

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904631

应变片排布位置对柱式力传感器输出影响^{*}

梁 伟^{1,2}, 韦铁平³, 杨晓翔¹, 赖征创¹, 姚进辉²

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116; 2. 福建省计量科学研究院 福州 350003;
3. 福建工程学院机械与汽车工程学院 福州 350118)

摘 要:研究偏心、倾斜载荷作用下,应变片排布位置对柱式力传感器输出的影响,对提高传感器抗偏心、倾斜载荷能力具有重要作用。采用弹性理论建立了偏心、倾斜载荷作用下,考虑应变片位置偏差、角度偏差、高度位置影响的柱式传感器输出模型。基于该模型,分别讨论了应变片位置偏差、角度偏差和高度位置对传感器示值误差和方位误差的影响,并进行实验验证。研究结果表明,当应变片之间存在位置偏差或应变片存在角度偏差,传感器在偏心、倾斜载荷作用下,将产生较大示值误差和方位误差,且误差随位置偏差或角度偏差的增大而迅速增大。应变片粘贴时,如果位置偏差和角度偏差均不大于 1° ,则即使传感器在 0.1° 倾斜载荷作用下,示值误差也可以控制在 $\pm 0.15\%$ 以内。贴片高度位置变化对传感器输出的影响较小。该力传感器输出模型分析结果准确可靠,对控制传感器生产工艺水平具有一定指导作用。

关键词:应变片;力传感器;寄生分量;示值误差

中图分类号: TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Influence of strain gauge layout on the output of column type force transducer

Liang Wei^{1,2}, Wei Tieping³, Yang Xiaoxiang¹, Lai Zhengchuang¹, Yao Jinhui²

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2.Fujian Metrology Institute, Fuzhou 350003, China; 3.School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Studying the influence of the strain gauge layout on the output of the force transducer under eccentric and tilting loading is very important to enhance the anti-eccentric and tilting loading ability of the transducer. In this paper, using the theory of elasticity, the output model of the column force transducer under eccentric and tilting loading is established considering the influence of the position deviation, angle misalignment and height location of the strain gauges. Based on the model, the influences of the position deviation, angle misalignment and height location on the indication error and direction error are discussed, respectively. The verification experiments were carried out. Study results show that under eccentric and tilting loading, when position errors exist among the strain gauges or angle misalignment of the strain gauges exists, large indication error and direction error occur. The indication error and direction error increase sharply as the position deviation and angle misalignment increase. When attaching the strain gauges, if the position deviation and angle misalignment are both not greater than 1° , the indication error could be controlled within $\pm 0.15\%$ even the transducer is under the tilting loading of 0.1° . The height location variation of the strain gauge has a little effect on the output of the transducer. The analysis results of the developed force transducer output model are accurate and reliable, which can be a guidance to control the manufacture processing of the force transducers.

Keywords: strain gauge; force transducer; parasitic component; indication error

0 引 言

力值是产业发展、国防建设及科学研究中不可缺少

的重要物理量。随着科技和工业水平的快速发展,精准的超大力值(大于20 MN)测量在国防装备、航空航天、高速铁路等领域具有关键性作用^[1-4]。为保证上述测量的准确可靠,国内外计量技术机构纷纷建立超大力值标准

收稿日期:2019-01-08 Received Date:2019-01-08

^{*} 基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技计划(2015QK295)、福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2015029)、福建省青年自然科学基金(2017J05071)项目资助

机^[5-7],以确保超大力值范围内力值测量的准确可靠。超大力值标准机^[8-10]必须采用力传感器叠加系统(简称“叠加系统”)对其进行赋值校准,才能保证其量值的准确可靠^[3, 11-13]。叠加系统一般由 n 只量程相同、并联排布的力传感器和叠加结构组成,其量程是单只力传感器的 n 倍^[14-15]。在实际工作中,在外载荷作用下,叠加结构发生变形。相比在上级力标准机上校准时的受力状态,力传感器在叠加系统中工作时增加了一个附加弯矩和一个侧向力,该附加弯矩和侧向力统称为“寄生分量”。由于该寄生分量的存在,力传感器受载输出的信号中,不仅包含了由于轴向受力输出的信号,而且耦合进了附加弯矩和侧向力作用下传感器输出的信号,使力传感器在叠加系统中工作时产生示值偏差,给叠加系统的合力值带来示值误差。作为超大力值范围内的初级计量标准,叠加系统准确与否直接决定了被校准的超大力值力标准机的准确度水平^[16-18]。因此,探究寄生分量对力传感器输出的影响,优化力传感器设计,使其具有较优的抗寄生分量能力具有重要意义^[19-20]。

一直以来,国内外专家学者对传感器的探索从未停止,但研究主要集中在通过弹性体结构的优化,提高传感器抗偏心、倾斜载荷的能力^[21-24]。但是,要制造出高准确度的应变式力传感器,应变片贴片工艺至关重要。由于目前并无相关的生产技术标准,国内外各传感器生产厂家根据其积累的经验进行传感器生产,且对外实施技术封锁。目前已公开的文献报道,只涉及部分生产经验以

及一些定性的分析研究。Bray等^[22]研究发现保证弹性体上应变片贴片方位的准确性,能抑制传感器旋转效应的产生;王海洲^[25]指出为把力传感器承受的力矩和侧向载荷的影响限制在规定的误差范围内,必须保证应变片粘贴时位置和方向的定位精度和对称性,尽量不要偏离中心线;刘九卿^[26-28]经过理论分析和实验测试发现电阻应变片定位偏差等引起的非测量应变变量是传感器旋转效应形成的重要原因之一。上述研究都指明提高贴片位置准确度对提高传感器抗偏心、倾斜载荷能力具有重要作用。但是在实际贴片过程中,无法真正做到位置的绝对准确。应变片粘贴位置偏差量对传感器输出的影响应该进行量化分析,只有这样才能进行贴片工艺的合理控制。为此,必须建立应变片粘贴偏差情况下传感器输出模型。

本文研究了在偏心、倾斜载荷作用下,应变片排布对传感器输出的影响。建立了考虑应变片贴片位置偏差、角度偏差、贴片高度位置影响的柱式力传感器输出模型,探究其对传感器示值误差和方位误差的影响。

1 理论分析

1.1 偏心、倾斜载荷下弹性体应变分布

如图1所示将柱式力传感器的弹性体简化为圆柱体,其顶部为球冠面,即为弹性体的球头曲面。以圆柱体中心轴为 z 轴,建立柱坐标系 (r, φ, z) ,以球头曲面的圆心为原点,建立球坐标系 (ρ, θ, ϕ) 。

