液体流量的精密测量

傅烈堂　陈自明　刘家增　译
苏　　彦　　勋　校

计　量　出　版　社

液体流量的精密测量

[苏] Б.В.比留科夫，M.A.丹尼洛夫
C.C.基维里斯 著
傅烈堂 陈自明 刘家增 译
苏彦勋 校

内 容 提 要

本书较全面、系统地介绍了各种标准流量装置的结构与技术特性，液体流量的传递系统和复现方法，流量的测量技术以及测量结果的误差分析。

可供各级计量机构中从事流量测量的计量人员阅读，也适用于从事有关专业的设计、研究、使用和管理的工程技术与科研人员参考。

Точные измерения расхода жидкостей

Б.В.Бирюков, М.А.Данилов, С.С.Кивилис

«МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1977

液体流量的精密测量

[苏]Б.В.比留科夫，М.А.丹尼洛夫，С.С.基维里斯 著

傅烈堂 陈自明 刘家增 译

苏彦勋 校

*

计量出版社出版

（北京和平里11区7号）

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32　印张 4 1/2

字数 100千字　印数 1—10 000

1982年9月第一版　1982年9月第一次印刷

统一书号 15210·166

定价 0.62 元

前　言

流量是科研和工业生产中一个重要的参数。流量的精密测量对石油、化工、冶金、电力等部门提高产品质量和科研数据的准确性，对节约能源、提高能源的效率都有着重大的现实意义。为此目的我们翻译了这本书供有关人员参考。

《液体流量的精密测量》一书共分五章，比较全面、系统地介绍了苏联流量单位量值的传递系统和复现方法、流量的测量技术、各种标准流量装置的结构与技术特性，以及测量结果的误差分析。有理论有实例，对从事流量测量工作的工程技术与科研人员是一本有益的参考书。

本书在翻译过程中曾得到华东石油学院自动化系孙延祚同志的帮助，在此表示感谢！

由于译者水平有限，加之时间短促，译文中一定存在不少错误和不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

译　者

1981年11月10日

目　录

引　言

各种物质流量的精密测量对国民经济各部门具有很大的意义。为了获得高质量的产品和提高动力装置的生产率和效率，在工业的主要部门（如航空、化学、石油等）进行科学研究时，在解决自动调节的准确度和可靠性的重要问题时，以及在计算程序、互相换算、各种物质的验收、发放和保管时，要求以质量和容积为单位进行流量的测量。

上述测量范围的复杂性是由下列因素引起的：

（1）被测介质处于不停的运动之中，而且由很多参数所决定的运动特性又影响着仪器的示值；

（2）被测介质和仪器的特性处于复杂的和不同的相互联系之中；

（3）大多数被测介质在物理化学性能和使用条件上都不相同。

例如在石油、化学和石油化学工业中使用着几千种物理化学性能都不相同的物质。这些性能要求在不同的温度、压力以及工艺设备带来的巨大液流扰动条件下进行检验。

很明显，如果不研究出物质流量的可靠测量方法以及缺乏一个检验计量器具（生产和使用中的）准确度的全国统一的方法，那么工艺过程的正常进行是不可能的。

现代科学技术对流量计的特性及使用范围提出了各种复杂的要求，这就导致出现了各种不同的流量测量方法：电磁式、转速式、超声波式、热力式、电离式等[1,18,26]。这就

使保持流量计量的统一问题大大地复杂化。如果没有流量计量的统一，那么不仅不能得出统一的科学结论，而且大规模生产的专业化企业也不能发挥其正常的作用。

如果不研究出流量单位的复现方法和按规定的检定系统对工作计量器具传递单位量值的方法，那么要顺利地解决这一问题是不可能的。检定系统的最佳化取决于组成部分的完善性和进行流量单位的复现和传递程序的正确性。

检定系统的中间环节(组成部分)——标准计量器具——是以精密的流量复现和测量系统为基础的装置。它们是检定系统中很少研究的组成部分。标准计量器具发展的落后现象已成为进一步改善流量测量技术的障碍：由于标准计量器具的相对“粗糙度”和不可靠性不能发挥工作计量器具潜在的高度计量学特性。

在研究流量复现和测量系统及标准流量装置的各个部分的特性时，以及在评定最佳结构的性能和设计原理时，制订出统一的方法具有头等的重要性。

可同时从几个方面来改进流量计的标定和检定手段及方法。首先是从线路上和结构上进一步改进标准流量装置。这里特别迫切需要解决的问题是研制出不怕使用条件变化大的元件，以及在结构上采取措施保护标准流量装置的元件不受影响量的影响。因此，必须综合研究上述影响量对各种标准流量装置元件的影响，以及研究出标准流量装置在使用过程中影响量的精密检验方法。

