

引用格式:王跃宗,曲道多,王盛逸. 自动引线系统中旋转偏心检测与补偿方法[J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(1): 1-12.
WANG Y Z, QU D D, WANG S Y. Detection and compensation for rotational eccentricity in automatic wire-traction system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(1): 1-12. (in Chinese)

自动引线系统中旋转偏心检测与补偿方法

王跃宗, 曲道多, 王盛逸

(北京工业大学机械与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 在空心杯转子线圈的自动引线微操作系统中,线圈的几何中心很难与旋转台的回转中心重合,因此在旋转过程中产生偏心现象,进而导致线圈引线失败。为此,提出了一种检测和补偿线圈偏差的方法。从分析线圈偏心源出发,建立偏心数学模型,设计了一种偏心模型与图像特征提取算法结合的偏差测量方法,并提出基于自动控制与补偿模型的校正方法。通过实验验证了模型的精确性以及偏心补偿的有效性,基于均方根误差的评价,模型对于偏差预测以及特征提取算法均具有较高的精度,补偿后的最大残余误差小于 $4\ \mu\text{m}$,平均补偿幅度约为 98.6%,引线实验展示了所提方法的优良性能。提出的偏心检测补偿方法具有精度高、复杂度低、效率高、实时性,以及嵌入式等优点,且在微操作以及微装配领域具有更合适、更广泛的应用。

关键词: 空心杯转子线圈; 旋转偏心; 模型; 特征提取; 微操作; 微装配

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2025)01-0001-12

doi: 10.11936/bjtxb2023020017

Detection and Compensation for Rotational Eccentricity in Automatic Wire-traction System

WANG Yuezong, QU Daoduo, WANG Shengyi

(College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In the automatic wire-traction micromanipulation system for the hollow cup coil, it is difficult for the coil's geometric center to coincide with the rotation center of the rotary stage, thus, the eccentricity occurs during the rotation, which leads to a failure of the wire-traction. Therefore, a method to detect and compensate the coil's eccentricity is proposed in this paper. Based on the analysis of the eccentricity sources, the eccentricity mathematical models were established, a bias measurement method combining the eccentricity models with the image feature extraction algorithm was designed, and a correction method based on control and compensation models was proposed. The accuracy of the models and the effectiveness of eccentricity compensation were verified by experiments. Relying on the evaluation of root mean square error (RMSE), the prediction for eccentricity based on models and the feature extraction algorithm both had a high accuracy. The maximum residual error after compensation was less than $4\ \mu\text{m}$ and the average compensation amplitude was about 98.6%, and the wire-traction experiment showed the excellent performance of the proposed method. The detection and compensation method for eccentricity proposed in this paper has the advantages of high accuracy, low complexity, high efficiency,

收稿日期: 2023-02-17; 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975009)

作者简介: 王跃宗(1975—), 男, 教授, 主要从事微操作机器人和微视觉方面的研究, E-mail: yaozongw@bjut.edu.cn

real-time and embedded, and is more suitable for a wider range of application in the field of micromanipulation and micro-assembly.

Key words: hollow cup coil; rotational eccentricity; model; feature extraction; micromanipulation; micro-assembly

微操作是指对尺寸范围从微米到亚毫米的物体进行操作。微操作系统通常由运动控制系统、视觉系统和微操作器组成,其操作精度可达微米、亚微米甚至纳米级别^[1]。因此,这种系统已被广泛应用于微组装、微注射、生物工程等微观领域^[2]。微型空心杯电机是微组装的对象之一,也是一种由空心杯转子线圈生产的新兴产品,具有能耗低、灵敏度高、控制精度高、轻量化等突出特点,被广泛应用于航空航天、医疗器械、智能机器人等高科技领域^[3]。在其生产过程中,线圈的导线牵引焊接是一个重要环节。在此之前,导线牵引主要依靠人工在显微镜下借助工具手动牵引。由于线圈的电极导线直径只有几十微米,而且质地柔软,承载能力较小,人工引线的效率和一致性在一定程度上存在缺陷。针对上述问题,刘凯等^[4]提出使用气流定位法进行引线。Wang等^[5-6]设计了一种基于显微视觉的电极导线自动引线微操作系统。在该系统中,线圈被固定在旋转台中心,电极导线由微夹持器捕获,在视觉引导下被牵引释放在指定焊盘表面,以满足连续的自动化引线操作。用于引线的微夹持器以及微操作系统受到广泛关注,然而,微操作系统对被操作对象有着较高的控制精度要求,对该部分的研究少之又少。

在引线系统中,受机械加工与装配关系的影响,很难保证线圈中心与旋转台回转中心重合,线圈在旋转时产生偏心现象。实验发现线圈与初始位置的偏差可达几十甚至几百微米。微操作系统对微米级别的导线进行操作,夹持钳尖的尺寸很小,而且整个操作也被限制在狭小的空间内,偏心严重影响着引线系统的正常工作。因此,对引线系统的偏心测量及补偿具有重要研究意义。

在相关文献中,用于角速度传感器的圆光栅安装偏心问题的研究与本文工作类似。Yu等^[7]建立圆光栅偏心模型并提出利用多个读数头几何排列法测量误差。Chen等^[8]建立模型验证误差源并基于压缩传感和稀疏分解原理以提高圆光栅角度测量精度。Lou等^[9-10]和Du等^[11]提出利用光电自准直仪与多边形反光棱镜的组合测量偏心引起的角度误

差。Jia等^[12]提出利用视觉图像处理技术检测偏心误差,以及王义文等^[13]基于视觉技术开发了检测调整系统,利用微位移装置将偏心光栅推向实际中心。偏心测量也被应用在一些设备旋转主轴中,隋艳丽等^[14]和王卫东等^[15]分别提出使用坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)和电涡流传感器来测量机床主轴的旋转偏心误差。刘忠夫等^[16]使用激光位移传感器测量安装在轮毂转轴上的探头位移来计算其跳动误差。Chen等^[17]和Huang等^[18]同样使用单个或多个激光位移传感器测量砂轮与旋转主轴的偏心误差。

综上,现有的偏心测量研究总结如下:1) 未建立偏心模型或模型未与测量及校正方法密切联系。2) CMM法与位移传感器的测量精度容易受到被测物体表面的形状误差的影响,测量方法是多点甚至全程式,过程复杂,耗时较长,误差源较多。光电自准直仪和多面镜的组合具有更高的测量精度,但安装要求和成本均较高,多适用于尺寸较大物体,而且这些传感器很难嵌入到系统中。3) 视觉图像处理技术具有检测精度高、速度快、成本低等优势,用于测量偏心是未来趋势,且易嵌入到系统中。

针对引线系统中线圈的旋转偏心问题,本文提出了一种基于偏心模型和显微视觉检测的偏心测量与校正方法。首先,分析了线圈产生偏心的来源,建立偏心模型并推导偏心规律。显微视觉系统及图像处理算法用于处理线圈的显微图像以确定模型参数并对偏差进行预测。基于系统硬件与补偿模型提出了一种粗精结合的校正方法。最后,通过实验获得模型的预测精度以及图像处理算法的检测精度并验证了校正方法的有效性。结果表明,该方法具有较高的测量精度与良好的补偿效果,能够有效地解决引线系统的旋转偏心问题,提高系统的操作精度。

