

文章编号 1004-924X(2026)09-1441-12

## 光纤耦合系统中角位移台耦合误差建模与修正

程梦婷, 李 洁, 靳雨菡, 程真英\*, 李瑞君, 张连生

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室,  
安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对单模光纤精密耦合系统中角位移台在角度调节过程中引入的角度-位移耦合误差,导致耦合效率波动和系统稳定性下降的问题,开展了角位移台耦合误差建模及解耦补偿方法研究。基于高斯光束与单模光纤基模的模场重叠理论,结合 ZEMAX 仿真分析了角度倾斜与横向偏心耦合误差对单模光纤耦合效率的影响规律,搭建高精度角度-位移标定实验系统,利用整体最小二乘法与遗传算法相结合建立角位移台耦合误差模型,并将其引入单模光纤自动耦合过程,对角度调节引起的等效横向位移进行解耦补偿。实验结果表明,与未进行补偿的情况相比,解耦补偿可使自动耦合过程的平均对准时间缩短约 71%,平均耦合效率提升了 22%。该方法能够有效抑制角位移台耦合误差,提高单模光纤耦合系统的稳定性与效率。

**关键词:**角位移台;耦合误差;整体最小二乘法;遗传算法;解耦补偿;光纤耦合效率

**中图分类号:**TN929.11 **文献标识码:**A

**doi:**10.37188/OPE.20263409.1441 **CSTR:**32169.14.OPE.20263409.1441

## Coupling error modeling and correction of angular and translational stages in fiber coupling systems

CHENG Mengting, LI Jie, JIN Yuhan, CHENG Zhenying\*, LI Ruijun, ZHANG Liansheng

(Anhui Provincial Key Laboratory of Measurement Theory and Precision Instruments,  
College of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,  
Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: chengzhenying01@hfut.edu.cn

**Abstract:** Angle - displacement coupling errors introduced by angular stages during adjustment remain a critical issue in precision single-mode fiber coupling systems, leading to fluctuations in coupling efficiency and reduced stability. To address this problem, modeling and decoupling compensation of angle - displacement coupling errors are investigated. The analysis is based on mode field overlap theory between a Gaussian beam and the fundamental mode of a single-mode fiber. ZEMAX simulations are employed to examine the combined effects of angular tilt and lateral misalignment on coupling efficiency. A high-precision calibration platform for angle - displacement characterization is established to acquire coupling error data. An error model of the angular stage is constructed by integrating the Total Least Squares method with a Genetic Algorithm, enabling accurate characterization of the coupling relationship between angular motion and

收稿日期:2026-02-28;修订日期:2026-03-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52475554)

equivalent lateral displacement. The model is subsequently incorporated into the automatic fiber coupling process, where the lateral displacement induced by angular adjustment is decoupled and compensated in real time. Experimental results demonstrate that, compared with the uncompensated case, the proposed method reduces the average alignment time by approximately 71% and increases the average coupling efficiency by about 22%. The method effectively suppresses angle-displacement coupling errors introduced by the angular stage, thereby enhancing both stability and efficiency. This approach provides a practical and robust solution for high-precision optical alignment systems in which multi-axis coupling effects are significant.

**Key words:** angle-displacement stage; coupling error; total least squares; genetic algorithm; decoupling compensation; fiber coupling efficiency

## 1 引言

单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)凭借其传输损耗低、带宽宽和模式纯度优等特点<sup>[1-2]</sup>,已成为光通信传输的核心介质。而单模光纤的耦合效率可以借助改变链路光功率与信噪比对信号传输质量带来影响,进一步改变整个光通信系统的性能。因此,有必要分析影响单模光纤耦合效率的因素,以提升光通信系统的传输性能。

国内外研究人员从理论分析、仿真建模、实验验证以及算法补偿等方向开展了单模光纤耦合效率影响因素的研究。在理论方面,研究人员多从高斯光束与光纤基模的模场重叠积分模型入手进行探究。陈海涛等<sup>[3]</sup>分析了轴向、横向和端面倾斜对耦合效率带来的影响,提出横向偏移最为明显。Luo等<sup>[4]</sup>研究了透镜耦合系统里径向与轴向误差的耦合制约关系。Yu等<sup>[5]</sup>在激光二极管-光纤系统里验证了横向与角度误差敏感性。Cao等<sup>[6]</sup>进一步考虑了大气湍流对耦合效率的综合影响,确认横向偏移是主导因素。

在仿真与实验层面,李堂玥等<sup>[7]</sup>借助 ZEMAX 对双透镜系统进行了建模与优化,结果显示角度倾斜对耦合效率敏感性极高,实测最高效率达到 69%。董雪若等<sup>[8]</sup>在 ZEMAX 的混合模式下定量分析了准直镜和聚焦镜产生的对准误差所引起的光束质量和耦合效率的变化。毛久兵等<sup>[9]</sup>借助 ZEMAX 非序列光线追迹明确了 1 dB 损耗下的容差范围。Bian 等<sup>[10]</sup>建立了统计

模型分析大气湍流、像差和定位误差的综合影响,揭示了横向偏移容忍度最小而端面倾斜受数值孔径制约不受湍流趋势影响的规律,He 等<sup>[11]</sup>通过 ZEMAX 仿真和高精度实验验证了角度偏移对耦合效率影响最显著,轴向偏心影响最小。

在算法补偿方面,吴加丽等<sup>[12]</sup>依靠五自由度的压电陶瓷平台和随机并行梯度下降算法实现了误差校正。柯熙政等<sup>[13]</sup>则用模拟退火算法和压电陶瓷闭环系统快速提升耦合效率。Liu 等<sup>[14]</sup>给出了一种基于模糊控制的自调节光纤章动算法,该算法能够应对传统参数固定以及修正范围比较有限的问题。

上述研究大多聚焦于单一误差源,对于角位移台耦合误差在精密耦合中效率的影响分析仍显不足。在微装配、机器人等精密操作中,耦合误差的影响也至关重要,尤其在三维形状与位置测量领域<sup>[15]</sup>。视觉复合定位方法广泛用于高精度设备调整<sup>[16]</sup>,机器人与传感器的手眼标定技术进一步表明,机器人系统在定位时需要同时考虑角度和位移误差<sup>[17]</sup>。

