

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007101

高精度三维螺纹测量机接触式扫描测头 动态特性研究*

林希萌, 禹 静, 杨艳玲, 蔡晋辉, 李东升
(中国计量大学 计量测试工程学院 杭州 310018)

摘要:扫描测头是高精度三维螺纹综合测量机的核心部件,其动态特性严重影响了整机的精度。为了提高测量机的精度,对高精度螺纹三维尺寸测量线性扫描测头的动态特性进行了研究。首先分析了三维螺纹综合测量机用扫描测头的测量原理,然后建立了动态特性模型并提出了影响动态测量结果的因素,最后通过实验验证了这种测头结构的动态特性和测量处理方式的有效性。实验结果验证了影响因素的正确性,优化影响最大的采样间距因素可以过滤80%的无效数据点,从而使该段拟合平均残差平方和误差减小了91.0%,线性误差减小了67.4%,进而提高了三维螺纹测量机的测量精度。

关键词:接触式测量;扫描测头;动态特性;测头精度

中图分类号: TH703 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Study on contact scanning probe dynamic characteristics of high precision 3D thread measuring machine

Lin Ximeng, Yu Jing, Yang Yanling, Cai Jinhui, Li Dongsheng

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The scanning probe is the core part of the high precision 3D thread synthetical measuring machine, its dynamic characteristics seriously affect the precision of the machine. In order to improve the precision of the measuring machine, the dynamic characteristics of the linear scanning probe for 3D size measurement of high precision thread are studied. Firstly, the measuring principle of the scanning probe used in the 3D thread synthetical measuring machine is analyzed, then the dynamic characteristic model is established and the factors affecting the dynamic measurement result are put forward. Finally, the dynamic characteristic of the probe structure and the effectiveness of the measuring processing method are verified through experiments. The experiment results verify the correctness of the influencing factors. Through optimizing the sampling spacing factor that has the greatest influence, 80% of invalid data points can be filtered, so that the mean residual sum of squares error of the fitting in this section is reduced by 91.0% and the linear error is reduced by 67.4%. The measurement accuracy of 3D thread measuring machine is improved.

Keywords: contact measurement; scanning probe; dynamic characteristic; accuracy of measuring head

0 引 言

由于螺纹表面结构有沟槽,传统的测量^[1]只能在一维或二维尺度进行检测,不能检测全面三维形貌的缺点,目前正经历向三维测量的转变^[2]。在高精度三维螺纹测量机中,光学测头能够实现复杂曲面的非接触快速测量^[3],但接触式扫描测头测量稳定性高,具有

边定位边测量的优势而被广泛应用。作为螺纹测量机的核心部件,其精度影响了三维螺纹测量机的测量精度,从结构或原理设计、误差补偿和特性研究上可以实现测量精度的提高。首先对三维测量接触式测头的设计呈现多元化^[4-9],范光照对探头进行了分类介绍^[10],其次对误差的研究多是将测头与坐标机进行综合补偿与标定,近年来较多利用神经网络建立动态误差补偿模型^[11-13]。接触式测头一般都具有较好的静态特性,

收稿日期:2020-11-10 Received Date: 2020-11-10

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF01013102)资助

但在动态测量时存在多种因素综合的影响,需要对其进行研究。随着有限元技术的发展,研究学者结合有限元软件仿真与测试做特性研究:蔡春梅^[14]应用 ANSYS 软件分析了微纳米测头的静态特性和动态特性;Elshamy 等^[15]通过测量不同厚度和宽度的工件的固有频率,说明工件的尺寸和材料对固有频率的影响,并将有限元分析结果与实验结果进行了比较;刘冰^[16]等利用有限元对机床床身进行动态特性分析与结构优化。三坐标测头的动态误差与补偿的研究颇多^[17-19],王欣^[20]研究了触发式测头与工件的碰撞。以上研究为本文提供了一定的理论思路。

