

民用航空发动机引气系统部件寿命建模

袁忠大¹,程秀全¹,张 勇²

(1.广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院,广州 510403;2.华南理工大学 机械与汽车工程学院,广州 510640)

摘要:针对飞机维修工作中发动机引气系统故障率较高问题,以寿命数据分析为基础,运用威布尔分布模型定量评估航空发动机部件可靠性,建立了民用航空发动机引气系统部件可靠性寿命模型。以 V2500 发动机引气系统为例,收集了该系统的可靠性数据,分析了部件的非计划拆换情况。在数据计算过程中采用 3 参数威布尔分布模型对引气系统部件的寿命数据进行拟合。假设检验结果表明,在对部件进行寿命可靠性分析时,运用威布尔分布建立的数学模型符合客观规律,且能够取得良好的拟合效果。依据计算出的部件可靠性特征量对部件的可靠性状况进行定量评估,结果表明:在评估复杂机械电子系统的可靠性时,威布尔分布模型具有较大应用价值。

关键词:民用航空发动机;引气系统;部件寿命;可靠性模型;非计划拆换;维修

中图分类号: V235.11

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.002

Component Life Modeling of Civil Aeroengine Bleed Air System

YUAN Zhong-da¹, CHENG Xiu-quan¹, ZHANG Yong²

(1. School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China; 2. Institute of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the problem of high failure rate of the engine bleed air system in the aircraft maintenance work, based on the life data analysis, the reliability of the aeroengine component was quantitatively evaluated by the Weibull distribution model, and the component reliability life model of the bleed air system of the civil aeroengine was established. Taking the V2500 engine bleed air system as an example, the reliability data of the system was collected, and the unscheduled replacement of the components was analyzed. In the process of data calculation, the component life data of the bleed air system were fitted by using the Weibull distribution model with 3 parameters. The hypothetical test results show that the mathematical model established by Weibull distribution accords with the objective law when the life reliability analysis of the components is carried out, and good fitting effect can be obtained. According to the calculated reliability characteristic quantity of the component, the reliability status of the component was evaluated quantitatively. The results show that the Weibull distribution model is of great application value in evaluating the reliability of complex mechanical and electronic systems.

Key words: civil aeroengine; bleed air system; component life; reliability model; unplanned replacement; maintenance

0 引言

可靠性概念源于航空领域,1939 年美国航空委员会提出了飞机事故率的概念,这是最早的可靠性指标^[1]。20 世纪 50 年代波音公司制订了较完善的可靠性大纲,规定定量的可靠性要求,进行可靠性分配^[2-4]及预估,开展故障模式及故障树分析,采用余度设计,开展可靠性鉴定试验,进行可靠性评审等,大幅度提高了航空安全。目前应用于航空发动机可靠性分析的

方法比较侧重于故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)^[5-6]、故障模式和影响分析(Failure Model Effects and Criticality Analysis, FMECA)等定性分析方法,主要是在发动机设计阶段进行固有可靠性的预测,以降低发动机投入使用后的故障率。而 Weibull 模型是定量研究航空发动机可靠性的最适合模型之一。标准的 3 参数 Weibull 分布模型能拟合各种类型寿命数据,当其形状参数分别取特定数值时,接近于指数分布、

收稿日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金(51575117)、广东省高等学校中青年教师国内访问学者项目资助

作者简介:袁忠大(1984),男,硕士,讲师,研究方向为航空发动机可靠性及故障诊断;E-mail:yuanzhongda@caac.net

引用格式:袁忠大,程秀全,张勇.民用航空发动机引气系统部件寿命建模[J].航空发动机,2020,46(1):6-11. YUAN Zhongda, CHENG Xiuquan, ZHANG Yong. Component life modeling of civil aeroengine bleed air system[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 6-11.

