

改进型空中交通流量预测算法的验证与实现

陈 恺¹, 曾培彬², 蔡 浩³

(1. 中国民用航空中南地区空中交通管理局 广西分局, 南宁 530000;

(2. 中国民用航空汕头空中交通管理站, 广东 汕头 515000;

3. 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515000)

摘要: 为了提升管制现场运行数据挖掘效率, 改善现有空管流量预测系统存在系统结构与算法设计复杂性, 提出一种基于空中交通管制自动化系统综合航迹数据和基础飞行数据交换报文处理的, 能够实时修正航空器航迹 4D 剖面预测模型的流量预测算法; 主要通过计划航迹和雷达航迹匹配关联算法模型以及利用航向角平面投影匹配算法提高流量预测的精确性; 通过与当前主流的优秀算法对比和验证, 方法能够全面、真实反映目标航迹当时运动态势和管制区域流量预测信息, 工程实现较为简洁, 具有一定的工程实践意义。

关键词: 空管; 综合航迹; 计划; 流量预测; 4D 航迹

Verification and Implementation of Improved Air Traffic Flow Prediction Method

Chen Kai¹, Zeng Peibin², Cai Hao³

(1. Guangxi Sub-bureau of Central South Air Traffic Management Bureau of CAAC, Nanning 530000, China;

2. Shantou Air Traffic Management Station of CAAC, Shantou 515000, China;

3. Department of Engineering, Institute of Technology, Shantou University, Shantou 515000, China)

Abstract: In order to improve inefficient data mining and Air Traffic Flow Prediction system with complicated system structure at present. An aircraft track 4D trajectory prediction model based on integrated track data and basic flight data exchange message processing based on air traffic control automation system is proposed, which can be corrected in real time. The design of the system mainly includes the model of correlation algorithm of planned track and radar track matching and the algorithm of course angle plane projection matching. The results show that the system integrates multiple functions such as real-time display of radar targets, real-time statistics of control sector flow, and sector delivery information of target flights. It can more comprehensively and truly feedback the current movement situation of target tracks and sector flow prediction information.

Keywords: air traffic management; track data; flight plan; traffic forecasting; 4D trajectory

0 引言

流量预测为空中交通管制员(以下简称管制员)提供航路容量、航路降落次序等信息并提供分配建议航路时隙, 给出合理的航班流量管控决策, 实现航班流量的有序管理和优化空域效能, 是当前空中交通管制(以下简称空管)研究的热点。

当前较为常见的方法有利用同一航班有规律的历史轨迹进行四维飞行航迹预测实现预测^[1]、运用混合估算对航空器飞行状态和模型进行估计进行预测设计^[2]、研究随机线性混合系统预测航空器飞行状态的改变导致的 4D 航迹剖面改变^[3-4]进行预测设计、研究高斯混合模型并对航班相邻时刻位置偏移量建模, 利用机器学习算法优化预测模型^[5]

等。这些研究为航迹预测开拓了新的算法思路, 然而空管是动态变化较大、实时性要求较高的工作, 要求模型具有良好的鲁棒性和预测的准确性, 符合现场运行状态的预测模型通常是需多次验证的复杂模型, 复杂程度比上述文献提出的理论研究更加复杂。与此同时, 在实际现场运行中复杂算法可能会对空管流量预测系统的运行带来较大的开销, 降低系统稳定性, 这对于空管工作而言是不可接受的。利用 DTW 算法匹配模型^[6]和元胞传输预测模型^[7]相对于上述模型复杂程度要低, 在空管流量预测系统具有更为实际的应用价值。

实际上, 空管行业规范近年已逐步规范相关监视信息处理, 信息源比以往更加丰富多样, 这些可以为流量预测提供较好的应用资源, 节省流量预测系统开发的时间和成本。基于空管现场实际运行需求, 本文设计了一种利用实时的空中交通管制自动化系统(以下简称空管自动化系统)综合航迹数据和飞行计划数据, 建立 4D 航迹剖面模型, 并能根据航空器运行态势实时修正预测航迹, 实现区域航班流量精确预测的方法。

收稿日期: 2020-05-12; 修回日期: 2020-05-26。

基金项目: 中国民用航空中南地区空中交通管理局广西分局 2019 年科研项目(GXKG2019001)。

作者简介: 陈 恺(1986-), 男, 广西梧州人, 硕士, 工程师, 主要从事空管自动化系统理论与应用方向的研究。

1 空管数据源及关键技术研究

1.1 系统应用的空管数据源

综合航迹数据是空管自动化系统多种监视源（雷达、ADS-B 等）综合处理产生的系统航迹与飞行计划数据融合航迹信息，包含目标航迹的 WGS-84 坐标、高度、速度、航向角和 24 位地址码等，通过解析目标的综合航迹数据，流量系统可实时获取航空器的运动态势。

