

# 电阻应变传感器动态特性校准方法的研究



徐爱华<sup>1</sup>, 代国红<sup>2</sup>, 胡红波<sup>1</sup>, 曾卓<sup>3</sup>, 许昊<sup>1</sup>, 李天添<sup>1</sup>, 徐建华<sup>4</sup>

1. 湖北省计量测试技术研究院, 武汉 430223
2. 南昌大学物理与材料学院, 南昌 330031
3. 武汉地震计量检定与测量工程研究院有限公司, 武汉 430071
4. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070

**【摘要】** 电阻应变传感器种类繁多、应用广泛,在桥梁隧道、建筑、航空航天等行业和领域中多用来对其结构进行监测,而合理评价电阻应变传感器的动态特性就非常重要,讨论分析了电阻应变传感器的特点及相关国内外标准规范对计量特性的描述,针对电阻应变传感器的计量校准现状,论述了一种利用现有的振动计量装置进行电阻应变传感器动态特性校准的方法。该方法以现有的振动标准装置为基础,通过动态信号分析仪分别采集振动台信号和应变传感器信号,并对测量信号进行分析得到动态灵敏度,完成传感器动态特性的校准。通过试验验证了该方法切实可行,重复性较好,最后说明了数据处理过程并评估了传感器动态灵敏度的不确定度。

**【关键词】** 计量学; 计量校准; 应变传感器; 动态特性; 测量不确定度

**【中图分类号】** TB973

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2096-9015(2024)04-0026-05

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0349

**【引用本文】** 徐爱华,代国红,胡红波,等.电阻应变传感器动态特性校准方法的研究[J].计量科学与技术,2024,68(4):26-30.

## Research on the Dynamic Characteristic Calibration Method of Resistance Strain Sensors

XU Aihua<sup>1</sup>, DAI Guohong<sup>2</sup>, HU Hongbo<sup>1</sup>, ZENG Zhuo<sup>3</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, LI Tiantian<sup>1</sup>, XU Jianhua<sup>4</sup>

1. Hubei Institute of Measurement and Testing Technology, Wuhan 430223, China

2. School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3. Wuhan Seismic Metrological Verification & Surveying Engineering Institute Co., LTD., Wuhan 430071, China

4. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China

**【Abstract】** Resistance strain sensors have a wide range of types and applications and are commonly used in industries such as bridge and tunnel construction, building, aerospace, etc., to monitor the structural health of various systems. Therefore, it is essential to reasonably evaluate the dynamic characteristics of resistance strain sensors. This article discusses and analyzes the characteristics of resistance strain sensors and the description of metrological characteristics in relevant domestic and international standards and specifications. Considering the current status of metrological calibration of resistance strain sensors, this paper proposes a method for calibrating the dynamic characteristics of resistance strain sensors using existing vibration measuring devices. This method is based on an existing vibration standard device, where a dynamic signal analyzer collects vibration table signals and strain sensor signals, and analyzes the measurement signals to obtain dynamic sensitivity, thus completing the calibration of the sensor's dynamic characteristics. Experiments have verified the feasibility and good repeatability of this method. Finally, the data processing process is explained, and the uncertainty of the sensor's dynamic sensitivity is evaluated.

**【Key words】** metrology, metrological calibration, strain sensors, dynamic characteristics, measurement uncertainty

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(12364019)。

作者简介: 徐爱华(1981-), 湖北省计量测试技术研究院高级工程师, 研究方向: 振动计量, 邮箱: 40244720@qq.com。

## 0 引言

在结构安全评估中,应变属于一个主要参数,其变化情况能够对系统结构整体的局部特征和固有特征的变化情况进行反映<sup>[1-5]</sup>,适合应用于损伤定位以及结构安全评价当中。电阻应变式传感器是测量物体受力变形所产生应变的一类传感器<sup>[6-10]</sup>。在桥梁检测、监测领域,桥梁荷载试验的试验数据通常通过绘制电阻应变传感器试验曲线来进行分析,试验曲线可以对桥梁荷载试验结果进行直接反映,在通常情况下,需要使用试验曲线对实际测量结果与理论计算值之间的关联性进行呈现,也可对主要控制点变形情况、应变分布情况以及荷载历程曲线进行反映。由此,评价试验结果的过程更加便捷,也可以判定结构工作状态、异常点以及应变分布情况与一般规律是否相符合<sup>[11-13]</sup>。作为一项应用价值较高的工具和手段,应变检测技术已经在多个领域受到重视,电阻应变式传感器的计量特性和参数直接影响监测工作的深度和成效,对电阻应变传感器的静态特性和动态特性进行校准都是非常必要的<sup>[14-16]</sup>。

