

## 接触线几何参数 CCD 交汇测量分辨率及精度分析

潘雪涛<sup>1,2,3</sup>, 高晓俭<sup>1</sup>, 谷牧<sup>1</sup>, 孟飞<sup>1</sup>, 蔡建文<sup>1</sup>

1. 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002;
2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
3. 常州市光电子材料与器件重点实验室, 江苏 常州 213002)

**摘要:** 采用双 CCD 交汇测量技术对电力机车接触导线磨损面边界点进行精确定位, 可以实现导线高度、拉出值、磨损宽度等几何参数的非接触实时测量, 而边界点定位精度及分辨率会受测量系统的光学参数、结构参数等的影响。基于交汇测量机理, 推导出了接触线几何参数测量的表达式, 详细分析了分辨率和测量精度与边界点位置、CCD 像元尺寸、成像镜头焦距、两 CCD 之间的距离、交汇仰角等参数之间的关系, 并进行了数值模拟。在此基础上, 结合测量条件及技术指标完成了各参数的优化设计, 得到了理论上能达到的最佳测量精度和分辨率, 同时对测量装置的制作和安装提出了合理化的建议。

**关键词:** 交汇测量; 电力接触导线; 分辨率; 定位精度; 优化设计

**中图分类号:** TN206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3627-06

## Resolution and accuracy analysis of CCD intersection measuring on contact wire geometry parameters

Pan Xuetao<sup>1,2,3</sup>, Gao Xiaojian<sup>1</sup>, Gu Mu<sup>1</sup>, Meng Fei<sup>1</sup>, Cai Jianwen<sup>1</sup>

1. School of Optoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
3. Changzhou Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Changzhou 213002, China)

**Abstract:** Dual CCD intersection measurement techniques are used for precise positioning the abrasive surface boundary points of electric locomotives' contact wire, the wire height, stagger values, abrasive width and other geometric parameters can receive non-contact and real-time measurements. The accuracy and resolution of positioning boundary points are limited by optical parameters of the measurement system, the impact of structural parameters, and so on. According to the dual CCD intersection measurement principle, a mathematics model of contact wire geometry measurement was established, the resolution and accuracy of the boundary positions, CCD pixel size, the imaging lens focal length, the distance between the two CCD, the relationship between intersection angle, and other parameters were analyzed in detail, and numerical simulations were made. Based on this, by means of the measurement conditions and technical specifications, the optimization of the parameters was completed, the optimum measurement accuracy and resolution which theoretically can be achieved was obtained, and meanwhile,

收稿日期: 2014-03-18; 修订日期: 2014-04-16

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目(13KJD460001); 江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养项目;  
国家级大学生创新创业训练计划

作者简介: 潘雪涛(1973-), 男, 副教授, 主要从事激光微纳加工、信息处理、光电检测技术等方面的研究。Email: pxtpqz@163.com

rational measures were put forward for the production and installation of measuring devices.

Key words: intersection measurement; power contact wire; resolution; positional accuracy; optimal design

### 0 引言

在电气化铁路的施工和日常运营中,必须加强对接触线几何参数(导线高度、拉出值、磨损创面宽度)的实时检测,以便进行及时调整,减小磨损,延长其使用寿命<sup>[1]</sup>。如图 1,光照后,导线磨损部分与其他部分的反射率具有明显的梯度变化,其图像边缘表现为典型的线条边缘。因此,基于视差和光学三角原理<sup>[2-5]</sup>,利用双 CCD 交汇测量技术<sup>[6]</sup>,获得磨损导线图像信号,采用边缘检测算法得到边缘点 A、B 的图像坐标值。根据几何关系,通过坐标变换可以计算出 A、B 两点的空间坐标值,这样就能够实现接触线几何参数的实时测量。由于 CCD 摆放位置、摄像机光学参数和测量系统结构参数等的不同会影响空间目标的探测精度和分辨率<sup>[6-7]</sup>,所以结合测量的实际条件和技术指标对各参数进行优化设计是实现几何参数精确测量的前提。