与此同时，空管自动化系统设计规范指出^[8]，空管自动化系统应可通过网络或串口形式的方式输出给予其他系统。这为本设计提供了较好的基础，直接采用空管自动化系统综合航迹进行开发，航迹更新周期在合理范围可进行调节，航迹更新速度快，完全满足流量系统开发所要求的高时效性和稳定性，同时也提高了开发效率。

MH4029.3 是民用航空空中交通管制自动化系统第 3 部分：飞行数据交换规范^[9]。其指出基础飞行数据交换报文（以下简称：IFPL），用于空管自动化系统及相关系统间基础飞行数据交换，其主要包含航班号、起降机场、航班起降时间、航路等信息。流量系统可通过 IFPL 报获取航迹的计划信息，建立计划航迹剖面模型，当计划信息变更时，重新修正计划航迹剖面，使计划航迹具备良好的计划迭代性。

1.2 改进型 4D 航迹预测算法

在航空器实际飞行过程中，特别是在雷雨绕飞情况下，航空器会偏离航路飞行，因此，要对偏航航空器的 4D 预测航迹进行修正，此处提出计划航迹和雷达航迹偏离的自动相关算法：

设航迹 T 为目标航迹， F_T^A 、 F_T^B 、 F_T^C 、 F_T^D 为航迹 T 所对应计划航迹 F_T^i 的第 i 条航段 ($i=1, 2, 3, \dots, N$)； α 和 β 分别是航迹 T 相对当前航段 F_T^B 的偏航角和偏离角； d 为航迹 T 距离航段 F_T^B 的垂直距离； d' 为 F_T^B 的航路宽度。假设 $t_{(B,C)}^{1 \sim C}$ 为航段 F_T^B 所有航路固定点预计过点时间所形成的集合；计划航迹 F_T^i 依次经过 A、B、C、D、E 点的时间依次为 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 、 t_E ，监视设备检测到航迹 T 的当前时间为 t_T ，如图 1 所示。

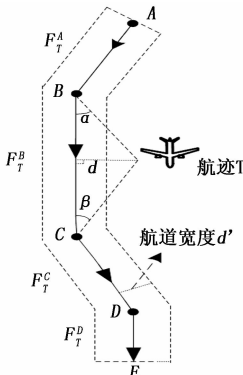


图 1 航迹飞行图

假设当前时间 t_T 属于 $t_{(B,C)}^{1 \sim C}$ 集合，即 $t_T \in t_{(B,C)}^{1 \sim C}$ ，由于航空器在实际飞行中相对于航段存在时间误差和空间误差^[13]，

因此，计划航迹和雷达航迹进行相关匹配时，允许雷达航迹在 $[F_T^B - \varphi, F_T^B + \omega]$ 航段范围内进行匹配，其中 φ 和 ω 的数值取决于计划航迹的预测精度。

此外，计划航迹和雷达航迹相关一般考虑以下匹配因子：航迹 T 到达最近一个航路点的时间 τ_i ，航向角 α_i ，偏离角 β_i ，与航段的距离 λ_i 。

$$1) \text{ 若 } t_T \in t_{(B,C)}^{1 \sim C}, \text{ 则 } \tau_i = \begin{cases} 1, & i \in [i - \phi, i + \omega] \\ 0, & \text{其它} \end{cases};$$

$$2) \alpha_i \text{ 和 } \beta_i \text{ 表示航迹 } T \text{ 相对当前航段的计划航迹的方位角, 令 } \alpha_i = \begin{cases} 1, & \alpha < 90^\circ \\ 0, & \alpha \geq 90^\circ \end{cases}, \beta_i = \begin{cases} 1, & \beta < 90^\circ \\ 0, & \beta \geq 90^\circ \end{cases};$$

3) 航迹 T 与航段的最短垂直距离表示该航迹基本沿该航段飞行，不产生偏航，即航迹 T 近似等于计划航迹 F_T^i 。若 $\lambda_{\min} = \min(d_{i-\varphi} \dots d_i \dots d_{i+\omega})$ ，当 $d_i = d_{\min}$ 时，令 $\lambda_{\min} = 1$ ，其它 $\lambda_{\min} = 0$ 。

