

基于远心原理的滚珠丝杠测量系统设计

邓锦湖¹ 孙维方² 姚斌¹ 陈彬强¹

¹厦门大学; ²温州大学

摘要: 针对传统滚珠丝杠外螺纹检测技术在检测参数不全面、检测范围受限等方面的缺陷,设计了一种基于远心镜头成像及检测算法的视觉测量仪。对仪器的测量原理和设计思路进行了研究,利用多次拍摄滚珠丝杠同一位置的方式求平均值,有效降低了随机误差,完成了对滚珠丝杠齿廓和珠心径的测量。与接触式测量仪器结果进行了对比,获得轮廓测量误差为 $3\mu\text{m}$,珠心径测量误差为 $3.6\mu\text{m}$ 。

关键词: 滚珠丝杠; 视觉测量; 远心; 高精度

中图分类号: TG802; TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.05.028

Design of Ball Screw Measuring System Based on Telecentric Principle

Deng Jinhu, Sun Weifang, Yao Bin, Chen Binqiang

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional ball screw detection technology in the aspects of incomplete detection parameters and limited detection range, a visual measuring instrument based on telecentric lens imaging and detection algorithm is designed. The measurement principle and design idea of the instrument are studied. The average value of the ball screw is taken at the same position for multiple times, which effectively reduces the random error and completes the measurement of the ball screw profile and the radius of ball center. The results of the contact measuring instrument are compared, and the result of the contour measurement error of is $3\mu\text{m}$ and the measurement error of radius of ball center is $3.6\mu\text{m}$.

Keywords: ball screw; visual measurement; telecentric; high precision

1 引言

滚珠丝杠作为现代工业基础元件,在机械传动与定位方面应用广泛,其加工质量直接影响机械的传动精度、定位精度、加工精度和测量精度^[1]。滚珠丝杠的传统检测方法有测针法^[2]、投影检查法^[3]、三线法^[4]和机器视觉法等,其中,基于机器视觉的螺纹检测方法因其非接触式、检测速度快和精度高的特点而受到研究者重视。传统机器视觉使用普通镜头无法采集到外螺纹正确的法向轮廓。陈曼龙等^[5]提出对失真廓形的补偿方法;卜晨^[6]提出使用机器视觉的方法获取外螺纹的大径、小径及螺距,精度达到 0.1mm ;田野^[7]采用线结构光的方法获取内螺纹的数据,极限误差为 $12.78\mu\text{m}$;万鹏^[8]针对传统视觉方法仅能测量平面轮廓或区域的不足,提出一种对三角外螺纹的三维检测方法;李晋惠等^[9]利用远心镜头的无视差原理,避开了廓形失真,获取了三角外螺纹大径、小径、牙高等参数。

尽管国内外的螺纹检测技术研究已经取得了不少突破,已经有许多检测技术应用于生产实践,但这些方法仍然受限于测量范围有限和检测参数

不全面、镜头边缘成像精度不高^[10]而无法适应公称直径大、精度要求高的滚珠丝杠外螺纹的检测需求。

本文针对滚珠丝杠的高精度测量,设计了基于双远心镜头的高精度外螺纹检测系统,相比采用普通镜头的传统视觉系统具有畸变小、无视差、照度均匀、标定简单等优点。

2 系统构成

2.1 硬件设计

螺纹检测系统的硬件设计见图1,主要由运动系统、工件夹持装置、光栅位移传感器和图像采集系统组成。图像采集系统由双远心镜头、工业相机、背光板和计算机组成。摆台用于固定工业相机,并可以精确地设定相对工件轴线的夹角,使图像采集系统能获得滚珠丝杠齿廓法截面的数据;头架与尾架上安装有顶尖,用于安装和固定滚珠丝杠。

2.2 坐标系转换

测量平台坐标系和图像坐标系的定义见图2,其中坐标系之间的位置关系由光栅信息显示板的光栅数据进行确定。由于图像行列方向与测量平台坐标系进行了精确校准,倾斜误差极小而可以忽略。

