

引文格式: 徐宏图, 张琦, 罗伟, 等. 轴类零件直线度检测系统研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 51-56.

XU Hongtu, ZHANG Qi, LUO Wei, et al. Research on straightness detection system for shaft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 51-56.

轴类零件直线度检测系统研究

徐宏图¹, 张琦¹, 罗伟¹, 田天泰¹, 李文浩¹, 王聚存²

(1. 西安交通大学, 西安 710049;

2. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

[摘要] 通过对现有轴类零件直线度检测方法的优缺点分析, 提出一种新的非接触式直线度测量方法。该方法利用多个激光位移传感器离散化采集轴类零件多条母线上的点, 基于最小二乘法计算每个截面的圆心坐标, 拟合出零件实际轴线, 从而判断零件直线度误差。基于上述方法, 设计开发了一套直线度检测系统, 通过测量精度研究和误差分析, 控制系统检测精度在 0.1mm/m 以内。试验结果表明, 直线度检测系统具有适用范围广、测量精度高、测量速度快、重复精度高等优点。

关键词: 直线度检测; 轴类零件; 最小二乘法; 激光测量; 误差分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.051



徐宏图

博士研究生, 研究方向为细长轴应力控制与增材修复。

轴类零件是机械工业中使用最普遍的零件之一, 在汽车、飞机、轮船等制造领域均有广泛应用。这些零件从毛坯料到成品的过程中, 经历了切削、磨削、热处理等多道复杂工序, 极易产生弯曲变形, 如不及时处理将

会影响后续加工和使用, 甚至产生大量废品, 造成极大损失^[1-3]。此外, 成品零件需要进行质量检测, 以确保满足使用要求。因此, 为减少废品的数量, 提高材料利用率, 改善产品精度, 保障使用要求, 必须在加工中和加工后对这些零件进行直线度检测, 及时进行校正^[4-5], 减少损失。

随着轴类零件在工业上需求的增大, 直线度测量技术也得到很大的发展^[6]。目前广泛应用于直线度的测量方法主要分为两大类^[7-13]: 第 1 类是传统测量方法, 包括光隙法、打表法、节距法、三坐标法和激光准直仪法等。其中光隙法和打表法测量效率低、精度差; 三坐标法测量精度高, 但成本过高, 且效率较低, 不适用于批量化生产; 节距法主要用于测量单一母线; 激光准直仪容易受到外界干扰, 使用受到很大局限。第 2 类是现代测量方法, 近年来研究较多的有激光干涉法、光学扫描法、基于

位置敏感探测器 (Position sensitive detector, PSD) 的直线度检测方法和基于图像处理的直线度检测方法等。激光干涉法的优点是测量精度高, 可同时测量两个方位, 缺点是由于激光光束受环境因素等影响较大, 激光漂移对直线度测量结果影响较大, 激光光路调节难度大、价格较高; 光学扫描法成本低, 数据处理简单, 但传感器漂移特性、传感器安装水平等因素对最终测量结果影响较大; 基于 PSD 的直线度检测方法具有测量精度高、位置分辨率高、自动化程度高和安装简便等特点, 但成本较昂贵。基于图像处理的直线度测量方法易于实现自动化, 不需要很多人工干预, 有一定的实用性, 但只能测量小尺寸的物体, 对工程中大尺寸物体不适用, 且照明系统对测量结果有一定影响。

综上所述, 虽然出现了很多直线度测量方法, 但测量精度、效率和成本之间很难平衡, 国内大部分工厂仍

然采用V形块与千分表配合的方式进行简单测量,这种方式测量效率和精度低,已经远不能满足工业需求。本研究基于以上现状,设计开发了一种快速准确的轴类零件直线度检测系统,并在系统误差补偿、数据处理、直线度误差评定和试验方面进行了深入研究。

直线度检测原理

本设备检测系统采用非接触式直线度测量方法,利用多个传感器离散化采集轴类零件多条母线上的点,从而得到多个截面圆周点数据,基于最小二乘法计算每个截面的圆心坐标,连接这些圆心坐标得到零件实际轴线,最后计算出直线度误差的大小和空间位置。

