

文章编号:1001-5078(2009)09-0961-04

· 光电技术与系统 ·

基于内窥光路的深腔盲孔形位检测及应用

王红平,曹国华,向阳,姜涛
(长春理工大学机电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:提出一种光机复合高精度非接触光电成像检测新方法实现有限深腔内盲孔的形位尺寸检测。系统由精密传动机构、光学内窥系统、精密光栅传感检测系统、图像采集及处理系统组成。系统通过高精度的传动机构配合,使内窥光学系统在有限的深腔内线性移动,并利用高分辨率 CCD 摄像技术获取盲孔图像,通过图像处理完成深腔盲孔形位尺寸的测量。通过实例测试表明系统精度高于 10 μm 。

关键词:盲孔;内窥光路;光电成像;图像处理

中图分类号:TH711 **文献标识码:**A

Form and position measurement of blind hole of deep cavity based on endoscopic optical path

WANG Hong-ping, CAO Guo-hua, XIANG Yang, JIANG Tao

(College of Electro-mechanic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The paper puts forward a new high-precise non-contact measuring method combining photoelectricity and machinery in limited deep cavity to detect form and position of blind hole. System is composed of high-precise drive mechanism, endoscopic optical path, precision raster part, imaging acquisition and processing part. Endoscopic optical system is moved linearly through drive mechanism in limited deep cavity, high-resolution CCD camera acquires image of blind hole, then system completes form and position measurement of blind hole through image processing. The example indicates precise reaches 10 μm .

Key words: blind hole; endoscopic optical path; photoelectricity image; image processing

1 引言

传统的小孔测量方法分为接触式和非接触式测量两种。接触式测量方法有坐标测量机测量法、振荡扫描测量法、电接触法测孔、尺寸线规法等测量方法。非接触式测量方法有光学测孔方法、气动量仪测孔等方法。应用较多的光学方法有光学放大法、小孔的夫琅和费衍射测量法、激光光点反射式测量法及像点法测孔等。如德国生产的像点比较仪^[1]采用光学触测法瞄准,可测 $\phi 0.1 \sim \phi 50 \text{ mm}$,深 $0.8 \sim 30 \text{ mm}$ 范围内孔的任意截面直径。但被测工件孔的形状误差及表面粗糙度对测量精度影响较大。英国在 20 世纪 70 年代曾经生产过一种用微小玻璃球作为探针,接触测量小孔形貌的小孔测量仪。

但操作繁琐,且探针极易损坏,已停止生产。此外,有报道^[2]采用电容瞄准测孔传感器的测头对相邻小孔的中心瞄准定位,其主要强调两个微小孔间相邻孔壁的测量,而盲孔测量误差较大。随着光学系统的发展,内窥光路的应用更加广泛^[3],本文提出一种远心内窥光路与 CCD 摄像技术相结合方法,并利用高精度的传动机构、精密光栅检测机构、图像处理系统,实现深腔盲孔位置、尺寸、形状的检测。

基金项目:吉林省科技厅重大支撑计划项目(No. 20080351)资助。

作者简介:王红平(1976-),女,讲师,博士研究生,从事机电控制及测试技术方面教学和科研工作。E-mail: custwanghongping@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-03-09

2 深腔盲孔形位尺寸非接触检测原理

如图1所示为深腔盲孔形位尺寸检测系统原理框图。系统原理如下:精密传动机构带动内窥光路进入被测试件内腔内寻找盲孔, CCD 摄像机上呈现被测孔清晰图像后,通过对图像及光栅位置数据处理最终得到被测孔形位尺寸。

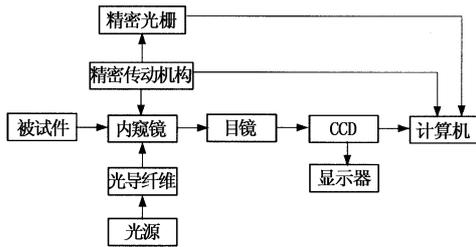


图1 深腔盲孔检测系统原理框图

如图2所示为深腔盲孔形位尺寸检测系统整体结构简图。系统由精密机械传动机构、光栅位移检测系统、光学成像系统及计算机数据采集处理系统组成。其中:精密机械传动机构主要由步进电机1、滚珠丝杠传动机构2、导向机构3、定位

