

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0431

基于 MPC 的飞机牵引车轨迹跟踪

张军^{1,*}, 黄明辉², 王玥琳³, 阳星⁴, 叶敏¹, 贾永乐⁵

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100010;

3. 长安大学 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 西安 710064; 4. 西安爱生技术集团有限公司, 西安 710065;

5. 西安睿诺航空装备有限责任公司, 西安 710060)

摘 要: 为能满足物流机场短时间、高频次的快捷飞机牵引需求, 提出了基于无人驾驶技术的快速牵引方法。采用“理论建模-算法设计-算例测试和仿真优化-样机实验”的技术路线和方法, 以 10 t 飞机牵引车为对象, 构建牵引车的运动学模型, 确定牵引车的约束条件和控制量, 通过增加防碰撞处理、最小转弯半径和路径平滑的方式改进 A* 算法, 生成牵引车运动轨迹; 设计模型预测控制 (MPC) 的轨迹跟踪控制器, 构建 MATLAB/Simulink 和 ADAMS 联合仿真模型, 通过轨迹跟踪仿真实验优化 MPC 的控制参数, 并在改造的电传动飞机牵引车样机上开展轨迹跟踪实验。结果表明: 改进的 A* 算法满足飞机牵引车工作路径规划和最小转弯半径要求, 联合仿真方法优化了 MPC 控制器, 在样机上实现了较好的跟踪精度, 弯道和直线跟踪误差的标准差分别为 0.362 m 和 0.128 m, 实现了飞机牵引车的无人驾驶功能, 为智慧物流机场的无人牵引飞机奠定技术基础。

关键词: 电传动飞机牵引车; 无人驾驶技术; 路径规划; 改进 A* 算法; 轨迹跟踪; 模型预测控制

中图分类号: V351.34; TP23

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)09-2916-11

飞机在机库、廊桥、停机坪和维修车间移动均由牵引车牵引实现移动, 牵引路线和效率多依赖于操作人员的经验和熟练度。现有的人工操控飞机牵引方式无法满足短时间内高频次的要求, 如物流机场, 短时间内有大量飞机起落, 需要快速高效的牵引配合。因此, 迫切需要针对飞机牵引车的特点, 开展牵引车的避障和轨迹跟踪控制研究, 提高牵引车移动精确性及工作效率, 为智慧机场助力。

路径规划是通过路径搜索过程来确定最优的路径, 可分为基于图搜索和基于随机采样的 2 类路径规划方法^[1]。前者包括 Dijkstra 算法、A* 算法和 D* 算法^[2], 这类算法环境建模复杂, 运行在栅格地图上, 适合做全局规划; 后者包括快速探索随机树

(rapidly-exploring random tree, RRT) 算法^[3]、改进的 RRT* 算法^[4]和 Anytime RRT* 算法^[5], 这类算法计算量适中, 存在路径不是最优、路径平滑性差等问题。路径规划研究集中在无人驾驶汽车、自动引导运输车 (automated guided vehicle, AGV) 小车上, 并被引入到飞机牵引车上。孙家玮等^[6]构建了舰载机牵引系统模型, 结合闭环快速搜索随机树 (close loop rapidly-exploring random tree, CL-RRT) 算法和模型预测控制 (model predictive control, MPC) 算法, 提出了一种舰载机牵引系统的路径规划算法, 解决了随机采样算法带来的路线冗余问题。张智等^[7]针对舰载机牵引系统的甲板调运过程, 引入行为动力学方法, 实现牵引系统在复杂障碍物环境中的避

收稿日期: 2023-07-03; 录用日期: 2024-02-23; 网络出版时间: 2024-04-09 19:23

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240408.1252.001

基金项目: 陕西省 2022 年自然科学基金基础研究计划 (2022JM-249); 陕西省重点研发计划 (2023-YBSF-104); 长安大学本科实践类课程建设项目 (2025-05)

* 通信作者. E-mail: zhangjun@chd.edu.cn

引用格式: 张军, 黄明辉, 王玥琳, 等. 基于 MPC 的飞机牵引车轨迹跟踪 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (9): 2916-2926.

ZHANG J, HUANG M H, WANG Y L, et al. Trajectory tracking for aircraft tug based on MPC [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (9): 2916-2926 (in Chinese).

碰路径规划。Meng等^[8]采用目标偏置方案和快速碰撞检测技术,利用RRT算法规划出无碰撞风险下的最快工作路径。Liu等^[9]考虑牵引过程中姿态变化,将牵引车-飞机系统转化为拖车系统,基于滚动时域控制理论和离线最优控制算法提出了一种在线跟踪方法,但未考虑机场环境特点及整体碰撞风险。Liu等^[10]采用离线路径规划法在甲板场景下开展了仿真实验,但避障所使用的范围过大。张震男^[11]提出一种基于几何理论扩展的A*路径规划算法,用Reeds-Shepp曲线优化了规划结果,解决了曲率突变问题。目前,牵引车的路径规划仍更多地被视为平面移动机器人的避碰问题,由于在机场环境中,场地及障碍物相对固定,具有计算量小、路径平滑等优点的A*算法可作为飞机牵引车全局路径优化方法。

轨迹跟踪控制的主要任务是根据决策规划层输出的参考路径,控制车辆的驱动、制动和转向等动作,从而准确跟踪参考路径。现有研究多依据预测理论和模型预测理论进行控制算法设计,如纯追踪算法^[12]、线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)算法^[13]及MPC算法^[14]。张攀等^[15]基于纯追踪算法对飞机牵引车系统的路径进行跟踪控制,最终规划出偏差小、控制精度更高的轨迹。Yu等^[16]设计了一种双层闭环控制器,用于在不完全约束和各种物理条件的约束下,实现甲板上飞机牵引车的轨迹跟踪。Werner等^[17]提出了一种针对牵引车-拖车控制的LQR调节器,能够对拖车位置进行控制,但当跟踪曲率较大的曲线时,需要引入前馈控制进行补偿。Bin等^[18]基于混合逻辑动力学对牵引车-拖车系统进行建模,提出了一种基于MPC算法的控制框架,设计了一种倒车最优控制器。Backman等^[19]将非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)应用到牵引车-拖车系统的轨迹跟踪控制中,实现了牵引车和拖车对指定直线和曲线的跟踪控制。与纯追踪算法和LQR算法相比,MPC算法拥有较强的约束处理能力、优良的滚动优化控制机制、综合考虑系统当前状态和输出信息的校正思想,广泛应用于自动驾驶车辆轨迹跟踪控制。

为提高飞机牵引车的智能化水平,本文建立了飞机牵引车的运动学模型,结合飞机防碰撞处理及最小转弯半径的安全性限制改进了A*算法,获得牵引车的全局路径。采用MPC算法进行在线轨迹跟踪控制,在MATLAB/Simulink与ADAMS机电仿真模型中进行算例验证和控制器参数优化,采用北斗RTK GPS获取样机的定位、姿态及运动信息,使用CAN总线通信技术对样机进行改造,使其具备无人