1 系统组成及其旋转偏心

图1给出了空心杯线圈的结构及其生产为空心杯电机的流程,其主体由筒形绕组线圈、转轴、电极导线和焊盘组成,如图1(a)所示。线圈的外径 Φ_1 约为2.50 mm,整体高度 H 约为12.00 mm,电极导

线的外径 Φ_2 约为 0.05 mm, 其长度 L 约为 1.50 mm, 转轴的外径 Φ_3 约为 1.00 mm。线圈顶部通常包含 3 根电极导线和焊盘。线圈通常需要经过引线、焊接以及组装等一系列工艺处理, 如图 1(b) 所示, 最终生产出空心杯电机。

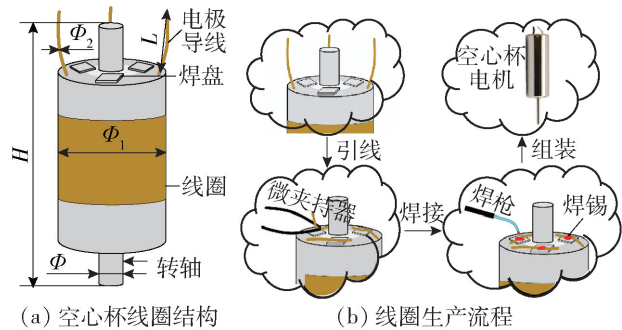


图1 空心杯线圈结构及其生产流程

Fig.1 Structure of hollow cup coil and its production

其中,线圈自动引线环节尤为重要,为整个生产流程中的核心。已经设计的自动引线微操作系统及其组件如图 2 所示。系统硬件主要由显微视觉系统、微夹持系统和运动控制系统等组成。五自由度运动控制系统用来调整线圈的位置与姿态。微夹持器是微夹持系统中的关键组件,其由微型气动手指驱动并在钳臂上集成三轴微调台装置实现钳尖在多维度的精密对准,夹持钳尖的整体尺寸 L 与 W 分别为 15.3 mm、15.0 mm, 尖端椭圆形包络区尺寸 l_1 与 l_2 分别为 0.20 mm、0.14 mm。显微视觉系统由 2 个互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 相机、显微镜头与光源组成,并在垂直以及水平 2 个维度上采集引线操作区的主要图像。整个系统在计算机与控制箱协调下实现自动引线功能。

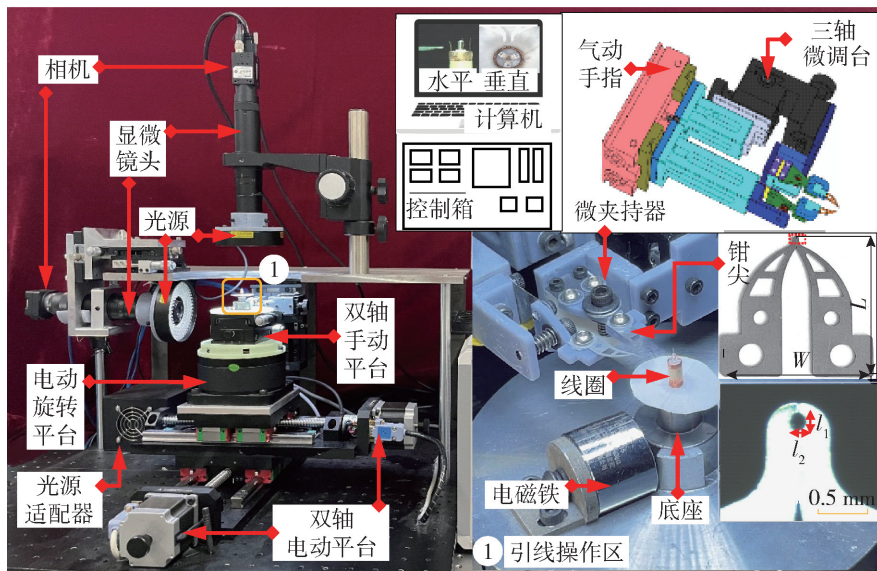


图2 自动引线微操作系统

Fig.2 Automatic wire-traction system

基于系统硬件,设计的自动引线策略如图 3 所示,主要包括检测阶段、捕获阶段、牵引阶段以及释放阶段。主要步骤可概括为:1) 特征点检测。使用特征位置以及夹持位置的特征点来描述微夹持器与导线在图像空间中的位置,目标导线旋转至捕获区内。2) 特征点捕获。微夹持器在 X 方向固定具有 2 个自由度,线圈在 z 方向固定具有 3 个自由度,视觉引导控制系统将目标导线移至钳尖包络区进而完成导线的捕获。3) 导线牵引。线圈移动并旋转,利用导线与钳尖的反作用力改变导线姿态达到引线目的。4) 导线释放。将导线牵引至焊盘指定位置可进行释放,线圈回到初始位置,等待下一根导线的检

测与牵引。上述为理想情况下的引线策略,由于导线尺寸,可捕获区域以及钳尖包络区均极小,系统对各组件的控制精度要求较高。

实际上,被放置的线圈中心很难与旋线台的中心重合,旋转时产生偏心现象。一是线圈固定底座的中心与旋转中心存在位置上的径向偏差,二是线圈中心线与旋转轴存在倾斜角所产生的倾斜偏差,这是由线圈底座的平面加工精度导致的。以上为系统中主要偏心来源,如图 4 所示。线圈在偏心状态下的运行轨迹近似圆形,实验测量发现线圈在旋转时与初始位置的偏差可达几十甚至几百微米,这会导致线圈在平面位置上产生波动,降低系统的控制

