

天然气和凝析油

下册

● 开采 ● 初加工 ● 输送

(苏) Ю.П. 科罗塔耶夫 P.Л. 马尔古洛夫 主编



石油工业出版社

39861

天然气和凝析油

开采 初加工 输送

下 册

〔苏〕Ю.П.科罗塔耶夫 P.Д.马尔古洛夫 主编

陈祖泽 译



00278010



200397329

石油工业出版社

内 容 提 要

本书分为上、下两册。本册详尽地介绍了天然气和凝析油初加工中天然气的干燥和分离、凝析油及从中获得的商用产品的稳定、天然气的脱硫和脱二氧化碳工艺方法；天然气与凝析油的输送和储存工艺、技术设备、天然气的液化方法、液化气的储存和重新气化等内容。书中对供气系统的操作和可靠性指标也进行了分析研究。

本书可供从事天然气和凝析油开采、矿场油气集输和天然气液化的专业人员阅读使用。

ДОБЫЧА, ПОДГОТОВКА И ТРАНСПОРТ

природного газа и
конденсата том I

Ю. П. Корогаев Р. Д. Маргулов

«НЕДРА» 1984

天然气和凝析油
开采 初加工 输送

下 册

(苏) Ю. П. 科罗塔耶夫 Р. Д. 马尔古洛夫 主编

陈祖泽 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168 毫米 32 开本 9 1/4 印张 257 千字 印 1—2,000

1989 年 5 月北京第 1 版 1989 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0213-2/TE·209

定价: 2.60 元

目 录

第一章 天然气、凝析油及其加工产品的技术条件	(1)
§1.1 商用产品的技术条件 (B. И. 格沃兹杰夫)	(1)
§1.2 气态和液态产品流量和数量的测量和计算 (A. И. 波 德科帕叶夫)	(7)
第二章 天然气和凝析油的物理加工方法 (И. Т. 巴雷 别尔季娜)	(34)
§2.1 基本过程的分类和简要特征	(35)
§2.2 质量交换 (扩散) 过程	(41)
§2.3 吸收-解吸过程的原理流程	(46)
§2.4 提取天然气中的烃类组分	(62)
§2.5 从天然气中提取水蒸气——天然气的干燥	(72)
§2.6 质量交换设备的构造	(76)
第三章 天然气的脱硫和脱二氧化碳 (И. Т. 巴雷别尔季娜)	(86)
§3.1 从天然气中提取酸性组分的吸收过程的分类	(87)
§3.2 利用物理溶剂的天然气净化过程	(97)
§3.3 天然气气流中酸性组分提取过程的选择	(106)
§3.4 从硫化氢生产硫	(109)
§3.5 废气净化	(112)
§3.6 用直接转化过程净化气体	(115)
§3.7 从天然气中脱除有机硫	(118)
第四章 输气管路系统的设计 (B. М. 阿加普金)	(123)
§4.1 天然气管路输送在国民经济中的重要性及 其技术-经济指标	(123)
§4.2 天然气管路输送的经济指标	(128)
§4.3 输气管系统的最优参数	(138)
§4.4 输气管水力计算	(155)
§4.5 输气管温度状况	(164)
§4.6 干线管路的强度和稳定性计算	(176)

第五章 管路的防腐 (B.A. 尤芬)	(186)
§5.1 沥青玛蹄脂防腐绝缘层	(187)
§5.2 聚合物胶粘带防腐绝缘层	(190)
§5.3 输气管阴极保护	(192)
§5.4 管路的牺牲阳极保护	(198)
§5.5 防止输气管遭受杂散电流腐蚀	(199)
第六章 天然气的液化 (A.Д. 德沃伊里斯)	(202)
§6.1 现代天然气液化工厂的工艺流程	(202)
§6.2 用于液化装置的高效型涡轮机的选择	(219)
§6.3 天然气液化装置的换热设备、结构特性和计算 基本原理	(228)
§6.4 大型天然气液化装置的最优技术方案	(254)
第七章 地下储气 (E.B. 列维金)	(268)
§7.1 储气库的用途和类型	(268)
§7.2 储气库的容积和流量	(269)
§7.3 地下储气库地面设备流程	(278)
§7.4 作为统一供气系统子系统的地下储气库 的工艺计算	(283)
§7.5 地下储气库在气态下周期性操作的计算	(290)
§7.6 储气库在水压状态下周期性操作的计算	(294)
§7.7 在处于气体状态下的衰竭矿层中建造储气 库的计算	(300)
§7.8 在处于水压状态下的衰竭矿层中建造储气库 的近似计算	(303)

