

电磁力配衡一体化柔性铰链传感器设计方法

刘小虎¹, 孙传鹏², 钱璐帅³, 董阳⁴, 赵伟¹, 李世松¹

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 北京云道智造科技有限公司, 北京 100192;
3. 中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018; 4. 沈阳创原计量仪器有限公司, 沈阳 110131)

摘要: 作为电磁力配衡重量检测器的核心部件,一体化柔性铰链传感器的测力灵敏性,决定着电磁力配衡重量检测器称量物体质量的分辨率。为实现更高分辨率的质量称量,文中聚焦电磁力配衡一体化柔性铰链传感器设计方法研究,具体结合拉丁超立方采样和有限元方法,并采用二项式拟合,建立了微小铰链薄壁厚度与一体化柔性铰链传感器弹性系数之间关联关系数学模型,支撑一体化柔性铰链传感器弹性系数的快速、准确计算,大幅提升了一体化柔性铰链传感器的设计效率;提出一种基于电磁力和电容式微位移传感器的一体化柔性铰链传感器弹性系数测量方法,实现了对弹性系数的高效、准确测量;并对所制备的一体化柔性铰链传感器的弹性系数进行了仿真计算和实测,具体结果分别为263.4 N/m和328.2 N/m,基本处于同一量级。最后,文中探讨了在一体化柔性铰链传感器已基本达到灵敏性极限条件下,还可从电磁测量角度探索能实现更高微位移分辨率的检测技术,以进一步提升电磁力配衡重量检测器质量称量分辨率的可行性。

关键词: 电磁力配衡重量检测器; 一体化柔性铰链传感器; 质量称量分辨率; 弹性系数; 拉丁超立方采样; 位移检测分辨率

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.018

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2026)03-0176-09

Integrated flexible hinge sensor design approach for electromagnetic force compensation weight detector

LIU Xiaohu¹, SUN Chuanpeng², QIAN Lushuai³, DONG Yang⁴, ZHAO Wei¹, LI Shisong¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China. 2. Beijing Internet Based Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China. 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Zhejiang 310018, China. 4. Shenyang Chuangyuan Measuring Instrument Co., Ltd., Shenyang 110131, China)

Abstract: As the core component of the electromagnetic force compensation weight detector, the force measurement sensitivity of the integrated flexible hinge sensor directly determines the resolution of the electromagnetic force compensation weight detector to weigh the mass of object. To achieve higher resolution mass weighing, this paper focuses on the design method of the integrated flexible hinge sensor of the electromagnetic force compensation weight detector, specifically combines the Latin hypercubic sampling and finite element method, and adopts the binomial fitting, establishes a mathematical model of the correlation relationship between the thickness of the thin wall of the miniature hinge and the elasticity coefficient of the integrated flexible hinge sensor, which supports the fast and accurate calculation of the elasticity coefficient of the integrated flexible hinge sensor, and greatly improves the sensitivity of the force measurement of the integrated flexible hinge sensor. The design efficiency of the integrated flexible hinge sensor is greatly improved; a measurement method of the elasticity coefficient of the integrated flexible hinge sensor based on electromagnetic force and the capacitive micro-displacement sensor is proposed, which achieves efficient and accurate measurement of the elasticity coefficient. The elasticity coefficients of the prepared integrated flexible hinge sensor are simulated and measured, with the specific results of 263.4 N/m and 328.2 N/m, which are basically in the same order of magnitude. Finally, this paper discusses the feasibility of exploring detec-

基金项目: 国家重点研发计划专项(2022YFF0708600)

tion technologies that can achieve higher micro-displacement resolution from an electromagnetic measurement perspective to further enhance the mass weighing resolution of electromagnetic force compensation weight detectors, under the condition that the integrated flexible hinge sensor has basically reached its sensitivity limit.

Keywords: electromagnetic force compensation weight detector, integrated flexible hinge sensor, mass weighing resolution, elasticity coefficient, latin hypercube sampling, displacement detection resolution

0 引 言

电磁力配衡重量检测器,是一种精密质量测量仪器,其以电磁力精确配衡被测物体的重力,从而实现对被测物体质量的准确测量,具有高灵敏、高分辨的显著优势,在质量比较器^[1-2]、孔隙与密度测量仪^[3-4],以及功率/能量天平^[5-6]等高精度科学仪器研制领域中扮演着不可或缺的重要角色。

一体化柔性铰链传感器,是电磁力配衡重量检测器的核心部件,其所具有的测力灵敏性,直接决定着电磁力配衡重量检测器测量物体质量的分辨率。为以电磁力配衡重量检测器实现对物体质量的高精密测量,国内外不少计量学者针对一体化柔性铰链传感器的力学特性^[7-8]、磁体系统温度补偿方法^[9-11]等开展了一系列卓有成效的研究。本质上,一体化柔性铰链传感器是一个高灵敏性测力“杠杆”,即,在其一端施加电磁力(线圈电流),在其另一端放置被测物体,通过精密检测被测物体放置端的位移偏移量,并基于位移偏移信息进行电磁力调控,使“杠杆”维持在动态平衡状态,进而实现对被测物体质量的高灵敏、精确测量^[12-13]。

质量称量分辨率,是评估电磁力配衡重量检测器性能的关键参数,而该参数的优劣,决定于一体化柔性铰链传感器的测力灵敏性。测力灵敏性表征当在“杠杆”(即一体化柔性铰链传感器)的一端(自由端)施加微小质量(或力)时,该自由端在竖直方向发生较大位移偏移的能力。因此,如何提高一体化柔性铰链传感器测力灵敏性,是能否更优异实现电磁力配衡重量检测器质量称量性能的关键。

