

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.07

# 刮板细度计示值误差非接触自动校准装置

陈挺, 卢歆, 吴春晖, 张晓, 叶欣, 陈宁, 金挺

(浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 采用光谱共焦传感器以及激光位移传感器相互配合的设计方式, 研制一套新型刮板细度计示值误差非接触自动校准装置。利用光谱共焦传感器测量光点可小至  $5\ \mu\text{m}$  的优点, 实现对刮板细度计测量点的精准定位, 同时避免了接触测量造成测头及测量面磨损的问题。经实验证明, 该装置测量重复性好、效率高, 测量结果准确可靠, 具有重要技术推广价值。

**关键词:** 刮板细度计; 光谱共焦; 激光位移传感器; 非接触计量测试

**中图分类号:** TB921

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)05-0040-04

## Non-contact Automatic Calibration Device for Indication Error of Fineness of Grind Gage

CHEN Ting, LU Xin, WU Chunhui, ZHANG Xiao, YE Xin, CHEN Ning, JIN Ting

(Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A new non-contact automatic calibration device for fineness of grind gage meter is developed by using the design method of combining spectral confocal sensor and laser displacement sensor. By using the advantages of spectral confocal sensor that the measurement spot size can be as small as  $5\ \mu\text{m}$ , the measuring points of the fineness of grind gage can be precisely located, and the wear of probe and measuring surface caused by contact measurement can be avoided. The experiment proves that the device has good repeatability, high efficiency, accurate and reliable measurement results, and has important technical popularization value.

**Key words:** fineness of grind gage; spectral confocal; laser displacement sensor; non-contact metrology and measurement

## 0 引言

刮板细度计是用来测量清(色)漆、油墨等产品内及食物中颜料、杂质及填充料的颗粒细度的计量器具<sup>[1]</sup>。刮板细度计测量的固体颗粒细度为微米量级<sup>[2]</sup>, 属于精密测量校准范畴。

刮板细度计检定或校准的主要项目为刮板的示值误差, 其最大允许误差为:  $(\pm 1.5 \sim \pm 3.5)\ \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>。按照 JJG 905-2010《刮板细度计检定规程》规定的方法, 其示值误差采用电感测微仪配合微型测量台实现检定或校准。文献[3]对规程规定的测量方法及影响分量进行了探讨, 提出操作者的熟练程度、测量位置准确与否以及测量者稳定重复性操作均对刮板细度计的测量结果造成很大影响; 文献[4]提出了一种新型刮板细度计检定装置, 舍弃了微型测量台, 通过手动微调机构移动电感测微仪的方式, 改善了原有方法定位不准确的问题; 文献[5]针对人工读数问题, 设计了一套基于 LabVIEW 的测量系统, 自动读取、记录及处理测量结果, 避免了人为读数等因素所造成的误差干扰;

文献[6]研制了智能检定装置, 采用接触式位移传感器进行定位, 并利用自动控制机构调整运动状态, 实现自动测量。

为解决现有刮板细度计测量时存在的接触点尺寸较大导致定位不准确、接触式测量方式横向移动磨损测头及斜槽表面等问题, 本文基于光谱共焦传感器, 研制了一套刮板细度计非接触自动校准装置, 实现非接触、全自动、高效率、高准确度的校准。

## 1 系统组成

本文研制的刮板细度计非接触自动校准装置的结构组成如图 1 所示。

装置由大理石平板底座、二维运动平台、定位凹槽、电机驱动机构、纵向运动数据采集机构、PC 工控机、运动控制器、数据采集器和单片机等组成。电机驱动机构由立柱、丝杆、直流电机、联轴器组成。激光位移传感器和光谱共焦传感器固定安装于纵向运动数据采集机构中。纵向运动数据采集机构与滑块固定连接。二维运动平台固定安装在大理石底座上, 定位

