

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.13

应变测量仪的自校准电路设计及应用

刘耀, 王文健

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 为解决应变测量仪在使用分流法进行校准时存在的费时耗力效率低下、精度不足等问题, 实现应变信号的高精度采集, 研究并设计了低漂移、低噪声的自校准电路, 程控配置采集通道和校准信号, 拟合出采集信号和自校准信号之间的函数关系式, 获取校准系数, 对应变测量结果进行校正, 有效降低应变测量的温度漂移误差和噪声误差, 满足应变测量仪精度的指标要求。

关键词: 应变测量仪; 自校准; 低漂移

中图分类号: TB971

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 02-0105-07

Design and application of a self-calibration circuit for strain measuring instrument

LIU Yao, WANG Wenjian

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problems of time-consuming, labor-intensive, low efficiency and insufficient accuracy in the calibration of strain gauges using the split flow method and achieve high-precision acquisition of strain signals, a low drift and low noise self-calibration circuit has been studied and designed. The acquisition channel and calibration signal are configured by program control. The functional relationship between the acquisition signal and the self-calibration signal is fitted, and the calibration coefficient is obtained. The strain measurement results are corrected, which effectively reduces the temperature drift error and noise error of strain measurement and meets the accuracy requirements of strain measuring instruments.

Key words: measuring instrument; self-calibration; low temperature drift

0 引言

应变测量仪广泛应用于航空航天、船舶重工、桥梁建筑等领域。利用应变测量仪对被测构件在载荷作用下的应变、变形分布情况进行精确测量, 为被测试样的安全性、可靠性验证提供应变数据支撑^[1]。随着我国航空事业快速地发展壮大, 飞机型号、试验任务越来越多, 应变测试的需求快

速增长, 应变测量仪的通道数也相应增加, 在飞机结构强度试验中通道数甚至超过6万^[2-3]。

应变测量仪由大量的电子元器件构成, 每一个元器件都是非理想元件, 测量仪器经过长时间的工作后, 其内部电路参数均会出现不同程度的变化, 使得系统采集的数据存在误差^[4]。比较典型的误差是由温度漂移引起的, 温度对电子元器件的影响会通过器件之间的级联而传递、叠加,

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家仪器工程项目(2006ZCTF0021)

引用格式: 刘耀, 王文健. 应变测量仪的自校准电路设计及应用[J]. 计测技术, 2023, 43 (2): 105-111.

Citation: LIU Y, WANG W J. Design and application of a self-calibration circuit for strain measuring instrument[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):105-111.



且温度误差在一定范围内具有一定的随机性,通过建立数学关系式去分析误差的变化规律是比较复杂的,甚至难以实现^[5]。

如果无视参数变化,将会造成测量数据不准确、工程质量降低,最终造成难以挽回的损失^[6]。为保障精度,应变采集前需要对仪器进行校准,而每次都去计量部门进行校准显然效率低下^[7]。为了减少设备维护成本,缩减校准周期,高精度的测量仪器最好在设计初期就具备自校准功能^[8]。

乔杜鹃等人^[9]论述了应变测量仪分流校准技术,采用在应变测量桥路并联大电阻破坏桥路平衡的方式模拟应变,通过信号采集电路采集桥路输出电压,将电压信号换算为应变对系统进行校准。这种分流校准方法存在的不足是需要手动连接分流校准线,并且需要更换不同阻值的校准电阻才能实现多点校准,效率较低。

胡轶群等人^[10]利用带有自动标定功能的多路模拟开关设计了自校准电路,这种模拟开关在内部集成了高精度电阻分压网络,基准电压经过分压后输出基准信号。但模拟开关内部的分压网络分压比例确定,所以输出基准信号幅值有限,无法输出多点校准信号,且只能输出单极性校准信号。

