

一种飞行器自动化舱段对接系统设计与实现

吴晓晔¹, 胡志伟², 唐晓田², 白香雪³, 董旭³, 胡若愚³

(1. 中国航天科工集团 驻系统工程公司质量监督室, 北京 100074;

2. 空装驻北京地区第二军事代表室, 北京 100074;

3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 对固定翼飞行器舱段传统人工对接方式效率低、精度差、依赖经验等问题进行了研究, 旨在开发基于多模态数据融合的自动化舱段对接系统; 通过采用视觉、测距与力传感器等多模态数据实时采集技术, 结合伺服控制与 AI 图像处理算法, 构建了包含轴线对准、径向对接与控制反馈的三阶段自动化对接流程, 实现了舱段位姿的精准调整与实时监测; 硬件系统设计集成了高精度传感器、可移动调节平台及综合控制板, 并开发主控软件实现多模态数据融合与闭环控制; 经自动化对接试验验证, 系统成功完成不同形态舱段的高精度对接, 对接效率显著提升, 人工干预减少 90% 以上, 降低碰撞风险, 满足复杂工况下的工程应用需求; 结果表明, 该系统有效提升了对接一致性与可靠性, 为飞行器模块化装配提供了高效解决方案, 适用于不同类型和尺寸的舱段对接任务。此外, 针对现有系统的局限性, 提出了进一步优化多自由度调节功能的方向。

关键词: 多模态; 数据融合; 固定翼飞行器; 舱段; 对接

Design and Implementation of an Automated Cabin Docking System for Aircraft

WU Xiaoye¹, HU Zhiwei², TANG Xiaotian², BAI Xiangxue³, DONG Xu³, HU Ruoyu³

(1. Quality Supervision Office of China Aerospace Science and Industry Corporation in
System Engineering Company, Beijing 100074, China;

2. The Second Military Representative Office in Beijing Area, Equipment Department of PLA Air Force,
Beijing 100074, China;

3. Beijing Mechanical and Electrical Engineering Research Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Study was conducted on the low efficiency, poor accuracy, and reliance on experience of traditional manual docking methods for fixed wing aircraft cabin segments, with the aim of developing an automated cabin docking system based on multimodal data fusion. By using multimodal data real-time acquisition technologies such as vision, distance measurement, and force sensors, combined with servo control and AI image processing algorithms, a three-stage automated docking process including axis alignment, radial docking, and control feedback was constructed, achieving precise adjustment and real-time monitoring of cabin pose. The hardware system integrates high-precision sensors, a movable adjustable platform, and a comprehensive control board, and develops main control software to achieve multimodal data fusion and closed-loop control. Through automated docking tests, the system has successfully completed the high-precision docking of different types of cabin segments, significantly improving docking efficiency, reducing the manual intervention by over 90% and collision risks, and meeting the requirements of engineering application under complex working conditions. The results indicate that, the system effectively improves docking consistency and reliability, provides an efficient solution for modular assembly of aircraft, and is suitable for docking tasks of different types and sizes of cabin segments. In addition, in response to the limitations of the existing system, directions are proposed to further optimize the multi degree of freedom adjustment function.

Keywords: multimodal; data fusion; fixed-wing vehicle; segment; docking

收稿日期:2025-03-05; 修回日期:2025-04-16。

作者简介:吴晓晔(1981-),女,硕士,高级工程师。

通讯作者:胡志伟(1982-),男,硕士,工程师。

引用格式:吴晓晔,胡志伟,唐晓田,等. 一种飞行器自动化舱段对接系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 319-326.

0 引言

固定翼飞行器舱段自动化对接是模块化装配的核心环节。在固定翼飞行器舱段对接问题上,传统对接方法依赖人工目视或简单传感器,舱段对接一般由总装工人通过手动调整舱段支撑装置以调整舱段的位姿,实现两舱段的对准,并进一步实现两舱段的对接。当前,尽管国内外已在航天器空间对接领域取得显著成果(如国际空间站舱段对接、货运飞船自动交会等),但面向地面固定翼飞行器生产的自动化对接系统仍面临多重技术瓶颈:1)环境适应性不足,现有系统多针对标准舱段设计,难以应对复杂工业场景下的非规则几何舱段与动态干扰(如振动、光照变化);2)多模态数据融合效率低,视觉、力觉与测距传感器数据异构性强,传统线性加权融合方法难以保障实时性与精度平衡;3)智能化水平受限,多数系统依赖预设参数与固定控制逻辑,缺乏对突发干涉或位姿偏差的自适应调整能力。上述瓶颈导致现有自动化系统在工程应用中存在对接成功率波动大和鲁棒性不足等问题,严重制约飞行器批量化生产进程。本文旨在攻克固定翼飞行器多模态舱段对接难题^[1]。

