

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615165

球面二维时栅电场仿真与结构优化*

王合文^{1,2}, 姜芷琪^{1,2}, 樊星辰^{1,2}, 刘小康^{1,2}, 陈自然^{1,2}

(1. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054;

2. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054)

摘 要:多自由度角位移传感器是精密运动控制与高端装备的核心器件,其测量范围与测量精度常存在相互制约的矛盾。针对现有球面二维时栅角位移传感器在 α 方向仅能实现 $0^\circ \sim 40^\circ$ 测量,难以满足宽范围应用需求的问题,以扩展测量范围为首要目标,系统开展了定子极片形状的优化设计与性能对比研究。基于有限元电场仿真,在保持激励频率、幅值、传感器尺寸等参数一致的前提下,依次提出了 3 种改进型极片结构,并与初始极片结构进行全测量范围内的误差和谐波特性的仿真对比。仿真结果表明,优化后形状通过将单个圆环沿正交方向均匀分割为 4 段独立弧形极片,有效解除了机械运动约束,同时利用对称布置实现误差平均化,其仿真误差在全量程内均显著低于前三者。实验采用与仿真一致的条件,搭建实验平台对所提结构进行验证。结果表明,优化后传感器 α 方向测量范围由初始的 $0^\circ \sim 40^\circ$ 大幅扩展至 $0^\circ \sim 220^\circ$, β 方向仍保持全周 360° 测量能力;补偿前 α 方向峰峰值误差较初始结构仅增大 0.22° , β 方向仅增大 0.66° ;经傅里叶谐波补偿后,所提结构在 $0^\circ \sim 220^\circ$ 范围内 α 方向峰峰值误差为 0.036° ,表明在量程扩展 5.5 倍的前提下,精度损失控制在可接受范围。与现有多自由度角位移传感器相比,所提出的四段圆环式极片结构在兼顾宽量程与高精度方面具有显著综合优势。

关键词:角位移传感器;多自由度测量;时栅;电场仿真;结构优化

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Electric field simulation and structural optimization of spherical two-dimensional time grating

Wang Hewen^{1,2}, Jiang Zhiqi^{1,2}, Fan Xingchen^{1,2}, Liu Xiaokang^{1,2}, Chen Ziran^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education,

Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Key Laboratory of

Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Multi-degree-of-freedom angular displacement sensors are core components in precision motion control and high-end equipment, but their measurement range and measurement accuracy are often mutually constrained. To address the problem that the existing spherical two-dimensional time-grating angular displacement sensor can only achieve a measurement range of $0^\circ \sim 40^\circ$ in the α direction, which fails to meet the requirements of wide-range applications, this paper takes the expansion of the measurement range as the primary goal and systematically conducts optimal design and comparative performance studies on the stator pole piece shapes. Based on finite-element electric field simulations, under the condition of keeping the excitation frequency, amplitude, sensor dimensions, and other parameters consistent, three improved pole piece structures are successively proposed, and simulation comparisons of errors and harmonic characteristics over the full measurement range are performed against the initial pole piece structure. Simulation results indicate that the optimized shape, by uniformly dividing a single ring into four independent segmented arc pole pieces along orthogonal directions, effectively removes mechanical motion constraints while leveraging symmetric arrangement to achieve error averaging, and its simulation errors over the full range are significantly lower than those of the previous three structures. Experiments are conducted under conditions

收稿日期: 2026-04-20 Received Date: 2026-04-20

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3209400)、国家自然科学基金(52125503, 52305567)、重庆理工大学科研创新团队(2023TDZ008)、重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-LZX0088)项目资助

consistent with the simulations, and an experimental platform is built to verify the proposed structure. Results show that after optimization, the measurement range of the sensor in the α direction is substantially expanded from the initial $0^\circ \sim 40^\circ$ to $0^\circ \sim 220^\circ$, while the β direction still maintains full 360° measurement capability. Before compensation, the peak-to-peak error in the α direction increases by only 0.22° compared with the initial structure, and that in the β direction increases by only 0.66° . After Fourier harmonic compensation, the peak-to-peak error in the α direction of the proposed structure within the $0^\circ \sim 220^\circ$ range is 0.036° , indicating that under the premise of a 5.5-fold range expansion, the accuracy loss is controlled within an acceptable range. Compared with existing multi-degree-of-freedom angular displacement sensors, the four-segment ring-type pole piece structure proposed in this paper exhibits significant comprehensive advantages in balancing wide range and high precision.

Keywords: angular displacement sensor; multi-degree-of-freedom measurement; time grating; electric field simulation; structural optimization

0 引 言

多自由度位移测量技术作为精密机械、机器人等高端装备领域的核心支撑技术,其测量精度与测量范围直接决定了装备的控制性能,是保障高端装备实现高精度作业的关键前提^[1-3]。

目前主流的多自由度位移测量方法主要有基于光学原理、电磁原理和电容式的测量方法。其中,基于光学原理的测量方法以高精度为核心优势,在多自由度检测中应用广泛。李勇杰等^[4]基于曼彻斯特编码研发图像式角位移测量系统,实现 $0 \sim 360^\circ$ 全周角位移测量,标准偏差 $1.73''$,结合图像传感与编码解析技术,显著提升了多自由度测量的抗干扰能力与精度,拓展了光学测量的应用场景。Wendel 等^[5]提出采用可见光域扫描点多波长干涉仪实现复杂光学元件的精密测量,测量精度达纳米级,进一步丰富了光学精密测量的技术手段;Lim 等^[6]探究了基于激光自准直的光学角位移传感器的可行测量分辨力,该传感器分辨力达 $0.001''$,为光学式角位移测量的精度突破提供了新参考。磁学测量因非接触、抗恶劣环境的特性,成为多自由度测量的重要路径。Yan 等^[7]针对永磁球形执行器,利用 3D 永磁体阵列的磁场分布特性,提出基于霍尔效应传感器的姿态测量方案,建立磁场与待测对象姿态位移的精准映射,实现 $\pm 15^\circ$ 三自由度姿态检测,角度测量误差 $\leq 0.5^\circ$,实现三自由度姿态的高效检测。Xia 等^[8]针对精密球形铰链,采用霍尔传感器与永磁体结合的测量方案,构建了 RBF-ELM 混合神经网络测量模型,直接建立磁感应强度与旋转角度的非线性映射,在 $\pm 20^\circ$ 测量范围内,角度均方根误差为 $1'59''$,显著提升了电磁式角度测量的精度与适应性。Wang 等^[9]设计的一种球冠形的电容传感器,在 $\pm 10^\circ$ 范围内可实现约 2° 的测量精度;Yang 等^[10]提出的电容式球面运动副二自由度角位移检测方法,在 $\pm 4^\circ$ 测量范围内实验输出电容达理论值 89.7%,利用电容值与被测物角位移的映射关系实现精准测量。

