



燃气计量

RANQI JILIANG

邓立三 编著

王自和 主审



黄河水利出版社

燃 气 计 量

邓立三 编著
王自和 主审

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书共分五大部分,较全面系统地介绍了计量管理基础、流量计量、压力计量、温度计量和气体成分计量等知识。在计量管理基础方面,重点介绍计量基础知识和测量不确定度的评定;在燃气流量计量中,重点介绍各种常用的流量计量仪表实用技术,其中不乏最新的流量测量技术;在压力计量中,仅介绍燃气计量工作中常用的压力仪表基础;在温度计量中,也只介绍几种常用的温度测量仪表;在气体成分计量中主要介绍可燃气体报警仪器和气相色谱仪等知识。

本书可以作为城市燃气、石油、化工、计量技术机构、计量仪表制造厂商等领域的技术人员以及高校相关专业的培训和学习参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

燃气计量/邓立三编著. —郑州:黄河水利出版社,
2011. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0137 - 7

I. ①燃… II. ①邓… III. ①城市燃气 - 计量 IV.
①TU996

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第229161号

组稿编辑:王琦 电话:0371-66023343 E-mail: wq3563@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:850 mm × 1168 mm 1/16

印张:29.25

字数:810千字

印数:1—2 800

版次:2011年11月第1版

印次:2011年11月第1次印刷

定价:105.00元

广告许可证号:4100005000001

前 言

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。1985 年国家颁布实施了《中华人民共和国计量法》,随后陆续出台了一系列相关计量法规和规章,基本形成了一整套完整的计量法律法规体系,同时还建立了相关的计量监督管理体系和计量技术法规体系,要求各行各业必须遵照执行。

城市燃气作为一种新型清洁能源,日益受到国家的重视,在国内各大中城市普遍使用,燃气计量是城市燃气企业的一个重要的基础管理工作,主要涉及贸易结算和安全防护等方面。为改善计量管理水平,促进计量技术进步,提高经济效益,杜绝安全事故,必须普及有关燃气计量知识,了解国家相关计量法律法规,积极探索新技术应用和推广,促进企业和社会的和谐发展。

为加强计量管理,提高经济效益,保护公共安全,急需一本燃气计量方面的基础读本。本书围绕燃气计量相关知识,全面系统介绍了计量管理基础、流量计量、压力计量、温度计量和气体成分计量五大部分内容。在计量管理基础方面,重点介绍计量基础知识和测量不确定度的评定;在燃气流量计量中,重点介绍各种常用的流量计量仪表实用技术,其中不乏最新的流量测量技术;在压力计量中,仅介绍燃气计量工作中常用的压力仪表基础;在温度计量中,也只介绍几种常用的温度测量仪表;在气体成分计量中主要介绍可燃气体报警仪器和气相色谱仪等知识。本书可以作为城市燃气、石油、化工等领域的技术人员以及高校相关专业的培训教材和参考资料。

本书由郑州华润燃气股份有限公司邓立三高级工程师担任主编,国家水大流量计量站王自和站长担任主审。本书编撰过程中,参考了国内多位专家教授的相关著作、文章及研究报告,得到了华润燃气及国内其他燃气同行的大力支持和帮助,得到各相关计量仪表生产单位的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,本书难免有大量不完善或错误之处,真诚欢迎广大读者提出宝贵意见,不吝赐教。

编 者

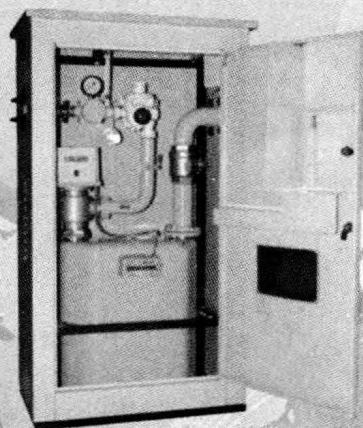
2011 年 5 月

Qw//krom 重庆前卫克罗姆表业有限责任公司

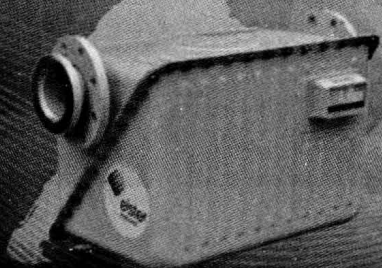
重庆前卫克罗姆表业有限责任公司是中国重庆前卫仪表有限责任公司和德国埃尔斯特公司于2001年1月共同投资组建的合资企业。是中国城市燃气协会常务理事单位，中国计量协会燃气工作委员会会长单位。是国内燃气表行业最早通过ISO9001和唯一通过欧洲标准EN1359认证的企业。公司主要产品包括：各种规格的民用、工业用及IC卡智能膜式燃气表、调压器、楼栋调压箱、调压计量箱、区域调压柜，气体精密检测仪等等。同时，公司产品荣获“中国名牌”和“产品质量国家免检”等称号。



