

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306345

# 螺纹量规三维数字化计量模型参数计算及精度分析\*

崔永丹 禹 静 李纪珍 蔡晋辉 孔 明

(中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018)

**摘要:**针对实体螺纹量规加工难、成本高、易磨损、检定工序繁琐等问题,提出了一种基于三维点云的螺纹量规数字化计量模型建立及参数计算方法。为实现实物螺纹量规数字化,首先获得其三维数字化模型,并获取模型大径、中径、小径、螺距与牙型角等关键参数。其次对模型进行单项误差与综合误差分析,得到各参数相对误差均小于5%。最终得到数字化模型各项参数的不确定度与扩展不确定度,证明螺纹量规数字化计量模型的准确性。该结果为螺纹量规数字化发展提供了研究基础,对计量行业的数字化转型具有参考价值。

**关键词:** 螺纹量规;数字化模型;精度分析;数字计量

**中图分类号:** TB92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Parameter calculation and precision analysis of 3D digital measurement model for thread gauge

Cui Yongdan Yu Jing Li Jizhen Cai Jinhui Kong Ming

(College of Metrology &amp; Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of solid thread gauges including difficult to process, high cost, easy wear and cumbersome verification procedures, a digital measurement model establishment and parameter calculation method of thread gauge based on three-dimensional point cloud was proposed. In order to realize the digitization of the physical thread gauge. First, the 3D digital model was obtained, and the key parameters of the model such as large diameter, middle diameter, small diameter, pitch and tooth profile angle were obtained. Secondly, the single error and comprehensive error of the model are analyzed, and the relative error of each parameter is less than 5%. Finally, the uncertainty and extended uncertainty of each parameter of the digital model are calculated, which proves the accuracy of the digital measurement model of thread gauge. The results provide a research basis for the digital development of thread gauge and have reference value for the digital transformation of measurement industry.

**Keywords:** thread gauge; digital model; accuracy analysis; digital metrology

## 0 引言

在数字化量值传递体系中,建立三维数字化计量模型并评价其尺寸信息,最终实现用于数字化计量是至关重要的环节。杨客<sup>[1]</sup>基于三维点云数据,提出了一种高重构效率、高网格质量的几何表面重构方法。Gong等<sup>[2-3]</sup>提出一种利用扫描光纤内窥镜和轴向立体视觉算法测量微小内部三维表面的新方法;一种基于机器视觉的三维光学测量方法,用于内螺纹孔等复杂微小内表面

的三维轮廓测量。谢张宁等<sup>[4]</sup>为更好获取螺纹参数,利用最小二乘法实现三维点云螺纹中轴线快速、准确的拟合。Lin等<sup>[5]</sup>开发了一组包含统计信息描述螺纹量规零件,进行统计建模,对数字螺纹量规系统进行验证。石雪飞等<sup>[6]</sup>使用三维模型重构技术实现评价异形混凝土结构尺寸,并提出3种判异原则分别对构件进行整体宏观、局部单项和先整体后局部的检验评价。王洛笛等<sup>[7]</sup>对管道系统进行三维重建,实现虚拟实体的构建,创建管道虚拟孪生模型,实现管道生命周期数字化。易礼琴等<sup>[8]</sup>利用MBD技术,构建了包含规范化设计与制造信息的圈椅数

收稿日期: 2023-03-15 Received Date: 2023-03-15

\* 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发项目(2018YFF01013100)资助

字化模型,实现了传统家具数字化制造。以上研究为螺纹量规三维数字化计量模型的建立提供了理论基础与构建经验。

螺纹量规主要参数包括大径、中径、小径、螺距、牙型角,为获取这些参数,传统工具与方法包括测长仪、三针法、轮廓仪、万能工具显微镜、坐标测量机、二维螺纹量规扫描仪等。螺纹测量主要有单项测量和综合测量两类<sup>[9]</sup>。单项测量法即使用不同测量方法获取螺纹量规各项参数具体数值,但需要花费较长时间;综合测量法即使用校对螺纹量规对被测量规进行旋合检验,便可判断其合格与否,但无法获得被测量规参数具体数值。后续发展过程中,为提高检测效率,可用于螺纹量规参数测量的仪器日益增多,李昕愉等<sup>[10]</sup>利用螺纹综合测量仪完成了螺纹量规的数字化测量试验,并对其测量中径的不确定度进行了评定。德国联邦物理研究院的 Przyklenk 等<sup>[11]</sup>基于三坐标测量仪研发了适用于螺纹量规的三维校准程序,并与传统二维检测方法进行比较验证。验证结果显示三维校准方法可以有效减少检测时间,提高准确性和灵活性。Sebastian 等<sup>[12]</sup>提出了一种螺纹量规整体评估方法,从螺纹几何参数化到面积测量策略的概念,再到收集点云的三维评估和使用数值模拟确定螺纹量规的测量不确定度。

