

基于四阶段法的管制区飞行流量预测

马 兰¹,任静静^{1,2}

(1. 中国民航大学空中交通管理学院,天津 300300; 2. 陕西中宇航空科技有限公司,西安 710000)

摘要:为解决各空中交通管理局独立预测管制区飞行流量而导致的航线流量分布不匹配、空域资源分配不公平问题,本文根据四阶段法预测理论,研究了管制区飞行流量及其内部航线流量分布的预测方法。利用灰色预测模型对管制区内航班源机场的航班起降架次进行预测;建立双约束重力模型求解各机场所属 OD(origin-destination)小区之间的飞行流量分布;运用多项 Logit 模型进行 OD 小区之间航线流量分布的预测,叠加航线流量分布可得到管制区飞行流量的预测结果。以西安区域管制区为例对该方法进行验证,结果表明:该方法在保证航线流量分布相匹配的前提下能有效实现管制区飞行流量的预测,可为全国层面航线流量分布和管制区飞行流量的统一预测提供参考。

关键词:空中交通管理;飞行流量预测;四阶段法;管制区;航线

中图分类号:V355

文献标志码:A

文章编号:1674-5590(2025)06-0031-07

Air traffic flow forecast in the control area based on the four-stage method

MA Lan¹, REN Jingjing^{1,2}

(1. College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Shaanxi Zhongyu Aviation Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to solve the problem of the mismatch of traffic flow distribution across airways and the unfair allocation of airspace resources resulting from independent air traffic flow forecasts conducted by individual air traffic control bureaus, this study proposes a forecasting method based on the four-stage prediction theory for estimating both overall air traffic flow in the control area and the traffic flow distribution across its internal airways. The grey prediction model was employed to forecast the number of flights from source airports within the control area. A double-constrained gravity model was established to estimate the distributed air traffic flow between origin-destination (OD) pairs associated with these airports. The multinomial Logit model was then applied to predict the traffic flow distribution across airways between the OD pairs, and the forecasted air traffic flow for the control area was obtained by aggregating these distributed flows. The method was validated using the Xi'an Regional Control Area as a case study. The results show that this method can effectively realize the air traffic flow forecast within the control area while ensuring consistency in the traffic flow distribution across airways. It can serve as a reference for the unified forecast of both traffic flow distribution across airways and control area air traffic flow at the national level.

Key words: air traffic management; air traffic flow forecast; four-stage method; control area; airway

管制区飞行流量预测是空域扇区规划、人员配备、空管设施规划等的重要基础。通过对未来年流量的科学预测,空管人员能够清晰掌握空域运行态势,为空中交通管理部门提供决策支持^[1],从而提升航班飞行安全水平和运行效率。

常用的管制区飞行流量预测方法有时间序列法、回归分析法、神经网络、深度学习及组合预测法等。Weinreich 等^[2]将时间序列法与神经网络应用于空域飞

行流量预测;刘玉梅^[3]研究了最小二乘格式模型及其在飞行流量预测方面的应用;王洪芳等^[4]采用综合干预分析模型和计量经济法对进近管制区的飞行流量进行了预测;杨阳等^[5]利用最大李雅普诺夫指数进行混沌时间序列预测,并应用于空域扇区飞行流量预测;西北管制区飞行流量预测项目中使用了多种定性、定量组合预测方法^[6];宋维凯等^[7]将深度学习应用到空中交通流量预测。上述文献考虑飞行流量历史态势及

其非线性特征等,从管制区飞行总流量角度进行研究,取得了较好的流量预测效果,但未细化管制区内航路、航线交通流的空间分布特征,因而无法得到管制区内航线流量分布情况。

在同时考虑管制区飞行流量和管制区内航路、航线流量分布预测方面:张明等^[8]基于四阶段法,组合双约束重力模型与人工神经网络对空域飞行流量进行预测,但其划分子空域流量预测未考虑航班源机场的流量分布情况;张慧等^[9]基于四阶段法,采用灰色模型和双约束重力模型预测终端区飞行流量,但未考虑进离场航线的流量分布预测。

不同地区空中交通管理局(简称空管局)采用上述方法对管制区飞行流量进行独立预测,客观上存在途经不同管制区的同一航线流量分布预测不一致、相互不匹配问题;各地区空管局流量预测考虑自身利益,造成本地管制区飞行流量预测值或大或小。以此为基础的空中交通流量管理不合理,空域扇区规划结果不准确,从而造成全国空域资源分配的浪费和不公平现象。

针对上述问题,本文借鉴四阶段法预测理论与原理^[10],提出了适合航线流量分布及其所属管制区飞行流量的预测方法,为全国层面管制区飞行流量科学、统一预测提供参考。

1 管制区飞行流量预测四阶段法

根据管制区航班源机场分布及历史流量特征,把全国分为不同的 OD(origin-destination)小区。OD 小区一般为机场所在城市,基于 OD 小区进行四阶段法的预测。预测原理平面示意图如图 1 所示。

图 1 中,假设管制区 2 为目标管制区,航线 1 经过属于不同地区空管局的管制区 1、2 和 3。若采用不同方法独立预测各管制区飞行流量,统计得到的航线 1 的飞行流量是不一致且相互不匹配的。因此,本文采用四阶段法,首先对目标管制区进行 OD 小区划分,对 OD 小区中各机场的航班起降架次进行预测,再根据机场航班起降架次预测 OD 小区之间的飞行流量分布,最后进行 OD 小区之间航线流量分布的预测^[11],将航线流量分布求总和得到管制区飞行流量的预测结果。具体预测步骤如下:

(1) OD 小区划分;

(2) 飞行流量生成预测,采用灰色预测模型预测 OD 小区中各机场的航班起降架次;

(3) 飞行流量分布预测,根据 OD 小区间的飞行阻抗因素,建立双约束重力模型,测算 OD 小区之间的飞行流量分布;

(4) 航线流量分布和管制区飞行流量预测,针对 OD 小区之间的航线分布情况,运用多项 Logit 模型,确定航线流量分布,叠加航线流量分布可得到管制区飞行流量的预测结果。

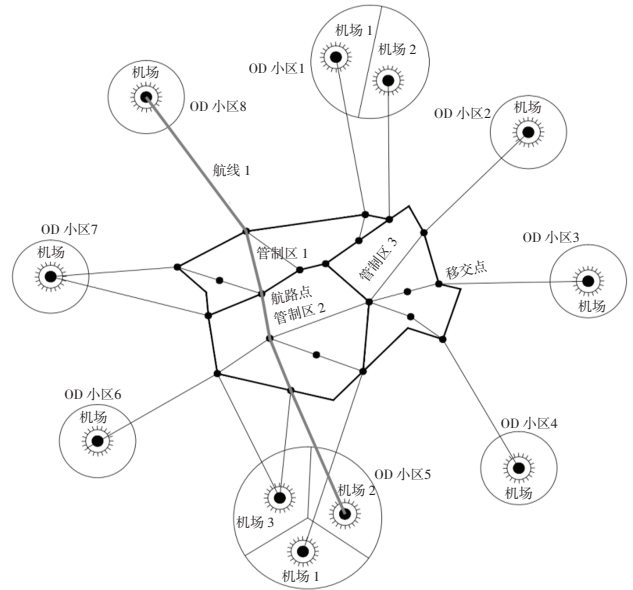


图 1 预测原理平面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the forecasting principle

1.1 OD 小区划分

OD 小区^[12],也称交通小区,以体现航班源、反映飞行流量的时空分布特征为原则,是具有交通关联性和相似性的节点或连线的集合。OD 小区划分的目的是增加预测的调查实操性,在保证精度的前提下,尽可能减小调查工作量,从而降低预测难度。OD 小区划分也在一定程度上反映了飞行流量需求的分布,为流量预测提供了良好基础。

由于并不是任意两个 OD 小区之间都存在航班往来,所以根据管制区的航班源机场分布和航线分布情况,筛选出相关 OD 小区对,作为有效 OD 小区对。OD 小区的划分遵循以下原则:①尽量以行政区为 OD 小区或其基本单元,以便于后续航班数据的统计和分析;②对于目标或重点区域,OD 小区的划分要尽量细致,以保证后续流量预测的准确度;③OD 小区的划分要避免过大或过小,过大会降低分析和预测的精度,过小则会增加工作量。

1.2 飞行流量生成预测

飞行流量的生成是社会经济活动对民航运输需求的具体反映。生成预测以 OD 小区为基本单位,预测各 OD 小区中机场的出行发生量和吸引量,即机场航班起降架次。本节将使用灰色预测 GM(1,1)模型对各机场的航班起降架次进行预测。

1.2.1 级别检验

为确定数据使用 GM(1,1)模型的可行性,及时调整预测与模型的适应性,需在预测之前进行数据的级别检验,检验参数计算公式为

$$\lambda(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)} \quad k = 2, 3, \dots, K \quad (1)$$

式中: k 为原始序列时间参数; K 为原始序列时间参数的总数; $x^{(0)}(k)$ 为机场航班起降架次的原始时间序列数据。如 $\lambda(k)$ 在区间 $(e^{-\frac{2}{K+1}}, e^{\frac{2}{K+2}})$ 内,则说明模型可用。

1.2.2 模型建立

1) 累加序列及均值序列的生成

假设机场航班起降架次的原始时间序列为

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(K)\} \quad (2)$$

对原始时间序列数据,即历年机场航班起降架次数据进行累加可得一阶累加时间序列

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(K)\} \quad (3)$$

式中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{q=1}^k x^{(0)}(q) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

为使预测结果更合理,对累加时间序列取前后两个时刻的均值,即均值序列为

$$Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad k = 2, 3, \dots, K \quad (5)$$

2) 微分方程构建及求解

构建一阶常微分方程来求解拟合曲线的函数表达式,设 $X^{(1)}$ 满足

$$\frac{dX^{(1)}}{dk} + \omega X^{(1)} = u \quad (6)$$

式中, ω, u 为微分方程的常数参数。由于数据离散,则方程改为

$$X^{(0)} = u - \omega Z^{(1)}(k) \quad (7)$$

利用最小二乘法,通过最小化误差的平方和寻求数据的最佳函数匹配。

构建微分方程的矩阵形式

$$Y = BW \quad (8)$$

式中

$$Y = [x^{(0)}(2) \quad x^{(0)}(3) \quad \dots \quad x^{(0)}(K)]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1) & 1 \\ -\frac{1}{2}x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}x^{(1)}(K) + x^{(1)}(K-1) & 1 \end{bmatrix}$$

$$W = [\omega \quad u]^T$$

求解可得

$$\hat{W} = [\hat{\omega} \quad \hat{u}]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (9)$$

由此得微分方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{\omega}} \right) e^{-\hat{\omega}k} + \frac{\hat{u}}{\hat{\omega}} \quad (10)$$

$$k = 0, 1, \dots, K$$

当 k 取大于原数据时刻时,则得到 OD 小区中各机场航班起降架次的预测值。

1.2.3 残差检验

为验证模型的可靠性,检验求得的拟合值和实际值间的相差程度,对预测值进行残差检验,检验参数计算公式为

$$\varepsilon(k) = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

式中, $x^{(0)}(1) = \hat{x}^{(0)}(1)$ 。

若残差 $\varepsilon(k) < 0.2$,说明此灰色模型对预测具有较高的可靠性。

1.3 飞行流量分布预测

在生成预测中得到了 OD 小区中各机场航班起降架次,在此基础上,建立双约束重力模型,对目标年 OD 小区间的飞行流量分布进行预测^[3]。重力模型又称引力模型,其思想来源于牛顿万有引力定律。假定 OD 小区间的飞行流量分布与 OD 两地机场航班起降架次成正比,与 OD 小区间的交通阻抗成反比。双约束重力模型基本形式为

$$Q_{ij} = \alpha_i \alpha_j O_i D_j f(c_{ij}) \quad (12)$$

式中: Q_{ij} 为小区 i 和小区 j 间的飞行流量分布; α_i, α_j 为双约束重力模型的约束参数; O_i, D_j 分别为 OD 小区 i 中机场航班起飞架次和 OD 小区 j 中机场航班落地架次; $f(c_{ij})$ 为交通阻抗函数; c_{ij} 为飞行阻抗因素,如飞行时间、航路里程等。约束参数分别满足

$$\alpha_i = \left[\sum_j \alpha_j D_j f(c_{ij}) \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\alpha_j = \left[\sum_i \alpha_i O_i f(c_{ij}) \right]^{-1} \quad (14)$$

由此得到守恒条件

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j \left[\frac{\alpha_j O_i D_j f(c_{ij})}{\sum_j \alpha_j D_j f(c_{ij})} \right] = O_i \quad (15)$$

$$\sum_i Q_{ij} = \sum_i \left[\frac{\alpha_i O_i D_j f(c_{ij})}{\sum_i \alpha_i O_i f(c_{ij})} \right] = D_j \quad (16)$$

交通阻抗函数以幂函数 $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-\gamma}$ 为模型, γ 为参数。双约束重力模型的计算过程为:

(1) 令 $h = 0$ (h 为迭代次数);

837 条。

2.1 机场起降架次预测

根据 OD 小区划分原则,将全国划分为 65 个 OD 小区,如表 1 所示,形成 4 160 个 OD 小区对。但由于不是每个 OD 小区对都与西安区域管制区的飞行流量

表 1 OD 小区划分表
Tab.1 OD zoning table

序号	小区名称	小区范围	序号	小区名称	小区范围
1	天津	天津	56	兰州	兰州
2	西安	西安	57	呼和浩特	呼和浩特
3	杭州	杭州	58	大连	大连
4	乌鲁木齐	乌鲁木齐	59	太原	太原
5	成都	成都	60	四川	阿坝、甘孜、广 元、南充、宜宾
6	广州	广州	61	哈尔滨	哈尔滨
7	北京	北京	62	河北	秦皇岛、石家庄
8	贵阳	贵阳	63	南京	南京
9	昆明	昆明	64	银川	银川
10	贵州	毕节、铜仁、 兴义、遵义	65	沈阳	沈阳
∴	∴	∴			

表 2 2012—2019 年各机场航班起降架次(经西安区域管制区管制)

Tab.2 Aircraft movements at each airport from 2012 to 2019 (controlled by the Xi'an Regional Control Area)

机场	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
ZBTJ	18 562	22 339	25 406	27 876	31 896	37 610	39 790	37 230
ZLXY	205 451	227 173	247 203	268 440	292 484	320 556	332 132	347 480
ZUUU	66 146	68 292	73 614	80 044	87 060	91 878	95 985	100 010
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
ZWWW	65 146	74 571	78 079	84 024	89 055	92 105	96 783	97 820
ZGGG	20 803	21 978	22 970	22 829	24 253	25 928	26 601	27 375
ZLLL	36 865	44 259	49 114	57 961	77 832	88 597	93 904	101 835

表 3 2020—2027 年各机场航班起降架次预测值(经西安区域管制区管制)

Tab.3 Forecasted aircraft movements at each airport from 2020 to 2027 (controlled by the Xi'an Regional Control Area)

机场	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年
ZBTJ	45 783	50 511	55 727	61 482	67 831	74 836	82 564	91 091
ZLXY	385 273	414 863	446 725	481 034	517 978	557 760	600 597	646 723
ZUUU	108 642	115 644	123 098	131 031	139 476	148 465	158 034	168 219
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
ZWWW	106 857	112 702	118 868	125 371	132 229	139 463	147 092	155 139
ZGGG	28 635	29 784	30 978	32 221	33 513	34 857	36 255	37 709
ZLLL	114 714	123 871	135 970	141 463	150 872	164 799	173 937	189 089

2.2 OD 小区之间飞行流量分布预测

以 2019 年为基准年,OD 小区之间飞行流量分布现状如表 4 所示,各 OD 小区之间的飞行时间矩阵如表 5 所示,阻抗函数设为 $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-1}$,求解双约束重力模型得到 2019 年 OD 小区之间飞行流量分布如表 6 所示,其中,“—”代表两小区之间的航班不经过西安区域管制区。

计算 2019 年实际分布与预测分布的相对误差

$$\delta = (\bar{A} - \bar{B})/\bar{B} \quad (26)$$

相关,所以从中筛选出有效 OD 小区对 764 个。

2012—2019 年,以上 OD 小区中,各机场经由西安区域管制区管制的航班起降架次统计数据如表 2 所示,数据来源于中国民用机场网、CSDN(Chinese Software Developer Network)全国航班数据库。

根据以上历史统计数据建立 GM(1,1)模型,以 OD 小区 2 为例,可得 $[\hat{\omega} \hat{u}]^T = [-0.074 \ 190 \ 641.756]^T, \lambda(k) \in (0.90, 0.96), x^{(1)}(k+1) = (185 \ 079 + \frac{190 \ 642}{0.07})e^{0.07k} - \frac{190 \ 642}{0.07}$ 。

残差检验 $\varepsilon(k) \in (-0.045, -0.006) < 0.2$,说明模型用于本次生成预测有较高的准确性。2020—2027 年各机场航班起降架次预测结果如表 3 所示。由表 3 可得,各机场经过西安区域管制区的航班起降架次逐年上升,经计算,各机场的航班起降架次年均增长率为 1%~15%。

式中: \bar{A} 为 2019 年 OD 小区之间飞行流量分布预测平均值; \bar{B} 为对应真实平均值。计算得到相对误差 $\delta = 0.98\%$,说明利用双约束重力模型预测 OD 小区之间飞行流量分布较为可靠,2027 年预测结果如表 7 所示。

2.3 航线流量分布和西安区域管制区飞行流量预测

以乌鲁木齐—西安为例,2.2 节求得 2027 年飞行流量为 11 680 架次,有 3 条航线来承担这些流量,编号分别为 ZWWW-ZLXY-01、ZWWW-ZLXY-01R、ZWWW-ZLXY-01X。运用多项 Logit 模型预测乌鲁木

表 4 2019 年 OD 小区之间飞行流量实际分布

Tab.4 Actual distribution of air traffic flow between OD pairs in 2019

架次

OD 小区	天津	西安	杭州	乌鲁木齐	...	兰州	呼和浩特	大连	太原	起飞架次
天津	—	3 650	—	897	...	1 460	—	—	—	18 594
西安	3 650	—	6 005	5 800	...	730	1 460	2 190	—	174 105
杭州	—	5 840	—	1 801	...	2 190	—	—	—	12 680
乌鲁木齐	1 095	6 698	1 520	—	...	5 410	685	—	738	48 900
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
兰州	1 460	730	2 190	5 698	...	—	365	—	365	51 100
呼和浩特	—	1 460	—	762	...	365	—	—	—	7 300
大连	—	2 190	—	—	...	—	—	—	—	4 015
太原	—	365	—	856	...	365	—	—	—	9 890
落地架次	18 636	173 375	13 140	48 920	...	50 735	6 570	3 850	10 950	606 647

表 5 2019 年 OD 小区之间的飞行时间

Tab.5 Flight time between OD pairs in 2019

h

OD 小区	天津	西安	杭州	乌鲁木齐	...	兰州	呼和浩特	大连	太原
天津	—	2.0	—	4.5	...	2.5	—	—	—
西安	1.8	—	2.5	3.4	...	1.3	1.8	2.3	—
杭州	—	2.4	—	5.5	...	3.0	—	—	—
乌鲁木齐	3.8	3.3	4.9	—	...	3.0	3.4	—	3.6
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
兰州	2.2	1.2	2.8	2.4	...	—	1.6	—	1.6
呼和浩特	—	1.6	—	3.5	...	1.7	—	—	—
大连	—	2.6	—	—	...	—	—	—	—
太原	—	1.1	—	4.2	...	1.6	—	—	—

表 6 2019 年 OD 小区之间飞行流量分布预测

Tab.6 Forecast of distribution of air traffic flow between OD pairs in 2019

架次

OD 小区	天津	西安	杭州	乌鲁木齐	...	兰州	呼和浩特	大连	太原	起飞架次
天津	—	3 458	—	897	...	1 570	—	—	—	18 498
西安	3 532	—	6 169	5 804	...	730	1 649	2 468	—	173 155
杭州	—	5 840	—	1 801	...	1 849	—	—	—	11 680
乌鲁木齐	1 094	6 107	1 520	—	...	5 709	695	—	730	48 351
兰州	1 568	775	1 996	5 792	...	—	361	—	365	51 024
呼和浩特	—	1 506	—	792	...	400	—	—	—	7 300
大连	—	2 290	—	—	...	—	—	—	—	4 015
太原	—	365	—	809	...	352	—	—	—	9 490
落地架次	18 738	172 425	13 140	48 976	...	50 210	6 890	3 876	10 235	610 045

表 7 2027 年 OD 小区之间飞行流量分布预测

Tab.7 Forecast of distribution of air traffic flow between OD pairs in 2027

架次

小区	天津	西安	杭州	乌鲁木齐	...	兰州	呼和浩特	大连	太原	起飞架次
天津	—	4 015	—	1 825	...	1 825	—	—	—	45 570
西安	4 980	—	10 950	7 665	...	2 190	2 825	4 745	—	334 678
杭州	—	8 030	—	4 460	...	2 920	—	—	—	21 600
乌鲁木齐	3 095	11 680	2 555	—	...	7 665	1 967	—	1 095	77 564
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
兰州	3 285	2 073	3 650	9 125	...	—	1 395	—	1 460	93 997
呼和浩特	—	2 190	—	1 645	...	730	—	—	—	10 950
大连	—	3 090	—	—	...	—	—	—	—	6 445
太原	—	896	—	1 095	...	730	—	—	—	15 910
落地架次	45 521	312 045	21 535	77 575	...	95 092	10 585	6 570	16 060	1 153 405

齐—西安选择这 3 条航线的概率,相关信息如表 8 所示。

表 8 2027 年乌鲁木齐—西安飞行流量预测结果

Tab.8 Forecast results of air traffic flow for Urumqi—Xi'an in 2027

航线编号	里程/ km	概率	飞行流量/ 架次	航路结构
ZWWW-ZLXY-01	2 213	0.367	4 287	WUR, ADPET, DAKPA, IPMUN, ESDEX, DNC, XIXAN, HO
ZWWW-ZLXY-01X	2 363	0.245	2 862	WUR, ADPET, GOVSA, GOBIN, XIXAN, HO
ZWWW-ZLXY-01R	2 018	0.388	4 532	WUR, ESDEX, DNC, XIXAN, HO

由表 8 可知,2027 年,ZWWW-ZLXY-01R 为里程最短的航线,选择此条航线飞行的概率为 0.388,实际流量分担中,ZWWW-ZLXY-01R 所承担的流量比例也最高,为 4 532 架次。本节通过航线流量分配,可以得到 OD 小区之间航线流量分担比例,同时也获得了 2027 年西安区域管制区航线流量分布,其预测结果如表 9 所示。

