

民航飞机季节性故障研究

张银波

中国民航大学航空工程学院，天津

收稿日期：2025年10月10日；录用日期：2025年10月29日；发布日期：2025年11月10日

摘 要

采用沈阳维修基地MD90机队的故障样本数据构造时间序列，首先采用建立组合模型的方法对序列进行分析，其次建立包含循环项和随机项的飞机故障预测组合模型，最后根据模型进行了预测分析。

关键词

MD90，组合模型，季节性故障

Research on the Seasonal Fault of the Civil Aircraft

Yinbo Zhang

School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin

Received: October 10, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

This paper constructs a time series model according to the MD90 fleet failure data in Shenyang Aircraft Maintenance Base. First, the series is studied by building the combined model. Secondly, the combined model including recycling and stochastic component is established to forecast failure. Lastly, the prediction and analysis are completed according to the model.

Keywords

MD90, Combined Model, Seasonal Fault



1. 引言

随着我国民用航空运输事业的高速发展和民用航空器适航管理的不断深入，国内维修单位及航空公司的工程管理部门都越来越意识到研究飞机故障产生机理以及其影响因素重要性，特别是某一时段或某一季节的频发故障的预测，以便民航维修机务工作提前采取有效措施，从而避免故障的多发性、频发性，提高航班的正常率，降低延误率，从而提高航空维修企业的工程维修管理水平，增加航空维修企业的经济效益。

我国民航维修普遍停留在定性分析、全员动员而进行故障的预防方式，没有真正实现采用故障的定量、定性相结合排故理念来开展故障预测。因此在国内有必要对故障发生的可靠性数据进行分析，研究故障的发生机理，从而提出基于时间序列预测法进行多发、频发故障的预测，进而提出防范的方法及措施角度开展研究工作[1] [2]。

2. 故障数据及统计学方法

2.1. 数据来源及处理

故障数据来源于南方航空股份有限公司沈阳维修基地航线故障数据。故障数据涉及的机型为 MD90 飞机，此种型号飞机为国内航线的主力机型，具有很强的代表性。数据收集后，首先进行数据的预处理，按时间区段进行统一化处理，选取 1997 年至 2006 年的数据并将数据进行合成。数据经过核对、补漏，从而保证数据的准确和完整。样本序列时间段选取 1997 年 1 月至 2006 年 12 月，2007 年 12 个月的观测值留出，作为评价预测精度的参照对象，表 1 给出了处理后平均单架次飞机 1997~2006 年故障数统计表，数据来源于整个机队的空调系统，图 1 给出了飞机故障分布折线图。

Table 1. Statistics of average failures per flight from 1997 to 2006 after treatment

表 1. 处理后平均单架次飞机 1997~2006 年故障数统计表

	1	2	3	4	5	6
1997:01-06	46.16667	31.16667	32.83333	35.16667	52.00000	46.50000
1997:07-12	37.66667	37.66667	31.16667	30.16667	31.16667	31.83333
1998:01-06	29.83333	27.00000	39.00000	30.83333	33.00000	37.16667
1998:07-12	40.33333	43.83333	37.66667	36.00000	35.50000	34.83333
1999:01-06	24.00000	18.00000	28.83333	28.83333	34.66667	38.00000
1999:07-12	38.16667	45.50000	35.33333	35.33333	27.83333	24.33333
2000:01-06	23.16667	20.16667	27.66667	24.16667	29.50000	29.00000
2000:07-12	40.16667	45.16667	36.66667	34.16667	39.50000	36.66667
2001:01-06	35.83333	34.33333	39.33333	43.50000	55.83333	51.83333
2001:07-12	52.66667	56.83333	63.16667	56.33333	50.33333	55.00000
2002:01-06	54.50000	47.33333	46.83333	50.50000	54.83333	62.00000

续表

2002:07-12	62.83333	57.16667	55.83333	55.50000	56.83333	53.83333
2003:01-06	50.00000	49.83333	62.33333	60.16667	59.50000	60.50000
2003:07-12	59.83333	71.50000	52.16667	47.33333	45.50000	51.00000
2004:01-06	48.00000	47.50000	47.33333	51.16667	50.00000	51.16667
2004:07-12	59.00000	56.16667	46.33333	38.33333	39.83333	48.33333
2005:01-06	47.50000	44.16667	46.33333	39.83333	43.16667	39.66667
2005:07-12	49.50000	44.66667	41.00000	31.83333	32.83333	33.50000
2006:01-06	33.33333	31.66667	37.66667	33.33333	33.16667	38.66667
2006:07-12	41.33333	39.83333	39.50000	36.00000	36.83333	35.66667