本文开展了角位移台耦合误差建模与补偿方法的研究。通过以高斯光束模场重叠理论为基础,结合 ZEMAX 仿真,对角度倾斜与横向偏心对耦合效率的影响进行定量分析,进一步引入多自由度精密调节系统,采用实验标定,构建基于整体最小二乘法与遗传算法的角位移台耦合误差模型,再将模型引入自动耦合控制流程,以实现解耦补偿。

## 2 仿真分析

单模光纤耦合的实现依赖于光束与光纤之间相对空间位姿的精确调节,使入射光场与光纤基模场达到最优匹配,从而实现耦合效率最大化。在实际系统中,该过程通常通过对横向位置及角度等多个自由度进行迭代调节来完成,本质上可视为以耦合效率为目标函数的多变量优化问题。

在理想情况下,各自由度之间相互独立,优化过程能够沿梯度方向快速收敛。在实际光纤耦合系统中,由于角位移台旋转轴与光纤端面参考点之间存在偏差,角度调整往往会引入额外的横向位移误差,从而导致不同调节自由度之间产生耦合关系。该耦合效应会改变耦合效率在参数空间中的分布特性,进而影响自动耦合过程的收敛速度与最终耦合效率。所以有必要从耦合效率模型出发,分析角位移台耦合误差对系统性能的影响,并在此基础上开展误差建模与修正研究。

### 2.1 单模光纤耦合效率模型

单模光纤的耦合效率,主要取决于入射光模场与光纤基模之间模场匹配程度。当入射光束与光纤光场在空间位置、传播方向和波前形状上完全吻合时,耦合效率取得最大值。假设入射光束是高斯光束,其在光纤端面上的复振幅分布  $E_{in}$  可表示为<sup>[18]</sup>:

$$E_{in}(x, y) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right), \quad (1)$$

其中:  $E_0$  为中心峰值振幅,  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径,  $x, y$  表示光束横截面上任一点的位置。单模光纤的基模场分布  $E_{SMF}$  可近似为等效高斯分布:

$$E_{SMF}(x, y) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_f^2}\right), \quad (2)$$

其中:  $\omega_f$  为光纤等效模场半径,与模场直径 (Mode Field Diameter, MFD) 满足  $MFD = 2\omega_f$ 。

耦合效率  $\eta$  定义为两者模场重叠积分的平方模:

$$\eta = \left| \frac{\iint E_{in}(x, y) \cdot E_{SMF}^*(x, y) dx dy}{\sqrt{\iint |E_{in}(x, y)|^2 dx dy \cdot \iint |E_{SMF}(x, y)|^2 dx dy}} \right|^2, \quad (3)$$

其中:  $E_{in}$  为输入光场的振幅分布,  $E_{SMF}^*$  为单模光纤模场分布的复共轭,  $E_{SMF}$  为单模光纤的基模场分布。在理想条件下,光束和光纤端面在空间位置和入射方向上完全匹配,且横向位移误差  $d$  与角度误差  $\theta$  相互独立时,耦合效率  $\eta$  可表示为二者的乘积形式:

$$\eta(d, \theta) = \eta_0 \cdot \exp\left(-\frac{2d^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(\pi\omega\theta)^2}{2\lambda^2}\right), \quad (4)$$

其中:  $\omega$  为光纤模场半径,  $\eta_0$  为理想对准条件下的最大耦合效率,  $\lambda$  为光波长。

但装配误差或结构扰动导致的角度误差和位移误差在实际工程应用中并不是独立存在的,特别是在角度调整的过程中。因为旋转轴不能与光纤端面完全对齐,所以角度调整经常不可避免地引入一个等效横向位移  $\Delta s$ , 其形式一般表现为非线性关系,表达如下:

$$\Delta s = k_{eff}(\theta) \cdot \theta, \quad (5)$$

其中:  $k_{eff}(\theta)$  为角位移台耦合系数,单位为  $\mu\text{m}/\text{arcsec}$ 。此时,耦合效率应写为:

$$\eta(d, \theta) = \eta_0 \cdot \exp\left(-\frac{2[d + k_{eff}(\theta) \cdot \theta]^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(\pi\omega\theta)^2}{2\lambda^2}\right). \quad (6)$$

在  $k_{eff}$  较小时,耦合效率主要受到角度的影响。当  $k_{eff}$  增大后,由角度误差所引起的等效横向位移显著上升,耦合效率对角度变化的敏感性越来越强。在小角度范围内,若角度误差本身很小,较大  $k_{eff}$  也会导致耦合效率迅速衰减。由此可见,角位移台耦合误差显著影响光纤的系统耦合稳定性,需对其进行深入研究与补偿。

### 2.2 光纤接收端角位移台耦合误差对耦合效率的影响

在自动耦合过程中,角位移台的调整误差会通过角度-位移耦合效应改变耦合效率分布,从而影响优化过程的搜索路径与收敛性能。为进一步定量分析该耦合效应对系统性能的影响,本文基于 Corning SMF-28e+ 单模光纤,在 ZEMAX 中构建了相应的光纤耦合仿真模型。模型中将入射激光束物方数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 设为 0.14, 波长设为 1 550 nm, 光源类型为高斯光束。在 ZEMAX 中使用多重结构编辑器定义两个独立的操作数 PRAM: 操

作数 1 映射为  $X$  倾斜, 操作数 2 映射为  $Y$  偏心。在操作数 2 中设置拾取功能, 其自变量取自操作数 1 的实时数值, 通过设定缩放因子, 实现位移对角度的动态追踪。参数联动完成后, 通过二维通用绘图工具对光纤入耦合效率 (Fiber-In-Coupling Loss, FICL) 进行扫描, 将多重结构操作数与独立变量  $X, Y$  绑定, 独立变量  $Z$  与 FICL 绑定, 在操作数 2 中将缩放因子依次设为 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 来模拟不同的  $k_{\text{eff}}$  值, 以揭示角度偏移与横向偏心间的耦合误差对耦合效率的综合影响。不同  $k_{\text{eff}}$  下耦合效率的变化趋势如图 1 所示。