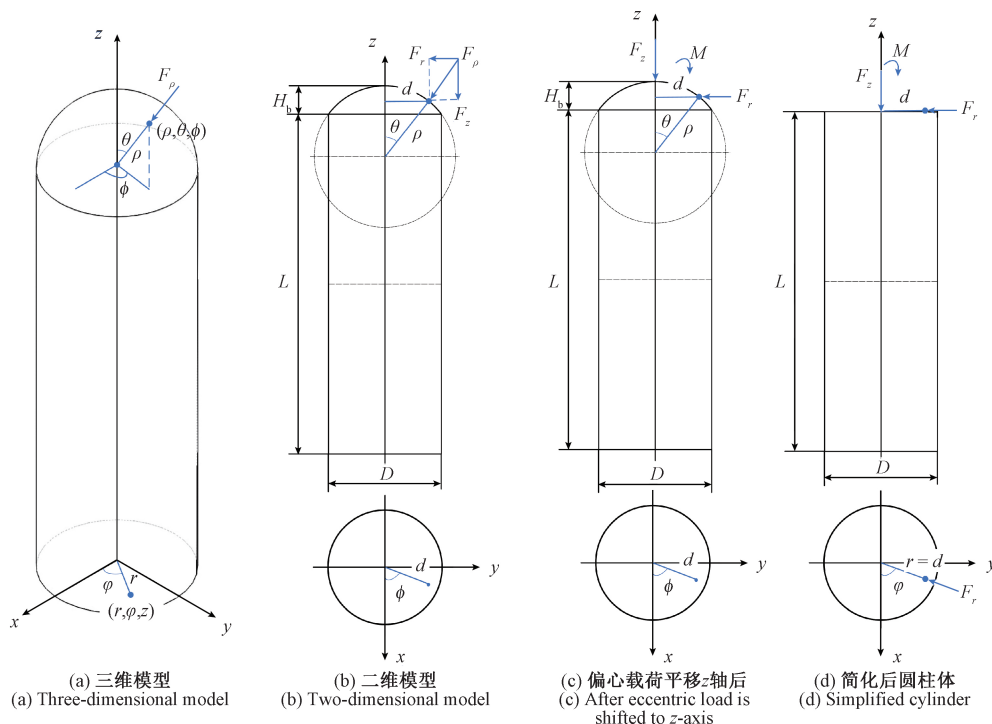


图1 柱式传感器弹性体受力示意图

Fig.1 Force diagram of the column-type force transducer elastic element

由于上承压板受载变形,传感器球头沿弹性体的球头曲面发生倾斜,倾斜角度为 θ 。如果忽略球头对弹性体的摩擦力,则施加在弹性体的力为 F_ρ , 将其沿径向和轴向分解得到:

$$\begin{cases} F_r = F_\rho \sin\theta \\ F_z = F_\rho \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_r 为径向力,即作用于弹性体的侧向力; F_z 为轴向力。由式(1)可以计算得到侧向力为:

$$F_r = F_z \tan\theta \quad (2)$$

相对弹性体中心轴(即 z 轴), F_z 为偏心载荷,偏心距为 d 。

$$d = \rho_2 \sin\theta \quad (3)$$

式中: ρ_2 为弹性体球头曲面的曲率半径。

如果将偏心载荷平移到 z 轴,则产生附加弯矩 M :

$$M = F_z \cdot d = F_z \cdot \rho_2 \sin\theta \quad (4)$$

对于一般的柱式力传感器,其弹性体球头曲面的高度 H_b 远小于弹性体圆柱体长度 L , 即 $H_b \ll L$ 。因此,把弹性体近似等效为圆柱体。根据叠加原理,上述柱式传感器弹性体在偏心、倾斜载荷作用下的力学问题可以分解为圆柱体的单向压缩、纯弯曲和一般弯曲 3 个力学模型。

1) 单向压缩

该圆柱体的单向压缩为轴对称模型,其平衡方程、本构方程、几何方程和边界条件如下。

(1) 平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r^{(1)}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}^{(1)}}{\partial z} + \frac{\sigma_r^{(1)} - \sigma_\varphi^{(1)}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z^{(1)}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}^{(1)}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}^{(1)}}{r} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 本构方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_r^{(1)} - \mu(\sigma_\varphi^{(1)} + \sigma_z^{(1)})] \\ \varepsilon_\varphi^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi^{(1)} - \mu(\sigma_z^{(1)} + \sigma_r^{(1)})] \\ \varepsilon_z^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_z^{(1)} - \mu(\sigma_\varphi^{(1)} + \sigma_r^{(1)})] \\ \gamma_{rz}^{(1)} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{rz}^{(1)} \end{cases} \quad (6)$$

(3) 几何方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{(1)} = \frac{\partial u^{(1)}}{\partial r}, \varepsilon_\varphi^{(1)} = \frac{u^{(1)}}{r} \\ \varepsilon_z^{(1)} = \frac{\partial w^{(1)}}{\partial z}, \gamma_{rz}^{(1)} = \frac{\partial u^{(1)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(1)}}{\partial r} \end{cases} \quad (7)$$

(4) 边界条件

在 $z=0$ 端面上,位移边界为:

$$w^{(1)} = 0 \quad (8)$$

载荷边界为:

$$\iint \sigma_z^{(1)} dr d\varphi = F_z \quad (9)$$

(5) 求解结果

依据弹性理论^[29]对该模型进行求解,可以得到弹性体的应变分布为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z^{(1)} &= \frac{F_z}{\pi E R^2} \\ \varepsilon_r^{(1)} &= \varepsilon_\varphi^{(1)} = -\mu \frac{F_z}{\pi E R^2} \\ \gamma_{r\varphi}^{(1)} &= \gamma_{\varphi z}^{(1)} = \gamma_{zr}^{(1)} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: E 为弹性体材料弹性模量; μ 为弹性体材料泊松比; R 为弹性体圆截面半径。

2) 纯弯曲

(1) 平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r^{(2)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}^{(2)}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}^{(2)}}{\partial z} + \frac{\sigma_r^{(2)} - \sigma_\varphi^{(2)}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\varphi}^{(2)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\varphi^{(2)}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}^{(2)}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{r\varphi}^{(2)}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zr}^{(2)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\varphi}^{(2)}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_z^{(2)}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}^{(2)}}{r} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

(2) 本构方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{(2)} = \frac{1}{E} [\sigma_r^{(2)} - \mu(\sigma_\varphi^{(2)} + \sigma_z^{(2)})] \\ \varepsilon_\varphi^{(2)} = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi^{(2)} - \mu(\sigma_z^{(2)} + \sigma_r^{(2)})] \\ \varepsilon_z^{(2)} = \frac{1}{E} [\sigma_z^{(2)} - \mu(\sigma_\varphi^{(2)} + \sigma_r^{(2)})] \\ \gamma_{r\varphi}^{(2)} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{r\varphi}^{(2)} \\ \gamma_{zr}^{(2)} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zr}^{(2)} \\ \gamma_{\varphi z}^{(2)} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{\varphi z}^{(2)} \end{cases} \quad (12)$$

(3) 几何方程为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(2)} &= \frac{\partial u^{(2)}}{\partial r}, \varepsilon_\varphi^{(2)} = \frac{u^{(2)}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v^{(2)}}{\partial \varphi}, \varepsilon_z^{(2)} = \frac{\partial w^{(2)}}{\partial z}, \\ \gamma_{r\varphi}^{(2)} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u^{(2)}}{\partial r} + \frac{\partial v^{(2)}}{\partial r} - \frac{v^{(2)}}{r}, \gamma_{zr}^{(2)} = \frac{\partial u^{(2)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(2)}}{\partial r}, \\ \gamma_{\varphi z}^{(2)} &= \frac{1}{r} \frac{\partial w^{(2)}}{\partial \varphi} + \frac{\partial v^{(2)}}{\partial z} \end{aligned} \quad (13)$$

