

基于立体视觉的齿轮轴系装配误差测量方法

陈勳昊¹ 王卓^{2,3} 张鹏^{2,3} 张旭¹ 丁晓宇¹

(1 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

(2 内蒙古第一机械集团有限公司, 内蒙古 包头 014030)

(3 特种车辆及其传动系统智能制造国家重点实验室, 内蒙古 包头 014030)

摘要 为解决工程中齿轮轴系装配误差的测量难题,提出了一种基于立体视觉的齿轮轴系装配误差测量方法。该方法以布置在待测特征上的圆形标记点为媒介,通过三维重建与数学拟合,获取相应特征的空间位姿,进而计算装配误差。以某锥齿轮箱为对象,给出了所提方法的完整技术流程,并系统研究了状态数量和靶标盘安装角度对拟合精度的影响。开发了完整的软硬件系统,通过实验,验证了测量方法的有效性与高效性。

关键词 齿轮轴系 立体视觉 装配误差 位姿拟合

Assembly Error Measurement Method of Gear Shafting based on Stereo Vision

Chen Menghao¹ Wang Zhuo^{2,3} Zhang Peng^{2,3} Zhang Xu¹ Ding Xiaoyu¹

(1 School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Inner Mongolia First Machinery Group Corporation, Baotou 014030, China)

(3 State Key Laboratory of Smart Manufacturing for Special Vehicles and Transmission System, Baotou 014030, China)

Abstract In order to solve the problem of measuring the assembly error of gear shafting in engineering, a method of measuring the assembly error of gear shafting based on stereo vision is proposed. In this method, the circular mark points arranged on the feature to be measured are used as the medium to obtain the spatial pose of the corresponding features through 3D reconstruction and mathematical fitting, and then the assembly error is calculated. Taking a bevel gearbox as an example, the complete technical process of the proposed method is given, and the influence of the number of States and the installation angle of the target plate on the fitting accuracy is systematically studied. A complete hardware and software system is developed, and the effectiveness and efficiency of the measurement method are verified by experiments.

Key words Gear shafting Stereo vision Assembly error Pose fitting

0 引言

对许多机械产品而言,传动装置是保证其运动性能及稳定性的核心组件^[1]。在车辆、船舶、工程机械等工业产品中,齿轮传动是最常见的传动形式^[2],其啮合状态对于产品的性能与可靠性起着至关重要的作用。

齿轮啮合质量受到设计、加工和装配3个阶段因素的综合影响。对于设计阶段,国内外学者已经做了很多研究,主要包括齿轮零件^[3-4]及装配体^[5-6]的分析与优化。对于加工阶段,随着机械加工技术的持续发展^[7-9]以及齿面修型技术的应用^[10],目前的齿轮加工精度已经达到一个较高的水平。然而,在装配

阶段,齿轮副装配精度对齿轮啮合质量的影响却通常被忽视,这导致某些情况下实际生产的齿轮啮合质量有较大波动。比如,对于生产批量小、精度要求高的齿轮副而言,其装配主要由人工完成,装配质量主要凭借技师的经验来控制^[11],往往导致啮合质量的稳定性难以保障。另外,目前人们对齿轮副装配精度的控制主要体现在齿轮安装距上^[12-13],即齿轮在轴上的位置,而对齿轮轴系的装配精度考虑较少。实际上,由于轴系安装时存在较多过盈或过渡配合,需要一些敲击、修磨、试配等操作^[14],往往会引起较大的装配误差。因此,控制轴系的装配精度,对于保障最终齿轮的啮合质量也是十分重要的。

在齿轮轴系的装配过程中,要想对其装配精度进行控制,首先要检测出其实际的装配误差。目前,对于轴系装配误差的测量主要采用三坐标测量技术^[15-16],由于齿轮轴系结构的复杂性与紧凑性,该测量过程复杂且耗时。虽然也有一些研究采用了光电自准、激光干涉等非接触测量手段^[17-19],但这些方法局限性大,技术要求和成本都较高,难以运用于实际生产中。