上述研究表明,针对螺纹量规的标准数字化计量模型相关研究尚未有报道,现有螺纹量规传统的量值传递方式不适于日新月异的工业生产发展<sup>[13]</sup>,所以需要建立螺纹量规数字化计量模型,研究适合量规的数字化模型几何精度分析方法及比对方法来满足螺纹量规计量工作的需要,以适于各领域的计量保障,使计量领域从实体空间拓展到数字空间<sup>[14]</sup>。

## 1 模型建立与参数获取

### 1.1 标准量规模型

螺纹量规对各式螺纹起到计量校准作用,能反映被检内、外螺纹边界条件。按照使用性能分为工作螺纹量规和校对螺纹量规。按照被检对象可分为螺纹塞规和螺纹环规。

为实现螺纹量规的数字化计量,首先需要建立一个标准的量规模型。螺纹量规型号繁多,本文以 M16 \* 2-6g T 通端螺纹塞规为例,该型号螺纹量规相关参数规定为:大径 16 mm,中径 14.701 mm,小径 13.835 mm,螺距 2 mm,牙型角 60°。

量规理论标准模型使用 SolidWorks 工业制图软件设计。绘制螺纹量规草图,导出为三维模型时,选用 STL 格式输出,为保证输出模型效果,选择输出角度为 10°<sup>[15]</sup>,标准模型结果如图 1 所示。

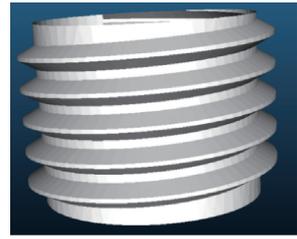


图 1 标准螺纹量规模型

Fig. 1 Standard thread gauge model

为得到螺纹量规各项参数的数值,基于量规三维点云数据获取螺纹量规点云集中各点三维坐标,旋转坐标实现获取特征点,以计算中轴线坐标、假想圆柱圆心  $O(x_0, y_0)$ 。

首先旋转坐标轴,获取  $XY$  平面最外圈圆的二维点坐标,并拟合该圆,得到假想大径圆柱。旋转坐标时,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  各轴旋转角度分别为  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 。则各轴旋转矩阵为:

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

平面圆方程可写成  $(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = R^2$ ,圆拟合要求距离的平方和最小,即:

$$f = \sum ((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 - R^2)^2 \quad (4)$$

定义辅助函数:  $g(x, y) = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 - R^2$ ,可化简为:

$$f = \sum g(x_i, y_i)^2 \quad (5)$$

求其偏导可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

已知圆半径不为 0,因此可得  $\sum g(x_i, y_i) = 0$ 。

令  $u_i = x_i - \bar{x}, u_0 = x_0 - \bar{x}, v_i = y_i - \bar{y}, v_0 = y_0 - \bar{y}$ ,代入得:

$$\begin{cases} \sum ((u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2 - R^2) u_i = 0 \\ \sum ((u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2 - R^2) v_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解得圆心坐标为:

$$\begin{cases} x_0 = u_0 + \bar{x} \\ y_0 = v_0 + \bar{y} \end{cases} \quad (8)$$

联立方程:

$$\begin{cases} \sum g(x_i, y_i)^2 = 0 \\ \sum ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R^2)^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中拟合圆半径  $R$  的两倍即大径  $d$ , 可求解大径得:

$$d = 2 \cdot R = 2 \times \sqrt{\frac{\sum ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}{N}} \quad (10)$$

同理, 通过旋转坐标轴, 拟合获得点云模型投影到  $XY$  平面的最小圆, 并计算其拟合圆半径  $R_1$ , 将其两倍作为小径  $d_1$ :

$$d_1 = 2 \times \sqrt{\frac{\sum (x_{1\theta} - x_0)^2 + (y_{1\theta} - y_0)^2}{N}} \quad (11)$$

中径  $d_2$  是通过螺纹轴向截面内牙型上的沟槽和凸起宽度相等处, 以  $YZ$  截面为例, 标记中径线与点云交点为点  $Q_1 \sim Q_6$ , 如图 2 所示。

