

发动机曲轴非接触式自动检测系统的研制

权威¹, 龚重成²

- (1. 解放军装备指挥技术学院, 北京 101416;
- 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要: 针对传统曲轴检测方法的费时、费力、误差大等缺点, 研制了基于 CCD 的非接触式曲轴自动检测系统。该系统通过 CCD 采集曲轴的图像信息并生成 DIB 位图。通过对 DIB 图像处理技术的研究以及对图像边缘提取、直线拟合等算法的实现, 最终测量出曲轴外形的几何尺寸。

关键词: 发动机曲轴 视觉检测系统 CCD 图像处理 边缘检测 直线拟合

在发动机曲轴的生产中, 国内厂家已经实现了自动或半自动化生产, 但是相应的检测手段基本停留在手工检测阶段。这种传统的检测方法存在着劳动强度大、效率低、精度差等弊端, 成为缩短曲轴生产周期的障碍。由于国外先进的自动检测设备价格高, 考虑到成本等因素, 很多厂家没有采用。国内曲轴生产厂家急需拥有自主知识产权、适合国内技术水平和经济能力的曲轴自动检测设备。

目前技术比较成熟的自动检测包括机械触碰式、光电感应式、CCD 成像式、磁感应式、超声波检测等方法。经过分析对比, 笔者认为基于 CCD 成像的非接触式检测方法具有速度快、结构简单、测量精确、稳定性高等优点, 而且这种方法非常适合对曲轴这种大尺寸、结构复杂、精度要求高的零件进行检测。基于此, 笔者开发了基于 CCD 的非接触式发动机曲轴自动检测系统。

1 系统简介

按照曲轴生产厂家的要求, 该系统应具备对厂家生产的各种发动机曲轴锻件的检测能力; 可完成曲轴锻件图纸所标注的主要轴向和径向尺寸检测, 检测精度为 ±0.1mm; 可检测曲轴主轴和连杆轴中心距离, 检测精度为 ±0.10mm; 可检测曲轴锻件主轴和连杆轴颈的同轴度, 检测精度为 ±0.20mm。

该检测系统硬件部分主要由面阵 CCD 摄像头、传动丝杠、工作台、步进电机组、图像采集卡、数据采集卡以及工控微机系统等组成, 系统结构如图 1 所示。硬件部分是根据检测系统的运动控制方案设计的, 即 CCD 摄像头在 X 方向电机的驱动下, 通过丝杠传动, 以进给的方式对曲轴做整体扫描, 摄像头每运动一步对曲轴采集一张图像; 曲轴铸件能够在 Y 方向电机驱动下沿轴线做微调转动, 同时曲轴每转动一步摄像头采集一张图像。

软件部分主要功能为: 判断曲轴装夹后的位置并找到检测的初始位置; 通过图像采集卡将 CCD 采集的曲

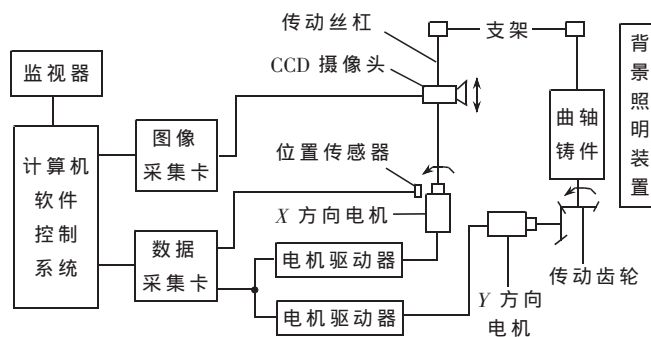


图 1 曲轴检测系统结构图

轴图像显示并保存; 通过数据采集卡控制步进电机组的运动方式; 实现图像采集与运动控制的同步; 通过图像处理技术实现曲轴图像的提取、合并、边缘检测、直线拟合、尺寸计算; 建立各种型号曲轴的数据库并将检测值与标准值进行误差分析, 判断被测零件合格与否。