如图1所示,首先将多个激光位移传感器沿零件圆周均匀分布,并以分布中心为原点,水平方向为X轴,竖直方向为Y轴,沿轴线方向为Z轴,建立三维直角坐标系,测量传感器自身到零件表面的距离,并根据安装角度将该距离值进行坐标化,得到一组坐标点;然后电机模组带动传感器沿零件轴线方向,从零件始端移动至末端,光栅尺实时记录轴线位置,从而得到多组坐标数据;最后基于最小二乘法计算每组坐标数据对应的圆心坐标,连接每个圆心点,得到零件的真实轴线,将该轴线进行空间旋转,使得起始点与末端坐标与Z轴重合,计算各个圆心点到Z轴距离,得到最大误差点,其对应的Z轴数值为误差点的轴线距离值,角度值根据X、Y坐标利用反三角函数计算,由此便得到直线度误差最大值和空间位置。

检测系统

根据上述检测原理,设计设备的检测系统结构如图2所示。支撑板、光栅尺、直线模组通过螺栓连接固定在底座上,支撑板上固定三爪卡盘,

两个三爪卡盘用于夹持零件,直线模组右端与步进电机固定连接,直线模组的滑块上安装有法兰,传感器安装架固定在法兰上,6个激光位移传感器分别固定在6个传感器法兰板上,传感器法兰板固定在传感器安装架上。系统实物图如图3所示。

直线度检测精度研究

1 传感器数量对检测精度的影响

本研究采用最小二乘法计算圆心空间坐标,圆心计算精度受零件截面形状影响,由于零件存在加工误差和安装误差,导致零件被检测截面不可能是圆形,而是一个椭圆,且椭圆长轴与短轴之差越大,精度越差。因此需要验证最大安装偏差对检测精

度造成的影响。

设轴类零件无直线度误差,长度为L,截面半径为r,由于安装偏斜,零件的右端相对于左端偏斜量为d,零件安装倾斜角和被检测截面长轴的长度分别为β和a,短轴为零件截面处直径,如图4所示。

根据各参数的几何关系,零件安装倾斜角为:

$$\beta = \arcsin(d/L) \quad (1)$$

被检测截面长轴的长度a为:

$$a = \frac{2r}{\cos \beta} \quad (2)$$

长轴与短轴差值Δ₁为:

$$\Delta_1 = a - 2r \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,Δ₁的值与r成正比,随β值的增大而变大。考

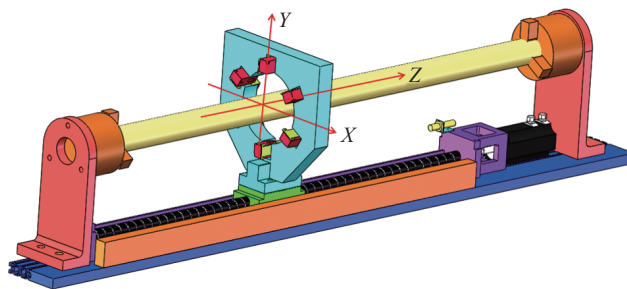


图1 检测原理图

Fig.1 Detection principle diagram

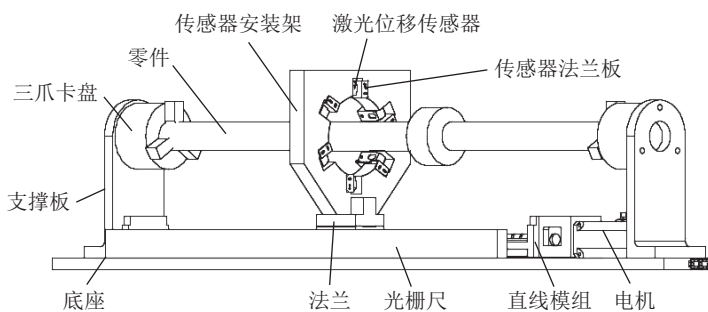


图2 检测系统

Fig.2 Detection System



图3 检测系统实物图

Fig.3 Physical picture of detection system

虑极限情况,轴类零件最大截面半径 r 为 50mm,零件安装倾斜角 β 为 5° 时, $\Delta_1=1\text{mm}$,因此极限情况下被检测截面椭圆长短轴之差为 1mm。

