

文章编号: 1674-8190(2021)05-075-05

# 基于支持向量机回归的民用飞机航材 消耗预测研究

曾浩然, 冯蕴雯, 路成, 潘维煌

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 航材作为装备保障的关键部件,其精确化保障在降低库存管理成本、优化资金分配、提高飞行安全等方面有重要作用。为保障飞机正常起飞,增加航空公司运营收入,降低航材保障费用,针对飞机航材消耗样本小、变化大难以预测的问题,提出一种基于支持向量机回归的航材消耗预测模型。以某国产民用飞机实际消耗数据为例,对支持向量机回归模型的预测精度进行验证。结果表明:该支持向量机回归模型对小样本数据有很好的适应性,相比指数平滑法具有更高的预测精度。

**关键词:** 民用飞机;航材;消耗预测;支持向量机回归;维修保障

**中图分类号:** V267

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.10

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Forecast Study on Civil Aviation Material Consumption Based on Support Vector Machine Regression

ZENG Haoran, FENG Yunwen, LU Cheng, PAN Weihuang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** As the key part of maintenance support, the accuracy support of aviation material plays an important role in the inventory management cost reduction, fund allocation optimization and flight safety improvement. In order to support the normal take-off of aircraft, improve the operating income of airline companies and reduce the cost of aviation material support, a material consumption forecast model based on support vector machine regression is proposed to overcome the problem which is difficult to forecast aviation material consumption with small sample size and large variation. Taking the actual consumption data of a domestic civil aircraft as an example, the forecast accuracy of the support vector machine regression model is verified. The results show that the support vector machine regression model is of good adaptability for small sample data, and has higher forecast accuracy than that of the exponential smoothing method.

**Key words:** civil aircraft; aviation material; consumption forecast; support vector machine regression; maintenance support

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51875465)

通信作者: 冯蕴雯, fengyunwen@npu.edu.cn

引用格式: 曾浩然, 冯蕴雯, 路成, 等. 基于支持向量机回归的民用飞机航材消耗预测研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 75-79.

ZENG Haoran, FENG Yunwen, LU Cheng, et al. Forecast study on civil aviation material consumption based on support vector machine regression[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 75-79. (in Chinese)

## 0 引言

装备保障直接影响航空公司机队的正常运行,航材作为装备保障的关键部件,其精确化保障在降低库存管理成本、优化资金分配、提高飞行安全等方面有重要作用,而航材消耗预测方法的准确性是实现精确化保障的基础。目前主要的航材预测技术可概括为三种:基于时间序列法的预测技术、基于回归分析法的预测技术和基于机器学习的预测技术<sup>[1]</sup>,每类预测技术还包括多种方法。

时间序列预测方法中指数平滑法最为经典,因其原理简单易懂、操作方便,成为航材消耗预测研究中最常用的方法<sup>[2-4]</sup>。毕钊等<sup>[5]</sup>综合考虑季节变动、中长期趋势以及随机干扰等因素之间的相互作用,改善时间序列法短期预测精度不高的问题;J. D. Croston<sup>[6]</sup>则考虑了时间间隔与消耗历史等因素,基于指数平滑法提出 Croston 方法用于航材预测,但现实中很多需求都不符合正态分布,因此该模型预测精度不高;R. H. Teunter 等<sup>[7]</sup>使用英国皇家空军的大型数据集,将 Bootstrap 法用于预测间断型航材需求量,但在预测小样本集航材需求时效果不佳。指数平滑法对数据集的大小较为敏感,当样本量减少到一定程度,预测结果就会产生较大偏差<sup>[8]</sup>。

回归分析法通过建立目标输出与输入变量之间的关系,确定消耗与影响变量的关系式<sup>[1]</sup>。陈振林等<sup>[9]</sup>提出一种非参数回归的航材消耗模型,能较好地改善缺乏先验知识、预测周期长等问题;Guo F 等<sup>[10]</sup>提出一种双层组合回归预测模型,进一步提高回归模型的预测精度。当涉及因素过多时,回归分析法的预测精度会降低,不能有效实现航材消耗预测。此外,当变量参数维数较高时,需要足够的样本支撑来实现回归分析模型的建立。

