

文章编号:1674-8190(2022)02-078-07

# 飞机前轮转弯系统潜在故障预警方法研究

黄世杰<sup>1</sup>, 蔡景<sup>1</sup>, 何盛<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

(2. 中国东方航空江苏有限公司 飞机维修部, 南京 211113)

**摘要:** 在现有计划维修体系下, 飞机前轮转弯系统的故障具有隐蔽性。通过挖掘航后快速存取记录器(QAR)数据, 开展前轮转弯系统潜在故障预警方法研究。首先, 在分析前轮转弯系统故障模式的基础上, 筛选与前轮转弯系统故障相关的QAR监测参数并进行相应的处理; 其次, 基于前轮转弯系统的正常和故障案例, 结合前轮转弯的操作原理, 采用皮尔逊(Pearson)相关性系数分析方法, 确定指令值和实际值之间存在相关性低的潜在故障特征, 实现对潜在故障的预警; 最后, 利用前轮转弯实际案例进行验证。结果表明: 基于QAR数据的前轮转弯潜在故障预警方法是有效的, 可以为前轮转弯系统视情维修策略的制定提供参考。

**关键词:** 前轮转弯; 快速存取记录器; 故障预警; Pearson相关性系数; 潜在故障

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Potential Fault Early Warning Method of Nose Wheel Steering System of Aircraft

HUANG Shijie<sup>1</sup>, CAI Jing<sup>1</sup>, HE Sheng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Aircraft Maintenance Department, China Eastern Airlines Jiangsu Ltd., Nanjing 211113, China)

**Abstract:** As the fault of Nose Wheel Steering (NWS) system is of concealment under the existing planned maintenance system, the potential fault early warning method of NWS is studied by mining the post flight Quick Access Recorder(QAR) data. Firstly, on the basis of analyzing the failure mode of NWS, the monitoring QAR parameters relating to the NWS failure are selected and handled. Secondly, based on the normal and faulty cases of NWS, combined with the operational principle of NWS, the Pearson correlation coefficient analysis method is used to determine the potential failure characteristics of the low correlation between the command value and actual value, so as to realize the detection of potential failure. Finally, the actual case of NWS is used to verify the effectiveness of the potential fault warning method based on QAR data, which provides a reference for the formulation of condition based on maintenance strategy of NWS.

**Key words:** nose wheel steering; QAR; fault early warning; Pearson correlation coefficient; potential fault

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-08-18

通信作者: 蔡景, caijing@nuaa.edu.cn

引用格式: 黄世杰, 蔡景, 何盛. 飞机前轮转弯系统潜在故障预警方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 78-84, 106.

HUANG Shijie, CAI Jing, HE Sheng. Research on potential fault early warning method of nose wheel steering system of aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 78-84, 106. (in Chinese)

## 0 引言

在飞机的地面运行过程中,机组要控制飞机在地面的滑行,将飞机停放在目标位置。在此过程中飞机转弯发挥着关键的作用。飞机前轮转弯系统不仅可以控制飞机在地面的灵活滑行,而且一定程度上还可以避免轮胎磨损及局部高温,是现代民用飞机和大多数军用飞机实现地面方向控制的常用方法。飞机在地面滑行时如果前轮转弯失效,轻则导致航班延误,飞机停留在跑道上,影响其他飞机的正常起飞和降落;重则导致轮胎严重磨损甚至爆破,威胁机上人员的安全。为了预防飞机前轮转弯系统出现故障,现有的飞机计划维修体系对前轮转弯系统采用定期检查的方法,实践证明,该方法虽然可以提前发现诸如前轮磨损、胎压差值较大等外部故障,但对于管路渗漏、活门故障等潜在故障基本无法提前识别。其原因是这类潜在故障具有很强的隐蔽性,不会在短时间内直接影响功能的使用。但当潜在故障累积到一定程度时,就会导致“转弯困难或失效”,这种故障由于在定期检查中基本不能被提前检测到故障征兆,而往往被误认为突发随机故障。但实际上,根据飞机前轮转弯系统的结构和原理<sup>[1-2]</sup>可知,转弯困难或失效故障模式具有渐变式的特点。因此,可以通过挖掘快速存取记录器(Quick Access Recorder,简称QAR)中记录的数据,找到反映转弯失效故障征兆的特征参数,实现对故障的提前识别。

