

密闭舱内氧传感器自动标定方法研究

潘点飞, 刘力涛, 唐斌, 葛江亚, 王魁, 郑为阁

(中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 鉴于氧浓度传感器、氧化锆传感器本身的特性, 处于寿命末期的传感器在测量时, 会出现精度误差及漂移特性。为减小传感器漂移影响, 基于多传感器数据融合技术, 选择稳定性及一致性较好的传感器测量值作为自动标定基准值, 并在这一基础上, 改单点 k 值标定方法为多点 k 值标定方法。验证结果显示: 当电压值漂移量达到0.1 V时, 常规标定方法氧分压漂移量将超过2 kPa, 漂移量不超过0.5 kPa。因此, 该标定方法增加了氧传感器漂移的适应范围, 降低了测量误差, 减少了标定的频次。

关键词: 传感器; 自动标定; 数据融合; 多点 k 值; 延寿; 密闭舱

中图分类号: R 852 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.05.008

Automatic Calibration Method for Oxygen Sensor in Sealed Cabin

PAN Dianfei, LIU Litao, TANG Bin, GE Jiangya, WANG Kui, ZHENG Weige

(China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the characteristics of oxygen sensor and zirconia oxygen sensor, it can be concluded that the sensor will have precision error and measured drifts at the end of its life. Based on the multi-sensor data fusion technology, the measured sensor data with good stability and consistency are selected as the reference values for automatic calibration. Based on the single-point k -factor calibration method, a multi-point k -factor calibration method is proposed. The results show that when the voltage drift reaches 0.1 v, the oxygen partial voltage drift of the conventional calibration method will exceed 2 kPa, but the drift of this method will not exceed 0.5 kPa. Therefore, the calibration method enhances the adaptive range of the oxygen sensor drift, reduces the measurement error and reduces the calibration frequency.

Key words: sensor; automatic calibration; data fusion; multi-point k -factors; life extension; sealed cabin

0 引言

氧是维持人与动植物生存必不可少的元素, 氧浓度传感器和氧化锆传感器常用于测量气体中氧浓度或氧分压。氧浓度传感器和氧化锆传感器(文中统称为氧传感器), 均采用电化学反应原理, 将氧气成分转化为电信号, 具有测量精度高、响应快、稳定性好等特点^[1], 是检测密闭舱内氧气浓度的重要方法, 被广泛应用于载人航天、潜艇、工业控制、医疗科研等领域。氧传感器均属于消耗性传感器, 如氧化锆传感器, 其使用寿命取决于电极的消耗, 氧化锆传感器的性能由其核心材料陶瓷结构决定^[2-8]。随着电极消耗、电解液蒸发和陶瓷结构稳定性降低, 其测量精度、稳定性逐渐丧失, 需采用定期标定

的方法, 保证其测量确定性^[9-12]。常规环境下, 可采用已知浓度的标气瓶进行校准, 而在载人航天器、潜艇等特殊密闭环境下, 常规标定方法不易实施, 且成本高、风险大。

密闭舱内一般同时采用多组、多只氧浓度传感器和氧化锆传感器测量氧气成分, 由于传感器分布位置不同、工作模式不同, 其测量值的变化特性也不同^[13]。当部分传感器性能下降时, 其测量结果出现精度误差及漂移特性, 导致各传感器之间的测量值表现出非一致性。为适用密闭舱内长期测量的需求, 研究氧传感器自主高效的标定方法, 是保证氧气成分测量精度、稳定性和可靠性的有效手段。

根据传感器测量数据, 对数据分析处理, 提取

收稿日期: 2023-06-23; 修回日期: 2023-08-29

作者简介: 潘点飞(1984—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为环控生保系统控制。

数据变化特征,采用基于数据融合技术的自动标定方案。监测到氧气成分测量数据超出额定阈值时,实施系统自动标定,既提高传感器定期标定的效率,又保证密闭内氧气成分测量准确性与稳定性,进而延长氧传感器的使用寿命。

