

基于激光的导轨直线度检测算法研究

刘不凡^a, 司欣格^b, 包建东^a, 徐文臻^b

(南京理工大学 a. 自动化学院; b. 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 直线导轨是一种机电一体化的导向装置, 是生产加工的重要零件。研究一种简单的检测导轨直线度的方法, 将激光安装在滑块上, 照射导轨末端安装的位置传感器, 读出光斑离坐标轴的距离。根据该距离得到导轨倾斜角, 通过倾斜角计算得到导轨直线度。考虑导轨实际轴线偏离理想轴线而产生静态误差, 利用最小二乘法和改进遗传算法消除该误差影响。详细给出了基于激光的导轨直线度检测计算方法, 并对误差进行分析, 为导轨直线度自动化检测提供条件。

关键词: 直线导轨; 激光; 最小二乘法; 改进遗传算法; 机电一体化; 自动化

中图分类号: TP274 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)01-0140-03

Research on Linear Detection Algorithm of Guide Rail Using Laser

LIU Bufan^a, SI Xinge^b, BAO Jiandong^a, XU Wenzhen^b

(a. School of Automation; b. School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As the guide device of a mechanical and electrical integration, linear guide is an important part of production and processing. In order to detect the detection of guide rail, a simple method was proposed. The laser was mounted on the slider to illuminate the psd installed at the end of guide rail to read the distance of the spot from the coordinate axis. According to the distance, the inclination angle of guide was obtained, and the detection of guide was calculated by the inclination angle. In consideration of the static error caused by the actual guide axis deviating from the ideal axis, the least square method and the improved genetic algorithm were used to eliminate the influence of the error. The paper, with the analysis on the errors, elaborates the calculation method of linear detection of guide rail based on laser great in detail, thus furnishing the conditions for automatic linear detection of guide rail.

Keywords: linear guidel; laser; the least square method; improved genetic algorithm; mechatronics; automatic

0 引言

直线导轨是一种机电一体化的导向装置, 是生产加工常用到的重要零件, 如机床、激光焊接机等都含有直线导轨。直线导轨的性能对加工件的精度产生重要影响, 导轨直线度也是衡量直线导轨精度的重要参数。本文主要研究激光检测导轨直线度的方法。激光检测的方向性好, 检测装置结构简单, 成本低, 还可实现自动化检测。若采用自动化检测, 采集点越多, 则检测精度越高。

1 检测方法

如图 1 所示, 检测装置由导轨、激光、滑块、光电位置传感器 (psd)、刻度尺组成, 其中 psd 上有坐标刻度。滑块带动激光在导轨上沿着 z 轴滑动, 通过刻度尺可以调整滑块体位置。检测之前, 记录光源的初始位置 z_0 , 然后调整 psd, 使得光斑对准坐标原点, 或者直接记录初始光斑的坐标, 根据直线度的定义, 最后求得的结果和截距无关。然后令滑块平移距离 δz , 每平移一段这个距离, 就记录光斑

的坐标, 直到滑块走完整段导轨。

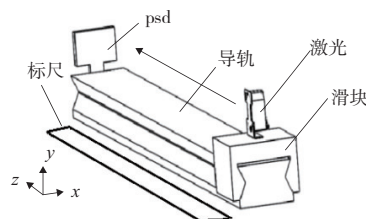


图 1 激光测量导轨直线度装置示意图

2 偏差计算方法

先考虑光斑离纵坐标的距离 $x(z)$, 通过该值可以得到导轨在水平方向的倾斜角 $\theta_x(z)$, 下标 x 表示在水平方向上的倾斜角, y 为垂直方向上的。所以有:

$$k_x(z) = \tan \theta_x(z) = \frac{x(z)}{z_0 - z} \quad (1)$$

式中: z_0 为光源在导轨初始位置离 psd 的距离; $k_x(z)$ 即为导轨偏差在水平方向上的变化斜率。有:

$$\begin{aligned} d'_x(z) &= k_x(z) \\ d_x(z) &= \int_0^z k_x(z) dz + d_x(0) \end{aligned} \quad (2)$$

