

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412968

螺尖丝锥几何参数快速非接触测量方法研究*

夏长久^{1,2}, 王远洋^{1,2}, 江磊¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031; 2. 高性能工具全国重点实验室/成都工具研究所有限公司 成都 610500)

摘要:针对螺尖丝锥生产过程中几何参数测量稳定性差、测量信息不全和测量效率低等问题,提出一种基于线激光扫描的快速非接触测量方法。首先,根据齐次坐标变换理论建立了螺尖丝锥非接触测量运动学模型,并在对测量数据进行预处理后,基于多视角拼接实现了螺尖丝锥的全信息曲面重构;然后,提出了考虑螺尖丝锥曲面特征的点云分割方法和刃部刃线提取算法,并在此基础上实现了丝锥前角、刃倾角、芯径、刃背宽度等几何参数的全面高效计算;最后,在数控机床上针对生产过程中的螺尖丝锥开展了测量重复性实验和对比实验。结果表明,该方法平均测量效率提升了3.88倍且最大相对误差不超过2%,验证了测量系统的可行性以及具有良好的测量稳定性、测量效率和准确性。

关键词:螺尖丝锥;几何参数;非接触测量;线激光传感器

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on fast non-contact measurement method for geometric parameters of spiral point taps

Xia Changjiu^{1,2}, Wang Yuanyang^{1,2}, Jiang Lei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory for High Performance Tools/Chengdu Tool Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610500, China)

Abstract:To address the problems of poor stability, incomplete information, and low efficiency of geometric parameter measurement in the production of spiral point taps, a fast non-contact measurement method based on line laser scanning is proposed. Firstly, the non-contact measurement kinematics model for spiral point taps is formulated, which is based on the homogeneous transformation theory. After the preprocessing of measurement data, the full-information surface reconstruction of spiral point taps is realized based on multi-view splicing. Then, a point cloud segmentation method and an edge line extraction algorithm considering the surface characteristics of spiral point taps are proposed. On this basis, the geometric parameters, such as the rake angle, spiral pointed angle, core diameter, land width, etc. of taps are calculated comprehensively and efficiently. Finally, the measurement repeatability and comparison experiments are implemented on the CNC machine tool for the spiral point tap in the production process. Results show that the average measurement efficiency of the proposed method increases by 3.88 times and the maximum relative measurement error is less than 2%, which evaluates the feasibility of the measurement system and has good measurement repeatability and accuracy.

Keywords:spiral point taps; geometric parameters; non-contact measurement; line laser sensor

0 引言

螺尖丝锥是一种主要用于深孔或通孔螺纹加工的专用刀具,具有攻丝扭矩小^[1]、不易堵屑^[2]、加工精度高^[3]

等优点,目前广泛使用于航空航天、汽车工业和精密机械等加工领域^[4]。螺尖丝锥的前角、芯径、刃倾角等关键几何参数会显著影响攻丝性能,导致锥刃异常磨损、提前失效以及螺纹加工质量等问题^[5-6]。甚至,由于攻丝通常是复杂零件加工的最后工序之一,产生的加工缺陷可能会

收稿日期:2024-06-20 Received Date: 2024-06-20

* 基金项目:国家自然科学基金(52205541)、中国博士后科学基金(2022M712635)、高性能工具全国重点实验室开放课题(GXNGJSKL 202417)、中央高校基本科研业务费(2682023CX023)项目资助

导致整个零件返工或报废,造成巨大损失^[7-8]。因此,有必要严格保证螺尖丝锥关键参数的加工精度。

一般而言,螺尖丝锥的生产过程包括制备毛坯及热处理、磨制顶尖孔、柄部磨方、磨刃部及柄部外圆、磨直槽、铲磨切削锥、磨螺尖槽和磨螺纹等。由于最后的磨螺纹工艺不会影响前角、芯径、刃倾角等关键参数的大小^[9],因此在磨螺纹前快速、精确地测量这些几何参数的大小及误差情况,一方面可以有利于解决因螺纹存在导致测量难度高的问题,另一方面可以为加工工艺调整和误差补偿提供数据支撑,进而有效提高螺尖丝锥的加工精度。

在丝锥几何参数测量方面,目前主要采用万能工具显微镜^[10-11]和机器视觉方法进行测量。中国行业标准 JB/T 10231.4—2001^[12]详细介绍了如何使用万能工具显微镜测量丝锥相关几何参数;李昊泽等^[13]针对直槽丝锥,提出了基于视觉原理的几何参数测量方法。但是,万能工具显微镜测量方法为离位手动测量,测量精度和效率容易受到丝锥装夹误差、人员操作熟练程度及操作水平等因素的影响。另外,虽然机器视觉法实现了自动化测量,但其与万能工具显微镜都仅能获取丝锥的二维图像,可测参数有限,无法测量刃倾角和内部芯径等参数,无法实现丝锥的全信息测量。因此,亟需开展测量参数全、测量效率高、测量精度高的螺尖丝锥自动化测量方法研究。

在除丝锥外的复杂零件精密测量方面,研究人员主要开展了接触式测量和非接触式测量两方面的方法研究,这对丝锥的全面高效测量具有很好的理论指导和实践意义。在接触式测量方面,主要采用触发探头逐点接触测量获取复杂零件的几何精度信息。例如,赵柏涵等^[14]针对渐开线齿轮,提出了一种齿形偏差的接触式在机测量方案创成与优化方法;高峰等^[15]针对涡扇叶片,提出了一种基于弯矩理论的自适应曲面采样方法。虽然接触式测量测量精度高,也可实现全信息测量,但是其测量效率一般,且容易引起测头接触磨损、测量表面损伤、测头半径补偿复杂等问题,无法满足螺尖丝锥生产过程中几何参数全面高效测量的要求。

因此,许多研究人员也对非接触式测量展开了研究,主要采用激光传感器获取复杂零件表面几何精度信息,其具有测量精度高、测量范围广、测量效率高等优点^[16-17]。例如,王可等^[18]针对石油钻杆,搭建了一种基于线激光传感器的非接触式螺线在机测量系统,实现了螺纹参数的实时计算;李茂月等^[19]模拟在机测量系统,对基于结构光在机测量的叶片点云处理方法进行了相关研究;Ding 等^[20-21]将线激光在机测量系统应用于自由曲面加工。这些研究拓展了激光式非接触测量在齿轮、叶片和薄壁等零件上的应用,但针对丝锥等具有复杂形面

