

基于模糊控制原理的电容薄膜 真空计数据优化算法研究

杨骐豪 冯焱* 成永军 孙雯君 吴成耀 裴晓强 丁栋
(兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室 兰州 730000)

Data Optimization Algorithm of Capacitance Diaphragm Gauge Based on Fuzzy Control Theory

YANG Qihao, FENG Yan*, CHENG Yongjun, SUN Wenjun, WU Chengyao, PEI Xiaoqiang, DING Dong
(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract Capacitance diaphragm gauges are widely used to measure medium and low vacuum. To improve the measurement accuracy of capacitance diaphragm gauges, the algorithm is applied to the data processing of capacitance diaphragm gauges. The piecewise fitting method can make the error data curve on each data segment fit more accurately according to the characteristics of the data on each data segment. However, this approach has the problem of data point jumping at boundary points, which has a great impact on practical use. In this paper, a data processing algorithm based on fuzzy control theory is designed to eliminate the problem of the hopping gap at the cut-off point of barometric pressure measurement. After the processing of the fuzzy control algorithm, the measurement accuracy of the capacitance diaphragm gauge is improved, and the barometric pressure measurement data curve has good continuity in the whole range.

Keywords Capacitance diaphragm gauges, Data processing algorithms, Fuzzy control theory

摘要 电容薄膜真空计广泛应用于中、低真空的测量,为了提高电容薄膜真空计的测量准确性,将算法应用于电容式薄膜压力计的数据处理中。分段拟合方法可以根据每个数据段上的数据特性,使每个数据段上的误差数据曲线拟合得更加准确。然而,这种方法会在边界点处出现数据点跳跃间断的问题,这对实际使用有很大影响。文章设计了一种基于模糊控制原理的数据处理算法,以消除气压测量值在分界点处的跳跃间断问题。经过模糊控制算法的处理,电容薄膜真空计的测量精度得到了提高,气压测量数据曲线在全范围内具有良好的连续性。

关键词 电容薄膜真空计 数据处理算法 模糊控制原理

中图分类号: TB772 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202306006

电容薄膜真空计因为其结构简单,线性度较好等优点被广泛应用于航天航空、科研、食品、医药、新能源和核工业等领域^[1]。近年来,由于国际关系紧张,西方国家对我国实施了高准确度电容薄膜真空计的出口禁运,这一举措阻碍了中国高端工业发展。为了实现高准确度电容薄膜真空计的国产化,国内一些科研机构从电容薄膜真空计结构设计、电容膜片材料选择、加工工艺、信号处理电路设计、

数据处理方法和人机交互方面入手,不断的进行研究和改进。本次研究将从数据处理方法入手,通过加入合适的数据处理算法来进一步提高电容薄膜真空计的测量性能。

电容薄膜真空计是根据电容极板间距离变化会引起电容值变化的原理设计而成的气压测量装置,当外界压力作用于感压膜片时会引起膜片变形使得膜片和固定电极间的距离减小,电容增大;反

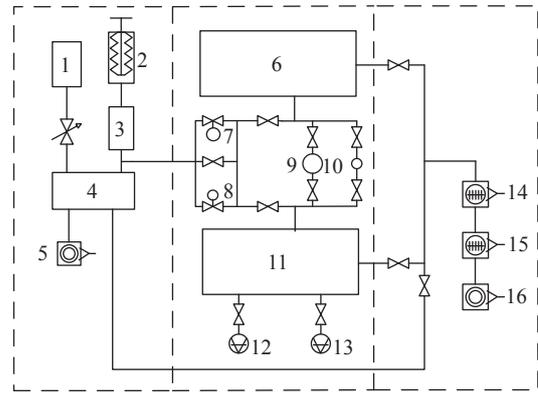
之,撤去外界压力,膜片逐渐恢复到原位,电容也随之变小。电容薄膜真空计通过处理电路将电容的变化量转换为对应的电流、电压和频率的变化量,间接测得气体的压力^[2-5]。该研究中使用的电容薄膜真空计是通过测量电容检测电路在不同压强下输出的电压值来完成气压数据的测量,其电压输出范围为 0 V ~ 10 V,然后再通过对应的电压-气体压强关系,将电压值换算成对应的气体压强值。此前已有相关论文采用了测量误差曲线分段拟合修正的方法来对测量原始数据进行补偿修正,这种方法相比于使用修正比例系数的修正方法^[6]和只使用全量程误差拟合曲线的修正方法,对电容薄膜真空计的测量原始数据有着更好的修正效果。但是,这种修正方法在使用过程中会出现分段分界点左右气压测量数据曲线出现较大跳跃间断的问题,这给工业生产中的气压环境测量和获得造成了很大的困难。例如,生产车间想得到某个气压下的生产环境,但是由于这个气压值刚好处于分段分界点附近,气压值会产生跳跃间断使得电容薄膜真空计测不到这一点的气压值或者测量出的数据相对误差较大,从而无法获得预定气压下的生产环境,给生产过程造成很大影响。