目前,中国计量科学研究院等计量技术机构开展了应变传感器静态特性的校准;欧美大地公司、北京盛赛克科技有限公司等设备代理和生产厂家开展了此类设备静态特性的内部校准,而对应变传感器动态性能进行校准的研究和试验不多,关于此类的文献报导也不多,因此研制电阻动态特性校准装置具有科学研究和实际应用价值<sup>[17-20]</sup>。本文提出使用振动标准装置对电阻应变传感器的动态特性进行校准,并进行了试验和不确定度分析。

## 1 电阻应变传感器的特点

桥梁应力(应变)测量系统根据安装位置不同可分为表面型和埋入型两种。常用应力(应变)测量设备根据操作方式不同又可分为直接采集型和传感器型。直接采集型应变(应力)测试设备一般包括:千分表、杠杆引伸仪、手持应变仪等;传感器型应变(应力)测试设备一般由采集系统和数据分析系统组成,包括电阻应变传感器及其测试分析系统、振弦式应变计及振弦式读数仪、光纤光栅式应变计及光纤光栅解调仪等<sup>[21-25]</sup>。

电阻应变传感器工作原理为:在结构上施加一个动态力,结构产生微小形变位移,敏感元件将机械

运动转换为电阻、频率等电量,根据传感器的灵敏度即可计算出结构的应变值,实现应变的动态测量,从而进行结构动态变形、疲劳状况的监测<sup>[26-27]</sup>。金属材料或是半导体材料在被拉伸或是被压缩的情况下,能够发生电阻变化的物理现象,将其制作成为丝栅状应变敏感元件。确认构件的被测位置,将电阻应变计粘贴于相应位置的表面,构件应变值能够转化成为电阻值改变量。

使用电阻应变计对应变情况进行测量,过程主要如下:在被测构件表面安装或是粘贴电阻应变计,并将其作为检测元件,之后将测量线路接入其中,构件受力之后逐渐发生变形,能导致电阻量出现变化,电阻变化情况与构件表面应变之间具有一定的关联性,测量线路将信号输出以后,信号由放大线路放大,之后由记录仪器进行记录或是显示,属于一类将机械能转换为电能的方式。而应变计电测技术能够广泛应用的原因,主要在于其具有以下优势:

1)重量轻、尺寸小,可以直接粘贴于构件表面,并且不易导致构件的应力分布情况或是正常工作状态受到影响,可以对应变情况进行准确测量,也可以采用多个应变计组建成为应变花,对应力较为复杂时,某一点的主应力方向和大小进行测量和计算。

2)测量范围广,数十到数千微的应变均能进行测量,通过应用高稳定性和高精度的测量系统、半导体应变计,对微应变的测量效果良好,甚至可以实现 $10^{-2}$ 量级微应变的测量。使用应变范围较大的应变计,能够进行测量的应变则可达到20%,且既可测量静态应变,也能针对0~500 Hz之间的动态应变进行测量。

3)用途较为广泛,可以针对应变以及其它物理量直接进行测量,还可作为制作物理量测量传感器的原材料,可以在设计方案的计量、对比以及生产过程控制中进行应用,还可应用在实验室以及多种现场条件中。

4)相对于其他类型的应变测量方法精度更高,一般精度可以达到0.1%甚至更多。

5)可以应用于复杂环境和恶劣环境中,例如在 $-270^{\circ}\text{C}$ (液氮温度)的低温环境中应用,或是在 $1000^{\circ}\text{C}$ 的高温环境中应用,也可应用在水中、真空状态下等,还可在强振动、大离心力、化学腐蚀性、放射性、强磁场等环境中进行应用。

