

文章编号 1004-924X(2024)16-2513-10

星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调系统

任同群^{1,2}, 曹润赟², 张国锐³, 石 权², 崔 璨³, 孔 帅², 王晓东^{1,2*}

- (1. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

摘要: CMOS 电路板靶面是星敏感器结构中的关键部分, 其安装姿态影响离焦距离的准确性, 进而影响星敏感器成像性能。因此, 靶面的装调是确保星敏感器成像质量的重要环节。当前, 靶面装调主要依靠人工装调完成, 存在装调精度低、产品一致性差、周期长等问题, 导致产品的良品率较低。为此, 研制了一台星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调设备。采取非接触式测量方式, 集成测量模组与微动平台完成 CMOS 靶面与基准面的相对位姿测量, 解决由星敏感器特殊结构造成的狭小空间内高精度测量难题。设计调整机构实现零件任意角度翻转, 消除测量方向与装配方向不一致造成系统结构布置复杂的影响。最后, 对测量系统进行精度分析, 采用局部枚举法开发了调整垫片研磨量算法, 解决由平面姿态单一已知量反求多垫片研磨量的欠定问题。实验结果表明: 该系统可实现靶面自动装调功能, 测量系统的重复性为 1.6', 满足技术指标要求。

关键词: 星敏感器; CMOS 电路板靶面; 自动化装调; 精度分析

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243216.2513

Automatic assembly and adjustment system for target surface of CMOS circuit board of star sensor

REN Tongqun^{1,2}, CAO Rungui², ZHANG Guorui³, SHI Quan², CUI Can³,
KONG Shuai², WANG Xiaodong^{1,2*}

- (1. Dalian University of Technology, State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian 116024, China;
2. Dalian University of Technology, Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116024, China;
3. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China)
* Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

Abstract: The target surface of the CMOS circuit board is a key part of the star sensor structure, and its assembly attitude affects the accuracy of the defocus distance, and then affects the imaging performance of the star sensor. Therefore, the assembly and adjustment of the target surface is an important link to ensure the imaging quality of the star sensor. At present, the assembly and adjustment of the target surface is mainly completed by manual assembly and adjustment, and there are some problems, such as low preci-

收稿日期: 2024-05-16; 修订日期: 2024-06-07.

基金项目: 国防基础科研计划资助 (No. JCKY2022203B006)

sion, poor product consistency, long cycle and so on, resulting in low rate of quality products. For this reason, an automatic assembly and adjustment equipment for the target surface of CMOS circuit board of star sensor was developed. The non-contact measurement mode was adopted, and the measurement module and fretting platform were integrated to complete the relative position and attitude measurement between the CMOS target surface and the datum surface, which solved the problem of high precision measurement in the narrow space caused by the special structure of the star sensor. The design adjustment mechanism could flip the parts at any angle and eliminate the influence of the complex layout of the system structure caused by the inconsistency between the measuring direction and the assembly direction. Finally, the accuracy of the measurement system was analyzed, and the algorithm of adjusting gasket grinding amount was developed by using local enumeration method to solve the problem of under-determination of multi-gasket grinding quantity from a single known quantity of plane attitude. The experimental results show that the system can realize the function of automatic assembly and adjustment of the target surface, and measurement repeatability of the system is $0.8'$, which meets the technical requirements.

Key words: star sensor; target surface of cmos circuit board; automatic installation and adjustment; precision analysis

1 引言

星敏感器是惯性导航系统中的重要器件之一^[1-2],主要功能是通过观测天体中恒星位置来提供准确的空间姿态信息^[3],广泛应用于航天飞行器导航中。CMOS 电路板靶面是星敏感器的核心部件,其装调精度直接影响成像质量^[4-5],进而影响惯性系统的性能。

CMOS 电路板靶面与基准面的平行度测量是装调的基础,但在实际测量中,测量基准面和 CMOS 靶面分别位于星敏感器支架两侧,且需要经过圆柱形深腔结构,参考图 1 所示。这种结构不仅意味着测量手段的选择受限,而且测量精度与测量范围难以协调。此外,靶面测量方向与螺钉锁付方向相反,且调整垫片难以夹持固定,使得调整机构集成、布置以及自动化实现较为困难。长期以来,该类型 CMOS 电路板靶面的装调方式主要依赖工人手动操作,装调过程中具有盲目性和经验化^[6-7],难以保证靶面装调效率和成品率。因此,亟待研制星敏感器 CMOS 电路板靶面自动化装调设备,满足兼顾装调效率和精度的要求。

由于 CMOS 靶面作为光学敏感面,不能受到损伤,故非接触式测量是该测量问题的首选测量手段^[8-9]。结合本任务中圆柱形深腔结构的限制,检测方法应重点考虑激光测量技术^[10]、视觉测量