传感器均匀分布时,零件被测截面上的采样点数越多,计算所得圆心坐标误差越小,但采样点数越多意味着需要更多的传感器,将导致成本大幅度提高。因此为了合理平衡精度与成本之间的关系,需要验证极限装夹误差时,可使用的激光位移传感器个数。

验证计算前,做出以下两点假设:(1)零件存在加工误差和装夹误差,导致零件上被检测截面为椭圆,考虑极限情况,被测截面长短轴直径差值为 1mm;(2)零件实际圆心与坐标原点不重合,且长轴、短轴均不与坐标轴重合。

分别设置被检测截面的长轴与 Y 坐标轴正向之间角度为 0° 、 10° 、 20° 和 30° ,并取 4 次计算结果中最大误差值为最终误差。激光位移传感器沿零件圆周等角度均匀分布,以激光位移传感器安装中心为坐标原点,水平向右为 X 轴正方向,竖直向上为 Y 轴正方向,建立平面直角坐标系 XOY。在 CAD 绘图软件中绘制实际检测情况,分别绘制 3、4、5、6、7、8 个激光位移传感器时的实际情况如图 5 所示,其中小圆表示零件被测截面,大圆为激光位移传感器安装圆周,半径值为 70mm,每个编号代表一个激光位移传感器,红色直线表示各个激光位移传感器到零件表面采样点的距离。

最大误差值具体如图 6 所示。其中纵坐标总误差是指计算圆心坐标与实际圆心坐标之间的距离。由图 6 可知,随着激光位移传感器个数的增加,圆心坐标误差值逐渐减小,误差值总体分布在 0.038~0.253mm 之间。激光位移传感器个数从 6 个到 8 个时,圆心坐标计算误差值仅降低 0.0302mm,总误差值降低很小;

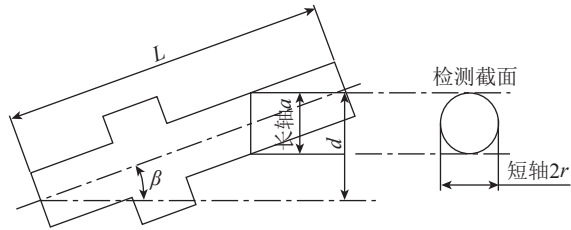


图 4 零件安装偏斜示意图
Fig.4 Installation deflection diagram of part

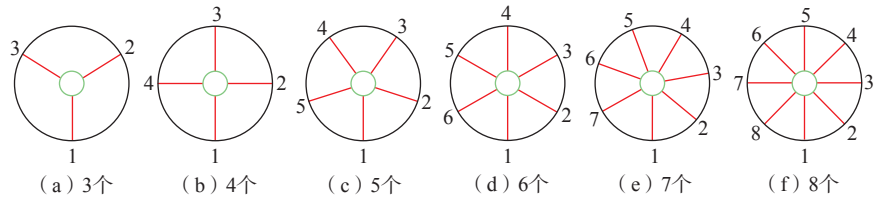


图 5 不同数量激光位移传感器的圆心坐标图
Fig.5 Center coordinates of different number of laser displacement sensors

综合考虑设备成本和精度,本设备采用 6 个激光位移传感器。

2 传感器安装对检测精度的影响

2.1 传感器径向安装误差

传感器安装应位于同一个圆周上,保证每个传感器到坐标原点的距离相等,但实际位置与理想位置存在一定偏差,该偏差会对检测精度造成影响,因此需要剔除由传感器径向安装造成的系统误差。本研究使用同轴度和直线度为 0.02mm、直径为 40mm、长度为 1000mm 的标准轴进行标定,对存在径向误差的传感器进行补偿。

设标准轴半径为 r' ,传感器安装圆周半径为 R ,第 i 个传感器在第 n 个截面检测到零件表面的距离为 d_m ,补偿后的第 i 个传感器在第 n 个截面检测距离为 d'_m 。当零件安装后,各个传感器测量自身至零件被检测表面上的对应点距离值,理想情况下,各数值应等于 $(R-r')$,但是由于传感器径向安装误差,造成有些传感器测量数值与该数值不等,因此,通过加上一个补偿量 Δx_i 的方法进行补偿,以消除传感器径向安装误差。如图 7 所示。