6)能够获取的信号为电信号,可以将信号直接输入计算机,并自动处理数据,从而实现测试以及控

制过程的自动化。

监测桥梁动态应变时,电阻应变传感器及其测试分析系统因具有可靠性高等特点较其他两类测试系统应用更多、更广。

### 2 电阻应变传感器动态特性校准方法的设计

应变传感器具有可靠性较高的特点,当前已经得到广泛应用,针对其定期进行校准工作,以保障其测量效果十分重要,但目前没有专门针对它的校准规范。JJG 623-2005《电阻应变仪》已经指导了电阻应变仪的校准检定,但这个规程是对电阻测量仪提出要求,虽涉及到应变传感器但未对传感器性能,尤其是单个传感器的计量特性,未提出相应要求及检定方法<sup>[28-30]</sup>。根据《电阻应变仪》(JJG 623-2005)相关内容,针对动态电阻应变仪进行检定时,主要检定对象包括外观、示值误差、开关状态、非线性误差、衰减误差、标定值误差、频响误差、零位漂移、低通滤波器滤波特性、示值稳定性等。检定过程中,通常是输入模拟信号给电阻应变仪,然后根据响应输出进行检定。而在实际工程检测工作中,并没有电信号模拟信号输入,而是由于锤击或者静载,使桩基产生位移、形变,从而输出电信号。因此有必要使用标准的位移或者应变值来校准应变传感器。

根据应变传感器现场使用的特点,本文设计一种校准电阻应变传感器的方法。标准器使用标准振动台,振动标准装置能够给出稳态振动,电阻应变传感器在稳态振动的作用下,输出电量,通过计算其电量输出和稳态振动输入的关系,即可得到电阻应变传感器的振动参数指标,实现电阻应变传感器的振动参数校准。在这个校准过程中关键是加工合适的夹具安装好应变传感器,当振动台给出稳态振动时,采集器测出标准位移值,标准位移值的可复现性、稳定性、准确度是考虑的重点。本校准方法的技术关键是,在利用现有振动台合适夹具安装应变传感器的前提下,运用激光测振仪(如图1所示)或标准传感器(如图2所示)准确测得标准值,同时测量电阻应变传感器的输出值。

电阻应变传感器的振动参数校准中使用的振动台和测量仪器,省级计量技术机构均具备该能力,不需要大量投入,能够为应变传感器的振动参数校准提供良好环境条件。当然因为电阻应变传感器在实际工程检测的使用中,由于锤击或者其他敲击,它受到的振动频率是不一样的,在进行校准的时候选择

哪些频率点作为标准频率,频响范围的上下限如何规定,都是要通过大量的试验来验证的。实际使用中,不同频率点得到的电阻应变传感器的灵敏度是不一样的,那么灵敏度相较于参考点,误差需要在什么范围内才不影响使用也是需要衡量的关键。同时,传感器如何安装在振动台上才会对频响输出没有影响,这个对装置的加工也提出要求,因为应变量跟形变有关系,怎么准确测量长度也很关键。

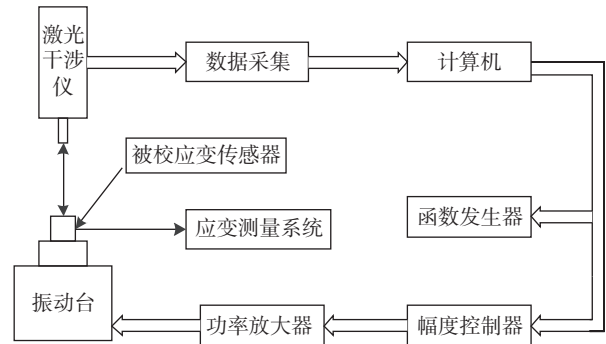


图1 激光法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser measurement principle

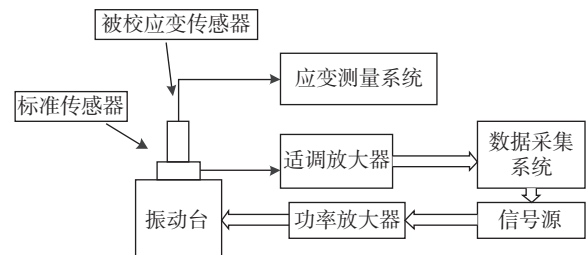


图2 标准传感器法测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of the standard sensor method measurement principle

### 3 电阻应变传感器动态特性校准数据的处理和不确定度评定

电阻应变传感器进行动态校准时,数据采集系统采集到振动台的位移值,根据仪器参数,可以计算标准应变值,同时仪器自身也相应输出了电压量。在校准过程中有很多因素将对校准结果产生影响,下面对电阻应变传感器灵敏度测量的不确定度进行评估。将电阻应变传感器安装于标准振动台上,选取某一合适频率点(推荐 80 Hz、160 Hz)和加速度值(推荐 5 m/s<sup>2</sup>、10 m/s<sup>2</sup>)进行激振。以此频率点为参考点,电阻应变传感器输出的幅值与标准应变值之比为电阻应变传感器的参考灵敏度,单位为 μV/με 或 mV/με。



