

文章编号: 1001-3806(2011)05-0613-05

一种新型激光测厚装置的设计

熊志勇, 赵斌*

(华中科技大学 机械科学与工程学院 仪器系, 武汉 430074)

摘要: 为了实现热轧钢板的在线厚度测量,建立了自动激光测厚系统。对该系统所采用的机械设计、光路设计、基于 MATLAB 的图像算法等进行了研究。首先使用激光器将激光倾斜投射到待测钢板的侧面上,并在激光器前方设置一块挡板,挡住水平方向上的部分光线。接着使用工业摄像机将被测板上的激光光斑成像于 CCD 靶面上。然后根据 CCD 上挡板所成像的位置计算出钢板的离焦量。最后根据 CCD 上钢板侧面所成像高和钢板的离焦量与待测板厚的几何关系,计算出钢板的厚度。结果表明,钢板厚度为 8mm ~ 120mm 时,系统测量精度为 0.32mm,低于测量系统要求的 ± 0.5 mm;测量系统受高温辐射影响较小。能够满足工业生产线上热轧钢板自动厚度测量的稳定性好、精度高、受外界干扰小等要求。

关键词: 测量与计量;激光测厚;投影法;热轧钢板;结构设计

中图分类号: TH744.5 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.011

Design of a new laser thickness measurement instrument

XIONG Zhi-yong, ZHAO Bin

(Department of Instruments, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to measure the thickness of the hot-rolled steel plate on line, an automatic laser gauging system was established, and its mechanical design and optical design, image algorithm based on MATLAB were investigated. Firstly, the laser beam was inclined to project onto the side of the plate, and a baffle is set to block the part of light at horizon. Secondly, the laser spot on the tested plate is imaged to CCD target surface in an industrial video camera. Then the defocusing amount is calculated based on the the CCD images. Finally, according to the geometric relationship between actual thickness of the plate to be measured and the imaging height of the plate flank in the CCD and the defocusing amount, the thickness of the steel plate is calculated. Experimental results indicate that the precision of the system is 0.32mm, smaller than the measurement system requirements ± 0.5 mm when the plate thickness between 8mm and 120mm. This measuring system has less influence induced by high temperature radiation. It can satisfy the system requirements of stabilization, higher precision and rapidity, as well as little interference.

Key words: measurement and metrology; laser thickness measurement; projection; hot-rolled steel sheet; structural design

引言

钢板广泛应用于生产、生活、国防、军工、航空航天等领域,并以约 3% 的年增长量的需求量增长,从而使得钢板的生产迅速发展。众所周知,钢板的生产质量必须以检测为基础,钢板检测精度和手段直接影响钢板的生产质量。

现在主流的热轧钢板的测量方法主要有:机械式

测量方法、射线法、电容法、电涡流法、超声波法以及光学测量方法^[1]。机械式测量方法、射线法^[2]现在都不主张采用,工业现场现在一般采用光学测量方法,其中上下双激光三角法成为主流的测量方法^[3]。

但上下双激光三角法由于采用 C 型架结构,整套系统体积大且安装于高温热轧钢板的正上下方,热辐射对探测器的影响及造成的结构热变形所导致的误差是一个问题,且下测头的防尘也是一个不易解决的难题。为此,本文中研制了一种新型的从热板侧面进行测量的激光测厚仪,能够很好地解决上述问题^[4]。

本设计相对传统机械式测量方法具有测量速度快、对生产线运行不产生任何影响的优点;相对射线法具有对操作人员无害且对环境无污染等优点;相对电容法和电涡流法具有对测量环境无特殊要求的优点;

基金项目:国家九七三重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714000)

作者简介:熊志勇(1986-),男,硕士研究生,主要从事激光精密测量方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@yahoo.cn

收稿日期:2010-12-20;收到修改稿日期:2011-02-22

相对上下双激光三角法等光学方法具有结构简单、调试方便、受高温影响小等优点。

1 激光测厚仪结构设计

针对在测量热轧钢板的过程中出现的散热、防辐射等问题,设计了一种新型激光测厚仪。该设计采用激光倾斜投影法测量热轧钢板的厚度,即激光器以一定的方位角度照亮热轧钢板的侧面,同时 CCD 摄像机也以一定的方位角度对照亮的热轧钢板侧面成像,通过对激光器和摄像机的姿态角度控制,即可使待测钢板厚度和图像中钢板的厚度成一个较精确的函数关系,通过软件处理即可计算出实际钢板的厚度。激光测厚仪原理图如图 1 所示。