及特殊几何参数的数控刀具而言,目前仍然缺少测量系统构建、测量原理分析以及几何参数计算等方面的研究。

本文针对现有螺尖丝锥几何参数测量方法测量信息不全、测量效率低、测量稳定性差以及接触式测量无法满足螺尖丝锥生产过程中几何参数全面高效测量的要求等问题,提出了一种基于线激光扫描的螺尖丝锥几何参数非接触式快速测量方法。该方法通过在加工机床上对生产过程中的螺尖丝锥进行三维快速扫描和全信息曲面重构,实现了关键几何参数的全面高效精密测量,进而可为后续加工工艺调整与误差补偿提供数据支持,保证丝锥加工精度。最后,开展了重复性测量实验和对比实验验证了该方法的可行性和有效性。

1 螺尖丝锥线激光扫描原理

1.1 螺尖丝锥结构及激光扫描测量方案

螺尖丝锥由工作部分、刀柄部分和容屑槽组成如图1所示。工作部分是直接参与攻丝工作的整个有螺纹部分,包括切削锥和校准部分。切削锥首先切入孔内并进行主要攻丝工作,校准部分在切削时起方向引导和校准已切削螺纹的作用。容屑槽是指在加工过程中用于容纳和排出切屑的槽形结构,包括螺尖槽和直槽。容屑槽的槽形及加工精度直接影响成品丝锥攻丝过程是否能够顺利完成。

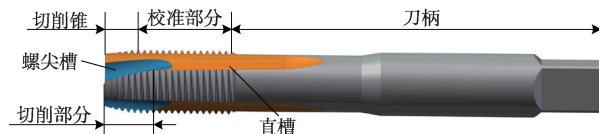


图1 螺尖丝锥结构组成

Fig. 1 Structural composition of a spiral point tap

线激光传感器是一种使用激光三角测量原理^[22]的精密光学仪器,基本原理为:当光源发射线性激光束经由透镜聚焦后投射到被测丝锥表面,激光在被测表面发生反射并投射到电荷耦合器件图像传感器上形成条纹图像,即可利用相似三角形关系可求出成像点的位置。如图2所示,本文在某型五轴数控工具磨床上搭建非接触式测量系统,线激光传感器通过专用夹具装夹在机床已锁死主轴的末端,被测丝锥由机床A轴带动作分度运动。测量过程中,根据丝锥槽数 Z 确定分度角度 θ ($\theta = 360^\circ/Z$),传感器由X轴带动沿丝锥轴线方向作匀速直线运动。

1.2 螺尖丝锥测量运动学模型

五轴数控工具磨床由床身、刀具、工作台、3个直线轴、2个旋转轴等组成,如图3(a)所示,工件端从床身出发依次由Y轴、C轴、A轴、工件组成,刀具端从床身出发

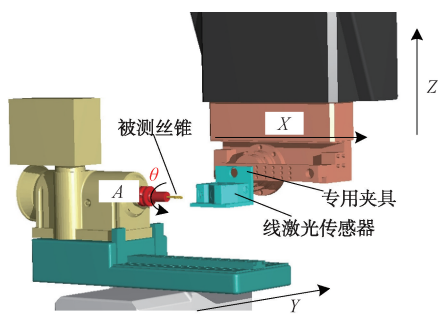
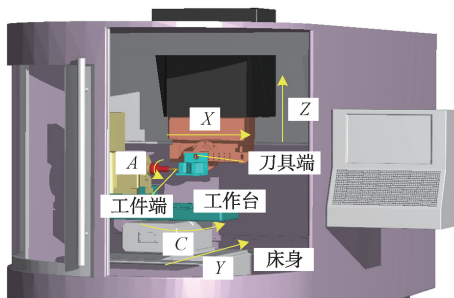


图 2 线激光测量方案

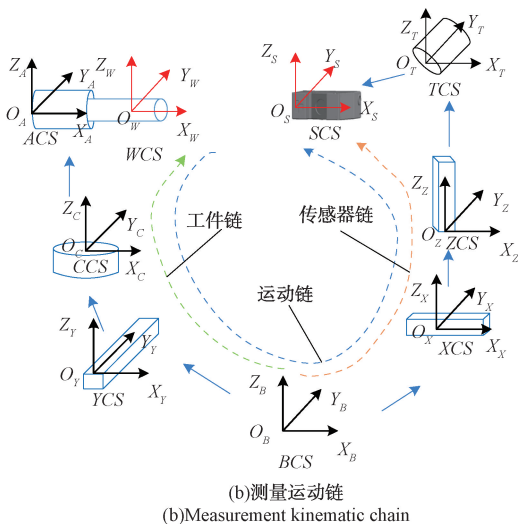
Fig. 2 Line laser-based measurement scheme

依次由 X 轴、 Z 轴、 Y 轴、主轴、刀具组成。测量系统的运动链如图 3(b) 所示,其中,工件、刀具、传感器和机床床身所在的子坐标系分别表示为工件坐标系 (workpiece coordinate system, WCS)、刀具坐标系 (tool coordinate system, TCS)、线激光测量坐标系 (sensor coordinate system, SCS) 和机床床身坐标系 (base coordinate system, BCS)。相似地, A 轴、 X 轴、 Y 轴、 C 轴和 Z 轴的子坐标系分别用符号 ACS 、 XCS 、 YCS 、 CCS 和 ZCS 表示。



(a)五轴数控工具磨床总体结构

(a)Structure of the five-axis CNC tool



(b)测量运动链

(b)Measurement kinematic chain

图 3 线激光非接触式测量系统

Fig. 3 Line laser based non-contact measurement system

测量过程中,测量数据在 SCS 中定义。为便于后续数据处理,需要将其从 SCS 转换到 WCS 。依据测量系统运动链及各运动部件子坐标系之间的相对位置关系,建立相邻坐标系间的初始位置变换矩阵 Γ_{ij} 和运动变换矩阵 M_{ij} ,下标 i 表示目标坐标系, j 表示初始坐标系,得到从 SCS 到 WCS 的总运动变换矩阵 H_{WS} 为:

$$H_{WS} = H_{WB} (H_{SB})^{-1} \quad (1)$$

$$H_{WB} = M_{WA} M_{AC} M_{CT} M_{YT} \Gamma_{WB} \quad (2)$$

$$H_{SB} = M_{ST} \Gamma_{ST} M_{TZ} M_{ZX} M_{XB} \Gamma_{TB} \quad (3)$$

式中:

$$M_{YB} = \Gamma_{WB} = M_{XB} = M_{ST} = \Gamma_{TB} = I_{4 \times 4}$$

$$M_{WA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & -\sin \theta_A & 0 \\ 0 & \sin \theta_A & \cos \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{AC} = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{CY} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & N_Y \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{ZX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & N_X \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{TZ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & N_Z \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \Gamma_{ST} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, R 和 T 分别表示从 TCS 变换到 SCS 的旋转矩阵和平移矩阵; N_X 、 N_Y 、 N_Z 、 θ_A 和 θ_C 分别表示在 BCS 中 X 、 Y 、 Z 、 A 和 C 轴在实际测量时的运动值。