正态分布等分布模型。用 Weibull 分布模型可以拟合各种可靠性数据,计算航空发动机的可靠性指标,为可靠性设计、预估与分配等工作提供了统计学依据。Weibull 分布模型可为航空公司的发动机性能工程师提供 1 种对民航发动机可靠性进行量化的方法,为拆换发动机提供理论支持,提高发动机的拆换准确性。在此基础上,国内各大航空公司可对其发动机进行可靠性评估,从而更好地制定维修计划以提高经济性和安全性,这可以减少不必要的发动机拆换,从而降低维修成本,有利于发动机性能工程师更好地进行发动机机队管理。

本文根据数理统计原理,应用分布函数的参数估计和分布假设检验的方法,判别发动机引气系统部件寿命数据满足 Weibull 分布,从而确定分布模型,并以此计算其可靠性参数。运用 Weibull 分布建立了航空发动机引气系统部件寿命模型,并对引气系统部件的可靠性状况进行了定量评估,最后对该模型在民用航空维修领域的应用进行了展望。

1 引气系统部件寿命建模

1.1 风扇空气活门控制恒温器寿命建模

1.1.1 部件非计划拆换分析

筛选风扇空气活门控制恒温器(Temperature Control Thermostat, TCT)的非计划拆换数据^[7],计算风扇空气活门控制恒温器的非计划拆换率(计算结果见表 1),以及非计划拆换率警戒值 $U_{cl}=0.185$ ^[8]。

表 1 TCT 非计划拆换计算结果

月份	装机数	部件总飞行时间/h	非计划拆换次数	非计划拆换率	3 个月均值
1	2	28306	7	0.1237	0.1378
2	2	29253	12	0.2051	0.1687
3	2	29540	12	0.2031	0.1773
4	2	30149	8	0.1990	0.2024
5	2	30527	8	0.1310	0.1777
6	2	29504	12	0.2034	0.1778
7	2	34610	12	0.1734	0.1741
8	2	35201	11	0.1562	0.1777
9	2	32418	11	0.1697	0.1665
10	2	34112	6	0.0880	0.1332
11	2	30988	11	0.1775	0.1450
12	2	31185	7	0.1122	0.1259

绘制风扇空气活门控制恒温器非计划拆换率变化趋势曲线,如图 1 所示。

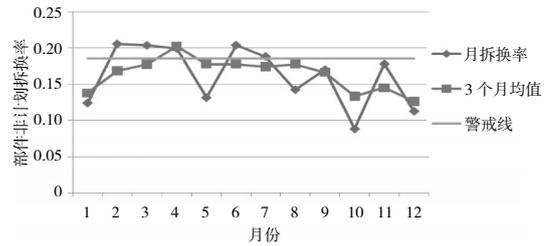


图 1 TCT 非计划拆换率变化趋势

从图中可见,当年 4 月的连续非计划拆换率超过了警戒线,且 2、3、4、6、7 月的单月拆换率也超过了警戒线。

1.1.2 寿命数据

将收集到的同一机群的风扇空气活门控制恒温器故障数据进行整理,得到该部件的寿命数据,按照使用时间从小到大排序见表 2。

表 2 TCT 寿命数据

序号	1	2	3	4	5	6
时间	622	1008	1262	1522	1892	2071
序号	7	8	9	10	11	12
时间	2236	2549	2740	3063	3453	3856
序号	13	14	15	16	17	18
时间	4085	4675	4924	5462	5794	6075
序号	19	20	21	22	23	24
时间	6479	6715	6899	7286	7421	7778
序号	25	26	27	28	29	30
时间	7856	8221	8665	9788	9996	10266

1.1.3 威布尔概率图绘制

利用 Matlab 软件中统计工具箱里的 Wblplot 函数绘制威布尔概率图,如图 2 所示。从图中可见,该部件的寿命数据大体是沿着 1 条直线分布的,这直观地说明了可以应用威布尔分布来对该部件的寿命数据建模^[9]。

