

基于 4D 轨迹的机载端滑行引导算法

张 鹏¹, 汤新民^{1*}, 胡钰明², 陈强超³

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106; 2. 中国民用航空中南地区空中交通管理局, 广东 广州 510080; 3. 中南民航空管通信网络科技有限公司, 广东 广州 510080)

摘 要: 针对繁忙机场航空器场面滑行效率低、延误大的问题, 提出一种基于 4D 轨迹的场面滑行引导算法。首先根据机场结构建立机场拓扑模型; 然后对传统 Dijkstra 算法进行改进, 在考虑路段翼展约束和转弯约束的情况下, 为航空器规划一条最优滑行路径, 并根据管制设定的所需到达时间(RTA)为所有轨迹点分配相应的 RTA, 从而得到一条目标 4D 滑行轨迹; 最后, 航空器在速度引导算法指引下实现对 4D 轨迹的追踪。速度引导算法是以航空器平顺滑行为目标, 根据航空器当前的运动状态, 以航空器性能、速度、RTA 为约束, 动态计算出最优的滑行参考速度, 从而实现精准的 4D 轨迹追踪。仿真实验结果表明, 机载端滑行引导算法能为航空器提供一条合理平顺的滑行轨迹, 并能在参考速度的引导下高效准时地到达终点。

关键词: 场面滑行引导; 路径规划; 所需到达时间; 4D 轨迹; 飞行控制; 导航控制

中图分类号: V249; TP311.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)01-0023-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4163

Research on Aircraft Surface 4D Trajectory Guidance Algorithm

ZHANG Peng¹, TANG Xinmin^{1*}, HU Yuming², CHEN Qiangchao³

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016 China;

2. Central South Air Traffic Management Bureau CAAC, Guangzhou 510080 China;

3. Central South Civil Aviation Air Traffic Control Communication Network Technology Corporation, Guangzhou 510080 China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and large delay of aircraft taxiing in busy airports, this paper proposes a taxi guidance algorithm based on 4D trajectory to realize efficient and punctual taxi of aircraft. Topology model is firstly established according to the structure of the airport, and then to improve the traditional Dijkstra algorithm, considering the road wingspan and turning constraints, an optimal glide path planning for aircraft is worked out. And according to the ATC set by the RTA for all track points dis-

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773202、52072174); 四川省科技计划项目(2018JZ0030); 中国民航管理干部学院民航通用航空运行重点实验室开放基金(CAMICKFJJ-2019-04); 国防科技重点实验室基金(6142505180407)。

第一作者: 张鹏(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进场面活动引导与控制系统。

ORCID 号: 0000-0002-4743-889X E-mail: 786449635@qq.com

* 通信作者: 汤新民(1979—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为智能空中交通。

ORCID 号: 0000-0001-9573-2172 E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn

引用格式: 张鹏, 汤新民, 胡钰明, 等. 基于 4D 轨迹的机载端滑行引导算法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 23-29.

ZHANG Peng, TANG Xinmin, HU Yuming, et al. Research on Aircraft Surface 4D Trajectory Guidance Algorithm[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2022, 41(1): 23-29.

tribution corresponding RTA and slide, a goal 4D trajectory is obtained. Finally, the aircraft can track the 4D trajectory under the guidance of the speed guidance algorithm. The speed guidance algorithm takes the smooth taxi of the aircraft as the target, dynamically calculates the optimal reference speed of the taxi according to the current motion state of the aircraft, and takes the aircraft performance, speed and RTA as constraints, so as to realize accurate 4D trajectory tracking. The simulation results show that the algorithm can provide a reasonable glide path for the aircraft and can reach the destination efficiently and on time under the guidance of the reference speed.

Keywords: surface taxi guidance; routing planning; required time of arrival(RTA) ; four dimension trajectory; flight control; navigation control

随着我国航空航天事业的飞速发展,民航运输产业日益繁荣,各机场航班量日益增加。但是各大机场的运行管理能力并没有随着机场业务量的激增而进行升级优化,这导致了滑行道阻塞、航班延误、管制员工作负荷大等一系列问题的出现。特别在场面滑行道布局结构复杂、航班量大、能见度低等情况下,场面滑行效率极低,安全性极差。美国联合规划和发展办公室(JPDO)将基于轨迹的运行操作(STBO)作为下一代航空运输系统(NextGen)的关键机制,不仅可以用于管理高密度或高度复杂空域的交通,还可以应用于机场场面作业中,确保场面作业安全高效。