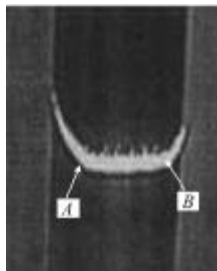


图 1 磨损接触导线图像  
Fig.1 Abrasive contact wire

### 1 导线磨损面边缘点空间坐标数学模型

测量中使用线阵 CCD 图像传感器,其像敏面尺寸为 2T,摄像机镜头焦距为 f,光轴与 y 轴夹角(即交汇仰角)为 α,两像敏面中心距为 2L。两 CCD 交汇形成一光电靶面(以图 2 中的虚线圆近似表示)。设边缘点 A 在 CCD1 和 CCD2 上对应成像点的坐标值分别为(x<sub>1</sub>, 0)、(x<sub>2</sub>, 0),则根据几何关系可得其空间坐标表达式<sup>[7]</sup>,如公式(1)、(2)所示。同理可得 B 点空间坐标值。

$$x = \frac{(x_1 + x_2)(L - f \sin \alpha) f}{(x_1 - x_2) f \cos 2\alpha - (x_1 x_2 + f^2) \sin 2\alpha} \quad (1)$$

$$y = \frac{2x_1 x_2 (L \sin \alpha - f) \sin \alpha - (x_1 - x_2)(2L \sin \alpha - f) f \cos \alpha - 2L f^2 \cos^2 \alpha}{(x_1 - x_2) f \cos 2\alpha - (x_1 x_2 + f^2) \sin 2\alpha} \quad (2)$$

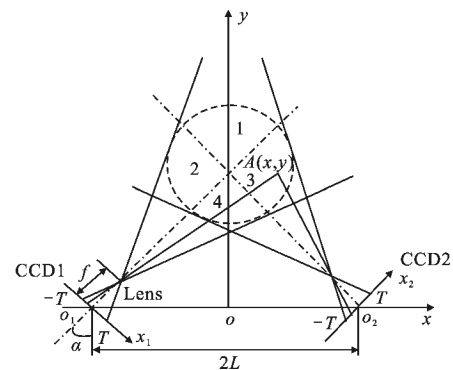


图 2 双 CCD 交汇测量原理图

Fig.2 Principle diagram of dual CCD intersection measuring

### 2 边缘点坐标测量的分辨率分析

测量分辨率为双 CCD 所能分辨的最小测量点<sup>[6]</sup>,即两个 CCD 必须能同时分辨出被测点。设 ΔX<sub>1</sub>、ΔX<sub>2</sub> 表示双 CCD 沿 x 轴(拉出值)方向的分辨率;ΔY<sub>1</sub>、ΔY<sub>2</sub> 表示双 CCD 沿 y 轴(导线高度)方向的分辨率,则系统分辨率 ΔX、ΔY 分别以数值较小的一个表示。

对应于 CCD1,设 ΔT 为 CCD 像元大小,由公式(1)、(2)可得:

$$\Delta X_1 = \left| \frac{dx}{dx_1} \right| \Delta x_1 = \left| \frac{[y \cos \alpha + (x+L) \sin \alpha - f]^2}{(y - f \cos \alpha) f} \right| \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta Y_1 = \left| \frac{[y \cos \alpha + (x+L) \sin \alpha - f]^2}{(x+L - f \sin \alpha) f} \right| \Delta T \quad (4)$$

同理,对应于 CCD2,有:

$$\Delta X_2 = \left| \frac{[y \cos \alpha - (x-L) \sin \alpha - f]^2}{(y - f \cos \alpha) f} \right| \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta Y_2 = \left| \frac{[y \cos \alpha - (x-L) \sin \alpha - f]^2}{(x-L + f \sin \alpha) f} \right| \Delta T \quad (6)$$

