

数据驱动下的国际航空货运不定期航线优化

陈华群, 黄方玮, 杨伟超

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 为了解决传统人工经验进行航线规划缺乏系统性和效率低下的问题, 考虑了机场和航路点限制条件建立基于优化理论的航线规划数学模型。引入动态规划算法思想对传统 A* 算法进行改进, 实现了智能化的航线规划。通过数据挖掘、清洗、坐标点转换, 实现对航线规划及全球历史航线数据的可视化输出。基于 Python 仿真平台对 2022 年全球航线和 14 110 个机场数据进行训练, 分别采用改进 A* 算法与贪心算法对洲际航线与短途国际航线进行规划对比。实验结果表明, 改进 A* 算法能够减少节点的数量, 缩短航线距离, 洲际长航线总航程缩短 37.66%, 短航线总航程缩短 4.36%, 提高了航线规划的效率和准确性。

关键词: 数据驱动; 国际航空货运; 不定期航线规划; 改进 A* 算法; 航线可视化

中图分类号: V37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)24-0308-08

国际航空货运不定期航线是指货运需求临时选择的航线方式, 这类航线不通过公共方式提前向社会公布起降地和时刻, 具有较强的不确定性。因国际航空货物具有高价值和时效性的运输需求, 不定期货运航线需满足及时、准确和经济的规划要求。当前, 航空公司对新开通国际不定期航线的规划与评估主要以人工经验为主^[1], 虽然满足了民航法规的要求, 但耗时耗力, 尤其面临大规模航线规划任务时, 各国规则差异较大, 更难实现对航线资源的充分利用。因此, 有必要建立更科学的航线规划与评估手段, 引入人工智能算法, 对新开货运不定期航线的合理规划与可视化输出, 不仅满足实时性动态调整要求, 且有利于航空货运的降本增效。

航空货运不定期航线的规划属于组合优化问题, 当前国内外智能航线规划研究尚属于起步阶段。例如, 朱承元等^[2]提出全空域与机场模型对空域内的临时航线进行动态优化, 有效降低了管制员负荷和飞行成本; 李玉民等^[3]提出了货运空铁联运衔接模型, 优化了航线与运力决策时脱节的缺陷; 朱学松等^[4]引入灰靶-粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 理论解决了竞争环境下的航空货运航线运营和机队规划的问题。然而, 上

述研究多采用传统航线规划方法, 较偏向于人工经验的定性管理, 且缺乏可视化手段, 不利于规划结果的分析及运用。人工智能技术已广泛应用于地面车辆、船舶和无人机路径规划领域, 例如, 章文俊等^[5]考虑多风险因素, 引入改进的 A* 算法结合动态窗口算法对北极的海运航道航线规划, 避免了搁浅和碰撞; 董翼宁等^[6]提出优化 A* 算法与动态窗口算法 (dynamic window approaches, DWA) 融合的自动引导车路径规划方案, 实现了高效寻优; 吕成等^[7]建立海冰栅格地图模型, 采用 Dijkstra 算法对船舶极低航行航线规划; 谭海燕等^[8]基于改进 A* 算法对无人机航线进行平滑处理满足自主路径寻优; 程洁等^[9]提出面向城市场景的最小危险路径规划算法, 满足对低空范围内的轨迹进行安全规划。上述研究能够实时进行航线规划, 但其目标样本量较少和涉及区域范围较小。

近年来大数据技术已经被应用到全球区域船舶航行路线的规划, 主要有: 王伟懿和李晓勇^[10]利用全球船舶时空大数据分析航迹数据的空间与属性特征, 并基于密度图进行可视化的实现; 叶锋和贾立校^[11]基于船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS), 搭建船舶历史航线可视化平

收稿日期: 2024-07-24

基金项目: 四川省科技计划 (23ZDYF0586); 中国民用航空局安全能力建设项目 (2022237); 中国民用航空飞行学院大学生创新创业项目 (2024106204028)

作者简介: 陈华群 (1981—), 女, 四川简阳人, 硕士, 副教授, 研究方向为航空公司运行管理; 黄方玮 (2000—), 男, 广东云浮人, 硕士研究生, 研究方向为航空货运航线规划与评估; 通信作者杨伟超 (1998—), 男, 山西大同人, 硕士, 助教, 研究方向为多旋翼无人机与服务站选址。

台;陈海蕊和开金宇^[12]通过大数据分析技术建立历史航线模型,采用可视化数据转换空间分析(data shift visualized analysis, DHZA)实现可视化。新开国际不定期货运航线通常涉及两国或地区及以上的区域,飞行数据量庞大,充分发挥大数据处理和整合海量数据、考虑用户偏好、帮助用户筛选的技术优势,有利于优化航线规划的效率及准确性。

鉴于此,为系统分析航空货运不定期航线数据的多样性及复杂性,基于大数据技术的高效处理和可视化呈现效果,本文拟在深入分析历史航线数据特点的基础之上,综合考虑机场和航路点的限制条件,建立航线规划的数学模型,利用改进 A* 算法对航线进行智能化规划,通过数据挖掘、清洗、坐标点转换、数据入库等处理,输出可视化的航线规划结果,有利于进一步运行评估与调整,满足不定期航线规划对运营效率的要求。

