

文章编号: 1000-8055(2006)04-0716-6

基于比例风险模型的航空发动机视情维修决策

左洪福, 张海军, 戎 翔
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘 要: 基于航空发动机在翼监控信息来合理确定视情维修 (CBM) 决策是航空公司安全运营中的重要内容。本文利用 Weibull 比例风险回归的建模思想, 分析了航空发动机因性能衰退而换发的历史监控数据记录, 并据此建立了反映该类发动机性能参数与在翼时间之间的函数关系; 进而采用最小维修成本、最大可用度策略确定最优维修决策阈值, 为同类型在翼发动机进行维修决策的优化提供了一个客观的量化方法。最后对 CF6 型发动机历史故障数据进行了实例分析, 表明该方法在发动机视情维修决策中的实用价值。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 在翼时间; 性能衰退; 视情维修; 比例风险模型; 维修决策
中图分类号: V37. 1 **文献标识码:** A

Condition based aero-engine maintenance decision method using proportional hazards model

ZUO Hong-fu, ZHANG Hai-jun, RONG Xiang
(College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Condition based aero-engine maintenance (CBM) decision based on condition monitoring information is an important issue to the safety operation of airlines. In this paper aero-engine historical data of removal due to performance degradation were analyzed, and a functional relationship between aero-engine performance parameters and time-on-wing was established using Weibull proportional hazards regression model. Furthermore, maintenance decision threshold is determined by the minimum maintenance cost or maximum availability strategy. Thus, an objective quantitative decision method for optimal maintenance decision was provided. Finally, the failure data of CF6 aero-engines were analyzed in detail as an example using the method mentioned above. The result shows that the method has high practical value for aero-engine CBM decision.

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; time-on-wing; performance degradation; CBM; proportional hazards model; maintenance decision

发动机作为飞机的核心,其潜在的故障可能导致功能失效而出现空中停车等飞行事故,严重时甚至导致灾难性后果的产生,因此为了有效避免潜在故障的发生,需要准确判别当前性能状态的劣化程度及是否需要预防维修。CBM 是通过监控系统的性能状态参数、及时检测到故障征兆

并采取预防措施来实现“按需维修”的一类策略,可以避免维修过度或不足所带来的严重后果。近年来,为保证飞机运营中高安全性、可靠性及经济性的要求,航空公司针对发动机维修普遍实施了 CBM 策略,对在翼时间进行科学的监控管理,减少了突发性故障事件的发生,既充分保证了飞机

收稿日期: 2005 - 07 - 18; 修订日期: 2006 - 01 - 08

作者简介: 左洪福(1959 -), 湖南茶陵人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 发动机故障检测等, E-mail: rms@nuaa.edu.cn;

张海军(1969 -), 博士生, 研究方向: 民航维修工程等, E-mail: hj_zh@126.com.

的正常运营,又降低了维修成本,因而获得较好的社会和经济效益。但是,目前航空公司在发动机的CBM决策实践中时仍然主要依据维修经验,而缺乏一个有效的量化方法。

最初的CBM决策是检测一些基本的状态信号,按照设定的阈值或进行简单的趋势分析,当监控值超过阈值或趋势发生剧烈变化时,则需要考虑及时维修。此法简单易行,但对于航空发动机这样复杂系统而言,则显得较为粗糙,难以反映多种影响因素的综合效应。因此,CBM决策的关键是将系统状态参数与完好程度之间建立起较为精确的对应关系。目前国内外针对此问题进行了大量的研究,常见的有利用卡尔曼滤波、马尔可夫过程、信息融合和人工智能方法等对机械系统的检测信息建立模型^[1-3],但这些模型在维修优化决策中实用性欠佳。加拿大Toronto大学开发的EX-AKT软件系统建立了比例风险模型,并成功地应用于CBM的决策(根据滑油中金属颗粒含量信息)与预测分析(根据系统监控的振动信息)

由发动机历史换发记录可知,性能衰退容易导致发动机的功能故障,是促使发动机提前换发的一类重要原因。因此本文利用Weibull比例风险回归的建模思想,根据历史故障数据回归出其性能状态参数与因性能衰退需要换发时的在翼时间之间的函数关系,再采用最小维修成本、最大可用度策略来求得换发决策阈值,从而可以判断当前发动机是否需要预防性离翼维修。当协变量较多或状态数较大时,采用传统的Markov决策过程中状态转移概率矩阵的维数很大,计算维修阈值的方法将极其繁琐^[4],因此本文中采用较为简单直观的图形法实现了对维修决策的客观评判。

