

# 飞机无杆智能牵引系统研究

姚永鑫

(陕西军工人力资源有限责任公司 陕西 西安 710000)

**摘要:**近年来,随着航空科技的蓬勃发展,机场飞机的起降架次明显增多,无杆牵引技术以其高效、安全可靠的牵引特点受到青睐。本文提出了无杆智能牵引系统的方案设计,以及车体框架和夹持机构的结构设计,通过研究多源融合定位、地图构建和上层程序框架等关键技术,实现无人牵引车的自主定位导航、自主路径规划、自主避障功能。通过部署智能牵引系统,引导、控制无人牵引车自主完成对飞机的牵引作业。

**关键词:**智能牵引系统;无杆牵引技术;夹持机构;地图构建;路径规划

## 0 引言

飞机的牵引分为两种形式,一种是采用牵引杆将飞机与牵引车相连接,称为有杆牵引;另一种是在牵引车上设置夹持机构,将飞机与牵引车连接为一体进行牵引作业,不需要牵引杆,这种形式被称为无杆牵引。相较于有杆牵引技术,无杆牵引车以其运行成本低、转弯半径易于掌控、在完成牵引飞机的任务时更安全高效等优势,在市场中所占的比例越来越高,无杆牵引技术也逐渐发展成为一种先进的牵引方式。随着机场飞机起降架次的增多,对无杆牵引技术也提出了更高的要求,安全、高效、智能和操作灵活是无杆牵引技术未来的发展方向。

## 1 智能牵引系统方案设计与实现

飞机的无杆智能牵引系统实则是给传统牵引车赋予了自动进行牵引作业的能力,实现对飞机的智能牵引。牵引系统是指挥运管系统中的关键一环,在接收到运管系统的指令后,按照系统规划路径,自动行驶到飞机降落停靠机位附近,通过图像识别等技术完成对飞机起落架的精准对接,然后按指令命令展开作业将飞机拖拽至指定位置。无人牵引车结构设计如图1所示。

### 1.1 智能牵引系统方案设计

无杆智能牵引系统采用无人牵引车和终端监控方式,在终端监控平台以云的方式与无人牵引车进行联合部署。云端的功能主要是通过大屏展示无人牵引车的部署、运行状态信息,以及所有信息的记录、

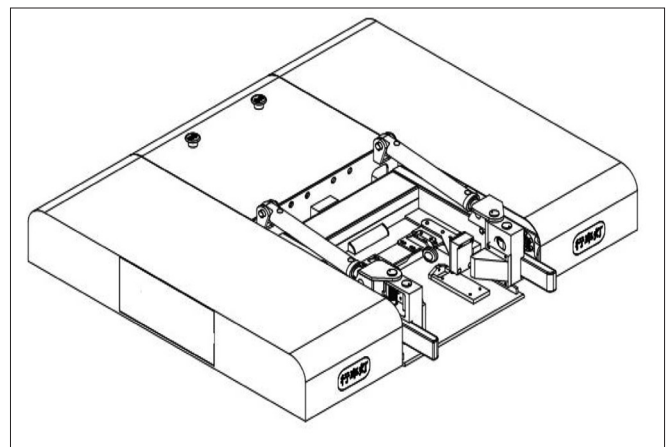


图1 无人牵引车

处理、挖掘和分发。当牵引作业通过远程终端无法完成时,机务也可进行人为干预,通过近程线控的方式操作无人牵引车继续完成牵引作业。

智能无人牵引车在传统牵引车的基础上添加嵌入式计算机、激光雷达、GNSS定位系统、高清视觉固态雷达等,通过这些器件组合搭建无人牵引车的硬件控制平台。系统方案设计架构如图2所示,采用分层结构体系,各个层级之间均有明确的定义接口,总体上以实现功能为主要完成标志。

### 1.2 智能牵引系统方案实现

无人牵引车、控制系统和远程监控平台是智能牵引系统的主要组成部分。无人牵引车是智能牵引系统执行牵引作业的载体,主要由车体框架和夹持机构所组成,包含电池组、充电接口、驱动装置、通信装置、安全与辅助装置等。无人牵引车承担着对飞机的牵引作业任务。控制系统是智能牵引系统的大脑中枢,控

