

磁-重力耦合悬垂平衡的全向倾角传感器 优化设计

王仲凯¹ 谢涛¹ 王洪亮¹ 胡方敏^{2*}

1.昆明理工大学民航与航空学院,昆明,650500

2.昆明理工大学工程训练中心,昆明,650500

摘要:现有磁效应式倾角传感器测量方向受限、结构复杂,为此提出了一种基于磁-重力耦合设计的悬垂式重力平衡全向倾角传感器。通过有限元仿真确定了永磁体尺寸与检测气隙的工程优化参数;分析了系统小扰动下自然回归过程中滚珠材料和接触面几何参数对接触特性的影响,优化了球冠凹面尺寸设计与滚珠材质选型。在校准实验中,验证了仿真模型的有效性。通过标定实验建立 X 、 Y 双轴磁场信号与位移、位移与角度的映射模型,以及 Z 方向磁场信号与倾角的解析模型,两者结合可实现倾角 θ 与方位角 φ 的同步解析。为充分利用各磁场分量在不同倾角区间的响应特性,提出分段式倾角解算策略。验证实验表明,该传感器在测量范围 $-20^\circ\sim 20^\circ$ 内,不同方位角下最大倾角测量误差不超过 $\pm 0.3^\circ$ 。

关键词:倾角传感器;全向倾角测量;四球冠凹面副;磁-重力耦合

中图分类号:TH712

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal Design of Omnidirectional Tilt Sensors Based on Magnetic-Gravity Coupled Pendulous Equilibrium

WANG Zhongkai¹ XIE Tao¹ WANG Hongliang¹ HU Fangmin^{2*}

1.Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500

2.Engineering Training Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500

Abstract: To address the issues of limited measurement directions and complex structures in existing magnetic-effect tilt sensors, a suspended, gravity-balanced omnidirectional inclinometer was proposed based on a magneto-gravitational coupling design. Finite element simulations were used to determine the optimized engineering parameters for the permanent magnet dimensions and the detection air gap. Under small perturbations, the natural restoring process was analyzed to evaluate the influences of ball material properties and contact surface geometry on the contact behavior, which guided the optimization of the spherical crown concave structures and ball material selection. Calibration experiments were conducted to verify the accuracy of the simulation models. Through systematic characterization, mapping models were established between the X 、 Y -axis magnetic field signals and displacement, and between displacement and inclination angle. Additionally, an analytical model was constructed between the Z -axis magnetic field and the inclination angle. The combination of these models enabled simultaneous estimation of inclination angle θ and azimuth angle φ . To fully exploit the response characteristics of each magnetic field component across different tilt angle ranges, a segmented tilt angle calculation strategy was proposed. Validation experiments show that within the measurement range of -20° to 20° , the maximum tilt angle error under various azimuth angles does not exceed $\pm 0.3^\circ$.

Key words: tilt sensor; omnidirectional tilt measurement; four-spherical-crown concave pair; magnetic-gravitational coupling

0 引言

倾角传感器作为获取被测平面相对于水平位置倾斜度的关键检测工具,在现代工业和科技的

快速发展中扮演着越来越重要的角色。这些传感器广泛应用于工程测量、电塔倾斜监测、桥梁监测、山体滑坡监测、隧道变形监测以及机器人姿态控制等领域^[1-4]。随着应用场景的多样化和复杂化,对倾角传感器的精度、稳定性和环境适应性要求越来越高。目前倾角传感器的研究主要是关于设计新颖的结构、优化测量原理、创新制造材料、

收稿日期:2025-03-25

基金项目:国家自然科学基金(62163021);云南省基础研究专项(202301AT070420)

改善制作成本、结合前沿技术等方面,近几年已开发了种类繁多、应用在不同环境的倾角传感器。常见的倾角传感器通常利用光学^[5-7]、磁效应^[8-9]、电阻^[10]、电容^[11]、微机电系统(MEMS)^[12]等原理研制。在众多类型的倾角传感器中,基于磁效应的传感器因其构造简单、测量准确度高、成本低、温度漂移小、工作寿命长等优点,在工程测量领域展现出良好的应用前景^[13]。这类传感器通常利用永磁体、电磁感应或磁性材料作为磁源,霍尔器件作为敏感元件,通过倾角变化引起的磁感应强度变化来分析敏感元件的输出,从而得到倾角信息。

目前已经提出许多基于磁效应的倾角传感器,ÖZTÜRK等^[14]提出了一种基于霍尔效应传感器与磁铁的可调双向倾斜传感器,通过监测移动磁铁磁场变化测量倾斜角度,计算霍尔传感器电压和与差,可近似线性和二次测量移动磁铁小位移的倾斜角。SU等^[15]提出新型磁流体倾斜传感器,探究其结构参数对检测性能的影响。该传感器由外壳与含永磁环、铁芯的芯体构成,芯体借助磁流体悬浮于壳体内,靠磁排斥力维持平衡,芯体轴向位移反映角度,倾斜后,通过外壳电感线圈测量。该倾角传感器在 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 区间具有较高的灵敏度(达 0.004°),由于该倾角传感器依靠铁芯悬浮移动反映倾角大小,并不适合长时间使用。赵心语等^[16]提出了一种基于磁性液体二阶浮力特性的高灵敏度磁性液体倾角传感器,通过霍尔元件检测惯性质量块随传感器倾角变化而产生的位移,从而实现角度信号到电压信号的转换。但参数的优化需要大量的实验和仿真分析,设计和制造的难度大。郭兵等^[17]采用永磁体与磁性液体设计了一种全向倾角传感器,通过磁传感器收集永磁体的电信号输出,分析电信号与倾角的关系,得到该倾角传感器测量范围为 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$,但在使用时未考虑永磁体在磁性液体中不规则运动给测量带来的影响。

现有的基于磁效应的倾角传感器多受测量方向的约束,无法满足全向倾角测量的需求,这限制了其灵活性。此外,部分复杂的结构设计不仅增加了传感器研制的难度,也增加了影响传感器测量的因素。针对以上问题,本文提出了一种具有体积小、质量小和易安装特点的磁-重力耦合的全向倾角传感器,突破了传统传感器单轴/双轴测量的局限,为全向倾角检测提供了新的解决方案。

