

文章编号 1004-924X(2010)11-2384-06

基于四象限探测的激光粒度仪自动对中技术

葛宝臻, 李文超, 马云峰, 魏耀林

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对激光粒度仪手动对中自动化程度低、不易调整等问题,提出了基于四象限对中单元的新型 50 通道光电探测器的自动对中方法。该方法根据光束是否处于四象限探测器的感光范围,将自动对中过程分为粗对中和精对中两部分。当光束不在四象限探测器的感光范围内时,可根据探测器的特定结构进行粗对中;当光束处于四象限探测器感光范围内时,根据四象限探测器产生的光电流强弱判断探测器的运动方向进行精对中。在粗对中过渡到精对中对后采取变步长方式,通过比较对中精度和对中所需时间确定算法的最佳截止条件。完成了激光粒度仪自动对中系统硬件和软件的设计,实验验证了对中系统的可靠性与准确性。结果表明,最终的对中分辨率高于 $5\ \mu\text{m}$ 。使用该技术对标准颗粒样品进行了测量实验,结果证实自动对中的测量数据符合国家激光粒度仪校准规范的要求。

关键词:激光粒度仪;自动对中;光电探测器

中图分类号: TN247; TH741.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2384

Automatic centering of laser particle size analyzers based on four-quadrant construction

GE Bao-zhen, LI Wen-chao, MA Yun-feng, WEI Yao-lin

(Key Laboratory of Electro-optic Information Technology Science of the Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As the manual centering of laser particle size analyzers is slow operation and difficult to be adjusted, this paper presents an automatic centering method for the 50-channel photo detector based on a four-quadrant detection unit. According to the different positions of the detectors, the process of automatic centering was divided into pre-centering and acute-centering. When the laser beam was out of the sensing range of the detector, the system carried out a pre-centering based on the special structure of the detector; When the laser beam could be sensed by the detector, the system undertook the acute-centering according to the photocurrent intensity from the detector to determine its motion direction. After transition from a pre-centering into the acute-centering, the variable step was used to obtain the best cut-off condition of the automatic centering system by comparing the centering accuracy and centering time. Furthermore, the designs of software and hardware of the laser size analyzer were completed and the reliability and accuracy of the system were verified. The results show that its resolution is higher than $5\ \mu\text{m}$. Finally, the method was used to test standard particles, and the data after

收稿日期:2009-08-21;修订日期:2009-11-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60527002)

automatic centering meet the requirements of calibration specification for static light scattering particle size analyzers.

Key words: laser particle size analyzer; automatic centering; photoelectric detector

1 引 言

随着现代科学技术的飞速发展,粒度测量在石化、冶金、建材、陶瓷、制药、军工等许多国民生产领域都受到了极大关注。随着人们对颗粒测量意义的认识加深,逐渐发展了很多测量方法。按照测量的基本原理,这些方法可以分为以下几大类:筛分法、显微镜法、沉降法、电感应法和光散射法,它们各有自己的特点和应用范围,其中光散射法由于具有适用性广、粒径测量范围宽、精度高、重复性好、测量速度快、适用于在线测量等优点已成为近年来使用最为广泛的一种方法。目前,以激光散射法为原理制成的测量颗粒大小的激光粒度仪在科研和市场上已经占据了主导地位,极具发展前景。

激光粒度仪是一种利用小角前向散射原理对颗粒大小进行检测的装置^[1-2],其测量精度与多元光电探测器与入射光的严格对中密切相关。

激光粒度仪的对中主要有传统的手动对中和自动对中^[3-4],与手动对中相比自动对中提高了仪器的自动化水平,减少了人为因素的干扰,降低了对操作人员技能的要求。自动对中的方法之一是在探测器的中央打孔^[5],使入射光汇聚到焦点后通过小孔,在小孔后用光电二极管探测。另一种对中方法是在光电探测器的中心孔垂直方向上集成两个长方形探测器,同时借助探测器水平方向上的测量环进行自动对中。四象限探测器是目前光学跟踪技术普遍采用的一种手段^[6-8],本文采用将四象限探测器与传统光电探测器相结合的新型光探测器进行自动对中,简化了激光粒度仪对中过程,提高了对中分辨率。

2 新型光电探测器自动对中基本原理

用于测量粒子散射光强的新型光电探测器^[9]的有效探测环共 46 个,编号为 1~46,其中前 32

环呈互补对称排列,如图 1 中阴影部分所示;后 14 环为顺序排列,在探测器两侧是完全对称结构,测量时仅需使用一侧。探测器中心开有一直径很小的孔,在其后方安装一个光电二极管以接收透过小孔的光能,辅助监测能量变化。在原有测量功能的基础上,新型光电探测器在紧邻中心孔的四周设计了 4 个大小、形状完全相同的探测单元,相当于四象限探测器,编号为 47~50,如图 1 中的 4 个三角形 L,R,T,B 所示。使用时,将新型光电探测器固定在二维电动平移台上,并使其前表面处于光学系统中透镜的焦平面位置。

