

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905804

差分式自阻尼位移传感器传感特性研究^{*}

曾涛^{1,2},王大伟³,谭久彬³,张钟华⁴,曹观标⁵

(1. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027; 2. 中国计量大学机电工程学院 杭州 310018; 3. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院 哈尔滨 150001; 4. 中国计量科学研究院电学所 北京 100029; 5. 浙江春晖集团有限公司 绍兴 312300)

摘要:“能量天平法”是一种基于机械电磁能量平衡的普朗克常数测量方法,该方法因存在一项由线圈特征矢量的非对准状态引起的“特征矢量对准能量误差”,其普朗克常数测量不确定度难以降低至 1×10^{-8} 。为实现对准能量误差的精确补偿,针对能量天平线圈垂向运动过程中的残留水平位移的精确测量问题,提出一种基于电磁自阻尼直接垂向测量参考的差分线面式位移传感测量方法。为避免间接测量参考的调整过程引入系统误差进而导致测量精度降低,线面式位移传感器利用细丝电极作为直接垂向测量参考;设计差分式三电极电容结构用于抑制单端电容非线性特性;将另两个电极的表面形状设计为相互正对的外圆柱面,利用圆柱面在横截面内的几何形状各向同性抵消姿态倾斜对测量结果的影响,提高传感器对复杂测量条件的适应能力;采用电磁阻尼器稳定细丝电极,保证测量结果的准确性。实验结果表明,在正常工作量程范围内,差分式自阻尼位移传感器的合成扩展不确定度约为 $2.81\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词: 差分式位移传感器;水平位移检测;直接垂向参考;电磁自阻尼

中图分类号: TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the sensing characteristics of differential self-damping displacement sensor

Zeng Tao^{1,2}, Wang Dawei³, Tan Jiubin³, Zhang Zhonghua⁴, Cao Guanbiao⁵

(1.School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3.School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4.Institute of Electricity, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 5.Zhejiang Chunhui Group Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: “Joule balance method” is a Planck constant measurement method based on mechanical electromagnetic energy balance. Due to the existence of a “feature vector alignment energy error” caused by the non-alignment state of the coil feature vector, the measurement uncertainty of the Planck constant can hardly be reduced down to 1×10^{-8} . In order to realize the accurate compensation of the alignment energy error, aiming at the precise measurement issue of the residual horizontal displacement during the vertical movement process of the energy balance coil, a differential line-surface displacement sensing measurement method based on the electromagnetic self-damping direct vertical measurement reference is proposed in this paper. In order to avoid the introduction of the system error in the adjustment process of indirect measurement reference, which leads to the reducing of the measurement accuracy, the line-surface displacement sensor uses a thin wire electrode as the direct vertical measurement reference. The differential capacitance structure of three electrodes is designed to inhabit the nonlinearity of the single-end capacitor. The surface shape of the other two electrodes is designed as mutual opposite outer cylinder, which uses the geometric shape isotropy of the cylinder surface in the cross section to offset the influence of attitude tilt on the measurement results, so as to improve the adaptability of the sensor to complex measurement conditions. And an electromagnetic damper is used to stabilize the thin wire electrode and ensure the accuracy of the measurement results. The experiment

收稿日期: 2019-11-12 Received Date: 2019-11-12

^{*} 基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ20E050015)项目资助

results show that the synthetic extended uncertainty of the differential self-damping displacement sensor is about $2.81\ \mu\text{m}$ within the normal working range.

