

# 基于 CCD 拼接的细玻璃管直径测量技术

仲思东<sup>1</sup> 徐 锐<sup>1</sup> 梅天灿<sup>1</sup>

(1 武汉大学电子信息学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:** 提出了一种基于 CCD 拼接技术的高精度直径测量方法。测量范围为 1.2~2.2mm, 测量精度为 1 $\mu$ m, 并阐述了其测量原理; 对在显微放大情况下的相机标定、边缘定位等, 进行了深入研究并分析了系统的测量精度; 最后通过试验验证了所提方法的正确性。

**关键词:** 直径测量; CCD 拼接; 相机标定; 边缘定位

**中图法分类号:** P258

光纤连接器是光纤通信系统中使用量最大的光无源器件, 而在光纤连接器中大量使用的细玻璃套管的外径的实时测量一直是生产过程中所面临的难题之一。因为这种玻璃套管的外径值为 1.2~2.2mm, 要求测量精度为 2 $\mu$ m, 同时应能实现实时测量, 这正是现在各种测径方法所不能完成的“空白”区域<sup>[1]</sup>。当前在玻璃套管生产过程中都是用工艺来保证外径的精度, 这种方法所需的成本很高, 而且不能进行实时在线监测。文献[2]提出了一种基于线阵 CCD 的外径测量方法, 但对于工件歪斜所引入的误差问题以及对于高速运动测量问题难以解决。因而, 本文提出了一种基于面阵 CCD 拼接技术的外径测量方法, 实现了在玻璃管拉制过程中对玻璃管的外径进行实时在线的高精度测量。

## 1 测量原理

由于要求测量精度较高(测量范围为 1.2~2.2mm), 因此, 考虑使用放大成像进行测量, 但是放大成像后若采用单片面阵 CCD 像传感器接收必然引起视场与物空间分辨率之间的矛盾。为解决高分辨率、大视场的矛盾, 笔者采用了两片 CCD 的拼接技术<sup>[2]</sup>。

针对设计任务和要求采取的方法是: 用两个 CCD 分别对玻璃管的两个边缘成像, 以一定的边缘提取算法, 通过软件对边缘进行精确定位, 同时

对两个 CCD 进行精确定标, 在误差校正之后就可以精确地测得玻璃管直径。

用 CCD 测量玻璃管的原理如图 1 所示, 其中,  $D$  为待测玻璃管的直径;  $W_l$ 、 $W_r$  分别为两边缘的像到两片 CCD 中心的物方距离;  $L$  为两片 CCD 面阵之间的物方距离。

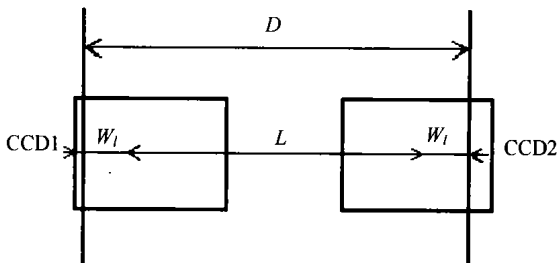


图 1 测量原理图

Fig. 1 Principle of Measure

用两个 CCD 拼接技术分别来成像显示玻璃管的边缘。本测量系统采用了 90° 棱镜进行转向, 这样一方面容易调整 CCD 的放置, 使两 CCD 的拼接达到要求, 另一方面使 CCD 部分的结构变得紧凑。本设计中应用 CCD 拼接的光路系统如图 2 所示。图中  $CD \sim AB$  对应直径范围为 1.2~2.2mm, 选择物镜的适当成像倍率, 确定两 CCD 之间的适当距离, 可以在不移动两个 CCD 面的基础之上使两边缘分别成像在 CCD1 和 CCD2 上。

