

天然气能量计量 理论与实践

黄黎明 陈赓良 张福元 罗 勤 编著

石油工业出版社

天然气能量计量理论与实践

黄黎明 陈赓良 张福元 罗 勤 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书扼要介绍了天然气能量计量的基本原理及其实施方法。同时根据计量学原理,结合天然气研究院多年来从事能量计量技术开发的成果与经验,讨论了天然气能量测定的同一性、溯源性和准确性问题。

本书可供从事天然气计量及分析测试的工程技术人员阅读、参考,也可作为石油大专院校天然气专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气能量计量理论与实践/黄黎明等编著.

北京:石油工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-5021-7838-3

I. 天…

II. 黄…

III. 天然气-气体流量计量

IV. TE832.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 100556 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523541 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14

字数:354 千字 印数:1—1000 册

定价:55.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

迄今为止,国际上商品天然气作为结算依据采用的计量方式有三种:质量计量、体积计量和能量计量。除第一种方式很少采用外,其他两种方式都是普遍采用的。但是,由于不同国家和地区所产天然气的组成有很大差异,其发热量也不可能是一个固定值,因而体积计量难以正确反映商品天然气作为一级能源的价值。因此,20世纪80年代北美地区就在天然气大规模交接计量中,开始以能量计量取代传统的体积计量。目前在北美和西欧地区,大规模交接计量几乎全部采用能量计量作为结算依据。另外,全球正在迅速发展中的液化天然气(LNG)国际贸易也均以能量计量的方式进行结算。

国际标准化组织天然气技术委员会(ISO/TC 193)于20世纪90年代中期就成立专门的工作组起草有关能量计量的国际标准,工作组在10多年间历经三次重大修改,于2008年12月发布了《天然气能量的测定》(ISO 15112:2008)。全国天然气标准化技术委员会(SAC/TC 244)于2003年成立能量计量工作组后,天然气能量计量国家标准的起草工作紧跟ISO/TC 193的发展动向,五年之中数易其稿,于2008年7月以修改采用(MOD)ISO 15112的方式完成了《天然气能量的测定》(GB/T 22723—2008)的制定工作,国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会于2008年12月31日发布了此项标准,并已于2009年8月1日起实施。GB/T 15112的发布标志着我国天然气计量进入了一个新阶段。

尽管天然气能量计量技术问世已有20多年历史,但真正直接对天然气进行能量测定的系统尚在开发之中,目前仅研制成功了样机。因此,当前国内外所采用的能量计量方法皆立足于间接测定,即分别测定天然气的体积流量和其单位发热量后,通过计算的方法求得某一时段中输出天然气的总能量。GB/T 22723—2008也同样是基于此原理制定的。

从学科分类的角度看,天然气能量计量隶属于计量学范畴,故应充分反映出计量学的三个基本属性:同一性、准确性和溯源性。同时,能量计量既涉及属于物理测量领域的流量计量,又涉及属于化学计量领域的分析测试,因而更增加了测量结果在量值传递及溯源准则方面的复杂性。近年来,随着成都天然气计量站和西气东输南京计量中心相继投运,我国在体积计量的领域已达到了国际先进水平。然而在发热量测定的领域,无论直接测定还是间接测定与国外先进水平相比均尚有诸多不足之处。

从标准化的角度看,天然气能量计量不仅涉及我国已发布的近30项国家标准中的大多数,还涉及一批与天然气流量计量有关的国家标准。与之相关的标准数量众多,涉及不同的溯源体系,而且有些相关的基础标准迄今尚未转化为相应的我国国家标准。例如,天然气分析的溯源准则、天然气在线分析系统的性能评价等。

鉴于以上认识,西南油气田公司天然气研究院与有关单位合作,针对推广能量计量的客观需要,在天然气组分分析方法的精密度评价、标准物质溯源链的建立、实验室间比对的能力验证和发热量等物性参数的赋值等方面开展了一系列卓有成效的研究,相关研究成果皆根据计量学的基本原理在本书中有所反映。

许文晓高级工程师校阅了本书初稿,并提出诸多宝贵意见,在此深表谢意。

限于作者的水平,本书不妥之处在所难免,祈请广大读者不吝赐教。

编著者

2010年4月20日

目 录

第一章 天然气计量基础知识	(1)
第一节 计量与计量学	(1)
第二节 国际单位制与法定计量单位	(6)
第三节 测量误差与测量不确定度	(13)
第四节 量值传递与检定	(24)
第五节 量值溯源与校准	(33)
第六节 天然气计量系统	(39)
第二章 国家标准 GB/T 22723—2008 简介	(45)
第一节 原理与方法	(45)
第二节 赋值方法	(52)
第三节 能量的计算	(55)
第四节 能量测定的不确定度及其评定	(58)
第三章 流量测量	(65)
第一节 超声流量计	(65)
第二节 涡轮流量计	(69)
第三节 孔板流量计	(73)
第四节 旋转容积式流量计	(76)
第五节 旋进旋涡流量计	(79)
第六节 质量流量计	(82)
第四章 气相色谱法分析天然气组成	(86)
第一节 概述	(86)
第二节 国家标准 GB/T 13610—2003 简介	(89)
第三节 在线分析系统的操作性能评价	(99)
第四节 精密度评价研究	(105)
第五节 实验室检测能力验证	(118)
第六节 标准气混合物制备与应用	(129)
第七节 天然气取样导则	(139)
第五章 天然气物性参数的计算与测定	(151)
第一节 相对密度与密度的计算	(151)
第二节 发热量与沃泊指数的计算	(156)
第三节 压缩因子的计算	(161)