此种装配对接方式,总体效率较低,装配一致性差,同时极大的依靠总装工人的个人经验,推广性差。难以精准应对。本研究旨在通过视觉、测距、质量等多模态的数据,实时捕捉舱段在复杂环境中的特征信息,结合数据融合,凭借软件强大的图像识别与分析能力,开发出适应恶劣工况下可靠的自动化舱段对接系统,舱段自动化对接系统可通过对接舱段的位姿数据采集及判断自动控制对接车进行各方向调整,进而实现两舱段的自动化对接。保障飞行器舱段在不同任务场景下稳定对接。舱段对接作为模块化实现的关键步骤,要求高效且精准。基于多模态数据源对接方法研究,致力于为固定翼飞行器提供智能化对接方案,实现不同功能舱段快速准确装配,提升飞行器研制与运维效率。精准稳定对接作为飞行器组合体得以构建、系统实现协同运行的根基。因此,本研究期望借助对多模态数据相结合的舱段对接的控制关键方法的深入探寻,自动对接相比人工对接具有明显的优势,其以数字化和自动化为依托,完成两节舱段之间的对接,它能更好更快的完成产品的装配任务,提高产品装配的质量,并且极大的减轻总装工人的劳动强度,最大程度减少对接碰撞风险与误差累积,进而提供固定翼飞行器装配效率^[2]。

本研究针对上述问题,提出基于多模态数据深度融合的自动化对接方案,旨在突破异构数据实时协同、动态位姿精准补偿等关键技术,为复杂工况下的飞行器舱段高效装配提供理论支撑与实践路径。

1 项目背景

进行基于多模态数据融合的固定翼飞行器舱段对接研究兼具多层面的重大意义。在科学理论层面,能够拓展控制理论于飞行器系统的应用边界,一方面拓展计算机视觉、模式识别在动态飞行器对接场景下的算法理论;另一方面促进控制理论、航空结构力学与智能技术融合,为飞行器系统设计、优化控制提供全新思路,填补相关学术空白,助力科研人员攻克更多前沿难题。为多飞行器协同飞行、集群作业筑牢理论根基,有力推动多学科融合发展。从工程应用价值来讲,既直接作用于我国未来飞行器地面对接等关键工程实践,实现对接流程的优化、组装周期的缩短以及成本的削减。

1.1 自动对接技术国内外研究现状

苏联在舱段对接领域堪称先驱,成果卓著。1967年,宇宙-186号与宇宙-188号飞船成功实现首次无人自动对接,验证了对接机构及自动控制技术的可行性,踏出关键第一步。此后,礼炮系列空间站时期,联盟号飞船、进步号货运飞船频繁与之对接,完善载人航天天地往返与物资补给体系,积累丰富经验,对接精度与可靠性不断进阶。和平号空间站时代更是苏联舱段对接技术的高光时刻。1986~1996年,量子-1号天文物理舱、量子-2号服务舱等多个功能舱段先后对接,构建起庞大空间复合体。俄罗斯继承苏联衣钵后持续深耕,星城航天训练中心的地面模拟设备群持续升级,如2019年启用的安德烈·彼得罗夫领导研发的新一代地面对接模拟系统,涵盖热、辐射等多环境模拟,大幅提升联盟号与国际空间站俄罗斯舱段对接可靠性,人才培养与技术研发协同推进,为对接任务强力赋能。

美国在舱段对接技术研发上同样全力以赴。20世纪60年代末,阿波罗计划中登月舱与指令舱在月球轨道的对接,堪称传奇。在月球引力场干扰下,宇航员凭借超高精度手动操控,完成复杂轨道动力学精算,为深空探测对接积累宝贵实战经验。航天飞机时代,其凭借可重复使用与强大载货能力,频繁将大型舱段、实验设备精准运抵国际空间站并对接安装,要求多元系统协同作业,催生一系列先进对接传感器与自动化程序,驱动技术飞跃。约翰逊航天中心科研团队打造高精度机械对接模拟装置,模拟空间站舱段对接,采集关键数据优化算法,提升对接成功率与空间站建设效率。斯坦福大学开发基于VR技术的地面舱段对接训练系统,缩短宇航员培训周期,增强应对复杂任务能力。此外,雷锡恩公司和波音公司开发的航天自动对接系统在美国的很多航空航天总装厂里都得到了广泛的应用。

我国舱段对接技术起步虽晚,却发展迅猛。2011年,神舟八号与天宫一号无人自动交会对接成功,攻克

并掌握自动交会对接核心技术，完成多项关键挑战验证。随后，神舟九号、神舟十号接力，圆满完成载人交会对接，航天员进驻天宫一号开展科学实验与太空生活体验，夯实载人航天对接技术根基。

自动对接技术是非人为干涉的自动化对接过程，其包含测量技术、控制技术、信息处理技术及反馈技术等。在空间站装配领域自动对接技术已经得到了广泛应用，而在飞行器生产领域，只有部分国外顶级航天器生产企业配备航天器舱段自动化对接系统，国内关于飞行器自动对接技术的研究还主要集中于核心理论研究^[3-4]。

1.2 项目研究意义

1) 提高对准效率：在面对航天器舱段形态与尺寸高度多样化的现实挑战时，传统的人工对接方式因其效率低下、精度受限以及人力物力消耗大等固有缺陷，已难以满足现代航天任务对高效、精准对接的迫切需求。因此，本研究聚焦于开发一种能够全面适应不同形态与尺寸舱段对接需求的自动化对接系统，该系统不仅旨在替代传统的人工对接流程，更在于通过技术创新，实现对接过程的智能化、高效化与精确化。

