

激光通信粗指向机构轴系精度测量方法

叶 壮 张述卿 刘雪鹏 李 臣 李 光 李兴光

(北京控制工程研究所, 北京 100190)



摘要: 基于某型号 CPA 机构的研制过程, 介绍了角秒级轴系倾角回转误差和垂直度测量的工艺难点。结合测试实例介绍了此 CPA 机构轴系精度测量的测量原理、配置方法以及数据处理过程。该工艺方法的实施为机构顺利研制奠定了基础, 并对同类高精度空间跟踪指向机构轴系精测有借鉴和推广意义。

关键词: 激光通信粗指向机构; 轴系组件; 垂直度; 倾角回转误差

Measurement Method of Spindle Precision for Laser Communication Coarse Pointing Assembly

Ye Zhuang Zhang Shuqing Liu Xuepeng Li Chen Li Guang Li Xingguang

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190)

Abstract: Based on the development of a certain model CPA (Coarse Pointing Assembly), the technical difficulties in measuring the wobble error and the verticality of the arcsec level spindle are explained in this paper. The measurement principle, configuration and data processing method are introduced in the illustration of the CPA spindle test case. This measurement method is significant for development of the CPA, and can be applied to the similar space high-precision pointing and tracking mechanism.

Key words: laser communication coarse pointing assembly; spindle; verticality; wobble error

1 引言

在无线通信领域, 激光通信具有频带宽、速率高、抗干扰能力强的特点, 是下一代空间通讯技术重要的发展方向。自上世纪80年代, 欧美等具有宇航能力的发达国家就已经开始空间激光通信系统的研制。2001年11月, 欧空局SILEX系统成功进行了首次星间激光通信试验^[1]。此后, 美日等国也相继研制了各自的空

间激光通信终端, 并成功开展了星地或星间的激光通信试验。目前国内, 以航天院所、中科院和高校为主要力量的多家单位在理论基础、关键技术和终端系统等不同领域、不同阶段开展研究, 并取得了一定成果。

空间激光通信终端通常由光学分系统、通信分系统、跟踪捕获分系统和总控分系统组成。其中捕获跟踪分系统(简称APT)包括粗、精两级指向机构, 功能是驱动光学负载实现捕获、对准和跟踪, 是激光通信链路建立的前提。激光通信粗指向机构(简称CPA)作为捕获跟踪分系统的主要组成部分, 负责光学负载的大范围二维转动, 保证光学信号进入并稳定在后部精跟踪端视场内。虽然名为粗指向机构, 但相较于射频通信系统采用的天线驱动机构, 其指向精度要求更高, 轴系精度测量难度更大。

行业内轴系精度标定方法主要参考GJB 1801, 在机床、仪器等行业广泛应用^[2~8]。本文所述的CPA机构是为某卫星通信终端研制的重点单机。其角秒级轴系精度达到了目前国内空间跟踪指向类机构的领先水平。基于该型号CPA机构的结构特点, 介绍了一种角

作者简介: 叶壮(1984), 工程师, 机械电子工程专业; 研究方向: 空间机构精密装配工艺。

收稿日期: 2019-12-10

秒级轴系精度的标定方法。

2 CPA 机构简介

如图1所示，该CPA机构采用经纬仪式结构，由垂直布局的方位轴系和水平布局的俯仰轴系组成，两轴系通过U形框架连接，光学负载安装在U形框架内由两轴系共同驱动实现二维转动。

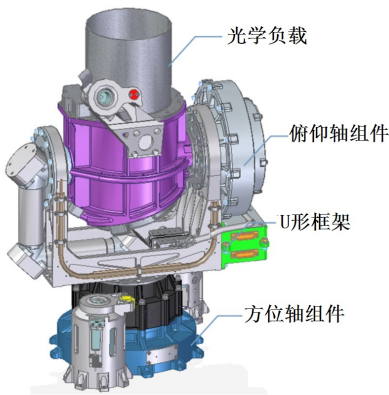


图 1 某型号 CPA 机构外观图

为实现机构高指向精度，该CPA机构在轴系装配阶段需精确测量以下两项精度指标。

- a. 轴系倾角回转误差；
- b. 轴系回转轴线平均线与安装基准面垂直度误差。

其中，倾角回转误差表征轴系在转动过程中回转轴线的稳定程度，而回转轴线与安装基准的垂直度则表征机构轴系安装的角位置关系。上述两项轴系精度是CPA机构实现高精度指向的前提。

