

doi: 10.7690/bgzdh.2024.08.007

锥形飞行体部段自动柔性对接机构的设计

郭永才, 游广飞, 来颜博, 郑国良, 栗世豪

(郑州机械研究所有限公司智能装备事业部, 郑州 450052)

摘要: 针对国内各类锥形飞行体部段对接装配以人工操作为主, 生产装配效率低、装配质量不稳定和安全隐患多的现状, 设计一种用于锥形飞行体部段对接的自动柔性对接机构。该机构可根据产品不同锥形部段, 采用多自由度平台为依托, 运用姿态测量算法对对接的不同部段进行位姿检测与对接姿态规划, 满足不同锥形部段之间的自动柔性对接装配, 位移调整的相对精度达到 0.01 mm, 角度调整的相对精度达到 0.01°。结果表明: 该机构可有效提高飞行体总装效率、装配质量, 消除装配安全隐患, 填补国内锥形飞行体部段智能对接装配技术的空白, 满足当下国防产品产能迅速发展的需求。

关键词: 舱段自动柔性对接; 调姿机构; 姿态测量

中图分类号: TJ71; V42 **文献标志码:** A

Design of Automatic Flexible Docking Mechanism for Conical Flight Body Segment

Guo Yongcai, You Guangfei, Lai Yanbo, Zheng Guoliang, Li Shihao

(Intelligent Equipment Division, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd.,
Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In view of the current situation of manual operation, low efficiency, unstable assembly quality and many potential safety hazards in the docking assembly of various conical flying body sections in China, an automatic flexible docking mechanism for the docking of conical flying body sections is designed. Accord to that different conical sections of the product, the mechanism adopt a multi-degree-of-freedom platform as a support, uses an attitude measurement algorithm to carry out position and attitude detection and docking attitude planning on different doc sections, and meets automatic flexible docking assembly between different conical sections, wherein the relative accuracy of displacement adjustment reaches 0.01 mm, and the relative accuracy of angle adjustment reaches 0.01 degree. The results show that the mechanism can effectively improve the assembly efficiency and assembly quality of the flight body, eliminate the potential safety hazards of assembly, fill the gap of the intelligent docking assembly technology of the conical flight body section in China, and meet the needs of the rapid development of the current national defense product capacity.

Keywords: automatic flexible docking of cabin; attitude adjustment mechanism; attitude measurement

0 引言

火箭、导弹、卫星等航天器通常具有重量大和尺寸大的特征, 一般采用分段制造与整体组装的生产方法^[1]。这种生产方法使得装配精度与产品最终质量具有很大关系。总装技术对导弹的总体性能和可靠性有直接的影响, 对飞行试验的成败有重要的作用^[2]。尽管加工制造精度很大程度影响产品的最终装配精度, 但实践证明, 在军工产品中, 像火箭等这类物体的最终质量, 很难通过提高制造准确度来提高装配精度。目前, 行之有效的的方法是改善和优化装配方法^[3]。

传统的舱段对接装配多采用刚性工装定位和人工装配为主, 这种装配方式效率低、一致性差, 调姿过程中劳动强度大, 装配周期较长, 且难以应用

于大型导弹舱段的对接装配, 更无法满足我国导弹高精度、高效率和高可靠性生产的需求^[4-5]。自动对接相比于人工对接具有明显的优势, 其以数字化和自动化为依托, 用一套装配调姿机构来完成两舱段之间的对接, 能够更好更快地完成产品的装配任务, 提高产品装配的质量, 极大地减轻技术工人的劳动强度, 有效地缩短产品的装配周期。相比较于传统对接方式, 实现舱段的自动对接可显著提高航天器的装配效率与品质一致性^[6]。

目前, 传统串联对接技术存在耗时耗力及对接质量一致性差的缺点, 而并联机构逐渐凸显其优势^[7]。哈尔滨工业大学高超^[8]和马剑锋^[9]针对导弹舱段自动对接系统中并联调姿、柔性对接、激光测距及质心测量等关键问题进行了实验设计及验证工作, 自动对接技术能够提高导弹装配的精度和一致