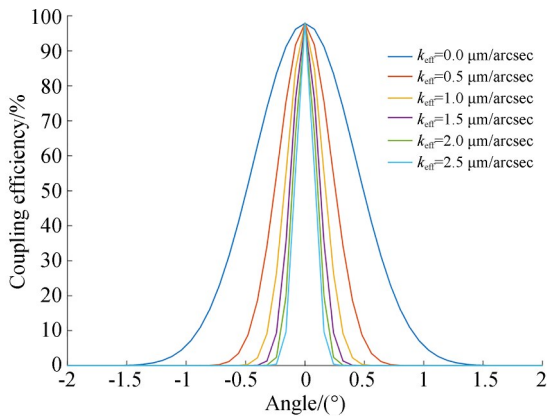


图 1 不同  $k_{\text{eff}}$  下耦合效率的变化趋势

Fig. 1 Variation trend of coupling efficiency under different  $k_{\text{eff}}$

由仿真结果可知, 随着  $k_{\text{eff}}$  的增大, 耦合效率下降到峰值一半时所对应的角度范围 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 随之减小, 表明角位移台耦合效应的增强削弱了系统的耦合能力。从图中可以看出, 同一角度偏移量下的耦合效率会随着  $k_{\text{eff}}$  的增大而减小, 这一结果也说明角位移台耦合误差会成为限制单模光纤耦合效率的影响因素, 必须通过抑制耦合效应、引入补偿策略来解决。

### 3 角位移台耦合误差建模与解耦补偿

#### 3.1 角位移台耦合误差的标定

角位移台误差建模补偿的前提条件是实现

耦合误差的标定, 建立角度输入与其引入的等效横向位移之间的定量映射关系。标定系统示意简图如图 2 所示, 角位移台提供可控且可重复的角度输入, 输出角度由角位移台自身的编码系统给出; 激光自准直仪获取角度变化, 测量方向与角位移台运动方向一致, 并通过光纤端面的偏心距换算得到由角度变化引起的等效横向位移。测量中保持测量平面固定, 仅允许角度自由度变化。该系统中以俯仰角位移台的参考旋转中心为坐标系原点。

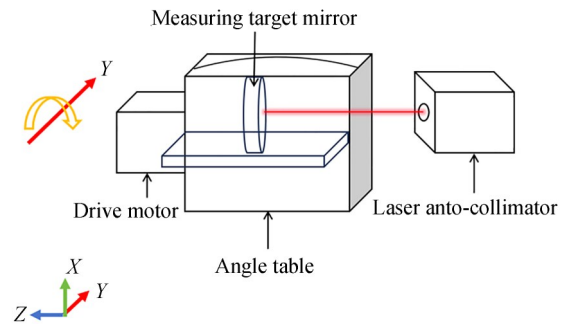


图 2 标定实验系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration experimental system

在角位移台的工作区间内, 采样选择对称的角度范围  $[-\theta, \theta]$ , 以一定精度  $\Delta\theta$  采样, 通过正向扫描和反向扫描获得位移数据。每个角度位置处角位移台调整到位稳定后再读出该处的角度测量值, 并转换成相应的横向位移。为了避免随机噪声的影响, 每个角度进行多次测量。整个标定过程处于恒温、隔振的实验环境, 以消除环境因素额外引入的误差。

#### 3.2 基于整体最小二乘法与遗传算法相结合的误差建模

在构建精确的角度-位移之间的映射关系时, 需要考虑宏观和微观两方面的叠加效应。从宏观方面看, 实际系统中角位移台的旋转轴与光纤端面参考点之间存在阿贝臂  $L$ , 当发生角度变化时, 阿贝臂将角度误差转化为等效横向位移误差, 可表示为  $\Delta D = L \cdot \sin \theta$ 。在小角度范围内 ( $\theta \ll 1 \text{ rad}$ ), 近似有  $\sin \theta \approx \theta$ , 可得  $\Delta D \approx L \cdot \theta$ , 该关系反映出系统准静态几何特性的线性耦合趋势。受制造公差、安装偏差及结构变形等因素的影响, 阿贝臂在实际系统中并非严格常数, 应视

为待求参数  $k$ 。上述关系可表示为  $\Delta D \approx k \cdot \theta$ ,  $k$  由系统的几何结构决定,通过实验标定获得。微观上,依据精密机械传动相关理论,系统内部存在随角度变化而变化的扰动成分,且该扰动受到传动机构运动学误差、旋转中心瞬时偏移以及重力载荷下结构弹性变形的影响,在角度域内通常表现为准周期变化特性,可采用谐波叠加形式描述:

$$\Delta D(\theta) = \sum_{j=1}^N (a_j \sin(c_j \theta) + b_j \cos(c_j \theta)). \quad (7)$$

综合阿贝误差项与周期扰动项,并考虑系统初始偏置,构建出角位移台耦合误差模型为:

$$D(\theta) = k\theta + \sum_{j=1}^N (a_j \sin(c_j \theta) + b_j \cos(c_j \theta)) + C. \quad (8)$$

为了确定模型中谐波的阶数,引入频谱分析法。假设经过预处理后的角度-位移序列为  $\{\theta_j, d_j\}$ ,为了进一步分析谐波特性,引入离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT),将该角度-位移序列从空间域转换到频域,得到各频率分量的复幅值如下:

$$D(m) = \sum_{i=0}^{M-1} d(\theta_i) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi m i}{M}\right), \quad (9)$$

其中: $M$ 为采样点的个数, $m$ 为表示频率的索引值, $d(\theta_i)$ 表示  $\theta_i$ 角处的采样值。对频域结果进行分析,通过比较各频率分量,识别出主导频率成分。选取前  $M$  个能量占比较高的谐波分量参与建模,在保留信号主要特征的同时,避免高频噪声成分引入模型,从而降低模型复杂度并提升其泛化能力。