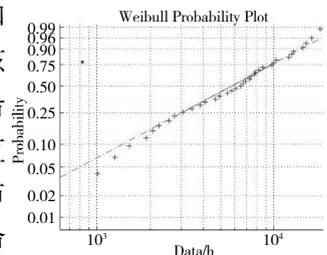


图 2 TCT 寿命数据的威布尔概率

1.1.4 寿命分布类型确定

对该部件寿命数据的分布类型作假设 H_0 , 假设该组数据符合 3 参数威布尔分布模型。根据相关系数优化法计算威布尔分布参数的基本原理,运用

Matlab^[10-11]软件编写应用程序,求出3参数威布尔分布模型的参数。

利用K-S检验法求出3参数威布尔分布下的统计观测值 D_n ,给定显著性水平 $\alpha=0.1$,查表得到统计量的临界值 $D_{30,0.1}$,若 $D_n < D_{30,0.1}$,说明在指定的显著性水平下接受原假设是合适的。计算结果见表3。

表3 分布参数估计及K-S检验结果分析 h

分布类型假设	参数估计值	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
3参数	$\beta=1.33, \eta=7460, \gamma=237$	0.05900	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

注: β 为形状参数, η 为尺度参数, γ 为位置参数。

从表中可见,3参数威布尔分布K-S检验的统计观测值小于临界值,因此接受原假设。

1.2 引气压力调节活门恒温控制电磁阀寿命建模

1.2.1 寿命数据

引气压力调节活门恒温控制电磁阀(Temperature Limitation Thermostat, TLT)的寿命数据见表4。

表4 TLT寿命数据 h

序号	1	2	3	4	5	6
时间	2183	2426	2809	3481	3904	3986
序号	7	8	9	10	11	12
时间	4083	4370	4385	4576	4672	4914
序号	13	14	15	16	17	18
时间	5274	5813	5864	6019	6460	6729
序号	19	20	21	22	23	24
时间	7159	7752	7951	8128	8446	8786
序号	25	26	27	28	29	30
时间	8975	9145	9310	9481	9974	10578

1.2.2 分布参数估计及K-S检验

分布参数估计及K-S检验结果见表5。

表5 分布参数估计及K-S检验结果

分布类型假设	参数估计值	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
3参数	$\beta=1.67, \eta=6685, \gamma=1483$	0.06500	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

1.3 引气压力调节活门寿命建模

1.3.1 寿命数据

引气压力调节活门(Pressure Regulator Valve, PRV)的寿命数据见表6。

1.3.2 分布参数估计及K-S检验

分布参数估计及K-S检验结果见表7。

表6 PRV寿命数据 h

序号	1	2	3	4	5
时间	1569	2028	2516	2808	3195
序号	6	7	8	9	10
时间	3644	4100	4577	4871	5032
序号	11	12	13	14	15
时间	5324	5726	6529	7483	7887
序号	16	17	18	19	20
时间	8452	8748	9054	9699	10226
序号	21	22	23	24	25
时间	10932	11531	12638	12946	13285
序号	26	27	28	29	30
时间	13671	14872	15236	16519	17106

表7 分布参数估计及K-S检验结果

分布类型假设	参数估计值	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
3参数	$\beta=1.39, \eta=9158, \gamma=947$	0.05700	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

1.4 引气监控计算机寿命建模

1.4.1 寿命数据

引气监控计算机(Bleed Monitoring Computer, BMC)的寿命数据见表8。

表8 BMC寿命数据 h

序号	1	2	3	4	5	6
时间	1271	1676	1827	2009	2217	2220
序号	7	8	9	10	11	12
时间	2449	2553	2617	2775	3219	3448
序号	13	14	15	16	17	18
时间	3552	3832	3909	4017	4333	4894
序号	19	20	21	22	23	24
时间	5089	5134	5550	5883	6115	7881
序号	25	26	27	28	29	30
时间	7981	8352	8873	8991	9453	9868

1.4.2 分布参数估计及K-S检验

分布参数估计及K-S检验结果见表9。

表9 分布参数估计及K-S检验结果

分布类型假设	参数估计值	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
3参数	$\beta=1.23, \eta=4910, \gamma=1079$	0.09900	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