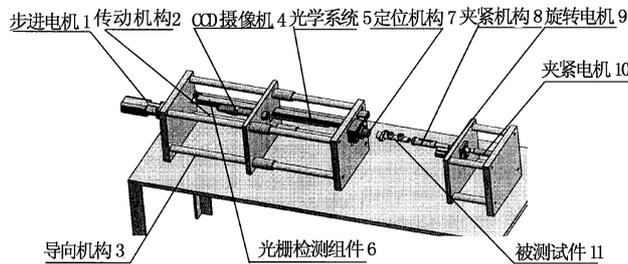


图2 深腔盲孔检测系统结构简图

3 内窥光路设计

光学成像系统用于捕捉补偿孔视频图像以获得被测孔清晰轮廓,是实现检测功能的关键。由于被测件在安装、测试过程中,被测孔与窥镜系统轴线的径向距离不一致,则同一被测孔在 CCD 上成像所占像素数不相等,这将直接影响测量精度。内窥光学系统具有大视场、小孔径、光学长度长、景深大、物方远心及像方远心等特点^[4],能有效地克服被测物体影像虚焦而产生的测量误差,使获得的视角和垂轴放大率在视场各点恒定,从而改善精密测量系统的光学成像质量,进而提高测量精度。

图3为光学系统原理图,由内窥镜物镜、转像系统、目镜、投影物镜组成。图4为内窥镜光路示意图,内窥光路由物镜加转像透镜组成,物镜采集图像信息。内窥镜物镜视场大、焦距短,通常选用反远距结构式作为物镜组;转像系统获得长工作距,优先选用 HOPKINS 棒透镜,其结构形式为两个贴上负透

机构7、夹紧机构8和旋转电机9、夹紧电机10等组成。光栅位移传感检测系统6采用增量式光栅传感器,光学成像系统5采用物象远心内窥光路,由成像系统和照明系统组成。工作时,首先将被测试件固定在定位机构上,为防止定位不稳利用夹紧步进电机带动夹紧机构将被测试件卡紧在定位机构中,保持被测试件与传动机构的平行度;为保证被测小孔成像到 CCD 摄像机中,旋转电机可带动被测试件及夹紧机构旋转一合适角度。检测时,步进电机带动光学成像系统及光栅位移传感器从系统零点开始沿被测件轴线线性移动至试件内腔中寻找检测小孔,当在 CCD 摄像机中看到清晰的小孔图像时,系统通过图像采集卡将 CCD 摄像机的视频信号实时显示成图像,通过图像处理技术,得到小孔内表面质量、小孔直径及孔心位置;同时光栅位移传感器以定位机构基准面为零位测得小孔相距定位基准的位置信息,数据一并送入计算机中处理以获得小孔形位尺寸。

镜的棒状镜组成,并且结构形式完全对称;孔径光阑放于对称位置,一方面校正像差,另一方面便于安装及光能传递。目镜用两个透镜组组成,一个为双胶合透镜,另一个为平凸透镜。投影物镜根据所选 CCD 参数要求设计,最终使系统满足成像要求。

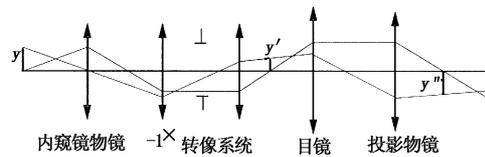


图3 光学系统原理图

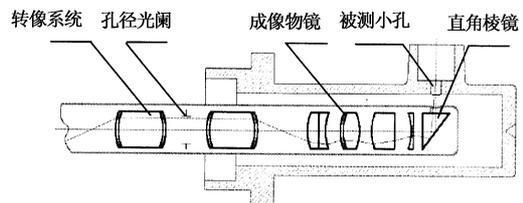


图4 内窥镜光路示意图

系统光源采用环型光源^[5],工作时,光通过光纤均匀照射在内孔表面,小孔轮廓经成像光学系统在 CCD 光敏面上清晰成像,采集卡采集图像,图像处理提取小孔特征轮廓,实现测量。