在标定实验里,因为角度输入和对应的横向位移输出都是实际测量得到,受到角度台的重复定位精度以及测量仪器精度的制约,两者都带有随机误差和系统性偏差。如果使用传统最小二乘法建模,即假定误差只出现在因变量里,自变量没有误差,这与实际条件不相符,模型参数产生系统性偏差。相比之下,整体最小二乘法(Total Least Squares, TLS)同时考虑自变量和因变量中的误差,借助观测数据矩阵施加整体扰动修正,使修正后的数据在最小意义下满足所建立的模型关系<sup>[19]</sup>。当角度-位移关系具有较强相关性或者表现出非线性特征时,其参数估计结果会显

示出更好的数值稳定性。所以本文把 TLS 用作参数估计的准则,将目标函数  $J(X)$  设成正交距离平方和,即:

$$\min J(X) = \sum_{i=1}^M \frac{[d_i - f(\theta_i, X)]^2}{1 + [f'(\theta_i, X)]^2}, \quad (10)$$

其中: $f(\theta_i, X)$ 代表理论模型, $f'(\theta_i, X)$ 代表模型关于角度  $\theta$  的一阶导数。该目标函数中,分母始终按实时位移误差进行补偿,从而在角度噪声和位移噪声同时存在的情况下,使线性斜率和谐波频率具有一致性。

由于 TLS 目标函数中含有非线性导数项, TLS 的解空间也是多元多极值空间。为了提高得到全局最优解的几率,避免陷入局部最优,本文采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行全局优化。将参数向量  $X = \{k, a_1, b_1, \dots, a_N, b_N, C\}$  编码成 GA 的遗传空间的染色体,按照标定数据量级,事先给  $X$  每个参数设定合理的搜索范围。因为 TLS 的目标函数  $J(X)$  是最小化函数,而 GA 选择机制要求适应度大于零且越大越好,因此构建如下倒数映射函数:

$$F(X) = \frac{1}{J(X) + \xi}, \quad (11)$$

其中: $\xi$ 为极小偏移常数。对极小偏移取倒数,则导致的正交残差的小幅度下降可转化为适应值的巨大提升,从而提高优良参数组合在进化过程中的生存概率,指导进化种群快速进化到全局最优解。在 GA 全局优化中,个体选择采用随机竞争选择法,以解决 TLS 准则的非线性误差曲面问题。而此非线性误差曲面常出现“超平面化”现象,以致算法陷入局部极值,随机竞争法针对这种特点采用样本局部优胜算法,采用调节竞争规模方式来动态地平衡选择压力。该方法保留低正交残差优良基因的同时防止早熟收敛,保持全局搜索过程中的种群多样性。在基因交换过程中采用自适应算术交叉算子,由于耦合误差模型中的物理分量之间存在一定的相关性,而传统离散交叉会破坏各个参数之间联系的内在一致性,自适应算法对父代参数向量直接插值,能在整个连续空间内同步匹配所有参数的调变型,自动协调线性项和谐波项对整个误差的贡献程度,避免参数不一致使模型的整体拟合精度降低。使用非均匀变异算子进行局部搜索,实现搜索操作与

局部搜索过程中两种操作的平衡性。进化初期,较大的变异幅度可以帮助算法跳出局部最优;随着进化代数增加,变步长逐步减小,算法转入精细搜索,实现对参数的高精度锁定,提升模型对微观波动特征的特征能力。通过选择、交叉、变异的循环迭代,GA 不断优化种群适应度直至满足收敛条件,最终输出参数的全局最优解。建模流程如图 3 所示。

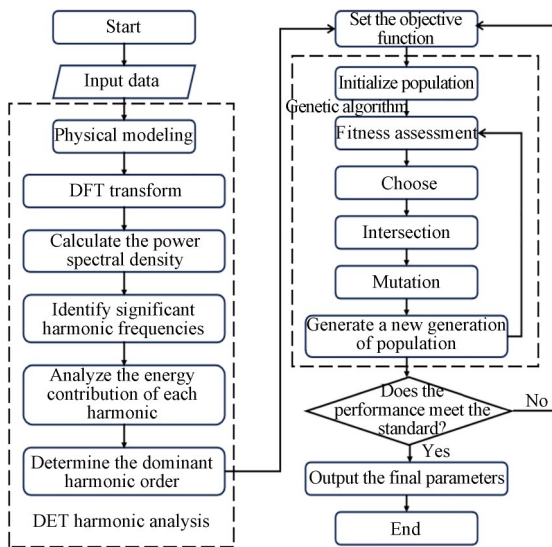


图 3 基于整体最小二乘法与遗传算法相结合的耦合误差建模流程

Fig. 3 Flow chart of coupling error modeling based on total least squares and genetic algorithm

### 3.3 解耦补偿流程

角位移台角度-位移解耦补偿流程如图 4 所示。基于所建立的角度位移台耦合误差模型,在光纤精密耦合过程中引入误差补偿,以角度指令为驱动,采用基于标定模型的补偿方式,用于抵消角度调节过程中引入的横向位移扰动。系统运行时,首先控制系统根据当前耦合效率反馈和预设扫描路径,生成角度调整指令  $\theta$ ,同时补偿模块读取当前角度指令  $\theta$  及对应的角度变化量  $\Delta\theta$ ,并作为位移补偿计算的输入量,代入标定的角位移台耦合误差模型  $D(\theta)$ ,计算由角度调节引起的横向位移预测值  $d_{\text{pred}} = D(\theta)$ ;在位移控制通道中施加与预测位移等幅反向的补偿指令  $d_{\text{comp}} = -d_{\text{pred}}$ ,以抵消角度调节过程中引

入的耦合位移误差,减小角度运动对光纤横向位置的附加影响。为保证补偿过程的平稳性与可执行性,补偿量的施加与角度调节过程保持同步,不引入额外的控制回路或实时反馈修正。

