

石油工业技术监督丛书 4

原油贸易计量

潘光坦 编



石油工业出版社

北京)

1

PDG

《石油工业技术监督丛书》编审委员会

顾 问 张永一 李天相 金钟超 史久光
主 任 张兴儒
副主任 金志俊
委 员 (按姓氏笔划为序)
石国栋 杨 果 张及良 张克勤
张孝文 张宗愚 张家茂 李儒沛
李鹤林 周 明 陈贻良 赵宗仁
郭福民
主 编 金志俊(兼)

《原油贸易计量》编写组

编 写 潘光坦
主 审 杨 果 黄 飞
审 定 金志俊

序 言

我国石油工业经济的发展,虽然早在北宋科学家沈括(公元1031~1095年)所著《梦溪笔谈》中第一次提出“石油”这个名称时就已启动了,但历经近千年后,在石油工业已进入了现代化的社会主义市场经济条件下,其技术监督工作也已作为建立和完善现代企业制度的重要基础工作之一,成为我国石油工业在国内、外市场竞争中宏观调控和规范市场的有效手段。作为石油工业技术监督工作主要内容的质量管理与质量监督、标准化、计量工作,多年来在我国石油、天然气和石油化工企业的发展中,起到了十分重要的作用。新中国成立以来,石油工业质量、标准化、计量工作在50年的迅速发展,已取得了显著成效,为提高石油企业的经济效益起到了巨大的推动作用,石油工业技术监督专业管理队伍已基本形成,产品质量和计量技术检测人员的素质也有了明显提高。

为了进一步提高我国石油、石化工业质量管理、标准化、计量管理人员和技术机构的业务水平、技术监督法制意识,以保证国家《计量法》、《标准化法》、《产品质量法》在石油和石化工业系统的认真贯彻实施,并为广大石油工业质量管理、质量监督检验、标准化、计量工作者提供一套系列参考书和培训教材。中国石油天然气集团公司(原“中国石油天然气总公司”)质量、标准化、计量主管部门组织有关专家和技术监督管理工作者,总结了石油工业生产和建设多年来质量、标准化、计量现场工作经验,并从其理论上作了较系统的整理,编写了《石油工业技术监督丛书》。

这套《丛书》在编写过程中,坚持遵循法规性、科学性、专业性、实用性的原则。其内容包括了石油天然气工业质量管理、质量监督检验、质量认证;石油工业标准化及其发展;石油工业计量管理工作和计量技术检测工作;还适当介绍了石油工业系统贯彻实施

国家《计量法》、《标准化法》和《产品质量法》的情况。《丛书》第一次较系统地整理了新中国成立 50 年来,我国石油天然气工业质量管理与质量监督检验、标准化、计量管理和技术检测的发展历史,力求在叙述石油工业企业贯彻实施国家技术监督“三法”情况的同时,努力体现石油天然气工业和企业技术监督工作方面的特色。

本套《丛书》的编写者,都是多年从事石油天然气工业质量管理与质量检验、标准化管理与标准制修订、计量管理与计量检测的工作人员。大多数作者具有丰富的生产实践和技术监督管理经验,且具有一定的质量、标准化、计量方面的理论基础。为保证《丛书》的质量,还特邀部分技术专家和管理工作者组成编审委员会对《丛书》进行了审查把关。《丛书》的编写和审定得到了原石油工业部副部长、原中国石油天然气总公司副总经理李天相同志和原中国石油天然气总公司副总经理、原国家原油大流量计量检定站站站长金钟超同志的关心和具体指导。还得到了国家原油大流量计量检定站、中国石油天然气集团公司石油工业标准化研究所、中国石油天然气集团公司原油及石油产品质量监督检验中心、四川石油管理局天然气研究院、中国石油天然气集团公司工程技术研究院、中国石油天然气集团公司江汉机械研究所、中国石油天然气集团公司石油管材研究所等单位的大力支持。在此,仅表示衷心地感谢。

本套《丛书》,计划由石油工业出版社出版共十二分册,由于时间的推移和工作机构的变化,《丛书》后部的各分册名称和内容,在原计划基础上作了部分调整。我们盼望这套《丛书》能系统地反映我国石油天然气工业现阶段质量工作、标准化工作、计量工作的特色,为推动石油天然气工业技术监督工作起到应有的推动作用。