该研究根据电容薄膜真空计的数据特点,基于模糊控制原理设计出了一个数据处理算法,有效的解决了分界点附近数据的跳跃间断现象,解决了电容薄膜真空计在实际使用中出现的测不到和测不准的问题。

1 电容薄膜真空计的实验数据采集

实验使用兰州空间技术物理研究所真空计量一级站的金属膨胀法真空标准装置进行气压值直接比对,得到电容薄膜真空计的原始气压测量值和所对应的气压标准值。该装置是中、低真空段的国防最高标准装置,其测量范围为 $10^5 \text{ Pa} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$, 不准确度为 0.01% ~ 1.0%。金属膨胀法真空标准装置可以通过选择不同的膨胀路径来对取气前级中的气体进行相应倍数的膨胀,从而得到所需的标准气压^[7]。使用该装置采集电容薄膜真空计的气压测量数据保障了实验数据的准确可靠性,金属膨胀法真空标准装置的结构示意图如图 1 所示:

金属膨胀法真空标准装置根据取气前级所设置的气体压强($p_{\text{前级取气压强}}$),通过所选择的膨胀倍数



1.供气稳压瓶; 2.可变体积; 3.测试口稳压瓶; 4.石英规; 5.机械泵 1; 6.校准室 VL; 7.一级膨胀室 V1b; 8.一级膨胀室 V1s; 9.二级膨胀室 V2b; 10.二级膨胀室 V2s; 11.校准室 VR; 12.电离真空计; 13.小型电容薄膜真空计; 14.分子泵 2; 15.分子泵 1; 16.机械泵 2

1. Gas supply pressure regulating bottle; 2. Variable volume; 3. Test mouth pressure regulator bottle; 4. Quartz gauge; 5. Mechanical pump 1; 6. Calibration chamber VL; 7. Primary expansion chamber V1b; 8. Primary expansion chamber V1s; 9. Secondary expansion chamber V2b; 10. Secondary expansion chamber V2s; 11. Calibration room VR; 12. Ionization vacuum gauge; 13. Small capacitive film vacuum gauge; 14. Molecular pump 2; 15. Molecular pump 1; 16. Mechanical pump 2

图1 金属膨胀法真空标准装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the vacuum standard device by metal expansion method

通道完成气体的膨胀。第一次膨胀后的气压标准值 p_{L1} (VL 校准室中的气压) 可通过式(1)计算得出:

$$p_{L1} = \frac{p_{\text{前级取气压强}}}{1+k} \quad (1)$$

式中: k 为膨胀系数, 其中 k 的计算公式(2)如下:

$$k = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

式中: V_1 为校准室的体积, V_2 为膨胀室的体积。

设第一次进气后校准室得到的膨胀气体压强为 p_{L1} , 第 n 次膨胀后校准室的气体压强为 p_{Ln} , 前级取气的压强统一用 $p_{\text{前级取气压强}}$ 表示, 则第 n 次膨胀后的校准室气体压强计算公式(3)为:

$$p_{Ln} = \left[1 - \left(\frac{k}{1+k} \right)^n \right] p_{\text{前级取气压强}} \quad (3)$$