现阶段通过测头的设计与误差补偿能在一定程度上提高测头精度,但是想要突破精度瓶颈,必须对动态特性进行研究与分析。对于动态特性的研究,存在结构和原理性的差异,所以影响因素与参数设置有所不同。三维螺纹测量机用扫描测头是一种典型的接触式线性测头,本文针对扫描测头的动态影响因素这一问题展开研究,进行理论分析和实验验证,为螺纹测量结果提供理论基础。

1 动态测量模型

1.1 测量原理

高精度三维螺纹测量机及其测头如图 1 所示,螺纹安装于电动旋转台上,被测螺纹的空间坐标由测头对于 R 轴的大位移和测头接触被测螺纹时内部产生的小位移组合得到。该测量采用测头扫描控制原理, R 轴横向运动使测头与被测螺纹直接接触至设定的测力, Z 轴沿螺纹母线方向纵向运动,根据 Z 轴的运动路径, R 轴接收测头内部产生微位移量的反馈,若水平测力超出阈值则调整水平电机位置使测力在设定值范围,若超出阈值,则中止扫描,仪器报警。相同的,对于垂直测力, Z 轴接收测头纵向产生微位移量的反馈,若垂直测力超出阈值则调整垂直电机位置使测力在设定值范围,若超出阈值,则中止扫描,仪器报警。以被测螺纹中轴线为基准, R 轴对于 Z 轴的远端为螺纹的测量上侧,近端为测量下侧,测头结束下侧的扫描后沿 R 轴运动继续扫描上侧,即扫描完一组对称母线,电动旋转台旋转设定的角度,如 20° 或 30° ,测头继续扫描上下测,如此得到被测螺纹的三维点云数据,经三维拟合得到三维模型。

扫描测头的结构原理如图 2 所示,测头由两组平行簧片嵌入构成二维测量机构。平动板通过测杆延长杆连接探针,其工作原理为测针接触被测螺纹后带动平动板拉伸平行簧片,使平动板与固定板产生相对位移,在测头安装有高精度光栅测,可读出测头偏移量。

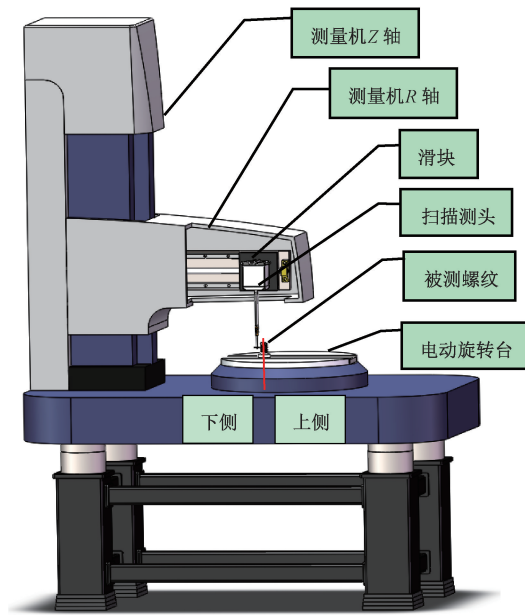


图 1 高精度三维螺纹测量机

Fig. 1 High precision 3D thread measuring machine

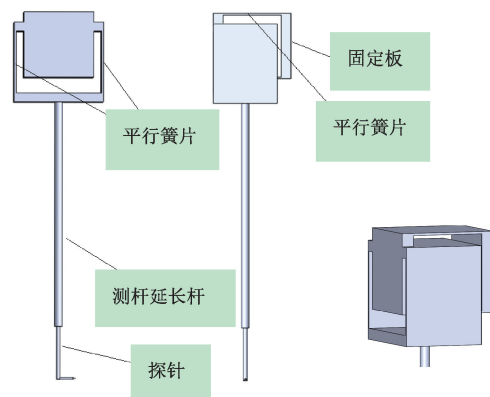


图 2 扫描测头结构原理

Fig. 2 Principle diagram of scanning probe structure

1.2 测头动态特性模型

在测头沿螺纹母线扫描过程中,由于螺纹路径的影响, R 轴移动变化过程中带动测头以一定的速度撞击螺纹,使得测针“跳动”,所以测得的值并不全为螺纹表面。分析这一测量过程有利于我们对测头动态特性的研究,找出影响动态特性的因素从而进行改善,为测头的精度提高提供有效的理论支持。