由于本套《丛书》所涉及的技术专业面较广,编写人员较多,编写时间又不集中,出版时间较分散,书中存在的问题和缺点在所难免,热忱欢迎广大读者提出批评和指正。

金志俊

2000 年 3 月 20 日

前 言

根据我国的计量法律和法规,原油的贸易计量是依法进行管理的。因此,本书的编写遵循了原油贸易计量有关的标准、计量检定规程等法律、法规。在编写本书的过程中,涉及的内容如果我国还没有相应的标准、计量检定规程等相应的法规,或者是标准、计量检定规程等相应的法规不齐全,则参照国际标准化组织(International Standardization Organization,缩写成 ISO)的标准、美国石油学会石油计量标准手册(Manual of Petroleum Measurement Standards,缩写成 API MPMS)的标准。遵循和参照的标准、计量检定规程等有关法规,在涉及的章节内都有说明。

编写本书时涉及到的某些计量器具的结构和性质,是参考有关制造厂的资料。计量器具安装、操作和管理方面的内容,是原油计量工作者现场工作经验的总结。

在编写本书的过程中,作者力争将原油贸易计量目前已有的技术内容,尽可能收集齐全。另外,因作者水平有限,书中还可能存在不足或错误,衷心希望得到读者的谅解和批评指正。

编 者

1999年6月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 原油贸易计量概述	(1)
第二节 原油的物理性质	(4)
第三节 测量数据的处理	(14)
第二章 计量用的容器	(36)
第一节 计量用的储存容器	(36)
第二节 计量用的运输容器	(38)
第三章 计量容器的计量检定	(40)
第一节 储存容器的计量检定	(40)
第二节 运输容器的计量检定	(56)
第四章 原油液位高度和温度的测量	(59)
第一节 原油液位高度的测量	(59)
第二节 原油温度的测量	(73)
第五章 取样和原油密度、含水率的测量	(88)
第一节 容器内取样	(88)
第二节 原油密度值的测量	(98)
第三节 原油含水率的测量	(114)
第六章 静态计量仪表的配置和油量计算	(124)
第一节 静态计量仪表的配置	(124)
第二节 静态计量的油量计算	(125)
第七章 流量计和有关的辅助设备	(138)
第一节 容积式流量计	(138)
第二节 涡轮流量计	(151)
第三节 质量流量计	(161)
第四节 流量计的辅助设备	(174)
第八章 计量标准器(标准装置)	(177)
第一节 标准体积管	(177)
第二节 标准罐——标准金属容器	(196)
第三节 标准流量计	(199)

第九章 标准体积管和流量计的检定	(201)
第一节 标准体积管的检定	(201)
第二节 流量计的检定	(234)
第十章 原油的自动取样	(252)
第一节 自动取样的一般原则	(252)
第二节 自动取样系统及其安装要求	(254)
第三节 自动取样的设备及其安装要求	(258)
第四节 样品的混合和处理	(274)
第五节 自动取样系统和部件的检验	(276)
第六节 自动取样系统的操作	(281)
第十一章 原油密度和含水率在线测量	(285)
第一节 原油密度值在线连续测量	(285)
第二节 原油含水率在线测量	(292)
第十二章 原油计量使用的常规仪表	(298)
第一节 温度测量仪表	(298)
第二节 压力和压差测量仪表	(305)
第十三章 原油贸易计量站	(308)
第一节 站的设置和站内计量系统	(308)
第二节 站的工艺流程	(310)
第三节 仪表和设备的选用	(313)
第四节 站的运行管理	(319)
第五节 油量计算	(324)
附录 我国的法定计量单位和流量计量中的单位换算	(338)
参考文献	(350)

第一章 绪 论

第一节 原油贸易计量概述

原油贸易计量是在测量条件下,测量出贸易交接的原油数量,需要的原油质量参数和原油中的含水率。然后,用测得的参数计算求得标准参比条件下贸易结算的、不含水原油的数量,给出与原油价格有关的质量参数(如原油的密度值、原油含硫量等)。根据贸易双方合同的约定,原油的数量可用 t 为结算单位,也可用 m^3 或 bbl 为结算单位。我国国内目前主要用 t 为结算单位,国际上许多国家用 bbl 为结算单位。