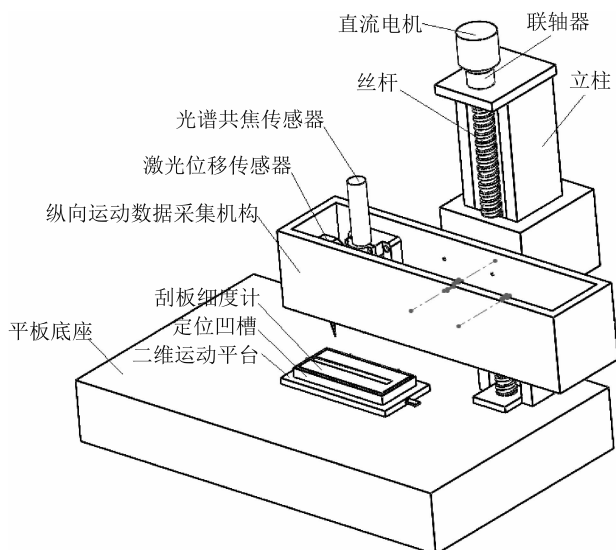


图1 装置结构示意图

凹槽装载在二维运动平台上并通过螺丝固定。刮板细度计安装在定位凹槽中，二维运动平台带动定位凹槽使其可沿水平方向直线双向移动。电机驱动机构固定在大理石底座上，纵向运动数据采集机构安装在电机驱动机构上，并由电机驱动机构带动上下纵向运动。

整个装置采用模块化设计，其系统模块架构如图2所示。纵向移动电机经单片机与PC工控机连接，二维运动平台经运动控制器与PC工控机连接，纵向运动数据采集机构(包括激光位移传感器和光谱共焦传感器)经数据采集器与PC工控机连接。

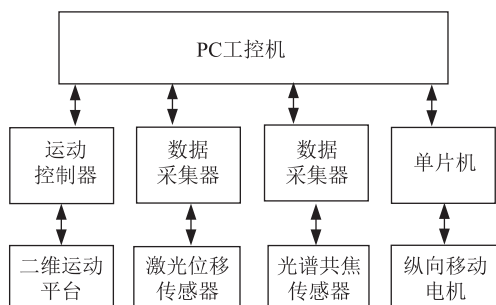


图2 装置模块架构图

## 2 工作原理

本装置以激光位移传感器及光谱共焦传感器两个非接触位移传感器为核心器件。激光位移传感器基于激光三角法原理，是一种非接触、无测量力、响应速度快、测量范围大的位移传感器<sup>[7-8]</sup>。本装置采用的激光位移传感器工作距离为85 mm，测量范围为 $\pm 20$  mm，线性度为 $\pm 0.05\%$ 。

光谱共焦传感器是一种高精度、非接触式的新型位移传感器，其测量误差在 nm 量级。以共焦显微技术为基础，无需轴向扫描，直接根据波长对应得出轴向距离信息，具有测量速度快，实时性高等优点<sup>[9]</sup>。

光谱共焦传感器的工作原理如图3所示。光源射出宽光谱光，经过分光镜透射，再经色散镜头后，分解成不同波长的单色光。这些光在被测物体表面反射后，通过分光镜反射，再通过针孔后，进入光谱仪。光源、被测点、针孔相互共轭，只有完美聚焦在被测点的单色光才可以穿过针孔，由光谱仪确定波长。由此建立光谱曲线峰值波长与被测点焦距的对应关系，从而准确获取被测点的距离值。

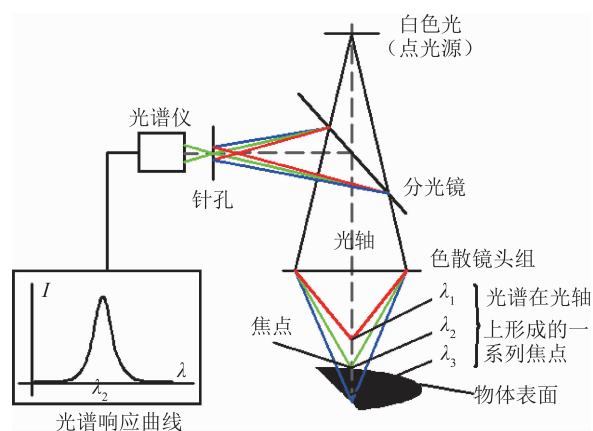


图3 光谱共焦传感器工作原理图

本装置采用的光谱共焦传感器测量范围为0~400  $\mu\text{m}$ ，最大工作距离为10.8 mm，样品斜率 $\pm 28^\circ$ ，准确度为45 nm，测量光点为5  $\mu\text{m}$ 。传统的刮板细度计测量装置所采用的电感测微仪测头大小约为3 mm，难以对测量点进行精准定位，而本文利用光谱共焦传感器有效地解决了此问题。同时，由于光谱共焦传感器采用非接触测量方式，有效避免了传统方法接触测量磨损测头、划伤测量表面引入测量误差等问题。