胡潇寅等人^[11]为解决标准模拟应变量校准器需要频繁手动旋转波段开关的问题,设计了档位自动切换系统来代替手动切换。这实际上是对校准装置的一种改进,需要连接符合国标规定的校准器,而不是应变测量仪自带的校准系统。

严洪燕^[12]提出的应变测量仪自动校准系统设计,通过给应变测量仪输入标准源,然后用标准表采集应变测量仪输出,依据校准规范进行数据处理,从而对设备进行校准。这本质上还是不属于应变测量系统内置的自校准系统。

为了校准时能自动断开仪器前面板连接的应变测量引线,并可输出不同幅值、不同极性的校准信号,对采集的校准信号进行最小二乘数据拟合,拟合出自校准函数,从而对多通道应变测量仪进行快速校准,设计了一种精密、低漂移、可编程、可内置于应变测量仪系统内部的自校准电路。

1 应变测量仪自校准原理

应变测量仪信号采集框图如图1所示,内置高精度、低漂移的自校准电路,进行自校准时,信号调理电路和桥路输出信号断开连接,同时和自校准电路相连,采集自校准电路输出的自校准信号。

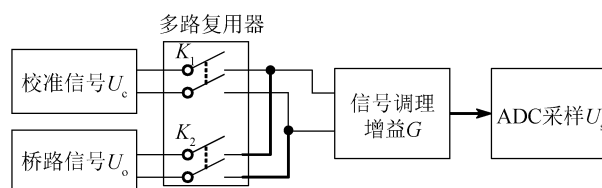


图1 应变测量仪信号采集框图

Fig. 1 Block diagram of signal acquisition for strain gauge

采用模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 对高精度、低漂移的自校准信号进行多点调理与采样,将采集的数据进行最小二乘拟合,拟合出采样电路输出值 U_s 和自校准信号 U_c 之间的函数关系式 $U_c = p(U_s)$, 作为校准函数。拟合函数为

$$p(U_s) = \sum_{i=0}^m c_i \varphi_i(U_s) \quad (1)$$

式中: $\varphi_k(U_s) = U_s^k$, 则最小二乘拟合法方程为^[13-14]

$$\begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) \cdots (\varphi_0, \varphi_m) \\ (\varphi_1, \varphi_0) \cdots (\varphi_1, \varphi_m) \\ \vdots \\ (\varphi_m, \varphi_0) \cdots (\varphi_m, \varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y, \varphi_0) \\ (y, \varphi_1) \\ \vdots \\ (y, \varphi_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可解出拟合函数多项式(1)的系数 $c_0, c_1, \dots, c_m$, 得到校准函数 $p(U_s)$ 。

校准完成后,进行应变测量时将采样电路测得的电压 U_s 代入校准函数 $p(U_s)$, 得到校准后的采样值。通过电压和应变之间的转换关系式(3), 得到校准后的应变^[15]。

$$\begin{cases} V_r = \frac{p(U_s) - p_{(0)}^{-1}}{V_{\text{exc}}} \\ \varepsilon = \frac{V_r}{GF} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p_{(0)}^{-1}$ 为无应变时桥路输出信号, V ; V_{exc} 为电桥激励信号, V ; ε 为微应变, $\mu\varepsilon$; GF 为应变片系数, 一般为2。可以通过式(3)对应变测量仪进行校准。

2 应变测量仪自校准电路的设计与实现

2.1 自校准电路设计

应变测量仪自校准电路以基准源输出的高精度、低漂移3 V电压作为基准，利用放大、反相与分压电路对电压基准进行变换，最终输出不同幅值的校准信号，如图2所示， a_1, b_1, c_1, d_1 为多路复用器 K_1 的各个通道； a_2, b_2, c_2, d_2 为多路复用器 K_2 的各个通道； a_3, b_3, c_3 为多路复用器 K_3 的各个通道；CAL+为校准信号正输出端；CAL-为与参考地相连的校准信号负输出端。