则 ΔX=min(ΔX<sub>1</sub>, ΔX<sub>2</sub>), ΔY=min(ΔY<sub>1</sub>, ΔY<sub>2</sub>)。

由此可知,ΔX 和 ΔY 与 L、ΔT、f、α 以及 x、y 的坐标值(即边缘点所在的位置)有关。对分辨率与各参数的关系进行数值模拟,可以得出以下结论。

(1) 如图 3 所示,在光电靶面内,分辨率都以 x

轴对称分布,  $y$  轴坐标值越小(即导线高度越小, 与 CCD 越接近)分辨率就越高。若边缘点落在第 1 区域, 则其分辨率较低; 而落在第 4 区域, 其分辨率较高。

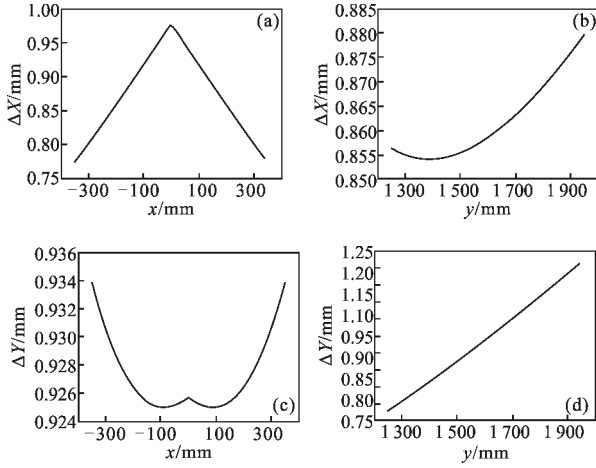


图 3 测量分辨率与边缘点坐标位置的关系曲线

Fig.3 Relation curves of measurement resolution and edge point coordinates

(2) 如图 4 所示, 镜头焦距  $f$  越小, 边缘点分辨率越差。当  $f$  大于 20 mm, 分辨率较高, 而且焦距变化对分辨率的影响较小, 故宜选用长焦镜头。

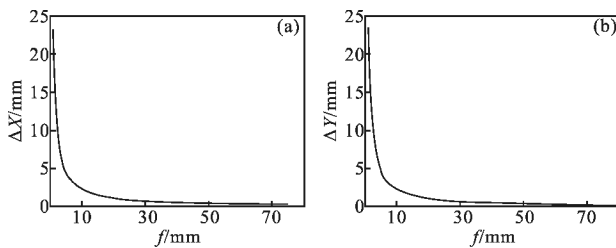


图 4 测量分辨率与焦距的关系曲线

Fig.4 Relation curves of measurement resolutions and focal length

(3) 如图 5 所示, 边缘点在  $x$  方向的分辨率与  $L$  呈近似线性关系, 而  $y$  方向分辨率与  $L$  的关系相对复杂。 $L$  在 1 200~1 800 mm 之间,  $y$  方向分辨率较好且  $L$  的变化对其影响较小。综合两个方向的分辨率变化曲线,  $L$  宜在 1 000~1 500 mm 之间选择。

(4) 如图 6 所示, 交汇仰角与分辨率近似呈二次曲线关系。当  $\alpha$  取 45° 分辨率最差, 小于或者大于该

值, 分辨率逐渐增大。但  $\alpha$  越大, 其光电靶面越小, 影响测量系统探测范围, 所以一般选择较小的  $\alpha$  值。

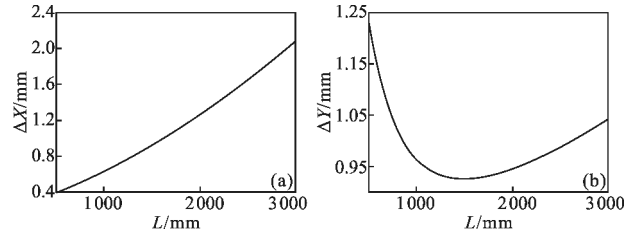


图 5 两 CCD 间距  $L$  与测量分辨率的关系曲线

Fig.5 Relation curves of distance  $L$  between the two CCD and measurement resolution

