

多向运动寄生载荷分量对称重传感输出的影响

郭贵勇^{1,2,3,4,5}, 钟剑锋^{1,2}, 张秋坤^{1,2}, 蔡宝杰^{3,4,5}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108; 2. 福州大学 福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室, 福州 350108; 3. 福建省计量科学研究院 建设与交通计量研究所, 福州 350003; 4. 福建省力值计量测试重点实验室, 福州 350100; 5. 国家市场监督管理总局重点实验室(力值计量测试), 福州 350100)

摘要:针对多向运动寄生载荷分量对称重传感输出影响很大的问题,提出了基于整体结构的变参数、多分量的输出影响评估方法,建立了“应变-总重-运动”瞬时特征的数学理论模型,并通过有限元仿真分析探讨了称重过程中常见的横向、纵向及绕轴旋转等运动特性,以及改变总重、旋转速度和角加速度等寄生载荷分量对输出的影响,通过实验测试验证理论模型及仿真分析规律的合理性。结果表明,横向运动寄生载荷分量对输出影响最小,最大偏差不大于 0.001%FS(Full Scale);其次为纵向运动,最大偏差不大于 0.015%FS;而绕轴旋转的运动寄生载荷分量对输出影响最大,最大偏差可达 0.5%FS,且随着总重、旋转速度的变化而变化,该规律为称重传感结构的动态称重应用提供了精度补偿技术支撑和科学评价依据。

关键词:测试计量技术及仪器;称重传感器;称重传感结构;多向运动;旋转;应变;载荷

中图分类号:TH715 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)06-1892-14

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231023

Effect of parasitic load components with multi-directional motion on weight-sensing outputs

GUO Gui-yong^{1,2,3,4,5}, ZHONG Jian-feng^{1,2}, ZHANG Qiu-kun^{1,2}, CAI Bao-jie^{3,4,5}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Division of Construction and Transportation, Fujian Institute of Metrology, Fuzhou 350003, China; 4. Fujian Key Laboratory of Force Measurement, Fuzhou 350100, China; 5. Key Laboratory of Force Measurement for State Market Regulation, Fuzhou 350100, China)

Abstract: For the parasitic load component generated by multi-component superposition effect has a great influence on the weight-sensing output, a variable parameter and multi-component output effect assessment method based on the overall structure was proposed. Subsequently, a mathematical theoretical model of the instantaneous characteristics of "strain-total weight-motion" was established and analyzed by

收稿日期:2023-09-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(52275096、52275523);福厦泉国家自主创新示范区高端装备振噪检测与故障诊断协同创新平台项目;福建省科技重大专项项目(2022HZ024005).

作者简介:郭贵勇(1983-),男,高级工程师,博士.研究方向:力值与称重计量、精密仪器状态监测与智能诊断技术.
E-mail:13960922779@163.com

通信作者:钟剑锋(1988-),男,教授,博士.研究方向:结构无损检测与设备故障智能诊断,视觉多维动态测量及仪器、光学相干层析技术及应用.E-mail:zhongjianfeng@fzu.edu.cn

finite element simulation. In addition, exploring the characteristics of the multi-directional motions with transverse, longitudinal and rotating around an axis that are commonly seen in the weighing process, which include parasitic effects such as changing the total weight, rotating speed and angular acceleration, etc. Eventually, the reasonableness of the theoretical model and simulation analysis was verified through experimental tests. The results showed that the parasitic load component of transverse motion had the smallest influence on the output, and the maximum deviation was no more than 0.001%FS (Full Scale); followed by longitudinal motion, and the maximum deviation was no more than 0.015%FS; and the parasitic load component of the motion of rotating around an axis had the largest influence on the output, and the maximum deviation can be up to 0.5%FS, and it was changed with the differences of the total weight and the rotating speed, which provided a technical support and accuracy compensation technology for dynamic weighing application of the weight-sensing structure. This law provides the technical support of accuracy compensation and scientific evaluation basis for the dynamic weighing application of weight-sensing structure.

Key words: measurement technology and instrument; load cell; weight-sensing structure; multi-directional motion; rotation; strain; load

0 引言

重量是自然界物体的一个根本属性,通常情况下都是采用称重方法获得。当今世界的称重技术已经在各个行业的生产中扮演着重要的角色,在生产活动中实现物料的精确计量是实际生产和贸易运转的一个重要环节^[1-4]。目前,瞬时、动态、精确、高效等已经成为现代称重方法的主要特点,研究动态称重方法、理论、技术及其应用符合国家科技和生产发展的实际需求^[5-7]。

称重传感结构主要由被称重物体以外的连接机构、工装及基座平台上的其他部件等共同构成,其在不同程度上都会影响称重传感结构的输出^[8]。对一些刚度低、质量小、量程小的称重传感结构而言,连接部件重量的增减将会造成称重传感结构的负载分配发生急剧变化,从而降低整体输出的准确性、可靠性及稳定性。此外,称重传感结构的多向运动,例如,三维空间中的平移、旋转运动等引起的寄生载荷分量也会导致传感结构的输出产生一些不良影响。因此,研究称重传感结构的组成及其整体多向运动的相关特征,对发现装备故障原因、预测装备故障及科学安排检修具有重要意义。

许多学者先后进行了一些相关专题研究。干方建等^[9]分析了多维力传感器在载荷作用下发生弹性变形而引起机器人系统运动误差的问题,研究了这种运动误差的形成及传递特点,但并未进行实验验证。朱建梅等^[1]对平行梁式称重传感

器的工作特性进行的分析,获得了弯矩作用下的应变区应变值,但偏向于动力学仿真方向。张业兵^[2]讨论了汽车的几种运动形式,分析了汽车运动速度及速度风向对动态称重的影响机理,但并未对弹性体应变规律与输出结果之间的关系进行研究。尹继武等^[3]基于双孔平行梁作为弹性元件的称重传感器,分析应变计粘贴时的倾斜角度对称重传感器偏载误差的影响,也对弹性体的应变进行理论分析,但其侧重点是分析偏载误差,并未对多向运动的影响进行研究。此外,相关学者^[10-12]对相关运动特性也做了一些研究。

本文针对电阻应变原理的平行梁称重传感器及连接部件等组成的称重传感结构展开研究,通过理论推导、仿真分析、实验测试验证并给出回归方程^[13]的研究方法,揭示了多向运动引入的寄生分量对输出的影响程度和规律,旨在为称重传感结构的动态称重应用提供精度补偿技术支撑和科学评价依据,并将一些不必要的外界干扰尽量消除。

1 称重传感结构多向运动工作原理

本文研究的称重传感结构横向、纵向及绕轴旋转的工作原理图如图1所示。该实验装置主要由称重传感结构(含称重传感器、基座、连接部件及高精度仪表等)、实验平台、加载源、驱动机构、标准仪表等部分组成。其工作原理为:①当进行横向和纵向运动时,实验平台上的驱动机构在加

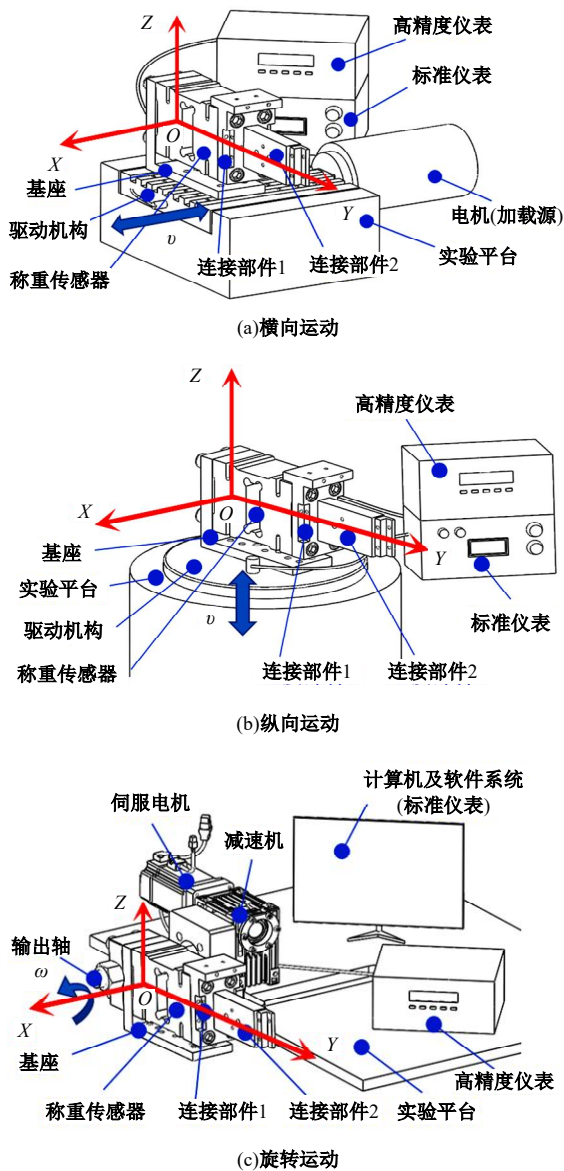


图 1 称重传感结构运动的工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of weighing sensor structure movement