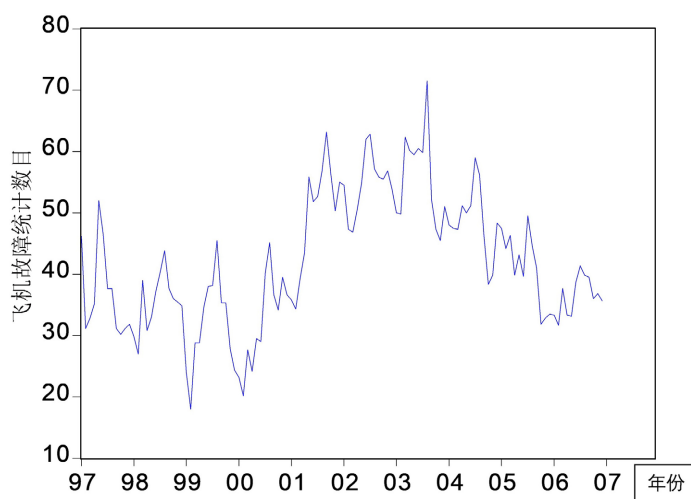


Figure 1. MD90 single flight failure distribution line chart

图 1. MD90 单架次飞机故障分布折线图

2.2. 统计学方法

运用 EXCEL2003 及 Eviews 对 1997 年 1 月至 2007 年 12 月 MD90 机队单架飞机故障数据进行整理分析, 统计出单架飞机每月发生故障数作为时间序列, 观察飞机故障发展趋势, 应用时间序列分析方法, 建立数学模型, 并对预测值和实际值比较。

3. 理论与模型介绍

在实际情况中, 绝大部分序列都是非平稳的, 同样, 飞机故障序列也是一个非平稳时间序列, 目前对非平稳序列的分析各种分析方法非常多。本文采用建立组合模型的方法对该序列进行分析, 它是从系统分析的观点出发, 用确定性模型描述序列中确定性因素的变动规律, 用 ARMA 模型刻画序列中随机因素的一般规律性, 从而建立起确定性加随机的组合模型。在组合模型中既有确定部分, 又有随机部分, 因而用以描述某些类型的非平稳过程, 往往能够得到满意的效果, 建立组合模型的方法分为以下三个步骤[3] [4]:

- (1) 根据时间序列特征, 用一定函数形式拟合序列的确定性组成部分, 直到剩余序列平稳为止;
- (2) 对剩余序列拟合合适的 ARMA 模型;
- (3) 将分别拟合的确定性模型和 ARMA 模型结合起来并以其参数作为初始值, 用最小二乘法估计模

型的参数，得到最终的组合模型。

从图 1 可看出，序列具有较强的循环变动和季节变动，而长期趋势变动表现为停留在某一水平线上。通过图 1 可以清晰看出，每年 6~7 月份，故障数会出现峰值，而在每年的 12 月份左右，故障数目相对较少，这充分反映出序列的季节变动。同时也可看出序列有类似三角函数的超过一年的周期波动，即存在循环波动。最后，观察序列无异常点，故不存在突然变动，但存在随机波动。通过以上分析，本文采用了下面的建模过程：

- (1) 季节调整：消除季节因素，得到新变量 ASA 和季节因子 f 。
- (2) 对季节调整后的新变量 ASA 建立组合模型。
 - ① 循环性拟合：消除季节因素后的序列仍有明显的循环波动，初步判断可以用三角函数拟合；
 - ② ARMA 模型的建立：消除循环性波动后的序列经过平稳性检验，如果是平稳序列就可以用 ARMA 模型进行建模；
 - ③ 包含循环项和随机项的组合模型：前面已经分析过，季节调整后的时间序列包含循环项和随机项，循环项使用余弦函数拟合，随机项采用 ARMA 模型拟合，模型的方程如下： $X_t = \mu_t + Y_t$ ，其中 μ_t 为循环项，采用余弦函数拟合， Y_t 为随机项。
- (3) 建立含季节项的最终模型：上述组合模型的建立是针对季节调整后的序列进行拟合的，如果要对原始序列拟合，必须考虑季节因子的影响，在上面季节调整过程中，已经计算出季节因子，所以求原始序列的拟合方程，只需要把上述拟合方程和季节因子叠加在一起即可。

4. 实例分析

4.1. 季节调整

根据 Eviews 绘制的折线图，可见原始序列(记为 A)无整体趋势，但存在季节变动和周期变动，应用 Eviews 得到序列的自相关图和偏自相关图，可以发现自相关图存在很强的季节性，故首先对原序列进行季节调整可以看到序列是非平稳的，为了消除序列趋势，首先对序列进行季节调整(图 2)，得到季节调整因子 f ，调整后的序列命名为 ASA。