1.5 高压活门寿命建模

1.5.1 寿命数据

高压活门(High Pressure Valve, HPV)的寿命数据见表10。

表 10 HPV 寿命数据 h

序号	1	2	3	4	5	6
时间	983	1697	2027	2088	2271	2784
序号	7	8	9	10	11	12
时间	3619	3617	3845	3894	4119	4541
序号	13	14	15	16	17	18
时间	5055	5194	5653	5742	6299	6429
序号	19	20	21	22	23	24
时间	6851	7392	7613	7795	8161	8856
序号	25	26	27	28	29	30
时间	9745	9846	10049	10370	10736	11935

1.5.2 分布参数估计及 K-S 检验

分布参数估计及 K-S 检验结果见表 11。

表 11 分布参数估计及 K-S 检验结果

分布类型假设	参数估计值	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
3 参数	$\beta=1.72, \eta=7089, \gamma=215$	0.05800	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

2 引气系统部件寿命分析

2.1 引气系统部件可靠性评估

根据上述结果,可建立引气系统部件的可靠性模型。部件的可靠度函数、故障率函数和故障概率密度函数见表 12,绘制各函数的曲线。部件的可靠度、故障率、故障概率密度函数曲线分别如图 3~5 所示。

表 12 引气系统部件的可靠性模型

部件名称	可靠度函数 $R(t)$	故障率函数 $\lambda(t)$	故障概率密度函数 $f(t)$
TCT	$e^{-\left(\frac{t-237}{7460}\right)^{1.33}}$	$\frac{1.33}{7460} (t-237)^{-0.33}$	$\frac{1.33}{7460} \left(\frac{t-237}{7460}\right)^{0.33} e^{-\left(\frac{t-237}{7460}\right)^{1.33}}$
TLT	$e^{-\left(\frac{t-1483}{6685}\right)^{1.67}}$	$\frac{1.67}{6685} (t-1483)^{-0.67}$	$\frac{1.67}{6685} \left(\frac{t-1483}{6685}\right)^{0.67} e^{-\left(\frac{t-1483}{6685}\right)^{1.67}}$
PRV	$e^{-\left(\frac{t-947}{9158}\right)^{1.39}}$	$\frac{1.39}{9158} (t-947)^{-0.39}$	$\frac{1.39}{9158} \left(\frac{t-947}{9158}\right)^{0.39} e^{-\left(\frac{t-947}{9158}\right)^{1.39}}$
BMC	$e^{-\left(\frac{t-1079}{4910}\right)^{1.23}}$	$\frac{1.23}{4910} (t-1079)^{-0.23}$	$\frac{1.23}{4910} \left(\frac{t-1079}{4910}\right)^{0.23} e^{-\left(\frac{t-1079}{4910}\right)^{1.23}}$
HPV	$e^{-\left(\frac{t-215}{7089}\right)^{1.72}}$	$\frac{1.72}{7089} (t-215)^{-0.72}$	$\frac{1.72}{7089} \left(\frac{t-215}{7089}\right)^{0.72} e^{-\left(\frac{t-215}{7089}\right)^{1.72}}$

从图 3 中可见,部件的可靠度随着时间的增加逐渐递减。当 β 在 1 左右变化时,曲线下降得比较平缓,当 $\beta>1$ 时,随着 β 的增大,曲线下降的速度由慢变快。

