

文章编号: 1001-4322(2009)01-0020-05

激光测头光束质量分析与控制^{*}

曾茜逾, 曹益平, 周力萍

(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

摘 要: 建立了光束质量控制的数学模型, 提出了一种可定量评价光束质量的参数优化选择方法。针对激光测头进行了两片式光束质量控制光学系统的优化设计, 并与光束聚焦控制、准直控制方法进行对比实验。激光结果证明: 该优化光束控制系统在测量范围内既保持了光束的均匀性, 光斑尺寸较小(光腰尺寸为 34 μm), 又保证了光束的精细度, 有效地抑制了光束质量引入的测量误差, 在 $\pm 5 \text{ mm}$ 测量范围内, 其均方根误差仅为 6.3 μm , 测量精度明显优于聚焦控制和准直控制系统。

关键词: 光束质量控制; 激光三角法; 激光测头; 高斯光束; 位置敏感传感器

中图分类号: TH744.5 **文献标志码:** A

激光三角法广泛用于与目标物相隔距离较大、探测器体积小、辨析度为 mm 级以下的非接触测量中^[1]。常用的光电探测器有线阵电荷耦合器件(CCD)和位置敏感器件(PSD)。当采用 CCD 探测器时, 获取的信号是一幅光斑图像, 因此需要复杂的信号处理电路来对光斑中心进行亚像素定位, 这限制了测量精度和速度。当采用 PSD 探测器时, 输出信号只与光点能量中心位置有关, 只需设置一个简单的光电信号输出处理电路, 而且, PSD 的几何精度和响应速度均优于 CCD^[2]。然而, 来源于被测物体表面粗糙度、散斑、光源波动、信号处理电路和探测器自身的误差在一定程度上限制了它的应用^[3]。有许多作者通过模型拟合来修正误差^[4-5], 但大多是对 PSD 器件本身来进行标定, 在实际应用情况中并不能做到对每个器件进行单独修正。

激光测头将光点在其光敏面上的强度及位置转换成两路电流信号输出^[6], 测量精度与激光束在被测物体表面形成的光斑尺寸和散射光强有明显关系。散射光束的信号强度分布不均会引入测量误差。如果采取措施使散射光束直径小于激光测头的定位分辨率, 则可有效地将所引入的误差限制在激光测头的定位分辨率内, 从而提高测量精度。减小光束直径的最直接办法是聚焦。然而, 聚焦仅能在焦面处使光束直径最小, 在其它位置, 高斯光束的光束直径会急剧增大。因此, 聚焦只能降低某一测量点的定位误差, 不能提高激光测头在整个测量范围内的测量精度。要保证在测量范围内具有一致的测量精度, 应使光束直径在测量范围内保持不变。准直方法可以使光束直径在测量范围内基本一致, 但准直后会使光束扩束, 对提高测量精度不利。为此, 本文建立了激光测头光束质量控制数学模型, 提出了一种光束质量控制的评价参数, 并依照经优化的评价参数, 设计了测头的光束质量控制光学系统, 在保持光束均匀性的基础上减小光束束腰, 获得了满意的光束。

1 激光测头的光束质量控制评价参数

1.1 光束质量控制数学模型

在激光三角法测量系统中, 对光束的控制要求在测量范围内, 光束直径既要尽可能均匀, 又要尽可能小。因此, 如果对光束进行压束, 并使激光光束束腰正好处于测量范围的中点位置, 在适当控制束腰大小的同时, 控制测量区域内的光束传输均匀性, 即可较好地减小激光测头测量误差。设经压束后的束腰为 w_1 , 控制束腰使之正好处于测量区域中心位置, 则在测量区域 $[-z_{\max}, z_{\max}]$ 内, z 位置的光束半径为

