

# 全自动轴类直线度测量及调整装置设计

王斌, 王麟

(核工业理化工程研究院, 天津 300180)

**摘要:** 轴类工件的直线度调整方法需要调直和检测功能相互配合完成, 一般需要两套设备或装置; 通过设计一种基于 DSP 主控芯片技术的智能化测量调直装置, 实现一台设备同步完成调直和检测; 该设备设有检测工位和调直工位, 工位可自动切换, 设备可根据对轴类件直线度指标的检测结果, 自行判断合格情况并对不满足设计要求的工件进行调直处理, 直至其直线度合格; 以 DSP 芯片为核心的嵌入式开发包, 实现对激光传感器、压力传感器及电气执行单元的集成控制; 软件采用 CCS3.3 开发环境, 通过开发调直下压量自反馈机制和圆周跳动测量数据拟合程序, 解决设备实现自动闭环控制的关键技术难题; 调直检测实验结果表明, 该设备可实现对轴类工件的全闭环智能自动检测及调直, 直线度指标圆周跳动量小于 0.05 mm, 可大幅减提高轴类工件的直线度水平。

**关键词:** 轴的直线度; 调直及检测; DSP 芯片; 闭环控制; 跳动量

## Design of Automatic Spindle Straightness Measurement and Adjustment Device

Wang Bin, Wang Lin

(Research Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Spindle need to adjust their straightness by straightening and detecting equipments. By designing an intelligent measurement and straightening device based on DSP master chip technology, a device can be synchronized to complete the straightening and detection. The device is equipped with a test station and a straightening station, which can be switched automatically. The device can automatically straighten the spindle according to the test results until its straightness is qualified. Embedded development package with DSP chip as its core enables integrated control of laser sensors, pressure sensors and electrical execution units. The software adopts the CCS3.3 development environment, and solves the key technical problems of automatic closed-loop control by developing the direct pressure self-feedback mechanism and the circular run-up measurement data fitting program. The results of the straightening test show that the device can realize the automatic detection and straightening of the closed-loop workpiece, and the linearity shape tolerance is less than 0.05 mm, which greatly improves the straightness of the spindle.

**Keywords:** straightness of the spindle; straightening and detection; DSP chip; closed-loop control; shape tolerance

## 0 引言

在机械行业中, 长径比在 10~20 之间的轴类件属细长轴<sup>[1-2]</sup>, 细长轴加工过程中容易产生端跳, 且调直极为困难。常用调直工艺方法主要有套筒调直法和矫杠调直法两种工艺路线, 其中, 套筒调直法的原理是将待调轴穿过标准调直筒套, 并严格控制通套与轴的间隙量与进给速度, 实现对轴类件的整体调直。该方法大多用于光轴的调直, 对于阶梯轴难以适用; 矫杠调直法调直力大, 调直后不易回弹, 一般用于大型结构件的直线度调整, 缺点是微小调直力难于控制, 用于细长轴的调直容易在接近临界点时产生过调现象, 需反复调直, 影响效率。此外, 调直处理后的直线度检测, 通常以轴的设计基准端作为定位基准, 检测另一端的径向跳动, 以此表征调直后轴的直线度。因此, 调直与检测需要两道工序完成, 若遇到需反复调直的工件,

工序转换需变换基准, 影响测量精度, 而且频繁的工序转换也会大大降低工作效率。为此, 本文将针对轴类件的结构特点及跳动要求, 设计研制一种基于 DSP 微控制器的专用调直检测装置, 提高检测精度和调直效率。

## 1 研制方案

装置采用双工位设计, 分别是测量工位和调直工位, 可自动完成工位切换, 一次装卡, 自动完成检测和调直功能。首先装置通过驱动工件回转测量直线度指标——端部跳动, 并找到跳动高点, 然后, 自动切换到调直工位, 进行直线度调整, 完成后再次切换至测量工位进行测量, 直到直线度符合要求为止。工件装卡完成后, 整个测量、调直流程自动完成, 系统可根据工件的初始跳动量自主确定调直行程范围, 全程无需人为干预, 可实现闭环循环工作。整体设计思路如图 1 所示。