智能表系列



调压计量箱



QK3000-BK系列、QK2000-G系列

地址：重庆市北部新区黄山大道中段69号 邮编：401121
电话：023-67602580 传真：023-67619960 网址：www.qwkrom.com

CHINT 正泰仪表

不断跨越的能源计量专家！

- 国际率先通过8000小时耐久性试验的燃气表生产企业；
- 国内率先全部通过荷兰NIMI实验室新的MID指令；
- EN1359: 1998/A1: 2006、EEC type approval(欧盟认证)、Dutch type approval(荷兰国家认证)、OIML(国际法制计量组织)；
- 世界500强企业意大利国家电力公司招标邀请企业；
- 华润燃气、中国燃气、中石油昆仑燃气、新加坡通达能源、新华联燃气等国内大型燃气集团供应商。

钢壳表 | 铝壳表 | 预付费表 | 远传表 | 工商业表 | 集抄系统

正泰集团 | 浙江正泰仪器仪表有限责任公司

地址：浙江省乐清市温州大桥正泰仪器仪表工业园 电话：0577-62877777-9293 传真：0577-62919800

全国统一免费服务热线：800-857-7777 400-817-7777 获取更多详细信息请登陆：www.chintim.com

* CHINT *、* 正泰 * 系中国驰名商标，属正泰集团（CHINT GROUP）所有



<http://www.hh-ic.com>

杭州鸿鹄电子有限公司
HANGZHOU HONGHU ELECTRON CO., LTD.

地址：杭州市拱墅区祥园路39号5幢 邮编：310011
电话：0571-88260206 88260208 传真：0571-88260203

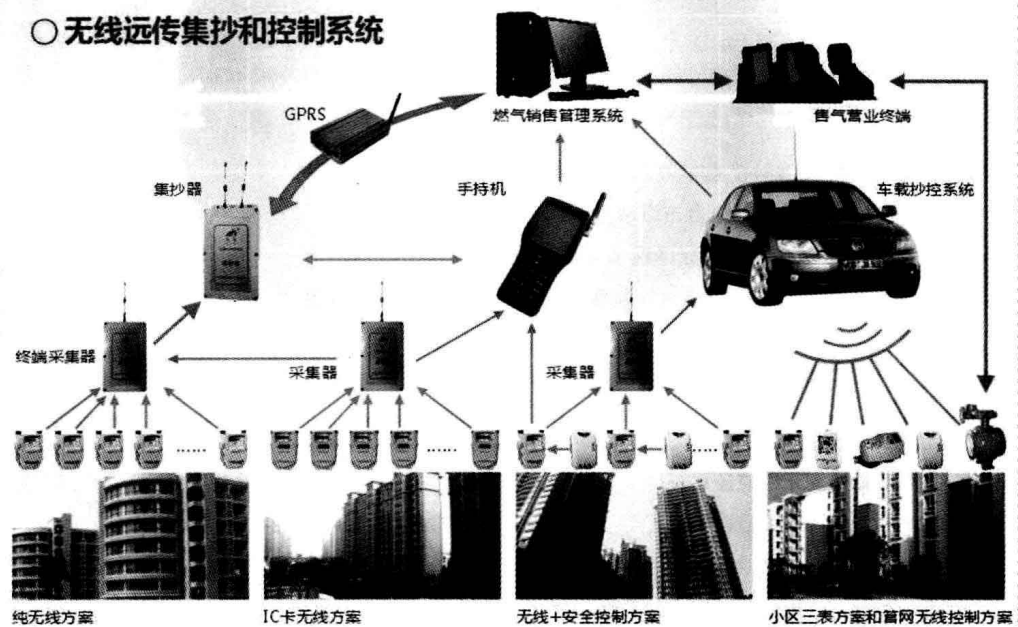
杭州鸿鹄电子有限公司成立于1998年，专业致力于IC卡式智能水表、气表系列产品和无线远传智能水、电、气三表系列产品以及三表和管网数据无线采集和控制终端产品的开发、生产、销售和服务于一体的综合性企业，可以为水、电、气等行业的用户和管理单位提供多付费方式、多种无线采集和管理方法、多行业数据集成的计量、采集和控制的智能化管理系统方案。