1 问题分析与假设

1.1 问题描述

我国国际航空货运不定期航线规划必须遵照《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121)、《中国民用航空货物国际运输规则》《中国民用航空货物国内运输规则》和《民用航空运输不定期飞行管理暂行规定》^[13],满足对起降机场、航路航线的匹配和飞机性能的要求,属于组合优化问题。根据国际航空货运集散要求,本文以两城市之间货运需要送达的两个机场分别作为起飞和目的地机场,沿途经过若干个可用机场;出发机场有多条标准仪表离场程序可以选择,从而存在多个离场结束点即航路加入点;航路加入点按照连通为第一准则,可能存在多个可供选择的航路结束点和多条进场和进近程序。以规划其中一条由起飞机场 P_1 经过若干个航路点到目的地机场 P_2 的

空中航线为例,其动态规划的网络结构如图 1 所示。

由图 1 可知,规划的该次航班以 P_1 为起始机场,由 P_1 起飞执行离场程序飞往的目的地机场 P_2 ,在候选的航路点集合中选择接入第一阶段的航路点 A_k^i 。按照距离目的地机场的远近程度,以最短路径为原则,综合考虑该航班所执飞机性能与航路点的距离 $L_{k,k+1}^i$ 和导航设施配备等因素,规划选择下一阶段的航路点 A_{k+1}^j 。总计经历 K 阶段完成航线规划抵达目的地机场 P_2 进场程序 STAR 的起始进近点,最终着陆至目的地机场 P_2 。

1.2 模型假设

为了建立不定期航线规划模型,确保航班的正常运行,做出如下假设:

(1)境内的航路点均没有列入《飞行管制一号规定》和《中国民航班机航线汇编》之内;

(2)境外的航路点是可以随机选择,没有相应的管制走向规定;

(3)所有航路点都正常工作,可以为飞机提供所需的引导服务;

(4)航路不受通告和天气条件的限制,不需要考虑绕飞;

(5)飞行过程中各航段的单位飞行成本相同,飞机的单位飞行成本与飞机类型相关,假设所用的飞机类型一致。

1.3 参数设置

(1)航路点参数。设规划的航线所有位置点集合为 P ,总计经历 K 阶段完成航线规划 $P = [P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_K]$, $k \in K$;每一阶段 k 的可候选的位置点设为 $P_k = [A_1^1, A_1^2, \dots, A_k^i, \dots, A_k^{M_k}]$ 。 A_k^i 为第 k 阶段的第 i 个可候选航路点,属性包括坐标、PBN 和 RVSM 运行,即 $A_k^i = [P(x_k^i, y_k^i, z_k^i), a_k^i, h_k^i]$; $L_{k,k+1}^i$ 为 A_k^i 与 A_{k+1}^j 的距离。

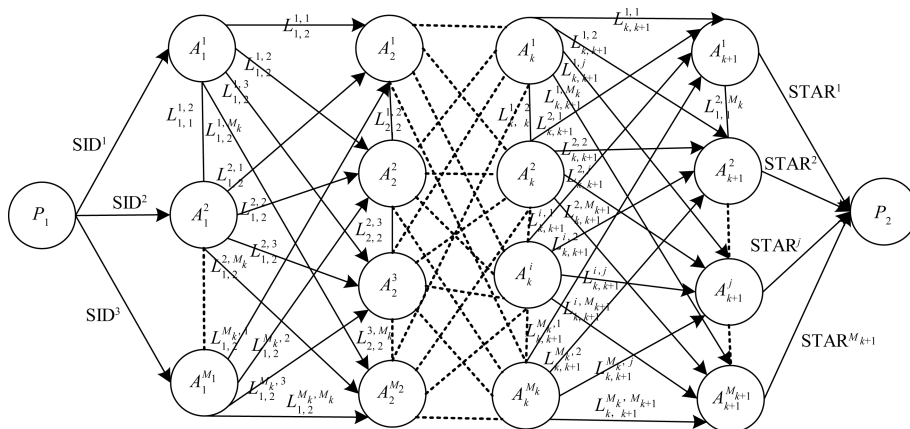


图 1 不定期航线的路径规划示意图

距离规划航线的位置点 P 最近的海岸线位置点集合设为 $G=[G_1, G_2, \dots, G_t, \dots, G_T]$, 其中 $G_t=(x_t, y_t, z_t)$, $t \in T$ 表示该航路上总计涉及 T 个海岸线位置点。

(2) 起降机场参数。按照航线运行的要求, 设机场集合 B 包括起飞机场、目的地机场、起飞备降机场、目的地备降机场和航路备降机场, 即 $B=[B_1, B_2, \dots, B_c, \dots, B_C]$, $c \in C$, 表示该航路上总计涉及 C 个机场。每个机场的属性包括坐标、离场程序、进场进近程序、飞行区等级和 PCN, 即 $B_c=[P(x_c, y_c, z_c), d_c, e_c, g_c, q_c]$ 。

(3) 航空器参数。设执行该航线的航空器为 S , 属性包括 ACN、入口速度、航程、越障能力和具备特殊导航能力; 特殊导航能力指具备 RVSM、PBN 和跨水设备, 即 $S=[r, v, u, w, n]$, 其中 $w=[w_1, w_2]$ 。