1 比例风险回归模型

航空发动机是一类典型的复杂、非线性、可修复系统,换发的原因主要分为四类:^[5]LLP(寿命限制件)到寿、FOD(外来物损伤)、随机性故障、AD/SB(适航指令/服务通告)规定。其中性能衰退属于系统的随机性故障,作为发动机换发的重要原因之一,它是本文的研究对象。其他几类故障不在此研究之列。

针对发动机性能衰退而换发的数据,考虑在翼时间与性能参数间的相互关系,将能够更加合理地反映发动机性能衰退的分布特征^[5]。比例风险回归模型是研究系统寿命周期与相关的协变量效应,并可确定各参数对系统风险的影响程度,尤

其适合于对发动机换发决策的建模研究。

该模型的基本假设是各协变量(即与在翼时间相关联的伴随变量)之间相互独立,因此需要首先分析各协变量间的相关性,从而筛选出合适的协变量。对于航空发动机而言,在翼时间为服从Weibull分布的一个随机变量(验证见图1)。同时再考虑各协变量的影响,可得到Weibull比例风险模型,即:

$$h(t|X(t)) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp(\gamma \cdot X(t)) \quad (1)$$

构造似然函数为:

$$\begin{aligned} L(\eta, \beta, \gamma) &= \left\{ \prod_{i \in D} \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp(\gamma_i \cdot X(t_i)) \right\} \cdot \\ &\quad \left\{ \prod_{j=1}^n \exp \left[- \int_0^{T_j} \exp(\gamma_j \cdot X(t_j)) d\left(\frac{t_j}{\eta}\right)^{\beta} \right] \right\} \\ &= \left\{ \prod_{i \in D} \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp(\gamma_i \cdot X(t_i)) \right\} \cdot \\ &\quad \left\{ \prod_{j=1}^n \exp \left[- H(t_j) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, D 为截尾样本的集合, T_j 为各在翼时间,

$H(t_j) = \int_0^{T_j} \exp(\gamma_j \cdot X(t_j)) d\left(\frac{t_j}{\eta}\right)^{\beta}$ 为累积风险函数。

当估计参数较多时,比例风险模型采用极大似然估计方法难以得到解析解,为此需利用Newton-Raphson迭代算法求解似然函数方程来得到各参数的估计值 $\hat{\beta}, \hat{\eta}, \hat{\gamma}$ ^[6]。

2 维修决策阈值的确定

系统航空发动机因使用要求的不同而导致决策目标的不同,通常以一定时间内维修成本最小或任务可用度最大作为决策策略。在此给出这两类决策方法的求解过程:

2.1 最小维修成本法^[7]

单位时间平均维修成本为:

$$C(t) = \frac{C_1[(C_1/C_2) + E(N(t|X))]}{t} \quad (3)$$

其中, C_1 分别为预防维修的平均成本, C_2 为故障后维修的平均成本, C_1/C_2 为两类维修成本的比率; $E(N(t|X))$ 为检查间隔期内预期的故障数,且有:

$$\begin{aligned} E(N(t|X(t))) &= H(t|X(t)) = \\ &\quad \int_0^t \exp(\gamma \cdot X(u)) d\left(\frac{u}{\eta}\right)^{\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

若使成本最小,则方程中斜率应最小。按上式绘出 $H(t) - t$ 曲线,过点 $(0, -C_1/C_2)$ 作曲线的切线,则切点所对应的时间即为成本最小的优化维修间隔时间(参见图 2)。

2.2 最大可用度法^[6,8]

可用度定义为系统在 t 时处于在翼状态的概率,即:

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{t_p - t_b \int_0^t h(t) dt}{t_p + t_a} \tag{5}$$

其中,MTTF 为工作时间(即出现故障前的平均使用时间),MTTR 为平均修理时间, t_p 、 t_a 、 t_b 分别为预防维修间隔、预防维修时间、故障后维修时间。

为得到最大可用度,通常采用对平均可用度求取极限的方法,即:

$$A_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T h(t) dt \tag{6}$$

上式中的积分难以直接求出,通常采用数值计算方法得到不同时刻的极限可用度,其中最大极限可用度所对应的时间即为预防维修的优化时

间间隔值(参见图 3)。

根据上述所得的优化时间,从故障数据中找出一组与此最接近的失效时间与伴随变量数据,求得故障率阈值 h^* ,即:

$$h^* \geq \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp(\gamma \cdot X(t)) \tag{7}$$