除了上述方法外,立体视觉技术凭借其非接触、操作简便、反馈迅速、适应性及互换性强等一系列特点,在工业测量领域应用广泛^[20]。目前已有一些学者将立体视觉技术应用到齿轮相关的测量中,但主要集中于齿轮零件形貌的测量^[21-22],缺乏对轴系零件间装配关系的研究。同时,目前以视觉技术对轴类零件进行测量的研究大多是直接根据轴体轮廓展开的^[23-24],由此获得的是轴体零件的实际中心线,而齿轮的回转轴线是由转动形成的空间虚拟轴线,将两者等同会存在一定偏差。

针对目前工业生产中齿轮轴系装配误差的测量难题,本文中引入双目立体视觉技术,提出了一种简便、精确、高效、普适的齿轮轴系装配误差测量方法。该方法通过对标记点进行三维重建和拟合,间接获得齿轮回转轴线以及相关基准的空间位姿,进而计算装配误差。其中,对于难以测量的回转轴线特征,设计了安装于轴端的靶标盘作为参考平面,并提供了相应的回转轴线特征拟合算法。本文中以某锥齿轮箱为对象,选取典型特征及相关尺寸为测量目标,给出了所提测量方法的技术流程,并且针对流程中影响测量精度的关键因素,展开了具体分析 with 优化。最后,搭建了基于双目立体视觉技术的软硬件测量系统,验证了所提测量方法的准确性。

1 测量对象与目标尺寸

本文中选取的对象为某锥齿轮转向箱,实物如图1所示。

该齿轮箱的两根齿轮轴成正交分布,如图2所示。要保障齿轮轴系的装配精度,既要保证两轴之间垂直且共面,又要保证轴与箱体间的形位尺寸满足要求。为此,待测特征除了两个齿轮回转轴外,还应该包括齿轮箱上的基准平面。本文中以箱盖安装面作为基准平面,如图3所示。

针对图3中的3个待测特征,选取了如图4所示

的4个形位尺寸(d_1 , α_1 , d_2 , α_2)作为最终的测量目标尺寸。



图1 某锥齿轮转向箱

Fig. 1 A bevel gear steering box

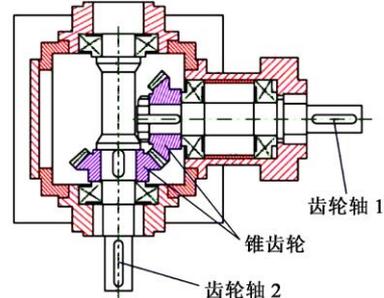


图2 齿轮箱俯视剖视图

Fig. 2 Top sectional view of gear box

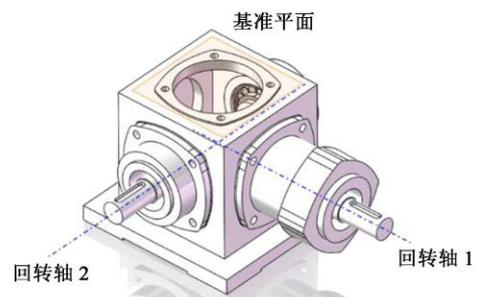


图3 待测特征示意图

Fig. 3 Schematic diagram of characteristics to be measured

图4中, O_1O_2 为两回转轴的公垂线; d_1 为两轴距离; α_1 为两轴夹角; d_2 为回转轴1上 O_1 点到基准平面的距离; α_2 为回转轴1与基准平面法向的夹角。这些参数的设计要求如表1所示。

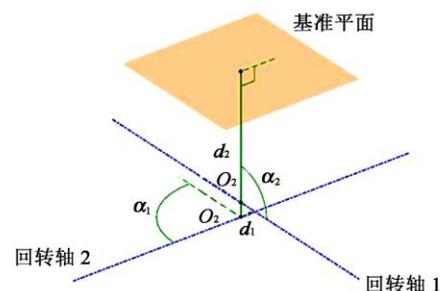


图4 测量目标尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement target size

表 1 目标尺寸的设计要求

Tab. 1 Design requirements of target size

目标尺寸	d_1/mm	α_1	d_2/mm	α_2
理论值	0	90°	70	90°
公差	±0.02	±10′	±0.1	±30′

2 测量方法原理

测量时，以布置在特征上的圆形标记点为测量媒介，通过立体视觉获得标记点的三维坐标，进一步拟合获得相应特征的空间位姿。主要涉及的方法原理包括基于双目立体视觉的三维重建以及平面与轴线特征的数学拟合。