第一章 天然气、凝析油及其加工产品的技术条件

§1.1 商用产品的技术条件

天然气及其加工产品作燃料或原料用时,对它们有种种要求,诸如商用产品的质量、对当燃烧产物向大气排放时环境可能受到污染的程度的限制等。

表1-1所列出的是由于工业生产废气向大气排放大气受污染的允许标准和危险浓度。

表1-1 大气被工业废气污染的允许标准和危险浓度

组 分	大气污染的允许标准 毫克/米 ³				大气污染的危险浓度 毫克/米 ³	
	受特别保护的地区		其它地区		1小时的平均值	24小时的平均值
	24小时的平均值	最大允许值	24小时的平均值	最大允许值		
氢	0.20	0.20	0.50	1.50	未限定	未限定
汽油	1.50	5	80	240	未限定	未限定
酚	0.01	0.01	0.20	0.60	未限定	未限定
氟化物	0.01	0.03	0.03	0.10	未限定	未限定
二氧化硫	0.15	0.50	0.50	1.0	未限定	2.620
硫化氢	0.008	0.008	0.15	0.30	未限定	未限定
硫酸	0.10	0.30	0.30	0.30	未限定	未限定
氮	0.03	0.10	0.30	0.60	未限定	未限定
烟黑	0.05	0.05	0.10	0.10	未限定	未限定
二氧化氮	0.085	0.085	0.15	0.50	3.75	0.938
铅	0.0007	0.0007	0.001	0.002	未限定	未限定
沉淀的灰尘	150 ^①	150 ^①	200 ^①	200 ^①	未限定	未限定
一氧化碳	1.00	3.00	2.00	6.00	0.144	未限定
光化学氧化剂	未限定	未限定	未限定	未限定	1.4	未限定

①以吨/(年·公里²)为单位。

供工业和生活用的天然气及其加工产品应该符合运输、储存、供应和使用的标准或技术条件。按质量指标对商用产品的验

收是在供货者移交产品的地点进行的。遇到商用产品的质量不符合所规定的标准或技术条件时,通常要再次测定质量。在有争议的情况下,由供方代表和用户代表共同监督测量或进行仲裁测量,其结果由双方写成正式记录。根据供方和用户之间协商的结果,在供货协议书上定出关于商用产品质量指标方面有争议问题的解决方式。如双方无法解决有争议的问题时,则通过仲裁的方式加以解决。

1.1.1 天然气

对供应用户的天然气的技术条件或标准应该反映出硫、空气或氧、二氧化碳、一氧化碳的允许含量、允许的水分饱和度和、固体杂质和其它组分的含量、热值等。

对天然气的要求分为对输入干线输气管的天然气的要求(全苏标准OCT51.40-83)和对供给公共生活用户的天然气的要求(全苏国家标准ГОСТ5542-78)。供气规格说明书包含有技术条件或标准中的一个或几个指标,其细则用试验方法定出(全苏国家标准ГОСТ22387.0-77-22387.5-77)。主要要指出水、烃和酸性气的含量、天然气的热值和密度。

由于天然气工业的发展,使它成了全国燃料-动力综合体的一个关键部门。在70年代就已要求对不同气候带定出对输入干线输气管的天然气质量的要求,规定天然气对水和烃的露点指标的标准。

由于采气中心转移到气候严寒地区,这就要求制定天然气的质量指标。这些指标(天然气对水和烃的露点、机械杂质、氧和硫化氢的含量)曾按苏联部颁标准(于1975.1.1.生效)作过规定。但是所积累的有关天然气处理装置和输气系统的操作经验表明,对准备输送的天然气露点的选择采取实际的态度极为重要。这种实际态度的实质在于使所要输送的天然气露点受输气管通过地区的年平均或季节平均环境温度的制约,这样就有可能略为降低对所要输送的天然气有关指标(例如天然气对烃和水的露点)的某些要求。按物化指标,天然气应符合表1-2中所列出的