## 2 机械结构设计

### 2.1 测量工位结构设计

根据功能需求, 该工位应由三部分构成, 分别是测量

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-09-03。

作者简介: 王斌(1982-), 男, 天津人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事精密测试技术方向的研究。

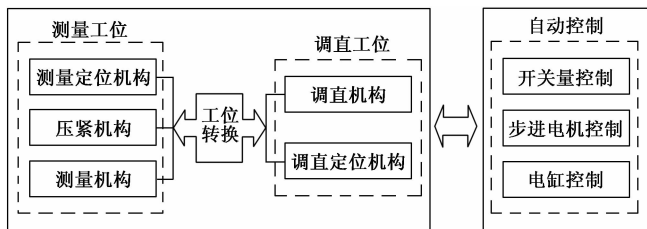


图 1 装置整体设计思路架构图

定位机构、驱动机构和测量机构。如图 2 所示, 测量定位机构以轴的设计基准作为测量基准, 保证基准的统一, 同时, 该机构还可实现在测量工位下的定位、夹紧及随动回转功能; 驱动机构为高精度步进电机, 通过联轴器与测量定位机构的定位机构连接, 用于实现工件的匀速驱动; 测量机构为激光 CCD 面阵传感器, 设置于被测轴的末端检测位置, 进行轴末端圆周径向跳动检测<sup>[3]</sup>。

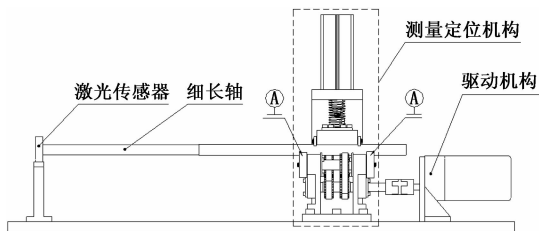


图 2 测量工位机构图

测量定位机构是测量工位的核心功能部件, 其结构设计是否合理将直接影响装置的测量精度。该机构由两个子机构组成, 分别是定位及驱动机构和随动压紧机构, 如图 3 所示。该机构可同时完成对工件的定位、压紧及驱动, 机构回转精度达到 0.005 mm, 从而有效避免定位误差给测量结果带来的影响。

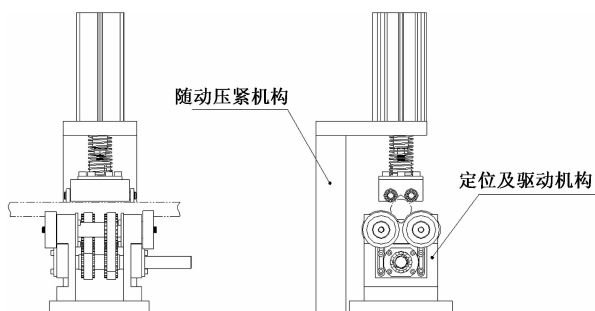


图 3 测量定位机构图

### 2.2 调直工位设计

调直工位主要由调直定位机构和调直机构组成, 如图 4 所示。其中, 调直定位机构是装置的工位转换机构, 采用气动推进方式, 可使装置由测量工位切换至调直工位, 夹持位置为轴的重心附近。调直机构采用电动执行器推进, 以伺服步进的方式提供持续的下压调直力, 可防止工件回弹, 保证调直效果<sup>[4]</sup>。

### 2.3 装置集成

通过对装置功能及精度需求分析, 建立了测量工位和

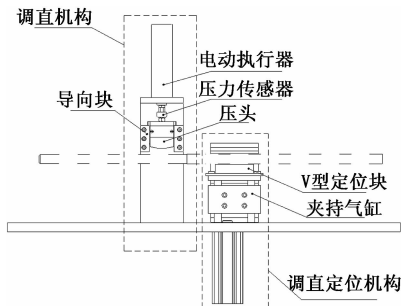


图 4 调直工位结构图

调直工位的机械结构设计, 并以工件轴线作为装配基准完成装置的整体装配, 对中精度控制在 0.05 mm 以内<sup>[5]</sup>, 保证装置调直和检测的基准一致性。装置整体结构如图 5 所示。

