

# 便携式大量程高精度位移测量影像系统设计

李帅帅 赵亮 刘金龙

(钛玛科(北京)工业科技有限公司, 北京 100023)

**摘要:** 本文描述了一种行走式大量程非接触高精度位移测量装置。本装置的显著特点是借助显微光学影像测量系统进行检测目标的特征位置进行精准定位, 检测目标的特征通常有物体的边缘、两种不同物料的接触区域等。通过分析识别外界噪声的特点, 通过统计分析的方法来保证测量的结果具有对外界环境震动等干扰因素具有抗干扰能力。本装置的另一个显著特征是使用高精度的位移测量装置反馈位移测量的结果。本文实现的设计案例是利用高精度光栅位移传感器反馈位移数据。本装置的第三个特征是设计了单独的相对位姿可视化部件, 用来协助调整测量装置和检测目标的相对位置关系。

**关键字:** 位移测量系统;显微瞄准结构;距离测量;高精度测量工具

## A Portable High Accuracy Large-Displacement Measuring Equipment integrated with Optical Imaging System

**Abstract:** In this paper, we describe a walking-type long-range non-contact high-precision displacement measuring device. Facilitated with a microscopic optical imaging measurement system, it could precisely locate the position of the detection targets with abundant micro-structural information. The typical detection targets are edges of materials that adherents to or as parts of industrial products. Statistical analysis methods, which include image preprocessing, feature extraction and tracing, are introduced to improve the accuracy of the measurement results. Intelligent software upgrades the automatic level of operations and enable the ability of anti-interference from the environment vibration noises. A high-precision displacement measuring sensor, which in the practice is a grating displacement sensor, is used aiming to locating the moving displacement of the optical imaging system. We also developed powerful software tools conveniently to control the movements of the imaging subsystem which is bundled with the measuring head component which is a part of the Grating Displacement Sensor.

**Keywords:** displacement measurement system; microscopic image measuring; displacement measuring; high-precision measurement tools

## 引言

随着工业智能化概念的普及, 基于机器视觉测量和缺陷检测系统得到广泛的应用。生产高精度和高品质的产品, 也需要高精度的视觉检测设备反馈的实时监测数据。视觉检测设备在完成标定工作后, 也需要通过对实际的产品进行测量来验证其测量数据的准确性。

在锂电行业，该过程是通过将检测的材料裁剪后转移到高精度数字影像测量仪上进行再次测量来完成的。此种方法无法对喷涂浆料后尚未高温固化的湿膜进行测量验证。因此，针对检测目标的实际宽度数据难以获取的场景，需要研发一款高精度的位移测量装置，能够对静态下目标进行快速测量。在实际应用场景中，由于对检测精度有较高要求，位移测量系统对检测目标的实际情况应当具有显微观察能力，以便于工作人员获取足够的产品材料细节信息，对于产品的品质进行直观评估。

目前高精度的影像测量系统往往体积大、重量大，难以用于工业产品的产线在线测量。本文描述了一款集聚有高精度、大量程、智能化、自动化测量和便捷安装使用等优点的非接触式的位移测量系统。本装置使用光学显微镜头搭配高分辨率彩色 CCD 数字相机，对检测的目标进行精准定位。使用高分辨率光栅位移传感器计量数字影像系统的游走位移。使用精密线性滑轨，提高影像测量系统移动平滑度和消弱移动过程的摩擦阻力。装置配置强大的图像分析和运动控制软件，能够提取图像中的典型特征。软件通过人机交互过程确定检测目标，通过目标识别和跟踪定位算法，对检测的目标进行帧间跟踪，计算发送运动控制信号，迭代优化移动部件的定位精度。最后，智能分析算法综合位移传感器的反馈数据、图像测量系统给出的噪声干扰补偿数据和定位偏移补偿数据，得到高精度的大量程位移测量结果。

