

## 湿式气体流量计校正实验方法的改进

张万章, 钟亚兰\*, 黄驰

武汉大学化学与分子科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(武汉大学), 武汉 430072

**摘要:** 化工实验气体流量计的校正中, 湿式气体流量计操作相对单一, 其校正方法用的是平均校正系数法, 该方法对于测量较小体积的气体误差较大。本文对教学内容进行改进, 提出一种新的校正方法, 即分段逼近校正法, 推导得到湿式气体流量计不同步长的分段校正方程。验证实验表明分段逼近校正结果准确度有显著提高。

**关键词:** 湿式气体流量计; 仪器校正; 分段逼近校正法; 测量误差

**中图分类号:** G64; O6; TQ01

## Improved Calibration Method for Wet Gas Flowmeters

Wanzhang Zhang, Yalan Zhong\*, Chi Huang

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Wuhan University), College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China.

**Abstract:** In chemical experiments, the calibration procedure for wet gas flowmeters is relatively straightforward, typically employing the average calibration coefficient method. However, this approach exhibits significant measurement errors when dealing with small gas volumes. This study presents an enhanced calibration technique—the segmented approximation correction method—and derives corresponding correction equations for different segments of the wet gas flowmeter. Experimental verification demonstrates that the proposed method achieves substantially improved measurement accuracy.

**Key Words:** Wet gas flowmeter; Instrument calibration; Segmented approximation correction method; Measurement error

在石油化工等化工反应装置中, 普遍使用连续流动反应器, 相应的流体原料(包括液态流体和气态流体)均需要通过流量计进行计量。流量的准确计量, 是生产过程和相应的科研实验过程中控制技术的关键环节之一。流量计计量的准确度直接影响生产效率和产品质量, 甚至会影响生产安全。根据《中华人民共和国强制检定的工作计量器具检定管理办法》, 流量计属于强制检定的范围。通过质量体系认证的企业, 其使用的流量计每年需送至国家市场监督管理总局(或法定)授权的校验机构进行检定。

湿式气体流量计是一种用于测量低气压、小流量、非腐蚀性气体(铜材质)或腐蚀性气体(不锈钢材质)的液封式体积流量计, 其精度可以达到0.2–0.5级, 是小型体积流量计中精度最高的一类流量计, 故广泛用于化学工业以及科研部门, 尤其是其体积计量准确度高且易校正, 在科研及生产中还常作为标准流量计标定其他气体流量计<sup>[1]</sup>。湿式流量计在使用过程中, 由于液位变化会导致测量数值变

化, 此外也会因为摩擦、腐蚀等因素而导致准确度下降, 因此湿式气体流量计在使用前或者定期使用时需进行校正<sup>[2]</sup>。湿式流量计的校正也被多个学校列入化工基础实验或者化工原理实验教学中。本文针对湿式流量计校正实验内容进行改进, 提升教学效果。

## 1 湿式气体流量计的结构及工作原理

湿式气体流量计由转鼓、壳体、转动计数装置、液位计、水平仪及相关管道接口等构成, 如图1所示。转鼓呈圆筒状并被金属叶片分割为ABCD四个等容积的小室, 每个小室在靠近轴心位置设有进气口与进气管相连。当使用湿式气体流量计时, 要先通过调节流量计支脚确保流量计保持水平, 加入液体(一般为纯净水)使液位计中的指示针尖与液位刚刚接触。当被测气体从中间进入流量计时, 叶片被气压差推动带动转鼓转动, 并不断将气体排向顶部出口, 四个小室如此重复不断地进行充满与排空, 通过齿轮机械由指针或机械计数器计数, 也可将转鼓的转动次数转换成电信号作远传显示, 得到气体的累积流量<sup>[3,4]</sup>。如果液位计不处于水平状态、液位偏高或者偏低, 均会导致每个鼓室体积与设计值不一致, 会给流量计测量带来较大误差。