第四节 天然气体积性质的测定	(172)
第五节 发热量测定	(177)
第六节 发热量等物性参数的赋值	(180)
第七节 VAMGAS 项目和 ISO/TR 24094:2006	(191)
附录一 天然气能量计量示例	(197)
附录二 天然气流量计算机基本技术要求	(198)
附录三 典型流量计的比较	(201)
附录四 流量计选型示例	(203)
附录五 GB/T 13610—2003 实施要点	(206)
附录六 气相色谱仪检定规程要点	(212)
参考文献	(216)

第一章 天然气计量基础知识

第一节 计量与计量学

一、测量与计量

测量与计量在英文中是同一个词汇(measurement),但严格地说两者有所区别。根据国家计量技术规范《通用计量术语及定义》(JJF 1001—1998)的规定,测量是以确定量值为目的的一组操作;而计量的定义则为实现单位统一、量值可靠的活动。过去,从狭义的角度定义计量,主要是指计量单位及其基准、标准与量值传递等;但当前从广义的角度来理解计量则包括了所有的测量。因此,从发展的角度看,统一使用“计量”这个词汇似乎更为恰当。具体就天然气工业而言,使用“体积计量”、“质量计量”或“能量计量”等词汇既比较合理,也符合已经使用多年的习惯。

计量学(metrology)是研究测量、保证量值统一和准确的科学,其主要包括的研究内容可归纳如下。

- (1) 计量单位及其基准、标准的建立、复制、保存和使用;
- (2) 计量原理、计量方法及其相关设备、量值传递与溯源、测量不确定度及其评定;
- (3) 计量方法、计量器具和计量人员进行计量的能力,如按《利用实验室间比对的能力验证》(GB/T 15483—1999)的规定,评价某些实验室进行某项特定检测或测量的能力;
- (4) 计量法制与管理,如根据国家法律、法规和行政管理的需要而对计量单位、计量器具、计量方法和计量准确度(或不确定度)以及专业人员的技能等进行强制性管理;
- (5) 有关计量的一切理论和实际问题,如高准确度的天然气组分分析(专用)标准气混合物(reference gas mixture, RGM)的研制、高准确度天然气发热量测定装置的建设等。

综上所述可见,计量学不仅是基础科学,也是应用科学,更重要地计量学也是一门基础性的先导科学,其发展水平能集中体现一个国家科学技术的发展水平。

二、计量的分类

按计量的基本属性区分,国际上倾向于将计量分为科学计量、工程(工业)计量和法制计量三类,它们分别代表计量学在基础科学、工业应用和政府起主导作用的社会事业等三个方面的应用。

(1) 科学计量:主要是指基础性、探索性和先行性的计量科学研究。科学计量属于精确计量,包括计量单位与单位制的研究、计量基准和标准物质的研制、量值传递与溯源系统的研究等;通常这些是国家计量科学研究机构的主要任务。对天然气分析用的 RGM 而言,一般均由代表国家最高水平的国家计量院(NMI)来研制、保存基准级 RGM(PSM),如美国的国家标准技术研究院(NIST)、英国的国家物理实验室(NPL)等。

(2) 工程计量:又称为工业计量,是指工程、工矿企业中的实用计量。工程计量涉及面甚广,并随着产品技术含量提高和测量复杂性的增加,为保证经济全球化所必需的一致性和互换性,它已成为工业生产过程控制不可缺少的环节。天然气大规模交接计量由目前的体积计量

为主,逐步向能量计量过渡就是一个典型的例子,此计量方式的改变将对天然气工业的发展产生深远的影响。

(3)法制计量:是指为了保证公众安全、国民经济和社会发展,根据法制、技术和行政管理的需要,由政府或官方授权进行强制管理的计量。鉴于天然气对国民经济和社会发展的重要性,无论采用何种计量方式,皆属于法制计量的范畴。不仅如此,随着我国进口管输天然气和液化天然气(LNG)的国际贸易量逐步增大,关键测量参数的国际比对正在迅速发展。通过在不同校准等级上测量等效性核查的广泛进行,包括天然气能量计量在内的计量系统将全面与国际接轨,并逐步融入全球计量体系。