2) 提高对准精度：为了实现舱段自动对接，首要任务是构建一个通用且精确的建模框架，该框架需具备足够的灵活性与适应性，能够涵盖从标准到非标准、从简单到复杂各类舱段的几何形状与动力学特性。这一框架的建立，将依赖于先进的数学与物理建模技术，以及大量的实验验证与数据优化，以确保模型能够准确反映舱段在对接过程中的实际行为。

2 系统结构及原理

2.1 工作原理概述

舱段对接系统能自动完成两个舱段的对接过程，其中一个舱段被固定于静态平台上，充当被动对接舱段^[5]；另一个舱段则安装于可移动调节平台上，作为主动对接舱段。该可调节移动平台有上、下、左、右、前、后、左旋转、右旋转共 8 个自由度可以移动。

第一步称为轴线对准，该系统通过捕获的视觉信号，对两舱段的相对轴线位置进行确定。随后，利用伺服控制系统，调整可移动对接平台，主动对主动舱段在水平（左右）、垂直（上下）及滚转方向共 6 个自由度进行对准调整^[6]。完成调整后，主动舱段和被动舱段处于同一轴线上^[7]。轴向对准工作流程如图 1 所示。

第二步称为径向对接，轴线对准完成后，启动两舱段的对接流程，主动对接舱段沿 X 轴方向进行进给运动，在 X 轴方向的进给及对接阶段，系统采用激光测距传感器持续监测主动对接舱段在 X 轴上的精确位置，以确保对接过程的精度^[8]。

第三步称为控制反馈，对接过程中，被动舱段托架

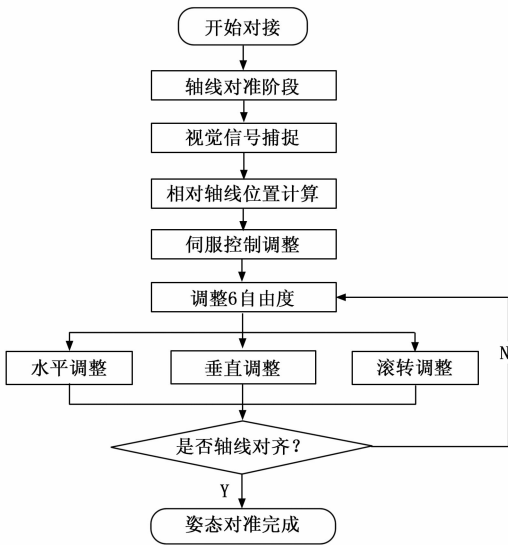


图 1 轴向对准工作流程图

上装备的 Z 轴力传感器用于检测舱段结构间是否存在潜在的干涉现象，并根据所受力的变化情况自动执行微调操作，以消除任何可能的干扰^[9]。进一步地，系统综合 X 轴力传感器与 Z 轴力传感器的读数变化，作为判断两舱段是否达到完全对接状态的依据。这一自动化对接系统的工作流程如图 2 所示，展示了从初步对准到最终对接完成的整个精密控制过程^[10]。

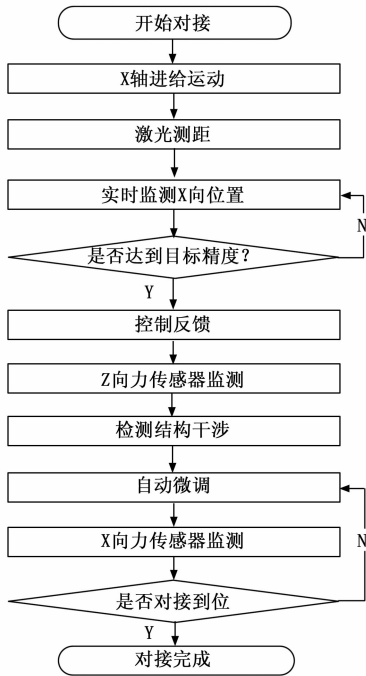


图 2 对接工作流程图

需对接的两舱段，一个置于固定平台上，为被动对接部分，另一个置于可移动调节平台上，为主动对接部分^[11]。通过采集到的视频信号，对两舱段的相对位置进行判断，并通过伺服控制系统驱动主动对接部分通过

左右和滚转方向的调整进行初对准, 初对准完成后主动对接部分将进行 X 向进给, 并开始两舱段对接^[12]。在 X 向进给过程及对接过程中, 通过激光测距传感器实时判断主动对接舱段的 X 向位置。对接过程中, 根据舱段托架上的 Z 向力传感器判断舱段结构是否有干涉, 并根据力的变化自动进行微调^[13]。根据 X 向力传感器度数变化再结合 Z 向力传感器读书, 判断两舱段是否对接到位。

2.2 视频辅助对准原理

自动对接的第一步是视频辅助对准过程。除在自动过程之前对被动舱段对接面的图像采集外, 整个过程还需对主动舱段进行两次图像采集。第一次采集舱段对接面的滚转角度, 通过与被动舱段的比对, 可确定主动舱段需进行的滚转调节量, 并进行相应的调节^[14]; 第二次采集舱段相对摄像头坐标系的 Z 向坐标, 通过与被动舱段的比对, 可确定主动舱段需进行的 Z 向调节量, 并进行相应的调节。