国内针对飞机前轮转弯系统开展了一定的研究。例如,梁建平<sup>[3]</sup>和孙贵杨<sup>[4]</sup>针对波音737NG飞机前轮跑偏故障分析了其发生的原因、形式并总结了排除该故障的常规方法;金磊<sup>[5]</sup>通过对某型飞机“漂移”故障机理进行分析,提出了应对漂移故障的改进措施;罗刚<sup>[6]</sup>通过对A320飞机的原理进行介绍,针对A320滑行中非指令性方向偏转的故障,总结了前轮转弯系统排故经验;薛海红等<sup>[7]</sup>以某型飞机的前轮转弯系统为例,基于故障模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis,简称FMEA)建立了贝叶斯网络模型,可以有效融合多源信息对前轮转弯系统进行故障诊断;Dai Zhiyong等<sup>[8]</sup>针对飞机ABS系统提出了一种基于模型和灰色关联分析相结合的诊断策略,经验证拥有相对准确的诊断准确度;Liu Kuijian等<sup>[9]</sup>针对起落

架收放机构提出了一种基于深度学习模型的多源信号特征融合方法,具有较好的特征融合能力和较高的诊断精度。可见,目前国内针对飞机前轮转弯系统故障的研究都集中在故障诊断方面,未见有关故障预警方面的研究报道。国外针对起落架收放和刹车系统故障诊断和预测有较多研究,但未找到关于前轮转弯系统故障诊断的相关研究。

飞机QAR数据在故障预测方面已有广泛的应用<sup>[10-13]</sup>。因此,本文针对飞机前轮转弯系统在现有计划维修体系下故障具有隐蔽性的特点,通过挖掘QAR数据,研究飞机前轮转弯系统“转弯困难或失效”故障的潜在特征,实现对前轮转弯系统关键潜在故障的提前预警。

## 1 特征参数提取

### 1.1 QAR参数获取

QAR是飞机机载记录系统中的快速存储装置,可实现飞行数据的便利存取。QAR记录的参数在飞机落地后由地面人员将数据拷贝或者通过无线快速存取记录器(Wireless Quick Access Recorder,简称WQAR)下传,经过专门的译码软件处理后,为飞机性能分析、系统状态监控、故障诊断及飞行品质监控提供数据支持。

根据飞机前轮转弯系统的工作原理,“转弯困难或失效”故障的预警主要跟表征飞机转弯角度的参数有关。QAR记录了许多与前轮转弯相关的参数,结合其采样原理本文选择以下特征参数(如表1所示)分析“转弯困难或失效”故障的潜在表现。

表1 前轮转弯参数列表  
Table 1 List of front wheel turning parameters

参数	含义
NWS_ORDER_ANG/(°)	前轮转弯指令值
NWS_WHEEL_ANG/(°)	前轮转弯实际角度
BSCU1_EGD	BSCU1接通状态
BSCU2_EGD	BSCU2接通状态

### 1.2 前轮转弯的数据采集特点

根据飞机前轮转弯系统的结构和原理,并分析其典型故障及原因<sup>[14]</sup>发现:管路渗漏、安全活门故障、缺少润滑等可能导致前轮转弯指令值与实际值出现延后及偏差,从而造成转弯困难或失效。