公司是“浙江省高新技术企业”、“浙江省软件企

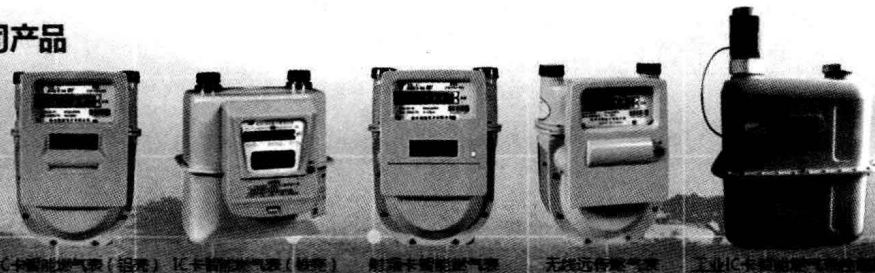
业”、“双软认定企业”和“拱墅区专利试点企业”，拥有30余项“国家发明和实用新型专利”和计算机软件著作权，并且是国家“计量远传抄控”等多个标准的编写起草单位。

公司生产全系列的IC卡工业和民用膜式燃气表，IC卡无线、纯无线民用膜式智能燃气表，以及基于采集器、公共网（GPRS）和车载采集等手段的表具和管网数据及安全的无线集抄和控制的系列方案。

○ 无线远传集抄和控制系统



○ 公司产品



IC卡膜式燃气表（铝壳） IC卡膜式燃气表（铁壳） 射频卡膜式燃气表 无线远传燃气表 工业IC卡膜式燃气表



军工品质 无线科技

闻：军工品质 无线科技 国家高新技术企业 标准编制单位 行业领军

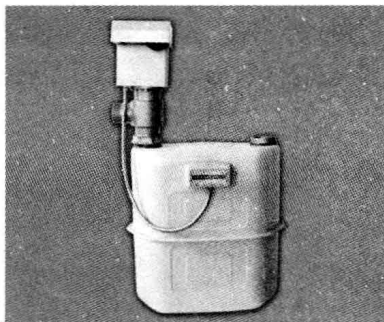
见：运行数量超过 150 万台市场考验 13 年 服务网络覆盖全国

学：量“体”裁“衣” 独成体系 有困难就找安然

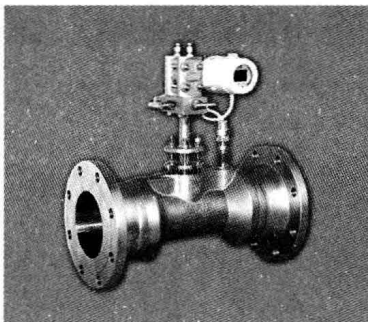
行：适时数据传输 远程阶梯气价调整 远程阀门控制 泄漏安全报警 省事省心 用了真行

用心打造 自有一套

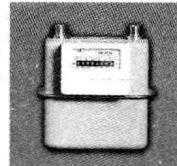
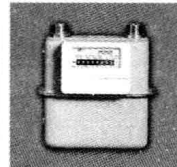
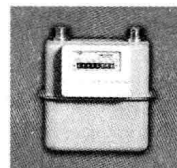
- 无线集抄智能抄表系统
- 工商业膜式表无线监控系统
- 工商业流量计无线监控系统
- IC 卡预付费无线集抄系统
- 气液联动阀无线监控系统
- 阴极保护测试桩无线监控系统



工商业膜式表无线监测终端



工商业流量计无线监测终端



户用无线集抄智能燃气表

郑州安然测控设备有限公司
ZHENGZHOU ANRAN I&C EQUIPMENT CO.,LTD.

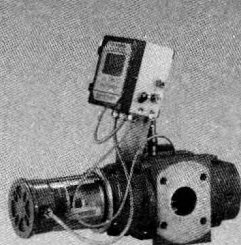
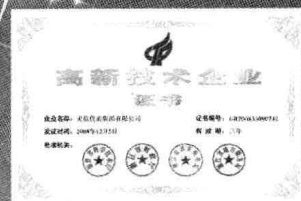
地址：郑州市航海西路 1 号 电话：0371-68623188 68629459 邮编：450006
网址：<http://www.zzanran.com> E-mail:anran@zzanran.com



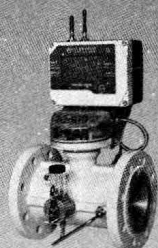
天信仪表集团有限公司
TANCY INSTRUMENT GROUP CO., LTD.

