

低碳时代的流量测量

Flow Measurement in Low Carbon Era

李传经 郭爱华

(上海工业自动化仪表研究院,上海 200233)

摘要: 虽然科学家对地球变暖的进展速度有不同的预测,但对于碳排放是未来可能发生的气候灾难的主要成因则没有争议。碳排放交易市场已经在世界范围内初步形成,而交易额和计价主要还是依据计算,而不是碳排放量的计量。为了引起学术界对今后十几年将变得越来越重要的碳排放流量计量技术领域有所重视,并做好技术储备工作,现就这一技术领域的国际现状、发展趋势及相关国际技术规范等做全面阐述;并介绍在经济活动中大量排放的二氧化碳、火炬气、烟道气等温室气体的流量计量技术和仪表,希望对于节能减排工作和流量计量的发展有所裨益。

关键词: 低碳 碳排放 碳交易 温室气体 流量计量技术

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Abstract: Even though scientists comment on the causes of global warming with different points of view, nevertheless, there is no difference of opinions that carbon emissions play the major role for the would-be climate disaster. In the light of the formation of carbon transaction worldwide in recent years, the volume of trade and pricing are determined mainly according to indirect calculations instead of direct flow measurement for carbon emission streams. To draw readers' attention to flow measurement of carbon emissions, this paper describes the newly-developed technical domain concerning carbon emission reduction which would be more important in coming decades. Also, critical issues are mentioned including the current situation, tendency, relevant international standards as well as particular flow metering challenges in which measurements for carbon dioxide, flare gas, stack gas are stated respectively. The authors expect that their work would be valuable for the state policy concerning energy-saving and emission reduction.

Keywords: Low carbon Carbon emissions Carbon transaction Greenhouse gas Flow measurement technology

0 引言

中国国家气象局气候中心副主任罗勇表示,据科学家预测,未来 50 ~ 100 年人类将生活在一个持续变暖的世界。由于人类活动的影响,21 世纪温室气体和硫化物气溶胶的浓度增加很快,未来 100 年内全球温度将迅速上升,全球平均地表温度将上升 1.4 ~ 5.8 °C,导致海平面上升 0.8 ~ 2.0 m。据估计,到 2050 年,我国平均气温将可能上升 2.2 °C,上海地区和东部沿海的部分地区将成为一片泽国。各国只有切实按照 1997 年在联合国框架下通过的《京都议定书》执行温室气体的减排,自觉进入低碳生活方式,才能避免环境灾难的发生。

在经济活动中,发达国家有更多的义务去大幅度降低温室气体的排放。为了保持经济发展进程,发达国家不可避免地要从不发达国家购买他们有盈余的碳

排放指标,事实上碳排放交易市场已经形成。目前,碳排放交易的计价和交易额主要是根据化学反应计算的,而具有贸易计量性质的碳排放计量必将成为交易的重要依据;同时,为了降低碳排放,在节能减排技术领域中流量计量的重要性将进一步提高。

1 无所不在的碳足迹

碳足迹指人类生活、经济活动、产品和服务在运行周期内的“碳耗用量”,也就是燃烧化石燃料(主要为煤、石油和天然气)或消耗其他燃料的二氧化碳当量(CO₂e)。对于碳耗用量的计算,目前已经开发了基于 Android 或其他操作系统的计算软件,目的是提醒人们在日常生活中有意识地降低碳排放量。大宗碳排放交易以流量计量为依据。本文将主要讨论高耗能工业如化工、冶金、发电领域的碳足迹定量及相关技术。

