

动态力学计量中力传感器的特性研究与校准方法优化

□杨思寒 杜翠 李胜男

(聊城市检验检测中心, 山东 聊城 252000)

【摘要】随着动态力学计量需求的增长, 力传感器性能对高精度测量至关重要。本文聚焦传感器的灵敏度、频率响应、线性度和迟滞特性, 优化动态加载装置设计, 建立测量不确定度模型, 并提出多参数耦合校准方法以同步优化多项动态特性。在动态称重系统中, 验证了改进方法对测量精度和动态响应的提升效果。研究成果为动态力学计量精度的提升提供了技术支撑, 并对复杂动态环境中的工程应用具有重要意义。

【关键词】动态力学计量; 力传感器; 校准方法; 动态加载装置

文献标识码: A 文章编号: 1003-1870 (2025) 05-0012-04

Characteristic Research and Calibration Method Optimization for Load Cells in Dynamic Mechanical Metrology

【Abstract】 With the growing demand for dynamic mechanical metrology, the performance of load cells is critical for high-precision measurements. This paper focuses on the sensitivity, frequency response, linearity and hysteresis characteristics of load cells, optimizing the design of dynamic loading devices, establishing a measurement uncertainty model, and proposing a multi-parameter coupled calibration method to synchronously optimize various dynamic characteristics. The improved method is validated in a dynamic weighing system, demonstrating enhanced measurement accuracy and dynamic response. The findings provide technical support for improving the accuracy of dynamic mechanical metrology and hold significant implications for engineering applications in complex dynamic environments.

【Keywords】 dynamic mechanical metrology; load cell; calibration method; dynamic loading device

引言

随着动态力学计量技术的发展, 力传感器作为核心测量元件, 其性能决定了动态测量的精度与稳定性。动态环境中传感器的灵敏度、频率响应、线性度和迟滞特性等复杂参数难以被精确量化, 传统静态校准方法无法满足动态特性验证需求。现有技术面临的挑战包括加载装置输出波动带来的不确定性、多参数耦合效应对测量精度的影响, 以及信号

处理系统带宽不足引发的动态误差累积。针对这些问题, 本文以动态力传感器的灵敏度、频率响应和动态线性特性为研究重点, 提出基于动态加载装置优化、测量不确定度建模及多参数耦合校准的改进方法。在动态称重系统中的实际验证表明, 这些改进有效提升了校准精度和适用性, 为动态力学计量领域提供了理论基础与技术支持, 同时推动高精度测量技术在复杂动态环境中的应用发展。

1 力传感器关键特性

1.1 灵敏度特性分析

力传感器的灵敏度是其核心性能指标之一，反映了传感器对外力的响应能力，定义为输出信号变化量与施加载荷变化量之比。灵敏度的变化直接影响测量精度，动态测量条件下其表现尤为明显。温度变化是影响灵敏度的关键因素，宽温区范围内中传感器内部材料的热膨胀系数差异，可能导致应变片输出非线性偏差。测试条件设置为20~80℃的温度区间，加载范围为0~100 N，使用高精度电桥系统采集输出电压数据。表1 测试了不同环境条件下的灵敏度数据。结果显示，温度从20℃升高到80℃时灵敏度呈现线性下降趋势，而加载速率增加至50 N/s 后灵敏度波动加剧。

表1 不同环境条件下灵敏度测试数据对比

温度 (°C)	加载力 (N)	灵敏度 (mV/V)
20	100	1.02
40	100	0.99
60	100	0.97
80	100	0.96

表1 显示了在不同温度条件下，加载力为100 N 时力传感器灵敏度的变化情况。随着温度从20℃升高至80℃，灵敏度呈现逐渐下降的趋势，从1.02 mV/V 下降至0.96 mV/V，表明温度变化对力传感器灵敏度有一定的负面影响。温度升高可能导致传感器内部材料的热膨胀系数差异，从而引起应变片输出的非线性偏差，进而影响灵敏度的表现。虽然在测试过程中加载力保持为100 N，但温度的变化依然能够显著影响测量结果，导致测量误差的增大。因此，在实际应用中，为了确保高精度的测量结果，需要采取相应的温控措施，或对传感器进行温度补偿，以减少温度变化对灵敏度的影响，保证系统的稳定性和准确性^[1]。

1.2 频率响应要求

频率响应用于描述传感器对不同频率外力的响应能力，高频环境下，传感器输出信号幅值可能出现衰减或相位滞后，影响测量精度。带宽的定义为传感器在输出信号幅值下降至输入信号幅值70% 的频率范围，带宽不足会导致动态响应失真。研究频

率响应特性需要建立数学描述，常用的频率响应函数表示如下：

$$H(f) = \frac{V_{out}(f)}{F_{in}(f)}$$

其中， $H(f)$ 表示频率响应函数； $V_{out}(f)$ 为输出电压的幅值； $F_{in}(f)$ 为输入力的幅值。实验设置频率范围从10~200 Hz，加载力为50 N，记录输出幅值与输入幅值的比值见表2。