驾驶功能。开展轨迹跟踪实验,实现了飞机牵引车的无人驾驶功能。本文方法可为智慧物流机场的牵引车无人驾驶提供参考。

1 牵引车路径规划

1.1 牵引车运动学建模

本文采用的10 t电传动飞机牵引车与文献^[20]一致,2个前轮为万向惰轮,2个后轮为驱动轮。根据牵引车的运动特征,建立笛卡儿直角坐标系 xOy 下的运动学模型,如图1所示,其中,坐标原点为分析牵引车运动学的坐标系参考点。图中: M_1 为牵引车后轴中心, M_2 为飞机后轴中心, β 为牵引车转向下自身的航向角, θ 为飞机与牵引车之间形成的夹角, λ 为飞机转向时自身的转动角, α 为牵引车的万向前轮偏角, L 为牵引车驱动轮轮距, d_1 为飞机轴距, d_2 为牵引车轴距, O_1 为飞机的瞬时转向中心, O_2 为牵引车的瞬时转向中心, O_1M_2 为飞机转弯半径,记为 R_1 , O_2M_1 为牵引车转弯半径,记为 R 。

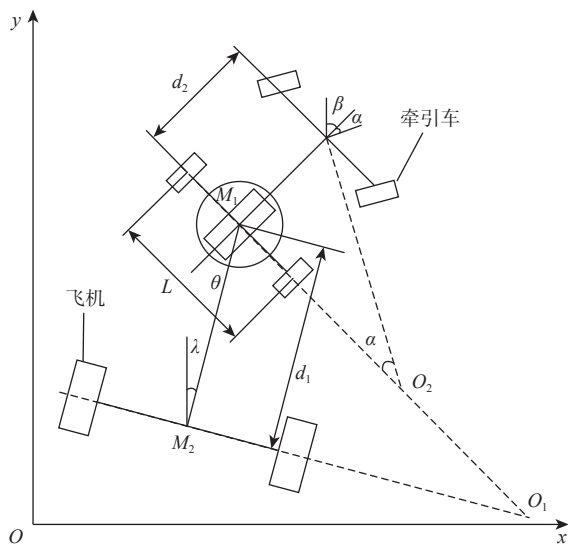


图1 牵引车运动学模型

Fig. 1 Motion model of tug

由图1可知,电传动飞机牵引系统运动学方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \sin \beta \\ \dot{y} = v \cos \beta \\ \dot{\beta} = \frac{v \tan \alpha}{d_1} \\ \dot{\theta} = \frac{v \sin \beta}{d_2} + \frac{v \tan \alpha}{d_1} \\ \beta = \theta + \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 分别为牵引车后轴中心点 M_1 的横、纵坐标; v 为牵引车后轴中心点 M_1 的速度。

进一步,将运动学模型表示为一般形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2)$$

式中: 状态量 $\chi=[x,y,\beta]^T$; 控制量 $\mathbf{u}=[v,\omega]^T$, ω 为牵引车航向角速度。

为实现牵引车控制, 将轨迹跟踪系统输出的控制量 $[v,\omega]$ 进一步转换至车辆左右两侧电机车速 V_L 、 V_R , 再转化为对应的电机转速 n_L 、 n_R 。

由图 1 可得牵引车的相对牵引角速度 ω 为

$$\omega=v\left(\frac{\sin \theta}{d_1}-\frac{1}{R}\right) \quad (3)$$

式(3)中, 被牵引飞机前轮的左右转向角度 $\theta \leq 40^\circ$, 以 $\omega \geq 0$ 和飞机轴距 $d_1=4\,754\text{ mm}$ 代入式(3), 可获得牵引状态下最小转弯半径 $R_{\min} \geq 7\,395.9\text{ mm}$, 取 $R_{\min}=8.0\text{ m}$; 而在非牵引状态下 $R_{\min}=0$, 可原地转向。

1.2 A*算法

A*算法是采用启发式方法的图搜索路径规划算法, 实现流程步骤如下:

步骤 1 设置创建 2 个表 Open List 与 Close List, 其中, Open List 用于存放可扩展节点, 可扩展节点指当前节点周围除障碍物、边界及已被扩展节点外的节点, Close List 用于存放已扩展过的节点, 并将起点 S 放入 Open List 中。

步骤 2 寻找起点 S 附近可扩展节点并放入 Open List 中, 当存在可扩展节点时, 将点 S 弹出至 Close List 中, 并利用代价函数 $f(n)$ 计算节点附近所有可扩展节点代价值, 选取估计代价最低节点作为下一移动节点; 若起点 S 附近无可扩展节点, 则无法规划可行路径。

步骤 3 判断当前 Close List 是否已包含终点, 包含终点则路径规划成功, 否则进行步骤 4。

步骤 4 寻找当前节点 n 附近所有可扩展节点, 并利用代价函数 $f(n)$ 计算节点 n 附近所有可扩展节点代价值, 选择代价值最小节点 m 作为下一移动节点, 并将当前节点 n 移出 Open List, 存入 Close List。

步骤 5 搜寻 Open List 中是否存在节点 m , 若存在, 比较前后 2 次节点 m 的实际代价 $s'(m)$ 与 $s(m)$, 取二者中小值替换 $s(m)$; 若不存在, 则将节点 m 存入 Open List。循环步骤 3~步骤 5, 直至搜索到终点或 Open List 为空。

1.3 改进 A*算法

为确保转向过程中飞机的安全性, 对传统 A*算法进行防碰撞处理及最小转弯半径限制处理, 最小转弯半径在后续的路径平滑算法中也进行约束, 使得所规划路径满足飞机牵引车防碰撞安全要求及运动约束条件。

1.3.1 防碰撞处理

防碰撞处理是保证所规划路径安全性至关重

要的部分, 先对飞机牵引车工作场地及障碍物进行栅格化处理, 再将连续的空间离散化为离散状态的栅格, 在栅格地图中体现飞机牵引车工作场地(如机场跑道、廊桥等)道路特征。道路及障碍物所占栅格数量由其实际占地面积决定。

基于上述内容及飞机牵引车-飞机系统实际尺寸 $12\,000\text{ mm} \times 9\,480\text{ mm} \times 4\,800\text{ mm}$, 本文围绕飞机牵引车及机体构建半径为 6 m 的防碰撞安全范围, 如图 2 所示。通过在栅格地图中障碍物原本位置及范围上, 加上防碰撞安全区域, 由此可在栅格地图中将飞机牵引车-飞机系统视为其质心位置的质点以进行路径规划。