收稿日期: 2024-04-27; 修回日期: 2024-05-27

第一作者: 郭永才(1991—), 男, 河南人, 硕士。

性，极大地提高装配效率，解决大型导弹舱段对接装配困难的问题。此外，不同的导弹部件，特别是锥形体在外形尺寸及结构特征等方面与传统导弹存在着较大差异^[10]。国内各类锥形飞行体部段对接装配仍以人工操作为主，生产装配效率低、装配质量不稳定。笔者设计一种用于锥形飞行体部段对接的自动柔性对接机构，用于满足不同锥形舱段之间的自动柔性对接装配。

1 总体设计

1.1 平台结构设计

飞行器部段对接机构包括固定部段支撑机构、对接部段支撑机构和位姿激光检测机构，固定部段和对接部段支撑机构均固定安装于对接基座上，其中固定部段支撑机构在垂直于要对接的部段方向上可相对于对接基座调整相对位置，位置的调整可通过对接基座上的 T 形槽移动来实现。固定部段和对接部段支撑机构中至少在一个上设有能够沿部段轴向往另一个方向移动的移动支撑装置，以及能够带动相应部段转动的转动支撑装置。在进行部段对接的过程中，2 对接部段对中后，可通过移动支撑装置带动部段相互靠近，通过转动支撑装置带动部段相互旋紧，从而实现 2 对接部段之间的螺纹连接。对接机构整体如图 1 所示。

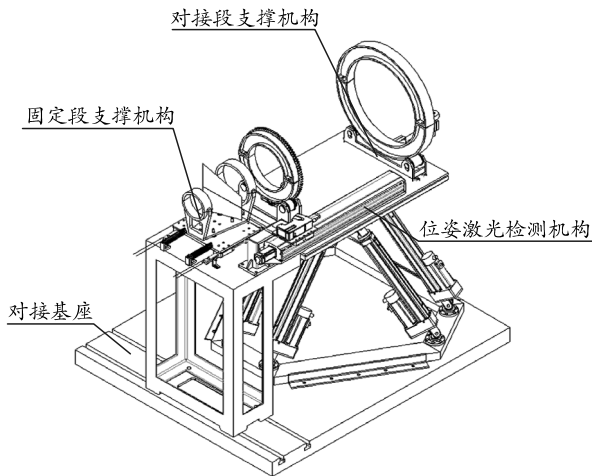


图 1 对接机构整体

1.2 固定部段对接机构

固定部段支撑机构的主要组成部分有固定段支撑座和移动支撑装置，其中固定段支撑座包括支腿和台面，整体为框架式结构。移动支撑装置包括移动平台和通过弹性部件支撑在移动平台上的承载板及设于承载板上、2 个同轴间隔布置的部段固定抱环装置。

移动平台通过滑块和导轨与固定支撑座的台面之间形成导向配合，导向方向为 2 对接部段的对接方向。承载板与移动平台之间的弹性部件设置为 4 个，支撑于承载板的 4 点，可通过弹性变形使承载板的姿态自适应变化，从而自动调整所支撑的部段姿态。

移动平台的后端配置有弹性装置，可在移动平台朝远离对接部段支撑机构的方向活动时通过变形储能，而后通过能量释放来驱使移动平台朝靠近对接部段支撑机构的方向移动，由此可实现在 2 部段对接过程中补偿二者之间的轴向相对位移，保证对接过程顺利进行。

为了限制移动平台的活动行程，固定段支撑座上设置了用于检测移动平台位置的接近开关，接近开关设于导轨的一侧处。当移动平台移动到该位置时，将会触发接近开关，可靠地检测移动支撑装置的移动路径，实现部段对接过程中对装置的自动控制，起到保护装置、避免错位的作用。固定部段对接机构如图 2 所示。