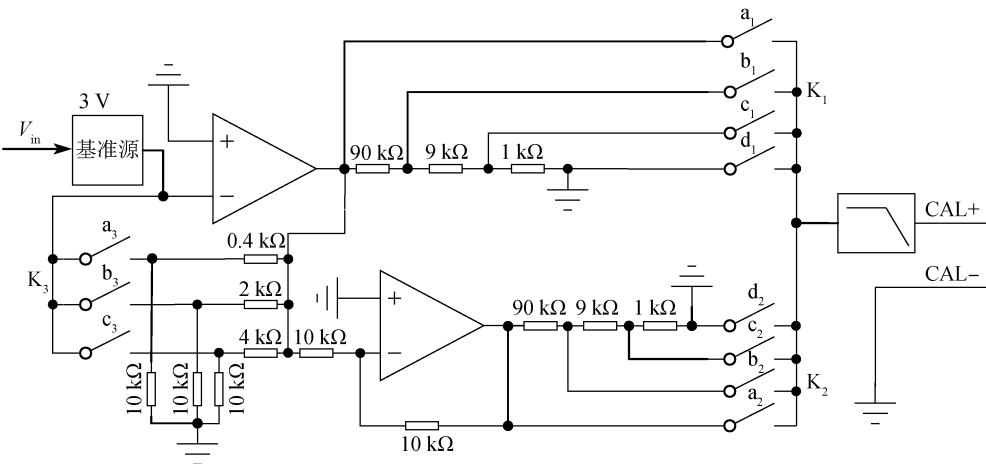


图2 应变测量仪自校准电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of self-calibration circuit for strain gauge

表1 自校准电路输出的校准信号
Tab.1 Calibration signal output by self calibration circuit

多路复用器 K_3 导通通道	多路复用器 K_2 导 通通道	校准信号 / V
a_3	a_2	0.120 0
	b_2	0.012 0
	c_2	0.001 2
b_3	a_2	0.600 0
	b_2	0.060 0
	c_2	0.006 0
c_3	a_2	1.2000
	b_2	0.120 0
	c_2	0.012 0

采用全桥电路测量应变信号，满量程应变为 $\pm 30\,000\,\mu\varepsilon$ ，桥路激励电压一般为5 V，则桥路的满量程输出电压值为

$$V = GF\varepsilon V_{exc} \tag{4}$$

测量满量程应变信号 $\pm 30\,000\,\mu\varepsilon$ 时，桥路的最大输出信号为 $\pm 0.3\,\text{V}$ ；测量 $\pm 1\,\mu\varepsilon$ 时，桥路的满量程输出信号为 $\pm 10\,\mu\text{V}$ 。因此，校准信号的范围应尽量在 $\pm 10\,\mu\text{V} \sim \pm 0.3\,\text{V}$ 。通过控制多路复用器选择不同的通道，对基准信号进行不同倍数的放大。多路复用器 K_3, K_2 配置的校准信号如表1所示， K_3, K_1 配置的校准信号与之大小相等，符号相反。

2.2 自校准电路的误差

2.2.1 噪声误差

基准电路是应变测量仪自校准设计的核心部分，其精度影响着自校准信号的精度。基准源选用德州仪器低漂移、低噪声的精密电压基准REF7030。

以校准自校准电路示意图中CAL+为等效噪声输出端，对校准信号的等效输出噪声做仿真，仿真结果如图3所示。

由图3可以看出，噪声为 $0.65\,\mu\text{V}$ ，电路的误差是由噪声引起的，相对误差为

$$Err = \frac{V_{calm} - V_{cals}}{V_{calf}} \times 100\% \tag{5}$$

式中： V_{calm} 为测量的校准信号值，V； V_{cals} 为标准的校准信号值，V； V_{calf} 为满量程的校准信号值，V。计算噪声误差时，测量值减去误差值就是噪声值