补偿量 Δx_i 的计算过程如下:

$$\Delta x_i = (R - r') - d_{i1} \quad (4)$$

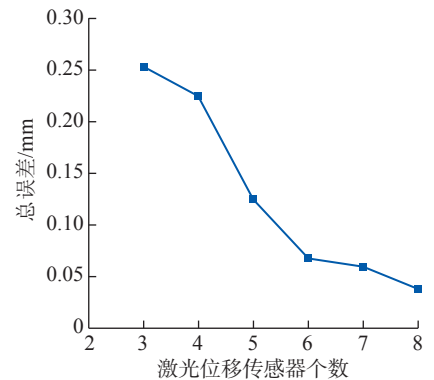


图 6 激光位移传感器个数对计算精度的影响
Fig.6 Influence of the number of laser displacement sensors on calculation accuracy

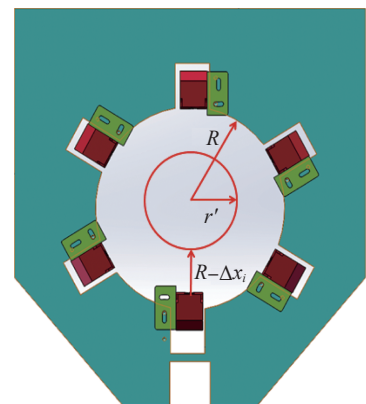


图 7 传感器径向安装
Fig.7 Radial installation of sensor

式中, Δx_i 为检测第 1 个截面时, 第 i 个传感器的测量值与理论值的差值, mm; R 为传感器安装圆周半径, mm; r' 为标准轴半径, mm; d_{i1} 为检测第 1 个截面时, 第 i 个传感器的测量值, mm。传感器径向安装误差补偿公式:

$$d'_{in} = d_{in} + \Delta x_i \quad (5)$$

式中, d'_{in} 为第 i 个传感器在第 n 个截面补偿值, mm; d_{in} 为第 i 个传感器在第 n 个截面测量值, mm。

2.2 传感器周向安装误差

传感器沿零件圆周方向安装角度的偏差也会影响检测精度。如图 8 所示, 某传感器角度偏差为 α_1 。此时该传感器测得实际距离值为:

$$d_{i1} = -\sqrt{r_1^2 - R^2 \sin^2 \alpha_1} + R \cos \alpha_1 \quad (6)$$

式中, d_{i1} 为检测第 1 个截面时, 第 i 个传感器的测量值, mm; r_1 为第 1 个截面半径, mm; α_1 为传感器偏差角。补偿量 Δx_i 为:

$$\Delta x_i = (R - r_1) - d_{i1} \quad (7)$$

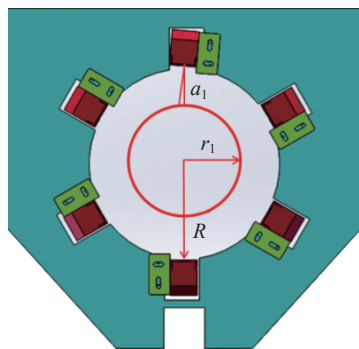


图 8 传感器圆周方向安装偏斜
Fig.8 Sensor installation deflection in circumferential direction

式中, Δx_i 为检测第 1 个截面时, 第 i 个传感器的测量值与理论值的差值, mm。当检测第 n 个截面时, 测得实际距离值为:

$$d_{in} = -\sqrt{r_n^2 - R^2 \sin^2 \alpha_1} + R \cos \alpha_1 \quad (8)$$

式中, d_{in} 为第 i 个传感器在第 n 个截面测量值, mm; r_n 为第 n 个截面半径, mm。补偿后输出值为:

$$d'_{in} = d_{in} + \Delta x_i \quad (9)$$

式中, d'_{in} 为第 i 个传感器在第 n 个截面补偿值, mm。补偿后的输出值与理论输出值的误差值 Δ 为:

$$\Delta = |d'_{in} - (R - r_n)| = |r_n - r_1 + \sqrt{r_1^2 - R^2 \sin^2 \alpha_1} - \sqrt{r_n^2 - R^2 \sin^2 \alpha_1}| \quad (10)$$