在舱段截面目标图像识别方面, 本系统引入了基于 AI 的先进图像识别算法, 该算法能够在复杂背景与光照条件下精确识别关键特征点, 为对接操作提供了可靠的数据基础。为了实现这一目标, 首先需要对模型进行训练。训练过程涉及大量样本数据的收集和处理, 这些样本包含了各种可能遇到的实际场景, 比如不同光照条件、不同的环境噪声以及舱段表面的材质变化等。通过模拟真实的对接场景, 我们能够生成大量的训练样本, 使得模型能够学习到如何在复杂的环境下准确地识别出舱段的关键特征点, 如边沿、销子、销孔等。此外, 为了增强模型的鲁棒性, 还会特别关注那些容易导致误判的情况, 比如部分遮挡、反光或者阴影等^[15]。

在选择和构建数据集时, 考虑到实际应用中可能会遇到的各种情况, 数据集不仅涵盖了标准情况下拍摄的高质量图像, 还包括了一系列挑战性的样本, 例如低照度条件下的图像、高对比度场景下的图像以及存在物理或光学干扰的情况。这些数据经过预处理后被用于训练深度神经网络模型^[16]。模型优化是一个持续的过程, 包括但不限于超参数调整、网络架构优化以及采用先进的正则化技术来防止过拟合。同时, 为了确保模型在长时间使用过程中依然保持高效, 还建立了一套模型性能监控体系, 定期评估其准确率、召回率等关键指标, 并根据实际情况适时地对模型进行微调甚至是重新训练。

同时提出了一种结合视觉信息、力觉反馈及距离测量等多种传感器数据的综合方案。在这一框架下, 所有传感器数据都需要经过时空对齐处理, 以保证它们在同一时间基准上反映同一个物理状态。具体来说, 视觉数据主要用于确定两舱段之间的相对位置关系, 而力觉传

感器则帮助检测是否存在潜在的干涉现象, 激光测距传感器提供精确的距离信息^[17]。为了有效整合这些来自不同源的信息, 采用了先进的融合策略, 如卡尔曼滤波器或是基于深度学习的融合网络。前者利用统计学原理估计最有可能的状态值, 后者则通过训练神经网络自动学习最优的数据融合方式^[18]。

2.3 力传感器辅助下舱段位姿精确调整原理

两舱段在接触后的对接过程中, 如果各结构均已对准并匹配, 则舱段应只受对接结构上的滑动摩擦力, 金属材料的摩擦系数很小, 因此此力也会很小, 虽然此力可能相对舱段的几何中心有一定的偏心、会产生偏心力矩, 但这个偏心力矩也非常小, 因此可认为 Y 、 Z 向应无分力; 而如果有结构未完全对准, 则可能会在干涉结构处产生阻力, 并产生相应的阻力矩, 导致主动舱段相对其支撑结构产生 Y 、 Z 向上有分力。因此, 我们可通过测量舱段对接过程中所受外力情况, 来分析两舱段对接过程中是否存在结构干涉, 并根据所受外力方向或偏心力方向来分析干涉产生的位置和方向, 据此可对主动对接舱段进行微调, 以实现精确调整。

3 系统硬件设计

自动化对接系统硬件由对接系统结构、伺服控制系统、图像采集系统、力传感器、激光测距传感器、综合控制板和上位电脑组成^[19]。

本研究将充分利用高精度传感器技术, 包括但不限于激光测距、力传感器、姿态传感器等, 实现对舱段位置、姿态、受力状态等关键参数的实时监测与精确测量。对于非标准形状和内部结构复杂的舱段, 系统将采用基于 AI 的图像处理技术, 结合传感器数据, 实现对舱段内部结构的精确建模与参数提取。这一过程将大大提高对接前准备的效率与准确性, 为后续的高精度对接控制提供坚实的数据支撑。在对接控制策略上, 本研究将引入先进的控制算法与反馈机制, 以提高对接控制的精确性与鲁棒性。通过实时监测舱段间的相对位置与姿态, 以及受力状态的变化, 系统能够自动调整对接策略, 确保在对接的最后阶段实现高精度的位置与姿态对准。

3.1 对接系统组成

对接系统结构是自动化对接系统的机械结构部分, 主要由底盘、固定托架、可移动平台、摄像头安装平台、控制机柜等组成^[20]。对接系统结构如图 3 所示。

1) 底盘: 固定托架、摄像头安装平台、控制机柜等都安装在再底盘上, 底盘上还安装有可移动平台 X 向移动所需的直线导轨和滚珠丝杠等。

2) 固定平台: 固定平台用于支撑被动对接舱段。

3) 可移动平台: 可移动平台放置于底盘上的 X 向

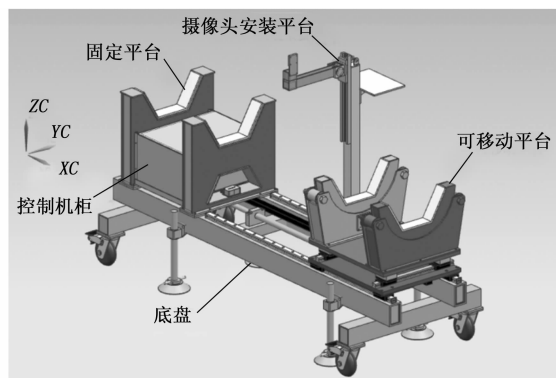


图3 对接系统结构示意图

直线导轨上,其上还设有Z向移动调节机构和滚转调节机构。主动对接舱段放置于可移动平台的托架上,可进行Z向调节和滚转调节。主动舱段的X向进给和Z向调节通过伺服电机带动滚珠丝杠转动实现,滚转调节通过伺服电机带到滚转调节托架转动实现。