技术^[11]等技术。YU^[12]等人开发了一种利用全光纤微波光子混合技术实现狭小空间内转子与定子之间轴向间隙的测量系统,在 $0.5\sim 20.5\text{ mm}$ 范围内,轴向游隙的测量精度优于 $10.5\text{ }\mu\text{m}$,由于需要处理高速、高频率的微波信号,该系统的稳定性较差。Kawasue K^[13]等人设计了一种可实现对复杂环境下管道内径测量的机器人,通过相机获取图像进行处理,解决了管道内径难以测量的问题,但平均测量误差为 0.5 mm ,测量精度较低。大连理工大学^[14]采用电涡流位移传感器对狭小空间下的关键特征进行测量,平均精度可达 0.02 mm ,但在测量时需要频繁调整位置,增加了测量的复杂性和难度。缪东言^[15]等人采用基于双线激光的单目主动视觉姿态测量方法,通过提取线激光中心点并计算转换矩阵得到平面的姿态,但需在 $100\sim 200\text{ mm}$ 的空间内使用,不适用于本系统的测量环境。

对于复杂机构集成、布置以及自动化实现,Shen^[16]等人提出了一种微型薄片零件高精度装调系统,该系统基于激光距离传感器和多操作模块,完成装配任务的姿态误差小于 0.6° ,但多操作模块具有重复自由度,结构冗余。法国弗朗什孔泰大学 FEMTO-ST 研究所 Kanty Rabenoro-soa 等人研制了一种用于 MOEMS 器件装配的微型装配站^[17-18],装配站包含视觉系统和两个机械手,机械手用于操纵支架、调整基板位置以及校

正运动轨迹,但两个机械手作为调整机构需在装配过程中频繁切换使用,降低了可靠性。哈尔滨工业大学杨永猛,利用多维显微视觉结合高精度位移平台,搭建 ICF 靶丸充气管自动装配系统^[19]。该系统通过五维精密光纤调整架实现五自由度的空间运动,能够达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的位置定位精度,但由于需不断进行五个维度的调节,效率较低。天津大学秦国花^[20]设计了一台二维导轨搭配龙门结构的星敏感器成像面姿态检测设备,以立方镜为参考基准,通过激光位移传感器和相机实现成像面倾斜角检测,文中待检测工件均位于同一表面上。而本装调任务中,CMOS 靶面和基准面位于不同水平面,测量难度相对增大。上述系统主要聚焦于视觉检测与多自由度定位机构,为本装调系统的研制提供了很好的借鉴思路。

综上所述,根据待装配零件的特征和相关设备的优缺点,研制了星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调系统。设计可伸缩测量模组,配合高精度位移滑台,克服圆柱形深腔结构对测量的限制;采用翻转机构,解决靶面测量方向与螺钉锁付方向相反的难题。

2 装调任务及总体方案

2.1 装调任务

星敏感器的组成零件如图 1 所示,主要包括:星敏感器支架、调整垫片和 CMOS 电路板。其中,星敏感器支架呈圆柱状,具有直径约 30 mm、深宽比约 2:1 的圆柱形深腔结构,星敏感器支架一端是调整垫片和 CMOS 电路板的安装面,另一端有一个六面体基准面,其表面和边线是 CMOS 电路板靶面的安装测量参考基准;调整垫片呈圆

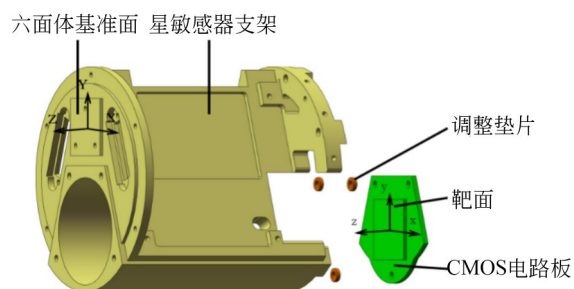


图 1 零件构成

Fig. 1 Part composition

环状,三个调整垫片形成 CMOS 电路板的支撑结构;CMOS 电路板表面有感光靶面,靶面的装配姿态通过研磨三个调整垫片进行调整。自动化精密装调系统需满足以下技术指标:

(1) 靶面相对于基准面的安装倾斜范围要求 $\leq 2'$;

(2) 靶面 x, y 轴相对于六面体的 X, Y 轴的安装倾斜范围要求 $\leq 1'$ 。

2.2 设备总体方案

装调过程可拆分为零件上料、调整垫片与 CMOS 电路板装调、靶面和基准面平行度检测、CMOS 电路板锁付等环节。平行度检测完成后,对调整垫片研磨加工,研磨过后重新装配,最后进行 CMOS 电路板锁付。

调整垫片装配完成后,其外侧会受到星敏感器支架和 CMOS 电路板的遮挡,而内孔尺寸小,不利于夹持固定。这就导致零件沿非竖直方向装配时,调整垫片在重力作用下容易造成滑落,因此采用星敏感器支架固定,自下而上一次性同时装配 CMOS 电路板和调整垫片的装配方法,简化设备结构。由于需要满足 CMOS 电路板靶面 x, y 轴与六面体 X, Y 轴的安装倾斜范围要求,采用视觉系统识别获取待装配零件的位置姿态信息,视觉系统布置在零件上方采集两平面边线特征信息,反馈给工控机计算出两边线倾角,辅助下方装调模块中的转台实现 CMOS 电路板靶面位姿的精确调整。综上,设计了三个主要功能模块,分别是装调模块、夹紧模块和测量锁附模块,整体方案参见图 2。