探索使用场面四维轨迹进行场面运行引导是研究热点^[1-13]。在四维轨迹设计方面:Cheng等^[1]提出了基于燃油消耗模型的四维轨迹速度剖面设计算法,将最小燃油消耗作为四维轨迹设计的目标,提升了航空器场面运行的经济性,但其将航空器在各路段的滑行简化为匀速运动,仅在转弯时做匀加/减速运动,与实际滑行场景不符;Chen等^[2]也是基于油耗建立四维轨迹设计模型,将航空器在各路段的运动分解为4个阶段进行分析,提高了轨迹设计的准确性。在四维轨迹追踪方面:Wu等^[3]提出了基于不同航空器运动学模型的轨迹追踪算法,并考虑到飞行员的操作响应,对比分析了各种不同模型的适用场景;Zheng等^[4]提出了基于预计到达时间的目标点追踪算法,根据目标轨迹点所需到达时间(RTA)及航空器运动状态计算建议速度,以保证航空器能在目标轨迹点 RTA 内准时到达。

实现整个场面众多航空器高效安全滑行的前提是各航空器自身拥有精确的滑行指引系统,而不仅仅依赖地面管制员的调控。各航空器可在接收

到地面管制员的滑行起终点位置指令和滑行时间指令后,为本机规划出一条最优 4D 滑行轨迹,并且航空器可依据当前运动状态计算出本机的参考滑行速度剖面,从而实现精准的路径与速度指引。

1 机场拓扑结构模型

图论为任何包含二元关系的系统提供一个很好的数学模型。它使用图解式方法,具有一种直观的、符合美学的外形。本文将机场场面滑行结构抽象成加权有向图模型,如图 1 所示。

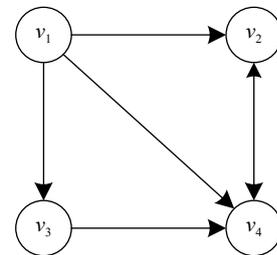


图 1 有向图模型

加权有向图可表示为 $G = (V, E)$,其中 V 为机场场面滑行网络节点集合, E 为机场场面有向路段的集合,即跑道中线、滑行道引导线和停机坪引导线的集合。则有:

$$\begin{cases} V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \\ E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \end{cases} \quad (1)$$

对于集合 V 和集合 E 中的每个元素,又包含以下属性:

$$\begin{cases} v_k = (\text{vid}_k, \text{lon}_k, \text{lat}_k) \\ e_t = (\text{eid}_t, \text{sp}_t, \text{ep}_t, \text{len}_t, \text{vl}_t, \text{wt}_t) \\ 1 \leq k \leq m, 1 \leq t \leq n \end{cases} \quad (2)$$

式中: vid_k 、 lon_k 、 lat_k 分别表示第 k 个路网节点的编号、经度、纬度; eid_t 、 sp_t 、 ep_t 、 len_t 、 vl_t 、 wt_t 分别表示第 t 条滑行路段的编号、起点编号、终点编号、路

段长度、限制速度、限制翼展。对于路径段 e_i ,假设 e_i 的起点 sp_i 对应的路网节点为 v_p , e_i 的终点 ep_i 对应的路网节点为 v_q ,则 e_i 的长度 len_i 即为 v_p 、 v_q 之间的距离。

为表示 2 节点之间的连接关系和节点构成线段的权值,采用邻接矩阵表示节点之间的连接。假设机场场面结构图有 m 个节点,可用 m 阶矩阵 C 表示,定义矩阵的元素,为

$$c_{i,j} = \begin{cases} len_k, i, j \text{ 连通} \\ \infty, i, j \text{ 不连通} \end{cases} \quad (3)$$