扫描过程中 R 轴滑块不断带动测头以一定速度左右运动以调整路径,为了方便说明这一过程的振动误差,动态特性研究以一维测头(左右两侧平行簧片)与被测件的碰撞为例进行分析。测头测量模型如图 3 所示,测头内部的平行簧片是弹簧-质量系统,其等效质量为 m ,刚度系数为 k ,在水平 R 轴滑块的带动下以 v_R 的速度运动。

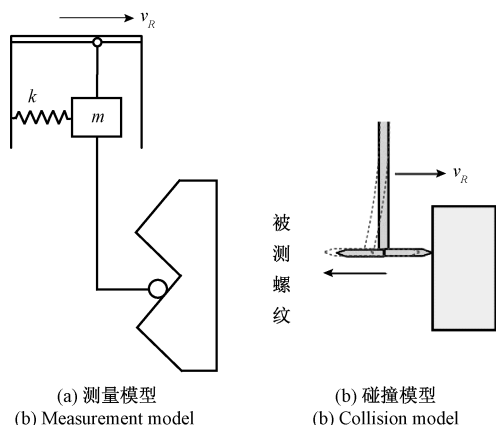


图3 测头扫描测量与碰撞模型
Fig. 3 Probe scan measurement and collision models

R 轴匀速运动靠近工件过程中测头一直在做简谐运动, 测头相对于坐标机的位移是简谐运动与匀速运动的叠加:

$$x_1 = A_1 \sin(\omega_f t) + v_R t \quad (1)$$

式中: ω_f 为测头的固有频率, 即 $\omega_f = \sqrt{k/m}$, 在匀速运动阶段简谐运动的幅值 A_1 远远小于 $v_R t$, 所以在碰撞时刻前为匀速运动。

碰撞后的变化如图4所示, 在 t_1 时刻发生碰撞, 由于测针(平动板)被弹开, 运行速度与 $v_R t$ 方向相反, 且幅值增大为 A_2 。由于测针的“跳动”, t_2 为下一个接触点, t_1 与 t_2 之间的数据是无效的, 同理, t_3 是实际的接触点, 如此产生衰减跳动, 所以研究第一次碰撞动态误差 δ 的影响因素并加以干预减小, 会提高数据的准确度。以此刻被测件接触面为原点, 测头被弹起与运动方向相反, 测头位移为:

$$x_2 = -A_2 \sin(\omega t) + v_R t \quad (2)$$

式中: A_2 为碰撞接触的最大幅值; ω 为碰撞接触的频率, 且与固有频率 ω_f 存在关系 $\omega = \lambda \omega_f$ 。测头碰撞后匀速前进, 碰撞时刻对整个测量机的瞬时速度为0, 即 $t = 0$ 时:

$$x_2'(0) = -A_2 \omega \cos(\omega t) + v_R = 0 \quad (3)$$

所以:

$$A_2 = \frac{v_R}{\omega} \quad (4)$$

即:

$$x_2 = -\frac{v_R}{\lambda \sqrt{k/m}} \sin(\lambda \sqrt{k/m} t) + v_R t \quad (5)$$

以上分析都是基于测量机的系统坐标, 目的在于求得第一次接触时测针被弹起的幅值 A_2 , 由此得出该幅值与 R 轴运行速度 v_R 、测头系统的接触振动频率 ω 有关, 而接触振动频率与测头系统的固有频率 $\omega_f = \sqrt{k/m}$ 有关, 为了减小这一动态误差 δ , 幅值 A_2 可以减慢 R 轴运行速度 v_R , 增大平行簧片的刚度 k , 与此同时减小质量 m , 因

