

# 大尺寸平面直线度检测方法的研究<sup>\*</sup>

杨碧波, 赵文宏<sup>\*</sup>, 赵 蓉, 楼一兵

(浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对大尺寸平面直线度测量的问题,提出了基于三点法的直线度测量方法,并在此基础上确定了测具的结构、参数和位移传感器的型号,选用 MSP430F149 型单片机来捕捉脉冲信号,并完成了测量仪器的设计。对采集的数据采用了最小二乘法原则来评定直线度。研究表明,该测量仪器能够满足自动加工中对直线度测量精度的要求,为大尺寸平面直线度测量技术提供了一种可以选用的测量仪器。

**关键词:**大尺寸;直线度;三点法;MSP430F149;最小二乘法

**中图分类号:**TH161.12;TP273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2011)01-0099-04

## Research on the inspection method of large-scale plane straightness

YANG Bi-bo, ZHAO Wen-hong, ZHAO Rong, LOU Yi-bing

(MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large-scale plane straightness measurement, a method based on three-point method was proposed. On the basis of the method, the structural, parameters and the type of displacement sensor were determined, and MSP430F149 microcontroller which was used to capture pulse signal was chosen to complete the design of measuring instrument. To evaluating the straightness, least squares method principle was used to process those collected datas. The results indicate that the measuring instrument meets the requirements of straightness measurement accuracy of automated processing. And it provides a selection of measuring instruments for flat extrusion dies polishing automation technology.

**Key words:** large-scale; straightness; three-point method; MSP430F149; least squares method

## 0 引 言

大尺寸工件的平面直线度直接关系着大型机电装置的运转平稳性、振动噪音和产品寿命。由于大尺寸工件的尺寸和重量的因素,对这样的工件进行测量相对困难。到目前为止,相对于其他许多参数的测量,大尺寸工件的平面直线度测量还缺乏使用简便、稳定可靠、经济实用的方法<sup>[1]</sup>。至于可在生产线上对大尺寸工件直线度进行动态测量的装置,就更为少见。

本研究以大尺寸平面研磨抛光为研究对象,研究基于三点法的直线度测量技术,以测量结果作为反馈控制的依据;挤出平模头要求在加工过程获得工件在某一规定垂直平面内的直线精度,需要对已加工表面

直线精度进行周期性的检测,从而找到高点和低点;然而对已加工的大尺寸工件表面直线精度进行周期性的检测十分困难,工件的长度规格各异(1~10 m),如采用在磨头上装测量传感器,利用精密导轨保证测量传感器的精度是不现实的<sup>[2-4]</sup>。

本研究基于以上分析,提出了以 MSP430 为主芯片的测量系统。该系统能够快速响应,满足了实时加工过程中对平面直线度在线动态测量的问题,对直线度的测量研究具有重要意义。

## 1 测量数学模型的建立

测量仪器组成如图 1 所示,图中 1 为设计的测量器具,2 为实验的测量对象。传感器测头 B 在支撑脚

收稿日期:2010-07-30

基金项目:浙江省科技厅重大科技专项重点资助项目(2006C11069);浙江省重中之重学科开放基金资助项目(未提供)

作者简介:杨碧波(1987-),男,湖北荆州人,主要从事精密和超精密装备方面的研究。E-mail: yangbibo09011@163.com

通信联系人:赵文宏,男,教授级高工,硕士生导师。E-mail: zwh2010@vip.sina.com

A 与 C 的中间位置,支撑脚是一段圆柱结构,利用圆柱的母线与工件表面接触,加强测量位置的稳定性。仪器的两外接触侧面经手工抛光表面粗糙度达到  $Ra = 200 \text{ nm}$  左右以及较高的平面度和平行度。根据实际情况,把 A、B、C 3 点在空间的分布分成 3 种情况:

- ①测头 B 在 AC 连线的上方;
- ②测头 B 在 AC 连线的下方;
- ③测头 B 在 AC 连线上为零点。如 B 点在 AC 连线的上方,测头为上缩状态,仪器的读数为负数,如 B 点在 AC 连线的下方,仪器的读数为正数。

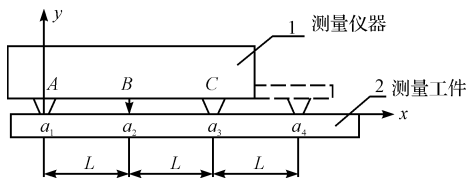


图 1 测量方法示意图

下面是两种模型的几何分析过程:

- (1) B 点在 A、C 连线的上方,几何模型如图 2 所示。

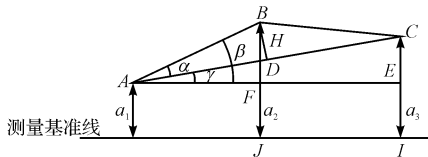


图 2 B 点在 A、C 连线上

A、C 为测量仪器的两个支撑点,B 点为测头位置,A、B、C 3 点形成一个三角形。过 B 点作 AC 的垂线交 AC 于 D 点,过 A 点作 CI 的垂线交 CI 为 E 点,交 BH 为 F 点。 $a_1, a_2, a_3$  分别为 A、B、C 3 点到测量基准线的距离,AC 为仪器的跨度  $2L$  ( $L$  为半跨度 DC 的长度), $\angle \alpha$  为等腰三角形的底角, $\angle \beta$  为 AB 与 AE 的夹角, $\angle \gamma$  为 AC 与 AE 的夹角。则:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L} \quad (1)$$

$$\sin \gamma = \frac{CE}{2L} \quad (2)$$

$$\angle \alpha + \angle \gamma = \angle \beta \quad (3)$$

$$\sin \beta = \frac{a_2 - a_1}{\sqrt{H^2 + L^2}} \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{L}{\sqrt{H^2 + L^2}} \quad (5)$$

$$\sin \alpha = \frac{H}{\sqrt{H^2 + L^2}} \quad (6)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{H^2 + L^2} - (a_2 - a_1)}{\sqrt{H^2 + L^2}} \quad (7)$$

$$CE = 2L \sin \gamma = 2L \sin(\beta - \alpha) = 2L(\sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \beta) \quad (8)$$

$$a_3 = a_1 + CE \quad (9)$$

在这个模型中由于  $\angle \beta$  很小,必定在  $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ ,所以  $\cos \beta$  必定为正数。把式(1~7)代入公式(8),即可求出 CE 的值,将 CE 值代入式(9),即可得出  $a_3$  的值:

$$a_3 = a_1 + 2L \left( \frac{L(a_2 - a_1)}{H^2 + L^2} - \frac{H \sqrt{H^2 + L^2} - (a_2 - a_1)^2}{H^2 + L^2} \right) \quad (10)$$

- (2) B 点在 A、C 连线的下方,几何模型如图 3 所示。

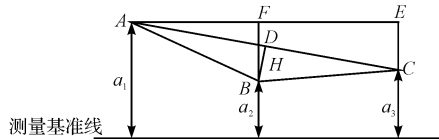


图 3 B 点在 A、C 连线下方

用同样的推导步骤可以得到当 B 点在 AC 连线的下方时:

$$a_3 = a_1 - 2L \left( \frac{L(a_1 - a_2)}{H^2 + L^2} + \frac{H \sqrt{H^2 + L^2} - (a_1 - a_2)^2}{H^2 + L^2} \right) \quad (11)$$

测量基准为水平面,第 1 个接触点为原点,用测量仪器测量出第 2 点的 y 方向上相对与 x 轴的距离。已知  $L, H, a_1, a_2$ , 利用公式(10)或式(11),可以求出第 3 点的 y 坐标值,接着把测量仪器移动 1 个跨距,如图 1 所示, $a_3$  移动到虚线  $a_4$  的位置。在此位置时, $a_1, a_2$  分别用上一个位置的  $a_2, a_3$  代替,利用公式(10)或式(11),可求出  $a_3$  的值,即第 4 点的 y 坐标值,以此类推,求出工件长度方向上各点 y 坐标值。

三点法已经在轧辊类工件上有了较多的应用,其直线度误差测量是可靠的,提高了测量的精度和测量的效率。在此基础上进一步研究挤出平模头类零件的直线度误差,进而补偿加工,可很好地解决大型平模头零件测量难、加工精度低的问题。

## 2 测量仪器的设计

系统设计的总体方案如图 4 所示。通过 MSP430-F149 型单片机采集传感器输出的脉冲信号,编写程序,实现对采集到的信号分析、处理,以得到实时的直线度数据。其结果以 LED 即时显示,或者通过 MAX232 通讯,传输到上位机显示。

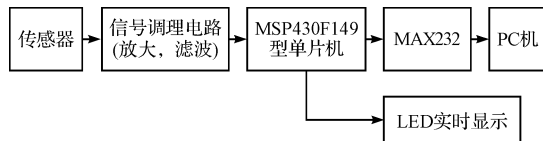


图 4 测量仪器的总体设计方案图

### 2.1 传感器的选用

在本研究中,传感器选用了上海德测公司的 LES1 型光栅尺位移传感器。LES1 是精密的小型光栅测量系统,适用于小量程的精密测量,尤其适用于直线度测量、机器人技术、医疗设备、精密现代化加工设备,通常用于连续的直线度测量。LES1 光栅尺将直线的位移变化转换为脉冲信号。脉冲信号的数量对应移动的距离,脉冲频率则反映了运动速度。