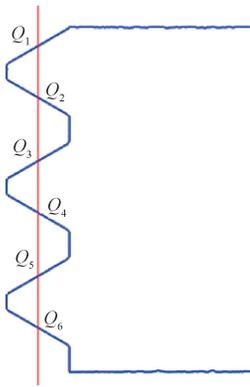


图 2 螺纹量规中径线与牙型交点  $Q$

Fig. 2 Point  $Q$  of intersection between thread gauge and tooth shape

相邻交点  $Q$  的  $z$  坐标差值相等为确定中径的依据, 即:

$$\Delta z(Q_{i-1}, Q_i) = \Delta z(Q_i, Q_{i+1}) \quad (12)$$

式中:  $\Delta z(Q_{i-1}, Q_i)$  表示中径线与螺纹交点  $Q_{i-1}$  与点  $Q_i$  的  $z$  坐标之差。

由此得到中径  $x$  轴坐标为:

$$x_{d_2} = \frac{\sum x_{Q_i}}{N} \quad (13)$$

则通过旋转模型, 得到各角度中径的平均值可以得到中径为:

$$d_2 = 2 \times \frac{\sum |x_0 - x_{d_2\theta}|}{N} \quad (14)$$

同理, 平均各旋转角度的中径线与量规的交点  $z$  轴之差获取其螺距:

$$P = \frac{\sum z_{Q_{i\theta}} - z_{Q_{(i+2)\theta}}}{N} \quad (15)$$

其中, 求取上述交点  $Q$  处的斜率, 得到牙型角为:

$$\alpha_i = \arctan \frac{|k_{Q_i} - k_{Q_{i+2}}|}{|1 + k_{Q_i} \cdot k_{Q_{i+2}}|} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i}{N} \quad (17)$$

其中,  $K_{Q_i}$  为点  $Q_i$  的斜率。

使用上述方法, 对 M16 \* 2-6g 的实测模型进行参数计算, 得到标准模型各项参数为大径为 15.997 mm, 中径为 14.698 mm, 小径为 13.817 mm, 螺距  $P$  为 2.001 mm, 牙型角  $\alpha$  为 59.973°。

根据上述螺纹量规三维参数检测算法, 为获取该算法误差, 用其获取标准螺纹量规模型各参数具体数值, 可得标准量规模型的绝对误差  $\Delta 1$ , 并可计算相对误差如表 1 所示。

表 1 标准螺纹量规模型各参数测得数据

Table 1 Measurement data of parameters of standard thread gauge model

参数	测得值	理论值	绝对误差 $\Delta 1$	相对误差/% $\epsilon$
大径 $d$ /mm	15.997	16.000	-0.003	-0.188
小径 $d_1$ /mm	13.817	13.835	-0.018	-1.303
中径 $d_2$ /mm	14.698	14.701	-0.003	-0.204
螺距 $P$ /mm	2.001	2.000	0.001	0.499
牙型角 $\alpha$ /(°)	59.973	60.000	-0.027	-0.450

已知螺纹量规模型大、中、小径公差  $\delta$  为 160  $\mu\text{m}$ , 则其微小误差区间为  $(1/10 \sim 1/3)\delta = (16.0 \sim 53.3) \mu\text{m}$ ; 螺距公差  $\delta_p$  为 4  $\mu\text{m}$ , 微小误差区间为  $(1/10 \sim 1/3)\delta_p = (0.4 \sim 1.3) \mu\text{m}$ ; 牙型角公差  $\delta_\alpha$  为 0.33°, 微小误差区间为  $(1/10 \sim 1/3)\delta_\alpha = (0.03 \sim 0.11)^\circ$ 。由表 1 可知, 各项参数误差均位于微小误差范围内, 且相对误差均为千分级, 可不考虑其影响, 因此判断所设计的螺纹量规相关参数测量算法可用。

### 1.2 实测量规模型

为获取实际测量螺纹量规模型, 首先利用深圳中图仪器研发的三维螺纹综合测量仪对实物螺纹量规进行点云数据的采集。通过实时测力分析装置和智能测力传感装置实现保持任意位置、任意斜面为相同接触力的高精密  $Z$  轴、 $X$  轴、高精密光栅系统、接触式扫描测头、高精密旋转轴组成的三维螺纹综合测量机采集螺纹量规表面点云数据。

其次, 对得到的三维点云数据集, 使用统计滤波结合双边滤波算法进行点云去噪, 并根据空间栅格法将点云进行栅格划分实现精简采样, 计算采样点与邻域点法向量, 若二者乘积小于 0, 则该区域点云保留, 获得离群点