尽管以上各类多自由度测量方法均具备自身技术特色,但仍存在一定程度的局限性,难以满足高端装备对测量精度、范围及环境适应性的综合需求。具体而言,基于光学原理的测量方法通常具有较高的分辨能力,但其测量精度易受环境条件影响,实时性受限于图像处理或编码解析算法的复杂性;基于电磁原理的方法虽可实现多自由度检测,但往往依赖多传感器布置,安装误差难以避免,且在宽测量范围内难以兼顾高精度与抗干扰能力;而现有电容式方法尽管结构较为简单,但在精度、范围、环境适应性及系统集成度等方面仍存在挑战。作者团队^[11]提出一种新型球形二自由度角位移传感器,采用创新的球形电极阵列结构与空间相位合成策略,通过检测转子与定子极片间重叠面积变化所引起的电容变化,实现 $\pm 20^\circ$ 范围内对角位移的高精度实时解算。然而,该传感器目前在测量范围上仍存在明显局限性,难以满足更大范围的测量需求。

电场仿真技术作为电容式传感器结构设计优化的核心支撑手段,能够精准分析电极结构与电场分布的关联特性,为突破现有传感器测量范围限制提供了可靠的技术路径。因此,本文采用电场仿真技术,对该新型电容式角位移传感器的结构进行优化设计,以期突破现有测量范围的限制,进一步提升传感器的综合性能,拓展更为广泛的应用价值。

现有研究中,基于电容传感原理的多自由度位移测量方案与电场仿真结合紧密,形成了较为成熟的技术路径。Wang 等^[9]针对球关节微间隙检测需求,提出一种电容传感器,通过电场仿真分析传感器电极结构与球关节表面的电场分布特性,明确了微间隙变化对电场耦合强度的影响规律,据此优化了电极排布与尺寸参数,有效提升了微间隙检测的灵敏度与稳定性,为基于电场作用的球关节微位移测量提供了结构优化的仿真设计方法;Yang 等^[10]面向球铰副二自由度角位移检测,构建了基于电容传感器的测量系统,借助电场仿真技术建立了角位移变化与电容值变化的映射关系,通过仿真模拟不同角位移状态下电极间的电场畸变特征,验证了传感器结构

对位移测量分辨率的影响,为电容式二自由度角位移测量系统的精准建模与性能预判提供了电场仿真支撑。Gao 等^[12]提出了一种基于旋转电场的多向量变面积型电容角位移编码器,通过仿真优化设计了传感器结构参数并验证了其高分辨率和测量性能。冯佳等^[13]针对单极板电容传感器,利用仿真选择了保护环和绝缘层缺口的最优值,并研究了极板倾斜对测量结果的影响,验证了仿真模型的可靠性。Ye 等^[14]针对感应角度传感器的非线性误差,结合有限元方法和粒子群优化算法,优化了传感器结构参数,使非线性误差显著降低,为高精度角位移感应提供了理论依据。王焕功等^[15]采用有限元仿真分析了电容式角位移传感器敏感元件的应变,对机械结构进行最优设计,为传感器结构设计提供了参考。崔小强等^[16]通过电场仿真分析,研究了电容角位移编码器的电场分布特性及其参数变化规律,进一步深化了电容传感器在不同工作条件下的理论建模与仿真验证,为多自由度角位移测量的精度提升提供了理论支撑。Wu 等^[17]利用 COMSOL Multiphysics 软件进行电容角度传感器的多物理场仿真研究,重点分析了电场分布与传感器结构参数之间的关系,并通过仿真验证了传感器的响应特性,为仿真软件在传感器设计中的应用提供了案例参考。针对时栅传感器的结构优化与精度提升的研究也持续深入。杨继森等^[18]提出基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器,通过仿真分析误差,优化传感器结构,实现精度提升;而后杨继森等^[19]又提出3层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器,同样通过结构优化有效提升了传感器性能。

基于上述研究基础,本文将电场仿真分析技术应用与球面二维时栅结构的优化研究,实现测量范围的进一步扩展,通过电场仿真方法可提前对比不同极片形状对传感器测量精度的影响,在确保测量精度满足要求、扩大测量范围的基础上,提前规避不合理结构设计,减少实物试错次数,进而降低后续加工及实验成本,完成传感器结构的优化设计,并通过实验验证优化方案的可行性与有效性。

1 传感器工作原理

二自由度角位移传感器如图1(a)所示,其采用同心安装结构,由内部的转子和外部的定子两部分构成。转子为球形结构,可绕空间任意方向进行旋转,其表面由八片球面三角形金属极片沿球面均匀分布而成。定子固定于转子外部,呈球壳形式,由6片均匀排列的球面镂空矩形金属导电极片组成。转子与定子之间保持恒定间隙,构成电容式传感的介电空间。

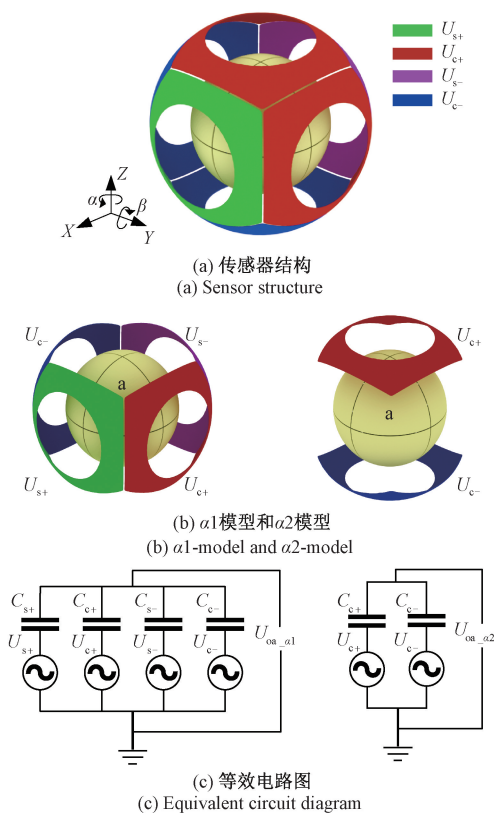


图1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

沿两个测量方向 α 和 β ,将式(1)的4路两相正交的正弦电压信号分别施加于定子极片上,作为传感器的激励极片:

$$\begin{cases} U_{s+} = A_m \sin(\omega t) \\ U_{c+} = A_m \cos(\omega t) \\ U_{s-} = -A_m \sin(\omega t) \\ U_{c-} = -A_m \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, A_m 、 ω 和 t 分别表示幅值、角频率和时间。