由式(10)可知, 误差值 Δ 与 r_n 、 r_1 、 R 和 α_1 有关。其中 r_n 、 r_1 、 R 与传感器、零件的尺寸有关, 属于系统固定值。因此控制误差值 Δ 的方法是通过降低周向偏斜角度 α_1 实现。误差值 Δ 越大, 计算得到的圆心坐标与实际坐标值偏差越大。下文验证在满足精度要求时 α_1 的极限值。

考虑极限情况, 当 3 个相邻激光位移传感器同时存在误差值 Δ (此时计算得到的圆心坐标误差最大) 时, 求取圆心坐标计算误差的极大值; 圆周方向安装角度误差 α_1 值、误差值 Δ 与圆心坐标误差值对应数值如表 1 所示。当 $\alpha_1=1.8^\circ$ 时, 圆心坐标误差值 $\Delta=0.093$ mm, 接近设备精度值 0.1mm。为确保测量结果准确, 采用水平角度测

量仪修正激光位移传感器安装的周向角度误差值。水平角度测量仪测量精度为 0.1° , 修正安装误差如图 9 所示。

采用水平测量仪修正周向安装角度误差后, 周向残余安装误差在 0.1° 左右, 此时圆心坐标计算误差值约为 0.01mm, 精度较高, 满足设计要求。

试验研究

1 光轴类零件直线度检测试验

为了能够对比本设备直线度检测精度, 本研究采用与三坐标测量仪检测结果对比的方式进行判断, 三坐标测量仪型号为 Global classic SR 575, 测量范围为 $500\text{mm} \times 700\text{mm} \times 500\text{mm}$, 长度测量误差为 $\text{MPEE} \leq 1.9 + 3.3L/1000$, μm , 最大探测误差为 $\text{MPEP} \leq 1.9\mu\text{m}$ 。

测量 5 个长度为 1000mm, 直径分别为 30mm、40mm、50mm、60mm 和 70mm 的光轴类零件直线度, 分析对比两个测量结果, 如图 10 所示。由图 10 可知, 三坐标测量仪检测结果与本设备检测系统测量结果的最大差值为 0.051mm, 偏差总体在 0.021~0.051mm。对于不同的零件, 本设备检测系统测量结果与三坐标测量仪测量结果偏差值较小, 说明本设备检测系统对光轴类零件直线度检测精度较高, 适用于对光轴类零件直线度测量。

2 阶梯轴零件直线度检测试验

本检测设备的主要优势之一在于对阶梯轴零件直线度的高效测量。试验选取 4 根长度 400mm、小端直径 35mm、大端直径 50mm 的阶

表 1 周向角度误差对计算精度的影响

Table 1 Influence of circumferential angle error on calculation accuracy

轴向角度安装误差值 $\alpha_i / (^\circ)$	传感器测量误差值 Δ / mm	圆心坐标计算误差值 / mm
1.2	0.065	0.043
1.4	0.088	0.0586
1.6	0.116	0.0773
1.8	0.14	0.093
2	0.183	0.125



图 9 周向角度误差修正
Fig.9 Correction of circumferential angle error

梯轴零件作为测量对象。首先采用三坐标测量仪对阶梯轴零件进行直线度检测,其次使用本设备检测系统进行检测,分析对比两者测量结果,如图 11 所示。由图 11 可知,对阶梯轴零件直线度检测结果中,本设备检测系统与三坐标测量仪检测结果的最大偏差为 0.04mm,偏差总体在 0.013~0.04mm,两者测量结果表明本设备检测系统对阶梯轴零件直线度检测精度较高,适用于阶梯轴类零件的直线度测量。