收稿日期: 2018年8月

图像中任意像素点对应的测量平台坐标系坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{光栅} \\ Y_{光栅} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{图像} \\ y_{图像} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} xScale \\ yScale \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, X 、 Y 为测量平台坐标系对应点位置; $X_{光栅}$ 、 $Y_{光栅}$ 为光栅信息显示板的光栅数据; $x_{图像}$ 、 $y_{图像}$ 为获取图像对应点位置; $xScale$ 、 $yScale$ 分别为图像像素点与真实世界尺度的系数, 其计算方法为

$$\begin{bmatrix} xScale \\ yScale \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xPix \\ yPix \end{bmatrix} / \beta \quad (2)$$

式中, $xPix$ 、 $yPix$ 分别为相机行列方向的像元尺寸和双远心镜头的固有视野放大倍率。

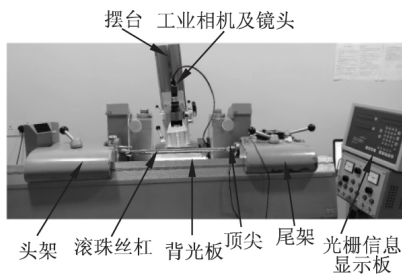


图1 系统硬件组成

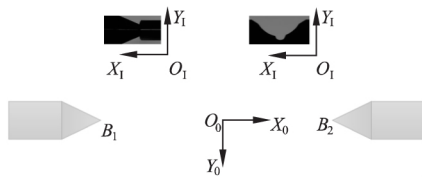


图2 坐标系

2.3 测量算法流程设计

设计的算法流程如图3所示,其流程具体可表述为:

①将滚珠丝杠安装到测量平台的顶尖上,安装好图像采集设备(后简称设备),并使相机光轴相对工件轴线成一定角度,且相机 CMOS 运行方向与工件轴线平行,调整设备工作距离使工件在图像中心区域成像清晰;

②将设备移动到测量平台的头架顶尖位置,拍摄 20 张图像,并记录当前光栅坐标;

③对头架图像进行边缘检测,得到顶尖两条边缘线的坐标,拟合后获得两条边缘线的交点坐标,根据式(1)和式(2)将交点像素坐标转换为测量平台的世界坐标 (X_1 , Y_1);

④将设备移动到测量平台的尾架顶尖位置,拍摄 20 张图像,并记录当前光栅坐标;

⑤对尾架图像进行边缘检测,并得到顶尖两条边缘线的图像坐标,拟合后获得两条边缘线的交点

坐标,同样转换为测量平台的世界坐标 (X_2 , Y_2);

⑥根据头尾顶尖交点所在世界坐标,计算两顶尖的直线解析式 L ;

⑦将设备移动到所需测量的齿廓位置,使拍摄对象位于图像中心,拍摄 20 张图像,并记录当前光栅坐标;

⑧对齿廓图像进行边缘检测,并框选位置,记录框选的偏移坐标,分别对双圆弧区域进行圆拟合,获得两个圆的半径与圆心坐标,转换到测量平台的世界坐标系得 R_1 、 R_2 与 (X_{c1}, Y_{c1}) 、 (X_{c2}, Y_{c2}) ;

⑨为模拟三线法测量过程,已知匹配丝杠的量棒半径为 R_3 ,以两个圆心坐标为基准,分别作半径为 $R_1 - R_3$ 、 $R_2 - R_3$ 的圆,并获取两圆交点坐标,正常情况下有两个交点,仅取靠近工件轴线端的交点 Z 作为量棒中心坐标;