4 深腔盲孔检测实例

4.1 一种深腔盲孔——汽车制动缸补偿孔

制动主缸是汽车制动系统^[6]的关键部件。制动主缸补偿孔是一种深腔小盲孔,其直径范围为 0.3 ~ 1.2 mm。每个制动主缸上有两个补偿孔,为保证制动主缸的质量,必须保证补偿孔的位置公差及直径尺寸要求,其中补偿孔的位置尺寸是指孔心距离缸体法兰面的轴向绝对距离,一般补偿孔位置误差要求在 10 μm 范围内,重复性达 0.02 mm。

4.2 制动缸补偿孔测量过程

制动主缸上两个补偿孔直径的大小以及分别距离缸体法兰面的轴向绝对距离的测量是利用内窥光学系统使小孔在 CCD 上呈现清晰图像,再通过图像处理获取孔心位置及直径信息,并利用光栅尺读取孔所在的相对位置数据最终计算处理得到。系统采用 Visual C + + 6.0 编写程序,完成二维图像的处理及检测。具体步骤如下:①初始化系统,包括光栅尺组件回系统零点,数据及图像采集卡初始化,设置采集方式为灰度图像及正确的图像采集卡类型,打开图像设备,设置图像采集卡相关参数等;②获取孔径图像及数据处理:步进电机带动光学系统在补偿孔内腔内从底端向上线性移动过程中捕捉到第一个补偿孔的清晰图像后,利用图像处理提取孔径 ϕ_1 并确定孔心位置,同时光栅尺计录孔的轴向距离 L 。设光栅尺初始零点相距缸体法兰端面为 x ,则该孔相对于主缸法兰端面的孔距 $M_1 = L - \phi_1/2 - x$;之后寻找第二个补偿孔,确定相对于主缸法兰端面的孔距 $M_2 = L - \phi_2/2 - x$,最终得到两补偿孔的形位尺寸。图 5 所示为测量界面及捕捉到的补偿孔图像。



图 5 测量界面及捕捉到的补偿孔图像

4.3 制动缸补偿孔检测实验及误差分析

4.3.1 制动缸补偿孔检测误差分析

系统采用经计量部门检定的某制动主缸标准件进行测试。该制动缸标准件主缸孔径为 $\phi 22.2$ mm,其第一补偿孔位置及孔径为:85.150 mm,0.803 mm,第二补偿孔位置及孔径为:12.480 mm,0.685 mm。光学系统拟采用内窥镜物镜焦距为 $f_1 = 1$ mm,目镜焦距 $f_2 = 10$ mm,投影物镜焦距 $f_3 = 70$ mm。由于主缸缸体主孔直径为 $\phi 22.2$ mm,可知内窥镜物距为 10.1 mm,根据 $\beta = -\frac{f}{x}$,则放大率范围约为 0.149。根据测量原理,影响检测精度主要因素有 4 个:

(1) 窥镜轴线与补偿孔轴线不重合引起的偏心误差 δ_1 。

安装窥镜时,窥镜轴线与制动主缸轴线不可能完全重合,取两者最大偏心为 0.2 mm。已知该标准件的补偿孔最大直径为 0.803 mm,由式 $\beta = -\frac{f}{x}$,

可知 $\Delta\beta = \frac{f}{x^2}\Delta x$,其中 Δx 为偏心距,则总放大倍率

误差为 $\beta = \Delta\beta \times \frac{f_3}{f_2}$,则由偏心引起的最大误差为 $\delta_1 = 0.0055 = 5.5 \mu\text{m}$ 。