Keywords: differential displacement sensor; horizontal displacement detection; direct vertical reference; electromagnetic self-damping

0 引言

国际单位制(international system of units, SI)是全世界应用最广泛的单位制。该单位制包含7个基本单位,其中质量的单位千克是最晚摆脱实物基准(国际千克原器IPK)进行复现的单位。使用实物作为单位基准的最大问题,是其量值会受多种外界因素影响而随时间推移发生未知漂移。由此造成的千克量值的不确定性将影响质量量值的溯源准确性。为实现千克计量溯源基准的高稳定性、高准确性,并使千克基准易于保存和复现,国际计量学界的普遍做法是将千克单位溯源至基本物理常数。2017年,国际计量大会通过了关于SI修订的“1号决议”,正式重新定义SI的质量单位千克^[1-2]:当普朗克常数 h 以单位 $\text{J}\cdot\text{s}$,即 $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 表示时,将其固定数值取为 $6.626\ 070\ 15\times 10^{-34}$ 来定义 kg ,其中 m 和 s 用真空光速 c 和铯133原子基态的超精细能级跃迁频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。

质量单位重新定义后,千克的最高基准溯源到了普朗克常数 h 上。各国在重新定义之前利用砝码质量测量普朗克常数的装置(功率天平^[3-7]/能量天平^[8-11]、硅球^[12-13])将反过来用来对质量进行溯源,装置的不确定度则决定了溯源质量的不确定度。目前,我国能量天平装置的不确定度在 2.4×10^{-7} 水平,而国外最高的功率天平装置不确定度为 9×10^{-9} 。我国能量天平装置虽然目前是国际上为数不多的可以将质量溯源到普朗克常数上的装置,但其不确定度水平还有待提高。进一步减小能量天平实验的不确定度,可降低SI单位重新定义后我国质量最高基准的不确定度,同时可为其他国家和地区提供千克基准的溯源服务。

迄今为止,能量天平法的一项系统误差“线圈特征矢量对准误差”未能进行精确测量补偿,导致能量天平方案的不确定度被限制于 10^{-7} 量级难以进一步提高。此项系统误差未实现精确补偿的原因之一为对准能量误差的补偿需要检测能量天平“线圈垂向运动过程中的残留水平位移量”,而目前其传统检测方法因使用间接垂向参考,其检测精度不满足能量天平方案精度要求。精准的垂向参考是残留水平位移量的测量依据,功率天平装置中的垂向参考通常由水平液面产生^[14-15],即构建引导光路使激光束垂直入射水平液面进而获取垂向反射激光束,而该反射光束即所求垂向参考。然而,由于水平液面自身稳定性易受外界扰动(如气流和振动)的影响,需要气流保护罩和隔振台等实验设备的支持,否则该方法方向检

测精度将无法保证。另一方面,垂向激光束是通过调整入射激光束方向垂直照射水平液面获得的,属于间接垂向参考;在上述光束方向调整过程中,垂向激光束的方向准确性会受到人为因素和测量仪器精度的影响,进而可能导致该垂向参考的方向精度降低。

针对能量天平线圈垂向运动过程中的残留水平位移量的精确测量问题,本文提出一种基于电磁自阻尼直接垂向参考的差分自阻尼位移传感器。利用有限元仿真对传感器的非线性误差进行分析,通过实验探究传感器的传感特性,并以此为依据评估了传感器的不确定度。

1 差分自阻尼位移传感器测量原理

精确测量能量天平线圈垂向运动过程中的残留水平位移量 (x, y) ,进而补偿线圈运动矢量在垂向上的非对准状态引起的测量误差,是保证能量天平方案测量精度必不可少的步骤。

为实现线圈垂向运动中水平位移的精确测量,本文提出一种基于自阻尼直接垂向测量参考的差分电容位移传感测量方法,该方法对应测量对象激励线圈-磁轭模块和测量装置如图1所示。被测对象为能量天平中沿垂向运动的磁场激励线圈,其被嵌入圆柱体电工软铁磁轭内,而磁轭与线圈可在一套位于磁轭底部的直线位移机构的推动下沿垂向运动。由于激励线圈内嵌于磁轭内部,可直接用圆柱体磁轭的水平位移测量结果表征激励线圈的水平位移量。