如图1(b)所示,当传感器沿 α 方向旋转时,可看作 $\alpha1$ 模型和 $\alpha2$ 模型。 $\alpha1$ 模型中极片a的等效电路如图1(c)左图,转子沿 α 方向旋转时,极片a与定子极片之间形成电容结构,其输出信号如式(2)所示。

$$\begin{aligned} U_{\text{oa},\alpha1} &= U_{s+}(t) \frac{C_{s+}(\alpha)}{C_{\text{sum}}} + U_{c+}(t) \frac{C_{c+}(\alpha)}{C_{\text{sum}}} + \\ &U_{s-}(t) \frac{C_{s-}(\alpha)}{C_{\text{sum}}} + U_{c-}(t) \frac{C_{c-}(\alpha)}{C_{\text{sum}}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $C_{\text{sum}} = C_{s+} + C_{c+} + C_{s-} + C_{c-}$,可用 $C = \frac{\varepsilon S}{4\pi k d}$ 分别计算电容值。当保持 d 不变,式(2)可进一步转化为式(3):

$$U_{\alpha\alpha 1}(t, \alpha) = U_{S+}(t) \frac{S_{\alpha 1 S+}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + U_{C+}(t) \frac{S_{\alpha 1 C+}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + U_{S-}(t) \frac{S_{\alpha 1 S-}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + U_{C-}(t) \frac{S_{\alpha 1 C-}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \quad (3)$$

其中, $S_{\text{sum}} = S_{S+} + S_{C+} + S_{S-} + S_{C-}$, $S_{\alpha 1 S+}(\alpha)$ 、 $S_{\alpha 1 C+}(\alpha)$ 、 $S_{\alpha 1 S-}(\alpha)$ 、 $S_{\alpha 1 C-}(\alpha)$ 分别表示沿 α 方向旋转时, $\alpha 1$ 模型中极片 a 与施加 S+、C+、S-、C- 信号的定子极片的重叠面积。

由于面积关系 $S_{\alpha 1 S}(\alpha) = S_{\alpha 1 S+}(\alpha) + S_{\alpha 1 S-}(\alpha)$, $S_{\alpha 1 C}(\alpha) = S_{\alpha 1 C+}(\alpha) + S_{\alpha 1 C-}(\alpha)$, 根据对称性, 同时结合式(1)的激励信号关系, 式(3)可简化为式(4):

$$U_{\alpha\alpha 1}(t, \alpha) = A_m \sin(\omega t) \frac{S_{\alpha 1 S}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + A_m \cos(\omega t) \frac{S_{\alpha 1 C}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \quad (4)$$

同样的, $\alpha 2$ 模型中极片 a 的等效电路如图 1(c) 右图, 极片 a 与施加 C+、C- 信号的激励极片之间形成电容结构, 其输出信号为式(5):

$$U_{\alpha\alpha 2}(t, \alpha) = A_m \cos(\omega t) \frac{S_{\alpha 2 C}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \quad (5)$$

其中, $S_{\alpha 2 C}(\alpha)$ 与旋转角度 α 无关, 不会随其变化, 以上是 β 初始位置 $\beta_0 = 0^\circ$ 时沿 α 方向旋转的情况, 当 $\beta_0 \neq 0^\circ$, $U_{\alpha\alpha 1}(t, \alpha)$ 和 $U_{\alpha\alpha 2}(t, \alpha)$ 应该被分别表述为式(6):

$$\begin{cases} U_{\alpha\alpha 1}(t, \alpha) = A_m \sin(\omega t) \frac{k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 S}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + A_m \cos(\omega t) \frac{k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 C}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \\ U_{\alpha\alpha 2}(t, \alpha) = A_m \cos(\omega t) \frac{k_2(\beta_0) S_{\alpha 2 C}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \end{cases} \quad (6)$$

系数 k_1 和 k_2 都是关于 β_0 的函数。沿 α 方向旋转时极片 a 的输出信号如式(7)所示。

$$U_{\alpha\alpha}(t, \alpha) = U_{\alpha\alpha 1}(t, \alpha) + U_{\alpha\alpha 2}(t, \alpha) = A_m \sin(\omega t) \frac{k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 S}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} + A_m \cos(\omega t) \frac{k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 C}(\alpha) + k_2(\beta_0) S_{\alpha 2 C}(\alpha)}{S_{\text{sum}}} \quad (7)$$

同样的, 沿 β 方向旋转时极片 a 的输出信号经推导可得式(8):

$$U_{\alpha\beta}(t, \beta) = A_m \sin(\omega t) \frac{k_1(\alpha_0) S_{\beta 1 S}(\beta)}{S_{\text{sum}}} + A_m \cos(\omega t) \frac{k_1(\alpha_0) S_{\beta 1 C}(\beta) + k_2(\alpha_0) S_{\beta 2 C}(\beta)}{S_{\text{sum}}} \quad (8)$$