(4) 边界条件

在 $z=0$ 端面上,位移边界为:

$$w^{(2)} = 0 \quad (14)$$

载荷边界为:

$$\iint \sigma_z^{(2)} r \cos\varphi dr d\varphi = -M \quad (15)$$

(5) 求解结果

依据弹性理论^[29]对该模型进行求解,可以得到弹性体的应变分布为:

$$\begin{cases} \varepsilon_z^{(2)} = -\frac{4M}{\pi ER^4}x \\ \varepsilon_r^{(2)} = \varepsilon_\varphi^{(2)} = \mu \frac{4M}{\pi ER^4}x \\ \gamma_{r\varphi}^{(2)} = \gamma_{\varphi z}^{(2)} = \gamma_{zr}^{(2)} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

3) 一般弯曲

(1) 平衡方程

平衡方程与式(11)一致,将其中的上标(2)改为(3)。

(2) 本构方程

本构方程与式(12)一致,将其中的上标(2)改为(3)。

(3) 几何方程

几何方程与式(13)一致,将其中的上标(2)改为(3)。

(4) 边界条件

在 $z=0$ 端面上,位移边界为:

$$w^{(3)} = 0 \quad (17)$$

载荷边界为:

$$\iint \sigma_z^{(3)} r \cos \varphi dr d\varphi = -F_r l \quad (18)$$

(5) 求解结果

依据弹性理论^[29]对该模型进行求解,可以得到弹性体的应变分布为

$$\begin{cases} \varepsilon_z^{(3)} = -\frac{F_r(l-z)}{EI} R \cos \varphi \\ \varepsilon_r^{(3)} = \varepsilon_\varphi^{(3)} = \mu \frac{F_r(l-z)}{EI} R \cos \varphi \end{cases} \quad (19)$$

式中: I 为弹性体的惯性矩, $I = \pi R^4/4$ 。

将单向压缩、纯弯曲和一般弯曲 3 个力学模型求解结果中的径向应变、环向应变和轴向应变叠加,得到:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = -\mu \frac{F_z}{\pi ER^2} + \mu \frac{4M}{\pi ER^4} R \cos \varphi + \mu \frac{F_r(L-z)}{EI} R \cos \varphi \\ \varepsilon_\varphi = -\mu \frac{F_z}{\pi ER^2} + \mu \frac{4M}{\pi ER^4} R \cos \varphi + \mu \frac{F_r(L-z)}{EI} R \cos \varphi \\ \varepsilon_z = \frac{F_z}{\pi ER^2} - \frac{4M}{\pi ER^4} R \cos \varphi - \frac{F_r(L-z)}{EI} R \cos \varphi \end{cases} \quad (20)$$

定义弹性体的长径比为 κ :

$$\kappa = \frac{L}{2R} \quad (21)$$

定义弹性体高度位置 λ_z :

$$\lambda_z = \frac{z}{L} \quad (22)$$

式中: $\lambda_z \in [0, 1]$ 。

由于 θ 很小, $\sin \theta \approx \tan \theta$, 将式(2)、(4)、(24)和(25)代入式(23), 计算得到:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\mu F}{\pi ER^3} [-R + 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin \theta \cos \varphi] \\ \varepsilon_\varphi = \frac{\mu F}{\pi ER^3} [-R + 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin \theta \cos \varphi] \\ \varepsilon_z = \frac{F}{\pi ER^3} [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin \theta \cos \varphi] \end{cases} \quad (23)$$

因此,在偏心、倾斜载荷作用下,弹性体圆柱侧面上的应变分布与弹性体的半径 R 、长径比 κ 、球头曲面曲率半径 ρ_2 、上承压板弯曲角度 θ 以及轴向位置 λ_z (应变片贴片高度位置)和应变片所在位置的环向坐标 φ 有关。研究这些变量对应变的影响,对于选择合适的应变片贴片位置、排布方案,设计合理的弹性体结构具有重要的指导意义。本文主要针对贴片位置及其偏差、贴片高度等对传感器的影响进行深入讨论。

1.2 偏心、倾斜载荷下传感器输出

柱式力传感器在弹性体轴向分布有若干个应变片以采集弹性体轴向应变,在弹性体环向分布有相同数目的应变片以采集弹性体环向应变。把弹性体上的应变片组成惠斯通电桥,如图2所示。

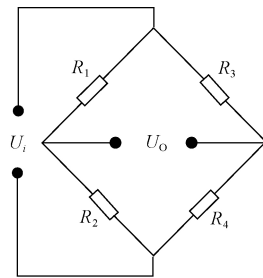


图2 惠斯通电桥
Fig.2 Wheatstone bridge

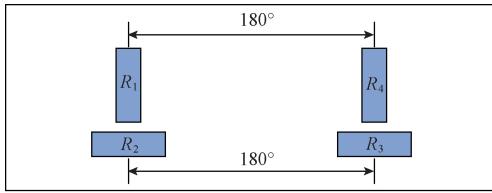
传感器的输出为 X :

$$X = \frac{1}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (24)$$

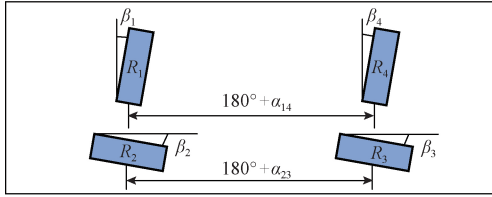
式中: K 为应变片系数。

将弹性体圆柱侧面展开,4枚应变片的排布方案如图3所示。由于工艺水平的限制,在应变片的粘贴过程中,应变片存在一定角度偏差 β_a 以及对称分布的两应变片间存在位置偏差 α_{ab} 。

考虑应变片的位置偏差和角度偏差,将各贴片位置坐标代入公式(26),得到每个应变片的应变值,



(a) 理想情况下
(a) Under ideal condition



(b) 应变片粘贴存在位置偏差和角度偏差
(b) Strain gauges attached with position deviations and angle misalignments

图3 四枚应变片布片方案

Fig.3 The layout scheme of four strain gauges

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{F}{\pi E R^3} (\cos\beta_1 - \mu \sin\beta_1) \cdot [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos\varphi] \\ \varepsilon_2 = \frac{F}{\pi E R^3} (\sin\beta_2 - \mu \cos\beta_2) \cdot [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos\varphi] \\ \varepsilon_3 = \frac{F}{\pi E R^3} (\sin\beta_3 - \mu \cos\beta_3) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos(\varphi + 180 + \alpha_{23})] \\ \varepsilon_4 = \frac{F}{\pi E R^3} (\cos\beta_4 - \mu \sin\beta_4) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos(\varphi + 180 + \alpha_{14})] \end{cases} \quad (25)$$

将上式代入(26)式,得到传感器输出为:

$$X = \frac{1}{4} K \frac{F}{\pi E_Y R^3} \{ (\cos\beta_1 - \mu \sin\beta_1) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos\varphi] - (\sin\beta_2 - \mu \cos\beta_2) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos\varphi] - (\sin\beta_3 - \mu \cos\beta_3) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos(\varphi + 180 + \alpha_{23})] + (\cos\beta_4 - \mu \sin\beta_4) [R - 4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta \cos(\varphi + 180 + \alpha_{14})] \} \quad (26)$$