针对于此,文献[8, 14-15]提出了一套较为完善的一体化柔性铰链传感器测力灵敏性分析方法,其具体以一体化柔性铰链传感器的二维模型作为力学分析对象,采用线性刚体理论,对上述二维模型做静力学建模,再经对上述静力学模型的求解,厘清一体化柔性铰链传感器的多个不同结构参数对测力灵敏性的影响规律;并通过在一体化柔性铰链传感器的力传递横梁上施加配重,提升了一体化柔性铰链传感器的测力灵敏性。同时,为优化一体化柔性铰链传感器的动力学特性,该大学研究人员

还基于 Thiele-small 参数估计方法,从一体化柔性铰链传感器阻抗频率特性中提取出了对其动态行为影响最大的参数,旨在为一体化柔性铰链传感器反馈控制器的优化设计提供依据^[16]。天津大学刘庆刚等人建立了杠杠-平衡机构(即一体化柔性铰链传感器)的力学模型,并基于该模型,在不同参数配置下进行了分析计算,且还与有限元方法的计算结果进行了对比,得到的研究结论是,通过降低微小铰链的刚度、增加其平行四边形的臂长,以及合理选择杠杠比等,可有效提高杠杠-平衡机构的测力灵敏性^[7]。文献[13]针对一体化柔性铰链传感器微小铰链的薄壁厚度、圆弧表面粗糙度及位移重复性等参数的检测方法进行了规范性研究,旨在为保证一体化柔性铰链传感器生产制造的一致性提供指导。

微小铰链的薄壁厚度,是决定一体化柔性铰链传感器测力灵敏性的核心参数。然而,已有的基于力学理论构建的一体化柔性铰链分析模型中,一般将微小铰链设定为理想铰链,因此无法将它的薄壁厚度进行参数化建模。而有限元计算方法虽然可全方位考虑一体化柔性铰链传感器不同参数对测力灵敏性的影响,但存在迭代求解耗时、低效的问题。

针对上述问题,文中根据已有研究成果,在确立一体化柔性铰链传感器最优结构参数基础上,仅以微小铰链薄壁厚度作为优化参数,采用拉丁超立方采样方法对微小铰链的薄壁厚度进行采样,并以有限元方法计算不同采样点对应的一体化柔性铰链传感器的弹性系数,再通过二项式拟合,以建立一体化柔性铰链传感器的弹性系数与微小铰链薄壁厚度之间关联关系的解析数学模型,继而实现对一体化柔性铰链传感器弹性系数的快速计算,旨在为一体化柔性铰链传感器的高效设计提供依据。

基于上述,文中还制备了一体化柔性铰链传感器,提出了一种基于电磁力和电容式微位移传感器的一体化柔性铰链传感器弹性系数测试方法,旨在验证所提出的弹性系数高效计算方法的有效性。

最后,文中探讨了以电容式位移传感器替代光

电探测式位移传感器的方式,来提升位移检测分辨率,继而提高电磁力配衡重量检测器质量分辨率的可行性。

1 电磁力配衡重量检测器称量质量的基本原理

电磁力配衡重量检测器的基本架构如图 1 所示,其主要是由一体化柔性铰链传感器、电磁力发生单元、位移检测单元,以及闭环反馈单元等构成。其中,一体化柔性铰链传感器是由一块机械构件(如铝构件)整体切割而成的,主要包括三种铰链,即平行四边形铰链(4 个)、拉力铰链(2 个)和支点铰链(1 个)。在实际使用过程中,图 1 所示的一体化柔性铰链传感器的三个位置,即①、②、③,是被机械固定的,定义一体化柔性铰链传感器的支点铰链的左侧部分为左侧力臂;而支点铰链的右侧部分,包括拉力铰链和平行四边形铰链等部分为右侧力臂。所谓铰链,也称微小铰链,是一种中间薄、两侧厚的微小结构,其对机械力非常灵敏,即当将其一侧固定而另一侧施加一定的力时,施加有力的一侧会发生较大的位移偏移,如图 1 中的插图所示。

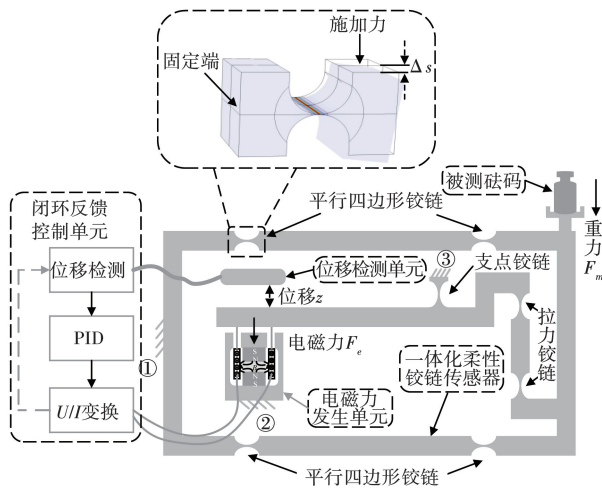


图 1 电磁力配衡重量检测器的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of the electromagnetic force compensation weight detector