当 $\alpha_0 = \beta_0 = 0^\circ$ 时, $S_{\alpha 1 S} = S_{\beta 1 S}$, $S_{\alpha 1 C} = S_{\beta 1 C}$, 则有 $U_{\alpha\alpha}(t, \alpha, \beta)$ 表达式如式(9)所示。

$$U_{\alpha\alpha}(t, \alpha, \beta) = U_{\alpha\alpha\alpha}(t, \alpha) + U_{\alpha\alpha\beta}(t, \beta) = \begin{cases} \sin(\omega t) \left[\begin{matrix} k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 S}(\alpha) + \\ k_1(\alpha_0) S_{\beta 1 S}(\beta) \end{matrix} \right] + \\ A_m \cos(\omega t) \left[\begin{matrix} k_1(\beta_0) S_{\alpha 1 C}(\alpha) + \\ k_1(\alpha_0) S_{\beta 1 C}(\beta) + \\ k_2(\beta_0) S_{\alpha 2 C}(\alpha) + \\ k_2(\alpha_0) S_{\beta 2 C}(\beta) \end{matrix} \right] \end{cases} \quad (9)$$

沿 α 方向旋转时, $\alpha 1$ 模型中极片 a 与施加 S 路信号和 C 路信号的定子极片的重叠面积间关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} S_{\alpha 1 S}(\alpha) = S_{\alpha 1 C}(\alpha + 90^\circ) \\ S_{\beta 1 S}(\alpha) = S_{\beta 1 C}(\alpha + 90^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

结合式(1)与(10), 可同理推出 $U_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta)$ 至 $U_{\alpha\alpha}$ 的表达式。

随后, 为独立提取 α 和 β 分量, 对从 $U_{\alpha\alpha}$ 到 $U_{\alpha\beta}$ 8 个感应极片采用如图 2 所示的两种信号组合方式以产生具有相位特异性的测量信号: $U_{\alpha\alpha}$ 和 $U_{\alpha\beta}$, 这两个信号分别仅包含 α 方向与 β 方向的角位移信息, 实现二自由度角位移的解耦检测。

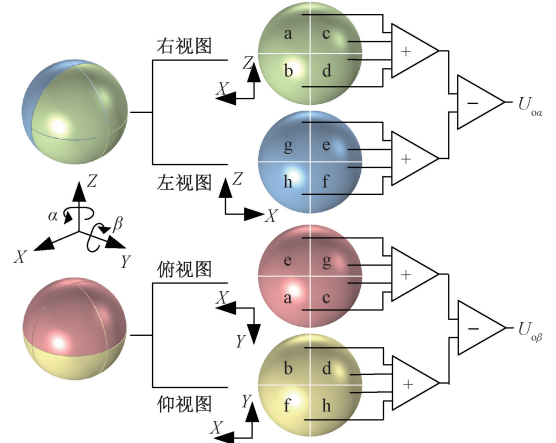


图2 感应信号组合方式

Fig. 2 Inductive signal combination method

从几何学角度而言, 该解耦过程包括: 1) 极片 a~d 构成转子前半部分, 其输出叠加得到包含 α 方向信息的输出 $U_{\alpha a} + U_{\alpha b} + U_{\alpha c} + U_{\alpha d}$; 2) 极片 e~h 构成转子后半互补部分, 对应输出为 $U_{\alpha e} + U_{\alpha f} + U_{\alpha g} + U_{\alpha h}$; 3) 通过变换方程对以上两组信号做合成与差分处理, 从中精准推导出仅与 α 角位移相关的特异性信号 $U_{\alpha\alpha}$:

$$U_{\alpha\alpha} = (U_{\alpha a} + U_{\alpha b} + U_{\alpha c} + U_{\alpha d}) - (U_{\alpha e} + U_{\alpha f} + U_{\alpha g} + U_{\alpha h}) = \frac{2\sqrt{2}A_m}{S_{\text{sum}}} \sqrt{S_{\alpha 1 S}^2(\alpha) + S_{\alpha 2 C}^2(\alpha)} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{S_{\alpha 1 S}(\alpha) + S_{\alpha 1 C}(\alpha)}{S_{\alpha 1 S}(\alpha) - S_{\alpha 1 C}(\alpha)}\right) \quad (11)$$

同理,生成 β 特异性信号 $U_{\varphi\beta}$:

$$U_{\varphi\beta} = (U_{\text{oa}} + U_{\text{oc}} + U_{\text{oe}} + U_{\text{og}}) -$$
$$(U_{\text{ob}} + U_{\text{od}} + U_{\text{of}} + U_{\text{oh}}) = \frac{2\sqrt{2}A_m}{S_{\text{sum}}} \sqrt{S_{\beta 1\text{-S}}^2(\beta) + S_{\beta 2\text{-C}}^2(\beta)}$$
$$\sin\left(\omega t + \arctan \frac{S_{\beta 1\text{-S}}(\alpha) + S_{\beta 1\text{-C}}(\alpha)}{S_{\beta 1\text{-S}}(\alpha) - S_{\beta 1\text{-C}}(\alpha)}\right) \quad (12)$$

最终通过信号处理电路和高速脉冲插值法提取到与转子旋转角度相关的相位差值,通过换算得到角位移 α 和 β 。

2 仿真分析与实验

2.1 仿真分析

基于以上原理,以传感器 α 测量方向为例进行电场仿真。仿真采用基于有限元法的电场仿真软件,求解器类型选用瞬态求解器,激励信号频率设置为 20 kHz,以计算空间电势分布及感应极片上的输出电压。网格划分采用自由四面体单元。在边界条件设置上,对定子极片分别施加式(1)所示的正弦和余弦电压信号,感应极片设置为悬浮电位,其余区域定义为空气域。材料参数方面,电极材料为铜,转子和定子之间的间隙介质为空气。其余几何尺寸及电气参数见表 1。

表 1 仿真参数	
Table 1 Simulation Parameters	
参数类型	参数设置
转子半径	50 mm
定子半径	80 mm
极片厚度	0.5 mm
定子极片镂空区域圆心角	60°
材质	铜
幅值	12 V
频率	20 kHz
角度	0°~360°
旋转轴	Z 轴

设 $\beta_0 = 0^\circ$,使转子沿 α 方向从 0° 开始以 10° 步长旋转至 360° ,仿真得到的行波图如图 3(a)所示。提取出对应行波信号相位与标准相位差,得到感应极片最终解耦后的输出信号误差曲线,如图 3(b)所示。

