

基于光学自准直的旋转轴平行度测量与不确定度分析

李小明^{1,2}, 朱国帅^{1,2}, 郭名航^{1,2}, 刘赢泽^{1,2}, 张 崇³

- (1. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 中国人民解放军陆军装备部驻沈阳地区军事代表局驻长春地区第一军事代表室, 吉林 长春 130022)

摘要: 在激光通信和光电跟瞄系统中已经开始采用基于旋转光栅或光楔的指向-捕获-跟踪 (Pointing, acquisition and tracking, PAT) 机构对光轴进行角度调整, 该结构质量轻、体积小, 非常有利于系统的轻量化。由于结构中两个旋转轴的平行度误差会严重影响 PAT 机构性能, 因此在机械装配时需严格保证两轴平行度。针对旋转轴系轴线不易测量, 传统测试方法精度不足, 轴系晃动误差影响测量结果等问题, 为了满足两轴平行度高精度检测的需求, 文中提出基于自准直原理的旋转轴平行度测试方法, 利用自准直光学特性, 结合特殊设计的半反半透基准镜, 采用数据拟合方法剔除轴系晃动的影响, 得到旋转轴轴线空间位置, 创新地实现了无需调整测试和被测设备即可在同一基准下测量两个平行轴系轴线角度和平行度。该方法只需一台测试设备, 排除了传统多台测试设备联合测量时, 基准传导与变换中的测量和变换误差, 提高了测试精度和测试效率。首先, 设计了基于自准直仪的测试系统, 采用一台自准直仪测试两个轴系轴线空间位置, 从而得到旋转轴同轴误差; 然后, 对测试结果不确定度进行了研究, 分析了测试准确性及其影响因素; 最后, 采用该测试方法和测试系统, 对某双液晶光栅跟瞄 PAT 机构的两轴平行度进行了测量, 系统的实际测试表明两轴平行度测试误差小于 10%, 该方法可以有效地测量两个同轴旋转轴系的平行度, 并且具有较高的测量精度和可信度。

关键词: PAT; 平行度; 数据拟合; 不确定度; 旋转轴系

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220794

0 引言

在激光通信或光电跟瞄系统中, 系统需采用指向-捕获-跟踪 (Pointing, acquisition and tracking, PAT) 机构实现光轴角度调整, 完成光轴对准功能。传统方案中多采用机械转台作为 PAT 机构, 以传统的十字跟踪架结构形式居多, 其两旋转轴正交布置, 分别带动载荷实现两维角度调整, 具有结构成熟、角度范围大、两轴耦合小、控制模型简单的特点^[1-2]。随着技术的不断进步和对 PAT 机构轻量化要求的提高, 逐步出现了双光栅 (光楔) PAT 机构, 其特点是两个旋转轴同轴布置分别带动两个光栅旋转, 利用光栅的光学特性实现光轴的二维调整^[3-5]。该结构虽然光轴调整

范围受限、两旋转轴耦合大、解算公式复杂, 但其紧凑性好, 轻量化优势大, 在有限角度的应用场合中可以实现更小的体积和质量, 所以在激光通信、光电跟瞄等领域已有较多应用。

除轴系精度外, 两个转轴的空间角度偏差也是机械转台的重要误差源之一, 其精度直接决定光轴空间扫描时的位置精度, 影响激光通信系统的开环捕获性能, 直接决定了激光通信链路建立的可靠性。因此, 在激光通信系统中, 粗跟踪转台轴系角度位置精度也是其不可忽略的重要参数, 在设计和加工阶段必须严格保证。对于十字跟踪架式转台, 轴系角度位置精度取决于两轴垂直度, 其可以采用光学正倒镜法进行测量, 测量精度高、测量结果直接、可信度较好, 完全满

收稿日期: 2022-11-04; 修订日期: 2023-01-30

基金项目: 航空科学基金 (202000080Q8001); 吉林省教育厅产业优化研究项目 (JJKH20220756CY)

作者简介: 李小明, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事精密光机结构分析与优化方面的研究。

足工程要求。在同轴系统中,两个旋转轴绕同一轴线独立转动,除转动时的轴系晃动对光轴产生影响外,轴系旋转时角度位置精度取决于两轴安装时的角度平行度。两个回转轴不平行时存在角度偏差,会造成轴上的光学部件转动时产生额外的角度偏摆,严重影响光轴指向和跟踪解算的精度^[6-9]。虽然两轴角度平行度属于系统误差,可通过标定等手段进行抑制,但其标定方法较为复杂,而且该系统光栅偏转角度大于 7° ,当光轴偏转角度较大,高精度光学测量设备视场无法满足要求,其标定难度较大。此外,在十字跟踪架转台的垂直度中,只要检测和调整俯仰轴线在方位轴 0° 和 180° 两个位置的角度偏差即可,其测试和调整位置固定比较简单。在同轴系统中,两轴角度偏差可能出现在 2π 空间内,在有效测量出角度偏差的同时,需能够得到偏差的相位角度,方便指导装调,所以测试难度远大于垂直度测量。因此,为了在装配过程中保证机械结构转轴的平行度误差,提高系统精度,需要在装配和检测阶段对轴系平行度进行高精度测量。

传统的平行度测量方法主要有接触测量和非接触测量,接触测量包括千分表测量、三坐标测量等方法,其中张二莉针对大型大批量生产的卷扬机卷筒两侧止口处的平行度检测的问题,利用设计的检测工装和千分表对卷筒两侧止口平行度进行检测^[10],该方法虽然利用设计的检测装置方便了检测,提高了检测效率,检测精度最高可达 0.01 mm ,仍然不能克服千分表测量时需要经验丰富的工人进行操作,需要工人读数,接触测量误差大等问题。相比于利用千分表测量的方法,利用三坐标测量机进行测量的精度更高,刘心宇、曹阳等人利用三坐标测量机对船舶舵轴的平行度进行测量,并针对三坐标测量机在检测时存在轴向延伸误差的问题,提出了分段、分坐标系采集被测元素的方法^[11],该方法提高了轴向平行度检测的准确度,削减了人工操作的工作量,提高了精度,检测精度最高可达 0.002 mm ,但仍存在对检测环境要求苛刻,测量效率低,而且检测价格昂贵等缺点。在非接触式测量方面,叶志斌、陆永华等人利用激光位移传感器和所设计的检测平台对复合齿轮的同轴度进行检测,通过测量位移传感器与被测工件之间的距离获得测量工件的信息,可将检测误差控制在 0.01 mm 以内^[12],但不易对同轴布置的双旋转轴进行检测。