图 1 中,电磁力发生单元是由一个线圈和磁体构成的,其中,磁体结构能够产生轴向均匀分布的径向磁场;线圈被放置于上述均匀磁场中,且与一体化柔性铰链传感器的左侧力臂固定连接。当线圈通以电流时,它会受电磁力 F_e 的作用,进而牵引一体化柔性铰链传感器的左侧力臂发生偏移。上述偏移量由位移检测单元准确测量,并反馈给闭环反馈单元,通过后续的 PID 调制来控制线圈电流大小,继而实现对一体化柔性铰链传感器左侧力臂位

移的精确控制。

当电磁力配衡重量检测器处于平衡状态时,被测物体(如砝码)的重力 $F_m = mg$ 与电磁力 $F_e = BIl$ 满足如下关系,即:

$$mgl_1 = BIl_2 \quad (1)$$

式中: m 为被测物体的质量; Bl 是磁几何因子,与磁体结构产生的磁场分布以及线圈的几何尺寸相关; I 为线圈通入的电流; l_1 和 l_2 分别代表一体化柔性铰链传感器左、右力臂的等效长度。

由式(1)可得到被测砝码的质量,即:

$$m = \frac{Bl}{g} \frac{l_2}{l_1} I \quad (2)$$

由式(2)可知,当完成对比例系数 $(Bl_2)/(gl_1)$ 的校准后,即可通过测量线圈电流,实现对被测物体质量的称量。

一体化柔性铰链传感器的弹性系数,是决定电磁力配衡重量检测器质量称量分辨率的关键参数,其定义为:使一体化柔性铰链传感器左侧力臂的端部处于自由状态,而在其右侧力臂的端部施加单位力 ΔF_m ,该单位力与其所引起的右侧力臂端部在竖直方向的位移量 Δz 的比值,即:

$$k = \frac{\Delta F_m}{\Delta z} \quad (3)$$

一体化柔性铰链传感器的弹性系数越小,施加单位力所引起的位移量就越大,如此,电磁力配衡重量检测器对位移检测单元的位移分辨率的要求也越低。因此,对一体化柔性铰链传感器的设计制备,应以减小其弹性系数作为主要目标之一。

2 一体化柔性铰链传感器弹性系数高效计算方法

理论上,微小铰链薄壁的厚度越小,一体化柔性铰链传感器的灵敏性越高。然而,受限于当前的铰链加工技术水平,微小铰链薄壁厚度的加工极限为 $50 \mu\text{m}$,若要进一步减小微小铰链薄壁的厚度,则铰链加工的成品率会随之大幅降低。

在现有微小铰链加工技术水平约束下,如何确定图 1 中三种类型微小铰链薄壁厚度的取值范围,以获得满足需求的弹性系数范围,这是亟需解决的难题。针对于此,文中结合拉丁超立方采样和有限元计算方法,以建立一体化柔性铰链传感器中微小铰链薄壁厚度与弹性系数之间关联关系的解析数学模型,从而在给定铰链薄壁厚度条件下,能够快速计算出一体化柔性铰链传感器的弹性系数,如

此,在后续的一体化柔性铰链传感器设计中,能指导对一体化铰链结构的高效设计与加工,而无需再进行相当耗时的重复性有限元计算。

文中设计了关于 yoz 平面对称的一体化柔性铰链传感器,如图 2 所示。其中,以 yoz 平面为对称面,其两侧分别有 4 个平行四边形铰链,1 个支点铰链;而 2 个拉力铰链的中心轴处于 yoz 平面内,电磁力 F_e 和被测物体的重力 F_m 分别施加于一体化柔性铰链传感器的左、右侧。

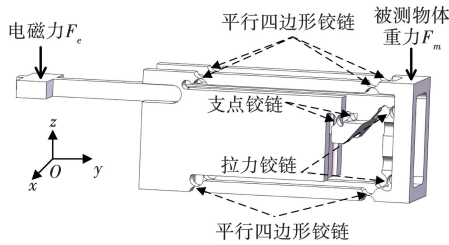


图 2 一体化柔性铰链传感器原理结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of integrated weighing unit

表征微小铰链薄壁厚度与一体化柔性铰链传感器弹性系数之间关联关系的数学建模过程,可划分为三个步骤:首先,采用拉丁超立方采样方法对微小铰链薄壁厚度进行采样;然后,针对微小铰链薄壁厚度的不同采样点,计算一体化柔性铰链传感器的弹性系数;最后,采用二次多项式,对微小铰链薄壁厚度参数与对应的由有限元计算得到的弹性系数进行拟合,进而得到表征微小铰链薄壁厚度与一体化柔性铰链传感器弹性系数关联关系的解析数学模型。利用上述解析模型,可以快速计算出不同微小铰链薄壁厚度对应的弹性系数,而无需再进行复杂、耗时很长的有限元计算。这里,对上述三个步骤阐述如下:

首先,对一体化柔性铰链传感器微小薄壁厚度进行拉丁超立方采样。采用参数 T_p 、 T_z 和 T_L 来表示三种类型的微小铰链(即平行四边形铰链、支点铰链和拉力铰链)薄壁的厚度,对这三个参数进行拉丁超立方采样的过程可分为以下 4 个步骤,即:

S_1 :根据一体化柔性铰链传感器实际设计经验,将参数 T_p 、 T_z 和 T_L 的取值区间分别设定为 $60 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 。由于支点铰链薄壁的厚度对一体化柔性铰链传感器弹性系数影响权重最大,因此,将它的薄壁厚度 T_z 的最大值设定为 $100 \mu\text{m}$ 。