(4) 决策关联变量。设 x_k^{ij} 为第 k 阶段的 A_k^i 与第 $k+1$ 阶段的 A_{k+1}^j 选择决策变量, 若被选择取 1, 否则为 0; x_{B_c} 为机场是否可用, 若可用取 1, 否则为 0; y_j^k 为飞机性能是否与航线要求匹配, 是取 1, 否则为 0; z_j^k 为是否为跨水运行, 是取 1, 否则为 0。

2 不定期航线网络规划模型

建立从起飞机场执行的离场程序、每一航路点之间的航段距离和目的地机场的进场程序的总距离最短的航线规划模型:

$$\min f_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in M_k} \sum_{j \in M_{k+1}} x_k^{ij} l_{k,k+1}^{ij} + \sum_{c=1}^C (d_c + e_c) \quad (1)$$

约束条件 s. t:

飞机的越障能力应满足 RVSM 要求为

$$w_1 \geq h_k^i, k \in K, i \in M_k \quad (2)$$

飞机的特殊导航能力满足航路点的 PBN 要求为

$$w_2 \geq a_k^i, k \in K, i \in M_k \quad (3)$$

离场程序距离、每一航段距离以及进场程序的总距离总和小于飞机的航程的约束为

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in M_k} \sum_{j \in M_{k+1}} x_k^{ij} l_{k,k+1}^{ij} + d_c + e_c \leq u, \quad j \in M_{k+1}, c \in C \quad (4)$$

起降机场 PCN 值满足飞机 ACN 值的约束为

$$r \geq q_c, r \in S, c \in C \quad (5)$$

起降机场的飞行区等级应满足飞机机型的要求:

$$v \geq g_c, v \in S, c \in C \quad (6)$$

保证每一航段均被规划的约束为

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in M_{k+1}} x_k^{ij} = 1, i \in M_k \quad (7)$$

保证飞机性能均满足每一条选择航线的要求为

$$\sum_{j \in M_{k+1}} y_j^k = 1, k \in K \quad (8)$$

每一阶段的航线规划、飞机性能、延伸跨水运行和机场可用的变量约束为

$$x_k^{ij} = \{0, 1\}, i \in M_k, j \in M_{k+1}, k \in K \quad (9)$$

$$y_j^k = \{0, 1\}, i \in M_k, j \in M_{k+1}, k \in K \quad (10)$$

$$z_j^k = \{0, 1\}, i \in M_k, j \in M_{k+1}, k \in K \quad (11)$$

$$x_{B_c} = \{0, 1\}, B_c \in P(x_c, y_c, z_c) \quad (12)$$

3 改进 A* 的模型求解算法

3.1 算法设计思想

A* 算法是一种广泛用于路径搜索和图搜索的启发式搜索算法, 结合了广度优先搜索和启发式搜索, 常用于求解最短路径问题。它的核心思想是通过在搜索路径时评估每一步的代价, 从而高效找到从起点到目标点的最优路径。A* 算法通过启发式估价函数和实际代价函数来高效地寻找最优路径, 能够保证最优性和高效性; 但节点实际代价需要在每次扩展时重新计算, 这导致了大量的重复计算^[14]。因此, 鉴于航空货运不定期航线规划的数据样本量大和数据结构复杂较复杂, 本文引入动态规划算法思想, 将记忆化搜索与启发式搜索相结合减少重复的计算。改进后的 A* 算法的启发式搜索特性能够有效地帮助确定从起始点到目的地的最优路径, 尤其在航线网络复杂、路径选择众多的情况下, 能够显著提高规划效率, 从而降低运营成本。最小总代价的函数为

$$F(A_k^i) = g(A_k^i) + h(A_k^i) \quad (13)$$

式中: $F(A_k^i)$ 为从当前节点 A_k^i 到目标点 A_{k+1}^j 的总估计代价函数; $g(A_k^i)$ 为从起点 P_1 到节点 A_k^i 的实际代价; $h(A_k^i)$ 为从节点 A_k^i 到目标节点 P_2 估算代价。

A* 算法的性能取决于启发式函数的选择。常用的启发式函数包括欧几里得距离和曼哈顿距离^[15], 两个航路点之间的欧几里得距离计算式为

$$l_{k,k+1}^{ij}(A_k^i) = \sqrt{(x_k^i - x_{k+1}^j)^2 + (y_k^i - y_{k+1}^j)^2} \quad (14)$$

曼哈顿距离为

$$l_{k,k+1}^{ij}(A_k^i) = |x_k^i - x_{k+1}^j| + |y_k^i - y_{k+1}^j| \quad (15)$$

由于欧几里得距离在计算精度上要优于曼哈顿距离^[15], 为提高规划最优路径的概率, 本文选择欧几里得距离作为启发函数。

3.2 算法实现步骤

改进 A* 算法首先从起飞机场节点 P_1 出发,采用启发式评估函数 $h(A_k^i)$ 计算、节点选择 x_k^j 和路径优化操作 $l_{k,k+1}^j$ 进行搜索,直至到达目的地机场节点 P_2 。改进 A* 算法的步骤如下。