对单个相机而言，空间某一点在图像中的像素坐标 (u, v) 与其在世界坐标系中的三维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 满足以下关系：

$$(u, v) = f_d(u', v') \quad (1)$$

$$s \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = K_{3 \times 4} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， f_d 为畸变函数，其形式及参数与所选的畸变模型有关； (u', v') 为图像去畸变后的理想像素坐标； s 为未知的尺寸因子； K 为相机内参矩阵，包含相机焦距、像元尺寸、中心偏移等固有参数； R 和 T 分别为相机相对世界坐标系的旋转矩阵和平移向量，构成相机外参矩阵。

式(1)和式(2)即构成立体视觉中核心的坐标转换模型。当相机架设完毕且不再进行调整移动时，模型中的内外参矩阵和畸变参数都可以通过标定获得。

基于双目立体视觉的三维重建过程，就是将待测标记点在两相机图像中的像素坐标代入转换模型，进而求解出待测标记点在世界坐标系中三维坐标的过程。在得到标记点坐标后，可以进一步获得对应特征(主要包括平面特征和回转轴线特征)的位姿参数，而这涉及多个标记点坐标的拟合。

对于平面特征，可以直接将较多标记点布置在所测平面上，如图 5 所示。



图 5 布置于平面上的标记点

Fig. 5 Marked points placed on a plane

平面特征的位姿通常用中心坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 和单位法向量 (X_n, Y_n, Z_n) 来表示，如图 6 所示。

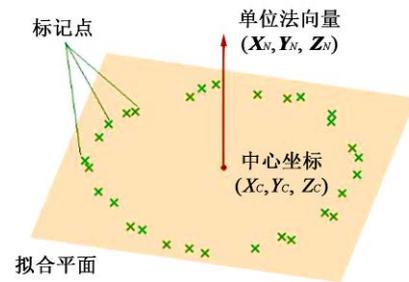


图 6 标记点拟合平面

Fig. 6 Fitting plane with marked points

将所有标记点的平均值作为拟合平面的中心坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 。由于所有的标记点都在平面上，则第 k 个标记点的坐标 (X_k, Y_k, Z_k) 满足关系式

$$[X_k - X_c \quad Y_k - Y_c \quad Z_k - Z_c] \cdot \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

给定足够多标记点，可根据式(3)列出线性齐次超定方程组，用最小二乘法或奇异分解法(SDV)求解平面单位法向量。由于通过单次采集的图像处理出的平面特征拟合结果受随机误差影响较大，因此，可以进一步采用增加平行测定次数并取平均值的办法来提高拟合精度。

对于回转轴线特征，需要选取一个与轴线相交且固连的参考平面，并将标记点布置于其上。若选择轴端面作为参考平面，由于其尺寸有限，标记点会布置得比较集中或数量较少，影响到拟合精度。因此，设计了圆形靶标盘作为辅助测量工具，将其安装在轴端面作为参考平面。如图 7 所示。



图 7 安装于轴端的靶标盘

Fig. 7 Target disk mounted on shaft end

靶标盘为圆形薄片，直径在 100 mm 左右，上面分散地布有较多标记点。靶标盘需要与轴固连。考虑到锥齿齿轮多以钢材为主，为了方便拆装，靶标盘用铁片制作，利用磁吸的方式进行安装。

有了参考平面之后，回转轴线特征的位姿可以用参考平面与轴线交点坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 和轴线单位方向向量 (X_d, Y_d, Z_d) 来表示。回转轴转动过程中，参考平面与轴线的交点保持不变，且参考平面法向

与轴线方向的夹角保持不变，即参考平面在交点处的法向量位于以交点为锥顶、以回转轴线为高线方向的虚拟锥面上，如图8所示。

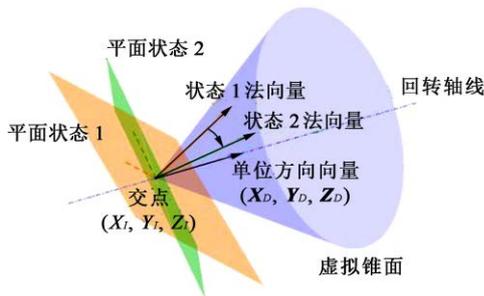


图8 参考平面拟合回转轴线

Fig. 8 Fitting axis of revolution with reference plane

根据上述几何关系，即可通过参考平面在转动过程中各状态的位姿拟合出回转轴线位姿。首先，通过平面拟合确定转动过程中参考平面各状态的位姿，第 k 个状态位姿以中心坐标 (X_{Ck}, Y_{Ck}, Z_{Ck}) 和单位法向量 (X_{Nk}, Y_{Nk}, Z_{Nk}) 表示。由于参考平面与轴线交点固定不变且始终在参考平面上，则有