S_2 :在仿真计算过程中,将采样点数设定为 100,为了获得 100 个采样点,针对每一个参数(即

T_p 、 T_z 和 T_L),将其取值区间均匀地划分为 100 个子区间,并从每个子区间中随机均匀地采样一个数,从而生成一维数为 100 且均匀分布的随机数组。

S_3 :将步骤 S_2 生成的每一参数对应的随机数组再进行一次随机排列,以保证由每一参数生成的随机数组之间互不相关。

S_4 :从每一个参数对应的随机数组中取出其第 i 个随机数,继而得到一个由三个随机数构成的采样点。按此类推,最终得到 100 个采样点。

然后,对一体化柔性铰链传感器弹性系数进行有限元计算。根据生成的每一个采样点,对图 2 所示的一体化柔性铰链传感器进行有限元建模与计算。在计算一体化柔性铰链传感器的弹性系数时,使左侧力臂的端部处于自由状态,将右侧力臂的端部位移 z 分别设定为 -0.02 mm 、 -0.01 mm 、 0 mm 、 0.01 mm 和 0.02 mm ;对于上述每个位移设定值,计算右侧力臂端部的受力,继而得到一个随位移 z 线性变化的受力特性曲线,而该线性特性曲线的斜率则表示一体化柔性铰链传感器的弹性系数。

图 3 展示了两种不同微小铰链薄壁厚度对应的一体化柔性铰链传感器的受力线性特性曲线。

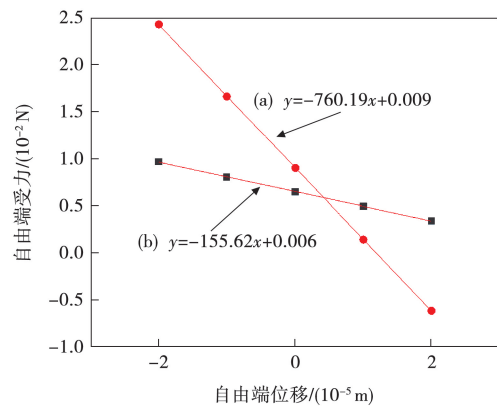


图 3 基于有限元计算的一体化柔性铰链传感器力学特性线性拟合曲线

Fig. 3 Linear fitting curve of mechanical properties of integrated flexible hinge sensors based on finite element calculation

图 3 中的特性曲线(a),表示 T_p 、 T_z 和 T_L 的取值分别为 $78.29 \mu\text{m}$ 、 $65.86 \mu\text{m}$ 、 $62 \mu\text{m}$ 时,一体化柔性铰链传感器的受力线性特性曲线,该特性曲线的斜率为 -155.62 ,即一体化柔性铰链传感器的弹性系数为 155.62 N/m ;同理,由图 3 中的特性曲线(b)可知,当 T_p 、 T_z 和 T_L 的取值分别为 $142.58 \mu\text{m}$ 、 $140.06 \mu\text{m}$ 、 $82.03 \mu\text{m}$ 时,一体化柔性铰链传感器

的弹性系数为 760.19 N/m。由图 3 可知,微小铰链薄壁的厚度越小,则一体化柔性铰链传感器的弹性系数越小,也即它的测力灵敏性也就越好。

最后,对一体化柔性铰链传感器弹性系数进行解析建模。计算出每一个采样点对应的一体化柔性铰链传感器的弹性系数后,采用二项式拟合方法,进而得到以下解析数学模型,即:

$$k = c_0 + c_1 \times T_p + c_2 \times T_L + c_3 \times T_Z + c_{11} \times T_p^2 + c_{12} \times T_p \times T_L + c_{13} \times T_p \times T_Z + c_{22} \times T_L^2 + c_{23} \times T_L \times T_Z + c_{33} \times T_Z^2 \quad (4)$$

式中: T_p 、 T_L 和 T_Z 的单位为 μm ,而其它系数的取值分别为 $c_0 = 114.9395 \text{ N/m}/\mu\text{m}$ 、 $c_1 = -1.9091 \text{ N/m}/\mu\text{m}$ 、 $c_2 = -2.2098 \text{ N/m}/\mu\text{m}$ 、 $c_3 = -2.8447 \text{ N/m}/\mu\text{m}$ 、 $c_{11} = 0.0242 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 、 $c_{12} = 0.0001 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 、 $c_{13} = -0.0003 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 、 $c_{22} = 0.0278 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 、 $c_{23} = -0.0005 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 、 $c_{33} = 0.0641 \text{ N/m}/\mu\text{m}^2$ 。

当确定了所有微小铰链薄壁的厚度后,将上述薄壁厚度的量值代入式(4),即可计算出一体化柔性铰链传感器的弹性系数,以帮助初步评估所设计的一体化柔性铰链传感器能否满足预设计制备的电磁力配衡重量检测器的质量称量分辨率。或者,在给定一体化柔性铰链传感器期望的弹性系数下,可以通过式(4)快速计算出不同微小铰链薄壁厚度的取值范围。结果,通过式(4)计算所得的弹性系数相对于有限元计算结果的相对误差小于 1%。

3 一体化柔性铰链传感器弹性系数测试

图 4 为文中实际制备的一体化柔性铰链传感器,其平行四边形铰链、支点铰链以及拉力铰链的薄壁厚度分别为 $80 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 。将上述微小铰链的薄壁厚度数据代入式(4),可得到一体化柔性铰链传感器的弹性系数为 263.4 N/m 。