本装置由上位机工控机进行系统控制及数据处理。将被测刮板细度计快速定位装夹于二维运动平台上的定位凹槽内后，工控机通过单片机发送指令，驱动纵向运动数据采集系统沿立柱运动，监控激光位移传感器的位移数据，定位至光谱共焦传感器的合适工作距离。之后由上位机发指令，控制二维运动平台按照预设的行程自行运动，数据采集系统实时采集光谱共焦传感器的高低位移信息。光谱共焦传感器的信号与运动平台的位置信息一起上传至上位机工控机，进行数据的自动保存和自动处理，完成整个校准过程。

### 3 校准方法

按照 JJG 905 - 2010《刮板细度计检定规程》，对刮板细度计的示值误差进行检定<sup>[1]</sup>。此误差是指刮板斜槽的深度误差，属于距离测量范畴。由于激光位移传感器的测量光点光斑较大，且为红光，易被人眼所感知，而光谱共焦传感器的测量光轴在测量面的光点光斑极小，仅为 5 μm 左右，且为白光，人眼感知困难。因此通过前期设计固定，利用激光位移传感器的测量光点推断出光谱共焦传感器的测量光点的位置。

校准时，调整各运动机构，根据激光位移传感器进行粗定位，将光谱共焦传感器移动到工作距离范围内。当运动至光谱共焦传感器工作距离时，此传感器的白光测量光点出现，调整后，将测量光点落在刮板细度计上表面左侧的“0”刻度线延长线上。由光谱共焦传感器采集获得其探头端与刮板细度计表面的距离数据。

刮板细度计校准运动轨迹如图 4 所示，测量光点从“运动起始点”开始，沿着 x 正方向，运动至 100 μm 刻线处，再沿着 y 正方向至斜槽底平面处，连续测量斜槽底平面的深度，直至到达 0 刻线位置处为止，完成刮板细度计左侧的示值误差测量。同理继续完成右侧的示值误差的测量，自此完成一个完整的测量过程，得到 4 组测量数据： $L_1, L_2, L_3, L_4$ 。

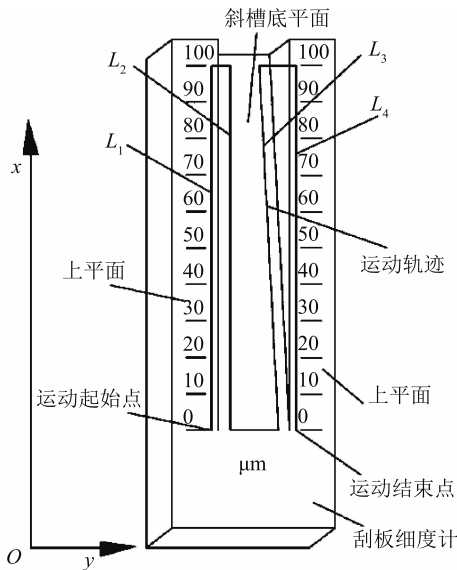


图 4 刮板细度计校准运动轨迹图

### 4 实验结果及不确定度评定

按照规程规定，对获得的 4 组数据按照以下公式

进行处理，由软件自动结算，完成自动测量。

$$l_1 = L_2 - L_1 \quad (1)$$

$$l_2 = L_3 - L_4 \quad (2)$$

$$\delta_1 = l_{\text{标}} - l_1 \quad (3)$$

$$\delta_2 = l_{\text{标}} - l_2 \quad (4)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_1 & \text{if } |\delta_1| \geq |\delta_2| \\ \delta_2 & \text{if } |\delta_1| \leq |\delta_2| \end{cases} \quad (5)$$

式中： $l_1$ 为受检点左侧的实际深度； $l_2$ 为受检点右侧的实际深度； $l_{\text{标}}$ 为受检点的标称值； $\delta_1$ 为受检点左侧的示值误差； $\delta_2$ 为受检点右侧的示值误差； $\delta$ 为受检点的示值误差，取  $\delta_1$  和  $\delta_2$  中绝对值较大的值对应的  $\delta_1$  或  $\delta_2$ 。以上物理量的单位都为 μm。