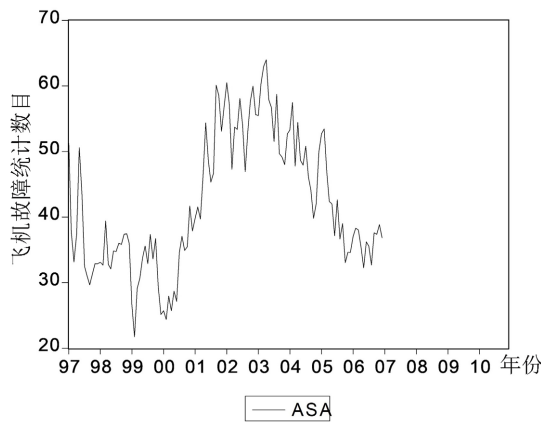


Figure 2. Line chart of the new variable ASA after eliminating seasonal factors from variable A
图 2. 由变量 A 消除季节因素后的新变量 ASA 的折线图

4.2. 循环项拟合及 ARMA 模型识别

消除季节因素后的序列 ASA 仍有明显的循环波动，初步判断可以用三角函数拟合，本文采用余弦函

数，其表达式为：

$$ASA = c(0) + c(1) * \cos(c(2) * t + c(3)) \quad (1)$$

其中： $c(0)$ 为截距项， $c(1)$ 为幅值项， $c(2)$ 为角速度项， $c(3)$ 为初相位项。

对于变量 ASA 采用余弦函数拟合具有较好的效果，R-squared 系数为 0.76，回归方程的系数 $c(0)$ 、 $c(1)$ 、 $c(2)$ 、 $c(3)$ 所对应的 p 值为零，说明方程系数显著不为 0。另外，通过余弦函数对变量 ASA 进行循环项拟合，可以得到相应的残差列(图 3)，并命名为 ASA_cos。

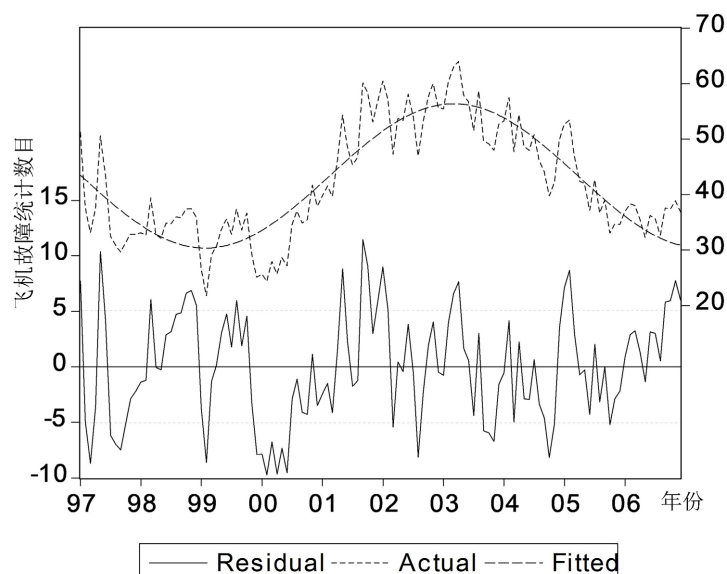


Figure 3. Variable ASA fitting results and residual curve

图 3. 变量 ASA 拟合结果和残差曲线图

然后对该序列进行平稳性检验，如果是平稳序列，可直接使用 ARMA 模型进行拟合。在 Eviews 中，常用的平稳性检验方法为 ADF 检验，检验结果中 ADF 值为 -3.137431，其值小于 5% 置信水平对应的临界值 -2.8865，因此可以判断序列 “ASA_cos” 为平稳序列。通过 Eviews 得到自相关函数图和偏自相关函数图，发现序列自相关函数图有拖尾现象，偏自相关函数图 4 阶截尾，所以选取 4 阶自回归模型。在 EViews 中，经过拟合后，因为 C、AR(2)、AR(3) 没有显著性，所以予以剔除，AR(2)、AR(4) 分别为 0 和 0.08，虽然 AR(4) 项为 0.08，相对于 0.05 的置信水平并无显著性，但其值并不是特别大，而且经过后面的组合模型的建立，在模型中保留 AR(4) 项后，最终的组合模型的估计效果会更好[5] [6]。