按计量的具体对象与测量设备的功能来区分,目前比较成熟且普遍开展的计量有几何量(长度)、温度、力学、电磁、电子学、时间频率、电离辐射、光学、声学 and 化学等十大类计量学领域。但随着科学技术的迅速发展,当前计量学的范围早已突破上述十类,如新兴的航天工程、生物工程、环境工程正在结合自身的特殊要求,逐步形成新颖的计量测试领域。

天然气能量计量既涉及属于力学计量的气体流量计量,又涉及属于分析化学计量的气相色谱分析,还涉及属于物理化学计量的热量计法测定气体发热量。因此,能量计量涉及的计量原理、计量设备、量值传递体系与溯源性都比较复杂,这些皆为本书重点讨论的内容。

三、计量的特点

上文已经提及,计量不同于一般意义上的测量,它是具有特殊要求的测量。计量所得的结果应是置信度有关、与不确定度相联系的一种规范化的测量,而所谓的规范化则是通过一系列有关计量的标准和规范来实现的。因此,计量工作是实现准确测量的基础,是社会化、专业化大生产的基本保障之一。各国政府通过建立计量基(标)准、实现单位统一和量值溯源来保障国家和公众利益,促进高新技术发展,保证贸易结算的公平,以及环境、资源、安全防护中所有测量操作的准确可行。由此可见,实现量值的准确一致不仅是技术工作,且必须具备相应的法律、法规的法制保障,从而形成法制计量的共同特点——法制性。

工程计量学涉及的门类虽然众多,但除上述法制性外,其基本(属性)特点可以归纳为三点:即准确性、一致性和溯源性。

(1)准确性:这是计量学的基本特点。准确性表征计量结果与被测量真值之间的一致程度。严格而言,仅有量值而无准确度(或不确定度)的测量结果没有任何意义。因此,任何计量结果必须给出该量值的不确定度(或误差范围),此即为(计量结果的)准确性。例如,国家标准《天然气计量系统技术要求》(GB/T 18603—2001)的附录A规定:A级计量系统的发热量测定仪表的准确度应达到0.5%,其含义即为此项测定结果的量值必须在0.5%准确度的范围实现统一。

(2)一致性:又称为同一性。众所周知,计量单位的统一是量值一致的基础,因而无论在任何时间、任何地点,使用任何方法、任何仪器以及由任何操作者所进行的(同一种)计量,只要符合有关法规、规范或标准的要求,所有计量结果就应在给定的不确定度(或误差范围)内相互一致。否则,计量结果将失去其社会意义。计量的一致性,不仅仅局限于国内,也同样适用于国际。

当前,贸易全球化和市场化的趋势日益加强,测量的可比性和溯源性显得越来越重要。对于原油和天然气的国际贸易也是同样,检验数据的互认、国家实验室的互认,以及为实现此类互认必须首先完成的国家基(标)准等效度的双边或多边互认等一系列重要工作,应引起我们充分重视。

(3)溯源性:在实际工作中,由于计量目的和条件的不同,对计量结果的要求也各不相同。但是,为保证计量结果的准确性与一致性,所有同种量值都必须自同一个计量基准传递而来。换言之,任何一个计量结果都应能通过一条规定了不确定度的、不间断的比较链溯源至计量基准。由此可见,溯源性在本质上是准确性和一致性的技术归宗。任何测量所得的数据,受技术条件等因素的限制,其准确性可能较差,但只要具备溯源性,此数据就有实际意义;而不具备溯源性的计量数据则无任何意义。

四、我国计量的法规体系

1. 计量法规体系的构成

我国于1985年颁布《中华人民共和国计量法》(简称计量法)以来,经20余年努力,现已基本建成了较为完善的计量法规体系;后者是由以计量法为母法及一系列与之配套的计量行政法规、规章所构成。该体系主要包括以下三部分内容。

(1)第一部分是法律,即《中华人民共和国计量法》,它由全国人民代表大会批准,在我国计量领域中具有最高效力。

(2)第二部分是法规,包括国务院依据计量法制定或批准的计量行政法规,如《计量法实施细则》等;以及部分省、自治区、直辖市人民代表大会或其常委会制定的地方性计量法规。

(3)第三部分是规章和规范性文件,包括国家计量行政部门制定的有关计量的部门规章,如《计量法条文解释》、《计量基准管理办法》、《计量标准考核办法》等;也包括国务院有关部门制定的计量管理办法。

2. 制定计量法的目的

计量法的主要目的是保证计量过程达到下列特定的要求:

- (1)采用统一的(法定)计量单位;
- (2)配备适用的、性能可靠的计量器具;
- (3)上述计量器具必须经过校准,其准确度要能通过完善的溯源链追溯至国家统一的计量基准;
- (4)应由技术熟练且具备相应资质的计量人员进行操作;
- (5)必须采用标准的测量方法和数据处理方法。