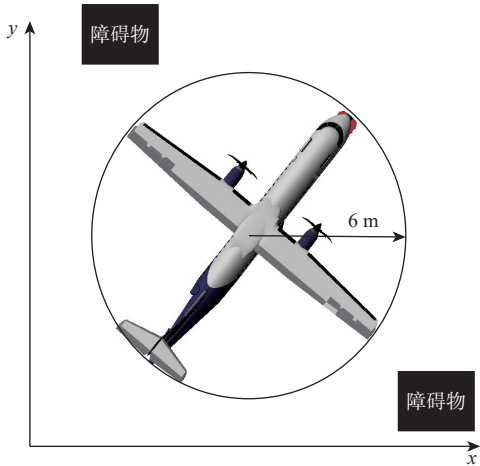


图 2 防碰撞安全范围
Fig. 2 Anti-collision safety range

1.3.2 最小转弯半径限制

1.1 节计算了飞机牵引车在牵引状态下的最小转弯半径, 因此, 在进行路径规划时, 将 $R \geq 8\text{ m}$ 设为路径规划的硬约束, 确保路径各处最小转弯半径均满足要求。

1.3.3 路径平滑算法

为提升路径的平顺性, 对得到的离散路径点进行曲线拟合, 以获得使飞机牵引车平稳前进的路径。

设曲线平滑前的点 $\mathbf{x}(i)$, $\mathbf{x}(i) \in \mathbf{X}$, 平滑后的点 $\mathbf{y}(i)$, $\mathbf{y}(i) \in \mathbf{Y}$, 定义路径平滑的代价函数 F 为

$$F=a_1\|\mathbf{x}(i)-\mathbf{y}(i)\|+a_2\|\mathbf{y}(i)-\mathbf{y}(i+1)\| \quad (4)$$

式中: a_1 和 a_2 为平滑路径权重系数。式(4)第 1 项为衡量平滑后的点偏离原始点的程度, 第 2 项为衡量平滑点之间的距离。这 2 项相互制衡, 平滑的过程就是最小化代价函数的过程。

采用共轭梯度下降法求解代价函数的最小值, 平滑前设定初值 $\mathbf{y}(i)=\mathbf{x}(i)$ 。遍历所有点, 对 $\mathbf{Y}$ 进行更新, 更新方法如下:

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{x}(i) + a_1(\mathbf{x}(i) - \mathbf{y}(i)) + a_2(\mathbf{y}(i-1) - 2\mathbf{y}(i) + \mathbf{y}(i+1)) \quad (5)$$

将式(5)中 a_1 和 a_2 均设置为0.5,右侧 $\mathbf{y}(i)$ 为更新前对应的 $\mathbf{x}(i)$ 值,通过不断迭代求解目标函数最优解,实现路径平滑,最终获得平滑曲线 $\mathbf{Y}$ 。

2 轨迹跟踪控制器设计

2.1 MPC 数学模型建立

MPC 算法中,普遍采用线性时变模型来进行预测控制以减小算法运算量。根据牵引车的运动学模型,当前牵引车的连续系统模型 $\dot{\chi}_i$ 可表示为

$$\dot{\chi}_i = f(\chi_i, \mathbf{u}_i) \quad (6)$$

式中: i 为当前连续时间轴时刻; $\chi_i = [x_i, y_i, \beta_i]^T$ 为当前状态量; $\mathbf{u}_i = [v_i, \omega_i]^T$ 为当前控制量。

采用泰勒展开的方法对式(6)进行处理,系统的误差模型 $\dot{\tilde{\chi}}$ 可表示为

$$\dot{\tilde{\chi}} = \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{x}_i \\ \dot{y} - \dot{y}_i \\ \dot{\beta} - \dot{\beta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_i \sin \beta_i \\ 0 & 0 & v_i \cos \beta_i \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_i \\ y - y_i \\ \beta - \beta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 \\ \sin \beta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v - v_i \\ \omega - \omega_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

为实现牵引车的控制,对式(7)按采样时间 T 进行离散化处理,可得到MPC控制器的离散误差模型为

$$\tilde{\chi}(k+1) = \mathbf{A}_{k,t} \tilde{\chi}(k) + \mathbf{B}_{k,t} \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (8)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_i T \sin \beta_i \\ 0 & 1 & v_i T \cos \beta_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} T \cos \beta_i & 0 \\ T \sin \beta_i & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix};$$

k 为当前离散时间轴时刻, t 为离散时间轴的某一时刻。

$$\boldsymbol{\theta}_t = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-3} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-4} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \cdots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-3} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \cdots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \cdots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^2 \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-3} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \cdots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-N_c+1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \end{bmatrix}$$

根据系统在 t 时刻的运动状态量及路径误差,预测未来 N_p 个时域内系统的状态量,可实现飞机牵引车轨迹跟踪过程的状态预测。

2.2 目标函数构建

为保证控制过程的精确性和稳定性,控制目标为牵引车在轨迹跟踪过程中保持尽可能小的轨迹

2.2 状态预测模型建立

为使轨迹跟踪过程中牵引车轨迹更加贴合规划路径,构建状态预测模型对牵引车未来路径误差进行预测,取 $\xi(k|t) = \begin{bmatrix} \tilde{\chi}(k|t) \\ \tilde{\mathbf{u}}(k-1|t) \end{bmatrix}$ 可得

$$\begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} \xi(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta \mathbf{U}(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \xi(k|t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{0}_{m \times n} & \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = [\mathbf{B}_{k,t} \quad \mathbf{I}_m]^T$; $\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \mathbf{0}_{m \times n} & \mathbf{0}_{m \times m} \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = \text{diag}(1, 1, 1)$; n 为状态量 $\chi = [x, y, \beta]^T$ 的维度,即 $n=3$; m 为控制量 $\mathbf{u} = [v, \omega]^T$ 的维度,即 $m=2$; $\Delta \mathbf{U}(k|t)$ 为预测时刻 k 相对于前一时刻 $k-1$ 的控制输入增量; η 为系统的输出向量, $\eta(k|t)$ 为基于 t 时刻的信息对 k 时刻的预测; $k+1|t$ 表示基于 t 时刻参数对 $k+1$ 时刻系统变量进行预测。

取 N 为预测时长,令

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{k,t} = \mathbf{A}_{t,t} & k=1, 2, \dots, t+N-1 \\ \mathbf{B}_{k,t} = \mathbf{B}_{t,t} \end{cases} \quad (10)$$

推导可得状态预测模型为

$$\mathbf{G}(t) = \boldsymbol{\psi}_t \boldsymbol{\xi}(t|t) + \boldsymbol{\theta}_t \Delta \mathbf{U}(t) \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \eta(t+1|t) \\ \eta(t+2|t) \\ \vdots \\ \eta(t+N_c|t) \\ \vdots \\ \eta(t+N_p|t) \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\psi}_t = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p} \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} \Delta u(t|t) \\ \Delta u(t+1|t) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N_c|t) \end{bmatrix}; N_c \text{ 为输入预测模型的时域数量; } N_p \text{ 为模型预测未来输出的时域数量。}$$

误差及控制量波动,目标函数如下:

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+i|t) - \eta_{\text{ref}}(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta \mathbf{U}(k+i|t)\|_P^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (12)$$

式中: ρ 为权重系数; ε 为松弛因子; $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{P}$ 分别为状态权重矩阵和控制权重矩阵。