机场场面结构中不存在自回环,即节点本身之间不存在连接,因此,矩阵 C 的对角线元素均为 0。

2 基于改进 Dijkstra 算法的 4D 轨迹规划

2.1 改进 Dijkstra 算法的路径规划

传统 Dijkstra 算法作为一种贪心算法,从起点开始进行广度优先搜索,遍历完所有节点即可得到起点到任意节点的最短路径。传统 Dijkstra 算法以 2 节点之间的路径长度作为搜索权重,搜索得到的路径只能满足 2 节点之间的最短路径的需求;但是在机场场面运行规则下,滑行路径最短不是唯一标准,滑行路径的平滑过渡也是相当重要,对于一个大型航空器来说,过多的转弯不仅影响了滑行效率也增加了安全风险。为此,本文以路段平均滑行时间、路段偏转角及路段翼展限制为综合因素,构造多因素权重函数。权重函数表达式为:

$$\tau_{i,j} = d_{i,j}/u_{i,j} + C \times W \quad (4)$$

$$C = \begin{cases} \infty, \theta > \pi/2 \\ \frac{\theta}{r}, 0 \leq \theta \leq \pi/2 \end{cases} \quad (5)$$

$$W = \begin{cases} \infty, win_k < w \\ 1, win_k \geq w \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tau_{i,j}$ 为节点 i,j 之间的权重值; $d_{i,j}$ 为节点 i,j 之间的长度; $u_{i,j}$ 为节点 i,j 之间的平均速度; C 为偏转角权重因子; θ 表示连续搜索路段的偏转角度; r 表示转弯路段的转弯半径; W 为翼展权重因子。

该权重函数表示路段总权重受路段平均滑行时间和权重因子的影响。偏转角权重因子表示为:当 2 条连续搜索路段的偏转角度大于 90° 时,该段权重为无穷大,即此路不通;当偏转角度小于 90° 时,权重因子与偏转角度呈正比,与转弯半径呈

反比。翼展权重因子表示为:当飞机翼展超过该路段限制翼展时,该段权重为无穷大,即此路不通;当翼展小于该路段限制翼展时,权重因子为 1。

在路网模型中有 N 个节点,每个节点表示为 (S_i, V_i) ,其中 S_i 表示起点 s 到节点 i 的最短路径长度, V_i 表示从起点 s 到节点 i 的最短路径中 i 节点的前一个节点。算法基本步骤如下。

步骤 1,初始化 $S_0 = 0, w_0, V_0$ 为空。所有其他节点 $S_i = \infty, V_i$ 未定义,标记原点 s ,记 $k = s$ 。

步骤 2,检验从所有已标记点 k 到其他直接连接的未标记点 j 的距离,并更新节点 j 的总代价值, $S_j = \min[S_j, (S_k + \tau_{k,j})], k < j$ 。

步骤 3,从所有未标记的点中选取 S_j 最小的点 i ,标记点 i ,将其加入到已标记的点集合中。

步骤 4,所有节点均被标记,则找到了起点到其他任意节点的最优路径。

2.2 计划 4D 轨迹设计

地面管制不仅需要设定航空器滑行的起点、终点,还需设定航空器计划到达时间 T_{end} 。若航空器滑行起始时间为 T_{start} ,则总滑行时间为 $T_{end} - T_{start}$,需满足的条件为

$$\sum_{i=1}^N \frac{l_i}{v_i^{\max}} \leq T_{end} - T_{start} \quad (7)$$

式中: l_i 为第 i 条路径段的长度; v_i^{\max} 为第 i 条路径段的最大限制速度; N 为滑行路径段总条数。

假定航空器仅在直线段做加减速操作,转弯曲线段均保持匀速运动,速度为 v_c 。包含转弯段,整条滑行路径可切分为几个大段,如图 2 所示。

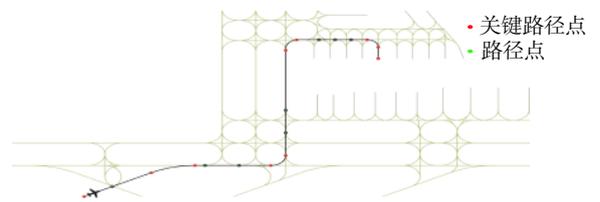


图 2 滑行路径

按照关键路径点将路径切分成 m 条转弯段和 n 条直线段。首先为关键路径点分配 RTA,然后根据关键点 RTA 为其余路径点分配合理的 RTA。因此航空器在转弯段的滑行时间可利用公式 $t = l_c/v_c$ 求得。直线段则可根据直线段的长度进行

分配。

$$T_i = (T_{\text{end}} - T_{\text{start}} - \sum_{i=1}^m t_i^c) \times \left(L_i / \sum_{i=1}^n L_i \right) \quad (8)$$