2 世界碳排放的现状

目前,大部分碳排放量源自化石燃料的燃烧,主要分布在发电、供热、交通和制造业,如图 1 所示^[1]。温室气体主要以烟气形式和明火燃烧形式通过火炬、烟

修改稿收到日期:2012-11-26。

第一作者李传经(1936-),男,1960 年毕业于天津大学机械工程系,获学士学位,教授级高级工程师;主要从事流量测量技术和流量测量装置的研究。

囱等排向大气。30年来我国经济发展迅速,但主要以大量消耗能源和牺牲环境品质为代价取得。

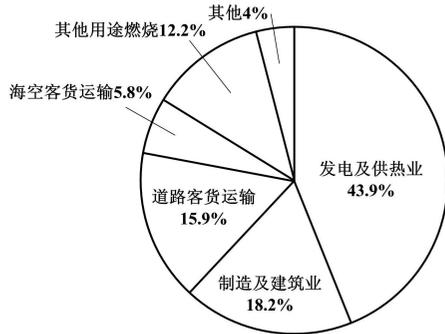


图1 碳足迹分布

Fig. 1 Distribution of the carbon footprints

如图2所示的是2006年世界各国碳排放情况^[2]。

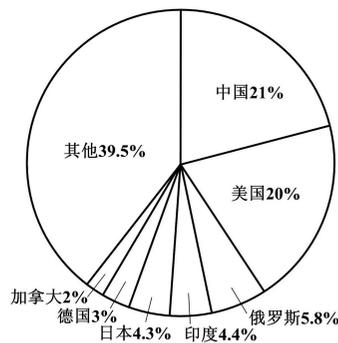


图2 2006年各国碳排放量分布

Fig. 2 Distribution of carbon emissions of countries in 2006

从图2可以看出,我国产出的单位能耗指标仍然远远落后于日本、美国等先进工业国家,总体上还是以粗放型经济为主。虽然节能减排是世界各国的共同任务,但对我国具有特殊的重要性和迫切性。

3 流量学科将面临的新技术领域

流量学科将面临的新技术领域主要包括:碳捕捉和封存(carbon capture and storage, CCS);强化采油(enhanced oil recovery, EOR);烟道气流量计量(flow measurement of stack gas);火炬气流量计量(flow measurement of flare gas);适用于碳排放的流量计量仪表;适用于碳排放的流量仪表的试验和标定。

4 碳捕捉和封存

碳捕捉和封存(CCS)过程由三级组成,即捕捉、输送和封存。为了确定有关流量测量的对策,在此先简单介绍CO₂的物理性质,进而对CCS过程做简要描述。CO₂的三相图如图3所示^[3]。

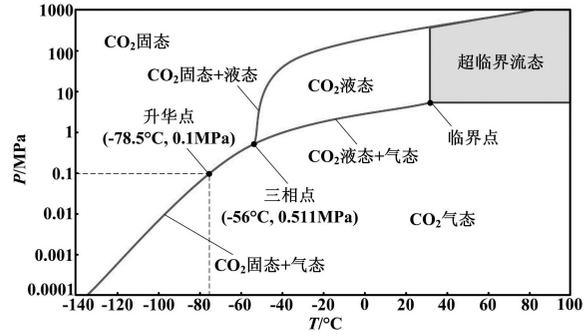


图3 CO₂的三相图

Fig. 3 Triple-point diagram of CO₂

CO₂的三相图给出了在不同温度、压力下CO₂的存在状态。在此需要特别说明的是少见的超临界流体(super critical fluid, SCF)。在超临界流态下,CO₂既不是液体也不是气体,而是不稳定的介于气、液之间的流体。这种流体给CO₂的流量测量带来很多困难,因此在CCS过程中应尽量避免超临界状态(SCF)。

4.1 碳捕捉

简言之,碳捕捉就是从高耗能产业的排放物中提取和富集CO₂,防止其排放到大气而成为温室气体的主要组成成分。碳捕捉工艺会导致总成本的提高,因此企业常常在碳捕捉和花钱购买排放指标间举棋不定。高昂的碳捕捉成本是减排的主要瓶颈,流量测量将在成本评估中扮演重要角色。我国已经在上海石洞口第二电厂、北京热电厂和内蒙神华煤液化公司等八个项目中开展了CCS研发或演示装置建设。

碳捕捉方法目前主要有三种,即燃烧后捕捉(post-combustion capture)、燃烧前捕捉(pre-combustion capture)和富氧燃烧法(oxy-fuel capture)。

燃烧后捕捉,即从烟道气中用溶剂吸收和富集CO₂,这将导致烟道气处理成本提高10%~30%(成本因使用溶剂的价格和效率不同而有所不同)。采用这种工艺的CO₂提取率较低。