由式 (1) ~ (3) 可得 i 时刻计划航迹 F_T^i 与航迹 T 相关因子公式为： $\rho_i = \tau_i \alpha_i \beta_i \lambda_i$ ，因此，可推算出航空器的飞行状态模型： $S = \sum_{i=1}^n \tau_i \alpha_i \beta_i \lambda_i$ 。当 $S = 0$ 时，说明该航空器不在该航段范围飞行；当 $S = 1$ 时，则说明该航空器在该航段飞行。

设航路宽度为 20 km，当 $d < 10$ km 时，认为该航空器是沿着当前航段飞行，经过某一航路点后，以当前航路点过点时间为基准，利用等角航迹预测算法^[14]进行后续航路过点时间的推算，更新 4D 剖面航路。当 $d \geq 10$ km 时，表示该航空仍在航段范围内，但属于偏航飞行，则需将航迹 T 当前航向角与后续航段的航向角进行比较，以最小角度差值作为航迹 T 的最终预测位置点，并以航迹 T 当前时间、速度和高度等信息来推算到达目的位置的时间，更新后续航路的过点时间，从而更新 4D 剖面模型。

1.3 改进型流量统计算法

实时飞行流量计算是流量管理系统一个重要组成部分。计算管制空域内的流量关键在于判断航空器所处的空域。因此，可以将空域投影在平面进行分析，进而转化成平面的点空域、线空域、面空域。

1.3.1 改进型点空域统计

点空域流量主要包含航路的固定点、导航点、边界点的流量，传统的判断方法是以该导航点坐标为圆心、某一经验值参数为半径的圆设定过点判断范围，当航空器的平面投影进入判断范围，则判定该航空器为某航路导航点的流量目标，如图 2 所示。这种方式能够简单处理正常飞行的航空器过点判断，然而，航空器在实际飞行过程中，在航路导航点附近可能存在偏航情况（特别是雷雨季节或军航活动较频繁的区域），利用这种方式的计算容易出现误判，计算过点时间也有较大的误差。因此，此处引入一种改进型点空域飞行流量统计模型，如图 3 所示。A、B、C 分别为航路上 3 个航路固定点，线段 BD 为航路点 B 的角平分线，即 $\angle \alpha = \angle \beta$ 。航空器与角平分线相交于角 P，角度

为 $\varphi, \angle\alpha, \angle\beta, \angle\varphi$ 均是相对于正北方向的角度值。已知 A、B、C 的 WGS-84 系坐标经纬度, 通过高斯投影^[15]算法将其转换成平面直角坐标系, 得到 A、B、C 点坐标分别为 $P_A(X_A, Y_A), P_B(X_B, Y_B), P_C(X_C, Y_C)$ 。

$$|P_{AB}| = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2},$$

$$|P_{BC}| = \sqrt{(X_B - X_C)^2 + (Y_B - Y_C)^2},$$

$$|P_{CA}| = \sqrt{(X_C - X_A)^2 + (Y_C - Y_A)^2}$$

利用余弦定理推算出:

$$\angle\alpha = \angle\beta = (\arccos \frac{|P_{AB}|^2 + |P_{BC}|^2 - |P_{CA}|^2}{2 |P_{AB}| |P_{BC}|})/2。$$

航迹与角平分线相交的 $\angle\varphi$ 小于或等于 $\angle\alpha$ 时, 说明航空器往导航点汇聚, 系统判定该航空器为导航点 B 的实时流量。

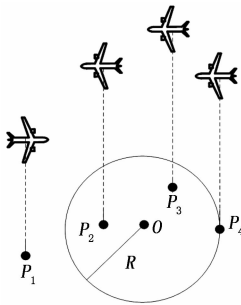


图 2 常规点空域实时飞行流量计算模型

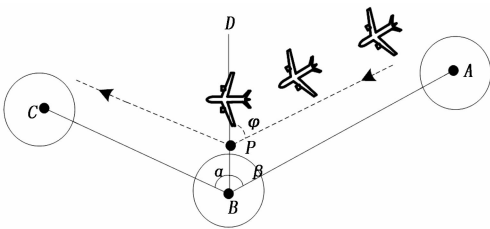


图 3 改进型点空域实时飞行流量计算模型

1.3.2 改进型线空域统计算法

航空器 A、B、C、D 分别位于不同高度层, 其平面投影依次为 a、b、c、d、e 和 f 是航路上的导航点, r 是航路宽度。传统的航路流量计算方法主要通过获取航空器的平面投影位置进行流量计算。如图 4 所示, a、b、c 在航路范围内, d 不在航路范围内, 说明此时航路流量为 3 架次。但此方法无法满足常见的航空器偏离航路后再回到航路飞行的情况。因此, 此处提出一种利用航向角来判断航空器运动趋势, 实现航路流量实时计算的方法。