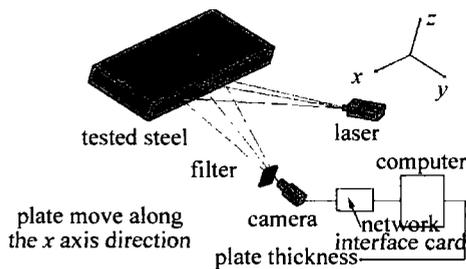


Fig. 1 The schematic of laser thickness gauge

1.1 激光器的选择与要求

由于热轧钢板的温度高,红外辐射强,且热轧钢板侧面呈暗红色反光能力较弱,故对激光器有一定的要求,本设计采用广州莱安光电有限公司的 LA-D-532 型大功率半导体绿光激光器。激光器射出的为一个带一定发散角的有一定面积的圆形光斑,本测量系统要求将此圆形光斑打到待测钢板表面,故光斑大小要求其最小光斑直径大于最大厚度的待测钢板的厚度。激光器部分参量为:输出波长为 532nm、输出功率 2000mW, TTL/Analogue 外调制模式。

1.2 光路的设计

1.2.1 基本设计思路 由于钢板是由轧辊轧制而成,在横向的起伏量不会太大,故本设计假设钢板横向最大起伏角度 $\pm 8^\circ$ 。假设钢板侧边离相机 CCD 平面 1500mm,允许钢板偏移焦点位置 ± 100 mm。在本设计中,大功率半导体绿光激光器按特定的角度和发散度要求产生绿色光斑,以特定的角度照射在热轧钢板的侧面,产生一个“绿色光带”,钢板侧面的散射光经过滤光片将红外辐射等除绿光以外的杂散光线滤除后,进入高速工业摄像机,该摄像机设置在大功率半导体绿光激光器右边并以一定角度放置。高速工业摄像机将“绿色光带”的图像成像于 CCD 的靶面上,由于 CCD 上“绿色光带”上下边缘像距的尺寸与热轧钢板的厚度成一定的函数关系,经过图像预处理^[5]、离焦

补偿和非线性校正等软件处理,即可得到板厚数据 d ,最后的结果以电流信号给出。

1.2.2 设计参量的分析与计算 在本设计中,在垂直方向上激光器放置于略高于钢板平面的位置,向下倾斜投射到钢板侧面,而摄像机在低于钢板的某个位置,向上倾斜接收“绿色光带”的漫反射光线,垂直方向上激光器、摄像机、待测钢板和黑板的相对位置关系

如图 2 所示。在水平方向上激光器、摄像机、钢板侧面满足斜射式三角测量的关系,此时摄像机正对前方,激光器向摄像机前方投射光线。激光器的角度要求斜射的激光除射在钢板侧面的部分外,其它的光线均不在摄像机的视场范围内。水平方向上激光器、摄像机、钢板及黑板的相对位置关系如图 3 所示。

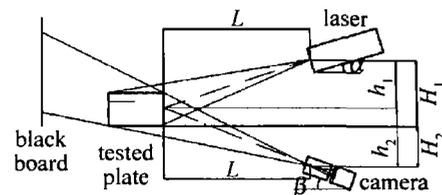


Fig. 2 Devices position relationship at vertical

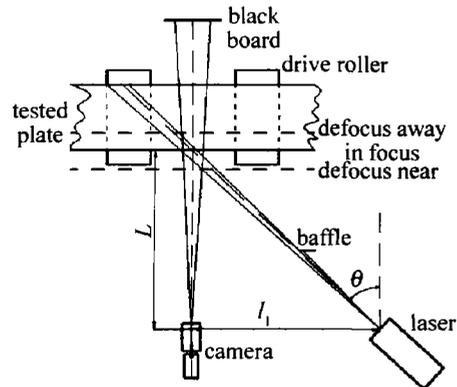


Fig. 3 Devices position relationship at horizon

为保证在摄像机上激光器光斑亮度与背景亮度有显著的差异,便于后续的图像处理,在本设计中摄像机视场内的待测钢板后面放置一块黑板,黑板大小要求完全覆盖摄像机视场范围。此时,在摄像机视场内被测钢板的待测侧面和背景的差异很大,合理选择摄像机的曝光量即可保证激光器光斑亮度与背景亮度有显著的差异,这种设置方式可以有效地减小外界光线对测量系统的干扰。通过上述设置,背景光线对测量系统的影响基本消除,图像上的噪声主要是相机自身的噪声,而相机自身的噪声相对于待测钢板侧面被照亮的部分可以忽略不计,故大大提高了系统的测量精度和稳定性。