应用此装置，对测量范围为 0 ~ 100 μm 的某型刮板细度计的示值误差进行测量，数据如表 1 所示。

表 1 刮板细度计示值误差校准结果 μm

刮板细度计标称值	$l_1$	$\delta_1$	$l_2$	$\delta_2$	$\delta$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	8.7	1.3	8.6	1.4	1.4
20	19.0	1.0	19.2	0.8	1.0
30	28.8	1.2	28.4	1.6	1.6
40	39.3	0.7	39.1	0.9	0.9
50	48.9	1.1	48.3	1.7	1.7
60	59.7	0.3	59.6	0.4	0.4
70	70.6	-0.6	70.3	-0.3	-0.6
80	80.3	-0.3	80.5	-0.5	-0.5
90	89.4	0.6	89.4	0.6	0.6
100	99.3	0.7	99.2	0.8	0.8

以受检点的示值误差  $\delta$  作为最终结果对刮板细度计进行校准。

以受检点 100 μm 为例，对测量结果进行不确定度分析。不确定度反映测量结果的可信程度，是验证测量装置准确可靠的重要依据<sup>[10]</sup>。参考 JJG 905 - 2010《刮板细度计检定规程》附录 A 的不确定度评定模板<sup>[1]</sup>，结合本装置，分析引入的不确定度分量主要有：

1) 测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$

在受检点为 100 μm 时，重复测量 10 次，由贝塞尔公式算出实验标准偏差  $s = 0.106 \mu\text{m}$ ，则

$$u_1 = s = 0.106 \mu\text{m}$$

2) 光谱共焦传感器引入的不确定度分量  $u_2$

传感器出厂资料显示其误差为  $\pm 45 \text{ nm}$ ，取半宽为  $45 \text{ nm}$ ，设其服从均匀分布，故其标准不确定度为

$$u_2 = 0.045 / \sqrt{3} = 0.026 \mu\text{m}$$

3) 刮板斜槽底平面平面度引入的不确定分量  $u_3$

引用规程数据， $u_3 = 0.173 \mu\text{m}$ 。

则合成标准不确定度  $u_c$  为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.205 \mu\text{m}$$

扩展不确定度  $U$  为

$$U = k \times u_c = 0.205 \mu\text{m} \times 2 = 0.41 \mu\text{m}, k = 2$$

由此可见，应用此校准装置对刮板示值误差测量结果的扩展不确定度小于其最大允许误差的  $1/3$ ，证明本装置准确可靠。

## 5 结论

采用光谱共焦传感器代替电感测微仪，研制了刮板细度计的非接触自动校准装置，解决了电感测微仪接触点尺寸较大 ( $\text{mm}$  级) 导致的定位不准确问题，并且避免了传统的接触式测量方式磨损测头及斜槽表面引入测量误差的弊端。本装置实现全自动测量，免除人工干预，测量重复性好、效率高，测量结果准确可靠，具有很好的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] JJG905-2010 刮板细度计检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [2] JB/T 9385-2017 刮板细度计行业标准[S]. 2017.
- [3] 陈淑美. 刮板细度计测量方法及分量探讨[J]. 江西建材, 2016 (16): 252.

- [4] 贾晓杰, 黄玉珠. 刮板细度计检定装置的研制及刮板斜槽底平面平面度的检定方法探讨[J]. 工业计量, 2014, 24 (6): 25-31.
- [5] 吴九牛, 王博. 刮板细度计示值误差测量系统的设计[J]. 计量技术, 2018 (8): 53-55.
- [6] 刘涛, 董宁, 姚宛庭, 等. 刮板细度计智能检定装置的研制及刮板斜槽底平面平面度的检定方法探讨[J]. 中国设备工程, 2019 (8): 77-78.
- [7] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23 (7): 1939-1947.
- [8] 陈挺, 茅振华, 周闻青, 等. LabVIEW 平台的平面螺纹测量系统研制[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26 (2): 145-150.
- [9] 陈挺, 周闻青, 卢歆, 等. 光谱共焦技术在精密几何量测量测试中的应用[J]. 计测技术, 2015, 35(s1): 4-6.
- [10] 宋宇. 采用 CMM 测量发动机叶片模具方法研究[J]. 计测技术, 2019, 39 (2): 26-29.

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-06

基金项目: 浙江省质量技术监督局科研项目 (20150216, 20180104)

## 作者简介

陈挺, 男, 浙江温岭人, 高级工程师, 工学硕士, 一级注册计量师, 二级考评员。长期从事几何量精密计量测试、光通信计量、虚拟仪器应用与测试等领域研究, 发表论文 10 余篇。