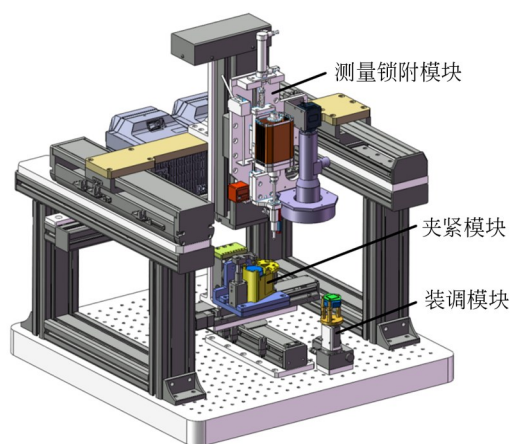


图 2 设备整体结构

Fig. 2 Overall structure of equipment

3 功能模块与控制系统

3.1 功能模块

3.1.1 装调模块

装调模块主要实现 CMOS 电路板靶面的位姿调整以及提供 Z 方向的自由度,以完成 CMOS 电路板与星敏感器支架的装配。该模块包括精密转台、顶升气缸、零件支撑装置和缓冲压块,详细结构如图 3 所示。

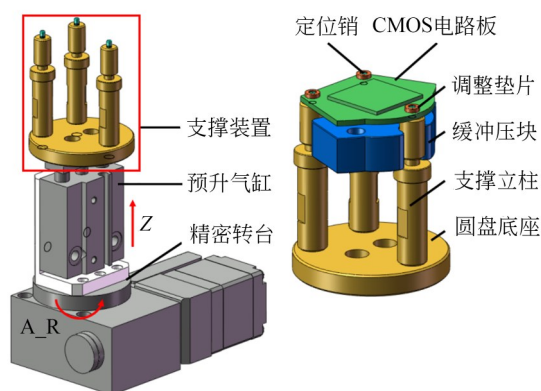


图 3 装调模块及支撑装置

Fig. 3 Assembly and adjustment module and support device

精密转台实现了待装配零件绕 Z 方向旋转姿态调整功能;顶升气缸安装在精密转台上,提供 Z 向移动自由度。其中,圆盘底座上三根支撑立柱分别对应三个调整垫片的位置,其上设置两个凸台限位结构,凸台结构限制缓冲压块的位置,同时支撑立柱最上方安装三个定位销,先后放置 CMOS 电路板与调整垫片,在顶升气缸的作用下将其与星敏感器支架一次性精准装配。在 CMOS 电路板装配后,缓冲压块避免夹气缸直接作用在 CMOS 电路板上损伤零件。

3.1.2 夹紧模块

夹紧模块的主要功能是实现 CMOS 电路板靶面、调整垫片、星敏感器支架三者的装配及压紧功能,其次在装调过程中提供 X, Y 方向移动自由度与绕 Y 向的旋转自由度。整个模块由 Y 向单轴机器人、精密位移滑台、精密转台、回转夹紧气缸、工装夹具、螺钉料盘组成,具体结构如图 4 所示。

在系统工作过程中,测量精度要求较高。测量方式为测量模组不动, X 向精密位移滑台移动

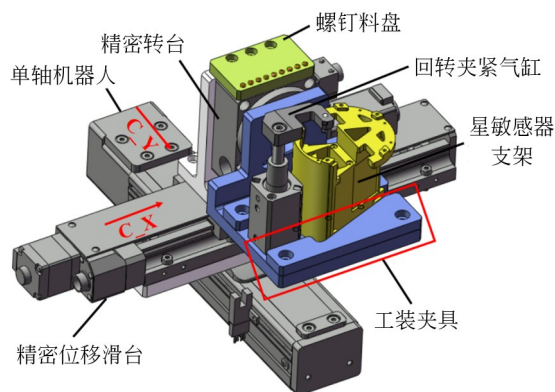


图 4 夹紧模块

Fig. 4 Clamping module

完成测量,故该滑台对测量精度产生较大影响。因此与 Y 向单轴机器人不同, X 向选用具有更高精度的精密位移滑台。精密转台可使其上固定的零件任意角度翻转,零件翻转功能允许锁付机构和测量模组布置在同侧,简化了设备结构,提高了设备的集成程度。工装夹具采用锁紧压板配合锁紧组件底座实现星敏感器支架的可靠锁紧。回转夹紧气缸实现 CMOS 电路板装配后的夹紧功能,保证在后续测量锁付过程中的装配精度保持。螺钉料盘为锁付过程提供稳定的螺钉供料位置。

3.1.3 测量锁附模块

测量锁附模块的主要功能是完成 CMOS 电路板靶面与六面体基准面的平行度测量和装调过程最终的螺钉自动锁付。该模块由龙门式框架、Y 向、Z 向单轴机器人、锁付机构、直线导轨、视觉系统、滑台气缸、分光干涉式位移计等组成,具体结构参见图 5。