2 螺旋丝锥曲面重构与几何参数计算

2.1 基于多视角拼接的螺旋丝锥全信息曲面重构

基于多视角拼接的螺旋丝锥全信息曲面重构如图 4 所示,扫描测得的丝锥原始点云数据量大且存在冗余信息,因此在几何参数计算前需进行点云重采样,提高计算效率。

本文采用体素网格对点云数据进行重采样处理,首先采用一个最小体包围盒将点云约束起来,然后将其划分为若干体素网格,最后对每个网格中的点云数据采用最靠近网格重心的点代替,实现原始点云的重采样,重采样效果如图 4(a) 所示。

在测量过程中,受丝锥表面粗糙度和环境光等因素影响,测量数据中会存在多种噪声。因此,需要再对精简

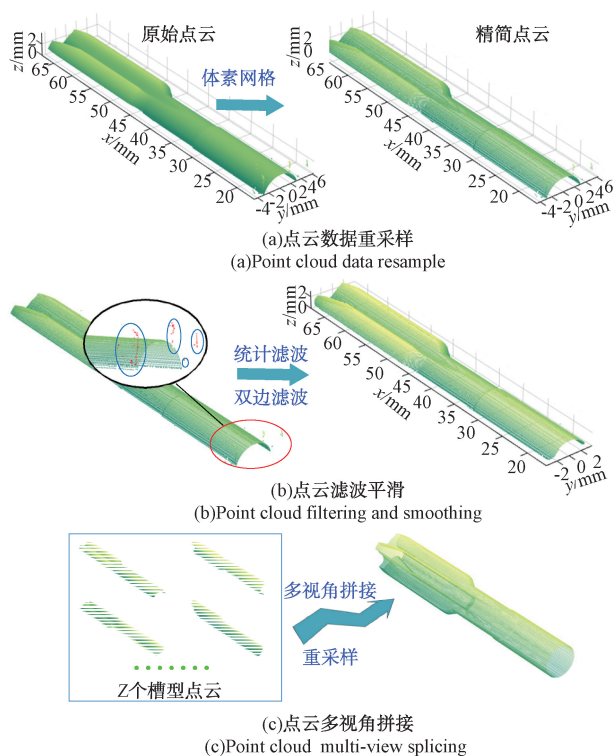


图4 基于多视角拼接的螺尖丝锥全信息曲面重构

Fig. 4 Full-information surface reconstruction of spiral point taps based on multi-view splicing

后的点云进行降噪平滑处理。考虑到点云中噪点的分布特征和所处区域不尽相同,本文采取统计学滤波和双边滤波相结合的组合降噪平滑方法,实现对丝锥点云噪点的有效处理。图4(b)展示了滤波前后的点云数据,该方法可以在去噪平滑时,较好地保留点云的原始特征。

在线激光扫描仪沿丝锥轴向的一次移动测量过程中,仅能测得丝锥单个槽的点云。因此,根据丝锥容屑槽分布的对称性,通过机床A轴驱动丝锥多次作分度旋转运动,分度角度 $\theta = 360^\circ/Z$,依次测得其Z个槽的点云。然后,根据螺尖丝锥的测量运动变换矩阵,将测得的第i($i=1, 2, \dots, Z$)个槽进行点云坐标变换以实现螺尖丝锥曲面的多视角拼接,其中A轴实际运动值为 $\theta_A = (i-1)\theta$ 。最后,划分较小的体素网格,进行点云重采样,以处理多视角下的重叠区域导致的数据冗余问题,重构得到全信息螺尖丝锥曲面,如图4(c)所示。

2.2 点云分割及刃部刃线提取算法

由于螺尖丝锥各组成部分所包含的几何参数各不相同,为实现后续几何参数的快速精确计算,需对重构后的丝锥曲面进行分割。

将包含切削刃的螺尖丝锥轮廓y向投影到XOZ平面得到如图5(a)所示投影轮廓线。轮廓线由首尾相接的多段直线和曲线组成,其变点的数量和位置信息反映

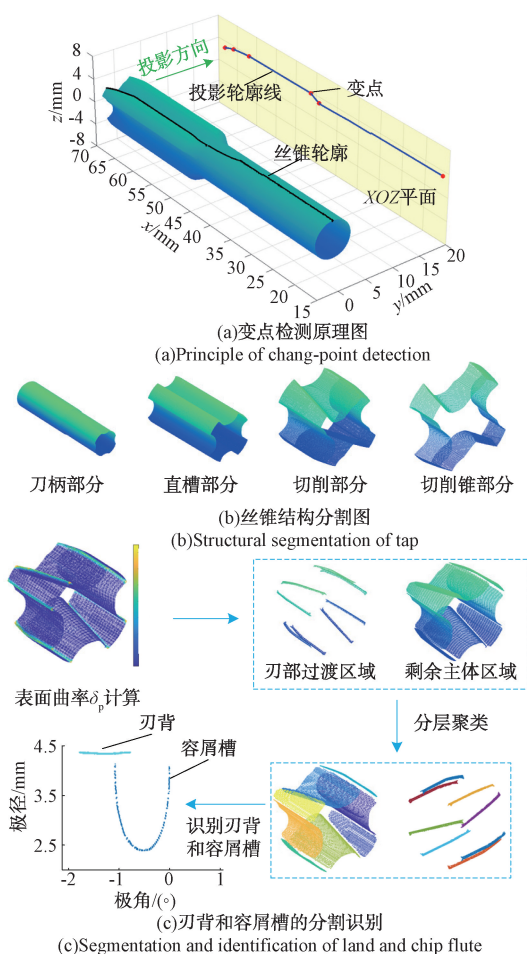


图5 丝锥点云分割

Fig. 5 Point cloud segmentation of a tap

了螺尖丝锥的结构组成,对变点进行检测分析,可将螺尖丝锥点云分割为切削锥、螺尖槽、直槽和刀柄等部分,如图5(b)所示。

为精确计算槽型和刃背几何参数,采用曲率计算和聚类的方法实现工作部分的刃背和容屑槽的分割识别,如图5(c)所示。具体流程如下:

- 1) 遍历点云,计算各点表面曲率 δ_p ;
- 2) 设定表面曲率阈值为 ω ,将超过阈值的点识别为螺尖丝锥刃部过渡区域点;
- 3) 提取刃部过渡区域数据,采用分层聚类算法对其和剩余主体区域识别,分割出独立点云;
- 4) 将剩余主体区域分割出的独立点云投影到YOZ平面,并转换为极坐标系表示;
- 5) 由于极坐标下的刃背和容屑槽数据的极径波动存在明显差异,计算各个独立点云投影数据的极径标准差。将其由大到小排序,排序后的前Z个区域视为容屑槽数据,后Z个区域视为刃背数据。

螺尖丝锥前角、刃倾角等几何参数均与切削刃相关。

因此,需要对提取出的刃部过渡区域进行特征细化处理,提取出刃线,并筛选出切削刃,如图6所示。

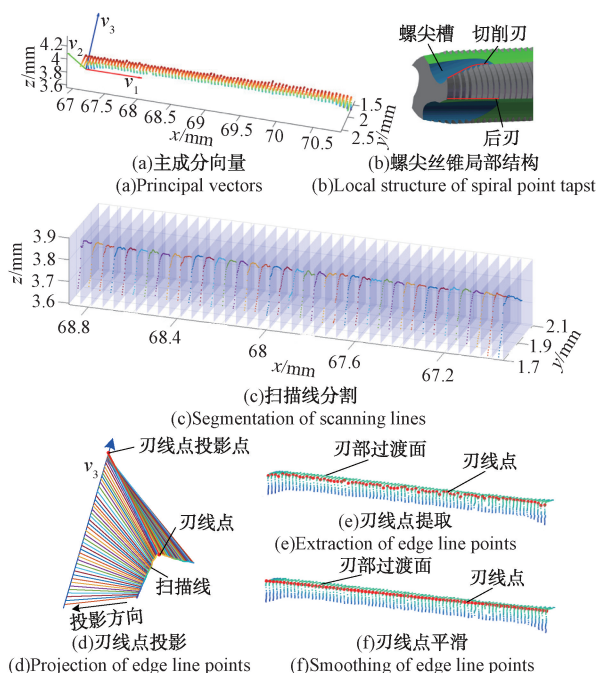


图6 丝锥刃线提取

Fig. 6 Extraction of edge lines of the tap

具体步骤如下:

1) 对过渡区域聚类后的各部分进行主成分分析,得到3个主成分向量 $\{v_1, v_2, v_3\}$,如图6(a)所示;

2) 由于螺尖槽的存在,切削刃相比后刃有明显的倾斜弯曲特征,如图6(b)所示。根据此特征,计算贡献率最大的主成分向量 v_1 与轴向向量 $[1, 0, 0]^T$ 的夹角。对夹角大小由大到小排序,则排序后的前 Z 个过渡区域为切削刃的过渡区域。

3) 考虑到经数据处理后的点云仍保留着明显的线扫描特征,设定距离阈值 d_1 ,若相邻两点 x 方向的距离 $d_i \geq d_1$,两点属于同一扫描线,反之,则属于不同扫描线。基于以上准则对切削刃的过渡区域数据进行扫描线的分离,扫描线的分割效果如图6(c)所示;

4) 如图6(d)所示,贡献率最小的主成分向量 $v_3 = [a, b, c]^T$ 反映了切削刃过渡区域的凸起特征。将扫描线中的各点 $P(x, y, z)$ 投影到通过原点且方向向量为 v_3 的直线上,并计算投影点 P_{proj} 与原点的距离 d_{proj} 为

$$d_{proj} = \left\| \left(\frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{v}_3}{\|\mathbf{v}_3\|^2} \right) \cdot \mathbf{v}_3 \right\| = \left\| \left(a \frac{ax + by + cz}{a^2 + b^2 + c^2}, b \frac{ax + by + cz}{a^2 + b^2 + c^2}, c \frac{ax + by + cz}{a^2 + b^2 + c^2} \right) \right\| \quad (4)$$

其中, $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$,且 d_{proj} 最大值所对应的点即为刃线点。遍历所有扫描线,即可提炼出刃线点,如

图6(e)所示;

5) 对筛选出的刃线点进行平滑处理,进一步细化切削刃的特征,如图6(f)所示。

2.3 螺尖丝锥几何参数计算

如图7所示,磨螺紋前的螺尖丝锥的几何参数主要包括基本大径 d 、校准部分芯径 D 、端部芯径 D_{ef} 、切削锥角 κ_r 、切削锥长度 l_5 、斜刃长度 l_4 、前角 γ_p 、刃倾角 λ 、刃背宽度 m 等。在1.1~2.2节点云数据处理的基础上,可计算螺尖丝锥的几何参数。

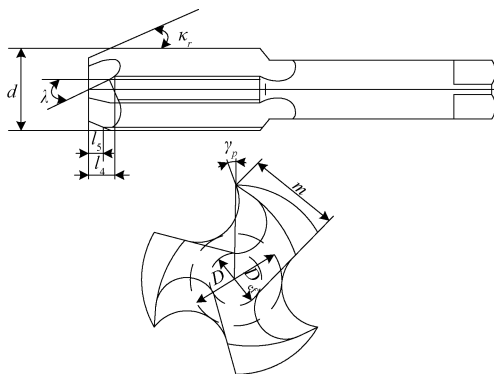


图7 几何参数示意图

Fig. 7 Diagram of geometric parameters

d 是指螺尖丝锥螺纹大径的基本尺寸。将螺尖丝锥校准部分的刃背数据 x 向投影到 YOZ 平面,并对其进行轮廓边界提取,从而获取径向刃背轮廓数据。采用随机抽样一致算法(random sample consensus, RANSAC)拟合圆,拟合圆直径即为基本大径 d 。

芯径指的是轴线上给定点上与槽底相切的一个圆弧的直径。如图8(a)所示,将螺尖丝锥校准部分点云 x 向投影到 YOZ 平面,对其进行轮廓边界提取,从而获取校准部分径向轮廓数据;然后,将其转换到极坐标系下,设定局部最小值个数为 Z ,计算极坐标系下的局部极径最小值,如图8(b)所示;最后,将 Z 个局部极径最小值对应的直角坐标系下的点拟合圆,拟合圆的直径即为校准部分芯径 D 。

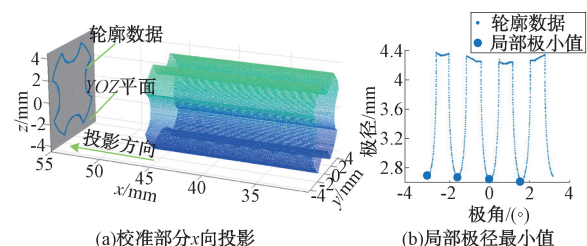


图8 螺尖丝锥芯径计算示意图

Fig. 8 Calculation diagram of core diameter of the spiral point tap

端部芯径指的是端部截面下的芯径。假设丝锥端部的 X 坐标为 x_{end} , 设定距离阈值为 d_{xe} , 将 X 坐标在 $[x_{\text{end}} - d_{\text{xe}}, x_{\text{end}} + d_{\text{xe}}]$ 范围内的点云 x 向投影到 YOZ 平面。重复上述校准部分的芯径计算步骤, 即可求得端面芯径 D_{ef} 。