根据仿真结果,测量误差表现出周期性重复的规律,其中 4 次谐波误差最为显著。

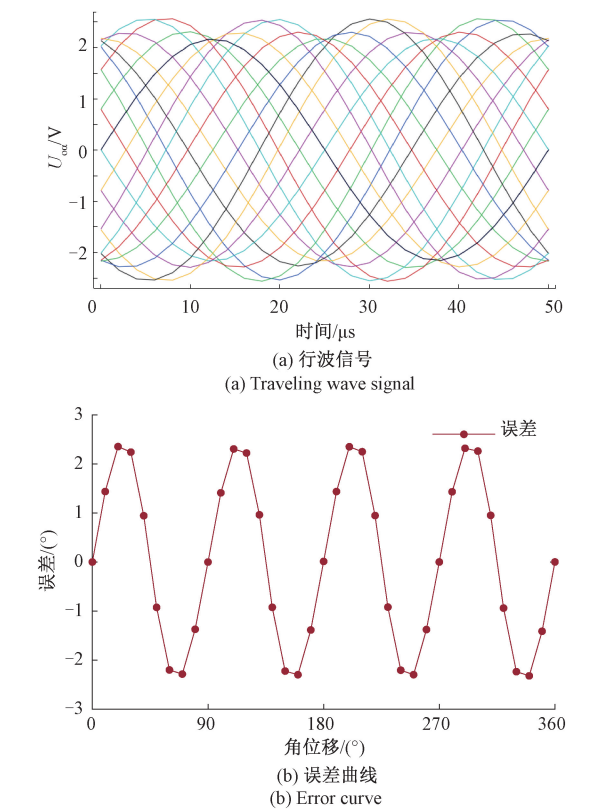


图 3 传感器 α 方向仿真结果
Fig. 3 Simulation results for the α direction of the sensor

2.2 实验验证与结果

基于仿真结果开展实验验证。图 4 为实验平台与极片结构。将定子与转子部分分别安装于水平旋转电机与垂直旋转电机上,旋转电机均固定于一大理石平台,电极通过导线连接至相应的信号处理电路。



图 4 实验装置
Fig. 4 Experimental setup

在 $\beta_0 = 0^\circ$ 条件下,使转子沿水平 α 方向以 10° 步长从 0° 旋转至 40° ,得到 α 方向误差曲线如图 5(a)所示;在

$\alpha_0 = 0^\circ$ 条件下,使转子沿另一 β 方向从 0° 开始以 10° 步长旋转至 360° , β 方向误差曲线如图 5(b) 所示。

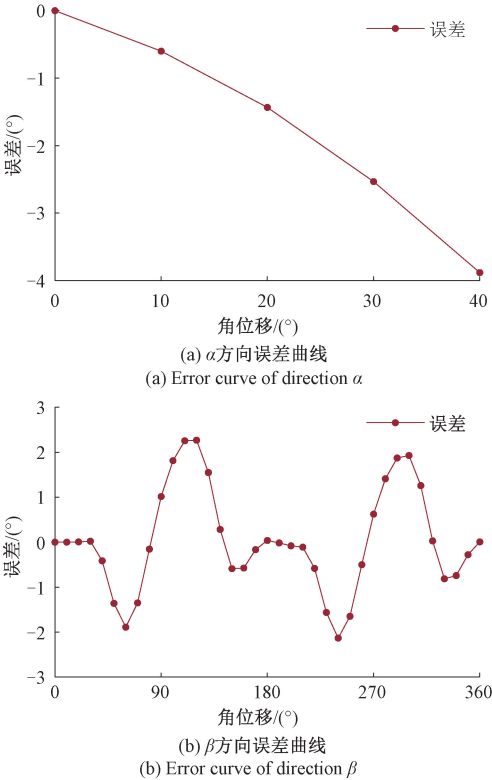


图 5 实验结果
Fig. 5 Experimental results

从图 5 可看出,传感器可实现两个方向角位移测量,实验结果与仿真结果一致,测量误差表现出周期性重复规律,主要表现为 4 次谐波误差。此外,图 5(b) 中还出现了较为明显的 2 次谐波误差。为探究该 2 次谐波误差的来源,分析认为在实验安装过程中,转子固定于侧向旋转电机时,受重力影响不可避免地产生微小倾斜,导致转子与定子之间出现不同心问题。为验证这一推断,在仿真模型中引入转子倾斜偏心条件,模拟重力影响下的安装偏差。仿真结果如图 6 所示。

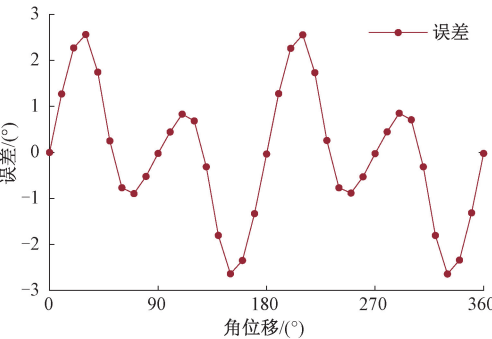


图 6 安装偏差下的仿真结果

Fig. 6 Simulation results under installation deviations

其误差曲线中同样呈现出显著的 2 次谐波特征,整体误差形态与实验结果高度吻合,从而证实实验中的 2 次谐波误差主要由安装不同心引入。该误差可通过后期傅里叶谐波修正进行有效补偿。

然而,受传感器结构设计限制, α 测量范围仅为 40° , 大幅限制了其应用场景与适用范围。因此,为扩大测量范围,本文将在现有结构基础上,通过仿真分析开展结构的优化设计,以扩大测量范围。

3 结构优化仿真与实验

3.1 结构优化设计与仿真

将前文所述初始传感器定义为结构 A,其定子由 6 片相同的球面镂空矩形极片构成。传感器采用全球包裹式结构,受极片镂空圆部分约束,任一方向仅能在 40° 范围内旋转。因此,为在保持测量精度的前提下扩展有效量程,同时兼顾加工工艺的简易性与安装的便捷性,对定子极片形状的优化过程如图 7 所示。