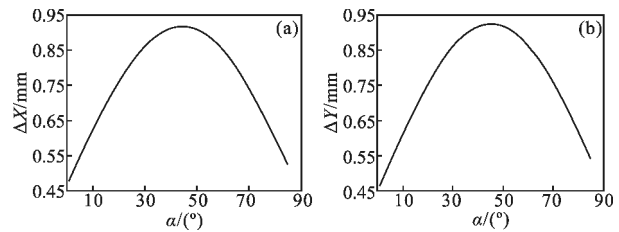


图 6 交汇仰角  $\alpha$  与测量分辨率的关系曲线图

Fig.6 Relation curves of intersection angle  $\alpha$  and measurement resolution

### 3 边缘点坐标测量精度分析

由公式(1)、(2)可知, 边缘点 A、B 的坐标值与  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $L$ 、 $T$ 、 $f$ 、 $\alpha$  五个参数有关。根据误差传递理论<sup>[8]</sup>, 以  $y$  坐标测量误差  $\Delta y$  为例进行分析。

$$\Delta y = \sqrt{(a_{x_1})^2 + (a_{x_2})^2 + (a_{2L})^2 + (a_f)^2 + (a_\alpha)^2} \quad (7)$$

式中:  $a_{x_1}$ 、 $a_{x_2}$ 、 $a_{2L}$ 、 $a_f$ 、 $a_\alpha$  为各分项误差。根据公式(2)可以得到各分项误差:

$$a_{x_1} = \frac{[2x_2(f\sin\alpha - L)f + (x_2^2 + f^2)(2L\sin\alpha - f)\cos\alpha]f\sin 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta x_1 + \frac{2[Lf^2\cos^2\alpha - x_2^2(L\sin\alpha - f)\sin\alpha]f\cos 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta x_1 \quad (8)$$

$$a_{x_2} = \frac{[2x_1(f\sin\alpha - L)f - (x_2^2 + f^2)(2L\sin\alpha - f)\cos\alpha]f\sin 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta x_2 - \frac{2[Lf^2\cos^2\alpha - x_1^2(L\sin\alpha - f)\sin\alpha]f\cos 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta x_2 \quad (9)$$

$$a_{2L} = \frac{2x_1x_2\sin^2\alpha - (x_1 - x_2)f\sin 2\alpha - 2f^2\cos^2\alpha}{2[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_{2L} \quad (10)$$

$$a_f = \frac{(x_1 - x_2)[(x_1 - x_2)f^2\cos\alpha - 2x_1x_2L\sin^2\alpha - 2Lf^2\cos^2\alpha]\cos 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_f + \frac{2(x_1 - x_2)[x_1x_2(L\sin\alpha - f) - Lf^2\sin\alpha]\cos\alpha\sin 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_f + \frac{2x_1x_2[x_1x_2\sin\alpha + 2Lf - f^2\sin\alpha]\sin 2\alpha}{[(x_1 - x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2 + f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_f \quad (11)$$

$$a_{\alpha} = \frac{2(x_1x_2+f^2)\{2x_1x_2(f\sin\alpha-L)\sin^2\alpha + [(x_1-x_2)\cos\alpha-2L]f^2\cos^2\alpha\}}{[(x_1-x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2+f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_{\alpha} + \frac{2(x_1-x_2)\{x_1x_2[L\sin 2\alpha - f\cos\alpha(2-\cos 2\alpha)] - Lf^2\sin 2\alpha\}f}{[(x_1-x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2+f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_{\alpha} - \frac{(x_1-x_2)^2[2L-f\sin\alpha(2+\cos 2\alpha)]f^2}{[(x_1-x_2)f\cos 2\alpha - (x_1x_2+f^2)\sin 2\alpha]^2} \Delta_{\alpha} \quad (12)$$