4.3. 组合模型建立

前面已经分析过，季节调整后序列 ASA 包含循环项和随机项，循环项使用余弦函数拟合，随机项采用 AR(1)，AR(4) 自回归模型拟合，模型的方程如下：

$$X_t = \mu_t + Y_t \quad (2)$$

其中 μ_t 为循环项，采用余弦函数拟合， Y_t 为随机项，采用 AR(1)，AR(4) 模型拟合。

使用 Eviews 进行方程估计，最终得到下列估计方程，残差见图 4。

$$ASA = f(t) + 0.6649 * [ASA(-1) - f(t-1)] + 0.2902 * [ASA(-4) - f(t-4)] \quad (3)$$

其中： $f(t) = 42.7664 + 2.5618 * \cos(-0.4646 * t + 1.8838)$ ， t 是以月份为单位的时间， $f(t)$ 用来描述序列 ASA 中循环变动的确定性部分。

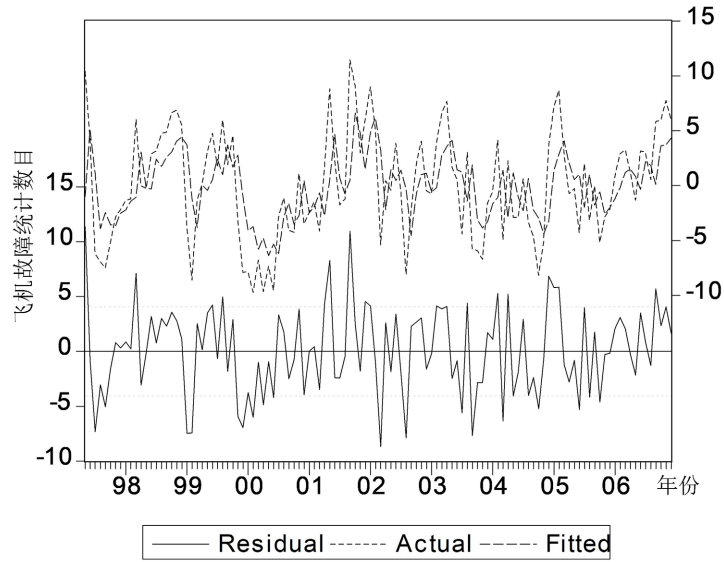


Figure 4. Diagram of the residual results of the sequence ASA_cos
图 4. 序列 ASA_cos 残差结果示意图

使用 Eviews 中的 “correlogram Q statistics” 功能，可判断残差是否独立，计算结果如下：

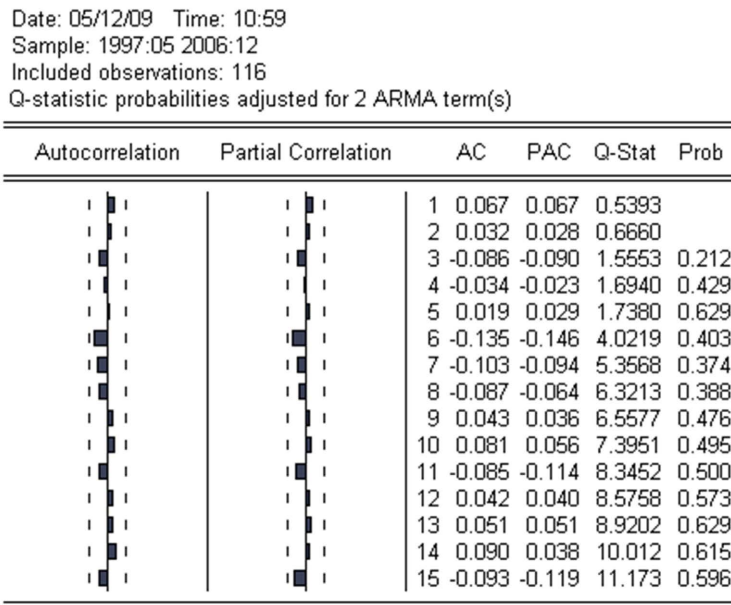


Figure 5. Schematic diagram of residual correlation calculation results
图 5. 残差相关性计算结果示意图

从图 5 中可以看出，残差序列白噪声检验的相伴概率 Prob 均远大于 5%，说明残差满足独立性假设，模型拟合较好。

4.4. 含季节项的最终模型

上述采用组合模型只是针对序列 ASA 的拟合, 如果要对原始序列 A 拟合, 必须考虑季节因子的影响, 在上面季节调整过程中, 已经计算出季节因子, 由于在季节调整时, 采用的是乘法模型, 所以序列 A 的拟合方程可表示为:

$$A = ASA * f \quad (4)$$

其中, $ASA = f(t) + 0.6649 * [ASA(-1) - f(t-1)] + 0.2902 * [ASA(-4) - f(t-4)]$, 图 6 给出了原序列 A (实线) 和预测序列 AF (虚线) 的计算结果, 说明方程拟合效果较好。

