

文章编号 1004-924X(2015)06-1791-09

基于二维轮廓点云的螺纹中径计算

陈 盛¹, 赵东标^{1*}, 陆永华¹, 刘 凯¹, 章永年²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 南京农业大学 机械工程系, 南京 210031)

摘要: 基于轮廓点的螺纹多参数综合测量方法由于螺纹工件的定位误差、非均匀磨损等情况会导致中径计算偏差, 因此, 提出了一套基于二维轮廓点云的螺纹中径计算方法。该方法利用三次样条插值均匀密化采样数据, 再用稳健高斯回归滤波处理得到轮廓滤波中线; 然后通过定义相邻两段牙侧线之间距离均方差最小的目标函数, 利用复合形-模拟退火 (CMSA) 算法求解出实际螺纹轮廓的中径线; 最后根据所求中径线计算出螺纹中径参数。实验结果表明: 当 X、Y、Z 轴的轴向定位偏差为 1 mm, 旋转偏差为 2° 时, 所得到的中径测量误差比范一保和 TONG Q 等人的方法平均减小 17.23% 和 96.93%, 说明所提出的计算方法可以有效减少定位偏差对中径参数计算的影响。提出的计算方法具有通用性, 可应用于接触式和非接触式采样得到的二维螺纹轮廓点云数据。

关键词: 螺纹工件; 二维螺纹轮廓; 中径计算; 定位误差; 三次样条插值; 稳健高斯回归滤波; 模拟退火算法

中图分类号: TG85; TH701 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1791

Calculation of thread pitch diameters based on two dimensional profile point clouds

CHEN Sheng¹, ZHAO Dong-biao^{1*}, LU Yong-hua¹, LIU Kai¹, ZHANG Yong-nian²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

* Corresponding author, E-mail: zdbme@nuaa.edu.cn

Abstract: The multi-parameter measurement of a thread based on profile points may show calculation errors for thread pitch diameters owing to the alignment deviations and inhomogeneous abrasion of thread work-pieces. Therefore, a new method for calculating the thread pitch diameters based on the 2-dimensional profile point clouds was proposed. The cubic spline interpolation was used to increase the data point densification uniformly, and the robust Gauss regression filter was adopted to get the midline of contour. Then, an objective function was put forward to minimize the mean square error of the distance between two adjacent flank segments, and the complex simulated annealing algorithm was adopted to solve the function to get the pitch line. Finally, the pitch diameter parameters were calculated with the obtained pitch line. The experimental results show that the measurement error of

收稿日期: 2015-02-02; 修订日期: 2015-04-01.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2014CB046501); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175261); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20123218110020)

pitch diameter obtained by the proposed method is reduced by 17.23% and 96.93% respectively compared with the methods from FAN Y B and TONG Q *et al*, when the alignment deviation along axes directions of X, Y, Z is 1 mm and the rotation deviation of each axis is 2° . The proposed method effectively reduces the influence of alignment deviations on the thread pitch diameters, and can be used for two dimensional point cloud data by both contact and non-contact 2-dimensional scannings.

Key words: thread workpiece; 2-dimensional thread profile; pitch diameter calculation; alignment deviation; cubic spline interpolation; robust Gauss regression filter; simulated annealing algorithm

1 引言

在螺纹各项参数中,中径参数是最为常用的评判标准,因此不论是何种测量方法,都追求中径测量的准确性。传统的螺纹中径测量方法主要有三针法、量球法等;现代化的综合测量方法则主要通过扫描得到的螺纹二维轮廓数据,再进行多参数的综合计算,轮廓扫描方式主要有接触式和非接触式两种^[1-3]。

目前,不少学者提出了基于二维轮廓数据的螺纹中径计算方法。Kosarevsky^[4]利用广义 Hough 变换对点云数据进行处理,得到螺纹截面轮廓的各相邻直线段间的交点,找到与螺纹轮廓线段相切的圆,然后根据经典的 Berndt 公式求得中径,其本质还是两球法的延伸,中径示值的准确性有赖于其他参数(螺距、牙型角等)的准确程度。Gadelmawla^[5]利用视觉检测方法得到螺纹牙型轮廓,再以螺纹底径为基础,计算中径线与底径线的偏差,两者相加(内螺纹则相减)得到螺纹中径。范一保^[6]在接触式扫描得到的螺纹轮廓数据基础上,提出了仅依赖拟合牙侧线的中径计算方法。Huang^[7]和 Tong^[8]利用三角激光扫描方法测量螺纹中径,均得到了很好的重复性精度。荷兰 IAC 公司研制的 MasterScanner 系列螺纹检测仪通过校准探针测头和一系列精密的定位夹具,来保证测量的准确性。从该公司公开的资料^[9-10]看,它是以螺纹顶径为基础,根据中径线与顶径线的偏差计算出中径的。