$$w_z = w_1 \sqrt{1 + (z/z_0)^2} \quad (1)$$

式中: $z_0 = (\pi w_1^2)/\lambda$, 是高斯光束的共焦参数; λ 为光束波长。因此, 测量范围边缘的最大光斑半径为

$$w_{\max} = w_1 \sqrt{1 + (z_{\max}/z_0)^2} \quad (2)$$

如果同时控制 w_1 和 w_{\max} 充分小, 可有效减小 PSD 测量误差。设

^{*} 收稿日期: 2008-04-14; 修订日期: 2008-11-04
基金项目: 国家高技术发展计划项目; 四川省科技攻关项目(2006Z01-028); 四川省学术和技术带头人培养基金项目(07GRC-01)
作者简介: 曾茜逾(1985—), 女, 湖南省常德市人, 硕士研究生, 主要研究方向是光机电一体化; antxyz@163.com。
通信作者: 曹益平, caoying@mail.sc.cninfo.net。

$$\begin{cases} J_1 = w_1 / \mu\text{m} \\ J_2 = (w_{\text{max}}^2 - w_1^2) / w_1^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： J_1 表示压束后光束束腰数值大小； J_2 表示在测量范围内光束面积的相对变化率。为了全面地评价光束质量的好坏，需要综合考虑 J_1 和 J_2 这两个指标，因此引入评价参数 E

$$E = K_1 J_1 + K_2 J_2 \quad (4)$$

式中： K_1, K_2 为权重因子，即有

$$K_1 + K_2 = 1 \quad (5)$$

E 越小，光束质量越好。

1.2 评价参数优化选择

K_1, K_2 的选择与测量系统的参数有关。本文设计的激光测头中所用的光源波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$ ， $z = \pm 5 \text{ mm}$ 。为优化选择 K_1, K_2 ，在不同压束状态下，对光束质量进行分析。

当 w_1 为 10, 20, 30, 40 μm 时，各个光束形状如图 1 所示。从图 1 可以看出：当 $w_1 = 10$ 和 20 μm 时，尽管光束束腰相对较小，但光束均匀性很差，光束质量不好；当 $w_1 = 40 \mu\text{m}$ 时，尽管光束均匀性较好，但光束束腰相对较大，光束质量也不够好；当 $w_1 = 30 \mu\text{m}$ 时，光束质量相对较好。

表 1 是 J_1 为 10, 20, 30, 40 以及 K_1 取不同值时评价参数 E 的取值情况。从表 1 中可以看出：当 K_1 值在 0.09~0.30 之间时， $J_1 = 30$ 时 E 取值均为最小，表明此时 J_1 值比较合理。在这种情况下， K_1 可取相对较小值，即 K_1 在 0.09 附近，重点考虑光束均匀性。

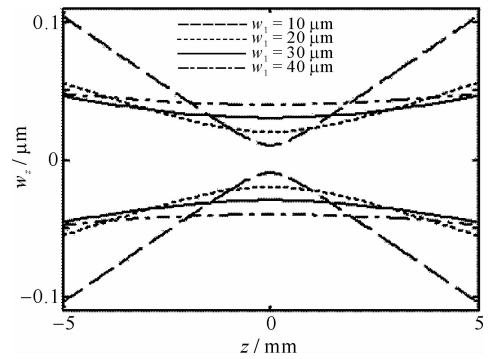


Fig. 1 Beam shape for different beam waist w_1

图 1 束腰 w_1 变化时的光束束形图

表 1 不同组别和 K_1 值所对应的的评价参数

Table 1 Evaluation parameter E for different K_1 and groups

J_1	J_2	E							
		$K_1=0.90$	$K_1=0.60$	$K_1=0.30$	$K_1=0.10$	$K_1=0.09$	$K_1=0.06$	$K_1=0.03$	$K_1=0.01$
10	107.020 5	19.702 1	48.808 2	77.914 4	97.318 5	98.289 0	101.199 3	104.109 9	106.050 2
20	6.688 8	18.668 9	14.675 5	10.682 1	8.019 9	7.886 8	7.487 5	7.088 1	6.821 9
30	1.321 2	27.132 1	18.528 5	9.924 9	4.189 1	3.902 3	3.042 0	2.181 6	1.608 0
40	0.418 0	36.041 8	24.167 2	12.292 6	4.376 2	3.980 4	2.793 0	1.605 5	0.813 9