目标函数 $J(k)$ 由 2 项组成, 前 1 项反映了状态量误差及对轨迹点的跟踪效果, 后 1 项反映了控制量的变化情况。为避免硬约束造成优化问题无法求解的情况出现, 目标函数添加软约束。根据牵引车技术要求和运动限制, 对轨迹跟踪系统输出的速度、角速度及其增量进行约束, 牵引过程车速限制为 $-1\text{ m/s} \leq v \leq 1\text{ m/s}$, 车速变化限制为 $-0.2\text{ m/s} \leq \Delta v \leq 0.2\text{ m/s}$; 牵引过程最小转弯半径 $R_{\min} \geq 8\text{ m}$, 车辆角速度输出限制为: $-0.125\text{ rad/s} \leq \omega \leq 0.125\text{ rad/s}$, $-0.025\text{ rad/s} \leq \Delta \omega \leq 0.025\text{ rad/s}$ 。

2.4 轨迹跟踪控制算法

牵引车轨迹跟踪 MPC 控制器组成如图 3 所示, 系统由数学模型、约束条件和目标函数构成。约束条件包括牵引车速度、加速度及与飞机夹角角度等; 数学模型是用式 (11) 描述被控制的牵引车系统, 目标函数按照式 (12) 设计, 并在 MATLAB/Simulink 中构建 MPC 控制器代码。

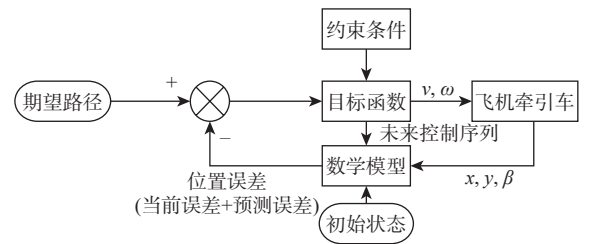


图 3 MPC 控制器组成

Fig. 3 MPC controller composition

基于 MPC 的轨迹跟踪具体算法步骤如下: ①由牵引车路径规划系统生成满足飞机牵引车防碰撞及最小转弯半径要求的路径; ②将规划路径离散化成一系列的离散路径点; ③从第一个离散路径点开始, MPC 控制器通过计算当前位置与期望位置偏差, 跟踪选取的路径点, 同时判断当前位置是否为路径终点, 到达终点即轨迹跟踪过程结束。

3 牵引车联合仿真实验

3.1 联合仿真模型构建

以 .stp 格式将飞机牵引车和飞机的三维模型导入到 ADAMS 软件中, 添加轮胎、地面等元素并与原三维模型部分相重合, 获得图 4 所示的牵引车动力学模型。其中, 轮胎采用 ADAMS 中的 PAC89 轮胎模型, 路面模型采用 2d_flat.rdf 模型。对模型中非必要组成成分进行删除简化, 定义轮胎与车体之间为转动、飞机起落架前轮与抱轮装置之间为固定、飞机机体与起落架之间为转动等约束。定义重力方向, 对牵引车 2 个后驱动轮添加 Motion 模块,

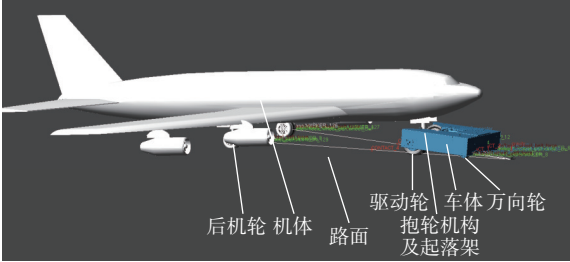


图 4 电传动无杆飞机牵引车动力学模型

Fig. 4 Dynamics model of electric drive aircraft tug

定义转速及转动方向等属性。设置 Control 模块, 定义 ADAMS 与 MATLAB/Simulink 联合仿真的输入输出变量, 其中, 输入为左右驱动轮转速 n_L 和 n_R , 输出为车体坐标 x 和 y 、线速度 v 、角速度 ω 等属性, 变量名与前文运动学分析的变量一致。

将 ADAMS 与 MATLAB/Simulink 进行联合建模, 建立如图 5 所示的牵引车-飞机系统的机电联合仿真模型。运动控制模块的输入为 MPC 轨迹跟踪控制系统输出的车体角速度 ω 及线速度 v ; 其输出是根据运动学模型将这 2 个变量转化为飞机牵引车两驱动轮转速, 再输入至 ADAMS 模块输入。对角速度等进行积分处理以获得飞机牵引车及飞机的航向角变化, 以二者之差来观测飞机牵引车-飞机系统在牵引过程中连接角度变化情况。

3.2 路径规划实验

设置 2 个典型场景: 场景 1 为机场弯道场景(如飞机在航站楼登机后到滑行道的转弯), 场景 2 为直线滑行过程存在障碍的道路场景。仅考虑全局路径规划, 采用改进 A* 算法规划所得离散路径点, 分别利用最小二乘法与梯度下降法进行曲线拟合, 并进行实验对比。

2 种场景的轨迹规划结果如图 6 所示。从图中对比可知, 经过梯度下降法平滑的路径与原路径偏差小, 更为平滑, 贴合初始曲线, 符合飞机牵引车驾驶特点。

将平滑后路径与初始路径的数据进行统计分析, 通过方差、标准差及路径本身平滑性来衡量所平滑路径的优劣, 结果如表 1 所示。梯度下降法在 2 个场景下的性能最优, 因此, 将梯度下降法用于改进 A* 算法的路径平滑。上述结果也表明改进 A* 算法所规划路径在保持了与路沿、障碍物间充分的安全距离及满足最小转弯半径要求的前提下, 能实现最优路线规划。