同理可求得  $x$  坐标测量误差  $\Delta x$ 。则坐标测量的综合误差可定义为  $\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ 。

同样对测量误差与各参数的关系进行数值模拟,可以得出以下结论。

(1) 如图 7 所示,坐标测量精度与边缘点在 CCD 上的成像位置有关。由其成像位置分析可知,边缘点离  $x$  轴越近,误差越小,反之则误差越大。即被测点落在光电靶面内第 1 区域,其测量精度较差,而落在第 4 区域测量精度较好。

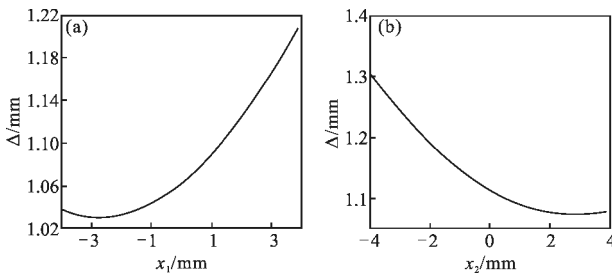


图 7 坐标测量误差与被测点成像位置的关系曲线  
Fig.7 Relation curves of coordinate measurement error and measuring point imaging

(2) 如图 8 所示,镜头焦距越大,测量精度越高。当  $f$  大于 20 mm,其变化基本不对测量精度产生太大的影响,故宜采用长焦镜头。

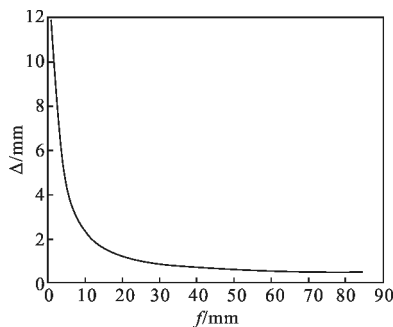


图 8 坐标测量误差与焦距的关系曲线  
Fig.8 Relation curve of coordinate measurement errors and focal length

(3) 如图 9 所示,两摄像机间距  $2L$  越大,测量精度越低。

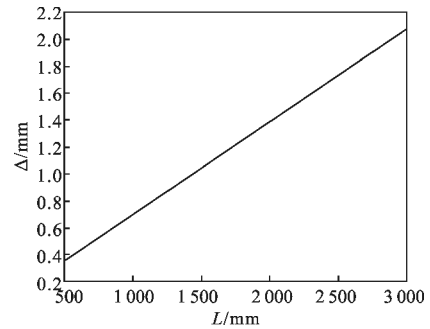


图 9 坐标测量误差与摄像机间距的关系曲线  
Fig.9 Relation curve of distance between camera and coordinate measuring errors

(4) 如图 10 所示,交汇仰角在  $30^\circ \sim 70^\circ$  区间,测量精度较高,而且角度的变化对误差的影响较小。仰角过大或者过小,误差值均显著增大。

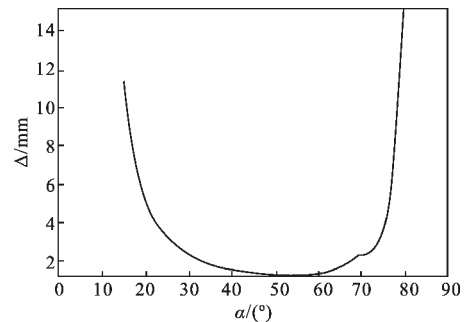


图 10 坐标测量误差与交汇仰角关系曲线图  
Fig.10 Relation curve of coordinate measurement errors and intersection angle