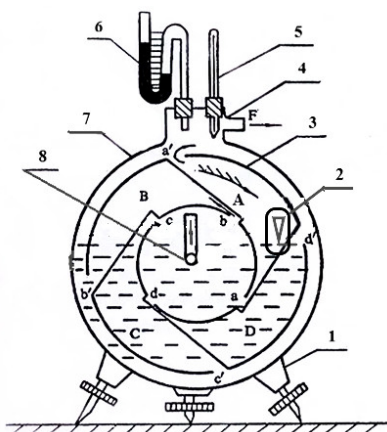


图1 湿式流量计的结构示意图

1-调节支脚; 2-液位调节指针; 3-鼓轮转动; 4-气体出口; 5-温度计; 6-压差计; 7-壳体; 8-气体进口

## 2 湿式流量计校正实验经典教学内容及存在的不足

开设气体流量计校正实验的目的, 是让学生了解流量计在化工生产和实验操作中的普遍应用及其校正的必要性。通过该实验, 使学生了解几种流量计的构造、工作原理和使用方法, 掌握几种气体流量计的校正方法, 培养学生细致严谨的科学态度。

在经典实验中, 湿式气体流量计的校正步骤<sup>[5,6]</sup>为:

- (1) 调节湿式流量计的水平性;
- (2) 往湿式流量计中加入蒸馏水, 通过水位计调节其水位;
- (3) 再次确认流量计的水平性后, 读出湿式流量计的指针刻度;
- (4) 通过在标准瓶中加入一定量的水, 将一定量的水加入到排气瓶中, 并将一定量的空气赶入湿式流量计中后, 再次读出流量计指针的刻度;
- (5) 重复五次;
- (6) 按照平均校正系数法处理实验数据, 得到校正公式。

在后续的气体流量计校正实验中, 湿式气体流量计作为标准流量计校正其他如转子流量计、质量流量计等。

在该实验的教学过程中我们注意到如下不足:

- (1) 学生关注操作过程，不关注工作原理，尤其不重视思考影响校正系数的关键因素；
- (2) 学生往往不考虑流量计放置水平和液位高低对计量误差大小的影响；
- (3) 在不同的刻度区间，测量误差存在差异，因此采用平均校正系数法时，某些测量范围的校正结果偏差较大。

### 3 教学内容改进

基于经典实验的以上不足，我校通过多年实践，对该实验进行改进，如引入课程思政内容，增加水平性及液位偏高偏低对测量结果的影响等实验内容，并将平均校正系数法优化为分段逼近校正法，提升了学生学习的积极性，提高了数据处理精度。校正后的数据更接近真实值，相对误差显著减小。

#### 3.1 讲解内容改进

引入课程思政内容：(1) 中国古代度量衡技术发展史，其发展历程提升了民族自豪感和民族自信、文化自信。(2) 都江堰设计。

流量计虽是一个小器件，但如果使用不当，不但影响生产质量和实验结果的准确性，还有可能造成事故。比如在某些情况下，超量程的流量可能引发安全隐患。在化工、石油等行业中，如果流量仪表无法准确计量或受到损坏，可能导致物料泄漏、设备故障等安全事故的发生。2019年6月7日，湖北当阳市发生一起由蒸汽引发的事故，造成6人死亡、4人受伤。经初步调查发现，这起事故的原因之一是蒸汽流量计的故障。

#### 3.2 操作内容改进

(1) 增加了湿式气体流量计中的液位变化对流量计测量准确性影响的实验。

(2) 校正方法中，常规的方法是用平均校正系数法，该法的缺陷如第3.3节所述，本文重点介绍该校正方法的改进。

#### 3.3 数据处理方法改进

任何测量都有误差，误差可能来源于仪器本身的精度限制、测量方法、操作过程产生的系统误差，也有环境条件(温度、湿度、气压)变化产生的随机误差<sup>[7]</sup>。误差会通过数据处理传递到后续的实验结果，所以这些误差的影响不容忽视。随机误差可通过反复多次测量取平均值消除，而系统误差则可通过校正达到尽量接近真值。

湿式气体流量计本身存在的误差可称为回转误差，即内部转子转动一圈过程中各示数偏离实际体积的误差<sup>[8]</sup>。

平均校正系数法是目前广泛使用的校正方法，它是将整个表盘示数分段校正，得到分段校正系数，然后对整个表盘的所有分段校正系数取平均值作为该流量计的校正系数，任意测量值都通过该平均校正系数进行校正。