为实现这些要求,我国政府已经设置了专门的计量机构,颁布和实施了一系列计量法规,实现了计量工作的基本任务,从而维护社会经济秩序,促进生产和科学技术的发展。

3. 天然气贸易计量涉及的有关法规与标准

1)《天然气商品质量管理暂行办法》

此文件1987年由原国家计委以计燃[1987]2001号发布,它与计量有关的要点可大致归纳如下:

(1)天然气按体积进行计量,体积计算的状态标准为 20°C (273.15K),绝对压力为 101.325kPa (1atm)。

(2)若使用孔板流量计计量天然气流量时,执行国家标准《用标准孔板流量计测量天然气流量》(GB/T 21446—2008)。

(3)凡需要进行天然气流量计量标准测量的单位,必须制定科学的设备、仪器、仪表的管理、操作、维护等制度和规程,并严格按照制度和规程的要求,由计量部门对标准节流装置及计量仪器、仪表进行定期检定、校准,以确保量值的准确性。

(4)在气量结算时,以供气方的测量值为准。供用双方应定期对计量仪表进行检查校核。用户对供气方的气量测量值有异议时,可及时提出,并共同查找原因。在查出原因之前,仍以供方测量值为准进行气量结算,用户不得拒付。若供气方的气量测量确有错误,在查明原因并整改后,供方应根据校正值予以调整,并按调整后的气量结算。

2)《原油、天然气和稳定轻烃销售交接计量管理规定》

此文件于1990年由原能源部和国家计委联合以能源油[1990]943号文发布,其中与计量有关的要点可大致归纳如下:

(1)油、气交接地点设在供方所在的站、库、码头等,如供方暂不具备上述条件,可在双方临时协商同意的地点进行交接。

(2)交接计量方式由供方根据需要选择确定。计量器具由供方负责操作,买方监护。计量员(监护员)必须持有省、部级计量主管部门或其授权的计量技术机构颁发的操作证书。

(3)供方应定期向买方提供按现行国家标准《天然气》(GB 17820—1999)中规定的质量和技术指标。

(4)供、需、运(输)各方因计量值发生争议时,应先以供方提供的计量数据进行结算,待查明原因后多退少补。

3)《天然气标准参比条件》(GB/T 19205—2008)

《天然气标准参比条件》(GB/T 19205—2008)系非等效采用国际标准《天然气——标准参比条件》(ISO 13443:1996)。该国家标准规定:在测量和计算天然气、天然气代用品及气态的类似流体时,使用的压力、温度和湿度(饱和状态)的标准参比条件是101.325kPa,20℃(293.15K)。

4)《天然气计量系统技术要求》(GB/T 18603—2001)

《天然气计量系统技术要求》(GB/T 18603—2001)于2001年发布并实施。它是参考欧洲标准《供气系统——天然气计量站——功能要求》(EN1776:1998)和国际法制计量组织流量计量技术委员会气体计量分委员会(OIML/TC8/SC7)制定的《气体燃料计量系统》国际建议第三版(1998年)编制的。它规定了新建天然气贸易计量系统的设计、建设、投产运行、维护等方面的技术要求,并规定输送的天然气气质应符合《天然气》(GB 17820—1999)的要求(表1-1)。GB/T 18603—2001规定的技术条件适用于天然气体积流量、质量流量和能量流量等三种流量测量方式,并在其附录C中列出了这三种计量方式的(基本)计算公式,故它是流量计量领域中最重要的一個基础标准。

表1-1 管输商品天然气的技术要求

项 目	一类	二类	三类
高位发热量,MJ/m ³	>31.4		
总硫(以硫计),mg/m ³	≤100	≤200	≤460
硫化氢,mg/m ³	≤6	≤20	≤460
二氧化碳,%(体积分数)	≤3.0		—
水露点,℃	在天然气交接点的压力和温度条件下,天然气的水露点应比最低环境温度低5℃		

《天然气计量系统技术要求》(GB/T 18603—2001)适用于设计通过能力等于或大于500m³/h(标准参比条件下),工作压力不低于0.1MPa(表压)的天然气计量站贸易计量系统。年输送天然气量等于或小于300000m³(标准对比条件下)可以不包括在标准范围内。

根据GB/T 18603—2001附录A的规定,天然气计量系统按其设计处理能力分为三个等级(表1-2);并按不同等级的计量系统分别规定了相应配套仪表的准确度要求(表1-3)。

表1-2 不同等级的计量系统

设计能力 $Q, \text{m}^3/\text{h}$	$Q \geq 5000$	$5000 \leq Q \leq 50000$	$Q \geq 50000$
用于测量的校验用系统 (例如,串联标准流量计)	—	—	✓
温度转换	✓	✓	✓
压力转换	✓	✓	✓
Z 转换	✓	✓	✓
发热量和气体质量的确定	—	—	✓
每个时间周期的流量记录	—	✓	✓
密度测量(替代温度、 压力和Z值转换)	—	—	✓
准确度等级	C级(3.0)	B级(2.0)	A级(1.0)