式中: T_i 为第 i 条直线段所分配的时间; $\sum_{i=1}^m t_i^c$ 为 m 个转弯段所分配的时间之和; L_i 为 n 条直线段中第 i 条直线段的长度。

根据滑行起始时间和各段分配时间即可得到各关键节点的 RTA, 为

$$\text{RTA}_i = T_{\text{start}} + \sum_{i=1}^n T_i \quad (9)$$

式中 RTA_i 表示第 i 个路径点的所需到达时间。

3 滑行速度引导模型

3.1 航空器运动学模型

为尽可能保证飞行员调速操作简单, 将航空器运动学模型进行简化。航空器的滑行速度剖面只包含匀加速、匀速和匀减速、匀速 2 种情况, 如图 3 所示, 阶段 1 为匀加速或匀减速运动, 阶段 2 为匀速运动。

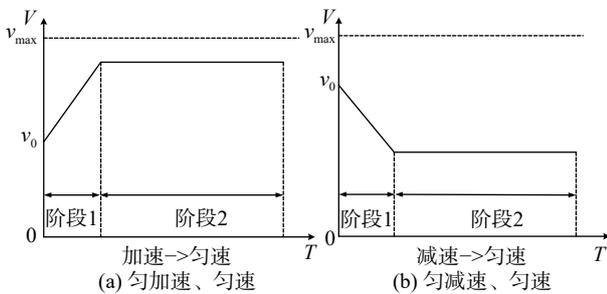


图 3 速度剖面

3.2 基于 ETA 时间窗的路径点可达性计算

航空器是依据目标 4D 轨迹上路径点的位置和 RTA 进行引导计算, 但不是所有路径点都能作为引导计算的参考点, 必须选择航空器在性能约束条件下可以达到的路径点作为引导计算的参考点, 所以需对航空器后续即将经过的路径点进行可达性判断。算法步骤如下。

步骤 1, 计算航空器当前位置与下一路径点 i 的间隔距离 d 和间隔时间 t 。

步骤 2, 计算航空器在当前速度 v_0 下以最大正向加速度进行加速且不超过限制速度的情况下到达下一路径点的时间 t_{\min} 。

步骤 3, 计算航空器在当前速度 v_0 下以最大反向制动加速度进行减速到达下一路径点的时间 t_{\max} 。

步骤 4, 航空器在路径点 i 处的 ETA (预计到达时间) 时间窗为 $[t_{\min}, t_{\max}]$, 判断间隔时间 t 是否在 ETA 时间窗内。若 $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, 则将第 i 个路径点作为可达参考路径点, 否则, 将下一路径点作为待定可达路径点进行判断, 返回步骤 2。

依据航空器当前速度以及加速度范围, 可推算出航空器到达后续路径点的 ETA 时间窗, ETA 时间窗计算分为以下 4 种情况。

情况 1: 当航空器以最大正向加速度 a_q 加速度到最大限制速度时还没到达路径点, 且当以最大反向制动加速度 a_t 减速到 0 还没到达路径点, 此时 $t_{\max} = \infty$, 如图 4 所示。

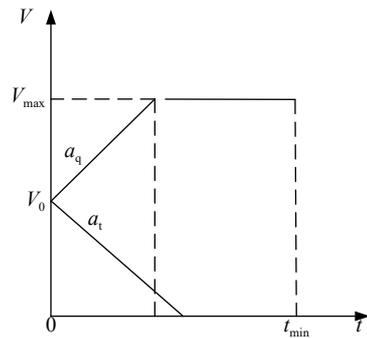


图 4 情况 1

情况 2: 当航空器以最大正向加速度 a_q 还没加速到最大限制速度时就已经到达路径点, 且当以最大反向制动加速度 a_t 减速时没有减速到 0 就已经到达路径点, 如图 5 所示。