自动对中过程分为粗对中和精对中两步,当光束不在四象限探测器的感光范围内时,可根据探测器的特定结构进行粗对中。粗对中分为两种情况:光束在 46 环探测器内和在探测器感光范围外。第一种情况下,根据光束在探测器上的位置确定移动的方向和距离,使四象限探测器自动运动至光束所在位置;第二种情况下,利用位于二维平移台两侧的原点开关使探测器自动回到预设位置,此位置下光束处于探测器的感光范围内时即可重新开始粗对中。当光束处于四象限探测器感光范围内时,根据四象限探测器产生的光电流强

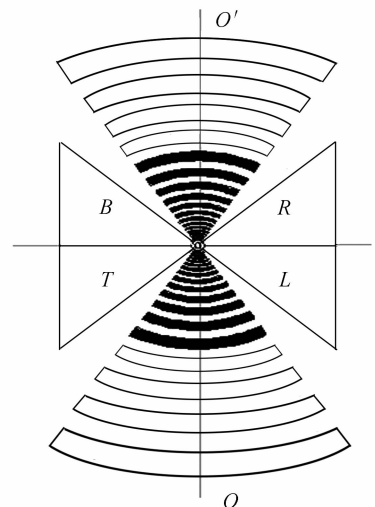


图 1 新型探测器结构图

Fig. 1 Structure of new photoelectric detector

弱判断探测器的运动方向^[10]来进行精对中。令

$$\begin{aligned} X &= k[(I_L + I_R) - (I_T + I_B)] \\ Y &= k[(I_L + I_T) - (I_R + I_B)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, k 为一常数, I_L, I_R, I_T, I_B 分别为图 1 中 L, R, T, B 四个探测器产生的电流, X 表示水平方向判据, Y 表示竖直方向判据。当 $X > 0$ 时, 表示光束处于探测器中心线 OO' 右侧, 此时探测器应向右移动, 并采用变步长对中方法, 预先设定较大的初始运动步长, 若在此步长下始终无法满足对中条件时将步长减小, 再次进行对中, 依次类推直至完成自动对中。若步长减小到一定程度对中仍无法停止, 则认为对中失败, 提示重新开始精对中。理论上, 当 $X=0$ 且 $Y=0$ 时, 完成自动对中, 但在实际情况下, 由于存在机械安装误差和四象限探测器响应度不均匀等因素, 自动对中算法的判据 X, Y 不为 0, 因此当 $X < N, Y < N$ 时, 即认为对中完成, N 为预设的截止条件。

3 自动对中算法

以天津大学在激光粒度仪方面已有研究成果和设备为基础^[11], 集成精密二维电动平移台及 50 通道光电探测器, 得到具有自动对中功能的激光粒度仪样机, 其可测粒径范围为 $3.76 \sim 2052 \mu\text{m}$, 通过驱动器将步距角为 1.8° 的步进电机进行 64 细分, 系统分辨率可达 $0.04 \mu\text{m}$ 。设计的自动对中算法流程如图 2 所示。

当自动对中开始后, 首先通过搜索算法得到探测器感应到的最大光强, 进而得到光束所在探测环的编号 $\text{Max}R$ 。若 $\text{Max}R \leq 46$, 表示光束不在四象限探测器内, 即光束在 46 环探测器内或在探测器感光范围外, 此时则进行粗对中; 若光束已处于四象限探测器的感光范围内, 则开始进行精对中。设定 R 为运动步长, R_0 为初始步长, ΔE 为四象限探测器的能量差, $\text{Max}(\Delta E)$ 为四象限探测器的能量差最大值, N 为截止条件。精对中开始后, 首先根据判据依次进行水平及竖直方向的运动, 当运动完成后将步长减半, 继续判断最大差值 $\text{Max}(\Delta E)$ 是否符合截止条件; 若符合, 则对中结束; 若不符合, 则使用新的步长重新进行对中, 重复此过程, 直至对中完成。