4) 摄像头安装平台:摄像头安装平台用于安装摄像头。摄像头安装在摇臂上,通过电机控制摇臂位置:在摄像头采集图像信息时,摇臂放下,使摄像头位于两舱段之间;当两舱段进行对接时,摇臂抬起,使摄像头避让舱段。

5) 控制机柜:220 V交流电源配电器、24 V直流电源、空气开关、工作指示灯、综合控制板、伺服电机驱动器、力传感器变送器均安装在控制机柜内。

3.2 伺服控制系统

伺服控制系统包含伺服电机、减速器、伺服电机驱动器和PLC。

PLC向伺服电机驱动器发送脉冲信号控制伺服电机转动圈数,通过设置电机转动一圈的脉冲数可调整电机的转动精度,通过调整每圈脉冲数和PLC发送脉冲的频率可调整伺服电机的转速。例如:设定为10 000个脉冲电机转动一圈,PLC发送脉冲频率为5 000 Hz,则单个脉冲电机转动0.000 1圈,也即电机转动精度为0.036°,电机转动速度为每秒2圈。PLC通过RS232接口与综合控制板相连,综合控制板可控制PLC向指定电机用指定的频率发送指定数量的脉冲,以控制指定电机以指定的转速转动指定的圈数。伺服电机输出端安装由减速器,通过减速器可降低输出轴转速,进一步提高调节精度,另可增加输出扭矩。

3.3 图像采集系统

图像采集系统选用智能摄像头。智能摄像头分辨率为1 600×1 200像素,根据图像采集区域大小,具有不同的采集精度。根据上文分析,本系统可只采集舱段对接面上部四分之一区域,采集区域大小为140 mm×80 mm。因此,理论上摄像头单像素点采集精度可达

$140/1\ 600=0.087\ 5\text{ mm}$,综合考虑摄像头边缘处的畸变影响和采光情况变化带来的影响,摄像头采集精度不低于0.1 mm,角度精度不低于0.05°。

摄像头需提前采集被动对接舱段对接面图像,并使用其自动图像处理软件对采集到的图像进行分析和处理,在处理时,软件会在所采集图像中自动生成坐标系,并会得到一组参数:舱段的滚转角度及舱段相对摄像头坐标系的Z向坐标(摄像头坐标系的X向,为不产生歧义。在自动对接过程,摄像头会采集主动对接舱段对接面的图像,并与之前的图像进行比对,如两图像相似度大于80%(可设定),则会输出此图像在之前生成坐标系中的相应一组参数。控制软件根据此两组参数可比对出两舱段的相对位置差,并控制伺服系统调整主动对接舱段的位姿。

为提高调整精度,减少反复迭代次数,我们把对主动对接舱段图像的采集分为两次:第一次仅使用其生成的滚转角度,并依此对主动对接舱段进行滚转调节;第二次仅使用其生成的Z向坐标,并依此对主动对接舱段进行Z向调节。这样做的好处是,在Z向调节时,可不必考虑由于滚转而引起的标识点Z向位移。摄像头通过网口与综合控制板相连,实现数据传输。

3.4 力传感器

力传感器用于在两舱段接触时,检测主动对接舱段X向和Z向的受力情况。如上文所述,如Z向力过大,则表示两舱段未对齐,其结构产生干涉,而其干涉产生的位置相对于舱段竖直中心的偏移方向则正好与力的方向相反,因此可延Z向力方向对主动舱段进行微调。如Z向力未超过阈值而X向力过大,则表示两舱段对接到位。

本系统所选力传感器量程为200 kg,测量精度为0.1%FS。传感器自带变送器,将传感器的模拟信号转换为数字信号,通过RS485接口传送给综合控制板。

3.5 激光测距传感器

激光测距传感器安装在固定平台下方,用于检测固定平台与可移动平台的间距。当两舱段对接过程中产生干涉时,需根据激光测距传感器所检测到的两平台间距减少量,控制可移动平台后退,使两舱段分离后对主动对接舱段进行微调。

3.6 综合控制板和上位电脑

综合控制板和上位电脑是整个自动对接系统的控制核心。综合控制板负责采集摄像头、力传感器、激光测距传感器的数据,并通过RS422接口提供给上位电脑。

上位电脑选用普通的工业一体机电脑,运行Windows7系统。控制软件将在电脑上运行,通过采集到的各项数据,计算出伺服控制系统需进行的调节,并将此数据传送给综合控制板,由综合控制板控制伺服控制系

