

文章编号: 1000-5013(2011)06-0615-03

直线度误差评定的测量提取点数选择

黄 富 贵

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在其他测量实验条件相同的情况下,采用不同的提取点数,用三坐标测量机对相同直线的部分测量点坐标进行等间距提取,并用最小二乘法评定相同直线不同提取点数下的直线度误差. 分析提取点数与直线度误差的关系,提出最佳提取点数的概念,指出直线度误差检测相关标准中必须补充提取点数的要求.

关键词: 提取点数; 三坐标测量机; 直线度误差; 最小二乘法

中图分类号: TG 801 **文献标志码:** A

直线度公差是国家标准和国际标准化组织(ISO)相关标准中规定的十几项形位公差项目之一,它主要用于控制平面内或空间直线的形状误差. 直线度误差的精确测量与评定,对于具有直线度公差要求的几何零件的合格性判断与保证是至关重要的. 在以往的实际生产和检验工作中,直线度误差的测量常用贴切法、测微法和节距法等遵循与理想要素比较原则的方法. 随着数据处理技术的成熟和三坐标测量机在形位误差检验中的广泛运用,测量坐标值原则成为直线度误差测量的主要原则. 根据新一代国际标准化组织制订的一系列产品几何量技术规范与认证(geometrical product specification and verification, 简称 GPS)标准的要求,要对制造完成的机械零件某项几何精度进行合格性判定,首先必须采用相应的设备在被测零件的实际要素上获得提取组成要素;然后,以提取组成要素为原始数据,根据一定的拟合规则获得拟合组成要素,并得到评定结果;最后,对测量评定结果的测量不确定度给出定量分析,并根据零件合格性判定规范做出判定^[1-3]. 由此可见,新一代 GPS 的要求与测量坐标值原则的要求不谋而合. 本文在遵循测量坐标值原则下,对某直线的直线度误差进行测量,并分析测量的评定结果.

1 直线度误差测量实验

如图 1 所示,采用 Global FX 777 型三坐标测量机,在测量环境温度 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的实验室条件下,对某零件给定平面内直线度误差进行测量的实验. 直线度误差测量实验有如下 3 个具体步骤.

(1) 将被测零件擦洗干净后放在 Global FX 777 型三坐标测量机工作台上,用 SP 600 型连续扫描测头测头系统配以直径为 8 mm 的球测头手动测量要素,按“3-2-1”法建立零件坐标系,并以被测直线方向为零件坐标系的 X 方向.

(2) 初步确定被测直线的评定长度(长度为 126 mm 左右,该被测直线的设计公差等级分为 6 级,直线度公差为 $12\text{ }\mu\text{m}$);然后,在 DCC 模式下进行不同情况的等扫描间距的自动扫描测量,提取被测直线上的测点坐标数据,以备直线度误差评定用. 实验提取了被测相同直线相同部位的 7 种不同情况的等扫描间距测点坐标数据,其扫描间距(d)分别为 2,1,0.5,0.33,0.25,0.20,0.10 mm,对应的提取点数分别为 63,126,253,379,506,632 和 1 252. 由于数据量很大,故文中没有全部列出.

(3) 将提取的等扫描间距测点坐标数据用 Matlab 软件的 Figure 功能折线拟合,如图 2 所示.