根据可靠度函数和可靠度曲线可以确定部件在指定时间内正常工作时的可靠度,例如当风扇空气活门控制恒温器的工作时间不大于 4000 h,该部件能

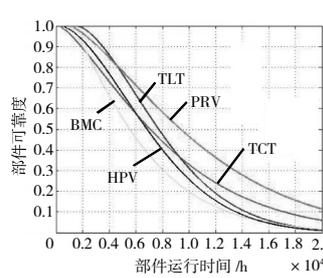


图 3 引气系统部件的可靠度

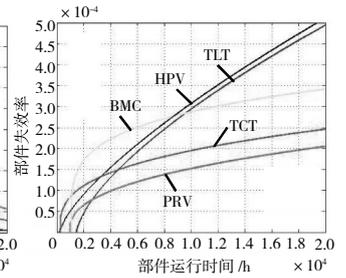


图 4 引气系统部件的故障率

够正常工作的概率为 67% (由可靠度函数即可得出,将 $t=4000$ 代入表 12 计算)。图中的曲线具有类似意义。

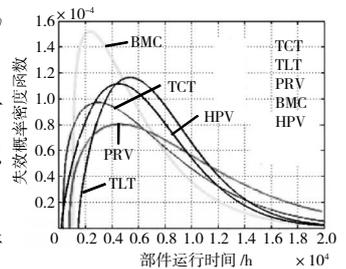


图 5 引气系统部件的故障率概率密度函数

从图 4 中可见,部件的故障率随着时间的增加逐渐增加。当 $\beta \approx 1$ 时,部件的故障率变化趋势较缓慢,并逐渐趋于固定值;当 $\beta>1$ 时,随着 β 的增大,曲线上升的速度由慢变快。

部件故障率随时间呈上升趋势,因此维修人员可根据故障率曲线和部件的可靠度来确定最佳维修间隔进行预防性维修,防止部件故障的发生。

从图 5 和表 12 中可见,当 β 趋近于 1 时,曲线变化平缓;当 $\beta>1$ 时,随着 β 的增大,曲线变化较快。

2.2 故障类型识别

形状参数 β 即威布尔分布函数曲线的斜率^[12-13],当 $\beta<1$ 时,意味着故障率随时间的增加而递减,故障类型为早期故障,即在使用寿命的初期故障率较高,随着使用时间的增长,故障率呈降低趋势。为了中止早期故障的高故障率,在产品投入使用前期,制造商通常会在交付之前进行产品的接收测试、老化和早期环境应力筛选^[14-16]。对处于早期故障阶段的部件,预定维修并不适用,应该采取状态监控或视情维修的方式^[15]; β 值越接近 1,则意味着故障率随时间的变化越平缓。

当 $\beta=1$ 时,意味着故障率是恒定的,不随时间的变化而变化,故障类型为偶然故障,在此阶段一般的预定维修对提高部件可靠性的作用不大,提高部件可靠性的惟一方式是对部件进行重新设计。

当 $1<\beta<4$ 时,意味着故障率随时间的增加而递增,故障类型为早期耗损失效,在此阶段对部件进行

预定维修的费用太高,而应该采取状态监控或视情维修的方式。

当 $\beta > 4$ 时,意味着故障率随时间的增加而急剧增加,故障类型为快速耗损,在此阶段可以通过优化预定维修的计划提高部件可靠性;针对此类型部件可采用硬时限^[7](Hard-Time Limit, HTL)的控制方式,确定1个可靠度(由飞机维修部门确定)下的使用时限 t_R ,当使用时间达到 t_R 时进行维护或翻修。

因此可以根据计算出来的 β 值确定部件的故障类型。然而故障类型的确定并不能完全依赖于形状参数 β ,应同时考虑部件的实际使用情况。

由计算结果可知部件的 β 值均大于1,部件的故障率随着时间增长而增加。部件的故障类型见表13。

部件故障模式的分析与威布尔分布的形状参数有很大关系,但仅考

虑形状参数的大小是不够的,应该同时考虑发动机引气系统部件的实际使用情况。由上述部件故障分析可知,用威布尔分布模型来拟合部件的寿命数据符合部件的实际情况,且效果较好。

若对故障征兆实行连续监测,一旦发现故障先兆,便立即采取措施,以防止功能故障的发生。当进行定期检查时,若2次检查的间隔比从出现故障先兆到发生功能故障之间的工作时间短时,仍可及时发现并排除故障。针对此类型部件可采用硬时限的控制方式确定1个可靠度较低的使用时限,当使用时间达到该时限时进行维护或翻修。

3 结束语

本文以V2500发动机引气系统为例,对该系统非计划拆换出现异常的部件进行可靠性分析及评价,得到以下启示:

(1)威布尔分布模型为维修方案的制定提供参考。

飞机部件的可靠性状况直接决定了应采用的维修方式。在部件维修方案制定过程中,应该根据部件的实际情况因地制宜,对部件实际使用数据进行可靠性分析,据此确定合理的维修方式,这也是对飞机或发动机部件性能进行可靠性分析的主要目的之一。

