

# 新型应变式三向力传感器的标定和验证

颜钰琳<sup>1</sup>, 王 臻<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连

<sup>2</sup>上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2023年5月20日; 录用日期: 2023年6月21日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

应变式力传感器广泛应用于医学、计算机、加工业等领域,但是在土建领域特别是工程结构试验方面,由于误差性耦合与结构性耦合的存在,严重影响了其测量功能和测量精度,使得很多试验得不到所需目标数据,影响了工程结构试验研究的进展,也限制了其更广泛的实际应用。基于此,本文首先介绍国产应变式力传感器的特点和应用现状,然后提出一种新的应变式力传感器,可以通过其标定试验获得的传递系数得到目标内力(轴力、剪力和弯矩),并在一座大比例尺的梁桥振动台试验中进行实际验证,将其测量结果与传统的应变片的测量结果进行比较,误差约为10%,验证了其测量方法的有效性和准确性。

## 关键词

应变式力传感器, 工程结构试验, 标定试验, 验证

# The Calibration and Verification of the New Three-Directional Strain Gauge Force Transducer

Yunlin Yan<sup>1</sup>, Zhen Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Co., Ltd., Shanghai

Received: May 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Strain gauge force transducer is widely used in many fields, such as medicine, computer technology, manufacturing and so on. But in civil engineering, especially engineering structure tests, because of the existence of error coupling and structural coupling, the measuring function and pre-

文章引用: 颜钰琳, 王臻. 新型应变式三向力传感器的标定和验证[J]. 仪器与设备, 2023, 11(2): 127-134.

DOI: 10.12677/iae.2023.112017

recision of the force transducer are seriously affected, causing many tests fail to get the required target data. And this definitely affects the progress of the tests and limits the wider practical application of the transducer. In this paper, the characteristics and application of the homemade force transducer are introduced. Next, a new strain gauge force transducer is proposed, which can measure the target forces (axial force, shear force, bending moment and torque) by the coefficients obtained from the calibration test. Then its verification in a large-scale shaking table test of a beam bridge is explained and the measuring results of this new force transducer are compared with the strain gauge. Finally, the validity and accuracy of its measuring method are verified because the error is only around 10%.

## Keywords

Strain Gauge Force Transducer, Engineering Structure Test, Calibration Test, Verification

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

应变式力传感器是将电阻应变片贴在弹性体的特定表面, 当外荷载作用于弹性体时, 导致其应力和应变的变化, 进而引起应变片内部电阻的改变, 经电路处理后以电信号的方式输出, 采集到的电信号经过处理后便可得到外荷载[1] [2]。

相比于医学、计算机、加工业等领域[3] [4] [5], 应变式力传感器在土建领域特别是工程结构试验方面的应用较少。工程结构试验的传统测量方法是在需测部位贴应变片, 但是当结构体进入塑性后, 传统测量方法已无法准确测出结构内力, 此时应变式力传感器不失为一种很好的测量方案。虽然目前有少数工程结构试验使用应变式力传感器来测量结构内力[6] [7] [8] [9], 但由于设计原理和制造加工等因素的影响, 存在较为严重的误差性耦合与结构性耦合, 在结构动力试验中尤为明显, 导致其测量精度无法满足试验要求[10] [11] [12]。

本文基于国内应变式力传感器的特点和现状, 提出一种新的应变式力传感器, 并在一大比例尺的两跨梁桥振动台试验中验证了其测量方法的有效性和准确性。

## 2. 新型力传感器

针对国产应变式力传感器的应用现状和设计缺陷, 本文提出一种新的应变式力传感器。如图 1 所示为一种用高强金属材料制造的应变式力传感器, 由连接板、弹性体和敏感元件组成。其中, 连接板带有螺栓孔和沟槽, 分别用于连接锚固和引线。弹性体部分则为薄壁圆管结构, 与连接板之间平滑过渡。

弹性体内侧的中部贴有四个直角应变花, 即敏感元件。每个应变花均能测得贴片处  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  三个方向的应变值。如图 2 所示, 四个应变花对称布置, 分别位于圆周的  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  处。

此应变式力传感器加工精度高、材质高强且均匀, 同时与国产力传感器相比, 连接板与弹性体之间平滑过渡, 避免了应力集中导致的脆性破坏, 同时也较大程度地保证了敏感元件处应变的均匀分布。同时, 弹性体共设置了 4 个敏感元件和 12 个输出通道, 可以利用不同通道之间的补偿效应, 准确测得所有类型的结构内力, 包括轴向力、剪力和弯矩等。同时, 通过合理的结构设计、贴片位置与实用的标定方法, 能够带来精确的标定结果与测量结果。