机器学习中最为典型的方法是人工神经网络和支持向量机。A. S. Vander 等<sup>[11]</sup>基于航材消耗信息,利用人工神经网络模型进行航材需求预测;孙伟奇等<sup>[12]</sup>将最小二乘原理结合支持向量机应用

于小数据集航材消耗预测,验证了该类方法在工程中的适用性。

本文以回归原理为基础,结合支持向量机理论对航材进行预测,提出基于支持向量回归的航材预测模型,通过对比指数平滑法和支持向量机回归模型的预测结果,验证本文模型的有效性。

## 1 支持向量机回归预测模型

支持向量机(Support Vector Machine,简称 SVM)理论于 1995 年提出,能够在小样本的前提下实现非线性和高维问题分析<sup>[13-15]</sup>,具有适应性强、训练时间短、泛化能力强等特点<sup>[16-19]</sup>。此外,SVM 能够有效克服维数灾难和过学习等传统算法难以解决的问题<sup>[20-23]</sup>。

SVM 主要包括支持向量机分类和支持向量机回归(Support Vector Regression,简称 SVR),目前两种方法已在很多领域得到广泛应用<sup>[24]</sup>。航材消耗预测实质上属于回归分析,结合航材消耗历史数据进行下一阶段或下一时刻点的需求预测分析<sup>[25]</sup>。利用 SVR 建立预测模型的步骤如图 1 所示。

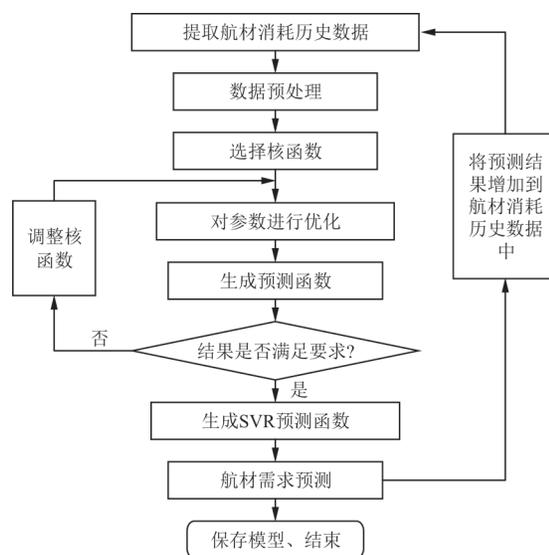


图 1 基于支持向量机回归的航材预测模型建立步骤  
Fig. 1 Support vector machine regression-based aircraft material forecast model building steps

首先进行数据预处理,将数据划分成训练数据集和预测测试数据集,然后将训练数据集输入模型进行训练,得到训练后的SVR模型。其中训练过程的原理为:通过引入非线性算子函数 $\varphi$ ,把初始样本映射到高维空间,并在高维空间对初始样本进行处理,通过这种方法能够将非线性预测问题变为高维度上的线性预测问题,这样就可以把一些较为复杂的运算简单化<sup>[26]</sup>。最后,将预测测试数据输入训练后得到的模型中进行回归计算,输出预测结果。SVR基本原理介绍详见文献[27]。

## 2 典型国产民用飞机航材消耗预测案例

本节针对某型飞机的LRU航材历史消耗数据进行分析研究。该组数据共有36期消耗值,选取前31期消耗量数据作为初始训练数据(如表1所示),最后5期作为预测测试数据(实际消耗值),用以分析预测模型的实际效果。

表1 航材消耗量预测训练样本

Table 1 Training samples for aviation material consumption forecast

序号	实际消耗值/件	序号	实际消耗值/件	序号	实际消耗值/件
1	110	12	118	23	114
2	116	13	115	24	140
3	131	14	126	25	145
4	129	15	141	26	150
5	121	16	135	27	178
6	135	17	125	28	164
7	148	18	149	29	172
8	146	19	170	30	178
9	136	20	167	31	199
10	121	21	158		
11	103	22	133		