燃烧前捕捉,即在燃烧前就减少或捕捉CO₂。该工艺适用于采用天然气和煤制气混合燃料的发电厂。煤制气中的CO经历加水反应成为CO₂,并从甲烷中分离出来,提取率高达90%~95%。剩下的只有纯净的甲烷,在燃烧时不产生CO₂。燃烧前捕捉的缺点为前期投资很高,只适用于以天然气或煤制气为燃料的发电过程——整体煤气化联合循环发电系统(integrated gasification combined cycle, IGCC),而且需投资昂贵的杂质洗涤设备,以便将氮氧化物(NO_x)的排放减少至最低。

富氧燃烧法是目前较有前途的捕捉工艺,是“燃

烧后捕捉”工艺之一。其资金投入和捕捉率(可达100%)均可满足成本核算的要求,即经济上是合算的,然而,初期投资也较高且技术复杂。据估计,工业化规模的碳捕捉在2020~2025年期间才可能实现。

4.2 碳输送

管道输送气态CO₂是目前碳输送的主要形式,美国每年通过2500 km的管道输送4×10¹² t CO₂,流量测量遭遇大口径、高压、低温等极端条件。英国在CCS技术方面发展领先,其北海废弃油井提供了理想的CO₂封存地点。由于在输送途中CO₂状态将随温度、压力的变化而转换,因此长输管线必须配置大量压缩和测控设备,不言而喻,投资是巨大的。据估计,今后10年CCS的投资将达1000亿美元;2010~2050年期间投资可能高达50000亿美元。这给流量测量带来新的挑战,也带来前所未有的机遇。

4.3 碳封存

碳封存可大幅度降低碳排放量,但必须绝对安全和确保CO₂上千年内无泄漏。常用的封存点有以下三种:废弃油气井、深层盐矿含水层、无开采价值的深煤层。

此外,英国在北海油气田进行了注入CO₂的强化采油技术(EOR)试验,所注入的CO₂被永久封存;同时增加了油田的产量,这在一定程度上抵消了CCS的成本。流量测量在碳封存技术中也有较多应用,如在注入量的计量、检漏等方面均可发挥重要作用。

5 CCS对流量测量的新挑战

5.1 流量测量的重要性

CCS过程的各个环节必然涉及大量流量测量技术问题,仅就经济方面考虑,流量测量也是至关重要的。以英国为例,目前英国主要大型火电站每年约排放2200万t CO₂,2013~2015年期间碳交易价格预计为每吨30英镑,流量测量不确定度相差1%,每年碳交易价格就约660万英镑。

目前,英国已经制定了较完善的CCS计划,预计到2015年将捕捉25%的碳排放,2025年将捕捉100%的碳排放量。我国2011年消耗35亿t标准煤,碳排放量为英国的12倍,CCS工作可以说仅在起步阶段,包括流量测量在内的过程测控行业既存在巨大的发展空间,又面临严峻的挑战。

5.2 CCS流量测量面临的难题

5.2.1 不纯净的CO₂流

在CCS过程中,现有技术几乎不可能捕捉到纯度

为95%的CO₂,图3所示的是纯CO₂三相图,实际的三相图与此有较大出入。如果不能确切掌握CO₂混合流体的相、密度、压缩系数等物理参数,流量测量的精确性会受到很大影响,因此需要对实际的CO₂流体建立准确的物性模型,以得到真实的三相图。据此可以选择合适的流量计并予以正确设定,方可获得尽可能高的测量精度。

5.2.2 声学衰减

对于在CCS过程中普遍应用的超声流量计,CO₂的声学衰减不但影响液体流量的测量,而且严重影响气体流量的测量。本质上,声学衰减源于分子弛豫现象,其影响程度取决于流体的相、密度、温度及压力等参数。流量学科在这方面的研究还很不充分。

5.2.3 腐蚀

干燥纯净的CO₂没有腐蚀性,但实际流体中含有氮氧化物(NO_x)、硫化氢(H₂S)和二氧化硫(SO₂)等杂质。这些组分会在不同程度上对管道、设备和流量计产生腐蚀,因此必须慎重选取合适的材料并采取防腐措施。