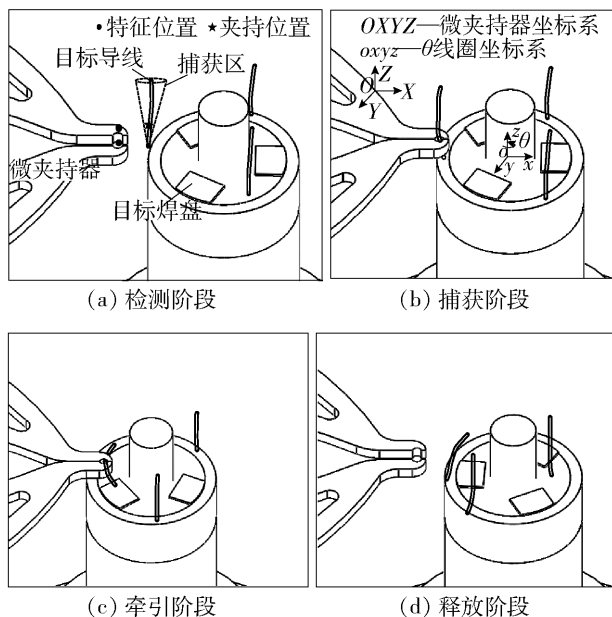


图3 自动引线策略

Fig. 3 Strategy of automatic wire-traction

精度,易造成引线失败甚至微夹持器损坏等情况,严重影响着引线系统的稳定性与可靠性。因此,测量与校正引线微操作系统中的偏心具有重要研究意义。

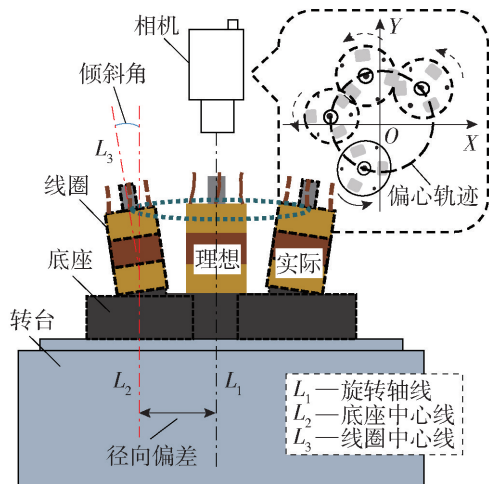


图4 系统旋转偏心来源分析

Fig. 4 Sources of rotational eccentricity

2 偏心模型的建立

前文从工程学角度分析了偏心的来源,偏心随着转台的旋转而产生周期性变化。因此,可从数学模型角度建立偏心模型,既能揭示偏心规律测量偏差,也能为补偿偏心提供思路。

2.1 径向偏心模型

在仅考虑径向偏差的前提下,建立的径向偏心模型如图5(a)所示。为了便于分析,建立如下坐标

系。在像素坐标系 UV 下,旋转台的实际旋转中心设为原点 O ,将 O 到旋转台的零点 A 的直线设置为 X 轴,将穿过点 O 垂直 X 轴的直线设为 Y 轴,建立 XOY 坐标系。线圈的几何投影中心 o 通常与旋转中心 O 不重合。 O 到 o 的矢量被定为偏心向量,其大小为偏心距 e ,初始方向为偏心角 α 。由围绕旋转中心旋转的偏心向量的末端形成的红色轨迹是线圈在径向偏心的下的偏心圆。

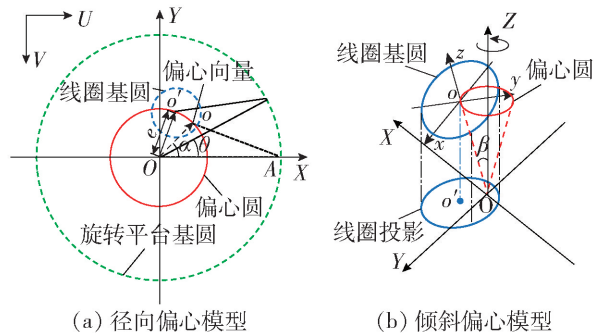


图5 偏心误差模型

Fig. 5 Eccentricity error models

当旋转台驱动线圈旋转时,线圈中心移动到下一个位置 o' 。 θ 是旋转台的实际旋转角度,设 δ_e 是 o' 相对于 o 的偏差向量,显然, $\delta_e = Oo' - Oo$,假设线圈几何中心 $o(x_0, y_0)$,线圈实际旋转中心 $O(u, v)$,有

$$\begin{cases} \delta_{ex} = e[\cos(\alpha + \theta) - \cos \alpha] \\ \delta_{ey} = e[\sin(\alpha + \theta) - \sin \alpha] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为线圈相对于初始位置的径向偏差 δ_e 分别在 X 和 Y 上的分量,即径向偏心模型。其中,线圈的初始偏心角 $\alpha = \arctan((v - y_0)/(x_0 - u))$;偏心距 e 与偏心圆半径相等,可由式 $(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2 = (x_0 - u)^2 + (y_0 - v)^2 = e^2$ 得到; (x_i, y_i) 为不同旋转角度下线圈中心坐标, $i = 1, 2, \dots$ 。因此,已知线圈初始位置与其旋转中心位置,可以获得偏心轨迹方程,反之,若已知偏心轨迹则可以求解出实际回转中心。这为之后的倾斜偏心模型的建立以及求解回转中心方法提供思路。然而,由于倾斜角总是存在的,不能直接计算出不考虑倾角的径向偏差。

2.2 倾斜偏心模型

在不考虑径向偏心的前提下,建立了线圈倾斜偏心模型,如图5(b)所示。旋转平台的空间坐标系为 $OXYZ$,线圈的空间坐标系统为 $oxyz$,线圈中心线的 z 轴穿过旋转坐标系的原点 O ,直线 Oo 与旋转 Z 轴的夹角 β 为线圈的倾角。线圈几何中心 o 与旋转坐标系原点 O 之间的距离为 l ,近似等于线圈的高

度。倾斜线圈基圆在 XOY 上的投影是一个中心为 o' 的蓝色虚线椭圆。 UV 坐标系下线圈倾斜偏心的分析与 2.1 类似。假设线圈投影中心 o' 的初始坐标为 (x_0, y_0) , 旋转中心 O 的坐标为 (u, v) , 同理可得

$$\begin{cases} \delta_{\beta X} = l \sin \beta [\cos(\alpha + \theta) - \cos \alpha] \\ \delta_{\beta Y} = l \sin \beta [\sin(\alpha + \theta) - \sin \alpha] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)为线圈相对于初始位置的倾斜偏差 δ_{β} 在 X 和 Y 上的分量, 即倾斜偏心模型。与式(1)不同, 倾斜偏差与参数 l 和 β 有关, 而这些量均可被实验标定, 因此, 当输入 (x_0, y_0) 与 (u, v) 时, 倾斜偏差可直接获得。

2.3 全局偏心模型

基于上述分析, 由线圈径向偏差 δ_e 与倾斜偏差 δ_{β} 随旋转角度 θ 呈周期性变化, 偏差可表示为旋转角度的相关函数。由于倾斜角 β 很小, 全局偏差 δ 近似等于径向偏差和倾斜偏差之和, 即

$$\delta \approx \delta_e + \delta_{\beta} \quad (3)$$

事实上, 因倾斜角始终存在, 不能直接求得径向偏差。与 2.1 分析过程类似, 全局偏差可以基于式(1)通过倾斜状态下线圈的初始位置直接计算得出。因此, 一开始便可获得全局偏差 δ 。如果标定出线圈倾角 β , 则可以通过式(2)获得倾斜偏差 δ_{β} 。最后, 根据式(3)可近似估计出在不考虑倾斜情况下的径向偏差 δ_e 。

3 图像特征提取算法与校正方法

为了测量线圈的偏心, 本文提出一种基于数学模型与视觉检测技术的测量方法, 其原理为: 通过 CMOS 相机获取线圈的显微图像, 利用图像处理技术对其进行特征提取, 拟合线圈边界外圆并提取中心; 将中心坐标传递给建立的偏心模型进而计算其旋转一周的偏差; 建立对应的补偿模型输入给运动控制系统, 可实现对偏心线圈的实时校正。

3.1 线圈中心提取算法

分析建立偏心模型的过程得出, 只要确定其中的模型参数, 便可求出整个旋转过程的偏心规律, 既可实现实时测量功能, 也可对偏差进行预测。首先, 需要确定的参数为线圈中心位置、线圈的实际回转中心以及线圈的倾斜角。针对线圈中心以及实际回转中心的求解, 本文提出了一种基于最小二乘法的圆提取算法。线圈倾斜角将在实验章节进行标定。设计的线圈中心提取算法主要包括: 对图像的预处理(步骤 1~4), 线圈的边缘检测(步骤 5), 以及外圆的拟合与中心提取(步骤 6), 具体步骤如下:

1) 显微图像的采集和滤波处理。采集的线圈彩色图像如图 6(a) 所示。图像滤波常被用来提高图像质量, 由于中值滤波可以在抑制噪声的同时有效地保护边缘且降低模糊程度, 因此本文使用中值滤波器对显微图像进行预处理, 如图 6(b) 所示。