## 4 交汇测量系统各参数的优化设计

### 4.1 测量条件分析

根据相应国家标准<sup>[9]</sup>,电力机车接触导线高度 5 650~6 200 mm,测量误差  $\pm 5$  mm,分辨率优于 2 mm;拉出值 300 mm,测量误差  $\pm 2$  mm,分辨率优于 2 mm;接触导线直径 10.2~14.5 mm,磨损面宽度测量误差  $\pm 2$  mm。

若光电靶面内切圆半径取 350 mm,可以满足导线高度和拉出值的测量范围。依据测量精度和实时性要求,选用 LIS1024 图像传感器,其像元间距为  $7.8 \mu\text{m}$ ,光敏面尺寸为 7.988 mm,则  $T$  为 3.994 mm,  $\Delta_{x1}$  和  $\Delta_{x2}$  均为  $7.8 \mu\text{m}$ 。测量系统镜头焦距为 30 mm,

则  $\Delta_r=0.03\text{ mm}$ 。当  $R、f、T$  确定后, 结构参数  $L$  和  $\alpha$  取不同的值将会影响边缘点的探测分辨率和精度。

### 4.2 结构参数优化设计结果

根据测量要求, 最优结构参数的设计应该达到以下条件: 在光电靶面内, 综合误差的最大值为最小, 且小于  $2\text{ mm}$ ;  $x、y$  方向(即拉出值和导线高度)分辨率满足要求; 考虑到加工、安装调试方便,  $L$  小于  $1450\text{ mm}$ 。

利用前文得到的各类表达式, 编制优化设计程序, 计算得到的最优结构参数为:  $\alpha=36.1^\circ, L=1445.8\text{ mm}$ , 此时边缘点测量误差在  $1.009\sim 1.962\text{ mm}$  区间, 拉出值和导线高度测量分辨率分别在  $0.664\sim 0.899\text{ mm}$  区间和  $0.884\sim 1.4493\text{ mm}$  区间, 因此满足测量要求。边缘点探测精度及分辨率分布曲线分别如图 11、12 所示。

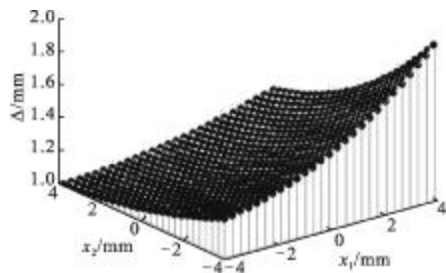


图 11 最优结构条件下光电靶面内坐标测量综合误差分布曲线  
Fig.11 Distribution curve of coordinates measuring comprehensive errors in photoelectric target surface under the condition of optimal structure

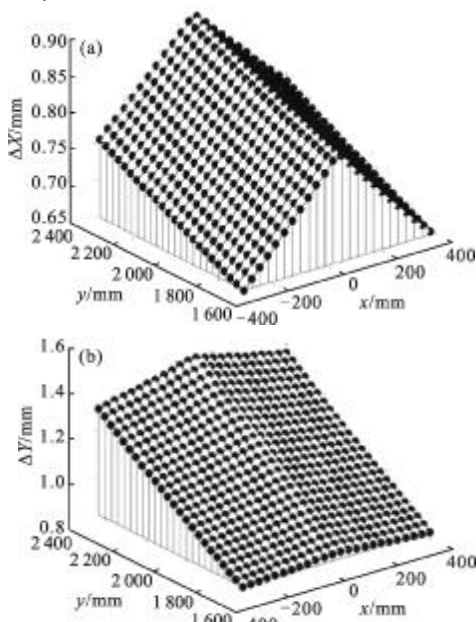


图 12 最优结构条件下光电靶面内  $x、y$  方向测量分辨率分布曲线  
Fig.12 Distribution curves of  $x、y$  direction measurement resolution in photoelectric target surface under the condition of optimal structure