因为每次气体膨胀都会给校准室带入一定的误差, 所以单次进气次数越多其带入的误差也就会越多。为了保证实验数据的准确性, 本实验选择分为两个区段进行采集, 分别为 0 Pa ~ 266 Pa (0 V ~ 1 V) 和 266 Pa ~ 2666 Pa (1 V ~ 10 V) 两个区段。并且在 0.7 V ~ 1.7 V 区间上采集了多个数据点, 由于

电容薄膜真空计在此区段上数据线性度较好,所以可以使用这些数据点求出对应的一次线性插值函数,近似得出 0.7 V ~ 1.7 V 数据段上所对应的气压标准值,如图 2 所示。

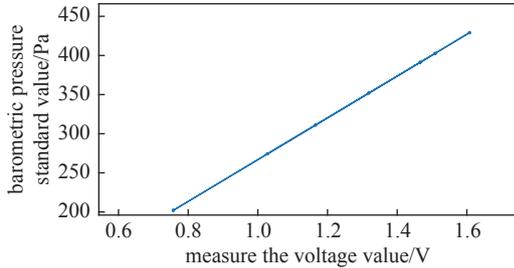


图2 0.7 V ~ 1.7 V 区间上对应的气压标准值

Fig. 2 The corresponding barometric pressure standard value in the 0.7 V ~ 1.7 V range

2 误差修正方法

2.1 分段拟合修正效果

如图 3 可知,电容薄膜真空计在高、低压两个量程上的误差曲线具有不同的特性,误差曲线分段拟合修正方法的使用可以分别根据高、低压量程段上的误差曲线特性得到更加精确的误差数据拟合结果,从而更加准确的对各自分段上的数据进行修正。

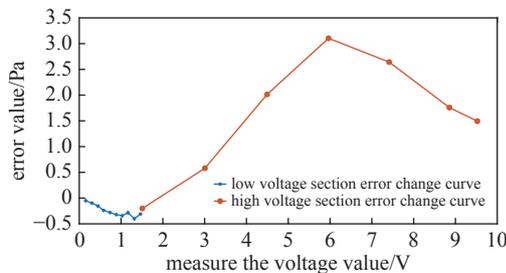


图3 电容薄膜真空计原始测量数据的误差变化曲线图

Fig. 3 Curve of the change in error of the raw measurement data of the CDG

通过计算可以得出电容薄膜真空计低压和高压部分测量数据的误差拟合曲线,再将与气压测量值相对应的电压值带入其中,来获得各个气压测量点的误差数据拟合值。然后,用电容薄膜真空计的原始气压值减去相应的误差拟合值来获得气压测量数据的修正值。

图 4(a)可以看出经过分段误差拟合修正的修正后各个数据点的误差都得到了一定的减小且都稳定在 0 值附近,而修正前的气压测量数据各点的

误差值较大且变化幅度较大。图 4(b)可以看出远离分界点的数据相对误差都得到了大幅的减小,但是分界点(1 V)附近数据的相对误差依然很大(紫色圆圈中的部分)。

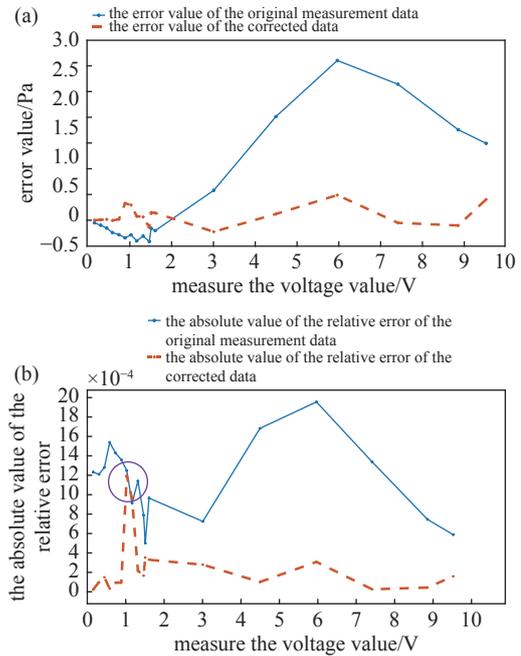


图4 数据修正前后的误差和相对误差绝对值变化曲线图。(a)数据修正前后的误差变化曲线图,(b)数据修正前后的相对误差绝对值变化曲线图

Fig. 4 Graph of error change and the absolute value of the relative error before and after data correction. (a) Graph of error change before and after data correction, (b) graph of the absolute value of the relative error before and after data correction