3 工艺难点分析

为满足转动功能需求，以轴承为核心的轴系机械结构不可避免地存在由零件形位误差、装配位置误差、结构间隙、低刚度零组件微变形等因素累积而成的结构误差，这些结构误差共同作用对轴系精度产生影响。对于角秒级精度的轴系组件，常规方法中的很多可忽略的微小误差因素都需要予以关注，进而增加了精度测量的工艺难度。其主要难点体现在方法设计、基准法线和回转轴线标定以及数据分析处理三个方面。

在工艺方法设计层面，需要考虑测量仪器的精度和使用特点。常规机械接触式测量方法无法满足角秒级精度需求，需要建立以高精度光学测量设备为核心

的测量装置。工装设计时应合理布局结构和设计精度，避免装配应力产生微变形而影响测试结果。此外，在实际操作时还需要考虑测试温度、地基平台稳定性等环境因素的影响。

在法线和轴线标定层面，需要评估零组件形貌误差对标定精度的影响，准确将虚拟的基准法线和轴线转移到可测量的光学镜面上。对于基准面法线，工装、零件微米级的形面误差都可能影响标定精度，如何保证法线标定的准确性和可重复性是一项主要难点；对于测量轴线，如何保证理论轴线与工艺镜面垂直一致，避免安装工艺误差是需要解决的主要问题。

在数据处理层面，一方面利用特征数据甄别工艺误差，另一方面重复测量实现数据互验是减小随机误差提高测量准确度和置信度的重要手段。而这些方法的应用都不免会使计算过程更加繁复，如何提高计算效率也是测量工艺方法最终实现的重要前提。

4 测量原理介绍

为满足该CPA机构高精度轴系标定需要，构建了图2所示以自准直仪、平晶和平面反射镜为主要组成的光学测量装置。平晶用于标定安装基准面；平面反射镜随轴系转动用于标定回转轴线。用自准直仪测量反射镜转动过程的法线倾角变化和两镜面法线间的角度关系，从而标定倾角回转误差和垂直度误差。

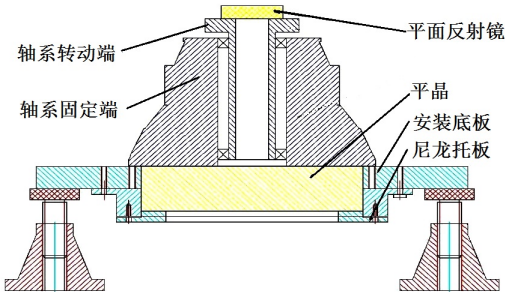


图 2 工装结构示意图

该方法将利用CPA机构轴系内的通光口径，采取分步标定的方式将基准法线和回转轴线先后置于同一自准直仪视场内，实现了倾角回转误差和垂直度误差的同时测量。

在基准面法线标定方面，由于平晶具有亚微米级面形的优势，在与微米级安装基准平面贴合时具有较高的准确性和可重复性。此外，在工装设计时，使用非金属零件支撑平晶安装，通过尺寸链控制，让非金

属零件承受定量可控的微变形,既能使平晶与基准面紧密贴合也能避免结构微应力变形或平晶面形破坏对测量结果产生的负面影响。

在回转轴线标定方面,利用轴系转动实现虚拟回转轴线平均线的拟合。此外,在轴线回转过程中,平面反射镜安装误差具有一阶特性,可以利用频域分析消除。

4.1 安装配置及数据采集

如图3所示,将被测轴系牢固安装在安装底板上,并置于稳定的光学平台。用尼龙托盘工装将平晶靠紧被测轴系安装基准面。利用五棱镜折转光路,将自准直仪沿轴线方向准直平晶,当前自准直仪 X 轴、 Y 轴示数即为安装平面法线基准,记为 X_b 和 Y_b 。保持自准直仪和五棱镜位置不变,在被测轴系转动端安装平面反射镜。驱动被测轴系转动,在均布 n 点位置,记录自准直仪测量读数,第 i 点坐标记为 X_i 和 Y_i 。