切削锥角是指切削锥的任一母线与轴线间形成的夹角。对切削锥刃背数据进行主成分分析, 选取反映母线方向的主成分向量, 计算与轴线夹角, 遍历所有切削锥刃背数据, 取均值作为 κ_r 。测量螺尖丝锥切削锥部分和螺尖槽部分的首末端面之间的轴向距离, 即可求得切削锥长度 l_3 和斜刀长度 l_4 。

前角是指丝锥前面(大径和小径与曲前面的交点连线)与经过丝锥中心线和螺纹牙顶的平面之间的夹角。前角测量截面的 X 坐标为 x_p , 设定距离阈值为 d_{xt} , 如图 9(a) 所示, 将 X 坐标在 $[x_p - d_{\text{xt}}, x_p + d_{\text{xt}}]$ 范围内的容屑槽点云 x 向投影到 YOZ 平面以获取测量截面的二维数据。然后, 如图 9(b) 所示, 获取距离测量截面最近的切削刃刃线点 P_1 和小径与测量截面曲前面的交点 P_2 , 分别连接 P_1 和 P_2 、 P_1 和丝锥中心 O , 计算 $\overline{P_1P_2}$ 和 $\overline{P_1O}$ 的夹角。遍历所有槽型, 取均值作为该截面下的 γ_p 。

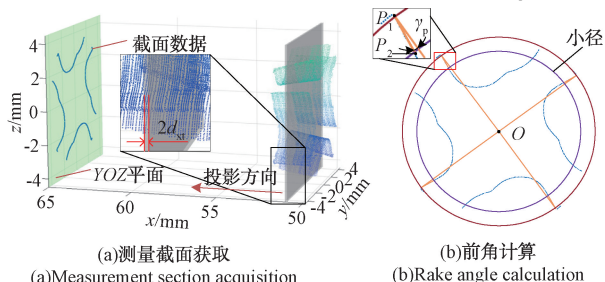


图9 螺尖丝锥前角计算示意图

Fig. 9 Calculation diagram of rake angle of the spiral point tap

刃倾角是指切削锥上切削刃选定点的切线向量和轴线向量之间的空间夹角, 一般选取 $\lambda = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。参照 GB/T 28254—2012^[23], 选定点 S 在 $l_5/2$ 处。由于无法直接得到切削刃曲线的参数表达式, 因此根据利用 2 个相邻的点 S_1 和 S_2 以及式 (5) 求解选定点处的切线单位方向向量 t 。

$$t = \frac{S_1 - S_2}{\|S_1 - S_2\|} \quad (5)$$

如图 10 所示, 轴线方向向量 J 和切线方向向量 t 之间的空间夹角即为刃倾角 λ 。

刃背宽度指的是切削刃和与其相对的刃之间的弦宽。在 2.2 节中, 刃背和刃线的独立分离识别, 导致刃背和刃线之间无明确的对应关系。因此, 需要重新对其进行归类, 以确定刃线应归属于哪个刃背。为此, 提出采用 Hausdorff 距离度量刃背和刃线之间的距离, 并将刃线分

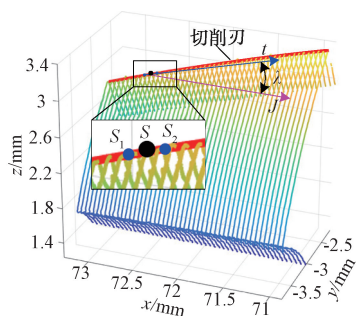


图10 螺尖丝锥刃倾角计算示意图

Fig. 10 Calculation diagram of spiral pointed angle of the spiral point tap

配给距离最近的刃背, 遍历所有刃线, 以建立刃线和刃背之间的对应关系。确定对应关系后, 如图 11 所示, 计算刃背上两刃线与测量截面相交点的距离, 遍历所有刃背, 取均值作为刃背宽度 m 。

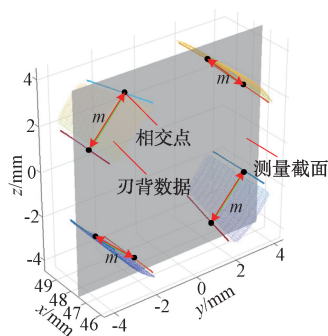


图11 螺尖丝锥刃背宽度计算示意图

Fig. 11 Calculation diagram of land width of the spiral point tap

3 实验验证

3.1 测量仪器

本文在某型五轴数控磨床上搭建螺尖丝锥非接触测量系统, 并开展相应的测量实验, 验证所提方法的可行性和有效性。由于本文测量方法是在低速测量、充分冷却和表面清理的条件下开展的, 振动、温度、切削杂物等对测量的影响较小, 可忽略其对测量实验结果的影响。采用的线激光传感器为基恩士 LJ-X8060, 其基准距离为 64 mm, Z 轴(高度)和 X 轴(宽度)的测量范围分别为 ± 7.3 mm 和 $-15 \sim 16$ mm, 重复精度分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 。

3.2 传感器位姿标定

为确保测量数据的准确性, 需对传感器相对于 TCS 的位姿进行标定实验, 以获取 SCS 到 TCS 的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

如图 12 所示,选用直径 8 mm 的高精度圆柱体作为标准件,驱动 X 和 Y 轴带动传感器和标准件测量 6 组不同位置的圆柱截面数据,拟合得到 6 组截面数据在 SCS 中的中心坐标 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) ,其中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。对应中心在 WCS 中的坐标为 $(x_{wi}, y_{wi}, 0)$,其中 x_{wi} 和 y_{wi} 可根据测量移动距离、扫描仪尺寸和夹具尺寸求得。将 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) 和 $(x_{wi}, y_{wi}, 0)$ 代入式 (1)~(3),可计算出 TCS 中的中心坐标 (x_{ti}, y_{ti}, z_{ti}) 。

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.4424 \times 10^{-3} & 0.9999 & -0.4087 \times 10^{-3} \\ -2.2270 \times 10^{-3} & -0.4097 \times 10^{-3} & -0.9999 \\ -0.9999 & -0.4414 \times 10^{-3} & 2.2272 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} = [-347.0636 \quad -40.5036 \quad -92.7768] \end{cases} \quad (7)$$