以上基于二维轮廓数据的螺纹参数计算方法均假定所得到的轮廓点数据就是严格的螺纹轴截面数据点。实验上由于存在测量误差,所得轮廓

数据点并不是准确的轴截面数据。吕东方^[11]通过分析不确定度,认为螺纹安装定位误差是螺纹参数测量不确定度的主要来源。文献[8]所提到的中径线求法需要先找出螺纹中轴线,但由于工件定位偏差和探针定位偏差的影响,很难得到准确的中轴线。因此,如何利用基于测量得到的有偏差的二维轮廓数据计算中径,从而有效降低定位偏差对中径测量结果的影响便成为一个重要的问题。本文通过有效的数据处理手段,利用复合形-模拟退火算法求解相邻两段牙侧线之间距离均方差最小的目标函数,得到上、下牙型中径线来求中轴线,从而计算出螺纹中径,该方法有效减小了定位偏差的影响。

2 数据预处理

2.1 数据插值

在对工件轮廓表面形貌进行测量时, X 轴的运动既可以是匀速运动,也可以根据测量面的倾斜程度采取变速运动,而 Z 轴则跟随测量工件表面运动。但即便 X 轴是匀速运动,由于摩擦、振动等因素,仍然不可避免地会出现速度波动。因此在得到的轮廓点数组中, X 轴的数据并不是严格的等差数列。为了保证后面数据滤波的准确性,不论是在频域内还是时域内都希望 X 轴数据是严格按照时间序列分布的等差数列。于是,需要对轮廓数据进行插值,使其均匀密化。常见的插值方法有 Lagrange 插值、Aitken 逐次线性插值法、Newton 插值、分段插值、Hermite 插值、样条插值等^[12]。这些方法的基本思想都是用高次代数多项式或分段的低次多项式作为被插函数的近似表达。

本文利用本实验室所研制的触针扫描式螺纹测量仪对一个 M20×2.5_T 的螺纹环规进行扫描,采样周期为 10 ms,得到了螺纹环规的二维轮廓数据。用上述几种插值方法进行处理,结果如图 1 所示。Data 表示原始测量所得的轮廓数据点,Nearest 为临近的两点插值结果;Linear 为 Newton 直线插值结果;Pchip 表示分段三次 Hermite 插值结果;Spline 代表三次样条插值结果。由图 1 可知,总体上,几种方法之间差别不是很大,但三次样条插值方法在数据尖点处的轮廓连续性要优于其他插值方法。因此,本文选用三次样条作为预处理插值方法。

除此以外,有些数据预处理也采用有理样条进行插值,如 B 样条、NURBS 插值等。但这类插值后的曲线不经过节点,只是逼近节点,是一种拟插值过程,在一定程度上会损失测量点的精度。

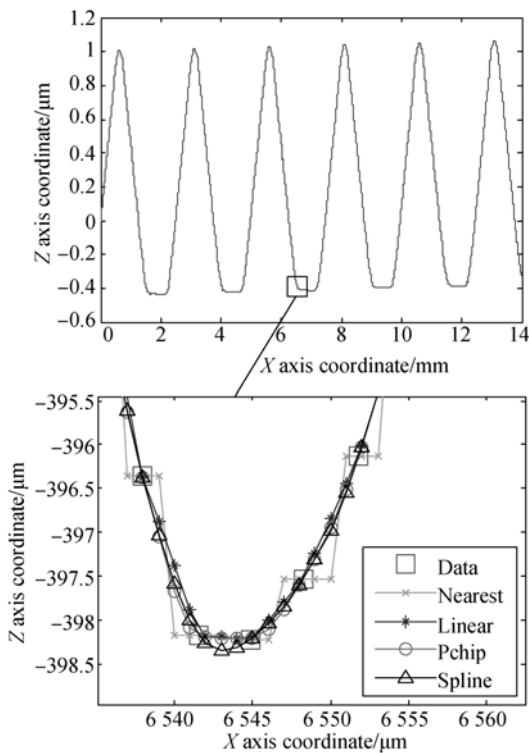


图 1 不同插值方法的结果比较

Fig. 1 Comparison of different interpolation methods

2.2 形貌数据滤波

表面计量学中,轮廓数据滤波的输出为粗糙度、波纹度还是形状,取决于滤波器类型(高通或低

通)以及截止波长。国际标准 ISO4287^[13] 和国家标准 GB/T3505^[14] 规定 λ_s 为粗糙度的短波截止波长, λ_c 为粗糙度长波即波纹度短波的截止波长, λ_r 为波纹度的长波即形状的短波截止波长。3 种轮廓滤波器 λ_s 、 λ_c 和 λ_r 具有相同的传输特性,只是截止波长不同。三者之间的关系如图 2 所示。