国内外原油贸易计量常用的方法有两种,即静态计量和动态计量。静态计量是利用通过检定,准确地确定出容积量的、储存或运输原油的容器,测量出原油的体积量,从容器内取得有代表性的原油样品,测量需要的原油质量参数和原油的含水率;动态计量是利用通过检定合格的原油流量计,测量出通过输送管道流动的原油体积量,从管道内取得有代表性的原油样品,测量需要的原油质量参数和原油的含水率,有的原油质量参数也可用相应的在线仪表测量。

原油体积量的大小与原油承受的温度和压力有关。温度和压力发生变化时,原油的体积量也发生变化。因此,在原油贸易中必须规定计算原油体积量的温度和压力条件,这种条件称之为标准参比条件。国家标准 GB/T 17291《石油液体和气体计量的标准参比条件》给出了规定的温度和压力值。从目前来看,世界各国规定标准参比条件使用的压力是相同的,其值为 101.325kPa 或 14.73 psi。如果在标准参比温度下,原油的平衡饱和蒸气压高于上述

值,一般都采用原油的平衡饱和蒸气压作标准参比压力。世界各国规定标准参比条件使用的温度是不相同的,我国规定标准参比条件使用的温度是 20°C ;美、英等国是使用 60°F ,相当于 15.6°C ;欧洲的一些国家和国际标准化组织使用 15°C 。由于国际上规定的标准参比条件不相同,在国际上进行原油的贸易交易时,必须在合同中对所采用的标准参比条件进行规定,作为确定原油量和有关质量参数的条件。

合同规定的标准参比条件是贸易双方共同遵守的条件,任何温度和压力条件下测得的原油体积量和密度值等,都必须换算成标准参比条件下的值。

根据我国计量法律和法规的规定,原油贸易计量是属于依法强制管理的范畴,其计量器具必须依法进行强制管理和监督。也就是说,原油贸易计量必须符合以下要求:

(1)原油贸易计量选用的标准器、工作计量器具以及计量用的其他仪表,必须满足有关技术标准和规程的技术要求,并与原油的性质、测量条件和环境条件相适应;符合国家对标准器和工作计量器具管理的规定,给出的量值是我国法定的计量单位。

(2)原油贸易计量用的标准器要将复现的量值传递到工作计量器具,工作计量器具测得的量值通过各级标准器,可溯源到国家基准。因此,标准器必须按国家计量行政主管部门规定的考核程序和有关的要求,向国家计量行政部门申请考核。

(3)原油贸易计量用的工作计量器具,是属于国家强制检定的计量器具,应由国家计量行政部门或授权的计量检定技术机构,按计量检定系统表和检定规程,定期、定点地进行强制检定。检定合格的计量器具,发给检定证书。发给检定证书的计量器具,对影响计量结果的可调部件,检定机构将加有该机构标志的铅封,不允许任何人调整。工作计量器具只有获得检定证书后,才能投入使用。

(4)原油贸易计量的有关运算,必须按国家标准进行,以保证不同的计算人员,用同样的计量数据,均能得到相同的运算结果。

一、原油的静态计量

静态计量是指被测量的量处在不变的恒定量状态下进行的测量。容器内储存的原油,在不进行输入或输出的条件下测量原油量,被测原油量就是恒定的量,这种测量就称之为静态计量。按照我国国家标准的规定,原油贸易静态计量的不确定度,应不大于 $\pm 0.35\%$ 。

原油贸易计量采用静态计量方法进行测量,必须有储存原油的容器,从容器中取样和测温用样品测量原油质量参数的仪表设备,以便为原油贸易计量提供所需要的、标准参比条件下的不含水纯原油量,以及与原油价格有关的质量参数。

二、原油的动态计量

动态计量是指测量随时间变化的、瞬时量的量值。也就是说,动态计量是测量处于流动状态下的原油量。

实现原油的动态计量,必须具有测原油量的流量计及辅助设备,取得原油质量参数的自动取样器或在线测量仪表,用样品测量原油质量参数和含水率的仪表,测量温度和压力值的仪表,以及检定流量计等装置。将这些仪表和设备按一定的规律用管道连接起来,组成动态计量系统,完成动态计量功能。

原油动态计量的主要功能:

(1)给出测量条件下不确定度等于或小于 $\pm 0.2\%$ 的原油体积量。

(2)给出原油贸易交接需要的原油质量参数,一般是原油的密度值。对含硫原油通常还需要给出含硫量。

(3)给出原油中的含水率,测量条件的温度和压力值。

(4)根据贸易结算规定的量值,利用上面这些参数计算出贸易结算的纯油(不含水)质量(t),或标准条件下的纯油(不含水)体积量(m^3)。

为确保动态计量上述功能的完成,必须做好以下的工作:

(1)选择好适合被测量原油性能、测量条件、环境条件和准确度要求的流量计,以及确保流量计正常运行和准确测量的辅助设

备,有关的仪器仪表。

(2)准备好测量原油质量和其他参数用的,并符合准确度要求的设备和仪器仪表。

(3)选择好适合流量计和其他计量仪表进行定期、定点强制检定的方式、方法,检定用的标准装置及有关的设备与仪器仪表。

(4)正确地确定出适合动态计量、计量检定、正常运行操作、事故处理、维修和启动投产、停运等操作的计量工艺流程和配套的辅助工艺流程。例如,伴热、扫线等辅助流程。

本书从第二章起将分别阐述原油的静态计量(第二章到第六章)和动态计量(第七章到第十三章)。

第二节 原油的物理性质

原油计量与原油的物理性质有关,有的性质还要直接参与原油贸易交接量的确定。下面对与原油贸易计量有关的物理性质进行介绍。

一、原油的密度

在一定的温度和压力条件下,原油的质量与体积之比是一个常数,该常数称之为原油的密度,用数学公式表示如下:

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中 ρ ——原油的密度值;

m ——原油的质量;

V ——原油的体积。

单位体积内所含原油的质量作为原油密度的单位。也就是说,原油密度的单位与质量和体积所采用的单位有关。我国的法定计量单位是用 kg/m^3 、 t/m^3 或 kg/L 。

原油的体积随温度和压力的变化而变化。因此,在不同的温度和压力条件下对应有不同的原油密度值。

在原油计量中还会遇到有关密度的下列术语及其相应的定义：

(1)标准密度。标准参比条件(压力为 101.325kPa,温度为 20℃)下的密度值。

(2)视密度。用石油密度计在 t 温度(非 20℃)下测得的密度值(压力是大气压,一般可认为是 101.325kPa)。

(3)相对密度。相对密度是原油的标准密度与压力为 101.325 kPa,温度为 4℃时蒸馏水密度值之比,用数学公式表示为

$$\rho_4^{20} = \rho_{20} / \rho_4 \quad (1-2)$$

式中 ρ_4^{20} ——原油的相对密度;

ρ_{20} ——原油的标准密度;

ρ_4 ——蒸馏水在 101.325kPa 压力和 4℃ 温度下的密度值。

ρ_{20} 和 ρ_4 必须使用相同的单位,例如 t/m^3 , kg/m^3 等。

在原油贸易交接计量中用质量结算的量,目前是用原油的体积量乘原油的密度值求得。确定原油的密度值有两种方法:一是取得原油的样品用石油密度计测得密度值;二是用在线密度计测得原油的密度值。无论使用哪一种方法都离不开石油密度计。

为了满足在各种地区测量原油密度值的要求,必须在真空中对石油密度计进行刻度。如果密度计不在真空中刻度而在大气中刻度,应将当地空气浮力的影响在密度计的刻度中体现出来,该密度计只能在当地使用。正是由于这种原因,石油密度计测得的原油密度值必须用下式进行空气浮力影响的修正,即

$$\rho_{20空} = \rho_{20} \cdot f \quad (1-3)$$

式中 $\rho_{20空}$ ——原油在空气中的密度值;

ρ_{20} ——石油密度计测得的原油密度值;

f ——密度值的空气浮力修正系数(可从表 1-1 中查得)。

表 1-1 密度值的空气浮力修正系数

20℃的密度值, g/cm ³	修正系数 <i>f</i>	20℃的密度值, g/cm ³	修正系数 <i>f</i>
0.5000~0.5093	0.99770	0.6796~0.7195	0.99840
0.5094~0.5315	0.99780	0.7196~0.7645	0.99850
0.5316~0.5557	0.99790	0.7646~0.8157	0.99860
0.5558~0.5822	0.99800	0.8158~0.8741	0.99870
0.5823~0.6114	0.99810	0.8742~0.9416	0.99880
0.6115~0.6136	0.99820	0.9417~1.0205	0.99890
0.6137~0.6795	0.99830	1.0206~1.1000	0.99900