当传感器在理想的承载状态下,力作用于传感器的轴向上,即 $\theta = 0^\circ$,将其代入上式,得到理想承载状态下的输出 X' 为:

$$X' = \frac{1}{4} K \frac{F}{\pi E_Y R^3} \cdot R \left[(\cos\beta_1 - \mu \sin\beta_1) - (\sin\beta_2 - \mu \cos\beta_2) - (\sin\beta_3 - \mu \cos\beta_3) + (\cos\beta_4 - \mu \sin\beta_4) \right] \quad (27)$$

力传感器在偏心、倾斜载荷作用下的示值误差 e 为:

$$e = \frac{X - X'}{X'} \times 100\% \quad (28)$$

将式(26)和(27)代入式(8),得到式(29)。

$$e = - \frac{4(2R\kappa - 2R\kappa\lambda_z + \rho_2) \sin\theta}{R} \cdot$$

$$\frac{\left[(\cos\beta_1 - \mu \sin\beta_1) \cos\varphi - (\sin\beta_2 - \mu \cos\beta_2) \cos\varphi - (\sin\beta_3 - \mu \cos\beta_3) \cos(\varphi + 180 + \alpha_{23}) + (\cos\beta_4 - \mu \sin\beta_4) \cos(\varphi + 180 + \alpha_{14}) \right]}{\left[(\cos\beta_1 - \mu \sin\beta_1) - (\sin\beta_2 - \mu \cos\beta_2) - (\sin\beta_3 - \mu \cos\beta_3) + (\cos\beta_4 - \mu \sin\beta_4) \right]} \times 100\% \quad (29)$$

在同一偏心、倾斜载荷作用下,力传感器绕其中心轴旋转到不同位置,其最大输出 $X_{\max}$ 和最小输出 $X_{\min}$ 的差值的相对值 p ,即传感器方位误差,由下式计算得到:

$$p = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max}} \times 100\% \quad (30)$$

2 实验设计

为验证上述理论分析结果,设计了一只不同贴片位置偏差和角度偏差、不同贴片高度以及不同贴片方案的300 kN 力传感器,如图4所示。

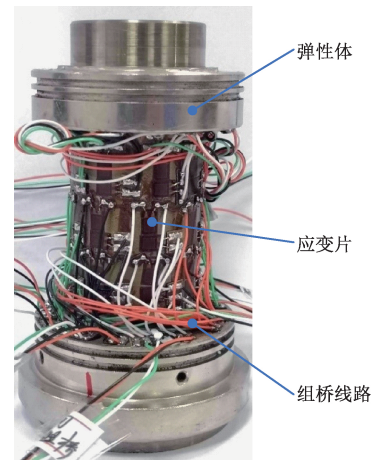


图4 力传感器

Fig.4 Force transducer

2.1 实验方案设计

1) 弹性体

弹性体外形尺寸如图5所示,当300 kN 外载荷作用下弹性体中心轴时,依据式(23)计算得到弹性体圆柱侧面中间位置的轴向应变和环向应变分别为 -1.26×10^{-3} 和 0.38×10^{-3} 。弹性体材料为40CrMoNiA,经过粗车、热处理、精车和打磨后进行清洗。

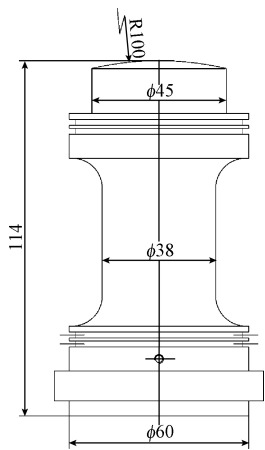


图 5 弹性体外形尺寸

Fig.5 Outline dimension of the elastic element

2) 应变片排布

在该弹性体上的不同高度位置, $\lambda_z = 2/3, 1/2$ 和 $1/3$, 共粘贴了 3 排电阻应变片, 各排分别贴有 4 组 (16 枚) 电阻应变片, 具体排布方案如图 6 所示。

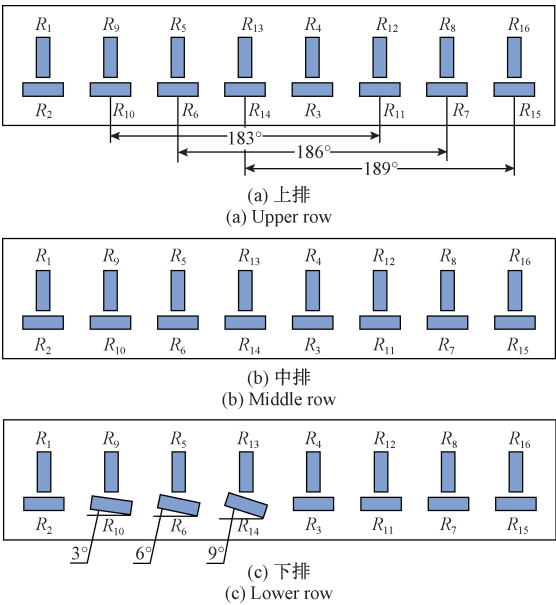


图 6 力传感器应变片排布示意图

Fig.6 Schematic diagram of the layout of the strain gauges attached on the force transducer

在上排 ($\lambda_z = 2/3$) 位置, 所有 16 枚应变片的角度偏差严格控制在 1° 以内, 但 4 组应变片的位置偏差不同。第 1 组 (R_1, R_2, R_3, R_4) 的两枚轴向和两枚环向应变片之间的间隔均为 180° ; 第 2 组 ($R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$) 的两枚轴向和两枚环向应变片之间的间隔均为 183° ; 第 3 组 ($R_5, R_6,$

R_7, R_8) 的两枚轴向和两枚环向应变片之间的间隔均为 186° ; 第 4 组 ($R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$) 的两枚轴向和两枚环向应变片之间间隔为 189° 。

在中排 ($\lambda_z = 1/2$) 位置, 所有应变片的角度偏差严格控制在 1° 以内, 且各组应变片在弹性体圆柱侧面均匀分布, 位置偏差控制在 1° 以内。

在下排 ($\lambda_z = 1/3$) 位置, 所有 4 组应变片位置偏差控制在 1° 以内, 但应变片角度偏差不一样。在第 2 组 ($R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$) 中, R_{10} 与水平方向存在 3° 偏差; 在第 3 组 (R_5, R_6, R_7, R_8) 中, R_6 与水平方向存在 6° 偏差; 在第 4 组 ($R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$) 中, R_9 与水平方向存在 9° 偏差。其余应变片的角度偏差控制在 1° 以内。

上排和下排的各组应变片均组成一个惠斯通电桥, 分别对载荷进行。上排的 4 组应变片用于比较不同贴片位置偏差对传感器输出的影响; 下排的 4 组应变片用于比较不同贴片角度偏差对传感器输出的影响; 上、中、下排的第 1 组用于比较不同贴片高度位置对传感器输出的影响。

3) 贴片

采用分辨率为 0.1° 的分度盘将弹性体夹紧, 按照图 6 的位置要求在弹性体圆柱侧面上划线, 完成后再对弹性体进行清洗。最后, 再进行应变片的粘贴和固化。所有应变片均采用德国 HBM 公司的 K-CLY4 型电阻应变片。