1 多传感器数据融合技术

多传感器数据融合,利用多种类型、多只数量传感器的信息与数据,在一定的准则下进行综合分析处理,以获得更加有效的数据信息。与单一传感器数据相比,多传感器数据融合技术提高了测量信息的可靠性与健壮性,增强数据的可信度,提高信息的利用率。传感器数据融合与概率统计、神经网络、模式识别、人工智能等技术后相结合,在信息化、智能化、全局化等方面提供广阔的应用空间^[14]。

多传感器数据融合的形式常分为3类:数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据融合的方法有加权法、滤波法、神经网络法等^[15]。不论采用何种方法,传感器测量偏差值(甚至失效数据)均会影响最终的测量结果,导致对环境信息错误判断。分析并处理传感器采集的数据,识别异常数据,筛选出最优基准值,对增强密闭舱氧传感器标定的可靠性及鲁棒性具有重要意义。

检测测量数据异常值的方法较多,常用的方法有罗曼诺夫斯基准则、狄克松准则、格拉布斯准则以及拉依达准则等^[16]。格拉布斯准则在数据量不大的情况下,可靠性能较好,本文在该准则的基础上,提出基于多传感器数据融合技术的自主氧传感器标定方法。

利用格拉布斯准则对传感器测量数据进行残差值分析判断,如测量值超过格拉布斯临界值,则认为该测量值为不可靠数据,不能参与传感器标定的基准值计算。将传感器测量数据按从小到大排序为 y_i ,其中 $y_1 < y_2, \dots, y_n$, n 为样本数, \bar{y} 为平均值, σ 为标准差, $g_0(n, a)$ 为统计临界数值,可得 g_1 、 g_n 分别为

$$g_1 = \frac{\bar{y} - y_1}{\sigma} \quad (1)$$

$$g_n = \frac{y_n - \bar{y}}{\sigma} \quad (2)$$

如 $g_1 \geq g_n$ 且 $g_1 > g_0$,则认为 g_1 为异常值;如 $g_1 < g_n$ 且 $g_n > g_0$,则认为 g_n 为异常值;如 $g_1 < g_0$ 且 $g_n < g_0$,则样本数据中不存在异常值。统计临界数

值 $g_0(n, a)$ 见表1^[17],其中 n 为样本数, a 为显著水平,0.050和0.010为错输概率,对应置信概率分别为95%和99%。

表 1 临界值表

Tab. 1 Critical value table

n	$a(0.050)$	$a(0.010)$	n	$a(0.050)$	$a(0.010)$
3	1.135	1.155	10	2.176	2.410
4	1.463	1.492	11	2.234	2.485
5	1.672	1.749	12	2.285	2.550
6	1.822	1.944	13	2.331	2.607
7	1.938	2.097	14	2.371	2.659
8	2.032	2.231	15	2.409	2.705
9	2.110	2.323	16	2.443	2.747

多只传感器同时测量舱内氧分压,测量数据之间的相互关联性反映传感器变化的一致性,确定一致性及稳定性较好的传感器测量值作为基准值,是氧分压传感器自主标定的基础。

假设某一时刻,氧传感器 i 、 j 测量结果分别为 T_i 和 T_j ,引入 d_{ij} 表示测量值 T_i 与 T_j 之间的融合度, d_{ij} 越大表示传感器 i 与 j 的测量值相差越大,反之则两者偏差越小。

$$d_{ij} = |Q_i - Q_j| \quad (3)$$

式中: Q_i 为 T_i 的方差。

其表达式为

$$Q_i = |T_i - \bar{T}|^2 \quad (4)$$

如舱内同时存在 m 个传感器测量当前氧分压,各传感器之间的融合度 $d_{ij}(i, j=1, 2, \dots, m)$ 构成融合度矩阵 D_m 。其表达式为

$$D_m = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

依据相容矩阵及相容性阈值,将相容矩阵进行归一化处理,得到标准化相容矩阵 R_m 。其表达式为

$$R_m = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

r_{ij} 表达式为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & d_{ij} \geq p_{ij} \\ 1, & d_{ij} < p_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_{ij} 为传感器相容性阈值。