假设四边形 $A_1A_2B_2B_1$ 是 AB 段航路, A 和 B 是导航点, 航路宽度为 20 km, B_1 和 B_2 是 B 的对称点, 长度为 10 km。 $\angle BAC$ 是航空器沿航路由 A 飞行至 B 相对正北方向的航向角, $\angle B_1AC$ 和 $\angle B_2AC$ 是航空器在航路宽度范围内, 左右偏离航路到达 B 点相对正北方向的最大航向角, 如图 5 所示。因此, 判断航空器平面投影是否在有效航路范围内, 可以通过雷达数据实时获取航空器航向角。若采集的航向角 $\angle\beta$ 满足 $\angle B_1AC \leq \angle\beta \leq \angle B_2AC$, 则可判断航空器沿航

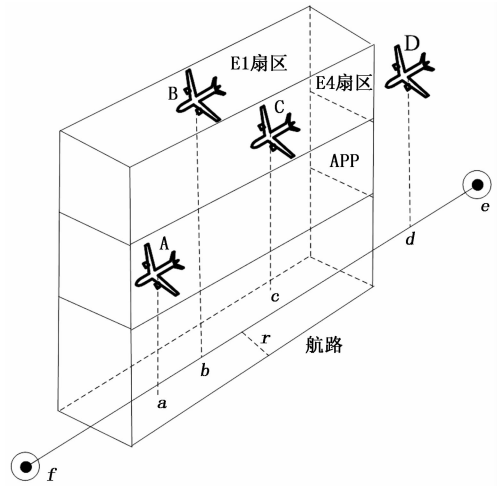


图 4 常规线空域实时飞行流量计算模型

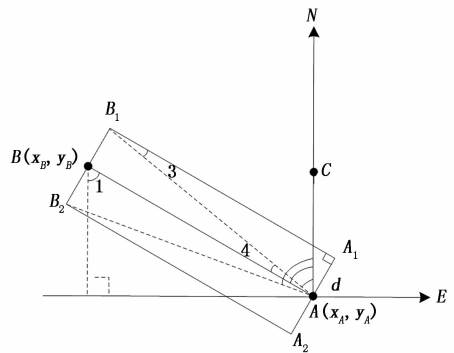


图 5 改进型线空域实时飞行流量计算模型

路飞行, 并将其归纳为该航路的实时流量队列。算法步骤如下:

由上述可知, A 和 B 点的平面坐标可通过高斯投影计算, 则:

$$\angle 1 = \arctan \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A} \quad (1)$$

$$\angle BAC = \angle 1 \quad (2)$$

$$|A_1B_1| = |AB| = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \quad (3)$$

$$\angle 4 = \angle 3 = \arctan \frac{10}{|A_1B_1|} \quad (4)$$

$\angle B_1AB_2$ 为等腰三角形, 因此, $\angle B_2AC = \angle BAC + \angle 4$; $\angle B_1AC = \angle BAC - \angle 4$; 本设计通过引接空管自动化系统的综合航迹和 MH4029.3 飞行计划信息, 便可使用简单的算法实现航路实时流量计算。假设多架航空器由导航点 e 进入航路, 先通过综合航迹直接获取航空器的当前航向角矢量, 所获取的航向角与系统离线自定义的 OBA 表 (存放所有航路导航点之间的最大和最小航向偏移角) 进行比较, 并以此判断航空器的运动趋势; 另一方面, 系统可以通过空管自动化系统的 IFPL 报文中的扇区字段 sector 获取航空器当前管制扇区。实际运行中, 系统将对满足条件的航空器出现频度进行统计, 当出现次数大于系统设置参数时, 目标航空器的呼号、扇区等信息将存入系统设置的航路流量 HashMap^[16] 表,