1 结构设计和工作原理

1.1 结构设计

通过引入球面运动副和重力球摆原理,使得传感器能够在任意方位上测量倾角。图1展示了传感器的模型,该传感器主体由三部分组成。第一部分壳体中央设有用于安装霍尔元件的方形凹槽;第二部分壳体中央采用镂空设计,并在中部设置方形凹槽以容纳四球冠凹面副;第三部分则主要起结构支撑与稳固封装作用。滚珠顶部固定钕铁硼(NdFeB)永磁体作为磁场激励源,滚珠底部通过细杆连接配重。当传感器发生倾斜时,配重通过杠杆效应驱动滚珠沿球冠凹面轨迹偏移,使永磁体和配重系统始终保持铅垂状态。霍尔元件随壳体相对永磁体运动,形成动态磁场耦合,通过磁场矢量分解与几何映射协同机制实现倾角 θ 与方位角 φ 的同步解析。

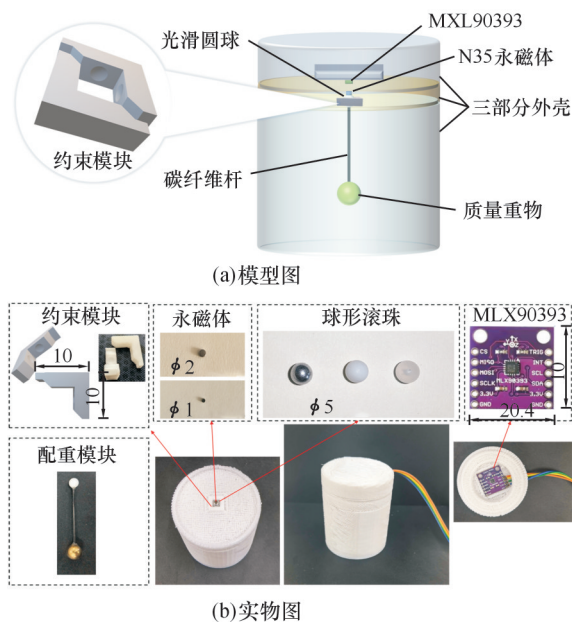


图1 传感器结构模型

Fig.1 Structural model of the sensor

1.2 四球冠凹面副结构设计

在悬垂平衡系统中,四球冠凹面副是保障配重系统稳定悬垂的核心部件。如图1a所示,球面约束模块由两个对称分体式组件拼合而成,4个球冠顶点均匀分布于约束模块内侧,并共面排列,滚珠嵌置于其间,且球冠顶点位于滚珠中心的水平面上,使滚珠中心与约束模块中心稳定重合。球面约束模块与滚珠装配时,无预紧力,整体构成具有轴对称性的接触支撑体系。配重通过连杆将重力传递至滚珠中心。

设计滚珠半径 R_b 与球冠曲率半径 R_s 满足

$R_b \approx R_s$ 。如图 2 所示,滚珠与四球冠凹面副紧密贴合,形成共形接触,接触区域呈球冠形面接触。该结构可显著降低单位接触压力,并增强系统的稳定性和抗滑脱能力。

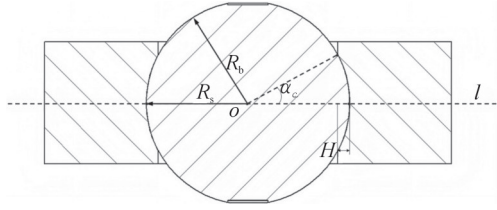


图 2 四球冠凹面副剖面图

Fig.2 Section view of four-spherical-crown concave pair

在外力或微扰作用下,滚珠可能产生微小角度的偏转,导致各球冠接触面上出现切向摩擦力分布。这些摩擦力在空间中形成合力矩,对滚珠姿态产生恢复或阻尼作用,从而影响系统的稳定性与复位能力。为对其进行简化建模,设滚珠与球冠之间的接触面法向压力分布为 $p(\alpha)$,其中, α 为接触点与球冠顶点法线 l 之间的夹角, $\alpha \in [0, \alpha_c]$; α_c 为最大接触边界角,与球冠高度 H 相关。

接触面面积微元为

$$dA = R_s^2 \sin \alpha d\alpha d\varphi$$

式中: φ 为绕球冠顶点法线 l 旋转的角度, $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。

接触面法向总力 F_N 可表示为

$$F_N = \iint p(\alpha) dA = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha_c} p(\alpha) R_s^2 \sin \alpha d\alpha d\varphi$$

由此可得,作用于滚珠的摩擦力矩为

$$\tau_f = \mu R_b F_N = 2\pi \mu R_b R_s^2 \int_0^{\alpha_c} p(\alpha) \sin^2 \alpha d\alpha$$

式中: μ 为接触表面的摩擦因数。

在滚珠回归水平基准状态的过程中,若所产生的摩擦力矩 τ_f 超过由重力提供的回复力矩 τ_g ,即满足

$$\tau_f > \tau_g = mgL \sin \theta$$

式中: m 为配重系统质量; g 为重力加速度; L 为力臂长度; θ 为扰动偏转角。

则可能导致配重系统无法准确回归铅垂状态。

根据上述公式,为减小摩擦对配重系统悬垂状态的干扰,设计中优先考虑减小 R_b 与 R_s ,其次对接触面积优化,即调整接触面球冠高度。因此,将滚珠半径 R_b 设定为 2.5 mm,从而有效降低摩擦力矩。在此基础上,设计尺寸为 10 mm × 10 mm × 2.5 mm 的球面约束模块,可允许球摆在任意方位角实现 $\pm 30^\circ$ 的摆动自由度。

在材料选择方面,四球冠凹面副的球面约束模块选用聚四氟乙烯 (PTFE) 材料。PTFE 具有超低摩擦因数、优异的绝缘性能与耐化学腐蚀性,

广泛用于高性能滑动接触机构^[18]。细杆选用 T300 碳纤维实心圆杆,具有高强度、高模量、低热膨胀率与良好的疲劳强度,保证配重系统的稳定性。外壳部分采用聚乳酸 (PLA) 材料通过熔融沉积成形 (FDM) 工艺 3D 打印制成,PLA 具有绝缘性、非磁性与良好的成形精度,满足传感器封装需求。

