

基于马尔可夫链的飞机刹车片 检查时间确定

Determine the Inspection Time for Aircraft Brake Friction Disk Based on Markov Chain

吴 江 / Wu Jiang

(中国民航飞行学院, 广汉 618307)

(Civil Aviation University of China, Guanghan 618307, China)

摘 要:

为结合飞机实际运行工况,科学合理地制定刹车片检查时间,提出了一种基于马尔可夫链理论的预测模型。以某一机群刹车片检查时间确定为例,分别论述了刹车片磨损状态的划分,以及转移概率矩阵的构造与估计,并对该机群刹车片磨损状态进行了预测,其预测结果与实际检查情况较吻合。根据刹车片磨损状况的预测结果,制定了该机群在实际运行工况下的刹车片检查时间。实际运行情况表明,所制定的刹车片检查时间可行、有效。

关键词: 磨损; 马尔可夫链; 刹车片; 检查时间

[Abstract] In order to determine scientifically and reasonably the inspection time for aircraft brake friction disk based on the actual operation conditions of aircraft, proposes a prediction model of Markov chain. The brake friction disk for a certain fleet are taken as an example to determine inspection time, discusses wear state classification of brake friction disk, transition probability matrices is constructed and estimated, wear state of brake friction disk for the fleet is forecast, the results show that prediction results have a good agreement with actual detections. The inspection time for aircraft brake friction disk in the actual operating conditions is determined base on the prediction results of brake friction disk wear. The practical operation results show that the inspection time for aircraft brake friction disk is feasible and effective.

[Key words] Wear; Markov Chain; Brake Friction Disk; Inspection Time

0 引言

飞机刹车系统的功能是使飞机在地面滑跑或滑行时减速,使飞机在一定距离内停止,同时具有辅助转弯的作用。因此,飞机刹车性能是否正常对飞行安全十分重要。飞机刹车过程是利用刹车片与刹车盘构成的摩擦副在工作时产生摩擦力矩来实现的,刹车片与刹车盘是保证刹车系统性能的重要组件之一^[1]。在刹车过程中,刹车片与刹车盘的相互摩擦会引起表面材料的流失和转移,从而产生磨损,且磨损量随使用时间增加而增大。正常情况下,由于刹车盘的耐磨性高于刹车片,因此在相同工作时间内,刹车片的磨损量远大于刹车盘。虽然

现代飞机刹车系统通常设有刹车间隙调节器,能自动补偿刹车片的磨损,保持稳定的刹车性能,但当刹车片磨损量超出允许值后,刹车性能将严重衰减甚至完全失效。因此,在飞机运行过程中,为保证飞机具有稳定的刹车性能,维护人员必须定期检查刹车片厚度,并适时更换刹车片。

飞机刹车片的磨损过程受速度、重量、刹车时间以及载荷等运行工况影响,是一个扩展性的非稳态的随机过程^[2-3]。同时,飞机在相同的工作时间内,运行工况不同,刹车片的磨损过程也会不同。因此,可以说飞机刹车片的磨损过程与运行工况息息相关。飞机制造商提供的维护资料中对刹车片的检查时间要求中并未充分考虑飞机的实际运行

工况,针对某一运行工况下的机群,其检查时间间隔会有所不同。飞机刹车片检查时间间隔过长,可能会导致在检查间隔期内刹车片磨损超标而未及时更换新件,这样不仅会影响刹车性能,危及飞行安全,而且还会导致刹车盘非正常磨损而报废;检查时间间隔过短将增加维护工作量和飞机停放时间,影响飞机运营经济性^[4]。某型飞机用于学生飞行训练,起降频繁,维护人员长期按维护资料中要求的每100小时对刹车片进行检查,结果在该型飞机运行期间,在检查间隔期内多次发生刹车片厚度超标,甚至将铆接刹车片的铆钉磨出等现象,严重影响刹车性能并导致刹车盘因非正常磨损而报废。