进入航路的实时流量统计队列。当已进入队列的航空器航向角或扇区管制权限发生变更时，系统不再对该航空器进行航路流量统计，算法流程如图 6 所示。

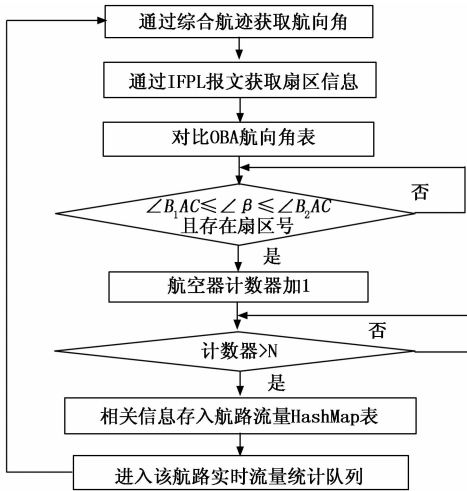


图 6 航路飞行流量计算流程图

面空域流量计算可以等效为具备管制扇区的航空器就直接列入该空域的流量统计队列，系统则可以直接利用 IF-PL 报中的 sector 字段对航空器进行扇区归类统计。

2 算法的验证与实现

文献 [6] 提出通过分析雷达数据及交通流特性，将扇区交通流按一定原则划分成 5 种标准模式，然后利用 DTW 算法对选取测试序列进行模式匹配，最后统计该模式下扇区最大流量，求出扇区的运行容量。对于某管制扇区短时间内航班预测流量过大时，管制员会根据空域情况实时调整航空器的航路或高度。在这种情况下，均会触发自动化系统重新对该航空器 4D 剖面计算模型修正，根据 4D 轨迹和管制区、扇区的物理关系，更新管制区内扇区之间交接点和每个航路报告点的所属扇区。因此，随着航空器改航频率越高，交通流模式聚类匹配相似度越低，在一定程度上影响了扇区容量计算的精度。

采用 2020 年 1 月 20 日南宁 (ZGNN) 区域雷达记录数据及飞行计划数据，数据包含同一时间段各管制扇区的流量信息，研究本文流量统计算法与 DTW 统计算法在特定空域条件下扇区流量变化情况，得到扇区与航空器飞行高度关系实测流量散点如图 7 所示。

其中，E1, E2, E3 为南宁空域低扇，E4, E5, E6 分别对应 E1, E2, E3 的高扇。由图 7 可知，本文所研究的统计算法得到 E1 扇区接管航班的密度大于 E4 扇区，是由于相邻广州管制区限制飞行高度，导致以往由 E4 扇移交广州的航班大部分转移至 E1 扇区接管，并按指定高度对外移交；由于 DTW 统计算法仍根据历史序列进行模式匹配，得到 E4 扇区接管航班的流量密度较大，与实际运行情况有所差异。对于其它扇区，由于没有出现外管制区限高飞行或雷雨绕飞等情况，利用本算法和 DTW 统计算法得到的航空

器流量密度值基本保持一致性。

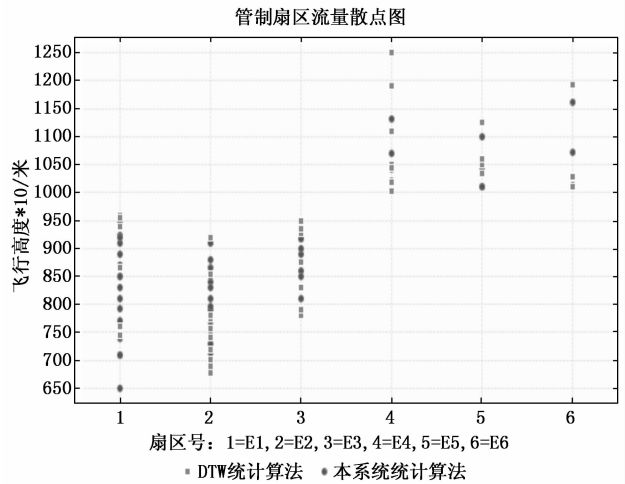


图 7 特定空域下两种统计算法流量对比图

采用某天南宁终端区空域航班较为正常的实际数据进行流量预测实验，如图 8 所示。基于元胞传输的预测模型 [7] 也能较好描述了正常时间段内航班流量预测波动趋势，预测结果稍比本算法粗略，误差波动大于基于偏航修正的 4D 航迹预测模型。而在具体工程实践上，该算法的元胞划分需要根据空域具体情况进行，机场的终端区特别是低纬度机场终端区的夏季天气变化较大 (如南宁机场)，不可预测情况较多，航空器需要采用多种管制策略，对于元胞传输预测而言算法实现困难。如若需要进行工程设计，该算法需要机器学习，针对不同环境进行参数的快速自我设置，算法实现复杂度较高。