光阑设在成像物镜的像方焦平面  $F'$  处。光阑为系统的孔径光阑, 形成了物方远心光路, 以控

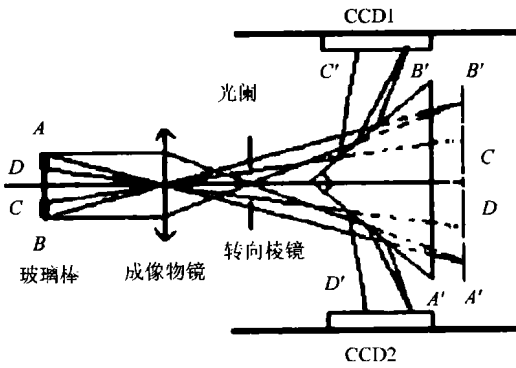


图 2 光路系统图  
Fig.2 Optical Path of System

制轴外物点主光线的方向,使  $AB$  在 CCD 光敏面的像点位置不变,从而消除玻璃管在拉制过程中的前后摆动对测量精度的影响。

试验中采用  $768 \text{ 像素} \times 576 \text{ 像素}$  的两片面阵 CCD,光敏面尺寸为  $5 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 。用 10 倍的显微物镜作为镜头,其焦距  $f=16.1157 \text{ mm}$ 。根据系统的测量范围 ( $1.2 \sim 2.2 \text{ mm}$ ) 和测量精度 ( $1 \mu\text{m}$ ),选择镜头的放大倍率为 8 倍,物距和像距分别为  $l=18.1302 \text{ mm}$  和  $l'=145.0413 \text{ mm}$ ,像素分辨率为  $5/(768 \times 8)=0.8138 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

由于玻璃管拉制过程是一个动态过程,玻璃管是沿着轴向不断运动的。因此,在实时在线测量过程中,必须保证左右像片在同一直径上获得,即两像片是同时获取的。为解决左右像片的同步问题,采用 RGB 图像卡来保证图像的同时获取。RGB 图像卡带有三路独立的 A/D 采样、量化和传输电路,采集的数字图像存于不同的帧存储器或传送到计算机不同的内存块,具体实现的原理如图 3 所示。

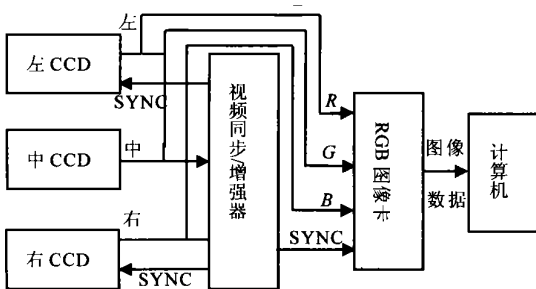


图 3 RGB 模式下的图像采集  
Fig. 3 Image Capture Under RGB Mode

从图 3 可以看出,系统从中间相机的视频信号中提取出同步信号,把同步信号放大后与左、右两相机同步,解决同步采集问题,左、中、右相机的信号都进入 RGB 图像卡中经三路 A/D 通道同时数字化。中间相机既要作为同步源又需数字化,视

频信号有所损失,该路图像质量下降,在测量时笔者采用左右相机的图像作为信号源进行测量。

## 2 双相机标定

测量结果的精度很大程度上依赖于相机标定的精度,所以发展高精度的摄像机标定技术是提高测量精度的一种有效手段。在不同的应用场合,所需知道的相机参数不尽相同,标定的方法也各异。摄像机一般标定方法的基本思想是利用若干参考点在物方和像方的已知坐标,根据成像的数学模型,利用最小二乘估计理论估计出摄像机的各种元素或空间变换系数。而本设计中采用基于拼接技术测量一维尺寸的双 CCD 相机的标定参数和方法又不同于一般的标定参数方法。