表1-2 对天然气的要求和标准

指 标	微气候带的标准				试验方法
	温 带		寒 带		
	从5月1日 到9月30日	从10月1日 到4月30日	从5月1日 到9月30日	从10月1日 到4月30日	
1.天然气对水的露点不超过, °C	0	-5	-10	-20	按全苏国家标准 ГОСТ 20060-74
2.天然气对烃的露点不超过, °C	0	0	-5	-10	按ГОСТ 20061-74
3.每1米³天然气中机械杂质量不大于, 克	0.003	0.003	0.003	0.003	按ГОСТ 22387.4-77
4.每1米³天然气中硫化氢的量不超过, 克	0.02	0.02	0.02	0.02	按ГОСТ 17556-81 和ГОСТ 22387.2-77
5.每1米³天然气中乙硫醇的量不超过, 克	0.036	0.036	0.036	0.036	按ГОСТ 17556-81
6.氧的容积分率不超过, %	1	1	1	1	按ГОСТ 23781-79 和22387.3-77

注: 1. 对天然气中C₇+C₈以上烃类含量不超过1克/米³的气田, 对天然气对烃的露点的标准不作规定;

2. 气候带按全苏国家标准ГОСТ 16350-80确定;

3. 根据按规定程序商定的技术条件允许把硫化氢和乙硫醇含量较高的天然气供给某些输气管。

要求和标准。

在取气样以检查天然气的质量时, 应注意不能让空气和其它杂质落到气样的组分中。

天然气中的含水量是根据天然气在某一压力下的露点来确定的。利用天然气的湿度诸模图, 按露点和压力可确定含水量(公斤/1000米³)。天然气中水和重烃的含量建议按全苏国家标准ГОСТ 20060-74和ГОСТ 20061-74来确定。

天然气的露点可用冷凝法确定。以这种测量方法为基础的仪

表由带有温度计和反射镜的压力室组成。当冷却压力室时，用目视的方法就能容易地确定冷凝点，而露点可从温度计上判读。用这种方法可测出天然气对水和对重烃的露点。

如果要求连续测量天然气对水的露点，则可利用以测量吸湿盐导电率为基础的仪表。所分析的天然气流中的水分用吸湿盐吸收。通常采用的是带有 P_2O_5 根的盐。当水分被吸收时，水电解为氢和氧。电解时产生的电流（湿度越大，电流也越大）可作为在所分析的天然气中含水量的度量。

天然气中重烃的含量、天然气的热值和密度可按其成分计算。重烃的含量通常是利用小型的低温分离装置来估计的。

天然气中酸性气体——硫化氢（ГОСТ 17580-82）、二氧化碳、二硫化硫、乙硫醇——的含量可用吸附法或色层分离法来确定。机械杂质的含量是用分离法来进行定量评价的，即让所分析的、有代表性的气样通过标准过滤器-滤尘管。

天然气中的含氧量允许按全苏国家标准ГОСТ 3022-80确定，可燃极限按ГОСТ 13919-68确定。天然气是易燃易爆的气体，与天然气有关的作业安全条件要按天然气业务安全规则和干线输气管操作规程制定。

1.1.2 冷凝酸

不同气田的冷凝液组成成分差别很大。根据所含的烃类主要或大部分是什么，冷凝液可分为甲烷（石蜡）、环烷和芳香烃冷凝液。冷凝液的品种（稳定的或不稳定的，除 C_5 外还含有更轻组分的）取决于其蒸气压和其在323K和大气压力下的蒸发百分比（从25%到85%）。大多数冷凝液的终沸点为423~463K，有时可能超过573K（对于边缘有油的气田）。稳定的冷凝液蒸气压应保证其能在温度达311K、压力为大气压的条件下液态储存。诸如密度、杂质浓度、颜色、含硫量和含蜡量这样一些冷凝液的参数通常采取原油和成品油分析中所采用的标准方法来确定。

含硫量按钢片上的腐蚀性估计，也可根据全苏国家标准ГОСТ 1437-75，1431-64所规定的要求来确定。含蜡量按ГОСТ

11851-66确定。

冷凝液中含水量的允许范围：从0到2%。

天然气加工企业的液态产品——乙烷、丙烷、丁烷、丙烷-丁烷、其它烃馏分——有如下指标作为特征：蒸气压、密度、轻馏分含量、颜色、杂质含量和含水量。

表1-3中所列出的是当每一种烃——乙烷、丙烷和丁烷——单独地在液态下储存时的温度和压力。

表1-3 乙烷、丙烷和丁烷在液态下储存时的温度和压力

乙 烷		丙 烷		正 丁 烷	
T, K	P, 兆帕	T, K	P, 兆帕	T, K	P, 兆帕
283.15	3.29	283.15	0.65	283.15	0.15
305.55 ^①	4.99	310.95	1.34	310.95	0.37
		338.75	2.53	338.75	0.77
		366.45	4.15	366.45	1.39
		369.95 ^①	4.34	395.25	2.39
				422.05	3.73
				425.15 ^①	3.87