2 硬件设计

2.1 CCD 与镜头的选择

常用 CCD 尺寸规格如表 1 所示。系统测量精度与 CCD 尺寸以及分辨率有很大关系。由于要求本系统的测量精度小于 ±0.1mm, 因此要求图像中单位像素所对应的实际距离至少小于 0.1mm。根据这个要求可以得出关系式:

$$\frac{K_v}{\beta} \leq 0.1\text{mm} \quad \text{或} \quad \frac{K_h}{\beta} \leq 0.1\text{mm} \quad (1)$$

其中, K_v (K_h) 代表 CCD 靶面上的单位像素对应的实际距离; β 是光学系统放大倍率。表达式如下:

$$K_v = \frac{v}{n} \quad \text{或} \quad K_h = \frac{h}{m} \quad (2)$$

表 1 CCD 尺寸规格

规格 (英寸)	1/3	1/2	2/3	1
CCD 靶面高度 v (μm)	3.6	4.8	6.6	9.6
CCD 靶面宽度 h (μm)	4.8	6.4	8.8	12.7

$$\beta = \frac{v}{V} \text{ 或 } \beta = \frac{h}{H} \quad (3)$$

式中, v : CCD 靶面高度 (mm); V : 被测零件高度 (mm); h : CCD 靶面宽度 (mm); H : 被测零件宽度 (mm); n : CCD 垂直方向有效像素个数, 即垂直分辨率; m : CCD 水平方向有效像素个数, 即水平分辨率。系统中 CCD 沿水平方向对曲轴扫描, 因此只考虑被测零件的高度。已知被测曲轴最大径向尺寸为 130mm, 带入式(3)中并将式(1)、(2)、(3)联立, 可求得 $n=1300$, 即 CCD 的垂直分辨率不得小于 1300 个。目前大多数 CCD 的宽度与高度比是 4:3, 为了节约成本, 笔者将 CCD 旋转 90°, 根据前面的计算结果, 只要选择水平方向的分辨率大于 1300 的 CCD 即可。通过查找, 选择了美国 UNIQ 公司的 UP-900 型 CCD 摄像头。其基本参数如表 2 所示。

表 2 UP-900 CCD 参数

CCD 图像传感器	1/2 英寸逐行扫描隔行传输 Hyper HAD CCD
传感器芯片尺寸	7.60mm×6.20mm
有效像素 ($n \times m$)	1392×1040
单位像素尺寸	4.65μm×4.65μm

通常情况镜头尺寸的选择取决于 CCD 的尺寸。视场角与镜头尺寸并不是直接相关的, 它仅仅是投射覆盖 CCD 上目标的像, 1/3 英寸镜头可以配合 1/3 英寸的 CCD, 也可以配合 1/2 英寸的 CCD, 只是 CCD 靶面没有得到充分的利用, 投射在 CCD 上的像只覆盖了 CCD 靶面的一部分。1/2 英寸镜头可用于 1/2 英寸 CCD, 但不能用于 1/3 英寸 CCD, 否则投射的像将大于 CCD 靶面。因此考虑到价格和 CCD 靶面的利用率, 最好选用同等尺寸的镜头和 CCD。镜头的焦距与视场角是一一对应的关系, 焦距越小, 视场角越大; 反之, 视场角越小。镜头焦距原理如图 2 所示, 焦距由以下公式确定:

$$f = \frac{vD}{V} \text{ 或 } f = \frac{hD}{H} \quad (4)$$

式中, f : 镜头焦距 (mm); v : 图像宽度 (mm) (被摄物体在 CCD 靶面上成像宽度); V : 被测零件宽度 (mm); D : 被测零件至镜头的距离 (mm); h : 图像高度 (mm) (被测零件在 CCD 靶面上成像高度); H : 被测零件的高度 (mm)。由于 CCD 旋转了 90°, 为了减小视角产生的误差, 对 CCD 采集的每张图像只提取中间的一部分。因此(4)式改为:

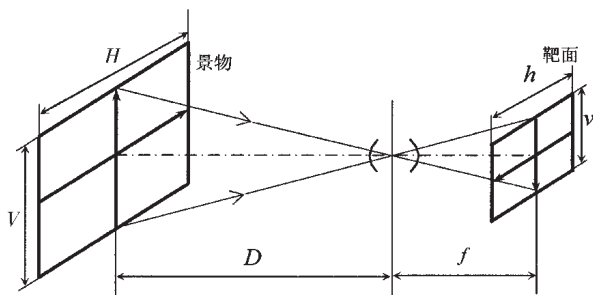


图 2 镜头成像原理

$$f = \frac{hD}{V} \quad (5)$$

已知被测曲轴径向最大尺寸是 130mm, 曲轴到镜头的距离初步定为 550mm, 根据(5)式可计算出镜头的焦距 $f \approx 27.08\text{mm}$ 。如果没有刚好对应的镜头焦距, 可以选择比此值稍小的镜头焦距。通过查找选用日本 Computar 的 M2514-MP 型镜头, 基本参数如表 3 所示。最后由镜头的焦距对物距作进一步确定。理想状态下的光学高斯公式如下:

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{v}{V} \quad (7)$$

它表明了物距、像距和焦距之间的关系。式中, l : 物距 (mm); l' : 像距 (mm); f : 焦距 (mm); β : 放大倍率; v : 图像的宽度 (mm); V : 被测零件高度 (mm)。由于 CCD 被旋转了 90°, 因此将式(7)中的 v 替换为 h , 并将 $f=25\text{mm}$ 、 $V=130\text{mm}$ 带入式(6)、(7)中, 解得 $l=535.20\text{mm}$, $l'=26.23\text{mm}$ 。最终, 依据此结果设计实验台的外形尺寸^[1]。

表 3 M2514-MP 型镜头参数

焦距	25mm
图像最大尺寸	8.8mm×6.6mm($\phi 11\text{mm}$)
1/2 英寸镜头视角大小	对角: 18.2°; 水平: 14.6°; 垂直: 11.0°

2.2 图像采集方式的确定

由于 CCD 与被测曲轴的距离较大, 且曲轴零件的纵深尺寸较长, 在视场角的影响下, CCD 所采集的单张图像越靠近两侧越失真, 也就是说靠近图像两侧所呈现的并不是曲轴在水平方向的投影而是与水平方向呈一定夹角的投影。因此设计的图像采集方式是: CCD 在 X 方向步进电机 (如图 1 所示) 的驱动下通过丝杠传动, 以进给的方式沿平行于曲轴轴线的方向运动, CCD 每运动一步采集一张曲轴图像, 在图像处理时按一定距离取每张图像的中间部分, 并将所有图像的中间部分进行合成, 便得到一张完整的曲轴图像。这样的采集方式要求 CCD 每一步移动的距离要与图像提取的距离相等, 否则会产生较大误差。CCD 每步移动距离由图像提取的距离确定。实验证明, 当提取图像中间部分的距离在不大于 50 个像素点时, 由视场角产生的误差可以忽略不计。由式 $d = k_v \times \beta$ 可以得到单位像素的实际距离 $d = 0.0934\text{mm}$, 式中 k_v 和 β 的值可以由式(2)、(3)得到。由此可知, 50 个像素对应的实际距离为 4.67mm, 此结果就是 CCD 每步移动的距离。同时按照这个结果可以计算出 CCD 每移动一步时步进电机的运转步数, 关系式如下:

$$n = 360^\circ \frac{\lambda i}{P\theta} \quad (8)$$

式中, n : CCD 每移动一步电机运转步数; λ : CCD 每步移动距离 (mm); i : 电机与丝杠的传动比; P : 丝杠螺距 (mm);

θ : 电机的步进角。其中, $\lambda=4.67\text{mm}$, $i=1.25$, $P=4.80\text{mm}$, $\theta=1.50^\circ$ 。最后计算出 $n=291.875$ 步, 约为 292 步。此外, 被测曲轴最长轴向尺寸为 435.5mm, CCD 每步移动 4.67mm, 则 CCD 每次检测需要移动 93.25 步, 这里取 94 步为宜。