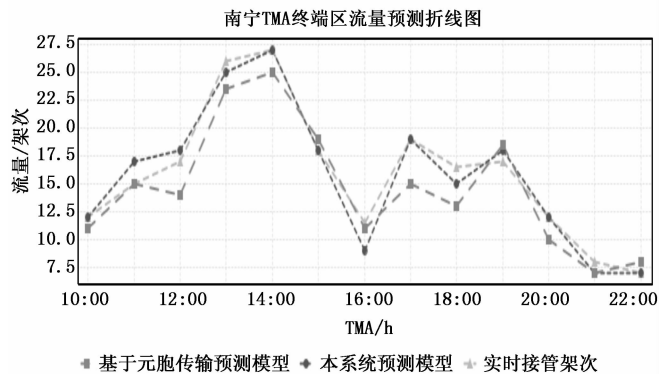


图 8 两种预测方法与实际流量对比图

在实现方法上利用 C/S 架构，设计了一种基于 JAVA 的改进型流量预测系统 (如图 9 所示)，具备了动态态势界面、4D 航迹剖面建立、流量预测与统计、流量告警和算法预测对比等功能。图 10 是某一天南宁空域在雷雨天气下 E1 管制扇区实时流量预测图，为方便分析，此处统计 04:00 至 18:00 共 16 个时刻的流量预测和实际接管架次。与此同时，系统绘制了基于传统的工程实现方式 (飞行计划 FPL 对流量进行预测)、雷达航迹修正预测、4D 航

迹预测以及系统预测的折线图。从图中可知, 统计的 16 个时刻中, 飞行计划 FPL 进行预测只有 2 个时刻点与实际接管架次数一致, 这也说明空管工作具有较强的实时动态性, 提前 120 小时内的飞行计划^[10]并无法完全实现流量预测的精准。

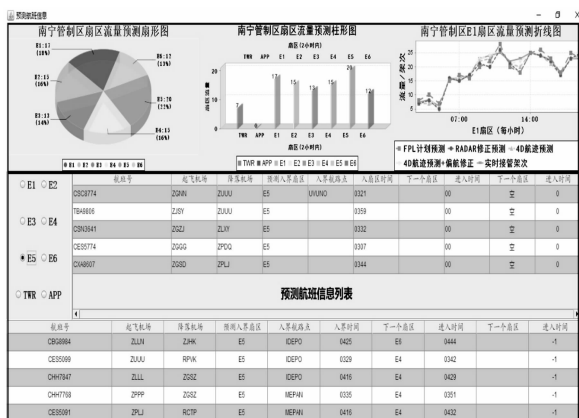


图 9 南宁流量预测系统

迹预测方法更能真实接近实际扇区接管航班的架次数量。通过系统实际运行所采集的数据表明, 在复杂天气情况下, 基于偏航修正的 4D 航迹预测, 更能有效、准确地预测航路、扇区交通流量。

由图 11 可知, 航迹平面投影法和运用航向角投影法所统计的航班流量与实际航路交通流量基本一致, 但运用航向角投影法只需通过获取航迹综合航迹的航向角, 与离线系统离线定义 OBA 表比较, 算法具备实时性和高效性, 能减少系统开销。