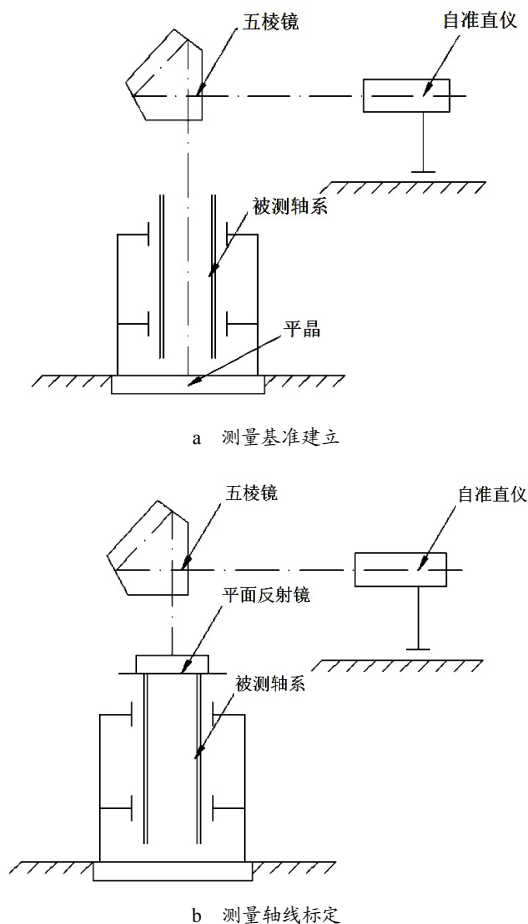


图3 轴系精度标定过程说明图

4.2 数据计算与误差评定

4.2.1 倾角回转误差计算

a. 计算零次和一次傅里叶系数 a_{x0} 、 a_{y0} 和 a_{x1} 、 a_{y1} 、 b_{x1} 、 b_{y1} :

$$a_{x0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$a_{x1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n X_i \cos \frac{2\pi i}{n} \quad (2)$$

$$b_{x1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sin \frac{2\pi i}{n} \quad (3)$$

$$a_{y0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4)$$

$$a_{y1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \cos \frac{2\pi i}{n} \quad (5)$$

$$b_{y1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \sin \frac{2\pi i}{n} \quad (6)$$

b. 计算第 i 点倾角误差 E_i :

$$\Delta X_i = X_i - a_{x0} - a_{x1} \cos \frac{2\pi i}{n} - b_{x1} \sin \frac{2\pi i}{n} \quad (7)$$

$$\Delta Y_i = Y_i - a_{y0} - a_{y1} \cos \frac{2\pi i}{n} - b_{y1} \sin \frac{2\pi i}{n} \quad (8)$$

$$E_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \quad (9)$$

c. 评定被测轴系倾角回转误差 E :

$$E = \max(E_i) \quad (10)$$

4.2.2 轴线垂直度计算

计算轴线垂直度 V :

$$V = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - X_b\right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - Y_b\right)^2} \quad (11)$$

4.3 计算说明

由于自准直仪测量坐标系的正交特性, X 轴采样数据实际是同一误差在 Y 轴相位相差 90° 时采样数据的重复测量,所以,倾角回转误差和垂直度误差的两轴计算数据具有相互验证性,提升了测量结果的置信度。由于倾角回转误差具有一定的随机性,因此在结果评定时按式(10)进行最大包络。

为提升效率和工艺过程的可操作性,编写了专用计算程序。程序读取采样数据后能够自动生成测试结果,并以图形化方式显示误差幅值、相位以及频域特征等信息。计算程序的使用不仅简化了原本复杂的计算过程,同时使计算结果更为直观,方便后续工序进行轴系校调。