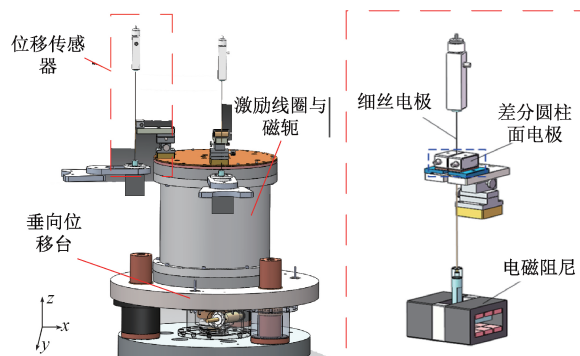


图1 能量天平的激励线圈-磁轭模块以及差分自阻尼位移传感器

Fig.1 Excitation coil-yoke module of joule balance and the differential self-damping displacement sensor

差分自阻尼位移传感器主要由细丝电极,差分双圆柱面电极,电磁阻尼和电容电桥组成,如图2所示。圆柱面电极被固定于磁轭的上表面随激励线圈和磁轭

一起做垂向运动;静态细丝电极是水平位移测量的直接垂向参考,因此在测量过程中细丝电极一直保持静止状态。

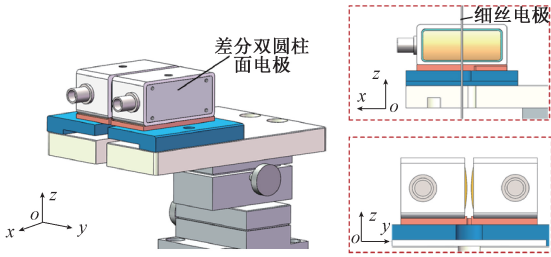


图 2 差分位移传感器

Fig.2 Differential displacement sensor

单端电容式传感器和差动电容式传感器在精密测量领域都有广泛的应用,而本文选择采用差动电容式传感器测量水平位移是为了获取更好的测量灵敏度和非线性。为便于分析对比单端电容和差分电容的特性,以最简单的平行板电容为例,在电极主要几何参数相同且不考虑条纹效应的情况下,差分电容的灵敏度是单端电容灵敏度的2 倍,非线性程度仅为单端电容的 1/2 次幂量级,因此差分电容至少在灵敏度和非线性两方面优于单端电容。

在磁轭的运动过程中,除了存在垂向位移和少量水平位移,还有可能存在由于垂向位移台导轨磨损变形导致的微小倾斜姿态变化。这将导致圆柱面电极的姿态一同发生变化,进而对电容测量结果造成影响。为最大限度地抑制倾斜姿态变化的影响,将圆柱面电极的表面曲率半径设计为等于圆柱体磁轭的横截面半径,利用圆柱面在横截面内的几何形状各向同性来抵消姿态倾斜对测量结果的影响;同时相较于传统平面电极,圆柱面电极的设计可明显简化传感器标定之前的电极姿态调整步骤,保证传感器在标定状态和实际测量状态的测量姿态一致性。

2 细丝电极特性分析

线面式位移传感器的自阻尼细丝电极在重力作用下能够自然保持竖直姿态,无需借助外部调整,属于直接垂向参考,如图 3 所示。细丝电极是测量过程中的垂向参考,同时也作为差分位移传感器的电极,其应具备导电性、直线度和稳定性,并且自身不能存在塑性形变。为了保证细丝电极不会因自身存在弯曲塑性形变而造成的测量参考失效,选用脆性材料二氧化硅作为细丝的加工原材料,使得细丝在完全断裂之前不产生塑性形变。为了确保细丝能够导电,采用真空电子束蒸镀法在二氧化硅细丝表面蒸镀一层 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 厚的金膜,如图 4 所示,使细

丝的电阻值小于 $1\text{ }\Omega$ 。为了确保细丝电极具有合格的直线度,选用“加热炉熔融+重力牵引”的方法制备细丝电极;在制备完成时,细丝的直线度由其自身重力牵引保证。为抑制外界随机扰动对细丝电极稳定性的影响,本文设计了被动电磁阻尼器稳定细丝电极,如图 5 所示,即让重锤主体在环形磁轭产生的换向磁场中切割磁感线从而引起电涡流,电涡流的能量由细丝和重锤减小的动能转化而来。电磁阻尼保证了细丝电极的稳定性和抗干扰性能。