灵敏度的数学模型为:

$$S_\varepsilon = S_v(I_1 \cdot I_2 \cdots I_M)$$

式中,  $S_v$  为电阻应变传感器参考灵敏度测量值;  $I_1 \sim I_M$  为其他影响量对灵敏度测量带来的误差。

因为各输入量均处于独立状态, 所以各标准的不确定度分量互不相关, 灵敏系数的绝对值均为 1, 相对合成不确定度的表达式为:

$$u_{\text{rel}}^2(S_\varepsilon) = \frac{u_c(S_\varepsilon)^2}{S_\varepsilon^2} = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{\text{rel}}(x_i))^2$$

1) 由标准加速度计套组引入的标准不确定度分量  $u_1$

由上级检定给出的测量不确定度为 160 Hz 时,  $U=0.5\%$ ,  $k=2$ , 通频带时  $U=1\%$ ,  $k=2$ , 则 160 Hz 时:

$$u_1 = 0.5\%/2 = 0.25\%$$

2) 由数据采集系统引入的相对标准不确定度分量  $u_2$

由证书给出的测量不确定度为:  $U=0.1\%$ ,  $k=2$ , 则:

$$u_2 = 0.1\%/2 = 0.05\%$$

3) 电阻应变传感器输出示值重复性引入的测量相对标准不确定度分量  $u_3$  删除。对电阻应变传感器进行重复性测试, 重复测量 10 次, 得到的数据如表 1 所示。

表 1 重复性测试  
Tab.1 Repeatability test

测试序号	灵敏度/ $(\mu\text{V}/\mu\text{e})$
1	7.02
2	7.01
3	7.05
4	7.04
5	7.02
6	7.03
7	7.04
8	6.99
9	6.95
10	6.99

单次测量试验标准差:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}} = 0.03 \mu\text{V}/\mu\text{e}$$

测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u(x) = s(x)/\bar{S} = 0.42\%$$

4) 电阻应变传感器的有效长度由测量工具显微镜测出, 由测量工具显微镜引入的相对标准不确定度分量  $u_4$

由证书给出的测量不确定度为:  $U=0.14\%$ ,  $k=2$ , 则:

$$u_4 = 0.14\%/2 = 0.07\%$$

5) 电阻应变传感器的安装损耗以及环境因素引入的相对标准不确定度分量  $u_5$

$$u_5 = 0.5\% / \sqrt{3} = 0.29\%$$

合成标准不确定度  $u_0$  的计算:

$$u_0 = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.57\%$$

计算扩展不确定度  $U_{\text{rel}}$ , 取  $k=2$ , 则:

$$U_{\text{rel}} = 1.2\%$$

## 4 结论

电阻应变传感器大量应用于交通、港口、桥梁、水利、电力等领域的建筑工程检测、结构健康监测中, 在机场、高铁、高速公路、房屋建筑、水利工程等施工过程中广泛使用。电阻应变传感器的动态性能对桩基础的各种承载力、结构疲劳监测的准确性有着重要影响。文中通过对电阻应变传感器的国内外相关标准、规范中的计量性能校准的分析对比, 结合电阻应变传感器的特点, 提出了一种切实可行的校准方法, 经试验得到了应变传感器的灵敏度指标, 对校准结果进行了不确定度分析。该电阻应变传感器动态特性的校准方法经过多次试验验证, 操作方便、切实可行, 保证了工程使用中应变监测的准确可靠。

## 参考文献

- [1] 张建彬, 鞠玉涛, 孟红磊, 等. 改性双基推进剂药柱表面静态应变测量方法 [J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(5): 595-599.
- [2] 段成丽. 大应变传感器的设计、制备及特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [3] 付亚冰. 航空发动机和传动系统中电阻应变测试技术应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [4] 杨立新, 赵寒容. 应变计在工程安全监测应用中几个问题的讨论 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(3): 42-45.
- [5] 金冉, 吕翔, 陈伟, 等. 应变传感器动态特性激光绝对法冲击校准装置 [J]. 宇航计测技术, 2021, 41(3): 38-42.
- [6] 夏睿, 徐玮, 刘雷, 等. 电阻应变式传感器在下肢牵引手术中的应用 [J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(15): 32-37.