$$\begin{bmatrix} X_{Nk} & Y_{Nk} & Z_{Nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Ck} - X_I \\ Y_{Ck} - Y_I \\ Z_{Ck} - Z_I \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

当拥有足够多转动过程中的参考平面位姿时，即可根据式(4)列出线性超定方程组求解交点坐标。

转动过程中，第 k 个状态的平面法向与回转轴线方向间的夹角 θ_k 满足关系式

$$\cos(\theta_k) = \begin{bmatrix} X_{Nk} & Y_{Nk} & Z_{Nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据前面的分析可知， θ_k 在转动过程中保持不变，则各个状态下的 $\cos \theta_k$ 都相等。因此，以式(6)最小值为目标进行优化，即可得到回转轴线的单位方向向量 (X_D, Y_D, Z_D) ，有

$$\text{std} \left(\begin{bmatrix} X_{Nk} & Y_{Nk} & Z_{Nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

式中，std表示求取标准差。将多个状态的平面法向量代入式(6)后，可利用拟牛顿法(BFGS)、序列二次规划法(SQP)、遗传算法(GA)等非线性优化算法求解出回转轴线的单位方向向量。

3 测量流程与系统

跟据第2节所述测量原理，给出整体的测量流程如图9所示。

系统硬件部分主要包括支撑结构(三脚架及横梁)、CCD相机2套(Basler acA2440-75 μm 、定焦镜头、USB3.0相机线)、补光灯、计算机。如图10

所示。

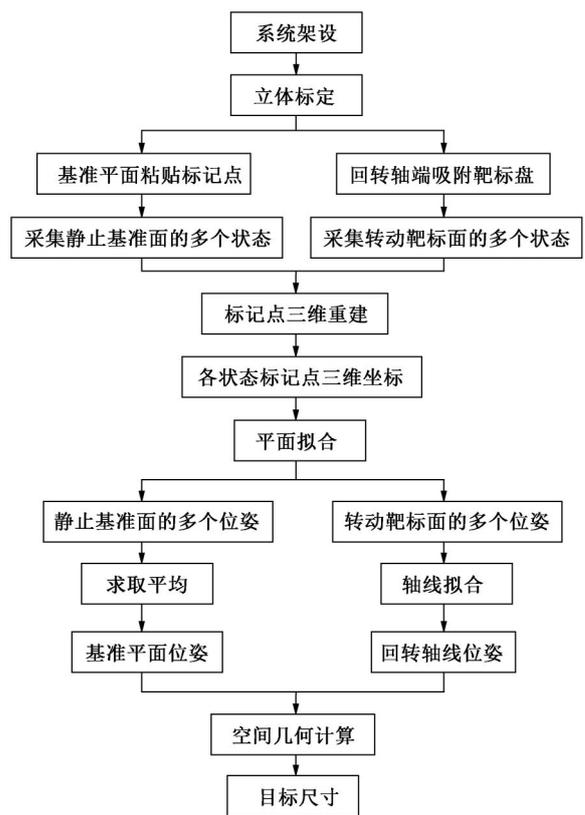


图9 测量流程

Fig. 9 Measurement process



图10 测量系统硬件

Fig. 10 Measurement system hardware

所选用相机的分辨率为 2 448 pixel×2 048 pixel，最高帧率为 75，镜头焦距为 25 mm。两相机布置时交角约为 16°，横梁与相机之间形成移动副，方便调节两相机间距。测量横向为 400 mm 的幅面时，相机间距约为 350 mm。

为保证测量精度，系统架设完后采用如图11所示激光打印的高精度标定板进行标定。根据标定结果的重投影误差，判断系统对标记点的三维坐标计算误差在 0.02 mm 以内。