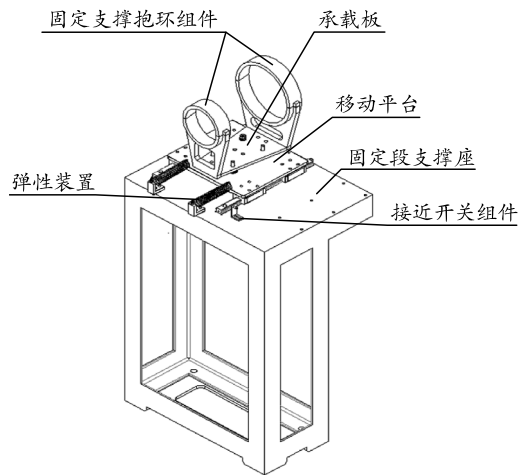


图 2 固定部段对接机构

1.3 对接部段支撑机构

对接部段支撑机构是由多自由度平台和转动支撑装置组成。为了能够调整位姿以及与固定部段支撑机构上的部段准确对中轴线，对接部段支撑机构下方设置有多自由度平台，该平台由结构部分及控制系统 2 部分组成，结构部分是由上平台、下平台、虎克铰、电动缸、压力传感器、伺服电机组成，控制系统是由电控柜、工控机、数据采集卡、伺服控制卡、电线线缆组成。该平台可根据 2 对接部段轴线之间的位置关系，以固定部段轴线的位置为基准，调整对接部段轴线的姿态位置，将 2 部段轴线调整至同一轴线方向上。多自由度平台如图 3 所示。

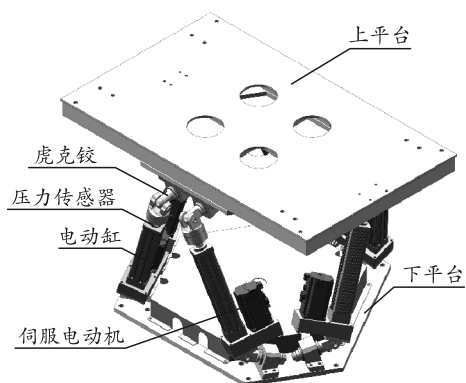


图 3 多自由度平台

转动支撑装置由前后滚轮组与对接段前后抱环构成。转动支撑装置包括 2 个以上同轴间隔布置的滚动抱环，滚动抱环通过前后滚轮组安装在多自由度平台的上平台面上。以轴向间隔布置的滚动抱环作为支撑装置，具有结构简单、轻便的优点。该装置用于支撑部段并带动部段转动，从而实现与固定部段支撑机构上所支撑的固定部段之间的螺纹进行旋合连接。对接部段支撑机构如图 4 所示。

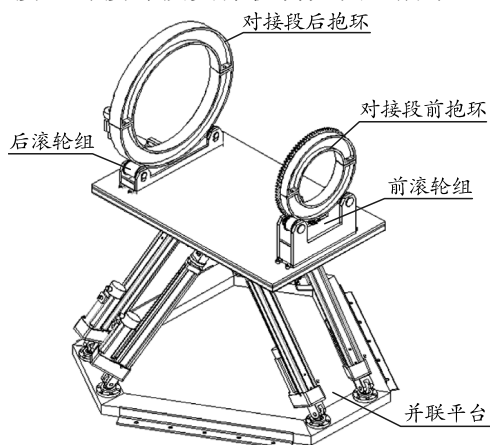


图 4 对接部段支撑机构

转动支撑装置配置有用于驱使其转动的转动驱动装置，主动带动相应的部段转动。该装置可进一步地实现部段之间的自动旋合，效率高并可降低工作人员的劳动强度。转动驱动装置具体采用的是第一电机，其通过减速机与滚动抱环传动连接，减速机通过相应的安装座可连接于转动驱动装置的小齿轮和安装于固定抱环的大齿圈。

转动支撑装置上设有用于抵顶部段的端部，以防止部段在旋合过程中沿轴向后退的抵顶装置。抵顶装置可起到限位部段的作用，防止其在螺纹连接过程中发生轴向窜动。同时，抵顶装置上设有用于与部段端部滚动配合的滚动体。滚动体可避免滑动摩擦，起到保护部段的作用。

抵顶装置包括了导向固定座、与导向固定座配合的导向夹紧座、被导向固定座与导向夹紧座固定的轴向调节杆、以螺钉与调节杆固连的限位轴承盖、安装于两者之间的竖向调节杆以及位于竖向调节杆顶端且通过卡簧防脱安装的限位滚轮。抵顶装置如图 5 所示。