2.3 步进电机组连接电路的设计

本系统中步进电机组由两台三相反应式步进电机和驱动器组成, A/D 转换器采用 PCL-812PG 多功能数据采集卡(以下简称板卡)。电机组的连接如图 3 所示。在驱动器接口中, FREE 为脱机信号输入端, 此端口输入高电平信号时电机励磁电流被断开, 电机处于脱机自由状态, 输入低电平信号时电流接通, 电机处于待机状态; DIR 为方向控制信号输入端, 通过高低电平控制电机的正反转; CP 为步进脉冲信号输入端, 输入信号由高电平向低电平转换时“下降沿”有效; VPP 为输入信号公共端, 接控制机的电源+5V 输出端。板卡上有数字信号输入通道 CN1 和输出通道 CN2。两个通道的针脚布置如图 4 所示。CN2 的针脚 1~16 对应 DO 0~15 通道。其中, DO 0~7 为低八位输出端, DO 8~15 为高八位输出端, 可分别控制一台电机驱动器。19 号针脚具有+5V 的电压, 可以同时为两台驱动器提供输出电源。板卡与驱动器的连接方式是: X 轴驱动器的 FERR、DIR、CP 接口分别连接 1、2、3 号针脚; Y 轴驱动器的 FERR、DIR、CP 接口分别连接 9、10、11 号针脚, 两台驱动器的 VPP 接口均连接 19 号针脚。

在设计过程中为了判断摄像头是否位于初始位置

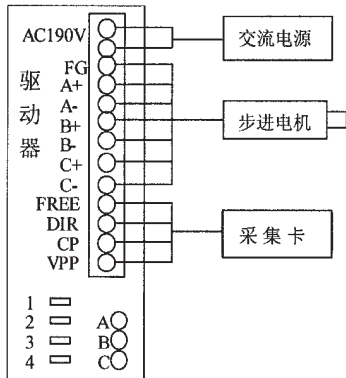


图 3 电机组连接示意图

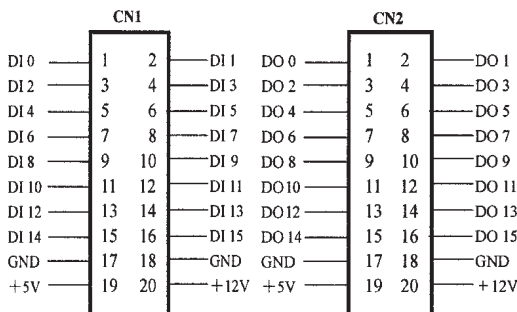


图 4 板卡通道针脚布置图

(靠 X 方向电机一端), 在系统中安装了霍尔开关位置传感器(如图 1 中所示)。连线时, 将传感器的信号输出端和电源输入端分别与板卡的数字信号输入通道 CN1 中的信号输入针脚(选用 7 号针脚即 DI 6)以及 20 号电源输出针脚(+12V)相接。板卡安装在工控机的 PCI 插槽中, 可实现软件对板卡输入输出信号的控制^[2-3]。

3 系统软件开发

本系统的软件设计平台是基于 MFC 类的 VC++ 6.0。VC++ 具有强大的功能, 在自动检测、工程控制及人工智能等领域的应用越来越广泛^[3]。尤其在对速度、稳定性以及代码大小要求较高的场合(比如设备驱动程序等), VC++ 都是首选的开发工具。此外很多数据采集卡和图像采集卡的库函数采用 C 语言编程, 与 VC++ 有很好的兼容性。软件系统流程图如图 5 所示。其中, 前三项流程可以结合图像采集卡和数据采集卡的库函数, 方便快捷地实现图像采集、驱动电机以及同步采集等功能, 具体方法这里不再赘述。