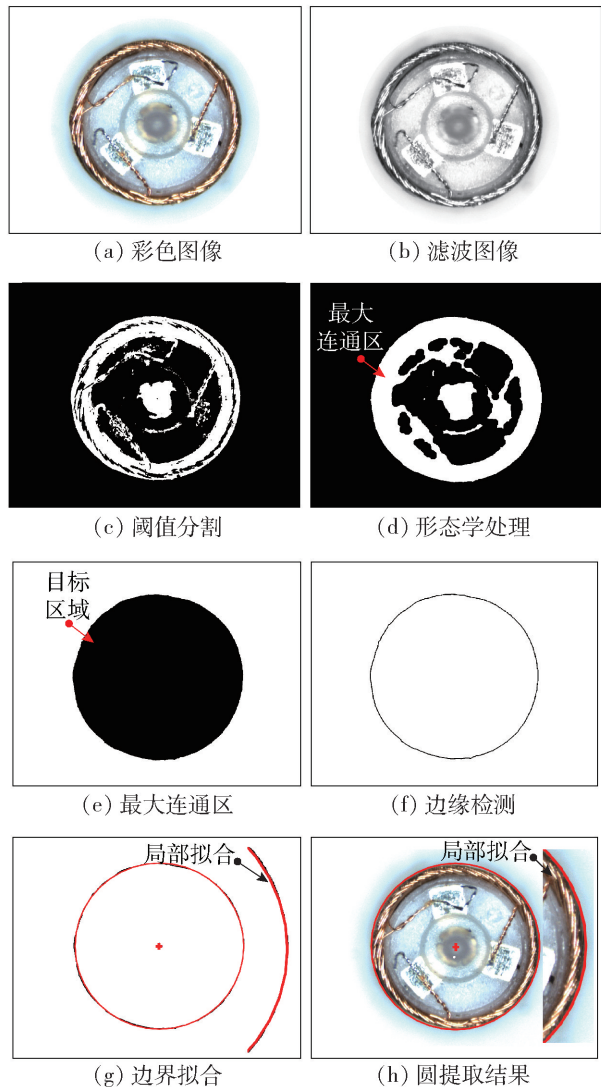


图6 图像处理算法流程

Fig. 6 Image processing algorithm

2) 显微图像分割。自适应阈值分割算法 (Otsu) 是用于图像分割的一种最大类间方差法^[19], 其类间方差是阈值的函数, 促使方差达到最大的阈值便是最佳分割阈值 T , 该方法可以自适应地确定阈值, 最大化目标和背景之间的方差值, 实现良好的分割效果, 基于 Otsu 的二值化处理结果如图 6(c) 所示。

3) 显微图像形态学处理。在经阈值分割后的二值图像中, 白色目标区域的边界处可能会存在微小孔洞, 为了填充这些微孔, 对图像进行形态学闭运

算处理,这样可以显著提高边界的平滑度,如图6(d)所示。

4) 提取显微图像中的最大连通区域。在初步处理之后,二值图像的白色目标区域中仍然存在较大的黑色干扰区域。为了消除这些干扰区域,将显微图像中所有像素的灰度值取反,然后提取图像中的最大连通区域,并将该区域之外的所有像素点的灰度值设置为0,此时,整个黑色连通区域成为新的目标区域,原干扰区域被消除,如图6(e)所示。

5) 目标区域的边缘检测。为了获得一系列重要的边缘点并便于拟合外圆提取圆心的图像坐标,本文选择在噪声抑制和边缘定位精度方面更具优势的Canny算子进行显微图像的边缘检测。拟合的边界如图6(f)所示。

6) 线圈外圆的拟合与中心提取。圆特征提取的精度对线圈偏差的计算结果有很大的影响。与其他算法相比,最小二乘法拟合圆只需循环一次边缘点即可获得圆参数,具有时间复杂度低、计算速度快、精度和鲁棒性高等优点^[20]。因此,本文选择最小二乘法来提取圆特征并计算线圈中心的图像坐标。详细原理如下。

设线圈外圆的方程为

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (4)$$

式中: r 为圆的半径; (a, b) 为圆心。

其残差为

$$\delta_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \quad (5)$$

式中: δ_i 为残差; i 是边缘点的索引号; (x_i, y_i) 为边缘点的像素坐标。

$$\begin{cases} a = \frac{(\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2y} + \overline{y^2y} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ b = \frac{(\overline{x^2y} + \overline{y^2y} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\overline{xa} + b^2 - 2\overline{yb} + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)可以求出线圈外圆的圆心与半径,将其绘制在图像中,如图6(g)和(h)所示,其分别展示了线圈显微图像的边缘轮廓拟合和圆特征提取的结果。其中,局部区域放大显示所求外圆与线圈的实际外圆高度拟合。以上是线圈圆心的提取算法流程。如果输入偏心线圈的显微图像序列,则可以提取出一系列图像的中心坐标。若图像序列足够多,根据步骤6这一系列点仍然可以拟合成一个圆,

圆拟合的残差平方和函数 Q 为

$$Q = \sum_{i=1}^{\text{num}} \delta_i^2 = \sum_{i=1}^{\text{num}} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (6)$$

式中: Q 为残差平方和函数; num 为边缘点数量。

根据最小二乘法原理, Q 分别对 a, b, r 求偏导,并且偏导数等于0,经过计算得到

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = -4 \sum_{i=1}^{\text{num}} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = -4 \sum_{i=1}^{\text{num}} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](y_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = -4 \sum_{i=1}^{\text{num}} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)整理得

$$\begin{cases} a^2 - 2\overline{xa} + b^2 - 2\overline{yb} - r^2 + \overline{x^2} + \overline{y^2} = 0 \\ \overline{xa^2} - 2\overline{x^2a} + \overline{xb^2} - 2\overline{xyb} - \overline{xr^2} + \overline{x^3} + \overline{xy^2} = 0 \\ \overline{ya^2} - 2\overline{xya} + \overline{yb^2} - 2\overline{y^2b} - \overline{yr^2} + \overline{x^2y} + \overline{y^3} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$\overline{x^m y^n} = \frac{1}{\text{num}} \sum_{i=1}^{\text{num}} x_i^m y_i^n \quad (9)$$

针对式(8),消去二项式可得

$$\begin{cases} (\overline{x^2} - \overline{x^2})a + (\overline{xy} - \overline{xy})b = (\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})/2 \\ (\overline{xy} - \overline{xy})a + (\overline{y^2} - \overline{y^2})b = (\overline{x^2y} + \overline{y^2y} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})/2 \end{cases} \quad (10)$$

最终得到拟合圆方程参数 a, b, r 的表达式:

该圆的圆心便是线圈的实际回转中心。因此,通过该方法既可确定线圈中心,亦可拟合求解出实际回转中心。

3.2 粗精结合的校正方法

根据偏心来源的分析,两者都是系统级偏差,通过合理的校正方法可以减小。径向偏差占比较大,倾斜的占比较小。这两部分可单独补偿,以确保线圈最终在初始位置附近只产生微幅的波动。因此,