5.2.4 超临界流(SCF)

SCF的本质是流体在高于其临界温度和临界压力下的特殊状态。在较低温度下,SCF的性状接近液态;在高于临界压力而低于临界温度时,液态的CO₂转变为“密相液”状态;当温度上升时,流体变为气体相似物;同样,当压力上升时,密相流也会从气体相似物变为液体相似物。三相图显示SCF与包含气液的两相流体有清晰的界限。当流体处于SCF相且正好在临界边缘时,会出现一种均相的SCF和密相液体的混合物。这种处于超临界区的均相流体可以进行流量测量,但迄今人们对于适于SCF的流量计选用和测量精确度还知之甚少。

5.2.5 大口径管流测量

由于CCS过程中CO₂的输送量一般都很大,管道口径常达DN300,甚至DN1000,这使得流量计的选取余地变得很有限。

5.2.6 测试及校准设备

虽然适用于CCS过程的测试及校准装置与普通流量测试设备没有本质区别,但是有必要考虑测量介质的物性差别所引起的测量误差^[4]。目前,采用气态或液态CO₂,甚至SCF作为介质的测试设备尚未出现,但为了更准确地复现CO₂的物性,偶有采用轻质油的装置校准CO₂流量仪表。鉴于CCS过程中经常出现两相流,油-气两相流装置也用于校准两相流流量仪表。

在碳捕捉过程中,烟道气和火炬气的流量测量不可避免,常用的仪表多为大口径流量计,包括速度-面积法流量计(如皮托管、热膜式等)、非插入式流量计(如夹装式超声流量计)、互相关流量计(如光流量传感式)等。这些仪表的校准必须采用计量风洞。目前,许多国家都建立了高精度的计量风洞,如美国 NIST、德国 PTB、英国 NEL 以及我国 NIM 等国家级权威试验室都有基于激光多普勒测速(laser Doppler anemometry, LDA 或称 laser Doppler velocimetry, LDV)技术的校准装置。常用的计量风洞有“开环”和“闭环”两类,基准多数为 LDA 装置,最高风速很少超过 40 m/s。

5.2.7 CCS 过程中采用的流量仪表

① 差压式流量计

孔板,具有至少 50 年的使用实践和 30 年的强化采油技术(EOR)领域应用经验,还有成熟的国际标准 ISO 5167。在已知密度和黏度的情况下,孔板在单相流 CO₂ 测量中的不确定度可以期望达到 1%;当已知温度、压力等条件时,即使测量超临界流也可以取得可接受的测量结果。孔板的问题仍然在于较大的压损,这可能导致在测量超临界流(SCF)时析出气相物,造成较大的测量误差。

文丘里管,除了压损较小,文丘里管孔板并没有很多优点。因此,迄今在 CCS 过程中还没有使用文丘里管的记录。

皮托管流量计,由于有成熟的技术规范和使用经验,至今仍被广泛应用于各个领域,包括 CCS 过程。由于有国际标准 ISO 10780 的支持,在英国碳排放流量测量中皮托管是首选的流量仪表。为了克服易被堵塞和点流速测量的局限性,已经有各种皮托管改进型投入使用,如 S 型皮托管、矩形管道皮托管和均速型皮托管等。

V-锥流量计,被认为是文丘里管的变型设计,具有与文丘里管近似的优缺点。该流量计有测量两相流的记录,但在 CCS 中还没有应用。使用 V-锥流量计前必须逐台标定,且标定导致成本上升,但即便如此它也不可能达到孔板的测量精度。

② 速度式流量计

涡轮和涡街流量计极少在 CCS 过程中使用,超声流量计在 CCS 中虽然有所使用,但 CO₂ 对声波的强烈吸收成为其应用的主要瓶颈。管外安装式的超声流量计则有较好的应用前景。

③ 科里奥利质量流量计

位于德克萨斯州西部的 Yates 油田积累了科里奥

利质量流量计(Coriolis mass flowmeter, CMF)用于 CCS 过程的成功经验,在 EOR 工艺和碳交易计量中发挥了优势。CMF 最突出的优点是可以直接获得质量流量测量结果,甚至可以测量两相流流量,但测量精度有所下降;其局限性在于目前最大口径只达到 DN300,在测量大口径管流时不得不采取并联的布局,增加了测量成本。