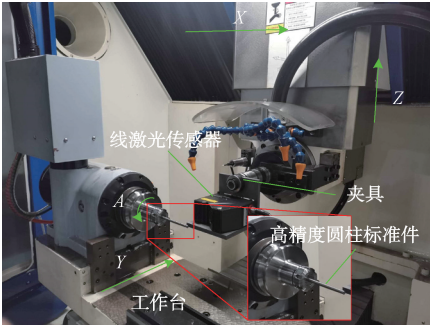


图 12 传感器位姿标定现场图

Fig. 12 Field diagram of sensor posture calibration

3.3 测量实验与分析讨论

为评定测量系统的稳定性和测量效率以及测量结果的精确性,本文针对螺旋丝锥几何参数进行测量重复性实验和对比实验。

由于 SCS 和 TCS 之间的转换关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_{ti} \\ y_{ti} \\ z_{ti} \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (6)$$

将 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) 和 (x_{ti}, y_{ti}, z_{ti}) 代入式 (6) 并结合罗德里格矩阵法求解得到 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 为:

1) 重复性分析

如图 13 所示,采用高精度圆柱标准件对同一螺旋丝锥和线激光传感器重复标定 6 次,并分别获取丝锥点云数据。计算螺旋丝锥的几何参数,并统计几何参数测量值的标准差,测量和统计结果如表 1 所示。

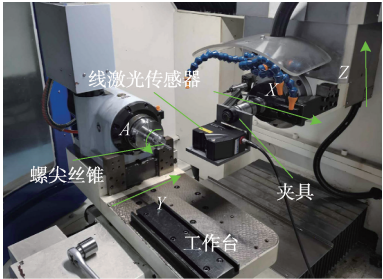


图 13 螺旋丝锥几何参数测量重复性实验现场

Fig. 13 Field diagram of measurement repeatability experiments of geometric parameters of spiral point taps

表 1 螺旋丝锥几何参数重复性测量结果

Table 1 Repeatability measurement results of geometric parameters of spiral point taps

参数	单位	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	标准差
d	mm	8.447 5	8.442 5	8.425 3	8.440 2	8.436 6	8.416 9	0.010 5
D	mm	5.120 0	5.094 0	5.109 5	5.107 6	5.118 7	5.165 1	0.022 3
D_{ef}	mm	3.639 4	3.649 6	3.668 6	3.651 0	3.653 9	3.678 4	0.012 9
κ_r	°	10.597 8	10.453 9	10.404 8	10.399 8	10.571 2	10.418 1	0.080 2
l_5	mm	2.567 2	2.553 4	2.564 5	2.556 7	2.566 7	2.559 2	0.005 2
l_4	mm	6.732 3	6.758 3	6.750 3	6.732 0	6.762 1	6.712 1	0.017 4
γ_p	°	14.504 6	14.360 6	14.513 4	14.525 7	14.176 2	14.742 7	0.172 6
λ	°	15.695 5	15.612 1	15.612 2	15.687 3	15.598 6	15.651 4	0.038 0
m	mm	2.713 6	2.734 6	2.691 3	2.741 3	2.685 2	2.722 8	0.020 8

由表 1 中可知,螺旋丝锥长度类几何参数(d 、 D 、 D_{ef} 、 l_5 、 l_4 、 m)的测量值最大标准差为 0.022 3 mm,角度类几何参数(κ_r 、 γ_p 、 λ)的测量值最大标准差为 0.172 6°,且

γ_p 、 κ_r 和 λ 等角度类几何参数的标准差明显大于长度几何类参数标准差,这表明长度类几何参数的测量稳定性整体优于角度类几何参数。总体而言,测量结果的标准

差均在要求的测量标准 0.05 mm 和 0.2° 以内。

2) 对比分析

采用 PG1000-200 刀具测量仪作为测量实验的对比设备,螺尖丝锥几何参数测量对比实验如图 14 所示。其包含 3 个直线轴和 2 个旋转轴,测量行程为 70 mm (垂直) 和 200 mm (水平),重复性精度为±5 μm。

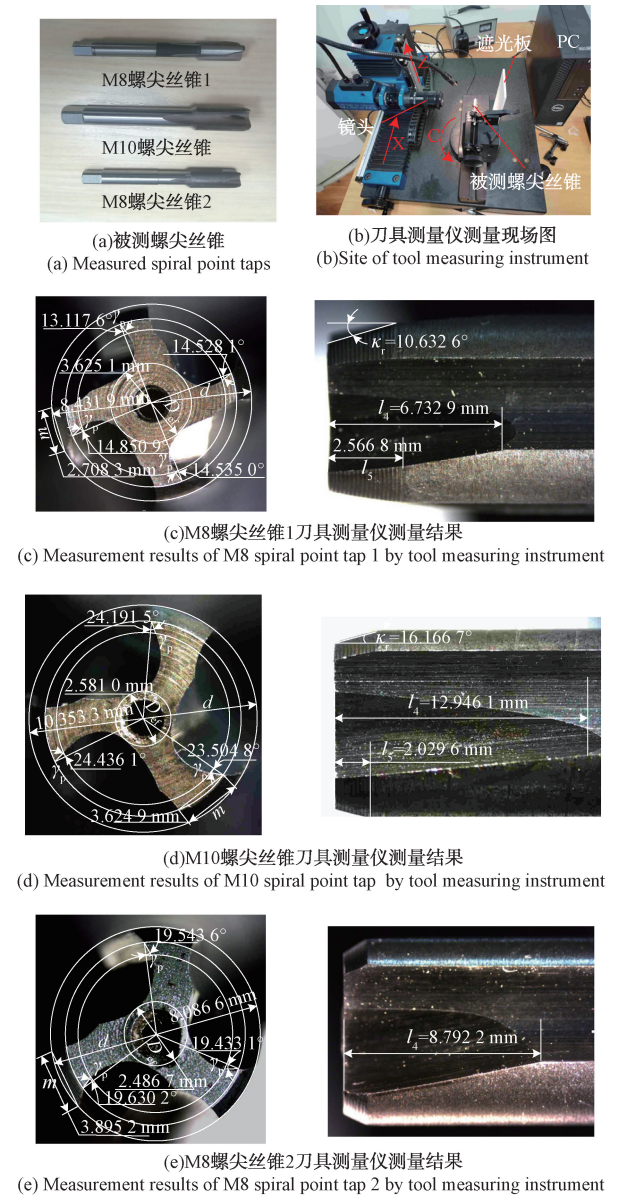


图 14 螺尖丝锥几何参数测量对比实验
Fig. 14 Measurement comparison experiments of geometric parameters of spiral point taps