1.3 数据来源

所用霍尔元件为 Melexis 的 MLX90393 (QFN-16 封装),供电电压范围为 2.2~3.6V,最低 I/O 电压达 1.8 V;可沿 X、Y、Z 轴感应磁场并提供 16 位输出数据;集成温度传感和滤波功能,提高测量精度和可靠性,适用于非接触式人机界面、旋转编码器、操纵杆和工业自动化等应用。本研究采用 Arduino UNO 开发板作为微控平台,通过 Arduino 板提供 3.3V 稳压电源供 MLX90393 运行,采用 I²C 协议与传感器通信,SCL 与 SDA 接口连接至 UNO 板相应端口。

2 有限元仿真分析

2.1 磁仿真

通过 ANSYS Maxwell 软件分析传感器发生倾斜时霍尔元件所处位置的磁场分量动态变化规律^[19]。建立轴对称有限元仿真模型(图 3a)。模型中,基于滚珠直径将沿 Z 轴正方向轴向磁化的圆柱形永磁体置于坐标原点上方 2.5 mm 处。永磁体正上方布置 $\phi 5$ mm 的检测平面,并在平面中心创建一个点,以模拟磁感应元件所在位置。在仿真软件中参数化永磁体绕滚珠中心的角度变量(步长 3° ,范围 $\pm 30^\circ$)。由于对称,仅对在 OYZ 平面内的旋转角度进行分析,重点研究不同几何参数(永磁体尺寸: $\phi 1$ mm × 1 mm、 $\phi 2$ mm × 1 mm、 $\phi 3$ mm × 1 mm;检测气隙: 2, 3, 4, 5 mm)下磁感应强度分量的动态响应特性。仿真过程严格控制材料磁导率、剩磁参数及边界收敛条件。

将图 3a 基坐标系下的仿真数据转化到图 1b 中的 MXL90393 坐标系。结果表明,各磁场分量呈现显著差异,当永磁体绕 X 轴旋转时,由于轴向磁化的对称性, B_x 受边缘磁场非线性叠加效应影响仅呈现微扰波动,整体趋近于零(图 3b); B_y 则与旋转角度在一定区间内呈稳定线性关系(图 3c),可作为倾角检测参数; B_z 与倾角之间存在明显的非线性关系,可用于或补偿较大倾角测量(图 3d)。

不同直径永磁体在不同气隙下模拟点 B_y 与

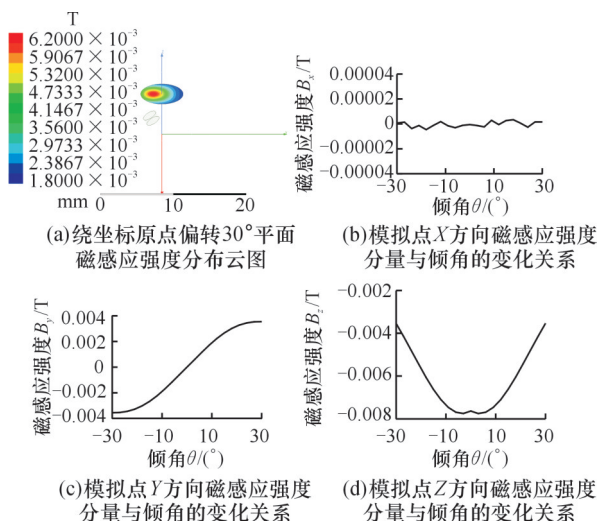


图3 永磁体直径2 mm和气隙3 mm条件下的仿真结果
Fig.3 Simulation results under the condition of 2 mm diameter permanent magnet and 3 mm air gap

倾角变化关系如图4所示。进一步分析永磁体尺寸与检测气隙的协同效应:3组永磁体在不同气隙呈相似的磁感应强度分量与倾斜角度的变化关

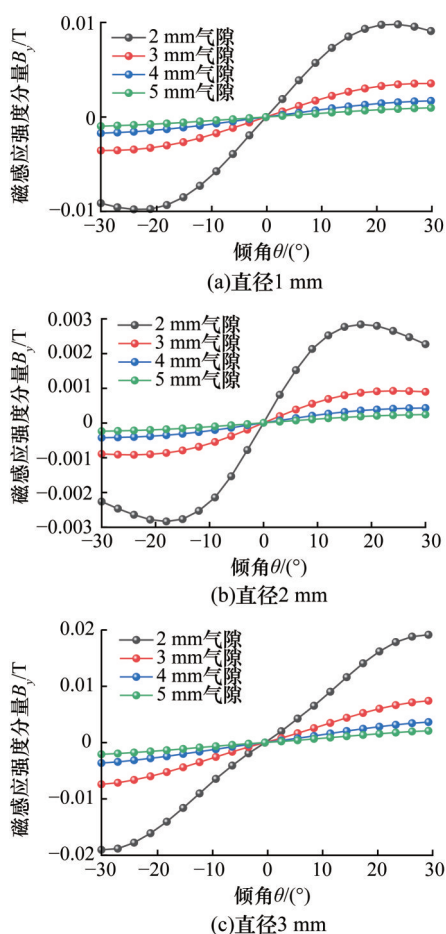


图4 不同直径永磁体在不同气隙下模拟点 B_y 与倾角的变化关系

Fig.4 B_y response versus tilt angle for different permanent magnet diameters under different gap conditions

系,但在较小气隙(2,3 mm)条件下,永磁体直径越大,其磁感应强度分量与倾角之间的关系越符合线性关系、线性范围越宽。增大检测气隙, B_y 线性范围逐渐延展,但整体灵敏度呈先快后慢的下降趋势。相比之下,较大直径的永磁体由于具有更高的磁通密度,其输出磁场强度更大,能显著提高磁感应信号的幅值,有助于抑制环境噪声干扰,增强测量灵敏度。上述现象表明,磁通密度梯度对磁体几何参数具有强相关性,且灵敏度与线性区间之间存在工程权衡关系。

在实际设计中考虑到直径3 mm永磁体安装在5 mm直径滚珠顶部时会限制球面运动副的行程,综合考虑线性区间、灵敏度及结构兼容性等因素,最终选择直径为1 mm和2 mm的永磁体用于后续实验研究与传感器优化。