自动对中算法中一个很重要的部分是截止条件的取值, 下面通过实验对其进行分析。当探

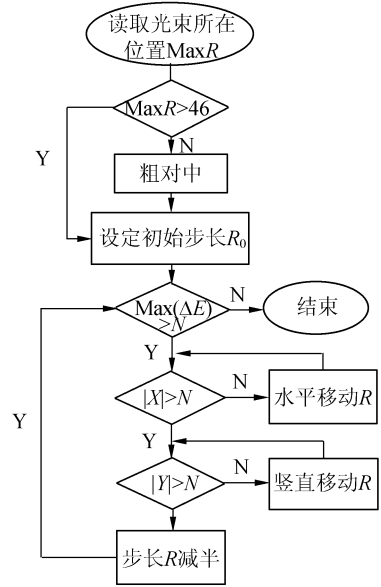


图 2 自动对中流程图

Fig. 2 Flow chart of automatic centering

测器感受到的光强最强时, 在显示界面的相应光能量最大值设为 300, 现将截止条件 N 取值 1~5, 实验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 精对中时间

Tab. 1 Consuming time of acute-centering

实验次数	截止条件				
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$
1	未找到	122	75	46	45
2	未找到	120	89	49	51
3	未找到	118	67	55	44
4	126	136	70	52	40
5	未找到	未找到	64	47	38
平均时间	未找到	124	73	49.8	43.6

表 1 中数据为对截止条件取不同的值时, 完成精对中所需的时间。可以看出, 当截止条件为 1 时, 多数情况下无法完成自动对中, 这说明截止条件选择过低, 由于机械安装和探测器光电响应的均匀性问题, 系统无法兼顾水平及竖直方向同时满足此截止条件。截止条件为 2 时尚有一次无法完成自动对中, 说明此条件下可实现自动对中功能但并不稳定。截止条件为 3~5 时系统均能完成自动对中且通过比较中对时间可知: 随着截止条件的增大, 对中所耗时间逐渐减小。

表 2 精对中最终步长

Tab.2 Final steps of acute-centering (unit: μm)

实验次数	截止条件				
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5
1	0	1.25	2.5	5	5
2	0	1.25	2.5	5	2.5
3	0	2.5	2.5	2.5	5
4	0.6	0.6	2.5	2.5	5
5	0	0	5	5	5
平均步长	0.6	1.4	3	4	4.5

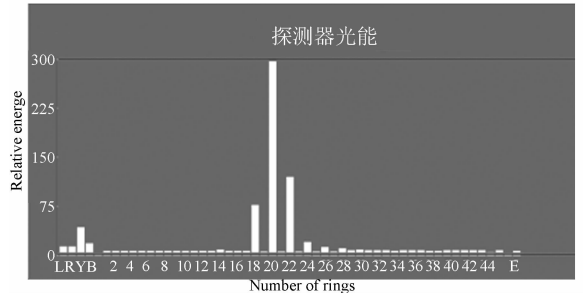
表 2 为自动对中完成后,最终的运动步长统计数据,其中步长为 0 表示无法完成自动对中,因此平均步长不对此次步长进行统计。可以看出当截止条件逐渐增大时,对中的最终步长亦逐渐增大。比较表 1 与表 2 中数据,综合考虑提高对中分辨率和节省对中时间两方面因素,选择精密对中的截止条件为 3,即当判据 X, Y 小于 3 后结束自动对中程序。通过分析此条件下的精对中最终步长,当 $N=5$ 时,精对中最终步长均小于 $5 \mu\text{m}$,因此取 $N=5$ 为系统的截止条件,此时系统的对中分辨率不低于 $5 \mu\text{m}$ 。

4 实验结果与分析

为验证自动对中效果,对标准粒子进行测量实验。首先将放入纯净水的样品池放入测量光路中,进行自动对中,图 3 为光能显示界面,左边 4 路为四象限探测器光能,中间 46 路为光电探测器的光能量,最后 1 路为位于探测器中心孔后方的光电二极管能量。如图 3(a)所示,刚开机时光束处于探测器的随机位置,此时四象限探测器光能不一致,完成自动对中操作后,四象限探测器光能基本相同,光电二极管能量最大,如图 3(b)所示。

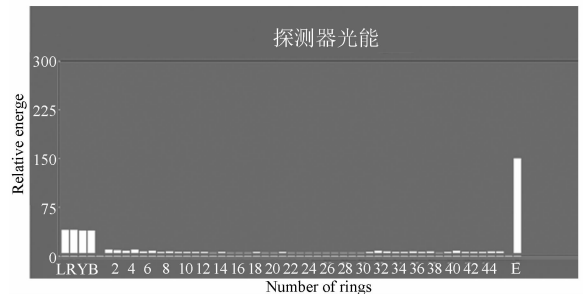
自动对中完成后将被测微粒物质放入样品池中,本文采用 3 种以聚苯乙烯乳胶为材料的颗粒样品进行实验。以参考直径为 $51.11 \mu\text{m}$ 的颗粒样品为例,将其放入样品池中搅拌均匀,待稳定后得到光能分布如图 4 所示。可以看出,受粒子的散射光影响,此时四象限探测器的光能发生了改变。