在垂直方向上,本设计要求摄像机能够对待测钢板侧面完整成像,并且不会将钢板上下表面的像成在摄像机的 CCD 上。假设摄像机处于和待测钢板同一个平面内,不管激光器处于什么位置,如果钢板存在正

负倾斜时,钢板上下表面的像均会出现在摄像机上,故摄像机必须处于与待测钢板不同的平面内,对钢板侧面倾斜成像。当摄像机处于高于钢板或者低于钢板的某个位置时,如果激光器处于相对待测钢板与摄像机同一侧时,摄像机会对待测钢板的上表面或下表面成像,此时会导致测量错误。当激光器处于与钢板同一个平面时,当钢板有正负倾斜时也会出现上述问题。综上所述,激光器和摄像机的位置必须分布在钢板平面两侧。为保证激光器发出的激光不会对生产线上的高空作业产生影响,本文中采用激光器处于钢板斜上方向下倾斜照明钢板侧面,摄像机处于钢板斜下方向上倾斜对钢板侧面成像的安装方式,通过对激光器和摄像机角度和高度的调整,当钢板离焦或者有正负倾斜时,可以保证摄像机对钢板侧面的正确成像。

本设计要求激光器和摄像机距离钢板侧面的距离 $L = 1500\text{mm}$,当钢板处于正焦时,由于待测热板范围为 $8\text{mm} \sim 120\text{mm}$,故在设计中以 120mm 为基准,要求激光光斑直径大于 120mm ,且中心在 120mm 厚的热板的中间位置。激光器的强度要求在待测热板为 8mm 时激光器也能以较大的强度照亮待测热板的侧面。此时激光器距离钢板下表面高度 H_1 为:

$$H_1 = h_1 + 60\text{mm} \quad (1)$$

式中, $h_1 = L \tan \alpha$, L 为激光器离待测钢板的垂直距离; α 为激光器向下倾斜的角度。由于钢板侧边与底边的结合处为不规则的形状,近似为圆角边,且本设计要求测量钢板精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$,故在本设计中要求激光器对钢板侧面高于底面 0.25mm 的地方都能照射到,具体要求如图 4 所示,此时在测量误差范围内,此原理误差可以接受且可通过软件进行校正。

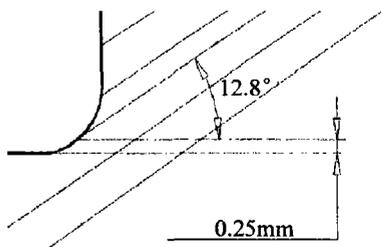


Fig. 4 Laser irradiate the bottom of the side plate

由于本设计要求钢板倾斜 $\pm 8^\circ$ 时,测量系统均能对钢板正确测量,故激光器向下倾斜角度要求当钢板正倾 8° 时,激光器不能照射到钢板的下表面,如图 5a 所示。当钢板负倾 8° 时,显然不能照射到钢板的下表面,如图 5b 所示。由图 5a 可知,激光器高度 h_1 应高于 $L \tan 8^\circ$,即 210.81mm ,此时,激光器距离钢板下表面高度 H_1 不小于 270.81mm ,激光器向下倾斜角度 $\alpha \leq 8^\circ$ 。本设计中取 $\alpha = 5^\circ$, $H_1 = 271\text{mm}$,因为 $5^\circ \leq 12.8^\circ$,所以,可以满足照亮钢板侧面底部大于 0.25mm 的地方的要求。

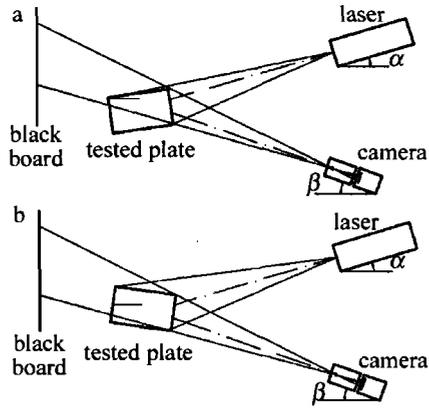


Fig. 5 The working drawing at plus or minus 8° tilt
a— 8° tilt plus b— 8° tilt minus