龙门式框架上安装 Y, Z 向单轴机器人,共同组成龙门双轴位移平台,实现了其上锁付机构、视觉系统和测量模组的位置移动调整功能。测量模组实现对 CMOS 电路板靶面和星敏感器支架基准面之间倾角测量的功能。视觉系统实时反馈装调模块的调整装配效果。锁付机构采用吸附式取料,可实现螺钉锁付、螺钉退松、分步拧紧、扭矩控制、浮高与滑丝检测等功能。

为了避免测量仪器直接与靶面接触对 CMOS 电路板的精度造成损坏,采用非接触式测量方式,受限与测量空间与测量范围,选用体积

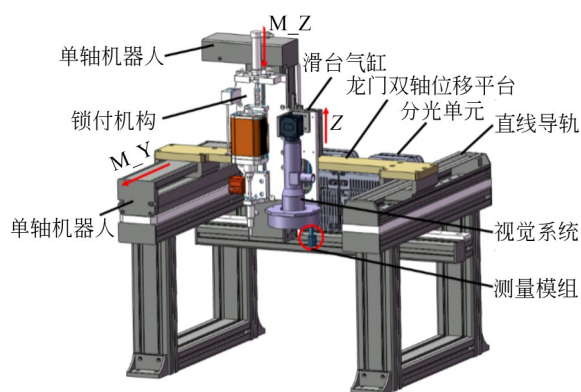


图5 测量锁付模块

Fig. 5 Measuring locking module

小精度高的分光干涉式位移计,该位移计的探头直径为 8 mm、分辨率可达 0.25 μm ,详细参数见 4.1 节。测量模组由可拆卸式专用夹具集成两个分光干涉式位移计微型探头,如图 6 所示。由于锁付机构与测量模组安装后的硬件极限位置存在固定高度差,锁付过程中测量模组的微型探头会与夹紧模块产生干涉,因此将测量模组安装于具有 Z 向移动自由度的滑台气缸上,避免在装配过程中造成干涉。两探头呈并列分布,且为了保证测量准确性,以靶面中点为中心,两探头越分散则测量得到的平面越精确,因此在设计可拆卸式专用夹具时,考虑到在直径约 30 mm 的圆柱形深腔内想要具有较大的测量范围,将两探头距离设置为 16 mm,最终测量范围可达到 16 mm $\times$ 10 mm。

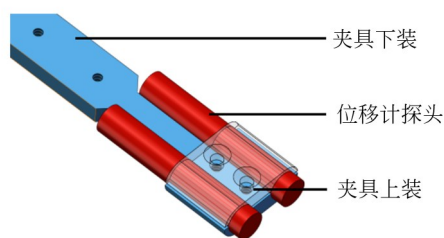


图6 测量模组

Fig. 6 Measuring module set

3.2 控制系统

星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调设备的控制系统主要包括运动控制系统和气动控制系统,分别针对精密位移滑台、单轴机器人和气动元件等进行精准调控。

3.2.1 运动控制系统

运动控制系统实现对精密位移滑台、精密转台、单轴机器人等运动机构位移量和旋转角度的控制,整个设备一共有六个运动轴,分别是 1 个直线精密位移滑台、2 个精密转台、3 个单轴机器人。运动控制系统采用“工控机+运动控制板卡(MPC2860)+驱动器”的方式。除运动控制外,MPC2860 卡同时监控滑台光电开关信号。为应对特殊情况,特设置了急停按钮,当按下该按钮时,报警信号会被触发,暂停所有运动滑台。运动控制系统原理图见图 7。

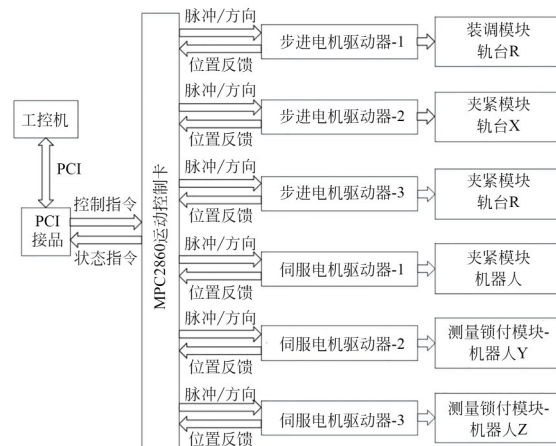


图7 运动控制系统原理图

Fig. 7 Motion control circuit diagram

3.2.2 气动控制系统

设备需要控制的气动元件有顶升气缸、回转夹紧气缸、滑台气缸、智能电批刀上的导杆气缸和真空吸附装置。装配时要求动作平稳,避免破坏待装配零件的定位,因此每个气缸支路上的气管接头均选用调速接头,安装高效便捷的同时节约成本。