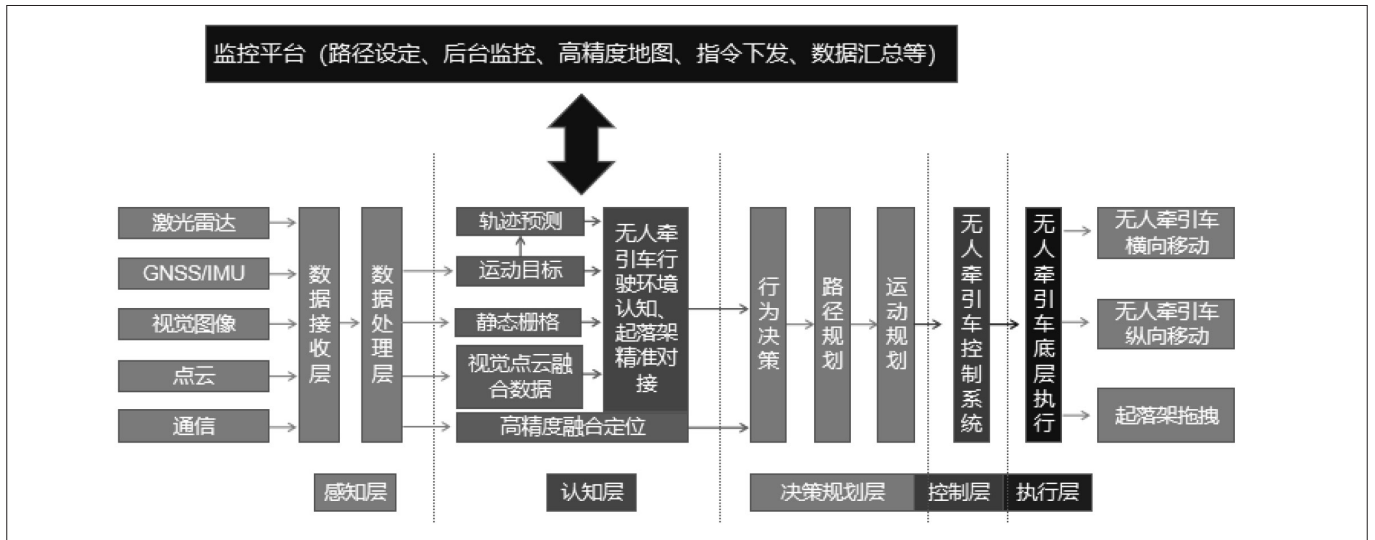


图2 方案架构图

制无人牵引车实现自主避障、自主导航、地图构建等功能。远程监控平台是终端控制单元，下达牵引作业指令，并实时监控整个作业过程。

智能牵引系统控制无人牵引车实现的功能包括对飞机起落架的检测识别、对飞机起落架位置的计算、与飞机起落架的精准对接、支持远程控制无人牵引车运动以及自主规划路径与避障。牵引车接收到终端控制系统发送的指令，离开停靠的自主充电位置，按照系统的规划路径、通过定位导航软件的指引自动行驶至飞机停靠机位；夹持机构完成对飞机抱轮的操作，牵引车牵引飞机行驶至目标位置，然后夹持机构释放飞机的牵引舵轮，自动驶离、开始下一趟牵引作业或回到充电位置进行自动充电，如此完成一个牵引作业流程。在牵引车作业的过程中，车体周围的视频图像通过车载摄像头拍摄获取，且实时传输到远程监控平台进行显示，以便于监测无人牵引车的动态信息，保证无人牵引车的整个作业过程智能、高效和安全可控。

## 2 无人牵引车结构研究

### 2.1 车体框架

车体框架主要采用方钢焊接而成，为便于吊装和装车运输，车体侧面布置系留吊环，防止运输途中发生侧滑造成碰撞损坏。在夹持机构抬起的前提下，车体离地高度应符合相关标准要求。车体前后各设置两组照明灯，车体两侧设置示廓灯。车体结构中设计了独立的功能模块组件舱室。