该方法一般在以下两种情况下误差较小：

(1) 当湿式流量计的各个气室在整个表盘的不同区间的转动阻力几乎一致时，表盘每一区间的校正系数差别较小，所以对整个表盘的多个校正系数取平均值确实可以将整个表盘的系统误差平均化，可以用总平均校正系数来校正区间段示数。

(2) 对较大的气体体积进行测定时。如果需要测定的气体的体积很大，则流量计中的各个气室会在整个表盘上旋转数周，那么总平均校正系数就可以对整数周的流量作校正，虽然在非整数周的校正结果不准确，但是相对于数量较多的整数周而言，相对误差会显著降低。沈文新等<sup>[8]</sup>提出，通过测量仪表的整回转数可大幅减小回转误差。

如果测定气体流量时不满足上述情况，则该校正方法存在较大误差，特别是不能较准确地校正较小气体流量，其原因可分析如下：

(1) 一般情况下，由于各气室在转动时不同位置受到的阻力不相等，且不同气室在相同位置受到

的阻力也不相等, 因此虽然可以计算总平均校正系数, 但当各区间段差异较大时, 总平均校正系数无法准确代表各区间段的校正系数。

(2) 当测量的气体量较小、指针转动不满一周时, 用整个表盘的平均校正系数来代表局部的校正, 会有较大的误差, 且同等的绝对误差会引起更大的相对误差。

针对平均校正系数法的缺陷, 我们提出了一种新的校正方法, 即分段逼近校正法, 使得在所有情况下, 都能得到更为精准的校正结果。

首先, 根据测定精度的需要设定一个步长, 该步长不应小于湿式流量计的最小分度值。然后从零读数开始, 向湿式流量计内通入气体, 当指针指示在步长的整数倍刻度线上时停止通气, 记录此次通入湿式流量计气体的实际体积。

测量完成后, 每次通入的气体实际体积与所定步长的比值即为仪器在该区间内的分段校正系数。待湿式流量计的指针旋转一个完整周期后, 将各区间测得的分段校正系数作为对应区间的校正斜率, 并逐级累加计算出分段函数方程后, 再绘制出校正曲线。

在一个完整周期内, 校正曲线的方程可按下列方法推导:

首先设步长为 $\xi$ , 且湿式流量计指针旋转一个完整周期含有 $i$ 个步长。则整个周期可划分为 $i$ 个区段:  $[0, \xi], [\xi, 2\xi], [2\xi, 3\xi] \dots [(i-1), i\xi]$ 。

设每个区段测得的分段校正系数分别为 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$ , 则在 $[0, \xi]$ 区间内的校正曲线方程为:

$$V_{\text{cali}} = f_1(V_m) = C_1 V_m \quad (1)$$

其中 $V_{\text{cali}}$ 表校正后体积,  $V_m$ 代表湿式流量计指针指示体积。

在 $[\xi, 2\xi]$ 区间内的校正曲线方程为:

$$f_2(V_m) = C_2(V_m - \xi) + f_1(\xi) \quad (2)$$

故可得到任意区段 $[n\xi, (n+1)\xi]$ 的校正曲线方程的递推公式为:

$$f_{n+1}(V_m) = C_{n+1}(V_m - n\xi) + f_n(n\xi) \quad (3)$$

通过逐项累加可得任意区段 $[n\xi, (n+1)\xi]$ 的校正曲线方程为:

$$f_{n+1}(V_m) = C_{n+1}(V_m - n\xi) + \sum_{i=1}^n C_i \xi \quad (4)$$

将上述分段函数按区间逐一绘出, 即得到较为精确的校正曲线, 利用校正曲线即可在一个完整周期内对湿式流量计做较精确的校正。

需要说明的是, 虽然在校正时以零刻度线作为起点, 但测得的校正曲线却是通用的。只要得到校正曲线, 则湿式流量计上的每一个刻度都能对应一个校正后的值。所以, 在以后的测量中, 只需记录操作中指针的起始位置与最终停留位置(不管起始点是否在零刻度线上), 然后通过校正曲线找到它们所对应的校正值再作差, 即可得到比较精准的气体体积。