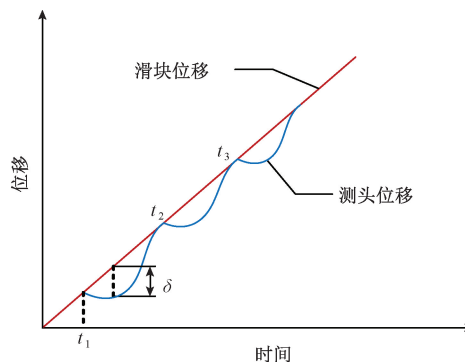


图4 测头碰撞被测件后位移

Fig. 4 Displacement after probe colliding with measured piece

此, 想要提高测头精度, 需要相应的选择合适的材料, 控制测头的运行状态。

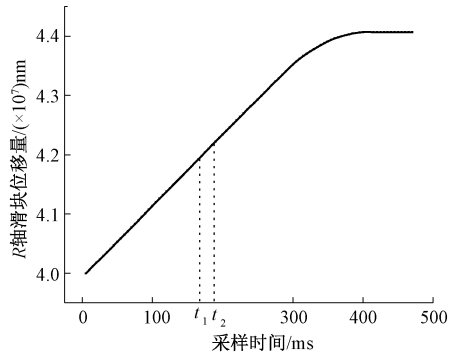
2 测头固有频率的敲击法试验理论

为了研究测针与被测螺纹接触过程, 开展了振动试验研究。图5所示为 R 轴滑块与测头内部的位移量, 图6所示为被测螺纹的实际位置即 R 轴滑块位移与测头内部位移量的叠加, 其中 t_1 为测针被撞时刻。理论值 $A_2 = \frac{v_R}{\omega}$ 与实测的幅值作比较, 通过碰撞实验图5(a)中可计算得 $v_R = 12 \text{ mm/s}$ 。系统的固有频率一般采用两类方法: 自由振动法和强迫振动法, 强迫振动法应用的是“共振”原理, 由于测头结构共振效应不明显, 此结构适合采用自由振动的敲击法, 即用榔头锤击测头系统使其自由振动, 内部安装分辨力为 10 nm 的高精度长光栅, 可以记录平行簧片的微小振动位移, 把系统作衰减振动的波形、标准时间信号的波形同时记录下来, 按照录波比较法, 测定系统在衰减振动中的固有频率, 系统衰减振动的固有频率 ω_d 与测头系统的固有频率 ω_f 存在关系式:

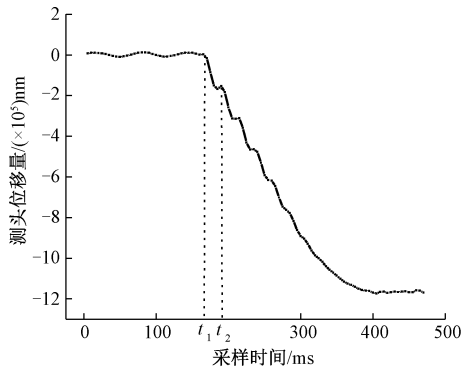
$$\omega_f = \sqrt{\omega_d^2 + \left(\frac{n}{2\pi}\right)^2} \quad (6)$$

式中: n 为振动衰减系数, 经实验测试, 衰减振动频率不低于 100 Hz 且 $n < 1$, 所以 $\omega_f \approx \omega_d$, 直接观察波形图的衰减振动频率即可, 简化了实验处理。但测针碰撞被测件时不是自由振动, 而是有预压量的接触频率 ω , 即在上述方法的初始位置设有预压量, 进而用上述的敲击法得到接触频率, 如图7所示, 振动周期为 45 ms , 计算接触频率为 $\omega = 140 \text{ Hz}$, 代入式(4), 计算得理论值为 $A_2 = 85.7 \text{ }\mu\text{m}$ 。

幅值 A_2 在实测中为测针被弹起的幅值 δ , 需要确定如图4中的理论滑块位移, 图8所示为图6中 t_1 至 t_2 时间的局部图, 采样时间为 5 ms , 由于采样数据有限, 测针弹起后下一次接触点不是第5点或第6点, 而是中间的



(a) Displacement of R-axis slider



(b) Displacement of the probe

图 5 测头扫描测量时滑块与测头内部的位移

Fig. 5 Displacement of slider and interior of the probe during probe scanning measurement