3.3 轨迹跟踪实验

在 MPC 控制方法中, 预测步长 N_p 及控制步长 N_c 决定了目标轨迹跟踪的精度及行驶平滑性, 这

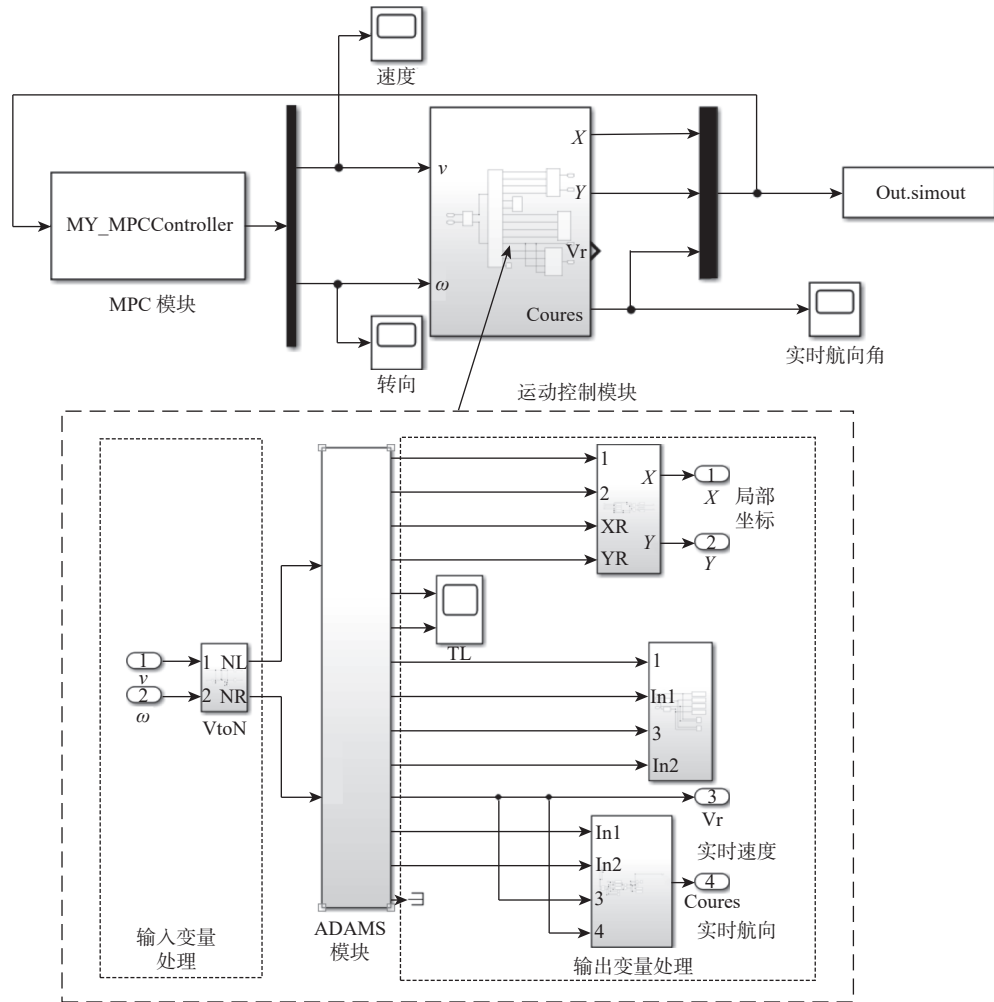


图 5 牵引车-飞机系统的机电联合仿真模型
Fig. 5 Co-simulation model of tug-aircraft system

2 个参数对飞机牵引车的无人驾驶控制至关重要, 过小的预测步长会使得车辆在运行至轨迹变化较大处出现较大误差的情况, 而过大的预测步长会导致系统计算量过大; 同理, 合适的控制步长可以更好地贴合规划路径, 过大的控制步长也会导致过大的计算量, 因此, 需要通过实验确定合适的控制参数。

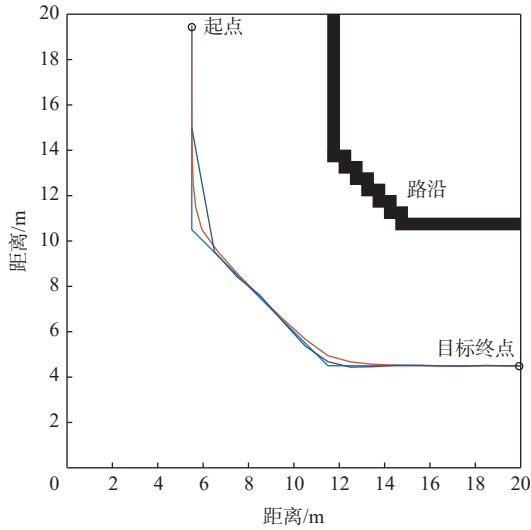
在 MATLAB 2021 与 ADAMS 2019 中进行联合仿真, 硬件环境为 Intel Core i5-9300HF @ 2.40 GHz CPU, 16 GB RAM, NVIDIA GTX 1660 TI GPU。以仿真场景 1 的弯道转向为例, 取多个不同的预测步长及控制步长进行仿真实验, 通过对比控制结果的标准差和耗时来选取合适的控制参数范围。MPC 控制中, $N_p \geq N_c$, 通过单因素实验, 固定 $N_p=60$, 将 N_c 从 5 逐步增大到 60 进行实验, 发现控制系统误差随 N_c 增大而减小, 仿真时间随 N_c 增大而增大; 当 $N_c \geq 30$ 时, 仿真时间大于 7 s, 运算时间过长。为获得合适的控制器参数组合, 设定 $N_c \leq 30$, 在此基础上进行 N_p 参数对比实验, 考虑了 8 种实验参数组合, 结

果如表 2 所示。结果表明, 最适合飞机牵引车-飞机系统的控制参数组合为组合 8, 即 $N_p=5$, $N_c=5$, 因此, 采取该组参数作为 MPC 控制器的参数。

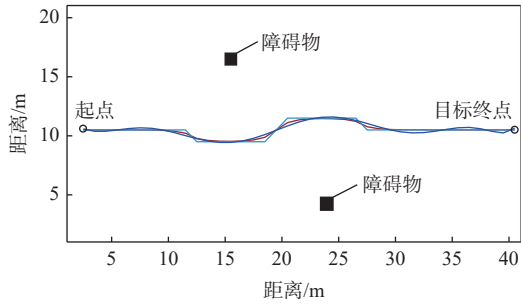
将优化的全局轨迹和 MPC 控制器用于联合仿真控制实验, 在 2 个场景下进行实验, 轨迹跟踪结果如图 7 所示。可知, 设计的 MPC 控制器可有效实现轨迹跟踪, 验证了本文算法的有效性。

图 7 所示 2 个场景仿真结果都很好地避开了路沿及障碍物, 并保持了一定的安全距离。对 2 个场景的仿真跟踪结果与规划路径进行误差分析, 结果如表 3 所示, 2 种场景在仿真情况下皆展示出较小的轨迹误差。

为进一步控制算法的有效性, 避免飞机存在转向角超过前起落架极限的情况, 在 ADAMS 模型输出端监测牵引车与飞机间连接处夹角。以角度变化最大的弯道场景为例, 结果如图 8 所示, 弯道转向过程中有一次角度波动, 连接夹角 θ 最大为 21.19° , 满足工作过程中 $\theta \leq 40^\circ$ 的技术要求, 符合牵引飞机的安全性要求。



(a) 仿真场景1



(b) 仿真场景2

— 改进 A* 算法 — 基于最小二乘法的曲线拟合
— 基于梯度下降的曲线拟合

图 6 仿真场景轨迹规划结果

Fig. 6 Compared simulated path planning results

表 1 路径平滑仿真结果

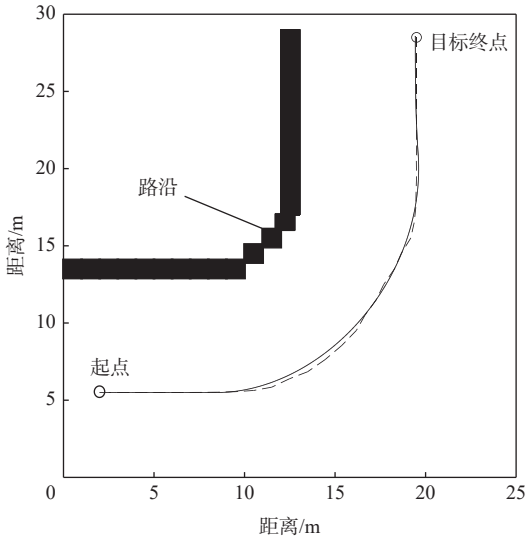
Table 1 Path smoothing simulation results