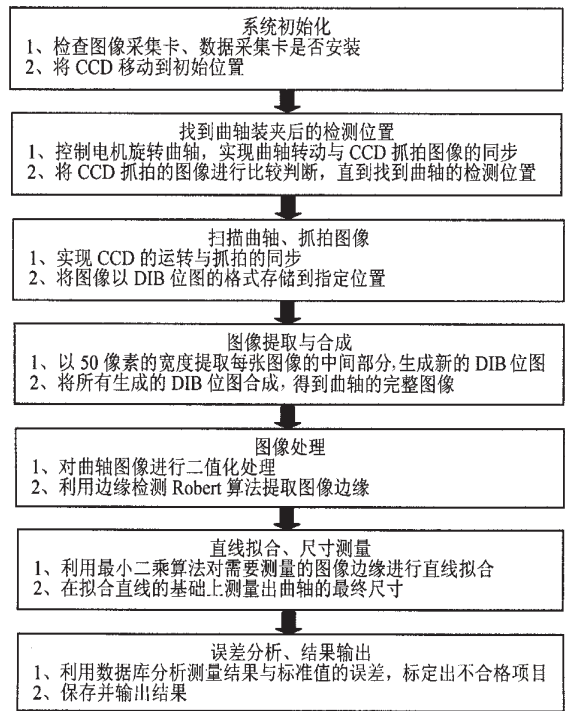


图 5 软件系统流程图

3.1 软件系统中的图像处理算法

经过合成, 完整的曲轴图像为 256 色灰度图, 如图 6(a) 所示, 局部放大效果如图 6(b) 所示。由于在采集的图像中既包含背景、目标, 还可能包含有噪声, 从采集的图像中将目标图像分离出来最常用的方法是对图像进行二值化处理。图像的二值化算法实际上是对图像进行分割。如果图像 $f(x, y)$ 的灰度级范围是 (Z_1, Z_2) , 设 T 是 Z_1 与 Z_2 之间的一个数, 则 $f(x, y)$ 可由下式表示:

$$f_i(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases}$$

其中, T 称为阈值。图像二值化处理的关键在于 T 的取值。目前求图像阈值的算法很多, 例如: 双峰法、迭代法、OTSU 法(大津法)、Kirsh 算法等。每种算法都适合不同特征的图像。经过实验表明, 迭代法非常适合曲轴图像的二值化处理。算法实现步骤如下:

(1) 求出图像中的最小和最大值 Z_l 和 Z_k , 令阈值初值 $T_0 = \frac{Z_l + Z_k}{2}$;

(2) 根据阈值 T_k 将图像分割成目标和背景两部分, 求出两部分的平均灰度 Z_0 和 Z_B :

$$Z_0 = \frac{\sum_{z(i,j) < T_k} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{z(i,j) < T_k} N(i,j)}$$

$$Z_B = \frac{\sum_{z(i,j) > T_k} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{z(i,j) > T_k} N(i,j)}$$

式中, $Z(i,j)$ 是图像上 (i,j) 的灰度值, $N(i,j)$ 是 (i,j) 点的权重系数, 一般 $N(i,j) = 1.0$;

(3) 求出新的阈值: $T_{k+1} = \frac{Z_0 + Z_B}{2}$;

(4) 如果 $T_k = T_{k+1}$, 则结束, 否则 $K \leftarrow K+1$, 转到步骤(2)。

根据这个算法, 在 DIBAPI.CPP 函数库中编写、添加了对曲轴图像进行阈值分割的 ThresholdDIB 函数。通过在 VC++ 工程中的 View.CPP 调用此函数, 得到二值化后的曲轴图像, 如图 6(c) 所示。

图像边缘是图像的最基本特征, 对曲轴图像进行边缘检测和提取是图像测量工作的基础。边缘检测的常用方法包括: Roberts 边缘检测算子、Sobel 边缘算子、Prewitt 边缘算子、Krisch 边缘算子、高斯-拉普拉斯算子等。根据对各个算子的性能分析, Roberts 算子在曲轴图像的边缘检测中最为适合。Roberts 边缘检测算子是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子。它由下式给出:

$$g(x,y) = \left\{ \left[\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{f(x+1,y+1)} \right]^2 + \left[\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{f(x+1,y)} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

其中, $f(x,y)$ 是具有整数像素坐标的输入图像, 平方根运算使该处理类似于在人类视觉系统中发生的过程。根据这个算法, 在 DIBAPI.CPP 函数库中编写、添加了对曲轴图像进行边缘检测的 RobertsDIB 函数。通过在 VC++ 工程中的 View.CPP 调用此函数, 得到曲轴图像, 如图 6(d) 所示。