为了增加车体刚性，由方钢焊接而成的车体框

架在重要的连接部位设计有加强筋，以保证连接的可靠性。在设计时充分考虑车体结构的刚度和强度，避免出现应力集中区域。在设计车体框架结构时，充分考虑防水、防锈、防盐雾、防湿热的设计要求，型材优先选择焊接性能好的高强度方钢。车体表面喷涂具有防锈防盐雾功能的底漆，面漆的颜色根据客户的要求选取，面漆采用烤漆工艺。

### 2.2 夹持机构

夹持机构是无杆牵引车的核心装置，能否实现与飞机舵轮的高效对接直接决定牵引车的性能优劣。在作业时保护飞机起落架不被损伤，提高飞机牵引的安全性，提高作业效率，提高操作的灵活性，全程实现智能化的无人对接操作，是夹持机构的设计目标。夹持机构实现了对飞机舵轮的抱轮、抬升、释放等操作。夹持机构将飞机的舵轮举升到设计高度，将飞机的部分重量传递到牵引车上，增加了牵引车作业时的重量，使得牵引车与地面的摩擦力增加，并通过反作用力使得牵引车的牵引力增加<sup>[1]</sup>。设计采用伺服电动缸作为夹持机构的传动装置，夹持机构中设置有导向装置，在对飞机舵轮举升的过程中可以自动对中；当电动缸回到最短行程时，夹持机构完全抬起。伺服电动缸通过滚珠丝杠进行传动，在电动缸的电动机断电后，滚珠丝杠停止转动，夹持机构实现自锁，在牵引车牵引飞机作业的过程中可以保证夹持机构不发生转动，从而避免飞机舵轮从夹持机构平台上滑落到地面，提高牵引作业的安全性和可靠性。

### 2.3 驱动机构

智能无人牵引车的驱动机构采用动力电池加驱动

电动机的组合形式。车体结构中设置电池舱室,车载电池组放置于舱室之中,在一个充电周期内可以提供较大的续驶里程;安全性和长续航是车载动力电池选择时首要考量的因素。动力电池的工作温度能够满足机场使用环境要求,智能无人牵引车在非作业状态下自动返回充电位置为车载动力电池组充电,完成充电任务后,依靠程序控制进行断电保护。

无杆牵引车采用四轮配置,由动力电池向驱动电动机供电。驱动电动机输出转矩,通过减速机降低转速、提高转矩,达到可以驱动牵引车作业的转矩值,然后通过传动装置将转矩传递给驱动轮。驱动轮采用实心橡胶钢圈轮胎,由于机场路面较为平整,因此实心橡胶轮胎可以满足牵引车的避振需求。驱动轮前端设置为两个主动轮,前端采用阿克曼转向机构,转向机构的转向动作由电动缸完成,后端设计为从动轮,夹持机构设置于后端位置。

### 3 控制系统研究

控制系统是无人牵引车的中枢神经,控制无人牵引车按照终端发出的指令自主运行、自主完成牵引作业。定位导航模块、核心程序软件包、通信接口和驱动程序等组成了控制系统。主控系统主要实现对前端主动轮驱动电动机的协调控制,以及接收远程监控发出的指令信息<sup>[2]</sup>。运行主控程序,通过无线网络的接口与无人牵引车核心处理软件进行通信,传输任务信息、控制指令与视频数据。核心处理程序通过串口连接与底盘控制程序进行通信、传输检测数据与控制指令,从而控制系统架构。

### 4 系统关键技术研究

无人牵引车的定位导航软件利用 ROS 中的 move\_base 框架,实现无人牵引车的自主定位导航、自主路径规划、自主避障和地图构建等功能。激光雷达传感器、深度摄像头、超声波测距传感器等各类传感器发送的信息被导航软件接收,然后导航软件对接收的数据进行过滤和融合处理。结合配套的软件接口应用,定位导航软件能高效准确地输出无人牵引车的位置信息和周围环境信息,进而实现无人牵引车的自动导航功能<sup>[3]</sup>。其中要实现的模块有:多源融合定位、地图构建和 move\_base 程序包模块。