载源的作用下,可在标准仪表或计算机及软件系统中设置并按不同加载频率、速度进行水平或垂直方向加载,实现了称重传感结构的横向或纵向运动,再从高精度仪表上读取称重传感结构的输出,取 3 次示值读数的平均值,即为此时的实验结果。②当进行绕轴旋转运动时,使用减速电机驱动输出轴带动其上的称重传感结构,在计算机及软件系统中设置并按不同的旋转速度、角加速度进行绕轴旋转加载,从而实现称重传感结构的绕轴旋转运动。同时,从高精度仪表上读取称重传感结构的输出,取 3 次示值读数的平均值,即为此时的实验结果。

2 多向运动建模与理论分析

在实际应用中,一般称重传感结构的输出作为称重测量最直接的指标之一。在外界特定载荷驱动下,称重传感结构的输出异常可能出于较大幅度的超范围运动状态中。基于此,如何精准确定出可用的运动幅度范围,需要研究不同总重的称重传感结构在受到多向运动特定载荷驱动作用下的基本规律,以解决由此引发对称重准确度不可预测的叠加效应。对常见的称重传感结构而言,其主要采用单端固定于基座或基础等刚性面上,而被固定的刚性面受到特定载荷的直接或间接载荷驱动,促使称重传感结构随之发生三维空间中的位置状态及承载变化。该称重传感结构的组成,主要包括固定基座、平行梁式称重传感器和其自由端的若干连接部件,如图 2 所示。

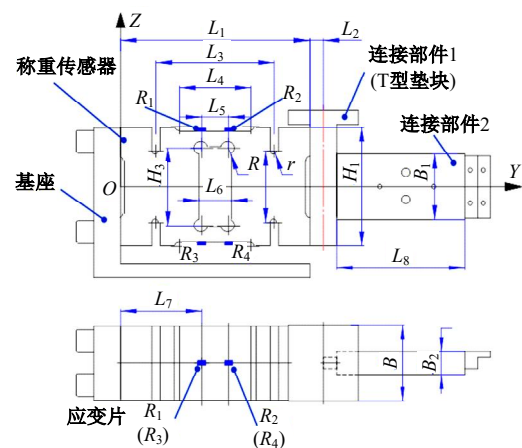


图 2 称重传感结构模型图(含部分连接部件)

Fig. 2 Model of the weight-sensing structure (including some connecting parts)

连接部件,或称附加质量,一般是指除工作面外的工具、执行器、工装等二次负载件,与预紧组件相比,这些构件具有质量大、刚度低、结构复杂等特点。因此,在实际使用中必须考虑连接部件的结构参数对现有称重传感结构的输出影响。该称重传感结构及部分连接件主体的外形尺寸参数如表 1 所示。为获取带有连接部件称重传感结构的输出,做出如下假设:称重传感结构弹性体与连接部件和安装基座的连接均为刚性。通常,应变用于测定弹性体材料的应力特性,其计算是根据胡克定律来完成的,其最简单的形式为:

$$\epsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} \quad (1)$$

式中: l_0 为弹性体材料上与主承载方向对应的应

表 1 称重传感结构及部分连接件主体的外形尺寸参数

Table 1 Boundary dimension parameters of weight-sensing structure and part of connector body

| 参数 | 符号 | 数值/mm |
|----------------------|-------|-------|
| 称重传感结构弹性体总长度 | L_1 | 176 |
| T形垫块中心线与弹性体右端面距离 | L_2 | 9 |
| 窄槽底部圆角中心长度 | L_3 | 110 |
| 贴片区域长度 | L_4 | 66.2 |
| 空心槽圆角中心长度(即两个应变截面距离) | L_5 | 25 |
| 贴片区空心槽宽度 | L_6 | 30 |
| 左应变片贴片与弹性体左端面距离 | L_7 | 75.5 |
| Y向第一个连接件主体长度 | L_8 | 143 |
| 弹性体总高度 | H_1 | 125 |
| 窄槽底部圆角中心宽度 | H_2 | 75 |
| 空心槽圆角中心宽度 | H_3 | 81.7 |
| 弹性体总宽度 | B | 80 |
| Y向第一个连接件主体宽度 | B_1 | 69 |
| Y向第一个连接件主体厚度 | B_2 | 24 |
| 贴片区空心槽圆角半径 | R | 7.5 |
| 窄槽底部圆角半径 | r | 4 |

变片有效宽度,即弹性体没有应变时的有效宽度; Δl_0 为对弹性体材料的主承载区的施加应变 ϵ 时,应变片有效宽度的变化量。

如图 2 所示,弹性体材料上应变区的 R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 应变片作用点的弯矩^[4,5]分别为:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{F_{\Delta m} \cdot L_5}{2} \cdot \frac{3K+1}{6K+1} + \frac{M}{2} \cdot \frac{1}{12K+2} \\ M_2 = -\frac{F_{\Delta m} \cdot L_5}{2} \cdot \frac{3K+1}{6K+1} - \frac{M}{2} \cdot \frac{1}{12K+2} \\ M_3 = \frac{F_{\Delta m} \cdot L_5}{2} \cdot \frac{3K}{6K+1} - \frac{M}{2} \cdot \frac{1}{12K+2} \\ M_4 = -\frac{F_{\Delta m} \cdot L_5}{2} \cdot \frac{3K}{6K+1} + \frac{M}{2} \cdot \frac{1}{12K+2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 为两端垂直梁与中部平行梁的刚度比, $K \gg 1$; L_5 为平行梁的双孔中心距离(即两个应变截面距离); $F_{\Delta m}$ 为载荷。

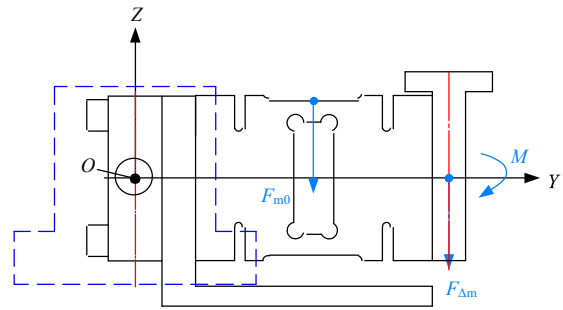
以应变片 R_1 为例,有:

$$\epsilon_1 = k_1 M_1 \quad (3)$$

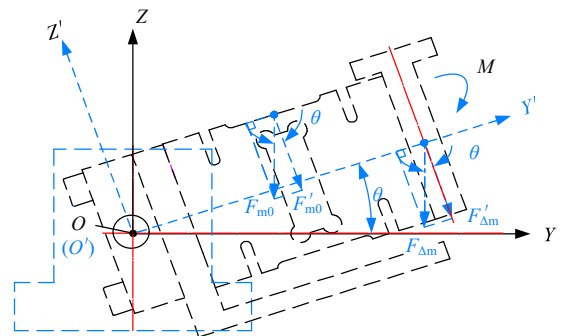
$$M = F_{\Delta m} \cdot y \quad (4)$$

式中: k_1 为弹性元件的材料和尺寸决定的常系数; y 为 $F_{\Delta m}$ 作用点沿Y向偏离加载中心点的距离。

称重传感结构在绕轴旋转运动时的承载分析示意图如图 3 所示,可得:



(a)承载分析示意图一



(b)承载分析示意图二

图 3 称重传感结构多向运动(绕轴旋转)承载分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram for analysing the load carrying capacity of a weight-sensing structure with multi-directional motion (rotation around an axis)

$$\begin{cases} F_{\epsilon} = k_{m0} \cdot F_{m0} + k_{\Delta m} \cdot F_{\Delta m} \\ F'_{m0} = F_{m0} \cdot \cos \theta \\ F'_{\Delta m} = F_{\Delta m} \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为称重传感结构绕轴旋转时Y向与水平方向的夹角。