在本试验情况下,作为待测量的直径为一维量。因此,所需知道的相机参数为左右两相机的物像比例和两 CCD 面阵之间的偏移。

### 2.1 两个 CCD 的物像比例关系 $\hat{\alpha}_L$ 、 $\hat{\alpha}_R$

本设计是运用 CCD 拼接技术并结合计算机图像处理来高精度地测量细玻璃丝的直径,目的是要通过对获取二维图像的处理得到物空间的细玻璃丝的直径,而并不需要确定图像上任意点的物方坐标,即物像空间点-点的转换关系。基于此,并不需要标定出每个 CCD 相机的内、外方位元素的具体值,也不需要像 DLT 标定方法那样标定出经过一定变换以后的相机内、外方位元素的某些函数值。在本设计中,通过对获取的二维图像的处理可以得到细玻璃管在每个 CCD 上的像经量化后在行方向上所包含的像素个数,表现在图像坐标系中即为图像边缘点的  $x$  坐标。针对这种情况,如果知道物方某一长度对应着像方多少像素,即物像比例关系  $\hat{\alpha}_L$ 、 $\hat{\alpha}_R$  (单位为  $\text{mm}/\text{像素}$ ),那么就可以得到物方细玻璃管边缘的尺寸。

### 2.2 两个 CCD 中心的物方水平距离 $L$

由于在计算细玻璃丝的直径时必须知道两个 CCD 中心的物方水平距离  $L$ ,如图 4 所示,故必

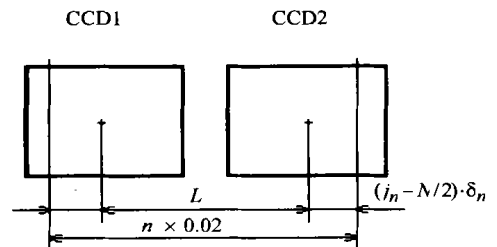


图 4 CCD 拼接  
Fig. 4 CCD Assembling

须对两个 CCD 中心的物方水平距离  $L$  进行标定。整个标定过程都是使用一块 50 线的光栅进行,如图 5 所示。标定前,要对系统作如下调整:

1) 调整光栅所在平面,使光栅条纹方向尽量处于竖直方向(标定物像比例和两个 CCD 中心物方水平距离时),或使光栅条纹尽量处于水平方向(标定两个 CCD 中心垂直距离时);

2) 调整相机,使其主光轴方向尽量垂直于标定平面;

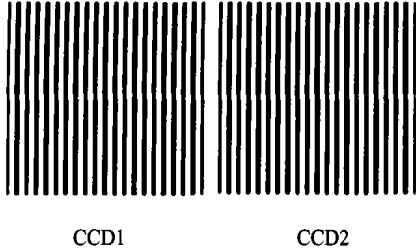


图 5 光栅图像  
Fig. 5 Image of Grating

3) 用水准器调整 CCD 相机成水平状态。  
标定  $\hat{q}_L$ 、 $\hat{q}_R$  的基本思想是:对于物空间来说,由于使用的是 50 线的光栅,其栅距为 1/50mm 是已知的,因此可以选取一个或几个栅距作为物空间的已知距离,记为  $m$ 。再通过软件对光栅经 CCD 所成的像进行处理,求出所选取的物方距离(1 个或几个栅距)对应着像方图像行方向上的像素个数,记为  $\mu$ 。在图像处理时可以对两幅图像成像质量好的区域各开一个窗口,再对窗口内的图像进行处理,则物像比例关系为:

$$\hat{q}_L = \frac{mL}{\mu_L}, \hat{q}_R = \frac{mR}{\mu_R} \quad (1)$$

为了提高  $\hat{q}_L$ 、 $\hat{q}_R$  的标定精度,可以对多个物方距离进行上述处理,再用平均法或最小二乘估计理论求出  $\hat{q}_L$ 、 $\hat{q}_R$  的值。