创国际品牌 树百年天信

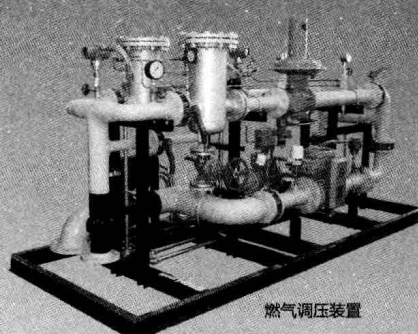
天信仪表集团有限公司是一家专业研发、生产、销售流量仪表和标准装置的国家高新技术企业，集团构筑了以工业计量仪表、燃气调压设备、电动机保护装置、软件开发为支柱的产业经营格局，打造了以“上海天信仪表”、“苍南天信科技”、“温州天信置业”和“苍南天信软件公司”等控股子公司组成的研发基地、生产基地并形成了完善的销售服务网络。目前，集团产品覆盖全国32个省市（自治区），在天然气计量产品中居全国首位。



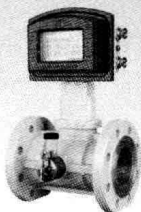
G型气体罗茨流量计



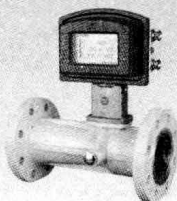
TBQ型气体涡轮流量计



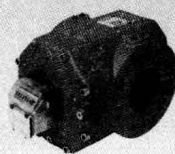
燃气调压装置



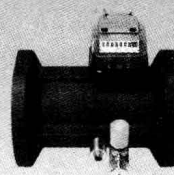
TBQZ型智能气体涡轮流量计



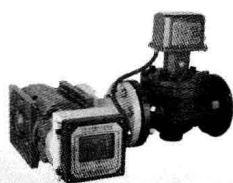
TDS型智能差压流量计



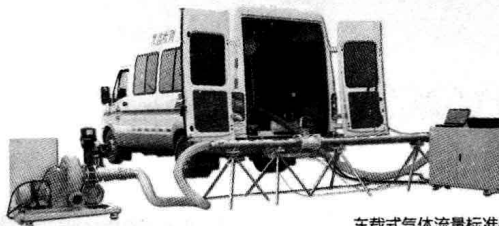
C系列气体罗茨流量计



C系列气体涡轮流量计



CPU卡气体工业流量计



车载式气体流量标准装置



地址：浙江省苍南县灵溪镇通福路3468号
电话：0577-68856655 68856699

邮编：325800
传真：0577-68856622

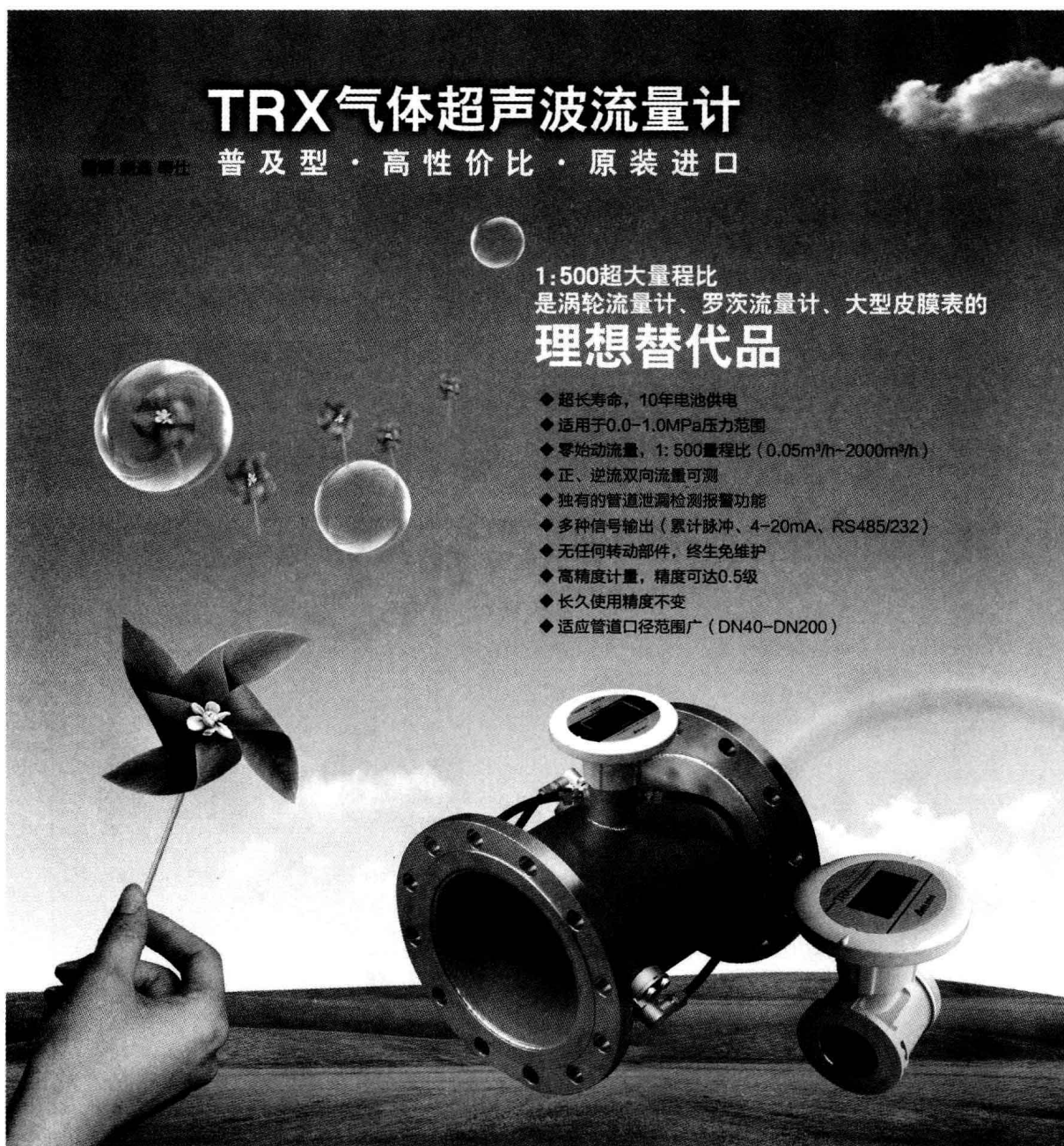
网址：www.tancy.com
电子信箱：tancy@tancy.com

TRX气体超声波流量计

普及型 · 高性价比 · 原装进口

1:500超大量程比
是涡轮流量计、罗茨流量计、大型皮膜表的
理想替代品

- ◆ 超长寿命, 10年电池供电
- ◆ 适用于0.0-1.0MPa压力范围
- ◆ 零始动流量, 1:500量程比 (0.05m³/h-2000m³/h)
- ◆ 正、逆流双向流量可测
- ◆ 独有的管道泄漏检测报警功能
