

# 反射式增量光栅尺位移测量系统研究<sup>\*</sup>

李昊文 杜浩<sup>†</sup> 熊培元

(桂林电子科技大学 南宁研究院, 南宁 541004)

**摘要** 针对集成电路设备工业生产中高精度加工和定位的需求,研究了利用反射光栅的增量式光栅尺测量系统. 根据高精度平面光栅尺测量原理,建立了反射式光栅尺位移测量系统. 利用读数头光束与光栅平面的几何关系,建立光斑位移与位移平台的位置关系,实现了将光栅反射的光信号转化为位移平台的位置信息. 设计了光栅反射信号处理的位移测量实验平台,开展了反射式增量光栅尺测量系统原理验证实验、测量一致性实验和测量稳定性实验. 实验结果表明:光栅尺位移测量系统原理正确;光栅尺测量系统测量精度达到 $\pm 2 \mu\text{m}/\text{cm}$ ,能够满足集成电路设备工业生产中高精度加工和定位的需求.

**关键词** 光栅尺, 位移测量, 误差补偿

中图分类号:TH711

文献标志码:A

## Research on Reflective Incremental Grating Ruler Displacement Measurement System<sup>\*</sup>

Li Haowen Du Hao<sup>†</sup> Xiong Peiyuan

(Nanning Research Institute, Guilin University of Electronic Technology, Nanning 541004, China)

**Abstract** To address the need for high-precision machining and positioning in the industrial production of integrated circuit equipment, a displacement measurement system using a reflective grating was studied. Based on the principle of high-precision plane grating measurement, a reflective grating ruler displacement measurement system was established. By utilizing the geometric relationship between the reading head beam and the grating plane, the relationship between the displacement of the light spot and the position of the displacement platform was established, thereby converting the reflected optical signal of the grating into positional information of the displacement platform. An experimental platform for displacement measurement of grating reflection signals was designed, and experiments were conducted to verify the principles of the reflective incremental grating ruler measurement system, as well as to assess measurement consistency and stability. Experimental results demonstrate that the principle of the grating ruler displacement measurement system is correct, with a measurement accuracy reaching  $\pm 2 \mu\text{m}/\text{cm}$ , which meets the requirements for high-precision machining and positioning in the industrial production of integrated circuit equipment.

**Key words** grating ruler, displacement measurement, error compensation

2024-07-16 收到第 1 稿,2024-08-08 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(62205076),国家重点研发计划项目(2022YFF0605502), National Natural Science Foundation of China(62205076), National Key Research and Development Program(2022YFF0605502).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail:duh.tdcq@qq.com

## 引言

随着全球科技的发展,半导体与集成电路已经成为影响国家经济及国防安全的关键,其发展壮大对提高我国国际竞争力和改善社会民生具有重要战略意义.当前中国集成电路产业正面临艰巨挑战,特别是在少数国家频频动用国家力量无端打压中国科技企业的背景下,针对国际、国内行业形势和国家战略需求<sup>[1]</sup>,为实现更大规模的半导体产业发展,切实推动高精设备的技术研发,开展半导体集成电路领域研究工作至关重要.

目前,集成电路不断往小型化方向发展,半导体器件特征尺寸不断减小,导入的新结构越发微细,二者都对半导体工艺提出了新的要求.特征尺寸的减小不仅要求我们能实现超精细的图形加工,能够精确控制图形的形状,还要能够控制形状表面能量状态等诸多要素;新结构的导入,需要我们能够精确控制三维,高深宽比结构的同时避免不必要的形状损伤.目前能够满足高精度加工和定位的位移测量方法只有各类激光干涉仪和光栅式位移测量装置.

激光干涉仪<sup>[2,3]</sup>是以稳频激光的波长为工作基准,当测量环境的某些参数如空气温度、大气压强、相对湿度、CO<sub>2</sub>浓度等发生变化都会导致激光波长的不稳定,进而给测量结果带来误差<sup>[4]</sup>.用激光干涉仪实现高精度测量需要高级别的环境控制系统,而且随着测量量程的增长,环境控制的技术难度和成本将成倍地增长.与之相对的,光栅位移测量系统<sup>[5-8]</sup>以光栅作为量尺,以光栅的栅距为测量基准,相比于波长光栅刻槽对环境的敏感度低,而且光栅与读数头之间的间距较小,且不会随测量距离的增加而变大,这就极大地降低了测量对环境的要求.