从结构上和线路上进一步改进的另一个方面是广泛地推广和研制液体量的精密计量器具：以重量为单位的液压式秤，误差不大于0.05%的应变秤；以容积为单位的连续式液位计（误差至0.1毫米）。

标定过程的自动化以及广泛地应用控制论方法、数学模型法及计算技术，对提高标准流量装置的效率（生产能力）有着重要的意义。自动化系统和测量-计算综合装置可以弄清测量过程中变化着的很多外部因素，以及将相应的修正量引入最后的结果。

第三个方面是标准流量装置的通用化，即建立流量复现和测量系统。这种系统可以复现气体流量和液体的小流量，双相和多相液体流量，以及可以复现不同物理性能的液体流量（无需更换流量的复现和测量系统）。

由于在生产过程中大量地应用标准流量装置，因此降低标准流量装置的成本，降低流量计的标定和检定费是很迫切的问题。因此，实际上非常重要的问题是使流量复现和测量系统的各个元件及其原型标准化，那怕是制订出一些临时的标准，也可以把不同方向的研究工作联合起来。将相似理论应用于制订流量复现和测量系统的标准系列，研究出标准化的原则问题。

广泛地应用与标准流量计进行比对的检定方法是提高流量计标定和检定过程经济效率的途径之一。这时昂贵的固定式标准流量装置只适合于作单位量值传递系统的原始标准计量器具。往下，根据逐级增大的流量等级来传递流量单位是适合的。这种等级是由并联规定的标准流量计组成。其中每一个流量计只利用靠近其测量上限的一个点。可以利用成批生产的仪器，经专门鉴定后作为相应精度等级的标准流量计。上一个等级检定下一个等级。上一个等级也可以用于工作计量器具的试验[14]。

第一章 对工作流量计传递流量的单位量值

检定系统

流量单位量值的复现方法、对工作仪器传递单位量值的程序和准确度由检定系统规定。

流量单位量值是按照由不同精度的计量器具所组成的等级不连续地进行传递的，如图 1 所示的单一阶梯式检定系统。每一相邻的等级必须遵从不相等的原则，即 $\delta_{i+1}>\delta_i$。式中：δ——流量的复现误差；i——精度等级的序号。在同一精度等级上的标准计量器具应具有相同的等级：一等相当于最高准确度，其次是二等、三等及其它等。

所谓检定系统的原始部分，即复现和测量质量、密度、时间和容积单位用的标准量具与仪器属于第 1 级；根据液体的质量或容积及液体流过的时间来复现流量的一等、二等和三等固定式标准流量装置❶属于第 2 级、第 3 级和第 4 级。

检定系统的最低部分（第 5 级）是工作流量计。这些工作流量计按允许（标准的）误差划分为精密的（高精度的）、标准精度的和粗糙的（低精度的）。

---

❶ 有标准流量计的装置可以作为检定系统的组成部分。在这种情况下，对工作流量计传递流量单位量值是在所谓“比较”的专门程序过程中实现的（请参阅“流量单位量值的传递方法”Измерения, контроля, автоматизация, 1976, №3, 12—18）。

检定系统中不同精度等级的各部分之间的联系是通过流量单位量值的传递程序来实现。

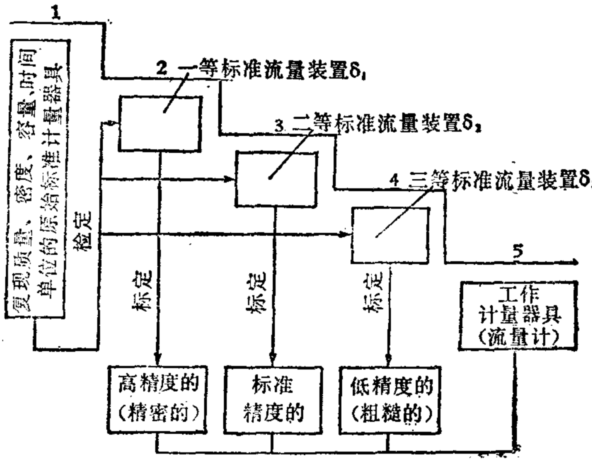

图 1 液体流量计量器具的单一阶梯式检定系统

在流量测量实践中称为检定的首项工作是对标准流量装置的性能进行一系列整体的或单个元件的实验研究，以及将原始标准计量器具与一等、二等、三等标准流量装置衔接起来。第五章要专门叙述标准流量装置的检定问题。