在原油的国际贸易中,经常遇到 API 重度或 API 度这个词。API 度是美国测量液体石油和石油产品密度(相对密度)使用的单位,例如 32.5 API 度的原油,相当于密度值为 862 kg/m³ 的原油。用这种单位刻度的密度计叫做 API 比重计或 API 重度计。API 度不仅在美国使用,世界上许多国家也使用,下面对它的定义和相互之间的换算做以介绍。

API 度的定义可用下式表示:

$$\text{API 度}_{[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})\text{下}] = \frac{141.5}{\text{相对密度}} - 131.5 \quad (1-4)$$

$$\text{相对密度} = \frac{15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})\text{下的原油密度值}}{15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})\text{下的水密度值}}$$

美国标准给出的 15.6℃(60°F)下的水密度值为 999.012 kg/m³ 或 0.999012 g/cm³。

API 度、相对密度和原油密度值之间的相互换算公式如下。

已知 API 度求相对密度:

$$\text{相对密度} = \frac{141.5}{\text{API 度} + 131.5} \quad (1-5)$$

已知 API 度求原油密度:

$$\begin{aligned} \text{原油密度}_{[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})]} &= \frac{141.5 \times \rho_{\text{水}[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})]}}{\text{API 度} + 131.5} \\ &= \frac{999.012 \times 141.5}{\text{API 度} + 131.5} \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-6)$$

已知原油在 15.6°C (60°F) 的密度值 $\rho_{[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})]}$ 求 API 度:

$$\text{API 度} = \frac{999.012 \times 141.5}{\rho_{[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})]}} - 131.5 \quad (1-7)$$

该式中 $\rho_{[15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})]}$ 的单位是 kg/m^3 。

二、原油体积的膨胀性

原油的体积随温度的上升而膨胀,随温度的下降而收缩。这种随温度的变化而变化的物理性质,称之为原油的体积膨胀性。

原油体积的这种膨胀性,给确定原油在贸易交接中的体积量带来很大的困难。为解决这个问题,世界各国都规定出确定原油体积量的温度值,即前面已经说明的标准参比温度。

根据原油体积的膨胀性可以推断,同一体积量的原油,在高于标准参比温度的温度条件下测量时,测得的体积量一定比标准参比温度下测得的体积量大;相反,在低于标准参比温度的温度条件下测量时,测得的体积量要比标准参比温度下测得的体积量小。因此,对原油体积量进行温度修正时,高于标准参比温度应乘以小于 1 的修正系数,低于标准参比温度则应乘以大于 1 的修正系数。

根据上述的推断,可得出原油体积量的下述修正公式:

$$V_s = KV_t \quad (1-8)$$

式中 V_s ——原油在标准参比温度下的体积量;

K ——原油的体积修正系数;

V_t ——原油在 $t^{\circ}\text{C}$ 温度下测得的体积量。

原油体积随温度的变化也可用原油的热膨胀系数 β 来表示,即

$$V_s = V_t [1 + \beta(20 - t_p)] \quad (1-9)$$

式中 β ——原油的热膨胀系数,表示温度每变化 1°C 时,原油体积的变化率, $1/^{\circ}\text{C}$;

t_p ——测量原油体积量时的原油温度,℃;

20——标准参比条件的温度值,℃。

将公式(1-8)和(1-9)相对比可以看出,公式(1-8)中的 K 可表示为

$$K = 1 + \beta(20 - t_p) \quad (1-10)$$

从上述的公式可以看出,确定体积修正系数 K , 必须确定出原油的热膨胀系数 β 。通过实验研究已经确定,原油热膨胀系数与原油的密度值有关。一般来说,原油的密度值越小,原油的热膨胀系数越大;相反,原油的密度值越大,温度每变化 1℃,原油体积的变化率相对来说是较小的。该特征在原油的 K 系数表中也体现出来。