对上式两边取对数并整理,得:

$$\gamma \cdot X(t) \leq \ln\left(\frac{\eta h^*}{\beta}\right) - (\beta - 1) \ln t \tag{8}$$

以工作时间 t 为横轴,以 $\ln(\frac{\eta h^*}{\beta}) - (\beta - 1)$ $\ln t$ 为纵轴画出图线(参见图 4),即为维修阈值对应的状态。然后以当前某运行时刻监控到的相关伴随变量计算相应的 $\gamma \cdot X(t)$,并在图中画点。该点若处于曲线上方,则需要采取维修措施;若处于曲线下方,则为正常工作区,可继续工作。若恰好落入上下曲线之间的阴影区,则属于失效临界区,通常需要加强监控,考虑在下次任务后进行更换。

3 实例分析

选用某航空公司 1999~2004 年的 CF6 型发

表 1 CF6 航空发动机历史故障数据的部分样本

Table 1 Partial samples from CF6 aero-engine history fault data

TSN	TC	num	DEGT	GWFM	GPCN25	DPOIL	ZVB1F	ZVB2R	EGTHDM
5396	1.60	0	7.51	2.54	1.89	- 7.27	1.06	0.32	- 2.53
10775	1.66	0	- 4.74	3.52	1.92	- 5.16	0.52	0.55	29.48
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28427	1.75	1	9.12	3.37	1.78	6.89	0.31	0.46	9.28

动机机队的 36 例换发时监控的故障数据。发动机因性能衰退而换发时的累积在翼时间 TSN 视为自变量,预设的协变量包括性能参数 DEGT(发动机排气温度偏差)、GWFM(燃油消耗量偏差)、GPCN25(高压转子转速偏差)、DPOIL(滑油压力偏差)、ZVB1F(低压转子振动值偏差)、ZVB2R(高压转子振动值偏差)、EGTHDM(起飞排气温度裕度)和 TSN(总的在翼时间)、TC(在翼时间与循环数比率)、num(历史换发次数)等(见表 1,限于篇幅仅给出部分数据)。

采用统计软件 SPSS 进行模型分析:经计算,Overall(score)、Previous Step、Previous Block 等检验量的 P 值均较小,符合小于 0.05 的检验标准^[9],可认为模型中协变量系数全不为 0 或不

全为 0,即模型是显著的。

当存在多个协变量对在翼时间均有影响时,首先需要通过相关性分析确定显著性协变量,然后建立协变量与在翼时间之间的关系模型,并根据该模型中协变量的作用大小对当前个体的状态进行分析和预测。各协变量的计算结果见表 2。按照 P 值检验准则,GWFM、GPCN25、DPOIL、ZVB1F、EGTHDM 因无显著作用而被剔除,最终四个协变量 DEGT、ZVB2R、num、TC 被筛选进入模型,记为 $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)\}$ 。这与实际换发决策中在翼时间一定的情况下,以排气温度偏差、高压转子振动值及换发(维修)历史次数、航段特征等作为主要参考指标^[10]相吻合。

表 2 各协变量选取对照表

Table 2 Variables selection compare chart

	B	SE	Wald	Df	Sig	Exp (B)	95.0 % CI for Exp (B)	
							Lower	Upper
TC	6.446	2.961	4.739	1	0.029	630.008	1.901	2088
num	- 0.538	0.212	6.470	1	0.011	0.584	0.386	0.884
DEGT	- 0.109	0.046	5.466	1	0.019	0.897	0.819	0.983
GWFM	0.327	0.195	2.803	1	0.094	1.387	0.946	2.034
GPCN25	- 0.606	0.737	0.675	1	0.411	0.546	0.129	2.314
DPOIL	0.005	0.014	0.112	1	0.738	1.005	0.978	1.032
ZVB1F	0.990	0.754	1.721	1	0.190	2.690	0.613	11.801
ZVB2R	- 2.121	1.037	4.182	1	0.041	0.120	0.016	0.916
EGTHDM	0.005	0.021	0.060	1	0.807	1.005	0.964	1.048