因此,选取前轮转弯指令参数和实际角度参数,通过分析正常情况和故障情况下两个参数之间的相关性特征,建立飞机前轮转弯系统的故障预警方法。通过分析 QAR 数据发现:机载的两套刹车和转弯控制组件(Braking/Steering Control Unit,简称 BSCU)中,当 BSCU2 处于接通状态时指令值恒为 0,这与数据采集的来源有关,因此 BSCU1 处于未接通时记录的数据并非前轮转弯的实际值。一般情况下,1 次航班中 BSCU1 和 BSCU2 各出现 1 次持续一段时间的接通,如果出现二者多次交替接通的情况,为了保证所分析数据的连续性,只需要选择 BSCU 1 接通时持续时间最长的一段数据进行分析即可。

### 1.3 数据预处理

原始航班数据经过译码后导出的 QAR 数据包含了表头、时间列等与分析无关的信息,而且不同参数由于采样频率不同,会导致某些参数存在缺省的情况,因此要对译码后的 QAR 数据进行预处理。

参数 NWS\_ORDER\_ANG 和 NWS\_WHEEL\_ANG 的采样频率为 4 Hz, BSCU1\_EGD 和 BSCU2\_EGD 的采样频率为 1 Hz,故二者存在缺省。该缺省值由于记录的并非数据而是 BSCU 的接通状态,当存在 BSCU 切换时,采用上一采样值填补的方法最多影响 3 条(即 0.75 s)数据,且查看大量航班数据发现,一个航班中 BSCU1 和 BSCU2 的切换最多出现 3 次,这对于整个航班动辄上万条数据来说是可以忽略的,故选择该缺省值填补方法处理缺省数据。处理后的部分数据如表 2 所示。

表 2 部分 QAR 数据展示  
Table 2 Part of QAR data display

NWS_ORDER_ANG/ (°)	NWS_WHEEL_ANG/(°)	BSCU1_EGD	BSCU2_EGD
0	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-0.38	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-0.50	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-0.75	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.00	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.00	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.00	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.00	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.00	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.13	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED
-1.13	0.13	ENGAGED	NOT ENGAGED

## 2 基于 Pearson 相关性系数的故障预警方法

通过分析“转弯困难或失效”故障案例,发现该类故障存在一个共同的故障表现:驾驶员的转弯指令得不到准确地执行,即驾驶员的指令值与实际执行值之间存在不一致。不一致可以从两个方面考虑:(1)指令值与实际值存在漂移(指令延后);(2)指令值与实际值相关性低。

### 2.1 QAR 数据初始分析

根据有故障航班数据,绘制指令值和实际值的变化图,如图 1 所示,可以看出:故障航班中存在指令值和实际角度值明显偏离的情况。

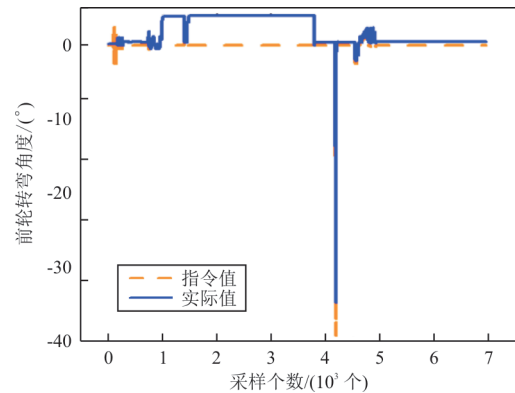
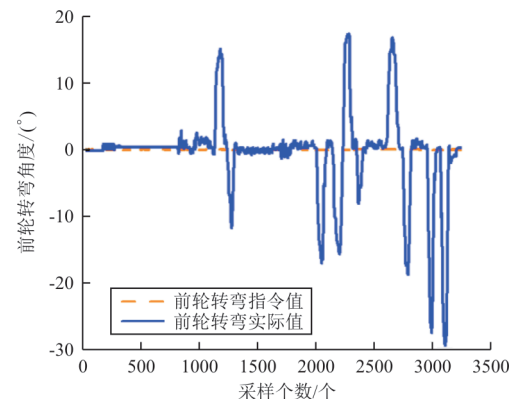