①临界温度。

1.1.3 商品丙烷

商品丙烷——含有95%丙烷或丙烯的液体，其在310.95K时的蒸气压不超过1.5兆帕，丁烷的允许含量为1~2%，乙烷的允许含量受最大蒸气压的限制。对商品丙烷在腐蚀性、含硫量、湿度和密度等方面的要求由对商品供应的技术条件来规定。如果丙烷用来作发动机燃料，则其所含的丙烯要受允许值的限制。

1.1.4 商品丁烷

商品丁烷——主要含有丁烷或丁烯的液体，在310.95K时其蒸气压不超过0.5兆帕。在大气压力下，95%商品丁烷的蒸发温度不应超过274K。对商品丁烷中杂质限量的要求与对商品丙烷的要求相同。

1.1.5 丙烷-丁烷混合物

丙烷-丁烷混合物或液化气在311K时的蒸气压不应超过商品

丙烷的蒸气压。95%液化气的蒸发温度接近于丁烷的蒸发温度。用作城市用户生活燃料的液化气，其在311K时的蒸气压为0.9兆帕，从而保证了气体燃料有足够的挥发性。

1.1.6 乙烷

从天然气中提取的乙烷在化学工业中得到了越来越广泛的应

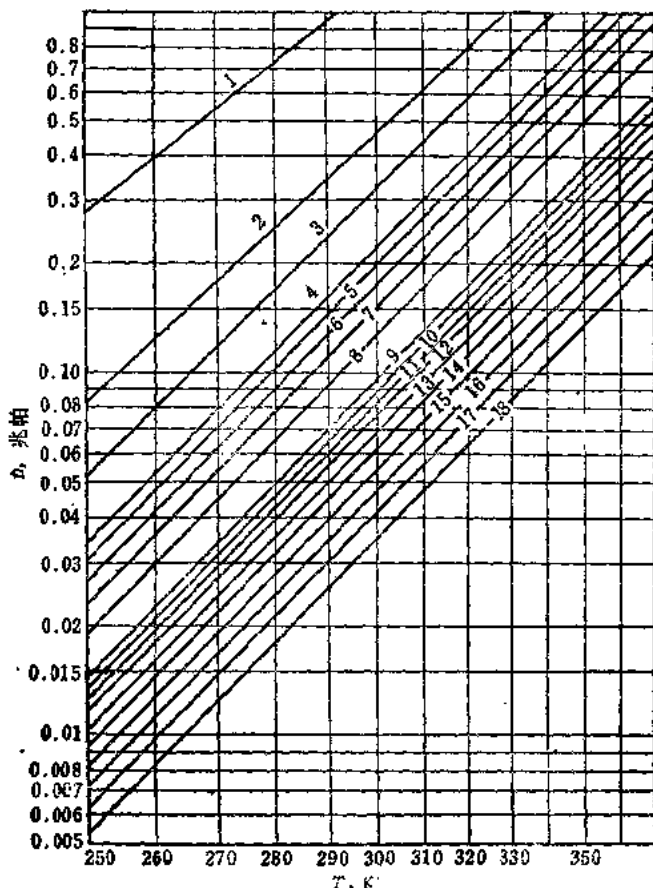


图1-1 商品烃类产品的蒸气压

1—丙烷；2—正丁烷；3—异丁烷；4~12—气体汽油，它们在37.8℃时的雷氏蒸气压（兆帕）分别等于：2.4、2.1、1.83、1.55、1.27、0.98、0.91、0.84、0.77；13~18—发动机汽油，它们在37.8℃时的雷氏蒸气压（兆帕）分别等于：0.7、0.63、0.56、0.49、0.42、0.35