步长 $\xi$ 的大小与本方法的校正精度直接相关, 步长 $\xi$ 越小, 绘制出的校正曲线就越能准确反映湿式流量计的实际测量值。

理论上, 当步长 $\xi$ 取到一个很小的数值时, 按照微积分中的极限思想, 绘制出的曲线可以视作一条光滑曲线, 直至与反映真实情况的曲线无限逼近, 如图2所示。

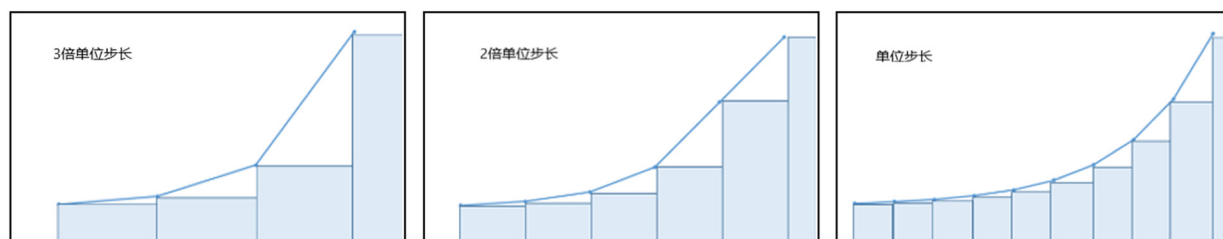


图2 步长对校准曲线逼近效果的示意图

但是仪器的分度值限制了步长的取值范围，当湿式流量计示数的微小变化无法在刻度上反映时，校正操作将无法进行。

#### 4 实验方法

实验装置示意图如图3所示，将标准容量瓶1中的已知体积水排入排气瓶4中，使排气瓶4内等体积的空气被压入湿式气体流量计7进行计量后排出。本实验对一台型号为SQL-2的湿式气体流量计进行校正。

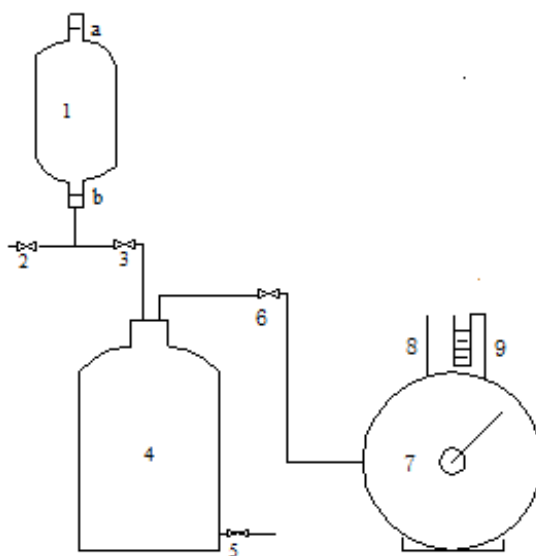


图3 湿式气体流量计的校正装置图

1-标准容量瓶；2、3、5、6-三通旋塞；4-排气瓶；7-湿式气体流量计；8-温度计；9-U型压差计

实验操作步骤如下(以1 L步长为例，标准容量瓶中a、b刻度之间容量为1 L)：

- (1) 调整湿式气体流量计水平，调节流量计中的水位，检查装置是否漏气。
- (2) 通过标准容量瓶将水排至排气瓶中，调整湿式流量计的指针在零刻度线。然后向标准容量瓶中注满自来水，调节阀2至水面与标准容量瓶上的刻度线a平齐。
- (3) 打开旋塞3，使水进入排气瓶4中，排出空气至流量计7，此时湿式流量计的示数开始发生变化。当湿式流量计的指针从0移动到1 L刻度的瞬间关闭旋塞，停止向排气瓶中注入自来水，即停止向流量计通空气。

(4) 此时观察标准容量瓶的液位，如果液位在刻度线b附近，说明流量计的刻度误差较小。用刻度移液管调节液位至刻度线b，方法是：如果液面在b的上方，则用刻度移液管吸出水，如果液面在b的下方，则用刻度移液管加入水，吸出或加入的水量记为 $V$ ，则流量计在0–1 L刻度间气体的实际体积为 $(1 - V)$ 或 $(1 + V)$  L。