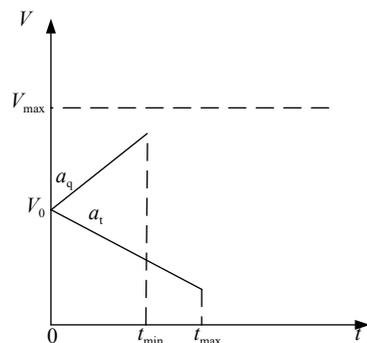


图 5 情况 2

情况 3: 当航空器以最大正向加速度 a_q 加速度到最大限制速度时还没到达路径点, 且当以最大反

向制动加速度 a_t 减速时没有减速到 0 就到达路径点,如图 6 所示。

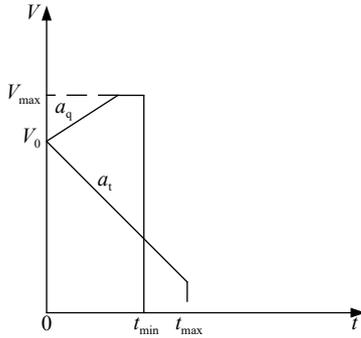


图 6 情况 3

情况 4: 当航空器以最大正向加速度 a_q 加速时还没加速到最大限制速度是就已经到达路径点,且当以最大反向制动加速度 a_t 减速到 0 还没有到达路径点,则此时 $t_{max} = \infty$,如图 7 所示。

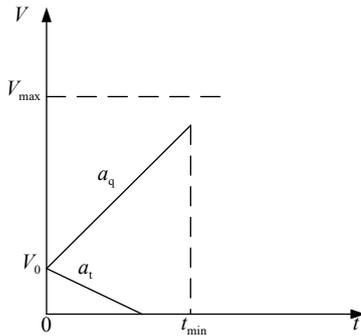


图 7 情况 4

在得到路径点 ETA 时间窗后,将路径点 RTA 与航空器 ETA 时间窗进行对比,即可判断出路径点的可达性。以情况 1 为例,如图 8 所示,RTA1 和 RTA2 均不在对应路径点 ETA1 和 ETA2 时间窗内,表明路径点一和路径点二不可达,而 RTA3 在 ETA3 时间窗内,则表示路径点三可达。

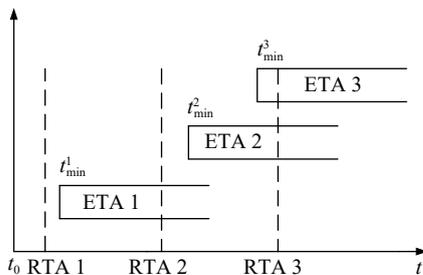


图 8 ETA 时间窗

3.3 滑行引导速度剖面计算

为保证航空器在滑行道上以平顺的速度进行

滑行,不进行较大的加/减速操作,可将航空器当前速度与匀速阶段的速度差值平方最小化作为目标函数,即

$$g = \min(v_0 - \bar{v}_{s_j})^2$$

由于路径点可达性计算得到的是航空器所能到达的最近路径点,当可达路径点与航空器距离较小时,引导速度会出现不稳定的波动,所以取距离航空器至少 100 m 处的路径点作为目标参考点进行引导计算。

运动学方程为:

$$\begin{cases} \bar{v}_{s_j} = v_0 + a\Delta t \\ v_0\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 + \bar{v}_{s_j}(t_{0 \rightarrow i} - \Delta t) = d_{0 \rightarrow i} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } \eta = (at_{0 \rightarrow i})^2 + 2a(v_0t_{0 \rightarrow i} - d_{0 \rightarrow i})$$

则当 $a < 0$ 时,

$$\Delta t = t_{0 \rightarrow i} + \frac{\sqrt{\eta}}{a} \quad (11)$$

当 $a > 0$ 时,

$$\Delta t = t_{0 \rightarrow i} - \frac{\sqrt{\eta}}{a} \quad (12)$$

约束条件为:

$$0 \leq v_{s_j} \leq v_{\max}^{0 \rightarrow i} \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta t \leq t_{0 \rightarrow i} - t_0 \quad (14)$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (15)$$

式中: \bar{v}_{s_j} 表示匀速阶段的速度; v_0 表示航空器当前速度; Δt 表示加/减速时间; a 表示航空器的加速度; $t_{0 \rightarrow i}$ 表示航空器从当前位置到目标点的时间; $d_{0 \rightarrow i}$ 表示航空器当前位置到目标点的距离; $v_{\max}^{0 \rightarrow i}$ 表示航空器从当前位置到目标点之间路段的最大限制速度。

4 4D 滑行引导算法验证

本文以 FlightGear 作为飞行仿真平台,选择波音 737-800 机型在南京禄口机场进行飞行模拟仿真验证。波音 737-800 的机型相关参数可从 BADA 获取。根据南京禄口机场施工 CAD 图,借助 ArcGIS 软件建立南京禄口机场地图数据库,为仿真测试提供基础数据。