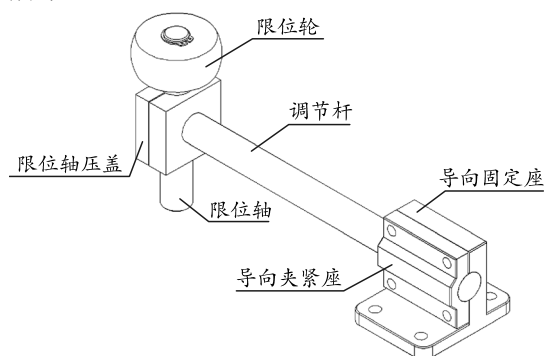


图 5 抵顶装置

1.4 位姿激光检测机构

位姿激光检测机构的作用是扫描需对接部段的位姿，对接部段支撑机构的多自由度平台根据位姿激光检测机构反馈的调姿数据进行相应的姿态调整，使对接部段支撑机构上的部段轴线与固定部段支撑机构上的部段轴线相互重合且沿轴线方向进给。

位姿激光检测机构包括组件安装座、模组安装座、直线运行模组、激光器安装板以及位姿扫描激光器。组件安装座固定在固定部段支撑机构的固定支撑座上，位于移动平台的一侧。直线运行模组固定在组件安装座上，激光器安装板安装于直线运行模组上，可沿直线往复运动。位姿扫描激光器安装在激光器安装板上，使用时可通过直线运行模组带动位姿扫描激光器往复运动，即可实现对要对接的部段的位姿的扫描。位姿激光检测机构如图 6 所示。

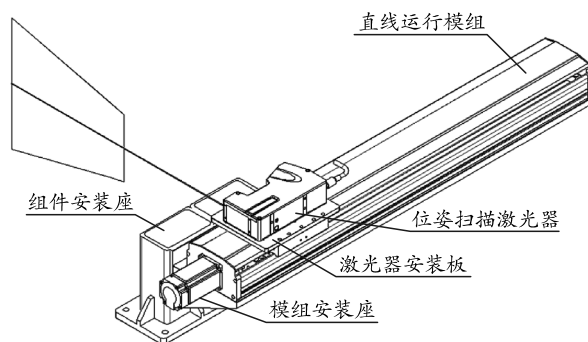


图 6 位姿激光检测机构

使用该装置对飞行器部段进行对接时，可将其中一个部段固定在固定部段支撑机构上，将另一个

部段安装在对接部段支撑机构上，通过多自由度平台的电机驱动机构上平台的活动，使 2 部段的轴线互相对中，然后对接部段支撑机构向固定部段支撑机构移动，并克服弹性装置的阻力，顶动固定部段支撑机构的移动平台，直至移动平台触发接近开关时，多自由度平台的上平台停止移动，此时转动驱动装置驱动滚动抱环转动，并带动其上的部段转动，对 2 部段进行螺纹连接。在螺纹相互旋合的过程中，弹性装置释放能量并驱使固定部段支撑机构自动移动，适应 2 部段之间的相互位置变化。

2 测控系统

2.1 测控平台框架

如图 7 所示，测控系统采用执行、数据、控制和监控 4 层控制架构。

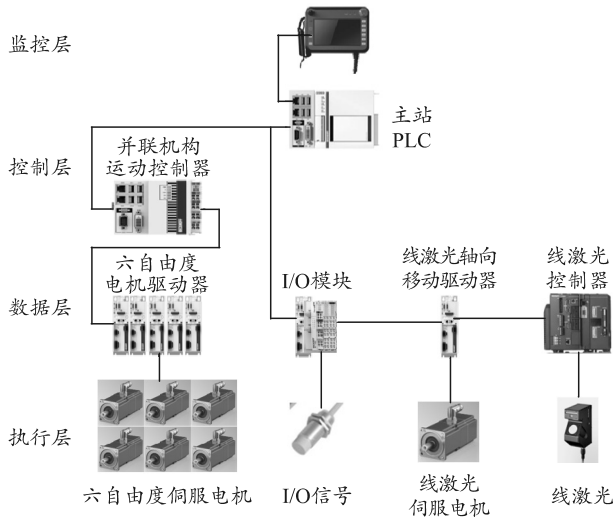


图 7 测控系统架构

1) 执行层包括多自由度伺服电机、线激光横移伺服电机、线激光以及 I/O 信号，用于执行上层的控制指令。

2) 数据层包括多自由度伺服驱动器、I/O 模块、线激光轴向移动驱动器以及线激光控制器。其中，线激光控制器用于实现位姿测量功能，该位姿测量系统通过线激光扫描舱段外表面获取舱段圆弧数据，将该数据交由位姿解算系统解算出移动段的当前空间坐标。