如果 $r_{ij}=0$,表明传感器 i 与 j 的相容性差,相互不关联。如果 $r_{ij}=1$,表明传感器 i 与 j 的相容性强,两者相互关联^[18]。如某一传感器测量值仅被少数传感器测量值关联,则认为其测量结果不可靠,不适合作为标定基准值。反之,如某一传感器的测量值与多数传感器测量值相关性强,则其为强关联数据。据此可得到强关联数据融合集,有利于确定可靠的标定基准值。

2 传感器测量数据变化特性分析

以氧化锆传感器为例,在氧化锆传感器寿命末期,传感器的陶瓷结构稳定性及气体扩散孔稳定性逐渐降低,氧传感器敏感探头中的电解液缓慢挥发,电化学反应活性变弱^[19],导致其测量精度和稳定性变差。处于寿命末期氧化锆传感器a、b、c的测量值漂移特性曲线如图1所示。

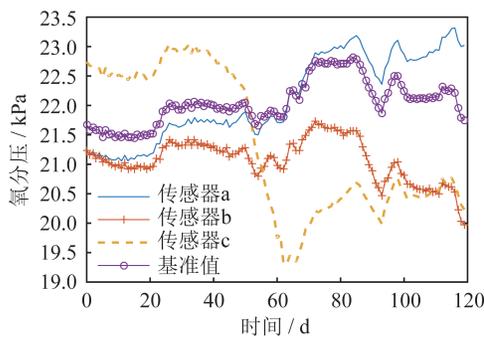


图1 氧化锆传感器测量曲线

Fig. 1 Measured curves of the zirconia oxygen sensors

由图1可知,密闭舱内氧浓度维持在约22 kPa的情况下,传感器a呈缓慢上升趋势,传感器b呈下漂降趋势,传感器c呈先上漂后快速下漂的趋势。在实际应用中,为提高测量可靠性,在同一位置往往布置多只传感器,每组传感器通过特定取平均算法,获得最终测量的物理值。当同组氧化锆传感器相互测量偏差超过额定阈值,将导致该组传感器无法得到有效的测量结果,甚至引起传感器多只超差报警提示。

上述传感器a、b、c相对基准值测量偏差如图2所示。如3只传感器属于同组配置,将出现异常结果。因此,通常采用传感器系数重新标定的方法,消除漂移影响,延长传感器使用寿命。

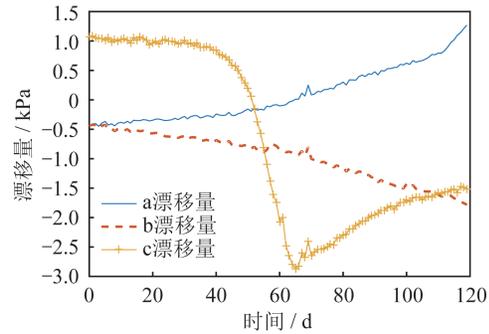


图2 氧化锆传感器测漂移量曲线

Fig. 2 Drift curves of the zirconia oxygen sensors

氧浓度传感器、氧化锆传感器的物理值计算公式为

$$\begin{cases} y = Ax + B, & \text{氧传感器} \\ y = (1 + Ae^{(Bx)})P, & \text{氧化锆} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x 为传感器测量电压值,V; P 为环境总压,kPa; A 、 B 为公式系数; y 为氧气成分物理值; e 为常数,取2.718 3。

修正计算公式中的系数 A 、 B 均可达到消除漂移的目的。其中,氧浓度传感器为线性公式,可直接通过修正系数获得标定后的新系数。本文主要分析氧化锆传感器的自标定方法,其基准值确定策略及系数修正流程同样适用于氧浓度传感器,不再赘述。上述方法需先确定校准基准值,再根据经验公式反算出校准后的系数,最后由控制器软件实施系数更新。

地面环境中,可通过校准气瓶确定待标定的基准值,但不易确定在轨航天器的校准基准值。系统软件更新维护流程繁多复杂、风险点多、不易控制。从待标定的传感器系数确定,到系数更新真正实施需要一定周期,存在滞后性,导致传感器更新后的系数时效性较差。