3.2 直线拟合算法

对于不规则的曲轴图像边缘, 无法找到尺寸测量的关键点。为了建立标准的曲轴二维测量图像, 对图像边缘做直线拟合处理。这样可以有效地剔除图像中不规则的点, 而且拟合直线最接近曲轴零件的边缘。直线拟合常用的算法是最小二乘法, 其原理是: 使测量结果的方差(标准差的平方)或不确定度的平方或残差平方和为极小值。可以建立这样的数学模型: 已知物理量 X 和 Y 成

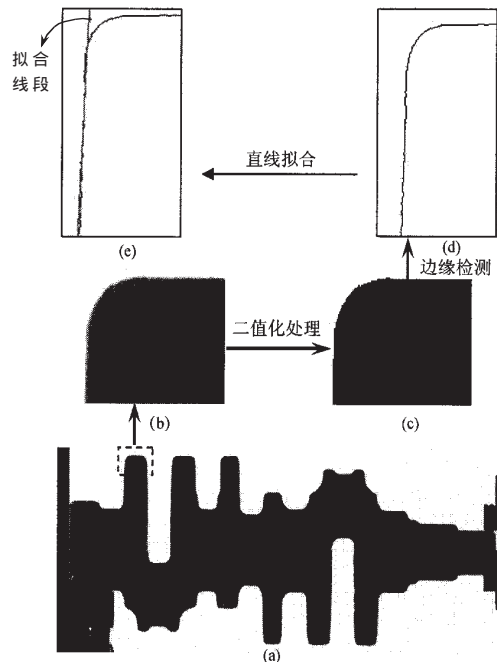


图 6 曲轴检测图像

直线关系 $Y = B + KX$, 有 n 组测量值 $(x_i, y_i), n > 2$, 假设 x_i 的误差可以忽略, 仅 y_i 具有互相独立的满足同一(正态)分布的测量误差(方差相同), 求直线的斜率和截距。由于方程数 n 多于未知数个数, 因此不能由代数方程组求解。设估值分别为 \hat{b} 和 \hat{k} , Y 的残差平方和 $RSS = \sum (y_i - (\hat{b} + \hat{k}x_i))^2$ 。根据最小二乘原理, 应当使 RSS 极小。由 $\frac{\partial(RSS)}{\partial \hat{b}} = 0$ 和

$$\frac{\partial(RSS)}{\partial \hat{k}} = 0, \text{ 可得 } \sum (y_i - (\hat{b} + \hat{k}x_i)) = 0 \text{ 和 } \sum (y_i - (\hat{b} + \hat{k}x_i))x_i = 0,$$

求解两式的联立方程组可得到 \hat{b} 和 \hat{k} :

$$\hat{b} = \frac{\sum x_i y_i \sum x_i - \sum y_i \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad \hat{k} = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (10)$$

进一步可得相关系数 r 的表达式:

$$r = \frac{\sum (x_i - \sum x_i/n)(y_i - \sum y_i/n)}{\sqrt{\sum (x_i - \sum x_i/n)^2 \sum (y_i - \sum y_i/n)^2}}$$

$$= \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

在式(11)中, $\bar{x} = \sum x_i/n, \bar{y} = \sum y_i/n$ 。相关系数 r 能反映变量 y_i 与 x_i 间线性关系拟合的优劣程度。 $r \approx 0$ 表明 y_i 与 x_i 互相独立、无相关性; r 愈接近于 1, 表明 y_i 与 x_i 间线性关系愈好。因此, 可以用 r 值来判断直线拟合的效果。

直线拟合算法实现的具体步骤如下:

(1) 建立曲轴图像坐标系, 并为不同型号的曲轴制定不同的直线拟合模板。模板由若干带编号的矩形区域组成, 每个矩形覆盖一条需要拟合的边缘线段。

(2) 在软件系统中建立一个链表结构, 按矩形标号顺序检测每个矩形内边缘线段的像素点, 并将每个像素

数字示波器自动检定系统

赵汝和, 袁太文, 李迅波

(电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 以 FLUKE5500A 为标准仪器, 采用 GPIB 总线控制器, 以 Visual.net 作为开发平台, 运用 IVI 技术和数据库技术, 开发了数字示波器的仪器自动检定系统, 给出了系统的硬件组成及软件设计。