统动作。

3.7 可调节部分参数介绍

整结构中,影响最终对接精度的可调节部分包括 X 向移动部分、Z 向移动部分、滚转调节部分和摄像头位置调节部分。

X 向平移部分: X 向平移部分使用滚珠丝杠调节,滚珠丝杠的调节精度为每转动 1 圈,丝杠螺母移动 5 mm。

Z 向平移部分: Z 向平移部分同 X 向平移部分相同。

滚转调节部分: 滚转调节部分使用齿轮配合,其齿数比为 530:50,也就是减速器输出轴每转动 1 圈,托架转动 $360^\circ \times 50/530 = (1\ 800/53)^\circ$ 。

摄像头位置调节部分: 摄像头安装摇臂转动轴与电机减速器直连,减速器输出轴没转动 1 圈,摄像头安装摇臂转动 1 圈。

4 系统软件设计

本系统软件主要包括图像处理软件和主控制软件。

图像处理软件直接集成在智能摄像头中,用于将摄像头采集到的图像信息转化为对接端面的相对位置坐标。软件选用成熟商业软件,本文不再复述。

主控软件在主控计算机上提供主控界面,并根据图像采集器、激光测距传感器、力传感器采集到的相关参数控制伺服控制系统完成对主动对接部分位姿的调整,最终完成两部分的对接。

4.1 主控软件

主控软件界面如图 4 所示。

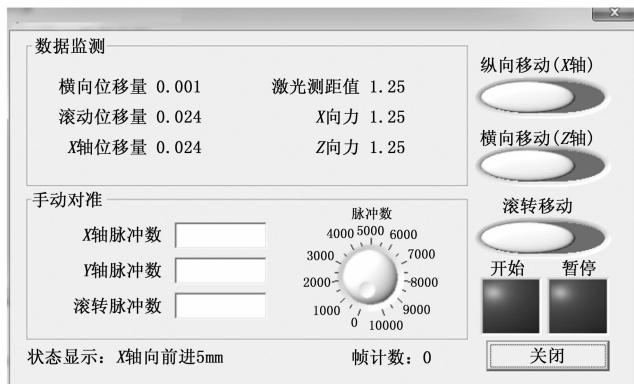


图 4 主控软件界面

主控软件界面可实时显示两个力传感器和激光测距传感器采集的数值,可显示主动对接舱段横向位移量、滚转位移量和 X 轴位移量。数据检测如图 5 所示。

主控软件可控制伺服电机按指定的转速转动指定的角度,进而实现各调节机构的调节动作。软件可实现手动控制和自动控制两种功能,在手动控制模式下,可对指定电机手动输入脉冲数及脉冲发送频率,并控制其动



图 5 主控软件数据监测界面

作。手动控制输入界面如图 6 所示。

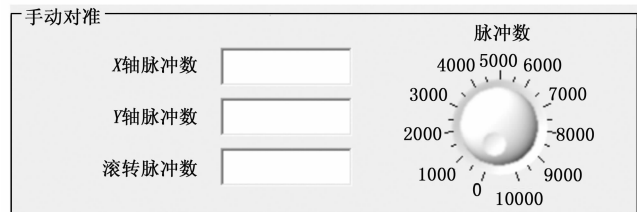


图 6 手动控制输入界面

4.2 自动控制对接软件流程

在自动控制模式下,主控软件将自动控制伺服系统完成两舱段的对接。自控控制的流程如图 7 所示。

5 实验结果与分析

使用舱段自动对接系统对现有不同类型飞行器的舱段截面开展对接控制实验验证工作,通过与实际对接要求和性能指标进行对比分析,验证所研究的对接控制关键方法的正确性和有效性。对实验结果进行深入分析总结,为进一步优化和完善对接控制方法提供依据。

5.1 试验方法

在专门的实验平台上,针对集成后的对接控制系统展开全方位的实验验证工作,实验涵盖不同形态和尺寸舱段的对接测试,以及在各种不同初始条件与外部干扰状况下的模拟实验等。依据实验所获取的结果,对系统的综合性能展开全面评估,深入剖析其中存在的各类问题,并实施针对性的改进与优化措施,最终成功构建出一套成熟完善的多形态多尺寸舱段对接控制关键方法以及与之配套的技术体系,为实际应用提供坚实可靠的技术支撑。

除了对不同形态和尺寸舱段进行对接测试外,我们还特别设计了一系列实验来评估系统在复杂环境下的性能。这些复杂环境包括高低温条件、电磁干扰以及动态扰动等。为了模拟实际工作条件中的极端温度变化,我们在专用的环境试验室内进行了高低温循环测试;对于电磁干扰测试,则是在强电磁场环境下检验系统的稳定性和可靠性;针对动态扰动的影响,我们通过模拟飞行器起飞和着陆时可能遇到的振动情况,考察了系统能否在这种条件下保持高精度对接。