3) 控制层包括主站 PLC 和多自由平台机构运动控制器。其中，主站 PLC 用于位姿解算功能，即将线激光控制器拟合出的圆心坐标换算多自由度机构所在的空间坐标，并向多自由度平台运动控制器下发目标坐标。多自由度平台运动控制器用于控制机构运动，可通过当前坐标与设定目标规划出机构

运动轨迹，并执行运动。

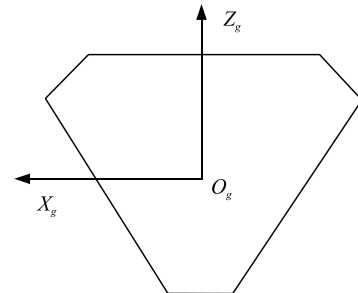
4) 监控层为上位机软件，用于实现系统手动控制、自动控制、参数配置以及系统监测。为保证系统安全稳定运行，监控层不进行数据处理，仅对设备发送控制指令与接收系统状态信息。

2.2 工作原理

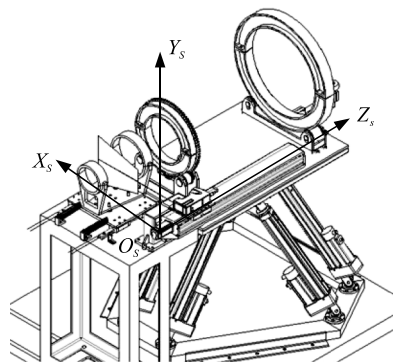
为便于描述部段的空间位姿，笔者参考文献[6]中对系统坐标系的定义。以多自由度平台底座中心为全局坐标系，符号为 $O_g X_g Y_g Z_g$ ，部段轴线方向为 X 轴，竖直方向为 Y 轴，按右手定则确定 Z 轴。线激光传感器坐标系以位姿激光检测机构的起始点为坐标原点用于描述由扫描传感器获取点云的空间位置信息，符号为 $O_s X_s Y_s Z_s$ 。部段姿态坐标通过下式描述，通过以端面圆心为坐标原心，

$$T = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \tag{1}$$

式中： (x, y, z) 为部段的一个对接端面中心在全局坐标系的位置； (β, γ) 分别为部段轴线在全局坐标系的偏航角和俯仰角； α 为筒形件绕其自身轴线的旋转角。全局坐标系与线激光坐标系如图 8 所示。



(a) 全局坐标系



(b) 线激光坐标系

图 8 全局坐标系与线激光坐标系

线激光被固定与部段理论轴线平行的滑轨上，沿部段轴线方向运动。若部段与理想轴线存在夹角，当扫描截面和圆柱面斜交时，得到的截面轮廓为椭圆，且圆柱面的轴线通过椭圆的圆心线。

锥形飞行部段对接机构测控系统的工作原理如

图 9 和 10 所示,位姿测量系统线通过激光扫描器获取移动段和固定端相对激光扫描器的圆心坐标位置 $C_1(x_1, y_1, z_1)$ 。位姿解算程序依据固定段和移动段的多组截面圆心 $[(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)]$ 拟合出的拟合各部段轴线,计算出各部段相对全局坐标系的姿态坐标,判断是否满足对接要求。若不满足,多自由度平台的位姿运动控制器则规划移动段向固定段移动轨迹,并执行。若满足对接要求,程序执行完毕。

