部分、低压损电磁阀和 电子部件三部分组成。论文列示了实验数据和现场使用数据。

在[48]文中阐述一种定功率测量法气体仪表。经改进后的新流量传感器, 其测量电路弃用通常采用的惠斯登电桥, 准确度从 1%FS 提高到 1%R, 响应时间从 0.5s 缩短到 0.3s, 零点漂移温度系数从 0.05%FS/°C 降低到 0.01%FS/°C。

3.5 科里奥利质量流量计 涉及科里奥利质量流量计(CMF)的论文有 7 篇, 其中两篇是在流量标准装置中用作标准表, 或在多家实验室装置间用作比对工具, 另一篇议论到由 MEMS 技术设计制造的微流量 CMF^[49]。

瑞士 E+H 公司研究低雷诺数流动时 CMF 灵敏度的流体结构互动(Fluid-Structure-Interaction, FSI)仿真^[50]。在工业应用中特别在石油工业, 经常遇到因流体黏度高处于低雷诺数区。CMF 读数在低雷诺数时会受流体动力影响而产生偏移, FSI 研究表明受影响始于 $Re=10000$, Re 降低到 800 时, 偏差高达 0.5%~1%。借助于大量 FSI 仿真, 详细考察导致此偏差的物理机理, 呈现偏差是雷诺数的函数, 可用一个周期剪切作用过程与振动科里奥利力相互作用来解释。按修正/未修正的实验结果与相对应的仿真数值作比较。本方法已应用该公司产品。

德国 Christian-Albrechts 大学研究沿测量管温度梯度或安装条件改变 CMF 灵敏度和零点所引起的偏差, 论证必须检测此偏差, 以保证 CMF 的高准确度测量^[51]。论文提出一种分析评估零点的模型。首先当测量管被激励的第 1 模式(即 CMF 的工作原理)时, 质量流量影响到第 2 模式振动; 其次当第 2 模式激励时, 质量流量作用到第 1 模式振动。这两个特性用 MINO 相位复合矢量控制(MINO-Phasor-Control)补

偿科里奥利力来实现。

浙江大学和天信仪表公司联合发表 CMF 零点漂移的实验研究^[52]。CMF 在工业实际应用中有时仍受到零点漂移影响, 即仪表零点在零流量时的读数随温度变化而异。本文对狭 U 形 CMF 作了一系列改变环境温度的性能试验和分析。分析认为引起零点变化可能因素是流量传感件(测量管)的物理性能(包括构件不对称, 剩余应力, 测量管壁厚不均匀)受温度变化而导致零点变化。

Krohne(英国)公司发表扩展 CMF 测量能力, 提升流量范围的文章^[53]。文章叙述 DN100 直管 CMF 在称重法水流量标准装置上辅以超声流量计作标准表, 按专门制订的校准步骤实施校准。

3.6 电磁流量计 涉及电磁流量计(EMF)的论文有 7 篇, 其中 2 篇是用作流量标准装置中的标准表或装置间量值比对的传递工具, 本文不赘述, 其余 5 篇都是俄罗斯 Niteplopribor 国家研究中心对 EMF 的研究开发, 下文分节说明。

3.6.1 液态金属用 EMF 和含有磁性金属粒纸浆用 EMF [54]是研究调节测量通道壁边界层条件的液态金属 EMF。液态金属 EMF 通道壁没有衬覆电绝缘层, 这样就有敏感于被测金属和金属壁两个环境边缘电参数的不稳定性。环境边缘条件的偶然变化是管内壁润湿性(wettability)变坏、氧化物剥落、积沉淀层等引起的。液态金属与壁间接触电阻的不稳定, 可认为是一个测量过程的外界扰动。论文考虑了借助于引入外界电流的电极和测量系统, 产生电位以支持通道壁的电位特性分布, 消除接触电阻不稳定干扰影响; 阐述其原理、电极布置和测量电路等。

[55]阐述一种用于测量含磁性金属粒纸浆专用电磁质量流量计, 使其测量不敏感于浆液磁性性能变化。解决方案是增加一个检测纸浆磁化率传感件的电信号, 不仅排除纸浆磁性物质含量变化引起对容积的质量流量测量不确定度, 而且还可以测量金属含量质量。论文认为本电磁质量流量计是解决这类测量难题的具有发展前景的方法。本类仪表国内亦已开发, 在现场试用。