用。对乙烷的技术要求由供应者与消费者之间的供货协议规定。乙烷中的甲烷含量不应超过2%。

当要从天然气中提取商品产品时，通常要根据提取单独的烃是否合理这一原则。随后，就要根据对商品产品供应的技术条件，进行必要的混合，以达到对供应的产品所要求的成分。

根据对冷凝液所要求的蒸气压，可加入一定量的丁烷或丙烷，以保证对供应给用户的冷凝液的技术条件。如果商品产品的蒸气压不足时，则要对其进行分馏，以脱去较重的组分。

冷凝液和商品产品储存时的蒸发损耗值取决于蒸气压的大小。

图1-1所示的是上述这些产品在不同温度下的蒸气压数据。总的蒸发损耗不应超过1.25~4.5%所储存的烃类液体。

§1.2 气态和液态产品流量和数量的测量和计算

在气态和液态产品的开采、运输、储存、加工和分配中，提高其流量测量和数量计算的准确性问题，无论在苏联还是在其它国家的输气系统的操作实践中都具有很大的意义。解决这一问题的努力方向仅与技术-经济上的考虑有关。由于天然气出口和进口量的增长，这一问题就更具有了特别的现实意义。

在输气管系统中输送的气流流量是最重要的参数之一。这一参数测量的准确性和可靠性对输气系统各环节达到最优工况有实际的价值。在进行实行经济核算制的收发作业时（其中包括出口—进口天然气），要对流量进行准确的测量，这也是进一步发展天然气工业所必须进行的统计、有效利用和计划编制的基础。

作为一种间接测量形式的天然气流量测量过程就是借助于组成流量测量系统的成套测量手段和器具所获得的有关天然气物化参数和质量指标单个信息总和的变换过程。这种系统的核心为带有收缩器的流量计，其作用原理是以测量可变压降为基础。这种

方法使用比较简单,又研究得比较深入,就其实质来说,这在本国或是在外国的实践中都是唯一的标准化方法。执行这一方法的基本原则和要求见以下两个文件的说明:全苏部长会议标准化委员会的关于用标准收缩器测量气体和液体流量的规则 ПД50-213-80 (自1982. 7. 1. 生效); 国际标准化组织的关于借助于安装在充满被测介质的圆截面管路上的孔板、喷嘴和文邱里管测量液体和气体流量的国际标准 ИСО5167。

利用可变压差流量计测量和计算气体流量的功能方块图(图1-2)是建立流量测量系统的基础。

以这一方块图建立起来的工业性流量测量系统既可以是机械式的,不能自动修正气体参数(压力,温度等),也可以是自动化的,但都是利用了以下综合函数关系式:

$$Q_H = F \left\{ \alpha_n \{ m(d, D) \}, k_{am}, k_{an}, k_{re} \right\} \times \xi \left[\frac{\Delta p}{p}, m(d, D), \kappa(p, T) \right] k_i(T), d, p, \Delta p, \rho_n \left(\sum_{i=1}^n N_{i\text{мол}} \right), T, z \left[p, T, \rho_n \left(\sum_{i=1}^n N_{i\text{мол}} \right) \right] \} \quad (1.1)$$

式中 α, α_n ——分别为收缩器的流量系数和原始流量系数;

d, m ——分别为收缩器的直径和相对面积;

D ——被测管路的直径;

k_{am}, k_{an}, k_{re} ——分别为对原始流量系数 α_n 的被测管路内壁粗糙度校正因数、收缩器入口边缘打钝程度校正因数、雷诺数的校正因数;

ξ, z, χ ——分别为气体的膨胀系数、压缩性系数、绝热指数;

p, T ——在测量条件下的气体压力和温度;

k_i ——对收缩器孔的温度膨胀校正因数;

Δp ——气体在收缩器中的压降;

ρ_n ——气体在标准物理条件下的密度;

$N_{i\text{мол}}$ ——气体混合物中组元的摩尔浓度。

适用于测量气流的流量方程有如下形式：体积流量

$$Q_0 = \frac{1}{\tau_j} \int_0^{\tau_j} Q(\tau) d\tau = V/\tau_j \quad (1.2)$$

质量流量

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{1}{\tau_j} \int_0^{\tau_j} G(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{\tau_j} \int_0^{\tau_j} Q_0(\tau) \rho(\tau) d\tau = M/\tau_j, \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 $Q(\tau)$ ——以时间函数表示的体积流量；