以上方法均为直线测量,需经过数据转换后才可得到同轴转台所需的两旋转轴间的角度偏差,由位移转换为角度时,其精度受到测量点分布圆直径影响,当分布圆直径较小时,其精度较低,并且存在转换标准不统一,转换数据准确性差,置信度低等问题。对此邹志鸿采用光束位置传感器和三角测长仪,实现了内孔平行度测量,该方法虽然避免了接触式检测的接触误差,并且采用光学仪器提高了测试仪器精度,但其测试时需要 PSD 的位置数据、LTS 轴心数据通过数据拟合方式得到轴系同轴度,该方法测试仪器多,并需配合机械导轨,误差环节多不易保证测量精度,其测试精度只能达到 0.02 rad ^[13]。同时其测试点为机械结构表面数据,结构表面加工质量也影响测试结果的可靠性,另外测试中需搭建专用的测试设备造成测试系统较为复杂,不易在工厂快速实施,设备的尺寸也限制了测量内孔的尺寸,对于小孔径转台无法进行测量。

因为需要检测轴系转动时的旋转轴线,传统的静态轴心测量方法不能满足测量的要求,此外双光栅 PAT 结构中的两旋转轴布置在结构内部,结构内孔尺寸小,千分表与三坐标测量机的测头以及激光不易接触到两旋转轴表面。调研并未发现有针对同轴旋转轴角度平行度的光学直接测量方法的相关报道,与多家优势生产企业沟通,也未有过类似系统的检测先例。因此,在双光栅转台装配过程中,如何有效测量两旋转轴角度平行度,成为制约光栅转台研制的关键问题。

为实现角度平行度的高精度、高可信度、高便捷性测量,解决转台研制过程中出现的工程问题,为装配提供调整依据,文中提出一种非接触式光学测量方法,利用一个自准直仪作为基准,在不移动自准直仪和被测转台的前提下,可分别对两个同轴轴系转动时的轴线角度进行测量。采用数据拟合处理排除轴系晃动的影响得到转动轴线空间位置,通过比较两个轴线的角度偏差,实现对两个旋转轴平行度测量。自准直仪直接得到旋转轴角度数据,其测量精度可优于 $1''$,并且不存在线性数据与角度数据间转换问题,测量方法可直接测量两轴间角度偏差。测试时在同次测量中采用同一基准,并采用非接触测量避免接触测量的不准确性,从而保证测量数据准确性,其测试结果更直观、精度更好、可信度更高。另外该方法不受测试轴系直径限制,测试设备简单,搭建方便,便于在

工厂实施。为了保证测方法的准确性,分析了测量仪器精度、测试参数、测试数据处理对测量结果不确定度的影响,保证测量的精度和置信度。

1 双轴同轴 PAT 机构

1.1 双轴同轴 PAT 机构工作原理

在某激光跟瞄系统中,采用双光栅 PAT 机构实现光轴的指向、捕获和粗跟踪,系统由两块平行放置

的液晶光栅 (LCPG) 组成,正入射的激光经过每片光栅后都会在衍射截面内发生固定角度的偏转,当光栅绕平行于正入射方向的旋转轴转动时即可在 $\pm 7^\circ$ 锥角范围内连续改变光轴指向,当两个光栅绕共轴旋转时即可实现在 $\pm 14^\circ$ 锥角范围内的两维方向上光轴任意角度调整,其光轴指向和跟踪原理与双光楔结构相似^[14],双光栅 PAT 机构模型和实物如图 1 所示。

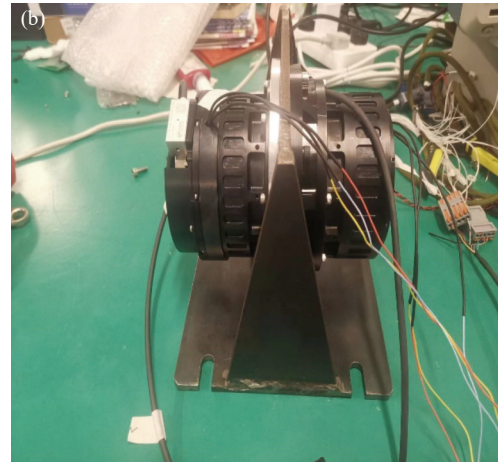
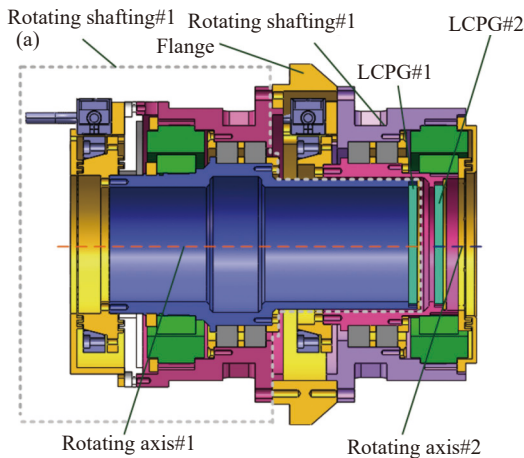


图 1 双光栅 PAT 机构。(a) 三维模型; (b) 实物图

Fig.1 Double grating PAT mechanism. (a) 3D model drawing; (b) Physical map

机构有旋转轴系 1 和旋转轴系 2 两个同轴布置的轴系,两个轴系通过安装法兰连接,轴系前端分别安装液晶光栅 1 和液晶光栅 2。两个轴系可分别绕旋转轴 1 和旋转轴 2 独立旋转,带动两个光栅转动,相互不干涉,设计时要求旋转轴 1 和旋转轴 2 的平行度满足优于 $10''$ 的精度要求。

1.2 PAT 机构误差源

系统工作时,外界发射过来的入射激光通过 PAT 机构的两个液晶光栅后进入后端的光学系统,通过光学系统后的 CCD 相机检测光轴偏转角度,然后控制两个轴系的电机带动光栅旋转,调整光线方向,实现外界光线与光学系统光轴的对准,图 2 为系统原理图。

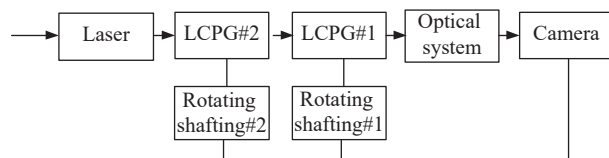


图 2 双光栅 PAT 机构原理图

Fig.2 Schematic diagram of dual grating PAT mechanism

旋转轴转动时轴线方向将直接决定前端安装的光栅的法线方向,从而影响光轴指向角度,因此对于 PAT 机构的机械系统,其轴系相关误差是影响光轴指向精度的主要误差源^[15]。对于两轴旋转轴系来讲,轴系误差主要有轴系晃动和两轴平行度误差。轴系误差如图 3 所示,轴线 A_1 和 A_2 为装配完成后两个轴系的理论轴线, A_1' 和 A_2' 为轴系转动时轴系的实际轴线,它们分别与 A_1 和 A_2 的差值为晃动误差。轴系晃动误差主要受轴承制造精度的影响,旋转轴在转动时产生晃动其轴线产生角度偏摆,实际旋转轴线偏离理论轴线,液晶光栅角度发生偏转,光线指向方向发生误差。轴系晃动为随机误差,通过选取高精度轴承,控制机械件加工精度,保证装配工艺等方法可以将轴系晃动控制在几个角秒。轴系同轴误差是系统误差,在轴系晃动的基础上两轴存在一个不随轴系转动而改变的固定角度偏差,该误差可以在装配时调整和控制。由于国内同轴转台相关研究较少,基本是作为光束指向应用的双光楔