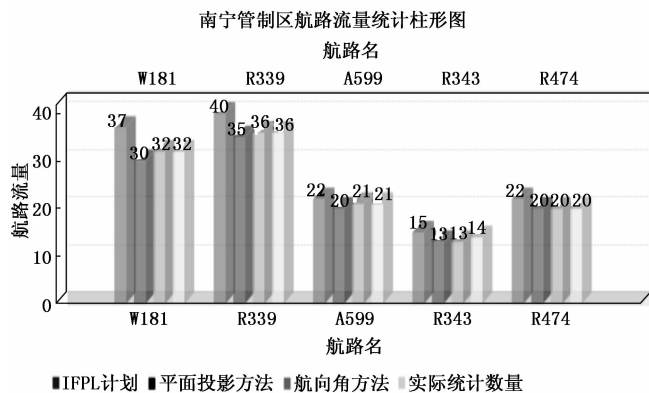


图 11 管制区域重要航路流量统计图

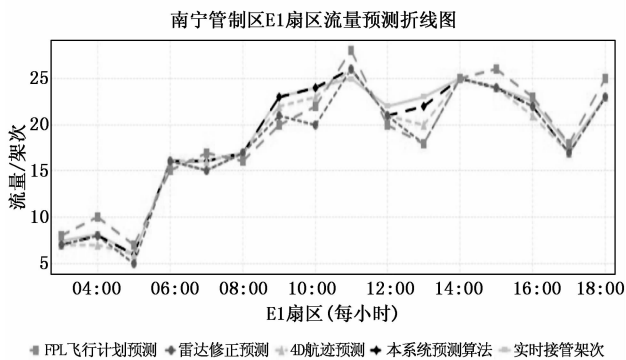


图 10 不同预测算法对同一扇区实时流量预测图

在凌晨 05:00, 接管架次是统计所有时刻中架次最少的时刻, 4D 航迹预测和系统预测能较好匹配实际接管架次, 其他预测方法也较为接近实际接管架次, 这是因为扇区区域内航空器架次少, 空管的可控余量较大, 管制员对区域内的航空器的人为干预会更少, 飞行复杂度降低, FPL 计划预测、雷达修正和 4D 航迹预测算法能够简单满足预测。此种情况下, 系统改进的预测算法将更加贴近实际, 预测结果架次与实际接管架次一致。在 13:00 时刻, 南宁空管现场该扇区区域出现午后大面积雷雨, 不少航空器需要进行绕飞, 从图中可以看出, 所有预测算法预测的架次都与实际接管的架次有一定的差异, 但系统改进算法在实现中表现出最优的效果, 误差率仅为 4.3%, 其他方法预测误差率皆大于 10%。随着统计航班量的增加, 系统预测算法预测的误差将会进一步的下降。

从总体走势可以看出, 系统设计的预测算法绘制的折线总体较其他算法预测折线更加贴近实际接管架次折线, 采用本文的改进型 4D 航迹预测 (偏航修正) 比常规 4D 航

3 结束语

目前, 系统已经在民航广西空管分局空中交通管制现场投入使用, 用户体验较好。可以得出以下结论:

- 1) 该融合空管自动化系统综合航迹和 IFPL 计划信息的 4D 航迹剖面预测模型, 结合基于偏航修正的 4D 航迹预测算法和改进型流量统计算法, 能有效改善航迹预测和统计的误差, 实现高精度的 4D 航迹预测和流量统计。
- 2) 空中交通流量预测是一个数据变化实时性较强的处理过程, 需要针对现场实际运行进行大数据挖掘以提高相关算法和系统的运行的准确度。后续研究将利用二进制气象网格数据 (GRIB) 和其它航路气象信息融合做进一步的数据挖掘, 并综合考虑管制意图等因素, 建立更为完善的 4D 航迹模型, 进一步提高航迹预测精度。

参考文献:

[1] 吴 鹏, 潘 薇. 基于数据挖掘的三维飞行航迹预测 [J]. 计算机应用, 2007, 27 (11): 2637-2639.

[2] Hwang I, Hwang J, Tomlin C. Flight-mode based aircraft conflict detection using a residual-mean interacting multiple model algorithm [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. Austin, Texas; 2003.

[3] Liu W Y, Hwang I. Probabilistic trajectory prediction and conflict detection for air traffic control [J]. Journal of Guidance, Control, Dynamics, 2011, 34 (6): 113-118.

[4] 汤新民, 韩云祥, 韩松臣. 基于混杂系统模型的航空器 4D 航迹推测 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (1): 105-112.