5.2.8 CCS 流量测量的技术要求和规范

欧盟排放交易计划(EU emissions trading scheme, ETS)规定,各国必须对碳排放量进行报告、数据认证和排放管理,其流量测量的性质为贸易计量,因此对测量不确定度要求较严格。由于以“吨”进行交易,需同时测量温度、压力、密度、组分等参数;同时由于流量仪表安装条件、大管径、组分多变等不利因素,使烟道气和火炬气流量计量成为本学科中的难题。欧盟、加拿大和美国已经立法执行十分严格的碳排放计划,特别是 ETS 已经从 2008 年起进入第二阶段,意味着更严厉的 CO₂ 排放计量文件《监管及报告导则》(monitoring and reporting guidelines, MRG)已经付诸实施,碳排放计量更具法制计量色彩。导则规定,年排放量在 50 ~ 500 kt 的大型燃烧企业属 B 类排放企业,监督及报告排放总量的测量不确定度不得劣于 12.5% ($k=2$)。这个要求看似不高,但导则又规定, B 类企业应该尽可能提高其碳排放计量的水平,以达到最高等级。所谓“最高等级”是指总排放量计量的不确定度要达到 7.5%,而 CO₂ 计量的不确定度应不劣于 2.5%。美国环境保护协会(US Environmental Protection Agency, EPA)会同美国海洋能源管制局(Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, BOEMRE)发布了强制性的条令 CFR30 和 CFR40,要求企业定期上报温室气体的排放量,包括 CO₂、N₂O、CH₄等;CFR30 还要求墨西哥湾日产超过 2 000 桶的采油平台以不确定度优于 5% 的计量装置测量火炬和放空燃气的排放量。总之,碳排放的流量计量已经成为本学科的热点,各国计量权威机构(如欧盟 ETS、英国 BSI、美国 API 等)被委托介入这一法制计量的新领域,代表政府执行环境保护的有关法令^[5]。

5.3 烟道气和火炬气的流量测量^[6]

5.3.1 具有挑战性的流量测量技术要求

① 特大口径管流:不同于 CCS 输送流量测量,烟道气和火炬气的管道常常具有特大管径,甚至有达到 4 m 的管径,截面形状也不完全是圆形。

② 不理想的流量计安装条件:在工厂设计初期,

管流的测量有时并未被考虑,安装流量计时常常不能满足前后直管段要求。

③ 没有流量计安装位置:工艺管道上不允许为流量计安装进行改建,只能考虑采用非插入式安装的流量计。虽然超声流量计在大管径测量和声衰减方面有一定的局限性,但在特定情况下管外夹装式超声流量计成了唯一选择。

④ 低流速:常常发生特低流速,以致某些流量计不能正常工作。

⑤ 气体组分不稳定:由于工艺条件多变,气体组分及其他物理参数不稳定,使得对组分敏感的流量计无法正确测量。

⑥ 气体中多粉尘和杂质:过程工艺产生的杂质导致流量计工作失常甚至损毁。

5.3.2 流量测量技术和流量仪表的选取

上述测量条件使得流量计的选取余地较小。原则上仍然可能在常规流量仪表中选取堪当重任的流量计,并尽可能改善测量条件,取得可接受的测量结果。本文将介绍部分适用于烟道气和火炬气的流量测量技

术和仪表。

① 采用互相关原理的流量测量。在多相流流量测量中,互相关技术早有应用,但迄今市场上很少有相应产品。究其原因,互相关技术仅仅是诸多流量测量原理之一,其技术较为复杂,应用条件多种多样,几乎不可能开发出像孔板、涡街那样的通用流量仪表。但在 CCS 应用和碳排放测量中,互相关技术却有独特的适用空间。