从式(5)可知,称重传感结构的应变主要受到结构承受载荷及所处位置的影响。其中的质量主要包括称重传感结构自身的质量,以及为了连接执行机构末端而不可避免需要额外增加的连接部件。连接部件与称重传感结构相互连接,使得称重传感结构的质量发生变化,进而导致总重发生改变,其相应的载荷输出也将会有所改变,如果不采取抑制措施,称重传感结构在实际应用中的输出准确度和稳定性将受到连接部件的限制。因此,连接部件也是称重传感结构输出影响的寄生分量之一。

3 应变-总重-运动的仿真

通过多向运动的理论模型计算公式可知,称重传感结构的输出与其运动姿态有关。由于该称

重传感结构在 X、Y 及 Z 向并非完全对称,实际连接部件的形状各异,这就需要考虑连接部件对多向运动的影响大小展开详细分析研究。称重传感结构的有限元分析图如图 4 所示。本文适当简化了称重传感结构模型,其网格大小为 5 mm,单元网格类型为八结点线性六面体单元,网格数为 17 716。

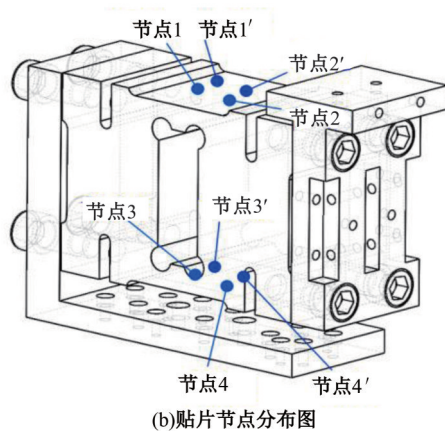
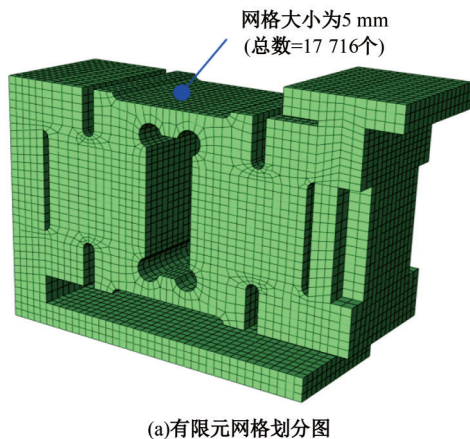


图 4 称重传感结构的有限元模型及贴片区应变排布位置

Fig. 4 Finite element model of weighing sensor structure and strain distribution position of patch area

该称重传感结构的弹性体采用 2A12 铝合金材质,其屈服强度为 340 MPa,抗拉强度为 485 MPa,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 800 kg/m³;其余零部件采用 40Cr 钢材质,其屈服强度为 785 MPa,抗拉强度为 980 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m³。其中,称重传感结构的基座质量约为 3.70 kg,称重传感器质量约为 3.50 kg,T 形加载垫块(连接部件 1)质量约为 2.40 kg,其余连接部件质量约为 1.75 kg。建立模型后,创建静力分析步,对 L

形支架底部进行全固定,并对整个称重传感结构模型添加自重载荷,计算后获得称重传感结构静态下不同方位角的模拟应变变化趋势,为后续的实验设计及测试步骤提供一些研究思路。

称重传感结构弹性体上排布有 4 个应变片以采集弹性体主承载区的应变,把应变片组成惠斯通电桥^[6],如图 5 所示。

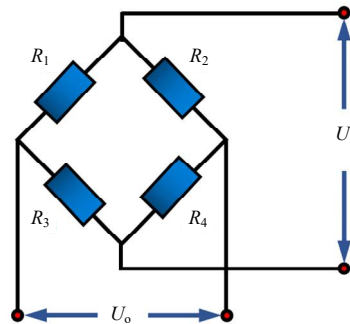


图 5 惠斯通电桥

Fig. 5 Wheatstone bridge

该电桥的输出电压为:

$$U_o = U_i \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (6)$$

式中: U_i 为输入电压; U_o 为输出电压; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为惠斯通电桥各桥臂的电阻,当 $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$ 时,此电桥为平衡状态。

当弹性体应变敏感区域受到载荷作用时,应变片将发生微小变形,使得电阻值发生变化,惠斯通电桥失衡,进而产生输出值,以下的仿真分析正是基于该基本原理进行展开的研究。

仿真分析的结果如图 6 所示,节点 1 和节点 1'、节点 2 和节点 2'、节点 3 和节点 3'、节点 4 和节点 4'之间的模拟应变极为相似,曲线几乎重合。由该曲线图还可以总结如下:①称重传感结构总重对输出具有一定的影响,尤其是与承载区域相连接的部件,直接作用于其称重传感器弹性体上,且总重越大,输出影响越大,但其具体变化规律还需要通过实验加以验证;②在三维空间中所处方位角位置也是影响称重传感结构输出的一个重要因素,其模拟应变随着角度的增大呈正弦曲线规律;③连接部件在 X、Y 及 Z 向排布方式带来的输出影响特性,还需要做进一步研究与实验验证,这是实际应用及结构优化设计中(尤其是高准确度应用场合)需要重点关注并采取相应抑制和补偿措施的重要因素。

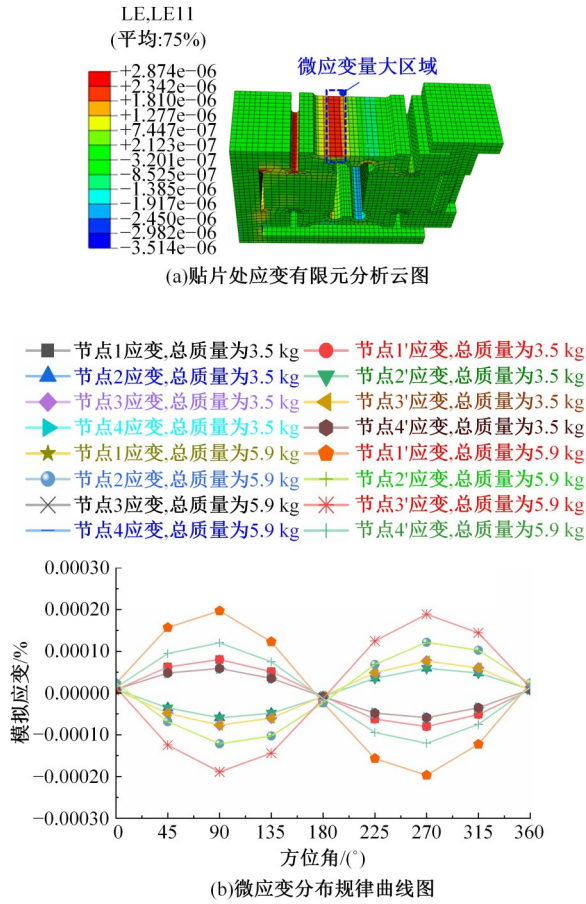


图 6 称重传感结构的应变片贴片处微应变分布规律
Fig. 6 Micro-strain distribution pattern at strain gage patches of weight-sensing structure

4 实验验证

通过使用标准振动台对称重传感结构的横向、纵向的加载驱动,以及使用减速机对其绕轴旋转的加载驱动方式,从而获得称重传感结构在多样化的加载驱动下的输出影响规律。该实验方法与实际应用中的使用工况状态是比较接近的,有必要对称重传感结构进行详细研究。

为进一步验证仿真分析规律的正确性,对称重传感结构的多向运动进行横向、纵向及绕轴旋转等多种工况,其中包括不同加速度和变转速,以及在 X、Y 及 Z 向分别改变连接部件大小等方法,对各个项目进行实验验证。该实验测试分为 3 个部分:①“横向运动-输出”,如图 7(a)所示,其实验装置为标准振动台(型号 DS-50,水平方向),工作频率为 0.005~200 Hz,最大位移为 50 mm,最大加速度为 20 m/s²;②“纵向运动-输出”,如图 7(b)所示,其实验装置为标准振动台(型号 DZ-50,垂直方向),工作频率为 0.005~200 Hz,最大位移