表2 不同频率下输出误差对比

频率 (Hz)	输入幅值 (N)	输出幅值 (mV/V)	输出误差 (mV/V)
10	50	0.5	0
50	50	0.48	0.02
100	50	0.44	0.06
200	50	0.4	0.1

表2 展示了在不同频率下，输入幅值为50 N 时，输出幅值和输出误差的变化情况。随着频率从10 Hz 增加到200 Hz，输出幅值逐渐减小，从0.5 mV/V 下降至0.4 mV/V，同时输出误差也逐步增大，从0 增加到0.1 mV/V。特别是在100 Hz 和200 Hz 频段，输出幅值和误差的变化较为明显，表明频率的升高导致了传感器的频率响应能力下降。频率响应不足可能是由于传感器在高频下出现幅值衰减或相位滞后，从而影响了信号的精度。这种现象在高频动态环境下尤为显著，可能会导致测量误差的累积。因此，在高频应用中，传感器的频率响应特性需要进一步优化，以减少高频信号的衰减和误差，提高测量的精度和可靠性^[2]。

1.3 线性度与迟滞特性

线性度和迟滞特性是力传感器的重要性能指标，直接影响动态测量的准确性与稳定性。线性度反映输出信号与施加载荷之间的偏离程度，是衡量传感器在不同加载条件下响应一致性的标准。通常，力传感器的线性度误差范围在0.02~0.05 mV/V 之间。这种误差与传感器的弹性体材料的均匀性和应变片的布置设计密切相关。在实际应用中，由于材料的非均匀性和应变片布置的不对称，传感器的线性度可能受到不同程度的影响，导致输出信号在不同加载下偏离预期值。

为了提高线性度，通常采取的措施包括，选择

高均匀性合金材料作为弹性体，并采用优化的应变片对称分布结构。这种设计有助于减少由于材料不均匀性引起的误差，从而确保传感器输出的信号更接近真实施加的力值。通过这些优化措施，传感器的线性度偏差可以有效控制在0.01 mV/V 以内，从而满足高精度测量的要求。实验数据显示，经过优化设计的力传感器在0~100 N 的加载范围内，其线性度误差控制在0.01 mV/V 以下，能够为动态测量提供更高的准确度。

迟滞特性描述的是在加载与卸载过程中传感器输出信号的差异性。这种误差通常源自材料的滞弹性特性和传感器内部的机械摩擦现象。当施加加载力后，力传感器的弹性体和应变片会发生形变，但在卸载过程中，部分形变会因为滞弹性效应而不完全恢复，导致输出信号与施加载荷之间存在差异。迟滞误差的范围通常为0.03~0.06 mV/V，具体值取决于材料的滞弹性和传感器设计。为减小迟滞误差，可以选择低滞弹性的材料，并采用改进的机械结构设计，这样可以有效降低迟滞效应。在使用低滞弹性材料和优化机械结构的设计下，传感器的迟滞误差可降至0.03 mV/V 以内，确保高精度动态测量^[3]。采样速率，对迟滞特性的表现也有显著影响。较高的采样速率，能够更精确地捕捉到动态信号，进而抑制由迟滞现象引起的误差。在采样速率为1 kHz 时，传感器的信号处理能力更强，能够有效抑制迟滞误差。当采样速率低于500 Hz 时，由于响应延迟可能导致误差累积，迟滞现象变得更加明显。采用高采样率，有助于提升系统的动态响应能力，减少由迟滞现象导致的误差。

2 校准方法优化

2.1 动态加载装置改进

动态加载装置在力传感器校准中承担着提供精确可控动态加载力的任务，其性能直接决定校准精度。优化动态加载装置性能的核心在于，提升加载力的幅值、频率和加载速率的控制能力。传统加载装置在力值输出方面存在非线性误差，这些误差主要来源于驱动机构的滞后和机械传动系统的惯性效应。以量程为500 N 的加载装置为例，当加载频率达到50 Hz 时，传统电磁加载装置的力值输出稳定性误差为2 N，相对满量程误差为0.4%FS，超出高精度校

准的误差要求（一般要求小于0.1%FS）。为了提升加载装置的性能，引入了高动态性能的伺服驱动系统。采用低惯量、高响应的伺服电机以及精密滚珠丝杠传动设计，可有效减少系统滞后并提升动态响应速度，从而大幅提高力值输出的控制精度。实验对比显示，量程为500 N 的伺服加载装置在加载频率50 Hz 时，输出力误差由传统电磁加载装置的2 N 降低至0.5 N，相对满量程误差降低至0.1%FS。动态加载性能提升，在高频加载条件下仍能满足精度要求。进一步优化还包括加载信号闭环控制系统的改进。采样频率从1 kHz 提升至5 kHz 后，反馈信号的实时性增强，使得加载力输出的波动幅值减少约1.2 N。在伺服加载装置中，信号闭环控制显著提高了加载力的平稳性和精确性，使动态加载过程中力值输出的误差趋于稳定。优化后的动态加载装置，能够满足频率范围1~100 Hz、加载力幅值0~500 N 的校准需求，并在高频加载条件下提供更高的精度与可靠性。