- [5] 林毅, 张建伟, 武喜萍, 等. 基于 GMM 的航班轨迹预测算法研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50 (4): 104-109.
- [6] 王红勇, 刘文, 赵巍飞. 一种基于交通流模式的扇区运行容量计算方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14 (6): 188-193.
- [7] 张洪海, 许炎, 张哲铭, 等. 终端区空中交通流参数模型与仿真 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14 (6): 58-64.
- [8] 中华人民共和国民用航空行业标准. 民用航空空中交通管制自动化系统第 2 部分: 技术要求: MH-T_4029. 2 12-15 [S]. 北京: 中国民航局, 2012.
- [9] 中华人民共和国民用航空行业标准. 民用航空空中交通管制自动化系统第 3 部分: 飞行数据交换: MH-T_4029. 3: 17-20 [S]. 北京: 中国民航局, 2015.
- [10] 王超, 郭九霞, 沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测 (上接第 232 页)
- [12] Cui Z, Gu X S. An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid flow shop problems [J]. Neurocomputing, 2015, 148: 248-259.
- [13] Sun C, Zhou X, Wang M. A Multi-strategy Artificial Bee Colony Algorithm with Neighborhood Search [M]. Advances in Swarm Intelligence, 2019, 7: 310-319.
- [14] Sharma N, Sharma H, Sharma A. Beer froth artificial bee colony algorithm for job-shop scheduling problem [J]. Applied Soft Computing, 2018, 68: 507-524.
- [15] 杨智飞, 苏春, 胡祥涛, 等. 面向智能生产车间的多 AGV 系统多目标调度优化 [J]. 东南大学学报, 2019, 46 (6): 1033-1040.
- [16] Oguz C, Salman S. Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 125 (1): 80-87.
- [17] 张贵军, 丁情, 王柳静, 等. 柔性车间生产排产调度优化方法 [J]. 计算机科学, 2018, 45 (2): 270-275.
- [18] 姜康, 咸凯, 郝宇. 基于订单拆分生产的 MTO 企业生产调度及算法研究 [J]. 制造技术与机床, 2018, 29 (3): 143-148.
- [19] 刘业峰, 潘全科, 柴天佑. 改进遗传算法在磁性材料组炉优化问题中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31 (9): 1221-1231.
- [20] 刘业峰, 柴天佑. 钎铁硼企业生产工单组炉的最佳优先和变邻域搜索算法 [J]. 化工学报, 2018, 69 (3): 1207-1214.
- [21] 周伟恒. 基于遗传算法的机械设备故障检测机器人设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 53-57.
- [22] 李晓辉, 刁林倩, 张秀. 不同支配关系的多目标算法的柔性作业调度 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 158-164.
- [23] Pan W T. A new fruit fly optimization Algorithm: taking the financial distress model as an example [J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26 (2): 69-74.
- [24] 王凌, 郑晓龙. 果蝇优化算法研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34 (5): 557-563.
- 方法 [J]. 西南交通大学报, 2009, 44 (2): 295-300.
- [11] 中华人民共和国民用航空行业标准. 中国民航 AIDC 应用指导手册: 4-61 [S]. 北京: 中国民航局, 2006.
- [12] 中华人民共和国民用航空行业标准. 民用航空飞行动态固定电报格式: MH-T 4007. 2012: 28-29 [S]. 北京: 中国民航局, 2012.
- [13] 张余, 葛飞. 基于航迹数据的飞行状态识别方法研究 [J]. 航空计算技术, 2017, 47 (6): 45-46.
- [14] 邢健. 基于高精度 4D 航迹预测的空中交通诱导技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [15] 高斯 C F. 算术探究英文版 [M]. 北京: 世界图书出版公司, 2016.
- [16] 李刚. 疯狂 Java 讲义 [M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [25] Zhang P, Wang L. An improved fruit fly optimization algorithm for solving lot-streaming flow-shop scheduling problem [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2014, 31 (2): 165-170.
- [26] Zhang P, Wang L, Wang S Y. A discrete fruit fly optimization algorithm for flow shop scheduling problem with intermingling equal sublots [A]. Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference [C]. Nanjing: IEEE, 2014: 7466-7471.
- [27] 黄思宇, 何通能. 雾计算平台的任务调度算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 247-251.
- [28] Babalik A, et al. An improvement in fruit fly optimization algorithm by using sign parameters [J]. Soft Computing, 2017, 22 (2): 1-17.
- [29] 闫俊涛, 吴自然, 陈宪帅, 等. 小型断路器柔性装配中视觉识别系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 192-198.
- [30] Lv S X, Zeng Y R, Wang L. An effective fruit fly optimization algorithm with hybrid information exchange and its applications [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2018, 9 (10): 1623-1648.
- [31] Li J Q, Pan Q K, Mao K, et al. Solving the steelmaking casting problem using an effective fruit fly optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 72 (5): 28-36.
- [32] Ma Q, He Y, Zhou F. Multi-objective fruit fly optimization algorithm for test point selection [A]. IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) [C]. Xi'an, IEEE, 2016: 272-276.
- [33] 闫秀英, 郭普静, 范凯兴. 基于 ABC-SA 混合算法的群控电梯优化调度 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 107-111.
- [34] 杜利珍, 王震, 柯善富, 等. 混合流水车间调度问题的果蝇优化算法求解 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (12): 1480-1485.
- [35] 王浩, 张凤. CAN 总线中改进的 EDF 调度算法可调度性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 238-241.