系统, 尚未见对轴系平行度的指标要求和相关研究报告。在该系统中, 系统除完成指向外, 还需完成闭环跟踪功能, 为保证跟踪精度要求转台要满足较高的轴系角度位置要求, 需要转台两个旋转轴的轴线角度平行度优于 $10''$ 。

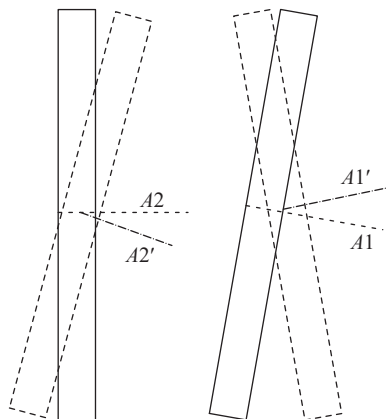


图 3 轴系误差示意图

Fig.3 Schematic diagram of shafting error

2 轴系平行度检测方法

2.1 测量装置组成与原理

为了检测两个轴系的平行度, 必须首先测量出每个轴系的旋转轴线空间位置, 然后比较两者的偏差值获得平行度误差。为保证测试精度需要两个轴线的检测以同一坐标系为基准, 如何简单高效的以同一基准检测两个轴系的旋转轴线成为平行度检测的关键问题。传统转台轴系垂直度测量常用的自准直仪具有测量精度高、使用方便、行业应用广、认可度高的优势。为此, 首选光电自准直仪作为测量设备, 借用自准直仪配合基准反射镜测量轴系偏转角度的方法, 采用一个自准直仪, 在不移动位置保证基准不变的前提下分别测量出两个轴系的旋转轴线角度。光学准直角度测量原理是利用自准直仪发出的自准直光, 经过被测系统上的反射镜反射后被自准直仪接收, 比较发射光和反射光的角度差即可获知反射镜法线角度, 对于机械旋转轴系上同轴安装的反射镜的法线即为机械旋转轴轴线。为此, 采用自准直仪结合基准反射镜即可测量机械旋转轴系的轴线角度。

对于同轴系统, 由于转台两轴系同轴安装, 其轴线重合, 在轴心安装传统的基准反射镜后, 两个轴系

的基准镜相互遮挡, 这造成在不调整测试系统的前提下很难实现同一测试设备测量两个轴系轴线角度, 为保证测试可信度一般采用多台测量设备, 利用基准传递完成测试。但该方法所需测试设备多、测试系统构建复杂, 基准传递难度大对测试人员要求较高, 在加工工厂很难具备测试条件, 也可采用先测量一个轴, 拆除该轴系基准反射镜后再测量另一个轴的方法, 但由于转台尺寸小, 一方面拆装困难另一方面需对转台进行机械拆卸, 势必造成转台移位, 从而影响测量精度。为了保证测量精度, 为其他更高精度要求的测量提供必要的技术积累, 方案采用一次安装两个基准镜, 在无需机械拆卸的前提下实现两个轴系的测量。并且, 考虑到实际测试多在加工工厂装配过程开展, 必须考虑测试方法的便捷性。为此, 必须研究新的同轴转台旋转轴角度同轴度测试方案。

为了实现测试基准镜即可反射自准直仪信号, 又可人为可控透射光线的目的, 将靠近自准直仪一侧的基准镜, 由传统的反射镜优化为一半反射一半透射, 测试时在两个旋转轴上分别安装两个角度可调的基准镜, 测量方法示意图如图 4(a) 所示。自准直仪与 PAT 机构通过工装保证两者相对固定不动。该方法主要对 PAT 轴系同轴度进行检测, 因此测试时 PAT 机构先不安装液晶光栅, 光栅引起的光轴精度需另行讨论。在安装液晶光栅的位置安装基准镜 1 和基准镜 2, 两个基准镜均有调整机构, 可以调整镜面的二维角度。基准镜 1 采用普通的反射镜, 基准镜 2 镜面如图 4(b) 所示, 其一半为透射镜面, 另一半为反射镜面, 基准镜实物如图 4(c) 所示。

理论上通过调整自准直仪的角度和基准镜的角度可以保证在轴系转动时, 自准直仪上的光斑以视场中心为圆心做圆周转动, 圆周的最小半径即为轴系晃动最大值, 圆周中心即为轴系轴线位置。但实际测量时, 由于结构调整能力和人员观察精度有限, 而且在调整时轴系晃动自身造成光斑无规律跳动, 很难调整到理想状态, 为此采用数学拟合方法对数据进行处理, 剔除轴系晃动误差和调整误差后拟合得到测试数据点的圆心作为轴系转动时的理论轴线位置。首先安装基准镜 1 并调整反射镜和自准直仪角度, 保证轴系 1 转动时自准直仪上光斑绕一个较小的圆变化, 同时圆心尽量靠近视场中心。然后安装基准镜 2 并遮