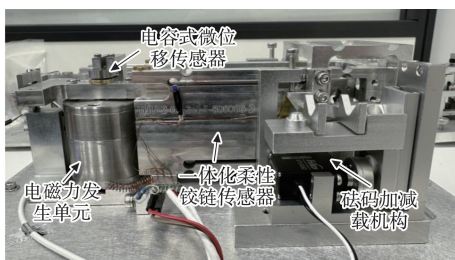


图 4 电磁力配衡重量检测器主要构件实物图

Fig. 4 Photographs of the main components of the electromagnetic force compensation weight detector

文中选用高精度电容式微位移传感器并配合

采用电磁力调控,以准确测定所制备的一体化柔性铰链传感器的弹性系数。测定弹性系数的过程,本质上就是测量右侧力臂的端部在竖直方向的位移 z (见图 1) 随标准砝码重力 $F_m = mg$ 变化的线性关系 $F_m = kz$,而该线性关系式的系数 k ,即为一体化柔性铰链传感器弹性系数的测量结果。

为此,文中实施了如下两个测试步骤。首先,测量标准砝码重力与电磁力发生单元中线圈电流之间的线性关系 $F_m = bI$;然后,在右侧力臂的端部处于自由状态的条件下,同时测量电磁力发生单元中的线圈电流 I 和左侧力臂的端部在竖直方向的位移,并将上述位移乘以力臂比 l_1/l_2 ,继而得到右侧力臂端部的等效位移 z 。再依据 I 和 z 的测量结果,通过线性拟合,继而得到电磁力发生单元中的线圈电流与右侧力臂的端部在竖直方向位移之间的线性关系 $I = cz$ 。最终,一体化柔性铰链传感器的弹性系数测量结果为 $k = bc$ 。对上述测量步骤具体阐述如下:

测量步骤 I:如图 5 所示,在一体化柔性铰链传感器的右侧力臂和左侧力臂,分别施加标准砝码重力 $F_m = mg$ 和电磁力 F_e ,以电容式微位移传感器检测左侧力臂的端部在竖直方向的位移 z ,并输出电压 $U = az$ (a 为电容式微位移传感器的比例系数);电压 U 由 3458A 八位半数字多用表进行测量,并提供给 PID 调控单元;以将一体化柔性铰链传感器维持在平衡状态为目标(即 $z = 0$),PID 对电压 U 进行调制,并控制电流源的输出电流 I ,继而调整电磁力发生单元产生的电磁力 F_e ,使其与标准砝码的重力维持平衡。通过多次改变标准砝码的质量 m ,当一体化柔性铰链传感器处于平衡状态时,测得对应的电磁力发生单元的线圈电流 I ,从而得到多组数据 (F_m, I),对上述测量结果进行线性拟合,最终得到标准砝码重力 F_m 与电磁力发生单元中线圈电流 I 之间的线性关系,即 $F_m = bI$ 。

测量步骤 II:如图 5 所示,在一体化柔性铰链传感器的右侧力臂的端部处于自由状态的条件下,由电磁力发生单元产生的电磁力,会使得一体化柔性铰链传感器的左侧力臂在竖直方向产生位移,电容式微位移传感器测量上述位移,并产生电压 U ;3458A 八位半数字多用表测量电压 U ,并馈入给 PID 控制单元,以使得左侧力臂端部在竖直方向的位移达到位移的设定值为目标,PID 调控电流源的输出电流 I ;多次改变位移的设定值(在电容式微位

移传感器的量程范围内),并测量对应设定位移下的电磁力发生单元的线圈电流,同时,将位移设定值乘以力臂比 l_2/l_1 ,得到右侧力臂端部的等效位移,最终得到电磁力发生单元的线圈电流 I 以及与其对应的右侧力臂端部的等效位移 z ,再通过线性拟合,即可得到线性关系 $I = cz$ 。

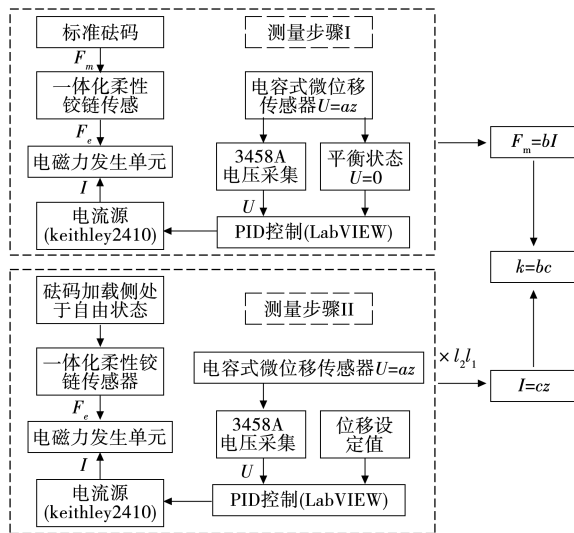


图 5 一体化柔性铰链传感器弹性系数的测量原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the measuring principle of the elasticity coefficient of the integrated flexible hinge sensor

在开展测量步骤 I 的过程中,向一体化柔性铰链传感器的右侧力臂依次加载 0 g(空载)、5 g、10 g、15 g、20 g 的标准砝码,通过 PID 调控,使得一体化柔性铰链传感器处于平衡状态,进而得到标准砝码重力 F_m 与电磁力发生单元线圈电流 I 的测量结果,对测量结果 (F_m, I) 进行线性拟合,得到如图 6 所示的线性特性曲线,其线性拟合系数 $b = 0.036 \text{ N/mA}$ 。