3 多k值标定方法实现与验证

3.1 传感器标定基准值确定

以地面长寿命验证试验中的氧传感器a~h为例,采用前文所述多传感器数据融合技术,筛选稳定性和一致性较好的传感器测量值作为标定基准值。

选择2个不同时间氧传感器测量数据,分别设为 T_1 和 T_2 ,各传感器测量值见表2。

由表2可知, $T_1=[22.784\ 00, 23.121\ 27, 22.955\ 00, 22.694\ 00, 22.751\ 00, 23.339\ 00, 22.912\ 00, 22.779\ 00]$,

表 2 氧传感器测量结果

Tab. 2 Measured results of the zirconia oxygen sensors

氧传感器	测量值 T_i	测量值 T_j
传感器 a	22.784	22.086
传感器 b	23.121	22.422
传感器 c	22.955	23.511
传感器 d	22.694	22.419
传感器 e	22.751	22.193
传感器 f	23.339	22.755
传感器 g	22.912	22.650
传感器 h	22.779	22.216

将传感器测量结果由小到大排序为 [22.694 00, 22.751 00, 22.779 00, 22.784 00, 22.912 00, 22.955

$$D_m = \begin{bmatrix} 0.6982 & 0.3624 & 0.7270 & 0.3650 & 0.5910 & 0.0290 & 0.1340 & 0.5680 \\ 1.0355 & 0.6997 & 0.3897 & 0.7023 & 0.9283 & 0.3663 & 0.4713 & 0.9053 \\ 0.8692 & 0.5334 & 0.5560 & 0.5360 & 0.7620 & 0.2000 & 0.3050 & 0.7390 \\ 0.6082 & 0.2724 & 0.8170 & 0.2750 & 0.5010 & 0.0610 & 0.0440 & 0.4780 \\ 0.6652 & 0.3294 & 0.7600 & 0.3320 & 0.5580 & 0.0040 & 0.1010 & 0.5350 \\ 1.2532 & 0.9174 & 0.1720 & 0.9200 & 1.1460 & 0.5840 & 0.6890 & 1.1230 \\ 0.8262 & 0.4904 & 0.5990 & 0.4930 & 0.7190 & 0.1570 & 0.2620 & 0.6960 \\ 0.6932 & 0.3574 & 0.7320 & 0.3600 & 0.5860 & 0.0240 & 0.1290 & 0.5630 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据相容性阈值 0.465 1, 对相容性矩阵进行归一化处理, 得到标准化相容矩阵 R_m 为

$$R_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

据此可得各传感器测量结果的关联性, 序号为 1、5、8 的 3 只传感器测量结果与其他传感器测量值强关联, 可将其作为传感器标定的基准值。

3.2 单点 k 值标定方法

密闭舱内氧化锆传感器系数标定主要采用单点 k 值标定方法, 即选择标定时刻 t_1 氧化锆传感器测量结果与舱内氧分压基准值的修正系数 k , 通过五点曲线拟合方法, 得出当前待修正传感器系数。具体步骤如下。

1) 根据专家知识库, 选择稳定性及一致性较好的氧浓度传感器测量值作为标定基准值 Y_0 。

2) 通过氧化锆传感器输出 Y_1 与基准值之间的偏差, 得到修正系数 $k = Y_0 / Y_1$ 。

3) 假设总压 P 为 100, 氧浓度 T 为 10~30 kPa

00, 23.121 27, 23.339 00], 其均值为 22.531 4, 标准差 0.427 3, 测量值残差矩阵为 $g = [1.042 8, 0.791 9, 0.738 1, 0.263 1, 0.257 0, 0.277 5, 0.523 2, 2.292 3]$, $n=8$, 依据格拉布斯表取 $g_0=2.032$, $g_1 < g_n$ 且 $g_n > g_0$, 认为 g_n 为异常值, 其对应的测量值不可靠, 将其剔除后传感器测量均值为 22.856 6。