表 3 回归系数之间的相关度

Table 3 Correlation Matrix of Regression Coefficients

	TC	num	DEGT	GWFM	GPCN25	DPOIL	ZVB1F	ZVB2R
num	- 0.474							
DEGT	- 0.203	- 0.070						
GWFM	0.327	- 0.400	- 0.434					
GPCN25	- 0.113	0.209	0.277	- 0.434				
DPOIL	0.056	- 0.249	- 0.245	0.476	- 0.577			
ZVB1F	0.062	- 0.169	- 0.266	0.096	- 0.484	0.322		
ZVB2R	- 0.182	0.240	- 0.020	- 0.171	0.161	- 0.341	- 0.181	
EGTHDM	0.074	- 0.498	0.537	0.223	0.016	0.059	- 0.098	- 0.185

如表 3 所示,各协变量的相关系数较小,表明各参数间独立性较好。

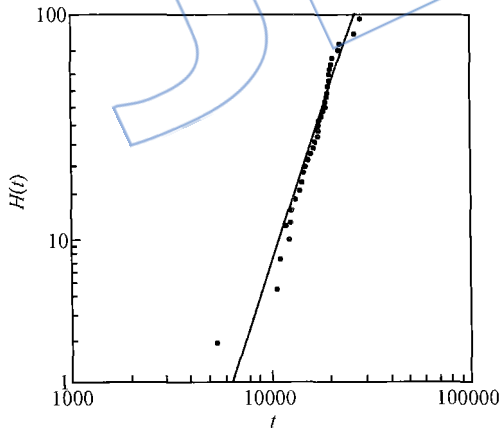


图 1 Weibull 分布检验图

Fig. 1 Weibull distribution test plot

在翼时间分布规律的 - 2LL 检验:

已知 Weibull 的可靠度函数为 $S(t) = \exp(-(\frac{t}{\eta})^\beta)$, 经对数变换后得:

$$\ln(-\ln(S(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

即 $\ln t$ 与 $\ln(\ln(S(t)))$ 或 $\ln(H(t))$ 之间呈线性关

系,这是 Weibull 分布的基本特征。

由图 1 可知, t 与 $H(t)$ 之间的对数曲线图近似拟合为一条直线,表明在翼时间服从 Weibull 分布规律。

按照航空发动机的工程实践经验,设定 C_1/C_2 为 0.002,则如图 2 所示,从点 $(0, -0.002)$ 向曲线作切线,则此切点为最小费用时对应的累积维修时间间隔 (约为 12 500 飞行小时)。

根据历史故障数据估计出系统的风险与使用时间、使用环境和使用方式等因素之间的函数关系为:

$$h(t | X(t)) = \frac{4.3}{18\,908} \left(\frac{t}{18\,908} \right)^{3.3} \exp[-0.109x_1(t) - 2.121x_2(t) - 0.538x_3(t) + 6.446x_4(t)] \tag{9}$$

由式(5)、(6)得到的曲线如图 3 所示。找出其中的极值点,即在 9 956 飞行小时得到累积最大平均可用度 (约为 0.962)。由此策略确定系统风险阈值,从而可得到对应的综合状态决策曲线见图 4 所示。