在标定两个 CCD 中心的物方水平距离时,由于选取的两个边缘分别位于两个 CCD 像敏面上,而且两个 CCD 分隔开了,因此,仅从图像上无法知道所选取的边缘之间共有多少个栅距。为了解决这个问题,在光栅上作一个标志,在显微镜下可以数出这两个标志间共有多少个完整栅距,记为  $n$ ,然后在左、右两幅图像上分别选取一条刻线提取出其位置,分别记为  $j_L$ 、 $j_R$ 。由于两条标志线之间的栅距个数已知,因此,从图像上就可以得到所开的两个窗口内两条参考线间共有多少个完整的栅距,记为  $n'$ 。又设图像行方向上总像素为  $N$ ,则两个 CCD 中心的物方水平距离为:

$$L = n' \times 0.02 + (j_L - N/2) \times \hat{q}_L +$$

$$(N/2 - j_R) \times \hat{q}_R \quad (2)$$

完成了双相机的标定过程即完成了两 CCD 焦面的拼接。

### 3 图像边缘定位

由于所选择的镜头为显微镜头,在系统完成了标定之后测量的精度主要取决于图像上边缘的定位精度。本文选择了一种多项式插值的边缘检测算法以达到亚像元的边缘检测精度<sup>[3,4]</sup>。

对连续图像  $f(x, y)$ ,求导得  $R(x, y)$ ,图像的坐标在  $R(x, y)$ 最大的点。为得到亚像元的定位精度,可利用最大梯度值两边的梯度值所提供的信息来求  $R(x, y)$ 的插值函数  $\Phi(x, y)$ ,然后求  $\Phi(x, y)$ 的最大值点的坐标即为边缘点的坐标。

在本试验中,对梯度图像  $R(i, j)$ 在  $X$  方向取 3 点  $R(i-1, j)$ 、 $R(i, j)$ 、 $R(i+1, j)$ ,求  $R(x)$ 的二次多项式插值函数  $\Phi(x)$ ,对  $\Phi(x)$ 求导并令其等于零,求出导数最大点的  $X$  方向坐标。

$$y(x) = \sum_{j=0}^n l_j^{(n)}(x) f_j \quad (3)$$

$$l_j^{(n)}(x) = \frac{(x-x_0) \cdots (x-x_{j-1})}{(x_j-x_0) \cdots (x_j-x_{j-1})} \rightarrow \frac{(x-x_{j+1}) \cdots (x-x_n)}{(x_j-x_{j+1}) \cdots (x_j-x_n)} \quad (4)$$

式中,  $y(x)$  为插值函数;  $l_j(x)$  为插值基函数;  $f_j$  为函数值;  $x_j$  为插值基点。在  $X$  方向,用  $\Phi(x)$  为插值函数,  $R(i-1, j)$ 、 $R(i, j)$ 、 $R(i+1, j)$  为函数值,  $x_{j-1}$ 、 $x_j$ 、 $x_{j+1}$  为插值基点,分别代入上两式,并令  $\frac{d\Phi(x)}{dx} = 0$ ,得到边缘坐标  $X_\epsilon$  为:

$$X_\epsilon = x_i + \frac{R(i-1, j) - R(i+1, j)}{R(i-1, j) - 2R(i, j) + R(i+1, j)} \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

此边缘检测方法可达到 0.1 亚像素级的精度<sup>[3,4]</sup>。

### 4 精度分析

计算直径的公式为:

$$D = L + W_L \times \hat{q}_L + W_R \times \hat{q}_R \quad (6)$$

式中,  $W_R$  和  $W_L$  分别为两边像到两 CCD 面阵中心之间的像素数,可由图像的边缘定位得到。

根据误差理论,直径  $D$  的极限误差  $\Delta D$  为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta D = \frac{\partial D}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial D}{\partial \hat{q}_L} \Delta \hat{q}_L + \frac{\partial D}{\partial \hat{q}_R} \Delta \hat{q}_R + \frac{\partial D}{\partial W_L} \Delta W_L + \frac{\partial D}{\partial W_R} \Delta W_R + \quad (7)$$

$$\Delta D = \Delta L + W_L \times \Delta \hat{q}_L + \hat{q}_L \times \Delta W_L + W_R \times \Delta \hat{q}_R + \hat{q}_R \times \Delta W_R \quad (8)$$