2.2 实验步骤

不同贴片位置偏差、不同贴片角度偏差以及不同贴片高度位置对传感器输出影响的实验测试同时进行。采用两台德国 HBM 公司的 DMP41 应变式传感器仪表, 每块仪表有 6 个独立通道, 共 12 通道。将上排 4 组、中排 1 组以及下排 4 组应变片组成的 9 个电桥分别接入仪表的各个通道中。

采用一台量程为 300 kN、准确度为 0.005% 的静重力标准机对该传感器进行测量。传感器下方安装一块倾斜角度为 0.1° 的楔形垫块, 实验装置如图 7 所示。

依据 ISO 376 :2011(E) “测力仪校准国际标准”^[30], 在第 1 个测量方位上, 经过 3 次预压后, 均匀选择 10 个测量点, 按载荷递增顺序逐点对传感器进行加载, 当加载到每个测量点后保压 30 s 并同时记录 9 个输出信号值 X_n , 直到最大测量点, 然后完全卸除载荷。等待 3 min 后将传感器绕其中心轴线旋转 120° 。在新的测量方位上, 预压 1 次后, 按递增顺序逐点加载, 在每个测量点上保压 30 s 后记录 9 个输出信号值 X_n , 直到最大测量点, 最后卸除载荷; 最后, 将传感器绕其中心轴再旋转 120° , 重复第 2 个方位的测量一遍。

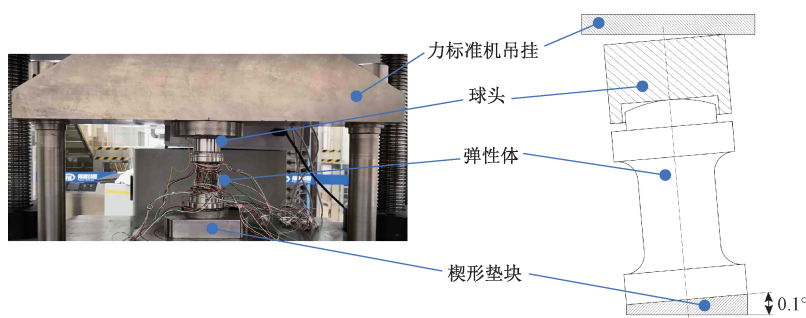


图7 力传感器测试装置

Fig.7 Test set-up of the force transducer

一次加载、同时测量出不同应变片排布方案的信号输出可提高不同电桥之间的可比性。因为即使对传感器施加同等大小的力,前后两次传感器与力标准机之间在接触过程相互交互产生的有害作用力也不同,会由此产生干扰。

将上述实验得到的输出值 X_n (n 为力传感器的测量方位,与 ISO 376 :2011 不同,在本文研究中 $n=1,2,3$ 分别代表第1方位、第2方位、第3方位)分别代入式(34)~(36)计算出实验测量得到的示值误差 e_i 、重复性 q_i 和方位误差 p_i ,

$$e_i = \frac{X_n - X'_i}{X'_i} \times 100\% \quad (31)$$

式中: X'_i 为各组比较中应变片位置误差为0或应变片角度为0的电桥输出。

$$q_i = \frac{|X_1 - X_4|}{X'_i} \times 100\% \quad (32)$$

$$p_i = \frac{\max(X_1, X_2, X_3) - \min(X_1, X_2, X_3)}{\bar{X}} \times 100\% \quad (33)$$

式中: $\bar{X}$ 为传感器在3个方位输出值的平均值, $\bar{X} = (X_1 + X_2 + X_3)/3$ 。

3 实验结果

3.1 贴片位置偏差对传感器输出影响

当轴向两个应变片,即图3中 R_1 和 R_4 ,存在一个位置偏差 α_{14} 时,将对力传感器输出产生很大影响。该300 kN柱式力传感器的尺寸 $R=19\text{ mm}$ 、 $\kappa=3$ 、 $\lambda_z=2/3$ 、 $\rho_2=100\text{ mm}$ 以及 $\theta=0.1^\circ$ 、 $\alpha_{23}=0^\circ$ 、 $\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_4=0^\circ$ 代入式(29),计算得到传感器示值误差随贴片位置偏差 α_{14} 和应变片环向位置坐标 φ 变化曲面,如图8(a)所示。从图8(a)可以明显看出,当 R_1 与 R_4 之间存在一个位置偏差时,示值误差随环向坐标的变化呈正弦规律变化。当应变片粘贴在 0° 和 180° 两个位置附近时,对于任何贴片位置偏差,传感器示值误差始终为0;当应变片粘贴在 90° 和 270° 两个位置附近时,示值误差达到峰值。

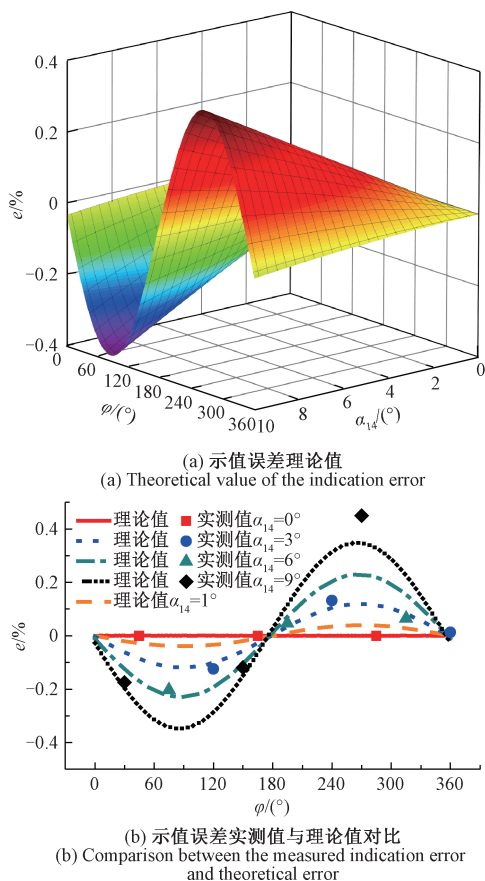


图8 在不同环向坐标位置上,应变片贴片位置偏差对传感器示值误差的影响

Fig.8 Influence of the position deviation of the strain gauge on the indication error of the transducer attached in different circumferential coordinate positions

正弦曲线的幅值与贴片位置的偏差 α_{14} 紧密相关,如图8(b)所示,当位置偏差为 9° 时,示值误差高达0.35%。随着偏差角度的减小,传感器示值误差迅速变小。当位置偏差为 1° 时,示值误差仅为0.04%,减小了近90%。特别是当轴向两个应变片呈对称分布,即 $\alpha_{14}=0^\circ$ 时,无论应变片粘贴在任何位置,传感器的示值误差始终为0。

由此证明,在不考虑摩擦力的情况下,当弹性体上所粘贴的所有应变片不存在位置偏差和角度偏差时,传感器即使承受偏心、倾斜载荷,示值误差始终为0。因此,提高应变片贴片角度和贴片位置的精准性对减小传感器的示值误差有重要作用。