注:(1)规模较小的计量系统使用上述功能不受限制;
(2)“✓”建议配套内容。

表1-3 计量系统配套仪表准确度

测量参数	A级(1.0)	B级(2.0)	C级(3.0)
温度	0.5℃	0.5℃	1℃
压力	0.2%	0.5%	1.0%
密度	0.25%	0.75%	1.0%
压缩因子	0.25%	0.5%	0.5%
发热量 ^①	0.5%	1.0%	1.0%
工作条件下体积流量	0.75%	1.0%	1.5%

① 当供用气双方用能量流量交接时需要配套的项目。

5)《天然气能量的测定》(GB/T 22723—2008)

《天然气能量的测定》(GB/T 22723—2008)于2008年12月31日发布,于2009年8月1日起实行。该标准系修改采用国际标准《天然气——能量测定》(ISO 15112:2007),提供了采用测量或计算方式对天然气进行能量测定的方法,并描述了必须采用的相关技术和措施。该标准规定:能量的计算是基于分别测量被输送天然气的量(质量或体积)及其发热量(由直接测量或间接计算获得);同时给出了估算其不确定度的通用方法。

《天然气能量的测定》(GB/T 22723—2008)同时规定:应按照GB/T 18603—2001的要求选择相应的能量测定方法。

第二节 国际单位制与法定计量单位

一、量与量值

1. 量的定义

国家计量技术规范《通用计量术语及定义》(JJF 1001—1998)中对量的定义为:量是现象、物体和物质可以定性区别和定量确定的一种属性。此定义表明,被研究的对象可以是自然现象,也可以是物质本身。因此,上述概念具有双重含义,一方面正如人们通常理解的那样,量的具体意义是指大小、轻重、长短等概念,例如物体的长度、质量、速度等;另一方面从广义的角度而言,量也可以指现象、物体和物质之间的定性区别,即可以把量区分为长度、质量、温度、电流、电阻、噪声等。

2. 量的表示

一般来说,凡是量都是可以计量的。因此,量可以用量值来表示,而量值则是由数值和计量单位的乘积来表示。例如,量 A 可以表示为式(1-1)的形式:

$$A = \{A\} \cdot [A] \quad (1-1)$$

式中 $[A]$ ——量 A 所选用的计量单位;

$\{A\}$ ——用计量单位 $[A]$ 表示量 A 的数值。

计量学所研究的量绝大部分为物理量,它通常具有可以进行数学运算的特性,也可以用数学式来表示,如式(1-2)至式(1-5),同一种物理量可以相加减;几种不同的物理量可以相乘除。

$$\text{同一种量相加 } A_1 + A_2 = \{A_1 + A_2\} \cdot [A] \quad (1-2)$$

$$\text{同一种量相减 } A_1 - A_2 = \{A_1 - A_2\} \cdot [A] \quad (1-3)$$

$$\text{几种量可以相乘 } AB = \{A\} \{B\} \cdot [A][B] \quad (1-4)$$

$$\text{几种量可以相除 } A/B = \{A\}/\{B\} \cdot [A]/[B] \quad (1-5)$$

3. 量的种类

按量在计量学所处的地位与作用,可以用不同的方法来分类。

(1)基本量和导出量:在科技的不同领域中需要使用多种量,因而出现了不同的量制。量制是指相互间存在确定关系的一组量。基本量在量制中,约定地被认为在函数关系上是彼此独立的量。导出量在量制中则为该量制基本量的函数所定义的量。如在力学领域中,公认的基本量只有三个:长度、质量和时间;在电磁学中则需要增加一个基本量——电流;在热学中则增加另一个基本量——温度。

(2)被计量的量和影响量:这是按其在计量中所处的地位进行分类的。被计量的量是计量操作的对象,可以理解为已经通过计量而获得的量,也可以指待计量的量。影响量不是计量对象,但却影响被计量的量值或测量仪器的示值的量。虽然影响量不直接反映被计量对象的量值,但与计量结果密切相关,在高精度的计量中尤其如此。影响量来源于环境条件及测量仪器本身,如环境温度、气压、湿度、地磁场、重力场、电源电压、电源频率及计量器具安装位置和本身结构的变化等。例如,在天然气体积计量操作中,被计量的量只有体积流量(m^3/h)一个,但影响量则有压力、温度和压缩因子(Z)等多个,在评定体积流量测定结果的不确定度时,必须全面考虑影响量的贡献值。

(3)有源量和无源量:被计量的对象本身具有一定能量的称为有源量,如温度、力等,计量对象观察者无需为计量信号提供外加能源。被计量的对象本身没有能量的称为无源量,如长度、硬度等材料特性,为了能对其进行计量必须从外界得到能量。

二、计量单位与国际单位(SI)制

1. 计量单位的定义

JJF 1001—1998 中对计量单位的定义为:用以定量表示同种量的量值而约定采用的特定量。该标准还给出两个注释:一是计量单位具有约定地赋予的名称和符号;二是同量纲量(不一定是同种量)的单位可以有相同的名称和符号。