将航空器初始位置设置为南京禄口机场 24 跑道端头,在管制端将航空器滑行的起点设置为 A3 跑道脱离道口,起点 RTA 设置为 0 s,终点设置

为 227 号机坪停机位, 终点 RTA 设置为 300 s。分别采用传统 Dijkstra 和改进 Dijkstra 算法进行轨迹规划。2 种算法规划得到的结果如图 9 所示。基于改进 Dijkstra 算法得到的轨迹点三维坐标如图 10 所示, 各轨迹点的 RTA 序列如图 11 所示。

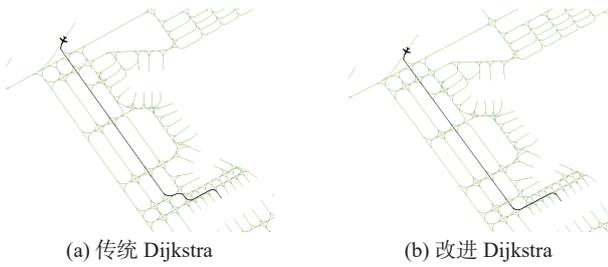


图 9 规划路径

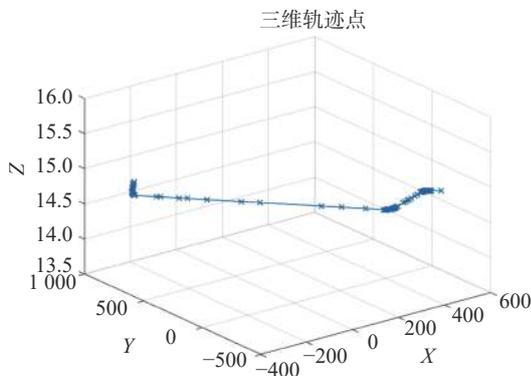


图 10 三维轨迹路径点

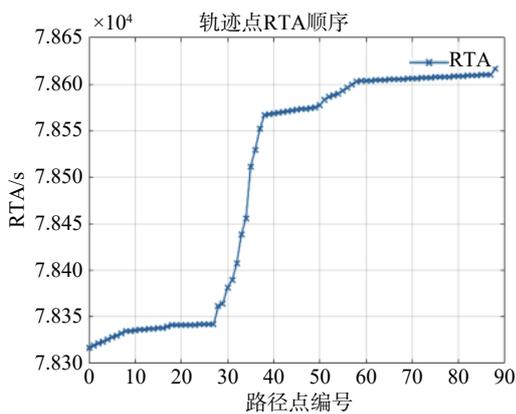


图 11 迹点 RTA 序列

由图 9 可知, 对于相同的起点、终点, 传统 Dijkstra 得到的规划路径包含 5 个转弯段, 本文提出的改进 Dijkstra 算法规划路径仅包含 3 个转弯段, 显然改进 Dijkstra 算法得到的规划路径更加平滑合理。

为验证速度引导的有效性, 分别进行 2 组实验: 第 1 组在无速度引导的情况下操作航空器从

A3 滑行到达 227 号机坪; 第 2 组在有速度引导情况下操纵航空器从 A3 滑行到 227 号机坪。

在速度引导中, 将滑行参考速度计算周期设置为 2 s。操纵航空器按照规划的路径以及参考速度进行滑行, 滑行场景如图 12 所示, 左下角为速度表, 绿色指针代表当前速度, 蓝色指针代表滑行参考速度。航空器在滑行过程中的实时速度剖面如图 13 所示, 实时加速度变化如图 14 所示。最终 2 组实验的滑行时间如表 1 所示。可以看出, 在速度引导下航空器的滑行时间显著缩短。