在 w_1 取 31, 32, 33, 34 μm 时光束束形如图 2 所示，其中图 2(b) 为图 2(a) 虚线框的放大图形。从图 2(b) 可以看出，当 $w_1 = 32 \mu\text{m}$ 时，光束均匀性较好，此时 K_1 经优化后，取值为 0.084，所以，光束质量评价参数的优化结果为

$$E = 0.084 J_1 + 0.916 J_2 \quad (6)$$

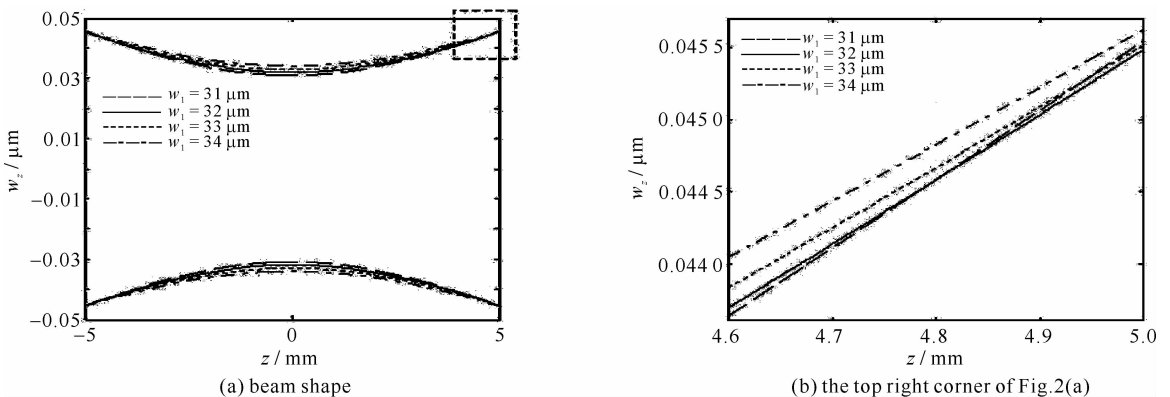


Fig. 2 Beam shapes for different beam waist w_1

图 2 束腰 w_1 变化时的光束束形图

2 双透镜压束系统

小型 3 维测距系统主要由光电光学系统和光电检测处理电路构成,其中任何一部分的精度都会直接影响系统总的精度指标。特别是一些需要高精度测量的场合,必须综合考虑到各项因素的影响才能实现系统总的精度要求。如果激光太弱,如点信号强度太小,尽管高斯光束的方向性好,但为使其能量集中,必须进行压束处理。

常采用双透镜组合系统来减小高斯发散角^[7]。为使系统结构紧凑,采用正负透镜组合。图 3 为双透镜构成的压束系统,透镜 M_1 (焦距为 f_1) 离入射高斯光束束腰 w_0 的距离为 d_0 ,两透镜间距为 d ,变换后得到的出射光束束腰 w_1 距透镜 M_2 (焦距为 f_2) 的距离为 d_1 。

本文所用的光源参数 $\lambda = 650 \text{ nm}$, $w_0 = 700 \text{ }\mu\text{m}$ 。测头的工作距离是相对确定的,这里 $d_1 = 70 \text{ mm}$ 。根据测头的小型化,要求 d 值不应太大,为 10 mm 左右。由高斯光束的 ABCD 定律,取不同的透镜组合可以得出相应的 d, w_1, d_1 的值,并由式 (6) 可以得出 E 的值,详见表 2。由表 2 可以看出, $f_1 = 25.4 \text{ mm}$, $f_2 = -20 \text{ mm}$, $d = 9.8 \text{ mm}$, $d_1 = 70.5 \text{ mm}$, $w_1 = 34.0 \text{ }\mu\text{m}$ 时所得到的 E 值最小,而且参数 d 和 d_1 也符合要求,所以在实际测量中选用透镜组合,参数为: $f_1 = 25.4 \text{ mm}$, $f_2 = -20 \text{ mm}$, $d = 9.8 \text{ mm}$ 。