虽然使用测量误差分段曲线拟合修正的方法取得了较好的数据修正效果,减小了大部分测量点上的误差,但是数据处理的过程中发现,在低压段与高压段数据分界点的地方,修正后的数据出现了数据曲线左右不连续的现象,如图 5 所示。

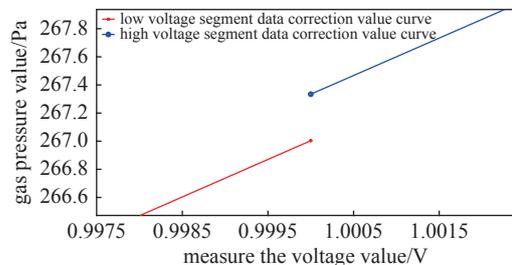


图5 修正后的数据曲线在分界点处出现的跳跃间断现象

Fig. 5 The corrected data curve has a jump gap at the cut-off point

图 6 可以更加明显的看出分界点附近区域因为数据曲线跳跃间断而产生相对误差突然增大的现象。可以看出当电压值小于分界点(1 V)时, 经过低压段测量误差数据拟合曲线的修正后, 数据与标准值之间的相对误差基本小于 0.025%。但是, 在分界点(1 V)处的修正值产生的相对误差突变到了 0.122%, 并且后续相邻区间上的修正数据值也产生了较大的相对误差, 随着电压值的增大, 修正后数据点的相对误差才又慢慢减小, 这种现象很大的影响了电容薄膜真空计在分界点附近测量数据的准确性和连续性。

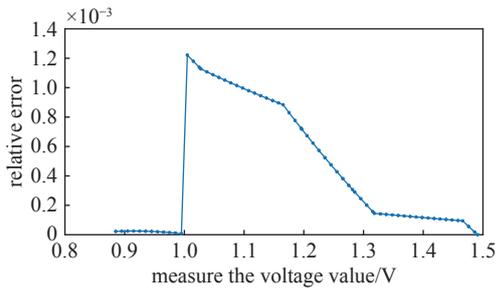


图6 分界点区间上相对误差的变化

Fig. 6 Change in relative error at the cut-off point interval

2.2 模糊算法修正

本文总结归纳了实验用电容薄膜真空计在跳跃间断区间上产生的系统误差及其变化规律, 然后根据测量数据对模糊控制算法的隶属度函数和模糊规则进行多次调整, 最终设计出合适的模糊控制数据处理算法。通过该算法, 数据处理芯片可以根据测量数据实时计算出该点会产生的误差近似值, 然后用测量值减去误差值, 从而达到减小跳跃间断区间上测量数据误差的目标。

2.2.1 划分数据跳跃间断区间

根据实验数据做出高、低压段修正数据曲线和一次线性插值函数的数据曲线图像, 如图 7(a)和图 7(b)所示:

由图 7(a)和图 7(b)可知, 插值函数的数据曲线在电压值 1 V 附近与低压段的修正数据曲线几乎重合, 然后随着电压值的增大又慢慢的趋向于高压段的修正数据曲线。为了更加精确的分析插值函数数据曲线与高、低压段修正数据曲线的关系, 以 0.1 V 为间隔从电压值 1 V 到 1.52 V 求出了对应电压值上的高、低压段气压数据修正值和气压标准值, 然后根据高、低压段气压数据修正值的相对误差, 画出

了相对误差的变化曲线图, 其结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 在电压为 1 V ~ 1.2 V 的数据区段上低压段的修正曲线与对应的标准值相对误差小于 0.01%, 所以可以在 1 V ~ 1.2 V 区段上直接使用低压段的数据修正值。又因为在 1.197 V 数