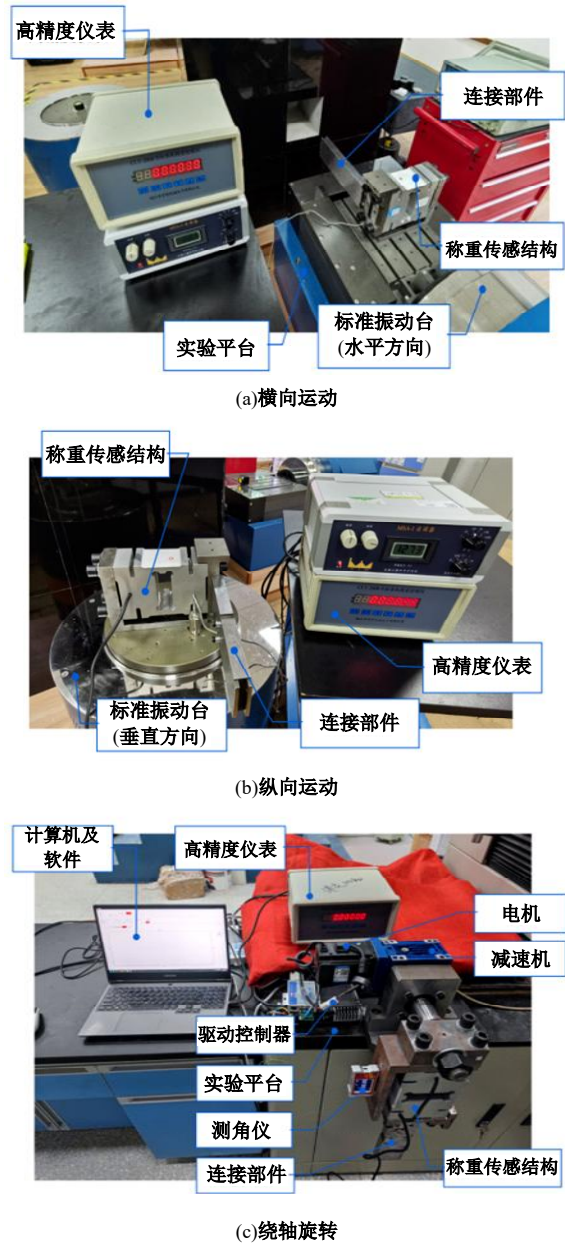


图 7 称重传感结构多向运动实验现场照片
Fig. 7 Experimental photographs of multi-directional movements of the weight-sensing structure

为 50 mm,最大加速度为 50 m/s²;③“绕轴旋转-输出”,如图 7(c)所示,其实验装置为 2 个减速机(减速比:10 和 50),电机最大转速为 3 000 r/min,其输出转速为(0.1~5) r/s,旋转加速度为(0~2) r/s²。将称重传感结构安装于 1 个稳固的实验平台上,利用测角仪读取初始角度位置,随后可通过计算机及软件采集电机的实时转速、加速度以及称重传感结构的输出,分别测试 3 组数据取平均值即为实测值,与仿真分析的结果对比,从而完成验证。

5 实验结果及讨论

5.1 横向运动与纵向运动对输出结果的影响

研究称重传感结构在不同横向/纵向加载频率和加速度驱动下的输出影响规律,在此期间还

改变了X、Y及Z向连接部件的重量,载荷输出的偏差是以称重传感结构的额定输出值(满量程FS约2 mV/V)为参考。单、双排连接部件排布方式及部件连接方向的输出变化规律基本相似,以X向单排为例,相应实验结果曲面图如图8所示。

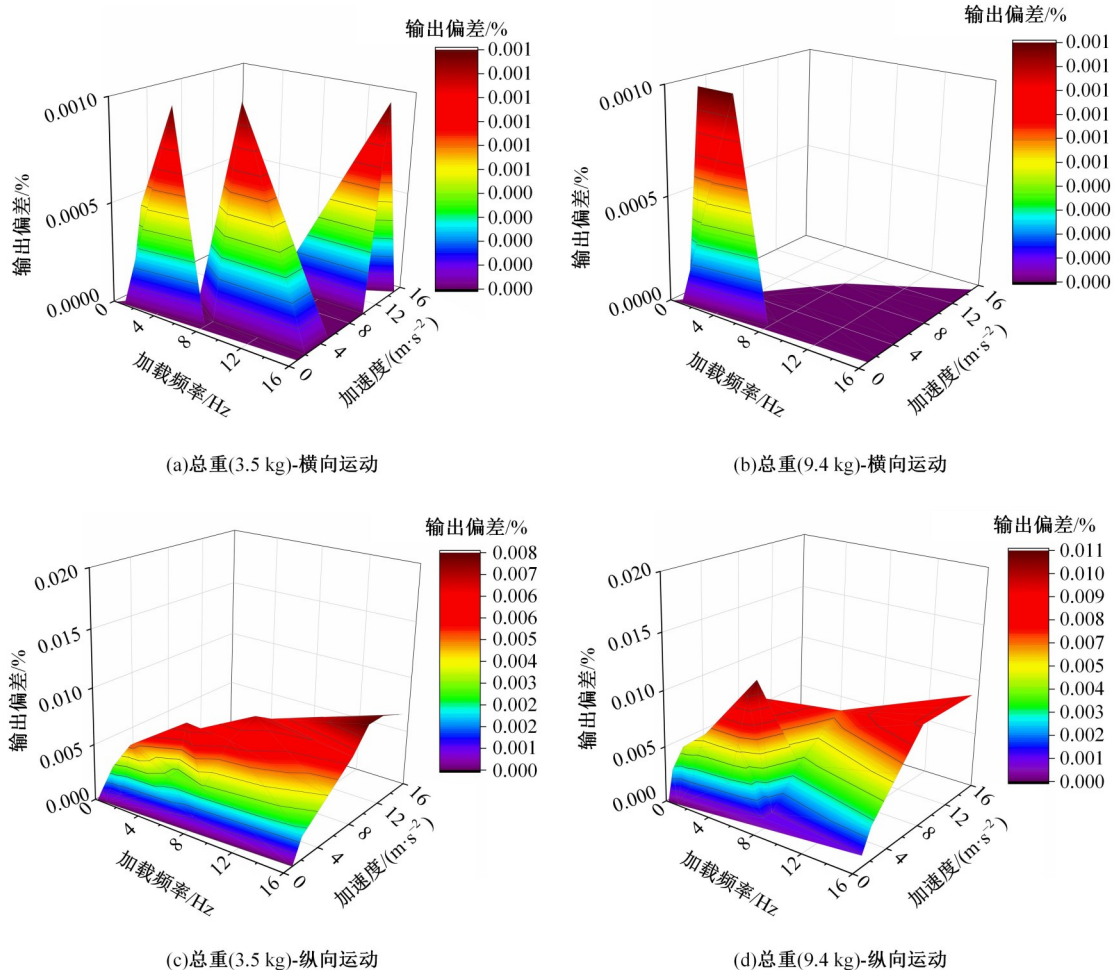


图8 称重传感结构的横向/纵向运动实验验证结果

Fig. 8 Experimental verification results of lateral/longitudinal motion of weighing sensor structure

从图8中的结果来看,在横向运动中称重传感结构载荷输出的偏差并未随着总重增加而发生明显改变,其偏差均小于0.001%FS,该影响可忽略不计,其主要原因称重传感结构在进行横向运动时,作用于称重传感结构应变敏感区域的载荷十分微小,基本不影响相应准确度。称重传感结构的载荷输出偏差均不大于0.015%FS,但在一些高精度称重场合是不容忽视的。纵向运动出现一定载荷输出偏差的主要原因在于纵向运动垂直作用在称重传感结构应变敏感区域,相对于将一定的载荷作用于该称重传感结构的加载区域。

5.2 绕轴旋转运动对输出结果的影响

如图9所示,研究绕轴旋转时不同总重对称

重传感结构输出结果的影响,探讨绕轴旋转时总重、旋转速度、角加速度等不同特征对称重传感结构的输出结果影响,将称重传感结构竖直向下作为0°方位角。

5.2.1 静态模式下的载荷输出结果

由图10可知,称重传感结构的输出随着方位角度的增加呈现正弦曲线变化规律:当总重为5.9 kg时,其峰值约为0.004 22 mV/V。

此时引入的寄生分量与2 mV/V额定输出误差为(-0.230~+0.211)%FS;当总重递增至12.9 kg时,其输出的峰值约为0.011 23 mV/V,此时引入的寄生分量与2 mV/V额定输出误差为(-0.588~+0.562)%FS,其已高达±0.5%。