Figure 1. New force transducer  
图 1. 新型力传感器

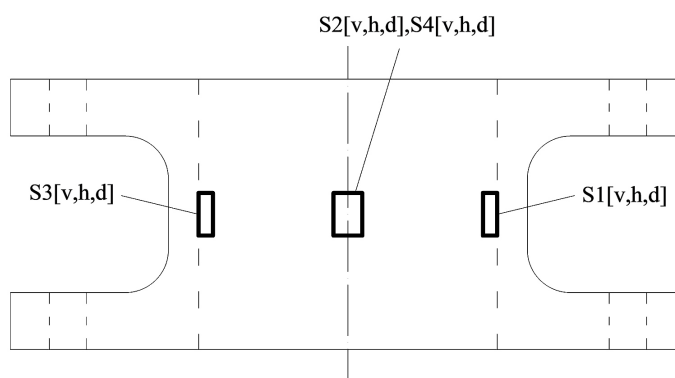


Figure 2. Sensitive components  
图 2. 敏感元件

### 3. 试验应用

在工程结构试验尤其是振动台试验中, 测量从上部结构传下来的惯性力是必不可少的。因此试验在每个板式橡胶支座的下方均放置了该新式力传感器。每个力传感器的  $0^\circ$  和  $180^\circ$  应变花的连线与纵桥向(X轴)平行,  $90^\circ$  和  $270^\circ$  应变花的连线与横桥向(Y轴)平行。同时, 试验利用拉线式位移计测得试验每一时刻的盖梁位置, 并在此位置处建立静力平衡方程, 根据在力传感器处测得的力求解出墩顶内力。另外, 本试验在墩底附近贴了直角应变花, 用以测量该处的应变和内力, 并与力传感器的测量结果进行比较, 检验该力传感器的测量精度。

### 4. 标定试验

为了获得准确的测量结果, 则需进行力传感器标定试验。标定试验旨在建立外荷载增量和应变增量之间的函数关系, 从而得到传递系数, 这样做既能满足试验精度要求, 又大大提高了试验效率。而且由于从上部结构传下来的扭矩很小, 所以只需进行轴向力、双向剪力和双向弯矩标定试验。另外, 为了模拟力传感器在模型桥中的真实受力情况, 试验将力传感器与支座连成一个整体来进行标定。

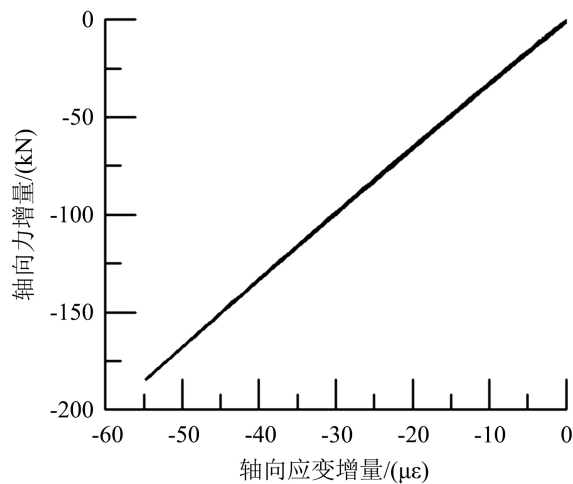
#### 4.1. 轴向力标定试验

轴向力标定试验的加载系统如图 3 所示, 将支座 - 力传感器部件放置在压力机中, 其上放置一个量程为 50 t、灵敏度系数为 1.665 的压力计, 用于输出外荷载数据。压力机给支座 - 力传感器部件施加竖向无偏心的集中荷载, 让其仅受轴向力作用, 满足轴向力标定试验的要求。



**Figure 3.** Axial force calibration system  
**图 3.** 轴向力标定试验系统

试验时, 压力机先从 0 缓慢加载至 0.3 t, 测试数据通道的稳定性。之后, 继续缓慢地从 0.3 t 加载至 18 t, 循环加载三次后停止试验。根据所得试验数据, 作出力传感器的轴向力增量和平均轴向应变增量关系曲线如图 4 所示。



**Figure 4.** Axial force calibration result  
**图 4.** 轴向力标定结果

## 4.2. 双向剪力标定试验

剪力标定试验的加载系统如图 5 所示, 在作动器下方放置一个压力计用以测量外荷载, 同时作动器施加的竖向集中力经由一块横梁的分散作用, 转化为两个集中荷载作用于带有支座 - 力传感器的外伸梁结构上。此时力传感器的敏感元件处仅承受剪力作用, 满足剪力标定试验的要求。