- ◆ 多种信号输出 (累计脉冲、4-20mA、RS485/232)
- ◆ 无任何转动部件, 终生免维护
- ◆ 高精度计量, 精度可达0.5级
- ◆ 长久使用精度不变
- ◆ 适应管道口径范围广 (DN40-DN200)



S&S
センサーシステムアンドサービス



愛知時計電機株式会社



山东思达特测控设备有限公司 中国大陆地区特约销售

中国地址: 潍坊市经济开发区民主街2010号4A座 (新厂区)

潍坊市经济开发区友谊路600号 (老厂区)

电话: 0536-8668057 8668557(直线) 8668957 8661299(总机)

服务热线: 400-6691299

传真: 0536-8661599

网址: www.startdy.com

目 录

第一篇 燃气计量基础知识

第一章 城市燃气计量基本知识	(1)
第一节 城市燃气基本性质	(1)
第二节 天然气计量基础	(6)
第三节 提高燃气计量准确性的途径	(17)
第二章 计量管理基础	(25)
第一节 概述	(25)
第二节 量值溯源体系	(29)
第三节 测量误差与数据处理	(38)
第四节 计量的法制管理与监督	(49)
第五节 企业计量管理体系	(59)
第六节 常用计量术语和定义	(64)
第三章 测量不确定度评定	(78)
第一节 测量不确定度评定方法介绍	(78)
第二节 流量测量不确定度评定	(89)
第三节 压力测量不确定度评定	(92)
第四节 温度测量不确定度评定	(99)
第五节 气体成分测量不确定度评定	(104)

第二篇 流量计量

第一章 流量计量基础	(108)
第一节 流量计量基本知识	(108)
第二节 流量测量方法	(112)
第三节 流量计量量值溯源和传递	(117)
第四节 流量计量名词术语及定义	(124)
第二章 膜式燃气表	(132)
第一节 普通膜式燃气表	(132)
第二节 智能 IC 卡燃气表	(146)
第三节 智能型远传表	(153)
第三章 腰轮流量计	(161)
第一节 工作原理	(161)
第二节 结构形式	(162)
第三节 计量特性	(163)
第四节 腰轮流量计的检定	(166)
第五节 腰轮流量计的使用	(170)
第四章 涡轮流量计	(172)
第一节 工作原理	(172)