如何依据飞机实际运行工况,科学合理地制定刹车片厚度检查时间,对保证飞机刹车性能和提高维护效率具有十分重要的意义。本文以飞机刹车片磨损的历史数据为基础,运用马尔可夫链理论建立刹车片磨损预测模型,揭示其磨损过程变化规律,从而科学合理地制定刹车片检查时间。

1 马尔可夫链模型

1.1 预测模型

令 $\{X_n, n=1, 2, 3, \dots\}$ 为一离散的随机变量序列, n 表示每一变量值 X_n 所对应的时间点,所有 X_n 能取到状态的全体称为状态空间,记为 Ω 。对于任意的正整数 n 及任意的状态 $i_1, i_2, \dots, i_n, i_{n+1} \in \Omega$, 如果 $\{X_n\}$ 满足: $P(X_{n+1}=i_{n+1} | X_n=i_n, \dots, X_2=i_2, X_1=i_1) = P(X_{n+1}=i_{n+1} | X_n=i_n)$, 则由 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 构成的随机过程称为马尔可夫链, 式中 $P(X_{n+1}=i_{n+1} | X_n=i_n)$ 称为转移概率。

马尔可夫链应用于飞机刹车片磨损状况预测模型中,认为刹车片将来的磨损状态只取决于当前磨损状态,而与过去的磨损状态无关。为了描述飞机刹车片磨损状况随时间变化过程,需要建立状态转移概率矩阵。假设飞机刹车片磨损状态的转移概率 $P(X_{n+1}=i_{n+1} | X_n=i_n)$ 不随着 n 的变化而变化,即转移概率不随时间变化,一步转移概率是不变化的,飞机刹车片磨损状态的变化过程是一个奇次马尔可夫链过程^[5]。

一步转移概率矩阵通常由 $m \times m$ 方阵 P 来表示, m 为被划分的状态数,即:

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,m} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \dots & P_{m,m} \end{bmatrix}$$

转移概率矩阵 P 有下列性质:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m P_{i,j} &= 1, i=1, 2, \dots, m \\ 0 \leq P_{i,j} &\leq 1, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

系统处于任意初始状态,经过 n 步,必定处于某状态。已知一步转移矩阵 P , 则 n 步转移概率矩阵 $P^{(n)}$ 可由切普曼—柯尔莫哥洛夫方程计算: $P^{(n)} = P^{(n-1)}P = P^n$ 。假设系统处于某一初始状态,记为 S_0 , 经过 n 步转移,所处状态 S_n 可由式(1)计算。

$$S_n = S_0 P^{(n)} = S_0 P^n \quad (1)$$

1.2 转移概率矩阵估计

由概率论知识可知,当状态概率的理论分布未知时,若样本容量足够大,可以用样本分布近似地描述状态的理论分布。因此,对于未知分布的转移概率,可以用转移频率来近似地估计转移概率。这种情况下,系统变量由状态 S_{n-1} 转向 S_n 的转移概率估计值为:

$$P_{i,j} = a_{i,j} / a_j (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, a_j 为变化前处于状态 S_{n-1} 的总状态数, $a_{i,j}$ 为由变化前状态 S_{n-1} 转移到变化后状态 S_n 的状态数, $\sum_{i=1}^n a_{i,j} = a_j (i, j=1, 2, \dots, n)$ 。

将由转移频率近似估计产生转移概率形成的状态转移概率矩阵称为离散转移概率矩阵。这种由转移频率来近似估计转移概率的方法,可以较好地融合某一机群的刹车片磨损状态变化的统计数据,反映实际工况下的刹车片磨损状态转移概率。

2 刹车片磨损状态划分与转移矩阵

应用马尔可夫链理论预测飞机刹车片磨损状况,需要确定刹车片磨损状态。依据飞机维护资料中对刹车片磨损情况的检查要求,并结合实际情况,将刹车片磨损状况划分为轻、中、重、严重、失效5种状态,如表1所示,分别对应状态1、状态2、状态3、状态4、状态5。

表1 刹车片磨损状态评价

磨损程度	最大磨损厚度	状态
轻	<25% Δ	1
中	25% ~ 65% Δ	2
重	65% ~ 85% Δ	3
严重	85% ~ 100% Δ	4
失效	> Δ	5