对于一个光滑的直线导轨,任意 z_0 在导轨长度范围内,都有

$$\lim_{z \rightarrow z_0^+} \theta(z) = \lim_{z \rightarrow z_0^-} \theta(z)$$

所以导轨偏差 $d(z)$ 在导轨长度范围内处处连续。

由于检测中只能采集 $x(z)$ 的离散点 $x(z_i)$, 利用刻度尺将 z 分割成 z_i 。令

$$\delta z = z_{i+1} - z_i$$

δz 为采集点的步长,显然,该值越小采集点越多,得到的结果越精确。

即有:

$$\delta d_{xi} = \delta z \tan \theta(z_i) \quad (3)$$

则:

$$\begin{aligned} d_{xi} &= d_{x(i-1)} + \delta d_{xi} = d_{x(i-1)} + \delta z \tan \theta(z_i) = \\ d_{x(i-1)} + \delta z \frac{x(z)}{z_0 - z} \quad (\text{当 } i = 1, d_{x(i-1)} &= 0) \end{aligned} \quad (4)$$

d_{xi} 即为导轨水平方向上的偏差。同理,可以用相同的方法得到垂直方向上的偏差 d_{yi} 。

3 静态误差分析

静态误差是不随滑块平移改变的误差,主要有两种误差:因 psd 不能与导轨理想轴线完全垂直;故刻度尺不能与导轨理想轴线完全平行;所以激光不能与导轨理想轴线完全平行。这导致实际 z 轴会和理想 z 轴存在一个角度,这个角度和 psd、刻度尺偏离的角度有关,虽无法知道这个角度,但可以采用最小包容区域法^[2-3]拟合估算出实际的 z 轴,这里称作 z' 。所得到的最小包容线即为 z' 。本文介绍两种获取最小包容线的算法。

3.1 最小二乘法

最小二乘法是通过最小化误差的平方和得到最小包容线^[4]。利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。可以根据以下公式得到最小包容线 $f = az + b$ 。

$$\begin{aligned} a &= \frac{b \sum_{i=1}^n d_i z_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2} \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n d_i - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n z_i d_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2} \end{aligned}$$

式中 n 为采集点的数目。

最终直线度 ε 通过下式得出:

$$\varepsilon = \max(d_i - f_i) - \min(d_j - f_j)$$

3.2 改进遗传算法

利用遗传算法可以搜索到最小包容线,且比最小二乘法的精度更高。但介于采集数据较多,遗传算法搜索效率

较低,可采用改进遗传算法^[5]。操作如下^[6]:

由式(5)

$$k = k_{\min} + k_c(k_{\max} - k_{\min}) \quad (5)$$

对 k_c 进行归一化,对归一化的 k_c 进行二进制编码,随机得到的向量 k_c 当作个体,对其进行微分进化。

1) 变异操作

$$v_i = x_{r_1} + F(x_{r_2} - x_{r_3}), \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

式中: $x_{r_1}, x_{r_2}, x_{r_3}$ 是在父代种群中随机选取的 3 个不同的个体; v_i 为变异后的个体; N_p 为种群规模, $N_p \geq 4$, $F \in [0, 2]$ (常量)。

2) 交叉操作

$$u_i = [u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,D}] :$$

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{randb} \leq C_R \text{ 或 } j = \text{rand}_j \\ x_{i,j}, & \text{randb} > C_R \text{ 或 } j \neq \text{rand}_j \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, N_p, j = 1, \dots, N_p$$

$\text{randb} \in [0, 1]$ (随机数); $C_R \in [0, 1]$ (常量);

$\text{rand}_j \in [1, D]$ (随机数)。

3) 选择操作

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} u_i, & g(u_i) < g(x_i^t) \\ x_i^t, & \text{其他} \end{cases}$$

估计最小包容线斜率的一个区间,该区间范围越小得到精度越高。该区间可以先利用最小二乘法进行估算;最小二乘法得到直线度后,该算法最小包容线斜率的估计区间可以以该直线度为中心,范围为比直线度小一个量级。比如最小二乘法得到的直线度为 0.055 7,估计区间则为 [0.050 7, 0.060 7]。

利用式(5)对斜率进行归一化,进行二进制编码,通过上述方法搜索满足最小条件的斜率。令最小条件

$$g(x_i) = \max(x_i - f_i) - \min(x_j - f_j)$$

即得到直线度的公式。

在文献[7]中已验证了该算法评定直线度的可行性。

4 动态误差分析

动态误差是随滑块位置改变的误差,本文考虑了以下几种导致误差的因素。

1) 滑块与导轨之间的间隙:因为滑块需要在导轨上滑动,与导轨之间的配合是间隙配合,这在滑动过程中会对偏差精度造成一定影响。一般该配合间隙 $\leq 0.04 \text{ mm}$ 。一般导轨直线度误差在 1‰ 左右,所以导轨长度超过 1 m,该配合间隙远小于导轨直线度误差。此外,被测导轨长度越长,该误差影响越小。