第二节 结构形式和分类	(175)
第三节 计量特性	(181)
第四节 涡轮流量计的检定	(182)
第五节 涡轮流量计的使用	(185)
第五章 超声流量计	(187)
第一节 工作原理	(187)
第二节 结构形式和分类	(188)
第三节 计量特性	(192)
第四节 超声流量计的检定	(193)
第五节 超声流量计的使用	(197)
第六章 涡街流量计	(199)
第一节 工作原理	(199)
第二节 结构形式和分类	(200)
第三节 计量特性	(203)
第四节 涡街流量计的检定	(203)
第五节 涡街流量计的使用	(206)
第七章 旋进旋涡流量计	(208)
第一节 工作原理	(208)
第二节 结构形式和分类	(208)
第三节 计量特性	(210)
第四节 旋进旋涡流量计的检定	(211)
第五节 旋进旋涡流量计的使用	(211)
第八章 质量流量计	(213)
第一节 工作原理	(213)
第二节 结构形式与分类	(216)
第三节 计量特性	(218)
第四节 质量流量计的检定	(219)
第五节 质量流量计的使用	(221)
第九章 浮子流量计	(223)
第一节 工作原理	(223)
第二节 结构和分类	(224)
第三节 计量特性	(227)
第四节 浮子流量计的检定	(231)
第五节 浮子流量计的使用	(234)

第三篇 压力计量

第一章 压力计量基础	(236)
第一节 压力基本概念	(236)
第二节 压力仪表的分类	(238)
第三节 压力计量量值溯源和传递	(239)
第四节 压力计量名词术语及定义	(242)
第二章 液柱式压力计	(250)
第一节 工作原理	(250)

第二节 U形液体压力计	(250)
第三节 杯形液体压力计	(251)
第四节 倾斜式液体压力计	(252)
第五节 补偿式微压计	(253)
第六节 液柱式压力计测量误差	(253)
第七节 液柱式压力计的检定	(255)
第八节 液柱式压力计的使用	(258)
第三章 弹性式压力表	(260)
第一节 工作原理	(260)
第二节 弹簧管式压力表	(261)
第三节 膜片、膜盒式压力表	(263)
第四节 波纹管式压力表	(265)
第五节 电接点压力表	(265)
第六节 弹性式压力表的检定	(266)
第七节 弹性式压力表的使用	(271)
第四章 活塞式压力计	(273)
第一节 活塞式压力计工作原理和结构	(273)
第二节 活塞式压力计计量特性	(278)
第三节 活塞式压力计的检定	(281)
第四节 活塞式压力计的使用	(286)
第五章 压力传感器	(288)
第一节 压力传感器工作原理	(288)
第二节 常用的压力传感器	(289)
第三节 压力传感器的检定	(294)
第六章 压力变送器	(298)
第一节 工作原理	(298)
第二节 压力变送器分类和主要技术参数	(298)
第三节 常用的压力变送器	(299)
第四节 压力变送器的检定	(304)
第七章 数字压力计	(310)
第一节 工作原理	(310)
第二节 仪器分类和特点	(311)
第三节 数字压力计的检定	(313)

第四篇 温度计量

第一章 温度计量基础	(316)
第一节 概述	(316)
第二节 温标	(317)
第三节 温度计量量值溯源和传递	(323)
第四节 温度计量名词术语及定义	(331)
第二章 膨胀式温度计	(340)
第一节 玻璃液体温度计	(340)
第二节 双金属温度计	(348)

第三节 压力式温度计	(350)
第四节 膨胀式温度计的检定	(352)
第三章 电阻温度计	(361)
第一节 工作原理	(361)
第二节 电阻温度计的结构和分类	(362)
第三节 热电阻技术参数	(363)
第四节 电阻温度计阻值的测量	(365)
第五节 电阻温度计的检定	(367)
第六节 电阻温度计的使用	(373)
第四章 热电偶	(375)
第一节 工作原理	(375)
第二节 仪器结构与分类	(379)
第三节 热电偶的检定	(386)
第四节 热电偶的使用	(391)

第五篇 气体成分计量

第一章 气体成分计量基础	(396)
第一节 概述	(396)
第二节 化学计量基础	(397)
第三节 气体成分计量量值溯源体系	(402)
第二章 气体传感器技术基础	(404)
第一节 气体传感器的基本特性	(404)
第二节 气体成分检测仪器	(405)
第三章 可燃气体检测报警器	(408)
第一节 催化燃烧型传感器	(408)
第二节 半导体型传感器	(411)
第三节 红外型传感器	(415)
第四节 热导型传感器	(421)
第五节 报警仪器的检定	(425)
第六节 报警仪器的使用	(428)
第四章 气相色谱仪	(433)
第一节 气相色谱仪工作原理	(433)
第二节 气相色谱仪结构与性能	(437)
第三节 气相色谱仪计量特性	(448)
参考文献	(450)

第一篇 燃气计量基础知识

第一章 城市燃气计量基本知识

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动,计量管理是计量部门对所用测量手段和方法,以及获得、表示和使用测量结果的条件进行的管理,是企业生产经营活动中不可或缺的重要组成部分,通过协调计量技术管理、计量行政管理和计量法制管理,来提高产品质量,保证生命财产安全,维护贸易公平,实现节能降耗。燃气计量是城市燃气企业面临的一个重要的基础管理工作,主要涉及的计量领域包括贸易结算和安全防护两大类。为提升燃气企业计量管理水平,促进计量技术进步,提高经济效益,杜绝安全事故,必须普及燃气计量有关知识,了解国家有关计量法律法规,积极探索计量新技术应用和推广,促进企业和社会的和谐发展。