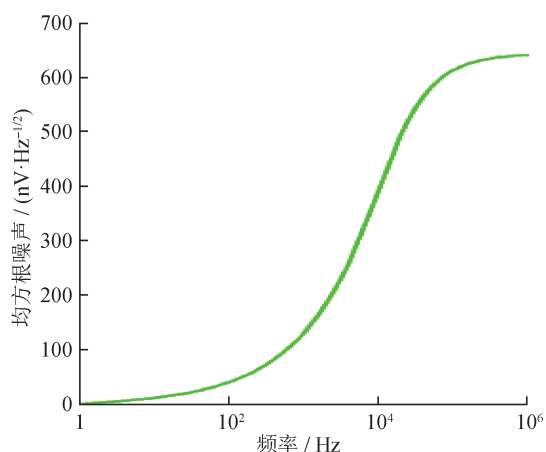


图3 自校准电路输出的等效噪声

Fig.3 Equivalent noise output from self-calibration circuit

0.65 μV , 校准信号在 $-1.2 \sim +1.2 \text{ mV}$ 之间变化, 满量程的校准信号值 V_{cal} 为2.4 mV, 计算可得自校准电路的噪声误差为0.03%。

2.2.2 温度漂移

为衡量温度变化对自校准电路输出校准信号精度的影响, 对自校准电路做温度漂移仿真。基准源输出3 V电压, 放大电路增益为 -0.04 , 输出 -120 mV , 在经过反相器和 b_2 选择 $1/100$ 分压后输出的校准信号理论标准值为 1.2 mV 。分别在 -5 , 23 , $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 对输出的校准信号进行仿真, 如图4所示。

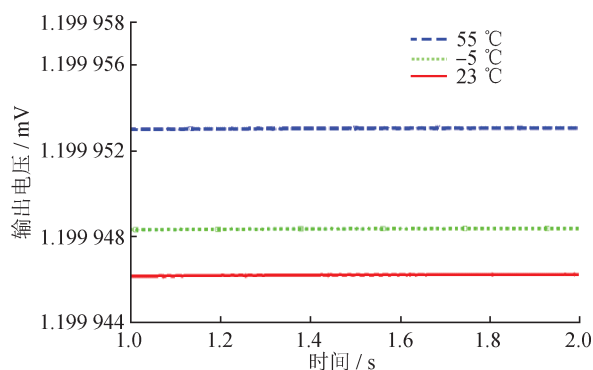


图4 自校准电路的温度漂移仿真

Fig. 4 Temperature drift simulation of self-calibration circuit

环境温度会影响芯片的工作性能, 校准电路因为温度变化而产生一定的温度漂移, 高温产生的温度漂移会大于低温造成的漂移。在计算和试验时只需要考虑自校准电路 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时相对于 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度漂移, 不用计算自校准电路 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时相对于 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度漂移。校准电路的温度漂移为

$$D_{\text{rift}} = \frac{|V_{\text{cal}, 55^\circ\text{C}} - V_{\text{cal}, 23^\circ\text{C}}|}{\Delta T V_{\text{cal}, \text{std}}} \quad (6)$$

式中: $V_{\text{cal}, 55^\circ\text{C}}$, $V_{\text{cal}, 23^\circ\text{C}}$ 分别为 55 , $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时输出的校准信号, V; ΔT 为温度的相对变化量, $^\circ\text{C}$; $V_{\text{cal}, \text{std}}$ 为标准输出的校准信号, V。

由图4可以看出, $V_{\text{cal}, 55^\circ\text{C}} = 1.199\ 985 \text{ mV}$, $V_{\text{cal}, 23^\circ\text{C}} = 1.199\ 978 \text{ mV}$, 温度变化量 ΔT 为 $32 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{cal}, \text{std}} = 1.2 \text{ mV}$, 计算得温度漂移为 1.8×10^{-5} 。