本文为满足集成电路设备工业生产中高精度加工和定位的需要,根据平面光栅尺的测量原理,开展反射式增量光栅尺方案研究,建立了基于反射光栅的增量式光栅尺测量平台,实现了精度在 $\pm 2 \mu\text{m}/\text{cm}$ 的光栅尺测量系统,为实现高精度位移测量提供新方案.

## 1 反射光栅位移测量原理

反射光栅测量原理如图 1 所示,测量系统由可见光激光器、标尺光栅、光栅尺读头、光电接收器和信号处理板卡组成.

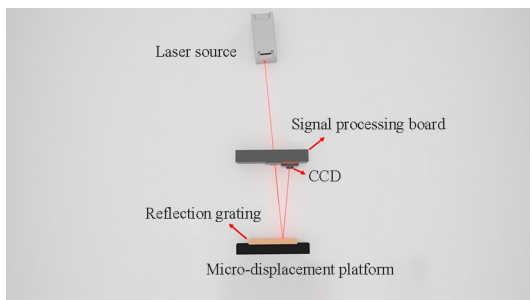


图 1 反射光栅尺测量原理

Fig. 1 Principle of reflection grating ruler measurement

标尺光栅被固定在位移平台上<sup>[9]</sup>,跟随位移平台移动,将读数头固定在空间位置不变的框架上.激光器产生的光束通过读头上的小孔入射至标尺光栅,在光栅上发生反射,其反射光返回至读数头.将光栅反射的测量信号经过光电转换后输入到信号处理板卡.通过对测量信号的实时运算处理就可以计算出位移平台的位移量.实验装置如图 2 所示.

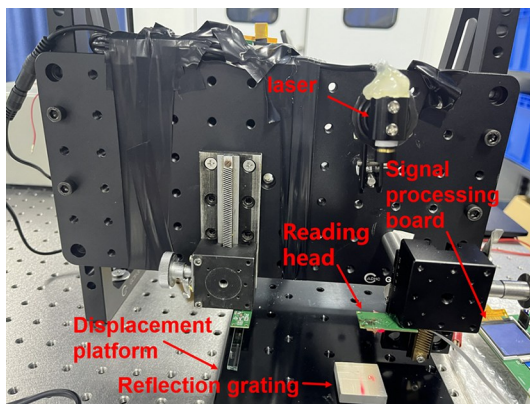


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental installation drawing

## 2 光栅尺位移测量系统

反射式增量光栅尺测量系统由可见光激光器、位移台、上位机和数据采集板卡组成.增量式光栅尺为测量系统提供测量基准;位移台采用亚微米级直线电机的直驱定位平台作为高精度位移台,运动范围为 60 mm,重复定位精度可达 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ;上位机用于向数据采集卡发送开始检测、结束检测的命令;数据采集板卡用来采集增量式光栅尺的数据.

在测量平台中,将光栅尺的尺壳与位移台固定,将读数头固定在空间位置不变的框架上,使用驱动程序控制位移台按照一定的速度运动,通过数据采集板卡、上位机以及可见光激光器三者之间的配合,即可完成测量范围内位移量的测量.

数据采集板卡精度检测流程图如图3所示,当接收到上位机设定测量起始点的命令后,数据采集板卡采集增量式光栅尺的位置信息并记录,同时驱动程序控制位移平台开始进行位移;随后,采集板卡循环采集增量式光栅尺位置信息,当检测到执行完整个测量步距后命令结束测量;当接收到上位机检测结束的命令后采集板卡停止记录,读取采集的位置信息。