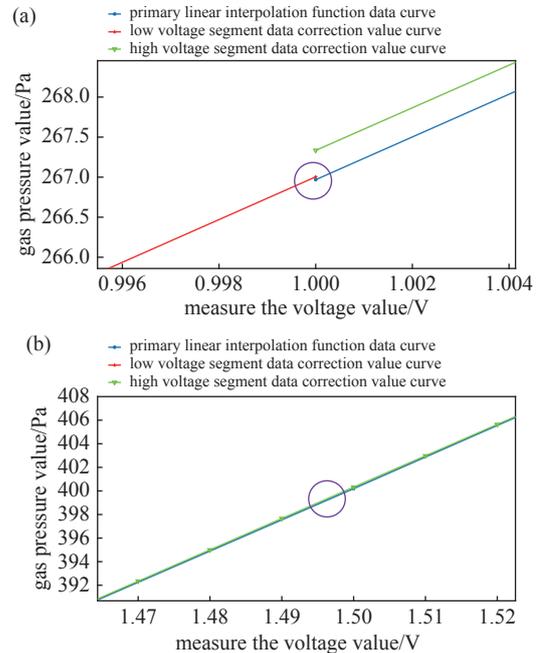


图7 高、低压段修正后的数据曲线和一次线性插值函数的数据曲线图像。(a) 高、低压段修正后的数据曲线和一次线性插值函数的数据曲线图像, (b) 高、低压段修正后的数据曲线和一次线性插值函数的数据曲线图像

Fig. 7 Data curve image of corrected high and low voltage segments and primary linear interpolation function. (a) Data curve image of corrected high and low voltage segments and primary linear interpolation function, (b) data curve image of corrected high and low voltage segments and primary linear interpolation function

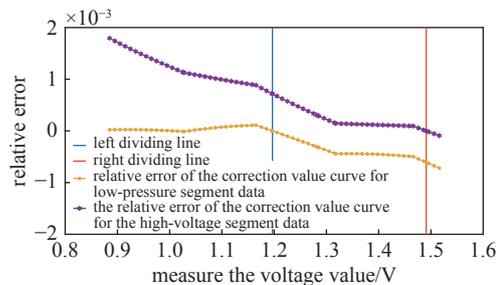


图8 高、低压段修正数据与插值函数标准值的相对误差变化曲线图

Fig. 8 Curve of the relative error of the corrected data and the standard value of the interpolation function in the high and low voltage segments

据点处的低压段气压修正值与标准值间的误差趋近于0, 1.491 V数据点处的高压段压强修正值与该点标准值间的误差趋近于0。所以选择1.197 V和1.491 V两个数据点作为数据跳跃区间的左右端点。

2.2.2 模糊语言变量的确定

设电容薄膜真空计的测量电压值为 z , z 在跳跃间断区间上的取值范围为 $[1.197 \text{ V}, 1.491 \text{ V}]$, 根据图8可以看出高压段修正数据的相对误差随着 z 与1.197 V端点的距离增大而呈现逐渐减小的趋势, 所以本算法选择 z 与1.197 V的差值作为输入量, 用 x 表示。这里为了使跳跃间断区间的端点也能得到较好的处理, 将 x 的取值范围适当扩大为 $[-0.1 \text{ V}, 0.3 \text{ V}]$ 。

由计算结果可知, 高压区段的数据修正值与标准值间的相对误差范围为 $0\% \sim 0.0718\%$, 为了提升模糊控制算法的处理效果, 将高压区段的数据修正值与标准值间的相对误差值 E 扩大1000倍, 将其定义为输出值 u_2 , 即 u_2 的表达式(4)为:

$$u_2 = E \times 1000 \quad (4)$$

模糊算法输出值 u_2 的基本论域为 $[0, 0.718]$, 但是为了防止输出值的端点处得不到良好的控制导致算法输出失控, 所以适当的扩大了 u_2 的基本论域, 根据多次的实际处理结果, 选择 u_2 的基本论域为 $[-0.1, 1]$ 。