气缸的动作采用“工控机+数字量输入输出模块(ADAM-4055)+电磁阀”的方式,主要实现对电磁阀和真空发生器的通断控制,包括控制气缸开合与控制真空发生器完成螺钉的拾取和释放操作。电磁阀接收来自 ADAM-4055 的数字信号,信号 0 和 1 分别对应电磁阀的关闭和开启状态。利用 ADAM-4561 模块,系统能够实现 USB 至 RS-485 通信的转变。该模块兼容 RS-232/422/485 接口,同时提供 3 000 V 的隔离保护,确保了使用时的安全性与可靠性。气动控制系统原理图如图 8 所示。

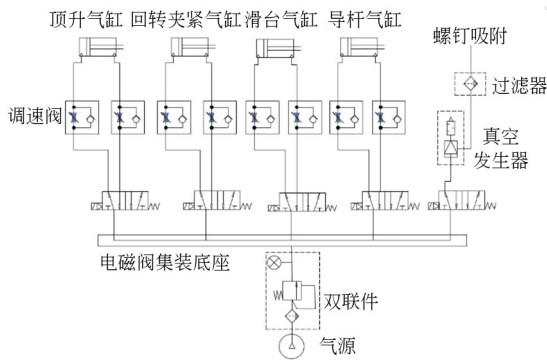


图8 气动控制系统原理图

Fig. 8 Principle diagram of pneumatic control system

4 精度分析与装调实验

4.1 精度分析

为确保装调设备满足预定的技术标准,对设备测量精度进行了分析。根据可拆卸式夹具的设计形式,测量模组在直径约 30 mm 的圆柱形深腔内可达到 16 mm×10 mm 的测量范围,如图 9 所示。

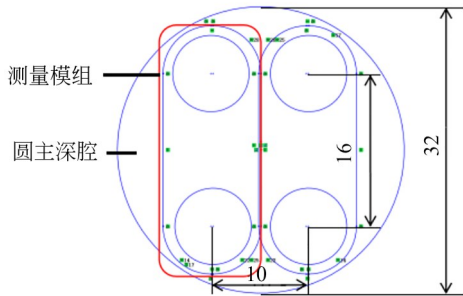


图9 测量范围

Fig. 9 Measuring range

测量系统中单轴机器人和分光干涉式位移计的具体参数如表 1~表 2 所示,测量模组安装在单轴机器人上,同时具有俯仰误差和偏摆误差。因此,规定测量方向为 X 方向,为了保证分析结果计算准确,在测量范围内任意选取三点,分别是 A(0,0,0),B(0,0,16),C(0,10,0),构成平面 1,如图 10(a)所示。

首先,将平面 1 按坐标转换公式(1)绕 Y 方向旋转 $\alpha=25''$,即最大的俯仰误差,得到如下坐标: A1(0,0,0),B1(0.002,0,15.99),C1(0,10,0),构成平面 2,如图 10(b)所示。

表 1 单轴机器人性能参数

Tab. 1 Performance parameters of uniaxial robot

参 数	性能指标
移动量	150 mm
重复定位精度	± 0.01
俯仰误差	25"以内
偏摆误差	20"以内

表 2 分光干涉式位移计技术参数

Tab. 2 Technical parameters of spectroscopic interference displacement meter

参 数	性能指标
类型	微型传感头型
传感头尺寸	$\Phi 8$ mm
测量范围	7 ± 0.5 mm
光束直径	$\Phi 50$ μ m
分辨率	0.25 μ m

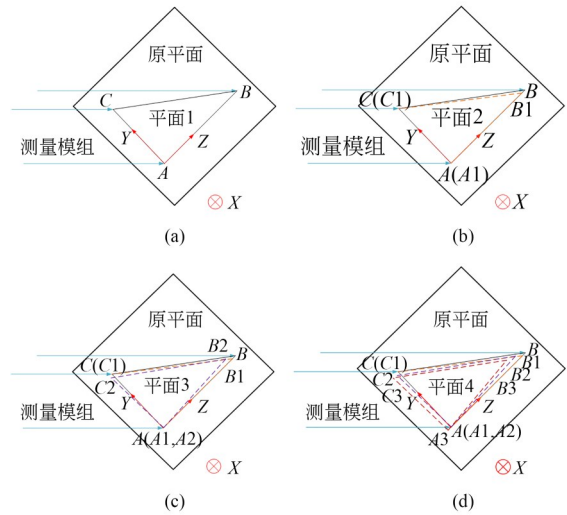


图10 平面测量

Fig. 10 Plane measurement

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

再将平面 2 按坐标转换公式(2)绕 Z 方向旋转 $\beta=20''$,即最大的偏摆误差,得到如下坐标: A2(0,0,0),B2(0.002,1.88,15.99),C2(-9.70,9.99,0),构成平面 3,如图 10(c)所示。

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由于分光干涉式位移计的分辨率为 $0.25 \mu\text{m}$, 故考虑极限情况, 将 A2, C2 的 X 坐标值均减 $0.25 \mu\text{m}$, B2 的 X 坐标值加 $0.25 \mu\text{m}$, 得到 A3 $(-0.000\ 25, 0, 0)$, B3 $(0.001\ 75, 1.88, 15.99)$, C3 $(-9.700\ 25, 9.99, 0)$, 构成平面 4, 如图 10(d) 所示。