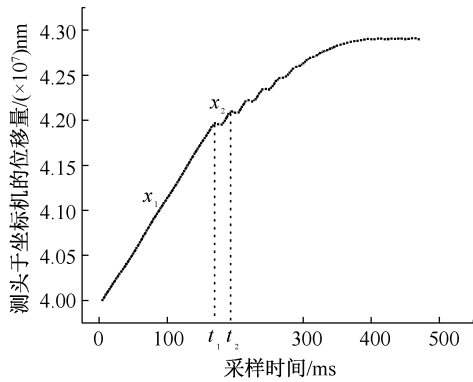


图 6 测头在坐标机系统中的位移

Fig. 6 Displacement of probe in coordinate machine system

一点 p , 为了确定这一点可以采用线性内插法计算。线性内插法是图像处理中利用像素点邻近 2 个像素确定其大小的计算方法, 利用两次此方法对图 8 进行处理, 两条红色直线相交即为所求点 p , 连接第一个采样数据与点 p , 蓝线即为滑块位移, 计算第三点到此线的纵向距离就能得到动态误差 δ , 得 $\delta = 76.72 \mu\text{m}$ 。

比较 A_2 与 δ 的大小, 由此可以证明动态误差 δ 与 R 轴

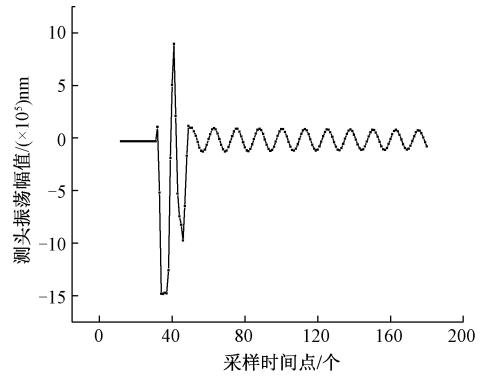


图 7 接触频率测量

Fig. 7 Contact frequency measurement

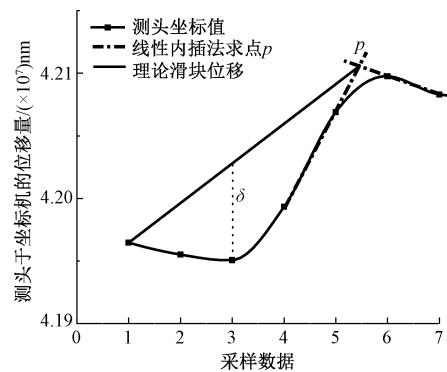


图 8 线性内插法求 δ

Fig. 8 Solving δ with linear interpolation method

运行速度 v_R 、接触频率 ω 即结构的刚度 k 与质量 m 有关, 所以为了减小幅值 A_2 可以适当减慢 R 轴运行速度 v_R , 增大平行簧片的刚度 k , 减小质量 m , 但考虑平行簧片的灵敏度, 所以刚度 k 不能选取太大。

3 动态特性的优化设计

数据波动的大小除了与 R 轴的扫描速度和接触频率有关, 还与预压量 l 有关, 其次是带动测头运动的 Z 轴起始加速度 a 与稳定后的匀速度 v , 由于加速度时间段很小, 只有几毫秒, 对测头特性影响较小, 所以暂不考虑。另外采样间距 T 也是影响结果的因素, 如果间距过大, 则丢失信息太多, 不能真实地反映被测要素, 影响测量结果; 反之如果采样间距过小, 则容易引入一些干扰信号, 给测量带来影响, 并且包含大量无用数据, 使测量和评定效率降低^[21]。故可以进行实验的动态特性参数有预压量 l 、 Z 轴的运行速度 v 、采样间距 T , 对 3 个影响参数进行优化选择以获得最优组合, 可以有效提高测量精度。

对于多因素多水平的实验, 可采用正交实验, 根据

正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,正交试验设计是分式析因设计的主要方法。预压量、扫描速度、采样间距的三水平三因子正交设计与实验结果如表1所示,预压量选择40、60、80 μm 3个水平,扫描速度选择0.3、0.5、0.8 mm/s 3个水平,采样间距选择3、10、15 ms 3个水平。对同一螺纹的同一位置(1.1节中所描述的上下两侧)进行扫描,每组实验可得到上下两侧的数据。