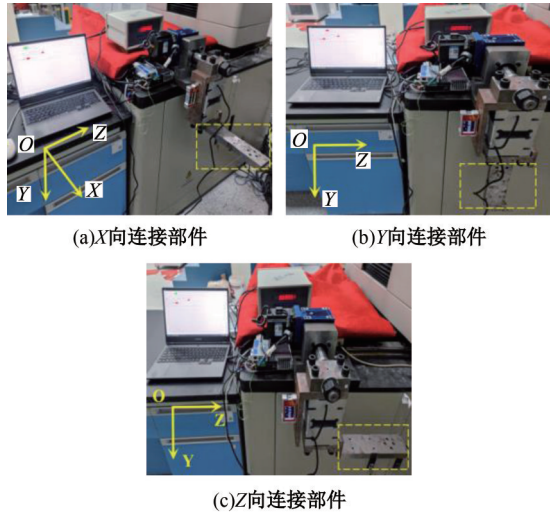


图 9 称重传感结构绕轴旋转实验现场照片
 Fig. 9 Experimental photographs of the weight-sensing structure with rotation around an axis

由此可见,随着总重的递增,该峰值和输出误差也相应增大,且此时为满量程误差(%FS),若需要精准测量小载荷时,其相对误差将会更大。

5.2.2 动态模式下的载荷输出结果

(1)从图 11 的结果来看,称重传感结构的输出随着总重的递增呈现正比的变化规律,对于 X 向连接部件:①当总重为 3.5 kg 时,其输出峰值约为 0.001 63 mV/V,此时引入的寄生分量与 2 mV/V 额定输出误差为 (-0.076~+0.082)% FS,因此时具有一定的加速度,该误差相对较大,随后波动也较大。第 11.9 s 起为匀速旋转,此时

已基本消除加速度带来的影响,其峰值迅速降至约为 0.000 37 mV/V,此时引入的寄生分量与 2 mV/V 额定输出误差为 (-0.017~+0.019)% FS。②随着总重递增至 12.9 kg 时,其峰值约为 0.010 97 mV/V,此时引入的寄生分量与 2 mV/V 额定输出误差为 (-0.513~+0.549)% FS。第 11.9 s 开始匀速旋转,其峰值稍略降至约为 0.006 43 mV/V,此时引入的寄生分量与 2 mV/V 额定输出误差为 (-0.333~+0.322)% FS。由此可见,随着总重的递增,该峰值和输出误差也相应增大,且此时为满量程误差,若需要精准测量小载荷时,其相对误差将会更大。

此外,考察了在 X、Y 及 Z 向的连接部件排布方式带来的影响情况。对 X、Y 向连接部件而言,以上的规律相差不大。对于单排或双排的连接部件,其输出曲线高度重合,说明其输出的结果基本一致。从 Z 向连接部件相对于 X 向的对比曲线来看,当称重传感结构总重达到 9.4 kg 和 12.9 kg 时,其输出的差异性将急剧增大,如图 12 所示。当第 11.9 s 开始达到输出轴旋转已达到预设值转为匀速旋转,即已基本消除加速度带来的影响:当总重为 9.4 kg 时,Z 向的输出比 X 向输出约小了 0.35%FS;当总重为 12.9 kg 时,Z 向的输出比 X 向输出约小了 0.20%FS,出现该现象的主要原因是 Z 向垂直于称重传感结构贴片区,所承受的弯矩及微应变也较大,输出发生较大的突变。因此,在称重传感结构设计及连接部件排布方式方面需要特别关注。

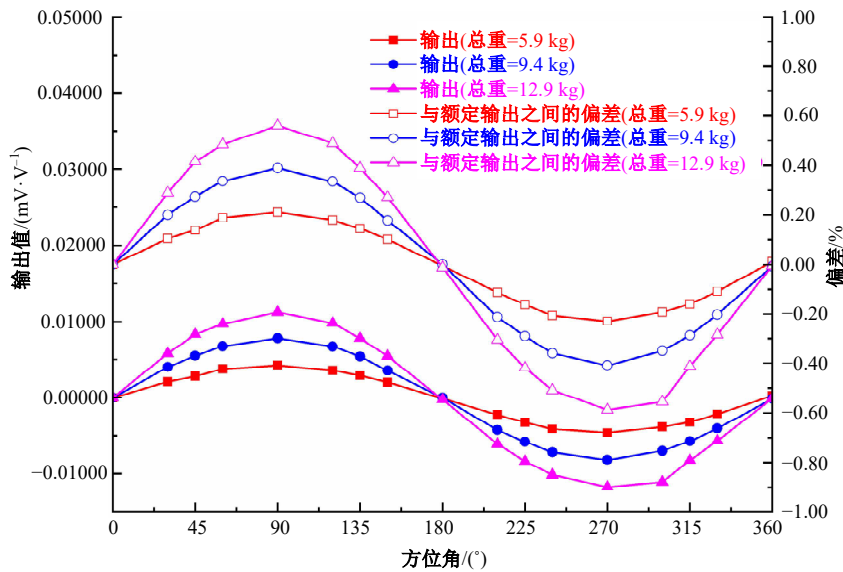


图 10 不同方位角对称重传感结构的输出影响实验曲线图
 Fig. 10 Experimental plots of output effects of symmetrical weight sensing structures at different azimuths

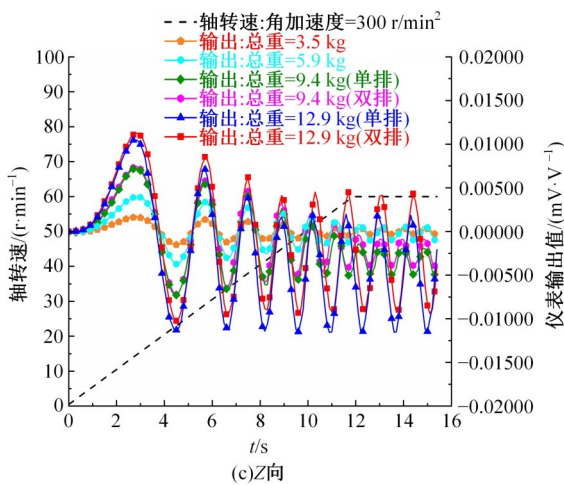
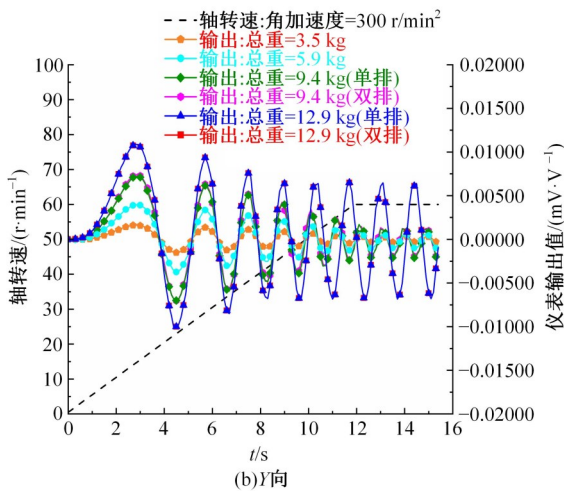
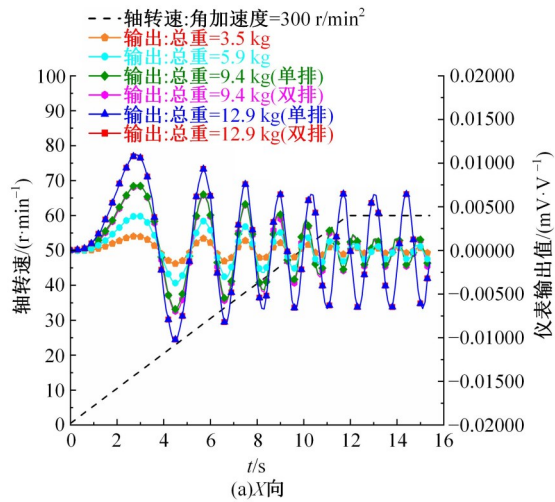


图 11 绕轴旋转时不同总重对称传感结构的输出结果实验验证曲线图(不同方向的连接部件)

Fig. 11 Experimental validation results of weight-sensing structures with rotation around an axis (connected parts in different directions)