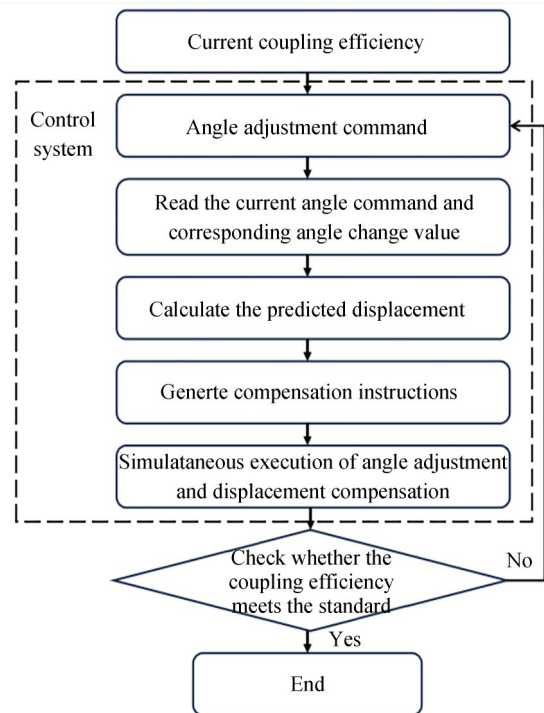


图 4 系统解耦补偿流程

Fig. 4 Flow chart of system decoupling compensation

解耦补偿是由模型计算结果触发的,直接反映到整个控制运行程序中,在保证系统实时性和运行稳定性的条件下,角度调整、位移补偿均能相应完成。借助这种补偿机制,可以有效抑制角度-位移耦合误差,减小因改变角度而引起的横向位移带来的扰动,为光纤耦合提供更稳定的条件,使整个系统更稳定、控制更精确。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 角度台耦合误差标定

角位移台耦合误差标定实验系统如图 5 所示。该系统主要由红星杨 OMPA6050 角位移台(对应图 2 的角度台)、卓立汉光 uFS20-60 位移台、激光自准直仪(对应图 2 的激光自准直仪)与控制单元组成,坐标系原点  $O$  为俯仰轴的旋转中

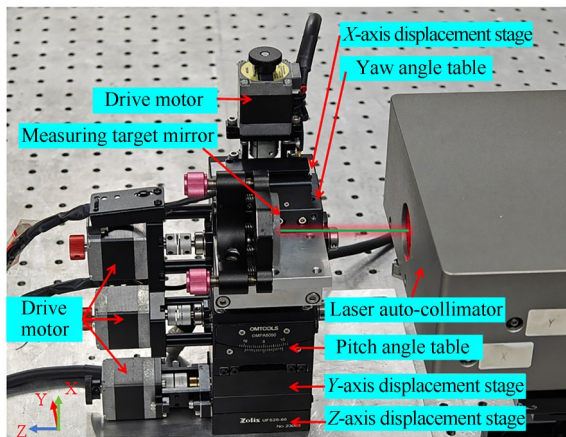


图 5 标定实验系统实物图

Fig. 5 Physical diagram of the calibration experimental system

心。由于实际结构限制,俯仰轴与偏摆轴的旋转中心存在空间偏置,偏摆轴相对于原点  $O$  具有固

定位置偏差。对偏摆与俯仰分别进行标定,得到两组角度-位移关系序列,表 1 和表 2 给出了部分测量数据。

需要说明的是,该角位移台采用滚柱导轨结构,并通过位移驱动实现角度调节,其控制输入为位移量,而角度变化由内部机械传动关系实现转换。通过标定实验建立了输入位移与输出角度之间的对应关系,10  $\mu\text{m}$  的间隔对应约  $50''$ 。为贴合实际控制方式,本文在建模与分析过程中直接采用位移量作为输入变量。

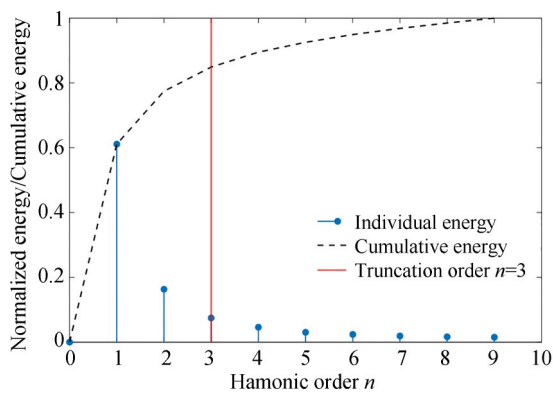
标定数据的频谱能量分布如图 6 所示。一阶谐波占据主导地位,二阶谐波次之,从三阶开始各阶谐波能量迅速衰减并趋近于零。由此说明,系统的主要误差成分集中在低阶谐波,高阶分量主要表现为噪声。综合考虑模型复杂度,选取三阶模型进行建模。

表 1 偏摆标定数据  
Tab. 1 Yaw calibration data

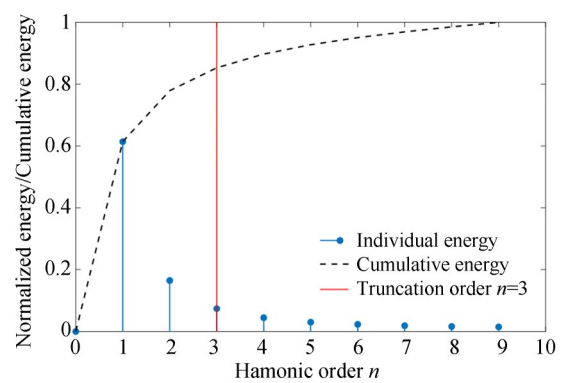
Displacement/ $\mu\text{m}$	( $\mu\text{m}$ )				
	1	2	3	4	5
-100	168.429	167.174	167.705	167.437	170.992
-90	150.477	149.221	148.861	148.579	148.131
-80	132.446	131.421	130.827	130.637	130.189
-70	114.201	113.153	112.620	112.386	111.833
-60	96.150	94.990	94.487	94.314	93.815
-50	78.106	76.830	76.362	76.216	75.795
-40	60.191	63.993	64.514	62.511	63.968
-30	52.862	51.671	51.288	51.264	50.956
-20	31.247	30.500	32.500	31.724	33.006
-10	14.653	15.464	15.041	14.743	16.178
0	0	0	0	0	0
10	-15.085	-14.501	-14.457	-14.654	-14.349
20	-31.354	-30.265	-30.177	-30.363	-30.102
30	-48.089	-46.565	-46.422	-46.660	-46.392
40	-64.996	-62.970	-62.885	-63.147	-62.899
50	-81.798	-79.969	-79.762	-79.915	-79.653
60	-98.159	-96.574	-96.398	-96.527	-96.296
70	-113.509	-113.363	-113.051	-113.024	-112.525
80	-128.543	-129.086	-128.540	-128.238	-126.850
90	-145.125	-143.998	-143.394	-143.211	-142.627
100	-161.998	-160.162	-159.826	-159.772	-159.517