图 1 故障航班中所研究参数的变化情况

Fig. 1 Changes of the parameters studied in the faulty flight

绘制正常航班对应参数变化图,如图 2 所示,可以看出:即使正常航班也存在指令值和实际值指令漂移较大的情况,故“指令值与实际值指令漂移较大”不能作为故障的征兆,可通过分析指令值与实际值之间的相关性特点,得到故障的特征。



(a) 正常航班 1

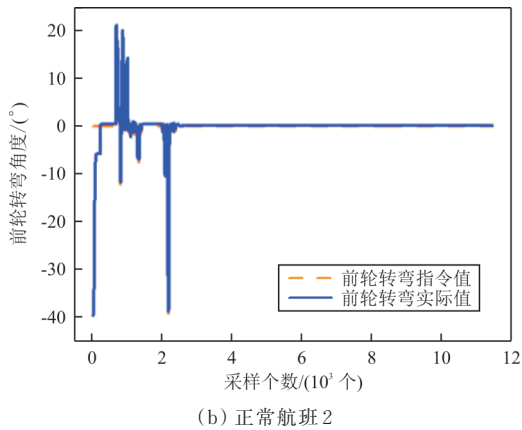


图2 正常航班中所研究参数的变化情况

Fig. 2 Changes of parameters studied in normal flight

## 2.2 基于指令值与实际值相关性的预警分析

### 2.2.1 Pearson 相关性系数

统计学中有三种常见的相关性系数: Pearson 积差相关性系数用于量度两个变量  $X$  和  $Y$  之间的线性相关; Spearman 秩相关性系数利用两变量的秩次大小作线性相关分析, 但效能不如前者; Kendall 秩相关性系数适用于两个变量均为有序分类的情况。

Pearson 相关性系数是英国统计学家 Pearson 于 20 世纪提出的一种用于度量两个变量  $X$  和  $Y$  之间的相关(线性相关)程度的方法, 可以用来进行特征选择、模型预测、寻找最优解等<sup>[15-21]</sup>, 具有广泛的应用领域。本文选择 Pearson 相关性系数进行分析。

假设两个变量  $X$ 、 $Y$  分别是一个数集, 则  $X$  和  $Y$  之间的 Pearson 相关性系数可以通过式(1)进行计算。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{X,Y}$  为  $X$ 、 $Y$  的 Pearson 相关性系数;  $E(X)$  和  $\mu_X$  均为  $X$  的期望值;  $\sigma_X$  为  $X$  的方差;  $E(Y)$  和  $\mu_Y$  均

为  $Y$  的期望值;  $\sigma_Y$  为  $Y$  的方差;  $\text{cov}(X,Y)$  为  $X$ 、 $Y$  的协方差。

计算所得的相关性系数的绝对值越大, 相关性越强。相关性系数越接近 1 或 -1, 相关性越强; 相关性系数越接近 0 则相关性越弱。当相关性系数为 0 时,  $X$  和  $Y$  两变量无关系; 当一个的值增大(减小), 另一个值增大(减小), 两个变量为正相关, 相关性系数在 0 与 1 之间; 当一个的值增大(减小), 另一个值减小(增大), 两个变量为负相关, 相关性系数在 -1 与 0 之间。

### 2.2.2 相关性分析

根据历史数据绘制指令值和实际值的关系图, 如图 3 所示, 可以看出: 二者基本呈线性关系, 符合 Pearson 相关性系数的使用条件。

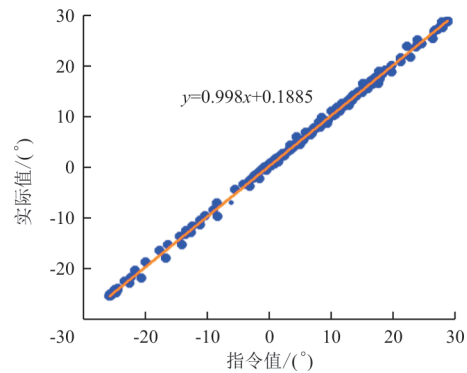


图3 指令值和实际值关系变化图

Fig. 3 Diagram of the change of the relation between instruction value and actual value