对每组每侧的数据进行线性拟合,观察残余平方和的大小(越小代表数据越集中),考虑由采样间距对同一

扫描长度引起的采样点数不同,以下的实验结果为测量数据线性拟合的平均残差平方和,即线性拟合的残差平方和与采样点数的比值。试验过程中出现脱针现象,结果定为 ∞ 。经极差分析,除空列外,参数 T (采样间距)的 R 值(18.3,3.6)远大于参数 l (预压量)与参数 v (Z 轴速度)的 R 值(2.2,0)与(0,0.5),因此采样间距对于提高测头精度的作用最为显著,为主要因素,次要因素为预压量与 Z 轴速度。其中由表1可以看出:

$$\begin{aligned} K_{12}(\text{上,下}) &< K_{13}(\text{上,下}), \\ K_{22}(\text{下}) &< K_{21}(\text{下}) \text{ 且 } K_{22}(\text{上}) = K_{21}(\text{上}), \\ K_{32}(\text{上,下}) &< K_{31}(\text{上,下}). \end{aligned}$$

表1 三水平三因子正交实验

Table 1 Three level and three factor orthogonal experiment table

| 参数 试验号 | 预压量 $l/\mu\text{m}$ | Z 轴速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 采样间距 T/ms | 空列 | 拟合平均残差平方和 | |
|----------------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 上侧/ nm^2 | 下侧/ nm^2 |
| 1 | 1(40) | 1(0.3) | 1(3) | 1 | 23.5 | 5.0 |
| 2 | 1 | 2(0.5) | 2(10) | 2 | 2.8 | 0.6 |
| 3 | 1 | 3(0.8) | 3(15) | 3 | 测针脱离(∞) | |
| 4 | 2(60) | 1 | 2 | 3 | 2.8 | 0.6 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1.3 | 0.2 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 14.7 | 3.5 |
| 7 | 3(80) | 1 | 3 | 2 | 1.2 | 0.3 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 23.4 | 3.7 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0.9 | 0.3 |
| $K_{j1}(\text{上,下})$ | ∞ | (27.5,5.9) | (61.6,12.2) | (25.7,5.5) | | |
| $K_{j2}(\text{上,下})$ | (18.8,4.3) | (27.5,4.5) | (6.5,1.5) | (18.7,4.4) | | |
| $K_{j3}(\text{上,下})$ | (25.5,4.3) | ∞ | ∞ | ∞ | | |
| $k_{j1}(\text{上,下})$ | ∞ | (9.2,2.0) | (20.5,4.1) | (8.6,1.8) | | |
| $k_{j2}(\text{上,下})$ | (6.3,1.4) | (9.2,1.5) | (2.2,0.5) | (6.2,1.5) | | |
| $k_{j3}(\text{上,下})$ | (8.5,1.4) | ∞ | ∞ | ∞ | | |
| $R(\text{上,下})$ | (2.2,0) | (0,0.5) | (18.3,3.6) | (2.4,0.3) | | |

最优水平为:预压量60 μm 、 Z 轴扫描速度0.5 mm/s 、采样间距10 ms 。从拟合平均残差平方和的结果来看,每组实验下侧的数据小于上侧,说明上侧拟合线性更紧密,效果更好。其中第3组实验出现测针脱离现象,是由预压量(小)与扫描速度(大)引起的。由结果分析的极值可知,影响因素主次顺序为:采样间距 $>Z$ 轴扫描速度 $>$ 测头预压量。

采样间距的影响是由于测针跳动的无效数据引起的,有必要对采样间距进行合理规划。如第2节所做的实验,可适当增大采样间距过滤无效数据点进行重新拟

合。如图9所示,在原来数据基础上增大采样间距过滤了80%的无效数据点,该跳动期间的数据优化前拟合平均残差平方和为 $4.96 \times 10^8 \text{ nm}^2$,线性误差为31 647.2 nm ,优化后平均残差平方和为 $4.47 \times 10^7 \text{ nm}^2$,线性误差为10 330 nm ,该段数据平均残差平方和误差减小了91.0%,线性误差减小了67.4%。