实验采用本文所提方法和刀具测量仪测量如图 14(a)所示的 3 支不同螺尖丝锥的几何参数,重复测量 5 次取测量结果平均值,同时记录测量时间。其中, M8 螺尖丝锥 1 和 M10 螺尖丝锥在磨螺纹前对切削锥进行了粗加工, M8 螺尖丝锥 2 未加工切削锥。

(1) 测量时间分析

为确保测量过程中数据的稳定获取,将 X 轴移动速度设置为 100 mm/min。本文方法测量时间由在机测量时间和几何参数计算时间两部分组成;刀具测量仪测量时间由丝锥拆卸夹装时间、图像获取时间和几何参数计算时间 3 部分组成,总测量时间对比结果如表 2 所示。

表 2 螺尖丝锥几何参数测量时间对比 Table 2 Comparison of measurement time of geometric parameters of spiral point taps					
测量 丝锥	测量 次数	本文测量时间/s		刀具测量仪测量时间/s	
		测量时间	平均时间	测量时间	平均时间
M8 螺尖 丝锥 1	1	199.16		700.60	
	2	197.20		694.59	
	3	197.42	197.15	690.48	705.52
	4	197.33		733.54	
	5	194.63		708.41	
M10 螺尖 丝锥	1	174.34		738.46	
	2	176.01		694.17	
	3	176.48	173.74	687.66	705.07
	4	170.52		716.70	
	5	171.36		688.38	
M8 螺尖 丝锥 2	1	169.16		668.36	
	2	173.36		717.20	
	3	173.93	172.02	699.83	691.08
	4	172.48		670.52	
	5	171.19		699.47	

根据测量结果可知,采用本文方法分别对 M8 螺尖丝锥 1、M10 螺尖丝锥和 M8 螺尖丝锥 2 进行测量,测量效率相比采用刀具测量仪测量分别提升了 3.59 倍、4.05 倍和 4.02 倍,平均测量效率提升了 3.88 倍,验证了本文测量系统可实现螺尖丝锥几何参数的快速、高效测量。

(2) 测量结果分析

为评定测量结果的精确性,以刀具测量仪测量结果作为约定真值进行比较。刀具测量仪测量现场如图 14(b)所示,图 14(c)~(e)展示了 3 支不同螺尖丝锥的刀具测量仪测量结果,最终对比结果如表 3~5 所示。

根据测量结果对比可知,3 支螺尖丝锥长度几何参数测量结果的最大绝对误差、平均绝对误差和平均相对误差的最大值分别为 0.077 9 mm、0.058 4 mm 和 1.251 2%;角度几何参数测量结果的最大绝对误差、平均绝对误差和平均相对误差的最大值分别为 0.511 9°、0.278 1°和 1.862 1%。由于角度类几何参数涉及更为复杂的测量步骤,引入的额外误差导致其相较于长度类几

表 3 M8 螺尖丝锥 1 几何参数测量结果对比

Table 3 Comparison of measurement results for geometric parameters of M8 spiral point tap 1

参数	本文方法	刀具测量仪	最大绝对误差	平均绝对误差	平均相对误差/%
d/mm	8.438 42	8.430 6	0.016 9	0.003 2	0.038 0
D_{ef}/mm	3.652 5	3.626 2	0.042 4	0.031 8	0.877 0
$\kappa_r/^{\circ}$	10.485 5	10.363 7	0.234 1	0.125 5	1.211 0
l_5/mm	2.561 7	2.567 1	0.013 7	0.004 9	0.190 9
l_4/mm	6.747 0	6.730 9	0.031 2	0.012 1	0.179 8
$\gamma_p/^{\circ}$	14.416 1	14.263 8	0.261 9	0.265 6	1.862 1
m/mm	2.713 2	2.716 4	0.031 2	0.006 9	0.254 0

表 4 M10 螺尖丝锥几何参数测量结果对比

Table 4 Comparison of measurement results for geometric parameters of M10 spiral point tap

参数	本文方法	刀具测量仪	最大绝对误差	平均绝对误差	平均相对误差/%
d/mm	10.384 4	10.353 3	0.043 6	0.031 1	0.300 4
D_{ef}/mm	2.609 1	2.581 0	0.061 3	0.028 1	1.088 7
$\kappa_r/^{\circ}$	12.907 4	13.006 1	0.151 0	0.098 7	0.758 9
l_5/mm	2.008 1	2.029 6	0.039 7	0.021 5	1.059 3
l_4/mm	24.402 5	24.344 1	0.077 9	0.058 4	0.239 9
$\gamma_p/^{\circ}$	15.907 2	16.166 7	0.505 3	0.259 5	1.605 2
m/mm	3.657 5	3.624 9	0.036 8	0.032 6	0.899 3

表 5 M8 螺尖丝锥 2 几何参数测量结果对比

Table 5 Comparison of measurement results for geometric parameters of M8 spiral point tap 2

参数	本文方法	刀具测量仪	最大绝对误差	平均绝对误差	平均相对误差/%
d/mm	8.082 1	8.090 5	0.022 9	0.008 4	0.103 8
D_{ef}/mm	2.524 8	2.493 6	0.064 2	0.031 2	1.251 2
l_4/mm	8.821 1	8.791 7	0.019 3	0.029 4	0.334 4
$\gamma_p/^{\circ}$	19.264 3	19.542 4	0.511 9	0.278 1	1.423 1
m/mm	3.889 8	3.897 2	0.027 1	0.007 4	0.189 9

何参数整体测量误差稍大,但所有参数的测量相对误差仍然均不超过 2%,误差较小,表明本文所提方法的测量精度可满足工业生产需求。结合重复性实验,验证了线激光非接触式快速测量方法的可行性和有效性。

4 结 论

针对现有螺尖丝锥测量方法可测参数少、测量稳

定性差、测量效率低以及接触式测量易导致测头接触磨损、被测表面损伤等问题,本文提出了一种基于线激光扫描的螺尖丝锥几何参数快速非接触测量方法,实现了螺尖丝锥加工过程中的在位快速精密检测。本文贡献如下:

1) 提出了基于测量运动变换矩阵和多视角拼接的螺尖丝锥全信息曲面重构方法。根据测量运动链和齐次变换理论建立测量运动模型,确定 SCS 与 WCS 之间的运动变换矩阵,确保测量数据准确可靠。在对测量数据重采样和滤波平滑后,结合测量运动模型实现点云多视角拼接,重构得到全信息螺尖丝锥曲面,以解决传统丝锥测量方法测量信息不全导致可测参数少的问题。

2) 提出了基于点云分割和刃部刃线提取算法的螺尖丝锥几何参数精确计算方法,成功识别分离出了螺尖丝锥各组成部分的刃背、容屑槽和刃线,并在此基础上实现了大径、刃倾角、前角和刃背宽度等几何参数的全面高效精确测量。

3) 通过测量重复性实验和对比实验验证了所提测量系统的可行性和有效性。重复性试验中螺尖丝锥长度类和角度类几何参数的最大标准差分别为 0.022 3 mm 和 0.172 6°;对比实验中测量系统相较于刀具测量仪平均测量效率提升了 3.88 倍且最大相对误差不超过 2%。实验结果验证了所提测量方法良好的测量稳定性、测量效率和准确性。

参考文献

[1] BHOWMICK S, LUKITSCH M J, ALPAS A T. Tapping of Al-Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15):2142-2153.