步骤 1: 初始化。设置最大迭代次数 k , 迭代计数器 $t=0$, 初始化开放列表、关闭列表和记忆数组“memo”, 并将起始机场节点 P_1 加入开放列表, 设定起点 P_1 所对应的实际代价 g 为 0, 用欧几里得距离作为启发式估价 h , 该函数估算从当前节点到目标节点的球面距离。 F 为 g 与 h 之和。

步骤 2: 节点评估。从机场航路点的开放列表选取 F 最小的节点 A_k^i , 检查该节点是否已在“memo”中, 若在则直接使用储存结果, 不在则计算其相邻节点 A_{k+1}^j 的 g (当前节点的 g 加上移动成本 $l_{k,k+1}^j$)、 h (使用启发式函数计算) 和 F (g 和 h 之和)。

步骤 3: 判断终点。检查节点 A_{k+1}^j 是否为终点节点。如果是, 算法终止并输出路径; 否则, 将节点 A_{k+1}^j 移出开放列表, 加入关闭列表, 并将当前节点及其代价储存到“memo”中。

步骤 4: 选择运算。对于航路节点 A_k^i 的每个相邻节点 A_{k+1}^j , 如果 A_{k+1}^j 在关闭列表中, 跳过该节点; 如果 A_{k+1}^j 不在开放列表中, 计算其 g 、 h 和 F , 并将其加入开放列表; 如果 A_{k+1}^j 已经在开放列表中但新的 g 更小, 则更新的 g 和父节点。

步骤 5: 优化路径。对于每个被更新的节点 A_{k+1}^j , 调整路径以确保新的路径更优。若找到更短路径, 则更新节点 A_{k+1}^j 的父节点为当前节点 A_k^i , 并重新计算其 g 和 F 。

步骤 6: 重复评估。返回步骤 2, 重复上述过程, 直到开放列表为空或找到终点。

步骤 7: 终止判断。若开放列表为空且未找到终点, 表示无可行路径, 算法终止; 否则, 输出找到的最优路径和总成本。

基于 Python 的历史航线规划数据的分析与科学计算的伪代码如下:

Input: G graph with nodes and edges; s start node; t , target node; //基础数据;

Output: P , shortest path from s to t ; //从 s 到 t 的最短路径;

$\text{open_list} \leftarrow \text{priority queue with } (s, 0)$ //初始化优先队列;

$g_score[s], f_score[s] \leftarrow 0, \text{heuristic}(s, t)$ //初始化得分;

$\text{current} \leftarrow \text{open_list.extract_min}()$ //取出最小得分节点;

If $\text{current} == t$: return $\text{reconstruct_path}(\text{came_from}, \text{current})$ //找到目标返回路径;

for neighbor in $G.\text{neighbors}(\text{current})$: //遍历邻居;

$\text{tentative_g} \leftarrow g_score[\text{current}] + G.\text{get_edge_weight}(\text{current}, \text{neighbor})$ //计算临时得分;

$f_score[\text{neighbor}] \leftarrow \text{tentative_g} + \text{heuristic}(\text{neighbor}, t)$ //更新得分;

$\text{memo}[\text{current}] \leftarrow g_score[\text{current}]$ //存储当前节点得分;

return $\text{sqrt}((\text{start.x} - \text{target.x})^2 + (\text{start.y} - \text{target.y})^2)$ //启发函数。

3.3 算法的时间复杂度

改进的 A* 算法的时间复杂度主要由优先级队列的操作和节点邻居的遍历决定。在最坏情况下, 算法需要对每个节点进行一次插入和删除操作, 这些操作的时间复杂度为 $O(\log A_k^M)$, 其中 A_k^M 是节点数。同时, 每个节点的邻居遍历操作的时间复杂度为 $O(\text{average}(M_1, M_{k+1}) A_k^M)$ 。因此得到改进的 A* 算法的总时间复杂度为

$$O(A_k^M \ln A_k^M + \text{average}(M_1, M_{k+1}) A_k^M) \quad (16)$$

4 实例分析

4.1 数据集的生成

为了验证本文全球历史航线大数据处理方法的有效性, 选取 2022 年的全球航线数据和 14 110 个机场数据进行数据处理试验。对数据进行清洗后, 最终筛选并建立的试验数据集有历史航线数据 67 664 条以及 7 699 个机场节点数据。对 2022 年的全球历史航线及机场试验数据进行坐标转换, 从地理坐标系的经纬度坐标 (λ, φ) 转换为墨卡托投影平面直角坐标 (x, y) ^[15]。具体的转换公式为

$$x = r_0 \lambda \quad (17)$$

$$y = r_0 \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] - \frac{r_0 e}{2} \ln \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \quad (18)$$

$$r_0 = \frac{a \cos \varphi_0}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}} \quad (19)$$

式中: r_0 为基准纬度卯酉圈曲率半径; λ 为经度 (以弧度表示); φ 为纬度 (以弧度表示); e 为椭圆的第一偏心率; a 为椭圆长轴半径, φ_0 为基准纬度。