3 试验验证

为了验证自校准电路对应变测量误差的校准效果, 试验时采用行业领先的EX1629应变仪, 将其放置在恒温箱中。自校准电路的温度漂移主要在高温环境下, 不需要验证 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度漂移。设置环境温度偏移到 $55 \text{ }^\circ\text{C}$, 选取CH1~CH6共6个通道, 采集标准模拟应变量校准器的应变信号, 标准应变分别为: $3\ 000$, $12\ 000$, $24\ 000$, $30\ 000$, $-3\ 000$, $-12\ 000$, $-24\ 000$, $-30\ 000 \mu\epsilon$ 。

试验时, 先不进行自校准, 直接测量应变并记录数据。作为对照, 执行自校准后再次测量对应通道的应变, 记录数据。比较校准前和校准后的应变测量数据, 分析自校准电路对应变测量精度的改善。

当环境温度稳定在 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 先不进行自校准, 依次通过EX1629通道CH1~CH6测量应变, 结果如表2所示。

在完成校准前的应变数据采集后, 执行自校准, 校准完成后, 仍然通过EX1629通道CH1~CH6测量应变, 结果如表3所示。

在计算测量结果的温度漂移时, 需要室温 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的应变测量结果, 所以将恒温箱的温度设置为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。不进行自校准, 同样利用EX1629通道CH1~CH6测量应变, 结果如表4所示。

在完成 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 校准前的应变数据采集后, 执行自校准, 校准完成后, 再通过EX1629通道CH1~CH6测量应变, 结果如表5所示。

测量完成后, 依据测量结果计算各通道的温度漂移为

$$D_{i, \text{rift}} = \frac{\epsilon_{i, 55^\circ\text{C}} - \epsilon_{i, 23^\circ\text{C}}}{\epsilon_{i, 23^\circ\text{C}} \Delta T} \times 10^6 \quad (7)$$

式中: $\epsilon_{i, 55^\circ\text{C}}$ 分别为 55 , $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时各通道测得的应变

表2 EX1629校准前应变测量结果(55℃)

Tab.2 Strain measurement results before calibration of EX1629(55℃)

 $\mu\varepsilon$

标准应变	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
12 000	120 49	120 36	12 047	12 040	12 044	12 043
24 000	240 96	240 70	24 086	24 080	24 086	24 084
30 000	301 26	300 93	30 114	30 105	30 113	30 110
-12 000	-12 049	-12 036	-12 045	-12 041	-12 044	-12 042
-24 000	-24 097	-24 071	-24 089	-24 080	-24 087	-24 083
-30 000	-30 127	-30 095	-30 116	-30 106	-30 114	-30 109

表3 EX1629校准后应变测量结果(55℃)

Tab.3 Strain measurement results after calibration of EX1629(55℃)

 $\mu\varepsilon$

标准应变	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
12 000	12 004	11 999	11 999	12 000	12 001	11 998
24 000	24 006	23 996	23 997	23 998	24 000	23 995
30 000	30 013	30 000	30 001	30 003	30 005	29 999
-12 000	-12 005	-11 999	-12 000	-12 000	-12 001	-11 999
-24 000	-24 007	-23 997	-23 998	-23 999	-24 000	-23 996
-30 000	-30 015	-30 002	-30 003	-30 004	-30 006	-30 001

表4 EX1629校准前应变测量结果(23℃)

Tab.4 Strain measurement results before calibration of EX1629(23℃)

 $\mu\varepsilon$

标准应变	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
12 000	11 984	11 982	11 978	11 982	11 981	11 978
24 000	23 967	23 963	23 953	23 962	23 961	23 955
30 000	29 963	29 959	29 947	29 957	29 956	29 949
-12 000	-11 983	-11 982	-11 977	-11 982	-11 982	-11 979
-24 000	-23 967	-23 964	-23 953	-23 962	-23 962	-23 957
-30 000	-29 964	-29 961	-29 947	-29 958	-29 958	-29 951

表5 EX1629校准后应变测量结果(23℃)