$G(\tau)$ ——以时间函数表示的质量流量；

V ——在 τ_j 时间内流过的介质体积；

M ——在 τ_j 时间内流过的介质质量；

τ ——时间的现时值；

$\rho(\tau)$ ——以时间函数表示的介质密度。

解方程 (1.1) 所获得的结果为一个有一定误差、但接近于实际的值。这种误差在一般情况下为一个随机函数，而测量结果的误差却是有定数的（固定的）误差，是用概率方法在精确度的线性理论范围内对其进行评价的。

除了利用可变压差法的流量测量系统外，在气流和液流流量测量技术中还采用工业上的固定压差流量计和数量计量器。

1.2.1 用带有收缩器的流量计测量流体的流量

通常用配有成套标准化收缩器的差动压力计来测量气体和液体的流量。标准化收缩器有孔板、标准喷嘴、文邱里喷嘴和文邱里管。孔板可以有角式的气体取样室和带法兰的气体取样室，而标准喷嘴、文邱里喷嘴和文邱里管只有角式的气体取样室。

当测量的是干燥的气体，基本的气体流量方程有如下形式

$$Q_H = 0.2109 \alpha \epsilon k_i d_{z_0}^2 \sqrt{\frac{\Delta p p}{\rho_H T z}} \quad (1.4)$$

当测量的是湿气中的干气部分

$$Q_H = 3.553 \alpha \epsilon k_i d_{z_0}^2 \frac{p - \varphi p_{B.П}}{T z} \sqrt{\frac{\Delta p T z}{283.78 \rho_H (p - \varphi p_{B.П}) + \varphi T z \rho_{B.П}}} \quad (1.5)$$

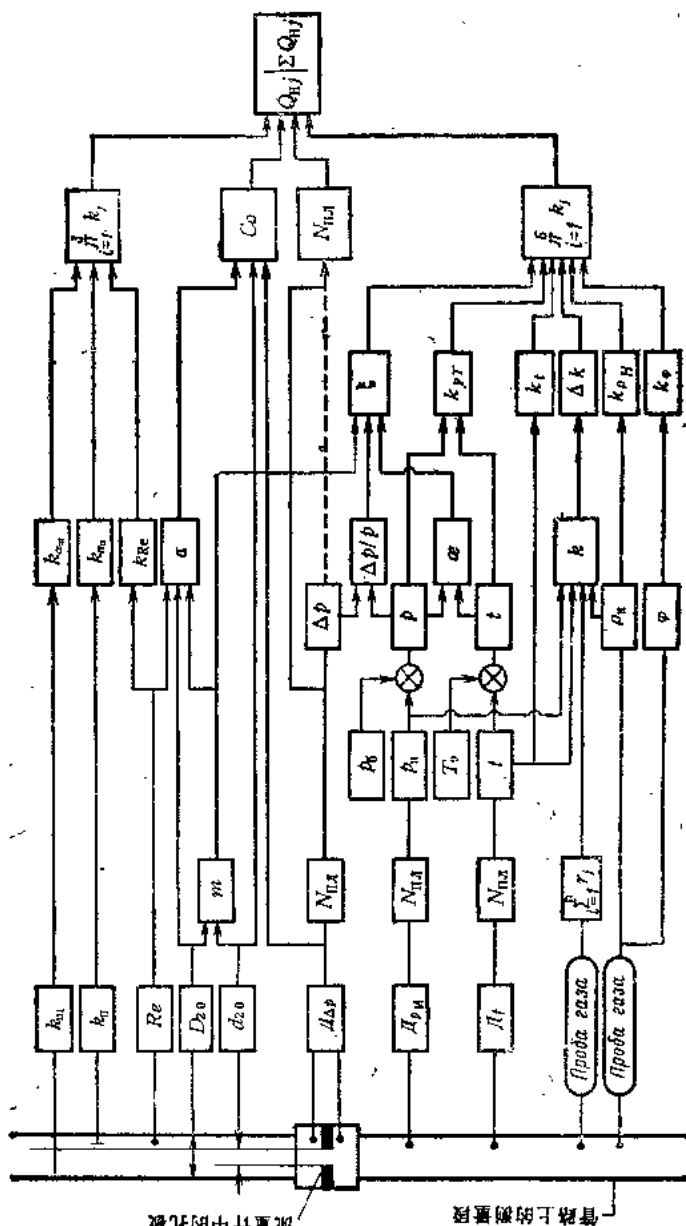


图1-2 流量测量系统功能方块图

k_{11} , k_{12} —分别为被测管路内壁粗糙系数和收缩器入口边缘打靶系数; R_0 —雷诺数; D_{10} , d_{10} —分别为收缩器前的管路内径和收缩器在温度为20°C时的孔径; Δp , Δp_{10} , Δp_{11} —分别为测量被测介质压差压力和温度的传感器; “Прос. раз.”—取样点, 在此取样以研究被测气体的物理性质; $m = (d/D)^2$ —在测量