在开展测量步骤 II 的过程中,在一体化柔性铰链传感器右侧力臂的端部处于自由状态条件下,通过 PID 调控,使得一体化柔性铰链传感器左侧力臂的端部在竖直方向的位移稳定在设定的位移值,由上述位移值并结合臂长比 l_2/l_1 ,换算得到右侧力臂端部的等效位移 z ,同时,测量电磁力发生单元的线圈电流 I ,并对测量数据 (I, z) 进行线性拟合,得到如图 7 所示的线性特性曲线,可见,线性拟合系数 $c = 9\ 042.31 \text{ mA/m}$ 。

结合测量步骤 I 和 II 测得的线性系数 b 和 c ,可计算得到一体化柔性铰链传感器的弹性系数 $k = bc = 328.2 \text{ N/m}$,其量值与依据式(4)计算所得的弹

性系数 263.4 N/m 相比,虽然存在一定差距,但整体上处于相同量级。一体化柔性铰链传感器弹性系数的实测结果与计算结果之间存在的差异,是由多种因素引起的,比如,为提高计算效率,实际制备的一体化柔性铰链传感器中的所有螺纹孔等均未被计及;且所构建模型的材料属性(如杨氏模量、密度等)与实际所用材料也存在差别,等等。

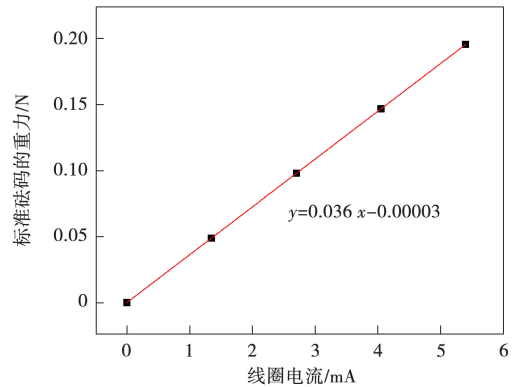


图 6 一体化柔性铰链处于平衡状态时,施加于其右侧力臂端部的标准砝码重力与线圈电流之间的线性拟合曲线

Fig. 6 Linear fitting curve between the gravity of a standard weight applied to the end of its right-hand force arm and the coil current when the integrated flexible hinge is in equilibrium

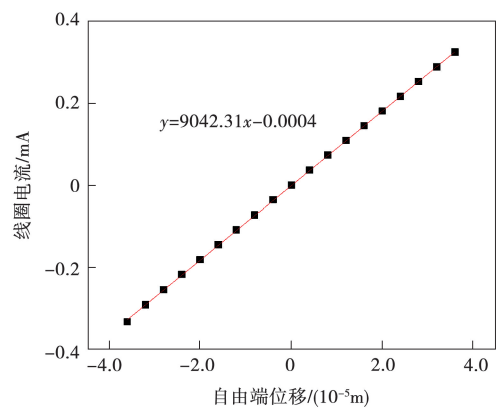


图 7 线圈电流与右侧力臂端部的位移之间的线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting results between the coil current and the displacement at the end of the right-hand force arm

4 讨论

目前,电磁力配衡重量检测器在称量 1 kg 时,其质量分辨率的国际先进水平为 $10 \mu\text{g}$ 。文中制备

的一体化柔性铰链传感器的弹性系数为 328.2 N/m, 则将其换算到一体化柔性铰链传感器左侧力臂端部在竖直方向的位移为 1.5 nm。这就要求微位移传感器的位移分辨率必须优于 1.5 nm, 才能实现对 10 μg 质量变化量的高灵敏检测。一体化柔性铰链传感器的弹性系数越大, 则对微位移传感器的位移分辨率的要求就越高。受限于当前精密机械加工水平(微小铰链薄壁的厚度加工极限为 50 μm), 在无法进一步降低一体化柔性铰链传感器弹性系数的条件下, 文中提出, 可以通过加强电磁检测能力^[17-18], 即提高微位移传感器位移分辨率的方式, 来弥补因一体化柔性铰链传感器机械灵敏性不足导致的电磁力配衡重量检测器质量测量分辨率难以进一步提升的难题。

在微位移检测技术手段方面, 已制成有包括激光干涉式^[19-20]、光电探测式^[21-22]、电阻应变式^[23]、压电应变式^[24]、电容式^[25]及涡流式^[26]等多种不同原理的位移传感器, 在一定的测量条件下, 它们可以实现高达纳米量级的位移检测分辨率^[27]。在已有的电磁力配衡重量检测器中, 目前主要选配光电探测式位移传感器来实现对一体化柔性铰链传感器位移偏移量的高灵敏检测^[8]。

光电探测式位移传感器, 是以位置敏感探测器 (position sensitive detector, PSD) 来探测光照位置的变化, 以实现位移的检测。然而, 受空间光干扰、光照均匀性等因素影响, 光电探测式位移传感器存在位移分辨率不足的问题。电容式位移传感器, 是通过检测电容量的变化实现对微位移的测量, 具有高灵敏、高分辨率、结构简单等优势^[28-29], 将其融入电磁力配衡重量检测器以完成微位移检测功能, 提高位移检测的分辨率, 有望在一定程度上解决因现有一体化柔性铰链传感器测力灵敏性不足导致的制约电磁力配衡重量检测器质量测量分辨率进一步提升的难题。