直接对工作流量计传递单位量值的方法是用标准流量装置对工作流量计进行标定。

在全国范围、各工业部门或企业的联合组织中实际实施检定系统，势必要使检定系统向“横的方向”复杂化。

这是由物理量——要传递单位量值的非压缩性液体的流量——特性所决定的。流量单位量值传递的正确性，与传递其它任何一种单位量值相比，在很大程度上取决于介质的性能。而且所指的依赖关系在检定系统的低等级部分表现得更明显，因为工作流量计受介质的影响最大。

因此，检定系统整个说来是一个平行结构的组合体（与图1所示相似），其中每一部分都联系着一组液体。这些液体在物理性能和状态参数上是相近似的，在这种状态下该液体是作为工作介质而存在或使用。

应将液体适当地分成下列几组：高沸点低粘性液体（粘度在50厘斯以下）、高沸点粘性液体（大于50厘斯）、触变性液体、冷却液、液体金属。

由于很多工业用液体是带腐蚀性的，有毒的，带放射性的，带爆炸性的和有火灾危险的，所以应当采取相应的措施防止其不良影响。不然会给测量准确度带来一定的影响，因此在标定工作中除了真实液体外还必须采用代用品或模拟液体。所以，每组液体又可分为两个分组：真实液体和代用品液体（模拟液体）。应用最广泛的代用品是水、水和酒精甘油混合物。用液氮代替"低温"冷却液——氢、氧、氮、氟（其中有些有爆炸性——如氢，有些有腐蚀性——如氟）。

借助对流量计特性进行换算的分析方法，可以保证流量计能用于与被标定液体不同性质的介质。这时，换算是流量单位量值传递的程序之一，代用品的物理性能越接近工作介质的物理性能，换算的正确性就越高。

流量计的标定

从单位量值的测量和传递的观点来看，液体流量是一种最复杂的特性流体。

在生产设备的使用过程中，是用各种流量计以直接法测量流量的，其一次变送器直接安装在液流中。不管流量计的型号如何，为了读取示值必须知道流量Q和流量计输出信号X（脉冲频率、电压、电流强度、标尺指示器的偏移等）之

间的关系。上述关系的数学表示式 $Q=f(X)$ 叫做变送器的标称静态函数（简称变换函数），并根据流量计在标准流量装置上标定的结果来确定。

标定过程包括：

（1）人为确定流量测量范围（Q_{min}—Q_{max}）；

（2）确定原始数据的最佳容量——建立一个近似变换函数的可靠方程所必要的测量次数；

（3）用实验方法获得原始数据；

（4）先假定流量与流量计输出信号之间实际系统的特性，并选定近似式；

（5）根据选用的近似式处理测量结果；

（6）评定流量计的误差。

根据一次变送器正常的工作状态和液体在管道中允许的流动流速，仪器设计人员应对测量范围作出主观估计。第一个条件与变送器和液流的相互作用特性有关，实际上取决于变送器的结构和仪器的作用原理。例如，对于转速式变送器，正常工作状态与雷诺数[11]的自成型性是相等的。当决定变压降流量计的测量范围时，也应遵从类似的理由。

第二个条件与仪器的用途有关，因为在各工业部门最大运动速度的标准是不一样的。它取决于管道中允许的压力损失，首先取决于液体源的功率。为了减小压力损失，管道中的流速一般限制在 8—15 米/秒内。但是，当压力较大时，流速有时也允许达到 30 米/秒。有时流速是根据管道中压力损失不超过工作压力的 5—6％来选择的。

在标定过程中要根据测量结果中获得的离散值来复现连续函数。测量次数应这样选择，即标定结果的置信度应在给定的(相当的)水平。问题就简化为主观规定足够的测量容积，因

为企图依靠增加测量次数来提高置信度，必然会导致流量计测量物质的消耗，降低计量学的可靠性以及提高标定费用。

上述问题可用下列方式来说明。如果认为被研究的各点上的误差是带零数学期望的平滑的正态随机函数，那么当标定点的误差在公差范围内时，就可求得区间点的误差超出公差范围的条件概率 P_y 和超出公差范围的无条件概率 $P_б$。如果概率 P_y 大大小于概率 $P_б$，那么检定将给出重要的结果。比值 $P_y/P_б$ 是标定质量最客观的准则：比值越小，标定时未发现的起伏数就越小，也就是说标定的质量就越高。