首先进行纵桥向即 X 向的剪力标定试验, 作动器先从 0 缓慢加载至 0.3 t, 测试数据通道的稳定性。之后, 继续缓慢地从 0.3 t 加载至 8 t, 循环加载三次后停止试验。接着进行横桥向剪力标定试验, 试验步骤相同, 只需将支座 - 力传感器部件整体顺时针旋转 90°后放置在加载体系中即可。根据试验所得数据, 作出力传感器的剪力增量和平均剪切应变增量关系曲线如图 6 所示。



Figure 5. Shear force calibration system  
图 5. 剪力标定试验系统

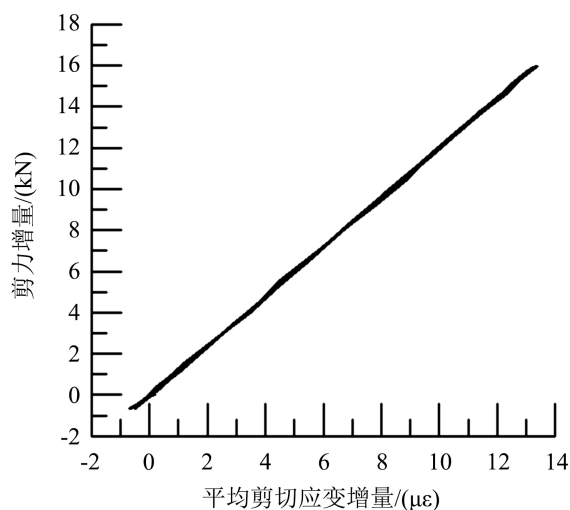


Figure 6. Shear force calibration result  
图 6. 剪力标定结果

### 4.3. 双向弯矩标定试验

弯矩标定试验的加载系统如图 7 所示, 在作动器下方放置一个压力计用以测量外荷载, 同时作动器施加的竖向集中力经由一块横梁的分散作用, 转化为两个相等的集中荷载对称作用于带有支座 - 力传感器的简支梁结构上。此时支座 - 力传感器部件处于纯弯状态, 满足弯矩标定试验的要求。

首先进行纵桥向弯矩标定试验, 作动器先从 0 缓慢加载至 0.3 t, 测试数据通道的稳定性。之后, 继续缓慢地从 0.3 t 加载至 5 t, 循环加载三次后停止试验。接着进行横桥向弯矩标定试验, 试验步骤相同, 只需将支座 - 力传感器部件整体顺时针旋转 90°后放置在加载体系中即可。根据试验所得数据, 作出力传感器的弯矩增量和曲率增量关系曲线如图 8 所示。





Figure 7. Moment calibration system  
图 7. 弯矩标定试验系统

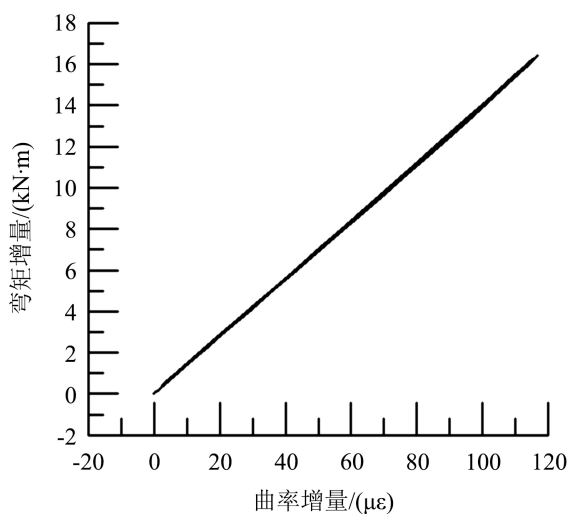


Figure 8. Moment calibration result  
图 8. 弯矩标定结果

#### 4.4. 双向弯矩标定试验

力传感器的标定结果汇总于表 1。

Table 1. Calibration results  
表 1. 标定结果

力传感器	轴向力(kN/μ $\epsilon$ )	剪力(kN/μ $\epsilon$ )	弯矩(kN*m/μ $\epsilon$ )
左侧	3.3895	1.2084	0.1397
右侧	3.3460	1.1978	0.1368

## 5. 测量精度验证

文献[13] [14] [15]在距离墩底 60 mm 高度处沿圆周每隔 90°布置一个直角应变花。根据平截面假定,在弹性范围内可由应变花输出的应变数据求得该处的弯矩。与此同时,由力传感器可以测得墩顶内力,从而也能求得墩底贴片处的弯矩。