表 9 2027 年航线流量分布预测结果

Tab.9 Forecast results of traffic flow distribution across airways in 2027

航线编号	飞行流量 架次
ZWWW-ZLXY-0R	4 532
ZLXY-ZWWW-01R	3 861
ZLXY-ZWWW-01	3 804
ZGGG-ZLXY-01	9 005
ZGGG-ZLXY-01X	5 960
ZLXY-ZGGG-01	15 695
⋮	⋮
ZWWW-ZLLL-01	1 918
ZWWW-ZLLL-01X	1 865
ZWWW-ZLLL-01R	1 241
ZWWW-ZLLL-02	2 641
ZLXY-ZSNJ-01	8 395
ZSNJ-ZLXY-01	6 205
ZLLL-ZWWW-01	5 116
ZLLL-ZWWW-01R	4 009
ZLXY-ZSHC-01	10 950
ZSHC-ZLXY-01	8 030
总计	2 306 810

由表 9 可知,西安区域管制区 2027 年飞行流量预测值为 2 306 810 架次。

以航线 ZWWW-ZLXY-01R 为例,航班在管制移交点 ESDEX 由乌鲁木齐管制区移交给西安管制区。无论是以乌鲁木齐管制区还是西安管制区为目标进行飞行流量预测,由于两地机场的航班起降架次预测是稳定一致的,因此分配得到此条航线的飞行流量是一致匹配的。

3 结语

本文提出了利用四阶段法预测管制区飞行流量及其内部航线流量分布,以此给出了同一航线所属不同管制区流量预测不一致问题的解决办法。形成了飞行流量生成—分布—航线选择的预测思路和灰色预测—双约束重力模型—多项 Logit 的组合预测方法。通过对西安区域管制区的案例预测分析,检验了该方法的实用性,对管制区飞行流量预测、扇区规划等具有参考意义。

在未来研究中,可考虑将改进重力模型与其他智能算法模型相结合,构建更合适的流量分布预测模型,得到更为优良的管制区飞行流量预测理论与方法。

参考文献:

- [1] 王 飞,孙鹏飞. 基于分解集成方法的空中交通流量短期预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15270-15276.
- [2] WEINREICH I, RICKERT H, LUKASCHEWITSCH M. Wavelet-based time series prediction for air traffic data[C]//Wavelet Applications in Industrial Processing, Providence, RI. SPIE, 2004: 238-248.
- [3] 刘玉梅. 基于最小二乘估计原理的飞机流量预测[J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(4): 20-23.
- [4] 王洪芳,赵志刚. 进近管制区飞行流量的组合预测[J]. 常州工学院学报, 2014, 27(1): 39-42.
- [5] 杨 阳,王 超. 空中交通流扇区内飞行流量优化预测管理[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 74-78.
- [6] 中国民用航空西北地区管理局. 管制空域飞行流量及扇区数量预测[R]. 西安: 中国民用航空西北地区管理局, 2019.
- [7] 宋维凯,张洪海,万俊强,等. 基于动态时间规整和长短期记忆的空中交通流量短期预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11256-11261.
- [8] 张 明,韩松臣,黄林源. 基于双重力模型和人工神经网络的空中交通流量组合预测[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(5): 764-770.
- [9] 张 慧,韩松臣. 基于灰色重力模型的终端区空域流量分布预测[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2010, 26(1): 38-41.
- [10] 屈云超,徐 猛. 求解交通出行预测的反馈四阶段法研究[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(10): 725-730.
- [11] 曹尧谦,李夏苗. 基于改进四阶段法的武广客运专线客流预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(3): 109-113.
- [12] 王 龙. 中长期高速铁路网客流 OD 及通道运量预测方法[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(4): 76-85.
- [13] 张宝磊,任军号,巩岁平. 出行分布预测模型及其系数标定算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(4): 21-24.
- [14] 杨亚琛,聂 垚,刘玉印. 基于 Logit 模型的居民租车出行影响因素分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(7): 834-838.

(责任编辑:明 月)