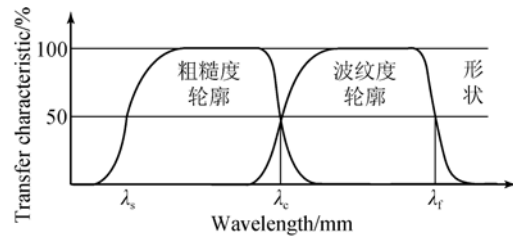


图 2 3 种滤波器的传输特性

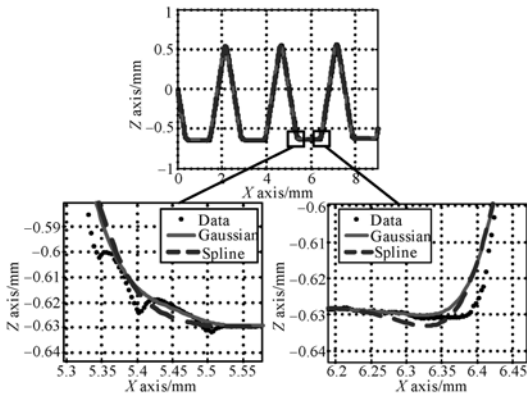
Fig. 2 Transmission characteristics of three kinds of filters

为了检测螺纹参数,需要得到螺纹二维轮廓的形状数据。因此滤波器应当选用 λ_r 的低通滤波器。1996 年国际标准 ISO11562^[15] 明确规定零相移的高斯滤波中线作为触针式表面粗糙度测量仪表面评定基准线。然而,实际使用中高通滤波器存在边缘效应严重、大形状下轮廓跟随性能差和异常点敏感三大问题^[16]。

样条滤波器^[17]和高斯回归滤波器^[18]只克服了前两个问题,而通过引入稳健估计理论得到的稳健样条滤波器和稳健高斯回归滤波器则解决了全部 3 个问题^[19]。基于小波变换的滤波器^[20-21]因能够将轮廓划分为多个波长很短的波段,在表面形貌测量中的应用也越来越多,但是小波变换受 Heisenberg 测不准原理的制约,另外小波分解结果与小波基函数和分解层数有很大关系,缺乏自适应性^[22]。形态学滤波器^[23]和尺度空间技术^[24]为表面形貌滤波提供了不同的视角,但各刻度下形态谱的大小受结构函数的幅值、形状和采样频率的影响很大。相对其他滤波器,稳健样条滤波器和稳健高斯回归滤波器理论上更为完备,故本文选取国际标准 ISO16610^[25]中给出的这两种滤波方法进行了测试。

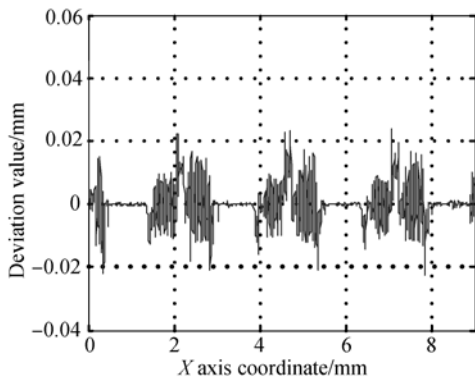
以型号为 M20_6g_Z 的标准螺纹环规测量轮廓数据点云为例,其截止波长按标准系列选用

0.08 mm,结果如图 3 所示。可以看出稳健高斯回归滤波与稳健样条滤波的中线结果多数情况下都十分接近,但是在螺纹牙型的拐角处,稳健样条滤波为了保证线条的连续性,会牺牲一部分轮廓精度,而稳健高斯回归滤波对期望轮廓形状则表现出了更好的逼近效果。因此,本文选用稳健高斯回归滤波的中线结果对螺纹参数进行计算。



(a) 滤波结果比较

(a) Comparison of filtering results



(b) 稳健高斯回归滤波的滤波中线与轮廓点的偏差

(b) Deviation between filtering midline and profile data for robust Gaussian regression filter

$$\xi = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \text{dist}(M_{i-1}, M_i) = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \sqrt{\left(\frac{b_{i-1} - b}{k - k_{i-1}} - \frac{b_i - b}{k - k_i} \right)^2 + \left(\frac{kb_{i-1} - bk_{i-1}}{k - k_{i-1}} - \frac{kb_i - bk_i}{k - k_i} \right)^2}, \quad (1)$$