此外,尽管当前系统仅支持三自由度调节,但我们也探讨了这种局限性对实际应用的潜在影响,并提出了

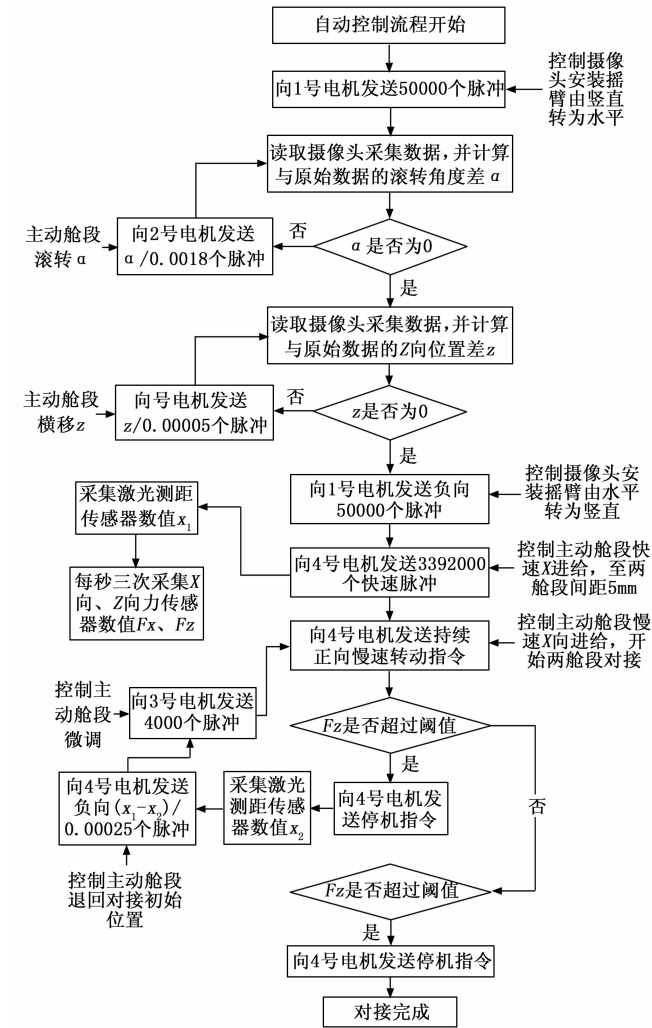


图 7 软件流程图

一些可能的解决方案。例如,在某些情况下,可以通过增加额外的机械调整装置或者采用更复杂的控制策略来弥补这一不足。

最后对实验数据实施处理与分析。通过将实际对接过程中的相对位姿变化与期望对接路径进行对比,以此来评估对接控制的跟踪精度,来评定控制的稳定性以及响应速度。根据数据分析所得到的结果,对对接控制方法以及实验平台进行优化与改进工作,不断提升整个对接控制系统的性能表现。

5.2 试验内容

自动化对接系统研制阶段,共进行了与舱段的机械对接试验、系统散件联调试验、系统整体匹配性试验、图像采集试验、舱段对接力匹配试验和自动化对接试验。

- 1) 舱段的机械对接试验;
- 2) 系统散件联调试验;
- 3) 系统整体匹配性试验;
- 4) 图像采集试验;
- 5) 舱段对接力匹配试验;

- 6) 自动对接试验;
- 7) 复杂环境下的性能验证。

自动化对接系统研制阶段,共进行了与舱段的机械对接试验、系统散件联调试验、系统整体匹配性试验、图像采集试验、舱段对接力匹配试验和自动化对接试验。

5.3 试验验证过程

5.3.1 舱段与对接系统的机械协调性验证

将舱段分别放置在固定平台和自动移动平台上,观察两者是否有结构干涉。试验结果二者匹配性好,无结构干涉。

5.3.2 传感器性能验证

验证伺服控制系统、摄像头、力传感器、激光测距传感器与综合控制板的匹配性,验证综合控制板与上位电脑的匹配性。将伺服控制系统通过 RS232 接口与综合控制板相连,并通过串口向伺服系统发送指令字,看伺服系统是否按指令执行电机动作。将摄像头通过网口与综合控制板相连,并通过串口采集综合控制板数据,看综控板是否采集到摄像头是数据。将两个力传感器通过 RS485 接口与综控板相连,并通过串口采集综合控制板数据,看综控板是否采集到力传感器数据,其采集到的数值是否与变送器上显示数值一致。将激光测距传感器通过 RS232 接口与综控板相连,并通过串口采集综合控制板数据,看综控板是否采集到激光测距传感器数据,其采集到的数值是否与传感器显示屏上数值一致。将综控板通过 RS422 接口与上位电脑相连,通过串口向综控板发送指令字,并通过串口采集综控板数据,看综控板接受到的指令字与上位电脑发送的指令字是否一致。试验结果:各传感器功能正常,精度正常。

5.3.3 系统整体匹配性试验验证

验证系统整体匹配性,将系统个设备连接好。打开主控软件,看其显示的力传感器和激光测距传感器数值是否与力传感器变送器和激光测距传感器上数值一致。在主控软件上手动输入伺服电机脉冲数,并控制电机动作,看电机实际动作是否与指令一致,看相应位移量显示是否与指令一致。试验结果:系统整体匹配性好。

5.3.4 图像采集试验验证

验证摄像头图像能力,并制定其采集特征点。使用摄像头自带图像处理软件采集舱段图像,并制定参考特征点。试验结果:摄像头可正常采集并处理舱段图像。

5.3.5 舱段对接力匹配试验

研究舱段对接过程中,针对两舱段不同的位姿差异受力的变化情况。手动调整两舱段,使其产生一定的位姿偏差,在此基础上进行对接,观察并记录力传感器在对接过程中的读书。验证结果:传感器记录正常。