由振荡图形与实验结果可以看出,测头扫描时只有稳定的振荡周期或接触频率,优化后的采样间距才不会或很少漏掉关键采样点,否则会造成测量结果失真。这就对测量机的轴系和测量平台提出更高的精度、抗干扰要求。

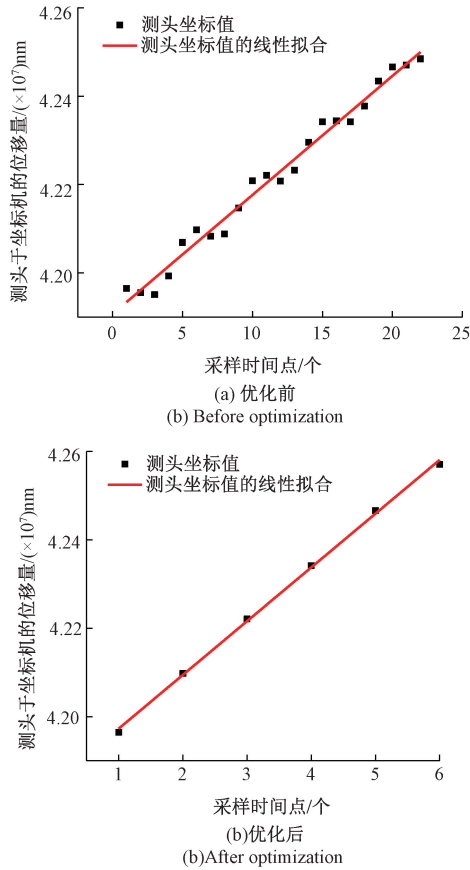


图 9 采样时间优化前后的线性拟合结果
Fig. 9 Linear fitting results before and after sampling time optimization

4 结 论

本文通过分析测针扫描控制原理,建立测针碰撞被测件的动态运行模型,对测量运动的影响因素进行理论分析并加以验证,得到以下结论:

1) 通过实验验证与数据处理,证明了 R 轴运行速度、结构的刚度 k 与质量 m 是控制测量过程的数据获取的影响因素,且可通过参数的干预减小动态误差 δ 。

2) 对预压量、纵向扫描速度、采样间距进行了三水平三因子正交实验,由结果可看出 R 轴的下侧数据比上侧更紧密、效果更好,这为测量位置提供了理论支持。

3) 通过极差分析最优的测量搭配为预压量 $60 \mu\text{m}$ 、 Z 轴扫描速度为 0.5 mm/s 、采样间距 10 ms ,其中采样间距的影响最大,对其适当优化过滤无效数据点,则该数据波动部分可以使误差降低 91.0% ,将有效提高测量精度。

参考文献

[1] MANLONG C. Compensation of thread profile distortion in image measuring screw thread [J]. Measurement,

2018, 129:582-588.
 [2] 王喜华. 基于三维点云数据非接触测量外螺纹尺寸实践 [J]. 计算机产品与流通, 2019(4):129.
 WANG X H. Practice of non-contact measurement of external thread size based on 3D point cloud data [J]. Computer Products and Circulation, 2019(4):129.
 [3] 于连栋,赵会宁. 关节类坐标测量机关键技术及进展 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8):1879-1888.
 YU L D, ZHAO H N. Key technology and progress of joint coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8):1879-1888.
 [4] LIEBRICH T, KNAPP W. New concept of a 3D-probing system for micro-components [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1):513-516.
 [5] LI R J. Design of a large-scanning-range contact probe for nano-coordinate measurement machines [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8):1503.
 [6] LIANG Q K, ZHANG D, WANG Y N, et al. Development of a touch probe based on five-dimensional force/torque transducer for coordinate measuring machine (CMM) [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(2):238-244.
 [7] LI R J, FAN K CH, HUANG Q X, et al. A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine [J]. Precision Engineering, 2016: 220-229.
 [8] HUANG Q X, CHEN CH, WU K, et al. A three-dimensional resonant triggering probe for micro-CMM [J]. Applied Sciences, 2017, 7(4):403.
 [9] TIAN J, TIAN Y L, GUO ZH Y, et al. Structure design and experimental investigation of a multi-function stylus profiling system for characterization of engineering surfaces at micro/nano scales [J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(5):2177-2187.
 [10] 范光照,李瑞君. 三坐标测量机微纳探头的设计与验证 [J]. 计测技术, 2018, 38(3):60-81.
 FAN G ZH, LI R J. Design and verification of three-coordinate measuring machine micro-nano probe [J]. Measuring Technology, 2018, 38(3):60-81.
 [11] WEI J W, CHEN Y L. The geometric dynamic errors of CMMs in fast scanning-probing [J]. Measurement, 2011, 44(3):511-517.
 [12] 朱嘉齐,章家岩,冯旭刚. 柔性臂坐标测量机动态误差补偿算法研究 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38(8): 1270-1275.
 ZHU J Q, ZHANG J Y, FENG X G. Research on dynamic error compensation algorithm of flexible arm coordinate measuring machine [J]. Mechanical Science