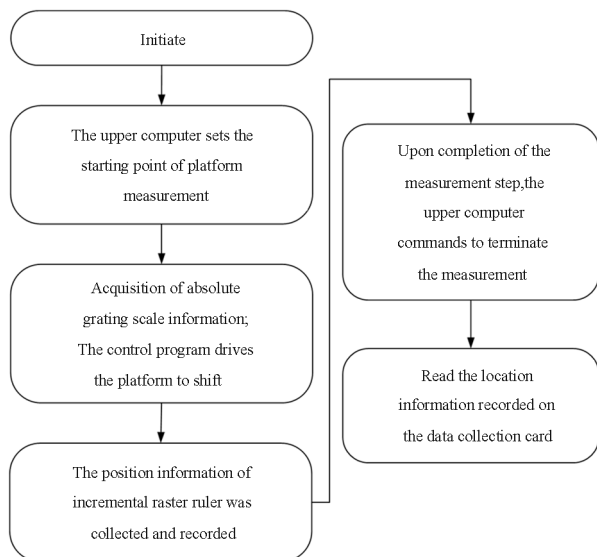


图3 数据采集板卡精度检测流程图

Fig. 3 Data acquisition board accuracy detection flow chart

### 3 光栅尺位移量计算

为实现光栅尺的微位移测量,提高光栅位移测量精度,需对采集到的单个周期内的条纹信号进行细分处理,从而达到更高的分辨力和精度。

从实现的方式上来说,条纹信号细分<sup>[10-12]</sup>的种类主要有光学细分、机械细分,以及电子细分。其中,光学细分采用光学的原理,在一个光栅栅距内输出多个信号周期,提高分辨力。这需要搭建复杂的光学系统,光线经过多次透射或者反射,容易导致光强信号衰减,光电探测器灵敏度不够。机械细分是指对达不到一个光栅栅距的长度使用精密仪器或采用高分辨力测量系统进行测量,机械细分方法对光栅条纹的信号质量要求不高,可以高倍数细分<sup>[13,14]</sup>,但操作起来繁琐,一般测量并不采用。电子细分是指用电子技术对信号进行细分,此方法可以灵活地用于不同环境下所需要的不同分辨力。电子细分时一般细分模块、控制模块和探测模块在同一个模块,集成度高,是光栅尺信号细分的一个重

要研究方向。电子细分可以分为相位细分<sup>[15,16]</sup>和幅值细分<sup>[17,18]</sup>。相位细分采用计算得到信号的相位差来获得其对应的位移大小,其优点是可以达到非常高的细分倍数,但对电信号要求严格,否则电子细分不能准确对应相位,会造成较大的误差。幅值细分通过计算探测器接收得到的光强幅值变化来判断位置信息,可以达到高细分倍数,但对光强的质量要求严格,否则不能反映幅值对应的细分倍数。电子细分可以通过硬件和软件实现,硬件是通过比较器产生上升沿和下降沿脉冲,再通过计数器统计脉冲完成计数;在软件方面,通过使用模数转换芯片,将光电传感器采集的模拟信号转换为数字信号,之后使用微处理器完成滤波、算法实现等实现细分,能够达到非常高的细分倍数。电子细分伴随处理器性能提升,运行速度越来越快,具有明显的优势,是当前研究的热点。

本系统采用的是电子细分中的幅值细分的方法,对采集到的光强幅值信号进行解算,获得对应的位移信息,如图4所示。

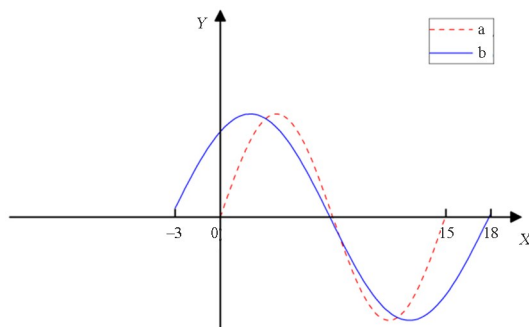


图4 光栅尺偏移量计算

Fig. 4 Grating ruler offset calculation

a: 横坐标范围(0,15),共16个点。

b: 横坐标范围(-3,18),共16+6=22个点。  
第一次运算:

$$\text{偏移量-3: } M_1 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i-3} - a_i|$$

$$\text{偏移量-2: } M_2 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i-2} - a_i|$$

$$\text{偏移量-1: } M_3 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i-1} - a_i|$$

$$\text{偏移量0: } M_4 = \sum_{i=0}^{15} |b_i - a_i|$$

$$\text{偏移量1: } M_5 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i+1} - a_i|$$

$$\text{偏移量2: } M_6 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i+2} - a_i|$$

$$\text{偏移量3: } M_7 = \sum_{i=0}^{15} |b_{i+3} - a_i|$$

对比计算出  $M_1 - M_7$  中的最小值,最小值对

应的偏移量为位移量;

第二次运算:

取 b: 横坐标范围(0,15)共 16 个点;取 c: 横坐标范围(-3,18)共 16+6=22 个点,重复以上运算.其中  $\Delta t$ : a 和 b 的时间间隔为帧间隔;偏移量的正负号代表不同方向.