模型的核函数选用径向基核函数(Radial Basis Function,简称RBF),惩罚系数 $C$ 和核参数 $g$ 运用网格搜索法对其进行优化,最终选择 $C=1\ 024$ , $g=0.031\ 5$ 。其预测结果如表2所示。

表2 航材消耗预测测试样本与预测值

Table 2 Test samples and forecasted values for aviation material consumption forecast

序号	实际消耗值/件	模型预测值/件
1	196	183.4
2	184	188.2
3	162	150.9
4	146	149.6
5	166	157.8

整理表2数据并绘制航材历史消耗与预测曲线,如图2所示。

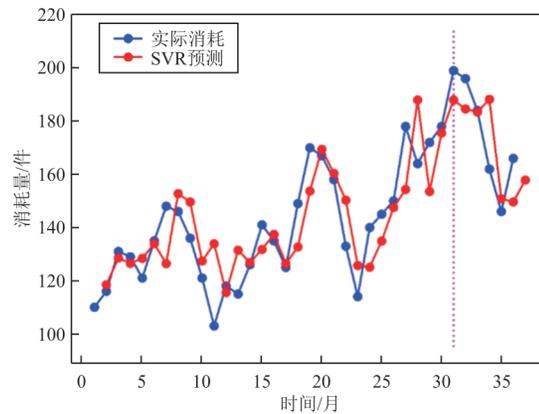


图2 实际消耗与SVR预测曲线

Fig. 2 Actual consumption and SVR forecasted curve

## 3 预测精度对比分析

将相同的数据分别输入到一次、二次和三次指数平滑模型中进行预测对比分析。

为有效评价模型拟合效果,使用以下两个指标分析不同模型的预测准确性:

(1) 平均绝对误差MAE

数学表达式为

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X'_i - X_i| \quad (1)$$

(2) 平均绝对百分比误差MAPE

数学表达式为

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X'_i - X_i}{X'_i} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: $X'_i$ 为观测值; $X_i$ 为预测值。

同样选取前31期历史消耗量作为初始训练数据,最后5期作为预测测试数据,取第1期消耗数值最为初始平滑值。一次、二次、三次指数平滑法

的平滑系数均为0.9,预测结果如图3所示。

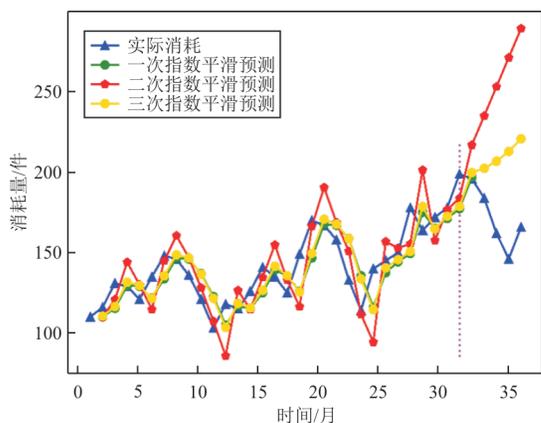


图3 实际消耗与指数平滑预测曲线

Fig. 3 Actual consumption and exponential smoothing forecast curves

通过式(1)和式(2)计算得到SVR模型的MAE和MAPE结果如表3所示。

表3 多种预测模型平均绝对误差和平均绝对百分比误差  
Table 3 Mean absolute error and mean absolute percentage error of multiple prediction models

模型/方法	MAE	MAPE/%
SVR	7.48	4.59
一次指数平滑	12.52	0.40
二次指数平滑	14.40	51.04
三次指数平滑	11.87	23.74

从图2~图3可以看出:SVR模型得到的预测曲线对实际数据的拟合程度优于指数平滑法。再结合表3可知,SVR模型的MAE=7.48,小于三种指数平滑法的11.87、14.40和12.52。由于一次指数平滑法具有只能预测一期的特点,其MAPE低于SVR模型,但SVR模型的MAPE为4.59%,显著小于二次、三次指数平滑法的51.04%和23.74%。