上述所谓的特定量是指数值为1的量。第一个注释要求,计量单位的名称和符号必须是约定的,例如国际单位制中单位的名称和符号均由国际计量大会(CGPM)统一规定。第二个注释则可以一个例子来说明:压力与弹性模量并非是同种量,但它们在国际单位制中的单位则皆为帕斯卡(Pa)。

2. 国际单位制的基本单位

相互间存在确定关系的一组量称为量制。计量单位制是指为给定量制按给定规则确定的一组基本单位和导出单位,简称单位制。国际单位制又称为SI制,是由国际计量大会采纳和推荐的一种一贯单位制,它由SI单位、SI词头、SI单位的十进倍数和分数单位三部分构成。所谓“一贯”是指用来定义导出单位的方程式中的系数始终为1。符合此原则的导出单位称为一贯制导出单位。

SI单位又分为SI基本单位和SI导出单位两大类。目前国际单位(SI)制中共有表1-4所示的7个基本单位,它们分别是米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)。

表 1-4 国际单位制基本单位

量的名称	单位名称	英文名称	国际符号
长度	米	meter	m
质量	千克	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安培	ampere	A
热力学温度	开尔文	kelvin	K
物质的量	摩尔	mole	mol
发光强度	坎德拉	candela	cd

SI基本单位均有严格的定义,并经国际计量大会通过。目前,除质量的单位kg外,其他6个基本单位都是根据自然规律定义的。特别应注意计量物质的量的基本单位摩尔(mol),与其他6个主要应用于物理计量的基本单位不同,它主要是应用于化学计量,其特点是以宏观的量来计量微观粒子。

随着生产和科技的发展,在化学领域中以质量来计量已经不能完全满足要求。因为在化学反应中,物质实际上是以分子、原子、离子等微观粒子的形式参与的,从而以系统中这些微观粒子的数量来计量远比以其总质量来计量要确切得多。鉴于此,直至其他6个单位被采纳为国际单位制基本单位的14年后,于1974年召开的第14届国际计量大会才决定将摩尔(mol)也采纳为基本单位。

摩尔的定义为：“表示一个系统中物质的量,该系统中所包含的基本单元(原子、分子、离子、电子及其他粒子,或粒子的特定组合)数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等”。在使用摩尔为单位进行计量时,基本单元必须明确,它所表示的物质的量与质量完全不同,1mol 中的基本单元数等于 6.02×10^{23} 个,后者称为阿伏加德罗 (Avogadro) 常数。

3. 国际单位制的导出单位

导出单位可以人为地分为以下 4 种:

- (1) 具有专门名称的导出单位,如力的单位牛顿(N),电容的单位法拉(F)等;
- (2) 用基本单位表示,但无专门名称的导出单位,如速度的单位米/秒(m/s)等;
- (3) 由具有专门名称的导出单位和基本单位组合而成的导出单位,如力矩的单位牛[顿]米(N·m)等;
- (4) 由无专门名称的导出单位和基本单位组合而成的导出单位,如角速度的单位弧度/秒(rad/s)等。

SI 导出单位是用 SI 基本单位以代数形式来表示的单位。导出单位符号中的乘和除采用数学符号。SI 导出单位由两部分组成:一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的导出单位(表 1-5);另一部分则为用 SI 基本单位和具有专门名称的 SI 导出单位以代数形式表示的单位,它们称为用组合形式表示的导出单位。例如, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

在国际单位制中,曾经在很长的一段时间内把弧度和球面度称为 SI 辅助单位,1990 年国际计量委员会重新将它们规定为具有专门名称的 SI 导出单位。因此,当前具有专门名称的 SI 导出单位共有 21 个。

表 1-5 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	英文名称	单位名称	国际符号	其他表示示例
平面角	radian	弧度	rad	
立体角	Steradian	球面度	sr	
频率	Hertz	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力,重力	Newton	牛[顿]	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力,应力	Pascal	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能量,功,热	Joule	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率,辐射通量	Watt	瓦[特]	W	J/s
电荷量	Coulomb	库[仑]	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
电位、电压、电动势	Volt	伏[特]	V	W/A
电容	Farad	法[拉]	F	C/V
电阻	Ohm	欧[姆]	Ω	V/A
电导	Siemens	西[门子]	S	A/V
磁通量	Weber	韦[伯]	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁通量密度/磁感应强度	Tesla	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	Henry	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	degree Celsius	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	K
光通量	Lumen	流[明]	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
光照度	Lux	勒[克斯]	lx	lm/m^2
放射性活度	Becquerel	贝克[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	Gray	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	Sievert	希[沃特]	Sv	J/kg

4. 国际单位制的倍数单位

SI 倍数单位由 SI 词头和 SI 单位(包括基本单位和导出单位)构成。国际单位制规定了 20 个词头(表 1-6)可组成不同的十进倍数,以满足不同场合对单位大小不同之需。例如,词头千(k)与长度单位米(m)可以构成倍数单位千米(km)。