#### 4.1 多源融合定位

无人牵引车运行过程中的定位是利用 GNSS (全球

导航卫星系统)、3D 激光雷达、惯性测量单元等传感器实现的。这些传感器可以提供高精度的姿态信息和可靠的位置、速度信息,不仅可以解决高精度问题,而且可以有效提高系统的完好性和可用性,即使在有树木、建筑物遮挡等卫星信号丢失的情况下也能保持高精度的定位输出。实现无人牵引车定位导航与安全运行所要求的智能导航决策,需要的前提条件包括精确的定位、高精度的地图和最优的路径规划。

使用 GNSS 实现室外绝对定位,可以使无人牵引车不依赖周边环境,不依赖自身初始位姿和时间,直接得到地球坐标系下的坐标信息。但是传统的 GNSS 定位精度在米级,而一般无人牵引车行走的车道也在米级,无法保证无人牵引车在车道上的正常行走。室外全天候厘米级定位可以通过采用 RTK (Real-time kinematic, 实时动态) 来实现,但是 RTK 容易受到卫星状况、天气状况、数据链传输状况的影响,保证不了 100% 的可靠性;并且依赖的北斗信息无法在建筑物内和高楼密集区使用。RTK 仅适用于空旷的区域,不适用于建筑物密集的城市中心、建筑物内的场景。

激光雷达通过向外发射探测信号(激光束),然后将返回的信号(目标回波)与发射信号进行比较,进行适当处理后,便可获取目标的相关信息,例如距离、方位、高度、速度、姿态、甚至形状等,从而对周边环境进行探测、跟踪和识别,同时还能根据获得的信息数据形成精确的数字模型。激光雷达具有分辨率高(相比微波雷达)、抗干扰能力强、不受光线影响(白天黑夜全天候)、体积小等优点;但是在恶劣的雨雪天气下,激光雷达的测量信息误差会明显增大。在空旷的路面环境下,因为超出激光雷达的最大测距范围,是无法使用的;激光雷达适用于建筑物密集的城市中心和建筑物内的场景。

惯性测量单元包括陀螺仪和加速度计,能连续、高速地输出位置、方向和速度信息,不依赖外部环境,不需要任何外部信号,能在若干秒内提供精确的定位信息。对于北斗定位、激光雷达数据采集间隔这段时间,惯性测量单元能起到很好的补充和验证作用<sup>[4]</sup>。

通过对上述三种传感器的信息融合,可以实现定位信息的优势互补、相互验证,提供一定的冗余替补性。基于 Kalman 滤波器的松耦合理论,将惯性测量单元(IMU)测量采集的加速度和角速度积分得到的位置、速度、姿态数据,作为卡尔曼滤波器传播阶段的预测模型,将 RTK 定位和激光雷达点云定位



结果作为卡尔曼滤波器的量测更新依据；相应地，经过卡尔曼滤波器的递推解算，对惯性测量单元测量的加速度和角速度进行矫正，最终输出更加精确而且平滑的位置、速度、朝向结果。

### 4.2 地图构建

采用 cartographer 算法构建地图。此图优化 SLAM 算法不同于滤波方法，它不仅修正无人牵引车当前时刻的位置姿态信息，使得牵引车当前时刻的位姿尽可能地准确，而且无人牵引车之前时刻的位姿信息也能通过回环检测方法来进行优化修正。图优化 SLAM 算法的基本思路，是利用保存的所有传感器测量信息以及它们之间的空间约束关系，完成对无人牵引车的运动轨迹及行进地图的评估。用节点来代表无人牵引车的位姿，而节点之间的边界代表位姿间的空间约束关系，通过这种方法所得到的图被称为位姿图。在位姿图构造完成后，通过调整位姿序列，使其所表示的约束关系能达到最优，优化后的结果即为无人牵引车的运动轨迹图<sup>[5]</sup>。