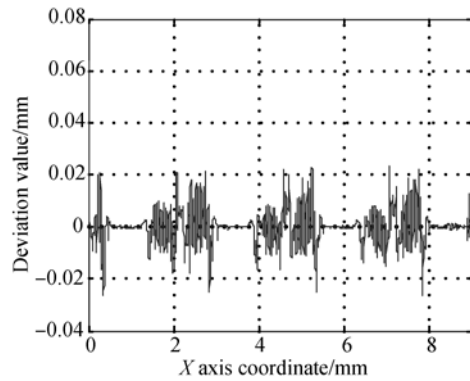
其中: k_i 和 b_i 分别表示第 i 个牙侧线所在的直线方程 $y = k_i x + b_i$ 的参数。于是,单个牙的误差为:

$$e_i = \text{dist}(M_{i-1}, M_i) - \xi, \quad (2)$$

定义函数:

$$f(k, b) = \sum_{i=1}^S e_i^2. \quad (3)$$

当 f 取最小值时,其对应的参数 k, b 即为所求中径直线参数。



(c) 稳健样条滤波的滤波中线与轮廓点的偏差

(c) Deviation between filtering midline and profile data for robust spline filter

图 3 截止波长 $\lambda_f = 0.08$ mm 时稳健高斯回归滤波和稳健样条滤波结果

Fig. 3 Results of robust Gaussian regression filter and robust spline filter at $\lambda_f = 0.08$ mm

3 中径参数计算

3.1 中径线拟合

根据国标^[26]对中径的定义,其母线通过牙型上沟槽和凸起宽度相等的地方。因此只需找到一条直线使其穿过相邻两段牙侧线之间的距离相等,则该直线即为所求中径线。设直线 l 为所求中径线,其表达式为 $y = kx + b$ 。该直线与各牙侧线的交点为 M_0, M_1, \dots, M_S 。那么有 $\text{dist}(M_0, M_1) = \text{dist}(M_1, M_2) = \dots = \text{dist}(M_{S-1}, M_S)$ 。然而,由于加工误差、测量误差以及螺纹表面的磨损等原因,实际上这样的理论直线几乎不存在^[27]。为了得到计算所需的中径线,记平均两段牙侧线间的距离为:

3.2 最小值求解

求解函数 f 的最小值,有不少有效的方法。可以令偏导数为零,构建两个偏导数方程组,再利用 Newton 迭代、Seidel 迭代等方法,即可求解出上述非线性方程组的根,从而求得函数 f 取最小值时的参数 k, b 。模型函数的偏导数方程较为繁琐,计算量较大,这里希望采用一种直接搜索的方法来避开复杂的求导计算。复合形算法^[28]

(Complex Method, CM)不需求导数并且收敛速度快,是单纯形法在约束问题中的发展,在机械优化设计中应用广泛。但该算法对初始解依赖性较强,易陷入局部极小。模拟退火 (Simulated Annealing, SA)算法^[29]通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳,从而可有效避免陷入局部极小,它对初值不敏感,但其收敛速度较慢。鉴于上述两种方法各自的特点,有学者将两者结合起来^[30]应用到非线性优化问题中,得到了不错的效果。

在本模型求解过程中,全局最优解的获得为关键,因此采用多点并行搜索模式和模拟退火的可控概率接受劣解来逃逸局部最小。在求解函数 f 极小值 f_{\min} 的同时,可以求出此时中径线的参数 k 和 b 。需要说明的是全局优化算法很多,包括人工势场法、遗传算法、粒子群算法、免疫算法等等。由于仅需要保证每次准确获得全局最优解并具有较快的计算速度,故文中不做过多的比较。

3.3 中径计算

设上节中拟合得到的上、下牙型中径线分别为 l_{up} 、 l_{down} ,那么螺纹工件的中轴线在测量平面内的投影直线为 l_{up} 与 l_{down} 的角平分线,如图 4 所示。因此,首先通过角平分线方程求出螺纹中轴线,然后计算中轴线上的中间点 Q 到上、下牙型中径线的距离,分别记为 d_{up} 、 d_{down} ,则平均中径 $d_{\text{test}} = d_{\text{up}} + d_{\text{down}}$ 。