系统软件基于 C++ 环境开发。首先，通过 Basler 提供的开发工具包 Pylon SDK 进行相机的控制，采集并显示图像。此部分软件界面如图12所示。之后，结合 Opencv 开源库的相关算法，实现图像处理、相

机标定、三维重建等功能。最后，根据标记点的三维坐标，利用 Matlab 高效的矩阵运算与优化算法，对特征进行拟合并计算目标尺寸。

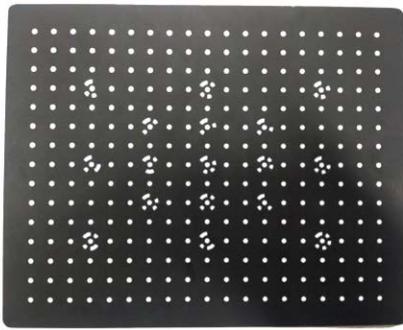


图 11 高精度标定板

Fig. 11 High precision calibration board

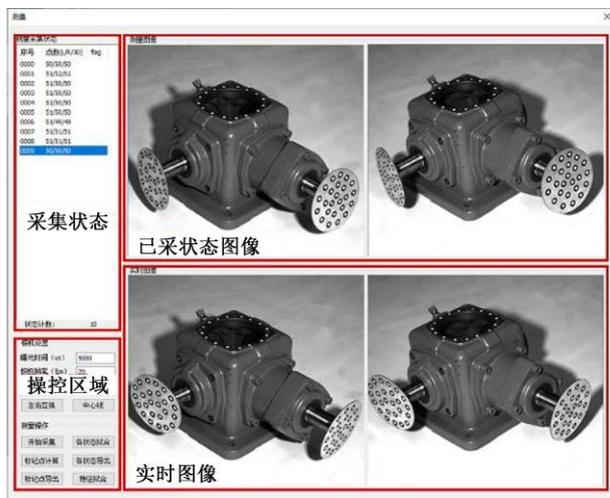


图 12 图像采集界面

Fig. 12 Image acquisition interface

整个方法流程可以分为人工操作和程序处理两个部分，采用了目前相关领域的常用成熟算法。对于简单操作和成熟算法，本文中不再赘述。为了充分确保测量精度，重点对两个关键因素对测量精度的影响进行研究：①状态数量对拟合精度的影响；②靶标盘安装角度对拟合精度的影响。这些内容在下面两个章节展开。

4 状态数量对拟合精度的影响分析

无论是平面特征还是回转轴线特征，都需要用多个状态进行拟合。状态数量过少则拟合精度不够；数量过多则浪费计算资源与时间。因此，有必要通过实验的方式确定合适的拟合状态数量。针对同一测量目标，采集大量的状态(1 000 个)，从中随机取一定数量的状态拟合特征，分析不同的状态组合拟合结果的离散度，将其作为评价拟合精度的指标，得到如表 2 所示的结果。

从表 2 中可以看出，随着拟合所用的状态数量增

加，拟合结果离散度不断减小，即拟合精度不断提升。但当状态数足够大且继续增加时，精度提升的幅度变小。在兼顾精度与计算效率情况下，平面特征用约 50 个状态进行拟合即可，位置离散度在 0.002 mm 以内，方向离散度在 0.01° 以内；回转轴线特征采用约 100 个状态进行拟合为佳，位置离散度在 0.01 mm 以内，方向离散度在 0.03° 以内。

表 2 拟合所用状态数量对拟合精度的影响

Tab. 2 Influence of the number of States used in fitting on fitting accuracy

状态数目	平面特征		回转轴线特征	
	位置离散度/mm	方向离散度/(°)	位置离散度/mm	方向离散度/(°)
1	0.01	0.05	—	—
10	0.005	0.018	0.2	0.3
20	0.003	0.012	0.1	0.15
50	0.002	0.008	0.05	0.08
100	0.001	0.004	0.02	0.03
150	0.001	0.003	0.01	0.025
200	0.001	0.002	0.01	0.025

5 靶标盘安装角度对拟合精度的影响

根据回转轴线的拟合原理，要求转动过程中参考平面法向与轴线方向间的夹角 θ_k 始终等于实际夹角 θ_0 。采用同样的优化算法情况下， θ_0 的大小会对结果的精度产生影响。因此，有必要对靶标盘与轴之间的安装角度进行优化，以获得最佳的拟合效果。