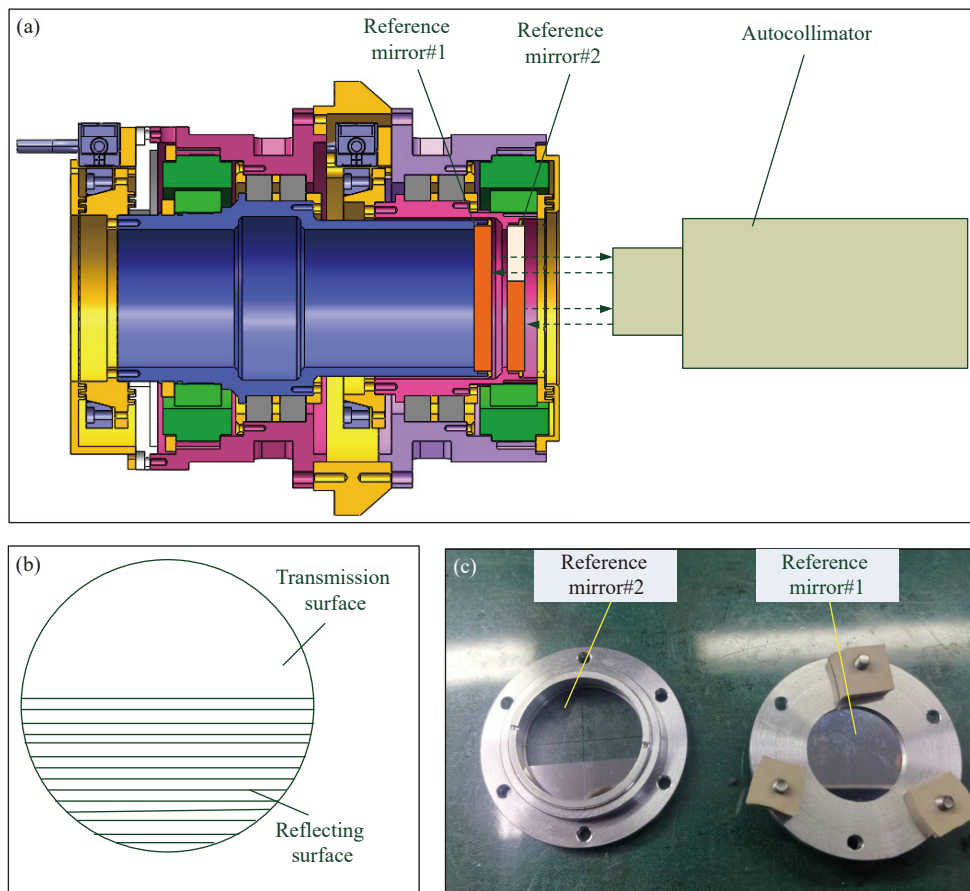


图 4 测量原理示意图。(a) 测量系统组成; (b) 基准镜 2 示意图; (c) 基准镜实物图

Fig.4 Schematic diagram of measurement principle. (a) Composition of measurement system; (b) Schematic diagram of reference mirror#2; (c) Reference mirrors

挡其透射面, 保证光不会透过基准镜 2, 然后保持自准直仪不动, 只调整基准镜 2 的角度, 使其状态与基准镜 1 基本一致。测量时, 首先遮挡住基准镜 2 的透射面, 使自准直仪发射的光只能通过基准镜 2 反射, 旋转旋转轴 2 同时记录测量数据。随后保持 PAT 机构和自准直仪不动, 打开基准镜 2 的透射面遮挡反射面, 自准直仪发射的光可以透过基准镜 2 的透射面照

射到基准镜 1 上反射后回到自准直仪, 此时转动旋转轴 1 并记录数据。测量时自准直仪始终保持不动, 因此测量得到的两轴轴线空间位置均以自准直仪的坐标系为基准, 并且自准直仪测量的是反射镜法线角度, 所以测得结果为轴线空间角度, 因此两个轴线间的差即为两个轴系间的平行度误差。测量时自准直仪成像如图 5 所示, 图 5(a) 为不遮挡基准镜 2 任何表

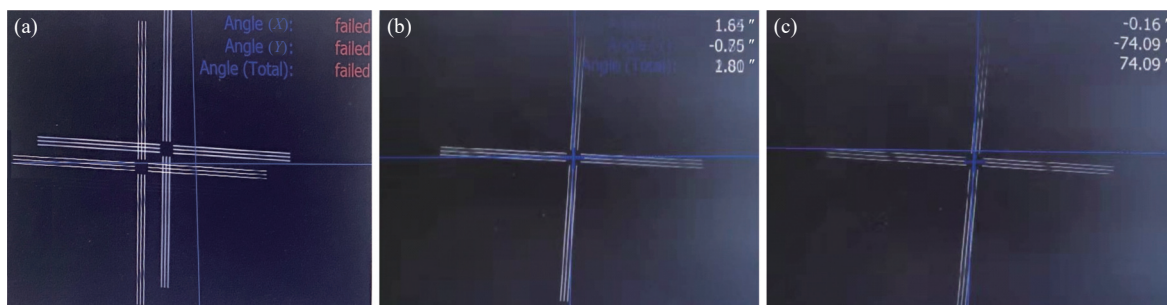


图 5 自准直仪成像图。(a) 基准镜 1 和 2 成像图; (b) 基准镜 1 成像图; (c) 基准镜 2 成像图

Fig.5 Autocollimator imaging map. (a) Reference mirror #1 & #2 image map; (b) Reference mirror#1 image map; (c) Reference mirror#2 image map

面时,自准直仪同时对基准镜 1 和 2 成像图,图 5(b)为遮挡基准镜 2 反射面时,自准直仪对基准镜 1 成像,图 5(c)为遮挡基准镜 2 透射面时,自准直仪对基准镜 2 成像图。

2.2 基于最小二乘法的轴线拟合

采用最小二乘法对数据进行拟合,对测量数据处理剔除轴系晃动和自准直仪及基准镜调整误差的影响,获得旋转轴系的轴线空间位置^[9]。轴系转动时基准镜法线一定是绕着一个圆变化,为此采用圆拟合公式:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r^2 \quad (1)$$

式中: (x, y) 为测量数据在 x 轴和 y 轴上的数值; (x_0, y_0) 为圆心坐标; r 为圆的半径。拟合时误差值平方的优化目标函数为:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2}-r \right]^2 \quad (2)$$

式中: $(x_i, y_i) i=1, 2, \dots, n$ 为圆上测量点坐标; n 为参与拟合的数据点个数。

对公式 (2) 改写为:

$$A = \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2+ax_i+by_i+c)^2 = 0 \quad (3)$$

式中: $a = -2x_0; b = -2y_0; c = x_0^2+y_0^2-r^2$ 。

当 a, b, c 取得最小值时,应满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2+ax_i+by_i+c)x_i = 0 \\ \frac{\partial A}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2+ax_i+by_i+c)y_i = 0 \\ \frac{\partial A}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2+ax_i+by_i+c) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对公式 (4) 进行推导,可得:

$$\begin{cases} a = \frac{H_2M_{12}-H_1M_{22}}{M_{11}M_{22}-M_{12}M_{21}} \\ b = \frac{H_2M_{11}-H_1M_{21}}{M_{12}M_{21}-M_{11}M_{22}} \\ c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2+ay_i+by_i) \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} M_{11} = \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i \right) \\ M_{12} = M_{21} = \left(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) \\ M_{22} = \left(n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i \right) \\ H_1 = n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2) \sum_{i=1}^n x_i \\ H_2 = n \sum_{i=1}^n y_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^n (x_i^2+y_i^2) \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (6)$$

根据公式 (5) 可获得拟合后的圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 r 。

$$x_0 = -\frac{a}{2}, y_0 = -\frac{b}{2}, r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2+b^2-4c} \quad (7)$$

轴系晃动误差 t_0 由公式 (8) 计算得到:

$$t_0 = \max \left[\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2}-r \right] i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

即:

$$t_0 = \sqrt{(x_{max}-x_0)^2+(y_{max}-y_0)^2} - \sqrt{(x_{min}-x_0)^2+(y_{min}-y_0)^2} \quad (9)$$

式中: (x_{max}, y_{max}) 和 (x_{min}, y_{min}) 分别为测量点中距离拟合圆中心最大值点和最小值点。采用最小二乘法分别对两组数据进行拟合后得到两轴晃动误差 t_1, t_2 和轴线空间角度坐标 (x_{01}, y_{01}) 和 (x_{02}, y_{02}) , 两个轴系的平行度误差 (x_0', y_0') 为:

$$\begin{cases} x_0' = (x_{01}-x_{02}) \\ y_0' = (y_{01}-y_{02}) \end{cases} \quad (10)$$