综上所述,SVR的预测效果好于指数平滑法,将支持向量机回归理论应用到航材消耗预测领域有助于提升航材的精细化保障水平。

## 4 结论

(1) 在某型航材样本数据较少、预测周期较短的情况下,支持向量机回归模型对消耗变化趋势的拟合效果强于指数平滑法,且具有更小的平均绝对误差和平均绝对百分比误差,该方法预测精

度优于指数平滑法。

(2) 支持向量机回归模型较为有效地解决了传统时间序列法难以解决的小样本航材预测问题,为推进装备精细化保障提供了一条可行的、有效的新途径。

## 参考文献

- [1] 冯蕴雯,陈俊宇,刘佳奇,等.民用飞机航材预测与配置管理技术综述[J].航空工程进展,2020,11(4):443-453.  
FENG Yunwen, CHEN Junyu, LIU Jiaqi, et al. Review on the civil aircraft spare parts prediction and configuration management technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 443-453. (in Chinese)
- [2] 程玉波,车建国,杨作宾,等.基于指数平滑法的装备维修器材需求量预测[J].指挥控制与仿真,2009,31(1):115-117.  
CHENG Yubo, CHE Jianguo, YANG Zuobin, et al. Requirement forecast of maintenance equipment based on exponential smoothing [J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(1): 115-117. (in Chinese)
- [3] 王斌,王勤为,董科,等.基于二次指数平滑预测的虚拟机调度方法研究[J].计算机应用研究,2017,34(3):723-726.  
WANG Bin, WANG Qinwei, DONG Ke, et al. Research on virtual machine scheduling method based on double exponential smoothing prediction [J]. Application Research of Computers, 2017, 34(3): 723-726. (in Chinese)
- [4] 夏贵进,张曦,张居梅,等.基于三次指数平滑法的光纤损耗预测研究[J].光通信技术,2014(1):90-94.  
XIA Guijin, ZHANG Xi, ZHANG Jumei, et al. Research of optical fiber loss prediction based on cubic exponential smoothing method [J]. Optical Communication Technology, 2014(1): 90-94. (in Chinese)
- [5] 毕钊,侯胜利.基于R语言SARIMA模型的航材需求预测分析[J].价值工程,2019,38(15):151-154.  
BI Zhao, HOU Shengli. Prediction and analysis of spare parts demand based on SARIMA model of R language [J]. Value Engineering, 2019, 38(15): 151-154. (in Chinese)
- [6] CROSTON J D. Forecasting and stock control for intermittent demands [J]. Operational Research Quarterly, 1972, 23(3): 289-303.
- [7] TEUNTER R H, ARIS A, SYNTETOS M, et al. Intermittent demand: linking forecasting to inventory obsolescence [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 214(3): 1174-1179.
- [8] 邱立军,付霖宇,董琪,等.基于遗传算法优化参数SVM的备件需求预测研究[J].兵器装备工程学报,2018,39(4):88-91.  
QIU Lijun, FU Linyu, DONG Qi, et al. Research on spare demand prediction based on support vector machine by gene-