## 0 硬件整体组成

系统的硬件设计包括机械结构的设计和电路光路的设计。可以分为滑块位移平台组件、定位瞄准组件、位移反馈组件、机械牵引组件、位姿可视化与辅助位姿调整组件。

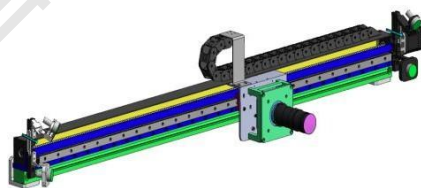


图1 位移测量影像系统机械设计

### 0.1 滑块位移平台组件

机械结构的设计包括用线性滑轨来负载一个滑块平台。线性滑轨又称作直线滚动导轨，能够保证滑块平台组件沿着滑轨以微弱的摩擦力高精度的做线性运动[1]。滑块平台上安装高分辨率显微影像测量系统，用于将滑块组件和检测目标精准对齐，起到滑块的定位瞄准器的作用。为了提高影像采集组件的瞄准精度，要严格保证相机与镜头的主轴方向时刻与滑轨所在平面垂直，为此可以通过增加固定滑块平台组件的滑轨滑块数量和增大

滑轨滑块的间距来实现。

滑块平台与光栅位移传感器的游走滑块固定。当滑块位移平台和光栅尺的游走滑块固定后，如果滑块位移平台所游走的位移方向与光栅尺尺轨行走方向存在微小夹角 $\alpha$ ，此时光栅尺的读数与滑块位移平台的行进位移可通过线性映射的方式进行补偿，补偿系数为 $\beta$ ，则：

$$D_{real} = \beta * D_{raser\_out}$$

其中， $\beta$ 的物理意义与两个读数头的链接方式有关，当与直线滑轨滑块刚体组合且光栅滑块从动于直线滑轨滑块时， $\beta$ 取典型值：

$$\beta = 1 / \cos\alpha$$

## 0.2 定位瞄准组件

本系统的影像采集组件系统由一个高分辨率彩色 CCD 工业相机、连续变焦单筒显微镜头和环状面阵 LED 光源组成。经由显微镜头采集到的高分辨率图片，能够用于精准的定位滑块位移平台组件的位置，因此该子系统被称为定位瞄准组件，能够用于观测材料表面的微观特征和提高检测目标的定位精度，也体现了装置非接触式测量的特点。

下面列出本套装置的详细参数：

### 相机

分辨率	7040 × 5280 px
像元尺寸	1.43 × 1.43 $\mu\text{m}$
相面直径	12.6 mm

### 变焦镜头参数

视野范围（150x）	2.54 mm（对角线）
景深范围	0.74 mm

当光学镜头完成对焦后，物体在相机感光靶面成像，在本装置的实际使用案例中，像素行距对应的实际物理距离为 0.73 微米。影像测量系统采集到的图像中物体边缘的品质取决于材料边缘质量、光照条件和光学系统的对焦效果，在实际测量时，图像中检测的特征边缘的可通过边缘提取算法拟合到亚像素精度。因此，表中影像系统可以得到微米级精度的边缘测量结果。

## 0.3 位移反馈组件

以莫尔条纹技术为基础的光栅位移传感器被广泛用于机床和仪器仪表，进行长度和位移测量。其测量分辨率可以达到 0.1 $\mu\text{m}$ [2]。本装置中，将光栅尺身通过机械结构与直线滑轨底座固定，光栅尺的游走测量滑块与装置的定位滑块固定。

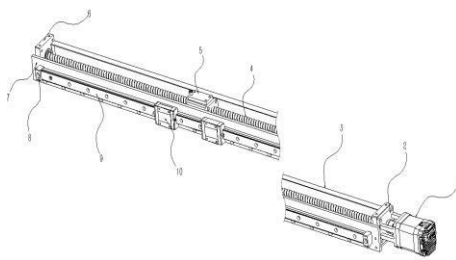


图2 由步进电机和滚珠丝杠组成的机械牵引部件

#### 0.4 机械牵引组件

本装置采用由高分步进电机和滚珠丝杠组成装置的机械牵引组件。机械牵引部件能够精细的将滑块位移平台牵引检测量程内的任意位置。此过程中，光栅位移传感器实时反馈滑块位移平台的物理位置。由于滚珠丝杠专注于滑块位移平台的牵引动作，放宽了对其牵引平滑度和丝杠行间距的均匀性要求。设计过程中，主要关注滚珠丝杠和步进电机组合所支持的滑块位移平台最小可控位移 $\epsilon$ 。

#### 0.5 位姿调整辅助组件

设计了激光辅助位姿调整器件。该部件由两端各固定的两对儿面激光器组成。每对儿面激光器在空间形成一条交线。设备出厂时，矫正激光器的位置，使得面激光器的交线与滑轨中线平行。激光器的底座以一个可拉伸支架。调整拉伸支架可以调整激光器的距离，进而调节激光器交线的空间位置。拉伸支架在调整的过程中，能够保持线激光器的激光平面之间的平行关系。此时，激光器的交线在调整前后仍然保持与滑轨中线平行的平行关系。设备安装时，调整检测平面与激光线的位置关系，当激光线与检测物面平行时可认定检测物面与相机滑动的方向处于平行关系。即满足设备的检测条件。