为了确定概率，就要知道被检定仪器的误差的相关函数，这个相关函数是根据实验数据的处理结果决定的。

用概率的方法解决标定点的数目问题，可以不考虑仪器的结构特点及其制造工艺。这时，只要求积累有关仪器误差的实验数据。

当用简化的计算方法[17]时，就采用评定仪器误差的系统分量 q_Δ 和随机分量 q_σ 的允许误差作为标定结果的置信度准则。这些误差分量用均方差百分数表示。应把测量的总次数 n_Σ 看成是相同容积 n_a 的组数 n_r。形成一个组的各次测量是在固定的复现参数值的情况下进行的，即在液体流量情况下。因此

$$n_\Sigma = n_r n_a \qquad (1)$$

如果可靠地确定了误差的系统分量，那么可求出 n_a

$$n_a \geq \frac{z_\alpha^2}{q_\Delta^2} \qquad (2)$$

式中：z_α——测量结果分布的分位点，取决于所采用的置信概率；α——评定误差的系统分量的相对极限误差不超过 q_Δ 的概率。设定标定点为正态分布，这在主观计算时是完全可

取的，则z_α由下列关系式决定

$$2\Phi_0(z_\alpha)=\alpha \tag{3}$$

式中：$\Phi_0(z_\alpha)$——拉普拉斯函数。

测量总次数的下限 $n_{\Sigma\min}$（在文献[17]中解释为观测次数，这对于根据实验数据来可靠地评定误差的随机分量 σ 是必要的）可由下式求得

$$n_{\Sigma\min}=n_\sigma \geqslant \frac{z_\alpha^2}{2q_\sigma} \tag{4}$$

根据工艺过程的设想，在很多情况下实际上把标定点的总数规定在 $n_\Sigma=25$—40范围内，并根据测量范围内均匀分布的固定流量值 $Q=Q_{\min}$，Q_2，…，Q_i，…，$Q_n=Q_{\max}$（$i=1$，2，…，n_r）进行分组，使$n_a\geqslant 5$—8。后者必须借助下一准则或阿贝准则[15,21]用统计检查法有效地评定近似式的非线性。

用下述实验方法获得决定关系式$Q=f(X)$的原始数据。将流量计的一次变送器安装在标准流量装置的试验管道中。然后，依次复现固定流量值$Q_{\min}$，Q_2，…，Q_i，…，$Q_{\max}$。由Q_i转换到 Q_{i+1} 的顺序（各次测量之间液流是停止或不停止）和编成容积测量组n_a的程序是与标准流量装置的系统和所采用的标定工艺过程有关。可用下述方法编测量组：n_a次重复从 $Q_{\min}$ 到 $Q_{\max}$ 逐渐增大流量；进行由“正行程”（从$Q_{\min}$到$Q_{\max}$改变流量）和“反行程”（从$Q_{\max}$到 $Q_{\min}$ 改变流量）组成的周期；当先n_a次复现Q_i，而后是Q_{i+1}和其它时，“逐级”增大流量。

根据流经流量计一次变送器的液体量（以质量或容积单位表示的）及其流经的时间（以下称为平均流量的时间间隔）可以间接测量出流量。用这种方法获得的每一个流量值

Q_{ij}（j——第 i 组的测量序号；$j=1$，2，…，n_a）就相当于在同一时间间隔 τ_{ij} 内测得的被标定流量计输出信号的平均值。

$$X_{ij}=\frac{1}{\tau_{ij}}\int_0^{\tau_{ij}} X(t)\mathrm{d}t \qquad (5)$$

对于评定流量计的近似变换函数的方程参数来说，得到的一对Q_{ij}，X_{ij}值的总和还是原始总和。

在处理得到的一对Q_{ij}，X_{ij}值的原始总和之前要设定经验近似式的数学形式。除了提出要与实验数据最好相符的正当的和基本的要求外，同时最好推导出一个包括尽可能少的任意恒定值的方程。

实际上被研究的方程明显地表现出线性化的趋势。这本身就是一个很严格的限制，因为只有极少的实际流量系统按其特性来说是线性的。线性化意味着与实际发生不同程度的偏差——从允许误差到明显的不相符合。所以，必须要对理论上的，并常常称为合理的特性方程加以研究。此外，标定点在 Q-X 坐标图上的分布是提出假设的依据。关于选择经验公式的方法的介绍可在文献[11,12]中找到。

如果要利用几种计算恒定值a_0，a_1，a_2的方法[15,12]，那么在大多数情况下可选择下列三种近似式中之一：$Q=a_1X$；$Q=a_0+a_1X$；$Q=a_0+a_1X+a_2X^2$。