3.6.2 EMF 模拟法干法校准的研究和应用

[56] 阐述所开发 POTOК-T 型成套仪器的数学模型模拟、组成和应用经验。仪器由①一组(6件)磁场检测件(相当于感应线圈), ②组装有接口块、模数/数模转换接口板和软件等的模块箱, ③IBM PC 型个人计算机组成, 以及配合使用的电阻数据表和长度计量卡尺。所开发的由印刷板制成的磁场检测件, 使用时紧贴电磁流量传感器流通通道内壁的不同位置, 模拟感应的互感量, 求取该位置的权重函数。仪器可测 EMF 口径 25~4000mm, 满度体积流量范围 0.01~350000m³/h, 体积流量基本误差±0.2%, 多参量基本误差±0.5%。不同型号 EMF 可按其建议书给出修正系数, 但随之亦会降低校准准确度; 也可以实施实流校准和用本仪器干法校准法求取校正系数, 备作以后核对检查时使用。据报道, 该国家中心已将该成套仪器技术和产品在中国推介^[注1]。

[57] 是讨论模拟 EMF 的物理基础。流量计的模拟模型是用柔性印刷板制成的感应线圈, 紧贴流通通道内壁检测磁通, 求取表面权重函数等位线来实现的。表面权重函数依存于通道几何形状、运动流结构(kinematic flow structure)和通道材质电导率。实现仪表在各种通道形状、运动流结构、雷诺数和其他工作条件的表面权重函数计算。

[58] 用 GPU(general processing unit) 构成的芯片作 EMF 的数值仿真, 研究描述流通通道内感应磁场的方法, 使可能评估磁场空间分布; 研究通道材质和流体电导率、通道壁厚度等各种因素对仪表灵敏系数和线性度的影响。

3.7 涡街流量计 涉及涡街流量计有 6 篇, 其中[25]是与内锥体流量计组合成质量流量计, 前文 3.2.5 节已有所述, 3 篇是研发新旋涡发生体和拓展流量范围, 2 篇是流场影响研究。

3.7.1 研发新旋涡发生体和拓展流量范围

台湾国立成功大学提出研究带槽圆柱形旋

涡发生体产生涡街性能的论文^[59]。所研究的旋涡发生体直径 d=40mm 圆柱体轴向, 开一与流动方向垂直宽度为 S 的直槽, 分别在水流槽和低速风洞上作宽度对产生涡街品质影响的实验, 实验表明(S/d)=0.1~0.15 时信号最佳, 且斯特劳哈尔数-雷诺数间关系最为线性。在水槽的实验, Re=2200~11500 间, S/d=0.15, 从图上读得非线性约 2%, 而无槽圆柱体则高达约 13%; Re 低至 2400 涡街信号品质仍保持可接受的程度, 从而适当降低下限流量。用热线流速计在风洞测试旋涡发生下游尾迹区, 呈现几乎是完美的 2-维涡街流动结构。

浙江大学和天信仪表公司联合开发在低流速区性能良好的涡街流量计^[60]。文章描述一种双旋涡发生体涡街流量计自适应算法, 以改进在低流速时的测量灵敏度。实验搜索两旋涡发生体产生旋涡度最强的相隔最佳距离。比较了单旋涡发生体、双旋涡发生体和带自适应 FFT(快速富里叶变换算法)双旋涡发生体仪表的实验数据, 验证了在小流量时测量性能的改善。以 DN50 样机的实验数据, 测量误差≤±1%时最低流量单旋涡发生体为 25m³/h、双旋涡发生体为 15m³/h、带 FFT 双旋涡发生体为 12m³/h。

德国 Freiburg 大学发表涡街流量计在高端流区拓展测量范围的论文^[61]。涡街流量计在低流速时信号弱, 而在高流速时涡街信号上叠加湍流干扰信号, 从而增加分离涡街信号的难度, 两者均直接影响流量测量范围。本文设计一种模拟滤波器电路, 增设在微控制器内基于卡曼(Kalman)滤波器 DSP 算法, 评判拓展段测量范围的频率, 从而将高端流量量程增加 55%。

3.7.2 涡街流量计迎流流场影响的研究

德国 Duisburg-Essen 大学、德国 Krohne 测量技术公司和法国 ICAMEcole d'ingenieurs 联合发表涡街流量计测量准确度受上游蝶阀影响的研究论文^[62]。用 CFD

注1 报导见《仪表世界》2011年4月号第39页《俄罗斯电磁流量计干标定技术交流会》
FLUENT Ver. 6.3 流动仿真程序研究 DN25 涡街流量计在上游 2 种直管长度(50, 80mm), 下游 50mm, 蝶阀 3 种开度(30, 45, 全开), 大气压理想气体在雷诺数范围 12000~