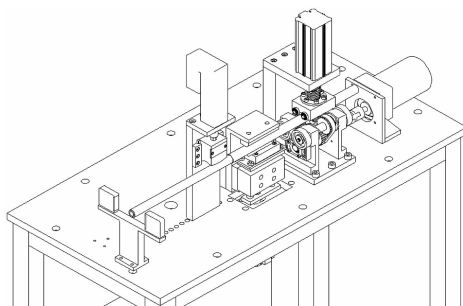


图 5 装置整体结构图

## 3 控制系统设计

### 3.1 硬件设计

采用 TMS320F28335 型 DSP 芯片作为主控芯片, 在 CCS3.3 (Code Composer Studio3.3) 环境下进行硬件开系统开发。CCS 是 TI 公司的代码开发和调试套件, 可为嵌入式 32 位精简指令集运算 (RISC) 微控制器 (DSP 处理器) 提供可视化编程环境, 其完整的开发环境适用于微控制器。该控制模块不仅集成了微控制器和嵌入式开发工具包, 还包含了快速创建应用程序所需的所有工具, 能够帮助用户快速完成从概念到投入生产的全套设计流程, 同时具有系统集成调试、信号处理、数据通讯及硬件驱动功能<sup>[6-7]</sup>。

硬件系统以 DSP 主控电路板作为控制核心, 处理来自激光传感器、压力传感器和光电开关的信号, 经过实时计算后, 反馈并控制气缸压紧工件, 步进电机旋转至端跳最大点, 系统根据已输入的调直经验数值模型自动确定调直下压量, 并驱动电动推杆对试件进行调直<sup>[8]</sup>。控制系统硬件架构如图 6 所示。

激光 CCD 传感器通过控制器 1 与 DSP 主控单元相连, 采用 RS232C 通讯协议。SMC 电动推杆通过控制器 2 与 DSP 主控单元相连, 采用 GPIO 和脉冲控制。压力传感器通过控制器 3 与 DSP 主控单元相连, 利用 DSP 主控板的 AD 采集模块。步进电机通过控制器 4 与 DSP 主控单元相连, 采用 GPIO 和脉冲控制。触摸屏通过 RS232C 串口通讯

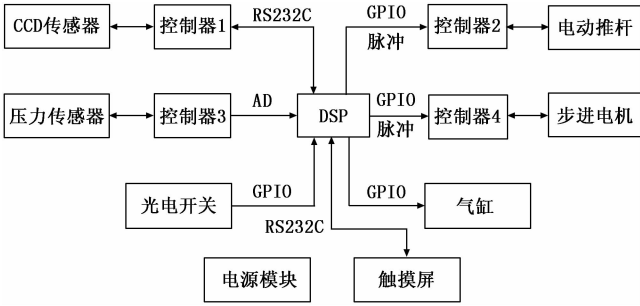


图 6 控制系统硬件架构图

与 DSP 主控单元相连。电源模块为整个控制系统供电，提供 +12 V、+24 V 和 +220 V 电源。

### 3.2 软件设计

装置的控制系统上位机软件采用 CCS3.3 在 TMS320F28335 芯片上进行开发，并采用 LabVIEW 开发算法验证程序。根据调直及测量的工艺设计的装置软件控制流程，如图 7 所示。