(2) 光栅尺测量误差 δ_2 。系统选用光栅尺精度为 0.002 mm,则 $\delta_2 = 2 \mu\text{m}$ 。

(3) 瞄准误差 δ_3 。一般最大瞄准误差为 10",人眼明视距离为 25 mm,则 $\Delta x = 0.0125$,取成像屏幕为 800×600 ,计算可得瞄准误差对应应在屏幕上为 $\delta_3 \approx 3.5 \mu\text{m}$;

(4) CCD 摄像机分辨率引起的测量误差 δ_4 。该误差由 CCD 摄像机像元数和像元尺寸引起的。系统拟采用的 CCD 摄像机像元间距 7 μm,则系统 CCD 分辨率误差为 $\delta_4 \approx 3.5 \mu\text{m}$ 。

对上述各种误差取均方和,则测量总误差为:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{总}} &= \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} \\ &= \sqrt{0.0055^2 + 0.002^2 + 0.0035^2 + 0.0035^2} \\ &= 0.0076 \text{ mm} < 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

4.3.2 实验结果分析

采取如下测量方法:在制动主缸定位后连续测量 5 次,每次测量时从补偿孔内腔底端向上线性移动依次测量各孔,取 5 次测量数据的平均值作为测量的近似真值,并计算测量误差(测量误差 = 实测

值 - 平均值) 和极差(极差 = 极大实测值 - 极小实测值), 其中以极差作为判断重复性结果的依据。

测量结果如表 1 所示, 单位均为 mm。

由表 1 可知, 该制动主缸补偿孔的位置及孔径最大误差为: $0.005 \text{ mm} < 0.010 \text{ mm}$, 重复误差为: $0.012 \text{ mm} < 0.02 \text{ mm}$, 满足精度要求。实验结果表明, 系统工作性能稳定可靠, 检测精度高于 $10 \text{ }\mu\text{m}$, 重复度在 0.02 mm 以内, 实现了高精度、非接触检测。

表 1 测量结果

次数	第一个补偿孔		第二个补偿孔	
	位置	孔径	位置	孔径
1	85.154	0.808	12.489	0.688
2	85.148	0.806	12.482	0.678
3	85.152	0.799	12.478	0.681
4	85.156	0.810	12.486	0.685
5	85.158	0.809	12.490	0.680
均值	85.154	0.806	12.485	0.682
真值	85.150	0.803	12.480	0.685
误差	0.004	0.003	0.005	0.003
极差	0.010	0.011	0.012	0.010

5 结论

本系统采用高精度的传动机构配合, 利用高分辨率 CCD 摄像技术动态非接触光电定位和瞄准获取被测试件深腔盲孔图像, 实时动态地完成了深腔小盲孔位置和形状的精密检测。整个系统可以得到

如下结论:

(1) 远心内窥镜光路实现了从有限的内孔空间中提取被测信息, 并消除了调焦不准带来的误差, 提高了检测精度;

(2) 制动主缸补偿孔检测结果表明系统测试精度高于 $10 \text{ }\mu\text{m}$, 能够满足一般的盲孔测试要求;

(3) 系统具有通用性。可应用在各种盲孔测量中, 如补偿孔测量、枪械内壁瑕疵检测等;

(4) 系统具有操作简单、精度高、自动化程度高、可靠性高等特点, 是一种可行的深腔小盲孔测量方法。

参考文献:

- [1] 李庆祥, 王东生, 李玉和. 现代精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 349 - 352.
- [2] 郭辉, 周兴林, 刘书桂, 等. 相邻孔壁和小盲孔测量系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 185 - 187.
- [3] H H BbicTPOB. 内窥镜在机床机械部分和电器电机检测中的应用[J]. 国外内燃机车, 2004, 4: 235 - 239.
- [4] 萧泽新, 安连生. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 132 - 141.
- [5] Crober E D, Hamsira S J. Validation of novel and objective measures of microsurgical skill: Hand motion analysis and stereoscopic visual[J]. Microsurgery, 2003, 23(4): 317 - 322.
- [6] 蔡兴旺. 汽车构造与原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 79 - 85.