本文提出一种粗精结合的偏差校正方法。该方法依靠补偿模型和五轴运动控制系统(图2所示)来补偿偏心,实现基于硬件和算法的校正方式,其校正流程如图7所示。

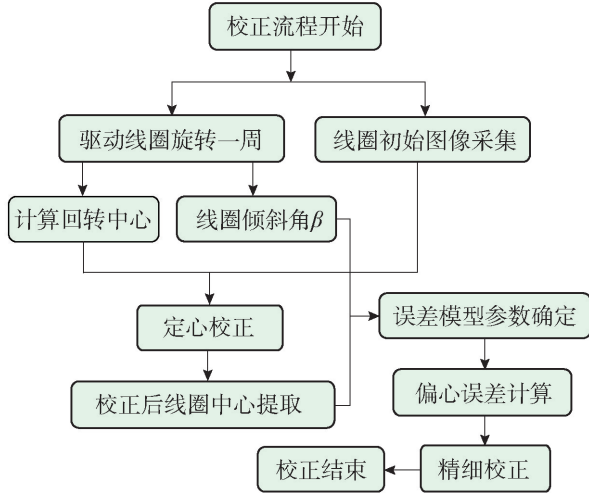


图7 粗精结合误差校正流程

Fig.7 Error correction based on coarse-precise combination

1) 确定模型参数计算偏差。在校正之前,使用圆心提取算法提取出偏心线圈的中心 (x_0, y_0) ,在获得一系列的圆心点 (x_i, y_i) 之后计算其实际回转中心 (u, v) ,同时,线圈的倾斜角也可被测定。在确定参数后,输入偏心模型,得出线圈的偏差。

2) 定心校正。依据径向偏差,可以计算线圈中心与实际回转中心的偏差。由千分尺驱动的两轴精密位移台(M1、M2)可用于对线圈进行定心补偿。线圈的中心被调整至与旋转中心几乎重合的位置。此时,线圈的全局偏心大幅减小。其中,M1、M2的补偿模型(CM)分别为

$$\begin{cases} \text{CM}_{M1} = \lambda \sqrt{(y_0 - v)^2 + (x_0 - u)^2} \cdot \\ \quad \cos(\arctan((y_0 - v)/(x_0 - u))) \\ \text{CM}_{M2} = \lambda \sqrt{(y_0 - v)^2 + (x_0 - u)^2} \cdot \\ \quad \sin(\arctan((y_0 - v)/(x_0 - u))) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda = 2.3 \mu\text{m}/\text{像素}$ 表示相机物像空间的转换系数。控制电动位移台移动固定距离,通过标定固定在位移台上的棋盘格在图像中的位移差可得出该系数。

3) 精密校正。经过定心校正后,线圈的径向偏差几乎很小,余下的以倾斜偏差为主的残余误差仍然影响着引线的正常运行。而理想的引线环境是线圈在指定位置无偏心地旋转或者位置波动极小。因

此,精密校正过程是使用精度更高、细分度更多的两轴电控位移台(E1、E2)来实时控制偏心线圈移至初始位置,以此补偿线圈的倾斜偏差。根据倾斜偏心模型建立的补偿模型为

$$\begin{cases} \text{CM}_{E1} = \lambda \delta_{\beta X} \\ \text{CM}_{E2} = \lambda \delta_{\beta Y} \end{cases} \quad (13)$$

式中: CM_{E1} 与 CM_{E2} 分别表示电控位移台X与Y轴的输入位移,整个校正流程在引线完成后结束。

4 实验

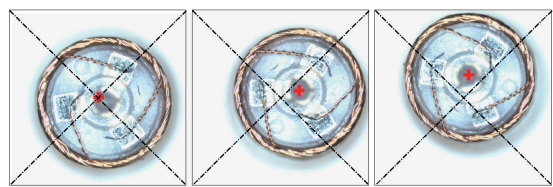
在本章中,主要进行偏心模型预测精度分析和偏差补偿效果实验,以及将提出的方法运用到引线流程中进一步验证其性能。图2为引线系统的实物图,在该系统中,五轴运动控制系统由双轴手动平台LY50-LM、双轴电动平台A032和电动旋转平台HWDD-WZ-65-112组成。带有千分尺的手动平台的控制精度为0.01 mm。电动平台的分辨率为0.000 625 mm,重复定位精度为0.002 mm,最大工作速度为25 mm/s。旋转台的分辨率为0.001°,重复定位精度为 $\pm 0.04^\circ$ 。系统中使用的相机分辨率为 2448×2048 像素,光学放大率为1.5 \times 。

4.1 偏差测量精度与校正效果

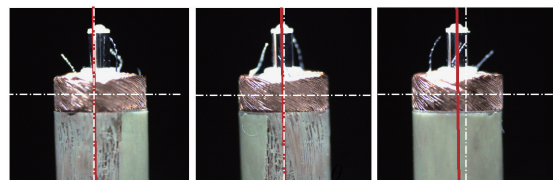
为了分析误差模型的精度并验证补偿方法的有效性,随机选择5个质量良好的线圈作为实验样品。根据图7所示的校正流程,首先需要标定模型参数,包括实际回转中心与线圈倾斜角。样本线圈均旋转一周,2个相机分别从初始位置开始每隔5°采集一张显微图像,图8分别展示垂直相机与水平相机采集的部分图像, θ 为旋转台的实际旋转角度,可见偏心现象较为明显,线圈也有微幅的倾角。

使用图6介绍的图像处理流程提取线圈垂直序列图像的中心坐标,拟合离散点轨迹并计算出实际旋转中心。图9展示了一个样本线圈的初始偏心轨迹,可见,初始偏心轨迹近似圆形,拟合度较高,圆心近似为实际回转中心也较为合理。

均方根误差(RMSE)能够直接反映测量值与真实值之间的残差,可用于评估数据的拟合精度以及模型的预测精度^[21]。表1给出了5个样本线圈偏心序列的中心点与拟合圆之间的RMSE评价结果,平均误差值为0.422 2,转换为物空间尺寸约为0.971 1 μm ,具有较高的拟合精度,因此,所求得的实际回转中心具有较高的可靠性。



(a) 部分垂直图像



(b) 部分水平图像

图8 部分线圈采集图像

Fig. 8 Partial collected coil image

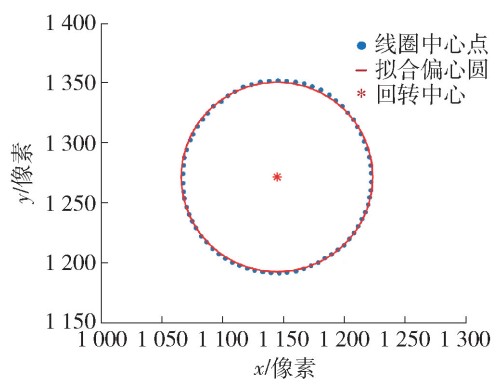


图9 偏心轨迹拟合

Fig. 9 Eccentric trajectory fitting

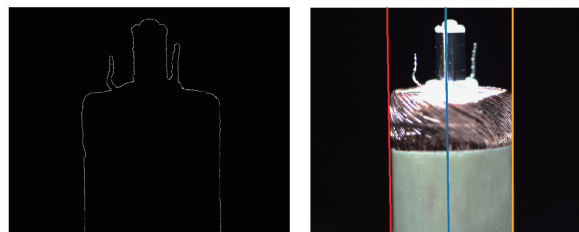
表1 偏心圆拟合的 RMSE 评价

Table 1 Eccentric circle fitting by RMSE

编号	1	2	3	4	5
RMSE	0.188 8	0.353 4	1.013 8	0.223 0	0.332 0

同时,为测定线圈倾斜角,提出了一种基于图像边界的角度检测算法。图10(a)是水平样本线圈图像经过预处理后的边缘检测结果。图10(b)是显微图像边缘的直线提取结果。其中,霍夫变换算法被用于检测显微图像中的直线区域,分别检测线圈外圈的两侧和线圈中心柱的两侧边界并拟合出4条直线。根据直线方程计算出斜率和倾角,取其平均值作为线圈在当前图像中的倾斜角。线圈在倾斜状态下旋转一周,利用上述方法计算出一系列的倾斜角,取最大值近似作为线圈倾斜角。最终,模型参数结果如表2所示,线圈的实际旋转中心和倾角近似定值,这是因为整个运动控制系统的零点位置恒定,以及使用相同的基座固定不同线圈。在像素坐标系