(2)以 X 向分布的连接部件为例,考察不同旋转速度对称重传感结构的载荷输出结果影响,期

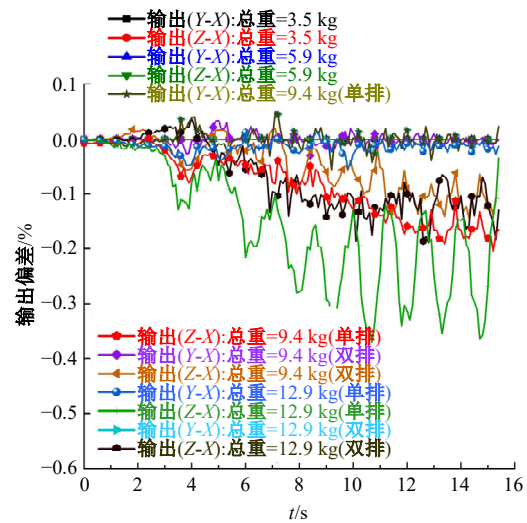


图 12 绕轴旋转时不同总重对称传感结构的输出偏差对比(Y 向-X 向、Z 向-X 向的输出对比)

Fig. 12 Comparison of the output deviation of different weight-sensing structures with rotation around an axis (the output deviation of Y-X, and Z-X)

间保证总重一致,且输出值至少在一个完整匀速旋转周期内,其相应的曲线图如图 13 所示。

从图 13 的结果来看,称重传感结构的输出随着旋转速度的递增呈现反比的变化规律,具体特点如下:①当旋转速度为 0 时(静态模式),其输出峰值约为 0.004 22 mV/V,各点的输出随着方位角度的增加呈现正弦曲线变化规律,将其在同一个旋转周期内方位角的输出值作为参考标准;②当旋转速度为(5~20) r/min 时,各点的输出呈现逐渐下降的趋势,与静态模式的输出偏差在 $\pm 0.05\%$ FS 范围内;③当旋转速度继续增加至 40 r/min 时,该偏差急剧增大至 $\pm 0.1\%$ FS;④当旋转速度再次增加至 60 r/min 时,该偏差又趋于稳定,也是约为 $\pm 0.1\%$ FS。该示值偏差对高精度应用场合来说是不容忽视的,其与旋转过程产生的离心力等因素有关,在使用过程中应该控制好旋转速度的大小以确保称重准确度更接近于静态模式的准确度。

(3)考察不同角加速度对称重传感结构的载荷输出结果影响。该实验验证分别选择 X、Y 及 Z 向分布的连接部件,且按较大的总重进行考察,以易于找出引入的寄生分量的影响程度。在实验前先设置输出轴旋转所需的预设值均为 60 r/min,之后分别按 180、240、300 r/min² 等不同角加速度旋转若干完整旋转周期内依次获得相应的载荷输

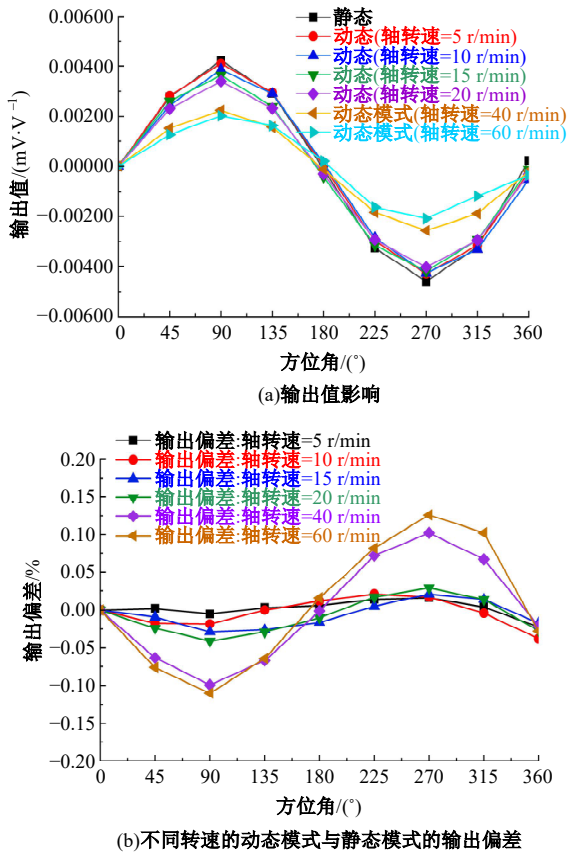


图 13 绕轴旋转时不同转速对称重传感结构的输出影响
Fig. 13 Output effect of symmetrical re sensing structure at different rotational speeds when rotating around an axis

出结果,其输出值相应的曲线图如图 14 所示。

从图 14 所示的结果来看,称重传感结构的输出在稳步加速至输出轴旋转预设值 60 r/min 前半程,并没有发生较大的差异,但由于加速度不同导致达到输出轴旋转预设值的时间有快慢之分,从而后半程称重传感结构的输出开始出现差异,但从前面的不同旋转速度对输出的影响为反比的规律来看,此时的差异性主要是不同旋转速度引起的。由此可见,不同角加速度对称重传感结构的输出影响不大。此外,由不同总重在不同角加速度的加载下,其规律和前面的不同总重对输出影响成正比的现象是吻合的。

5.2.3 动态模式下的载荷输出拟合分析

由图 13 可知,在高速转动情况对称重传感结构的输出影响较大,为揭示转速、加速度和总重对输出影响规律,分别对高速旋转情况下的加速、匀速阶段的输出值峰值设置响应面试验并进行分析。

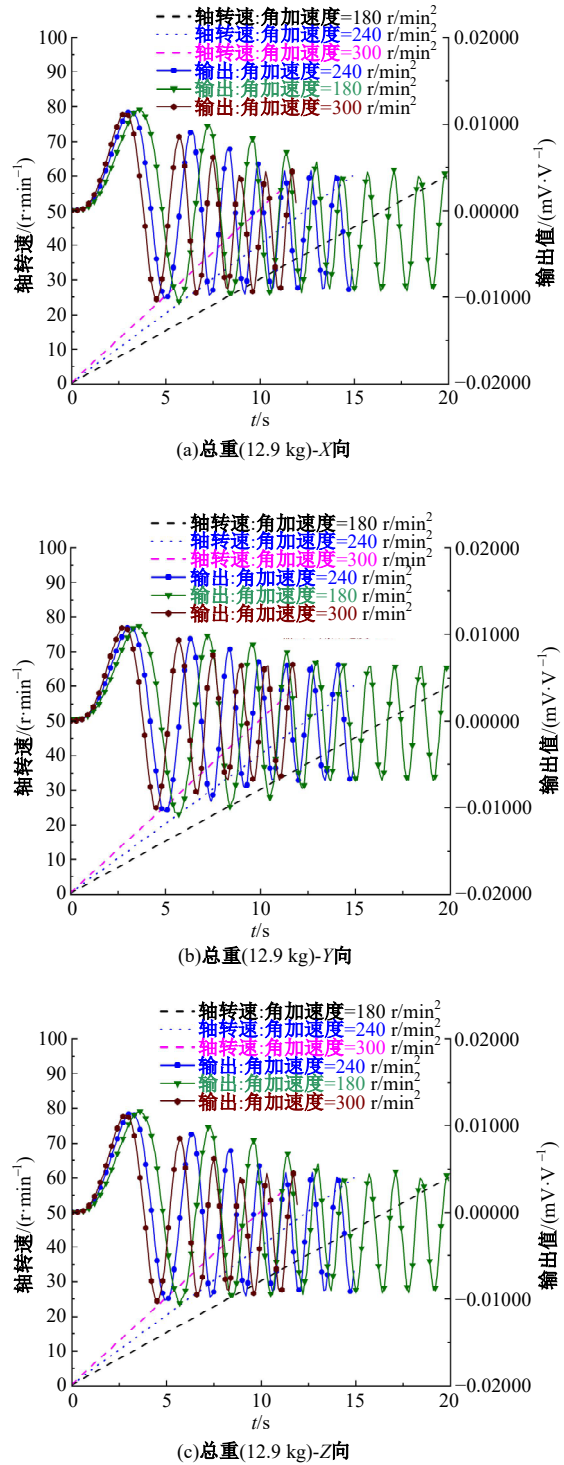


图 14 绕轴旋转时不同角加速度对称重传感结构的输出影响实验验证曲线图 (以双排连接部件为例)

Fig. 14 Experimental verification curve of the output effect of different angular accelerations on the symmetric weight sensing structure when rotating around the axis (using double row connecting components as an example)