通过上述细分方法对采集到的一个周期的光波信号进行 40 个区间的划分采样,从而实现对信号的 40 细分处理.

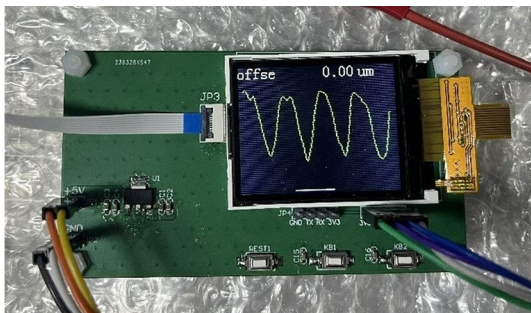


图 5 信号处理板卡波形图

Fig. 5 Signal processing board waveform diagram

## 4 测量误差分析

增量式光栅尺的测量范围内误差<sup>[19-20]</sup>主要由系统误差、随机误差和粗大误差组成.其中系统误差主要由标尺光栅刻划误差、余弦误差构成.

本文研制的增量式光栅尺的精度由标尺光栅来决定,标尺光栅的周期为  $40 \mu\text{m}$ .在实际情况下,光栅周期在测量范围内不可能为一恒定值,如图 6 所示,标尺光栅的误差会直接导致光栅幅形成的反射条纹的周期产生误差,并且该项误差具有累计效果<sup>[21]</sup>.



图 6 标尺光栅刻划误差

Fig. 6 Scale grating marking error

余弦误差是由于理论测量轴线和实际运动轴线不平行造成的误差.其中测量轴线为位移平台的运动轴走过的轨迹,实际运动轴线为打到标尺光栅上的光斑相对光栅走过的轨迹.

如图 7 所示,假设夹角为  $0.1^\circ$ ,对于 1 m 长的测量范围,余弦误差造成的测量误差约为  $1.5 \mu\text{m}$ ,因此余弦误差为二阶项,对光栅尺的测量影响较小.

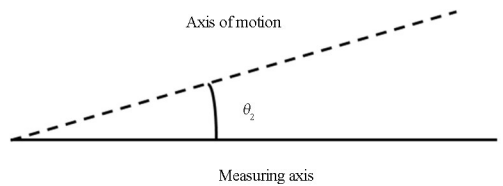


图 7 余弦误差

Fig. 7 Cosine error

随机误差又称偶然误差,是在测定过程中一系列有关因素微小的随机波动而形成的具有相互抵偿性的误差.随机误差的大小和方向都不固定,也无法测量或校正.只有随着测定次数的增加,正负误差逐渐相互抵偿,误差的平均值将逐渐趋向于零.

粗大误差是在一定的测量条件下,超出规定条件下预期的误差.不能被彻底消除,只能在一定程度上减弱.它是异常值,严重歪曲了实际情况,在处理数据时应将其剔除.

从上述分析可知,我们主要针对系统误差进行数据处理.标尺光栅刻划误差、余弦误差,这二者都是系统误差,可以通过误差补偿<sup>[22]</sup>的方式来降低其对测量精度的影响.

## 5 光栅尺测量误差检测与补偿

反射式增量光栅尺测量系统的误差检测与补偿主要以搭建的光栅尺位移测量系统为测量平台,使用周期  $40 \mu\text{m}$  的标尺光栅为测量主体,采用亚微米级(重复定位精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ )定位平台对光栅尺测量起始位置和各测量步距进行标定,采用  $0.005 \text{ mm/s}$  的速度进行多次位移测量与数据采集.

### 5.1 测量误差检测

使用本文设计的反射式增量光栅尺测量系统对光栅尺的位移量进行检测, $0.005 \text{ mm/s}$  运动速度下的精度检测曲线如图 8,从图中可以看到,在该速度的动态测量情况下,测量的精度为  $\pm 12 \mu\text{m/cm}$ ,重复测量精度为  $1 \mu\text{m}$ .