下,线圈的平均回转中心为(1 144.84,1 268.34),线圈的平均倾角为0.197°。



(a) 水平图像边缘检测

(b) 直线提取结果

图10 线圈直线提取算法流程

Fig. 10 Line extraction algorithm for coil

表2 模型参数标定结果

Table 2 Calibration of eccentricity parameters

编号	回转中心/像素	倾斜角/(°)
1	(1 144.51,1 267.90)	0.194
2	(1 144.92,1 267.65)	0.198
3	(1 145.28,1 271.27)	0.203
4	(1 145.02,1 266.99)	0.199
5	(1 144.46,1 267.90)	0.190
平均	(1 144.84,1 268.34)	0.197

在标定出模型参数的基础上,采用图7的校正方法对偏差进行补偿。实验中,相同的线圈样本初始中心坐标被提取并输入全局偏心模型计算出初始偏差。同时,提取出每间隔5°采集的图像序列中心坐标用来与模型预测结果形成对比。

图11(a)分别展示了样本线圈在X和Y方向上全局模型预测结果与全程视觉检测结果的对比。同样,图11(b)给出在进行定心校正后倾斜模型预测结果与实际测量结果的对比。基于模型的预测与实际测量结果具有较高的拟合度。

定量来看,表3计算了图11(a)和(b)中偏心模型预测与实际测量之间残余误差的RMSE。可以看出,全局偏心模型的平均RMSE为1.0300,倾斜偏心模型的为0.5278。分别转换成物空间的偏差为2.3690、1.2139 μm。显然,所提出的偏心模型在偏差测量中提供了较高精度的预测性能。因此,基于单点的偏心模型预测法可以用来代替全程的视觉检测法。

此外,图11(a)展示了线圈最大偏差为100~140像素。图11(b)中进行定心校正的最大偏差降低至约20个像素。根据前文分析,残余误差几乎是倾斜偏差,可以通过提出的精细校正法来补偿。

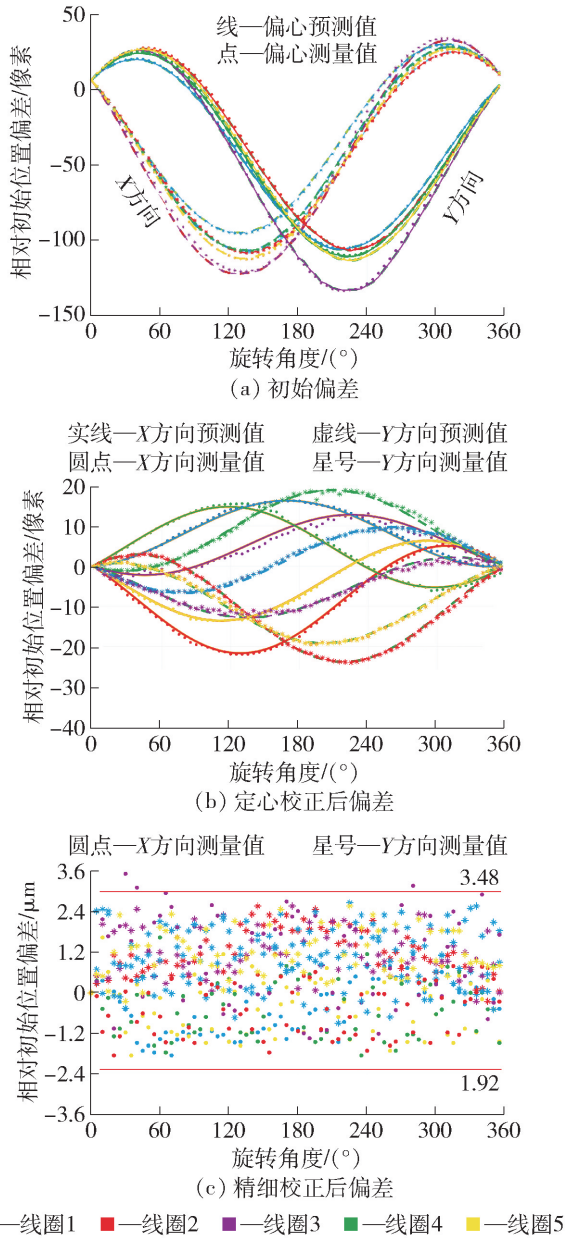


图 11 线圈偏心曲线

Fig. 11 Curve of coil's eccentricity

表 3 模型预测与实际测量的 RMSE 评价

Table 3 Evaluation of residual error by RMSE

编号	全局模型		倾斜模型	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1	0.749 0	0.856 5	0.383 3	0.381 3
2	0.954 1	1.113 5	0.481 9	0.369 3
3	1.470 8	1.756 2	0.906 9	0.788 7
4	0.731 4	1.233 8	0.613 6	0.622 6
5	0.664 8	0.769 2	0.332 2	0.398 1
平均	1.030 0	0.527 8		

图 11(c) 给出精细校正后线圈相对初始位置的偏差, 偏差范围为 $[-1.92, 3.48] \mu\text{m}$, 最终, 线圈在初始位置附近呈现分散式的微幅波动, 2 次校正后的最大偏差小于 $4 \mu\text{m}$ 。图 12 给出了一个样本线圈在校正前后的偏差曲线, 可以直观看出偏差大幅降低, 并计算出 5 个线圈的平均补偿幅度约为 98.6%, 初步验证所提偏差校正方法的有效性。

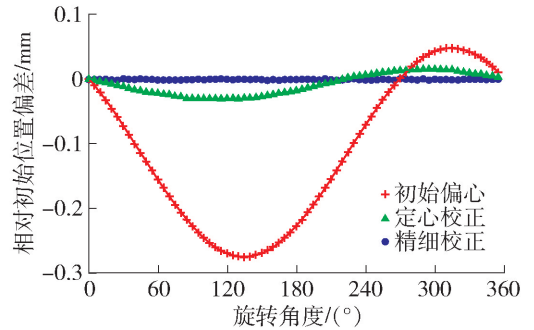


图 12 校正前后线圈偏差曲线对比

Fig. 12 Comparison of bias curve

另外, 模型参数的求解基于圆心提取算法, 提取算法的精度对模型预测结果有着较大的影响, 圆心提取算法中的核心部分为线圈的边缘点检测及拟合过程。因此, 继续进行实验以得到边缘点拟合的精度作为圆心提取算法的精度。样本线圈的边缘点提取及拟合情况如图 6(g) 所示, 其 3 620 个边缘检测点与拟合点的偏差情况如图 13 所示, 总体残差在 ± 3 像素之间。表 4 计算了 5 个样本线圈的拟合残差的 RMSE, 均值为 3.264 0, 转换为物空间尺寸约为 $7.507 2 \mu\text{m}$, 该值可近似作为圆心提取算法的精度。与之前获得的模型预测精度相比, 该值较大, 说明圆心提取算法对于偏差测量的精度影响较大。因此, 线圈图像的预处理以及边缘检测算子尤为重要, 可通过提升图像处理算法性能进一步提升测量精度。