(1)加速阶段

将各影响因素定义为 a -转速、 b -角加速度、 c -总重、响应值 S -输出峰值,如表 2 所示。

表 2 加速阶段响应面试验设计及结果

Table 2 Design and results of acceleration phase response surface test

| 试验号 | a 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | b 角加速度/ ($r \cdot \min^{-2}$) | c 总重/kg | S / ($mV \cdot V^{-1}$) |
|-----|------------------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------|
| 1 | 20 | 300 | 9.4 | 0.007 41 |
| 2 | 20 | 240 | 5.9 | 0.003 73 |
| 3 | 60 | 300 | 9.4 | 0.007 43 |
| 4 | 40 | 180 | 5.9 | 0.003 81 |
| 5 | 40 | 240 | 9.4 | 0.007 46 |
| 6 | 40 | 180 | 12.9 | 0.011 16 |
| 7 | 40 | 300 | 12.9 | 0.010 87 |
| 8 | 40 | 240 | 9.4 | 0.007 46 |
| 9 | 40 | 240 | 9.4 | 0.007 46 |
| 10 | 40 | 300 | 5.9 | 0.003 9 |
| 11 | 60 | 180 | 9.4 | 0.007 51 |
| 12 | 20 | 240 | 12.9 | 0.010 74 |
| 13 | 20 | 180 | 9.4 | 0.007 51 |
| 14 | 60 | 240 | 5.9 | 0.003 98 |
| 15 | 40 | 240 | 9.4 | 0.007 46 |
| 16 | 40 | 240 | 9.4 | 0.007 46 |
| 17 | 60 | 240 | 12.9 | 0.010 90 |

对表 2 中的各因素与响应值进行拟合,得到以下回归方程:

$$S_1 = -2.95785 \times 10^{-3} + 1.39589 \times 10^{-5}a - 3.53930 \times 10^{-6}b + 1.24738 \times 10^{-3}c + 4.1667 \times 10^{-9}ab - 3.21428 \times 10^{-7}ac - 4.52381 \times 10^{-7}bc - 1.15625 \times 10^{-7}a^2 + 1.42361 \times 10^{-8}b^2 - 6.22449 \times 10^{-6}c^2 \quad (7)$$

对式(7)进行方差分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,加速阶段输出峰值预测模型的 P 值极显著($P < 0.0001$),证明模型具有较高可靠性。模型的调整决定系数 $R^2_{adj} = 0.9995$,表明响应值 Y 的变化有 99.95% 来源于所选因素;相关系数 $R^2 = 0.9998$,与 R^2_{adj} 非常接近,表明该回归方程拟合程度较高,误差较小。经方差分析,所选因素对加速阶段输出峰值影响的主次顺序为 $c > a > b$ 。

从图 15(a)中可以看出,加速阶段输出峰值随转速的升高而升高,而角加速度与加速阶段输出峰值呈负相关,但从其 Z 轴坐标变化来看,转

表 3 响应面试验分析

Table 3 Response surface test analysis

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|------------|----------|--------------------|----------|--------------|----------|-----|
| 模型 | 9.99E-05 | 9 | 1.11E-05 | 2 040 | <0.000 1 | *** |
| a | 2.31E-08 | 1 | 2.31E-08 | 4.2 | 0.078 2 | * |
| b | 1.81E-08 | 1 | 1.81E-08 | 3.3 | 0.111 3 | * |
| c | 9.98E-05 | 1 | 9.98E-05 | 18 340 | <0.000 1 | *** |
| ab | 1.00E-10 | 1 | 1.00E-10 | 0.018 | 0.896 | * |
| ac | 2.03E-09 | 1 | 2.03E-09 | 0.37 | 0.561 | * |
| bc | 3.61E-08 | 1 | 3.61E-08 | 6.64 | 0.036 7 | ** |
| a^2 | 9.01E-09 | 1 | 9.01E-09 | 1.66 | 0.239 1 | * |
| b^2 | 1.11E-08 | 1 | 1.11E-08 | 2.03 | 0.196 9 | * |
| c^2 | 2.45E-08 | 1 | 2.45E-08 | 4.5 | 0.071 6 | ** |
| 残差 | 3.81E-08 | 7 | 5.44E-09 | | | |
| 失拟 | 3.81E-08 | 3 | 1.27E-08 | | | |
| 误差 | 0 | 4 | 0 | | | |
| 总和 | 9.99E-05 | 16 | | | | |
| S/N=171.22 | | $R^2_{adj}=0.9995$ | | $R^2=0.9998$ | | |

注:“*”表示研究结果具有一定的显著性;“**”表示研究结果非常显著;“***”表示研究结果极显著。

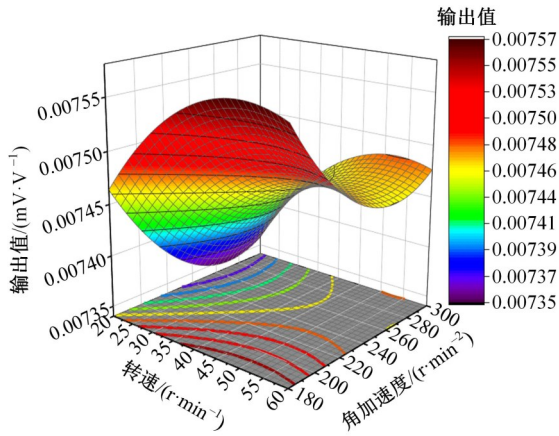
速、角加速度的影响相对较小。从图 15(b)和(c)中可以看出,无论固定转速还是固定角加速度,总重对加速阶段输出峰值的影响远远大于其余 2 个因素。

(2)匀速阶段

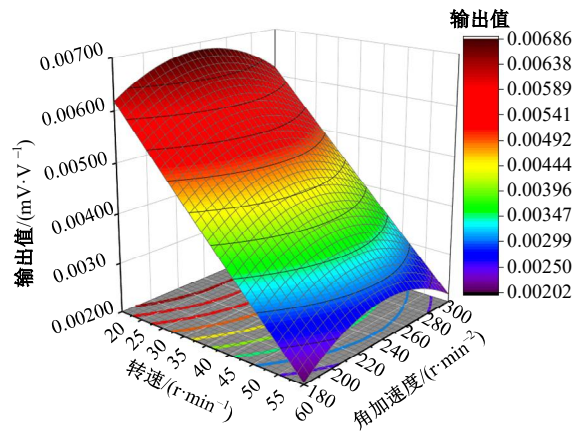
同理,对匀速阶段输出峰值进行响应面分析。为控制文字篇幅,仅给出分析后的回归方程及响应面图,如图 16 所示,其回归方程如下:

$$S_2 = -8.38070 \times 10^{-3} - 9.94464 \times 10^{-5}a + 9.27970 \times 10^{-5}b + 5.34214 \times 10^{-4}c + 2.91667 \times 10^{-8}ab - 1.42857 \times 10^{-6}ac - 3.92857 \times 10^{-7}bc + 4.68748 \times 10^{-8}a^2 - 1.87153 \times 10^{-7}b^2 + 1.92857 \times 10^{-5}c^2 \quad (8)$$

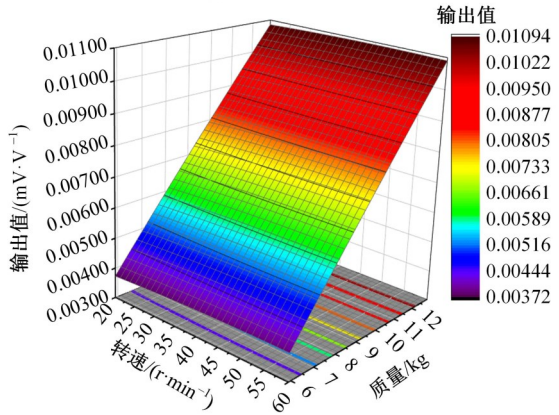
转速、角加速度和总重交互影响下匀速阶段输出峰值的响应面图和等高线如图 16 所示。从图 16(a)中可以看出,在匀速阶段状态下,角加速度在一定程度上影响着输出峰值,随着角加速度的增大,输出峰值先增大后减小。由图 16(b)的等高线可以看出,匀速阶段状态下的转速与总重对输出峰值影响的占比基本持平,转速越小,总重越大,输出峰值越大。如图 16(c)所示,随角加速度的增加,输出峰值呈先增大后减小的趋势。由此可见,在高速转动情况下,加速阶段的输出峰值主要受总重影响较大,对转速及角加速度的影响