关键词: GPIB 数字示波器 自动检定 IVI

随着电子技术的发展, 数字示波器凭借数字技术和软件大大扩展了工作能力, 早期产品的取样率低、存在较大死区时间、屏幕刷新率低等不足得到较大改善, 以前难以观察的调制信号、通讯眼图、视频信号等复合信号越来越容易观察。数字示波器可以对数据进行运算和分析, 特别适合于捕获复杂动态信号中产生的全部细节和异常现象, 因而在科学研究、工业生产中得到了广泛的应用。为了让示波器工作在合格的状态, 对示波器定期、快速、全面的检定, 保证其量值溯源, 是摆在测试工程师面前的一项紧迫任务。

手工检定效率低, 容易出错, 对每一种示波器的检

定需要测试工程师翻阅大量的资料; 自动测试系统具有准确快速地测量参数、直观地显示测试结果、自动存储测试数据等特性, 是传统的手工测试无法达到的。用自动测试系统实现对示波器的程控检定将会是仪器检定的趋势。

GPIB、VXI、PXI 是自动测试系统标准总线, GPIB 以性能稳定、操作方便、价格低廉赢得用户的认可。这里选用了 GPIB 作为测试系统的总线。

1 硬件设计

基于 GPIB 的数字示波器自动检定系统的硬件由 GPIB 控制器、FLUKE5500A、被检定数字示波器和 PC 机

(接上页)

点的坐标 (x_i, y_i) 赋值给链表的每个节点。

(3) 将链表每个节点值分别代入(10)、(11)式中, 求得拟合直线的方程 $Y=B+KX$ 和相关系数 r 。

(4) 根据步骤(3)的结果在原图上绘制出拟合直线。

为了检验拟合效果, 每拟合一次显示一次 r 的值。在本系统中 r 的范围可以控制在 0.99~0.90 内, 达到了精度要求。拟合结果如图 6(e)^[4]所示。

4 测试与结论

利用直线拟合最终得到曲轴图像的二维标准测量图。将每两条直线间垂直方向的像素个数转换为毫米, 便得出曲轴的实际测量值。通过建立数据库, 可以将测量值与标准值进行比较, 对于不合格的数据重点标出。为了验证系统精确度, 对一系列不同长度的标准杆件进行重复测量。测量结果如表 4 所示。由此可知, 本系统完全符合曲轴检测的精度要求。

目前随着各种生产技术的提高, 对自动化的要求也随之增加, 而国内在机械零部件的检测方法多数停留在手工检测上, 厂家对自动检测的需求十分强烈。本系统在一定程度上满足了厂家的需求, 能够达到厂家的检测

表 4 测试结果

标准件轴向尺寸(mm)	第一次测量结果(mm)	第二次测量结果(mm)	第三次测量结果(mm)	相对误差范围(%)
500±0.01	500.08	499.92	500.10	≤0.020
400±0.01	399.91	400.09	400.07	≤0.023
300±0.01	300.09	299.90	299.93	≤0.033

标准, 检测精度可以达到 ±0.10mm, 每件曲轴的重复检测精度小于 0.20mm, 单件检测时间小于 3 分钟, 大大减少了厂家在检测环节中时间、人力、物力的投入。同时本系统的检测原理为精密轴类零件的非接触式测量系统的开发奠定了基础。

参考文献

- [1] 林家明. 面阵 CCD 摄像机光学镜头参数及其相互关系. 光学技术, 2000, (3).
- [2] 董桂菊. 步进电机控制系统的研究. 农机化研究, 2002, (8).
- [3] PCL-812PG Advanced multi-function data acquisition card user's manual. EVOIC, 1996~1997.
- [4] 何斌. 马天予. 王运坚等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

(收稿日期: 2006-09-20)