少且表面平滑的点云数据。最后,采用自适应 BPA 重建算法<sup>[16]</sup>对上述处理后的点云进行重建处理,实测结果如图 3 所示。

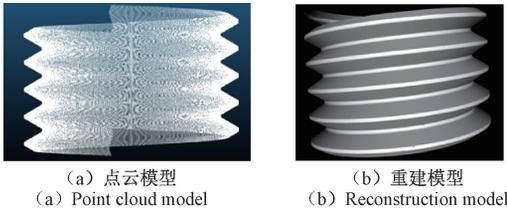


图 3 实测量规点云及重建模型

Fig. 3 Measuring gauge point cloud and reconstruction model

根据上述所提螺纹量规三维参数检测算法所得结果,可得实测模型的绝对误差  $\Delta 2$ ,如表 2 所示。

表 2 实测螺纹量规模型各参数测得数据  
Table 2 Data of measuring parameters of screw thread gauge model

参数	测得值	理论值	绝对误差 $\Delta 2$	相对误差/%
大径 $d/\text{mm}$	15.962	16.000	-0.038	-0.238
小径 $d_1/\text{mm}$	13.268	13.835	-0.567	-4.27
中径 $d_2/\text{mm}$	14.662	14.701	-0.039	-0.266
螺距 $P/\text{mm}$	2.003	2.000	0.003	0.149
牙型角 $\alpha/(\circ)$	60.089	60.000	0.089	0.148

## 2 数字化模型精度分析

### 2.1 单项误差分析

对螺纹量规数字化模型进行精度量化误差分析,分析模型误差来源。首先,标准模型误差  $\Delta 1$  主要包括的建模过程中产生的模型构建误差  $\Delta h$ 、使用参数测量算法产生的参数算法误差  $\Delta c$ ;实测模型误差  $\Delta 2$  主要包括使用三维螺纹综合测量仪采集量规点云数据产生的仪器测量误差  $\Delta m$ ,同时包含参数算法误差  $\Delta c$  以及实物螺纹量规出厂时的生产加工误差  $\Delta e$ 。且参数定义各不相同,上述各项误差均包含螺纹量规大径、小径、中径、螺距、牙型角等参数误差,其具体误差关系如图 4 所示。

#### 1) 模型构建误差 $\Delta h$

SolidWorks 软件的草图绘制精度可达  $0.01 \mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>,草图绘制过程产生的误差可以忽略不计,因此在标准螺纹量规三维模型构建过程中主要误差为制图软件输出时产生。设计标准模型在生产制造实体时会输出 STL 格式模型,该格式通过三角面片去逼近原始曲面模型会产生误差,误差可以由径向三角形边到曲面圆的弦距高表示,即三角形轮廓边与曲面轮廓之间的径向距离  $\Delta h$ 。

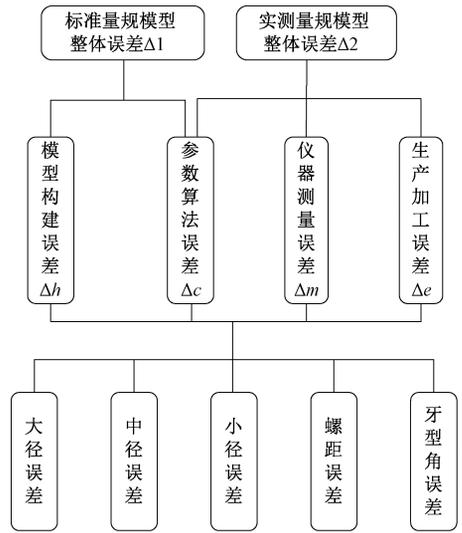


图 4 模型误差分析图

Fig. 4 Model error analysis diagram

如图 5 所示,假设曲面圆弧半径为  $R$ ,对应圆心角为  $\alpha$ ,几何理论推导绝对误差  $\Delta h$  为:

$$\Delta h = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \quad (18)$$

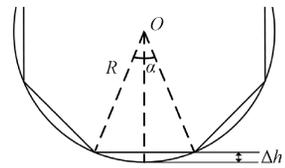


图 5 STL 格式误差示意图

Fig. 5 STL format error diagram

在导出 STL 模型时选择导出角度为  $\alpha = \pi/18$ ,大径  $d = 16 \text{ mm}$ ,小径  $d_1 = 13.835 \text{ mm}$ ,中径  $d_2 = 14.701 \text{ mm}$ 。分别代入  $R$  则可通过公式计算出误差  $\Delta h_d = 0.0186 \mu\text{m}$ ,  $\Delta h_{d1} = 0.0161 \mu\text{m}$ ,  $\Delta h_{d2} = 0.0171 \mu\text{m}$ 。已知螺纹量规模型大、中、小径公差  $\delta$  为  $160 \mu\text{m}$ ,则其微小误差区间为  $(1/10 \sim 1/3)\delta = (16.0 \sim 53.3) \mu\text{m}$ 。上述计算可知螺纹大中小径误差均位于微小误差范围内。因螺纹量规的对称性与螺纹牙型的连续性,螺距  $P$  与牙型角  $\alpha$  因 STL 输出格式产生的误差可忽略。