唯一的例外是质量单位千克(kg)。由于此单位本身已经包含词头千(k),故需要构成千克的一千倍单位时,应将词头兆(M)加在克之前成为兆克(Mg)。

表 1-6 国际单位制的词头^①

因数	词头名称	国际符号	中文符号	因数	词头名称	国际符号	中文符号
10^{24}	尧它	Y	尧[它]	10^{-1}	分	d	分
10^{21}	泽它	Z	泽[它]	10^{-2}	厘	c	厘
10^{18}	艾可萨	E	艾[可萨]	10^{-3}	毫	m	毫
10^{15}	拍它	P	拍[它]	10^{-6}	微	μ	微
10^{12}	太拉	T	太[拉]	10^{-9}	纳诺	n	纳[诺]
10^9	吉咖	G	吉[咖]	10^{-12}	皮可	p	皮[可]
10^6	兆	M	兆	10^{-15}	飞母托	f	飞[母托]
10^3	千	k	千	10^{-18}	阿托	a	阿[托]
10^2	百	h	百	10^{-21}	仄普托	z	仄[普托]
10^1	十	da	十	10^{-24}	幺科托	y	幺[科托]

① 10^4 称为万, 10^8 称为亿, 10^{12} 称为万亿,此类数词的使用不受词头影响,但不应与词头混淆。

三、我国的法定计量单位

1. 法定计量单位的构成

我国法定计量单位是以国际单位制单位为基础,结合我国的实际情况选用了若干其他单位而构成的(图 1-1),包括以下 6 部分:

- (1) 国际单位制的基本单位;
- (2) 国际单位制的辅助单位;
- (3) 国际单位制中有专门名称的导出单位;
- (4) 国家选定的非国际单位制单位;
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位;
- (6) 由词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位。

表 1-7 列出了我国由国家选定的 11 个非国际单位制的法定计量单位。

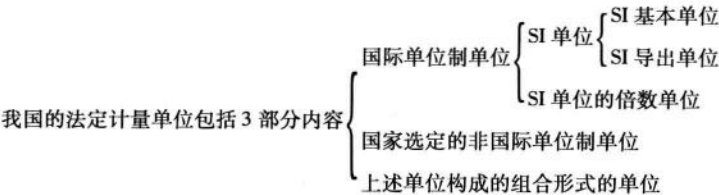


图 1-1 我国法定计量单位的构成

表 1-7 国家选定的非国际单位制的法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分 [小]时 天(日)	min h d	1 min = 60s 1 h = 60min = 3600s 1 d = 24h = 1440min = 86400s
平面角	[角]秒 [角]分 度	($''$) ($'$) ($^{\circ}$)	1 $''$ = ($\pi/648000$) rad 1 $'$ = 60 $''$ = ($\pi/10800$) rad 1 $^{\circ}$ = 60 $'$ = ($\pi/180$) rad
旋转速度	转每分	r/min	1 r/min = ($1/60$) s $^{-1}$
长度	海里	n mile	1 n mile = 1852m
速度	节	kn	1 kn = 1 n mile/h = (1852/3600) m/s
质量	吨 原子质量单位	t u	1 t = 10 3 kg 1 u $\approx$ 1.660540 $\times 10^{-27}$ kg
体积	升	L, (l)	1 L = 1 dm 3 = 10 $^{-3}$ m 3
能	电子伏	eV	1 eV $\approx$ 1.602177 $\times 10^{-19}$ J
级差	分贝	dB	—
线密度	特[克斯]	tex	1 tex = 1 $\times 10^{-6}$ kg/m
土地面积	公顷	hm 2	1 hm 2 = 10 4 m 2

2. 法定计量单位的名称

法定计量单位的名称是指单位的中文名称,后者又分为全称和简称。上述表中列出的单位名称均为该单位的全称,如把方括号内的字省略即成为该单位的简称。对于没有方括号的单位,其简称即为全称。

例如,力的单位的全称为牛顿,简称为牛;发光强度单位的全称为坎德拉,简称为坎。温度的单位摄氏度,既是简称,又是全称。

简称的作用有两个:一是在不至于发生混淆的场合,简称在使用上等效于它的全称;二是简称被规定作为单位的中文符号。单独一个法定计量单位的名称读写只要按给出的中文字读写即可。对于组合单位则另有一套严密的读写规则。

3. 组合单位的读写规则

(1)组合单位读写顺序与其国际符号表示顺序一致。但乘方形式的单位名称,要把指数名称读在所表示的单位名称之前。例如,电能单位 kW $\cdot$ h 的中文名称为“千瓦小时”或“千瓦时”;密度单位 kg/m 3 ,中文名称为“千克每立方米”。