在前轮转弯过程中, 如果转弯指令发出后, 2 s 内系统没有做出相应的动作, 飞行员可以明显感知到存在指令延后, 因此对于指令延后的分析范围设定为 2 s。由于指令值和实际值的采样频率为 4 Hz, 2 s 对应 8 个数据位, 可以对实际值延后 0~7 个数据位分别与指令值进行相关性分析。

将指令值和实际值作为 Pearson 相关性分析方法的输入数据集。首先对总计 106 个连续无故障航班的 QAR 数据进行相关性分析计算, 得到的指令值和延后不同位数的实际值的相关性系数如表 3 所示。



表3 连续正常航班的相关性分析结果  
Table 3 Correlation analysis results of continuous normal flights

航班序号	Pearson相关性分析结果							
	数据后延0位	数据后延1位	数据后延2位	数据后延3位	数据后延4位	数据后延5位	数据后延6位	数据后延7位
航班001	<b>0.998 121</b>	0.998 018	0.994 840	0.989 967	0.983 732	0.976 233	0.967 625	0.957 981
航班002	<b>0.999 232</b>	0.999 065	0.996 561	0.992 555	0.987 342	0.981 001	0.973 653	0.965 298
航班003	<b>0.996 576</b>	0.996 394	0.993 708	0.989 443	0.983 816	0.977 013	0.969 221	0.960 452
航班004	<b>0.999 385</b>	0.999 246	0.995 738	0.989 887	0.982 165	0.973 017	0.962 753	0.951 469
航班005	<b>0.997 929</b>	0.997 769	0.993 360	0.986 868	0.978 919	0.969 484	0.958 635	0.946 428
航班006	0.997 691	<b>0.997 711</b>	0.994 370	0.988 516	0.980 807	0.971 474	0.960 850	0.948 956
...	...	...	...	...	...	...	...	...
航班103	<b>0.999 369</b>	0.999 302	0.996 962	0.992 890	0.987 536	0.981 059	0.973 668	0.965 415
航班104	<b>0.994 629</b>	0.994 549	0.991 193	0.985 733	0.978 742	0.970 239	0.960 593	0.950 098
航班105	<b>0.999 148</b>	0.999 085	0.995 967	0.990 882	0.984 542	0.977 113	0.968 871	0.960 013
航班106	<b>0.996 692</b>	0.996 652	0.993 135	0.987 475	0.980 313	0.971 685	0.961 689	0.950 090

注:表中加粗数据为该行最大值。

从表3可以看出:大多数情况下,无延后的实际值与指令值之间的相关性系数最大,少数情况下,1~2个数据位延后的实际值与指令值之间的相关性系数最大。表明前轮转弯中数据延后的现象并不明显或者可以认为指令延后的现象可以忽略;另外,各个正常航班对应的相关性系数均在0.9以上,不同延后下的相关性系数变化范围在

0.05以内,表明指令值与实际值之间具有高度的相关性,符合前轮转弯系统正常工作状态的实际情况。

在故障案例中,分析故障航班的QAR数据与该次航班之前的连续11个航班的数据的相关性,分析结果如表4所示。

表4 存在故障的连续航班相关性分析结果  
Table 4 Correlation analysis results of continuous flights with faults