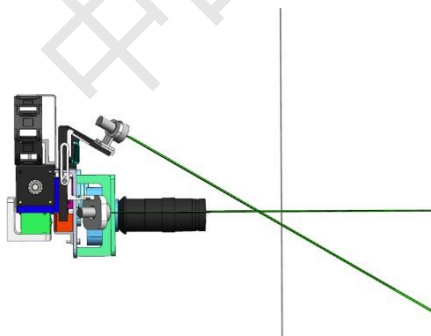


图3 面激光器交线可视化丝杠滑轨走向

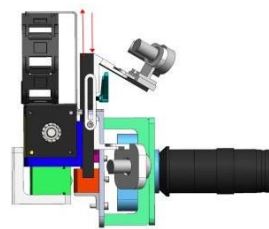


图4 调整激光器间距可以调节交线远近

适当调整激光器对儿之间的距离，可以调整其交线与装置的相对位置。但要满足条件：激光器位置调整前后其出射平面之间具有严格的平行关系。

# 1 软件整体架构

装置的软件部分由位移传感器数据获取模块、步进电机控制模块、图像分析与测量算法模块、人机交互模块等组成。

## 1.1 位移传感器数据获取模块

本装置中采用光栅位移传感器实时测量滑块的位移。位移传感器数据获取模块负责当前位移传感器数据的查询和辅助测量。

## 1.2 步进电机控制模块

步进电机的控制主要是指发送控制信号给步进电机的控制电路，引导影像采集滑块到达指定的图像采集位置。为了便利工具的使用，软件部分实现了电机控制与光栅尺返回数据的闭环功能。

步进电机控制模块将直线导轨滑块平台的移动控制解释为步进电机的控制指令。支持指定位移的移动和固定步长的微小位移调整。该模块的功能深度支持图像分析算法自动下发指令调整视野的位置。

## 1.3 图像分析与测量算法

图像分析算法模块集成了常用的影像测量系统的算法工具。包括镜头畸变校准、边缘提取、距离测量等。软件通过图像预处理，精准提取图像内的潜在检测目标，如拟合出的边线、圆弧等，最大化的消除人为误差的引入。

通过分析检测目标在视野内的位置，智能的计算需要给控制系统下发的信号，控制相机的移动。通过目标跟踪算法，计算运动过程结束后检测目标在视野内运动的偏差，迭代的进行位置再调整，实现了控制过程的自动化、智能化和闭环。整体工作过程描述

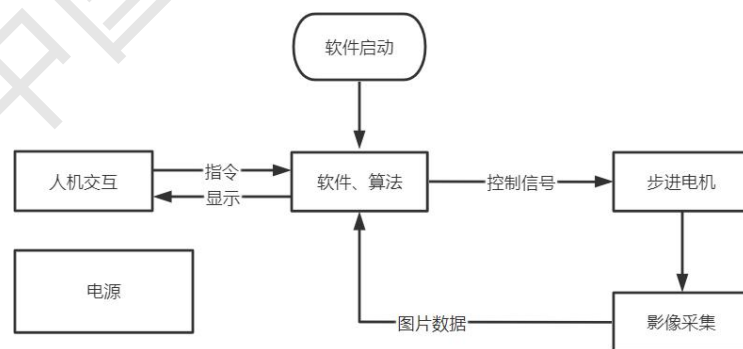


图5 软件流程图

下面以检测锂电行业涂布材料的宽度为例，描述本装置的使用步骤。

(1) 完成装置的出场校准。装置组装完成后依次进行激光器出射面角度校准，测量精度校

准等出场参数校准过程。

(2) 完成使用现场的安装调试。将本装置通过安装支架固定于正对检测材料的合适位置，通过位姿调整辅助组件，调整装置位姿。调整显微镜头焦距，使 CCD 能够捕捉材料表面清晰的图片。