② 非插入测量技术。如前所述,很多高耗能企业在设计初期并未考虑排放管流的测量,以致流量计无法安装,管外安装型的超声流量计或伽马射线流量计等成为仅有的选择。目前,美国 GE(相关法)和 Siemens(宽波束法,wide beam)集团都有超声式产品。当然,并非所有应用问题均可得到满意解决,还需视具体工况而定。除了这两种主要的非插入式流量计,还有基于核辐射、声纳、声学、断层扫描等原理的传感方法。利用这些方法,再结合互相关技术,可形成多种非插入式流量测量仪表。非插入式流量计选型如表 1 所示。表 1 中的点数表示适用程度。

表 1 非插入式流量计选型

Tab. 1 Selection of non-insertion flow meter

所采用的技术	可测参量							适用流体					
	平均流量	声速	密度	固体量	管壁厚度	流型	区域流量	液体	油及砂	气体	湿气	两相流	多相流
超声式	·	·						····		··			
脉冲回声式					·			·		·	·	·	·
声纳式	·	·						·		·	·		
核辐射式	·		·					·				·	····
声学式	·			·				·	·		·		·
断层扫描式	·					·	·					·	·

③ 示踪法标定技术。多数大口径流量计安装后就不能拆卸,更不可能安装标准表,导致今后的周期检定无法解决。基于 ISO 4053 的示踪法标定技术可发挥不可替代的作用。扩散稀释法的原理为在烟道上游注入已知浓度(C_i)和流量(Q_i)的示踪气体,如很适合作为示踪剂的无毒、无臭、化学性质稳定的六氟化硫气体(SF_6);然后在下游提取充分混合的气样,并测量其中示踪气体的浓度(C_m);最后按照式(1)计算,即可获得烟道气体的总流量(Q_m):

$$Q_m = kQ_i C_i / C_m \quad (1)$$

式中: k 为修正系数。

英国 NEL 认为,如果仔细控制各项影响量,示踪法测量不确定度可达 4%,可以标定烟道流量计。示踪法中的标记法原理更为简单,即在已知距离内测量示踪物的传导时间差,得到流速;然后乘以管道面积,

即可获得烟道总流量。

④ 采用互相关原理的光传感器方法^[7-8]。众所周知,互相关原理简言之就是测量沿管道方向两个距离已知的两点之间的流体特征物的渡越时间,然后计算得到流速,再乘以管道截面积,即可获得总流量。采用互相关原理的关键是如何最大化流体特征物在两个测点的信号的相关度。光传感器互相关流量计是美国一家公司近年推出的产品,其原理基于光学闪烁场现象,即当平行光束以 90°入射角从管道一侧通过被测流体时,在另一侧接收到的是随机扰动的闪烁场信号。在自然界,接近沙漠地平线处可看到扰动的“闪烁光场”;夏天的沥青公路表面也可以发现这个因空气温度及密度变化引起的气体扰动现象。“闪烁光场”在光接收器上的成像如图 4 所示。光源可以是红外光,也可采用对被测介质穿透性更好的可见光源。

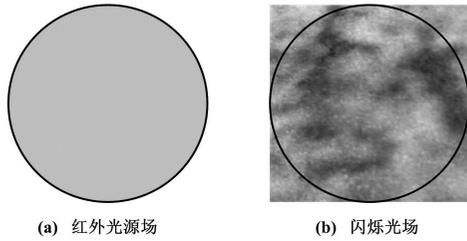


图4 闪烁光场成像图

Fig. 4 Imaging of the flickering light field

光流量传感器(optical flow sensor, OFS)互相关流量计的原理如下。光接收器 A 和 B 的闪烁信号形态有很小的差异,对闪烁光场 A 和 B 的信号建立数学模型,继而建立互相关数学模型并求解相关函数,得出它们的相关度。经过多次采样和计算,找到相关度的最大值,此时可将一个像场“定位”,并测出流体流经 A、B 两个接收器的渡越时间,然后算出流速,再乘以管道截面积即可得到管道总流量。该流量计的原理如图 5 所示。

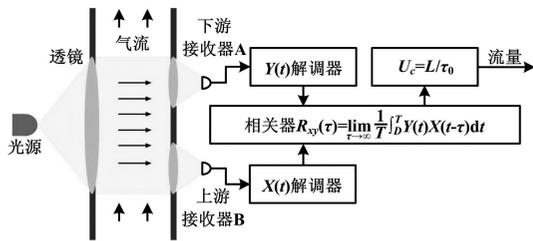


图5 光传感器互相关流量计原理图

Fig. 5 Principle of the cross correlation flow meter based on optical sensor method