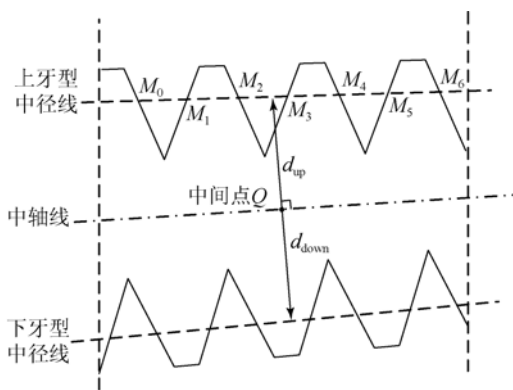


图 4 中径计算方法示意图

Fig. 4 Diagram of calculation method for pitch diameter

为说明问题,图 4 中轮廓倾斜度经过适当放大,实际上、下牙型的中径线夹角很小。显然本文中径计算方法仅仅依赖牙侧线的准确程度。由于定位误差的存在,这里的计算方法得到的是螺纹

中径在测量平面内的投影值,需要补偿定位误差带来的结果偏差。常见的补偿方法是采取单规校准的补偿,即先测量一个标准规再测量待测规。不少单规补偿的思路^[6,10,31]认为:

$$e^2 = D_{\text{real}}^2 - D_{\text{test}}^2 = \text{const}, \quad (4)$$

其中: D_{real} 为真实直径, D_{test} 为测量值,通过校准规测量,得到常量 e ,然后再对待测规的测量值进行补偿得到最终结果。实际上这是一种简化的补偿模型,作者之前的研究工作^[32]已详细讨论过定位误差对中径影响的数学模型,并提出了两规校准的补偿方法。后文的结果比较仅仅是为了说明本文中径计算方法对定位误差的鲁棒性优于其他方法。因此对参与比较的中径计算方法,都将按照式(4)的单规校准对结果进行补偿。

4 测试结果及分析

为了对参数计算算法进行独立测试和分析,文中采用 Matlab 模拟生成螺纹轮廓数据,从而排除轮廓点测量时的误差影响。Nicolson^[33-34]利用分段函数给出了一种美制螺纹轮廓表面数据的数学模型,但其在牙顶和牙底都采用了圆弧形过渡,与国内普通螺纹的轮廓定义不一致。Kosarevsky^[35]从螺旋线方程出发,构造了形式上更为简便的数学模型来描述螺纹表面轮廓,但是在轮廓牙顶和牙底部分仅以尖点表示,也不完全符合实际螺纹轮廓。本文严格按照国标 GB/T192-2003^[36]的基本牙型规定,以螺纹轮廓特点进行分段,采用如下形式的分段函数构建普通螺纹的三维轮廓数据:

左牙侧:

$$\begin{cases} x_1 = P \frac{\theta}{2\pi} + \frac{(r - R_{\min})}{\sqrt{3}} \\ y_1 = r \cos \theta \\ z_1 = r \sin \theta \end{cases}, \quad r \in [R_{\min}, R_{\max}], \theta \in [0, \theta_{\max}].$$

牙顶:

$$\begin{cases} x_2 = P \frac{\theta}{2\pi} + \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{\sqrt{3}} + L_t \\ y_2 = R_{\max} \cos \theta \\ z_2 = R_{\max} \sin \theta \end{cases}, \quad L_t \in \left[0, \frac{P}{8}\right], \theta \in [0, \theta_{\max}].$$

右牙侧:

$$\begin{cases} x_3 = P \frac{\theta}{2\pi} + \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{\sqrt{3}} + \frac{P}{8} + \frac{(R_{\max} - r)}{\sqrt{3}} \\ y_3 = r \cos \theta \\ z_3 = r \sin \theta \end{cases},$$

$$r \in [R_{\min}, R_{\max}], \theta \in [0, \theta_{\max}].$$

牙底:

$$\begin{cases} x_4 = P \frac{\theta}{2\pi} + \frac{2(R_{\max} - R_{\min})}{\sqrt{3}} + \frac{P}{8} + L_b \\ y_4 = R_{\min} \cos \theta \\ z_4 = R_{\min} \sin \theta \end{cases},$$

$$L_b \in \left[0, \frac{P}{4}\right], \theta \in [0, \theta_{\max}].$$

其中: $R_{\max} = D/2$; $R_{\min} = R_{\max} - 5\sqrt{3}P/16$; D 为普通螺纹公称直径; P 表示螺距; θ_{\max} 为最大旋转角度。不妨设 $\theta_{\max} = 10\pi$, 即有 5 圈有效螺纹牙型, 所形成的普通螺纹 M20×2.5 的三维轮廓数据如图 5 所示。

当没有定位偏差时, 直接令 $y_i = 0, (i = 1, 2, 3, 4)$, 即 $\cos \theta = 0$, 可得 $\theta = \pi/2 + k\pi$, 将它们分别代入各坐标方程, 就可以求出标准的螺纹二维轮廓曲线。当有定位偏差存在时, 需要先通过坐标变换, 求出变换后的 (x'_i, y'_i, z'_i) 坐标, 再令 $y'_i =$