(2)威布尔分布模型为航材储备数量提供重要参考。

理论上航材储备越多越好,然而飞机及发动机部件价格高昂,航材的大量储备将占用航空公司大量资金;如果航材储备过少,就会因缺件而影响维修效率。可靠性分析能够为航空公司提供科学的航材储备计划,在有利于节省航材开支的情况下可防止因缺件而影响维修。在工程中可根据部件的失效率函数计算出航空公司1年内该部件的失效数量,以此确定该部件1年内的备件数量。

参考文献:

- [1] 孙新利, 陆长捷. 工程可靠性教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:11-12.
SUN Xinli, LU Changjie. Engineering reliability course [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:11-12.(in Chinese)
- [2] 谭松林, 李宝盛. 液体火箭发动机可靠性[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014:22-23.
TAN Songlin, LI Baosheng. Reliability of liquid rocket engine [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2014: 22-23. (in Chinese)
- [3] 李斌. 液体火箭发动机结构可靠性设计与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
LI Bin. Structural reliability design and analysis of liquid rocket engine [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] 尤明懿. 一种面向设计寿命全过程的电子系统可靠性分配法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012(1): 32-36.
YOU Mingyi. Reliability allocation method of electronic systems for the whole design life [J]. Reliability and Environmental Test of Electronic Products, 2012(1): 32-36. (in Chinese)
- [5] Kumar M, Yadav S P. The weakest T-norm based intuitionistic fuzzy fault tree analysis to evaluate [J]. ISA Transactions, 2012, 51(4): 531-538.
- [6] CAI Quan, LIANG Lingqiang, YU Dongping, et al. A reliability risk analysis method based on the fuzzy fault tree and fuzzy event tree[C]// 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). Hangzhou: IEEE, 2016: 1-6.
- [7] Batchoun P, Ferland J A, Cléroux R. Allotment of aircraft spare parts using genetic algorithms [J]. Pesquisa Operacional, 2003, 23(1):141-159.
- [8] Wu H Q, Liu Y, Ding Y L. Methods to reduce direct maintenance costs for commercial aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2004, 76(1): 15-18.
- [9] 赵晓彤, 赵廷弟, 王云飞, 等. 可靠性实用指南[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 23-25.
ZHAO Xiaotong, ZHAO Tingdi, WANG Yunfei, et al. Practical guide

- to reliability [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:23-25. (in Chinese)
- [10] 张德丰. Matlab 概率与数理统计分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2009: 121-123.
- ZHANG Defeng. Matlab probability and mathematical statistical analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2009:121-123. (in Chinese)
- [11] 周博, 谢东来, 张宪海. MATLAB 科学计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 78-79.
- ZHOU Bo, XIE Donglai, ZHANG Xianhai. MATLAB scientific calculation [M]. Beijing: China Machine Press, 2010:78-79. (in Chinese)
- [12] Federal Aviation Administration. Title 14 of the code of federal regulations [EB/OL]. (2013-09). http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgFAR.nsf/MainFrame?OpenFrameSet.
- [13] Ichikawa M. An extension of the reliability based design method for variable amplitude fatigue[J]. Reliability Engineering, 1987, 17(3): 312-316.
- [14] Parthasarathy G, Menon S, Richardson K, et al. Neural network models for usage based remaining life computation [J].ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 1-7.
- [15] Chen L J, Liu Y H, Xie L Y. Power-exponent function model for low-cycle fatigue life prediction and its applications-part II: life prediction of turbine blades under creep-fatigue interaction [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 10-19.
- [16] 苏清友, 孔瑞莲, 陈筱雄, 等. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南[M].北京:航空工业出版社, 2004: 345-355.
- SU Qingyou, KONG Ruilian, CHEN Xiaoxiong, et al. Life determination guidelines for main components of aviation turbojet and turbofan engine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004:345-355. (in Chinese)
- [17] 刘德一. 民航概论[M]. 北京:中国民航出版社, 2008: 117-119.
- LIU Deyi. Introduction to civil aviation [M]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2008: 117-119. (in Chinese)

(编辑:刘 静)