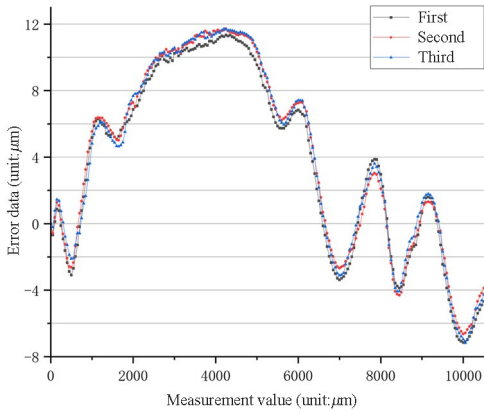


图8 0.005 mm/s运动速度下精度检测结果  
Fig. 8 Accuracy test results at 0.005 mm/s speed

## 5.2 测量误差补偿

从5.1节的检测结果可知,本文研制的增量式光栅尺测量精度为 $\pm 12 \mu\text{m}/\text{cm}$ ,重复测量精度为 $1 \mu\text{m}$ ,具有较高的重复定位精度.因此可以通过误差补偿的方式,降低测量系统中的系统误差,提高反射式增量光栅尺测量系统的测量精度.

采用分段线性修正法,根据固定的间距对增量式光栅尺进行精度检测,得到一组增量式光栅尺测量值和测量值所对应的误差,采用分段线性插值的办法,获得全部测量点对应的测量误差,从而进行精度补偿.

设在检测过程中,第 $j$ 个检测点的增量式光栅尺测量值和误差分别为 $a_j$ 、 $b_j$ ,那么对应的分段精度修正函数为:

$$y = \frac{x - a_{j+1}}{a_j - a_{j+1}} b_j + \frac{x - a_j}{a_{j+1} - a_j} b_{j+1} \quad (a_j \leq x \leq a_{j+1}) \quad (1)$$

其中 $x$ 为增量式光栅尺的测量值, $y$ 为经过修正后的测量值.

分段线性修正法主要是对所测得的误差测量曲线进行分段线性拟合,如图9所示.通过已知有限点的测量精度,拟合出测量误差曲线,从而得到所有测量点的测量误差,并对测量误差进行修正.分段线性修正法具有算法简单、易于实现的优点.

在位移测量算法中加入分段线性修正数据后再次使用亚微米级定位平台对反射式光栅尺位移进行标定多次测量,采取系统误差检测时使用的相同步距相同起始点位置标定进行位移测量.位移测量结果如图10所示,可见修正后的测量误差从 $\pm 12 \mu\text{m}/\text{cm}$ 降低到 $\pm 2 \mu\text{m}/\text{cm}$ ,测量精度得到大幅

度提高.

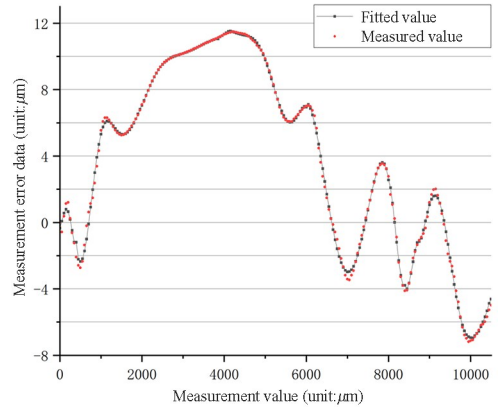


图9 测量误差曲线的分段线性拟合  
Fig. 9 Measurement error curve segment linear fitting

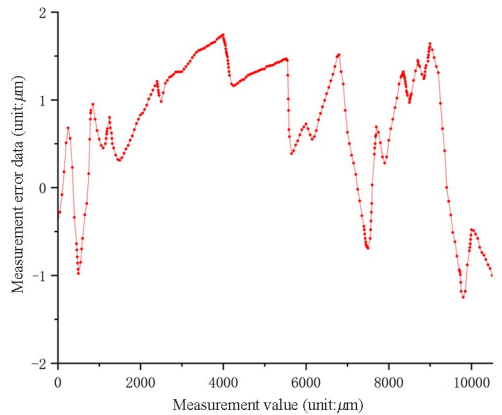


图10 分段线性修正后的测量误差  
Fig. 10 Measurement error after piecewise linear correction

## 6 结论

本文以光栅测量系统为研究对象,详细分析了运动台位置测量原理,搭建了反射式增量光栅尺测量平台.通过采用亚微米级定位平台对光栅尺测量平台进行标定测量,并对测量误差进行电子细分补偿的方式实现 $\pm 2 \mu\text{m}/\text{cm}$ 精度的位移测量,可以满足集成电路设备工业生产中高精度加工和定位的需要.