此时即为理论最大误差, 根据 A3, B3, C3 坐标计算出平面 4 的法向量为 $(6.559\text{e}+03, 0.636, -1)$, 已知初始原平面的法向量为 $(1, 0, 0)$, 计算得两平面夹角为 $0.621'$, 满足系统所需的靶面相对于基准面的安装倾斜范围技术要求。

4.2 调整垫片研磨量算法设计

垫片研磨量的算法设计是实现高精度装调的关键环节。通过精确控制垫片的研磨量, 可以实现对装配间隙的微调, 从而提高装调的精度。在算法设计过程中, 我们需要考虑垫片的研磨工艺参数以及装调要求等因素, 通过建立数学模型, 实现垫片研磨量的精确计算。同时, 还需要考虑算法的实时性和稳定性, 以确保在实际装调过程中能够准确、快速地计算出调整垫片研磨量。

分光干涉式位移计测量靶面的状态如图 11 所示。调整垫片装配到星敏感器支架凹槽结构里时, 绕轴向没有限位。此时, 如果在立体空间内对垫片进行任意方向的修研, 修研后的零件再次装配时无法保证与修研之前的方向一致, 故研磨时只能端面平磨。

由于修研前的已知条件仅有两平面的倾角

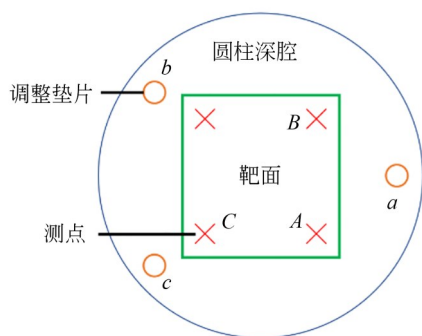


图 11 测量状态

Fig. 11 Measurement state

(测量计算获得), 而需要研磨的调整垫片有三个, 属于欠定问题。因此, 在研磨量的算法设计中, 首先判定两平面的相对倾斜方向, 设定与倾斜方向接近的垫片不予修研调整。将该圆柱形深腔平均划分为 3 个象限区域, 分别与象限内的调整垫片序号所对应, 如图 12 所示。

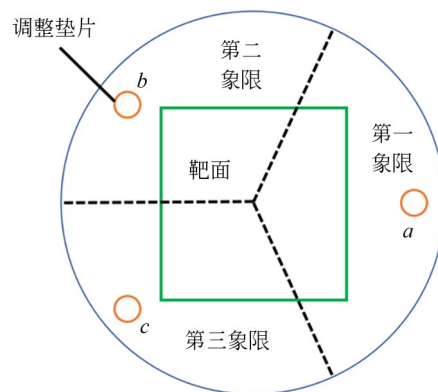


图 12 象限区域划分

Fig. 12 Quadrant region division

将三个调整垫片简化为一个支撑点, 并假设其理想坐标分别为 $a(x_1, y_1, 0)$, $b(x_2, y_2, 0)$, $c(x_3, y_3, 0)$, 此坐标值根据相机坐标系中工业相机拍照比对获取, 装配后计算得出 CMOS 电路板靶面相对于基准面的倾斜角度, 由该倾斜角度得到 CMOS 电路板上与三个调整垫片分别对应的点的坐标, 分别为 $a'(x_1, y_1, \Delta_1)$, $b'(x_2, y_2, \Delta_2)$, $c'(x_3, y_3, \Delta_3)$, $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 即为三个调整垫片的研磨量。已知一个调整垫片不会被研磨, 故 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 中会有两个垫片的研磨量作为未知数, 但此时仅有 a', b', c' 三点形成的平面与 a, b, c 形成的平面倾斜角度的关系, 故无法通过直接计算得到精确的调整垫片研磨量数值, 考虑采用枚举法估算出调整垫片的研磨量数值。

设计的调整垫片研磨量数值算法如下:

(1) 假设 a 垫片不用修研, 需估算 Δ_2, Δ_3 。

(2) 参考图 10 方法, 固定 a 点和 b 点, 计算两平面在理想情况下 (平面夹角与测量所得相同) 的 c 点调整量。同理计算出固定 a, c 点时, b 点的调整量。

(3) 在调整量范围内以固定步数 δ 均分, 设置从最小值开始依次累加, 枚举 Δ_2, Δ_3 的所有组合, 将所有可能的结果组合作为坐标代入得到平

面方程。

(4) 由于装调系统的技术指标为两平面的安装倾斜范围要求 $\leq 2'$,因此选用低于指标一个数量级的 $0.2'$ 作为收敛条件。计算该平面方程与基准面的夹角 $\leq 0.2'$ 时结束,输出此时的 $\Delta 2, \Delta 3$ 。