### 4.3 接触线双 CCD 交汇测量系统结构

根据设计给定的参数进行样机制作, 其结构如图 13 所示。两个摄像机水平反向放置, 在其前方适当位置各安装一个反射镜, 通过调整平面反射镜的角度就可以实现测量系统交汇仰角的精确调整, 这样的结构极大地减小了安装和调整的难度。同时在保持双 CCD 间距  $2L$  不变的情况下减小了系统体积, 质量更轻, 便于安装固定。

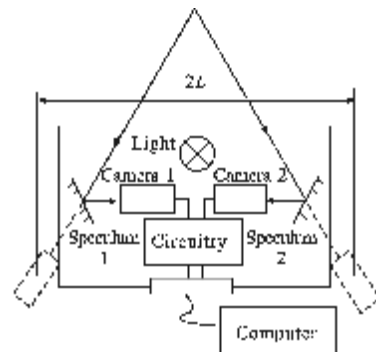


图 13 接触线双 CCD 交汇测量系统结构示意图

Fig.13 Structure diagram of dual CCD intersection measurement of contact wire system

## 5 结 论

通过上述分析, 可以得出以下结论:

(1) 该装置结构参数中的  $\alpha$  为  $36.1^\circ, L$  为  $1445.8\text{ mm}$ 。此时磨损面边缘点坐标测量误差、导线高度和拉出值的测量分辨率均能满足技术指标要求。同时双 CCD 交汇靶面内切圆半径为  $350\text{ mm}$ , 最高点和最低点距地面高度分别为  $6333\text{ mm}$  和  $5633\text{ mm}$ , 满足接触线高度和拉出值的变化范围。

(2) 在双 CCD 交汇靶面内, 离基线(两 CCD 间的连线)较远的区域坐标测量误差值较大, 分辨率较差。即接触线处于图 2 所示的第 1 区域内, 测量精度及分辨率均较差, 而处于第 4 区域内, 测量精度及分辨率均较好。因此在实际测量中, 应根据导线的大致高度合理安装测量装置, 尽量使导线处于第 4 区域, 以获得较佳的测量精度和分辨率。

(3) 在各影响因素中, 边缘点在 CCD 上的成像位置对测量精度影响最大, 然后依次是焦距和两 CCD 间距, 交汇仰角的影响最小。由于成像位置  $x_1$  和  $x_2$  随着导线位置的不同而发生变化, 故该误差分量是随机误差。通过选用高分辨率图像传感器或者

- 出版社, 2003.
- [2] Xing Jichuan, Luo Xiaohong. Measurement of truck carriage volume with laser triangulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3083-3087. (in Chinese)  
邢冀川, 罗小红. 利用激光三角法测量货车车厢体积[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3083-3087.
- [3] Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)  
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Sun Yanpeng, Liang Xiaobao, Lang Yao. FPGA implementation of laser spot center location algorithm based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 970-973. (in Chinese)  
孙延鹏, 梁小骛, 郎瑶. 激光光斑中心圆拟合定位算法的 FPGA 实现[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 970-973.
- [5] Fan Fuming, Cheng Lianglun, Xiao Lei, et al. Establishment and analysis of auto-focus model for laser triangulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2028-2032. (in Chinese)  
范富明, 程良伦, 肖磊, 等. 激光三角测距法自动调焦模型的建立与分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2028-2032.
- [6] Yang Huayong, Lu Haibao. Optimization on structure parameters of intersection measuring system with dual-CCD [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(4): 347-351. (in Chinese)  
杨华勇, 吕海宝. 双 CCD 交汇测量系统结构参数的优化设计[J]. *光学技术*, 2001, 27(4): 347-351.
- [7] Zhong Yanli, Jia Fujuan, Ding Ling. Designing way of two linerarray CCD intersection measuring system [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(11): 481-483. (in Chinese)  
钟堰利, 贾福娟, 丁凌. 双 CCD 交汇测量系统的设计方法 [J]. *光学技术*, 2002, 28(11): 481-483.
- [8] Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)  
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.