$0, (i = 1, 2, 3, 4)$, 求出各自定义范围内对应的 L_r, L_b 或者 r , 将它们分别代入各坐标方程, 得到有偏差的螺纹二维轮廓数据。基于得到的二维数据, 代入螺纹参数计算方法中进行计算。

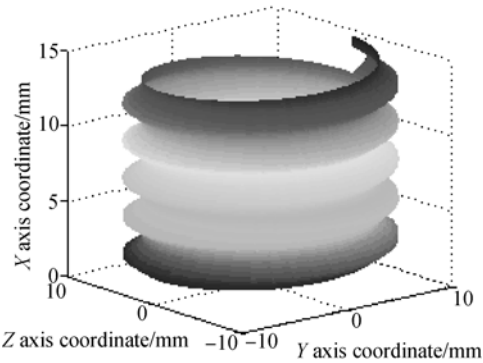


图 5 普通螺纹三维轮廓数据

Fig. 5 Three-dimensional profile data of common thread

将本文中径计算方法与文献[6]和文献[8]的中径计算方法进行比较, 测量对象设定为 M8×1、M20×2.5、M22×2、M27×3、M30×3、M42×4.5、M52×5 这 7 个普通外螺纹, 校准规设为 M25×2。所提出的分段函数构建生成螺纹的二维轮廓数据根据, 中径计算结果如表 1 所示。

表 1 中径测量结果

Tab. 1 Measurement results of pitch diameter

定位偏差/(°)	计算方法	中径误差/ μm						
		M8×1	M20×2.5	M22×2	M27×3	M30×3	M42×4.5	M52×5
$a=0 \text{ mm}; \alpha=0^\circ$	文[6]算法	0	0	0	0	0	0	0
$b=0 \text{ mm}; \beta=0^\circ$	文[8]算法	0	0	0	0	0	0	0
$c=0 \text{ mm}; \gamma=0^\circ$	本文算法	0	0	0	0	0	0	0
$a=0.1 \text{ mm}; \alpha=0.5^\circ$	文[6]算法	3.35	0.65	0.44	1.99	3.55	-14.59	-20.59
$b=0.1 \text{ mm}; \beta=0.5^\circ$	文[8]算法	28.90	1.64	1.79	-6.72	-16.84	-17.91	-27.94
$c=0.1 \text{ mm}; \gamma=0.5^\circ$	本文算法	1.81	0.58	-0.03	0.85	1.79	-1.73	-4.62
$a=0.5 \text{ mm}; \alpha=1^\circ$	文[6]算法	1.15	0.51	0.14	0.56	0.48	1.12	1.05
$b=0.5 \text{ mm}; \beta=1^\circ$	文[8]算法	47.58	4.88	3.66	-7.06	-9.96	-28.54	-37.28
$c=0.5 \text{ mm}; \gamma=1^\circ$	本文算法	0.97	0.46	0.11	0.46	0.40	0.93	0.95
$a=1 \text{ mm}; \alpha=2^\circ$	文[6]算法	3.39	0.78	0.11	1.04	0.85	2.99	2.77
$b=1 \text{ mm}; \beta=2^\circ$	文[8]算法	115.39	12.64	9.10	-16.41	-23.79	-68.46	-89.99
$c=1 \text{ mm}; \gamma=2^\circ$	本文算法	4.05	0.52	0.10	0.67	0.54	2.45	2.56

表1中, a 、 b 、 c 分别表示螺纹工件沿 X 、 Y 、 Z 轴的轴向偏移误差; α 、 β 、 γ 分别表示螺纹工件绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角度偏差。可以发现当没有定位偏差时, 3种算法得到的结果都是准确的。随着定位误差的增大, 本文方法能够有效减少定位误差带来的中径测量误差。所测3组不同定位误差下的螺纹中径数据显示, 本文算法的中径误差比文献[6]平均减少了60.36%、15.41%和17.23%; 比文献[8]的中径误差则平均减少了86.75%、95.6%和96.93%。这是由于本文算法仅在中径线求取上与文献[6]中的中径求法存在不同, 故结果比较接近。而文献[8]中的中径计算方法得到的结果与实际偏差比较大, 这是因为文献[8]是采用三角激光进行扫描的, 并且会通过自身旋转激光头, 实现两个正交方向的轮廓扫描, 然后取均值来抵消部分定位误差的影响。本文的模拟计算并不能实现这样的测量过程, 其仅对一个方向的二维轮廓进行计算, 所以误差比较大。但这也说明文献[8]的中径计算方法并不能直接应用于接触扫描轮廓的测量。