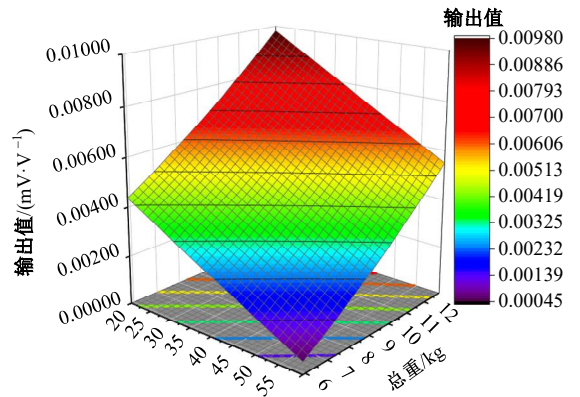
(a)转速和角加速度



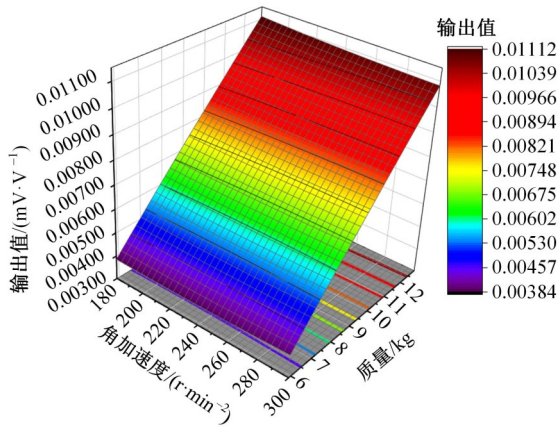
(a)转速和角加速度



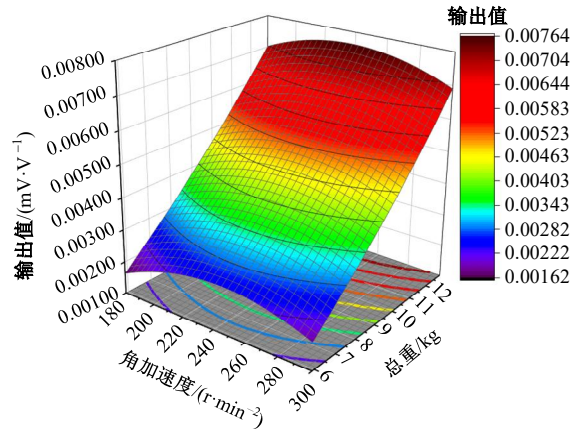
(b)转速和总重



(b)转速和总重



(c)角加速度和总重



(c)角加速度和总重

图 15 转速、角加速度和总重交互影响下加速阶段输出峰值的响应面图

Fig. 15 Response surface diagram and contour of output peak at acceleration stage under interaction of speed, angular acceleration and total weight

图 16 转速、角加速度和总重交互影响下匀速阶段输出峰值的响应面图

Fig. 16 Response surface diagram of output peak at constant speed stage under the interaction of speed, angular acceleration and total weight

可忽略不计;对于匀速阶段,输出峰值主要受总重影响,其次是转速;角加速度对输出峰值的影响在匀速阶段较为明显。

综上所述,称重传感结构的输出与连接部件的结构特点及运动状态的特性是息息相关的,应当对称重传感结构的连接部件结构及引入的影响统筹考虑,进而将其作为工程应用中的寄生分量

抑制措施的重要依据。

6 结 论

分析了动态称重过程中常见的横向、纵向及绕轴旋转的多向运动特点,通过研究基于称重传感结构的多向运动特征,给出了数学模型理论公式,并对横向、纵向及绕轴旋转进行仿真分析。逐级改变称重传感结构中的总重大小、旋转速度及角加速度,用以模拟实际应用中不同工况引入的叠加效应对输出的影响,再给出相应的回归方程,通过实验测试,验证了理论和仿真分析的合理性,结论如下:

(1)横向运动引入的输出影响,可忽略不计;纵向运动引入的载荷输出影响大小次之,其最大偏差为 $0.015\%FS$,其在一些高准确度称重场合是不容忽视;而绕轴旋转的运动引入的载荷输出影响最大,且在一定范围随旋转角度的增大而发生急剧变化,最大可达 $(-0.588\sim+0.562)\%FS$ 。

(2)旋转动作均为由0加速至最大转速,再保持一定的转速或变转速,最后在旋转起点瞬间,其输出将发生突变现象,此时不宜作为称重结果,应当对其误差补偿或选用合适的加载时间及位置的数据采集,以此抑制多向运动引入的动态称重误差。

(3)当逐级增加称重传感结构的总重,对称重传感结构的作用力也相应增加,该影响效应也随之增大,效果还是比较显著的,其额定输出误差最大可达 $(-0.333\sim+0.322)\%FS$,该影响不容忽视。

(4)当逐级增大称重传感结构的旋转速度时,其输出的影响比较显著,最大可达 $\pm 0.1\%FS$ 。

(5)当逐级增加称重传感结构的角加速度,称重传感结构的输出未发生较大的变化,可见一定范围内的角加速度对输出结果影响不大。

为进一步提高称重传感结构的动态称重精准性和可靠性,通过掌握多向运动规律及对输出的影响,在实际应用中避开这些干扰因素带来的不良影响,尤其关注加速运动节点的突变现象并予以补偿,以解决复杂工况下称重传感结构的动态精确测量问题,最终确保称重传感结构具有良好的技术性能。

参考文献:

- [1] 朱建梅, 黄松和. 平行梁式称重传感器的动态仿真分析[J]. 机械, 2014, 41(11): 31-35, 76.
Zhu Jian-mei, Huang Song-he. Dynamic simulation analysis of parallel girder load sensor[J]. Machinery, 2014, 41(11): 31-35, 76.
- [2] 张业兵. 运动速度对动态称重的影响[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2007, 21(2): 41-44, 47.
Zhang Ye-bin. The influence of vehicle speed on weigh-in-motion[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 21(2): 41-44, 47.
- [3] 尹继武, 龙姝明. 应变片倾斜角度对称重传感器偏载误差的影响[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2014, 30(2): 19-23.
Yin Ji-wu, Long Shu-ming. Influence of strain gauge tilt angle on eccentric error of load sensor[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 30(2): 19-23.
- [4] 郁有文, 常健, 程继红. 传感器原理及工程应用[M]. 4版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [5] 赵思宏, 田春艳, 范惠林. 平行梁式称重传感器的有限元分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 209-213.
Zhao Si-hong, Tian Chun-yan, Fan Hui-lin. Finite element analysis of the parallel girder load sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(2): 209-213.
- [6] 何兆湘, 黄兆祥, 王楠. 传感器原理与检测技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.
- [7] 郑韬, 俞宁峰, 连昌伟. 应变计式力传感器对高速拉伸载荷振荡的改善[J]. 锻压技术, 2019, 44(8): 124-128, 136.
Zheng Tao, Yu Ning-feng, Lian Chang-wei. Improvement of load oscillation in high-speed tension by strain gauge force sensor[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(8): 124-128, 136.
- [8] Mocanu S, Panaitescu R, Tonciu O, et al. Influence of the parallel beam load cell installation on the strain/stress field reading error[J]. Romanian Journal of Transport Infrastructure, 2023, 12(1): 1-13.
- [9] 干方建, 刘正士, 孔凡让, 等. 传感器微分运动引起的机器人运动误差及其在线补偿[J]. 中国机械工程, 2005(23): 2069-2071.
Gan Fang-jian, Liu Zheng-shi, Kong Fan-rang, et al. On-line compensation of robot motion errors based on multi-axis force sensor's deformation[J].

- China Mechanical Engineering, 2005(23): 2069-2071.
- [10] 陈浩文, 李坚, 王兵, 等. 机器人交互作业中六维力传感器重力补偿研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10): 47-51.
- Chen Hao-wen, Li Jian, Wang Bing, et al. Research on gravity compensation of six-axis force sensor in robot interactive operation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(10): 47-51.
- [11] Li J, Guan Y, Chen H, et al. A high-bandwidth end-effector with active force control for robotic polishing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 169122-169135.
- [12] Taeyong K, Marco V A, Jaehong S, et al. Development of a differential load cell negating inertial force[J]. Measurement, 2023, 223: No. 113789.
- [13] 马涛, 马源, 黄晓明. 基于多元非线性回归的智能压实关键参数最优解[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(7): 2067-2077.
- Ma Tao, Ma Yuan, Huang Xiao-ming. Optimal combination of key parameters of intelligent compaction based on multiple nonlinear regression[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 2067-2077.