场景	方法	方差/m ²	标准差/m	平滑性
仿真场景1	最小二乘法	1.851	1.360	一般
	梯度下降法	0.015	0.126	好
仿真场景2	最小二乘法	0.026	0.161	一般
	梯度下降法	0.012	0.111	好

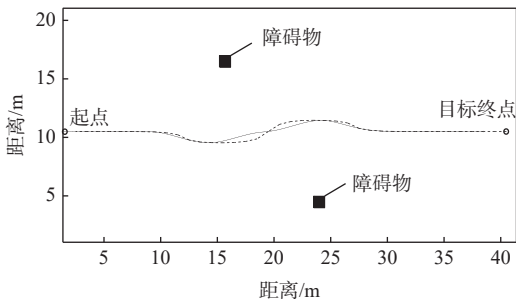
表 2 不同控制参数下的 MPC 控制效果对比

Table 2 Compared results at different MPC control parameters

参数组合	N_c	N_p	标准差/m	仿真时间/s
1	30	60	0.267	6.95
2	30	50	0.247	6.39
3	30	40	0.231	6.23
4	30	30	0.218	5.92
5	20	20	0.204	5.07
6	10	10	0.182	3.73
7	5	10	0.183	2.83
8	5	5	0.157	2.78



(a) 仿真场景1



(b) 仿真场景2

--- 规划轨迹 — 跟踪轨迹

图 7 联合仿真实验结果

Fig. 7 Results of joint simulation experiments

表 3 联合仿真轨迹结果

Table 3 Joint simulation trajectory results

场景	方差/m ²	标准差/m
仿真场景1	0.021	0.146
仿真场景2	0.016	0.128

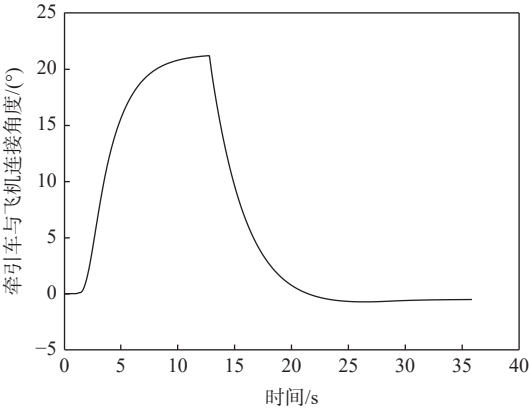


图 8 弯道下牵引车与飞机的连接角度变化

Fig. 8 The connection angle change

4 工程实验

4.1 无人驾驶牵引车平台搭建

采用 CAN 总线通信和上下位机主从控制方法

对 10 t 飞机牵引车进行无人驾驶功能改造。上位机为 MATLAB/Simulink 平台, 负责轨迹规划、MPC 控制、GPS 定位信息和采集下位机转速参数, 实现轨迹跟踪中的速度反馈调节, 提高轨迹跟踪控制精度。下位机为牵引车的 PLC 控制系统, 在保留原有的遥控功能情况下增加了通信指令控制方式。当 PLC 接收上位机的控制指令后, 按照上位机的目标来控制牵引车动作。上位机通过 PCAN-USB 设备与下位机进行 CAN 总线通信, 通信波特率为 250 Kbit/s。

无人驾驶飞机牵引车软件包含 GPS 数据解析及坐标转换、期望速度设置、MPC 轨迹跟踪控制、左右驱动轮的转速解算、电机转速 PID 控制、CAN 通信模块和驱动电机执行部分。驱动电机采用速

度模式, 通过 CAN 通信实现电机动作。由于车辆位姿和路径依赖于 GPS 信息, 系统需先判断 GPS 信号源是否稳定, 信号稳定才进行局部坐标系转换, 再按照规划的轨迹运行 MPC 轨迹跟踪, 输出牵引车左右轮的目标转速, 实现车辆控制。

建立样机的上位机控制系统如图 9 所示, 包括 MPC 模块、运动指令转换模块、车辆通信模块及定位通信模块组成。相比图 5 中的仿真模型, 样机控制系统上增加了 CAN 通信、RTK-GPS 数据解析功能和真实采样时间模块, 使得上位机系统时间与真实时间保持一致, 采样时间为 0.1 s。实际车辆的通信模块替换 ADAMS 的动力学模型, 实现车辆车速和转向控制。