其中，图优化 SLAM 算法主要包括前端和后端两个过程，图优化 SLAM 算法的框架如图 3 所示。数据的关联和闭环检测主要由前端负责，数据关联的作用主要是处理局部数据关系，解决连续数据帧间的匹配以及相关姿态估计的问题。全局数据关系处理主要通过闭环检测来实现，通过传感器所获得的数据判断无人牵引车当前位姿与之前已访问区域位姿之间的匹配度。无人牵引车通过执行上述两个过程完成位姿图的构建，即图优化 SLAM 的前端。由于传感器获得的数据与所创建的地图存在匹配误差，会导致前端获得的位姿图存在偏差，因此需要后端对部分位姿图进行修正。后端处理不直接对传感器的观测数据进行处理，而是仅对前端创建的位姿图进行优化，得到的位姿的数据值即最优的位姿序列<sup>[5]</sup>。

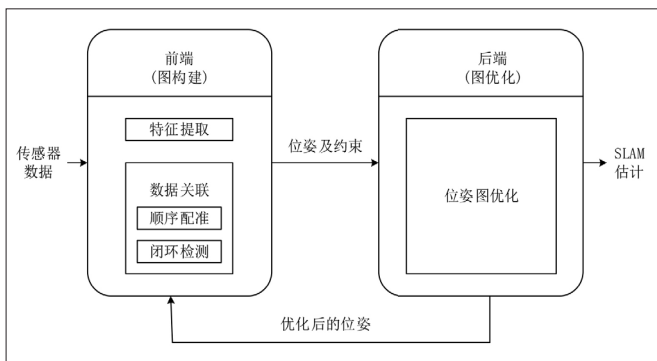


图3 图优化SLAM算法的框架

### 4.3 move\_base 程序包模块

move\_base 是整个导航包的最上层，将各个功能模块组合起来，然后用 simple action server 接收目标并完成导航任务。其主要功能是进行调参调优，使得无人牵引车具备流畅的避障导航能力。

move\_base 是 ROS 下关于无人牵引车路径规划的中枢，ROS 导航的配置、运行、交互接口由 move\_base 程序包提供。其依靠激光雷达、北斗导航和 RTK 的定位数据，依次规划出全局路径和本地实时路径，再将规划出的路径信息转化为无人牵引车的速度信息，最终实现无人牵引车的自主导航功能。其中，全局路径规划是指根据设定的目标位置进行总体路径的规划；本地实时路径规划是指根据牵引车运行附近的障碍物进行躲避路线规划。

### 4.4 夹持机构与舵轮起落架精准对接

当无人牵引车自动行驶到飞机停机坪附近后，需完成与飞机起落架的精准对接，从而进行牵引作业。采用图像识别与雷达测距技术实现无人牵引车与飞机起落架的精确对接；通过图像及点云进行精确的定位，自动控制牵引车，调整姿态，实现精确对接。

基于图像识别与雷达测距技术的无人牵引车与飞机起落架自动对接和调整系统，包括前端视觉雷达装置、图像处理模块、位置调整计算模块及后台处理软件。其中，位置调整计算模块包括横向位置距离角度计算模块和纵向距离监测模块。前端摄像装置采集飞机起落架图像，用于飞机起落架的识别和飞机起落架位置的标定。经图像处理模块核准后，将采集的飞机起落架图像与飞机起落架数据库中预存的现有飞机起落架图像进行比对。选择到相同起落架后，后台处理软件将得到的起落架信息形成标定框作为标定图像，与前端摄像头采集的图像进行标定比对。同时，后台处理软件具备对无人牵引车的控制功能，利用比对后的图像数据提取到对应的点云数据，计算无人牵引车与起落架之间的相对位置，通过位置调整计算模块自动控制无人牵引车，使其移动至起落架正前方，从而进行后续拖拽工作<sup>[6]</sup>。

## 5 结语

无人牵引车是智能牵引系统执行作业任务的载体，定位导航软件实现对无人牵引车的自主定位导

航、自主路径规划、自主避障和地图构建。定位导航软件对接收的各类传感器的数据进行过滤和融合处理,结合配套的软件接口应用,高效准确地输出无人牵引车的位置信息和周围环境信息,进而实现无人牵引车的自动导航功能。控制系统对无人牵引车进行自主控制,依靠远程监控平台实时监测无人牵引车的运动状态,实现对飞机起落架的检测识别、对飞机起落架位置的计算、与飞机起落架的精准对接、远程控制无人牵引车等功能。整个作业过程实现智能化和无人化,真正实现了降低机务人员工作强度的目标。

### 参考文献:

[1] 王岳飞. 飞机牵引车夹持举升机构性能分析 [D]. 天津: 中

国民航大学, 2014.