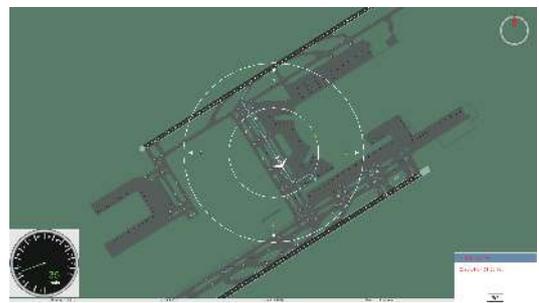


图 12 滑行引导运行场景

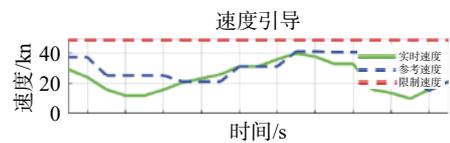


图 13 速度变化曲线

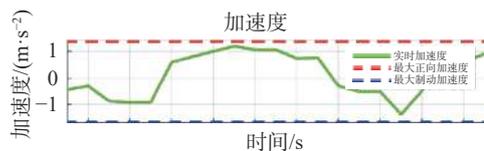


图 14 加速度变化曲线

表 1 滑行时间

对照组	起点	终点	路程/m	时间/s
无引导	A3	227	1537	363
引导	A3	227	1535	302

仿真结果显示, 使用改进 Dijkstra 算法能在不显著增加路径长度的情况下, 规划出转弯更少的滑行路径, 使得整个滑行路径更加平滑, 而且基于目标 4D 轨迹的滑行引导算法能够在各种约束条件下实现精准的轨迹追踪。本文提出的基于 4D 轨迹的机载场面滑行引导算法模型能够显著提高航空器场面滑行效率, 降低航班延误时间。

5 结束语

1) 基于4D轨迹的滑行引导算法将空中4D轨迹引导理念引入到机场场面引导系统中,考虑更加复杂的机场运行规则,为航空器提供最优滑行路径和滑行参考速度。

2) 现有基于轨迹的滑行引导算法仅为航空器设计一条理想速度剖面,并没有考虑在飞行员操作误差扰动下的修正,而本文提出的基于4D轨迹路的引导算法,是根路径点RTA、航空器运动状态和一系列约束条件,对航空器进行实时动态的速度引导,有效消除人为操作误差。

3) 随着我国民航产业的飞速发展,航空运输需求量的不断增加,大型繁忙机场的场面引导系统必定会从管制单方面引导朝着管制与机载协同引导的方向发展。

参 考 文 献

[1] CHENG V, SWERIDUK G D. Trajectory design for aircraft taxi automation to benefit trajectory-based operations[C]// 2009 7th Asian Control Conference. Hong Kong, China; IEEE, 2009: 99 – 104.

[2] CHEN J, STEWART P. Planning aircraft taxiing trajectories via a multi-objective immune optimisation[J]. Classroom Discourse, 2011, 5(1): 2235 – 2240.

[3] WU D, ZHAO Y, CAPOZZI B. Fundamental surface trajectory models for air traffic automation[C]// 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Fort Worth, Texas: AIAA, 2013: 13 – 15.

[4] ZHENG Q, ZHAO Y J, CAPOZZI B J. Time-of-arrival based taxi conformance monitoring for surface operation[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2013,

34(3): 750 – 760.

[5] 张天慈. 基于四维轨迹的机场地面运动引导控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[6] 周龙. 基于4D轨迹的航空器地面滑行动态路径规划及仿真系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

[7] 李楠, 孙瑜, 焦庆宇, 等. 基于多目标速度剖面的航空器滑行路径规划[J]. 飞行力学, 2020, 38(6): 87 – 94.

[8] International Civil Aviation Organization (ICAO). Advanced surface movement guidance and control system (A-SMGCS) manual[S]. [S.l.]: ICAO, 2004.

[9] 李仪环. 高级场面活动引导和控制系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[10] BAKOWSKI D L, HOOEY B L, BAKOWSKI D L, et al. Flight deck surface trajectory-based operations (STBO): A four-dimensional trajectory (4DT) simulation [C]// 36th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, DASC 2017. Florida, USA: IEEE, 2017: 1 – 10.

[11] OKUNIEK J N, JUNG Y C, GERDES I, et al. Performance evaluation of conflict-free trajectory taxiing in airport ramp area using fast-time simulations[C]// 37th Digital Avionics Systems Conference. London, UK: IEEE, 2018: 23 – 27.

[12] OKUNIEK N, BECKMANN D. Towards higher level of a-smgcs: handshake of electric taxi and trajectory-based taxi operations[C]// 36th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, DASC 2017. Florida, USA: IEEE, 2017: 17 – 21.

[13] JACKSON M, HOWE-VEENSTRA R, WALKER D. 4D Trajectory based operations-speed control interoperability[C]// 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). [S.l.]: IEEE, 2019: 1 – 7.

(编校: 饶莉)