如果液位离刻度线b较远，说明流量计的刻度误差较大，在容量大于1 L的量筒中加入一定量的水，将水从量筒倒入标准容量瓶至液面刚好回到上刻度线a，此时记录量筒中剩余水的量，倒出的水的体积即为通过湿式流量计的空气质量。

将此实际体积(以L为单位)除以步长，即为湿式流量计在0–1 L刻度间的分段校正系数，记作 $C_1$ 。

(5) 重复上述步骤，直至指针在整个表盘旋转一个完整周期(5 L)，就得到每一段的分段校正系数，则第 $n$  L到第 $(n + 1)$  L的分段校正系数即可记作 $C_{n+1}$ 。

(6) 改变步长为500 mL和250 mL，并重复上述操作，得到不同步长下的校正结果。

## 5 实验数据处理

### 5.1 平均校正系数法

采用平均校正系数法所得到的实验数据见表1。表中， $V_v$ 表示实际的气体体积， $V_w$ 表示测量的气体体积，分段校正系数 $C_i$ 中的下标 $i$ 表示分段号。

表1 平均校正系数法的测定数据及处理结果

实际通过的气体 体积 $V_v/L$	湿式流量计测量 体积 $V_w/L$	体积修正值 ( $\Delta V = V_v - V_w$ )/L	分段校正系数 $C_i = V_v/V_w$	平均校正系数 $C_{aver}$
1.000	1.010	-0.010	0.990	0.988
1.000	1.010	-0.010	0.990	
1.000	1.017	-0.017	0.983	
1.000	1.000	0.000	1.000	
1.000	1.021	-0.021	0.979	

由表1可以看出，在某些刻度区间段的分段校正系数与总平均校正系数相差较大。

采用平均校正系数法得到的校正公式可记作：

$$V_{\text{cali}} = C_{\text{aver}}V_m = 0.988V_m \quad (5)$$

式中， $V_{\text{cali}}$ 为校正值； $C_{\text{cali}}$ 为平均校正系数； $V_m$ 为测量值。

### 5.2 分段逼近校正法

当使用分段逼近法并且步长 $\xi = 1$  L时，由式(4)可知，湿式流量计的校正公式为：

$$V_{\text{cali}} = C_{n+1}(V_m - n) + \sum_{i=1}^n C_i \quad (6)$$

若湿式流量计的指针从a处转动到了b处，其中a介于表盘中的 $m$ 到 $(m+1)$ L之间，b介于表盘中的 $n$ 到 $(n+1)$ L之间( $m, n$ 均为整数刻度， $n \geq m \geq 0$ )，此时a处的校正方程 $V_{\text{cali},a}$ 与b处的校正方程 $V_{\text{cali},b}$ 分别为：

$$V_{\text{cali},a} = C_{m+1}(V_{m,a} - m) + \sum_{i=1}^m C_i$$

$$V_{\text{cali},b} = C_{n+1}(V_{m,b} - n) + \sum_{i=1}^n C_i$$

$V_{m,a}$ 和 $V_{m,b}$ 分别表示指针在a处和b处的示数。

则指针从a到b的校正后体积可表示为：

$$V_{\text{cali}} = V_{\text{cali},b} - V_{\text{cali},a} = C_{n+1}(V_{m,b} - n) - C_{m+1}(V_{m,a} - m) + \sum_{i=m+1}^n C_i$$

或

$$V_{\text{cali}} = C_{n+1}(V_{m,b} - n) + C_{m+1}(m + 1 - V_{m,a}) + \sum_{i=m}^{n-1} C_{i+1} \quad (7)$$