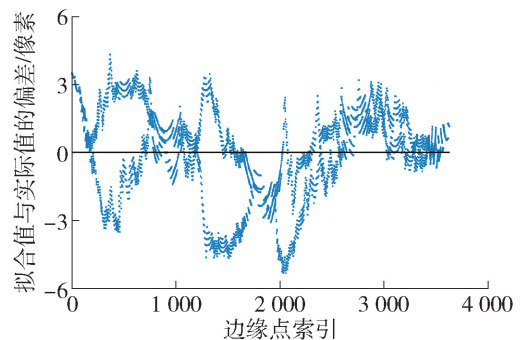


图 13 边缘检测点的拟合误差

Fig. 13 Fitting error of edge detection points

表4 圆心提取算法精度的 RMSE 评价

Table 4 Accuracy of circle extraction by RMSE

编号	1	2	3	4	5
RMSE	3.235 5	3.209 8	3.191 8	3.192 5	3.192 5

4.2 引线实验

为了进一步评估所提偏心补偿方法的性能,继续进行引线实验,将对于线圈的偏心测量以及校正过程嵌入于自动引线流程中。图3展示的自动引线策略中,前2步为特征点检测与导线的捕获,这也是引线中的核心步骤。夹持钳尖的包络区较小,成功捕获导线是引线的前提条件。因此,同样的5个预处理良好的线圈继续被用来进行引线实验。

图14展示了其中一个样本线圈的3根导线分别在偏心校正前后的特征点检测情况。图中红色十

字标为夹持钳尖的特征点,该点位置固定;红色三角是导线检测结果,定义为导线捕获点,其与钳尖特征点在同一水平线上;蓝色矩形框为定义的导线捕获区,其宽度指标较为重要,为夹持钳尖包络区的最大宽度,约为0.2 mm。为提升引线系统效率,钳尖特征点与导线捕获区的距离被定量。当导线捕获点处于捕获区内,钳尖可完成对导线的顺利捕获,否则捕获失败,影响后续引线流程。图14(a)偏心情况下,导线捕获点的位置存在较大幅度的波动,未能处于捕获区,因此后续捕获过程必将失败。偏心校正后的场景如图14(b)所示,3根导线捕获点均处于捕获区内,钳尖对导线的捕获必将顺利。图15展示了其中一个样本线圈的完整引线流程,电极导线被牵引释放至对应焊盘,偏心补偿方法较为成功,3根导线引线顺利,系统表现出具有较高的稳定性与可靠性。

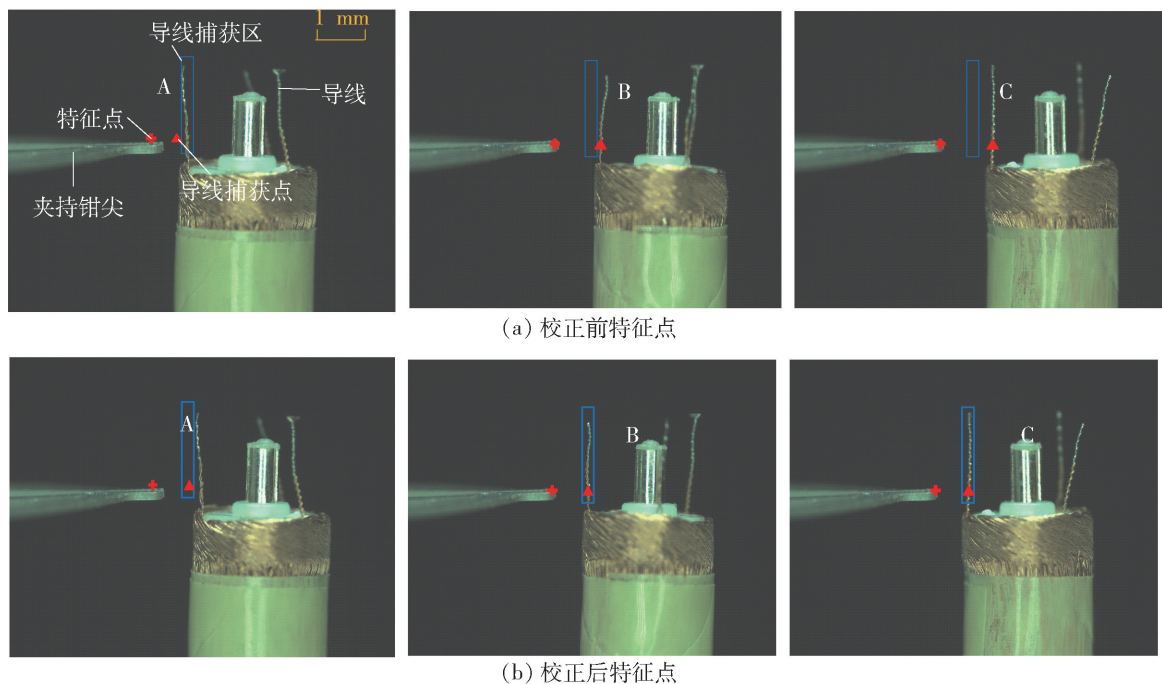


图14 样本线圈3根导线的检测情况

Fig. 14 Detection of the sample coil's three wires

该偏心测量与校正方法具有以下优势:1) 单点式输入模型预测法相较于传感器的全程式或多点式测量耗时较少;2) 该方法是一种高精度的、实时在线的测量方法;3) 不需要增加额外的高精度检测设备,并且测量与校正流程和系统均是嵌入式的。

4.3 讨论

线圈偏心发生在其旋转过程中,电极导线经检测后需旋转返还至捕获区等待夹持钳尖对其进行捕获与夹持,进而实现后续引线过程。捕获区的尺寸

由钳尖包络区及钳尖最大张合量决定,并设定为直径约0.2 mm的圆柱形区域。为确保钳尖能够精确地捕获导线,导线应位于靠近捕获区中心位置,与其中心线的距离不超过0.1 mm,这被看作是引线对于线圈电极导线要求的最大偏差值。测试实验得出线圈在偏心补偿后与初始位置的偏差不得超过 $4\ \mu\text{m}$ 并完整地处于捕获区内,因此,线圈补偿后的偏差能够满足引线微操作的要求。此外,偏差的补偿基于多轴运动控制系统,基于手动位移台的定心校正具有