航班序号	Pearson相关性分析结果							
	数据后延0位	数据后延1位	数据后延2位	数据后延3位	数据后延4位	数据后延5位	数据后延6位	数据后延7位
航班01	0.997 574	<b>0.997 805</b>	0.994 703	0.989 146	0.981 919	0.973 269	0.963 405	0.952 364
航班02	0.997 115	<b>0.997 276</b>	0.994 905	0.990 649	0.984 970	0.977 990	0.969 965	0.960 887
航班03	0.997 802	<b>0.998 233</b>	0.995 717	0.991 083	0.984 849	0.977 172	0.968 283	0.958 284
航班04	0.995 532	<b>0.996 063</b>	0.992 533	0.986 904	0.980 011	0.971 982	0.963 080	0.953 175
航班05	0.993 876	<b>0.994 395</b>	0.991 107	0.985 010	0.977 000	0.967 311	0.956 208	0.943 884
航班06	0.797 743	0.802 580	<b>0.803 747</b>	0.801 758	0.797 235	0.790 491	0.782 085	0.772 216
航班07	0.998 331	<b>0.998 784</b>	0.996 696	0.992 786	0.987 607	0.981 280	0.974 030	0.965 662
航班08	0.939 385	<b>0.939 888</b>	0.937 737	0.933 676	0.928 325	0.921 847	0.914 470	0.906 229
航班09	0.997 487	<b>0.998 572</b>	0.996 876	0.992 987	0.987 469	0.980 511	0.972 556	0.963 772
航班10	0.995 744	<b>0.996 346</b>	0.991 130	0.983 292	0.973 960	0.963 492	0.952 198	0.940 132
航班11 (故障)	0.559 264	<b>0.570 724</b>	0.568 280	0.551 284	0.522 223	0.482 304	0.435 388	0.383 971

从表 4 可以看出:相关性系数最大时数据延后位数基本为 1 个,但值与不延后时相差极小,可认为数据延后现象并不存在;故障前相关性系数基本在 0.8 以上,其中延后不同位数的相关性系数变化范围值均在 0.06 以内,且在靠近故障航班时值明显变大。对于有故障航班,系数值低至 0.55 左右,表明指令值和实际值相关性低,出现了指令偏移;且延后不同位数的相关性系数变化范围为 0.18,与正常航班表现出明显差别,表明数据的连续性也受到了影响。

11 个航班延后 0~7 位数据相关性系数变化区间的长度如图 4 所示。

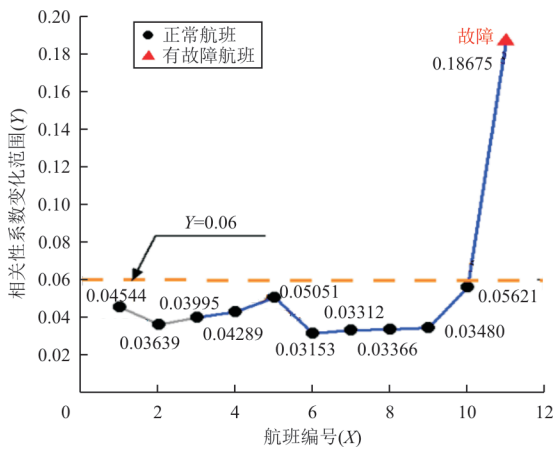


图 4 11 个航班的相关性系数变化区间长度图

Fig. 4 Variation length of correlation coefficient of 11 flights

综合上述分析结果,可得:

(1) 当某航班指令值和实际值的相关性系数较低(低于 0.8)时,表明前轮转弯系统可能存在潜在故障,需要在飞行中给予一定的关注;当连续出现较低情况时,极有可能出现了潜在故障,需要停飞检查。

(2) 当某航班指令值和实际值的相关性系数较低时,且将实际值延后 0~7 位与指令值的相关性系数变化范围超过 0.1(保守估计),表明二者之间的连续性受到影响,出现指令偏移,极有可能存在潜在故障,需要对前轮转弯系统进行检查以免影响飞行安全。

需要注意的是,上述结论是基于整个航班数据得到的,且相关性系数计算的准确度与数据量呈正相关的关系,飞行前期由于数据量较少可能会产生虚警,因此采用该方法实现对前轮转弯系统的实时监控尚具有一定的挑战性。