下面考量算法的时间消耗。所用计算机硬件平台为AMD的2.1GHz双核CPU, 内存为2GB, 软件平台为Windows7操作系统, 计算软件为Matlab(R2010b)。时间耗费对比结果如表2所示。

由表2结果可以看出, 本文算法与两文献的算法用时相差不大。甚至多数时候还优于文献[6]的算法, 因此本文所提方法是一种快速、有效地减小定位误差对中径结果影响的中径计算方法, 可以在螺纹参数的二维轮廓扫描测量中推广应用。

参考文献:

- [1] CARMIGNATO S, DE C L. A new method for thread calibration on coordinate measuring machines [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, 52(1): 447-450.
- [2] CHEN S, ZHAO D B, LU Y H, et al.. A detection method of alignment deviation on thread measuring instrument [J]. *Meas. Sci. Technol.* 2013, 24: 085002.
- [3] HONG E, ZHANG H W, KATZ R, et al.. Non-contact inspection of internal threads of machined parts [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing*, 2012, 62(1/4): 221-229.

表2 中径计算时间消耗对比结果

Tab. 2 Comparison of time consumption for calculating pitch diameter (s)

方法	M8×1	M20×2.5	M30×3	M42×4.5	M52×5
文献[6]算法	0.591	1.263	1.475	2.381	2.967
文献[8]算法	0.619	1.215	1.400	2.178	2.825
本文算法	0.546	1.278	1.455	2.301	2.880

5 结 论

由于螺纹轮廓采样点的不均匀和产生的部分动态测量误差, 本文将轮廓数据预处理过程分为插值和滤波两个部分, 分别采用三次样条插值和稳健高斯回归滤波手段处理, 得到较准确的轮廓信息。

由于螺纹中径线的标准定义难以利用存在定位误差的螺纹轮廓点进行计算, 本文提出了一种中径线的实际计算定义: 即交相邻牙侧线交点的距离与平均距离的最小二乘函数最小, 结合CMSA算法对其求解。基于该中径线, 给出了螺纹中径参数的计算方法。

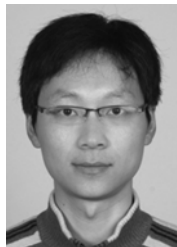
实验结果显示当工件的 X 、 Y 、 Z 轴的轴向定位偏差为1mm, 旋转偏差为 2° 时, 所得到的中径测量误差比文献[6]和文献[8]的方法平均减小17.23%和96.93%。说明了本文算法可以有效弥补工件定位误差对螺纹参数准确性的影响。本文中径计算方法具有通用性, 可应用于接触式和非接触式采样得到的二维螺纹轮廓点云数据。

- [4] KOSAREVSKY S, LATYPOV V. Development of an algorithm to detect screw threads in planar point clouds [J]. *Measurement Science Review*, 2010, 10(4): 136-141.
- [5] GADELMAWLA E S. A novel system for automatic measurement and inspection of parallel screw threads [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*, 2004, 218(5): 545-556.
- [6] 范一保. 高精度接触式螺纹测量仪软件系统的设计与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- FAN Y B. *The design and development of software of high-precision contact thread measuring instrument* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