## 参考文献

- [1] 中国电子报.《中国制造2025》设定集成电路设备国产化目标[J].电子工业专用设备,2016,45(8):56.
- [2] JANG Y S, KIM S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: a review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18

- (12): 1881—1890.
- [3] MEINERS-HAGEN K, MEYER T, PRELLINGER G, et al. Overcoming the refractivity limit in manufacturing environment [J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24092—24104.
- [4] KANG H J, CHUN B J, JANG Y S, et al. Real-time compensation of the refractive index of air in distance measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26377—26385.
- [5] YIN Y F, LIU Z W, JIANG S, et al. Grating-based 2D displacement measurement with quadruple optical subdivision of a single incident beam [J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 24169—24181.
- [6] 尹云飞, 刘兆武, 吉日嘎兰图, 等. 二维光栅位移测量技术综述[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1224—1238.
- YIN Y F, LIU Z W, JIRIGALANTU, et al. Overview of 2D grating displacement measurement technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1224—1238. (in Chinese)
- [7] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741—752.
- GAO X, LI S H, MA Q L, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741—752. (in Chinese)
- [8] YU H Y, CHEN X L, LIU C J, et al. A survey on the grating based optical position encoder [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107352.
- [9] WANG C, XU L L, ZHU J, et al. A novel integrated fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 125—131.
- [10] 任雪玉, 黄焱, 薛梓, 等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 25—34.
- REN X Y, HUANG Y, XUE Z, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating Moiré signal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 25—34. (in Chinese)
- [11] 钟玉龙. 基于幅值采样的光栅莫尔信号数字细分技术[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
- ZHONG Y L. Digital subdivision technology of grating moiré signal based on amplitude sampling [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2016. (in Chinese)
- [12] 邢前进. 光栅莫尔信号采集与细分技术研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- XING Q J. Research on grating moiré signal acquisition and subdivision technology [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2018. (in Chinese)
- [13] ZHU W B, YE S J, HUANG Y, et al. Design of a precise subdivision system for gratings using a modified CORDIC algorithm [J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2019, 13(8): 1284—1291.
- [14] 丁旭. 基于 FPGA 的光栅信号细分技术的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- DING X. Research on grating signal subdivision technology based on FPGA [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] YU J W, WANG Q, ZHOU G Z, et al. Analysis of the subdivision errors of photoelectric angle encoders and improvement of the tracking precision of a telescope control system [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2998.
- [16] 张紫杨, 张文涛, 杜浩, 等. 基于小波变换瞬时频率优化的相位细分方法 [J]. *仪表技术与传感器*, 2020(8): 108—111.
- ZHANG Z Y, ZHANG W T, DU H, et al. Phase subdivision scheme based on instantaneous frequency optimization of wavelet transform [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(8): 108—111. (in Chinese)
- [17] KOVÁCS P, FEKETE A M. Nonlinear least-squares spline fitting with variable knots [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 354: 490—501.
- [18] 高旭, 马庆林, 高阳, 等. 光电位移信号新型细分方法及系统设计[J]. *电子学报*, 2019, 47(12): 2575—2581.
- GAO X, MA Q L, GAO Y, et al. New subdivision method and system design of photoelectric displacement signal [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(12): 2575—2581. (in Chinese)
- [19] 任东旭, 李彬. 直线光栅尺的精度评价及标定方法研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020(6): 54—56, 60.
- REN D X, LI B. Research on accuracy evaluation and calibration method of linear scale [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2020(6): 54—56, 60. (in Chinese)

- [20] 徐全坤, 阚侃, 黄振宇, 等. 光栅尺动态误差检测与补偿技术研究[J]. 装备制造技术, 2023(1): 50—53.
- XU Q K, KAN K, HUANG Z Y, et al. Research on dynamic error detection and compensation technology of grating ruler [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(1): 50—53. (in Chinese)
- [21] 乔栋. 高精度绝对式光栅尺测量技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- QIAO D. Study on the measurement technology of high precision absolute linear encoder [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [22] 黄明辉, 王晗, 陈新, 等. 光栅尺测量精度误差补偿系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 81—84.
- HUANG M H, WANG H, CHEN X, et al. Research on the error compensation system of linear encoder's measuring precision [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(12): 81—84. (in Chinese)