同理, 计算氧传感器数据 T_j 均值为 22.391 5, 剔除异常值后, 不同时刻传感器测量平均差值为 0.465 1, 并将其设为相容性阈值, 其中 T_1 为: $T_j = [22.085 8, 22.421 6, 23.511 0, 22.419 0, 22.193 0, 22.755 0, 22.650 0, 22.216 0]$ 。因此, 不同时刻各传感器测量数据之间融合度矩阵 D_m 为

的氧化锆传感器与氧传感器一致性好, 此时对应未修正的氧分压则为氧浓度 T/k , 根据氧化锆计算公式, 反算出氧化锆电压值应为

$$x = \ln \left[\left(\frac{T}{PK} - 1 \right) / A \right] / B \quad (11)$$

式中: A 和 B 为当前未修正的系数。

1) 选取 10~30 范围 5 个点, 根据上述反算公式得到电压和输出之间的 5 个点关系。

2) 根据这 5 个点, 拟合出新的修正后公式系数 A' 和 B' 。设 A' 和 B' 为正, 氧分压公式表示为

$$y = (1 + A e^{(Bx)}) P \quad (12)$$

$$(1 - y/P) = A' e^{(B'(-x))} \quad (13)$$

如选取 t_1 时刻的修正 k 值 (单点 k 值), 即可实现对该时刻传感器测量电压 x_1 的修正。其中, 10~30 kPa 范围内的修正一致只是一种理想假设。但实际上, 在氧化锆传感器寿命末期, 即使舱内氧分压未发生变化, 其测量电压值会不断漂移, 一旦氧化锆测量电压继续漂移, 上述修正效果则明显降低。

分析试验数据, 密闭舱内氧分压大部分时间维持在 22~23 kPa, 氧化锆测量值不断漂移 (上漂或下漂), 其实质是传感器电压值漂移。常规修正方法仅实现了当前电压值下测量的一致性, 当电压继续漂移, 修正系数 k 无法保证电压为 x_2 时的一致性。

因此,单一 k 值修正方法的适应范围较窄,导致传感器系数修正的频次不断增加。

3.3 多点 k 值标定方法

将原单点 k 值修正法改进为多点 k 值修正法,即选取 t_1 时刻对应的电压值 x_1 及修正值 k_1 ,再选取氧分压修正范围漂移 1 kPa,对应 t_2 时刻的电压值 x_2 及修正值 k_2 ,根据氧化锆公式可得:

$$y_1 = (1 + A'e^{(B'x_1)})P_1k_1 \quad (14)$$

$$y_2 = (1 + A'e^{(B'x_2)})P_2k_2 \quad (15)$$

如氧分压漂移修正范围选择 1 kPa,考虑氧分压公式中总压变化的影响,取舱内总压经验值上限,即 P_2 为 100 kPa,则上式中, $Y_2 = Y_1 \pm 1$, $P_2 = 100$ kPa,根据上述多项式可求得修正后的传感器系数 A' 和 B' 。

该方法可保证氧化锆传感器测量电压值在 $x_1 \sim x_2$ 范围内漂移,与基准值修正一致。

3.4 方法验证

以地面长寿命验证试验中的传感器为例,对于寿命末期的 3 只氧化锆传感器 I、II 和 III 进行系数标定,修正前后,氧分压传感器系数见表 3。

表 3 氧化锆传感器标定系数(单点 k 值)

Tab. 3 Calibration coefficients of the zirconia oxygen sensors (single-point k -factor)

传感器	A(修正前)	B(修正前)	A'(修正后)	B'(修正后)
I	-1.118 919	-0.164 1	-1.134 90	-0.181 8
II	-1.145 481	-0.166 1	-1.174 84	-0.193 3
III	-1.087 876	-0.152 8	-1.104 04	-0.174 7

上述 3 只氧化锆传感器于 t_i 进行单点 k 值系数修正,修正后其测量结果与基准值一致。随传感器工作时间增加,在舱内氧分压基本稳定的情况下,其测量结果仍不断漂移,2 个月内各传感器测量漂移量如图 3~5 所示。

采用单点 k 值标定后,在一定程度上延长了氧化锆传感器使用寿命,但其输出物理量(氧分压)与基准值的差异仍在持续增大,直至超出额定阈值。综上所述,该方法适应范围较窄、延寿效果有限。