2.2 测量不确定度建模

测量不确定度建模用于量化测量误差来源并分析其传递机制，以提高测量精度。动态校准的不确定度主要受动态加载装置输出波动、传感器非线性误差、环境干扰及信号处理误差影响。在50 Hz 加载条件下，量程为500 N 的动态加载装置，其输出波动标准差约为1.2 N，表现出小幅周期性变化。对于灵敏度2 mV/V、量程 500 N 的电阻应变式传感器，非线性误差为0.08 mV/V，对应的力值误差约20 N，经过仪表端校准，可符合高精度测量要求。信号处理系统的量化误差及动态失真受采样率影响，在10 kHz 采样率下可控制在0.15 N 以内，而在1 kHz 时误差可能累积至0.4 N。基于误差传递模型，各误差源叠加后，总不确定度在量程范围内约为 ± 2.5 N，为动态校准提供可靠的高精度测量依据。测量不确定度的综合计算公式如下：

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

其中，U 为合成测量不确定度， u_i 为各独立误差分量的不确定度。结合动态校准实验数据，输出波

动、非线性误差和信号处理误差的合成不确定度为0.85 N，说明校准系统的整体误差水平已接近设计要求的1 N 阈值。

2.3 多参数耦合校准技术

在动态校准过程中，由于传感器各参数间存在明显耦合关系，单一参数校准难以全面反映其在复杂工况下的真实响应特性。因此本文引入多参数耦合校准技术，综合考虑灵敏度、频率响应及非线性误差的相互作用，提高校准精度。以额定输出为2 mV/V（满量程500 N）的力传感器为例，其单位灵敏度约为0.004 mV/V/N。实验中，在50~150 Hz 频段内灵敏度波动范围为0.0038~0.0042 mV/V/N，频率变化引起的灵敏度变化率约为 4×10^{-6} mV/V/N/Hz，表明频率对灵敏度的影响虽小但具有非线性趋势。经过多参数耦合校准后，整体输出误差降低了约0.02 mV/V，约为满量程输出的1%，在合理范围内显著改善了精度。此外，加载力与环境温度的耦合也被纳入考虑，实验显示在温度从25℃升高至75℃时，灵敏度由0.0040 mV/V/N下降至0.0038 mV/V/N，灵敏度衰减率为 -4×10^{-6} mV/V/N/℃，且在高加载力条件下，温度影响呈减弱趋势，说明热干扰主要集中在低负载状态。以上结果验证了多参数耦合校准在提升传感器整体精度与环境适应性方面的有效性。为量化这一影响，多参数校准技术引入灵敏度衰减因子的修正公式：

$$S' = S \cdot (1 - \alpha \cdot T)$$

其中，S'为校准后的灵敏度值，S为校准前灵敏度值， α 为温度衰减因子，T为温度变化量，单位为℃。修正公式的应用使得在复杂温度条件下的灵敏度校准误差从0.3 mV/V减小到0.1 mV/V提升了校

准结果的准确性。

3 结语

本文围绕动态力学计量中的力传感器特性及校准方法优化展开研究，分析了灵敏度、频率响应、线性度和迟滞特性对动态测量性能的影响，提出了动态加载装置改进、测量不确定度建模和多参数耦合校准技术的优化方案，并在动态称重系统中验证了校准方法的效果。优化后的校准方法提升了系统的测量精度、动态响应能力和频率带宽，降低了数据丢失率和测量误差，改善了复杂动态环境下的性能稳定性。成果提供了动态测量技术在交通、工业等领域的推广应用技术支持，也为更高精度的动态力学计量发展奠定了理论与实践基础。未来的研究可进一步结合智能算法和新型材料技术，推动动态计量技术的多场景创新应用。

参考文献

- [1] 褚文敏, 周蒯, 滕利臣. 基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法[J/OL]. 仪器仪表学报, 1-13[2025-01-20].
- [2] 亓振广, 王桂从, 褚宏博等. 采用长短期记忆神经网络的压电式六维力/力矩传感器解耦算法[J/OL]. 西安交通大学学报, 1-11[2025-01-20].
- [3] 温丽钦, 赖征创, 杨晓翔. 非实物动态汽车衡动态校准装置动态力加载系统的设计与分析[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(03): 20-24.

作者简介

杨思寒（1992—）女，山东省阳谷县，助理工程师。研究方向：力学计量专业。