### 3 实例验证

以某航空公司相同机型的飞行数据为例进行验证。由于前轮转弯系统的故障很少,为了验证“转弯困难或失效”潜在故障与“指令值与实际值”相关性系数之间的关联性,在该飞机的前轮转弯问题进行定期维修前,收集和整理该飞机最近 13 个航班的 QAR 数据,对其指令值和实际值作相关性进行分析,结果如表 5 所示。

表 5 用于验证的连续航班的相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results of consecutive flights for validation

航班序号	Pearson 相关性分析结果							
	数据后延 0 位	数据后延 1 位	数据后延 2 位	数据后延 3 位	数据后延 4 位	数据后延 5 位	数据后延 6 位	数据后延 7 位
航班 01	0.938 366	<b>0.941 696</b>	0.939 785	0.934 999	0.928 537	0.920 509	0.911 137	0.900 415
航班 02	0.993 476	<b>0.996 379</b>	0.993 790	0.988 486	0.981 870	0.974 145	0.965 143	0.955 001
航班 03	0.996 894	<b>0.998 106</b>	0.996 829	0.994 106	0.990 327	0.985 464	0.979 507	0.972 542
航班 04	0.997 925	<b>0.999 773</b>	0.997 857	0.993 319	0.986 851	0.978 600	0.968 668	0.957 283
航班 05	0.995 284	<b>0.997 093</b>	0.995 243	0.990 704	0.983 970	0.975 358	0.965 088	0.953 379
航班 06	0.858 703	<b>0.860 619</b>	0.858 546	0.853 393	0.845 896	0.836 381	0.825 188	0.812 518
航班 07	0.994 559	<b>0.997 548</b>	0.994 323	0.987 733	0.979 157	0.968 924	0.956 911	0.943 436
航班 08	0.994 783	<b>0.997 351</b>	0.994 854	0.989 334	0.981 870	0.972 905	0.962 714	0.951 304
航班 09	0.984 195	<b>0.990 622</b>	0.983 352	0.968 939	0.951 323	0.931 944	0.910 951	0.888 748
航班 10	0.909 617	0.914 206	<b>0.915 868</b>	0.915 268	0.912 918	0.908 947	0.903 500	0.896 571
航班 11	0.993 907	<b>0.996 324</b>	0.994 155	0.988 899	0.981 499	0.972 168	0.961 322	0.948 894
航班 12	0.996 692	<b>0.999 629</b>	0.997 253	0.991 294	0.983 242	0.973 545	0.962 429	0.949 946

从表5可以看出:除编号为06的航班外,其余航班的相关性系数均在0.9以上,编号为06的航班的相关性系数也都在0.8以上,因此可以认为该飞机前轮转弯系统无潜在故障。将这一分析结果与该航空公司的维护人员执行定期维修时的检查结果完全符合,证明所提预警方法对于该机型的

有效性。  
另外,由于上述所使用的数据均来自相同型号的飞机,所得结论是否适用于其他型号的飞机有待相关数据佐证,本文所提出的分析方法可供参考。

## 4 结 论

(1) 根据飞机前轮转弯系统的工作原理和故障特点,选取转弯角度指令值和实际值作为预警监测参数,采用Pearson相关性分析方法,得出“转弯困难或失效”的故障规律及阈值:相关性系数低于0.8或实际值延后0~7位时变化范围超过0.1,实现了对飞机前轮转弯系统潜在故障的预警。