### 2.2 硬件电路的设计

MSP430F149 具有低电源电压、超低功耗的优点;具有强大的处理能力,MSP430 单片机在 8 MHz 晶振工作时,指令速度可达 8 MIPS;具有高性能模拟技术及丰富的片上外围模块,多达 60 KB 的 Flash ROM 和 2 KB 的 RAM、2 个 UART 接口和 2 个 SPI 接口,集成了一个能实现 16 × 16 位、8 × 16 位、16 × 8 位或 8 × 8 位

运算的硬件乘法器,包含了一个 12 位高性能 A/D 转换器。A/D 转换器采样速度可高达 200 Kbps,内置采样与保持电路;系统工作稳定可靠性高。选用这款单片机设计数据采集系统,可以提高采集和处理的速度<sup>[5-8]</sup>。

#### 2.2.1 信号调理电路

由于选择的传感器输出的 TTL 电平不能满足单片机采集的要求,因而设计了如图 5 所示的信号放大、滤波电路<sup>[9-10]</sup>。VCC 为 +3 V 供电电源,VEE 为 -3 V 供电电源。信号放大电路选用 AD620 芯片,它有极宽的电源工作范围:±2.3 ~ ±18 V,仅需一个外接电阻即可得到 1 ~ 1 000 内的任意增益范围。为了防止信号产生混叠,系统设计了一个无增益的 4 阶有源低通滤波器,截止频率为 10 kHz。选用通用的运放 TL084 芯片。

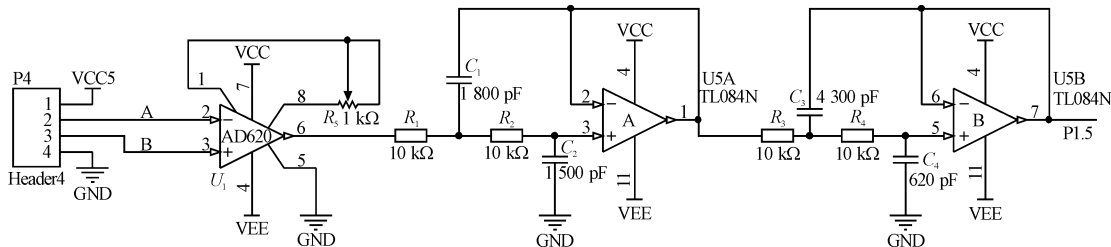


图 5 信号调理电路

#### 2.2.2 数据采集

由于传感器输出的是脉冲信号,采集的信号不必 A/D 转换,直接接到单片机的 I/O 口,通过单片机的捕捉中断功能实现计数。采集过程如图 5、图 6 所示。

与串口电平的相互转换,如图 7 所示。异步串行通信是在经一系列寄存器设置之后,由硬件自动实现数据的移进和移出,完成通信的功能,波特率设置为 9 600 bps。

经调试,以 MSP430F149 为核心的数据采集系统能够很好地捕捉到传感器的输出信号,达到了实验设计的要求。实验使用方便,工作稳定,测量效果可靠性好。

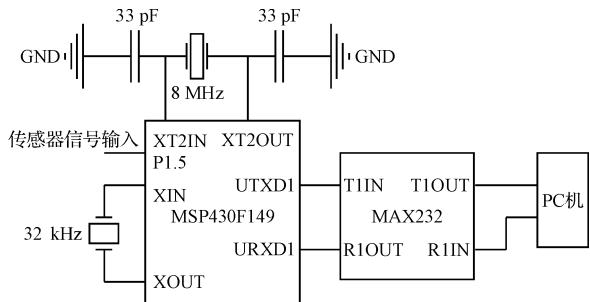


图 6 MSP430F149 数据采集与通信模块简图

### 2.3 软件设计

系统完成的主要操作包括:数据采集、数据处理、显示以及上位机通讯,其流程图如图 7 所示。单片机主要完成实时数据采集,被采集的数据经初步处理后可以 Direct 通过 LED 显示或通过异步串行通信接口传送给主机。设计采用 MAX232 芯片,实现 3 ~ 5 V 电平

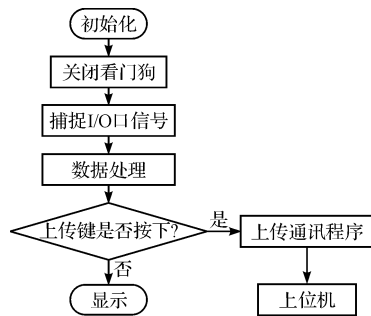


图 7 数据采集流程图

系统程序主要分为:

- (1) 程序主程序—键盘扫描程序,反复判断是否有键按下;

(2) 数据处理子程序—根据 IO 口捕捉到的脉冲信号,对数据进行处理;