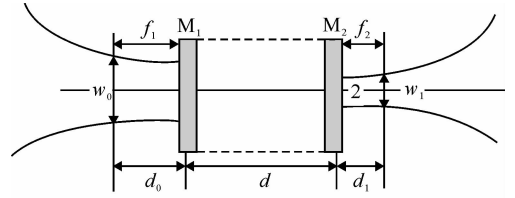


Fig. 3 Schematic of beam shape compressing system with dual lenses

图 3 双透镜压束系统示意图

表 2 几组不同的透镜组合参数

Table 2 Parameters of different composite lenses

f_1/mm	f_2/mm	d/mm	d_1/mm	$w_1/\mu\text{m}$	E
38.1	-18	23.7	69.2	55.4	4.757 7
38.1	-20	22.4	71.0	51.7	4.480 0
25.4	-18	11.1	69.0	36.4	3.616 0
25.4	-19	10.4	70.8	35.6	3.600 7
25.4	-20	9.8	70.5	34.0	3.589 6

对 d_0 作进一步分析可知, d_0 在 $0 \sim 100 \text{ mm}$ 范围内时, w_1 变化小于 $0.15 \text{ }\mu\text{m}$, d_1 变化小于 0.3 mm , 这说明参数 d_0 对整个压束光学系统的影响不大。我们在选取 d_0 时可依照小型测头的设计要求,使激光器紧靠透镜。根据以上分析,可以得出所设计双透镜压束系统的具体参数: $d_0 = 1 \text{ mm}$, $f_1 = 25.4 \text{ mm}$, $d = 9.8 \text{ mm}$, $f_2 = -20 \text{ mm}$, 压束后的光束束腰 $w_1 = 34 \text{ }\mu\text{m}$, 实际作用距离 $d_1 = 70.5 \text{ mm}$ 。

3 实验及数据分析

实验装置如图 4 所示。在满足 Scheimpflug Condition^[8]的前提下,为保证光能被 PSD 吸收,应尽量减少投影光轴和成像物镜光轴之间的夹角 θ_1 。为防止到达 PSD 受光面的光被过多反射或是全反射,PSD 受光面与