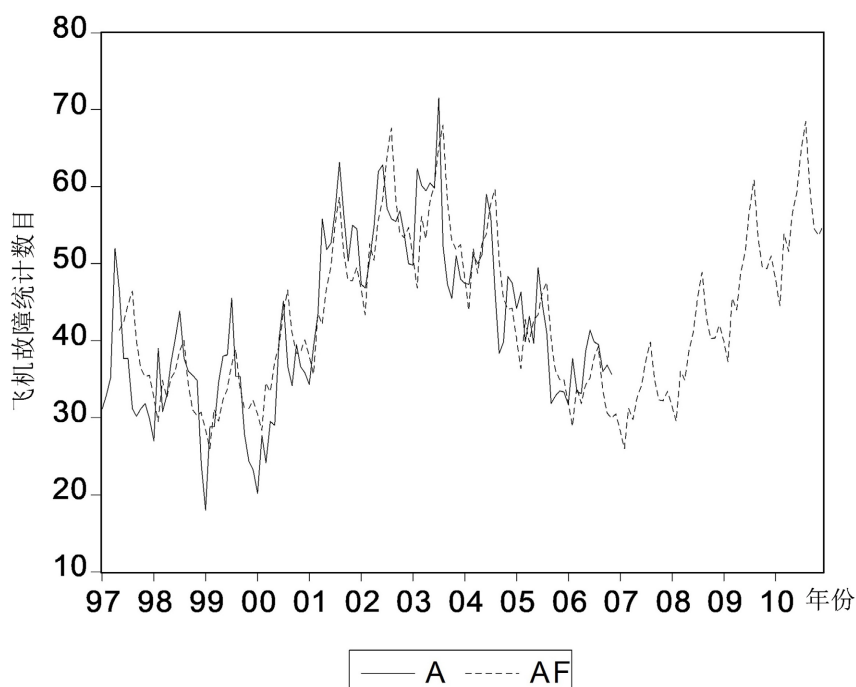


Figure 6. Schematic diagram of the comparison results of sequences A and AF

图 6. 序列 A 、 AF 比较结果示意图

4.5. 预测

利用上述组合模型对 2007 年 1 月至 2007 年 12 月的单架 MD90 飞机月发故障数进行预测, 预测结果如表 2 所示, 从表 2 可看出预测效果较好。

Table 2. MD90 single aircraft monthly failure prediction results in 2007

表 2. MD90 单架飞机 2007 年月发故障预测结果

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
实际值	47.3	46.8	50.5	54.8	62	62.8	57.1	55.8	55.5	56.8	53.8	50
预测值	51.0	46.6	55.1	52.6	57.7	60.1	65.4	68.8	59.5	54.7	53.9	55.1

5. 结束语

整体民航飞机故障曲线呈现具有以年为周期的变化曲线, 并且呈现波峰和波谷交替状态, 一般在每

年 7、8 月份出现大的波峰；另外两次小的波峰出现在 3、12 月份，出现的偏差约为 ± 15 天左右；通过对收集整理的十年故障数据研究分析，整体故障趋势呈现以 8 年左右为周期的波浪型曲线，在大的波浪曲线中会显示每年呈现季节性变化的跳动。通过对曲线的分析，同时结合飞机的故障统计，发现每年出现的与季节性正相关的大的波峰情况与飞机一些系统在雨雪季节的特定气候相关，飞机的这些系统包括：空调系统、电子电气系统等，这些系统在该季节频繁出现故障，从而带来相对较高的波峰值。不同季节所出现的环境因素对飞机的一些敏感系统会产生一定的不利影响，从而导致一系列故障的产生，因此换季时期也是故障多发期。做好换季工作，针对不同季节的多发故障准备相应的维修预案采取预防性维护，可以避免或消除大量的故障隐患，从而提高飞机的安全性能。

参考文献

- [1] 中国民用航空局安全技术中心维修工程室. 中国民航维修行业能力与市场发展报告 2008 [R]. 北京: 中国民用航空局, 2008.
- [2] 来关军, 潘星. 我国民航维修业现状分析与发展趋势研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(1): 14-17.
- [3] 卢二坡. 我国能源需求预测模型研究[J]. 统计与决策, 2005(20): 31-33.
- [4] 杨位钦. 时间序列分析与动态数据建模[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1986.
- [5] 王积瑾. 应用统计学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [6] 易丹辉. 数据分析与 Eviews 应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.