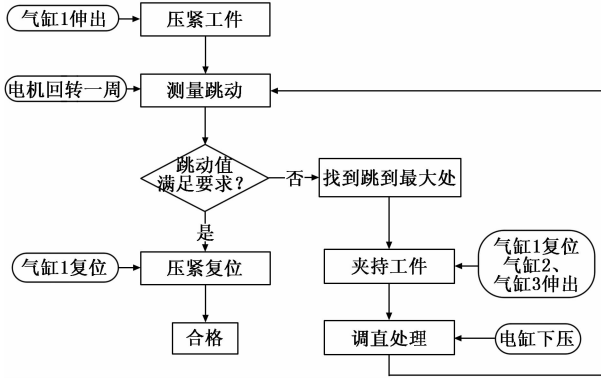


图 7 系统软件控制流程图

#### 3.2.1 测量方法及程序设计

激光 CCD 传感器测量轴类试件的原理如图 8 中左图所示，由 S 发射器发出测量光线，R 接收器接收测量光线，得到试件截面上沿到测量光线上沿的距离  $h_0$ 。理想状态下，轴的直线度误差为零，旋转时，传感器测得的距离  $h_0$  保持不变。

但实际情况下，由于轴加工后的直线度并非理想状态，会产生直线度误差，使得旋转一周截面的实际运行轨迹如图 8 中右图所示。那么，当轴旋转时，传感器实时检测试件上沿到测量光线上沿的距离。从图 8 中右图可以看到，当试件弯曲向上时，测得距离最小值  $h_{min}$ ，当试件弯折向下时，测得距离最大值  $h_{max}$ 。若试件顺时针旋转，从弯折向上时开始运动，则距离  $h$  以先变大后变小的规律周期性变化，且在最小值和最大值附近变化较为缓慢。经过运动轨迹分析，可以发现试件绕理想轴线实际运行轨迹的半径  $\Delta h$ ，即为轴的端跳最大值。由此可以得到轴的端跳最大值  $\Delta h$  的计算公式：

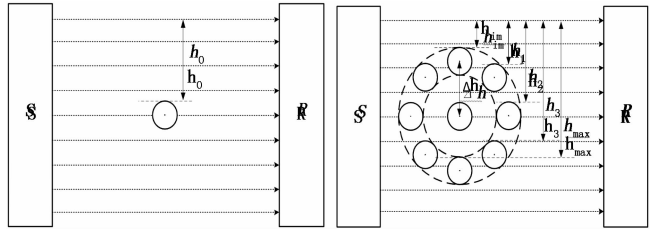


图 8 测量方法原理图

$$\Delta h = \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \quad (1)$$

从上式可以看出，试件端跳最大值  $\Delta h$  等于传感器测量值得最大值与最小值差的一半。根据此方法设计的跳动测量方法验证 VI 程序代码如下<sup>[11]</sup>：

#### 3.2.2 调直下压量计算方法及程序设计

轴的调直过程是先克服其弯曲形变，再使之发生塑性形变的过程。在弹性变形阶段，材料的弹性模量是一个描述物体弹性的物理量，由物体材料决定，影响弹性形变的大小<sup>[9]</sup>，其计算公式如下：

$$E = \sigma / \epsilon \quad (2)$$

式中， $E$  为弹性模量，Pa； $\sigma$  为表示单位面积上的应力，Pa； $\epsilon$  为表示单位面积上的应变。

因此，可通过模拟测定弹性模量得到调直下压量。压力传感器数值监测调直反弹力，并由激光传感器测量轴的形变量，通过计算调直力与形变量的比值，得到一个与弹性模量成正比例关系的变量  $E_0$ ，其计算公式如下<sup>[10]</sup>：