采用多点 k 值点修正方法,氧化锆 I、II 和 III 的修点同样选择 t_1 时刻,修正范围为 1 kPa,则由式(14)与式(15)可得到新的修正系数,见表 4。

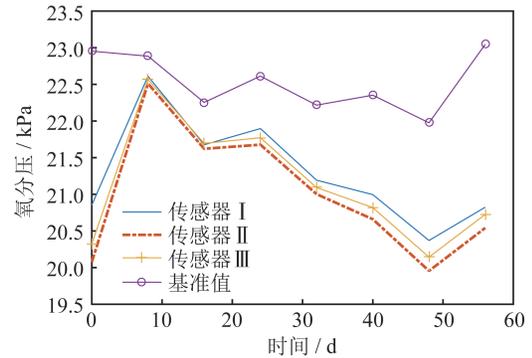


图 3 氧化锆 I、II、III 单点标定曲线

Fig. 3 Results of the zirconia oxygen sensors I, II, and III obtained by the single-point calibration method

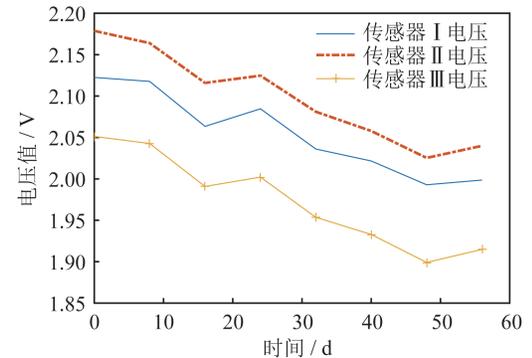


图 4 氧化锆 I、II、III 电压值漂移量曲线

Fig. 4 Voltage drift curves of the zirconia oxygen sensors I, II, and III

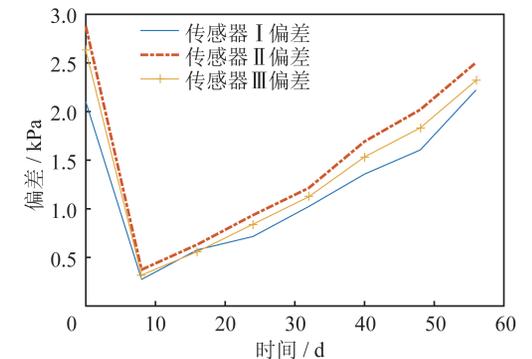


图 5 氧化锆 I、II、III 物理值漂移量曲线

Fig. 5 Physical quantity drift curves of the zirconia oxygen sensors I, II, and III

采用前文多传感器数据融合方法,确定标定基准值为 1、5 和 8 的 3 只氧传感器测量平均值,采用多点 k 值修正方法得到修正结果,如图 6 所示。

单点 k 值标定方法,在 k 值选定标定时刻的标定效果较好,但随着传感器测量电压值的继续漂移,2 个月后,测量电压值漂移量达 0.1 V,相应物理量漂

表 4 氧化锆传感器标定系数(多点 k 值)

Tab. 4 Calibration coefficients of the zirconia oxygen sensors (multi-point k-factor)

传感器	A' (新方法)	B' (新方法)
I	-0.886 27	-0.067 079
II	-0.830 23	-0.036 301
III	-0.824 44	-0.034 150

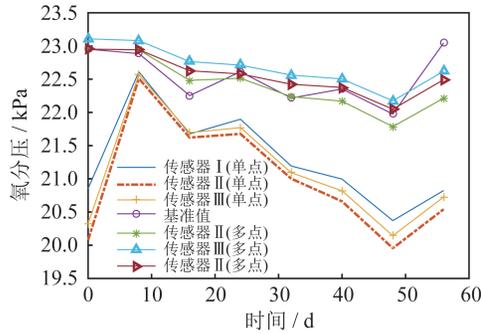


图 6 2 种标定方法比较曲线

Fig. 6 Comparison curves of two calibration methods

移超过 2.0 kPa。而多点 k 值标定方法,在相同传感器电压漂移量下,物理量的漂移不超过 0.5 kPa。综上所述,采用多点 k 执行修正方法可适应的传感器漂移范围更广,与标定基准值测量误差更小。