本文根据前面设定好的输入量 x 与输出量 u_2 的基本论域, 初步选择它们的等级量论域分别为 $X=[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$, $U_2=[-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]$ 。模糊控制算法的输入输出量都需要进行模糊化才能带入到算法中, 选用线性变换公式(5)来对取值在 $[a, b]$ 之间的连续量转换到 $[-n, n]$ 之间, 转换后的输入量用 X^* 表示, 转换后的输出量用 U_2^* 来表示^[8]。

$$y^* = \frac{2n}{b-a} \left(y - \frac{a+b}{2} \right) \quad (5)$$

式中: y^* 为变换后的值, y 为 $[a, b]$ 之间的值。

最后将输入 X^* 和输出 U_2^* 的模糊控制论域语言表达变量设定为 $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{O}, \text{PS}, \text{PB}\}$, 依次代表负大, 负小, 零, 正小, 正大^[9-13]。

2.2.3 隶属度函数的选择与调整

选用三角隶属度函数作为基础函数, 然后再根据输入量 X^* 和输出量 U_2^* 的几个关键值来对整个隶属度函数进行调整, 使得其输出的结果更加符合预期。

输入量 X^* 和输出量 U_2^* 的隶属函数图像分别如图9(a)和图9(b)所示。

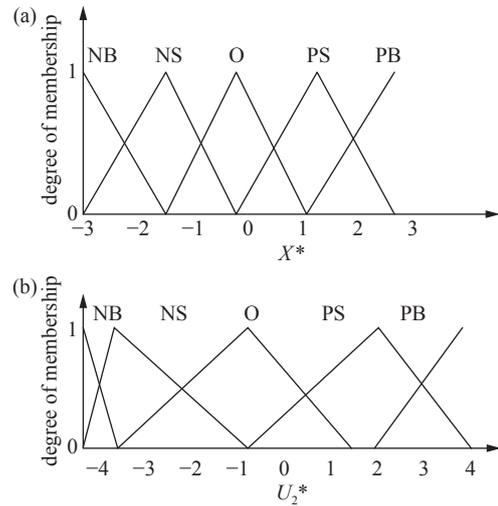


图9 隶属度函数。(a) X^* 的隶属函数, (b) U_2^* 的隶属函数
Fig. 9 Membership function. (a) X^* membership function, (b) membership function of U_2^*

2.2.4 模糊规则

高压段的修正数据曲线与对应标准值的相对误差值 u_2 会随着电压值 $x(x \in [1.197 \text{ V}, 1.491 \text{ V}])$ 的增大而呈现逐渐减小的趋势。所以该算法根据这一规律设定模糊规则如下表1所示。

表1 模糊规则
Tab. 1 Fuzzy rules

X^*	NB	NS	O	PS	PB
U_2^*	PB	PS	O	NS	NB

其代表的含义为, 当 X^* 靠近跳跃间断区间左端点的时候, U_2^* 较大, 当 X^* 处于跳跃间断区间靠近中间部分时, U_2^* 为一个大概值, 当 X^* 靠近跳跃间断点右端点时, U_2^* 较小。

2.2.5 解模糊

通过模糊推理得到的输出结果需要通过解模糊的过程才能转化为执行器可以执行的精确量, 该算法采用重心法进行解模糊, 重心法是目前比较常用的解模糊方法, 它可以很好的兼顾多个部分对输出结果的控制, 从而使输出值更加合理, 重心法的计算公式如式(6)所示:

$$U_2^* = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{2i}^* \cdot \mu(U_{2i}^*)}{\sum_{j=1}^5 \mu(U_{2j}^*)} \quad (6)$$

式中: $\mu(U_2^*)$ 为相应的模糊子集隶属函数的隶属度。

通过重心法解模糊后的输出值数据曲线如图 10 所示, 可以看出模糊控制的输出值曲线符合所预期的输入输出量关系。

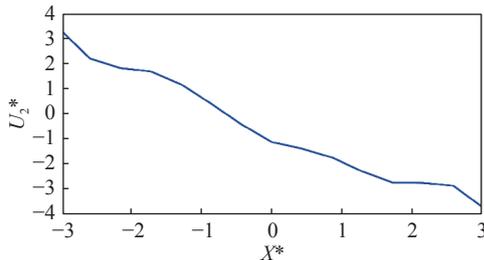


图 10 重心法解模糊后的输出数据值曲线

Fig. 10 Output data value curve after fuzzy de-ambiguation by the center of gravity method