通过上述对激光器位置及角度的设置,钢板下表面不会被激光照亮,此时钢板下表面在摄像机上反映为测量背景,对测量没有影响。钢板上表面虽然被激光器照亮,但是摄像机受钢板视角的限制,也不会对钢板上表面成像。当钢板正倾 8° 时,由图 5a 可知,摄像机显然不会对钢板侧面成像,当钢板负倾 8° 时,摄像机的高度和角度要求为不能对钢板的上表面成像。当钢板 $\pm 8^\circ$ 有倾斜时,钢板在摄像机上厚度变化为 $h(1 - \cos 8^\circ)$,由现场采样观察当钢板厚度大于 30mm 时,钢板基本没有倾斜,而钢板厚度小于 30mm 时,钢板在摄像机上厚度最大变化量为 $\Delta h' = 30\text{mm} \times (1 - \cos 8^\circ) = 0.29\text{mm}$,在系统精度范围内可以接受。摄像机的视场中心也要求在 120mm 厚的热板的中间位置,此时摄像机距离钢板下表面高度 H_2 为:

$$H_2 = h_2 - 60\text{mm} \quad (2)$$

式中, $h_2 = L \tan \beta$, L 为激光器离待测钢板的垂直距离; β 为摄像机向上倾斜的角度。

摄像机的高度 h_2 要求大于 $L \tan 8^\circ$,即 210.81mm ,此时摄像机距离钢板下表面高度 H_2 应大于 150.81mm ,摄像机向上倾斜角度 $\beta \geq 8^\circ$ 。本设计中取 $H_2 = 240.38\text{mm}$, $\beta = 12^\circ$,经试验该设计能够很好地满足测量要求。

在水平方向上,由图 3 可知,在摄像机视场内待测钢板后面需要放置一块黑板来消除背景光线对测量系统的影响,而且在热轧钢板工业生产线中,测量设备所占的空间不可能太大,否则会影响到生产线的正常工作。本激光测厚仪允许钢板出现 $\pm 100\text{mm}$ 的离焦,故需要测量出待测钢板的离焦量,本文中采用激光三角测量原理来测量待测钢板的离焦量。采用在激光器前方设置一块在垂直方向上的挡板,挡住部分光线,此时钢板上就会出现这块挡板所成的像——一条垂直方向上光斑的边界直线,如图 6 所示,通过测量这条直线的位置就可以计算出钢板的离焦量。

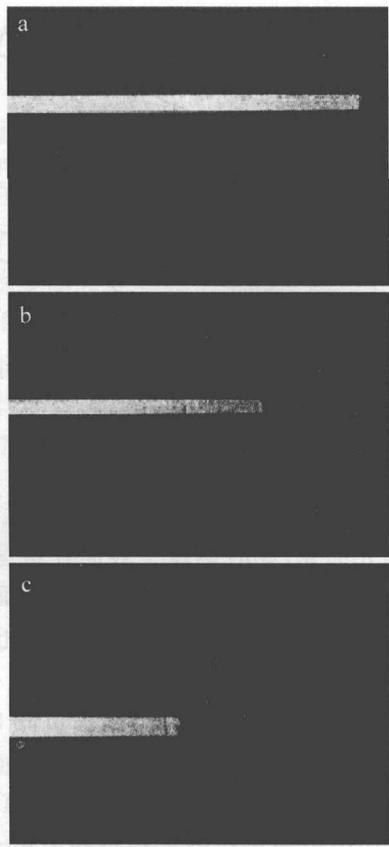


Fig. 6 The focus and defocusing images

a—defocus away b—in focus c—defocus near

在水平方向上,激光器的偏转角度 θ 为:

$$\theta = \arctan(l_1/L) \quad (3)$$

式中, l_1 是激光器和摄像机的水平方向的距离, L 为摄像机离钢板侧面的垂直距离,与(1)式和(2)式中出现的 L 为同一个量,本设计中取 $L = 1500\text{mm}$, $l_1 = 776.25\text{mm}$,由于允许钢板离焦 $\pm 100\text{mm}$,此时 $\theta \in (25.88^\circ, 29.00^\circ)$,取 $\theta = 26.55^\circ$ 。激光器挡板在热轧钢板侧面的投影要求在钢板正负离焦时始终在摄像机视场范围内。设计挡板设置在当钢板处于正焦的位置时,挡板在钢板侧面所成的像即光斑右边界线基本在 CCD 视场的中间,最好在 CCD 视场横向 $2/3$ 的位置。因为为保证测量的精度和可靠性,需要足够多的光斑上下边界线样本来计算出光斑上下边界的距离。