这两种方法测得的动弯矩 - 时间曲线并进行比较,结果如图 9 所示。两条动弯矩 - 时间曲线波形相近,由墩底应变片测得的动弯矩峰值为 26.58 kN·m,而由力传感器测得的动弯矩峰值为 23.89 kN·m,两者的误差约 10%,该新型应变式力传感器具有较高的测量精度。

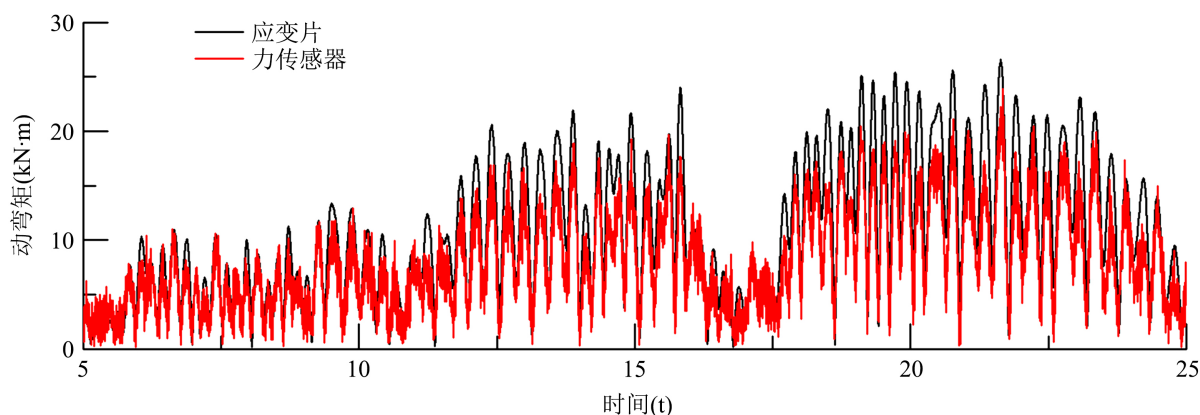


Figure 9. Moment-time curve under ground motion

图 9. 动弯矩 - 时间曲线

## 6. 结论与展望

本文提出的新式应变式力传感器,由于做工精细、材料高强和结构合理,较大程度地削弱了力传感器固有的误差性耦合与结构性耦合,不仅获得了理想的标定结果,同时在振动台试验中也验证了其测量方法的有效性和准确性。由此可见,该新式应变式力传感器必将广泛应用于工程结构试验中。

## 参考文献

- [1] 刘俊, 李敏, 刘京诚. 六向力传感器研究发展综述[J]. 光学精密工程, 2004(z1): 312-317.
- [2] 龚莉杰. 一种新型多维力传感器及其标定方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 骆训煌, 周兴林, 关佳希, 等. 高精度应变式三维力传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5): 64-67, 71.
- [4] 谷向飞, 孙松梅. 六维力传感器静/动态性能指标综述[J]. 机械工程与自动化, 2019(2): 224-226.
- [5] 汤建华, 李孟秋阳. 多维力传感器研究现状及其小型化存在的问题与对策[J]. 衡器, 2021, 50(12): 40-45.
- [6] 王建宁, 窦远明, 魏明, 等. 土-隧道结构动力相互作用振动台模型试验中传感器位置的优选[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 144-150.
- [7] Xu, Y., Wang, R.L. and Li, J. (2016) Experimental Verification of a Cable-Stayed Bridge Model Using Passive Energy Dissipation Devices. *Journal of Bridge Engineering*, **21**, Article ID: 04016092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000966](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000966)
- [8] 徐艳, 王瑞龙, 李建中, 嵇冬冰. 弹塑性钢阻尼器对中等跨径斜拉桥横桥向减震效果的振动台试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 101-109.
- [9] 廖述江, 何文福, 刘文光. 云南省博物馆新馆隔震设计与振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2016(22): 48-55.
- [10] 曹会彬, 孙玉香, 刘利民, 冯勇, 王以俊, 葛运建. 多维力传感器耦合分析及解耦方法的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1136-1140.

- [11] 王志军, 王凯, 刘宣佑. 六维力传感器解耦综述[J]. 机械工程与自动化, 2018(2): 220-221.
- [12] 周山, 刘利平, 高建宇, 张宝存. 三维力传感器静态解耦方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 181-187.
- [13] 徐艳, 王臻, 后藤·芳显, 海老泽·健正. 部分充填钢管混凝土桥墩振动台试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 177-185.
- [14] 王臻. 部分充填圆形钢管混凝土桥墩抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2019.
- [15] 徐艳, 王臻, 陈智钊. 部分充填钢管混凝土独柱墩的最小混凝土充填率[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 1546-1555.