2.2 测量原理

根据2.1节磁仿真获得的结论,以霍尔元件MLX90393的坐标系为基准,建立图5a所示的OXYZ坐标系。滚珠中心 O' 坐标为 $(0,0,d+h+R_b)$,永磁体上表面中心坐标 M 为 $(0,0,d)$ 。其中, h 为永磁体厚度, d 为检测气隙(霍尔元件与永磁体的间距), $d+h+R_b$ 为球心到霍尔元件的距离, R_b 为滚珠半径。图5b和图5c传感器发生倾斜,配重通过杠杆效应驱动滚珠沿球面运动副轨迹偏移。永磁体相对滚珠中心做圆周运动, M 由初始位置偏转至 M' 。倾角 θ 定义为滚珠、连杆、重物轴线与Z的夹角,也可等效为永磁体轴线与Z轴的夹角。方位角 φ 定义为滚珠、连杆、重物轴线在霍尔元件OXY平面内的投影与正X轴的夹角,或永磁体轴线在霍尔元件OXY平面内的投影与正X轴的夹角加 π 。

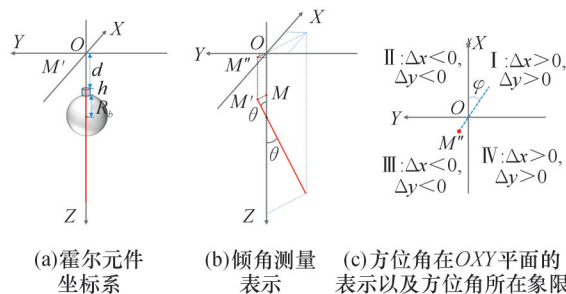


图5 倾角传感器测量原理

Fig.5 Measurement principle of inclination sensor

以霍尔元件坐标系为基准,永磁体绕滚珠中心旋转引起的磁场分量变化可由霍尔元件实时检测。图5b传感器在第四象限方向倾斜,霍尔元件检测到的磁场分量 $B_x > 0, B_y < 0$,其变化方向与相对位移分量 $\Delta x, \Delta y$ 一致,反映出磁场响应与倾斜

方向的对应关系。永磁体上表面中心点位移分量 $\Delta R = M' - M$ 满足：

$$\begin{aligned} \Delta x &= (R_b + h) \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta y &= (R_b + h) \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta z &= (R_b + h)(\cos \theta - 1) \end{aligned}$$

B_x 和 B_y 可表示为

$$\begin{aligned} B_x &= k_x \Delta x = k_x (R_b + h) \sin \theta \cos \varphi \\ B_y &= k_y \Delta y = k_y (R_b + h) \sin \theta \sin \varphi \end{aligned}$$

式中： k_x 、 k_y 为磁场梯度系数，可通过标定实验调整气隙 d 得到最佳线性范围和磁场梯度系数。

由于 B_z 分量的变化仅与倾角 θ 相关，因此可采用多项式回归模型对其进行拟合，构建非线性模型：

$$B_z = a_0 + a_1 \theta + a_2 \theta^2 + \dots$$

建立并协同磁感应强度信号 B_x 、 B_y 与位移、位移与角度的映射关系， B_z 与倾角的非线性关系可实现倾角解析：

$$\begin{aligned} \theta_{xy} &= \arcsin \frac{1}{R_b + h} \sqrt{\left(\frac{B_x}{k_x}\right)^2 + \left(\frac{B_y}{k_y}\right)^2} \\ \theta_z &= f^{-1}(B_z) \end{aligned}$$

方位角采用四象限反正切函数，可唯一确定 φ ，表示为

$$\varphi = \arctan 2(\Delta y, \Delta x) + \pi$$

2.3 应力仿真

基于 ANSYS Workbench 平台有限元仿真分析，综合材料性能、力学要求与封装兼容性，最终确定直径 1 mm、长度 30 mm 的 T300 碳纤维圆柱连杆，与质量 2.3 g 的 H62 黄铜配重组合。

在保证四球冠凹面副兼具抗滑脱性能与稳定性的基础上，进一步减小摩擦对配重系统悬垂状态的干扰，对球冠面积进行优化。设计了球冠高度为 0.2、0.3、0.4 mm 的接触面。球冠面积为

$$A = 2\pi R_s H$$

式中： H 为球冠高度； R_s 为球冠曲率半径。

模拟系统在小扰动后，自然回归过程中，滚珠材料的机械性能及接触面几何参数对接触面接触特性的影响，模型初始状态设置为：滚珠、连接杆及重物整体绕 X 轴向正 Y 方向偏转 1° ，仅受重力作用，并从静止状态开始自由响应。滚珠材料选取 3 种常见的非磁性材料：聚四氟乙烯 (PTFE)、聚丙烯 (PP) 与铝 (Al)，比较不同材料的弹性模量、密度等机械性能参数对摩擦力矩产生的影响。考虑到球面约束模块采用自润滑材料，3 种滚珠在接触界面的摩擦因数均统一设定为 0.04，以保持摩擦边界条件一致，突出材料与几何因素本身的作用。材料参数如表 1 所示。

三种材料滚珠在不同球冠接触面下的应力仿真结果如表 2 所示。

表 1 滚珠材料主要参数

Tab.1 Key parameters of ball material

名称	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
滚珠 1	Al	7100	0.33	2700
滚珠 2	PP	1370	0.42	910
滚珠 3	PTFE	500	0.40	2200

表 2 应力仿真结果

Tab.2 Simulation results of stress

	球冠高度/mm	最大摩擦应力/kPa	平均摩擦应力/kPa	最大等效应力/kPa	平均等效应力/kPa
PTFE	0.2	0.086 97	0.011 87	8.619	1.295
	0.3	0.116 49	0.008 95	5.422	1.211
	0.4	0.297 07	0.042 90	3.799	1.061
PP	0.2	0.097 82	0.013 28	8.296	1.247
	0.3	0.133 76	0.010 37	5.240	1.170
	0.4	0.290 71	0.042 67	3.594	1.024
Al	0.2	0.097 83	0.013 17	8.753	1.315
	0.3	0.126 15	0.010 08	5.509	1.230
	0.4	0.372 28	0.056 87	3.780	1.076