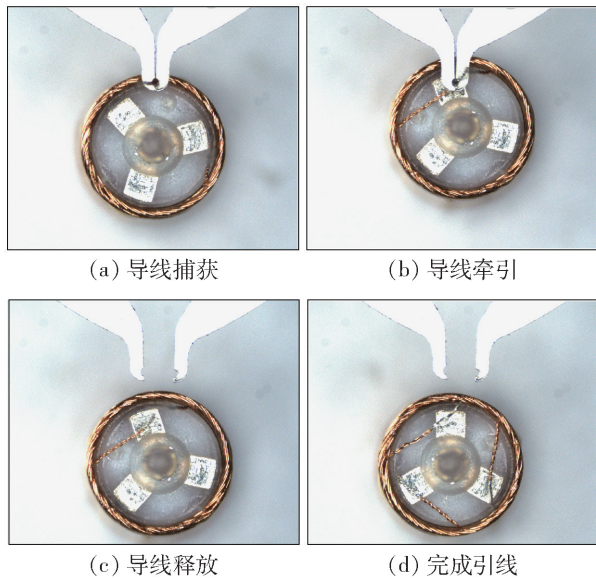


图15 样本线圈引线流程

Fig. 15 Wire-traction of the sample coil

相对较低的调节精度,其作为粗调节手段实现线圈与旋转台的共心调整过程,该过程具有一定的调整误差与不确定性。于是,基于高分辨率、高控制精度的电动位移台在定心校正基础上继续进行线圈的偏差补偿,以实现精密的、实时的、在线的校正,使线圈能够达到较高的补偿精度。可见,运动系统的精度直接影响着线圈补偿后的偏差,采用更高精度的位移台能够实现更高的补偿精度,但会增加系统的成本。然而,本文使用的电动位移台的重复定位精度可达 0.002 mm ,线圈补偿后的偏心误差也远小于引线过程中对于线圈的偏差要求。

5 结论

本文针对自动引线微操作系统中的旋转偏心问题提出了一种基于偏心模型和视觉检测的偏心测量方法,以及硬件和算法相结合的校正方法。这项工作结论如下:

1) 自动引线系统中,线圈的旋转偏心对引线有较大影响,测量并校正偏心尤为重要。现有的一些方法难以应用于微操作和微装配等显微环境中。

2) 通过显微视觉系统引导五自由度精密运动系统补偿偏心线圈,可以显著提升系统的控制精度,满足引线要求。

3) 本文建立的偏心模型对实际偏差有良好的预测效果。2次校正后,线圈偏心的残余误差不超过 $4\text{ }\mu\text{m}$,且校正前后的平均补偿幅度约为 98.6% 。

4) 引线实验展现了偏心测量与校正方法运用

在自动引线流程中具有优良的效果,可提升系统的稳定性与可靠性。

尽管设计的方法表现出良好的性能,但仍存在不足之处:该方法可以将偏心误差减小到 $4\text{ }\mu\text{m}$,但残余误差仍然存在;显微视觉技术用于提取线圈图像的特征并标定模型参数,算法的性能直接影响着测量精度;未能使用更高精度的测量设备与本文测量结果形成对比。

参考文献:

- [1] WASON J D, WEN J T, GORMAN J J, et al. Automated multiprobe microassembly using vision feedback[J]. IEEE Trans Robot, 2012, 28: 1090-1103.
- [2] FABIAN R, TYSON C, TUMA P L, et al. A horizontal magnetic tweezers and its use for studying single DNA molecules[J]. Micromachines, 2018, 9(4): 188.
- [3] XU X, ZHOU K K, ZOU N N, et al. Hierarchical control of ride height system for electronically controlled air suspension based on variable structure and fuzzy control theory[J]. Chin J Mech Eng, 2015, 28: 945-953.
- [4] 刘凯,何功汉,席文明. 显微视觉控制的微型机电转子引线自动化焊接[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1463-1467.
- LIU K, HE G H, XI W M. Automated welding for lead wires of micro-motor rotor based on microscopic vision [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1463-1467. (in Chinese)
- [5] WANG Y Z, LONG C, SUN Y D. System design based on microscopic vision with stereo light microscope for gripping microscopic objects [C] // Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1052-1057.
- [6] WANG Y, CHEN J, QU D. Design, analysis and experimental investigations of a double-arm based micro-gripper for thin and flexible metal wires manipulation [J]. Micromachines (Basel), 2022, 13(6): 925.
- [7] YU Y, DAI L, CHEN M S, et al. Calibration, compensation and accuracy analysis of circular grating used in single gimbal control moment gyroscope [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(5): E1458.
- [8] CHEN G. Improving the angle measurement accuracy of circular grating [J]. Rev Sci Instrum, 2020, 91(6): 065108.
- [9] LOU Z F, HAO X P, CAI Y D, et al. An embedded sensor system for real-time detecting 5-DOF error motions of rotary stages [J]. Sensors (Basel), 2019, 19(13): E2855.

- [10] LOU Z F, LIU L, ZHANG J Y, et al. A self-calibration method for rotary tables' five degrees-of-freedom error motions [J]. *Measurement*, 2021, 174: 109067.
- [11] DU Y, YUAN F, JIANG Z, et al. Strategy to decrease the angle measurement error introduced by the use of circular grating in dynamic torque calibration [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(22): 7599.
- [12] JIA H K, YU L D, ZHAO H N. A new method of angle measurement error analysis of rotary encoders [J]. *Applied Sciences*, 2017, 9(16): 3415.
- [13] 王义文, 周志龙, 王斐, 等. 编码器用圆光栅调整系统偏心位置计算方法 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2017, 22(4): 122-128.
WANG Y W, ZHOU Z L, WANG F, et al. Calculation method of the eccentric position of the circular grating for encoder adjustment system [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2017, 22(4): 122-128. (in Chinese)
- [14] 隋艳丽, 李明, 张美华, 等. 电机转子出轴偏心量的检测分析 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2005(8): 45-47.
SUI Y L, LI M, ZHANG M H, et al. Measurement and analysis of the offset about axial fan-out of motor rotor [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2005(8): 45-47. (in Chinese)
- [15] 王卫东, 翟超, 王翔, 等. 基于虚拟仪器的主轴回转精度测量系统 [J]. *计量技术*, 2005(3): 21-25.
WANG W D, ZHAI C, WANG X, et al. Spindle rotation precision measurement system based on virtual instrument [J]. *Metrology Science and Technology*, 2005(3): 21-25. (in Chinese)
- [16] 刘忠夫, 王振宏. 回转主轴垂直度及安装偏心对轮毂跳动检测的影响分析 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(2): 35-38.
LIU Z F, WANG Z H. Analysis on effect of rotary axis perpendicular and installation eccentric to the wheel hub runout detection [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(2): 35-38. (in Chinese)
- [17] CHEN S P, WANG Z Z, YU H, et al. Research on automatic compensation technology for eccentricity of grinding wheel [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(8): 1201-1209.
- [18] HUANG X, WANG Z, SHEN B, et al. Research on self-aligning flanges based on piezoelectric actuators applied to precision grinding machines [J]. *Micromachines*, 2021, 12(11): 1393.
- [19] TA Y G, SHAFRIZA N B, HANIZA Y, et al. Performance analysis of image thresholding: Otsu technique [J]. *Measurement*, 2018, 114: 298-307.
- [20] 吴泽楷, 李恭强, 王文涛, 等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 346-350.
WU Z K, LI G Q, WANG W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 346-350. (in Chinese)
- [21] LEE I H, MAHMOOD M T, CHOI T S. Robust focus measure operator using adaptive log-polar mapping for three-dimensional shape recovery [J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, 21(2): 442-458.

(责任编辑 张 蕾)