综合同轴误差为:

$$\Delta_{xy} = \sqrt{x_0'^2+y_0'^2} \quad (11)$$

3 测量不确定度分析

影响测量不确定度的因素很多,包括人为测量误差、检测工具精度、测量方法等引起的误差,其中人为误差随机性较强,在此重点讨论测量方法与检测工具引起的测量不确定度。通过对测量数据的最小二乘圆拟合可以得到拟合圆的圆心和半径,分别评价轴系的晃动误差和平行度误差。数据的准确性和可信性势必影响拟合结果的精度,为了评价测试结果的准确性,保证测量结果的置信度,把测量数据对拟合结

果的影响进行分析。影响拟合结果的测量数据主要参数有数据点数量、分布均匀性、数据分布离散性、测试点准确性等^[16-17]。

3.1 测量数据点数的影响

理论上平面内不在同一直线上的三个点即可完全确定一个圆,但是在实际测量中受到轴系晃动的影响每个测试点会产生一定的随机误差,甚至有可能出现错误的测量值,所以数据点过少时测量点偏差会严重影响拟合精度。

采用自准直仪对轴系旋转进行测量时,各个测量点可以认为是相互独立的,在没有错误测量点时可假设各点精度相同,所以每个测试点相互独立且互不相关,因此有 $x_{max}, y_{max}, x_{min}, y_{min}$ 之间互为不相关,每个参数的不确定度与测量不确定度 u_t 相同且 $ux_{max}=uy_{max}=ux_{min}=uy_{min}=u_t$, 则拟合圆心 (x_0, y_0) 的不确定度 (u_{x_0}, u_{y_0}) 为:

$$\begin{cases} u_{x_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x_0}{\partial x_i}\right)^2} u_t = \frac{1}{\sqrt{n}} u_t \\ u_{y_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y_0}{\partial y_i}\right)^2} u_t = \frac{1}{\sqrt{n}} u_t \end{cases} \quad (12)$$

由此可见,随着测量点数的增加,拟合圆心的不确定度降低,但随着测量点的增加测量效率降低,同时增加了错误测量点出现的机率,在实际测量中需根据测试误差需求和单点测试预估不确定度,综合选取测量点数。

测量时单点测量值受到轴系晃动影响产生随机摆动,另外计算精度和数据精度同样影响拟合结果,所以实际测量时各测试点数据不完全独立,拟合结果不确定度受到轴系晃动等影响,为综合评价测量点的影响,数据点数引起的不确定度误差用不确定度偏差比 u_{Δ} 表示,为轴系误差拟合值 f_0 与轴系晃动最大值 Δ 之比表示,即:

$$u_{\Delta} = \frac{f_0}{\Delta} \quad (13)$$

用 matlab 对在随机轴系晃动作用下 3~48 个均匀分布测试点时拟合圆心坐标不确定度偏差比 u_{Δ} 和轴系晃动拟合偏差 u_m 进行了仿真分析。仿真时,根据测试点数量在每个测试点下分别取 500 组随机数据进行拟合分析,以该组所有结果最大值作为输入分析不同

测试点数量时数据偏差,仿真结果曲线如图 6(a) 所示, u_{Δ} 分解为 x 轴上分量 $u_{\Delta x}$ 和 y 轴上分量 $u_{\Delta y}$ 。可见,随机数据造成结果曲线产生一定的震荡,但并不影响其总体变化规律,从结果可见测量点的数量对拟合圆心影响较大,测试点数少于 5 个时轴系晃动测试结果不确定度偏差比较大,当数量大于 6 后其偏差比优于 0.3,当点数少于 16 点时拟合结果变化较大,大于 16 点后变化趋于平缓,其不确定度偏差比在 0.2 左右,48 点时其不确定度偏差比约为 0.1,且从数据变化趋势可见,随着测试点数的增加,拟合圆心不确定度偏差会更趋近于零,其规律与公式一致。测试点数对误差拟合结果标准差影响如图 6(b) 所示,看见其变化规律与不确定度偏差比相同。

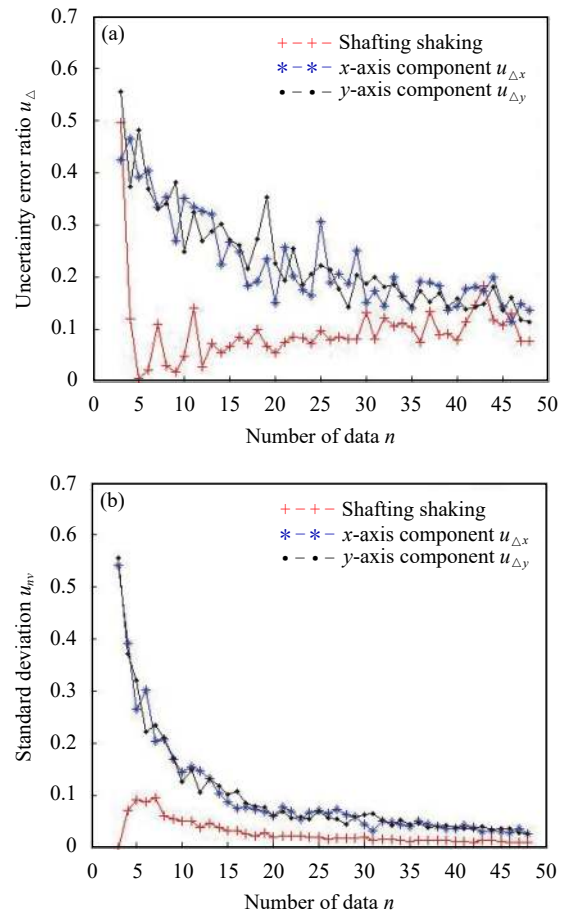


图 6 数据点影响分析。(a) 不确定度偏差比; (b) 标准差

Fig.6 Data point impact analysis. (a) Uncertainty deviation ratio; (b) Standard deviation

3.2 单点测量不确定度

单个测试点的不确定度主要取决于测量仪器的

测量精度 u_{ic} 和被测量值随机偏差 u_{ix} , 一般测量中测试仪器测量精度必须高于被测值至少 3 倍以上, 但当被测值精度较高时测量仪器精度不足会对测量不确定度产生一定影响, 因此单点测试可信度计算时以两个被测量值随机偏差和测试仪器测量精度的平方根与测量值随机偏差之差作为单点测量不确定度 u_t , 即:

$$u_t = \sqrt{u_{ic}^2 + u_{ix}^2} - u_{ix} \quad (14)$$

由上式可见, 当测量仪器测试精度远高于被测值时, 单点测量不确定度趋近于零。设仪器测试精度与被测值随机偏差之比为 k , 则单点测量不确定度比 u_k 可表示为:

$$u_k = \frac{u_t}{u_{ix}} = \sqrt{1+k^2} - 1 \quad (15)$$

其当 k 取 0.1~1 时 u_k 变化曲线如图 7 所示, 由图可见, 随着测量仪器精度变大, 单点不确定度比随之快速上升, 当测量仪器精度与被测值精度接近时, 其测量误差约为被测值的 0.4 倍。