用上节所述的边缘检测方法可以使边缘定位的精度达到 0.1 亚像素级, 因此  $\Delta W_L$  和  $\Delta W_R$  均为 0.1 像素。

试验中采用了 50 线的光栅对相机进行标定。要求光栅的任意两刻线间的垂距误差小于 0.1。标定时一个 CCD 面阵可以对 20 条刻线成像, 而根据标定得到的参数可知半个栅距(0.01mm)大约对应 CCD 面阵上的 15 个像素。标定过程中, 在 CCD 面阵上的每一条水平扫描线都计算了 40 次, 计算次数  $I$  大于 10 000 次。因此,

$$\Delta \hat{q}_L = \Delta \hat{q}_R = \pm \left[ \left( \frac{1}{N} \Delta d_s + \frac{d_s}{N^2} \Delta N \right) \sqrt{I} \right] =$$

$$\pm 0.111 \, 1 \times 10^{-6} (\text{mm/像素})$$

所选两相机的物像比率  $\hat{q}_L$  和  $\hat{q}_R$  分别为 0.000 701mm/像素和 0.000 703mm/像素。

$$\Delta L = \pm \left[ (j_L - N/2) \cdot \Delta \hat{q}_L + (N/2 - j_R) \cdot \Delta \hat{q}_R + \hat{q}_L \times \Delta j_L + \hat{q}_R \times \Delta j_R \right] \leq \pm 0.19 \times 10^{-3} \text{mm}$$

将上述数值代入公式(8)得:

$$\Delta D = \pm 0.000 \, 44 \text{mm}$$

由以上分析, 系统的测量精度小于  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

5 试验结果分析

试验装置如图 6 所示。用 50 线的光栅对相机参数进行标定, 结果如下:

左相机的物像比率  $\hat{q}_L = 0.000 \, 701 \, \text{mm/像素}$ ; 右相机的物像比率  $\hat{q}_R = 0.000 \, 703 \text{mm/像素}$ ; 两相机中心的物方水平距离  $L = 1.193 \, 2 \text{mm}$ 。