480000 流动条件下受蝶阀的影响。实流实验是在两台 DN50 涡街流量计串联比较来实现的，第一台仪表在蝶阀下游 350mm (7D)，第 2 台仪表在第 1 台仪表下游 1000mm (20D)，7~60m/s 间取 5 个流速点作比较。

台湾 I-Shou 大学、空军学院和能源管理系统公司联合发表在不同上游条件下涡街流量计的流场仿真论文^[63]。借助于 FFT 技术仿真瞬时湍流流动，获取旋涡频率。以充分发展流动进口为标准例，按数值仿真和实验取得斯特劳哈尔-雷诺数间关系。沿管道流动的品质按规定的定义予以量化，研究几种进口不对称流和非稳定正弦

波流，并与标准例比较。提出对不同流入条件引起基本频率偏移的一些原因，作了若干结论和下一步工作建议。

4 台湾的流量实验室

所参观的流量实验室是位于离台北车程约 80 分钟新竹的 CMS/ITRI 所属流量和能量研究实验室 (FERL)，设置有传递流量值给工业用流量仪表的 11 套流量标定系统和装置。图 1 所示水和油流量系统标准装置实验室全景照片，会议提供的照片和文字介绍 PPT 稿的电子文档。



图 1 水和油流量系统标准装置实验室

表 3 台湾流量和能量研究实验室的流量标准装置

编号	系统名称	范围 L/min	不确定度 (U_{95}) %	说明
F1	液体流量 大水流量	200~8000	流量 0.06	称重法
			总量 0.05	
F2	小水流量	2~700	流量 0.04~0.06	称重法
			总量 0.03~0.06	

F3		低粘油流量	300~6000	总量 0.05	称重法, 介质是轻油(lightoil)
F4		高粘油流量	300~6000	总量 0.05	称重法, 介质是锭子油
F5		高压空气流量	15~18000 m ³ /h	0.18	称重法+音速喷嘴法, 0.1~6MPa 压缩空气
F6	气 体 流 量	低压空气流量	0.002~24	0.10	4支玻璃活塞体积管组成, 用于干涉仪测量活塞位 移
F7		低压空气流量	4~100	0.15	60升钟罩式体积法
F8		低压空气流量	20~1000	0.11	600升钟罩式体积法
F9		小空气流量	0.002~20	0.16	称重法
		小空气流量	0.002~24	0.18	MOLBLOC 法
		小空气流量	0.01~20	0.18	音速喷嘴法
F10		空气流速	0.25~25m/s	0.5	激光多普勒流速仪+风洞
F11		微液体流量	0.0001~10mL/min	3~0.5	称重法, 测量微量级流量和纳升级总量

流量实验室规模不大, 但设计方案有许多值得学习和借鉴之处, 流量标准装置布置、结构等具体设计制造也相当精致, 如表 3 所示编号 F6 系统不确定度优于大陆 (0.2%) 相应装置。有些微小流量的标准测试设备在大陆还未见到过, 特别是微液体流量的标定测试给大陆代表留下深刻印象。

表 3 所示是 11 套系统流量标准装置的流量范围、测量不确定度等的汇总表。

电子文档还简介从 FERL 流量原始标准传递的流量标准装置:

(1) 两套由音速喷嘴作标准表组成的检定膜式燃气表的流量标准装置, 一套为真空泵低压系统, 另一套为储罐高压系统;

(2) 压力为 1~60bar、最大流量 4000m³/h 的高压气体循环系统, 标准表为多台旋转活塞式校准器;

(3) 由 CMS 指导设计建在中国石油公司 (CPC) 桃园炼油厂的柴油流量标准装置, 传递标准为 CPC 的多台科里奥利流量计。

5 结束语

本文分析了 FLOMEKO 2010 论文组成, 概要阐述了其中近 60% 论文的要点和若干评论。这些论文中涉及流量标准装置者超过 25%, 表明国际流量测量界对装置的重

视; 涉及差压式仪表的论文超过 30%, 呈现出此传统测量方法的研究仍然兴趣浓厚; 超声流量计在前一时期有较大发展, 因此论文数量也较多, 超过 13%。这些论文的概览将有助于我们掌握国际流量测量的动向。

参考文献(括号内为论文集原编号)