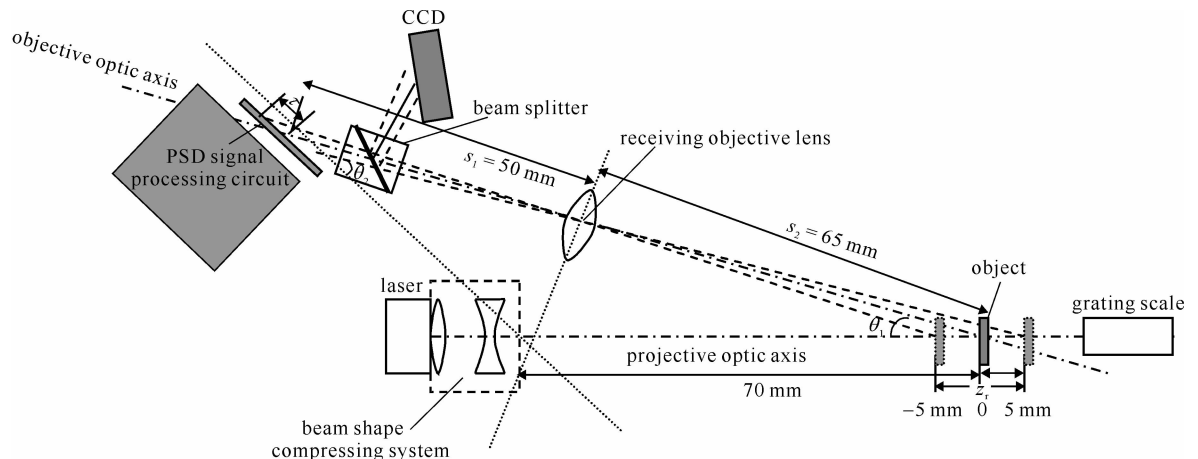


Fig. 4 Experimental setup

图 4 实验装置图

成像物镜光轴夹角 θ_2 不宜过小。已知光束束腰为 $34 \mu\text{m}$ ，波长为 650 nm ，当成像物镜焦距 $f=43 \text{ mm}$ ，物距 $s_1=65 \text{ mm}$ ， $\theta_1=22^\circ$ 时，根据薄透镜物像公式^[9]可得，像距 $s_2=50 \text{ mm}$ ， $\theta_2=62^\circ$ ，横向放大率约为 0.68 。当物体偏移量 z_r 较小时， z_r 与光斑在 PSD 的位移量 τ 可近似为线性。当待测物体从 -5 mm 到 5 mm 移动时，用一高精度计量光栅尺来跟踪位移真值 z_r ，同时由 PSD 获取不同光束质量下的实际位移值，实际位移值与对应位移真值之差即反映了该状态下的定位误差。为了跟踪光束质量状况，由 CCD 同步获取不同位置下的光斑分布。为了验证优化压束系统对激光测头测量精度的作用，分别对光束聚焦控制、准直控制和本文优化压束控制 3 种情况下的测量精度进行了测量和光束质量跟踪。

图 5 是待测物体位于 $-5.0, -2.5, 0, 2.5, 5.0 \text{ mm}$ 五个典型位置时，CCD 测得的激光光斑变化情况。由图可以看出：激光能量分布不均匀^[10]，且由于激光与待测物体表面相互作用，不可避免产生了散斑，也引入了误差；激光光束经聚焦控制后的光束在有效测量区域内明显不均匀；经准直控制后的光束在有效测量区域内非常均匀，但光斑相对较大；而采用本文的优化压束控制的光束在有效测量区域内既有较好的均匀性，又有较小的光斑尺寸。

图 6 是采用聚焦方法、准直方法和压束方法的定位误差曲线，可以看出：激光光束在聚焦控制情况下的定位误差较大，且呈单调递增，最大定位误差达 $105 \mu\text{m}$ ，均方差为 $52.6 \mu\text{m}$ ；激光光束在准直控制情况下的定位误差尽管比聚焦情况小，但仍有较大误差，最大定位误差达 $48 \mu\text{m}$ ，均方差为 $27.1 \mu\text{m}$ ；而激光光束在优化压束控制情况下，定位误差明显小于聚焦和准直控制情况下的误差，最大定位误差只有 $12.7 \mu\text{m}$ ，而均方差降低到 $6.3 \mu\text{m}$ 。实验结果表明在基于激光三角法的测头设计中，根据本文建立的光束质量控制模型设计出的优化压束控制方法是可行的，确实能有效提高激光测头的精度。

