

# 基于改进引力模型的航空货运量预测

王超峰, 曲俊霏

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 德阳 618307)

**摘要:** 航空货运是现代交通物流体系中的重要组成部分,近年来随着航空货运业的不断发展,货运量持续增长。因此,准确预测航空货运量对于航空运输业的发展和运营至关重要。为科学预测城市之间航空货运业务量,综合考虑城市经济发展水平、机场设施安排等影响因素,首先使用灰色预测模型预测机场的货运业务总量,再使用主成分分析法和改进引力模型确定城市机场综合服务得分和城市节点间的货运吸引强度,从而判断物流流向的趋势,最后通过构建组合预测模型得到 2026 年各城市机场间的货运量。结果表明,中国的航空货运业务市场处于快速发展期,货运量的预测为对货运机场的运行容量设置以及提升物流设施保障能力具有一定的参考价值。

**关键词:** 灰色预测; 改进引力模型; 航空网络

**中图分类号:** U8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0061-05

航空运输是全球贸易和物流领域不可或缺的一部分,对我国的经济发展具有重大作用,国家相关政策也在鼓励各大航空公司发展航空货运业务。2018 年,国家发改委发布《国家物流枢纽布局和建设规划》,该规划有利于航空货运物流网络空间布局的规划和现代化物流体系的构建。2020 年,国家发改委和民航局发布的《关于促进航空货运设施发展的意见》指出,到 2025 年,将建成湖北鄂州专业货运枢纽机场,并优化完善北京、上海、广州、深圳等综合性枢纽机场的货运设施。由此可见,航空货运不仅迎来快速发展期,也正处在政策红利期。利好政策的出台体现了国家对航空货运业高质量发展的期望,同时也对现有有机场货运站的扩建和新建货运机场基础设施的建设进度提出了新的要求。机场建设过程中,总体规划以及配套设施的布局工作,都依赖于对航空货运量发展趋势的准确预测。因此,对航空货运发展趋势做出精准预测,对管理部门和航空公司进行发展规划、做出经营决策具有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前,航空货运量预测的方法多样化,通常结合了传统统计法、人工智能法、组合预测法。传统统计法包括灰色预测法、时间序列分析法、回归分析法。灰色预测模型适合用于小样本、信息不完备的系统,尤其在航空货运量数据有限时,可以使用

灰色模型进行预测<sup>[2]</sup>。徐莉和薛锋<sup>[3]</sup>建立 GM(1, 1)残差二次修正预测模型基于残差二次修正后的模型对未来三年我国铁路的货运量进行预测。时间序列分析法是将一组随机序列按照时间顺序依次排列,并采用统计方法对时间序列值进行处理。贾庆兰<sup>[4]</sup>首先建立基于时间序列分析法的分析模型,揭示船舶数量变化的基本规律。周叶和肖灵机<sup>[5]</sup>通过构建航空货运量的自回归积分滑动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型预测并进行检验,结果表明此方法可以应用于短期内我国航空货运量的预测。廖列法和欧阳宗英<sup>[6]</sup>提出一种改进贝叶斯自适应搜索 (Bayesian adaptive search, BAS) 的 Elman 神经网络预测模型。郭雅丽等<sup>[7]</sup>选取成都市近 15 年来的物流需求数据,采用多元线性回归模型对未来的物流需求进行预测。

人工智能预测主要基于机器学习和深度学习技术,与传统的预测方法相比,基于人工智能的模型在短期预测中表现更优的预测性能,主要包括时间序列模型、机器学习模型、深度学习模型。龙宇等<sup>[8]</sup>提出了一种基于 ARIMA-LSTM-XGBOOST 组合模型的铁路货运量预测方法,有效提升了模型的预测精度和泛化能力。钟蒙等<sup>[9]</sup>提出结合灰色关联度分析的 BP 神经网络方法,用于公路货运量

**收稿日期:** 2024-10-12

**作者简介:** 王超峰(1981—),男,河南许昌人,博士,副教授,研究方向为航空物流、航空货运网络;通信作者曲俊霏(1999—),女,辽宁丹东人,硕士研究生,研究方向为航空货运网络。

预测。

组合模型预测法将多种方法结合在一起,往往能够提高预测精度。赵建立等<sup>[10]</sup>提出一种将卷积神经网络(CNN)与残差网络相组合的预测模型。曹允春和龚曼丽<sup>[11]</sup>在应用趋势外推法、三次指数平滑法和灰色预测法,引进 SHAPLEY 值法组合预测模型。王鑫鑫等<sup>[12]</sup>提出一种基于长短期记忆网络和径向基神经网络的组合预测模型,该预测模型对水路货运量的预测有着较高的准确度。