Tab.5 Strain measurement results after calibration of EX1629(23℃)

 $\mu\varepsilon$

标准应变	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
12 000	12 003	11 998	11 998	11 998	12 001	11 998
24 000	24 004	23 994	23 994	23 995	23 999	23 995
30 000	30 010	29 998	29 998	29 999	30 003	29 999
-12 000	-12 003	-11 998	-11 998	-11 998	-12 001	-11 998
-24 000	-24 005	-23 996	-23 995	-23 995	-24 000	-23 996
-30 000	-30 011	-30 000	-29 999	-30 000	-30 006	-30 001

值, $\mu\epsilon$, 下标 i 为通道号; ΔT 为环境的温度变化量, $^{\circ}\text{C}$ 。

在测量应变时, 测量大应变的误差比测量小应变的误差大, 实验时测量的最大应变为 30 000 $\mu\epsilon$, 依据式 (7) 可以计算出 EX1629 应变仪通道 CH1 ~ CH6 在测量 30 000 $\mu\epsilon$ 时各个通道的温度漂移如表 6 所示。

表 6 EX1629 校准前、后应变测量温度漂移
Tab.6 Temperature drift of strain measurement
before and after calibration of EX1629

通道	校准前	校准后
CH1	181×10^{-6}	3×10^{-6}
CH2	149×10^{-6}	2×10^{-6}
CH3	186×10^{-6}	3×10^{-6}
CH4	165×10^{-6}	4×10^{-6}
CH5	175×10^{-6}	2×10^{-6}
CH6	179×10^{-6}	0

噪声是衡量应变测量仪百分比误差的重要指标, 各通道的噪声误差为

$$Err_i = \frac{\epsilon_{i,23^{\circ}\text{C}} - \epsilon_{\text{ref}}}{\epsilon_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: Err_i 为噪声误差; E_{ref} 为标准应变值, $\mu\epsilon$, 下标 i 为通道号。

依据式 (8) 可以计算出校准前、校准后 EX1629 应变仪通道 CH1~CH6 噪声误差如表 7 所示。

通过试验验证, EX1629 应变仪通道 CH1~CH6

表 7 EX1629 校准前、后应变测量噪声误差
Tab.7 Noise error in strain measurement before and
after calibration of EX1629 %

通道	校准前	校准后
CH1	0.12	0.03
CH2	0.14	0.01
CH3	0.18	0.01
CH4	0.14	0.00
CH5	0.15	0.01
CH6	0.17	0.00

的温度漂移结果如表 6 所示, 校准前最大温度漂移为 186×10^{-6} , 校准后最大温度漂移为 4×10^{-6} 。通道 CH1~CH6 的噪声误差如表 7 所示, 校准前最大噪声误差为 0.18 %, 校准后最大噪声误差为 0.03 %。

4 结论

设计了低漂移、低噪声的应变测量仪自校准电路, 通过程控方式选择校准通道和校准信号, 提高了校准效率。计算分析了自校准电路的精度, 试验验证了设计的自校准电路能有效校正应变测量仪误差: 试验时采用 EX1629 应变仪, 指标规定的最大温度漂移为 $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 噪声误差为 0.05%; 不进行校准时, 测量应变的最大温度漂移为 $186 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、最大噪声误差为 0.18%, 温漂与噪声较大; 校准后测量应变的最大温度漂移为 $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 最大噪声误差为 0.03%。故设计的自校准电路能有效地对 EX1629 应变仪的温度漂移与噪声误差进行校正, 有效提高应变测量精度, 测量结果的误差处于指标允许范围内。