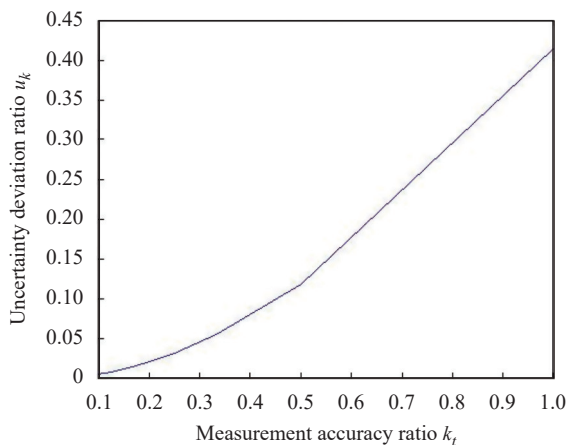


图 7 测量精度影响分析结果

Fig.7 Measurement accuracy affects analysis results

3.3 数据分布偏均匀性影响

常规的不确定度分析基本都基于数据均匀分布的假设, 但是在 PAT 系统装配阶段进行测试时尚未安装电机和角度编码器, 测试时很难保证测试点分布均匀性, 同时在测量时由于人员失误等因素也会造成测量点分布不均。当不存在轴系晃动等误差时, 即使测量点分布不均匀但其依然在理想圆上, 因此对拟合圆不确定度没有影响, 但是由于单点测量不确定度的存在, 当测量点分布不均时, 会影响测试点偏离度的

分布, 造成局部测试点集中, 从而影响拟合精度。为此分析数据分布偏均匀性对不确定度的影响。由图 8 可见在不同测试点数时数据分布偏差角度分别为 5° 、 10° 和 15° 时, 拟合圆圆心不确定度比 u_f 和方差比 u_{fx} 和 u_{fy} , 其中 u_{fx} 和 u_{fy} 为不确定度比 u_f 在 x 轴和 y 轴上的分量, 每个数据点均为 500 组随机数据拟合结果的最大值。由图 8(a) 与 (b) 结果曲线可见 u_{fx} 和 u_{fy} 随着偏角增大而增大, 在 15° 时最大可达到约 0.11。在同一偏离角度时不确定度随着测量点数增加而增大, 这是由测试点数增加, 相邻两测量点角度间隔减小, 角度偏离引起的数据不均匀性变大造成的。由图 8(c) 可见, 数据不均匀性对测量结果方差影响较小。

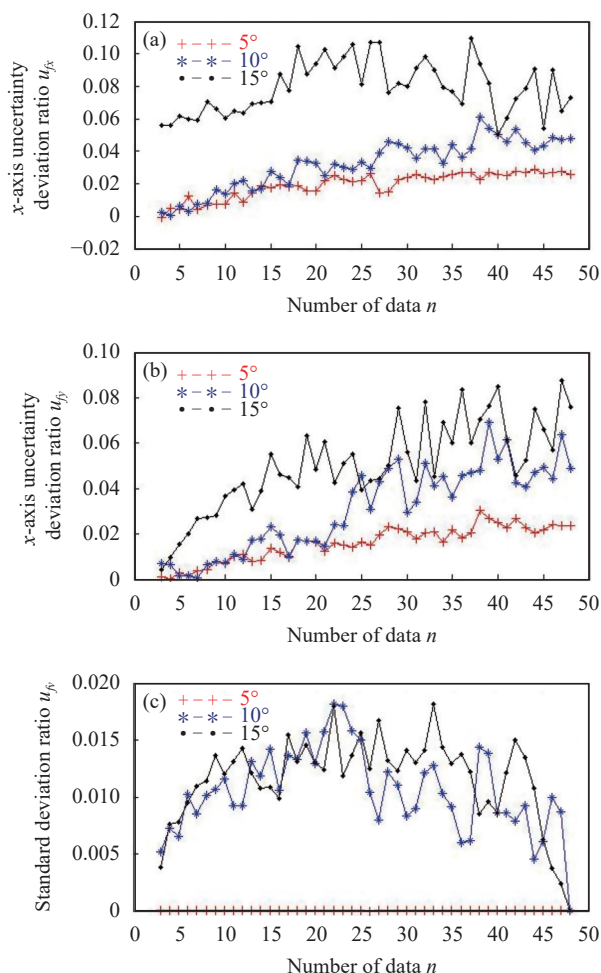


图 8 数据分布影响分析结果。(a) x 轴不确定度比; (b) y 轴不确定度比; (c) 标准差比

Fig.8 Data distribution affects analysis results. (a) x axis uncertainty deviation ratio; (b) y axis uncertainty deviation ratio; (c) Standard deviation ratio

根据以上分析测试时平行度和轴系晃动测量不确定度 u_{z_l} 和 u_{z_h} 为:

$$u_{z_l} = u_{z_h} = \sqrt{(u_{\Delta}u_{ix})^2 + u_k^2 + (u_f u_{ix})^2} \quad (16)$$

式中: u_{ix} 为被测量值随机偏差; u_{z_l} 和 u_{z_h} 的单位与 u_{ix} 相同。

4 同轴 PAT 机构测试

采用 matlab 编写了拟合程序并对某双光栅 PAT 机构进行了检测, 其同轴度要求优于 10"。检测时自准直仪与 PAT 放置在同一光学平台上, PAT 通过工装固定在光学平台上保持不动, 此时两者间位置可保持不动, 放置引起的误差较小。测试时转动到每个测试点后静止 3~5 s 再进行测量, 减小操作引起的 PAT 检测误差。检测现场如图 9(a) 和图 9(b) 所示。测量时每个轴系在一周内平均分布了 16 个测量点, 测量数据的拟合结果如图 9(c) 所示, 图中蓝色点为两组测量数据点, 两个圆形轨迹为基准镜法线旋转理论圆, 中心两个红色点为两轴系轴线空间角位置点。根据拟合结果轴系 1 轴线角度坐标为 (72.56", -2.74") 轴系 2 轴线角度坐标为 (76.70", 0.14"), 两轴平行度误差为 (4.14", 2.98"), 综合平行度误差为 5.1", 两轴系晃动误差分别为 3.96" 和 3.12"。由不平行度和轴系晃动引起的两轴综合摆动误差按两轴平行度误差分别与两轴晃动误差平方根计算为 (6.5", 5.8")。系统轴系晃动误差预估 u_{ix} 取为 4", 该测试采用 TriAngle 的 TA HS 300-57 型自准直仪, 测量精度为 0.75"。测试时测量点数量取为 16, 测试点分布误差小于 10°, 则测量结果不确定度 u_h 为:

$$u_h = \sqrt{(0.2 \times 4)^2 + 0.01^2 + (0.11 \times 4)^2} = 0.8" \quad (17)$$

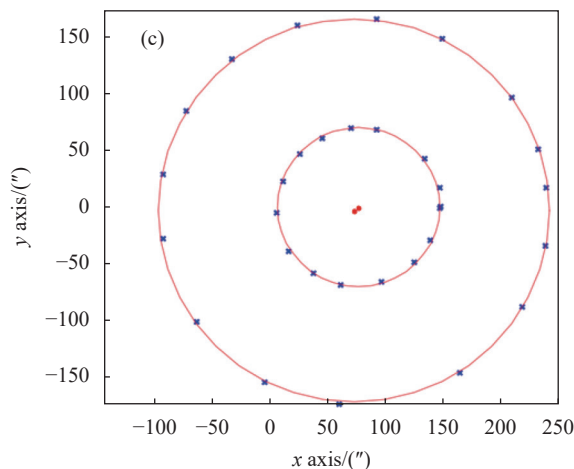
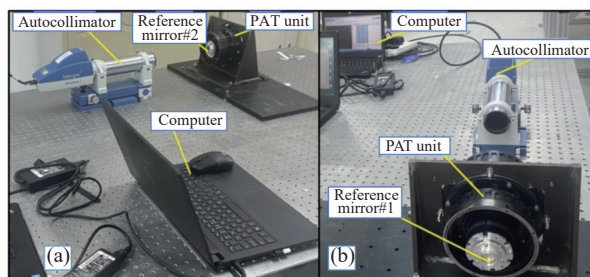
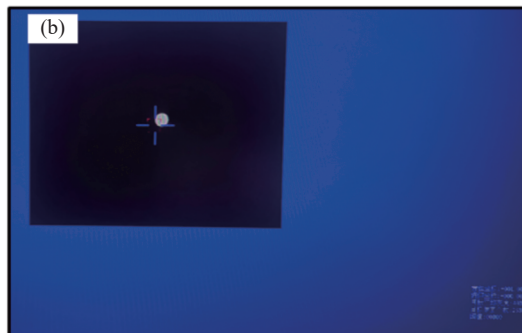
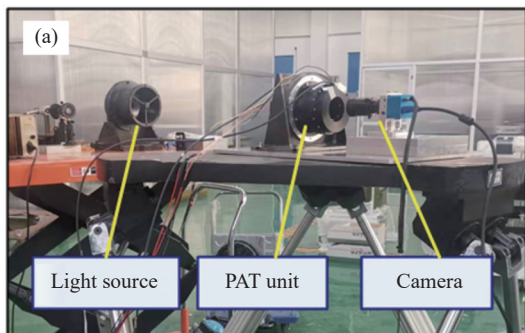


图 9 测试现场及测试结果。(a) 现场图#1; (b) 现场图#2; (c) 测试结果

Fig.9 Test site and test result. (a) Figure at the crime scene#1; (b) Figure at the crime scene#2; (c) Test result

可见, 采用 TA HS 300-57 型自准直仪进行 16 点测量时, 该方法测试精度完全满足系统平行度优于 10" 的测试要求。

系统完成液晶光栅装调后通过光学方法对系统轴系性能进行了标定, 标定现场如图 10(a) 和图 10(b) 所示。在 PAT 机构前方安放平行光源, 后端安装 CCD 相机, 平行光管发射的平行光通过 PAT 机构后被后端 CCD 相机接收, CCD 可以提取接收光斑的脱靶量从而测量出光轴偏差程度, 测试前将三者光轴调



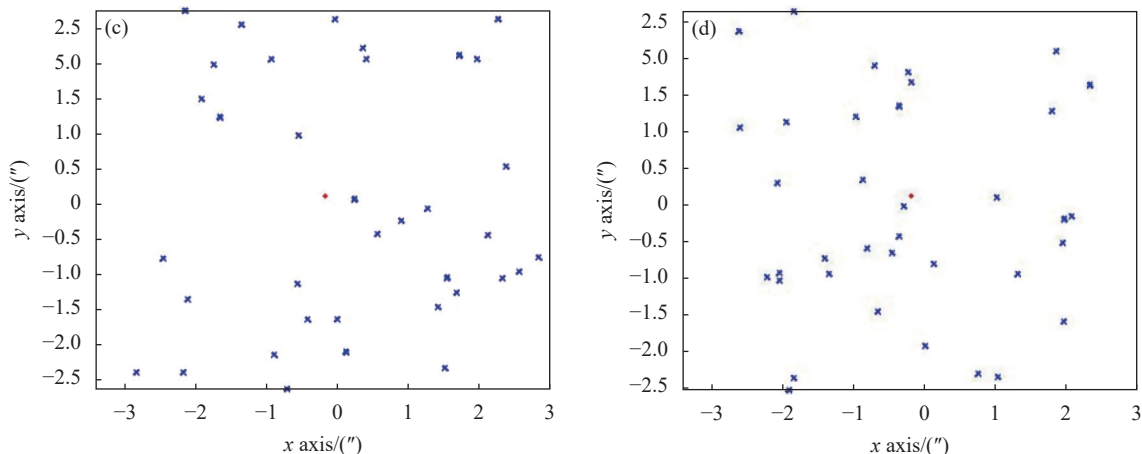


图 10 轴系误差测试结果。(a) 测试现场图; (b) 光斑示意图; (c) 测试结果 1; (d) 测试结果 2
 Fig.10 Shafting error test results. (a) Test site; (b) Spot pattern; (c) Test result 1; (d) Test result 2

为同轴。测试时首先通过电机和编码器驱动控制两个光栅旋转到零位位置,此时平行光管发射平行光经过 PAT 机构后在 CCD 上的成像光斑位于视场中心位置,然后沿相同方向同步旋转两个光栅,在不存在轴系晃动时,光斑会保持同一位置不动,当轴系晃动时其光斑会发射摆动,测量出光斑摆动角度即为两个轴系的综合晃动误差。图 10(c) 和图 10(d) 为两次 PAT 机构旋转 1 周并均匀取 36 个测量点后的 CCD 光斑位置分布图,可见系统综合轴系摆动误差在 x 轴和 y 轴上分量最大值测试 1 约为 (5.82", 5.48"), 测试结果 2 约为 (6.01", 5.66"), 与装配过程中测试结果偏差为 (10%, 5.5%) 和 (7.6% 和 2.4%)。

5 结 论

文中针对同轴 PAT 机构高精度、高可信度平行度测量问题,提出了基于自准直原理的平行度测试方法并设计了测试装置,同时对测试中的误差环节进行了研究,分析了测试方法的不确定度。该测试方法应用在双光栅 PAT 机构中,通过实验和测试证明装配过程中测试结果与最终状态测试结果偏差小于 10%,证明其测试精度较好,可有效测量同轴转动轴系间平行度。

参考文献:

[1] Song Y S, Chang S, Tong S F, et al. Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*,