温度下收缩器的相对面积; M_{11} —处理仪器曲线图的求积数; $\sum_{j=1}^n$ —被测气体 j 个组分混合物的某种物理

性质的加值; p_0 , p_{11} —分别为被测气流的气压计压力和剩余压力; T_0 , t —分别为零温度 (在某个被数系统中, 例如在国际单位制中定 $T_0 = 273.15K$) 和相对温度 (相对于 T_0); Δp —介质流过收缩器时的压降;

$p = p_0 + p_{11}$ —介质的绝对压力; $\Delta p/p$ —相对压降; $T = (T_0 + t)$ —介质的绝对温度; κ —绝热指数; k —气体的压缩性系数; ρ_{11} —标准条件下干气的密度 (或湿空气中干燥部分的密度); φ —气体的相对湿度; k_{11} ,

k_{12} , k_{13} —分别为被测管路内壁粗糙度对原始流量系数的校正因数, 收缩器入口边缘打靶程度对原始流量系数的校正因数, 和雷诺数对原始流量系数的校正因数; α —流量系数; ξ , k_{14} , k_{15} , k_{16} , k_{17} —分别为

气流通过收缩器时的膨胀校正因数、被测气流的压力和温度校正因数、收缩器材料热膨胀校正因数 (孔径面积的变化)、气体压缩性系数校正因数、气体密度和温度校正因数; $\prod_{j=1}^n$ —对被测管路内壁粗糙度、收

缩器入口边缘打靶程度和雷诺数的积分校正因数; $\prod_{j=1}^n$ —对被测介质物理性质 (气流膨胀、压力和温度、

压缩性系数、气体密度和湿度、收缩器材料热膨胀——孔径变化) 的积分校正因数; C_0 —流量测量器具的常数;

Q_{11} —换算成标准条件下的、在第 j 时刻的流量总和 (累计值)

当测量的是液体:

$$Q = 0.0125 \alpha k_z d_{20}^2 \sqrt{\Delta p / \rho} \quad (1.6)$$

式中 Q_H, Q ——分别为标准条件下 (101.325千帕和293.15K) 和工作条件下的体积流量, 米³/时;

α ——流量系数;

e ——收缩器中气体的膨胀系数;

d_{20} ——收缩器在293.15K时的孔径, 毫米;

Δp ——收缩器中的压降, 兆帕;

p ——收缩器前的绝对压力, 兆帕;

$p_{B.П}$ ——饱和水蒸气的压力 (参考值), 兆帕;

ρ_H, ρ ——分别为标准条件和工作条件下的密度, 公斤/米³;

k_z ——收缩器温度膨胀系数;

φ ——气体的相对湿度;

T ——绝对温度, K;

z ——气体的压缩性系数。

液体通过收缩器而不发生气蚀的条件如下

$$p_2 / p_1 \geq CL \quad (1.7)$$

式中 p_1, p_2 ——分别为收缩器前后压差测量处的绝对压力。

上式中的 CL 按下式计算

$$CL = \left[1 + \frac{a}{b} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{b}{af_0}} \right) \right]^{-1} + \frac{p_{HП}}{p_1} \quad (1.8)$$

式中 f_0 ——气体在液体中的相对溶解度;

$$a = 1 - \mu_1 m^2; \quad b = 2 - f_0 (7 + a)$$

μ_1 ——流束收缩系数。

f_0 的值按下式计算

$$f_0 = \kappa_r \frac{m_c}{m_{ж}} \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г, H}} p_{HOM} \frac{T}{T_{HOM}} \quad (1.9)$$

式中 κ_r ——根里 ($\Gamma_{г, ж}$) 系数;

$m_r, m_{ж}$ ——分别为气体和液体的分子质量;

$\rho_{ж}$ ——液体在工作条件下的密度;