表1中, $\Delta = \delta_0 - \delta_{min}$, δ_0 为刹车片新件的厚度,

δ_{min} 为刹车片允许的最小厚度。

当飞机刹车片磨损状况被划分为 5 个状态后, 其转移概率矩阵 P 的形式为:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix}$$

根据飞机刹车片磨损检查的统计数据, 确定其磨损状态, 计算处于各状态的次数和各状态之间转移的次数, 利用式(2) 求解出所有的转移概率 $P_{i,j}$, 进而构造出转移概率矩阵 P 。将预测前的最后一次检查数据作为初始状态 S_0 , 可以利用式(1) 预测飞机刹车片磨损状况, 从而科学地制定刹车片的检查时间。

3 刹车片磨损状况预测与检查时间确定

3.1 模型验证

针对某型飞行训练机群的 60 件刹车片的磨损状况进行了统计, 其刹车片磨损状态变化情况见表 2。

表 2 机群刹车片磨损状态变化数据

使用时间/h	数量				
	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
0	60	0	0	0	0
100	60	0	0	0	0
200	60	0	0	0	0
300	22	38	0	0	0
400	2	58	0	0	0
500	0	55	5	0	0
600	0	50	10	0	0
700	0	42	18	0	0
800	0	30	30	0	0
900	0	12	48	0	0
1 000	0	0	40	20	0
1 100	0	0	19	36	5
1 200	0	0	2	47	11
1 300	0	0	0	30	30
1 400	0	0	0	4	56
1 500	0	0	0	0	60

根据表 2 中的数据, 利用式(2) 即可求得该机群刹车片磨损状态的转移概率矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 0.7059 & 0.2941 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7895 & 0.2105 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6512 & 0.3488 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5620 & 0.4380 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表 3 为该机群中的某一架飞机刹车片在各检查时间点测得的磨损数据。

表 3 单机刹车片磨损数据

使用时间/h	磨损量/mm	状态	使用时间/小时	磨损量/mm	状态
0	0	1	400	0.82	2
100	0.32	1	500	1.02	2
200	0.50	1	600	1.18	2
300	0.66	2	700	1.36	2

以新刹车片(即使用时间为 0 小时)为预测的初始状态, 其磨损状况为状态 1, 其向量形式为 $S_0 = [1, 0, 0, 0, 0]$ 。应用马尔可夫链理论对刹车片磨损状态分布进行预测, 利用式(1) 进行计算, 得到预测值如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 刹车片在使用 300h 后, 刹车片进入磨损状态 2, 使用到 700h 后, 刹车片仍处于磨损状态 2。该预测结果与表 3 中的单机刹车片检测结果较吻合, 因此, 证实了将马尔可夫链理论应用于飞机刹车片磨损状况预测是可行的。

表 4 刹车片磨损状态分布概率预测值
(初始状态为 1)

使用时间/h	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	最大概率状态
100	0.7059	0.2941	0	0	0	1
200	0.4983	0.4398	0.0619	0	0	1
300	0.3517	0.4938	0.1329	0.0216	0	2
400	0.2483	0.4933	0.1905	0.0585	0.0095	2
500	0.1753	0.4624	0.2279	0.0993	0.0351	2
600	0.1237	0.4166	0.2457	0.1353	0.0786	2
700	0.0873	0.3653	0.2477	0.1618	0.1379	2

3.2 刹车片磨损状况预测

以刹车片 300h 检查时的磨损状况为预测的初始状态, 其磨损状况为状态 2, 其向量形式为 $S_0 = [0, 1, 0, 0, 0]$ 。利用式(1) 进行计算, 得到预测值如
(下转第 66 页)

4 结论

本文利用计算机辅助设计中的 NURBS 曲面曲线生成方法,根据大型飞机后缘襟翼机构伸出机翼下表面的特殊情况建立了一套详细的大型客机后缘襟翼滑轨整流罩外形设计方法,并且使用 CFD 数值模拟不同整流罩外形模型,对比分析得到参数化建模具体实施方法中一些细节的处理准则。通过该方法设计的整流罩满足整流罩包裹住机构、气动阻力小等基本要求,同时该方法具有参数化建模的优点,可缩短设计周期。

参考文献:

- [1] An introduction to aircraft excrescence drag. ESDU, 90029
[2] Drag of stub wings and fairings on a flat plate with a turbulent boundary layer for subsonic and supersonic speeds. ESDU, 84035.
[3] C. P. van Dam. The aerodynamic design of multi-element

high-lift systems for transport airplanes [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002(38):101-144.