本章重点介绍了与计量有关的燃气基本性质,较为详细地介绍了天然气计量的一些特殊参数和计量方法,包括国家标准中有关天然气能量计量的关键内容,同时,针对燃气贸易计量的特点,深入细致地介绍了提高计量准确性的途径,如流量仪表的设计选型、安装施工、使用维护、监督检查等。

第一节 城市燃气基本性质

城市燃气一般可以分为四大类:天然气、人工制气(煤气及油制气等)、液化石油气和生物气(沼气)。燃气通常是由多种可燃与不可燃成分组成的气体混合物,可燃成分主要有碳氢化合物(如甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、丁烷、丁烯等烃类)、氢气、一氧化碳等,不可燃成分主要有二氧化碳、氮气、氧气、水分等。

天然气一般分为纯天然气、石油伴生气、凝析气田气和煤层气,不同的来源其气体组分含量也不尽相同,但主要成分均为甲烷,含量一般在80%以上,热值可达 $36 \sim 45 \text{ MJ/Nm}^3$ 。

人工制气一般分为干馏煤气、气化煤气和油制气(石油裂解气),煤气的主要成分为甲烷、氢气和一氧化碳,热值通常为 $5 \sim 18 \text{ MJ/Nm}^3$;油制气主要成分为甲烷、氢气和重烃,热值一般为 $17 \sim 42 \text{ MJ/Nm}^3$ 。

液化石油气主要成分为丙烷和丁烷,一般各占50%,热值约 108 MJ/Nm^3 ,是所有燃气中热值最高的一种。

沼气主要成分为甲烷和二氧化碳,热值约为 21 MJ/Nm^3 ,热值与煤气接近。

一、燃气的物理化学性质

(一) 燃气组分

燃气组分的表示方法主要有三种:体积分数(体积比)、质量分数(质量比)和摩尔分数(摩尔比)。还有一些其他表示方法,见第五篇气体成分计量相关内容。

1. 体积分数

体积分数是指混合气体中组分气体的体积与混合气体的总体积之比,混合气体的总体积等于各组分的体积之和。

2. 质量分数

质量分数是指混合气体中组分气体的质量与混合气体的总质量之比,混合气体的总质量等于各组分的质量之和。

3. 摩尔分数

摩尔分数是指混合气体中组分气体的摩尔数与混合气体的总摩尔数之比,混合气体的总摩尔数等于各组分的摩尔数之和。

(二) 燃气密度

(1) 混合气体平均密度:为混合气体平均摩尔质量与平均摩尔体积之比,等于各单一组分气体密度之和。计算公式为:

$$\rho = \frac{M}{V_m} = \sum y_i \rho_i \quad (1-1-1)$$

式中: ρ 为混合气体平均密度, kg/m^3 ; M 为混合气体平均摩尔质量, kg/kmol ; V_m 为混合气体平均摩尔体积, m^3/kmol , $V_m = \sum y_i V_i$; y_i 为燃气中各组分的体积比(%); ρ_i 为燃气中各组分在标准状态下的密度, kg/m^3 。

(2) 混合气体相对密度:等于混合气体平均密度与标准状态下空气的密度之比。计算公式为:

$$G = \frac{\rho}{\rho_{\text{空}}} = \frac{M}{\rho_{\text{空}} V_m} \quad (1-1-2)$$

式中: G 为混合气体相对密度; ρ 为混合气体平均密度, kg/m^3 ; $\rho_{\text{空}}$ 为标准状态下空气的密度, kg/m^3 , 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $101\ 325\ \text{Pa}$ 时空气密度为 $28.966/22.4 = 1.293\ \text{kg/m}^3$, 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $101\ 325\ \text{Pa}$ 时空气密度为 $1.293 \times 273.15/293.15 = 1.205\ \text{kg/m}^3$ 。

有关气体密度的计算方法在以后的内容中还有进一步的介绍。

(三) 气体临界参数

当温度低于某一数值时,对气体施加压力可以使其液化;而超过该温度值时,无论加多大的压力也不能使气体液化,这一温度称为该气体的临界温度。在临界温度下,使气体液化所需要的压力称为临界压力;此时气体的各项参数称为临界参数。