[1]Chuang Li, et al. Establishing of Air Flow Test Bench with Interact-Check Standards (A3-4)

[2] Michael Bair. Improvements in the Implementation of Laminar and Sonic Based Gas Flow meters in the Range of $2 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s} (1 \text{Ncc} \cdot \text{min}^{-1})$ to $100 \text{ g} \cdot \text{s} (1 \text{Ncc} \cdot \text{min}^{-1})$ (A2-2)

[3] Christopher David, et al. Novel Water Facility in France Range Extension to Low Flow Rates (10000ml/h down to 1ml/h) (B1-4)

[4]Kar-hooi Chemong, et al. A New Calibration Facility for Small Flow of Hydrocarbon Liquid (B5-2)

[5] Fang-ruey, et al. Traceable Calibration from Primary Standard to On-site Ultrasonic Flow meter (A10-3)

[6] Sutham Masri, et al. New Primary

Low-pressure Gas Flow Standard at NIMT (A5-3)

[7] Miroslava Benovo, et al. Bell Prover-Calibration and Monitoring of Time Stability (A1-3)

[8] Lishui Cui, et al. A Kind of New Calibration Method for the Volume of Bell Prover (A1-4)

[9] Khaled Chanine. Assessment of Reproducibility and Linearity of the NMIA Bell Prover Using A High Flow rate Sonic Nozzle Array (A1-2)

[10] Masahiro Ishibashi, et al. Dependence of the Flow Velocity Field in Critical Nozzles on the Pressure Ratio(A6-4)

[11] Chin-Chung Hu, et al. Discharge Characteristics of Small Sonic Nozzles in the Sharpe of Pyramidal Convergent and Conical Divergent (A6-5)

[12] Xing-ming Sang, et al. Experiment Research on Detecting the Small Diameter Flow meter for Critical Flow by Using A Bell-type Facility (A3-2)

[13] P.N. Unnikrishnan, et al. Performance Evaluation of Critical Flow Venturi Nozzle with Primary Standard Calibration Facilities at FCRI and Validation with ISC Standards (A2-4)

[14] Rainer Kramer, et al. The Application of Critical Nozzles in Series for The Determination of Small Flow Rates and the Generation of Gas Mixtures (A6-3)

[15] T.M. Kegel. The ISO 5167 Compliant Design Venturi—A Further Summary of Calibration Experience (B10-3)

[16] E. von Lavante, J. Yao. Numerical Investigation of Turbulent Swirling

Flows in Flow Metering Configuration (B9-4)

[17] Qiang Zhang, et al. Wet Gas Flow rates Metering Bases on Double Differential Pressures of Venturi Meter (B10-5)

[18] Chin-Cheng Feng, et al. Laminar Flow Element Type Flow Meter with Straight Glass Capillary (A2-5)

[19] Triage Cobu, et al. Modeling Laminar Meters for Process Gases (A2-1)

[20] Michael Reader-Harris, et al. The Effect of Contaminated Orifice Plate on the Discharge Coefficient (B4-5)

[21] M. Schrader, et al. The “RCT” : Two Functions Integrated in One for Pressure Regulation and Gas Flow Metering (B7-4)

[22] William R. Johansen. The Effect of Using Real Gas Absolute Viscosity and Isentropic Exponent on Orifice Flow Measurement: Proposed Adoption of REFPROP 8.0 as A Standard for the Natural Gas Industry (B8-1)

[23] Casey Hodges, et al. Cone DP Meter Calibration Issues (B4-2)

[24] Richard Steven, et al. 4” , 0.63 Beta Ratio DP Meter Wet Gas Performance (B4-4)

[25] Jim Storer, et al. A Mass Flow Meter Concept with Diagnostic Capabilities (B7-3)

[26] Casey Hodges. New Differential Producing Meters Ideas, Implementation, and Issues (B4-1)

[27] Shao-feng Li, et al. The Research of Correlation between Flow Coefficient and Diameter Error of Upper stream and Down Stream for Elbow Meter (P05-039)