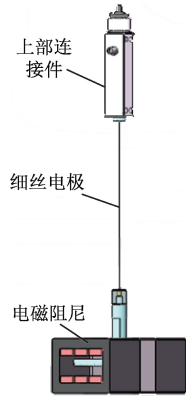


图 3 细丝电极原理

Fig.3 Principle of the thin wire electrode

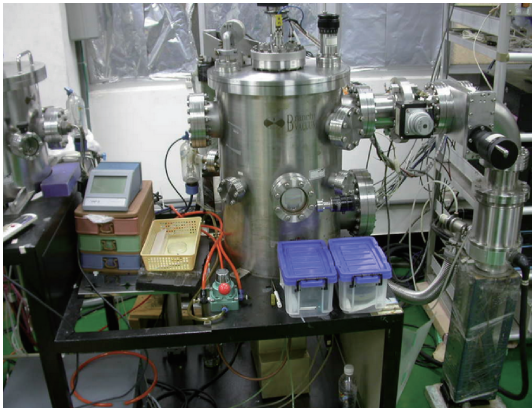


图 4 真空电子束蒸镀设备

Fig.4 Vacuum electron beam evaporation equipment

3 线面式位移传感器非线性误差分析

3.1 细丝电极直径非均匀性引起的非线性误差

细丝电极是垂向运动残留水平位移测量的垂向参考,具有无塑性形变、高导电率、高直线度和良好稳定性等性质;然而若细丝电极在自身全长范围内的直径均匀性无法达到精度要求,细丝直径的非均匀性也将引起细丝与差分双圆柱电极之间的相对空间位置分布的非均匀性,从而对传感器测量结果造成影响。因为由细丝直径

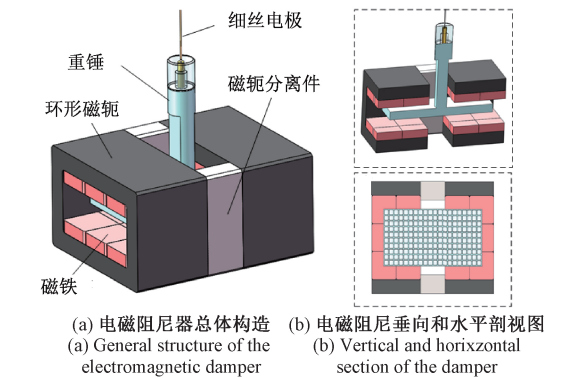


图 5 电磁阻尼器
Fig.5 Electromagnetic damper

变化引发的电极间距和正对面积的变化均为非线性关系,所以细丝直径的非均匀性引入的测量误差为非线性误差。

细丝直径均匀性作为垂向参考的关键参数,其品质可利用合理的细丝制备工艺保证在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右。采用扫描电子显微镜(SEM)在真空环境下对细丝的直径进行测量以验证细丝的均匀性,图 6 所示为 SEM 测得的细丝表面形貌图像。表 1 所示为 SEM 测得细丝全长各处直径值,根据表 1 可知,细丝全长各处直径的总变化量约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。通过静电场有限元仿真分析细丝直径变化 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时造成电容测量结果误差,由如表 2 所示有限元计算结果可知,细丝电极直径变化 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时造成电容测量结果相对误差约为 6×10^{-4} ,对应水平位移测量误差约为 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

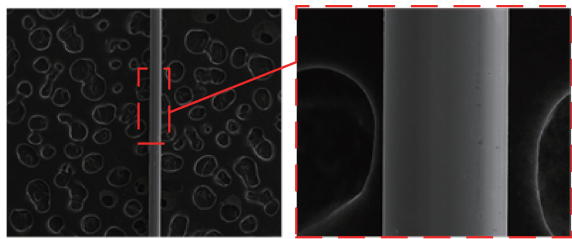


图 6 扫描电子显微镜观测得到的细丝电极表面图像
Fig.6 The surface images of the thin wire electrode observed with SEM