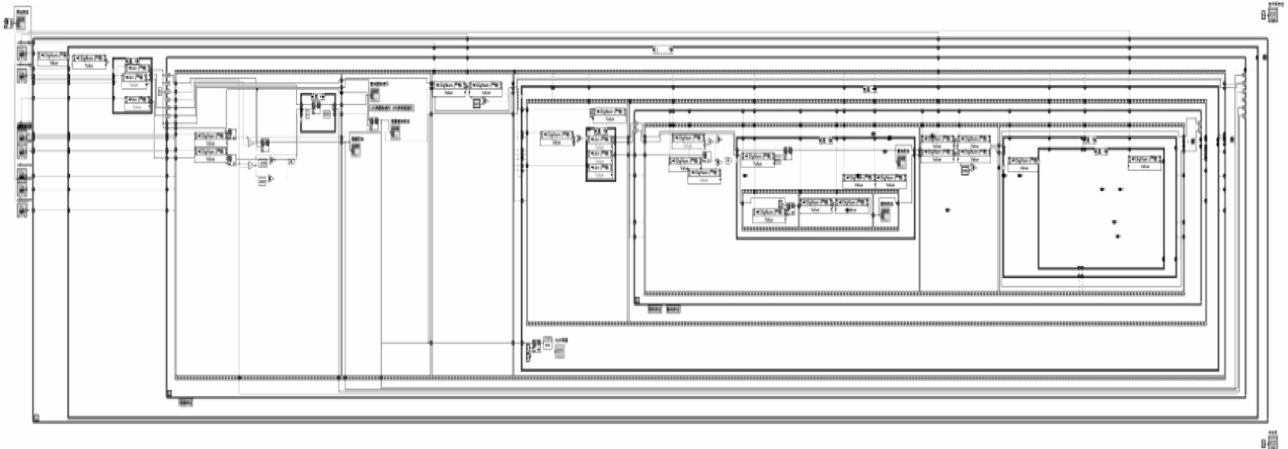


图 9 跳动测量 VI 代码

$$E_0 = F/H_{40} \quad (3)$$

式中,  $H_{40}$  表示电动推杆从接触试件到压力传感器达到 40 N 的下压值。调直力与下压量的关系如图 10 所示。

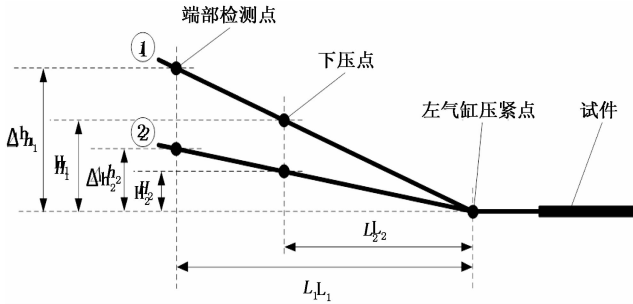


图 10 调直力与下压量模拟计算示意图

图 10 中, 试件上的端部检测点为激光 CCD 传感器的测量位置, 下压点表示电动推杆的下压位置, 左气缸压紧点代表气缸固定试件的位置, ①号位置表示试件未被电动推杆下压的状态,  $L_1$  表示试件端部检测点到左气缸压紧点的距离,  $\Delta h_1$  表示初始端跳最大值,  $H_1$  表示初始下压点距理想轴线的距离, ②号位置表示试件被电动推杆下压, 压力值达到 40N 时的状态,  $L_2$  表示下压点到左气缸压紧点的距离,  $\Delta h_2$  表示下压后的端跳值,  $H_2$  表示下压后下压点距理想轴线的距离, 则电动推杆从接触试件到压力传感器达到 40 N 的下压值  $H$  的计算公式如下:

$$H_{40} = H_1 - H_2 = \frac{L_2}{L_1} \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2) \quad (4)$$

式中,  $\Delta h_1 - \Delta h_2$  表示试件从①号位置变化到②号位置时, 非接触式 CCD 传感器测量值的变化量,  $L_1$  和  $L_2$  是固定值, 因此可以计算出  $H_{40}$ 。从而根据公式 (3), 计算变量  $E_0$ , 计算公式如下:

$$E_0 = \frac{L_1 \cdot F}{L_2 \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2)} \quad (5)$$