U_2^* 在得到解模糊化后需要通过线性变化公式 (5) 将 U_2^* 的值重新转换为 $[-0.1, 1]$ 上的 U_2 值。在得出输入电压 x 值所对应的 U_2 值后, 便可以用式 (7) 计算出此电压值点所对应的气体压强修正值 p^* 。

$$p^* = \left(1 - \frac{U_2}{1000}\right) \times p \quad (7)$$

式中: p^* 为经过模糊控制算法得出的对应于电压值 x 的气压修正值, p 为电压值 x 所对应的高压段气压数据值。

2.2.6 实验数据经过模糊控制算法处理后的效果

经过模糊控制算法的处理后, 跳跃间断区间上气压数据的相对误差绝对值的变化如图 11 所示。

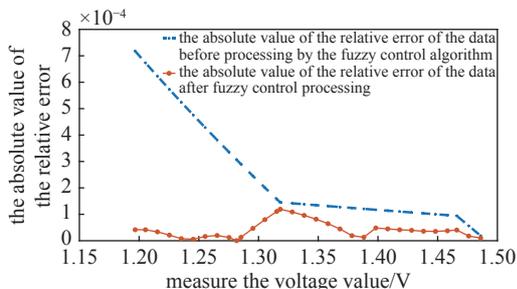


图 11 分界区间数据经过模糊控制算法处理前后的相对误差绝对值变化曲线图

Fig. 11 The change curve of the absolute value of the relative error before and after the data of the demarcation interval is processed by the fuzzy control algorithm

从图 11 中可以看出, 通过数据模糊控制算法的处理后, 跳跃间断区间上数据的相对误差绝对值都得到了减小, 大部分数据的相对误差都减小为修正前的 50% 以下。如图 12 可以看出经过模糊控制

算法处理后电容薄膜真空计的气压测量数据在全量程上为一条平滑连续的曲线, 分界点处的跳跃间断现象得到了明显的减小。

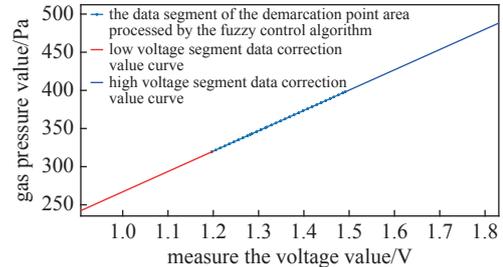


图 12 经过模糊控制算法处理后的数据曲线图

Fig. 12 Data curve after processing by fuzzy control algorithm

3 实际测试效果

为了在实际测量中验证该模糊控制算法对电容薄膜真空计的实际处理效果, 将上述的误差曲线分段拟合修正算法和模糊控制算法写入到电容薄膜真空计的数据处理芯片中, 然后在金属膨胀法标准装置上进行了两组全量程的测量实验, 每次测量实验可以测得两个位于跳跃间断区间内的电容薄膜真空计气压测量值和其对应的气压标准值。这两组测量值通过数据算法处理后的结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 靠近分界点 1.197 V 的数据点, 在经过误差曲线拟合修正后, 其相对误差变得比未修正前的数据相对误差还大, 在经过了模糊控制数据处理算法的修正后其相对误差得到了减小, 且小于原始测量数据的相对误差, 提高了分界点附近数据的测量准确性, 并且越靠近分界点的数据其修正效果越好。模糊控制数据处理算法的使用解决了分界点附近区间上数据出现跳跃间断的问题, 使电容薄膜真空计在全量程上的测量数据曲线更加平滑连续, 实际测试的结果验证了模糊控制数据处理算法的有效性。