[4] Rui Miguel Martins Pires. Design methodology for wing trailing edge device mechanisms [J]. PhD Thesis, 2007.

[5] 飞机设计手册第 5 册气动设计 [M]. 北京:航空工业出版社, 2002.

[6] Drag of stub wings and fairings on a flat plate with a turbulent boundary layer for subsonic and supersonic speeds. ESDU, 84035.

[7] 张国华, 杨兴强, 张彩明. 基于权因子的 NURBS 曲线形状调整 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1396-1400.

[8] 邵箭, 朱承斌. 飞机设计手册 [M]. 北京:航空工业出版社, 1996.

[9] 陈迎春, 宋文滨, 刘洪. 民用飞机总体设计 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2010.

[10] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

(上接第 39 页)

表 5 所示。由表 5 可以看出,刹车片使用到 900h,刹车片进入磨损状态 5,刹车片可能失效,其概率为 0.280 1。刹车片磨损状况从状态 2 转化到状态 5 的时间间隔可能不足 100h。

表 5 刹车片磨损状态分布概率预测值
(初始状态为 2)

使用时间/h	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	最大概率状态
400	0	0.789 5	0.210 5	0	0	2
500	0	0.623 3	0.303 3	0.073 4	0	2
600	0	0.492 1	0.328 7	0.147 1	0.032 2	2
700	0	0.388 5	0.317 6	0.197 3	0.096 6	2
800	0	0.306 7	0.288 6	0.221 7	0.183 0	2
900	0	0.242 1	0.252 5	0.225 3	0.280 1	5
1 000	0	0.191 1	0.215 4	0.214 7	0.378 8	5

3.3 刹车片检查时间确定

由整个机群刹车片磨损状况预测情况表 4 和表 5 分析得出,刹车片从新件到使用 300h 期间,不会发生失效;使用时间在 300h ~ 600h,刹车片可能出现失效,但失效概率非常小;使用时间在 600h ~ 800h,刹车片可能出现失效,但刹车片失效并非主要状态;使用时间超过 800h,刹车片失效是主要状态。

基于上述分析,可以确定该机群刹车片检查时间为:300h、600h、700h、800h,800h 以上每间隔 50h 检查一次。

4 结论

将飞机刹车片磨损状况划分为 5 个状态,构造出马尔可夫链中的转移概率矩阵。利用整个机群刹车片的历史统计数据,计算得出转移概率矩阵,该矩阵较好地融合了机群在实际运行工况下的刹车片磨损状况的变化情况。基于马尔可夫链模型对刹车片磨损状态进行了预测,其结果与实际情况较吻合。根据飞机刹车片磨损状况的预测结果,制定了机群在实际运行工况下的刹车片检查时间。机群的实际运行情况表明,执行新的刹车片检查时间后,不仅使刹车片磨损超标的现象大大减少,降低了刹车盘的报废率,而且减少了维护工作量,缩短了飞机的离场时间。

参考文献:

[1] 陶梅贞. 现代飞机结构设计 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 1997.

[2] 张彦. 制动器摩擦衬片磨损量的等维灰色预测 [J]. 润滑与密封, 2009, 34(12): 30-33.

[3] 谭明福, 王建业. 提高飞机刹车片寿命的研究 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1997, 2(2): 152-158.

[4] 左洪福, 蔡景, 吴昊, 等. 航空维修工程学 [M]. 北京:科学出版社, 2011.

[5] 孙荣恒. 随机过程及其应用 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 2001.