3 设备重复测量精度试验

重复测量精度是指针对同一个零件,多次测量结果间的差值。本设备检测系统不仅能够测得零件的最大直线度误差,而且还可以测得最大误差处的轴向位置和周向角度值。重复测量精度的高低直接影响到后续校直加工,因此十分重要。本研究通过对零件两次装夹,且每次装夹进行 5 次测量,获取测量结果数据如表 2 所示。

由表 2 数据可知,两次装夹下,测得的直线度偏差最大差值为 0.05mm,轴线位置偏差最大值为 13mm,第 1 次装夹周向角度偏差最大值为 4°,第 2 次装夹轴向角度偏差最大值为 5°。本设备检测系统设定的检测精度为 0.1mm/m,因此该直线度重复测量误差值满足精度要求。

两次装夹下,测得最大误差处轴线位置在 395~408mm 内,第 1 次装夹下直线度最大差值为 0.02mm,第 2 次装夹下直线度最大差值为 0.03mm。本设备检测系统采用的激光位移传感器测量精度为 0.03mm,因此激光位移传感器在精度范围内产生数据波动,导致直线度误差值出现较小变动,即呈现最大误差值在轴线位置 395~408mm 内波动的现象。同理,周向角度也出现数值波动的情况。虽然轴向位置和周向角度数据出现波动,但波动范围内的直线度误差最大差值很小,进行后续校直加工时压点位置在该范围内选取对最终校直

结果影响不大,因此本设备重复精度满足实际应用。

最后,根据上述设计和试验中得到的数据,可以得出本研究中的细长轴零件直线度高效检测设备的详细参数。零件直径范围为 20~100mm,

零件长度为 $\leq 1000\text{mm}$,检测精度为 0.1mm/m,检测速度为 1.5m/min。

结论

(1) 提出了一种新的轴类零件直线度测量方法,通过多个激光位移

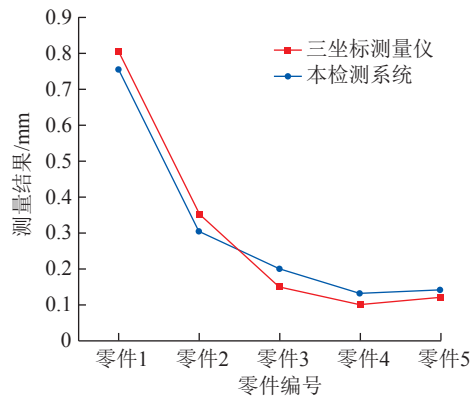


图 10 光轴类零件直线度测量结果对比

Fig.10 Comparison of straightness measurement results of plain shaft

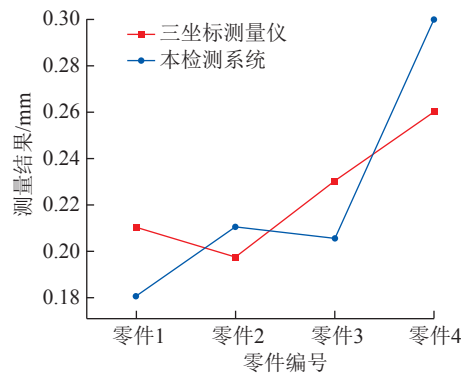


图 11 阶梯轴零件直线度测量结果对比

Fig.11 Comparison of straightness measurement results of stepped shaft

表 2 检测系统重复测量精度试验数据

Table 2 Test data of repeated measurement accuracy of detection system

装夹过程	直线度检测值/mm	最大误差处轴向位置/mm	周向角度/(°)
第 1 次装夹	0.48	397	40
	0.47	401	41
	0.48	406	44
	0.48	395	40
	0.46	408	42
第 2 次装夹	0.46	395	58
	0.44	403	58
	0.43	407	56
	0.45	403	57
	0.46	399	53