(3) 通过软件移动线性滑轨定位滑块，使待检涂布宽度的一条边界进入 CCD 的成像视野。图像分析算法对图片进行预处理，提取视野内的边缘等典型特征信息。

(4) 通过鼠标与软件交互，确定视野内的检测对象。软件计算需要对控制系统下发的信号指令，将指令下发到步进电机控制模块。

(5) 步进电机在软件控制下进行运动调整，影像测量算法跟踪视野内检测目标的移动情况，当移动指令结束后，计算滑块实际到达位置与预期位置的偏差，计算需要对控制系统下发的信号指令，将指令下发到步进电机控制模块。

(6) 重复步骤4、步骤5多次，直到达到相机运动的停止条件。此时记录光栅的读数信息，根据图像计算定位偏差，综合计算得到检测目标（涂布边缘1）的位置数据。

(7) 移动定位滑块，使涂布的另一条边界进入影像系统视野。图像分析算法对图片进行预处理，提取视野内的边缘信息。

(8) 重复步骤3至步骤5，得到检测目标（涂布边缘2）的位置数据。

(9) 综合步骤6和步骤8的结果，得到涂布宽度。测试数据分析

#### 1.4 装置的边缘特征拟合和重复测量精度

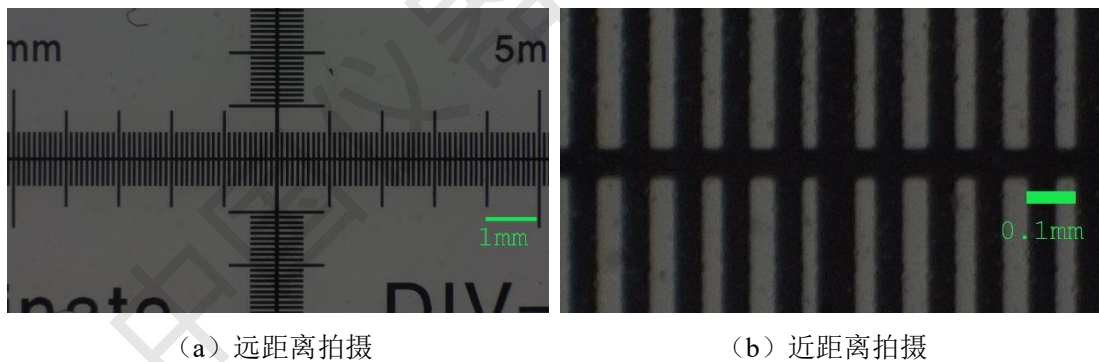
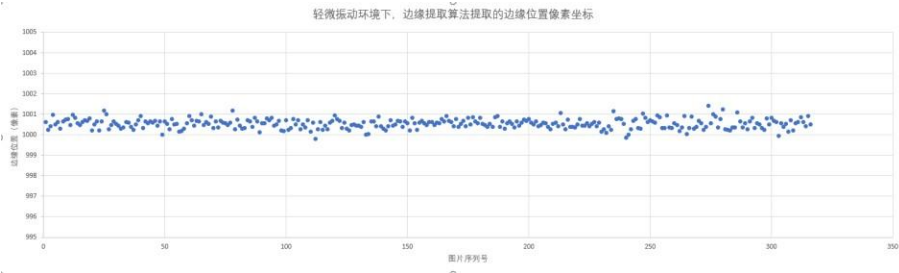


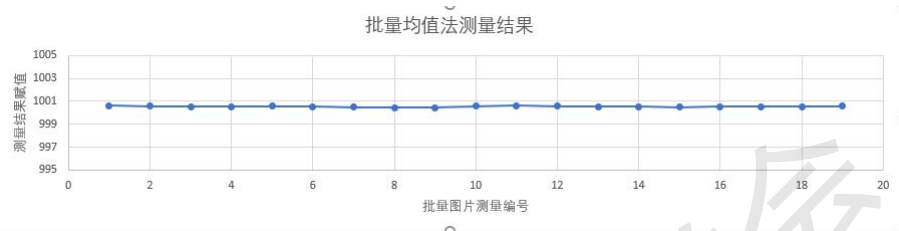
图6 设备采集的菲林尺图片（图片大小：1920 x 1080）

本节将通过实验来检验系统能够在存在环境震动扰动的条件下，对边缘特征能够获得满足测量精度要求的测量结果。如图6所示，将显微镜测试专用菲林尺作为测量目标，调整焦距，采集边缘清晰的图片。

在采集的高分辨率菲林尺的图片上设定边缘检测框，算法会对检测框内的区域进行图片预处理，找出黑白条纹边缘，本次实验检测的是竖条纹，测量的边缘位置数据以小数的形式返回。环境震度、相机噪声等因素会影响条纹边缘的取值结果。