通过上述公式运用, 地球表面的每一个经纬度

点都可以被准确地映射到一个二维的墨卡托投影图上,并进行航线提取等处理,生成以下.csv数据集,选取部分代表数据如表1所示。

表1将经过清洗、筛选并处理过后的全球航线历史数据按字段名称、数据类型以及字段内容都做了详细列举,如机场名称、经纬度坐标及高程和航线信息等。

4.2 航线规划对比

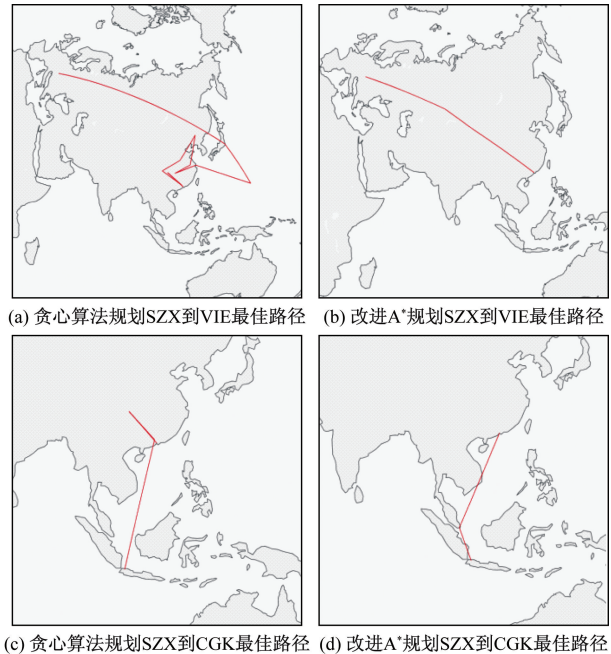
利用改进A*融合动态规划算法,通过Python实现基于上述可视化全球航线网络图中实现智能航线网络规划。为验证本文所采用的改进A*算法的有效性,仿真实验分别对比改进A*算法与经典贪心算法求洲际远程航线与短途国际航线最短规划路径的结果。

实验对象为模拟某航空货运公司新开通两条由基地深圳宝安国际机场(SZX)起飞,使用C类飞机,分别规划洲际长航线运送货物至目的地维也纳国际机场(VIE)和短途国际航线目的地为印度尼西亚苏加诺哈达国际机场(CGK)。通过人机交互选择起降机场,利用本文构建的数学模型,分别采用改进A*融合动态规划算法和经典贪心算法得到仿真规划结果如图2所示。

由图2可知,从SZX到VIE使用贪心算法生成的航线显示需要经过9个中转节点,改进A*算法生成的航线呈现一条较为直线的路径仅需经过2个节点,表明改进A*算法在考虑到全局最优路径的基础上,能够更有效地减少中转点和路径长度,更贴近于实际运行中所采用的大圆航线,从而提供了一

条更为高效和合理的航线;从SZX到CGK的短航线规划,采用贪心算法因局部最优导致了离场绕飞和多数航程属于跨水运行,而改进A*算法从离场结束即航路加入点至航路结束点均引入全局信息,对当前节点距终点的距离做出全局最优估计。两种算法规划航线的指标对比结果如表2所示。

由表2可知,改进A*算法对比贪心算法洲际航线规划距离缩短了37.66%的航程,短航线降低了4.36%。通过对比上述两种算法规划的航线走向



基于审图号为GS(2024)0650标准地图制作,底图无修改

图2 贪心算法和改进A*算法的
长短航线规划结果对比

表1 全球机场及航线数据

字段	数据类型	字段内容	国外数据	国内数据
id	bigint	主键,机场序列号编码	1	3374
ident	String	机场四字代码	AYGA	ZGSZ
Source airport	String	机场三字码	AER	LHW
name	String	机场名称	Goroka Airport	Shenzhen Bao'an International Airport
latitude_deg	Float	经过转换的纬度数据	-6.081 689 835	22.639 299 39
longitude_deg	Float	经过转换的经度数据	145.391 998 3	113.810 997
elevation_ft	int	机场高度	5 282	13
country_name	String	所属国家	Papua New Guinea	China
region_name	String	所属区域	Goroka	Shenzhen
iata_code	String	机场的IATA代码	GKA	SZX
Timezone	Float	机场时区	10	8
DST	String	夏令时	U	U
Airline	String	航空公司IATA两字码	2B	MF
Airline ID	int	航空公司序列号编码	410	5484
Source airport ID	int	机场序列号编码	2965	3378
Destination airport	String	目的地机场序列号编码	KZN	CSX
Route point	String	航路点编码	CEN	PNK
Equipment	String	执飞航线的飞机类型	CR2	737