因此,模型构建误差  $\Delta h$  可以忽略,可认为该模型为标准螺纹量规数字模型。

#### 2) 参数算法误差 $\Delta c$

标准模型因其各项参数误差均在微小误差范围内,可将其作为理想模型,且所得标准模型综合误差  $\Delta 1$  包含标准模型的模型构建输出误差  $\Delta h$  与参数算法误差  $\Delta c$ ,因此可得到参数算法误差  $\Delta c$  结果为:

$$\begin{cases} \Delta c_d = \sqrt{\Delta 1_d^2 - \Delta h_d^2} = 3.00 \mu\text{m} \\ \Delta c_{d_1} = \sqrt{\Delta 1_{d_1}^2 - \Delta h_{d_1}^2} = 18.00 \mu\text{m} \\ \Delta c_{d_2} = \sqrt{\Delta 1_{d_2}^2 - \Delta h_{d_2}^2} = 3.00 \mu\text{m} \\ \Delta c_p = \sqrt{\Delta 1_p^2 - \Delta h_p^2} = 1.00 \mu\text{m} \\ \Delta c_\alpha = \sqrt{\Delta 1_\alpha^2 - \Delta h_\alpha^2} = 0.027^\circ \end{cases} \quad (19)$$

3) 仪器测量误差  $\Delta m$

在温度为 20 °C、湿度为 60% 的环境下,使用三维螺纹综合测量仪采集点云数据,测量误差由仪器说明书中规定指标可得,大径、中径、小径的测量误差为  $\pm(4.0+L/200)$   $\mu\text{m}$ ;螺距  $P$  的误差为  $\pm(0.9+L/200)$   $\mu\text{m}$ ;牙型角  $\alpha$  的误差为  $\pm 0.03^\circ$ 。则各参数的仪器误差  $\Delta m$  为:

$$\begin{cases} \Delta m_d = \pm(4.0 + 160.00/200) = \pm 4.80 \mu\text{m} \\ \Delta m_{d_1} = \pm(4.0 + 138.35/200) = \pm 4.69 \mu\text{m} \\ \Delta m_{d_2} = \pm(4.0 + 147.01/200) = \pm 4.74 \mu\text{m} \\ \Delta m_p = \pm(0.9 + 2.00/200) = \pm 0.91 \mu\text{m} \\ \Delta m_\alpha = \pm 0.03^\circ \end{cases} \quad (20)$$

4) 生产加工误差  $\Delta e$

已知实测模型综合误差  $\Delta 2$ 、实测模型的仪器测量误差  $\Delta m$  与参数算法误差  $\Delta c$ ,可计算得到实测量规的生产加工误差  $\Delta e$  结果为:

$$\begin{cases} \Delta e_d = \sqrt{\Delta 2_d^2 - \Delta m_d^2 - \Delta c_d^2} = 37.56 \mu\text{m} \\ \Delta e_{d_1} = \sqrt{\Delta 2_{d_1}^2 - \Delta m_{d_1}^2 - \Delta c_{d_1}^2} = 38.59 \mu\text{m} \\ \Delta e_{d_2} = \sqrt{\Delta 2_{d_2}^2 - \Delta m_{d_2}^2 - \Delta c_{d_2}^2} = 566.69 \mu\text{m} \\ \Delta e_p = \sqrt{\Delta 2_p^2 - \Delta m_p^2 - \Delta c_p^2} = 2.68 \mu\text{m} \\ \Delta e_\alpha = \sqrt{\Delta 2_\alpha^2 - \Delta m_\alpha - \Delta c_\alpha^2} = 0.08^\circ \end{cases} \quad (21)$$

实现标准螺纹量规与实测螺纹量规的参数测量后,将各模型上述误差进行补偿,再对二者模型进行比较,即通过对比二者各项具体参数从而实现螺纹量规数字化计量。二者参数对比如表 3 所示。