当摄像机与钢板的距离变化时,相同厚度的钢板在 CCD 上成像大小有不同的变化,即所产生的“绿色光带”在 CCD 的上下边缘距离不同,计算出的热轧钢板的厚度值也就不同,故需要对测量系统进行离焦补偿^[6]。离焦补偿必须以热轧钢板的离焦量为自变量,由上述可知,通过斜射式三角测量测出挡板在热轧钢板侧面所成像的位置就可以实时地测出热轧钢板的离焦量^[7]。图 6a~图 6c 反映了远点离焦、正焦、和近点离焦时直线的变化,从图中可以看出,相同厚度的钢板处于不同离焦量时,像的高度和光斑的上下边缘距离

都不相同,且距离越近挡板在热轧钢板侧面所成像的直线越靠近左边。根据斜射式三角测量的关系^[8],通过测量光斑右边界线的位置即可计算出待测钢板的离焦量。

2 系统标定及误差分析

通过上述可知,待测钢板的实际厚度 d 与钢板侧面在摄像机 CCD 上所成的光斑像高 H 和钢板的离焦量 X 有关,而钢板的离焦量 X 反映在成像光斑右边界线的位置移动量 Y 上,故待测钢板的实际厚度 d 是 H 和 Y 的函数。实际中,由于存在着机械安装误差、摄像机镜头聚焦误差、各个角度误差等因素影响,故而难以给出被测钢板厚度 d 与像高 H 、像的横向移动量 Y 精确的函数关系式。但总是可以根据 Taylor 级数展开公式,将被测钢板厚度值 d 表示为测量像高 H 和像的横向移动量 Y 的级数:

$$d = \sum_{i=1, j=1}^{\infty} (k_i + A_i Y^j + A_{i+1} Y^{j+1} + \dots + A_{i+n} Y^{j+n}) H^i \quad (4)$$

式中, k_i, A_i 为待确定的系数。根据实际估算,当 $i \geq 3$, $j \geq 2$,系统的高阶误差很小,可以忽略不计,故在系统测量中取 $i=2, j=1$ 即可,则(4)式可简化为:

$$d = (k_1 + A_1 Y)H + (k_2 + A_2 Y)H^2 \quad (5)$$

式中含有 4 个未知参量,因此,本设计采用 4 种不同厚度的钢板在正离焦、正焦、负离焦 3 个位置进行测量,得到 12 个方程,此方程为一个超定方程组,然后求解这个超定方程组即可得到 k_1, A_1, k_2, A_2 的最小二乘解。

使用 11.7mm, 61.2mm, 111.1mm, 130.5mm 4 种不同厚度的钢板,测量数据如表 1 所示。求解超定方程组可得: $k_1 = 1.553137 \times 10^{-1}$; $A_1 = 2.892116 \times 10^{-5}$; $k_2 = 5.178910 \times 10^{-6}$; $A_2 = -2.738228 \times 10^{-9}$,将上述各值代入(5)式即可完成系统的标定。

Table 1 The data analysis of actual thickness and plate measurement

number	actual	image	image move	measure	absolute
	thickness	high	toward Y	thickness	error
	d'/mm	H/pixel	Y/pixel	d/mm	$\Delta d/\text{mm}$
1	11.7	74	0	11.52	-0.18
2	61.2	386	28	61.02	-0.18
3	111.1	696	38	111.32	0.22
4	130.5	817	20	130.78	0.28
5	11.7	71	239	11.54	-0.16
6	61.2	370	263	60.89	-0.31
7	111.1	668	265	110.85	-0.25
8	130.5	784	256	130.32	-0.18
9	11.7	77	-202	11.54	-0.16
10	61.2	400	-169	61.07	-0.13
11	111.1	720	-159	111.42	0.32
12	130.5	847	-220	130.31	-0.19