针对上述问题，可以通过数值仿真的方法进行分析。根据第 4 节中的实验结果，假定参考平面法向量自身的方向拟合精度为 0.05°，即 θ_k 与 θ_0 的误差始终在 $\pm 0.05^\circ$ 范围内。随机生成一组 $[-0.05, 0.05]$ 区间内的值作为角度误差 Δ_k 。假设实际轴线方向向量为 V_d ，取一组与其成 $\theta_0 + \Delta_k$ 角度的单位向量 V_k ，视为转动过程中的参考平面单位法向量。根据这些向量拟合出轴线方向向量 V_d' ，计算其与实际轴线方向向量 V_d 的夹角 γ ，视作方向拟合偏差。对于某组随机误差 Δ_k ，针对平面与轴线间不同的夹角 θ_0 ，计算对应的拟合偏差 γ 。对于不同的随机误差组 Δ_k ，得到的结果大致相同，如图 13 所示。

从图 13 中可以发现，平面法向与轴线间夹角接近所设定的拟合精度 0.05° 时，拟合偏差较大；当夹角不断增大时，拟合偏差逐渐稳定于一个较小的值。

由于上述过程是基于理想值的数值仿真，所得的偏差值普遍较小。接下来，进一步通过实验验证上述结论。将靶标盘以一定角度安装在回转轴端面

上,在转动过程中采集状态拟合出轴线方向,采用与第4节中类似的方式分析出方向离散度与安装夹角的关系,结果如表3所示。

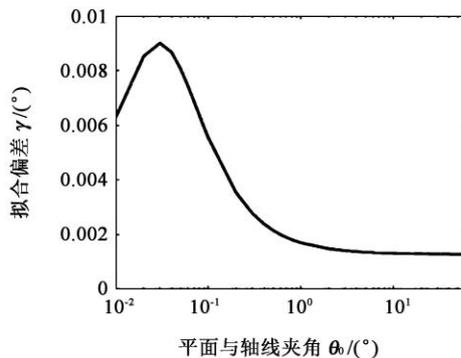


图13 平面法向与轴线夹角对拟合偏差的影响

Fig. 13 Influence of angle between plane normal direction and axis on fitting deviation

表3 轴线拟合方向离散度与安装夹角的关系

Tab. 3 Relationship between axis fitting direction dispersion and installation angle

安装夹角/ $^{\circ}$	0	0.5	1	5	10
方向离散度/ $^{\circ}$	0.05	0.04	0.035	0.03	0.03

分析表3中的结果可知,为提高回转轴线方向拟合精度,靶标盘安装时应与轴端面成一定夹角。考虑到靶标盘在转动过程中两个相机的视角问题,该夹角不宜过大,取 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 比较合适。

6 优化后的测量实验结果

利用搭建完的系统,根据优化后的测量流程对齿轮箱实物展开测量实验,如图14所示。



图14 测量实验现场

Fig. 14 Measurement experiment site

测量过程中,采集了靶标盘在转动过程中的多个状态,在软件中拟合出回转轴线,如图15所示。

针对第1节提出的目标尺寸展开多次测量实验,测得结果如表4所示。

通过实验可知,测量结果符合表1中的设计要求,结果可信度高。重复测量稳定性好,位置重复测量精度优于 0.01 mm ,方向重复测量精度优于 0.03° 。在完成相机标定及标记点布置的前提下,单次测量耗时在 1 min 以内,测量效率高。

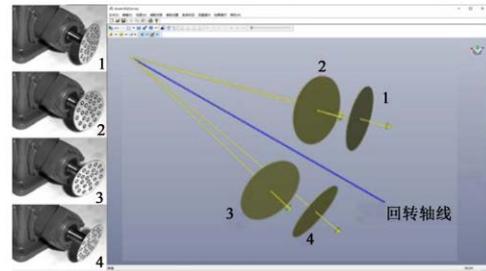


图15 靶标盘多状态位姿拟合轴线

Fig. 15 Fitting axis with multi state pose of target disk

表4 目标尺寸测量结果

Tab. 4 Target dimension measurement results

测量实验次序	d_1/mm	$\alpha_1/(^{\circ})$	d_2/mm	$\alpha_2/(^{\circ})$
1	0.014	89.972	70.037	90.119
2	0.018	89.964	70.033	90.131
3	0.015	89.974	70.040	90.126
4	0.011	89.956	70.036	90.117
5	0.009	89.962	70.034	90.111