4 结论

使用误差曲线分段拟合的校准方法可以有效地降低电容薄膜真空计气压测量数据在各自分段区间内的误差。然而, 在电容薄膜真空计的实际使用过程中, 它会导致修正后的气压数据点在相邻段的分界点处产生跳跃和中断, 导致边界点附近的气压值出现无法测量和误差较大的问题。模糊控制数据处理算法的加入, 解决了测量数据在边界点附近出现间断跳跃的问题, 使电容薄膜真空计的测量

表2 验证组测量数据通过数据处理算法后的相对误差变化

Tab. 2 Relative error variation of the measurement data of the verification group after passing the data processing algorithm

电压值/V	标准值/Pa	原始测量值相对误差的绝对值	误差曲线分段拟合修正后数据相对误差的绝对值	模糊控制算法修正后数据相对误差的绝对值
1.3204	352.30	0.0639%	0.0712%	0.0450%
1.4677	391.60	0.0601%	0.0352%	0.0300%
1.3202	352.28	0.0625%	0.0658%	0.0396%
1.4676	391.57	0.0511%	0.0373%	0.0320%

曲线更加平滑、更加连续,从而提高电容薄膜真空计的测量精度。

增加数据区间分割的数量可以在一定程度上提高电容薄膜真空计的测量精度,模糊控制数据处理算法的应用可以实现更多数据区间的划分,而不用担心各分段边界点出现跳跃间断的问题。

尽管数据处理算法可以在一定程度上弥补电容薄膜真空计在材料和加工技术方面的不足,但要实现更高的测量精度,电容薄膜真空计在材料结构和加工技术等方面仍需进一步改进,只有不断的提高电容薄膜真空计的测量稳定性和重复性,才能更好的发挥出数据处理算法的作用。

参 考 文 献

- [1] Song P S, Ma Z, Ma J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors[J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 56
- [2] Feldman J, Paul M, Xu G P, et al. Effects of natural zeolites on field-scale geologic noble gas transport[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, 220-221: 106279
- [3] Hyland R W, Shaffer R L. Recommended practices for the calibration and use of capacitance diaphragm gages as transfer standards[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1991, 9(6): 2843-2863
- [4] Wang F, Cui H M, Zong Y Z, et al. Design of capacitive thin film vacuum pressure sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(3): 84-86,90 (王凡, 崔宏敏, 宗义仲, 等. 电容式薄膜真空压力传感器设计[J]. *传感器与维系统*, 2017, 36(3): 84-86,90(in chinese))
- [5] Shahiri Tabarestani M, Azizollah Ganji B. Analytical analysis of capacitive pressure sensor with clamped diaphragm[J]. *IJE Transactions C:Aspects*, 2013, 26(3): 297-302
- [6] Ran X, Feng Y, Cheng Y J, et al. Study on correction method of measurement error of capacitive diaphragm gauge[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, 28(4): 445-452 (冉欣, 冯焱, 成永军, 等. 电容薄膜真空计测量误差修正方法研究 [J]. *真空与低温*, 2022, 28(4): 445-452 (in chinese))
- [7] Lü S L, Li D T, Zhang D X, et al. A static expansion vacuum standard[J]. *Vacuum Science and Technology China*, 1998, 18(4): 266-271 (吕时良, 李得天, 张涤新, 等. 金属膨胀式真空计量标准 [J]. *真空科学与技术*, 1998, 18(4): 266-271(in chinese))
- [8] He G, Cai X H, Bai Y, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 266-276 (贺刚, 蔡晓华, 白阳, 等. 基于模糊 PID 的犊牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(3): 266-276(in chinese))
- [9] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998, 6(2): 250-265
- [10] Wang L X, Mendel J M. Generating fuzzy rules by learning from examples[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1992, 22(6): 1414-1427
- [11] Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, 14(5): 676-697
- [12] Fnaiech M A, Betin F, Capolino G A, et al. Fuzzy logic and sliding-mode controls applied to six-phase induction machine with open phases[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(1): 354-364
- [13] Hayashi K, Otsubo A, Murakami S, et al. Realization of nonlinear and linear PID controls using simplified indirect fuzzy inference method[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 105(3): 409-414