3.2 线面电极边缘效应引起的非线性误差

线面式位移传感器检测的是细丝电极和外圆柱面电极之间的水平相对位移(图 7 所示方向 1),然而实际情况下很可能也存在沿平行于圆柱面中轴线方向的位移(图 7 所示方向 2);这部分“额外”位移分量将由于静电场的边缘效应给激励线圈水平位移测量结果引入非线性误差。若要使细丝与差分双圆柱面之间的静电场分布不

表 1 扫描电子显微镜测得细丝电极全长各处直径值
Table 1 The diameters along the thin wire electrode measured with SEM

细丝电极上的测量位置/mm	细丝直径/ μm
40	124.7
60	124.7
80	124.8
100	124.4
120	124.4
140	124.5
160	124.9
180	124.5

表 2 细丝直径变化引起电容测量误差的仿真结果
Table 2 Simulation result of the capacitance measurement error caused by the thin wire diameter variation

细丝直径/ μm	电容仿真结果/pF
123	0.580 13
123.5	0.580 48
124	0.580 65
124.5	0.581 06
125	0.581 37
125.5	0.581 75
126	0.582 17
126.5	0.582 59

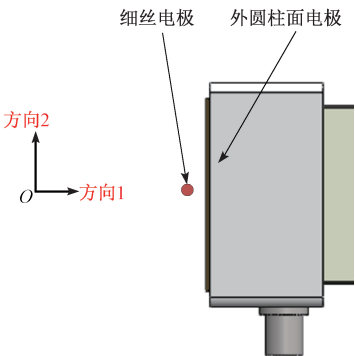


图 7 线面式位移传感器结构俯视图
Fig.7 Top view of the line-surface displacement sensor structure

受边缘效应影响,进而使测量结果不受沿方向 2 的相对位移的影响,由静电场相关理论可知,此时需要将圆柱面在方向 2 上的尺寸设计为无限长。

为确定沿方向 2 的相对位移造成的非线性测量误差的量值范围,利用静电场有限元仿真分析计算当方向 1

无位移时方向 2 的位移引起的电容变化,对应细丝电极在方向 2 上的位移变化示意图和仿真计算结果分别如图 8 和 9 所示。根据仿真结果,当细丝沿方向 2 偏离圆柱面中央等分线(图 8 中心实线位置)1 mm 时,传感器电容值变化约 1×10^{-4} pF,相当于在方向 1 上发生了约 $0.6 \mu\text{m}$ 的位移。而实际情况下能量天平实验中,细丝电极沿方向 2 上的位移不会大于 0.03 mm,对应等效在方向 1 上的相对位移不会大于 $0.02 \mu\text{m}$ 。

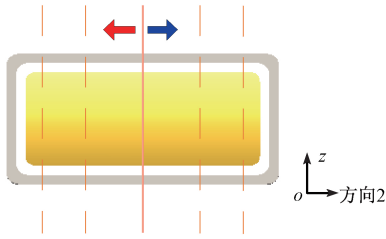


图 8 仿真实验中细丝电极沿方向 2 发生位移

Fig.8 Schematic of the thin wire electrode

moving along the direction 2 in simulation experiment

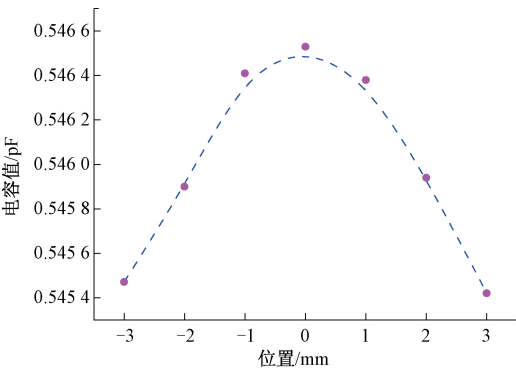


图 9 仿真获得的细丝电极沿方向 2 上发生位移时的电容值变化情况

Fig.9 Variation of the capacitance value as the thin wire electrode moves in direction 2 obtained in simulation