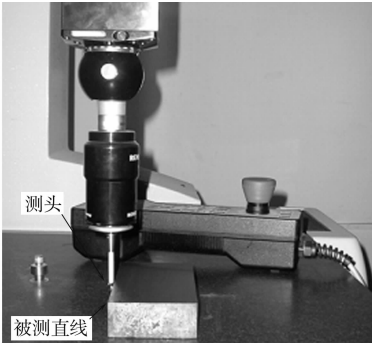


图 1 测量现场照片
Fig. 1 Measurement scene photo

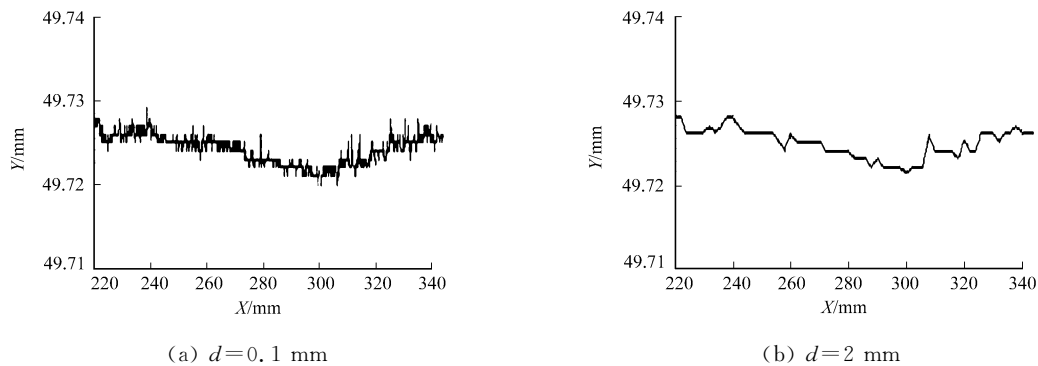


图 2 被测直线不同扫描间距的测点坐标

Fig. 2 Coordinates by different scanning distances

2 直线度误差的评定

国家标准规定在评定直线度误差时,理想直线必须满足最小条件并采用最小包容区域法确定. 不少学者对于满足最小条件的理想直线的确定方法进行研究,提出了优化算法、区域搜索法等. 这些算法评定精度虽高,但也有实现比较麻烦的缺点. 因此,实验仍采用最小二乘法评定被测直线的直线度误差^[4-5].

假设 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ 为被测直线上的提取点坐标数据,满足最小二乘条件的理想直线为 $y=kx+b$. 其中: k 为理想直线的斜率, b 为理想直线的截距. 则其残余误差为 $\epsilon_i=y_i-(kx_i+b)$. 其最小二乘法的目标函数 $J(k,b)=\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$, 约束条件是使 $J(k,b)$ 最小. 要满足约束条件,必须有 $\frac{\partial J}{\partial k}=0, \frac{\partial J}{\partial b}=0$. 将其简化,可求得最小二乘直线的待定参数 k 和 b 为

$$k = \left[n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right] / \left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right],$$
$$b = \left[\sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] / \left[\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \right].$$

根据最小二乘评定方法得被测直线的直线度误差为

$$\Delta = \max d_i - \max d'_i.$$

其中: $\max d_i$ 和 $\max d'_i$ 分别为最小二乘直线两异侧提取点到最小二乘理想直线的最大距离.

分别用最小二乘法评定两组被测直线的 7 组测量数据的直线度误差,结果如表 1 所示. 表 1 中: l 为直线长度; δ 为直线度公差; d 为扫描间距; N 为提取点数; Δ 为直线度误差.

表 1 采用不同提取点数下的直线度误测量评定结果表

Tab. 1 Evaluation results in different extraction points

l/mm	δ/mm	d/mm	$N/\text{个}$	$\Delta/\mu\text{m}$	l/mm	δ/mm	d/mm	$N/\text{个}$	$\Delta/\mu\text{m}$
126	0.012	2.00	63	6.7	62	0.05	2.00	30	47.0
126	0.012	1.00	126	6.8	62	0.05	1.00	61	52.7
126	0.012	0.50	253	8.8	62	0.05	0.50	122	54.9
126	0.012	0.33	379	8.6	62	0.05	0.25	245	59.2
126	0.012	0.25	506	9.8	62	0.05	0.20	303	58.2
126	0.012	0.20	632	8.8	62	0.05	0.10	519	58.9
126	0.012	0.10	1 252	8.7					

3 结果与讨论

直线度误差和其他形位误差的测量不确定度不仅与测量提取点数有关,而且还与测量设备、测量方法、评定方法、测量人员的技术水平和测量环境等因素有关. 从表 1 的结果可以看出,提取点数的不同会导致直线度误差测量评定结果的差异,随着提取点数的增加,直线度误差的测量评定结果有增大的趋

势,而且随着提取点数增加到一定值时,直线度误差的测量评定结果趋稳.