趋势,传统的贪心算法完成的航线明显弯曲并经过了多个地区,这表明该算法可能在每一步选择局部最优解,而忽略了全局最优路径的寻找。

4.3 可视化实现

航线数据可视化的实现需要将前期采集到的原始数据进行编码处理,使其能成为计算机可以识别的语句。通过 Google Earth 等地理数据处理软

件,将原始数据转化为 KML 格式的包含地理信息的数据包,使后续基于 Python 平台构建的可视化模块可以进行调用,如图 3 所示。

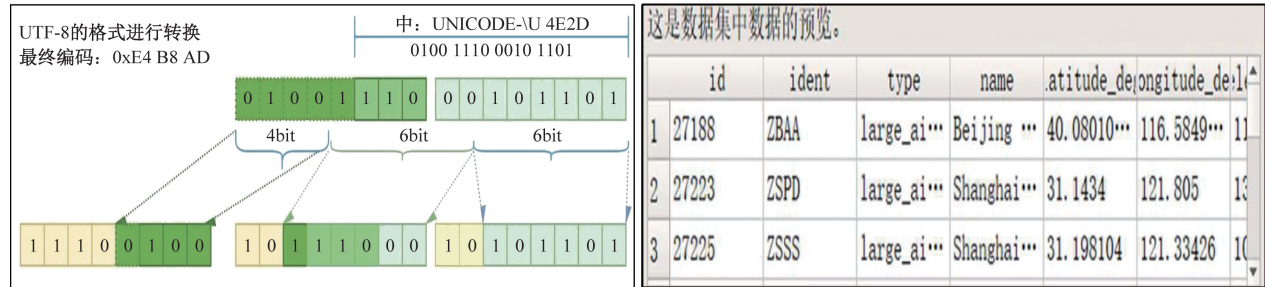
图 3 展示了将全球历史航线以及机场节点的原始地理数据导入至谷歌虚拟地球专业版(Google Earth Pro)中,并按照实验数据集的文本格式,选择“UTF-8”的编码形式。参照样原始数据的数据类型

表 2 改进 A* 算法与贪心算法规划结果对比

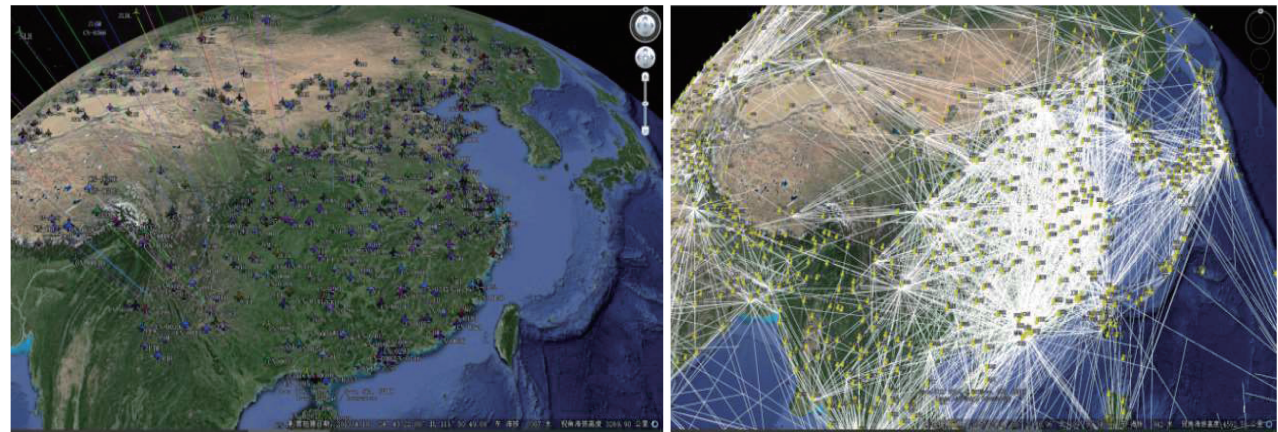
航线	算法	规划航线的主要位置点	航线距离/nm	改进效果/%
SZX-VIE	贪心算法	SZX-CKG-CAN-CTU-CGQ-NKG-DYG-PVG-SPN-NRT-VIE	7 870. 56	—37. 66
	改进 A* 算法	SZX-URC-TSE-VIE	4 906. 13	
SZX-CGK	贪心算法	SZX-CGK-CAN-CGK	2 029. 42	—4. 36
	改进 A* 算法	SZX-SIN-CGK	1 940. 86	

Airport ID	City	Country	IATA	ICAO	Latitude	Longitude	Altitude	Timezone	Airline	Source airport	Source airport ID	Destination airport	Destination airport ID	Equipment
1 611	Linz	Austria	LNZ	LOWL	48.233 2	14.187 5	980	1	2B	AER	2 965	2 KZN	2 990	CR2
1 612	Salzburg	Austria	SZG	LOWS	47.793 006 3	13.004 300 12	1 411	1	3U	SZX	3 374	3 CKG	3 393	320
1 613	Vienna	Austria	VIE	LOWW	48.110 298 16	16.569 700 24	600	1	3U	SZX	3 374	3 CTU	3 395	320 321
3 374	Shenzhen	China	SZX	ZGSZ	22.639 299 39	113.810 997	13	8	3U	SZX	3 374	3 WXN	6 403	319
3 275	Jakarta	Indonesia	CGK	WIII	-6.125 569 82	106.655 998 2	34	7	4U	CGN	344	VCE	1 551	320 319
4 380	Changchun	China	CGQ	ZYCC	43.996 200 56	125.684 997 6	706	8	4U	CGN	344	VIE	1 613	319 320
14 106	Belaya	Russia	\N	ULDA	71.6166 992 2	52.4782 981 9	272	\N	4U	CGN	344	VRN	1 550	319
14 107	Ulan Ude	Russia	\N	XIUW	51.849 998 47	107.737 999	1 670	\N	4U	CGN	344	WAW	679	CRJ
14 108	Novgorod	Russia	\N	ULLK	58.625	31.385 000 23	85	\N	A3	VIE	1 613	ATH	3 941	320
14 109	Copiapó	Chile	CPO	SCAT	-27.261 199 95	-70.779 197 69	670	\N	A3	VIE	1 613	HER	1 452	320
14 110	Melitopol	Ukraine	\N	UKDM	46.880 001	33.305	0	\N	AF	CGK	3 275	KUL	3 304	77W