2) psd 精度:光电位置传感器(psd),光斑的位置与电流存在一定关系,得到偏差较精确。

3) 刻度尺的精度:因不能准确调节滑块的位置,刻度尺的精度误差在 1‰,和 1) 一样,基本影响不大。人工调节滑块位置的不准确,会令光源在 z 轴的坐标投影产生误差。即对于公式(4)中的步长 δz 会有细微的误差,但这些误差在每次调整后可能为正也可能为负,累加后会有一定的抵消。

5 实验和仿真

本实验为得到更高精度的值,利用 psd 输出光斑的坐

标值,采用 2 cm×100 cm 光轴导轨为实验对象,初始距离 $z_0 = 100$ cm。滑块沿导轨平移重复经过 3 次实验获得实验结果如表 1 所示,分别利用最小二乘法和改进遗传算法进行直线度的计算。

表 1 三次实验结果

第一次			第二次			第三次		
s/cm	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	s/cm	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	s/cm	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$
5	5.08	5.06	5	4.03	5.12	5	2.34	4.72
10	8.48	-3.92	10	8.94	-2.38	10	6.96	0.12
15	18.35	-6.03	15	16.73	-3.09	15	13.4	-4.50
20	15.84	-10.40	20	18.42	-12.29	20	17.19	-11.24
25	7.36	0.97	25	9.58	-1.74	25	6.08	-3.97
30	-9.03	9.28	30	-6.75	7.32	30	-7.71	5.14
35	4.94	8.81	35	3.64	9.18	35	2.74	7.91
40	10.30	13.09	40	9.32	16.98	40	8.58	15.38
45	14.82	9.26	45	12.83	8.40	45	9.82	9.01
50	8.30	9.38	50	7.89	6.83	50	6.51	5.24
55	-4.62	9.76	55	-2.4	10.25	55	-4.29	9.73
60	-18.04	10.17	60	-14.59	8.28	60	-6.92	10.58
65	-9.75	8.39	65	-10.77	6.06	65	-8.15	7.83
70	4.37	-0.45	70	2.85	1.92	70	4.74	0.18
75	13.23	-7.29	75	11.81	-8.16	75	13.52	-5.39
80	24.26	-9.34	80	23.03	-11.42	80	20.74	-8.71
85	30.35	-9.75	85	28.27	-12.73	85	30.37	-14.01
90	27.83	-18.04	90	25.18	-20.01	90	23.91	-19.49

计算结果如表 2 所示。

表 2 基于最小二乘法和改进遗传算法的直线度计算的算法偏差 单位: μm

实验次数	最小二乘法		改进遗传算法	
	d_x	d_y	d_x	d_y
第一次实验	10.363 5	6.107 8	10.219 4	5.932 5
第二次实验	10.364 8	6.135 1	10.208 2	6.113 8
第三次实验	10.238 1	5.109 7	10.208 2	5.676 5
重复度	0.059 4	0.477 1	0.005 3	0.179 4

从计算结果可以看出,本文的方法得到的直线度重复性较小,改进遗传算法得到的结果精度比最小二乘法更高。

6 结语

本文对激光检测导轨直线度进行了研究,详细给出了偏差的计算过程。另外,讨论了两种估算最小包容直线、消除静态误差的算法;最后对存在的动态误差进行分析。分析结果证明:表面所测导轨越长,动态误差影响越小。式(4)中的 δz 和传感器频率相关,如果采用自动化检测代

替人工、电机驱动滑块等措施,可以使 δz 非常小。这样采集点数量越多,越能贴近实际的偏差曲线。所以本文的计算方法更加适用于自动化检测。

参考文献:

- [1] 黄天喜,严祯,曾韬. 几种测量机床导轨直线度误差的方法[J]. 机械工程与自动化, 2008(2): 186-188.
- [2] 吴呼玲. 最小包容区域法评定直线度误差[J]. 林区教育, 2008(9): 124-126.
- [3] HUANG S T, FAN K C, WU J H. A new minimum zone method for evaluating straightness errors [J]. Precision Engineering, 1993, 15(3): 158-165.
- [4] 于大国,宁磊,孟晓华. 基于最小二乘法深孔轴线直线度误差评定[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 39-41.
- [5] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1995, 23(1): 2-10.
- [6] 段海滨. 仿生智能计算[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] 司欣格,包建东. 基于爬山算法及微分进化算法的深孔轴线直线度误差评定[J]. 测试技术学报, 2019, 33(5): 418-420, 460.

收稿日期:2019-11-26