4 差分自阻尼位移传感器特性实验

4.1 实验系统

差分自阻尼位移传感器特性实验系统如图 10 所示。整个实验系统被放置于光学平台上,细丝电极悬挂于三维可调支架的一端,差分双圆柱面电极可随直线位移台沿其导轨方向运动。使用 SIOS 激光干涉仪 SP-DIS 测量位移传感器电极间的相对位移值,进而标定线面式位移传感器的电容-位移特性,该激光干涉仪的频率稳定性优于 2×10^{-8} 。差分线面式位移传感器的电容检测单元为精密电容电桥 AH2700A,该电桥的测量分辨力与最高测量精度分别为 0.8 aF 和 10 ppm。

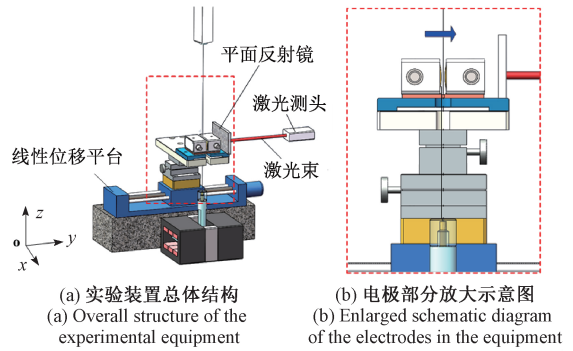


图 10 差分自阻尼位移传感器特性实验装置

Fig.10 Experiment equipment for the characteristic of the differential self-damping displacement sensor

4.2 位移传感器标定实验

使用激光干涉仪对差分自阻尼位移传感器进行标定实验。双圆柱面电极随直线位移平台移动,并实时采集差分电容值与电极间相对位移值,实验结果如图 11 所示。标定曲线表明,在 $500 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 范围内,相对位移和差分电容值之间的关系已接近线性(明显比图 11 中的蓝色虚线框内的电极电容特性曲线更趋于线性)。在 $500 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 范围内对标定曲线进行一阶拟最小二乘拟合,拟合曲线已用红色标注,其拟合一阶函数的相关参数如表 3 所示,最大拟合误差 0.002 pF。另外值得注意的是图中位移值为 0 的点并不表示细丝电极与外圆柱面电极之间的距离为 0,而是表示在标定过程开始时电极的初始相对位置。

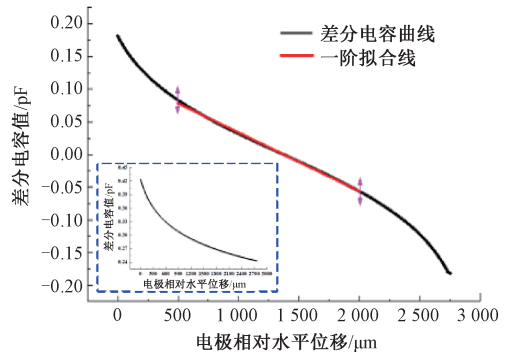


图 11 差分自阻尼位移传感器标定曲线

Fig.11 Calibration curve of the differential self-damping displacement sensor

4.3 分辨力实验

为了确定差分自阻尼位移传感器的灵敏度,以下进行以 $0.05 \mu\text{m}/20 \text{ s}$ 为步进速度的差分自阻尼位移传感器的分辨力实验,其结果如图 12 所示。由于直线位移台运动速度的控制精度不高,分辨力曲线中的“阶跃”跳变

表 3 差分自阻尼位移传感器标定曲线一阶拟合结果
(相对位移范围 500~2 000 μm)

Table 3 The first-order fitting result of the calibration curve of the differential self-damping displacement sensor (relative displacement range: 500~2 000 μm)

参数	数值
拟合曲线函数	$y=a+bx$
斜率 b	-0.847×10^{-5}
截距 a	0.123
最大拟合误差/pF	0.002

形状并不理想。由图 12 可得差分自阻尼位移传感器的分辨力约为 0.05 μm。

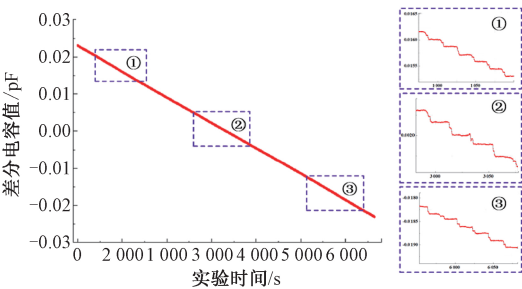


图 12 差分自阻尼位移传感器分辨力测试曲线
Fig.12 The resolution measurement curve of the differential self-damping displacement sensor

4.4 短期稳定性实验

为考察细丝电极在电磁阻尼作用下对抗外界扰动的能力,进行短期稳定性实验。实验过程中,外圆柱面电极与直线位移平台保持不动,细丝电极仍悬挂于支架一端;此时位移传感器所测得的微小位移变化主要由外界扰动引起。实验中电磁阻尼摆放情况如图 13 所示,实验结果如图 14 所示,在 15 min 内传感器所测得位移的变化小于 0.1 μm,初步验证了细丝末端的液体阻尼装置的有效稳定作用。

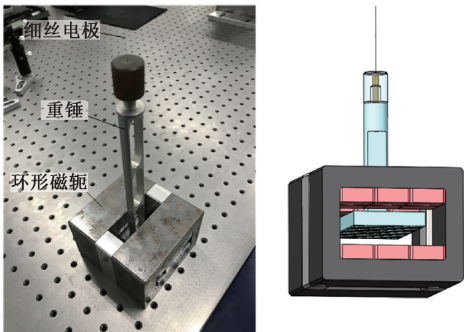


图 13 实验过程中电磁阻尼器

Fig.13 Photo of the electromagnetic damper in the experiment

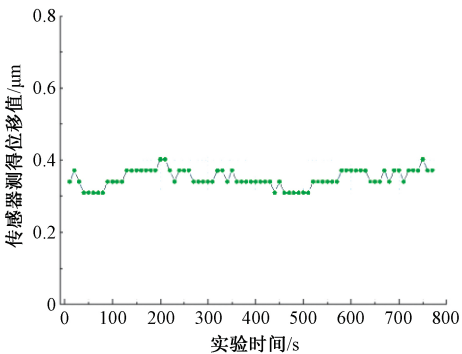


图 14 位移传感器稳定性实验结果
Fig.14 The stability experiment result of the displacement sensor

4.5 差分自阻尼位移传感器不确定度评估

根据仪器精度理论相关知识,综合前文中对差分位移传感器各项性能参数的分析结果,可得表 4 所示不确定度评估。其中细丝电极的直径非均匀性引起的不确定度约为 1.40 μm,电极间静电场边缘效应引起的不确定度约为 0.02 μm,传感器稳定性引起的不确定度约为 0.10 μm。通过计算可得该传感器的合成扩展不确定度约为 2.81 μm。

表 4 位移传感器的不确定度评估表

Table 4 Uncertainty evaluation table of the displacement sensor

不确定度分量	评估值/μm
细丝电极直径非均匀性	1.40
线面电极间静电场边缘效应	0.02
传感器短期稳定性	0.10
合成扩展不确定度	2.81

5 结 论

针对能量天平线圈垂向运动过程中的残留水平位移量的精确测量问题,本文提出一种基于自阻尼直接垂向测量参考的线面式位移传感器。细丝全长各处直径的总变化量约为 0.5 μm,由有限元计算结果可知其造成电容测量结果相对误差约为 6×10^{-4} ,对应水平位移测量误差约为 1.4 μm。能量天平实验中,细丝电极沿方向 2 上的位移不大于 0.03 mm,根据仿真结果可知对应等效在方向 1 上的相对位移不大于 0.02 μm。差分自阻尼位移传感器的合成扩展不确定度约为 2.81 μm。

参考文献

[1] CHO A. World poised to adopt new metric units Kilogram and other units will be derived from fixed constants of nature[J]. Science, 2018, 362(6415):625-626.

- [2] 张钟华,李世松. 质量量子标准研究的新进展[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 1921-1926.
ZHANG ZH H, LI SH S. New achievement of the quantum mass standard[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2013, 34(9): 1921-1926.
- [3] THOMAS M, ZIANE D, PINOT P, et al. A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air[J]. Metrologia, 2017, 54: 468-480.
- [4] ROBINSON I A, SCHLAMMINGER S. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass[J]. Metrologia, 2017, 53(5): A46-A74.
- [5] STEINER R L, GILLESPIE A D, FUJII K, et al. The NIST watt balance: progress toward monitoring the kilogram[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1997, 46(2): 601-604.
- [6] STEELE A G, MEIJA J, SANCHEZ C A. Reconciling Planck constant determinations via watt balance and enriched-silicon measurements at NRC Canada[J]. Metrologia, 2012, 49(1): L8-L10.
- [7] EICHENBERGER A, BAUMANN H, JECKELMANN B. The METAS watt balance Mark II experiment[C]. 2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. IEEE, 2014: 426-427.
- [8] LI Z, ZHANG Z, LU Y, et al. The Design and construction of the joule balance NIM-2[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017, 66(6): 1329-1336.
- [9] LI Z, ZHANG Z, LU Y, et al. The first determination of the Planck constant with the joule balance NIM-2[J]. Metrologia, 2017, 54(5): 763-774.
- [10] 李辰,贺青,张钟华,等. 能量天平反馈系统的改进[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 987-993.
LI CH, HE Q, ZHANG ZH H, et al. Improvements in the feedback system of Joule balance[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2014, 35(5): 987-993.
- [11] 许金鑫,张钟华,李正坤,等. 能量天平不确定度分析与整体系统改进[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1168-1175.
XU J X, ZHANG ZH H, LI ZH K, et al. Uncertainty analysis of the Joule balance method and the improvements of whole system[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2017, 38(5): 1168-1175.
- [12] ANDREAS B, AZUMA Y, BARTL G, et al. Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal[J]. Physical review letters, 2010, 106(3): 1-4.

- [13] VOCKE R D, RABB S A, TURK G C. Absolute silicon molar mass measurements, the Avogadro constant and the redefinition of the kilogram[J]. Metrologia, 2014, 51(5): 361-375.
- [14] EICHENBERGER A L, BUTTY J, JEANNERET B, et al. A new magnet design for the METAS Watt balance[C]. 2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 2004: 55-57.
- [15] GILBERT O, BIELSA F, JUNCAR P, et al. Optical alignment tool for the LNE and METAS watt balance projects [C]. 2010 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 2010: 518-519.

作者简介



曾涛, 2011年、2013和2017年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为中国计量大学讲师和浙江大学在职博士后, 主要研究方向为精密测量与仪器技术。

E-mail: zengtao806@sina.com

Zeng Tao received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Harbin Institute of Technology in 2001, 2013 and 2017, respectively. Now, he is a lecturer in China Jiliang University and an on-the-job postdoctor in Zhejiang University. His main research interests include precision measurement and instrument technology.



王大为, 2013年于河北工业大学获得学士学位, 2016年于太原理工大学获得硕士学位, 现为哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密机械与仪器技术。

E-mail: 16B901020@stu.hit.edu.cn

Wang Dawei received his B.Sc. degree in 2013 from Hebei University of Technology, and received his M.Sc. degree in 2016 from Taiyuan University of Technology. Now, he is a Ph.D. candidate student in Harbin Institute of Technology since 2016. His main research interests include precision machinery and instrument technology.



张钟华, 1965年毕业于清华大学, 现为中国工程院院士、中国计量科学研究院首席研究员, 主要研究方向为精密电磁测量、量子计量基准。

E-mail: zzh@nim.ac.cn

Zhang Zhonghua graduated from Tsinghua University in 1965. Now he is an academican of the Chinese Academy of Engineering and principle research fellow in Chinese National Institution of Metrology. His main research interests include precision electromagnetic measurement, quantum measurement benchmark.