(a) 原始数据的采集



(b) 原始数据的导入与编码



(c) 生成KML可视化图层

基于审图号为 GS(2024)0650 标准地图制作,底图无修改

图 3 基于 Google 地图的 KML 文件生成

对字段类型进行筛选分析,生成 KML 格式的可视化图层文件。再通过谷歌虚拟地球(Google Earth)可视化应用程序编程接口(application programming interface,API)在虚拟地球仪上对基于机场和全球历史航线数据生成的 KML 文件,进行初步的空间定位和可视化图像的显示。

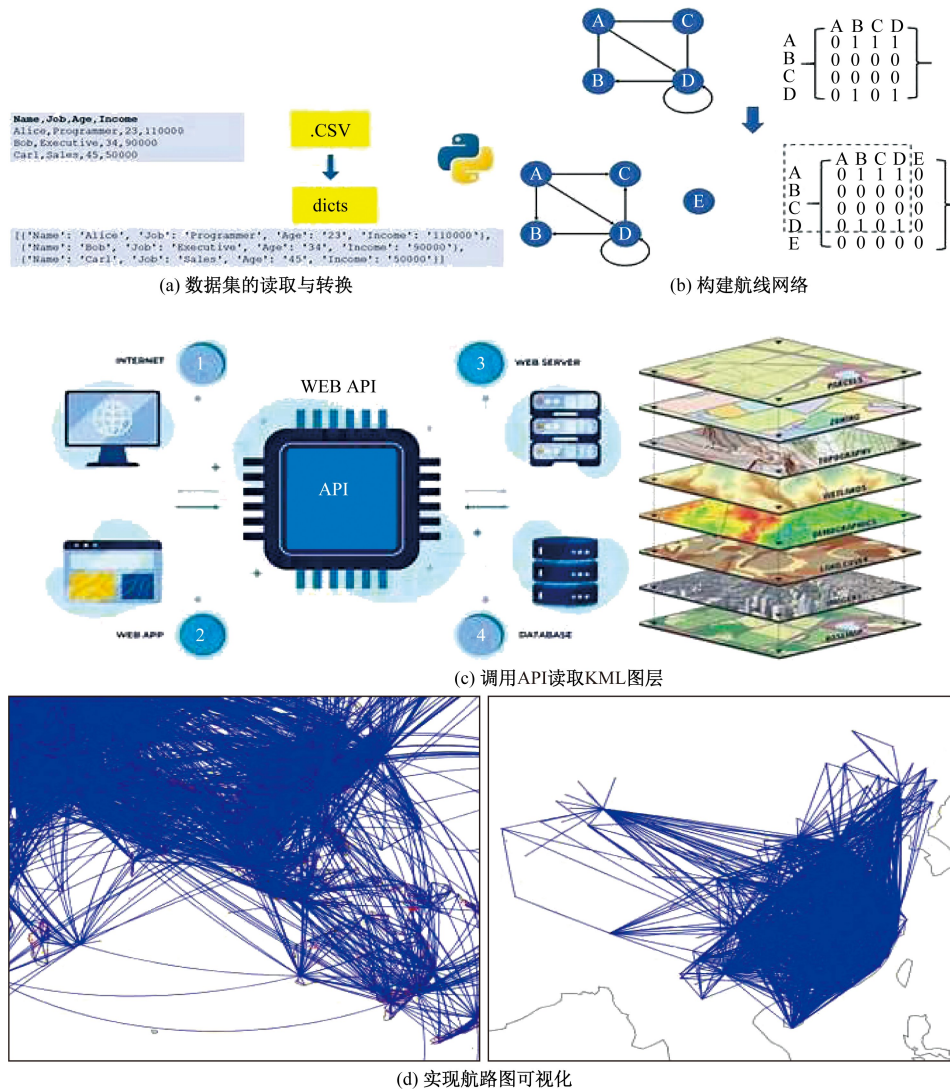
搭建基于 Python 的航线网络可视化平台,需要对航线数据集进行分析和处理,和对可视化图层的调用。为此构建 4 个功能模块,即主函数模块、数据读取模块、航线绘制模块以及航线可视化模块(图 4)。

图 4 展示了通过数据读取模块对编码后的全球航线及机场数据集进行读取和编译,从原来的 CSV 格式转换为基于 Python 的数据字典。再通过航线绘制模块基于图数据结构理论,数据遍历数据字典中的所有机场和邻居节点,构建航线网络图。其次,利用航线可视化模块,调用包含全球和指定国