上述理论方法在对航空货运网络中的货运量进行预测时,主要的研究对象集中于全国、某个省份或者某个城市的货运业务量预测,但是在不能预测航空货运网络中某条航线的货运需求。为解决该问题,选取出全国范围内航空运输综合能力较强的主要城市,结合影响货运量的相关指标,构建组合预测模型有效地解决传统预测方法面临的难题。

## 1 主要城市选取以及数据来源

从预测的角度而言,尽量收集更多的数据以提高预测的精度。然而,由于我国航空货运行业起步较晚,因此选取 2012—2022 年各城市的数据,以及 2022 年相关影响因素数据,作为后续研究的依据。

选取上海、广州、北京、杭州、郑州等 25 个主要城市作为研究对象进行出行起点-终点(origin-destination, OD)小区划分,将每个城市视为一个节点,所在城市有双机场将两个机场合并成一个节点。根据《从统计看民航》收集选取 25 个城市节点 2012—2022 年的货邮量数据,运用 GM(1,1)灰色预测模型对 2026 年的货邮量进行预测。

## 2 城市机场航空货运业务总量预测

### 2.1 货运量生成预测

灰色 GM(1,1)模型的核心思想是先对原始数据进行一次累积处理,利用累积后的数据序列进行建模和计算,最后通过对模型计算结果进行累减处理,从而得到最终的预测值<sup>[13]</sup>。

(1)原始序列定义:

$$X^{(0)}(k) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

式中:  $X^{(0)}(k)$  为原始数据。

(2)生成累加数列:对  $X^{(0)}(k)$  进行累加得到  $X^{(1)}(k)$ , 即

$$X^{(1)}(k) = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\} \quad (2)$$

$$X^{(1)}(k) = X^{(1)}(k-1) + X^{(0)}(k) \quad (3)$$

式中:  $X^{(1)}(k)$  为对原始序列进行一次累加生成的序列。

(3)建立微分方程模型:基于累加生成序列

$X^{(1)}(k)$  构建微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (4)$$

式中:  $a, u$  为未知待估参数。

(4)计算参数  $a, u$ : 利用最小二乘法估计参数  $a, u$ , 计算过程为

首先构建矩阵  $B$ :

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n) + X^{(1)}(n-1)] & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

构建和向量  $Y$ :

$$Y = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

参数  $a, u$  可通过式(7)求得:

$$[a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

(5)构建预测模型:将估计出的参数  $a, u$  代入微分方程,得出离散预测模型为

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (8)$$

(6)还原预测结果:由于预测是在累加生成序列上进行的,因此需要对预测结果进行逆累加还原到原始数据序列。还原公式为

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) \quad (9)$$

(7)模型检验:残差检验为

$$E(k) = X^{(0)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k) \quad (10)$$

### 2.2 各城市货邮量预测

通过 GM(1,1)灰色预测模型对 2012—2022 年的货邮量进行预测,得到各个城市 2012—2022 年的预测值,进行残差检验。计算得到平均相对误差为 0.06, 小于 0.1, 由此可知运用 GM(1,1)灰色预测模型精度具有可信度,使用此方法可预测得出 25 个城市 2026 年的货邮量,如表 1 所示。

## 3 基于改进引力模型的 OD 对货运量的分布预测

在 2026 年 25 个城市的航空货运业务量基础上,构建基于主成分分析法的城市机场服务能力评分模型并结合改进的引力模型,以及计算各城市的货运量吸引强度,并对城市间航空货运业务量进行合理地预测。

表 1 25 个城市 2026 年的货邮量预测

城市	货运量/万 t	城市	货运量/万 t
上海	421.51	青岛	26.25
广州	232.38	长沙	22.35
北京	130.51	天津	14.92
深圳	194.95	沈阳	19.54
杭州	101.72	福州	11.34
郑州	86.12	海口	17.19
成都	77.52	大连	14.53
重庆	50.02	乌鲁木齐	12.28
西安	38.17	南宁	20.14
昆明	37.51	贵阳	11.22
南京	43.63	哈尔滨	12.36
武汉	34.19	三亚	9.67
厦门	29.31		