5 经纬仪式 CPA 机构轴系精度计算示例

以该经纬仪式 CPA 机构方位轴精度标定为例。按上述方法搭建如图 4 所示测量装置，自准直仪准直基准面平晶建立测量基准，如表 1 所示，安装平面反射镜后转动轴系在间隔 15° 的 24 个位置记录自准直仪测量数据。

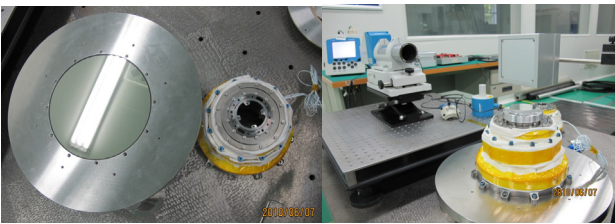


图 4 CPA 机构方位轴精度测量

表1 测量数据(″)

测量位置	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°
X_i	11.8	-3.4	-16.0	-29.4	-40.8	-49.7	-55.6	-57.0
Y_i	-51.9	-54.5	-54.3	-50.1	-41.4	-31.5	-19.2	-6.3
测量位置	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°
X_i	-56.6	-50.2	-41.9	-31.2	-18.9	-4.5	9.8	21.8
Y_i	8.1	22.1	34.3	41.7	48.3	51.3	50.8	45.7
测量位置	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
X_i	32.0	41.9	48.1	50.3	49.8	44.3	34.3	22.1
Y_i	40.6	28.1	16.8	3.0	-12.6	-24.2	-37.3	-47.0

按式 (10) 和式 (11) 计算得到该轴系倾角回转误差小于 2.3″，回转轴线平均线与方位轴安装面垂直度误差 5.3″，误差分布和倾角相位如图 5 所示。采样数据的频域特征如图 6 所示，平面反射镜安装工艺误差产生的一阶谐波分量幅值占数据主要部分，计算时按式 (7) 和式 (8) 被消减。

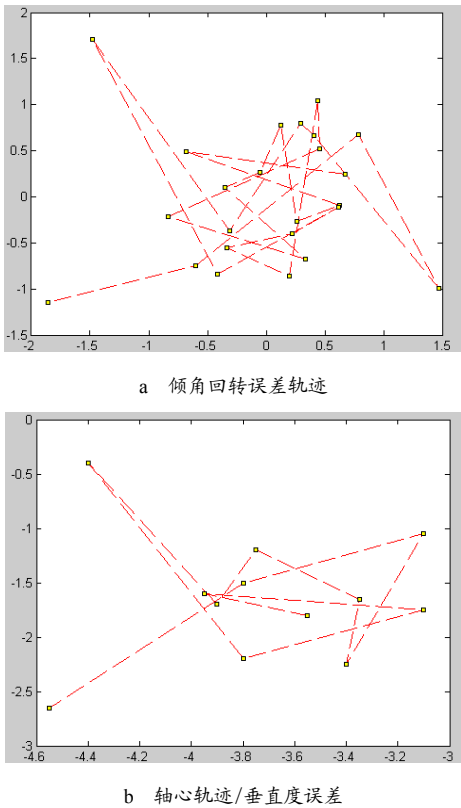
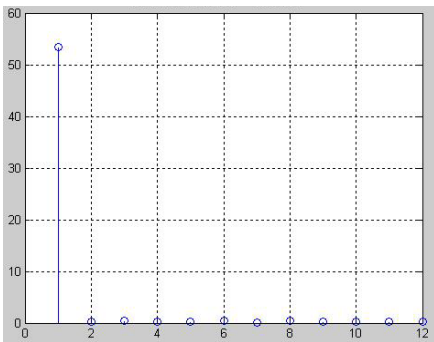
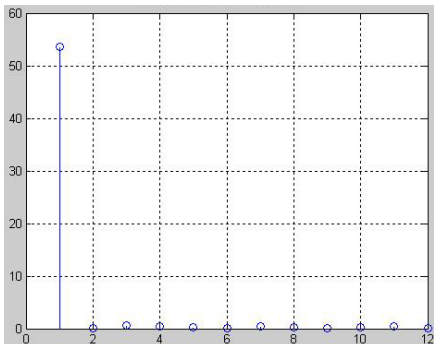