5.3.6 自动对接试验

验证系统自动对接能力。试验方法将两舱段放置在自动化对接系统上,使用主控软件自动对接模式,进行两舱段对接。试验结果:自动化对接系统可自动完成两舱段的对接。

5.3.7 复杂环境下的性能验证

包括高低温、电磁干扰、动态扰动等多种复杂环境条件下的对接测试。

5.4 试验验证过程

强电磁干扰环境下,系统通过优化屏蔽设计和信号处理算法,确保了数据传输的准确性,对接成功率达到了 98% 以上。

动态扰动测试表明,系统能够有效抵抗轻微至中等程度的振动干扰,但在剧烈振动条件下仍需进一步优化以提高稳定性。

对接时间较传统人工对接方法缩短了约 70% 的时间。位姿误差范围控制在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 内,显著优于行业标准要求。力传感器阈值设定基于大量实验数据统计分析得出,确保既能及时检测到干涉现象又不会因误判而频繁触发微调机制。

6 结束语

自动化对接系统圆满完成了研制工作,可完美实现舱段的自动对接。考虑到不同型号舱段外形、舱段对接面结构的不同,为提高自动化对接系统的适应性,后续还需继续针对不同结构舱段开展自动化对接系统的适应性改进工作,并结合实际型号,总结归纳不同类型舱段的不同控制模式。同时,本次课题研制的自动化堆积系统仅为三自由度调节,在实际应用中很难满足使用需求,后续还需开展更多自由度调节的自动化系统。详细分析了现有三自由度系统在处理多自由度需求时面临的挑战及其改进方向。

在飞行器舱段对接的关键环节,舱段截面的目标图像识别方面,在舱段表面图像采集流程中,该算法展现出卓越的精准度,能够在复杂的背景与光照条件下,精确无误地识别出舱段的边沿、销子、销孔等关键特征点的确切位置,为后续对接操作提供坚实的数据基础。当经过大量样本训练、优化后的模型被成功部署到自动识别软件平台后,一旦新的舱段截面图像被图像采集设备捕获,软件便能迅速、自动地调用模型执行舱段位置识别任务,极大提高了识别效率。不仅如此,考虑到实际应用场景的多变性,在长期使用过程中,专门构建了模型性能监控体系,实时追踪其准确率、召回率等关键指标。一旦发现模型性能下滑,即刻根据新出现的舱段变化情况有针对性微调,甚至重新训练,以此确保模型始终能够灵活适应不同舱段在设计、制造工艺、使用损耗等方面变化的多样性,保障对接任务顺利推进。

参考文献:

- [1] 魏乐愚,刘检华,崔金星.基于视觉检测的航天产品高精度对接系统研发[J].北京理工大学学报,2025,45(4):360-366.
- [2] 汤辉,晋严尊,刘赛华.导弹舱段对接姿态偏差测量方法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2022(5):24-27.
- [3] 刘赛华,晋严尊,汤辉.导弹舱段自动对接系统设计[J].组合机床与自动化加工技术,2022(2):103-106.
- [4] 潘鹤斌,袁桢棣.导弹舱段自动对接平台设计与研究[J].现代制造技术与装备,2020(1):49-52.
- [5] 鲁俊兴,唐翔,刘晓娟,等.小型导弹舱段在线同轴度测量对接装置设计[J].机械设计与制造工程,2019,48(12):57-59.
- [6] 温晶晶,刘承骛,吴斌,等.基于 Stewart 平台的导弹舱段自动对接方法研究[J].弹箭与制导学报,2017,37(5):47-51.
- [7] 宋兴君.导弹舱段对接中的非接触测量系统设计与分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [8] 李世其,陈栋,王峻峰.并联机构实现舱段对接的位姿测量方法及试验研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):150-158.
- [9] 陈伟,李明慧,周瞳,等.基于数字化装配偏差建模的飞机舱段对接定位方案研究[J].机械设计与制造,2012(1):245-247.
- [10] 陈冠宇,成群林,张解语,等.基于多传感器测量的航天器舱段自动对接位姿调整方法[J].北京航空航天大学学报,2019,45(6):1232-1239.
- [11] 易旺民,段碧文,高峰,等.大型舱段装配中的水平对接技术[J].计算机集成制造系统,2015,21(9):2354-2360.
- [12] 沈晓成.导弹舱段部件精密柔性装配系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [13] 陈峰.导弹舱段气浮式柔顺自动装配研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [14] 于斌.航天器舱段自动对接技术与仿真[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [15] 陈栋.舱段对接并联机构的轨迹规划及运动控制技术[D].武汉:华中科技大学,2020.
- [16] 杨庆五.基于机器视觉的飞行器舱段对接圆孔尺寸检测技术研究[D].武汉:华中科技大学,2024.
- [17] 王陆明.面向弹体舱段对接的视觉三维测量技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2023.
- [18] 张振宇.基于国产 PLC 的舱段对接视觉检测定位系统研究[D].长沙:国防科技大学,2022.
- [19] 张解语.面向舱段对接的位姿自动化测量关键技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2020.
- [20] 李亚军.基于双机器人协同的舱段对接装置结构设计与分析[D].西安:西安电子科技大学,2020.