### 3.1 基于主成分分析法的城市机场服务能力评分模型

货运量的大小是衡量一个国家或地区物流综合实力、运输发展规模和速度的重要指标。如何对航空货物运量有效地进行预测,一直都是航空货运各部门面临的重大课题。影响货运量需求的因素有很多,使用主成分分析法进行预测可以进行降维操作,消除各指标之间的相关性。

机场活动受所在城市的经济发展、政府政策、机场的地理位置等影响。因此选取与机场以及机场所在城市的相关指标,包括国民生产总值( $X_1$ )、城市常住人口( $X_2$ )、机场货邮吞吐量( $X_3$ )、机场起降架次( $X_4$ )、社会消费品零售总额( $X_5$ ) 5 个评分指标来衡量城市机场综合服务水平。

使用主成分分析法进行分析的前提是各变量之间必须具有相关性,利用 KMO 统计量和 Bartlett's 球形检验进行判定, $KMO=0.807\ 11 < 0.9$ , $Bartlett=0.000 < 0.005$ ,这两个数据证明各变量之间具有相关性,可以进行因子分析对各城市的机场服务水平进行评价。

方差解释率用于评估某个因子对变量解释的贡献程度。通常,方差解释率越高,表明该主成分越重要,其权重占比也越大。根据特征值大于 1 的原则,可提取出两个主成分,分别为成分 1、成分 2。这两个成分的特征值分别为 2.44、2.36,同时得出成分得分系数矩阵,如表 2 所示。

表 2 成分得分系数矩阵

指标	成分 1	成分 2
GDP	0.298	0.017
常住人口	0.792	-0.517
货邮量	-0.468	0.772
起降架次	-0.279	0.590
社会消费品零售总额	0.417	-0.107

根据成分得分系数矩阵,可以计算得到各城市机场节点的综合服务水平得分:

$$F_1 = 0.298X_1 + 0.792X_2 - 0.468X_3 - 0.279X_4 + 0.417X_5 \quad (11)$$

$$F_2 = 0.017X_1 - 0.517X_2 + 0.772X_3 + 0.590X_4 - 0.017X_5 \quad (12)$$

$$F = (0.488/0.962)F_1 + (0.473/0.962)F_2 \quad (13)$$

式中: $F_1$ 、 $F_2$  分别为两个成分的得分值; $F$  为各个城市机场的综合服务能力得分; $X_1 \sim X_5$  为 5 个评价指标,分别为 GDP、常住人口、货运量、起降架次、社会消费品零售总额。

最终得到各个城市机场的综合服务能力得分,由于部分数据存在负数为了能更直观地反映各个机场的航空运输强度,因此对所有数据进行归一化处理,计算公式为

$$W_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij}^{\min}}{X_{ij}^{\max} - X_{ij}^{\min}} \times 9 + 1 \quad (14)$$

标准化后主成分 1、主成分 2 得分如表 3 所示。

表 3 各个城市机场的综合服务能力得分

城市	综合得分	处理后得分	城市	综合得分	处理后得分
上海	5.70	10.00	青岛	-0.3	2.92
广州	2.52	6.24	长沙	-0.37	2.84
北京	4.02	8.01	天津	-0.12	3.14
杭州	0.49	3.85	沈阳	-0.82	2.31
郑州	0.04	3.32	福州	-0.81	2.32
成都	1.41	4.94	海口	-1.63	1.35
重庆	2.41	6.11	大连	-1.11	1.97
西安	0.16	3.46	乌鲁木齐	-1.41	1.61
昆明	-0.40	2.80	南宁	-1.23	1.83
南京	0.11	3.40	贵阳	-1.35	1.68
武汉	0.28	3.61	哈尔滨	-0.86	2.26
厦门	-1.07	2.11	三亚	-1.93	1.00
深圳	2.01	5.65	青岛	-0.30	2.92

### 3.2 基于改进引力模型的 OD 对货运量的分布预测

引力模型是一种用于预测和解释两个地点之间相互作用的模型。它以类比物理学中的万有引力定律为基础,假设两个地点之间的相互作用力与它们的规模成正比、与距离的平方成反比<sup>[14]</sup>。引力模型的基本形式可以用公式表示如下