(2) 利用同型号飞机QAR数据对本文所提预警方法进行了验证,预警结果与维修人员实际检测结果一致,表明了预警方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 夏语冰, 钟科林, 姜逸民. 民用飞机转弯控制系统研究[J]. 科技资讯, 2010(5): 2-3.  
XIA Yubing, ZHONG Kelin, JIANG Yimin. Research on civil aircraft nose wheel steering control system[J]. Science & Technology Information, 2010(5): 2-3. (in Chinese)
- [2] 龙江, 刘峰, 张中波. 现代飞机结构与系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016: 268-284.  
LONG Jiang, LIU Feng, ZHANG Zhongbo. Modern aircraft structure and system[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016: 268-284. (in Chinese)
- [3] 梁建平. B737NG飞机前轮转弯跑偏故障的解决方法[J]. 科技经济导刊, 2016(16): 59-59, 63.  
LIANG Jianping. Solution of nose wheel steering deviation fault of B737NG aircraft [J]. Technology and Economic Guide, 2016(16): 59-59, 63. (in Chinese)
- [4] 孙贵杨. 波音737NG飞机前轮转弯跑偏故障浅析[J]. 科技创新导报, 2019(27): 12-13.  
SUN Guiyang. Analysis of nose wheel steering deviation fault of Boeing 737NG aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019(27): 12-13. (in Chinese)
- [5] 金磊. 某型飞机前轮转弯“漂移”故障分析及处理[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2017(11): 250.  
JIN Lei. Analysis and handling of nose wheel steering "deviation" fault of aircraft [J]. Chinese Sci Tech Journal Database (Full Text Version) Engineering Technology, 2017(11): 250. (in Chinese)
- [6] 罗刚. 空客A320s飞机前轮转弯系统排故经验总结[J]. 科学技术创新, 2019(19): 22-23.  
LUO Gang. Summary of troubleshooting experience of nose wheel steering system of A320s aircraft [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(19): 22-23. (in Chinese)
- [7] 薛海红, 严控航, 王瑶, 等. 一种基于FMEA的故障诊断贝叶斯网络快速构建方法[J]. 航空工程进展, 2016, 7(3): 316-324.  
XUE Haihong, YAN Shuanhang, WANG Yao, et al. A modeling method of fault diagnosis Bayesian network based on FMEA [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(3): 316-324. (in Chinese)
- [8] DAI Zhiyong, LIN Hui, GUO Hao, et al. Integrated model-based and grey-relational-analyzed diagnosis of wheel speed sensor for aircraft antilock braking [C]// The 32nd Chinese Control Conference. Xi'an: IEEE, 2013: 1-9.
- [9] LIU Kuijian, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng. Fault diagnosis of hydraulic retraction system based on multi-source signals feature fusion and health assessment for the actuator [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems Applications in Engineering & Technology, 2018, 34(6): 13-20.
- [10] 蔡坤焯, 蔡景, 周迪, 等. 基于SVM方法的APU故障预测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 466-473.  
CAI Kunye, CAI Jing, ZHOU Di, et al. APU fault prediction based on SVM method [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 466-473. (in Chinese)
- [11] 高飞鹏, 黄加阳, 陈新霞. 基于航后QAR数据译码的APU故障诊断技术[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 42-45.  
GAO Feipeng, HUANG Jiayang, CHEN Xinxia. Study of post flight QAR data decoding in fault diagnosis of APU [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(1): 42-45. (in Chinese)
- [12] ATASOY V E, CETEK C. Enhanced cruise range prediction for narrow-body turbofan commercial aircraft based on QAR data [J]. The Aeronautical Journal, 2020, 125: 1-11.
- [13] ZHANG Yingjie, XU Jianxing. A novel particle swarm neural network model to optimize aircraft fuel consumption [J]. Advanced Materials Research, 2013, 694-697: 3370-3374.
- [14] 刘伟. MA600前轮转弯系统常见故障分析[J]. 科技创新与应用, 2016(3): 59-60.  
LIU Wei. Analysis of common faults of MA600 nose wheel steering system [J]. Technology Innovation and Application, 2016(3): 59-60. (in Chinese)
- [15] JEBLI I, BELOUADHA F Z, KABBAJ M I, et al. Prediction of solar energy guided by Pearson correlation using machine learning [J]. Energy, 2021, 224: 120109.