针对于此, 文中改用高性能电容式微位移传感器来替换光电探测式位移传感器。由于高性能电容式微位移传感器的输出电压范围为 -10 V ~ 10 V, 位移检测的量程是 400 μm , 位移分辨率为 0.35 nm, 且还具有更高的测量稳定性, 足以满足对 1.5 nm 位移分辨率的检测指标需求。图 8 展示了高性能电容式微位移传感器与一款基于 PSD 的光电探测式微位移传感器同时测量某一固定位移的输出电压信号(已被归一化到各自的输出电压信号量程)

随时间变化的特性曲线, 可见, 基于 PSD 的光电探测式微位移传感器的输出电压, 随着时间的推移会发生较大漂移, 而高性能电容式微位移传感器的输出信号则基本保持不变。

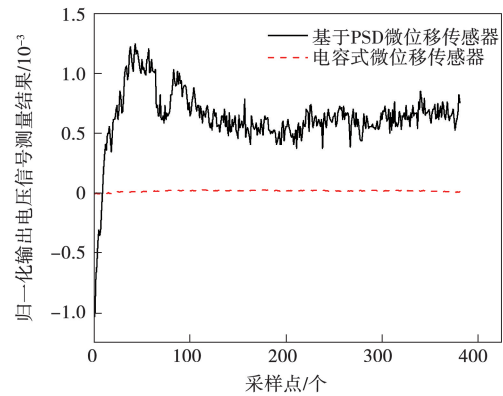


图 8 基于 PSD 的微位移传感器和电容式微位移传感器的归一化输出电压信号测量结果

Fig. 8 Normalized output voltage signal measurements of a PSD-based displacement sensor and a capacitive displacement sensor

5 结 论

微小铰链薄壁的厚度是影响电磁力配衡一体化柔性铰链传感器测力灵敏性的核心参数, 而现有的基于力学理论构建的一体化柔性铰链传感器的数学模型中, 直接将微小铰链设定为理想铰链, 无法实现对微小铰链薄壁厚度的参数化建模。针对于此, 文中结合拉丁超立方采样和有限元计算方法, 得到微小铰链薄壁厚度的采样点与一体化柔性铰链传感器弹性系数的计算结果, 进而再采用二次多项式拟合方法, 得到了表征微小铰链薄壁厚度与一体化柔性铰链传感器弹性系数关联关系的解析数学模型, 能够有效支撑一体化柔性铰链传感器弹性系数快速、准确计算, 避免了复杂、耗时的有限元重复求解, 旨在为一体化柔性铰链传感器的高效设计提供指导依据。

为验证上述方法的有效性, 文中制备了一体化柔性铰链传感器, 并提出了一种基于电磁力和电容式微位移传感器的弹性系数测试方法。基于研究工作结果得到, 所制备的一体化柔性铰链传感器的弹性系数的实测结果和计算结果分别为 328.2 N/m 和 263.4 N/m。这两个结果之间存在一定差距, 主要是因为在进行有限元建模计算时, 为了提高计算

效率,忽略了一体化柔性铰链传感器上的所有螺孔,且在所构建模型中设置的材料属性(如杨氏模量、密度等),也与实际所用材料存在一定差异。

文中还指出,在一体化柔性铰链传感器的测力灵敏性达到优化极限后,还可以从电磁测量角度去提出优化措施,例如采用高性能电容式微位移传感器替换光电探测式微位移传感器等,以切实提高电磁力配衡重量检测器的微位移检测分辨率,以达到进一步提升电磁力配衡重量检测器质量称量分辨率的目的。