采用互相关原理的光传感器流量计具有以下特点:与被测气体的温度、压力、密度、湿度和阻光度无关;真正的非插入式安装,光线可通过“窗口”入射;测得的流量是平均流量;经美国 NIST 检定,仪表准确度可达 $\pm 2\%$;光源和接收器的安装位置精度不影响测量结果;无可动部件,结构坚固,没有防爆要求。

6 结束语

我国行政及计量部门应对碳排放的贸易计量特性予以重视,应预见到十年内碳排放计量将和石油、天然气等能源的贸易计量同样重要。虽然发达国家对温室

气体的减排有更大的义务,但 CCS 应用和碳排放计量有利于我国本身的可持续发展,与发达国家减排工作的优劣没有直接关系。不存在专用于 CCS 过程和碳排放的流量仪表,所有现存的流量仪表在测量条件适合时,都可以用于 CCS 过程和碳排放计量。在 CCS 过程和碳排放计量应用中,主要难点在于特殊的工况,而不是寻求专用的“碳排放流量仪表”,因此开展 CCS 流量测量应用技术研究远比新型流量计的开发研制重要。其实,“重开发,轻应用”也是检测仪表行业中长期存在的问题。由于欧盟在“控碳”方面有很多实践及严格的要求,因此加强对欧盟所属国际组织及相关技术规范的了解十分必要。美国在 CCS 和 EOR 技术方面有较丰富的经验,并已取得实在的经济效益,借鉴他们已取得的经验和教训有助于提升我国在节能减排领域的流量测量技术水平。

参考文献

- [1] 碳足迹[EB/OL]. [2012-08-30]. [http://image. baidu. com/i?tn=baiduimage&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&word=%E7%A2%B3%E8%B6%B3%E8%BF%B9&ie=utf-8](http://image.baidu.com/i?tn=baiduimage&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&word=%E7%A2%B3%E8%B6%B3%E8%BF%B9&ie=utf-8).
- [2] EIA, 国都证券研究所. 2006 年全球碳排放分布[EB/OL]. [2012-08-30]. [http://image. baidu. com/i?tn=baiduimage&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&word=%CC%BC%C5%C5%B7%C5](http://image.baidu.com/i?tn=baiduimage&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&word=%CC%BC%C5%C5%B7%C5).
- [3] Leslie G. CCS metering challenges and options[C]//TÜV NEL, Oil & Gas Seminar, 2009.
- [4] Espina P. Report of special test of air speed instrument[R]. United States Department Commerce, National Institute of Standards & Technology, Gaithersburg Maryland, 2001.
- [5] Fré R D, Deun J V, Swaans W. Measuring diffuse emissions from industrial buildings: volume flow measurement[EB/OL]. [2012-08-15]. [http://www. vito. be/VITO/OpenWoDocument. aspx?vovitoguid=11C22DAA-0B1B-4F2F-B452-609D4085510C](http://www.vito.be/VITO/OpenWoDocument.aspx?vovitoguid=11C22DAA-0B1B-4F2F-B452-609D4085510C).
- [6] Hunter L, Smelt F. A review of flow measurement devices for use in stack emissions monitoring[J]. National Measuring Office, 2009.
- [7] Wang T. A new approach to combustion air monitoring[R]. Optical Scientific Report 0306, USA.
- [8] Wang T I, Williams D. Optical flow sensing for flare stack and process control applications[EB/OL]. [2012-08-10]. [http://freedownloadb. com/pdf/optical-flow-sensing-for-flare-stack-and-process-control-applications-18461476. html](http://freedownloadb.com/pdf/optical-flow-sensing-for-flare-stack-and-process-control-applications-18461476.html).

《自动化仪表》 中文核心期刊 中国科技核心期刊

邮发代号: 4-304; 2013 年定价: 15 元/月, 全年价: 180 元; 国外代号: M 721

欢迎赐稿, 欢迎订阅, 欢迎宝贵建议, 欢迎惠刊各类广告