实际诊断中,将当前时刻监控到的状态参数、在翼时间及在翼时间与循环数的比率代入上式计算,并在图中画点。该点若处于曲线上方则立即

离翼维修;若处于曲线下方,则继续工作。当处于图中阴影部分的过渡区域时,属于临近失效状态,原则上在下次任务结束后须考虑换发维修。

图 5 为在协变量作用下的可靠度函数,表明 TSN 在 9 000~11 000 飞行小时之间曲线出现急剧变化,说明可靠度在剧烈下降,风险在明显增加。

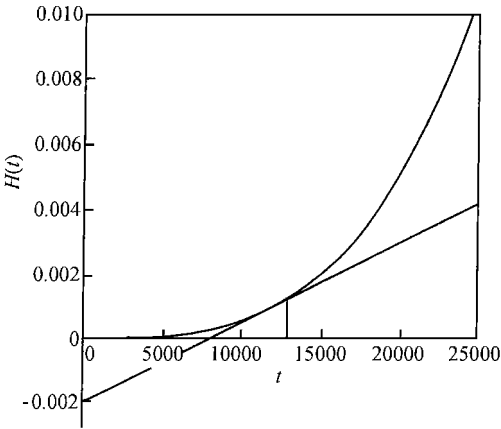


图 2 累积风险函数图
Fig. 2 Cumulated hazards function plot

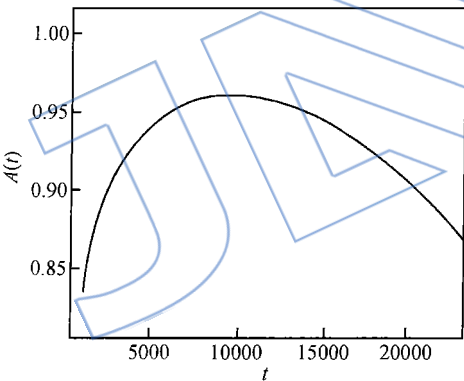


图 3 可用度的优化曲线
Fig. 3 Availability optimization curve

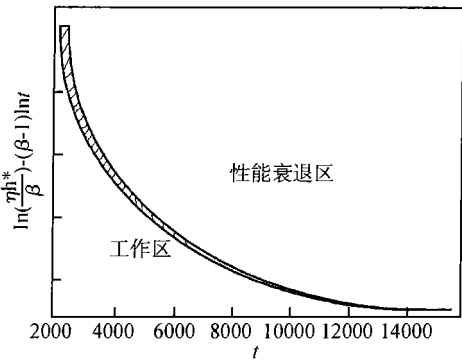


图 4 维修决策曲线
Fig. 4 Maintenance decision curve

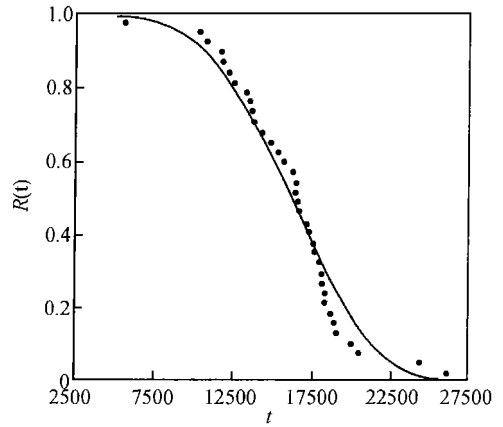


图 5 累积可靠度函数图
Fig. 5 Cumulated reliability function plot

4 结论

本文分析了因性能衰退而导致换发的历史监控数据记录,建立了反映该类发动机性能参数与在翼时间之间函数关系的 Weibull 比例风险回归模型;进而采用最大可用度、最小成本策略确定最优维修决策阈值,为同类型在翼发动机 CBM 的维修优化决策提供了一种定量测度方法,既可保证发动机的安全运营,又可有效节约维修成本。同时,该方法可以推广应用到实施 CBM 策略的多种场合,因而具有较大的实用价值。最后以 CF6 型发动机历史故障数据为例,表明该方法在发动机视情维修决策中的有效性。

参考文献:

[1] Willetts R, Starr A G, Banjevic D, et al. Optimising complex CBM decisions using hybrid fusion methods[C]. *Proceedings of the 14th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, 2001:909-918.

[2] Marseguerra M, Zio E, Podofilini L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002,77:151-165.

[3] Daming L, Murray W, Dratan B, et. al. An approach to signal processing and condition-based maintenance for gear-boxes subject to tooth failure[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004,18:993-1 007.

[4] 张秀斌,王广伟,郭波.应用比例故障率进行基于状态的视情维修决策[J]. *可靠性与环境适应性理论研究*, 2002,4:19-22.

Zhang Xiubin, Wang Guangwei, Guo Bo. Decision of condition based maintenance using proportional hazards model [J]. *Theory study of reliability and environment adaptability*, 2002,4:19-22.

- [5] Weckman G R, Shell R L, Marvel J H. Modeling the reliability of repairable systems in the aviation industry [J]. *Computers and industrial engineering*, 2001, 40:51-63.
- [6] 劳立斯 J F. 寿命数据中的统计模型和方法[M]. 刘忠, 茆诗松译. 北京: 中国统计出版社, 1998.
Laolis J F (author). The statistic model and approach of life data[M]. Liu Zhong, Mao Shisong(translators). *Beijing: the statistic press of China*, 1998.
- [7] Prasad P V N, Osmania K R M. Reliability models of repairable systems considering the effect of operating conditions[J]. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2002:503-510.
- [8] Tsai Youtern, Wang Kuoshong, Tsai Linchang. A study of availability centred preventive maintenance for multi-component systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, 84:261-270.
- [9] Sofiane Gasmi, C Ernie Love, Waltraud Kahle. A general repair proportional hazards framework to model complex repairable systems[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2003, 52(1):26-31.
- [10] Naeem M, Singh R, Probert D. Consequences of aero-engine deteriorations for military aircraft[J]. *Applied Energy*, 2001, 70:103-120.