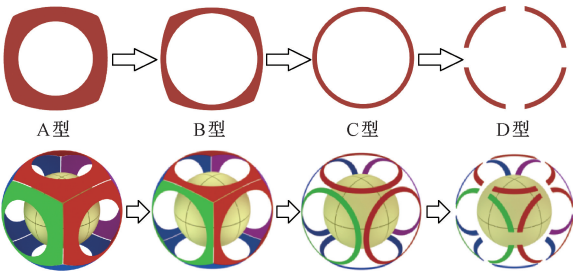


图 7 极片优化过程

Fig. 7 Electrode optimization process

优化后的极片依次命名为 B、C、D 型,对应传感器结构为 B、C、D 结构。下面将对该优化过程仿真情况展开分析。

限制传感器测量范围的主要因素是极片镂空部分面积太小,因此首先通过扩大镂空部分面积实现测量范围的提升,设计得到 B 型极片,由 6 片 B 型极片组合成的传感器为结构 B。对结构 B 进行电场仿真,以 α 方向为例进行分析,误差如图 8 所示。

对比仿真结果可知,结构 B 相较于结构 A,测量误差总体大幅减小,表明扩大镂空面积不仅能扩大测量范围,同时对误差抑制具有积极效果。

然而, A、B 型极片均为多边形结构,加工难度大且易产生加工误差,在高精度测量中,此类加工误差的影响不可忽视,而圆形工件在传统加工方法中具有天然的加工优势^[20]。

因此,将极片的矩形外轮廓改为圆形外轮廓,设计为球面同心圆环形状极片(C 型),该设计既降低了加工难

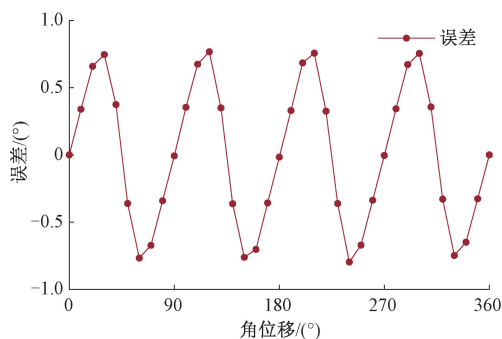


图 8 传感器结构 B 误差曲线

Fig. 8 Error curve of sensor structure B

度,又能减小边缘效应引入的测量误差。由 C 型极片构成的传感器定义为结构 C,其与结构 B 的主要区别在于定子极片外轮廓形状的变化。进一步地,对结构 C 模型进行仿真,误差分析如图 9 所示。

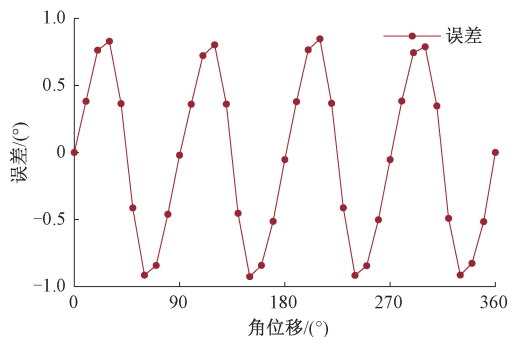


图 9 传感器结构 C 误差曲线

Fig. 9 Error curve of sensor structure C

从图 9 可看出,结构 C 的测量误差相较于结构 B 略有增大,但均显著小于结构 A。为进一步扩大测量范围,将圆环定子极片沿正交两个方向的中段部分切除,将单个圆环均匀分为 4 个部分,设计得到 4 段圆环式极片 (D 型),由 D 型极片构成的传感器为结构 D。对结构 D 模型进行仿真,误差分析如图 10 所示。

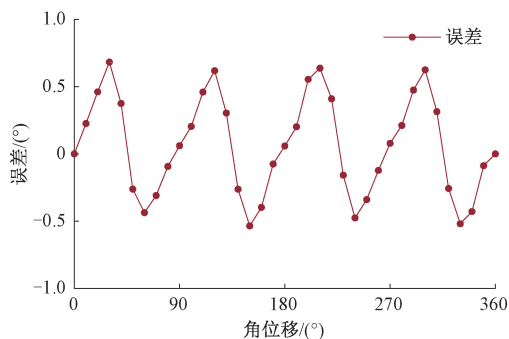


图 10 传感器结构 D 误差曲线

Fig. 10 Error curve of sensor structure D

仿真结果显示,相较于结构 C,结构 D 的仿真误差显著减小。综合以上仿真结果,将 4 种结构的误差曲线汇总如图 11 所示。

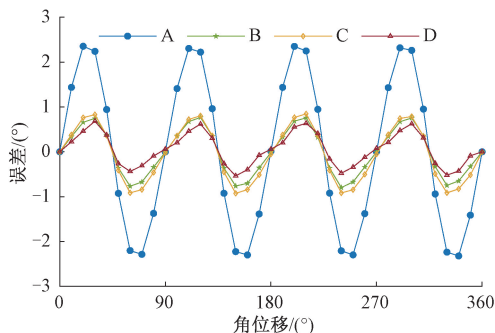


图 11 4 种不同形状激励极片误差曲线

Fig. 11 Error curve of four different shapes of electrodes

从图 11 可直观看出,D 型极片的仿真误差显著低于 A、B、C 3 种极片结构,在全测量范围内表现出更优的误差抑制能力。上述电场仿真结果进一步验证了由结构 A 到结构 D 的电极形状设计优化的有效性。

3.2 实验结果与分析

结构 D 传感器与结构 A 采用一致的加工工艺与装配方式,二者的核心差异在于激励极片形状的变化,以及适配极片承载结构的调整,具体对比如图 12 所示,图中虚线框内为单块完整的定子极片。

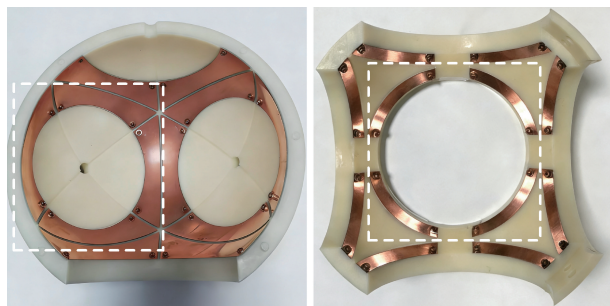


图 12 优化前后极片对比

Fig. 12 Comparison of electrode sheets before and after optimization

为进一步验证结构 D 的实际测量性能,将其装配至实验平台,沿用与结构 A 完全一致的实验流程与测试参数开展对比实验。在 $\beta_0 = 0^\circ$ 条件下,使转子沿水平 α 方向从 0° 开始以 10° 步长旋转至 220° ,得到实验误差曲线如图 13(a) 所示;在 $\alpha_0 = 0^\circ$ 条件下,使转子沿另一方向 β 从 0° 开始以 10° 步长旋转至 360° ,得到 β 方向实验误差曲线如图 13(b) 所示。