表 3 螺纹量规模型参数对比与误差分析

Table 3 Parameter comparison and error analysis of thread gauge model

参数	实测模型参数	标准模型参数	加工误差 $\Delta e$	公差
大径 $d/\text{mm}$	15.965	15.997	37.56 $\mu\text{m}$	
小径 $d_1/\text{mm}$	13.250	13.817	566.69 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$
中径 $d_2/\text{mm}$	14.659	14.698	38.59 $\mu\text{m}$	
螺距 $P/\text{mm}$	2.002	2.001	2.68 $\mu\text{m}$	4.00 $\mu\text{m}$
牙型角 $\alpha/(\circ)$	60.089	59.973	0.08	0.33

从表 3 中数据可以知道,实测模型各项参数的加工误差大部分位于公差范围内,只有小径的加工误差超出公差范围。在实际生产过程中,小径并未规定下偏差,且

可依据各加工方商议决定,因此会产生较大偏差。该加工误差可返回至加工端,对螺纹量规的生产起到良好的加工反馈作用。

2.2 综合误差分析

基于设计的数字化标准量规模型和获取的实测量规模型进行相应模型处理,并对二者模型进行对齐与对比,实现点云偏差分析,并输出检测结果报告,实现螺纹量规的数字化计量。选择在技术较为成熟的 Cloud Compare 环境下进行相应处理。在软件中分别导入依照国标规定参数设计的 STL 标准模型作为参考模型、被测螺纹量规经过点云处理以及重建生成的数字化标准模型作为测试模型。选用“Cross Section”手动实现初步调整模型位置,实现大致对齐;再调用 ICP 对齐算法实现两模型重合。最后获取实测模型相较于标准模型的偏差值,进而得到模型的三维偏差云图如图 6 所示。

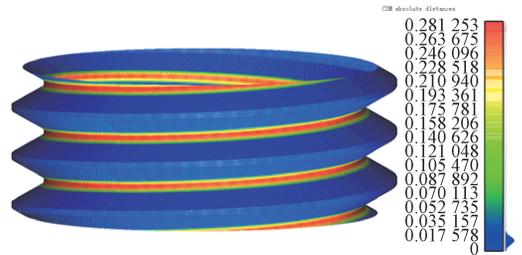


图 6 实测螺纹量规三维模型比较结果偏差云图

Fig. 6 Cloud image of deviation of measured screw thread gauge 3D model comparison results

软件结果显示,绝大多数偏差位于  $(0\sim 0.03)$  mm 范围内,偏差较大处为小径部分,与单项误差计算结果相符合。因此,可以看出本文所提螺纹量规参数计算方法有效可靠,所述螺纹量规参数测量与误差分析方法可用于螺纹量规的模型对比以及数字化量值传递。不仅实现螺纹量规模型的数字化计量,也能在实际螺纹及量规加工生产过程中起到有效作用。

2.3 不确定度分析

在实际螺纹量规数字化模型参数获取及计量过程中,主要存在以下 4 个不确定度来源:

1) 由仪器性能引起的测量不确定度分量  $u_1$ ,检测该不确定度分量可以参考仪器的技术参数和校准证书,三维螺纹综合测量仪自身不确定度在其仪器说明书中有所提及,所给出的测量不确定度为标准差的 2 倍。

2) 使用参数获取算法引起的不确定度分量  $u_2$ ,在对三维螺纹量规模型参数获取过程中使用的参数获取算法存在不确定性。

3) 生产加工引起的不确定度分量  $u_3$ ;实物螺纹量规在生产加工时,因加工环境、加工人员以及量规使用过程

中产生磨损等造成量规本身存在的不确定度。

4) 模型构建误差引起的不确定度分量  $u_4$ ; 在标准螺纹量规三维模型设计导出过程中, 存在模型输出 STL 格式时产生的模型逼近不确定度。

上述各不确定度相互独立, 均采用 B 类不确定度评定, 且  $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$  按均匀分布计算。则可计算得到螺纹量规各参数的不确定度分量以及合成标准不确定度  $u_c$ <sup>[18]</sup>、扩展因子  $k$  取 2 时的扩展不确定度  $U$ <sup>[19-20]</sup> 如表 4 所示。

表 4 螺纹量规模型参数不确定度

Table 4 Parameter uncertainty of thread gauge model

参数	不确定度分量	不确定度分量	不确定度分量	不确定度分量	合成标准不确定度	扩展不确定度
	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_c$	$U$
大径 $d/\mu\text{m}$	2.400	1.732	21.685	0.011	21.955	43.9
小径 $d_1/\mu\text{m}$	2.345	10.392	327.179	0.009	327.352	53.6
中径 $d_2/\mu\text{m}$	2.370	1.732	22.280	0.010	22.472	654.4
螺距 $P/\mu\text{m}$	0.455	0.577	1.547	\	1.808	3.6
牙型角 $\alpha/^\circ$	0.015	0.016	0.046	\	0.053	0.1