式(7)即为湿式流量计步长1 L时的校正公式。

若测量时指针从零刻度线开始，此时 $V_{m,a} = 0$ ， $m = 0$ ，因此公式可进一步简化为：

$$V_{\text{cali}} = C_{n+1}(V_{m,b} - n) + \sum_{i=0}^{n-1} C_{i+1} \quad (8)$$

$n = 0$ 时，

$$V_{\text{cali}} = C_1 V_{m,b}$$

以1 L为步长的分段逼近法所测得的实验数据及处理结果见表2。

将表2中步长为1 L的实验数据代入到式(7)，得到分段函数如下：

$$\begin{aligned} V_{\text{cali}} &= 0.982V_m & (n = 0) \\ &= 1.000V_m - 0.018 & (n = 1) \\ &= 0.990V_m + 0.002 & (n = 2) \\ &= 0.992V_m - 0.004 & (n = 3) \\ &= 0.998V_m - 0.028 & (n = 4) \end{aligned} \quad (9)$$

**表2 以1 L为步长分段逼近法的测定数据及处理**

$n$	湿式流量计指针始示刻度-终示刻度/L	流过该段刻度的实际气体体积/L	指针终示校正体积/L	该段校正系数(校正方程的斜率) $C_{n+1}$	该段校正方程截距
0	0.000-1.000	0.982	0.982	0.982	0
1	1.000-2.000	1.000	1.982	1.000	-0.018
2	2.000-3.000	0.990	2.972	0.990	0.002
3	3.000-4.000	0.992	3.964	0.992	-0.004
4	4.000-5.000	0.988	4.962	0.988	0.012

测量时,记录指针起始点a和终点b的读数 $V_{m,a}$ 和 $V_{m,b}$ ,将它们分别代入式(9)所对应的函数式, $V_{m,b}$ 与 $V_{m,a}$ 的差值即为采用步长为1 L的分段逼近校正法得到的校正体积。

类似地,还可以得到步长为500 mL和250 mL的校正方程,具体数据见表3和表4。

**表3 以0.5 L为步长分段逼近法的测定数据和处理结果**

$n$	指针所指的刻度/L	流过该段刻度的实际气体体积/L	指针所指校正体积/L	该段校正系数(校正方程的斜率) $C_{n+1}$	该段校正方程截距
-	0	0	0	-	-
0	0.500	0.524	0.524	1.048	0
1	1.000	0.474	0.998	0.948	0.050
2	1.500	0.500	1.498	1.000	-0.002
3	2.000	0.498	1.996	0.996	0.004
4	2.500	0.526	2.522	1.052	-0.108
5	3.000	0.502	3.024	1.004	0.012
6	3.500	0.492	3.516	0.984	0.072
7	4.000	0.503	4.019	1.006	-0.005
8	4.500	0.489	4.508	0.978	0.107
9	5.000	0.495	5.003	0.990	0.053

**表4 以0.25 L为步长的分段逼近法的测定数据和处理结果**

$n$	指针所指的刻度/L	流过该段刻度的实际气体体积/L	指针所指的刻度校正体积/L	该段校正系数(校正方程的斜率) $C_{n+1}$	该段校正方程截距
-	0	0	0	-	-
0	0.250	0.256	0.256	1.024	0
1	0.500	0.257	0.513	1.028	-0.001
2	0.750	0.237	0.750	0.948	0.039
3	1.000	0.239	0.989	0.956	0.033
4	1.250	0.256	1.245	1.024	-0.035
5	1.500	0.255	1.500	1.020	-0.030
6	1.750	0.253	1.753	1.012	-0.018
7	2.000	0.245	1.998	0.980	0.038

(待续)

(续表4)

$n$	指针所指的 刻度/L	流过该段刻度的实 际气体体积/L	指针所指的刻 度校正体积/L	该段校正系数(校正 方程的斜率) $C_{n+1}$	该段校正 方程截距
8	2.250	0.240	2.238	0.960	0.078
9	2.500	0.250	2.488	1.000	-0.012
10	2.750	0.247	2.735	0.988	0.018
11	3.000	0.255	2.990	1.020	-0.070
12	3.250	0.237	3.227	0.948	0.146
13	3.500	0.252	3.479	1.008	-0.049
14	3.750	0.250	3.729	1.000	-0.021
15	4.000	0.263	3.992	1.052	-0.216
16	4.250	0.247	4.239	0.988	0.040
17	4.500	0.245	4.484	0.980	0.074
18	4.750	0.244	4.728	0.976	0.092
19	5.000	0.248	4.976	0.992	0.016