与结构 A 的实验结果相比,结构 D 在 β 方向依然保持 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围测量,补偿前峰峰值误差比结构 A 增大

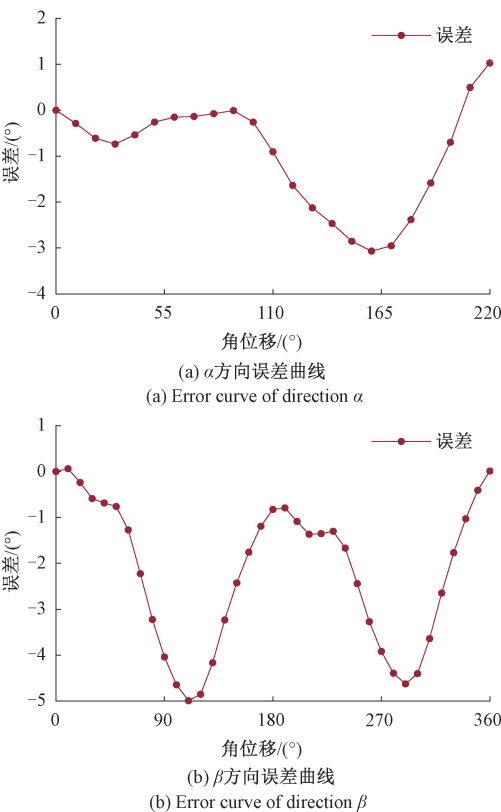
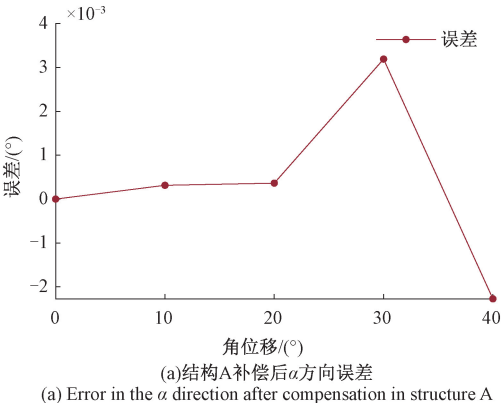


图 13 结构 D 传感器实验结果

Fig. 13 Experimental results of structure D sensor

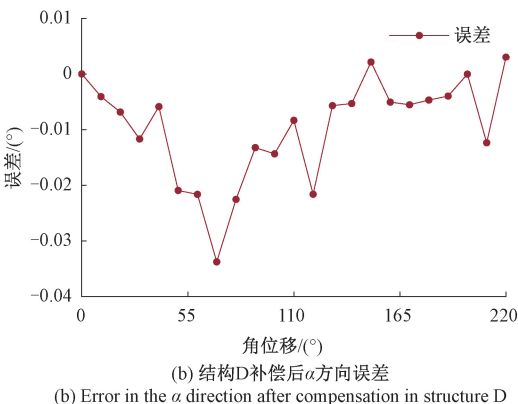
约 0.66°;在 α 方向,补偿前峰峰值误差比结构 A 增大大约 0.22°,但测量范围由 0°~40°扩展至 0°~220°。使传感器在测量精度保持相当的前提下,测量范围显著扩展。针对测量结果中存在的周期性系统误差,采用傅里叶谐波修正算法进行误差补偿。优化前后两种传感器经补偿后的 α 方向误差曲线如图 14 所示。

结果表明,在 α 方向上,结构 A 在 0°~40°范围内的补偿后峰峰值误差为 0.005°,结构 D 在 0°~220°范围内的补偿后峰峰值误差为 0.036°。这表明,结构 D 在显著扩展测量范围的同时,仍保持了较高的精度,实现了高精度与大范围测量的兼顾。表 2 为与相关研究



(a)结构A补偿后 α 方向误差

(a) Error in the α direction after compensation in structure A



(b)结构D补偿后 α 方向误差

(b) Error in the α direction after compensation in structure D

图 14 优化前后传感器补偿后误差对比

Fig. 14 Comparison of compensated sensor errors before and after optimization

的对比分析,进一步凸显了优化后传感器在精度与量程的优越表现。

表 2 相关研究对比

Table 2 Comparison with Related Studies

测量原理	关键技术	最大误差	测量范围
电磁学	磁场式霍尔传感器 结合神经网络 ^[8]	>0.15°	±20°
光学	光学图像式角 位移测量 ^[4]	>3°	0~360°
电容式	电容式球冠变 面积传感器 ^[9]	>2°	±10°
电容式	球面二维时栅 ^[11]	0.005°	α :0°~40°, β :0°~360°
电容式	本文提出结构	0.036°	α :0°~220°, β :0°~360°

4 结 论

针对球面二维时栅角位移传感器测量范围受限的问题,本文以扩展量程为核心目标,开展了定子极片形状的系列优化设计,依次提出结构 B、C、D 3 种优化方案,并通过电场仿真与实验验证,与初始结构 A 完成了系统的性能对比分析。

仿真结果表明,经极片与整体结构优化,传感器单方向测量范围从 0°~40°扩展至 0°~220°,有效解除了原结构的机械运动约束,综合性能显著提升。实验验证进一步证实,优化后的结构 D 在大幅扩展量程的同时, α 方向补偿前峰峰值误差仅较结构 A 增大约 0.22°, β 方向补偿前峰峰值误差仅增大 0.66°,实现了量程扩展与测量精度的兼顾。此外,补偿后误差结果显示,结构 A 在 0°~40°

范围内误差为 0.005° , 结构 D 在 $0^\circ \sim 220^\circ$ 范围内误差为 0.036° , 进一步验证了结构 D 在实现测量范围扩展的同时, 仍保持较高的测量精度。本研究的结构优化方案与仿真分析方法, 为球面二维时栅的精度提升与量程拓展提供了可靠的理论和实验依据。