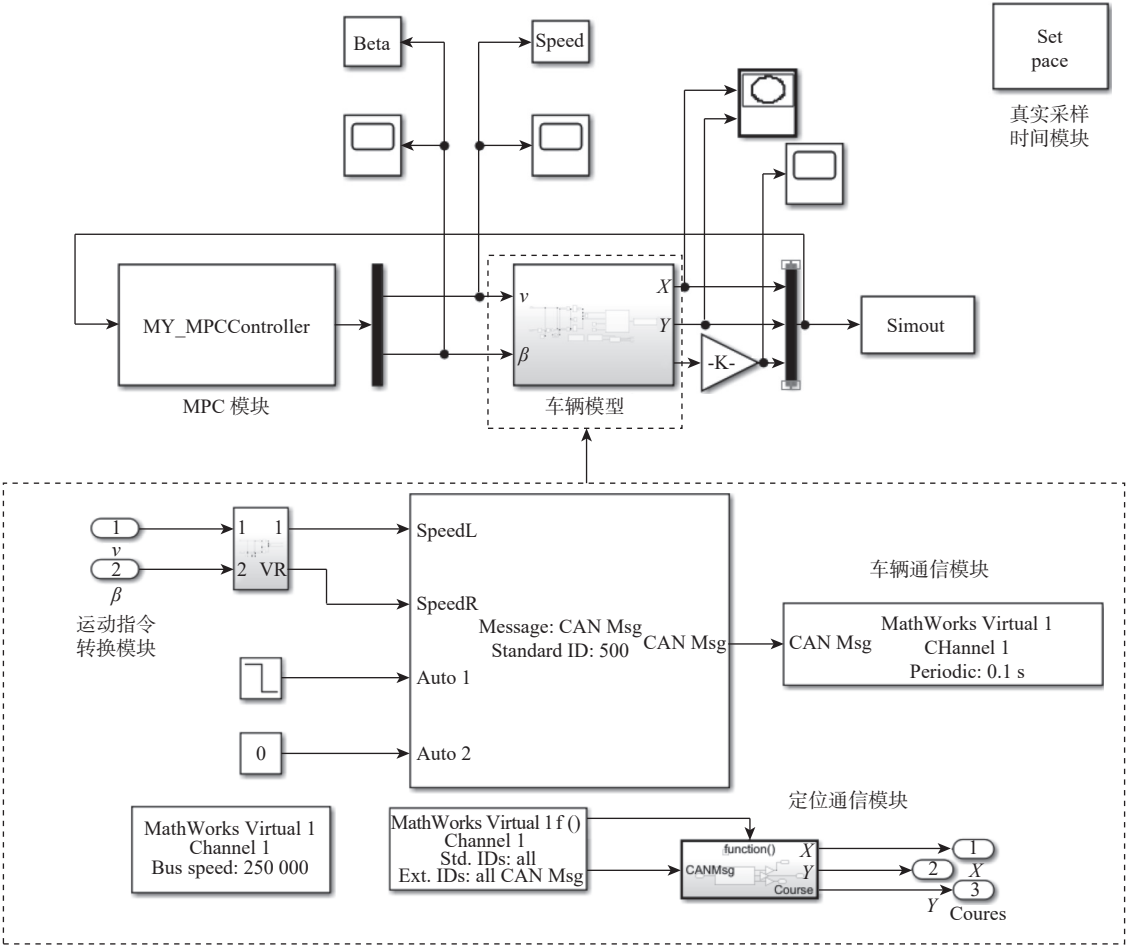


图 9 样机的上位机程序

Fig. 9 Overall structure of upper computer software

RTK-GPS 接收到的数据为 WGS84 坐标系下的 KSXT 数据结构定位信息, 包含了时间、经度、纬度、海拔、俯仰角、航向、速度、差分状态及接收卫星信号数量。为实现轨迹规划, 将 GPS 坐标转化为二维的 UTM 投影坐标系, 再转换为局部坐标系的定位和航向信息, 输入给 MPC 控制器。

按照上述控制策略, 对 10 t 飞机牵引车进行改装, 如图 10 所示。通过沿车体中轴线布置前后 2 个高精度 GPS-RTK 流动站设备的方式, 可以精确

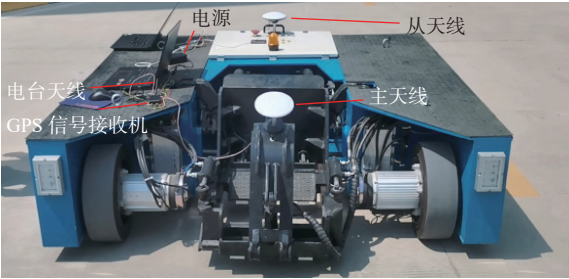


图 10 无人驾驶飞机牵引车

Fig. 10 Autonomous aircraft tug

获取牵引车车体的定位、航向、运动速度及方向。构建局域网 RTK-GPS 系统, 2 个 BT300 GPS 天线分别置于车辆中心线上, 通过千寻 D300 电台接收机将 GPS 信号传给 PC 机。为减轻 MPC 控制主机的负载, 增加一台 PC 主机用于 GPS 信息解析, 通过 CAN 发到总线后再被主机接收, 获得车辆当前位置信息。

4.2 室内轨迹跟踪实验

实验地点为位于西安市高新区的军民融合产业园, 弯道和直线避障场景如图 11 所示。其中, 直线避障场景所选取路段的道路宽度为 10 m, 长度为 40 m, 使用 2 把 0.5 m×0.5 m 的椅子模拟道路中的固定障碍物。

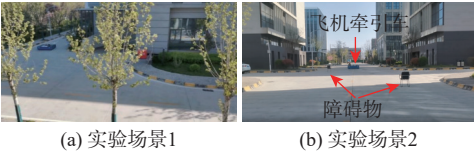


图 11 实验场地
Fig. 11 Experimental site

基于图 11 所示实验场地构建数字地图, 采用 UTM 坐标系, y 轴正方向为正东方向, x 轴方向为正北方向, 并进行路径规划, MPC 控制器参数取 $N_p=5$, $N_c=5$ 。考虑飞机牵引车牵引工作运动限制, 取 $v=0.8$ m/s 作为轨迹跟踪过程期望速度。

实验结果如图 12 所示。实验跟踪轨迹与规划

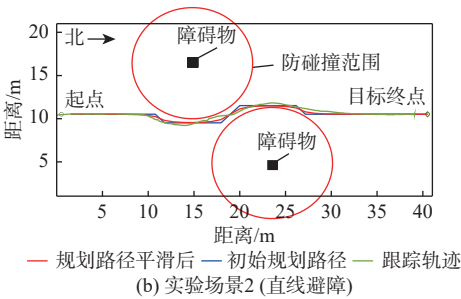
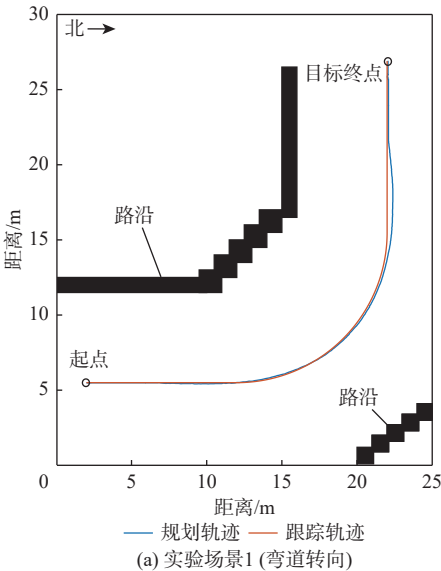


图 12 轨迹跟踪实验结果

Fig. 12 Field result of path tracking

轨迹整体误差较小, 且整体轨迹及移动过程较为平滑稳定, 满足飞机牵引车牵引工作的要求。在直线避障中与障碍物保持 6 m(牵引车和飞机总体半径< 6 m)以上的安全距离, 达到了预期目标。轨迹跟踪的统计结果如表 4 所示。发现实际实验时弯道转向场景实验轨迹标准差为 0.362 m, 大于仿真结果; 直线避障场景实验轨迹标准差为 0.128 m, 与仿真误差接近。主要原因是: 实验场地有一定的局限性, 弯道场地较短, 直线场景路径较长。由于牵引车转速控制误差会导致控制误差增大, 相比于直线场景, 在较短的弯道上会出现较大的误差, 若增加测试距离, 标准差会减小, 但园区内无法开展大范围转弯场景实验。现场实验验证了本文所提轨迹跟踪方法的有效性。

表 4 轨迹跟踪误差分析

Table 4 Track tracking error analysis

场景	方差/m ²	标准差/m
实验场景1	0.131	0.362
实验场景2	0.016	0.128

5 结 论

1) 建立了 10 t 飞机牵引车的运动学模型, 并基于飞机前起落架的转弯角度约束, 获得了牵引车在牵引状态下最小转弯半径为 8 m, 基于防碰撞需求、最小转弯半径限制和路径平滑对 A*算法进行改进, 实现了牵引车牵引过程的轨迹规划功能。