[2] 徐峰, 赵宇. 无杆飞机牵引车设计技术分析 [J]. 科技创新与应用, 2018(10):94-95.

[3] 韩文兴. 舰载机牵引系统稳定性及控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[4] 沈圳. 飞机无杆牵引安全技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

[5] 贾浩. 基于 Cartographer 算法的 SLAM 与导航机器人设计 [D]. 济南: 山东大学, 2019.

[6] 杨颖, 王立勇, 孙鹏, 等. 动态环境下激光雷达地图构建 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(7):2125-2131.

作者简介: 姚永鑫 (1989.09-), 男, 汉族, 甘肃庆阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 智能机械结构及系统设计。

### (上接第 19 页)

(1) 应使用扳手拧紧, 直到与轴承表面齐平, 拧紧力矩值应符合要求。

(2) 必须检查螺钉尺寸、螺纹尺寸和拧入长度是否正确。

(3) 处理盲孔时, 螺纹深度至少为拧入螺纹长度的 1.1 倍; 对于钢材, 最小拧入长度为 1.2 倍的螺栓直径<sup>[4]</sup>。

(4) 处理通孔时, 钻孔直径为螺钉的标称螺纹尺寸 + 1mm; 且在任何情况下都不得使用非公制螺纹。

## 5 盾体钢结构的螺纹尺寸

在起吊点 1.1 处选用 M56 螺栓吊耳, 则最小拧入长度为  $1.2 \times 56 = 67.2\text{mm}$ , 盲孔深度至少为 74mm, 而盾体外壳采用 30mm 厚的钢板卷制而成, 直接加工螺纹明显不够, 则需要增加螺纹衬套; 而中心至构件边缘距离最小为  $1.5 \times$  螺栓直径<sup>[5]</sup>, 即  $1.5 \times 56 = 84\text{mm}$ 。综合考虑后, 选用材料直径为 180mm、长度为 140mm 的 Q345B 热轧圆棒, 加工深度为 95mm、螺栓公称直径为 56mm 的螺纹, 然后倒角周边焊接在外壳上。同理可设计出捆绑处的螺纹衬套尺寸。此处螺纹衬套不仅保证了螺栓吊耳的使用性能, 还提高了钢结构的强度, 减小螺纹孔造成的应力集中的影响。

## 6 结语

本文通过盾体三维建模, 在其钢结构上设计各个吊点, 在起吊点处焊接螺纹嵌套以便安装螺栓吊耳,

不仅有利于装配和施工前后重复拆卸使用, 还提高了钢结构的强度, 大大减少了螺纹孔处应力集中的影响。计算结果证明, 起吊点接近质心位置且对称设计, 可以增大链条和螺栓吊耳的使用安全倍数。而在盾体运输捆绑中, 前后放置方向对其钢结构设计极其重要。计算结果也验证了盾构机关键部件选用的螺栓吊耳是合理可靠的, 确保了盾构机装配和验收后的运输安全, 为盾构施工奠定了良好的基础。同时, 本文提供了一种新的超大重物的起吊和运输捆绑的设计思路, 节省材料、方便安装, 降低了钢结构的制造成本, 缩短了施工工期。

### 参考文献:

[1] 欧洲标准化委员会. 道路车辆负载限制·安全·第 1 部分: 计算获得力量: EN 12195-1-2010[S]. 2014:22.

[2] 国际道路运输 安全货物系固指南 [Z].

[3] 欧洲标准化委员会. 起重用短扁节链条 安全性 第 6 部分: 吊链: EN 818-6-2000[S]. 2000:14.

[4] 罗兰·葛麦陵. 简明机械手册: 中文版第 3 版 [M]. 杨祖群, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2019:216.

[5] 夏志斌, 姚谏. 钢结构设计——方法与例题 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006:327.

作者简介: 黄惠敏 (1987.08-), 女, 汉族, 广东湛江人, 本科, 工程师, 研究方向: 盾构机钢结构设计。