参 考 文 献

- [1] YOON K, CHOI Y. Modeling and tolerance analysis of compliant mechanism for axis-symmetric mass comparator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023: 1-11.
- [2] SUN J, UEKI M, UEDA K. Development of a high-accuracy 500 kg mass comparator for improved weight calibration capability[J]. Measurement, 2017(95): 418-423.
- [3] 王君,高丽英,凌振宝,等.一种岩矿石密度测量的新方法[J].地球物理学进展,2005(2):440-442.
WANG Jun, GAO Liying, LING Zhenbao, et al. A new method of density measurement for rock and ore materials [J]. Progress in Geophysics, 2005(2): 440-442.
- [4] SPIERINGS A B, SCHNEIDER M, EGGENBERGER R. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(5): 380-386.
- [5] KIM D, KIM M, SEO M, et al. Realization of the kilogram using the KRISS Kibble balance[J]. Metrologia, 2020, 57(5): 55006.
- [6] 牛艳,马永超,赵星杰,等.功率天平磁体系统设计综述[J].电测与仪表,2023,60(6):1-9.
NIU Yan, MA Yongchao, ZHAO Xingjie, et al. Review on the design of the Kibble balance magnet system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 1-9.
- [7] 刘庆纲,孙庚,秦自瑞,等.基于柔性铰链的杠杆-平衡机构的运动特性分析与参数设计[J].传感技术学报,2016,29(3):313-319.
LIU Qinggang, SUN Geng, QIN Zirui, et al. Kinematics analysis and parameter design of leverage balancing mechanism based on flexible hinges[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(3): 313-319.
- [8] MARANGONI R R, RAHNEBERG I, HILBRUNNER F, et al. Analysis of weighing cells based on the principle of electromagnetic force compensation[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(7): 75101.
- [9] 陈良柱,滕召胜,杨敏,等.电磁力平衡传感器的磁缸温度稳定控制方法研究[J].仪器仪表学报,2012,33(9):1995-2001.
CHEN Liangzhu, TENG Zhaosheng, YANG Min, et al. Research on the magnetic cylinder temperature stability control method of electromagnetic force balance sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 1995-2001.
- [10] 代宇,张婕.具有自主温度补偿的多通道柔性应变传感系统[J].传感器与微系统,2024,43(2):97-100.
DAI Yu, ZHANG Jie. Multi-channel flexible strain sensing system with independent temperature compensation [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(2): 97-100.
- [11] 井云鹏,智文虎,关恩明,等.宽温区热敏电阻温度传感器调理电路[J].传感器与微系统,2024,43(1):120-123.
JING Yunpeng, ZHI Wenhui, GUAN Enming, et al. Conditioning circuit for thermistor temperature sensor with wide temperature range[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(1): 120-123.
- [12] 王秋晓,沈利坚,蒋盼,等.采用电磁力杠杆机构的力平衡式传感器[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(1):173-179.
WANG Qiuxiao, SHEN Lijian, JIANG Pan, et al. Force balance sensor based on electromagnetic force balance lever structure[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016, 48(1): 173-179.
- [13] 蒋家东,王国起,陈军,等.基于柔性铰链的一体化称重机构关键几何参数检测[J].工具技术,2022,56(7):146-150.
JIANG Jiadong, WANG Guoqi, CHEN Jun, et al. Geometrical parameters measuring of integration weighing mechanism based on flexible hinges[J]. Tool Engineering, 2022, 56(7): 146-150.
- [14] DARNIEDER M, PABST M, WENIG R, et al. Static behavior of weighing cells[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7(2): 587-600.
- [15] PABST M, DARNIEDER M, THESKA R, et al. Adjustment concept for compensating for stiffness and tilt sensitivity of a novel monolithic electromagnetic force compensation (EMFC) weighing cell[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2022, 11(1): 109-116.
- [16] HILBRUNNER F, WEIS H, FRÖHLICH T. Parameterization and optimisation of EMC balances based on the frequency response of the impedance[J]. Measurement, 2014(51): 349-355.
- [17] 祝毛宁,张蓬鹤,赵伟,等.碳中和及其对电磁测量技术的新需求[J].电测与仪表,2021,58(11):1-7.
ZHU Maoning, ZHANG Penghe, ZHAO Wei, et al. Carbon neutrality and its new demand for electromagnetic

- measurement technology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(11): 1-7.
- [18] 邱虎, 杨旭, 罗传仙, 等. GIS 间歇性局部放电泄漏电磁波检测传感器设计研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(9): 202-209.
- QIU Hu, YANG Xu, LUO Chuanxian, et al. Design and research of high sensitive GIS intermittent partial discharge leakage electromagnetic wave detection sensor[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(9): 202-209.
- [19] BONOPERA M. Fiber-bragg-grating-based displacement sensors: review of recent advances[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5561.
- [20] ZHU C, ZHUANG Y, LIU B, et al. Review of fiber optic displacement sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022(71): 1-12.
- [21] SUKHAREVB G P G. New approach to raising the resolution of position sensitive detector with moving current-voltage characteristic[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13(8): P08005.
- [22] 黄刚, 潘李克, 何成章, 等. 基于 S-G 和 CEEMDAN 技术的光纤光栅传感信号降噪方法研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(2): 69-75.
- HUANG Gang, PAN Like, HE Chengzhang, et al. Research on de-noising method of optical fiber grating sensing signal based on S-G and CEEMDAN technology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(2): 69-75.
- [23] RANA S, GEORGE B, KUMAR V J. Sigma-delta digital converter suitable for a resistive displacement sensor with a floating slide[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(3): 502-509.
- [24] BAZAEI A, BOUDAOU M, HEMMASIAN ETTEFAGH M, et al. Displacement sensing by piezoelectric transducers in high-speed lateral nanopositioning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9156-9165.
- [25] YE Y, ZHANG C, HE C, et al. A review on applications of capacitive displacement sensing for capacitive proximity sensor[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 45325-45342.
- [26] NABAVI M R, NIHTIANOV S N. Design strategies for eddy-current displacement sensor systems: review and recommendations[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(12): 3346-3355.
- [27] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013(190): 106-126.
- [28] LIU X, PENG K, CHEN Z, et al. A new capacitive displacement sensor with nanometer accuracy and long range [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(8): 2306-2316.
- [29] ANIL KUMAR A S, ANANDAN N, GEORGE B, et al. Improved capacitive sensor for combined angular and linear displacement sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10253-10261.
-
- 收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2025-10-08
- 作者简介:
- 刘小虎(1991—),男,博士后,研究方向为电磁传感、量子精密测量。E-mail: cquliuxiaohu@tsinghua.edu.cn
- 孙传鹏(1995—),男,博士,研究方向为有限元仿真方向。E-mail: chuanpeng.sun@ibe.cn
- 钱璐帅(1993—),男,博士,硕士生导师,研究方向为精密电磁测量与量子电学计量技术。
E-mail: qianlushuai@126.com
- 董阳(1984—),男,高级工程师,研究方向为精密力学计量。E-mail: d_yang115@163.com
- 赵伟(1956—),男,教授,博士生导师,研究方向为现代电磁测量技术和方法。
E-mail: zhaowei@mail.tsinghua.edu.cn
- 李世松(1987—),男,通信作者,博士,助理教授,研究方向为现代电磁计量和电磁测量理论和方法。
E-mail: shisongli@tsinghua.edu.cn

(编辑 杜景飞)