4.3 装调实验

星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调系统实物如图 13 所示。

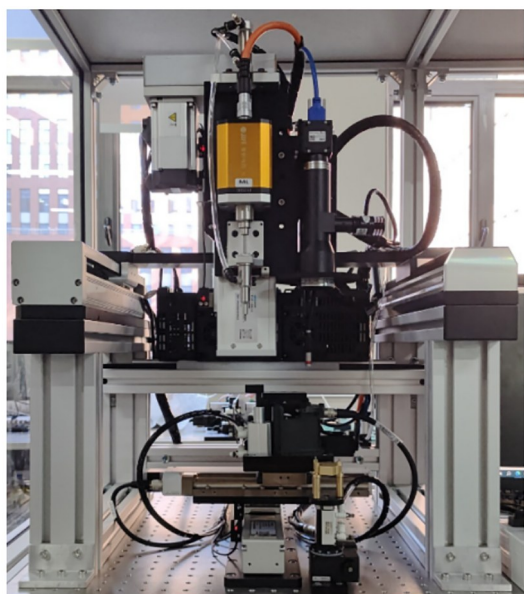


图 13 靶面装调系统

Fig. 13 Target surface assembly and adjustment system

如图 14 所示为本系统的装调策略,根据此装调策略进行测量实验。实验主要包括零件上料、变动识别位置、靶面位姿调整、零件装配、靶面与基准面平行度测量五个部分。通过实验验证了该装调策略的可行性和高效性。整个装调流程可在 5 min 内完成,提高了工作效率。具体流程如下:

(1) 零件上料:将星敏感器支架装夹于工装夹具上,CMOS 电路板和调整垫片先后放置于装调模块上方。

(2) 变动识别位置:相机首先识别基准面的 X, Y 轴,然后测量锁附模块移动相机至靶面上方,识别靶面的 x, y 轴。

(3) 靶面位姿调整:提取图像中的两边线,计算两者倾角,装调模块中的精密转台据此对靶面

位姿进行微调,使两边线倾角满足安装倾斜范围要求。

(4) 零件装配:夹紧模块运动至合适位置,气缸旋转 90° 并上抬,自下而上同时装配两零件。

(5) 靶面与基准面平行度测量:测量模组移动至合适位置,配合夹紧模块的位移滑台完成基准面与靶面的测量,由测量数据计算出两平面倾角。

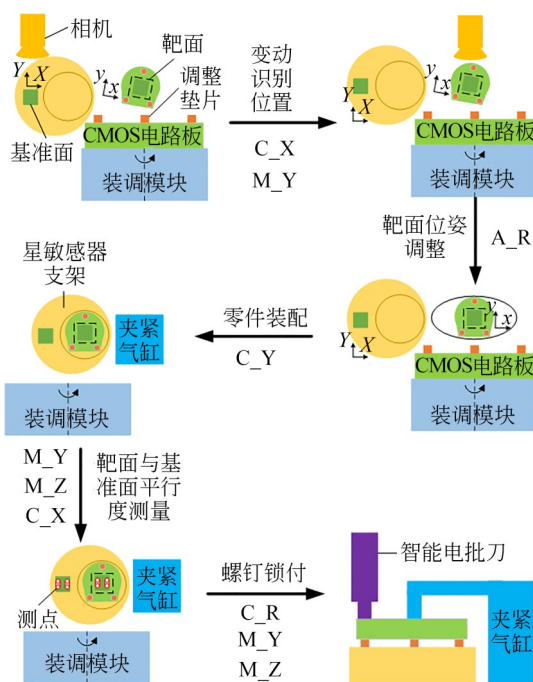


图 14 装调策略

Fig. 14 assembly and adjustment strategy

按照上述装调策略,针对同一组零件进行了若干次测量实验。由于目前设备未在用户现场,不具备调整垫片研磨手段,故在测量实验中仅考察靶面装调的重复性精度。靶面位姿调整阶段,靶面调整后的边线识别示意图如图 15 所示。实验结果如表 3 所示,得到调整垫片研磨前的平面倾角与边线倾角。

由实验数据可知,调整垫片研磨前的靶面相对于基准面的安装倾斜角度极差为 $1.6'$;靶面 x, y 轴相对于六面体的 X, Y 轴的安装倾斜角度极差为 $0.4'$ 。该靶面装调系统具有良好的重复性。

表 3 靶面装调实验效果

Tab. 3 Experimental effect of target surface installation and adjustment

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平面倾角	5.0′	4.9′	5.8′	5.8′	5.4′	6.4′	6.5′	4.5′	6.4′	5.8′
边线倾角	0.1′	0.3′	0.1′	0.2′	0.3′	0.5′	0.4′	0.1′	0.1′	0.3′

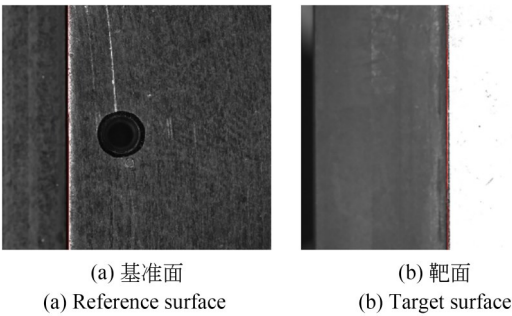


图 15 边线识别

Fig. 15 Edge recognition

5 结 论

针对星敏感器 CMOS 电路板靶面人工装调难点,研制了一套靶面精密自动化装调系统。采取非接触式测量方式,设计可拆卸式专用夹具,

配备分光干涉式位移计,完成靶面与基准面的高精度测量。针对测量方向与装配方向矛盾导致的功能模块集成困难,设计调整机构实现零件任意角度翻转,优化系统空间布置。

采用局部枚举法开发了调整垫片研磨量算法,解决由平面姿态单一已知量反求多垫片研磨量的欠定问题。该系统可实现 CMOS 电路板与调整垫片的同时装配,完成 CMOS 电路板靶面与星敏感器支架六面体基准面的平行度测量,以及装调完成后的螺钉自动锁附。