将上排第1组应变片(即位置偏差为0)所组成桥路的输出作为参考标准,依据式(31),计算得到其他3组不同位置偏差的桥路的示值误差。传感器在3个方位上分别测量得到的各个桥路的示值误差如图8(b)所示。从图8(b)可以明显看到,由于各组电桥位置相隔 45° (见图6),保持弹性体坐标位置不变,各组电桥测量得到的示值误差在图中也相隔 45° ,且各组电桥测量得到的3个示值误差在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 均匀地分布在各理论计算得到的正弦曲线上。实验测量得到的示值误差与理论计算得到的示值误差值的规律基本一致。第1组电桥的输出作为参考标准,所以其示值误差为0。其他3组电桥的示值误差虽然各有大小,但是从其曲线的分布规律上看,位置偏差越大,示值误差越大。文献[22]测量得到的示值误差也呈现正弦分布的规律,但其并未解释造成这种现象的原因。本文通过对弹性体的建模分析,理论推导得到的柱式传感器示值误差计算模型能够较好地预测传感器在偏心、倾斜载荷作用下的示值误差及其变化规律。

图8(b)中波峰与波谷之差即为传感器的方位误差,因此,贴片位置的偏差极大影响了方位误差。依据式(30)绘制的方位误差随贴片位置偏差变化曲线如图9所示。

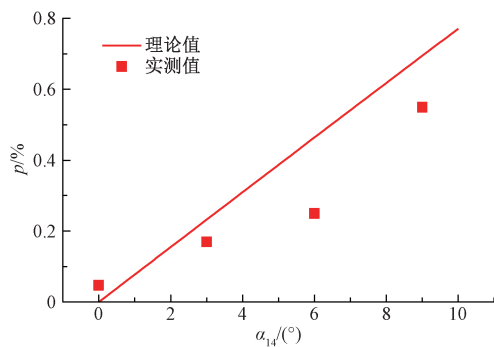


图9 应变片间贴片位置偏差对传感器方位误差的影响

Fig.9 Influence of the position deviation among the strain gauges on the direction error of the transducer

从图9可以看到,当 $\alpha_{14} = 0^\circ$ 时,方位误差为0。但是随着位置偏差的不断增大,方位误差快速变大,方位误差在 $\alpha_{14} = 9^\circ$ 时达到了0.72%。实验测量得到的方位误差变化规律与理论预测结果一致,方位误差随着贴片位置偏差的增大而增大。但是,实测方位误差稍微小于理论值。这是由于在方位误差的实际测量中,只是有限地选择了3个测量方位。如果这3个方位不在示值误差正弦曲线的波峰和波谷点上,则3个示值误差的极差值小

于示值误差正弦曲线的波峰与波谷之间的极差值,所以实测得到的方位误差要小于理论计算得到的方位误差。

3.2 贴片位置角度偏差对传感器输出影响

将 $R = 19 \text{ mm}$ 、 $\kappa = 3$ 、 $\lambda_2 = 1/2$ 、 $\rho_2 = 100 \text{ mm}$ 、 $\theta = 0.1^\circ$ 、 $\alpha_{14} = \alpha_{23} = 0^\circ$ 、 $\beta_1 = \beta_3 = \beta_4 = 0^\circ$,依据式(29),绘制传感器示值误差随贴片角度偏差 β_2 和应变片环向位置坐标 φ 变化曲面,如图10所示。从图10中可以观察到,当应变片 R_2 与水平方向存在一个角度偏差时,示值误差随环向位置的变化同样呈余弦规律变化。与图8一样,当载荷施加在 90° 和 270° 两个位置上时,对于任何贴片角度偏差,传感器的示值误差始终为0;而当载荷施加在 0° 和 180° 两个位置附近时,示值误差达到峰值。当环向应变片呈水平分布,即 $\beta_2 = 0^\circ$ 时,无论载荷施加在任何方位,传感器的示值误差始终为0。当贴片位置偏差 $\beta_2 \neq 0^\circ$ 时,传感器产生示值误差。受该贴片角度偏差 β_2 影响,示值误差曲线的幅值随着偏差的增大而增大。当位置偏差为 1° 时,示值误差为0.04%。而当角度偏差增长到 9° 时,示值误差高达0.38%左右。

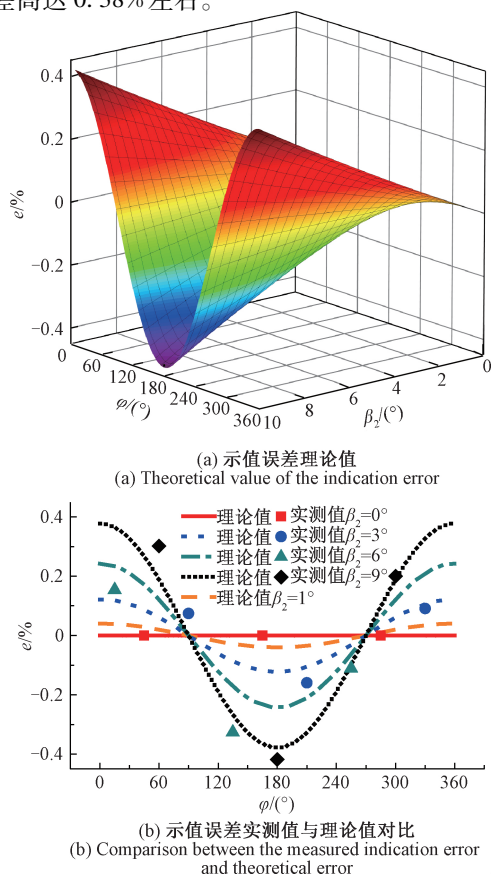


图10 在不同环向坐标位置上,应变片贴片角度偏差对传感器示值误差的影响

Fig.10 Influence of the angle misalignment of the strain gauge on the indication error of the transducer attached in different circumferential coordinate positions

将下排第1组应变片(即角度偏差为零)所组成桥路的输出作为参考标准,依据式(31),计算得到其他3组不同角度偏差的桥路的示值误差。传感器在3个测量方位上分别测量得到的各个桥路的示值误差如图10(b)所示,从图10(b)可以明显看到,各组电桥测量得到的3个示值误差在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 均匀地分布在各理论计算得到的余弦曲线上。当角度偏差为 3° 时,示值误差最大为 -0.16% ;偏差为 6° 时,示值误差增大到 -0.33% ;而偏差进一步增大到 9° 时,示值误差高达 -0.42% 。实验测量得到的示值误差与理论计算得到的示值误差值的规律基本一致,随着应变片贴片角度偏差的增大,测量得到的示值误差也不断增大。

实验测量得到的各桥路方位误差与依据式(33)计算得到的方位误差对比如图11所示。当两个应变片完全水平分布时,传感器方位误差为0。随着偏差角度的增大,方位误差迅速增大。当 $\beta_2 = 9^\circ$ 时,方位误差达到 0.76% 。比对实测结果,从图11可以看到,在角度偏差为 6° 和 9° 点上,实测值和理论值基本相等。这是由于这两组桥路测量的载荷方位正好靠近余弦曲线的波峰和波谷位置。角度偏差为 3° 点上,实验测量值高于理论预测值,这因为该组桥路在 75° 和 210° 两个位置上,示值误差均略高于理论预测值。