2016, 43(12): 1206004. (in Chinese)
 [2] Li X M, Wang L M, Li X, et al. Optimization of integrated tilt-mirror for laser communication antenna [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 50(11): 20210143. (in Chinese)
 [3] Ostaszewski M, Harford S, Doughty N, et al. Risley prism beam pointer[C]//SPIE, 2006, 16304: 630406.
 [4] Li S F, Xu W D, Zhao C Q. Determination and optimization of Risley prisms scanning parameters in laser 3D imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190508. (in Chinese)
 [5] Zhu J G, Li F, Huang Q T, et al. Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0502001. (in Chinese)
 [6] Guo Y Z, Yang X J, Yang X J, et al. Simulation study of rotating double optical wedge vectoring optics path based on Matlab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 856-860. (in Chinese)
 [7] Zhao J L, Wu Y M, Gao L M. Detecting method of right-angled prism tilting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 228-232. (in Chinese)
 [8] Guo H, Wang J Z, Luo C Z. Influence of prism with large-angle tilt on aiming accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 138-142. (in Chinese)
 [9] Li A H, Sun W S, Yi W L. An overview of inverse solution expressions for Risleyprism-based scanner [C]//SPIE, 2016, 9947: 99470Z.
 [10] Zhang E L. Design of the measuring device for the coaxiality of the winding drum of the hoist reducer [J]. *Mechanical Engineering*, 2021(1): 101100-101104. (in Chinese)
 [11] Liu X Y, Liu G D, Cao Y, et al. Control method of axial

- coaxiality extension error in three- coordinate detection [J]. *Mechanical Engineering*, 2022(1): 18-20. (in Chinese)
- [12] Ye Z B, Lu Y H, T J, et al. Study on coaxiality measurement system of compound gear shaft based on non-contact optic [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(3): 393-403. (in Chinese)
- [13] Zou Z H. Design of a research platform to measure bore alignment error based on laser calibrate and photoelectric detecting technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Li Z S. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [15] Zhang L W, Wang W B, Wang R, et al. Precision analysis of Risley prism beam pointing control based on forward solution process [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 507-153. (in Chinese)
- [16] Liu Z, Wang Q D, Wang C, et al. Analysis obeamsteering control precision for Risley prisms based on forward solution [J]. *Chinese Optics*, 2021, 50(11): 1105003. (in Chinese)
- [17] Zhang M X, Guo X H. A Study on Grating Diffraction with Slating Incidence Ray [J]. *Journal of Tianshui Normal University*, 2006, 26(5): 44-47. (in Chinese)

Coaxiality measurement and uncertainty analysis of rotating shafts based on autocollimation

Li Xiaoming^{1,2}, Zhu Guoshuai^{1,2}, Guo Minghang^{1,2}, Liu Yingze^{1,2}, Zhang Chong³

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. The First Military Representative Office, Shenyang Military Representative Bureau of PLA, Army Equipment Department in Changchun, Changchun 130022, China)

Abstract:

Objective In laser communication and photoelectric tracking systems, the pointing, acquisition and tracking (PAT) mechanism based on optional grating or wedge has been used to adjust the angle of the optical axis. This structure is light in weight and small in size, which is very beneficial to the lightweight and miniaturization of the system. Since the coaxiality error of the two rotating axes of the structure seriously affect the performance of the PAT mechanism, it is necessary to strictly ensure the parallelism of the two axes during mechanical assembly. For the cross-tracking frame gimbal, the precision of shafting angle position depends on the verticality of two axes, which can be measured by autocollimator with optical mirror. But in optional grating or wedge PAT system, the gimbal is characterized by two rotating axes coaxially arranged to drive two gratings to rotate respectively, and the test method for cross-tracking frame gimbal is not applicable. The existing parallelism measurement methods, such as contact measurement and non-contact measurement, are straight-line measurements, contact measurement includes micrometer measurement and three-coordinate measurement, and the required angular deviation between two rotating axes of a coaxial turntable can be obtained only after data conversion. When the diameter of the distribution circle is small, its accuracy is low, and there are problems such as inconsistent conversion standards, poor conversion data accuracy, and low confidence. Therefore, it is necessary to establish the methods for angle parallelism measurement of grating or wedge PAT system with high precision, high reliability and high convenience to solve the engineering problems in the process of gimbal test and assembly.

Methods A non-contact optical measurement method is proposed, and it uses an autocollimator as the only reference to measure the axis angle of two coaxial shafting without moving the autocollimator and the test gimbal in the test (Fig.4). Data processing is used to eliminate the influence of shafting sloshing to get the spatial position

of the rotating axes. By comparing the angular deviation of the two axes, the parallelism of the two rotating axes can be measured. A semi-reverse semi-transparent reference mirror is designed in order to solve the problem of mutual occlusion of mirrors (Fig.4). The semi-reflection semi-transmission reference mirror can reflect collimating laser when testing its own shafting and project self-collimating light when testing another shafting (Fig.5). The spatial position of the axis of the rotating shafting is obtained by fitting the measured data with a least squares. Then the influences of the number of data points (Fig.6), the uniformity of data distribution (Fig.7), the dispersion of data distribution (Fig.8) and the accuracy of test points on the accuracy of test results are analyzed.

Results and Discussions The fitting program is compiled by MATLAB, and a double-grating PAT mechanism is tested, the required coaxiality is better than $10''$. In the test, 16 measuring points data are measured by TAHS 300-57 autocollimator whose measuring accuracy is $0.75'$, and the distribution error of measuring points is less than 10° . Then the uncertainty of the measurement result is $0.8''$, and the measuring precision of this method fully meets the requirement. In the test the error of comprehensive parallelism is $5.1''$, and the sloshing error of two shafting is $3.96''$ and $3.12''$ (Fig.9). The two-axis combined swing error caused by unparallelism and shafting sloshing is calculated as the square root of two-axis parallelism error and two-axis sloshing error respectively ($6.5''$, $5.8''$). After the alignment of the liquid crystal grating, the performance of the system axis is calibrated by optical method. In the two tests, the maximum value of the swing error of the synthetic shafting on the x -axis and y -axis is about $5.82''$ and $5.48''$, and the maximum value of the swing error on the x -axis and y -axis is about $6.01''$ and $5.66''$ (Fig.10). The deviation between the assembly period and the test results is (10%, 5.5%, 7.6% and 2.4%) respectively.

Conclusions In this study, a parallelism testing method based on auto-collimation principle is proposed, and a testing device is designed. It innovatively realizes that the angle and parallelism of two parallel shafting axes can be measured under the same reference without adjusting the test and the tested equipment. This method only needs one test equipment, which eliminates the measurement and transformation errors in the benchmark conduction and transformation when the traditional multiple test equipment is used for joint measurement, and improves the test accuracy and efficiency. Then the error link in the test is studied, and the uncertainty of the test method is analyzed. The method of the paper can solve the problem of high precision and high reliability parallelism measurement of PAT mechanism. It is used in an coaxial PAT gimbal with grating. Through the experiment and test, it is proved that the deviation between the test result and the final-state test result is less than 10%. It is proved that the testing precision is good and the parallelism between coaxial rotors can be effectively measured.

Key words: PAT; coaxiality; data fitting; uncertainty; rotating shafting

Funding projects: Aviation Science Foundation (202000080Q8001); Industrial Optimization Research Project of Jilin provincial Department of Education (JJKH20220756CY)