对每种颗粒样品测量 3 次并对实验数据进行分析^[12],得到的结果如表 3 所示,其中 D_{50} 表示小于该直径的粒子体积占粒子总体积的 50%。激



(a) 初始状态

(a) State before automatic centering



(b) 对中完成后状态

(b) State after automatic centering

图 3 自动对中光能分布显示界面图

Fig. 3 Interface figure of display of luminous energy with automatic centering

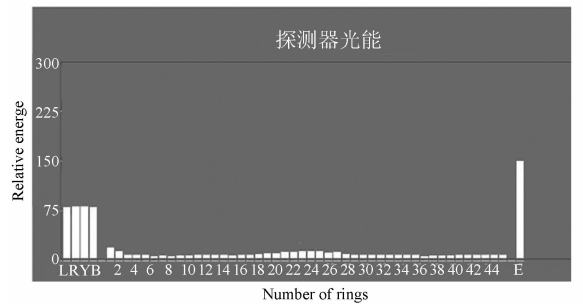


图 4 2# 标准粒子光能分布图

Fig.4 Luminous energy distribution of 2# standard particle

光粒度分析仪校准规范规定^[13],当 $5 \mu\text{m} < D_{50} \leq 20 \mu\text{m}$ 时,相对误差应小于 10%;当 $D_{50} > 20 \mu\text{m}$ 时,相对误差应小于 8%。通过表 3 数据可知,1# 颗粒样品 D_{50} 的相对误差为 2.73%,2# 与 3# 颗粒样品 D_{50} 的相对误差最大值为 0.26%,均小于规范中对相对误差的要求,表明利用自动对中技术的激光粒度仪样机在对颗粒粒径的测量中表现稳定、结果准确,满足激光粒度测试系统的要求。结合之前的分析可以看出,通过调整仪器以及减小

对中步长可以进一步降低对中误差,进而降低测量误差^[14]。

表 3 标准颗粒样品测量结果

Tab. 3 Measurements of three standard particles

颗粒样品	1 [#]	2 [#]	3 [#]
测量值/ μm	9.28	51.51	103.51
平均值/ μm	9.30	50.43	104.54
参考值/ μm	9.23	51.37	105.34
相对误差/%	9.27	51.10	104.46
	9.53	51.11	104.19
	2.73	0.01	0.26

参考文献:

- [1] 葛宝臻,魏永杰,吕且妮. 基于分布宽度选取收敛阈值求解粒子尺寸分布[J]. 光电子激光, 2007, 18(11):1329-1332.
- GE B Z, WEI Y J, LV Q N. Study of invert particle size distribution by choosing convergence threshold based on distribution width[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2007, 18(11):1329-1332. (in Chinese)
- [2] 王少清,任中京. 激光粒度仪用标准颗粒样板设计原理初探[J]. 光学精密工程, 1995, 3(2):69-74.
- WANG S Q, REN Z J. Design principle of laser particle size analyzer which using standard particle-plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(2): 69-74 (in Chinese)
- [3] KUROZUMI T, IKEMOTO K. Laser beam optical axis adjusting mechanism in particle size distribution measuring apparatus [P]. US: 6407812B1, 2002-06-18.
- [4] LLOYD J. Laser diffraction detector [P]. US: 6879397B2, 2005-04-12.
- [5] 马玉真,宋波,梁永维. 二维对中系统在激光粒度仪中的应用[J]. 试验技术与试验机, 2000, 40(3):40-41.
- MA Y Z, SONG B, LIANG Y F. The application of two-dimension centralizing system in laser particle size analyzer[J]. *Testing Technology and Machine*, 2000, 40(3):40-41. (in Chinese)
- [6] 石川,刘如珍. 基于四象限探测器的光束智能校正系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2007, 14(3):44-46.
- SHI C, LIU R Z. Design of the four-quadrant detector based on intelligent beam correction system[J].