(2)组合单位的国际符号中的数学符号“ $\cdot$ ”、“/”和“x”的读写应按以下规定。乘号“ $\cdot$ ”无对应名称,即不再读;除号“/”读为“每”,且不论分母中有几个单位,“每”字只在有除号的地方出现一次。乘方号“x”中的指数的相应名称一般是数字加“次方”两字。但如果是长度单位的2次或3次幂,且用于表示面积或体积时,则相应的指数名称应读写为“平方”或“立方”。对于指数是-1的单位,或分子为1的单位,其名称以“每”字开头。例如,冲量单位 N $\cdot$ s,其中文名称是“牛秒”;比热容单位 J/(kg $\cdot$ $^{\circ}$ C),其中文名称为“焦耳每千克摄氏度”。截面系数单位 m 3 ,其中文名称为“三次方米”;体积单位 m 3 ,其中文名称为“立方米”;波数的单位 m $^{-1}$,其中文名称为“每米”。

(3)我国法定计量单位也规定了词头相应的中文名称和符号。在20个词头中有8个常用词头,即表示 $10^{-6} \sim 10^6$ 的因数的词头,其中文名称为相应的汉语数词。但应注意,由于这些词头的中文名称本身就是数词,故它们应避免与中文数词混用,其他词头的中文名称为相应的音译汉字。

4. 量值的正确表达

(1)单位的名称或符号要放在整个数值之后。如 $80\text{kPa} \pm 2\text{kPa}$,可写作 $(80 \pm 2)\text{kPa}$,但不能写成 $80 \pm 2\text{kPa}$; $(642 \pm 6)\text{mm}$ 不应写成 $642 \pm 6\text{mm}$ 。

(2)十进制单位一般在一个量值中只应使用一个单位。如 1.81m ,不应写成 $1\text{m} 81\text{cm}$ 。非十进制的单位,允许在一个量值中使用几个计量单位,如 $28^\circ 37' 11''$ 、 $3\text{h} 45\text{min} 15\text{s}$ 。

(3)选用倍数或分数单位时,一般应使数值处于 $0.1 \sim 1000$ 范围内,如 $1.2 \times 10^4\text{N}$ 应写成 12kN ; 101325Pa ,应写成 101.325kPa 或 0.101325MPa 。某些场合习惯使用的单位可以不受上述限制,如大部分机械制图中长度单位使用“mm”。

(4)万(10^4)、亿(10^8)等数词的使用不受上述限制,它们也可与单位构成倍数单位,但它们不是词头。如“万吨公里”,符号可用 $10^4\text{t} \cdot \text{km}$ 或 $\text{万 t} \cdot \text{km}$ 。

四、天然气贸易常用计量单位及其换算

天然气贸易计量工作中经常需要测量长度、压力、差压、温度、流量、密度、发热量、电流、电压和电阻等参数,这些参数的计量单位及简单的换算关系如下。

长度的基本单位是米(m),常用的计量单位有分米(dm)、厘米(cm)、毫米(mm)和微米(μm)。换算关系是: $1\text{m} = 10\text{dm} = 100\text{cm} = 1000\text{mm}$, $1\text{mm} = 1000\mu\text{m}$ 。

压力的基本单位是帕(Pa),常用的计量单位有千帕(kPa)、兆帕(MPa)。换算关系是: $1\text{MPa} = 1000\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

差压的单位也是Pa,但由于差压的值一般比较小,因此,计量单位常用Pa或kPa。

温度的基本单位是开(K),即热力学温度,但在计量操作中习惯用摄氏度($^\circ\text{C}$),热力学温度与摄氏温度的换算关系见式(1-6):

$$t = T - T_0 \text{ 或 } T = t + T_0 \quad (1-6)$$

式中 t ——摄氏温度, $^\circ\text{C}$;

T ——热力学温度,K;

T_0 —— 273.15K 。

天然气发热量分为体积发热量、质量发热量和摩尔发热量。体积发热量常用的计量单位为 kJ/m^3 和 MJ/m^3 ;质量发热量常用的计量单位为 kJ/kg 和 MJ/kg ;摩尔发热量常用的计量单位为 kJ/mol 和 MJ/mol 等;也可用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 作为天然气发热量的计量单位。

密度常用的计量单位为 kg/m^3 和 g/m^3 。

天然气流量分为体积流量、质量流量和能量流量,同时又分为瞬时流量和累积流量。瞬时体积流量的计量单位是 m^3/s ,常用的计量单位有 m^3/h 、 m^3/d 、 $10^4\text{m}^3/\text{d}$ 等;累积体积流量的计量单位是 m^3 。瞬时质量流量计量单位是 kg/s ,常用的计量单位有 kg/h 、 kg/d 、 t/d 等;累积质量流量计量单位是 kg ,常用的计量单位有 t 。

能量计量时,按天然气体积(或质量)发热量推导出其瞬时能量计量单位是 J/s ,常用的计量单位有 MJ/s 、 MJ/h 、 MJ/d 、 GJ/d 等;累积能量计量常用的计量单位有 kJ 、 MJ 、 GJ 等;也可用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 作为天然气累积能量计量单位。