需要指出的是, 本文的实验验证均在理想实验室环境下开展, 尚未充分考虑工业现场中复杂的环境因素。实际应用中, 温度漂移可能导致介电常数与结构尺寸发生变化, 进而影响电容输出值的稳定性; 机械振动可能引起转子与定子间隙的动态波动, 引入额外的测量噪声。后续将系统评估温度、振动、湿度等环境因素对传感器性能的影响规律, 探索相应的温度补偿、振动抑制及防潮封装等抗干扰策略, 并围绕小型化与集成化方向开展结构优化。同时, 还将通过减小安装与加工引入的误差、降低导线产生的电磁干扰等方式, 进一步降低传感器测量误差, 提升测量精度, 推动该传感器在工业领域的实际工程应用。

参考文献

- [1] 王文, 张敏, 朱晔文, 等. 球铰链的多维回转角度测量方法研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 1-8.
Wang Wen, Zhang Min, Zhu Yewen, et al. Review of multi-dimensional angular displacement measurement method for spherical joint[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 1-8.
- [2] Xu X, Tan Y D, Mu H L, et al. Laser inter-ferometric multi-degree-of-freedom measurement technology in space gravitational-aave detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312006.
- [3] Li Z, Zhao H, Chen X T, et al. Structural design and analysis of hybrid drive multi-degree-of-freedom motor[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 955.
- [4] 李勇杰, 于海, 万秋华, 等. 基于曼彻斯特编码的图像式角位移测量系统[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(4): 830-838.
Li Yongjie, Yu Hai, Wan Qiuhua, et al. Image-based angular displacement measurement system based on Manchester encoding [J]. China Optics, 2025, 18(4): 830-838.
- [5] Wendel M. Precision measurement of complex optics using a scanning-point multiwavelength interferometer operating in the visible domain[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2023, 6(1): 11.
- [6] Lim H, Shimizu Y. Feasible resolution of angular displacement measurement by an optical angle sensor based on laser autocollimation [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2023, 6(1): 32.
- [7] Yan L, Zhu B, Jiao Z X, et al. An orientation measurement method based on Hall-effect sensors for permanent magnet spherical actuators with 3D magnet array[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6756.
- [8] Xia L Q, Hu P H, Ma K L, et al. Research on measurement modeling of spherical joint rotation angle based on RBF-ELM network[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 23118-23124.
- [9] Wang W, Yang H, Zhang M, et al. A novel approach for detecting rotational angles of a precision spherical joint based on a capacitive sensor[J]. Micro-machines, 2019, 10(5): 280.
- [10] Yang S Q, Xu Y L, Xu Y S, et al. A novel method for detecting the two-degrees-of-freedom angular displacement of a spherical pair, based on a capacitive sensor[J]. Sensors, 2022, 22(9): 3437.
- [11] Wang H W, Zhou J L, Peng K, et al. A spherical two-degree-of-freedom angular displacement sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(20): 37780-37790.
- [12] Gao X, Zhang X B. A multivector variable area type capacitive angular displacement encoder based on a rotating electric field and improvement of its demodulation method [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(19): 18631-18638.
- [13] 冯佳, 李佩玥, 尹志生, 等. 单极板微位移电容传感器结构设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(7): 63-66.
Feng Jia, Li Peiyue, Yin Zhisheng, et al. Structural design and optimization of single-plate micro-displacement capacitive sensors[J]. Sensors and Microsystems, 2014, 33(7): 63-66.
- [14] Ye L, Yang M, Xu L, et al. Nonlinearity analysis and parameters optimization for an inductive angle sensor[J]. Sensors, 2014, 14(3): 4111-4125.
- [15] 王焕功, 王立平, 康宁民. 电容式角位移传感器有限元仿真及拓扑优化研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(8): 114-116.
Wang Huangong, Wang Liping, Kang Ningmin. Finite element simulation and topology optimization of capacitive angular displacement sensor[J]. Instrument Technology and Sensors, 2017(8): 114-116.
- [16] 崔小强, 曹国华, 丁红昌. 电容角位移编码器电场仿真分析[J]. 制造业自动化, 2019, 41(8): 71-74, 103.
Cui Xiaoqiang, Cao Guohua, Ding Hongchang. Simulation analysis of electric field in capacitive angular displacement encoder [J]. Manufacturing Automation,

2019, 41(8): 71-74, 103.

[17] Wu J W, Meng Z, Zhang X C, et al. Capacitive angle sensor research using COMSOL Multiphysics [J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 2937.

[18] 杨继森, 庾万章, 张静, 等. 基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 201-213.

Yang Jisen, Tuo Wanzhang, Zhang Jing, et al. Planar two-dimensional displacement sensor based on multi-frequency magnetic field coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 201-213.

[19] 杨继森, 罗云沛, 曹峻杰, 等. 三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 230-242.

Yang Jisen, Luo Yunpei, Cao Junjie, et al. A time-grating angular displacement sensor with a three-layer complementary shape coil combination structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 230-242.

[20] 罗祥玮, 刘建群, 夏鸿建. 多边形轴类零件的数控车削方法研究与开发[J]. 制造技术与机床, 2026(1): 99-106.

Luo Xiangwei, Liu Jianqun, Xia Hongjian. Research and development of CNC turning method for polygonal shaft parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2026(1): 99-106.

作者简介



E-mail:hwwang1990@cqut.edu.cn

王合文,2014 年和 2017 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位,2021 年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学机械测试技术与装备教育部工程研究中心副研究员,主要研究方向为传感器技术和智能仪器。

Wang Hewen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree

both from Chongqing University of Technology in 2014 and 2017, respectively, and his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2021. He is currently an associate researcher of Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology. His main research interests include sensor technology and intelligent instrument.



姜芷琪,2024 年于成都工业学院获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为传感器技术和智能仪器。

E-mail:jzq1992367541@163.com

Jiang Zhiqi received her B. Sc. degree from Chengdu Technological University in 2024. She is currently a master student at Chongqing University of Technology. Her main research interests include sensor technology and intelligent instrument.



樊星辰(通信作者),2015 年和 2018 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位,2023 年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学机械测试技术与装备教育部工程研究中心助理研究员,主要研究方向为传感器技术和智能仪器。

E-mail:fxc@cqut.edu.cn

Fan Xingchen (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2015 and 2018, respectively, and his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2023. He is currently an assistant researcher of Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology. His main research interests include sensor technology and intelligent instrument.