2) 设计了飞机牵引车的 MPC 控制器, 并采用 ADAMS 与 MATLAB/Simulink 联合仿真的方法优化了 MPC 控制器参数, 通过仿真实验验证了算法的有效性, 实现了较好的控制精度。

3) 搭建了无人驾驶牵引车样机平台, 并在样机上开展了轨迹跟踪实验, 实现了飞机牵引车的无人驾驶控制功能。

后期将开展环境感知实验, 加入局部避障策略, 以实现牵引车的无人驾驶功能。

参考文献 (References)

[1] 李永丹, 马天力, 陈超波, 等. 无人驾驶车辆路径规划算法综述[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 72-79.
LI Y D, MA T L, CHEN C B, et al. Review of path planning algorithm for unmanned vehicles[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 72-79(in Chinese).
[2] 刘军, 冯强, 任建华. 移动机器人路径动态规划有向 D*算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(2): 291-300.
LIU J, FENG S, REN J H. Directed D* algorithm for dynamic path planning of mobile robots[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(2): 291-300(in Chinese).

[3] 陈秋莲, 蒋环宇, 郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(16): 10-17.
CHEN Q L, JIANG H Y, ZHENG Y J. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(16): 10-17(in Chinese).

[4] NOREEN I, KHAN A, HABIB Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, 7(11): 97-107.

[5] KARAMAN S, WALTER M R, PEREZ A, et al. Anytime motion planning using the RRT[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1478-1483.

[6] 孙家玮, 余明晖, 杨大鹏, 等. 基于 CL-RRT 与 MPC 的舰载机牵引系统路径规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(5): 1745-1755.
SUN J W, YU M H, YANG D P, et al. Path planning of carrier based aircraft traction system based on CL-RRT and MPC[J]. *Systems Engineering and Electronic Technology*, 2024, 46(5): 1745-1755(in Chinese).

[7] 张智, 林圣琳, 邱兵, 等. 舰载机牵引系统甲板调运避碰路径规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(8): 1551-1557.
ZHANG Z, LIN S L, QIU B, et al. Collision avoidance path planning of carrier aircraft traction system indispatching on deck[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(8): 1551-1557(in Chinese).

[8] MENG X L, WANG N J, LIU Q H. Aircraft parking trajectory planning in semistructured environment based on kinodynamic safety RRT[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 3872248.

[9] LIU J, DONG X Z, WANG J Y, et al. A novel EPT autonomous motion control framework for an off-axle hitching tractor-trailer system with drawbar[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(2): 376-385.

[10] LIU J, HAN W, PENG H J, et al. Trajectory planning and tracking control for towed carrier aircraft system[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 830-838.

[11] 张震男. 牵引系统路径规划与路径跟踪控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
ZHANG Z N. Research on path planning and path tracking control strategy of traction system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021(in Chinese).

[12] WALLACE R, STENTZ A, THORPE C, et al. First results in robot road-following[C]//*Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. New York: ACM, 1985: 1089-1095.

[13] 黄海洋, 张建, 王宇, 等. 基于多点预瞄最优控制的智能车辆路径跟踪[J]. *汽车技术*, 2018(10): 6-9.
HUANG H Y, ZHANG J, WANG Y, et al. Path traking for intelligent vehicle based on the optimal multipoint preview control[J]. *Automobile Technology*, 2018(10): 6-9(in Chinese).

[14] CHENG S, LI L, CHEN X, et al. Model-predictive-control-based path tracking controller of autonomous vehicle considering parametric uncertainties and velocity-varying[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(9): 8698-8707.

[15] 张攀, 柳阳, 刘新杰, 等. 改进的智能飞机牵引车路径导航纯追踪算法[J]. *计算机工程*, 2019, 45(5): 267-271.
ZHANG P, LIU Y, LIU X J, et al. Improved pure pursuit algorithm for intelligent aircraft tractor path navigation[J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(5): 267-271(in Chinese).

[16] YU M H, GONG X, FAN G W, et al. Trajectory planning and tracking for carrier aircraft-tractor system based on autonomous and cooperative movement[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 6531984.

[17] WERNER R, KORMANN G, MUELLER S. Systematic model based path tracking control of actively steered implements in simulation and experiment[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(18): 85-90.

[18] BIN Y, SHIM T, FENG N L, et al. Path tracking control for backing-up tractor-trailer system via model predictive control[C]//*Proceedings of the 24th Chinese Control and Decision Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 198-203.

[19] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 82: 32-43.

[20] 张军, 文川, 阳星, 等. 基于 ADRC 的电传动飞机牵引车控制系统设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(5): 1017-1026.
ZHANG J, WEN C, YANG X, et al. Design of an electric drive-aircraft tug control system based on ADRC[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(5): 1017-1026(in Chinese).

Trajectory tracking for aircraft tug based on MPC

ZHANG Jun^{1,*}, HUANG Minghui², WANG Yuelin³, YANG Xing⁴, YE Min¹, JIA Yongle⁵

- (1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
- 2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100010, China;
- 3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Digital Road Infrastructure, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
- 4. Xi'an ASN Technology Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China;
- 5. Xi'an Ruinuo Aviation Equipment Co., Ltd., Xi'an 710060, China)

Abstract: To meet the short and high frequency demands of quick aircraft towing at logistics airports, a rapid towing method based on unmanned driving technology is proposed. Using the technical route and method of “theoretical modeling-algorithm design-case test and simulation optimization-prototype experiment”, a kinematic model of the towing vehicle is constructed for a 10-ton aircraft towing vehicle, the vehicle’s constraint conditions and control quantities are determined, and the A* algorithm is improved by adding collision avoidance processing, minimum turning radius, and path smoothing to generate the motion trajectory of the towing vehicle. A trajectory tracking controller based on model predictive control (MPC) is designed, and a joint simulation model of MATLAB/Simulink and ADAMS is constructed. The control parameters of MPC are optimized through trajectory tracking simulation experiments, and trajectory tracking experiments are carried out on the modified electric aircraft towing vehicle prototype. The results show that the improved A* algorithm meets the requirements of aircraft towing vehicle work path planning and minimum turning radius, the joint simulation method optimizes the MPC controller, achieves good tracking accuracy on the prototype, with standard deviation of tracking errors for curve paths and straight paths being 0.362 m and 0.128 m respectively, realizes the unmanned driving function of the aircraft towing vehicle, and lays the technical foundation for unmanned aircraft towing at smart logistics airports.

Keywords: electric aircraft towing vehicle; unmanned driving technology; path planning; improved A* algorithm; trajectory tracking; model predictive control

Received: 2023-07-03; **Accepted:** 2024-02-23; **Published Online:** 2024-04-09 19:23
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240408.1252.001
Foundation items: Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of 2022 (2022JM-249); The Key R & D Project in Shaanxi Province (2023-YBSF-104); Undergraduate Practical Course Development Project of Chang'an University (2025-05)
*** Corresponding author.** E-mail: zhangjun@chd.edu.cn