- [7] HSUEH-LIANG H, WEN-YUH J, CHIEN-HUNG L, *et al.*. Development of a novel laser-based measuring system for the thread profile of ballscrew [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 1012-1018.
- [8] TONG Q, JIAO C, HUANG H, *et al.*. An automatic measuring method and system using laser triangulation scanning for the parameters of a screw thread [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(3): 035202.
- [9] GALESTIEN R. Method and device for measuring workpieces having internal and/or external screw thread or similar grooves: United States, 6289595 [P]. 2001-09-18.
- [10] GALESTIN R. Advanced 2D scanning: the solution for the calibration of thread ring and thread plug gauges [C]. *Proceedings of the 13th International Metrology, Co. Lille; French College of Metrology Press*, 2006: 363-372.
- [11] 吕东方. 螺纹参数激光检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LV D F. *Research on laser screw thread parameter detection technology* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
LI Q Y, WANG N CH, YI D Y. *Numerical Analysis* [M]. 5th ed, Beijing: Tsinghua University press, 2008. (in Chinese)
- [13] International organization for Standardization, ISO 4287. Geometrical Product Specifications (GPS)-surface texture; profile method-terms, definitions and surface texture parameters [S]. Switzerland, 1997.
- [14] 国家质量技术监督局, GB/T 3505-2000. 产品几何技术规范 表面结构 轮廓法 表面结构的术语、定义及参数[S]. 北京, 2000.
Chinese State Bureau of Quality and Technical Supervision, GB/T 3505. Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters [S]. Beijing, 2000. (in Chinese)
- [15] International organization for Standardization, ISO 11562. Geometrical Product Specifications (GPS)-surface texture; profile method-metrological characteristics of phase correct filters [S]. Switzerland, 1996.
- [16] MURALIKRISHNAN B, RAJA J. *Computational Surface and Roundness Metrology* [M]. London: Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [17] KRYSZEK M. Form filtering by splines [J]. *Measurement*, 1996, 18(1): 9-15.
- [18] BRINKMANN S, BODSCHWINNA H, LEMKE H. Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2001, 41(13): 2153-2161.
- [19] LI H, JIANG X, LI Z. Robust estimation in Gaussian filtering for engineering surface characterization [J]. *Precision Engineering*, 2004, 28(2): 186-193.
- [20] 任志英, 高诚辉, 申丁, 等. 双树复小波稳健滤波在工程表面粗糙度评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1820-1827.
REN ZH Y, GAO CH H, SHEN D, *et al.*. Application of DT-CWT robust filtering to evaluation of engineering surface roughness [J]. *Opt. Precision Eng.* 2014, 22(7): 1820-1827. (in Chinese)
- [21] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Development of a lifting wavelet representation for surface characterization [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series*, 2000, 456 (2001): 2283-2313.
- [22] ALLER J M, HABETLER T G, HARLEY R G, *et al.*. Sensorless speed measurement of AC machines using analytic wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38 (5): 1344-1350.
- [23] JIANG X, LOU S, SCOTT P J. Morphological method for surface metrology and dimensional metrology based on the alpha shape [J]. *Meas. Sci. Technol.* 2012, 23(1): 015003.
- [24] JIANG X J, ABDUL-RAHMAN H S, Scott P J. Multi-scale freeform surface texture filtering using a mesh relaxation scheme [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2013, 24(11): 115001.
- [25] International organization for Standardization, ISO 16610. Geometrical product specifications (GPS)-Filtration-Part 21: Linear profile filters; Gaussian filters [S]. Switzerland, 2011.
- [26] 全国螺纹标准化技术委员会, GB/T 28703. 圆柱螺纹检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Technical Committee on Thread of Standardization Administration of China, GB/T 28703. The methods for parallel screw threads [S]. Beijing: China standards Press, 2012. (in Chinese)
- [27] 吴得信. 基于机器视觉的螺纹测判系统的研究

- [D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- WU D X. *Research on measurement and evaluation system of the screw thread via machine vision technology* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [28] 李亮,迟世春,林皋. 改进复合形法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005, 37(10):1429-1432.
- LI L, CHI SH CH, LIN G. *Modified complex method and its application to the slope stability analysis* [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(10): 1429-1432. (in Chinese)
- [29] DOWSLAND K A, THOMPSON J M. *Simulated Annealing* [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012: 1623-1655.
- [30] ABDEL-RAHMAN H, MASAO F. Hybrid simulated annealing and direct search method for non-linear unconstrained global optimization [J]. *Optimization Methods and Software*, 2002, 17(5): 891-912.
- [31] KOSAREVSKII S V. Determining alignment in measurement of a large-diameter thread by means of devices for profile measurement [J]. *Measurement Techniques*, 2008, 51(12): 1273-1278.
- [32] 陈盛,赵东标,沈建新,等. 轮廓扫描式螺纹中径测量的两规校准补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(10):2184-2191.
- CHEN SH, ZHAO D B, SHEN J X. Compensation method of two gauge calibration for the thread pitch diameter measurement with profile scanning [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10): 2184-2191. (in Chinese)
- [33] NICOLSON E, FEARING R. Compliant control of threaded fastener insertion [C]. *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Osaka*, 1991: 30-37.
- [34] NICOLSON E, FEARING R. Dynamic modeling of a part mating problem threaded fastener insertion [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Georgia*, 1993: 484-490.
- [35] KOSAREVSKY S, LATYPOV V. Detection of screw threads in computed tomography 3D density fields [J]. *Measurement Science Review*, 2013, 13(6): 292-297.
- [36] 国家质量监督检验检疫总局, GB/T 192. 普通螺纹-基本牙型[S]. 北京, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, GB/T 192. General purpose metric screw threads-Basic profile [S]. Beijing, 2003. (in Chinese)

作者简介:



陈盛(1985—),男,江西九江人,博士研究生,2007年于河海大学获得学士学位,2010年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事精密测量与智能检测方面的研究。E-mail: chensheng351@qq.com

导师简介:



赵东标(1963—),男,安徽人,博士,教授,博士生导师,1985年、1990年、1993年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机器人学、智能制造系统与技术、微机电系统智能检测与控制等方面的研究。E-mail: zdbme@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)