(a) 算法针对同一边缘目标在连续图片序列上提取的位置数据



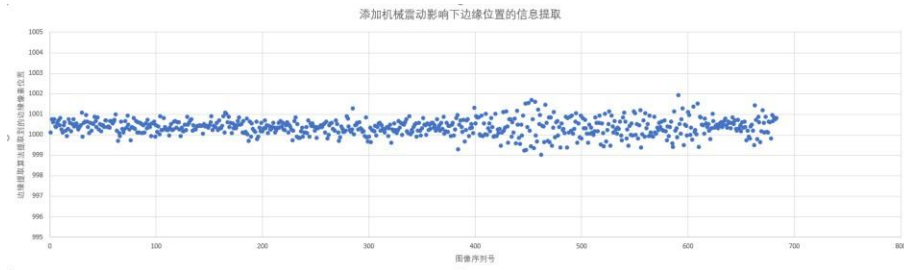
(b) 批量均值计算得到的边缘位置

**图7. 影像测量系统可以采集批量图片通过统计的方法将结果进行优化**

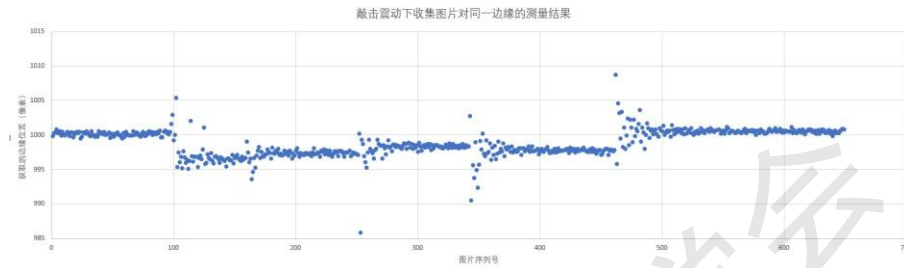
批量均值法要求每次测量时收集多张短时间采集的连续图片，本文中依照图片的采集顺序，每隔 15 张图片定为采样起点，收集后续 30 张连续图片组成测量组，分组后提取出的边缘位置数据组内求均值，作为每组边缘的测量结果。计算得到在实验室原有的环境下，仪器对同一边缘位置的重复测量精度为 0.89 像素，本测试案例中通过菲林尺条纹间距，换算得到重复精度约为  $0.5\mu\text{m}$  空间距离。

### 1.5 不同震动噪声源下异常信号的处理

仪器使用环境中震动是主要的获取高精度测量数据的干扰因素。为了抵消环境中震动噪声对测量的影响，需要对震源的属性进行针对分析，得到合适的补偿方法。本节在仪器的测量过程中人为引入两种噪声，尝试采用统计分析的方法，在噪声数据中恢复边缘位置的真实数据。



(a) 震源：工作电机转动扰动



(b) 震源：木槌间歇击打

图8 震动环境下连续采集图片检测出的边缘数据

针对电机运动等持续的频率稳定的震动噪声，可以使用线性回归、求均值等方式恢复较为准确的边缘位置。针对木槌击打等偶然发生的非持续性震动干扰，算法主要靠识别混有噪声数据的分布情况，识别震动时段，进行针对性规避。

## 2 小结

本文所描述的装置具备以下特点。(1). 高精度测量，在 1000mm 的宽度距离，累计误差可以小到微米级别。(2). 体积小，方便安装调试。避免了离线测量对检测目标材料的裁切、转移过程可能混入的形变误差和产品线上长距离传送带来的拉伸形变。(3). 采用非接触式的测量方法。光学影像测量系统可以方便的对平面材料的宽度（距离）数据进行非接触取值。经过实际测量验证，装置的重复精度为 0.5 微米，量程为 1.2m。装置影像系统在实验工作条件下的空间分辨率为 0.559 微米/像素列，设备传动组件支持最小可调整位移为 0.5 微米，初步完成了设计的目标。

## 3 参考文献

- [1]. 邹翠波, 师鸿飞, 张彩虹. 线性滑轨的应用与安装技术[J]. CAD/CAM 与制造业信息化. 2004, (4): 88-90.
- [2]. 杜立剑. 光栅莫尔测量系统的研究与设计[D]. 重庆大学硕士学位论文. 2010(4): 2-3.