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d_{ij}^2} \quad (15)$$

式中: $F$  为两个地点之间的相互作用力; $G$  为引力

常数;  $M_1$ 、 $M_2$  分别为两个地点的规模;  $d_{ij}^2$  为距离的平方,通常用来表示距离对互动的衰减效果。

引力模型常用于预测两个城市之间的交通流量。随着研究的深入,经典的引力模型不能符合每一个使用环境,因此引力模型的参数需要根据使用环境进行扩展和修正,以适应复杂的现实情况。增加机场所在城市的机场服务能力评分模型,将各城市机场的综合服务能力得分作为机场引力测算的一部分,改进后的引力模型更加符合实际情况,可以更好地描述各机场的综合质量,改进引力模型为

$$q_{ij} = \frac{s_i s_j}{H_{ij}} \quad (16)$$

$$Q_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (17)$$

式中:  $q_{ij}$  为节点之间的联系程度;  $s_i$ 、 $s_j$  分别为城市机场的综合服务能力得分;  $H_{ij}$  为节点之间的飞行时间;  $Q_{ij}$  为城市之间的吸引力强度。根据式(16)和式(17)计算,可以得出 25 个城市间货运业务量的

吸引强度如表 4 所示。

#### 4 城市间货运业务量预测及分析

通过预测,得到了 2026 年 25 个城市的航空货运业务总量和城市之间货运量吸引强度,由此可以得到城市之间航空货运业务量组合预测模型:

$$W_{ij} = Q_{ij} W \quad (18)$$

式中:  $W_{ij}$  为城市  $i$  至城市  $j$  之间的货运量;  $Q_{ij}$  为城市之间的吸引力强度;  $W$  为上文预测出的 25 个城市 2026 年的货邮总量。2026 年货运总量前 10 的城市间货物业务量如表 5 所示。

预测显示,2026 年 25 个城市的航空货运业务总量将达到 1 669.31 万 t,年增长率为 12.4%。这表明中国的航空货运市场处于快速发展阶段,未来仍有较大的增长潜力。在这 25 个城市中,北京、上海、深圳、广州等城市的货运量明显高于其他城市,建议优先发展北京等枢纽城市,增加对人力和物力的投入,将这些城市建设成为功能更强大的物流基地,以优化航空货运网络布局。

表 4 2026 年货运总量前 10 的机场之间的吸引力强度

城市	新引力强度/%									
	上海	广州	北京	深圳	杭州	郑州	成都	重庆	西安	南京
上海	0.00	7.55	9.99	6.59	4.50	5.17	6.61	6.61	4.04	3.03
广州	10.62	0.00	6.92	8.46	4.86	3.64	5.81	8.38	3.55	4.00
北京	12.44	6.13	0.00	5.27	5.32	5.16	5.12	6.34	4.62	4.88
深圳	10.68	9.74	6.86	0.00	5.49	3.78	5.28	8.04	3.49	4.17
杭州	10.11	7.78	9.61	7.62	0.00	5.37	4.44	6.61	3.74	2.90
郑州	12.94	6.47	10.36	5.84	5.97	0.00	6.39	7.92	1.73	4.81
成都	12.48	7.80	7.76	6.15	3.73	4.82	0.00	5.08	6.37	4.25
重庆	9.28	8.70	7.43	7.24	4.29	4.62	3.93	0.00	5.77	4.37
西安	10.03	6.27	9.21	5.34	4.13	1.72	8.37	9.81	0.00	4.56
南京	7.75	7.28	10.02	6.58	3.30	4.92	5.75	7.65	4.70	0.00

表 5 2026 年货运总量前 10 的城市间货物业务量

城市	货物业务量/万 t									
	上海	广州	北京	深圳	杭州	郑州	成都	重庆	西安	南京
上海	0.00	30.83	40.78	26.92	18.37	21.13	26.98	25.96	16.52	12.39
广州	24.69	0.00	16.09	19.65	11.31	8.46	1.35	1.94	8.26	9.31
北京	16.24	8.00	0.00	6.88	6.95	6.74	6.68	8.28	6.03	6.37
深圳	2.08	10.99	13.38	0.00	10.72	7.38	5.28	8.04	3.49	4.17
杭州	10.29	7.91	9.78	7.75	0.00	5.46	4.52	6.72	3.81	2.95
郑州	11.14	5.57	8.92	5.03	5.14	0.00	5.50	6.82	1.49	4.15
成都	9.67	6.04	6.02	4.76	2.89	3.74	0.00	3.94	4.94	3.29
重庆	4.64	4.35	3.71	3.62	2.14	2.31	1.96	0.00	2.89	2.18
西安	3.83	2.39	3.51	2.04	1.57	0.65	3.19	3.74	0.00	1.74
南京	3.38	3.17	4.37	2.87	1.44	2.14	2.51	3.34	2.05	0.00

## 5 结论

我国正处于从民航大国向民航强国的关键转型期,航空货运作为航空运输市场的重要组成部分,其在推动社会经济发展中的作用日益凸显。科学准确地预测航空货运量有助于掌握其变化趋势,保障航空运输业的持续健康发展。本文利用灰色预测模型,对选取的 25 个城市节点 2026 年的航空货运量进行预测,并选取国民生产总值、城市常住人口、机场货邮吞吐量、机场起降架次、社会消费品零售总额 5 个不同评分指标,对城市经济条件,机场设施等方面进行量化,充分利用指标数据信息,得出影响货运量的指标,构建了一个城市机场综合服务水平评价模型,借此对引力模型进行改进,基于改进的引力模型预测城市节点间的吸引强度以判断货运量的趋向性,最终得到城市节点 OD 对之间的货运量。此方法能够有效预测未来的航空货运量趋势,为航空货运业的决策制定和运营优化提供了可靠的数据支持。

### 参考文献

- [1] 曹更永,王倩倩,白鸿宇. 后疫情时期浙江省高质量发展国际航空货运对策建议[J]. 综合运输, 2022, 44(7): 94-99.
- [2] 徐宁,党耀国. 特征自适应型 GM(1, 1)模型及对中国交通污染排放量的预测建模[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(1): 187-196.
- [3] 徐莉,薛锋. 基于 GM(1, 1)残差二次修正的铁路货运量预测[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(2): 44-50.
- [4] 贾庆兰. 基于时间序列分析法的港口通航船舶数量预测[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(24): 187-189.
- [5] 周叶,肖灵机. 基于 ARIMA 模型的我国航空货运量预测分析[J]. 南昌航空大学学报(社会科学版), 2010, 12(3): 22-27.
- [6] 廖列法,欧阳宗英. 改进天牛须搜索优化神经网络的港口货运量预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2937-2944.
- [7] 郭雅丽,施莉,李紫萌. 基于多元线性回归的成都市农产品物流需求预测实证分析[J]. 中国储运, 2024(7): 127-128.
- [8] 龙宇,许浩然,余华云,等. 基于 ARIMA-LSTM-XG-Boost 组合模型的铁路货运量预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10879-10886.
- [9] 钟蒙,薛运强,周珣,等. 基于灰色-反向传播神经网络的江西省公路货运量预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10478-10484.
- [10] 赵建立,石敬诗,孙秋霞,等. 基于混合深度学习的地铁站进出客流量短时预测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 128-134.
- [11] 曹允春,龚曼丽. 专业货运机场航空物流需求预测研究[J]. 综合运输, 2023, 45(10): 156-162.
- [12] 王鑫鑫,沈晓攀,王琪,等. 基于 LSTM-RBF 的水路货运量预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7995-8001.
- [13] 翁志坚,邱晨杰,邱福祥,等. 基于马尔科夫优化的灰色 GM(1, 1)沉降预测模型及应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12065-12070.
- [14] 王智鹏. 澳门对外铁路客运量及客流分配研究[J]. 铁路运输与经济, 2023, 45(5): 38-44.

## Air Cargo Volume Prediction Based on Improved Gravity Model

WANG Chaofeng, QU Junfei

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307, Sichuan, China)

**Abstract:** Air freight is an important part of modern transportation logistics system. In recent years, with the continuous development of air freight industry, the freight volume has continued to grow. Therefore, accurate prediction of air freight volume is very important for the development and operation of air transport industry. In order to scientifically predict the air cargo business volume between cities and comprehensively consider the influencing factors such as the level of urban economic development and airport facilities, the grey forecasting model was used to predict the total cargo business volume of airports, and then the comprehensive service capacity score of urban airports and the freight attraction intensity between urban nodes were determined by using principal component analysis and improved gravity model, so as to judge the trend of cargo flow. Finally, the freight volume between urban airports in 2026 was obtained by constructing a combined forecasting model. The results show that China's air freight business market is in a period of rapid development, and the forecast of freight volume has certain reference value for setting the operating capacity of freight airports and improving the support capacity of logistics facilities.

**Keywords:** gray prediction; improved gravity model; aviation network