- [7] Dong W, Li W, Tao Z, *et al.* Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 146-163.
- [8] Ting R Y. Recent developments in piezoelectric composites for transducer applications[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85(S1): S60.
- [9] 余康. 基于电阻应变计的飞机驾驶杆力传感器研制 [J]. *衡器*, 2021, 50(3): 46-51.
- [10] 雍利鹏, 李明波. 基于电阻应变计的直升机吊挂测力传感器设计 [J]. *测控技术*, 2021, 40(2): 85-89.
- [11] Gao W, Huo L, Li H, *et al.* Smart Concrete Slabs with Embedded Tubular PZT Transducers for Damage Detection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 025002.
- [12] 张正伟, 袁俊英. 高架桥梁应力结构安全监测方法研究 [J]. *现代交通技术*, 2022, 19(5): 37-46.
- [13] 郭红, 李恪宇. 桥梁结构应力监测新方法探索 [J]. *四川建材*, 2023, 49(9): 170-173.
- [14] 何晓敏. 动态电阻应变仪示值误差和频率响应测得值的不确定度评定 [J]. *计量与测试技术*, 2023, 50(7): 105-106.
- [15] 王菊凤, 龙波, 黄徐瑞晗, 等. 静态电阻应变仪测量值的不确定度分析 [J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(4): 76-80.
- [16] 陆叶, 龚华平, 蔡静怡, 等. 动态激励下的FBG应变传感器原位校准方法 [J]. *光子学报*, 2023, 52(1): 116-123.
- [17] 贺琴. 基于压电陶瓷的电阻应变式位移传感器电路设计 [J]. *中国战略新兴产业*, 2018(40): 174-175.
- [18] 孙辉, 韩玉龙, 姚星星. 电阻应变式传感器原理及其应用举例 [J]. *物理通报*, 2017(5): 82-84.
- [19] 刘泽统. 仿生哑铃形薄膜电阻应变传感器设计及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [20] 王玲璐, 陈柯行, 赵印明. 电阻应变式传感器数字化补偿技术 [J]. *计测技术*, 2016, 36(S1): 196-200.
- [21] 张龙龙, 钟山. 基于振弦式压力传感器的桥梁索力监测探讨 [J]. *交通世界*, 2022(15): 29-34.
- [22] 王红珂, 徐德城, 林磊, 等. 基于光纤光栅的三向应变计设计及性能研究 [J]. *压电与声光*, 2021, 43(6): 761-765.
- [23] 张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 52-57.
- [24] 王新彤, 李山东, 郑光金, 等. 光纤光栅解调仪校准方法研究 [J]. *宇航计测技术*, 2021, 41(2): 8-12, 37.
- [25] 郑术力, 喻桂华, 郑文炜, 等. 无封装光纤光栅应变传感器校准系统研究 [J]. *环境技术*, 2023, 41(6): 157-160.
- [26] 李岢. 电阻应变式传感器测量性能分析 [J]. *电子元器件与信息技术*, 2020, 4(2): 153-155.
- [27] 李盼菲. 电阻应变测量中提高精度的方法研究 [J]. *计量与测试技术*, 2019, 46(12): 62-64.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. 电阻应变仪: JJG 623-2005 [S] 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [29] 袁明. 电阻应变式传感器误差原因以及补偿方法 [J]. *电子技术与软件工程*, 2019(9): 227.
- [30] 许艺青, 杨晓翔, 韦铁平, 等. 电阻应变式传感器应变传递影响因素分析 [J]. *中国测试*, 2018, 44(1): 136-142.

本文编辑: 霍炜炜

(上接第 49 页)

- [25] 武利庆, 谢宝民, 程清, 等. JJF 1720-2018《全自动生化分析仪校准规范》解读 [J]. *中国计量*, 2020(3): 127-131.
- [26] 戴新华, 杨梦瑞, 全灿, 等. 液相色谱-同位素稀释质谱法准确测定血清中的尿酸 [J]. *计量技术*, 2008(10): 27-30.
- [27] 石莲花, 金有训, 何海红, 等. 血清中尿酸和尿素含量测定的超高效液相色谱-单四级杆质谱法国际比对 [J]. *化学分析计量*, 2017, 26(4): 85-88.
- [28] 张晴, 金有训, 徐蓓, 等. 冰冻人血清中尿酸标准物质复制的定值 [J]. *分析实验室*, 2022, 41(3): 302-306.
- [29] 孙雪晴, 邹迎曙, 张书香, 等. 冰冻人血清中尿酸标准物质的研制 [J]. *医疗装备*, 2017, 30(13): 33-36.
- [30] 江雅平, 徐国兵, 刘欧. 5 水平冰冻混合人血清尿酸候选二级标准物质的研制 [J]. *检验医学*, 2021, 36(1): 101-106.

本文编辑: 霍炜炜