- [28] Xian-ju, et al. The CFD Simulation and Experimental Research of the V Type Elbow Flow meter (B9-5)
- [29] Guo-xiang Zhou, et al. Study on the Test of Large-bore Flow Measurement Using FJPE-Type Gauging Pipes (B6-4)
- [30] Li-jun Sun, et al. Numerical Simulation and Experiment on Averaging Pitot with Flow Conditioning Wing (B10-2)
- [31] Jerker Delsing, et al. Low-Pressure Gap Discharge Ultrasonic Gas Flow meter (A5-2)
- [32] William Johansen, et al. The Development of Ultrasonic Meter Performance Diagnostic Methods Velocity Profile Ratio (A4-2)
- [33] T. Cousins, et al. The Production of Swirl in Oil and Method of Compensation in Multi-path Ultrasonic Flow meters (A4-4)
- [34] Lei Sui, et al. Ultrasonic Flow meter for Accurately Measuring Flare Gas over a Wide Velocity Range (A4-5)
- [35] Bryan Trostel. Ultrasonic Flow meter Calibration Intervals (A4-1)
- [36] Iryna Gryshanova. A Computational Investigation of Flow meter (B9-1)
- [37] Chi Wang, et al. Research on Accuracy Evaluation Method of Ultrasonic Flow meter Used in Large Conduits (A10-4)
- [38] Tao Meng, et al. Analysis of Flow Field Characteristics in the Hydro-turbine Intake Penstock of Three Gorges Power Station by Model Experiment (B3-4)
- [39] Jon G. Drenchen, et al. Ultrasonic Flow meters Diagnostic and the Impact of Fouling (A4-3)
- [40] Dan-dan Zheng, et al. Installation Effects of Ultrasonic Flow meter in Single Bend Pipe (A10-2)
- [41] Liji Huang. MEMS Mass Flow Technology: Striving for 30 Years (P07-048)
- [42] Liji Huang. All Electronic MEMS Flow Meter for City Gas Application (A8-2)
- [43] Yahong Yao, et al. MEMS Thermal Time-of-flight Flow Meter (A8-3)
- [44] Wenhong Deng, et al. Calibration and Verification of MEMS Mass Flow Meters for Custody Transfer (A8-1)
- [45] K. Peng, et al. Cost Effective MEMS Mass Flow Meters (P09-52)
- [46] J. Luo, et al. Design of Miniature Disposable Flow sensors for Medical Applications (P08-51)
- [47] Changhua Mou, et al. Gas Flow Measurement and Controllers (A8-4)
- [48] Changhua Mou, et al. Novel Thermal Sensor for Gas Flow meter Measuring (B7-1)
- [49] Richard Fetell. The Specification, Selection and Use of Liquid Flow Rate Measuring Devices (P03-018)
- [50] Vivek Kumar, et al. Fluid-Structure Interaction (FSI) Simulation on the Sensitivity of Coriolis Flow Meter under Low Reynolds Number Flow (A9-2)
- [51] F. Koschmieder, et al. Compensation Method Applied to Coriolis Mass Flow Metering (A9-5)
- [52] Li-Jun Wang, et al. Experimental Investigation on Zero Drift Effect in Coriolis Mass Flow meters (A9-1)
- [53] Tao Wang, et al. Extending Flow Measurement Capacity with the Straight

tube Coriolis Technology (A9-4)

[54] I. D. Velt, et al. Electromagnetic Flow meters with the Governing Boundary Condition on the Channel Wall (P02-010)

[55] J. V. Mikhailova, et al. Measurement of Metallic Weight of The Pulp by the Electromagnetic Method (B3-5)

[56] I. D. Velt, et al. Practical Application of Electromagnetic Flow meters (B10-1)

[57] N. V. Terekina, et al. Physical Bases of Simulation of The Electromagnetic Flow meters (P04-037)

[58] Julia Mikhailova, et al. Numerical Simulation of Electromagnetic Flow meter on GPU (P01-008)

[59] B. H. Peng, et al. Performance of Vortex Shedding from a Circular Cylinder with a Slit (B2-4)

[60] Hui-Min Shen, et al. Development

of a Vortex Flow meter with Good Performance at Low-flow Rate (B2-2)

[61] M. Akresh, et al. Extended Measurement Range of Vortex Flow meters in High Turbulent Range (B2-1)

[62] E. von Lavante, et al. Effects of Upstream Butterfly Valve on the Accuracy of a Vortex Flow meter (B2-3)

[63] Jiann-lin Chen, et al. Numerical Simulation on the Flow Field of a Vortex Flow meter with Various Upstream Condition (B2-5)

[64] Zhen don Shi. Influence Factor of Verification of the Ultrasonic Heat Meter (P11-101)

[65] He-ming Hu, et al. Numerical Approach to Estimate the Accuracy of Ultrasonic Flow meter under Disturbed Flow Condition (A10-1)

[66] Richard Steven. Diagnostic for Venturi Flow meter (B10-4)