表 2 俯仰标定数据  
Tab. 2 Pitch calibration data (f)

Displacement/ $\mu\text{m}$	1	2	3	4	5
-100	172.648	172.743	172.057	172.111	172.088
-90	155.784	155.835	155.038	155.021	155.078
-80	138.548	138.633	137.818	137.821	137.988
-70	121.060	121.165	120.364	120.408	120.480
-60	103.732	103.694	102.866	102.978	103.046
-50	86.108	86.166	85.341	85.321	85.423
-40	66.546	68.519	68.363	68.074	68.251
-30	48.654	50.743	50.488	50.417	50.603
-20	32.394	34.428	34.275	34.289	34.458
-10	15.545	16.606	16.705	16.606	16.909
0	0	0	0	0	0
10	-15.343	-15.404	-15.621	-15.268	-15.224
20	-31.534	-31.656	-31.877	-31.405	-31.358
30	-48.336	-48.350	-48.778	-48.350	-48.292
40	-65.468	-65.512	-65.800	-65.369	-65.342
50	-82.864	-82.932	-83.122	-82.708	-82.643
60	-100.050	-100.192	-100.671	-100.199	-100.111
70	-117.761	-117.853	-118.277	-117.700	-117.816
80	-135.293	-135.517	-135.632	-135.069	-134.991
90	-155.324	-153.422	-153.531	-152.842	-152.716
100	-170.771	-170.879	-170.811	-170.258	-170.170



(a) 偏摆  
(a) Yaw



(b) 俯仰  
(b) Pitch

图 6 标定数据的频谱能量分布

Fig. 6 Spectral energy distribution of calibration data

在模型阶数确定后,用 GA 对模型参数进行全局寻优解算,获得偏摆角与俯仰角方向对应的

$$D_{yaw}(\theta) = -1.641\theta + 2.404 \cdot \sin(0.035\theta) - 0.38 \cdot \cos(0.035\theta) - 0.0128 \cdot \sin(0.0347\theta) + 0.025 \cdot \cos(0.0347\theta) - 0.355 \cdot \sin(0.0525\theta) - 0.0356 \cdot \cos(0.0525\theta) + 0.773, \quad (12)$$

$$D_{pitch}(\theta) = -1.7141\theta + 2.04 \cdot \sin(0.0262\theta) - 0.092 \cdot \cos(0.0262\theta) - 0.814 \cdot \sin(0.0233\theta) - 0.005 \cdot \cos(0.0233\theta) + 0.737 \cdot \sin(0.0564\theta) - 0.216 \cdot \cos(0.0564\theta) + 0.655, \quad (13)$$

其中: $\theta$ 由角位移台的驱动位移通过固定传动关系换算得到。

角位移台耦合模型参数,用于后续解耦补偿计算,即:

为定量评估模型的拟合精度及补偿效果,以均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为模型有效性的评价指标。偏摆角与俯仰角补偿前后的 RMSE 对比结果如表 3 所示,补偿效果如图 7 所示。

表 3 建模补偿效果

Tab. 3 Effect of modeling-based compensation

RMSE/ $\mu\text{m}$	Yaw angle	Pitch angle
Before compensation	93.69	97.86
After compensation	1.87	0.59
Reduced percentage	98%	99%

从上述结果可知,误差补偿后,偏摆角的 RMSE 降低了 98%,俯仰角的 RMSE 降低了 99%,表明所建立的角位移台耦合误差补偿模型具有很高的建模精度与误差表征能力,所提出的