⑩计算 Z 点到直线 L 的距离,乘以 2 倍即为所求珠心径数据。

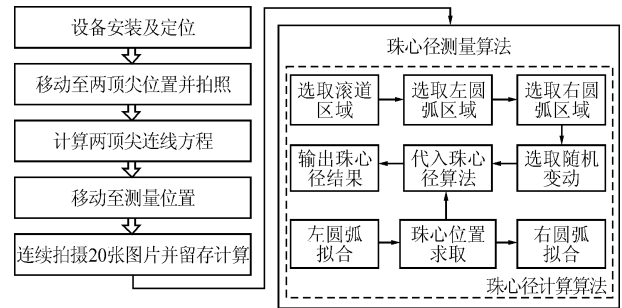


图3 操作及计算流程

3 试验验证

滚珠丝杠型号为 SW059-01-301, 导程为 5mm, 右旋, 螺旋升角为 $5^{\circ}40'50''$ 。双远心镜头采用 Coolens 品牌的 DTCM118-36, 视野直径为 36mm, 工作距离为 110mm, 最大支持 1/1.8 英寸 CMOS 传感器。工业相机为大恒的 MER-4810, 传感器尺寸 1/2.5 英寸, 像元尺寸为 $1.25\mu m$, 具有 1800 万像素; 测量平台使用 Leitz-strassmann L020, 表面粗糙度测量仪使用 Hommel-Etamic T8000。

为尽可能减少成像过程中的噪声对图像造成的影响,采用多次测量求平均的方法进行随机噪声的抑制。针对于同一测量对象进行 20 次重复试验,其测量结果见表 1。

标记测量位置并直接对比测量结果。采用 Hommel 测量仪对滚珠丝杠进行接触式测量,测量报告见图 4, 廓形测量结果对比见表 2, 拟合圆交点数据与头尾架顶尖坐标见表 3。

表 1 轮廓信息参数计算 (mm)

| 序号 | R_1 | R_2 | X_{c1} | X_{c2} | Y_{c1} | Y_{c2} | 圆心距 |
|-----|--------|--------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 1.7360 | 1.7298 | 2.5626 | 2.3450 | -0.1106 | -0.1055 | 0.2177 |
| 2 | 1.7480 | 1.7283 | 2.6898 | 2.4655 | -0.2007 | -0.1841 | 0.2249 |
| 3 | 1.7435 | 1.7374 | 2.5268 | 2.3006 | -0.3169 | -0.3116 | 0.2263 |
| 4 | 1.7501 | 1.7403 | 2.2909 | 2.0577 | -0.2823 | -0.2734 | 0.2334 |
| 5 | 1.7480 | 1.7284 | 2.4092 | 2.1857 | -0.3209 | -0.3044 | 0.2241 |
| 6 | 1.7543 | 1.7507 | 2.5332 | 2.2913 | -0.3660 | -0.3619 | 0.2420 |
| 7 | 1.7540 | 1.7473 | 2.4131 | 2.1745 | -0.4458 | -0.4402 | 0.2386 |
| 8 | 1.7451 | 1.7396 | 2.2479 | 2.0179 | -0.4785 | -0.4725 | 0.2300 |
| 9 | 1.7439 | 1.7396 | 2.5271 | 2.2986 | -0.4373 | -0.4327 | 0.2285 |
| 10 | 1.7524 | 1.7468 | 2.5723 | 2.3363 | -0.3643 | -0.3604 | 0.2360 |
| 11 | 1.7387 | 1.7361 | 2.4037 | 2.1806 | -0.3930 | -0.3899 | 0.2231 |
| 12 | 1.7392 | 1.7310 | 2.4842 | 2.2634 | -0.3535 | -0.3458 | 0.2209 |
| 13 | 1.7430 | 1.7368 | 2.4867 | 2.2595 | -0.2764 | -0.2703 | 0.2273 |
| 14 | 1.7419 | 1.7354 | 2.4056 | 2.1805 | -0.3959 | -0.3892 | 0.2252 |
| 15 | 1.7442 | 1.7314 | 2.5271 | 2.3031 | -0.4377 | -0.4263 | 0.2242 |
| 16 | 1.7491 | 1.7436 | 2.1698 | 1.9355 | -0.2818 | -0.2758 | 0.2344 |
| 17 | 1.7441 | 1.7360 | 2.4074 | 2.1802 | -0.4371 | -0.4295 | 0.2273 |
| 18 | 1.7421 | 1.7336 | 2.3657 | 2.1419 | -0.2759 | -0.2679 | 0.2239 |
| 19 | 1.7393 | 1.7290 | 2.3244 | 2.1053 | -0.3933 | -0.3842 | 0.2193 |
| 20 | 1.7457 | 1.7321 | 2.6474 | 2.4230 | -0.3189 | -0.3066 | 0.2248 |
| 平均值 | 1.7451 | 1.7367 | | | | | 0.2276 |
| 标准差 | 0.0050 | 0.0064 | | | | | 0.0062 |