原油贸易计量中,较通用的修正系数表是 ISO 91:2 和美国 API 石油测量标准手册公布的表。下面对我国的修正系数表和 API 的修正系数表进行一些介绍。

1. 我国编制的原油贸易计量用的表

国家标准 GB/T 1885—1998(等同采用 ISO 91:2 国际标准)中有两组石油计量表,一组表叫“普通原油的 20℃ 体积修正系数表”,利用原油的标准密度和不同的温度,可从该表查得原油的体积修正系数;另一组表叫“普通原油 20℃ 的密度表”,在不同温度下测得的原油视密度,可从该表查得标准参比条件下的原油标准密度值。有关查表和取数据的方法,可参照该标准的说明进行。

2. 美国编制的原油贸易计量用的表

在国际原油贸易计量中,一般都是利用美国 API 石油标准计量手册中给出的修正系数表。

为修正温度变化引起原油体积量的变化,早在 1940 年美国就编制出有关的修正系数表。1972 年发现以前公布的数据表不能满足需要,1974 年在老数据表的基础上开始进行新的试验研究,用了 5 年的时间,于 1979 年完成试验研究。这次试验研究用了 349 个样品(见表 1-2),样品是由美国、国际标准化组织和其他一

些国家提供的,我国没有提供样品。通过试验研究后公布了新的修正系数表。美国石油学会(API标准 2540)、英国石油协会(伦敦)(IP 200)、国际标准化组织(ISO 91)、美国试验材料学会(ASTM D1250)、美国国家标准协会(ANSI/ASTM D1250),都以标准的形式予以公布(上面括号内的编号为公布的标准号)。

表 1-2 确定修正系数使用的石油样品

样品种类	样品数	观测数据的数量	密度范围 kg/m ³	温度范围 ℃(°F)
原油	124	690	770~990	4.4(40)~56(133)
成品和半成品汽油	76	436	657~770	3.9(39)~44(111)
喷气燃料油、煤油、溶剂油	44	351	785~825	3.9(39)~52(125)
燃料油、取暖用油、柴油	76	617	812~1075	3.9(39)~58(136)
润滑油	17	107	861~940	4.4(40)~58(136)
其他各种各样的油				
润滑油	2	13	927~972	10(50)~53(127)
重整油、石脑油等	6	43	664~823	3.9(39)~54(129)
JP-4油	4	21	736~763	5(41)~40(104)
总计	349	2278		

表 1-2 中观测的数据综合回归成修正系数方程的标准偏差,在表 1-3 中给出。

表 1-3 综合回归的标准偏差

样品组	观测数据的数量	标准偏差, %
原油组	690	0.0253
汽油组	436	0.0266
喷气燃料组	351	0.0174
燃料油组	617	0.0180
润滑油组	107	0.0197

标准在给出修正系数的同时,还对编制体积修正系数的背景、发展过程、计算系数用的计算机程序文件和相应的计算例题,计算过程中各种数据应取有效数字的位数,小数舍入的要求等都做了详细的说明,让使用者全面了解系数表的编制和使用要求,以便更好地利用系数表。有关这部分的内容见 API 计量手册第 11.1 章第十卷《背景、发展过程和程序文件》。

在计算机程序文件中,还给出计算的修正系数在 95% 置信度下,不同温度时的百分数准确度。同时也指出,如果该准确度不能满足要求,建议测量原油的热膨胀性质,使用表 6c 查原油的体积修正系数。表 6c 的名称叫《关于个别和特殊应用时,相对 60°F 的热膨胀系数将体积修正到 60°F 下的体积修正系数》。表 6c 是根据热膨胀系数 α_T 和温度查体积修正系数。

为说明表 6c 用的热膨胀系数 α_T ,将标准导出体积修正系数的内容简介如下。

对流体的热膨胀系数做如下的基本定义:

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-11)$$

式中 α ——热膨胀系数;
 V ——任意温度下的体积;
 t ——任意温度。

热膨胀系数还可用下式表示:

$$\alpha = \alpha_T + \beta \Delta t \quad (1-12)$$

式中 α_T ——标准参比温度下的热膨胀系数;
 β ——热膨胀系数的函数,与温度无关。

根据方程式(1-11)和(1-12)可以得出

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \alpha_T + \beta \Delta t \quad (1-13)$$

$$\Delta t = t - T$$