图 5 倾角回转误差和垂直度误差分布图



a Y 轴向频域图 (含一阶频率)



b X 轴向频域图 (含一阶频率)

图 6 采样数据频域特征图

6 结束语

基于某型号经纬仪式 CPA 机构的研制过程，介绍了该产品角秒级轴系精度测试的工艺原理、方法和实

现过程。通过合理选择工艺装备、优化工装设计、消除工艺误差等方式,解决了高精度轴系基准法线和回转轴线标定的工艺难题。并在工艺实现的基础上编写专用计算程序提高了计算效率,增加了测量工艺的可实现性。该工艺方法的实施为该经纬仪式 CPA 机构顺利研制奠定了基础,并对同类高精度空间跟踪指向机构轴系精测有借鉴和推广意义。目前该 CPA 产品已经随卫星发射入轨,在轨运行良好。

参考文献

- 1 姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010
- 2 贾宏进, 秦石乔, 胡浩军, 等. 轴系倾角回转误差与垂直度测量方法[J].

[illegible]

(上接第 21 页)

涂胶量的多少、底座的粘接面与安装面的平行度、被粘接件重力、手动排气泡时粘接面法向用力大小等。

底座的粘接面与安装面的平行度对粘接精度影响较大，主要原因是胶的流动性，其中流动性环胶 6101/TY650 大于 Armstrong A-12 环氧胶，而使用硅橡胶 GD414 则几乎没有影响，这种胶的流动性较差，且固化收缩很小。

从粘接过程可以看出,当底座平行度较差时,需要在胶固化过程中进行多次调整,都能保证最终的粘接精度,底座平行度较好时,则不需要调整(或调整次数很少)就可以保证最终的粘接精度。根据粘接实验,建议底座粘接面平行度公差 0.015mm。

通过环境实验和力学分析可知,硅橡胶 GD414 粘接的结构对胶层厚度不敏感(实验试件的胶层控制厚度在 0.03~0.10mm),经过力学和热学实验,均没有发生裂纹和破坏,且基准镜指向精度和位置精度都没有发生变化。

5 结束语

通过实验和分析可知,综合考虑基准镜和胶层应

计量技术, 2008(11): 25~28

- 3 孙郅佑, 安晨辉, 杨旭, 等. 超精密机床主轴回转误差在线测试与评价技术[J]. 制造技术与机床, 2015(9): 118~123
- 4 任顺清, 王俊柱. 用水准仪测试倾角回转误差的数据处理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 837~847
- 5 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. 谐波分析方法在提高精密转台回转精度中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 275~278
- 6 王志臣, 郭爽, 王国强. 2m望远镜方位轴系倾角回转误差分析[J]. 长春理工大学学报, 2014, 37(4): 32~35
- 7 任顺清, 曾庆双. 带框架轴系倾角回转误差的测试结果分析[J]. 工具技术, 2000, 34(9): 33~35
- 8 任顺清, 房振勇, 吴广玉, 等. 竖转轴系倾角回转误差的两种测试方法的比较[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 74~78

力分布情况,对于钛合金底座+环胶 6101/TY650 环氧胶+K9 玻璃基准镜(15mm×15mm×15mm),最优胶层厚度为0.04~0.06mm。

选用激光位移传感器量化控制胶层厚度, 并进行粘接实验, 操作人员通过练习, 能够很快掌握胶层厚度的控制方法, 为提高粘接可靠性, 一致性提供了保证。

建议底座粘接面平行度公差 0.015mm。

参考文献

- 1 彭海俊. 几何参数对复合材料厚胶层胶接的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017
- 2 陆玉婷, 王伟之. 大口径胶粘主镜装调的有限元分析[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(1): 39~44
- 3 李媛, 王胜男, 蔡彬, 等. 影响汽车板材粘接性能的研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(1): 52~55
- 4 范志刚, 常虹, 陈守谦. 胶粘光学元件的热应力和变形分析[J]. 光学技术, 2011, 37(35): 366~369
- 5 刘强, 何欣, 张峰, 等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2229~2236