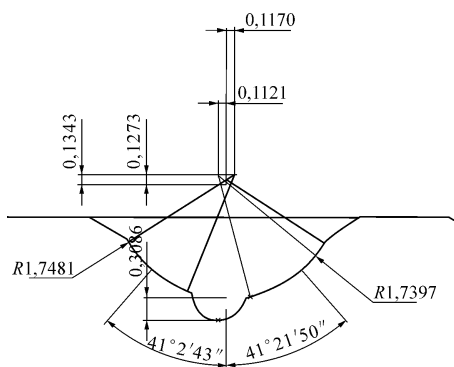


图 4 Hommel 接触式测量结果

表 2 廓形测量结果对比 (mm)

| | R_1 | R_2 | 圆心距 |
|-------|---------|---------|---------|
| 接触式测量 | 1.7481 | 1.7397 | 0.2291 |
| 本试验方法 | 1.7451 | 1.7367 | 0.2276 |
| 绝对误差 | -0.0030 | -0.0030 | -0.0015 |
| 误差比例 | -0.17% | -0.17% | -0.66% |

表 3 拟合圆交点数据与头尾架顶尖坐标 (mm)

| X_{c3} | Y_{c3} | X_1 | Y_1 | X_2 | Y_2 |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| -202.8816 | -8.8108 | -224.4390 | -16.8563 | 206.7181 | -16.8504 |

利用 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 计算两顶尖拟合交点平均坐标的直线解析式, 可得

$$y = 0.0000137x - 16.8532$$

计算拟合圆心坐标平均值到该直线的距离为

$$d = \frac{|AX + BY + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

上式计算结果为 8.0452mm, 乘以两倍后为

16.0904mm。由于 Hommel 测量仪只能检测廓形数据, 缺少珠心径数据的对比, 故使用三线法测量该齿廓的珠心径。三线法测量结果为 16.094mm, 本试验方法测量结果为 16.0904mm。

4 结语

由表 1 数据可知, 单个图像处理得到的坐标结果不够稳定, 但当拍摄 20 次求平均时, 可以有效降低来自环境条件、相机热噪声带来的影响, 最终取得较好的结果。根据与 Hommel 轮廓仪对比测量结果可知, 双圆弧半径及圆心距误差分别为 $-3\mu\text{m}$ 、 $-3\mu\text{m}$ 、 $-1.5\mu\text{m}$, 而三线法测量得到的珠心径误差为 $3.6\mu\text{m}$, 可见本方法精度较高, 能够满足滚珠丝杠高精度非接触式测量的需求。

参考文献

- [1] 丁梅, 冯虎田. 滚珠丝杠激光动态测量系统设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2011(12): 37-41.
- [2] 朱冰. 发动机高精度螺纹孔加工技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
- [3] 陈曼龙. 外螺纹垂直投影测量法及应用分析[J]. 激光技术, 2012, 36(6): 793-797.
- [4] 史伟萍. 三线法测量螺纹中径误差分析[J]. 计量技术, 1978(5): 29-32.
- [5] 陈曼龙, 冯来健, 牛文莉. 机器视觉外螺纹测量失真分析[J]. 机械设计与制造, 2014(7): 221-223.
- [6] 卜晨. 基于机器视觉的外螺纹检测方法实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [7] 田野. 基于机器视觉的内螺纹参数检测系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [8] 万鹏. 基于图像处理的外螺纹三维模型重构[J]. 图学学报, 2012, 33(1): 68-72.
- [9] 李晋惠, 于亚琳, 田军委. 基于双远心光学系统的高精度外螺纹测量方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 244-249.
- [10] 田原媛, 黄合成, 谭庆昌, 等. 摄像机镜头畸变的研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 49-52.

第一作者: 邓锦湖, 硕士研究生, 厦门大学航空航天学院, 361005 福建省厦门市

First Author: Deng Jinhua, Postgraduate, School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

通信作者: 姚斌, 教授, 厦门大学航空航天学院, 361005 福建省厦门市

Corresponding Author: Yao Bin, Professor, School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China