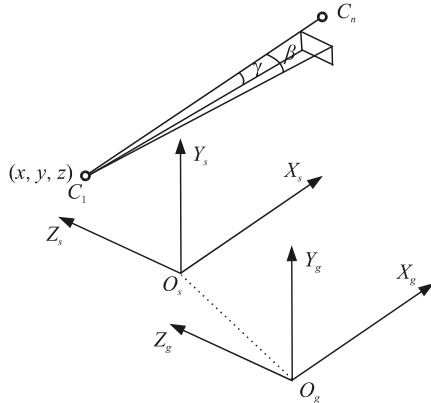


图 9 部段空间姿态

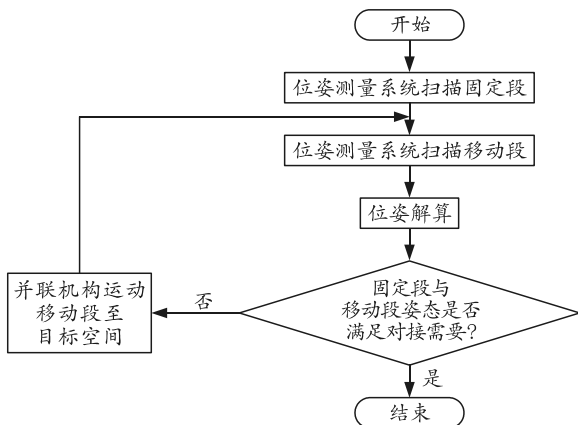


图 10 工作流程

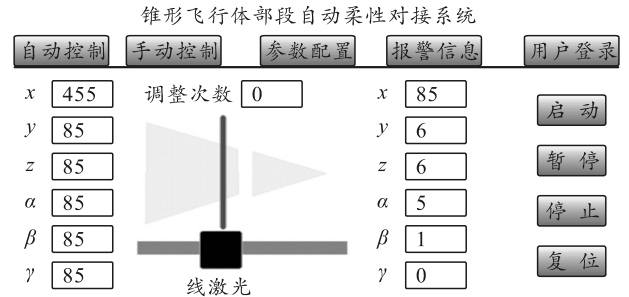
2.3 上位机设计

考虑到便于操作人员现场操作,锥形飞行体部段自动柔性对接系统的上位机软件是基于步科 SG7ES 手操器设计实现。如图 11 所示,软件具备以下功能:

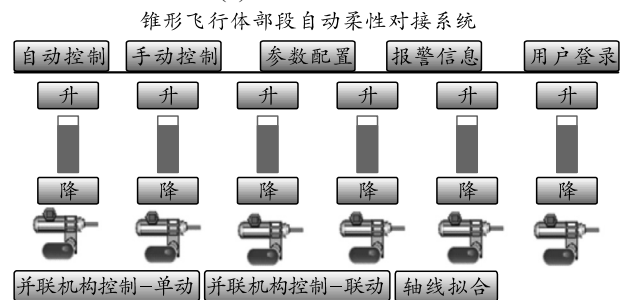
- 1) 自动控制:控制设备启动、停止、暂停自动对接功能。
- 2) 手动控制:可实现多自由度平台中,各伺服电机单个电机运动和联动运动控制,以及轴线拟合功能。
- 3) 参数配置:设定收敛阈值、扭矩保护阈值等参数。

4) 报警信息:展示设备报错信息,便于操作人员即时排除故障。

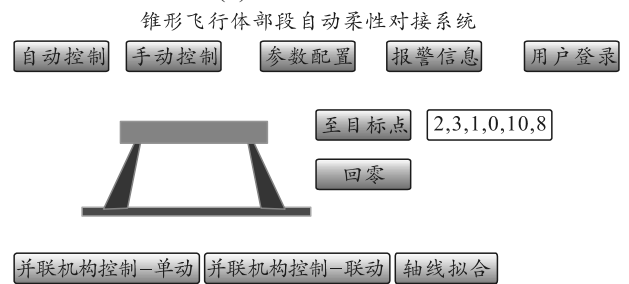
5) 用户信息管理:限定不同级别的操作员对该设备的操作权限。



(a) 自动控制界面



(b) 手动控制界面



(c) 并联机构控制界面

图 11 上位机界面

3 结论

结果表明:该设备可有效实现不同锥形飞行体部段的自动柔性对接,具有测量自动化、调整自动化、对接自动化的特点,可有效地提高生产装配效率,提升装配质量,减轻劳动强度和降低安全隐患,具有较好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 陈先有, 崔晶. 先进的装配连接技术在航空制造领域的应用分析[J]. 机械制造, 2007, 45(11): 53-55.
 [2] 吴宝中, 龔京忠, 李国喜, 等. 导弹总装几何量数字化测量流程及其表达[J]. 国防制造技术, 2009(2): 39-43.
 [3] 周丽华. 大型运载火箭自动对接技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.