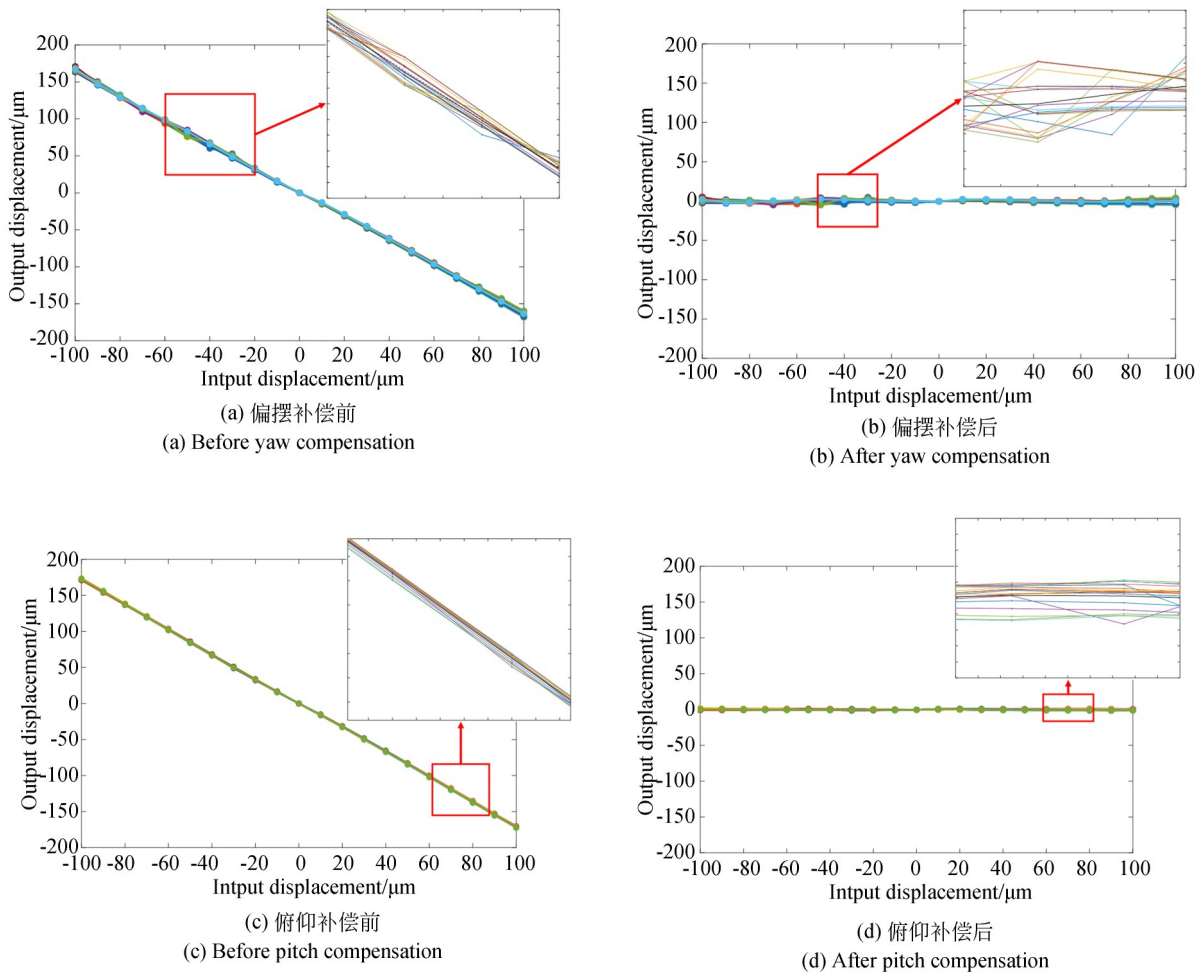


图 7 俯仰角和偏摆角的补偿效果

Fig. 7 Compensation effect of pitch and yaw angles

模型能够有效刻画角度调节过程中由结构耦合引入的等效横向位移误差。

#### 4.2 单模光纤耦合效率补偿效果

本文进一步用标定系统构建单模光纤自动耦合系统,并设计对比实验评估补偿效果。为尽可能排除硬件条件、初始状态及非算法因素对实验结果的影响,对比实验基于相同的系统结构、控制参数以及相同的初始失准状态下启动,仅在角度调整过程中引入本文提出的补偿模型进行解耦补偿,对比结果如图 8 所示。

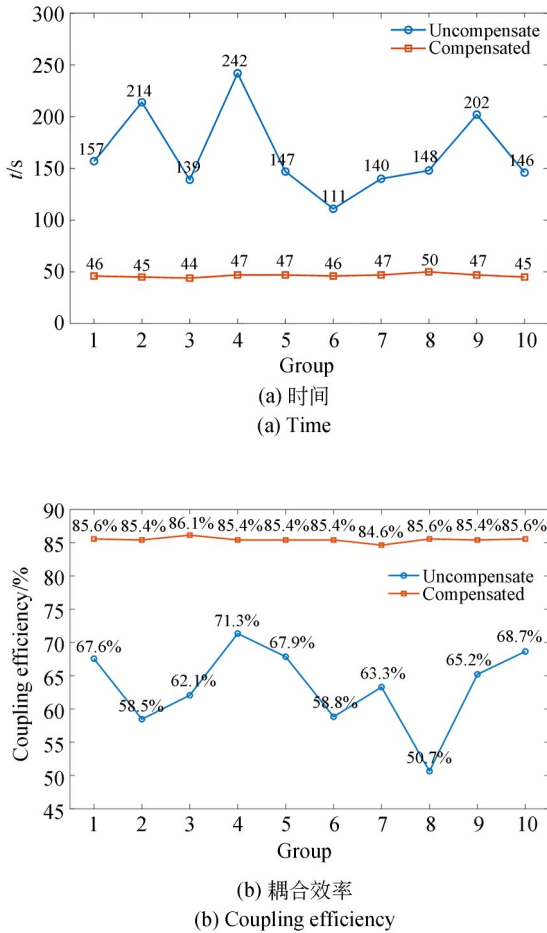


图 8 补偿前后指标对比

Fig. 8 Comparison of metrics before and after compensation

从标定与实验结果可知,角位移台的耦合系数约为  $1.7 \mu\text{m}/(^\circ)$ ,在未进行补偿时,该耦合效应带来的等效横向误差的均值约为  $1.7 \mu\text{m}$ ,横向误差的均方根较大。引入本文所提出的补偿方

法后,耦合效应得到有效抑制,耦合系数降至约  $0.1 \mu\text{m}/(^\circ)$ ,对应横向误差的均值约为  $0.1 \mu\text{m}$ ,均方根减小,系统的角度-位移映射关系得到优化,光场与模场的匹配程度明显改善,从而实现耦合效率的提升。

从仿真结果来看,不同耦合系数的耦合效率差异仅在小角度范围内显著。在  $0.1^\circ$  时,当等效耦合系数为  $1.7 \mu\text{m}/(^\circ)$ ,耦合效率约为 70%;当等效耦合系数为  $0.1 \mu\text{m}/(^\circ)$ ,耦合效率约为 90%,增幅约为 20%。

从实验结果来看,补偿前系统的平均耦合效率为 63.4%;补偿后系统的平均耦合效率为 85.5%,提升了 22%,与仿真趋势一致,且自动耦合过程的平均对准时间缩短约 71%。由此说明,对角位移台耦合误差进行建模与补偿的方法,能够明显改善系统的收敛速度和耦合效率。

## 5 结 论

针对角位移台耦合误差会降低单模光纤自动耦合系统的稳定性、收敛速度和耦合精度的问题,本研究将理论建模、ZEMAX 仿真和实验三者结合起来,建立了基于整体最小二乘法和遗传算法的角位移台耦合误差补偿模型。相较未做补偿的情况,该补偿模型能将系统的平均对准时间缩短 71%,平均耦合效率提升 22%。该方法不需要额外增加硬件,只需要将补偿算法嵌入软件流程,即可明显提高系统的装调效率和稳定性。由于本研究针对两个角度分别建立了各自的补偿模型,因此后续的工作将重点扩展补偿模型以适应多轴耦合误差,并增强模型在不同环境和操作条件下的稳定性。

### 作者贡献声明:

程梦婷:实验设计及数据整理与分析,论文构思与撰写;

李 洁:测量方法提出及指导;

靳雨菡:实验及验证;

程真英:论文指导及修改;

李瑞君:实验平台提供;