平均值近似法是一种最简单的方法，这是根据给定点绘制曲线的唯一的一种方法。当研究的方程相对于任意一个恒定值为线性时，就采用平均值法。

让我们研究一下含有任意恒定值的公式$Q=Q(X)$。该方法在于将观察得到的一对Q_{ij}和X_{ij}的总次数n_Σ分为m组。这些组的组成应大体一样，每个组都应只含有相邻两点的Q

和X值。然后，在每组内将Q和X值取平均值。从而，获得m个Q和X的平均值。最后，中点Q和X取作各组的代表，用来绘制曲线图。为了利用力矩法，必须使与公式相对应的相邻各点具有X坐标，坐标差为常数量ΔX。如果原始数据不满足这个基本要求，那么首先必须将数据编成图表形式。然后，根据与实验数据相对应的各点绘制出平滑的曲线，在曲线上选出各点序列，各点在X轴上的投影以固定的距离排列。于是可求出与各次X相对应的Q力矩：

$$m_i=\Sigma X^i Q\Delta X \qquad (6)$$

式中：m_i—— i次力矩（$i=0$，1，…）。

如果存在i次力矩m_i，则它与未知曲线方程有关，并表示为

$$m_i=\int_q^l X^i Q(X)\mathrm{d}X \qquad (7)$$

式中：$l=X_{\max}+\frac{1}{2}\Delta X$；　$q=X_{\min}-\frac{1}{2}\Delta X$。

应该利用的力矩数取决于近似式的幂。因此，对于2次方程必须利用力矩m_0，m_1和m_2，而对于线性方程只用m_0和m_1。

决定任意恒定值的方法是解联立方程，联立方程是在将未知方程依次代入（7）式时得到的。在利用方程$Q=a_1X$时，下列形式的方程是原始方程：

$$\frac{a_1}{2}(l^2-q^2)=\Sigma Q(X)\Delta X \qquad (8)$$

对于$Q=a_0+a_1X$，联立方程由两个方程组成

$$\left.\begin{aligned} &a_0(l-q)+\frac{a_1}{2}(l^2-q^2)=\Sigma Q(X)\Delta X,\\ &\frac{a_0}{2}(l^2-q^2)+\frac{a_1}{3}(l^3-q^3)=\Sigma XQ(X)\Delta X. \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

而对于 $Q=a_0+a_1X+a_2X^2$，联立方程由三个方程组成：

$$\left.\begin{aligned}
&a_0(l-q)+\frac{a}{2}(l^2-q^2)+\frac{a^2}{3}(l^3-q^3)=\Sigma Q(X)\Delta X,\\
&\frac{a_0}{2}(l^2-q^2)+\frac{a_1}{3}(l^3-q^3)+\frac{a_2}{4}(l^4-q^4)=\Sigma XQ(X)\Delta X,\\
&\frac{a_0}{3}(l^3-q^3)+\frac{a_1}{4}(l^4-q^4)+\frac{a_2}{5}(l^5-q^5)=\Sigma X^2Q(X)\Delta X.
\end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

最小二乘法是已知的最准确的方法，其实质是决定任意恒定值。该值保证实验点 Q_{ij} 相对于近似曲线 $Q=Q(X)$ 的偏差平方和为最小。即

$$\sum_{i=1}^{n_z}\sum_{j=1}^{n_a}[Q_{ij}-Q(X_{ij})]^2=\text{最小} \qquad (11)$$

式中：$Q(X_{ij})$——近似曲线点的纵坐标（横坐标为 X_{ij}）。

确定任意恒定值的原始方程称为标准方程，并可写成下列形式：

当 $Q=a_1X$ 为近似时

$$a_1[QX]=[Q]^2 \qquad (12)$$

当 $Q=a_0+a_1X$ 时

$$\left.\begin{aligned}
&a_0n_z+a_1[X]=[Q],\\
&a_0[X]+a_1[X^2]=[QX],
\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

当 $Q=a_0+a_1X+a_2X^2$ 时

$$\left.\begin{aligned}
&a_0n_z+a_1[X]+a_2[X^2]=[Q],\\
&a_0[X]+a_1[X^2]+a_2[X^3]=[QX],\\
&a_0[X^2]+a_1[X^3]+a_2[X^4]=[QX^2].
\end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

在(12)—(14)式中采用高斯符号

$$[X]=\sum_{i=1}^{n_z}\sum_{j=1}^{n_a}X_{ij};\qquad [Q]=\sum_{i=1}^{n_z}\sum_{j=1}^{n_a}Q_{ij}$$