实验结果表明，随着接触面积的增大，微观接触点数量增多，增强了分子黏着效应和微凸体的塑性变形，导致 3 种材料的平均摩擦应力和最大摩擦应力均显著上升。在 0.2 mm 和 0.3 mm 球冠高度下，PTFE 滚珠接触面的最大摩擦应力与平均摩擦应力最小，表现出其优良的摩擦特性。在 0.4 mm 球冠高度下，铝滚珠接触面的最大摩擦应力均高于 PTFE 滚珠与 PP 滚珠接触面，这与其刚性较大、弹性恢复能力差有关。最大等效应力随球冠高度增大而减小，可在一定程度上分散接触应力。PTFE 滚珠接触面平均与最大等效应力的表现介于铝和 PP 之间。在本传感器系统中，优先考虑姿态恢复灵敏性，PTFE 滚珠在摩擦性能与结构支撑之间表现均衡，其摩擦应力最低、等效应力中等，兼具结构支撑力与柔性贴合性，故采用 PTFE 作为滚珠材料。

PTFE 滚珠在 3 种球冠高度接触面下的摩擦应力云图见图 6。在接触面积较小时，包覆角度很小，无法形成完整的下端包覆区，载荷主要集中在球面顶点附近，因而未出现明显的摩擦应力下端集中现象。当球冠高度增大至 0.4 mm 时，球冠凹面与滚珠形成了更大范围的接触弧，摩擦滑动路径延长，导致应力传导至球冠边缘，从而在下端形成显著的摩擦应力集中带。综合以上结论，最终将球冠高度 0.2 mm 作为球面约束模块的设计尺寸，采用数据加工制成。

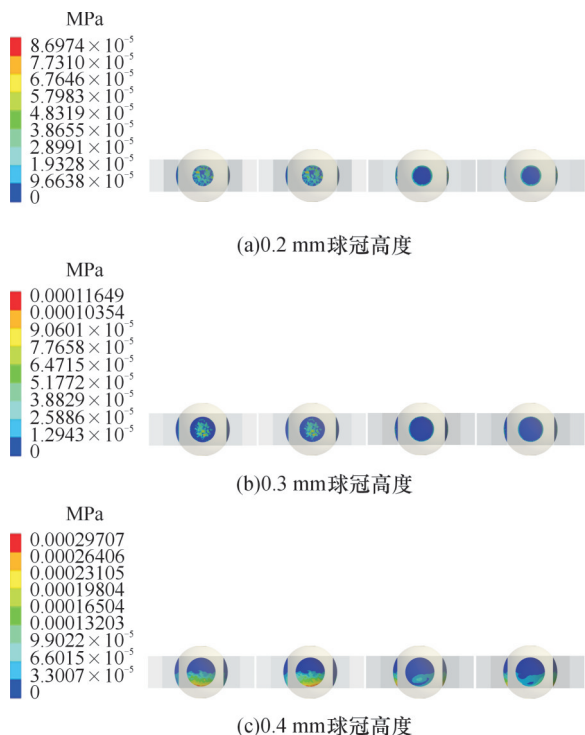


图6 PTFE滚珠在不同球冠高度下4个接触面的摩擦应力云图

Fig.6 Frictional stress contour plots of PTFE balls on 4 contact surfaces under different spherical cap heights

3 实验与结果

3.1 校准及性能测试

校准实验对3种材质滚珠与2种直径永磁体组合,在3种检测气隙下进行X和Y方向的校准和性能评测。使用球冠高度0.2 mm的四球冠约束机构,并通过3D打印不同高度的第二部分壳体,与第一部分嵌合实现对检测气隙的调控。搭建的实验平台如图7所示,采用可调式角度规尺提供标准倾角参考。

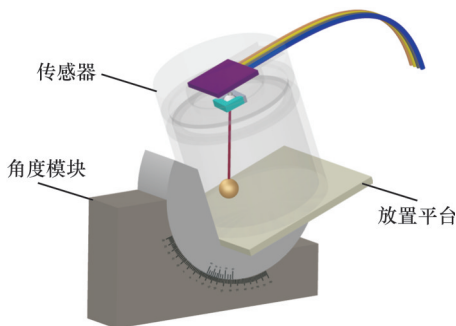


图7 传感器标定实验装置

Fig.7 Calibration device for inclinometer

可调式角度规尺能控制单一方向以 0.01° 的精度转动。将一块用于放置传感器的平台固定在可调式角度规尺上,设定X、Y轴,再将上述装置放置在水平台上。标定实验在室温环境中进行,

环境磁场强度为 $39.5 \mu\text{T}$ 。

在无倾斜状态下对霍尔元件进行初始校准,消除零点偏移,确保后续测量以该状态为参考基准。将倾角传感器放置在角度可调平台上,分别沿X轴和Y轴方向在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 范围内以 2° 为步长逐步倾斜,记录MLX90393输出的磁感应强度分量 B_x 和 B_y ,保留最优的线性范围,如图8所示。

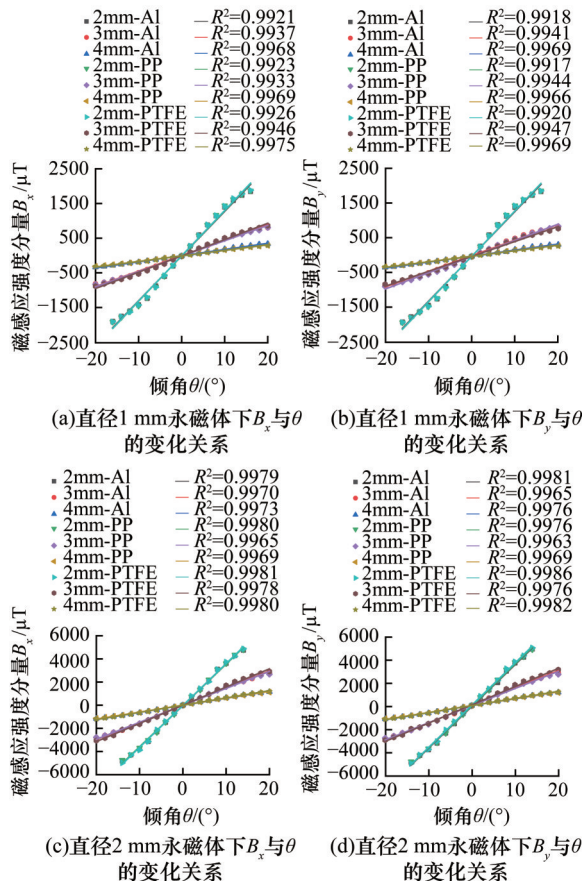


图8 校准实验结果

Fig.8 Calibration experimental results

结果表明,永磁体直径与检测气隙形成参数倒置效应。相同永磁体在小气隙下,磁感应强度分量对倾角变换的响应灵敏度较高,但其线性范围较窄;随着气隙的增大,灵敏度显著降低,线性度气隙增至3 mm时,线性范围最大扩展至 $\pm 20^\circ$,灵敏度降低约40%;增大检测气隙至4 mm,线性范围将更大,但灵敏度过低,无法满足测量需求。相同气隙下,直径1 mm永磁体作为激励源时,其灵敏度显著低于直径2 mm永磁体,且在X、Y方向的线性拟合相关系数也较低。但在2 mm气隙时,大直径永磁体的最优线性范围为 $-12^\circ \sim 12^\circ$,而小直径永磁体的最优线性区间为 $-14^\circ \sim 14^\circ$ 。3 mm气隙二者线性区间稳定在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。大直径永磁体磁感应强度大,高磁感应强度产生的信号幅值更大,有助于抑制环境噪声干扰,提高灵敏度。

直径 1 mm 永磁体检测场景下,随着气隙的增大,线性相关度 R^2 呈现上升趋势;PP 滚珠在 X、Y 方向上 R^2 差异较大。相比之下,在直径为 2 mm 的永磁体检测场景下,PTFE 滚珠在不同气隙时 X、Y 方向的 R^2 较优,且差异较小,表现出良好的各向一致性和高线性度。结果表明材料特性对测量精度产生决定性作用。PTFE 滚珠、直径 2 mm 永磁体、3 mm 气隙的配置达成最优测量性能。

3.2 标定结果

选用最优配置进行标定,控制传感器在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 范围内分别沿 X 方向和 Y 方向以 2° 的步长偏转;每个方向进行 3 次循环实验,并记录磁感应强度分量 B_x 、 B_y 、 B_z 。对永磁体上表面中心点偏移量 $(\Delta x, \Delta y)$ 与磁感应强度分量进行线性拟合,标定实验结果如图 9 所示。

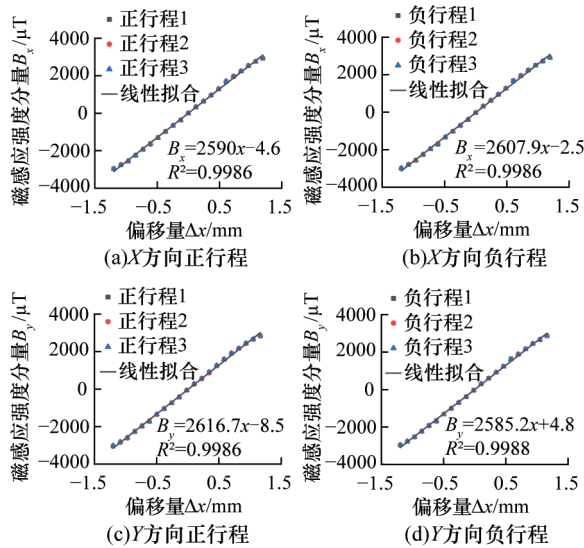


图 9 X 方向与 Y 方向的标定结果

Fig.9 Calibration results in X direction and Y direction

倾角传感器相关指标如表 3 所示。进一步对 12 组标定的 B_z 取平均值与 θ 进行多项式拟合(图 10)。 Z 方向重复性误差为 3.1942%,迟滞性误差为 2.5097%。在四次多项式拟合时达到最高 $R^2 = 0.9960$,表达式为

$$B_z = -119.5 + 0.429\theta + 5.434\theta^2 - 0.0008\theta^3 + 0.001\theta^4$$

表 3 X 方向与 Y 方向标定结果相关指标

Tab.3 Related indicators of the calibration results in X direction and Y direction

方向	线性度/ %	重复性/ %	迟滞性/ %	灵敏度/ ($\mu T \cdot (^{\circ})^{-1}$)
X	2.7646	1.8179	1.6406	147.85
Y	2.6891	1.7168	1.4823	150.78

倾角传感器受到霍尔元件灵敏度漂移、环境电磁干扰导致磁场信号基线波动的影响,导致位移-磁场映射关系的不稳定性,并且摩擦力的随机波动会导致永磁体复位轨迹偏差,表现为重复性

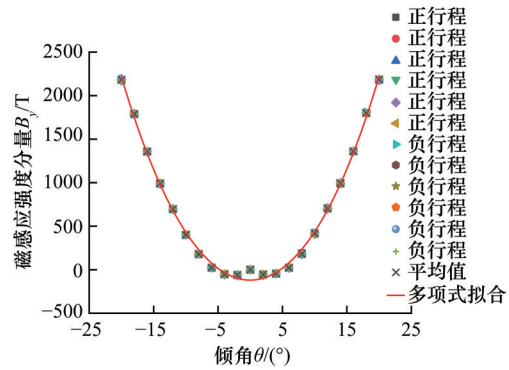


图 10 B_z 平均值与倾角多项式拟合

Fig.10 B_z average value and inclination angle polynomial fitting

误差。动态倾角变化时的磁延会引起磁场信号响应滞后。根据标定结果可知,倾角传感器的线性度误差、重复性误差以及迟滞性误差均在可用范围。

3.3 倾角解算模型优化

分析标定结果,线性模型(B_x 、 B_y)的误差集中在 $8^\circ < \theta < 14^\circ$ 、 $-14^\circ < \theta < -8^\circ$ 范围以及标定范围末端。非线性模型(B_z - θ)的误差集中在 $-10^\circ < \theta < 10^\circ$ 范围内。为结合不同磁场分量在不同倾角区间的解算优势,以提高倾角测量的鲁棒性,提出分段式倾角解算策略:以标定 $|\theta| = 10^\circ$ 时 B_z 的平均值 B_z^* 作为分段判断的阈值。当 $|B_z| < |B_z^*|$ 时,采用基于 B_x 和 B_y 的线性解算模型解;当 $|B_z| \geq |B_z^*|$ 时,测量范围采用基于 B_z 的倾角解算模型。通过实时对比阈值来判断当前所处区间,进而实现倾角解算模型在不同区间内的切换。

4 验证实验

如图 11 所示,实验平台为 Cincinnati FTV850 立式加工中心,能够控制工作台沿 X、Y、Z 方向移动,控制旋转轴以 0.001° 的精度转动。加工中心提供标准倾角作参考,对倾角传感器进行全向倾角测量验证。

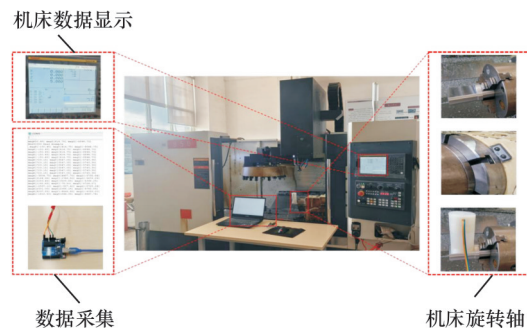


图 11 验证实验

Fig.11 Verification experiment

图 11 左侧为机床数据显示界面和 Arduino UNO 数据采集单元,上位机通过串口接收 Ardui-

no传输数据。图11右侧是将一块角度平台固定在加工中心旋转轴上,当旋转轴为 0° 时角度平台处于水平状态。将传感器坐标与工作台坐标对齐,置于角度平台上。验证实验在12个不同方位角下进行,其中在第一象限与第三象限的方位角分别为 20° 、 40° 、 60° 、 200° 、 220° 、 240° ;第二象限和第四象限的方位角分别为 120° 、 140° 、 160° 、 300° 、 320° 、 340° 。进行倾角测量,每个方位角下控制角度平台在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 范围内以 2° 间隔逐渐倾斜,每个方位角进行3组实验。

分段式倾角解算策略下,对比分析倾角传感器测量值和加工中心的标准值,计算测量误差 E :

$$E = T - S$$

式中: T 为倾角传感器测量值; S 为加工中心标准值。

汇总合并 OXY 平面同一直线上的方位角结果,从3组重复实验中选取最大误差作为代表值绘制误差柱状图,见图12。

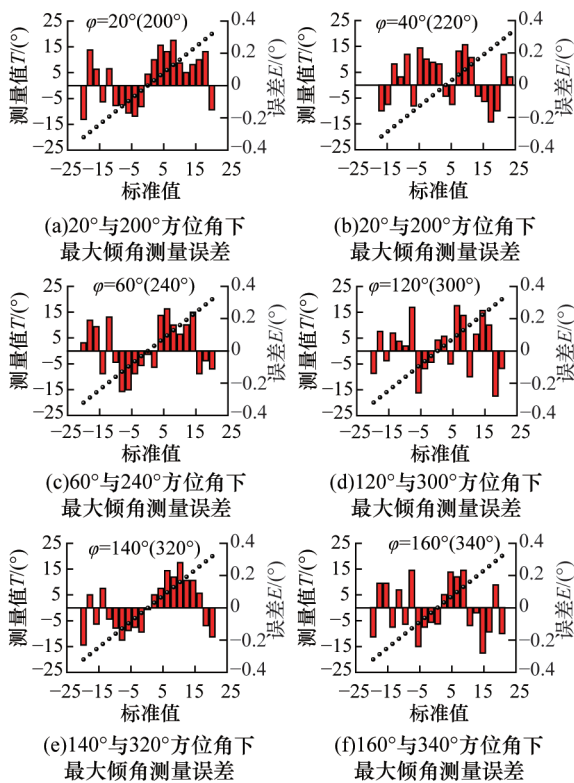


图12 验证实验最大误差

Fig.12 Maximum errors of validation experiment

分区测量策略提高了中高倾角测量的精度,3组验证实验在 $-20^\circ\sim 20^\circ$ 范围内,不同方位角下测量值最大测量误差不超过 $\pm 0.3^\circ$ 。该倾角传感器能够实现全向倾角测量且适用于一般精度要求场景。

5 结论

本研究通过有限元仿真指导传感器设计,通

过有限元磁仿真,揭示永磁体尺寸和气隙对磁感应强度测量的影响关系。综合材料性能、力学要求与封装兼容性,各结构模块选材与参数均基于有限元仿真与工程约束优化得出。

标定循环实验表明,在 $\pm 20^\circ$ 范围内 X 、 Y 方向具有良好的线性度($< 2.8\%$)。重复性误差与迟滞误差分别低于 1.9% 和 1.7% ,灵敏度分别达到 $147.85 \mu\text{T}/(^\circ)$ 和 $150.78 \mu\text{T}/(^\circ)$,双轴均衡性良好。基于此,建立 X 、 Y 双轴磁场信号与位移、位移与角度的映射模型,可实现倾角 θ 与方位角 φ 的同步解析。 Z 方向磁场呈对称非线性趋势,通过多项式拟合得到 B_z 与 θ 的解析函数表达式,建立 B_z - θ 的解析模型。为结合不同磁场分量在不同倾角区间的解算优势,以提高倾角测量的鲁棒性,提出分段式倾角解算策略。验证实验表明,传感器在12个方位角下的最大测量误差不超过 $\pm 0.3^\circ$,适用于一般精度的倾角测量和监测场景。

参考文献:

- [1] 陈松,吕玉祥. 一种输电杆塔总体倾角角度检测装置的设计与实现[J]. 传感技术学报, 2021, 34(10): 1279-1284.
CHEN Song, LYU Yuxiang. Design and Implementation of an Overall Tilt Angle Detection Device for Transmission Tower[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(10): 1279-1284.
- [2] PEI H, ZHANG F, ZHANG S. Development of a Novel Hall Element Inclinometer for Slope Displacement Monitoring[J]. Measurement, 2021, 181: 109636.
- [3] 陈晓斌,王风栋,吴梦黎,等. 基于倾角反演的隧道断面变形全方位监测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 151-161.
CHEN Xiaobin, WANG Fengdong, WU Mengli, et al. An All-round Monitoring Method for Tunnels Deformation Based on Tilt Inversion[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2024, 55(1): 151-161.
- [4] OZIOKO O, NASSAR H, DAHIYA R. 3D Printed Interdigitated Capacitor Based Tilt Sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26252-26260.
- [5] DU X, CHEN Q. Dual-laser Goniometer: a Flexible Optical Angular Sensor for Joint Angle Measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(7): 6328-6338.
- [6] ISMAIL N N, SHARBIRIN A S, SA'AD M S M, et al. Novel 3D-printed Biaxial Tilt Sensor Based on Fiber Bragg Grating Sensing Approach[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 330: 112864.
- [7] 邢心魁,邝卡斌,覃荷瑛. 一种高灵敏度的新型光纤光栅倾角传感[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 51-61.
XING Xinkui, KUANG Kabin, QIN Heying, et al. Novel Fiber Bragg Grating Tilt Sensor with High Sensitivity[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 51-61.
- [8] 杨继森,付航,秦梓洋,等. 互补式双层时栅角位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(4): 431-439.
YANG Jisen, FU Hang, QIN Ziyang, et al. Research on Complementary Double-layer Time-grid Angular Displacement Sensor[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34