新标定方法矫正了传感器测量值与基准值的测量误差,同时保证两者变化趋势的一致性,能较好地解决氧气成分测量正确性的问题。虽然测量灵敏度精度略有下降,但满足使用要求,是延长使用氧传感器寿命的有效方法。

4 结束语

本文分析了密闭舱内氧气测量传感器变化特性,运用多传感器数据融合方法确定传感器自动标定基准值,并提出一种改进的传感器标定方法。该方法可有效缩短传感器标定频次,降低系统运行风险,对处于寿命末期的氧传感器,其适应范围更广,测量误差更小,为氧传感器自动标定、延寿使用提供有效的参考。

参考文献

[1] 秦浩, 尤佳, 刘智敏, 等. 常温电化学氧气传感器寿命测试分析[J]. 轻工学报, 2016(1): 105-108.
 [2] 粟慧龙, 韩雪, 魏丽君. 高精度氧传感器的设计及其应用研究[J]. 控制工程, 2016, 23(4): 588-591.
 [3] 陈新喜, 袁开涛. 基于氧化锆的高精度氧传感器[J]. 仪

表技术与传感器, 2014, 26(8): 8-10.

[4] 石敏, 刘宁. ZrO₂ 基固体电解质氧传感器的研究现状及发展趋势[J]. 合肥工业大学学报, 2003, 26(3): 388-392.
 [5] 谢光忠, 蒋亚东, 杨邦朝. 环境检测与控制用组合传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(4): 21-24.
 [6] KNAUTH P, TULLER H L. Solid state ionics: roots, status and future prospects [J]. *Jam Ceram Soc*, 2002, 85(7): 1654-1680.
 [7] 黄彩虹, 金福江. 氧化锆氧传感器电压输出特性模型的研究[J]. 石油化工自动化, 2012, 48(6): 57-59.
 [8] 罗志安, 肖建中. 氧化锆氧传感器电极电化学性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2008, 31(4): 387-389.
 [9] 王光伟, 李和平, 徐愿坚, 等. 电化学极化对 YSZ 氧传感器中贵金属电极性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(22): 3348-3353.
 [10] 刘宇, 沈孟良, 曹广益. 电化学氧浓度传感器在环境压力变化情况下的补偿测试技术[J]. 测控技术, 2006, 25(1): 5-9.
 [11] 潘鸿飞, 杨柏军, 王立强. 陀螺仪随机漂移的测量及其数学模型的建立[J]. 上海航天, 2003, 3(20): 20-23.
 [12] SURYADEVARA N K, MUKHOPADHYAY S C. Wireless sensor network based home monitoring system for wellness determination of elderly [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6): 1965-1972.
 [13] 由川, 李勇, 林夏, 等. 红外地球敏感器测量误差分析及修正方法[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(5): 107-114.
 [14] TANG C, HU H S, ZHANG M H, et al. Real-time detection of moving objects in a video sequence by using data fusion algorithm [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, 41(3): 793-804.
 [15] 熊泰然, 陈雯雯, 陈宏宇, 等. 基于自适应 KF 动态虚拟陀螺数据融合算法的研究[J]. 上海航天(中英文), 2022, 38(6): 124-30.
 [16] ZHU L, KAO I. Galerkin-based model analysis on the vibration of wire-slurry system in wafer slicing using a wiresaw [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283(3-5): 589-620.
 [17] ZHANG X L. Shock overpressure outlier processing based on grubs criteria [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(6): 37-39.
 [18] AZEROUAL O, SAAKE G, ABUSBA M. Data quality measures and data cleansing for research information systems [J]. *Journal of Digital Information Management*, 2019, 16(1): 12-21.
 [19] ADACHI G Y, IMANAKA S. Ionic conducting lanthanide oxides [J]. *Chemical Reviews*, 2002, 102(6): 2405-2430.