张连生:提供基金支持。

## 参考文献:

- [1] 杜恒校, 徐雯. 论单模光纤在综合布线系统的应用[J]. 智能建筑, 2010(3): 68-70.  
DU H X, XU W. Discussion on the application of single mode fiber in PDS[J]. *Intelligent Building*, 2010(3): 68-70. (in Chinese)
- [2] 杨海林, 刘丽娟, 彭迪, 等. 光纤信能共传技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1100001.  
YANG H L, LIU L J, PENG D, *et al.* Research progress of power-over-fiber technique applied to radio-over-fiber systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1100001. (in Chinese)
- [3] 陈海涛, 杨华军, 李拓辉, 等. 光纤偏移对空间光-单模光纤耦合效率的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 75-78.  
CHEN H T, YANG H J, LI T H, *et al.* Influence of the fiber displacement on coupling light beam into single-mode fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 75-78. (in Chinese)
- [4] LUO L N, YANG Z Y, LI S, *et al.* Investigation of the effects of alignment errors on coupling efficiency in lens-based coupling of polarization-maintaining fibers[J]. *Photonics*, 2025, 12(12): 1194.
- [5] YU J H, GUO L H, WU H L, *et al.* Analysis influence of fiber alignment error on laser - diode fiber coupling efficiency[J]. *Optik*, 2016, 127(6): 3276-3280.
- [6] CAO B S, QIU Z F, HUANG K K, *et al.* Single-mode fiber auto-coupling system with wedges [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102433.
- [7] 李堂玥, 牟达, 夏鹏宇, 等. 基于太赫兹时域光谱系统共光路光纤耦合系统的设计及误差分析[J]. 中国激光, 2024, 51(8): 0806003.  
LI T Y, MU D, XIA P Y, *et al.* Design and error analysis of a fiber coupling system based on THz-TDS common optical path [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(8): 0806003. (in Chinese)
- [8] 董雪岩, 李平雪, 章曦, 等. 基于ZEMAX的扩束型光纤连接器对准误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152201.  
DONG X Y, LI P X, ZHANG X, *et al.* Analysis of alignment errors of beam-expanded optical fiber connector based on ZEMAX[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 152201. (in Chinese)
- [9] 毛久兵, 杨伟, 李建平, 等. 光电互联电路中激光器与光纤直接耦合对准误差仿真分析[J]. 电子工艺技术, 2018, 39(3): 129-132.  
MAO J B, YANG W, LI J P, *et al.* Simulation and analysis of direct coupling alignment error for laser and optical fiber in electro-optical interconnection circuit [J]. *Electronics Process Technology*, 2018, 39(3): 129-132. (in Chinese)
- [10] BIAN Y M, LI Y, CHEN E H, *et al.* Free-space to single-mode fiber coupling efficiency with optical system aberration and fiber positioning error under atmospheric turbulence [J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(2): 025703.
- [11] HE Q, ZHAO Z G, YE X D, *et al.* Optical coupling efficiency of a coupler with double-combined collimating lenses and thermally expanded core fibers[J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 324.
- [12] 吴加丽, 柯熙政, 杨尚君, 等. 多维耦合器校正空间光-单模光纤耦合对准误差[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0706003.  
WU J L, KE X ZH, YANG SH J, *et al.* Correction of alignment error in coupling space light into single-mode fiber by multi-dimensional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0706003. (in Chinese)
- [13] 柯熙政, 罗静, 雷思琛. 空间光耦合自动对准方法与实现[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0103009.  
KE X ZH, LUO J, LEI S CH. Automatic alignment method and realization of space optical coupling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103009. (in Chinese)
- [14] LIU Y K, LI S Q, LV F R, *et al.* Parameter self-adjusting single-mode fiber nutation coupling algorithm based on fuzzy control[J]. *Sensors*, 2025, 25(10): 3051.
- [15] 孙广开, 张兴硕, 何彦霖, 等. 面向连续体机器人精密操作的多芯光纤三维形状与位置测量误差研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(3): 68-82.  
SUN G K, ZHANG X SH, HE Y L, *et al.* Measurement error of 3D shape and position of multi-core optical fiber for precision operation of continuum robots [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(3): 68-82. (in Chinese)
- [16] 王晓东, 崔世鹏, 徐征, 等. 面向精密微装配的视觉复合定位[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2857-2866.  
WANG X D, CUI SH P, XU ZH, *et al.* Visual

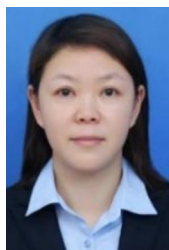
- composite positioning for precision microassembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(19): 2857-2866. (in Chinese)
- [17] 刘昶, 罗寅, 曲广宇. 应用垂直角特征的机器人与 2D 激光雷达手眼标定[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(22): 3336-3347.  
LIU CH, LUO Y, QU G Y. Hand-eye calibration between robot and 2D LiDAR using orthogonal corner feature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(22): 3336-3347. (in Chinese)
- [18] 王艺轩, 郭斌, 刁晓飞, 等. 高斯光束单模光纤耦合效率影响因素的定量分析[J]. *计量学报*, 2025, 46(9): 1364-1370.  
WANG Y X, GUO B, DIAO X F, *et al.* Quantitative analysis of the influencing factors on the coupling efficiency of Gaussian beams into single-mode fibers[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46(9): 1364-1370. (in Chinese)
- [19] 张晓东, 陈静, 马超. 基于转向架航向角的既有铁路平面线形识别方法研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2024, 37(2): 64-70.  
ZHANG X D, CHEN J, MA CH. Identification method of existing railway horizontal alignment based on bogie heading angle[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)*, 2024, 37(2): 64-70. (in Chinese)

#### 作者简介:



程梦婷(2000—),女,安徽合肥人,硕士研究生,2022年于安徽理工大学获得学士学位,主要从事仪器精度与软件开发等方面的研究。E-mail: 15156555954@163.com

#### 通讯作者:



程真英(1980—),女,江苏金坛人,博士,教授,2004年、2015年于合肥工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事精密机械及仪器精度理论、微纳测量技术等方面的研究。E-mail: chengzhenying01@hfut.edu.cn