(1) 混合气体的平均临界温度为各单一气体临界温度之和,即 $T_{mc} = \sum y_i T_{ci}$ 。

(2) 混合气体的平均临界压力为各单一气体临界压力之和,即 $P_{mc} = \sum y_i P_{ci}$ 。

临界参数是气体的重要物理指标,气体的临界温度越高,越容易液化,如液化石油气中的丙烷、丙烯的临界温度较高,在常温下加压即可使其液化;而天然气中甲烷的临界温度低,表明天然气很难液化,在常压下,需将温度降至 $-163.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,才能使其液化。

(四) 气体状态方程

常温常压下,气体遵守气体状态方程,当气体的压力较高或温度较低时,如果仍然用理想气体状态方程进行计算,就会引起较大误差,这是因为气体分子本身占有的容积和分子之间的引力会发生较大变化,因此需要对理想气体状态方程进行修正。实际气体状态方程为:

$$PV = nZRT \quad (1-1-3)$$

式中: P 为气体的绝对压力, Pa ; V 为气体的体积, m^3 ; Z 为压缩因子; n 为气体摩尔数; R 为通用气体常数, $R = 8.314\ 51\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体的绝对温度, K 。

压缩因子是随气体的温度和压力变化而变化的。在工程上,当燃气压力低于 $1\ \text{MPa}$ 、温度在 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以近似地当做理想气体进行计算。详见本章第二节相关内容。

(五) 气体黏度

流体的黏度是表示内摩擦力大小的一个参数,与温度和压力有关,一般情况下,气体的黏度随

温度和压力的升高而增加,液体则相反。黏度可用动力黏度和运动黏度表示。

动力黏度的物理概念是层流间发生相对滑动所产生的内摩擦力与单位层流距离上的层流间的速度梯度的比值,表达式为:

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-1-4)$$

式中: μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ 为内摩擦力(剪切应力), N/m^2 ; du/dy 为速度梯度, $1/\text{s}$ 。

混合气体的运动黏度为动力黏度与相同温度压力下气体密度之比,公式为:

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-1-5)$$

式中: ν 为流体的运动黏度, m^2/s ; μ 为相应流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ 为流体的密度, kg/m^3 。

二、燃气的燃烧特性

(一) 燃气热值

燃气热值(也称发热量)是指单位数量的燃气完全燃烧时所放出的全部热量。

燃气热值分为高热值和低热值。高热值是指单位数量的燃气完全燃烧后,其燃烧产物与周围环境恢复到燃烧前的原始温度,烟气中的水蒸气凝结成同温度的水后所放出的全部热量。低热值则是指在上述条件下,烟气中的水蒸气仍以蒸气状态存在时,所获得的全部热量。

热值的计算方法有摩尔发热值、体积发热值和质量发热值,详细内容可参见下一节内容。

干燃气摩尔发热值为:

$$H_{h(l)} = \sum_{i=1}^N y_i H_{h(l)i} \quad (1-1-6)$$

式中: $H_{h(l)}$ 为干燃气的高(低)发热值, MJ/m^3 ; y_i 为组分 i 的摩尔分数(%) ; $H_{h(l)i}$ 为组分 i 的高(低)发热值, MJ/m^3 。

湿燃气与干燃气的发热值换算关系为:

$$H_h^w = (H_h + 2\,352d_g) \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-1-7)$$

$$H_l^w = H_l \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-1-8)$$

式中: H_h^w 为湿燃气高发热值, MJ/m^3 ; H_l^w 为湿燃气低发热值, MJ/m^3 ; d_g 为干燃气含湿量, kg/m^3 。

烟气中的水蒸气通常以气体状态排出,可利用的只是燃气的低热值。在实际应用时,一般以燃气的低热值作为计算依据。

(二) 爆炸极限

燃气与空气混合后达到一定浓度时,就会形成爆炸性混合气体,这种气体一旦遇到明火即会发生爆炸。在可燃气体和空气的混合物中,可燃气体的含量少到使爆炸燃烧不能进行,即不能形成爆炸性混合物时的含量,称为可燃气体的爆炸下限;当可燃气体的含量增加到一定程度,由于缺氧而无法进行爆炸燃烧,以至不能形成爆炸性混合物时的含量称为爆炸上限。

(1) 对于不含氧及惰性气体的燃气,其爆炸极限可按下式估算:

$$L_m = \frac{100}{\sum \frac{y_i}{L_i}} \quad (1-1-9)$$

式中: L_m 为不含氧及惰性气体的混合燃气爆炸上(下)限(%); y_i 为混合燃气中各组分的容积成分(%); L_i 为混合燃气中各组分的燃气爆炸上(下)限(%)。

(2) 对于含有惰性气体的燃气,其爆炸极限可按下列下式估算:

$$L_d = L_f \times \frac{(1 + \frac{B}{1-B}) \times 100}{100 + L_f \times \frac{B}{1-B}} \quad (1-1-10)$$