### 3 结 论

本文实现了螺纹量规三维数字化计量模型建立, 并对参数检测方法进行研究, 设计了螺纹量规标准模型与实测模型对比方法。分析计算量规模型单项误差, 通过模型对比获得模型综合误差, 最终实现螺纹量规三维数字化计量模型整体质量评估。

首先参照国标对螺纹量规标准尺寸的规定, 使用三维模型设计软件实现螺纹量规标准模型的建立; 使用三维螺纹综合测量仪实现 M16 \* 2-6g 通端螺纹塞规的点云数据获取, 并对初始点云数据进行滤波、精简与重建得到螺纹量规实测模型。

其次, 设计螺纹量规参数三维获取方法, 实现大径、中径、小径、螺距以及牙型角的数值获取。并用该算法对实测模型进行参数测量与误差分析, 所得结果显示为大部分参数误差在微小误差范围内, 小径因实际生产加工原因存在较大偏差, 且所得加工误差可用于实际生产反馈。

最后, 从模型整体角度分析, 将被测量规模型与标准模型对比, 获取模型偏差云图, 实现从宏观角度验证文中所提三维螺纹量规参数计算方法可靠性, 并对量值传递过程进行不确定度评定, 打通了从国标规定到标准模型再到实测模型这一量值传递路径。

本文提出的螺纹量规三维数字化计量模型参数获取算法, 成功实现对螺纹量规数字模型关键参数的数值获取。并针对标准模型与实测模型进行单项误差与综合误差分析, 得到了标准模型与实测模型具体误差值。并计

算了两模型各个参数的不确定度及扩展不确定度, 实现了三维螺纹量规模型的量值传递路径建立, 为螺纹量规由实体向数字化发展提供研究基础。

### 参考文献

- [1] 杨客. 基于点云的几何表面重构方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.  
YANG K. Research of algorithm for geometric surface reconstruction based on point cloud [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2013.
- [2] GONG Y, JOHNSTON R S, MELVILLE C D, et al. Axial-stereo 3-D optical metrology for inner profile of pipes using a scanning laser endoscope[J]. International Journal of Optomechanics, 2015, 9(3): 238-247.
- [3] GONG Y, SEIBEL E J. Three-dimensional measurement of small inner surface profiles using feature-based 3-D panoramic registration[J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 014108.
- [4] 谢张宁, 姜志华, 朱惠臣, 等. 基于三维点云螺纹中轴线的拟合方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(8): 918-925.  
XIE ZH N, JIANG ZH H, ZHU H CH, et al. Research on fitting method of thread middle axis based on 3D point cloud [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 918-925.
- [5] LIN C F, LIN S F, HWANG C H, et al. Real-time image-based defect inspection system of internal thread for nut[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(8): 2830-2848.
- [6] 石雪飞, 徐梓齐, 朱荣, 等. 基于三维模型重构技术的公路预制构件尺寸检验评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 66-81.  
SHI X F, XU Z Q, ZHU R, et al. Dimensional inspection and evaluation method of highway prefabricated components based on 3D model reconstruction technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 66-81.
- [7] 王洛笛, 郭延军, 白佳, 等. 基于数字孪生的三维电力管道系统[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(9): 91-98.  
WANG L D, GUO Y J, BAI J, et al. 3D power pipeline system based on digital twin [J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(9): 91-98.
- [8] 易礼琴, 何佳容, 张仲凤, 等. 基于 NX 软件和 MBD 技术的圈椅数字化模型构建[J]. 林业工程学报, 2023, 8(2): 180-186.  
YI L Q, HE J R, ZHANG ZH F, et al. Construction of digital model of round-backed armchair using NX software and MBD technology [J]. Journal of Forestry