实验结果表明该靶面装调系统具有良好的重复性,其中,调整垫片研磨前的靶面相对于基准面的安装倾斜角度极差为 1.6′;靶面 x,y 轴相对于六面体的 X,Y 轴的安装倾斜角度极差为 0.4′。

参考文献:

[1] THEUWISSEN A. CMOS Image Sensors: State-Of-The-Art and Future Perspectives [C]. *ESSDERC 2007-37th European Solid State Device Research Conference*. Munich, Germany. IEEE, 2007: 21-27.

[2] HOU B W, HE Z M, ZHOU H Y, *et al.* Integrated design and accuracy analysis of star sensor and gyro on the same benchmark for satellite attitude determination system[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(4): 1074-1080.

[3] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.

LI J. *Research on Key Technologies of APS Star Sensor*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

[4] YANG J S, JIANG J, LI J, *et al.* Uncertainty estimation and multi-FOV data fusion for star sensors based on directional statistics [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 73: 1000115.

[5] FU J N, LUO W, ZHANG H. Real-time analysis of star sensor attitude accuracy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2724(1): 012024.

[6] 李小燕. 高精度星敏感器光学系统装调工艺与检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

LI X Y. *Research on Assembly and Adjustment Technology and Detection Method of High-Precision Star Sensor Optical System* [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)

[7] YOON I, NA M, SONG J B. Assembly of low-stiffness parts through admittance control with adaptive stiffness[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, 86: 102678.

[8] CALDERS K, ADAMS J, ARMSTON J, *et al.* Terrestrial laser scanning in forest ecology: expanding the horizon [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 251: 112102.

[9] ASAKI Y, ALCALDE PAMPLIEGA B, EDWARDS P G, *et al.* Astronomical radio interferom-

- etry[J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3: 89.
- [10] ZHANG Y C, LIU X X, ZHANG T L, *et al.* Laser angle attitude measurement technology and its application in aerospace field[C]. *2nd International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic Technology (LOPET 2022)*. May 20-22, 2022. Qingdao, China. SPIE, 2022.
- [11] 宋帅帅, 黄锋, 江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(3): 22-26.
- Song S S, Huang F, Jiang Y B. Analysis of research progress of geometric measurement technology based on machine vision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021 Magi 44 (3): 22-26.
- [12] YU Z X, LIU W Z, DUAN F J, *et al.* High-accuracy measurement system for rotor-stator axial clearance in narrow spaces based on all-fiber microwave photonic mixing[J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 20994-21013.
- [13] KAWASUE K, KOMATSU T. Shape measurement of a sewer pipe using a mobile robot with computer vision [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(1): 52.
- [14] 王婷. 基于电涡流传感器的狭小空间三维测量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WANG T. *Research on Three-Dimensional Measurement of Narrow Space Based on Eddy Current Sensor*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 缪东言, 陈念年, 巫玲, 等. 可用于狭小空间的单目主动视觉姿态测量方法[J]. *现代制造工程*, 2024, (1): 110-117.
- MIAO D Y, CHEN N N, WU L, *et al.* Monocular active vision attitude measurement method can be applied in tight spaces[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2024, (1): 110-117. (in Chinese)
- [16] SHEN F, QIN F B, ZHANG Z T, *et al.* Automated pose measurement method based on multivision and sensor collaboration for slice microdevice [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 488-498.
- [17] RABENOROSOA K, CLÉVY C, LUTZ P, *et al.* A Micro-Assembly Station Used for 3d Reconfigurable Hybrid Moems Assembly [C]. *2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*. Seoul, Korea (South). IEEE, 2009: 95-100.
- [18] CLÉVY C, LUNGU I, RABENOROSOA K, *et al.* Positioning accuracy characterization of assembled microscale components for micro-optical benches[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(1): 69-77.
- [19] 杨永猛. 基于机器视觉的ICF靶精密装配技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YANG Y M. *Research on Precision Assembly Technology of ICF Target Based on Machine Vision*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [20] 秦国花. 星敏感器成像平面姿态检测方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- QIN G H. *Research on Attitude Detection Method of Star Sensor Imaging Plane*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)

作者简介:



任同群(1980—),男,辽宁瓦房店人,博士,副教授,2002年、2005年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密微小装配技术、精密测试技术及信号处理等方面的研究。E-mail: ren_tq@dlut.edu.cn

通讯作者:



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,1987年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现任精密与特种加工教育部重点实验室(B类)副主任,主要从事精密微小装配技术、精密测试技术、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn