

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614959

长线缆应变测试的调平和自校准研究

丁永红, 尤文斌

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原 030051)

摘 要:针对长线缆导致两线式 1/4 应变电桥难以精准调平与校准的难题,分析长线缆电阻对惠斯通电桥灵敏度的影响,发现长线缆电阻与应变片电阻处于同一量级产生的分压效应会引发共模失调并导致灵敏度不确定,传统 T 型调平结构无法同时解决这两个问题,提出一种新型 1/4 桥调平电路结构。通过在相邻桥臂引入可调电阻,拓宽桥路阻值补偿范围,从硬件结构层面解决灵敏度不确定问题。在此基础上,设计自校准应变测试系统,通过程控模拟开关切换校准通道与测量通道,利用校准桥臂电压实现灵敏度自动校准,有效抑制了线缆阻值偏差与器件离散性对灵敏度影响。建立改进调平电路数学模型,以校准相对误差最小为优化准则,结合校准电阻与误差的非线性关系,求解最优校准电阻值。进一步分析了系统灵敏度误差的来源和误差值,并通过元器件老炼与筛选等方法降低相对误差。在实验室环境下,分别模拟线缆长度和工作温度,对测试装置进行了测试。结果分析表明,所提电路长线缆电阻调平补偿范围可达 0~120 Ω ,系统信噪比(SNR)优于 70 dB,自校准后灵敏度误差控制在 1% 以内。圆柱跌落动态实测中,应变信号 SNR 达 70.16 dB,充分验证了该自校准电路的有效性与动态测量稳定性。该方案可为低成本长线缆应变测试电路的设计与工程应用提供参考。

关键词: 应变测量; 1/4 桥调平; 自校准; 长线缆

中图分类号: TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research on balancing and self-calibration for long-cable strain testing

Ding Yonghong, You Wenbin

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the difficulty in accurate balancing and calibrating the 2-wire 1/4-bridge strain gauges with long cables, the influence of long cable resistance on the sensitivity of the Wheatstone bridge is analyzed. It is found that the voltage division effect, caused by the long cable resistance being in the same order of magnitude as the strain gauge resistance, induces common-mode offset and leads to uncertain sensitivity. The traditional T-type balancing circuits cannot simultaneously resolve these two issues, a novel 1/4 bridge balancing circuit structure is proposed. By introducing adjustable resistors into adjacent bridge arms, the resistance compensation range of the bridge is expanded, and the uncertain sensitivity problem is solved at the hardware level. On this basis, a self-calibrating strain measurement circuit is designed. Programmable analog switches are utilized to alternate between the calibration and measurement channels, and the voltage of the calibration arm is leveraged to achieve automatic sensitivity calibration. The effects of cable resistance deviations and component tolerances on sensitivity are effectively mitigated. Furthermore, a mathematical model of the improved balancing circuit is established. With the minimization of relative calibration error adopted as the optimization criterion, and the nonlinear relationship between the calibration resistance and the error incorporated, the optimal calibration resistance value is determined. The sources and magnitudes of the system's sensitivity errors are further analyzed, and the relative error is reduced through methods such as component burn-in and screening. Laboratory tests are conducted on the prototype by simulating various cable lengths and operating temperatures. It is demonstrated by the results that a balancing compensation range of 0~120 Ω for long cable resistance

is achieved by the proposed circuit, and a system signal-to-noise ratio (SNR) exceeding 70 dB is obtained. After self-calibration, the sensitivity error is maintained within 1%. In dynamic drop tests of cylinders, an SNR of 70.16 dB for the strain signal is reached, and the effectiveness and dynamic measurement stability of the proposed self-calibrating circuit are fully validated. A valuable reference for the design and engineering application of low-cost, long-cable strain measurement circuits is provided by this solution.

Keywords: strain measurement; 1/4-bridge balancing; self-calibration; long cable

0 引言

爆炸载荷作用下舰体主要结构的应变是评价弹药动静爆对舰船毁伤效果的重要指标^[1-2],然而,由于舰船毁伤试验后存在快速沉没的特殊性,需要低成本、自校准、便于快速部署的应变测量系统。惠斯通电桥因其结构简单、输出线性好、温度补偿便利等优势,成为应变测试中常用的电路^[3-6],应变片个体的差异性、粘接胶蠕变^[7]、温度波动^[8]等影响下,会导致测试电桥出现不可忽视的失衡^[9-10]。同时,测量长线缆引入的电阻(通常可达几十至上百欧姆)远远超出传统桥臂调平衡应用范围,导致测量桥路无法调节到平衡状态。测量桥路失衡导致测试数据不准确、测量范围减小问题,甚至无法工作,为了保证采集系统的准确性和可靠性,必须要对电桥电路进行快速调平操作^[11]。郑新春^[12]设计了基于单片机和数字电位计电桥平衡自调节电路,通过不断调节电位器的触点来使电路达到平衡状态,该电路结构简单、可靠性较高,但线性度并不理想。为了解决电位器调零的线性度不理想的问题,刘晓东等^[13]提出一种基于数字电位计粗调和数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)细调相结合的方式对电路进行平衡调节,实现了对电桥初始不平衡的快速、精准调节。侯川江等^[14-15]采用DAC调整桥臂电位的方法设计自动调零电路,当电桥输出不为零时,系统根据初始零点的极性和大小调整DAC的输出电压,使电桥达到平衡,该方法调平精度和速度略显不足。研究者对桥路调节平衡电路引入的误差和校准方法进行了分析^[11,14,16],以标准电阻替换测量桥臂电阻校准系统的灵敏度。上述测量桥臂调平衡和校准方法均是以应变电桥桥臂电阻值在几欧姆小范围变化为假设条件实现的,不能适应长线缆上百欧姆变化范围大的情况。

针对长线缆引起的应变测试桥路无法调平、系统无法完成灵敏度校准的问题。本文建立了惠斯通电桥调平的数学模型,分析了测量桥路灵敏度,研制了一种新的桥路平衡电路和自校准电路。通过实验验证了设计的长线缆1/4桥路测试装置灵敏度自动校准功能,同时具有调平范围宽、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)高的特点。

1 调平原理

1.1 惠斯通电桥调平原理

惠斯通电桥^[17-18]是将应变片电阻的变化转化为电压变化信号的电路,由电阻应变片和电阻共同组成桥臂,单臂电桥(1/4桥)的测量电路原理如图1所示。

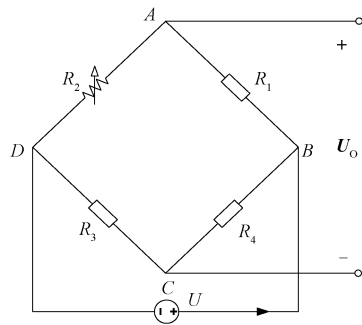


图1 单臂惠斯通电桥原理

Fig. 1 Schematic diagram of a single-arm Wheatstone bridge

图1中 R_1 、 R_3 、 R_4 为固定电阻, R_2 为应变片, U 为恒压电源供电电压, U_0 为输出电压。由电路理论可知,电桥输出为:

$$U_0 = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1)$$

当 $R_1 = R_3 = R_4 = R$,应变片 R_2 的初始阻值为 R ,在应变作用下电阻变化量为 ΔR ($\Delta R \ll R$)时,将其代入式(1)得到电桥平衡状态的输出电压为:

$$U_0 = \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} U \quad (2)$$

金属丝电阻应变效应公式为^[19]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (3)$$

式中: K 为应变片的灵敏度系数,约为2。

根据式(2)和(3)可知产生应变 ε 时,电桥输出的电压值近似为:

$$U_0 \approx K \varepsilon U / 4 \quad (4)$$

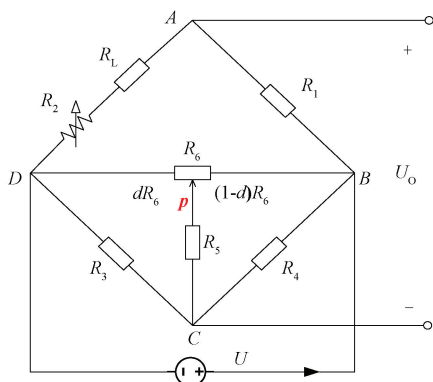
在未发生应变时, $R_2 R_4 = R_1 R_3$ 电桥达到平衡状态,即输出电压 U_0 为0。测试中采用长导线连接应变片时,长导线上引入的电阻成为不可忽略因素,同时还受到桥臂固定电阻、应变片的阻值差异、应变片粘贴工艺、环境因

素等影响,初始状态下惠斯通电桥严重失衡,输出电压出现饱和状态,就需要通过改变桥臂电阻实现桥路平衡。

引入长线缆的两线式1/4电桥和调平衡惠斯通电桥如图2(a)所示。通过调整桥臂电阻,实现节点A和节点C的电压相等,节点A的电压由电阻 R_1 与应变片电阻 R_2 +线缆电阻 R_L 分压得到,节点C的电压由电阻 R_4 、电阻 R_3 、数字电位计 R_6 和 R_5 组成的调平电阻网络分压得到。图2(a)经过T型等效变换后得到三角型电路图^[16],如图2(b)所示。图2(a)中电位器触点 p 将两端电阻分为 dR_6 和 $(1-d)R_6$, d 为数字电位器的调整百分比数值, d 的取值为 $[0.01, 0.99]$,步进0.01,等效电阻为:

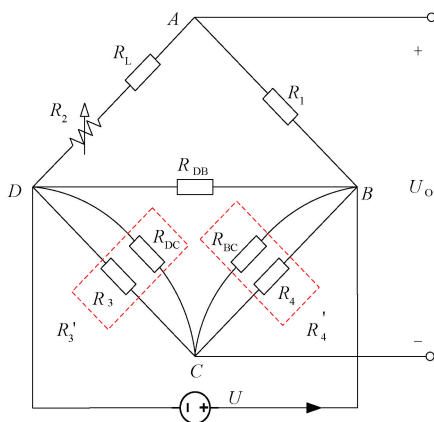
$$R_{DC} = \frac{R_5}{1-d} + dR_6 \quad (5)$$

$$R_{BC} = \frac{R_5}{d} + (1-d)R_6 \quad (6)$$



(a) 长线1/4惠斯通电桥调平衡电路原理

(a) Schematic diagram of 1/4 Wheatstone bridge balancing circuit for a long cable



(b) 惠斯通电桥调平电路变换

(b) Transformation diagram of Wheatstone bridge balancing circuit

图2 单臂电桥调平原理

Fig. 2 Schematic diagram of the single-arm Wheatstone bridge balancing

正比,调整数字电位器触点 p 的位置使得 R_{DC} 与 R_{BC} 为非线性变化,电平范围由电阻 R_5 和 R_6 决定。

桥臂电阻 R_3 与 R_{DC} 并联,桥臂电阻 R_4 与 R_{BC} 并联,得到等效桥臂电阻为:

$$\begin{cases} R'_3 = \frac{R_3 R_{DC}}{R_3 + R_{DC}} \\ R'_4 = \frac{R_4 R_{BC}}{R_4 + R_{BC}} \end{cases} \quad (7)$$

调平的实质是改变桥臂电阻 R'_4 与 R'_3 比值,改变桥臂分压使点A和点C的电压相等。桥臂输出电压为:

$$U_o = \frac{(R_2 + R_L)R'_4 - R_1 R'_3}{(R_1 + R_2 + R_L)(R'_3 + R'_4)} U \quad (8)$$

桥路平衡的条件为 $(R_2 + R_L)R'_4 = R_1 R'_3$ 。应变片的电阻与桥路电阻初始值均为 R ,长线缆电阻 $R_L = rL$,其中 r 为导线每米电阻, L 为导线长度。桥路平衡时,将式(3)代入式(8),得到应变片变化 ΔR 对应桥臂输出为:

$$U_o = \frac{\Delta R/R}{(2 + R_L/R)(1 + P)} U = \frac{K\varepsilon}{(2 + R_L/R)(1 + P)} U \quad (9)$$

式中: $P = R'_3/R'_4$ 。

则电桥电路的灵敏度为:

$$S_{b0} = \frac{U_o}{\varepsilon} \approx \frac{KU}{(2 + R_L/R)(1 + P)} \quad (10)$$

由式(10)可知,调平后的测量桥路灵敏度同时受到线缆电阻和调平桥路比值 P 的影响。由于长导线的电阻与应变片的电阻值在一个量级,线缆电阻和 P 都不可忽略,灵敏度难以确定。同时,长线缆电阻导致分压后的共模量远远偏离供电的中间电位,影响仪表放大的放大范围。需要对现有调平电路进行改进,以适应两线式长线缆模式。

1.2 改进调平电路原理

改进的调平电路如图3所示,在桥臂AB上串联滑动电阻器 R_p ,通过增加 R_p 降低点A电压,实现点A与点C电压相等。得到等效桥臂输出电压表达式为:

$$U_o = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3 + R_L R_4 - R_p R_3}{(R_1 + R_2 + R_L + R_p)(R_3 + R_4)} U \quad (11)$$

长线缆状态下桥路平衡相对式(1)增加了 $R_L R_4 = R_p R_3$ 。应变片的电阻与桥路电阻初始值均为 R ,桥路平衡时,将式(3)代入式(11)中,则:

$$U_o = \frac{U \Delta R/R}{2(2 + 2R_L/R + \Delta R/R)} = \frac{UK\varepsilon}{2(2 + 2R_L/R + K\varepsilon)} \quad (12)$$

电桥电路灵敏度为:

$$S_b \approx \frac{KU}{4 + 4R_L/R} = \frac{KU}{4 + 4(R'_2 - R)/R} \quad (13)$$

其中, K 、 U 、 R 通过标定可以确定数值,由式(13)可知,改进后的电桥电路灵敏度仅取决于长线缆电阻这一

由式(5)和(6)可知, R_{DC} 和 R_{BC} 的值与 R_5 和 R_6 成

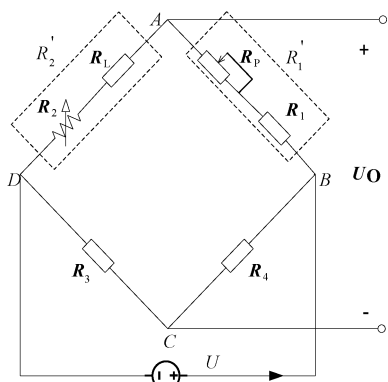


图 3 单臂电桥等效原理

Fig. 3 Equivalent schematic diagram of single-arm bridge

未知因素,通过测量线缆电阻即可确定测量电桥电路的灵敏度。

1.3 调平电阻变化仿真

改进前电路调平范围一般对应 1/4 量程电阻变化值,当 $120\ \Omega$ 应变片测量 $\pm 20\ 000\ \mu\varepsilon$ 时, $\Delta R = \pm 4.8\ \Omega$,调平范围为 $\pm 1.2\ \Omega$,而本电路调平范围为长线缆电阻与应变片变化的和。假设应变片连接电缆为排线,其电阻率为 $0.24\ \Omega/\text{m}$,长度 $500\ \text{m}$ 的等效电阻为 $120\ \Omega$ 。调平范围设定为 $0\sim 120\ \Omega$,线缆电阻变化对应测量电桥的灵敏度关系如图 4 所示。

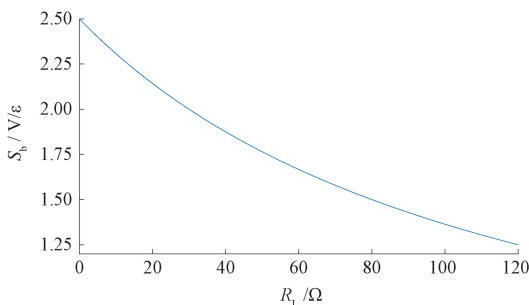


图 4 线缆电阻与桥路灵敏度关系

Fig. 4 Cable resistance vs. bridge sensitivity

由图 4 可知,接入不同长度的电缆对灵敏度影响较大,保证测量结果的精度需要准确测量线缆电阻。

2 系统硬件设计

2.1 桥臂电阻测量电路设计

惠斯通电桥在接入测量桥臂后形成电阻网络,无法直接测量线缆的电阻值。为此设计了一种能方便测量长线缆与应变片组成的桥臂电阻校准电路,原理如图 5 所示。图 5 中 K_1 为模拟开关(其内阻为 R_K), R_K 为补偿

模拟开关内阻的精密金属电阻, R_P 为可调精密金属电阻器, R_S 为标准的精密金属电阻。

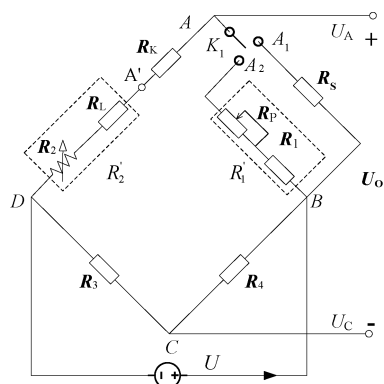


图 5 电桥自平衡调节系统框图

Fig. 5 Block diagram of the bridge self-balancing regulation system

桥路采集应变时,通过程序控制开关 K_1 端点 A 与 A_2 导通,调节精密金属电阻器 R_P 实现桥路平衡;在应变测量前通过程序控制开关 K_1 端点 A 与 A_1 导通,采集点 A 的单端电压信号 U_A ,通过式(14)求取 R'_2 ,如式(15)所示。

$$U_A = \frac{R'_2 + R_K}{(R'_2 + R_K) + R_S + R_K} U \quad (14)$$

$$R'_2 = \frac{2U_A R_K + U_A R - U R_K}{U - U_A} \quad (15)$$

其中,模拟开关内阻 R_K 、标准电阻 R_S 和桥路电压 U 通过标定均可视为已知量,仅需测量电压信号 U_A 便能求得长线缆与应变片组成的桥臂电阻 R'_2 。测量过程中噪声干扰量值和 ADC 量化误差一定的情况下, U_A 的输出范围越大,校准测量相对误差越小。设定桥臂供电电压 $U=5\ \text{V}$, $R_K=2.5\ \Omega$, R_S 的取值范围 $0\sim 300\ \Omega$ 和 R'_2 的取值范围 $120\sim 240\ \Omega$,得到 R_K 、 R_S 与输出电压 U_A 的关系如图 6 所示, U_A 的输出与桥臂电阻的关系为非线性。在桥路其他参数不变的情况下,求取 U_A 在 R'_2 取极值 120 、 $240\ \Omega$ 时输出电压差 U_{Ad} ,绘制其 R_S 与 U_{Ad} 的曲线如图 7 所示。由图 7 可知 R_S 取 $170\ \Omega$ 时 U_A 输出范围达到最大。

2.2 自校准调理电路设计

差分应变信号和桥臂电阻采集信号均为微弱模拟信号,长线缆传输容易引入高频噪声,因此需要放大与低通滤波电路完成信号处理。如图 8 所示,本文自校准调理电路分为应变信号调理和桥臂电阻校准测量信号调理两部分,其中应变信号调理电路由差分放大电路和二阶压控低通滤波器组成,信号调理电路放大倍数为 A_S ;桥臂电阻校准测量信号为直流信号,采用 $1\ \text{Hz}$ 的单端低通滤波器消除 $50\ \text{Hz}$ 工频和高频干扰,其放大倍数为 A_C 。

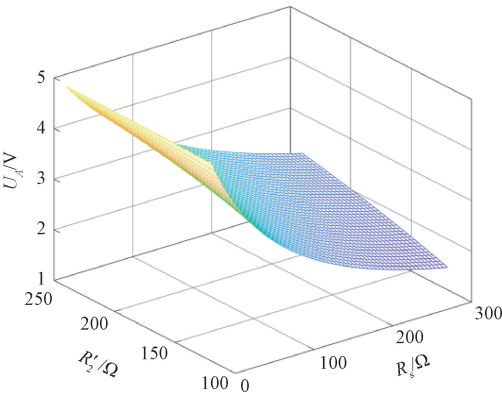


图6 桥臂电阻与输出电压关系

Fig. 6 Bridge arm resistance vs. output voltage

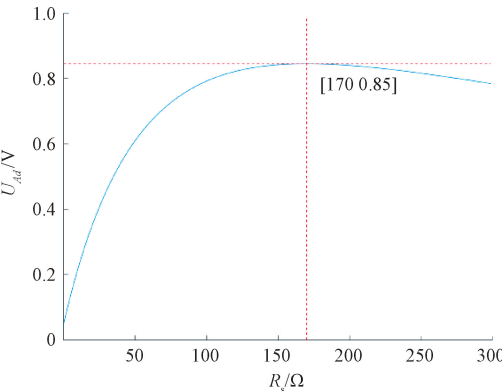


图7 R_s 与输出电压差的关系

Fig. 7 R_s vs. output voltage difference

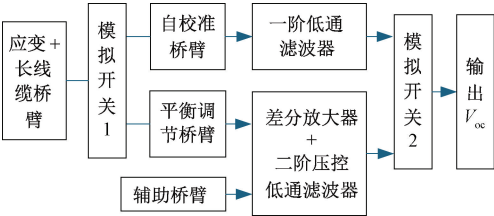


图8 自校准测量电路原理

Fig. 8 Schematic diagram of self-calibrating measurement circuit

在应变测量通道通过可调电阻完成惠斯通电桥的桥路平衡后,需要测量被测桥臂的电阻。应变测量通道和桥臂电阻测量通道通过程控方式进行选择。程控模拟开关采用 MAX4663,具有轨到轨,单电源供电,低至 2.5 Ω 的内阻,通道 1 和 4 处于常开状态,通道 2 和 3 处于常闭状态。为了减少模拟开关内阻,将通道 1 和 4、通道 2 和 3 进行并联,模拟开关 1 和 2 所有通道在同一控制信号 Con 作用下切换。Con = 0,模拟开关选通应变测量通道和差分放大与滤波电路,Con = 1,模拟开关选通桥臂电阻测量通道和单端滤波与放大电路。

2.3 系统误差分析

由式 (13)、(15) 和一阶低通滤波电路放大倍数 A_c 可得标定桥路灵敏度为:

$$S_b = \frac{KUR(UA_c - V_{oc})}{4(V_{oc}(2R_k + R_s) - UR_kA_c)} \tag{16}$$

则电路的系统灵敏度可表示为:

$$S = A_s S_b \tag{17}$$

因各个器件独立,所以各误差独立、不相关,系统灵敏度极限误差为:

$$|\Delta S|_{\max} = \sum_{i=1}^{11} \left| \frac{\partial S}{\partial x_i} \right| \cdot |\Delta x_i|_{\max} \tag{18}$$

式中: x_i 为 S 表达式中各个参数; Δx_i 为 x_i 的极限误差。

所有电阻的精度 $e_{tol} = \pm 0.1\%$, 温漂系数为 $\alpha = \pm 25$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 温度范围 $\Delta T = -20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$, 参考温度 25°C , 可得电阻温漂极限误差为:

$$e_{\text{drift}} = |\alpha| \cdot |\Delta T|_{\max} = 25 \times 10^{-6} \times 45 = 0.11\%$$

电阻的合成相对极限误差为:

$$\delta_{\max} = |e_{tol}| + e_{\text{drift}} = 0.1\% + 0.1125\% = 0.21\%$$

MAX4663 模拟开关 $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 对应导通电阻 $R_k = 2.5 \Omega \pm 4\%$ 。 A_s 的误差为 $\pm 0.35\%$, A_c 的误差为 $\pm 0.12\%$ 。电路灵敏度误差分析用到的数据如表 1 所示。

表1 电路灵敏度误差源

Table 1 Circuit sensitivity error sources

序号	参数	标称值	误差/%
1	K	2.00	± 0.10
2	U	5.00 V	± 0.10
3	R_k	2.50 Ω	± 4.00
4	R_s	170.00 Ω	± 0.21
5	R	120.00	± 0.21
6	A_s	48.22	± 0.35
7	A_c	1.40	± 0.12
8	V_{oc}	4.00 V	± 0.01

温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 时,系统灵敏度极限相对误差为 $\pm 1.58\%$ 。为了减少灵敏度误差,装配前元器件进行老化和精密测量,消除公差影响,电阻极限误差降为 0.11%,系统灵敏度极限相对误差减少到 $\pm 1.03\%$ 。

2.4 系统灵敏度自校准流程

对应变调理电路和桥臂电阻测量调理电路分别进行测量,求取灵敏度 S。置 Con = 0,模拟开关选通应变桥路测量通道,通过调节可调电阻完成应变测量桥臂平衡。置 Con = 1,模拟开关切换到桥臂电阻校准通道。考虑到

长线缆存在电感和电容效应,二阶低通滤波器和一阶低通滤波器调理电路含有电容,测得切换后稳定时间为 0.22 s,为保证电路达到稳定状态,延时 0.5 s 采集桥臂电压 V_{oc} ,利用式 (16) 求得应变测量桥路灵敏度 S_0 。结合应变信号调理电路放大倍数 A_s 得到应变测量电路系统灵敏度 S 。每次测量前自动完成灵敏度的校准,减少因电缆材质、电缆长度、环境温度等改变引起的灵敏度变化对测试精度的影响。

3 长线缆应变测试实验验证

3.1 测试装置性能验证

研制的长线缆应变测试装置如图 9 所示,该装置同时集成了 8 路长线缆应变测试通道。



图 9 长线缆应变信号测试装置实物

Fig.9 Long cable strain signal test device

室温 21℃ 时,采用上海正阳精密电阻箱 ZX92A 替代应变片和长线缆验证自动灵敏度校准性能。通过精密仪器测量选定相同阻值作为桥臂电阻,测量得到应变片的电阻值为 119.51 Ω ,模拟开关内阻 2.32 Ω ,阻值 170 Ω 、精度 0.1% 校准电阻阻值为 169.95 Ω 。代替长线的电阻箱设定为 10、30、50、70、90、110 Ω ,得到自动校准的灵敏度与理论值统计结果如表 2 所示。自动校准的灵敏度相对误差在 1% 以内,具有较高精度。

表 2 校准灵敏度统计

Table 2 Calibration sensitivity statistics

长线电阻 箱值/ Ω	理论灵敏度/ ($\mu\varepsilon \cdot mV^{-1}$)	校准灵敏度/ ($\mu\varepsilon \cdot mV^{-1}$)	相对误差/ %	SNR _{电路} / dB
10	8.986	8.936	-0.56	74.05
30	10.368	10.392	0.23	73.41
50	11.750	11.716	-0.29	72.81
70	13.133	13.183	0.38	72.25
90	14.515	14.493	-0.15	71.22
110	15.898	16.001	0.65	70.75

使用标示电阻率为 0.237 Ω/m 的 110 m 排线,电阻箱模拟应变片,将测试系统放入 DES-800L 恒温试验箱,在稳定 -20℃、21℃ 和 45℃ 条件下调平,电阻箱阻值按满量程设置为 124.8 Ω ,对应电压分别为 2.041、1.983、1.956 V,低温 -20℃ 相对 21℃ 误差达到 2.92%,高温 45℃ 相对 21℃ 误差达到 -1.36%,低温相对高温误差达到 4.35%。在不同温度条件下进行灵敏度自校准,修正后的电压分别为 1.991、1.984、1.982 V,低温相对高温误差为 0.45%,灵敏度自校准有效减少了温度对灵敏度的影响。

基于幅值的电路 SNR_{电路} 表达式为:

$$SNR_{电路} = 20lg\left(\frac{S_{幅度}}{N_{幅度}}\right)$$
 (19)

式中: $S_{幅度}$ 为信号幅值; $N_{幅度}$ 为噪声幅值。

通过电阻箱模拟应变片变化阻值,使 V_{oc} 幅度达到 4.0 V,测得 100 Hz 不同长线缆对应 SNR 如表 2 所示,测试电路的 SNR>70 dB。

3.2 测试装置实测数据分析

为验证设计的长线缆应变测试装置在实际冲击工况下的整体功能与稳定性,搭建了跌落冲击实验平台,开展了圆柱薄壳结构圆柱体的自由跌落试验。试验将结构体从 6 m 高处自由下落至刚性平面,通过粘贴应变片捕捉其在接触地面瞬间产生的变形。

实验传感器的布设如图 10 所示,在结构体表面布置 4 个应变测点和 1 个加速度测点,其中应变测点 1、2 为壳体同一位置的内外表面,测点 3 和 4 分别位于测量测点 1 和 2 的两侧,加速度传感器位于壳体轴向中心位置,线缆长度约为 110 m。采集的着地撞击信号时间历程曲线如图 11 和 12 所示。

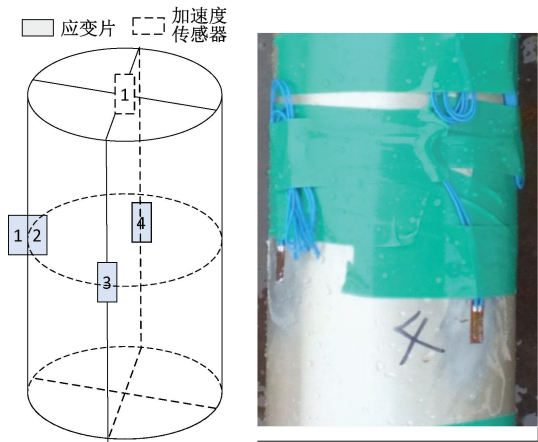


图 10 传感器布设

Fig.10 Sensor layout

由图 11、12 可知,装置能在长线缆情况下完成桥路

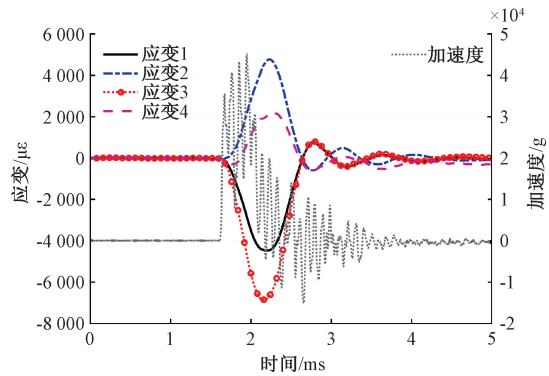


图 11 长线应变信号测试曲线 1

Fig. 11 Long cable strain signal test 1 curves

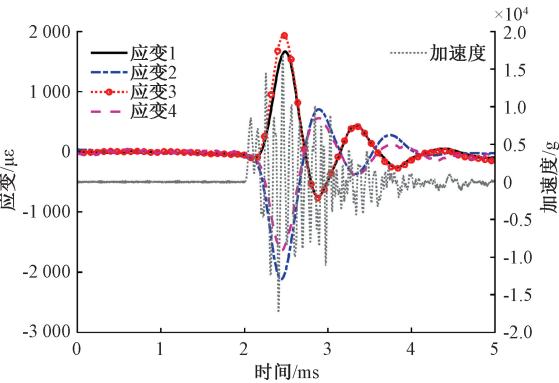


图 12 长线应变信号测试曲线 2

Fig. 12 Long cable strain signal test 2 curves

平衡调节,跌落冲击前基线为 0,准确完成系统灵敏度的自动校准。理论上测点 1 和测点 2 的信号幅值相近,符号相反,测点 3 和测点 4 符号相反,应变值的大小与冲击加速度的大小成正比,测试结果与理论符合。

为了评估测试装置性能,对采集信号进行噪声分析。分离噪声处理基于离散小波变换^[20](discrete wavelet transform, DWT)框架展开。小波基选择具有良好正则性的 db8 函数,分解尺度确定为 6 层。阈值的选取遵循极小极大方差原则,该原则通过最小化最坏情况下的均方误差,实现对含噪信号的有效分离。基于均方根误差的测试数据 SNR_{测试}表达式为:

$$SNR_{测试} = 20 \lg \left(\frac{S_{RMS}}{N_{RMS}} \right) \quad (20)$$

式中: S_{RMS} 为采集应变信号小波变换重构的信号均方根值; N_{RMS} 为采集应变信号小波变换分离出来的噪声均方根值。

对两次测试信号进行小波变换,求得 SNR 如表 3 所示。应变通道 SNR 在 70.16~81.12 dB,加速度通道 SNR 为 40.65 dB。应变通道具有>70.16 dB 的高 SNR。

表 3 测试信号的 SNR

Table 3 SNR of test signals (dB)

测点	实验 1	实验 2
Strain1	81.12	80.43
Strain2	78.82	77.65
Strain3	76.51	75.52
Strain4	70.16	70.63
Acceleration	43.24	40.65

4 结 论

针对 1/4 应变电桥长线电缆导致桥路无法调整平衡和系统灵敏度校准问题,设计了一种调平与灵敏度校准电路。通过分析惠斯通电桥测量原理、桥路平衡原理和系统灵敏度的基础上,改进了桥路平衡调节的方式,提出了一种新的桥路自动校准电路及方法,为提升测量精度选择了最优桥路校准标准电阻的阻值。为验证设计的长线应变测试装置的性能,设计了壳体跌落冲击实验,实验结果表明装置能够便捷的完成不同长度电缆情况下的桥路调节平衡,采集应变信号具有高 SNR,为低成本 1/4 桥长线应变测试提供了一种新方法。

参考文献

[1] 武海军,成乐乐,陈文戈,等. 典型舰船结构的水下爆炸耦合毁伤研究进展[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(5): 439-459.

Wu Haijun, Cheng Lele, Chen Wenge, et al. Review on coupling damage effects of underwater explosion on typical ship structures[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(5): 439-459.

[2] 刘文思,陆越,周庆飞,等. 鱼雷近场爆炸复杂载荷及对舰船毁伤模式[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 842-850.

Liu Wensi, Lu Yue, Zhou Qingfei, et al. Complex load of torpedo near-field explosion and its damage mode to ships[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 842-850.

[3] Iriarte X, Bacaicoa J, Aginaga J, et al. D-optimal strain sensor placement for mechanical load estimation in the presence of nuisance loads and thermal strain[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 382: 116110.

[4] Hrabovsky L, Cepica D, Karel F. Detection of mechanical stress in the steel structure of a bridge crane[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2021,

- 11(6): 320-329.
- [5] Anand L V, Hepsiba D, Palaniappan S, et al. Automatic strain sensing measurement on steel beam using strain gauge [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(2): 2578-2580.
- [6] 黄子军, 卞雷祥. 压电执行器与应变计复合的电压传感器[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(2): 244-250.
- Huang Zijun, Bian Leixiang. Piezoelectric actuator and strain gauge composited voltage sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(2): 244-250.
- [7] 艾延廷, 刘明, 张凤玲, 等. 提升高温应变计寿命及精度的结构优化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(6): 151-161.
- Ai Yanting, Liu Ming, Zhang Fengling, et al. Research on the structural optimization method to improve the service life and accuracy of high temperature strain gauge[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(6): 151-161.
- [8] 王程远. 电阻式传感器转换电路研究与分析[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(8): 161-167.
- Wang Chengyuan. Research and analysis of resistive sensor conversion circuit [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(8): 161-167.
- [9] 张雯丽, 张万亮, 李雨杭, 等. 高压氢环境专用薄膜应变片的设计制备及性能测试[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(10): 1285-1290.
- Zhang Wenli, Zhang Wanliang, Li Yuhang, et al. Design, fabrication and performance evaluation of thin film strain gauge for high pressure hydrogen environment[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(10): 1285-1290.
- [10] 郭志君, 卢文科, 左锋, 等. 基于NSGA-II & BP的应变片式压力传感器温度补偿研究[J]. *中国测试*, 2020, 46(6): 72-77.
- Guo Zhijun, Lu Wenke, Zuo Feng, et al. Temperature compensation of strain gauge pressure sensor based on NSGA-II & BP [J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(6): 72-77.
- [11] 王浩, 王红亮, 王铮, 等. 电压自校准的高精度多通道应变信号采集模块[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(4): 24-28, 89.
- Wang Hao, Wang Hongliang, Wang Zheng, et al. High-precision multi-channel strain signal acquisition module with voltage self-calibration [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(4): 24-28, 89.
- [12] 郑新春. 嵌入式程控应变计的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 5.
- Zheng Xinchun. Development of embedded programmable strain gauges [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004: 5.
- [13] 刘晓东, 曹逢源, 李俊杰, 等. 基于PID算法的电桥平衡自调节测试系统设计[J]. *机电一体化*, 2018, 24(6): 36-40.
- Liu Xiaodong, Cao Fengyuan, Li Junjie, et al. Design of bridge self-regulation test system based on PID algorithm [J]. *Mechatronics*, 2018, 24(6): 36-40.
- [14] 侯川江. 高精度电阻应变数据采集系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 20-21.
- Hou Chuanjiang. A design of high precision resistance strain data acquisition [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 20-21.
- [15] Zhang Y F, Ni F L, Liu H. Design and optimization of wheatstone bridge adjustment circuit for resistive sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13): 14314-14330.
- [16] 尤文斌, 祖静. 动态应变仪的误差分析与校准[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 794-795.
- You Wenbin, Zu Jing. The error analysis and adjusting of dynamic strain gauge [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2004, 25(4): 794-795.
- [17] Yao B, Dai Y, Xia G M, et al. High-sensitivity and wide-range resistance measurement based on self-balancing wheatstone bridge and gated recurrent neural network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 5326-5533.
- [18] 李泽函, 廖昕昕, 黄浩, 等. 一种新型液压导管应变测量装置设计与研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 180-188.
- Li Zehan, Liao Xinxin, Huang Hao, et al. Design and research of a new strain measuring device for hydraulic pipe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(1): 180-188.
- [19] 邵华, 洛桑郎加. 电阻应变式传感器测量性能分

析[J]. 山东交通科技, 2022 (1): 19-21.

Shao Hua, Lausan Langa. Analysis of resistance strain sensor[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2022 (1): 19-21.

[20] 孙世政, 秦鸿宇, 何盛港, 等. 基于信号特征分析和多小波变换的机械手滑动觉感知研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 299-307.

Sun Shizheng, Qin Hongyu, He Shenggang, et al. Research on sliding perception of manipulators based on signal feature analysis and multi wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 299-307.

作者简介



丁永红, 2002 年于太原理工大学获得学士学位, 2005 年和 2014 年于中北大学分别获得硕士学位和博士学位, 现为中北大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向信号与信息处理及动态测试。

E-mail: dingyonghong@nuc.edu.cn

Ding Yonghong received her B.Sc. degree from Taiyuan

University of Technology in 2002, and received her M. Sc. degree and Ph. D. degree from North University of China in 2005 and 2014, respectively. She is currently an associate professor and master advisor at North University of China. Her main research interests include signal and information processing and dynamic testing.



尤文斌(通信作者), 2003 年于华北工学院获得学士学位, 2006 年和 2014 年于中北大学分别获得硕士和博士学位, 现为中北大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为动态测试与智能控制。

E-mail: youwenbin@nuc.edu.cn

You Wenbin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Institute of Technology in 2003, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree from North University of China in 2006 and 2014, respectively. He is currently a professor and Ph. D. advisor at North University of China. His main research interests include the dynamic testing and intelligent control.