从图 2 的数据看,提取点数多,反映包含的被测直线的误差信息丰富(图 2a);相反,提取点数少,反映包含的被测直线的误差信息少(图 2b). 因此,提取点数多的情况下得到的直线度误差测量评定结果更接近被测直线的直线度误差真值. 理论上,在不考虑其他误差因素的情况下,要获得被测直线的直线度误差真值,提取点数应该为无穷多. 在对实际被测直线的直线度误差进行测量评定时,提取点数的选择很重要. 提取点数选择过少会导致直线度误差的测量评定结果比真实的直线度误差偏小,可能导致“误收”;但提取点数选择过多,虽然可以获得接近被测直线的直线度误差真值的测量评定结果,但也会增加测量工作量,降低测量效率,增加测量成本. 如从表 1 的测量评定结果可以看出,若提取点数为 30 时,直线度误差的测量评定结果为 0.047 mm,小于设计公差 0.05 mm,判定结果为合格. 但事实上,当提取点数增大到 200~300 点时,直线度误差趋于稳定,约为 0.059 mm,这一结果接近该直线的直线度误差真值,更可靠. 由此可见该直线的直线度误差大于设计公差 0.05 mm,判定结果为不合格.

在对直线度误差进行测量时,对于不同的直线测量对象,必定有一个合适的提取点数. 按照这个提取点数测量直线度误差,能得到接近直线度误差真值的直线度误差,该提取点数为最佳提取点数. 对应的相邻两提取点之间的间距称为最佳提取间距. 从表 1 的结果可以看出,两条被测直线的最佳提取点数大约为 250~600 点和 200~300 点.

直线度误差和其他形位误差测量的最佳提取点数的确定问题,实际上是个很复杂的问题. 在现今的直线度公差与误差的国家标准和国际标准 ISO 14406: 2010 《Geometrical product specifications (GPS): Extraction》中,由于没有对提取点数作出明确的规定,所以往往出现有直线度公差要求的零件的制造厂家的检验结果与用户厂家的检验结果差异较大,有时甚至出现合格与不合格的两种相反的判定结果. 造成这一结果的原因只是两者在测量时的提取点数选择不同. 所以,直线度误差检测的相关标准必须补充提取点数的相关要求. 在对其他的形位误差,如圆度误差、平面度误差、圆柱度误差、同轴度误差等进行测量时,提取点数的不同也会导致上述类似的情况,有待进一步深入研究.

参考文献：

[1] 蒋向前. 现代产品几何量技术规范(GPS)国际标准体系[J]. 机械工程学报,2004,40(12):133-139.
[2] 机械科学研究院,中国计量科学研究院. GB/T 11336—2004 直线度误差检测[P]. 北京:中国标准出版社,2004.
[3] 中机生产力促进中心,北京理工大学,中原工学院,等. GB/T 24631. 1—2009 产品几何技术规范(GPS)直线度[P]. 北京:中国标准出版社,2010.
[4] 黄富贵,崔长彩. 任意方向上直线度误差的评定新方法[J]. 机械工程学报,2008,44(7):221-224.
[5] 黄富贵,郑育军. 直线度误差测量采样方案的研究[J]. 工具技术. 2007,41(10):95-98.

Study on the Number of Extraction Points for
Evaluation of Straightness Error

HUANG Fu-gui

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Under same measurement conditions, some point sets were extracted from the linear part of a same part with different number of extraction points on the coordinate measuring machine the straightness error of the measured point sets was computed by the least square method; the relationship between the number of extraction points and the straightness error was analysed; the concept of optimal number of extraction points was put forward, and it is pointed out that the requirements for extraction number must be added in the relevant ISO standard of straightness error measurement.
Keywords: extraction points; coordinate measuring machine; straightness error; least square method