[2] 陈汪林,李喆,黄勇浩,等. 螺纹丝锥表面处理研究进展 [J]. 表面技术,2023,52(10):124-140.

CHEN W L, LI ZH, HUANG Y H, et al. Research progress on surface treatment of thread tap [J]. Surface Technology, 2023,52(10):124-140.

[3] GIL DEL VAL A, ALONSO U, VEIGA F, et al. Wear mechanisms of TiN coated tools during high-speed tapping of GGG50 nodular cast iron [J]. Wear, 2023, 514/515: 204558.

[4] PAWAR S, JOSHI S S. Experimental analysis of axial and torsional vibrations assisted tapping of titanium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22:7-20.

[5] PEREIRA I C, VIANELLO P I, BOING D, et al. An approach to torque and temperature thread by thread on

- tapping [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (11/12): 4891-4901.
- [6] POLVOROSA R, LOPEZ DE LACALLE L N, SANCHEZ EGEA A J, et al. Cutting edge control by monitoring the tapping torque of new and resharpened tapping tools in Inconel 718 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (9/10): 3799-3808.
- [7] BIERMANN D, OEZKAYA E. CFD simulation for internal coolant channel design of tapping tools to reduce tool wear [J]. CIRP Annals, 2017, 66(1):109-112.
- [8] VELDHUIS S C, DOSBAEVA G K, BENGA G. Application of ultra-thin fluorine-content lubricating films to reduce tool/workpiece adhesive interaction during thread-cutting operations [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47 (3/4): 521-528.
- [9] MA Y CH, WAN M, YANG Y, et al. Dynamics of tapping process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 140:34-47.
- [10] BAZAN A. Accuracy and repeatability of thread measurements using replication techniques [J]. Engineering Proceedings, 2022, 24(1):1-5.
- [11] TAN X F, XU CH X, SHI R W, et al. Measurement techniques study of universal tool microscope [J]. Advanced Materials Research, 2012, 503/504: 1454-1457.
- [12] 刀具产品检测方法. 第 4 部分:丝锥: JB/T 10231.4—2001 [S]. 2001.
Tool inspection methods part4: Taps: JB/T 10231.4—2001 [S]. 2001.
- [13] 李昊泽,刘永,王宸,等. 基于视觉原理的直槽丝锥径向几何参数测量方法研究 [J]. 制造技术与机床, 2023(10):145-150,157.
LI H Z, LIU Y, WANG CH, et al. Research on measurement method of axial geometric parameters of straightgroove taps based on vision principle [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(10): 145-150,157.
- [14] 赵柏涵,高峰,李艳,等. 渐开线齿形磨削精度的在机测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (6): 48-55.
- ZHAO B H, GAO F, LI Y, et al. Research on on-machine measurement for grinding accuracy of involute profile [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(6):48-55.
- [15] 高峰,潘子月,张旭涛,等. 涡扇叶片在机测量自适应采样方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (3): 843-851.
GAO F, PAN Z Y, ZHANG X T, et al. Adaptive sampling method for turbofan blades on-machine measurement [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023,29(3):843-851.
- [16] DING D W, DING W F, HUANG R, et al. Research progress of laser triangulation on-machine measurement technology for complex surface: A review [J]. Measurement, 2023, 216:113001.
- [17] 樊文刚,吴昌昕,吴志伟,等. 尖轨复杂型面激光测量与三维重构方法研究 [J/OL]. 机械工程学报,1-12 [2024-06-20].
FAN W G, WU CH X, WU ZH W, et al. Research on laser measurement and three-dimensional reconstruction methods for complex profiles of switch rail [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-12 [2024-06-20].
- [18] 王可,董祉序,孙兴伟,等. 石油钻杆螺纹廓形参数在机测量系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (7): 1618-1625.
WANG K, DONG ZH X, SUN X W, et al. Study on on-machine measurement system for contour parameters of petroleum drill pipe thread [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(7):1618-1625.
- [19] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8):55-66.
LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud basedon structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(8):55-66.
- [20] DING D W, ZHAO ZH C, LI Y, et al. Calibration and capability assessment of on-machine measurement by integrating a laser displacement sensor [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(7/8):2301-2313.
- [21] DING D W, ZHAO ZH C, HUANG R, et al. Error modeling and path planning for freeform surfaces by laser

triangulation on-machine measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1005811.

[22] 李津容, 葛广言, 冯晓冰, 等. 在机测量线激光传感器安装位姿的全局标定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9):158-165.

LI J R, GE G Y, FENG X B, et al. Global position calibration of 2D laser profiler for on-machine measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):158-165.

[23] 螺尖丝锥: GB/T 28254—2012[S]. 2012.

Spiral pointed taps: GB/T 28254—2012[S]. 2012.

作者简介



夏长久, 分别在 2016 年和 2021 年于重庆大学获得学士学位和博士学位, 现为西南交通大学机械工程学院助理教授, 主要研究方向为在机测量和精密加工。

E-mail: changjiuxia@qq.com

Xia Changjiu received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 2016 and 2021, respectively. He is currently an assistant professor in the School of Mechanical

Engineering at Southwest Jiaotong University. His main research interests include on-machine measurement and precision machining.



王远洋, 2023 年于烟台大学获得学士学位, 现为西南交通大学硕士研究生, 主要研究方向为在机测量和数控加工。

E-mail: 1452831219@qq.com

Wang Yuanyang received his B. Sc. degree from Yantai University in 2023. He is currently a master student at Southwest Jiaotong University. His main research interests include on-machine measurement and CNC machining.



江磊 (通信作者), 2014 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南交通大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为智能测量和精密加工。

E-mail: jianglei0506@163.com

Jiang Lei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2014. He is currently an associate professor in the School of Mechanical Engineering at Southwest Jiaotong University. His main research interests include intelligent measurement and precision machining.