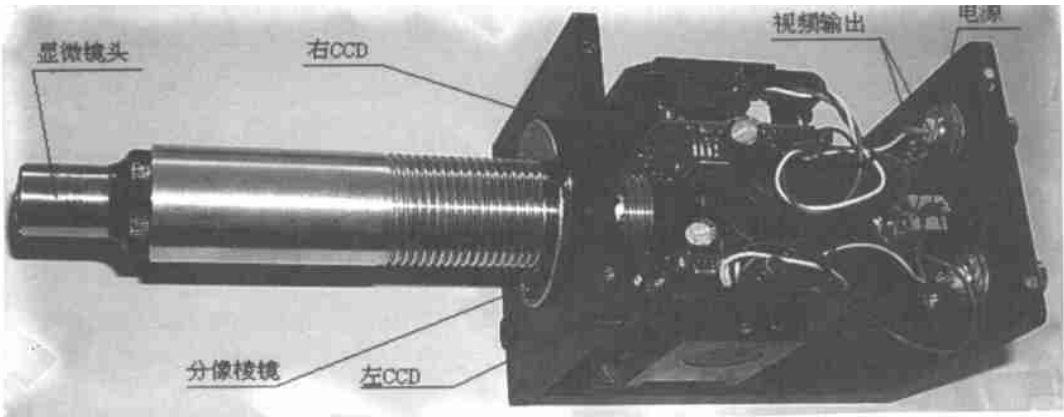


图 6 试验装置实物图

Fig. 6 Practicality Picture of Expeniment Installation

表 1 测量数据

Tab. 1 Results of Measurement

序号	1		2		3	
直径值	1. 392 430	1. 392 253	1. 371 648	1. 371 769	1. 212 049	1. 212 165
	1. 392 358	1. 392 294	1. 371 729	1. 371 446	1. 212 467	1. 212 510
	1. 392 427	1. 392 537	1. 371 581	1. 371 529	1. 212 126	1. 211 998
	1. 392 246	1. 392 236	1. 371 717	1. 371 770	1. 212 200	1. 212 655
	1. 392 527	1. 392 246	1. 371 659	1. 371 787	1. 211 936	1. 212 259
	1. 392 316	1. 392 434	1. 371 709	1. 371 431	1. 212 364	1. 212 204
	1. 392 305	1. 392 254	1. 371 983	1. 371 887	1. 212 279	1. 212 322
	1. 392 455	1. 392 500	1. 371 707	1. 371 748	1. 212 048	1. 212 112
	1. 392 377	1. 392 344	1. 371 489	1. 371 094	1. 212 533	1. 212 146
	1. 392 337	1. 392 165	1. 371 674	1. 371 599	1. 212 366	1. 212 464
平均值	1. 392 352		1. 371 648		1. 212 260	
单次测量标准偏差	0. 000 106		0. 000 190		0. 000 197	

用上述标定参数分别对三根不同直径的细玻璃管进行 20 次测量, 数据如表 1 所示。

可以看出, 本方法的极限误差为  $3s < 0.000 \, 6 \text{mm}$ , 具有较高的精密度, 满足实际测量的

要求。

参 考 文 献

1 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术. 天津: 天津大学出版社, 1993

2 王庆有, 薛晓忠. 采用 CCD 拼接技术的外径测量研究. 光电工程, 1997, 10: 22~25

3 程存学, 朱晓昆. 计算机视觉——低层处理技术. 北京: 电子工业出版社, 1996

4 吴晓波. 高精度图像测量系统. 光学精密工程, 1995, 28~33

5 肖明耀. 误差理论与应用. 北京: 计量出版社, 1985

作者简介: 仲思东, 教授. 现主要从事精密检测技术工作。  
E-mail: zhongsidong @263. net

Diameter Measuring of Slender Glass Tube Based  
on CCD Assembling Technique

ZHONG Sidong<sup>1</sup> XU Rui<sup>1</sup> MEI Tiancan<sup>1</sup>

(1 School of Electronic Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road Wuhan, China 430079)

**Abstract:** In this paper, a diameter measuring technique of slender glass tube based on CCD assembling is presented. Since field of vision is very small, the cameras are calibrated with a grating. During the process of calibration the grating is placed in front of the lens and is imaged on the CCD. By determining the number of pixels of each span, the parameters we need can be calculated exactly. The diameter can be measured by performing some mathematical calculations of the edge position and the parameters obtained by calibration. The errors that affect measuring precision are analyzed. The precision of this system is less than 1 $\mu$ m. The experimetal result shows that the measuring system has quite high stabilization. Of course much improvement can be made to this method. A higher accurate edge-positioning algorithm can be used to improve the precision, and the employment of more advanced image capture card may make the measure result more stable and repid.

**Key words:** diameter measuring; CCD assembling; camera calibration; edge position

About the author: ZHONG Sidong, professor. He is engagen in inspection technology.  
E mail: zhongsidong @263. net

《武汉大学学报·信息科学版》编辑委员会

名誉主任: 宁津生

主 任: 李德仁

委 员: 毋河海 王新洲 刘 甬 刘经南 刘耀林 朱元泓 朱灼文  
仲思东 张正禄 张祖勋 苏光奎 杜清运 杜道生 李建成  
李清泉 郑肇葆 柳建乔 晁定波 龚健雅 舒 宁 詹庆明

主 编: 李德仁(兼)

副 主 编: 柳建乔(常务)