- Engineering, 2023, 8(2): 180-186.
- [ 9 ] 何燕侠, 刘振宁. 浅析螺纹的几种测量方法[J]. 汽车实用术, 2016(4): 127-128.  
HE Y X, LIU ZH N. The comparison among several measuring methods of thread [J]. Automobile Applied Technology, 2016(4): 127-128.
- [10] 李昕愉, 史建华, 刘盼. 螺纹量规的数字化检测方法[J]. 工具技术, 2020, 54(3): 85-88.  
LI X Y, SHI J H, LIU P. Digital measuring method of thread gauge [J]. Tool Engineering, 2020, 54(3): 85-88.
- [11] PRZYKLENK A, SCHADEL S, STEIN M. Verification of a calibration method for 3D screw thread metrology [J]. Measurement Science and Technology, 2021(32): 094005.
- [12] SEBASTIAN S, ACHIM W, MARTIN S. Advanced screw thread metrology using an areal measuring strategy and a holistic evaluation method [J]. Measurement Science and Technology, 2019 (30): 075009.
- [13] 方立德, 徐潇潇, 马鑫月, 等. 计量仪器的远程量值传递与溯源技术探讨[J]. 中国测试, 2021, 47(3): 1-8.  
FANG L D, XU X X, MA X Y, et al. Discussion on remote transfer and traceability of quantity values technology of measuring instruments [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(3): 1-8.
- [14] 任思源. 国际计量数字化发展政策及启示[J]. 中国计量, 2021(6): 64-67.  
REN S Y. Development policy and enlightenment of international metrology digitization[J]. China Metrology, 2021(6): 64-67.
- [15] 孙立明, 韩校粉, 刘冬芳, 等. 基于 SolidWorks 输出 STL 格式文件的最优值研究[J]. 机械设计, 2019, 36(S2): 41-43.  
SUN L M, HAN X F, LIU D F, et al. Research on optimal value of output STL format file based on SolidWorks [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(S2): 41-43.
- [16] 刘爽, 禹静, 蔡晋辉, 等. 一种双球驱动的三维重建旋转球优化算法[J/OL]. 中国测试: 1-7 [2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220322.1818.034.html>.  
LIU SH, YU J, CAI J H, et al. A twin-sphere driven rotating ball optimized algorithm for three-dimensional reconstruction[J/OL]. China Measurement & Test: 1-7 [2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220322.1818.034.html>.
- [17] 倪洪启, 何崇玉, 孟宪春. SolidWorks 二次开发草图绘制不准确的分析与探讨[J]. 机械工程师, 2022, 371(5): 9-12.  
NI H Q, HE CH Y, MENG X CH. Analysis on Inaccuracy of sketch drawing in secondary development of SolidWorks[J]. Mechanical Engineer, 2022, 371(5): 9-12.
- [18] 褚进华, 唐修雄, 矫健, 等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 180-187.  
CHU J H, TANG X X, JIAO J, et al. Uncertainty analysis of the calibration system of visibility meter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 180-187.
- [19] 秦瑶, 吴艳丽, 刘潇. 基于电流探头的标准场法环天线校准及不确定度分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 37-44.  
QIN Y, WU Y L, LIU X. Standard field method for loop antenna calibration and uncertainty analysis based on the current probe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 37-44.
- [20] 刘昕, 边泽强, 李松奎. 标准皮托管校准系数测量及不确定度评定分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(14): 50-54.  
LIU X, BIAN Z Q, LI S K. Standard pitot tube calibration coefficient measurement and uncertainty evaluation analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(14): 50-54.

## 作者简介



崔永丹, 2021 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学在读研究生, 主要研究方向为几何量数字化计量。

E-mail: 1418923375@qq.com

Cui Yongdan received her B. Sc. degree from China Jiliang University in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. Her main research interest includes geometric quantity digital measurement.



禹静(通信作者), 2008 年于湖南大学获得学士学位, 2011 年于中国计量大学获得硕士学位, 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机械工程、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, respectively. Now she is an associate professor in China

Jiliang University. Her main research interests include ultra-precision mechanical engineering and ultra-precision measurement technology.



**李纪珍**, 2020 年于天津理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学在读研究生, 主要研究方向为三维点云处理、误差分析。

E-mail: lijizhen0503@163.com

**Li Jizhen** received her B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 2020. Now she is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. Her main research interests include 3D point cloud processing and error analysis.



**蔡晋辉**, 2005 年于浙江大学获得博士学位, 2007 年于浙江大学获得博士后学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为检测技术与信号处理。

E-mail: caijinhui@cjlu.edu.cn

**Cai Jinhui** received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005, and postdoctoral fellow degree from Zhejiang University in 2007, respectively. Now he is a professor in China Jiliang University. His main research interests include detection technology and signal processing.



**孔明**, 2000 年于东南大学获得学士学位, 2002 年于东南大学获得硕士学位, 2005 年于东南大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为计算机视觉、光学测量、三维重建和嵌入式系统等。

E-mail: mkong@cjlu.edu.cn

**Kong Ming** received his B. Sc. degree from Southeast University in 2000, M. Sc. degree from Southeast University in 2002 and Ph. D. degree from Southeast University in 2005, respectively. Now he is a professor in China Jiliang University. His main research interests include computer vision, optical measurement, 3D reconstruction and embedded systems.