7 结论

针对目前工业生产中齿轮轴系装配误差的测量难题,提出了一种基于双目立体视觉的齿轮轴系装配误差的测量方法。利用圆形标记点作为测量媒介,通过三维重建及数学拟合,获取相应特征的空间位姿,进而计算出装配误差。给出了所提方法的完整测量流程,并针对特征拟合所用状态数量与靶标盘安装角度两个关键因素进行了分析与优化。明确了在兼顾计算精度与效率的情况下,拟合平面时合适的状态数量为50个左右,拟合轴线时合适的状态数量为100个左右,靶标盘与轴端面成 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 安装为佳。根据优化后的测量流程,搭建了完整的软硬件系统进行实验。结果表明,所提方法位置重复测量精度优于 0.01 mm ,方向重复测量精度优于 0.03° 。

参 考 文 献

- [1] 王向才.机械传动技术发展及展望[J].机械管理开发,2018,33(2):152-154.
WANG Xiangcai. Development and prospect of mechanical transmission technology [J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(2): 152-154.
- [2] 吴鲁纪,耿福震.高速齿轮传动技术与装置综述[J].机械传动,2019,43(11):172-175.
WU Luji, GENG Fuzhen. Overview of high speed gear transmission technology and equipment [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(11): 172-175.
- [3] 王延忠,熊巍,张俐,等.面齿轮齿面方程及其轮齿接触分析[J].机床与液压,2007(12):7-9.
WANG Yanzhong, XIONG Wei, ZHANG Li, et al. Tooth surface equations and tooth contact analysis of face gear [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007(12): 7-9.
- [4] 王延忠,田志敏,侯良威,等.航空重载面齿轮三维裂纹分析与疲