- and Technology, 2019, 38(8):1270-1275.
- [13] 郭敬滨, 丁航, 李醒飞, 等. 基于模糊神经网络的接触式测头动态误差补偿[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(4):278-282.
GUO J B, DING H, LI X F, et al. Dynamic error compensation of contact probe based on fuzzy neural network [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(4):278-282.
- [14] 蔡春梅. 基于微力测量原理的微纳米测头结构设计及特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
CAI CH M. Structural design and characteristics research of micro-nano probe based on the principle of micro-force measurement [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [15] ELSHAMY M, CROSBY W A, ELHADARY M. Crack detection of cantilever beam by natural frequency tracking using experimental and finite element analysis [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57 (4): 3755-3766.
- [16] 刘冰, 陈诚, 王勇, 等. 某型复合加工机床床身动态特性分析与结构优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3):72-77.
LIU B, CHEN CH, WANG Y, et al. Analysis of dynamic characteristics and structure optimization of a compound machining machine bed [J]. Journal of Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3):72-77.
- [17] 宋开臣, 张奕群, 李书和, 等. 高速扫描三坐标测量机动态误差模型[J]. 天津大学学报, 1999(2):3-5.
SONG K CH, ZHANG Y Q, LI SH H, et al. Dynamic error model of high-speed scanning CMM [J]. Journal of Tianjin University, 1999(2):3-5.
- [18] 杜翠翠, 徐强, 冯旭刚, 等. 三坐标测量机测头系统的误差分析与修正[J]. 常州工学院学报, 2016, 29(3):33-37.
DU C C, XU Q, FENG X G, et al. Error analysis and correction of CMM probe system [J]. Journal of Changzhou institute of technology, 2016, 29(3):33-37.
- [19] ALI S H R. Probing system characteristics in coordinate metrology [J]. Measurement Ence Review, 2010, 10(4):120-129.
- [20] 王欣. 三坐标测量机动态误差分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
WANG X. Dynamic error analysis of CMM [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [21] 侯学锋. 基于三坐标机直线度测量中采样间距的研究[J]. 工具技术, 2008(6):102-103.
HOU X F. Research on sampling spacing based on three-coordinate machine straightness measurement [J]. Tools & Technology, 2008(6):102-103.

作者简介



林希萌, 2018年于山东理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为接触式扫描测头、动态特性。
E-mail: 1605696736@qq.com

Lin Ximeng received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2018. She is currently a master student at China Jiliang University. Her research interest includes contact scanning probe and dynamic characteristics.



禹静(通信作者), 2008年于湖南大学获得学士学位, 2011年于中国计量学院获得硕士学位, 2015年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为超精密测量技术。
E-mail: yujing88@cjlu.edu.cn

Yu Jing (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hunan University in 2008, M. Sc. degree from China Jiliang University in 2011 and Ph. D. degree from Tianjin University in 2015. She is currently an associate professor at China Jiliang University. Her main research interest includes ultra-precision measurement technology.