为了验证分段逼近校正法在实际应用中的准确性,我们随机选取刻度起始点,让一定量体积的气体通过湿式流量计,并用气体体积所对应步长下的分段逼近法以及平均校正系数法校正,数据记录见表5,两种校正方法的结果比较见表6。

表5 随机通入定量气体的测定数据

通入的气体体积/L	湿式流量计起始刻度/L	湿式流量计终止刻度/L	湿式流量计测量体积/L
1.000	0.248	1.275	1.027
0.500	1.275	1.765	0.490
0.250	1.770	2.027	0.257

表6 两种方法的校正结果相对误差比较

气体实际体积/L	用分段逼近法	分段逼近校正法	用平均系数法	平均校正系数法
	校正结果/L	相对误差	校正结果/L	相对误差
1.000	1.013	1.3%	1.015	1.5%
0.500	0.489	2.2%	0.484	3.2%
0.250	0.251	0.4%	0.254	1.2%

## 6 实验结果分析

由表6可以看出,当步长为1 L时,分段逼近校正法与平均校正系数法的校正结果比较接近,这也说明了测量的气体体积较大时,局部的不准确性会降低。而步长为500 mL和250 mL时,两者表现出了明显的差异,分段逼近校正法的相对误差显著减小。所以在小体积气体测定、精确度要求比较高时,用分段逼近法具有很明显的优势。

此外,使用分段逼近法时,还可以通过调整步长来满足操作者对精度的需求。这一点是平均校正系数法无法做到的,因为平均的结果总是不能完美地反映局部的情况,而步长只要小到一定程度,校正曲线就与实际情况非常接近。

理论上,小步长分段逼近法精度应高于大步长逼近法,但我们将表5中的三个测定数据分别用1 L、0.5 L和0.25 L的步长分段逼近校正公式校正时,结果不尽如此,如表7所示。这是因为,小步长的测定过程中,操作误差和视差误差大于大步长的测定。这种误差可以通过多次反复测量得到降低。

表7 不同步长分段逼近校正的结果比较

通入的气体 体积/L	湿式流量计测量 体积/L	步长1 L的校正 体积/L	步长0.5 L的校正 体积/L	步长0.25 L的校正 体积/L
1.000	1.027	1.013	1.013	1.017
0.500	0.490	0.490	0.489	0.497
0.250	0.257	0.257	0.257	0.251

## 7 实验方法改进后的教学效果

湿式气体流量计校正实验方法改进后,虽然课时稍有延长,实验数据处理也较之前复杂了一些,但从课后的提问和讨论中可以看出,通过改进实验方法,学生对湿式流量计的结构和工作原理有了更深的理解,对生产实践中测量仪表的校正重要性有了更全面的认识。实验方法的改进有助于培养学生更严谨的科学态度,提高他们分析问题和解决问题的能力。

## 8 结语

本文指出并深入分析了平均校正系数法的一些缺陷,设计了一种新的方法用于湿式气体流量计的校正。通过理论分析与函数模型的验证,并用标准气体量进行试验,直观地展示了平均校正系数法的不足及分段逼近校正法的优势。分段逼近校正方法更符合流量计实际测量气体时的状况,特别是在测量小体积的气体时,确实有效提高了校正的精度。此外,分段逼近校正法将微积分的数学思维引入到了流量计的校正中,这种创新思维还可以延伸到其他仪器的校正方面。

## 参 考 文 献

- [1] 张金利, 郭翠梨. 化工基础实验. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2006: 112-123.
- [2] 王艳花. 化工基础实验. 北京: 化学工业出版社, 2016: 38-40.
- [3] 刘光永. 化工开发实验技术. 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [4] 沈文新, 廖新. 自动化仪表, **2010**, 31 (1), 56.
- [5] 武汉大学化学与分子科学学院实验中心. 化工基础实验. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 65-72.
- [6] 韦厚朵. 化肥工业, **2003**, 30 (5), 54.
- [7] 欧美极. 测量误差分析与数据处理技术的研究, 流体测量与控制, **2024**, 5 (5), 63.
- [8] 沈文新, 季艳, 金岚. 计量技术, **2008**, No. 11, 47.