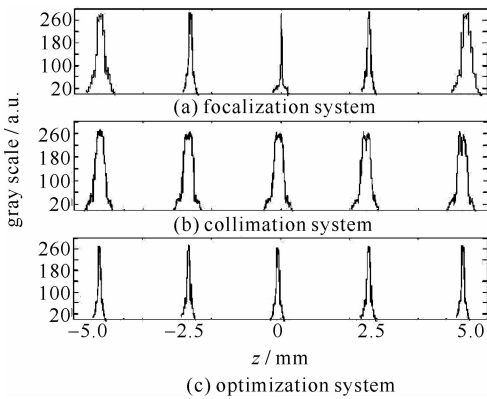


Fig. 5 Spot distributions for different laser beam control systems

图 5 在不同光束控制系统中的光斑分布图

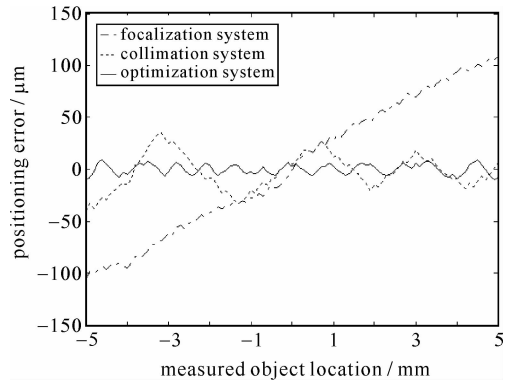


Fig. 6 Positioning errors of different laser beam control systems

图 6 在不同光束控制系统中的定位误差

4 结论

本文提出了在激光测头中通过改善激光光束质量提高测量精度，综合考虑了高斯光束束腰大小和准直特性，提出了一种光束质量评价参数，以便定量地评价激光测头中的光束质量。对光束质量评价参数进行了优化，并根据具体的测量需要设计出双透镜光束压束控制系统。实验表明，该光束压束控制方法有效提高了激光测头的定位精度。

参考文献：

- [1] Kim K-C, Oh S B, Kim S H, et al. Design of a signal processing algorithm for error-minimized optical triangulation displacement sensors [J]. *Meas Sci Technol*, 2001, **12**(10):1683-1688.
- [2] 王雁, 赵忠杰, 马社. 光学平台微角振动激光探测方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1):40-44. (Wang Yan, Zhao Zhongjie, Ma She. Laser detection of micro-angle vibration of optics bench. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1):40-44)
- [3] 黄战华, 蔡怀宇, 李贺桥, 等. 三角法激光测量系统的误差分析及消除方法[J]. *光电工程*, 2002, **29**(3):58-61. (Huang Zhanhua, Cai Huaiyu, Li Heqiao, et al. Analysis for error in triangular laser measurement system and an elimination method. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(3):58-61)
- [4] 郭丽峰, 张国雄, 郭敬滨, 等. PSD 空间三维非线性修正技术的研究[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(5):566-570. (Guo Lifeng, Zhang Guoxiong, Guo Jingbin, et al. Study on spatial 3-D nonlinear correction technique for PSD. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(5):

566-570)

- [5] 莫长涛,陈长征,张黎丽,等.神经网络在光电位置坐标传感器中的应用[J].激光技术,2003,27(6):594-596. (Mo Changtao, Chen Changzheng, Zhang Lili, et al. Neural network application in position sensitive detector. *Laser Technology*, 2003, 27(6):594-596)
- [6] 张文伟,庄葆华,张吉华.一种基于光三角法的激光测振仪[J].光电工程,1999,26(3):53-57. (Zhang Wenwei, Zhuang Baohua, Zhang Jihua. Laser vibration measurement instruments based on optical triangulation. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26(3):53-57)
- [7] 刘金环.高斯光束的光学变换[J].光学精密工程,1994,2(3):15-21. (Liu Jinhuan. Optical transform of Gauss beam. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(3):15-21)
- [8] 王晓嘉,高隼,王磊.激光三角法综述[J].仪器仪表学报,2004,25(s2):601-608. (Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(s2):601-608)
- [9] 周炳琨,高以智,陈侗嵘,等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2007. (Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser principle. Beijing: National Defense Industry Press, 2007)
- [10] 杨镜新,庄亦飞,沈卫星,等.激光光斑有效面积的准确测定[J].强激光与粒子束,2004,16(10):1263-1266. (Yang Jingxin, Zhuang Yifei, Shen Weixing, et al. Precise measurement of the effective area of laser spot. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(10):1263-1266)

Quality analysis and control on beam of light in laser measuring probe

Zeng Xiyu, Cao Yiping, Zhou Liping

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

Abstract: A math model of beam quality control has been established and the beam quality evaluation parameter is presented. A dual-lenses beam quality optimized optical system has been designed for the small measuring probe. It not only keeps beam uniformity but also guarantees the refinement of laser beam, so that the positioning error caused by laser beam can be restrained effectively. Experiments show its feasibility. The beam quality controlled by the optimized system, whose RMS error is only 6.3 μm at its measuring range within positive and negative 5 mm, is superior to those controlled by the focalized and collimated system.

Key words: beam quality control; laser triangulation; laser measuring probe; Gaussian beam; position sensitive detector