不同轴的结构也是影响其形变的主要因素。对于同一种轴类件, 可将初始的直线度表征参数一跳动值看做是其结构上的位移差异。因此, 本文采用试件端跳最大值 (可以表征直线度) 来表征不同试件的结构差异, 则试件下压量  $H$  的计算公式如下:

$$H = k \cdot H_0 \quad (6)$$

式中,  $k$  是由表征试件材料变量  $E_0$  决定的,  $H_0$  是由表征试件结构的试件端跳最大值  $\Delta h$  决定的。通过实验确定了在电动推杆形成范围 (0~10 mm) 内有效调直位置 (6 mm 处) 的两个变量值, 如表 1 所示。

表 1 下压量取值表

$H_0$ /mm	$\Delta h/\mu\text{m}$	$k$	$E_0$
6	150~170	1.20	0.037~0.044
7	171~190	1.15	0.045~0.052
8	191~210	1.10	0.053~0.060
9	211~230	1.05	0.061~0.068
10	231~250	1.00	0.068~0.074

表中,  $E_0$  越大表示试件材料的刚性越大, 因此对应系数  $k$  值应该越小, 表示同样的端跳最大值下所需试件下压量越小。根据实验数据结果设计了调直下压控制调直程序如图 11 所示<sup>[12]</sup>。

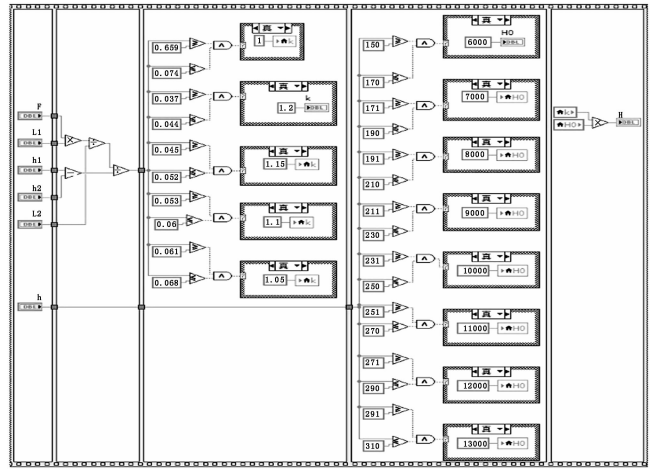


图 11 调直下压量 VI 程序代码

### 4 测量调直实验

根据力矩原理, 理论上同等调直力作用条件下, 力臂越长, 所产生的力矩越大, 调直效果越好。但是, 由于考虑到材料特性影响, 存在调直后回弹的现象, 因此, 需通过调直检测实验, 确定调直效果较好的调直力加载位置。为了验证装置的调直效果, 设计了相同调直力条件下的不同力臂调直效果对比实验, 实验原理如图 12 所示。

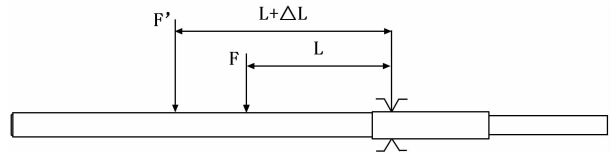


图 12 调直原理分析图

实验方法: 沿试件轴向方向分别设置 5 个调直位置, 距夹持位置最近的调直点与夹持点距离为  $L$ , 如图 12 所示, 其余 4 个位置远离夹持点, 距离分别为  $L + \Delta L$ 、 $L + 2\Delta L$ 、 $L + 3\Delta L$ 、 $L + 4\Delta L$ , 在 5 个夹持位置分别对 5 个阶梯轴实验件进行调直处理, 并测量末端跳动值, 确定调直效果最佳的调直位置。各位置调直后的跳动测量结果如表 2 所示。

表 2 调直检测实验数据

试件	跳动值/mm				
	$L$	$L + \Delta L$	$L + 2\Delta L$	$L + 3\Delta L$	$L + 4\Delta L$
1#	0.10	0.08	0.07	0.02	0.03
2#	0.13	0.12	0.08	0.03	0.04
3#	0.09	0.06	0.04	0.01	0.01
4#	0.08	0.07	0.05	0.02	0.04
5#	0.12	0.09	0.06	0.02	0.02