- tic algorithm optimization parameter [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(4): 88-91. (in Chinese)
- [9] 陈振林, 薛永亮. 基于非参数回归的航材消耗预测模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 132-135.  
CHEN Zhenlin, XUE Yongliang. Research on prediction model of aviation material consumption based on nonparametric regression[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(6): 132-135. (in Chinese)
- [10] GUO F, DIAO J, ZHAO Q H, et al. A double-level combination approach for demand forecasting of repairable airplane spare parts based on turnover data[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 110: 92-108.
- [11] VANDER A S, BOUTE R N, SYNTETOS A A. Forecasting spare part demand with installed base information: a review [J]. International Journal of Forecasting, 2019, 35(1): 181-196.
- [12] 孙伟奇, 周斌, 史玉敏, 等. 基于LS-SVM的新机备件需求预测[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 71-73, 78.  
SUN Weiqi, ZHOU Bin, SHI Yumin, et al. Demand forecast of new machine spare parts based on LS-SVM[J]. Ordnance Automation, 2018, 37(7): 71-73, 78. (in Chinese)
- [13] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 171-178.
- [14] STITSON M O, WESTON J A E, GAMMERMAN A, et al. Theory of support vector machines: CSD-TD-96-17 [R]. Royal Holloway: University of London, 1996.
- [15] 王国胜. 支持向量机的理论与算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.  
WANG Guosheng. Research on theory and algorithm for support vector machine classifier[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007. (in Chinese)
- [16] GAO J B, GUNN S R, HARRIS C J, et al. Probabilistic framework for SVM regression and error bar estimation[J]. Machine Learning, 2002, 46(3): 71-89.
- [17] MYASNIKOVA E, SAMSONOVA A, SAMSONVA M, et al. Support vector regression applied to the determination of the developmental age of a drosophila embryo from its segmentation gene expression patterns [J]. Bioinformatics, 2002, 18(s1): 87-95.
- [18] 费成巍, 艾延廷. 基于支持向量机的航空发动机整机振动故障诊断技术研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2010, 27(2): 29-32.  
FEI Chengwei, AI Yanting. Fault diagnosis research on aero-engine whole-body vibration based on support vector machine [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2010, 27(2): 29-32. (in Chinese)
- [19] DING W D, YUAN J Q. Spike sorting based on multi-class support vector machine with super position resolution [J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2008, 46(5): 139-145.
- [20] 祁享年. 支持向量机及其应用研究综述[J]. 计算机工程, 2004, 30(10): 6-9.  
QI Xiangnian. Support vector machines and application research overview[J]. Computer Engineering, 2004, 30(10): 6-9. (in Chinese)
- [21] 江敏. 基于主成分分析和支持向量机相结合的天然气消耗量预测[J]. 科技通报, 2013, 29(12): 42-47.  
JIANG Min. Consumption prediction of natural gas based in principal component analysis and support vector machine[J]. Bulletin of Science Technology, 2013, 29(12): 42-47. (in Chinese)
- [22] 陈君实, 陈佳品. 支持向量机训练算法综述[J]. 信息与控制, 2002, 31(1): 45-50.  
CHEN Junshi, CHEN Jiapin. Support vector machine training algorithm: a review [J]. Information and Control, 2002, 31(1): 45-50. (in Chinese)
- [23] 牟廉明. 统计学习与支持向量机[J]. 内江师范学院学报, 2002, 17(6): 3-7.  
MOU Lianming. Statistics learning and support vector machine [J]. Journal of Neijiang Normal University, 2002, 17(6): 3-7. (in Chinese)
- [24] 任博, 张恒喜, 苏畅. 基于支持向量机的飞机备件需求预测[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(3): 78-80.  
REN Bo, ZHANG Hengxi, SU Chang. Requirement prediction of aircraft spare parts based on support vector machines [J]. Fire Control & Command Control, 2005, 30(3): 78-80. (in Chinese)
- [25] 段鹏飞, 周绍骑. 支持向量机在装备维修备件需求量预测中的应用[J]. 物流科技, 2010, 33(4): 67-69.  
DUAN Pengfei, ZHOU Shaoqi. Application of support vector machine in spare parts requirement forecasting [J]. Logistics Sci-Tech, 2010, 33(4): 67-69. (in Chinese)
- [26] WU C H, HO J M, LEE D T. Travel-time prediction with support vector regression [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(4): 276-281.
- [27] 刘旭, 周丽华, 朱臣. 基于PCA-SVM的航材需求预测方法研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(7): 105-109.  
LIU Xu, ZHOU Lihua, ZHU Chen. Prediction of air material requirement based on PCA-SVM [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(7): 105-109. (in Chinese)

#### 作者简介:

曾浩然(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机运行支持,航材规划管理。

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

路成(1989—),男,博士。主要研究方向:可靠性分析、维修性工程。

潘维煌(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:飞机运行支持,航材规划管理。

(编辑:丛艳娟)