家的航线网络 KML 文件。利用 Plotly 库中的“scattergeo”图表类型,绘制地理散点图和地理线图,通过经纬度坐标在地图上显示机场和航线。最后,主函数模块负责调用其余模块中的不同函数,并提供一个交互式的命令行界面。用户可以按需求选择特定的区域,生成不同数据大小的航线网络图及其对应的 KML 文件并通过 API 在 Google 地图中查看,以及查找并输出航线规划最短路径的可视化图像。用户可以通过点击或拖拽调整合适视角以便查看航线网络图中详细的航路航线及机场数据信息。

5 结论

(1)依据 CCAR-121 部对航空货运不定期航线规划的要求,基于组合优化理论,综合考虑机场和航路点的限制条件,建立数学规划模型,有利于对航线进行科学的规划,从而实现不定期航空货运航



基于审图号为 GS(2024)0650 标准地图制作,底图无修改

图 4 基于 Python 的航线网络可视化

线规划的优化目标和约束限制,确保航线规划的安全性和运营效益。

(2)引入改进 A* 算法对上述航线规划模型进行求解,利用历史航线数据实现航线智能规划;选取 2022 年全球航线数据和 14 110 个机场数据进行仿真实验,验证模型和算法可行性和优化效果,并与传统的贪心算法相比;长航线总航程缩短了 37.66%,能够更有效地减少中转节点和路径长度,更贴近于实际运行中的大圆航线,实现洲际航线规划的合理性和经济性;短航线总航程缩短 4.36%,有助于提高此类航线规划的效率和准确性。

(3)基于数据驱动的国际货运不定期航线规划方法,创建了完整的数据挖掘、清洗、坐标点转换及数据入库等处理步骤,实现对航线的可视化呈现,为航空公司提供直观的航线规划参考。利用 Python 平台构建的可视化程序,用户可以根据需求查看不同数据规模的航线网络图,包括全球历史航线图和具体国家或地区的航线图。

本文未考虑航路点的通告限制及不同机型的运输成本问题,未来将进一步深入研究不同机型容量和节点机场的需求量匹配的路径规划。

参考文献

- [1] 王姣娥,车恩瑜,肖凡. 中国航空货运时空格局演变与影响因素研究[J]. 热带地理, 2024, 44(5): 771-782.
- [2] 朱承元,晏楠欣,刘裕旭. 基于仿真优化的临时航线动态规划[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 60-64.
- [3] 李玉民,李腾,王知临,等. 基于外部转运式的货运空铁联运衔接方案设计[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7843-7850.
- [4] 朱学松,陈肯,陈洪浩,等. 基于灰靶理论的竞争航线货运机队规划研究[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(3): 22-27.
- [5] 章文俊,王昱,牟聪瑞,等. 考虑多风险因素的北极东北航道航线规划[J]. 大连海事大学学报, 2024, 50(2): 1-10.
- [6] 董翼宁,曹景胜,李刚. 融合 A-Star 与 DWA 双优化算法的自动引导车路径规划[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 12994-13001.
- [7] 吕成,崔濛,吴刚. 基于 Dijkstra 算法的极区船舶航线规划方法[J]. 船舶工程, 2022, 44(6): 10-19.
- [8] 谭海燕,张莉,韩仪洒,等. 基于改进 A* 算法的无人机航线规划[J]. 飞行力学, 2019, 37(5): 63-67.
- [9] 程洁,郑远,李诚龙,等. 面向城市超低空物流场景的最小风险路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 690-698.
- [10] 王伟懿,李晓勇. 全球船舶时空大数据处理与可视化研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(8): 97-103.
- [11] 叶锋,贾立校. 船舶历史航线数据可视化方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(17): 170-173.
- [12] 陈海蕊,开金宇. 大数据分析技术在历史航行路线可视化中的应用[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(24): 58-60.
- [13] 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2024(19): 9-124.
- [14] 张金奋,王志康,吴达,等. 考虑极地船舶航行风险的 A* 路径规划算法[J]. 中国航海, 2024, 47(2): 19-24.
- [15] 邢慧杰,张晓滨,张宏伟. APF 与 A* 融合的多目标点路径规划算法[J]. 计算机技术与发展, 2024, 34(8): 116-121.

Data-driven Optimization of Nonscheduled International Air Cargo Routes

CHEN Huaqun, HUANG Fangwei, YANG Weichao

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: In the context of intelligent civil aviation construction, considering the inefficiency and lack of systematization in traditional manual route planning, a mathematical model was established for route planning based on optimization theory, considering airport and route point restrictions. The traditional A* algorithm was improved through dynamic programming for intelligent route planning. Visual output of route planning and global historical route data was realized through data mining, cleaning, and coordinate point transformation. Using the Python simulation platform with 2022 global route data and 14,110 airports, the improved A* algorithm was compared with the classic greedy algorithm for long-haul and short-haul routes. The results show the improved A* algorithm reduces node count and route length, with a 37.66% reduction for long-haul routes and a 4.36% reduction for short-haul routes, enhancing planning efficiency and accuracy.

Keywords: data-driven; international air cargo; nonscheduled route planning; improved A* algorithm; route visualization