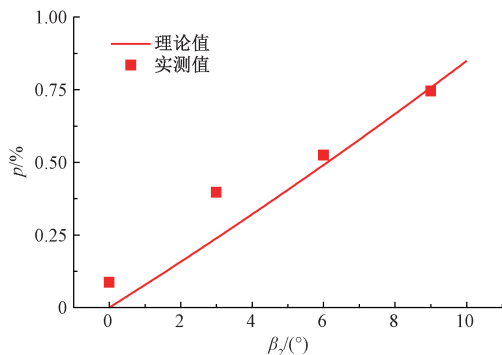


图11 应变片间贴片角度偏差对传感器方位误差的影响

Fig.11 Influence of the angle misalignment among the strain gauges on the direction error of the transducer

3.3 贴片高度对传感器输出影响

对于柱式力传感器,其弹性体贴片的高度位置一般在距离底部 $1/3 \sim 2/3$ 。取 $R = 19 \text{ mm}$ 、 $\kappa = 3$ 、 $\rho_2 = 100 \text{ mm}$ 、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 1^\circ$ 、 $\theta = 0.1^\circ$ 、 $\alpha_{14} = \alpha_{23} = 1^\circ$,依据式(29)绘制传感器示值误差随贴片高度 λ_z 和环向位置坐标 φ 变化曲面,如图12(a)所示。从图12(a)中可以观察到,当贴片高度不一致,传感器的示值误差也不同。当应变片贴在离弹性体底部 $1/3$ 位置时,示值误差最大, $e = 0.13\%$ 。随着贴片位置的上移,示值误差逐渐减小。当 $\lambda_z = 2/3$ 时,示值误差 $e = 0.10\%$,示值误差变化了

0.03% 。在3个不同测量方位上,上、中、下三排的第1组应变片分别组成的桥路测量得到的不同高度位置的示值误差如图12(b)所示。与理论计算得到的正弦分布规律一致,不同高度位置的桥路测量得到的示值误差各有大小,且各桥路的3个示值误差每隔 120° 、均匀分布在理论得到的示值误差正弦曲线附近。除 60° 方位外,在 180° 和 300° 两个方位上,3个不同高度测量得到的示值误差极差值约为 0.07% 。

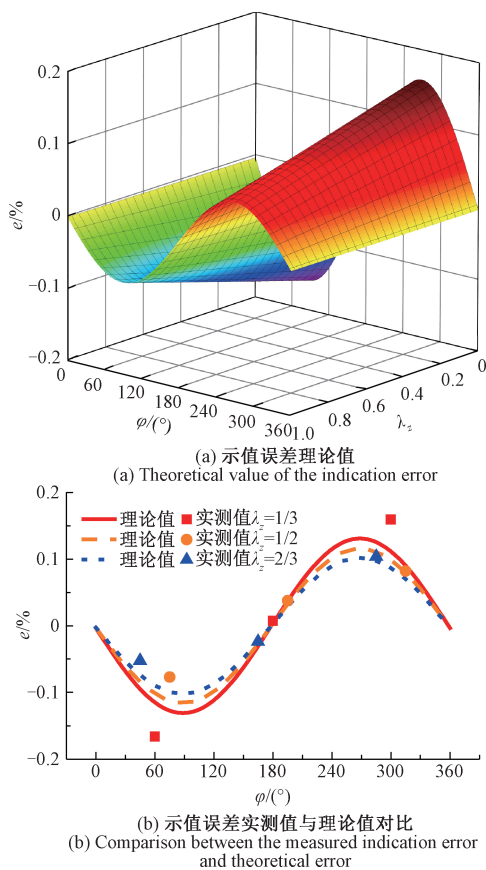


图12 贴片高度对传感器示值误差的影响

Fig.12 Influence of strain gauge height on the indication error of the transducer

依据式(30),方位误差随应变片高度变化曲线,如图13所示。当 λ_z 从 $1/3$ 增大到 $2/3$ 过程中,方位误差减小了 0.06% 。3个不同高度位置的桥路测量得到的方位误差如图13所示,随着贴片位置从 $1/3$ 提高 $2/3$,方位误差逐渐减小了 0.18% ,其规律与理论计算结果一致。

在相同的载荷工况下,相对于贴片位置偏差和角度偏差带来的影响,高度位置对传感器示值误差和方位误差的影响较小。

从图12也可以看出,如果贴片位置偏差和角度偏差不大于 1° ,则即使在 0.1° 倾斜载荷作用下,传感器示值

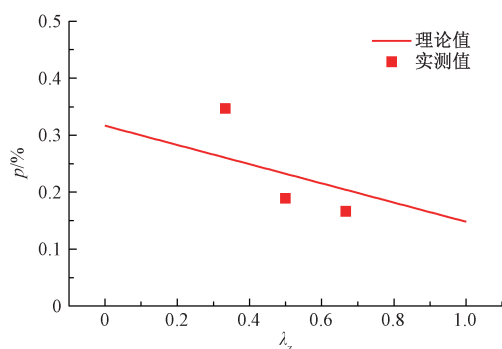


图13 不同贴片高度位置,方位误差实测值与理论值对比

Fig.13 Comparison between the measured direction error and theoretical error for different heights of the strain gauge

误差也可以控制在 $\pm 0.15\%$ 以内。

4 结 论

本文建立考虑应变片贴片位置偏差、角度偏差和贴片高度影响的传感器输出模型。基于该模型,分别讨论了应变片在位置偏差、角度偏差以及不同贴片高度位置传感器示值误差和方位误差的变化情况,并通过实验进行验证。经过理论分析和实验验证,得到如下结论。

1) 贴片位置偏差会对传感器的输出产生较大影响。当两枚应变片绕传感器中心轴相隔 180° 对称分布时,传感器的示值误差为0。但是当位置出现偏差并不断增大,传感器示值误差迅速增大。当应变片的位置偏差角度达到 9° 时,示值误差高达0.35%。在贴片过程中,应该注意对应变片位置的准确控制。

2) 贴片角度偏差也会对传感器的输出产生较大影响。当传感器所有应变片贴片角度偏差为零时,传感器的示值误差为0。随着角度偏差的增大,示值误差迅速变大。当偏差增大到 9° 时,示值误差高达0.42%。在贴片时,应该注意控制好应变片的角度,使其尽量水平排布;受贴片工艺水平的制约,无法真正做到两枚应变片完全对称分布或应变片角度偏差绝对为0,但是如果能够将偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 范围以内,则即使在 0.1° 倾斜载荷作用下,传感器的示值误差仍然可以控制在 $\pm 0.15\%$ 以内。

3) 相对贴片位置偏差和角度偏差,贴片高度位置的变化对传感器输出的影响较小。

4) 本文建立的偏心、倾斜载荷作用下,考虑应变片位

置偏差、角度偏差和高度位置影响的柱式力传感器输出模型经过实验验证,分析结果准确可靠。该模型对控制传感器生产工艺水平,提高传感器抗偏心、倾斜载荷能力具有一定指导作用。