传感器测量零件多条母线信息,从而拟合出零件圆心坐标曲线,采用两端连线法判断直线度。

(2) 根据上述方法,设计开发出一台直线度高效检测设备,测量精度为 0.1mm/m,检测速度为 1.5m/min。

(3) 通过与三坐标测量仪进行对比试验,验证了该设备测量精度和适用范围,对光轴类零件和阶梯轴零件都具有较高的直线度测量精度,且重复精度也满足实际应用。

参考文献

[1] 马鹏举,许志永,程向,等.基于旋转锻造工艺的航空发动机薄壁空心细长轴加工精度研究[J].锻压技术,2017,42(3):1-10.
 MA Pengju, XU Zhiyong, CHENG Xiang, et al. Study on machining precision of thin wall long hollow shaft for aero-engine based on rotary swaging technology[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(3): 1-10.
 [2] 张定华,黄新春.航空发动机关键构件制造可靠性技术研究[J].航空制造技术,2015,58(17):26-29.
 ZHANG Dinghua, HUANG Xinchun. Research on manufacturing reliability of aeroengine's key components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(17): 26-29.
 [3] 孙华,韩靖,张海波.薄壁细长轴加工方法[J].金属加工,2015(11):46-47.
 SUN Hua, HAN Jing, ZHANG Haibo.

Machining method of thin-walled slender shaft[J]. Metal Working, 2015(11): 46-47.
 [4] 刘子涛.轴类自动校直机控制系统研究[D].重庆:重庆理工大学,2013.
 LIU Zitao. Research on control system of automatic shaft straightening machine [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.
 [5] 王梦帆.轴类零件校直机智能检测模块研究设计[D].重庆:重庆理工大学,2020.
 WANG Mengfan. Research and design of intelligent detection module for shaft straightening machine[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
 [6] 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].现代制造工程,2005(6):82-84.
 NING Yanping, LIU Zhanfeng. The status of high precision linear measure techniques inside and outside[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(6): 82-84.
 [7] 房传明.基于光学扫描法的长导轨直线度测量方法研究[D].苏州:苏州大学,2014.
 FANG Chuanming. Research on straightness measurement method of long guide rail based on optical scanning method[D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
 [8] 左倩.圆管状零件内孔测量技术研究[D].西安:西安工业大学,2016.
 ZUO Qian. Research on inner hole measurement technology of circular tubular parts[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016.
 [9] 罗凯.基于位置探测器(PSD)的长

导轨直线度测量系统研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
 LUO Kai. Research on long rail straightness measurement system based on position detector (PSD)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
 [10] 李婷,郭宇,张拥军,等.直线度测量技术综述[J].计量技术,2020(6):84-87.
 LI Ting, GUO Yu, ZHANG Yongjun, et al. Survey of straightness measurement methods[J]. Measurement Technique, 2020(6): 84-87.
 [11] 谢江平.空间直线度测量中的DSP图像处理技术和误差评定[D].武汉:华中科技大学,2012.
 XIE Jiangping. DSP image processing technology and error evaluation in spatial straightness measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
 [12] 计玮.长管束直线度与平行度测量方法研究[D].西安:西安工业大学,2017.
 JI Wei. Research on straightness and parallelism measurement method of long tube bundle[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
 [13] 张云辉,谭庆昌,田原姬,等.基于数字图像处理测量直线度的方法研究[J].微计算机信息,2008,24(27):274-275,203.
 ZHANG Yunhui, TAN Qingchang, TIAN Yuanyuan, et al. Research on a method of measuring linearity based on numerical image processing[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(27): 274-275, 203.
 通讯作者:张琦,教授,主要从事先进成形工艺及其装备的研究。

Research on Straightness Detection System for Shaft Parts

XU Hongtu¹, ZHANG Qi¹, LUO Wei¹, TIAN Tiantai¹, LI Wenhao¹, WANG Jucun²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] By analyzing the advantages and disadvantages of the existing straightness detection methods of shaft parts, a new non-contact straightness measurement method is proposed. In this method, several laser displacement sensors are used to discretize the points on several generatrix of shaft parts. The center coordinate of each section is calculated based on the least square method, and the actual axis of the parts is fitted to judge the straightness error of the parts. Based on the above method, a straightness detection system was designed and developed. Through measurement accuracy research and error analysis, the measurement accuracy of the system was within 0.1mm/m. The experimental results show that the system has the advantages of wide application range, high measurement accuracy, fast measurement speed and high repeat accuracy.

Keywords: Straightness detection; Shaft parts; Least square method; Laser measurement; Error analysis

(责编 七七)