- 劳寿命预测[J].北京航空航天大学学报,2014,40(2):148-153.
WANG Yanzhong, TIAN Zhimin, HOU Liangwei, et al. Three-dimensional crack analysis and fatigue life prediction of aero heavy-load face gear[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 148-153.
- [5] 谢雄伟,徐宏海,关通.基于3DCS的RV减速器静态装配公差分析及优化[J].机械传动,2019,43(6):150-153.
XIE Xiongwei, XU Honghai, GUAN Tong. Tolerance analysis and optimization of static assembly of RV reducer based on 3DCS[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(6): 150-153.
- [6] 谭昕,陈定方,张争艳.三级齿轮减速箱动态特性分析与结构优化设计[J].装备制造技术,2010(1):77-80.
TAN Xin, CHEN Dingfang, ZHANG Zhengyan. Dynamics analysis and structural optimization design of a three-stage gearing [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010(1): 77-80.
- [7] 王延忠,陈云龙,张祖智,等.基于DEFORM有限元仿真的弧齿锥齿轮热处理过程残余应力与变形分析[J].机械传动,2016,40(1):148-152.
WANG Yanzhong, CHEN Yunlong, ZHANG Zuzhi, et al. Analysis of the residual stress and deformation of spiral bevel gear heat treatment process based DEDORM software finite element simulation[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(1): 148-152.
- [8] 明兴祖,王红阳,申警卫,等.面齿轮高速铣削数控加工方法研究[J].机械传动,2019,43(4):1-6.
MING Xingzu, WANG Hongyang, SHEN Jingwei, et al. Research on NC machining method of face gear in high speed milling[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(4): 1-6.
- [9] 毛继哲,杨林杰,张坤,等.多特征齿轮轴的设计及制造工艺研究[J].制造技术与机床,2020(1):114-118.
MAO Jizhe, YANG Linjie, ZHANG Kun, et al. The research on design and processing technic of multi-feature gear shaft[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(1): 114-118.
- [10] 高士豪,杨龙,陈思雨,等.齿向修形斜齿轮齿面加工扭曲机理及对啮合性能影响分析[J].机械传动,2020,44(10):13-18.
GAO Shihao, YANG Long, CHEN Siyu, et al. Analysis on the machining twisting mechanism of tooth surface with axial modification of helical gear and its influence on meshing performance[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(10): 13-18.
- [11] 孙海波.再制造TBM主驱动装配关键工艺及齿轮副啮合质量检验技术[J].隧道建设(中英文),2020,40(6):890-897.
SUN Haibo. Key technology of main drive assembly and inspection technology of meshing quality of gear pair during TBM remanufacturing[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 890-897.
- [12] 汤洁,王冰鹤,石照耀.安装距可调的锥齿轮副传动误差测量[J].光学精密工程,2016,24(6):1335-1344.
TANG Jie, WANG Binghe, SHI Zhaoyao. Transmission error measurement of bevel gear pair under mounting distance adjustment[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1335-1344.
- [13] 马秋颖.螺旋锥齿轮安装距的控制[J].铁道机车与动车,2019(1):41-42.
MA Qiuying. The control of installation allowance for spiral bevel gear[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2019(1): 41-42.
- [14] 常星.齿轮箱过盈配合装配工艺方法研究[J].山西冶金,2019,42(4):44-46.
CHANG Xing. Study on interference fit assembly technology of the gearbox[J]. Shanxi Metallurgy, 2019, 42(4): 44-46.
- [15] 王欣,李焯.三坐标测量机在齿轮偏差测量中的应用[J].低碳世界,2017(6):87-88.
WANG Xin, LI Ye. Application of CMM in gear deviation measurement[J]. Low Carbon World, 2017(6): 87-88.
- [16] 梁龙龙.三坐标测量机的同轴度测量评定[J].现代制造技术与装备,2017(7):108-109.
LIANG Longlong. Coaxiality measurement and evaluation of three coordinate measuring machines[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(7): 108-109.
- [17] 胡廷智,张忠清,肖木峥,等.基于激光自准直的发动机轴孔同轴度在线检测方法[J].推进技术,2019,40(9):2099-2104.
HU Tingzhi, ZHANG Zhongqing, XIAO Muzheng, et al. Online detection method for shaft holes coaxiality of engine based on laser autocollimation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 2099-2104.
- [18] YIN Y K, ALTMANN B, PAPE C, et al. Machine-vision-guided rotation axis alignment for an optomechanical derotator[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 456-463.
- [19] 卢业坚.基于Renishaw激光干涉仪的数控机床摆轴位置精度的测量与分析[J].质量技术监督研究,2020(4):2-7.
LU Yejian. Measurement and analysis of position accuracy of numerically-controlled machine swing axis based on renishaw laser interferometer [J]. Quality and Technical Supervision Research, 2020(4): 2-7.
- [20] 黄鹏程,江剑宇,杨波.双目立体视觉的研究现状及进展[J].光学仪器,2018,40(4):81-86.
HUANG Pengcheng, JIANG Jianyu, YANG Bo. Research status and progress of binocular stereo vision[J]. Optical Instruments, 2018, 40(4): 81-86.
- [21] 唐昀超,黄矿裕,陈明猷.基于双目视觉的齿轮曲面重构[J].现代农业装备,2018(5):46-50.
TANG Yunchao, HUANG Kuangyu, CHEN Mingyou. Gear surface reconstruction based on binocular vision [J]. Modern Agricultural Equipment, 2018(5): 46-50.
- [22] 薛红影.基于双目视觉的齿轮倒角检测方法的研究[D].天津:天津科技大学,2017:2-4.
XUE Hongying. Research on gear chamfer detection method based on binocular vision [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017: 2-4.
- [23] 王莹莹,张学昌,梁涛.基于机器视觉的活塞杆同轴度误差检测研究[J].机械科学与技术,2015,34(12):1846-1850.
WANG Yingying, ZHANG Xuechang, LIANG Tao. Study on inspection method of coaxial error for piston rod based on machine vision [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(12): 1846-1850.
- [24] 金守峰,范荻,陈蓉,等.面向回转类零件圆度的机器视觉测量方法与试验[J].机械设计与研究,2016,32(4):117-119.
JIN Shoufeng, FAN Di, CHEN Rong, et al. Method and experimental study of machine vision measurement for the roundness of rotary parts[J]. Machine Design and Research, 2016, 32(4): 117-119.

收稿日期:2020-12-29

基金项目:特种车辆及其传动系统智能制造国家重点实验室开放课题(GF2019KF014)

作者简介:陈勳昊(1995—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事机器视觉与数字化装配技术研究。