5 结 论

在天津大学研制的激光粒度仪基础上,结合集成四象限对中探测单元的新型 50 通道光电探测器及二维运动装置,实现了激光粒度仪的自动对中。编写了自动对中算法,并对算法中截止条件的选择进行了实验分析,最终实现了自动对中分辨率高于 $5 \mu\text{m}$ 。通过对标准粒子的测量实验,证明本文所用自动对中技术效果良好,提高了仪器的自动化程度,且自动对中后的测量结果准确,达到了预期目的。

- Instrumentation Users*, 2007, 14(3): 44-46. (in Chinese)
- [7] 田铁印,孙世维. 激光精密跟踪测角误差分析与计算[J]. 光学精密工程, 1996, 4(3):68-74.
- TIAN T Y, SUN S W. Laser precision tracking angle error analysis and calculation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3):68-74. (in Chinese)
- [8] 林志琦,李会杰,郎永辉. 用四象限光电探测器获得光斑参数[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4):764-770.
- LIN Z Q, LI H J, LANG Y H. With the four quadrant photoelectric detector to obtain spot parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 764-770. (in Chinese)
- [9] 葛宝臻,魏永杰,魏耀林. 共轴双探测面的激光粒度仪[P]. 中国:200610013967. 9, 2006-5-31.
- GE B Z, WEI Y J, WEI Y L. Dual Coaxial Probe Laser Particle Size Analyzer [P]. China: 200610013967. 9, 2006-5-31. (in Chinese)
- [10] 匡翠方,冯其波,冯俊艳,等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析[J]. 光学技术, 2004, 30(4):387-389.
- KUANG C F, FENG Q B, FENG J Y. The characteristic analysis of four quadrant detectors serve as the laser alignment [J]. *Optical Technology*, 2004, 30(4):387-389. (in Chinese)
- [11] 葛宝臻,魏永杰,吕且妮. 共轴两焦点面探测信号的激光粒度测试[J]. 光电工程, 2007, 34(7):35-38.
- GE B Z, WEI Y J, LV Q N. Laser particle size measurement by detecting signals on two coaxial focal planes [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7):35-38. (in Chinese)

- [12] 王乃宁, 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
WANG N N. *Optical Measurement Technology and Application of Particle size*[M]. Beijing: Atomic Energy Press. (in Chinese)
- [13] JJF 1211-2008. 激光粒度分析仪校准规范[S]. 国家质量监督检验检疫总局.
JJF 1211-2008. Calibration Specification for Static Light Scattering Particle Size Analyzers[S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. (in Chinese)
- [14] 沈建琪, 王乃宁. 小角前向散射测粒仪光电探测元件的对中问题[J]. 上海理工大学学报, 1998, 20(1): 30-34.
SHEN J Q, WANG N N. The centering problem of small-angle forward scattering particle size analyzer components' electro-optical detector [J]. *Journal of Shanghai University of Technology*, 1998, 20(1): 30-34. (in Chinese)

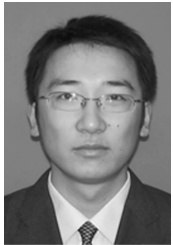
作者简介:



葛宝臻(1964—), 男, 内蒙古人, 教授, 博士生导师, 1987年、1990年、1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事激光三维彩色数字化理论与技术、粒子场测量理论与技术和数字全息理论与应用等方面的研究。
Email: gebz@tju.edu.cn



马云峰(1985—), 男, 天津人, 硕士研究生, 2008年于天津大学获得学士学位, 主要从事粒子场理论与技术的研究。
E-mail: ma_yunfeng851116@163.com



李文超(1985—), 男, 天津人, 硕士研究生, 2007年于天津大学获得学士学位, 主要从事粒子场测量自动化理论与技术的研究。E-mail: wenchaoli@yahoo.cn



魏耀林(1951—), 男, 陕西人, 高级工程师, 1978年于天津大学获学士学位, 现为精密仪器与光电子工程学院院长助理, 主要从事光电精密仪器设计、测试与校正以及光电技术应用的研究。E-mail: ylwei@tju.edu.cn

● 下期预告

纳米三坐标测量机接触式测头触发控制

程 方, 费业泰

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

针对高灵敏度纳米三坐标测量机(nano-CMM)接触式测头提出了一种高精度高效率的触发控制策略。该方法基于一种自行研制的4-DVD接触式测头, 工件接触测头带来的微小变形会导致测头产生灵敏度极高的触发信号。该系统使用超声波马达, 通过整合不同驱动模式, 实现高速逼近和低速触发相结合。在触发过程中, 使用二次触发策略, 即第一次触发获得接触位置的范围, 第二次触发用极低的速度, 详细记录触发点附近的触发信号, 并通过线性拟合的方式求得信号曲线转折点, 该点即为触发位置。该方法解决了驱动分辨率和行程大小的矛盾。实验结果表明: 该方法可以有效地避免测头系统的塑性形变, 触发位置的重复性可在10 nm以内。本文提出的纳米三坐标测量机接触式测头触发控制策略在保证精度和稳定性的前提下, 表现出了良好的控制效率。