参考文献

- [1] KUMME R, TEGTMEIER F, RÖSKE D, et al. Force traceability within the meganewton range [C]. IMEKO 22nd Conference on the Measurement of Force, Mass and Torque, 2014: 135-136.
- [2] TEGTMEIER F, WAGNER M, KUMME R. Investigations of transfer standards in the highest range up to 50 mm within EMRP project sib 63 [C]. XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry, 2015: 227-233.
- [3] TEGTMEIER F L, GUTSCH A W. Calibration of a 30 MN material testing machine according to iso 7500-1 using a force-transducer build-up system [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065: 42018-42023.
- [4] 梁伟, 杨晓翔, 姚进辉, 等. 叠加式力标准装置系统误差修正研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2473-2481.
- LIANG W, YANG X X, YAO J H, et al. Study on systemic error correction of build-up force standard device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2473-2481.
- [5] 池辉. 基于均力结构 60 MN 叠加式力值传递系统 [J]. 计量学报, 2015, 36(2): 221-224.
- CHI H. The 60 MN build-up force delivery system based on compensating structure [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(2): 221-224.
- [6] LIANG W, TEGTMEIER F, YAO J, et al. Force comparison between FJIM and PTB up to 16.5 MN [C]. IMEKO 23rd Conference on the Measurement of Force, Mass and Torque Measurement Facing New Challenges, 2017: 45-48.
- [7] WAGNER M, TSIPORENKO A, TEGTMEIER F. Development of a 15 MN build-up system for calibrations in UKRAINE's heavy industry [C]. XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry, 2015: 261-265.
- [8] MARINESCU A, OPRAN G, POPA D, et al. Stability of

- the 32 MN force calibration machine and industrial applications[J]. *Strategies of Multinational Corporations & Social Regulations*, 2002(1685):631-636.
- [9] KANG D, SONG H, LEE J, et al. Traceability of large force standards in KOREA [C]. XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, 2003: 393-396.
- [10] 姚建涛, 侯雨雷, 牛建业, 等. 大量程预紧式六维力传感器及静态标定研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6):1233-1239.
- YAO J T, HOU Y L, NIU J Y, et al. Large range prestressed six-axis force sensor and study on static calibration[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6):1233-1239.
- [11] TEGTMEIER F, ROSK D, LIANG W. Practical applications of an enhanced uncertainty model for build-up systems [C]. IMEKO 23rd Conference on the Measurement of Force, Mass and Torque Measurement Facing New Challenges, 2017: 57-61.
- [12] KLECKERS T, SCHAEFER A. Force calibration with build up systems [C]. 18th International Congress of Metrology, 2017: 1-5.
- [13] 石中盘, 赵铁石, 厉敏, 等. 大量程柔性铰六维力传感器静态解耦的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(5):1062-1069.
- SHI ZH P, ZHAO T SH, LI M, et al. Research on static decoupling of large range flexible joint six-axis force sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5):1062-1069.
- [14] LIANG W, YANG X, YAO J, et al. Investigation the creep and creep recovery behavior of build-up systems [C]. IMEKO 23rd Conference on the Measurement of Force, Mass and Torque Measurement Facing New Challenges, 2017: 87-89.
- [15] WEI T, YANG X, YAO J, et al. The influence of a balanced structure on the rotation effect of a build-up system[J]. *Measurement*, 2015(61):162-168.
- [16] PRATO A, PALUMBO S, GERMAK A, et al. Effects due to the misalignment of build-up systems for force measurements in the meganewton range [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018(1065):42013-42016.
- [17] 顾廷炜, 孔德仁, 商飞, 等. 基于落锤装置的力监测压力绝对校准方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3):750-756.
- GU T W, KONG D R, SHANG F, et al. Research on an absolute calibration method of monitoring pressure by force sensor based on drop-weight device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3):750-756.
- [18] 于宁波, 李思宜, 赵晋泉, 等. 基于共享控制的人机灵巧力触觉交互系统设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3):602-611.
- YU N B, LI S Y, ZHAO Y Q, et al. Design and implementation of a dexterous human-robot interaction system based on haptic shared control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3):602-611.
- [19] LIANG W, YANG X X, JAO Y H. Effect of load pad shape on the position error of column type strain gauge force transducer [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1065:42034-42037.
- [20] 冯李航, 王东, 徐扬, 等. 运动-力解耦的多维轮力传感器研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5):1240-1248.
- FENG L H, WANG D, XU Y, et al. Motion-force decoupling wheel force transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5):1240-1248.
- [21] 张强, 宋爱国, 刘玉庆, 等. 一种指尖三维力传感器设计[J]. *计量学报*, 2018, 39(1):52-55.
- ZHANG Q, SONG AI G, LIU Y Q, et al. Design of a three dimensional force sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(1):52-55.
- [22] BRAY A, BARBATO G, FRANCESCHINI F, et al. Rotational and end effects: A model for uncertainty evaluation in force measurements by means of dynamometers[J]. *Measurement*, 1996, 17(4):279-286.
- [23] HSIEH K C, CHEN K T, KANJANAPHACHOAT C, et al. The application of finite element methods to study force transducer anti-deviated load characteristics [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2011(138-139):168-174.
- [24] ROBINSON G M. Finite element modelling of load cell hysteresis[J]. *Measurement*, 1997, 20(2):103-107.
- [25] 王海洲. 称重传感器弹性元件的结构设计与加工[J].

衡器, 2012(11):5-9.

WANG H ZH. Structural design and processing for the element of load cell [J]. Weighing Apparatus, 2012(11):5-9.

- [26] 刘九卿. 称重传感器的横向灵敏度及横向力补偿[J]. 衡器, 2014(3):12-15.

LIU J Q. Transverse sensitivity and force compensation of weighing load cell[J]. Weighing Apparatus, 2014(3):12-15.

- [27] 刘九卿. 圆柱、圆筒式称重传感器非线性和旋转误差分析[J]. 衡器, 2013(3):1-7.

LIU J Q. Nonlinear and rotating error analysis of cylinder and cylinder type weighing sensor [J]. Weighing Apparatus, 2013(3):1-7.

- [28] 刘九卿. 提高称重传感器准确度和稳定性的若干问题[J]. 衡器, 2013(5):1-6.

LIU J Q. Some issues to improve the accuracy and stability of weighing load cell[J]. Weighing Apparatus, 2013(5):1-6.

- [29] TIMOSHENKO. Theory of Elasticity [M]. Newyork: Maple Press Company, 1951.

- [30] International organization for standardization technical committees. ISO 376-2011 (E) metallic materials-Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines[S]. 2011.

作者简介



E-mail: weirliang@foxmail.com

Liang Wei received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Fuzhou University in 2009 and 2012. Now he is a Ph. D. candidate in Fuzhou University and an engineer in Fujian Metrology Institute. His main research interest includes force metrology standard in super wide-range.



应用。

E-mail: yangxx@fzu.edu.cn

Yang Xiaoxiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1985 from Inner Mongolia University of Technology, received his M. Sc. degree in 1988 from Northeast Petroleum University, received his Ph. D. degree in 1995 from Xi'an Jiaotong University. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Fuzhou University. His main research interests include computational mechanics and its application in engineering.

梁伟, 分别在 2009 年和 2012 年在福州大学获得学士学位和硕士学位, 现为福州大学博士研究生、福建省计量科学研究院工程师, 主要研究方向为超大力值计量标准。

杨晓翔(通信作者), 1985 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 1988 年于东北石油大学获得硕士学位, 1995 年于西安交通大学获得博士学位, 现为福州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算力学及其工程