由表 1 中数据可知,在正焦、远点离焦和近点离焦时测量系统经标定后的最大绝对误差为 0.32mm,在系

统要求精度 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内,满足本设计的精度要求。

3 新型激光测厚仪的冷却与控制

热轧钢板测量现场环境恶劣,激光测厚系统的降温防尘成为本设计的一个重要方面。本激光测厚仪采用水冷和中央空调制冷双重降温的方法,将外壳设计成中空,通循环水冷却箱体,同时也可以起到隔热防辐射的作用。本设计在激光器窗口和摄像机窗口设置了两块挡板,该挡板采用气动控制的方法进行控制。在不出光的情况下,挡板挡住窗口,此时设备完全密封,可以起到防尘的作用。当有钢板到来时,气动系统控制窗口挡板打开,系统正常工作,此时采用将压缩空气从内往外吹的方法进行防尘操作。

控制系统采用可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 控制^[9],当外部信号给出有钢板到来的信息时,PLC 控制气路将激光器和摄像机前的挡板打开,激光器出光,系统正常工作;当无钢板信息时,PLC 控制气路将激光器和摄像机前的挡板关闭,激光器不出光。整个系统工作时的实物图如图 7 所示,生产线现场工作图如图 8 所示。



Fig. 7 Physical picture

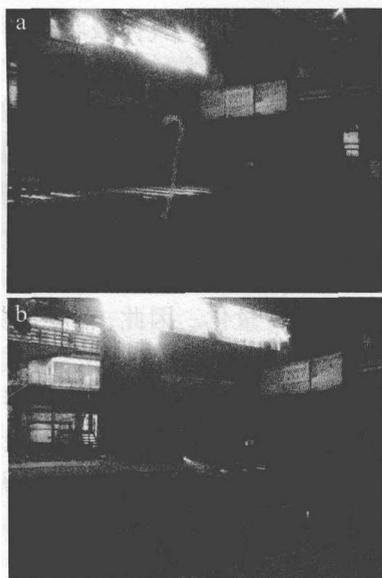


Fig. 8 Pictures of laser thickness measurement instruments

a—the working drawing without steel plate b—the working drawing with steel plate

4 结 论

实验证明,所提出的新型激光测厚仪在高温环境下能够较好地消除高温对测量的影响,同时采用气动控制的方法可以起到较好的防尘效果。测量系统采用外部信号控制的方法可以有效减少激光器的使用时间,从而提高测量系统的整体寿命。测量结果以电流信号给出,通过比较测量结果的电流和轧机轧辊高度的电流信号的大小,起到保护轧机的作用。经现场测试实验,本新型激光测厚仪在 $8\text{mm} \sim 120\text{mm}$ 范围内,测量精度能够稳定地达到 $\pm 0.5\text{mm}$,能够很好地满足测量热轧钢板的要求。

参 考 文 献

- [1] JIA Z G, LU Z G. Online testing technology of thickness[J]. Instrumentation Technology, 2009(2):19-21 (in Chinese).
- [2] ZHU Q F, ZHANG X Y, LI S A. Application of X-ray measuring technique in hot strip mill[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(5): 321-323 (in Chinese).
- [3] BAI S J. JGC-H1A laser thickness gauge in the application of Handan iron and steel plate[J]. Shandong Metallurgy, 2004, 26(s1):281-282 (in Chinese).
- [4] ZHAO B, WANG D, XIONG Zh Y. A kind of plate thickness of laser measurement device; China, CN101825438 A [P]. 2010-09-08 (in Chinese).
- [5] WANG W, CHEN H X. Inhibiting noise of light spot image[J]. Laser Technology, 2007, 31(1):54-57 (in Chinese).
- [6] SHEN M D, ZHANG M, ZHANG F Q. Effect of defocused image on area measurement and error amendment[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1240-1244 (in Chinese).
- [7] MA G G, CHANG J. Research on the influence of the defocus on the optical measurement[J]. Ship Electronic Engineering, 2008(9): 28-32 (in Chinese).
- [8] LIU W, HAN X D, AI H. Application of laser triangulation in displacement measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(4):103-107 (in Chinese).
- [9] WANG P, LIU F Y. The study on the reliability of the PLC automatic control system[J]. Electric Drive, 2001(1):36-38 (in Chinese).