(3) 显示子程序—利用 LED 显示驱动控制器将测量结果进行显示;

(4) 通讯子程序—通过异步通讯实现与 PC 机通讯。

### 3 测量结果、直线度误差分析

用测量仪器对一根长 1 m 的挤出平模头工件进行直线度测量,每隔 25 mm 采样 1 个点,共计采样了 40 个坐标点。根据测量方法测得的数据和式(10)或式(11)得出各点  $y$  轴坐标值。具体数据如表 1 所示。

表 1 测量的 40 个采样点  $Y$  坐标值

位置	$Y$ 值/ $\mu\text{m}$	位置	$Y$ 值/ $\mu\text{m}$	位置	$Y$ 值/ $\mu\text{m}$	位置	$Y$ 值/ $\mu\text{m}$
第 1 点	3.1	第 11 点	34.5	第 21 点	36.8	第 31 点	10.5
第 2 点	5.2	第 12 点	34.8	第 22 点	33.5	第 32 点	13.2
第 3 点	10.4	第 13 点	32.3	第 23 点	38.3	第 33 点	8.4
第 4 点	11.3	第 14 点	43.2	第 24 点	36.7	第 34 点	1.8
第 5 点	14.4	第 15 点	45.2	第 25 点	35.2	第 35 点	-1.7
第 6 点	23.3	第 16 点	50.2	第 26 点	25.3	第 36 点	-12.4
第 7 点	24.5	第 17 点	50.4	第 27 点	23.5	第 37 点	-9.3
第 8 点	25.6	第 18 点	46.4	第 28 点	22.4	第 38 点	-8.4
第 9 点	23.2	第 19 点	38.2	第 29 点	15.2	第 39 点	-8.1
第 10 点	26.3	第 20 点	37.4	第 30 点	15.1	第 40 点	-7.6

对于表 1 中得到的数据,采用最小二乘法计算直线度误差。设最小二乘直线的方程为: $y = ax + b$ ,根据表 1 中测量序号  $X_i$  测,量读数  $Y_i$ ,由最小二乘直线公式<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \end{cases} \quad (12)$$

得最小二乘直线方程为  $y = -0.6627x + 34.8$ 。按照最小二乘法评定直线度误差的定义,由点(17, 50.4)、(3, -12.4)计算得到两条包络直线,最后得到直线度误差为  $T = 50.2 \mu\text{m}$ 。计算的直线度误差在允许范围内,满足了平磨头直线度检测的要求。

## 4 结束语

本研究针对大尺寸平面测量技术,通过数学建模、公式推导、测量仪器的设计,提出了测量挤出平模头直线度测量理论,其直线度测量效果从理论上得到了验证,满足了自动加工过程中对直线度测量精度的要求,为进一步研究大尺寸平面直线度测量方法提供了有效的方案,为解决大尺寸工件直线度测量难、加工精度低的问题提供了一种新的思路。

### 参考文献 (References):

- [1] 宁延平,刘战锋. 国内外高精度直线度测量技术的研究现状[J]. 仪器仪表与检测,2005(6):82-84.
- [2] 谭久彬,李东升. 超精密仪器工程关键技术研究若干进展[J]. 中国计量学院学报,2003,14(2):83-88.
- [3] GAO Wei, YOKOYAMA J, KIYONO S, et al. Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system[J]. **Precision Engineering**,2002,26(3):279-288.
- [4] OKUYAMA E, AKATA H, ISHIKAWA H. Multi-probe method for straightness profile measurement based on least uncertainty propagation (2nd report)—two-point method considering cross-axis translational motion, pitch motion and sensor's random error[J]. **Precision Engineering**,2010,34(4):683-691.
- [5] WANG C C, HSHIAO Y H, HUANG M C. Development of MSP430-based ultra-low power expandable underwater acoustic recorder[J]. **Ocean Engineering**,2009,36(6):446-455.
- [6] 石向荣,姚旺生. 基于 MSP430 的高速数据采集电路[J]. 舰船电子工程,2005,25(2):72-75.
- [7] 胡大可. MSP430 系列 FLASH 型超低功能 16 位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [8] 魏小龙. MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [9] 戚新波,范 峥,陈学广. 高精度电感测微仪电路的设计[J]. 华北水利水电学院学报,2005,26(4):31-33.
- [10] FENG Qi-bo, ZHANG Bin, KUANG Cui-fang. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. **Optics & Laser Technology**,2004,36(4):279-283.
- [11] 张世勇. 用最小二乘直线法求取直线度误差[J]. 渝州大学学报,2001,18(1):29-31.
- [12] 李汾娟. 基于单片机的数控冲压进给系统的设计[J]. 现代制造技术与装备,2009(4):13-15.

[编辑:柴福莉]