参考文献

- [1] STEPANOVA L N, KABANOV S I, BEKHER S A, et al. Microprocessor multi-channel strain-gauge systems for dynamic tests of structures [J]. Automation & Remote Control, 2013, 74(5): 891-897.
- [2] 丁颖, 杜玲玲, 李浩田. 多通道应变测试系统校准面临的新问题[J]. 计测技术, 2017, 37 (S1): 190-192. DING Y, DU L L, Li H T. New problems in calibration of multi channel strain testing system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(S1): 190-192. (in Chinese)
- [3] 黄晓龙. 大规模应变测量仪的现场计量[J]. 计测技术, 2015, 35 (S1): 70-72. HUANG X L. Field measurement of large-scale strain acquisition system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35 (S1): 70-72. (in Chinese)
- [4] 张贵清, 张天序, 颜露新, 等. 数据采集的硬件自校准方法与 FPGA 实现[J]. 数据采集与处理, 2006, 21: 236-241. ZHANG G Q, ZHANG T X, YAN L X, et al. Hardware self calibration method and FPGA implementation of data

- acquisition[J]. Data Acquisition and Processing, 2006, 21: 236-241. (in Chinese)
- [5] 黄翀. 数字动态应变仪的研究与设计[D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
- HUANG C. Research and design of digital dynamic strain gauge[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [6] 朱伦伦. 测量仪器校准间隔优化及校准结论风险评估研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2016.
- ZHU L L. Research on optimization of calibration interval and risk assessment of calibration conclusion of measuring instruments[D]. Hunan: National University of Defense Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] 叶川, 陈强, 刘晓勇. 基于多种仪器总线多通道示波器校准系统[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 77-80.
- YE C, CHEN Q, LIU X Y. Multi channel oscilloscope calibration system based on multiple instrument buses[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 30(7): 77-80. (in Chinese)
- [8] 董立纲. 高精度多通道应变测量系统研究[D]. 山西: 中北大学, 2021.
- DONG L G. Research on high-precision multi-channel strain measurement system[D]. Shanxi: Central North University, 2021. (in Chinese)
- [9] 乔社娟, 邓利红, 王成, 等. 应变测试系统分流校准方法设计[J]. 测控技术, 2016, 35(7): 17-20.
- QIAO S J, DENG L H, WANG C, et al. Design of shunt calibration method for strain testing system[J]. Measurement and Control Technology, 2016, 35(7): 17-20. (in Chinese)
- [10] 胡轶群, 徐俊臣, 杜玉杰, 等. 数据采集系统中自动校准技术的研究[J]. 海洋技术, 2013, 31(1): 21-23.
- HU Y Q, XU J C, DU Y J, et al. Research on automatic calibration technology in data acquisition system[J]. Ocean Technology, 2013, 31(1): 21-23. (in Chinese)
- [11] 胡潇寅, 张皓羽, 李业, 等. 多通道应变采集系统自动校准装置的研制[J]. 计量装置及应用, 2022, 32(3): 21-23.
- HU X Y, ZHANG H Y, LI Y, et al. Development of automatic calibration device for multi-channel strain acquisition system[J]. Measuring Device and Application, 2022, 32(3): 21-23. (in Chinese)
- [12] 严洪燕. 应变测量仪自动校准系统设计[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 64-68.
- YAN H Y. Design of automatic calibration system for strain gauge[J]. Aerospace Measurement Technology, 2015, 35(4): 64-68. (in Chinese)
- [13] 李红. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- LI H. Numerical analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [14] 何运飞. 浅谈用最小二乘法对电子天平示值误差校准曲线的拟合[J]. 计量与测试技术, 2015, 42(12): 64-65.
- HE Y F. A brief discussion on fitting the calibration curve of the indication error of electronic balance with the least square method[J]. Measurement & Testing Technology, 2015, 42(12): 64-65. (in Chinese)
- [15] VTI Instrument. EX1629 48 channel strain gage instrument user's manual[EB/OL]. [2017-07-03]. <https://www.vti-instruments.com/products/data-acquisition/ex1629>.

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 刘耀(1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为模拟信号采集。



作者简介: 王文健(1972—), 男, 研究员, 主要从事测控技术、信号采集方面的研究。