- (4): 431-439.
- [9] 杨继森,周润,张天恒,等. 结构参数约束下的磁场补偿式双层时栅角位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(19): 2296-2303.
YANG Jisen, ZHOU Run, ZHANG Tianheng, et al. Research on Magnetic Field Compensated Double-layer Time-grating Angular Displacement Sensors under Structural Parameter Constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19): 2296-2303.
- [10] 张文昭,刘志壮,赵全友,等. 液体摆差分电阻倾角传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(9): 90-92.
ZHANG Wenzhao, LIU Zhizhuang, ZHAO Quanyou, et al. Design of Tilt Angle Sensor with Liquid Pendulum Differential Resistance [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(9): 90-92.
- [11] HA T T T, DANG D T, VU Q T, et al. A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor Based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure[J]. IETE Journal of Research, 2020, 66(5): 685-696.
- [12] RAO K, LIU H, WEI X, et al. A High-resolution Area-change-based Capacitive MEMS Accelerometer for Tilt Sensing[C]//2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Hiroshima, 2020: 1-4.
- [13] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and Applications of Angle Sensors: a Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(6): 7195-7206.
- [14] ÖZTÜRK Y, YARIÇI I. Research on a Novel Magnetic Tilt Sensor Designed Using Hall Elements and Ferrofluid [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 70(5): 406-411.
- [15] SU S, LI D, TAN N, et al. The Study of a Novel Tilt Sensor Using Magnetic Fluid and Its Detection Mechanism [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(15): 4708-4715.
- [16] 赵心语,姚杰,刘嘉盟,等. 一种高灵敏度磁性液体倾角传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2):10-16.
ZHAO Xinyu, YAO Jie, LIU Jiameng, et al. Study on a Magnetic Fluid Inclination Sensor with High Sensitivity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2):10-16.
- [17] 郭兵,马晓燕,杨晓锐,等. 磁性液体全方位倾角传感器的研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 395-399.
GUO Bing, MA Xiaoyan, YANG Xiaorui, et al. Research on Omni-directional Tilt Sensor of Magnetic Fluid [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(3): 395-399.
- [18] 邱明,李正国,李迎春,等. 倾斜摆动条件下衬垫改性对自润滑关节轴承摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014(1): 59-64.
QIU Ming, LI Zhengguo, LI Yingchun, et al. Effect of Liner Modification on the Tribological Properties of Self-lubricating Spherical Plain Bearings under Tilting Oscillation [J]. Tribology, 2014(1): 59-64.
- [19] ZHAO C L, ZHANG S M, XIE T, et al. A Novel Whisker Sensor with Variable Detection Range for Object Positioning [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(3):035007.

(编辑 王昱玥)

作者简介:王仲凯,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为传感器设计、机械设计及自动化。E-mail:2420604765@qq.com。
胡方敏*(通信作者),男,1972年生,实验师。研究方向为机械设

计及自动化。E-mail:1011059800@qq.com。

本文引用格式:

王仲凯,谢涛,王洪亮,等. 磁-重力耦合悬垂平衡的全向倾角传感器优化设计[J]. 中国机械工程,2026,37(3):555-563.

WANG Zhongkai, XIE Tao, WANG Hongliang, et al. Optimal Design of Omnidirectional Tilt Sensors Based on Magnetic-Gravity Coupled Pendulous Equilibrium [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 555-563.

(上接第554页)

WEN Donghui, XU Xinqi, ZHENG Zijun. Research on Shear Characteristics of LHP Flow Fields [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18): 2203-2210.

[13] KADIVAR M, AZARHOUSHANG B. 12-kinematics and Material Removal Mechanisms of Loose Abrasive Machining [M]// Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes (3rd ed). Amsterdam: Elsevier, 2022:507-536.

[14] 付振峰,王振忠,王彪,等. 光学元件超光滑表面的流体动压抛光特性研究[J]. 制造技术与机床, 2022(6): 11-17.

FU Zhenfeng, WANG Zhenzhong, WANG Biao, et al. Hydrodynamic Effect Polishing Characteristics of Ultra-smooth Surfaces of Optical Components [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(6): 11-17.

[15] 傅远韬. 基于复合结构抛光工具的线性液动压抛光加工表面形貌研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2023.

FU Yuantao. Research on Surface Morphology in Linear Hydrodynamic Polishing Process by Using Cylindrical Roller with Composite Structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2023.

[16] 傅远韬,文东辉,孔凡志,等. 线性液动压抛光加工的流场特性研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(11): 1306-1314.

FU Yuantao, WEN Donghui, KONG Fanzhi, et al. Research on Characteristics of Flow Fields during LHP Processes [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(11): 1306-1314.

[17] 薛凯元. 线性液动压抛光加工流体动压特性研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2019.

XUE Kaiyuan. Study on the Dynamic Pressure Characteristics of Linear Hydrodynamic Pressure Polishing [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.

(编辑 王昱玥)

作者简介:余虹蛟,女,2000年生,硕士研究生。研究方向为超精密加工。E-mail:464714686@qq.com。文东辉*(通信作者),男,1974年生,教授、博士研究生导师。研究方向为超精密加工。E-mail:wendh@zjut.edu.cn。

本文引用格式:

余虹蛟,文东辉,孔凡志,等. 基于复合结构抛光工具的铜衬底线性液动压抛光加工[J]. 中国机械工程,2026,37(3):546-554.

YU Hongjiao, WEN Donghui, KONG Fanzhi, et al. Linear Hydrodynamic Polishing of Copper Substrates Based on Composite Structure Polishing Tools [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 546-554.