

基于飞参信息的某型涡轴发动机性能退化研究

谢镇波, 孙护国, 于海滨

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 研究涡轴发动机性能退化规律。**方法** 以某型涡轴发动机监控工作为基础, 根据该型发动机性能计算模型和发动机出厂时的排气温度基线, 计算稳定工作状态下该型涡轴发动机的排温裕度和燃油消耗率随工作时间的变化情况, 统计并分析近4~6年以来10台涡轴发动机的飞参数据。**结果** 随着工作时间的增加发动机的效率都会降低, 发动机的燃油消耗率随时间逐渐增大。**结论** 通过定期合理地清洗发动机, 及时采取防腐控制措施等方法, 可以减缓发动机性能退化速度。

关键词: 涡轴发动机; 监控; 飞参; 性能退化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.022

中图分类号: TJ01; V235.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0115-05

Study on the Performance Deterioration of Turboshaft Engine Based on Air Data

XIE Zhen-bo, SUN Hu-guo, YU Hai-bin

(Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the performance deterioration regularity of turboshaft engine. **Methods** Base on the monitoring works of certain turboshaft engine, the performance calculation model was analyzed. The exhaust temperature margin and the fuel consumption during engine working were also determined based on the exhaust temperature baseline. The air data of ten turboshaft engines during the past 4 to 6 years was collected and analyzed. **Results** With the increase of working time, the efficiency of engines falls down. The fuel consumption rate of engines was gradually increased with time. **Conclusion** The performance deterioration speed of engines can be slowed down by regularly cleaning, in time corrosion protection and other methods.

KEY WORDS: turboshaft engine; monitor; air data; performance deterioration

近年来,随着航空涡轴发动机服役时间的增加,其性能下降和退化程度愈加明显,发动机性能退化引发的安全性和经济性变差已变得越来越受关注。尽

管不同型号涡轴发动机性能退化程度各不相同,甚至同型号涡轴发动机中的各台发动机性能退化也不尽相同。大量的历史经验表明,涡轴发动机的维护工作

收稿日期: 2015-04-30; 修订日期: 2015-05-03

Received: 2015-04-30; Revised: 2015-05-03

作者简介: 谢镇波(1980—),男,辽宁丹东人,硕士研究生,主要研究方向为航空发动机状态监控和故障诊断。

Biography: XIE Zhen-bo(1980—), Male, from Dandong, Liaoning, Master graduate student, Research focus: aircraft engine condition monitoring and fault diagnosis.

和研发、改进等工作都需要尽可能地研究发动机性能下降的状况,寻找发动机使用过程中性能退化的规律。

NASA 利用现役航空发动机大修/试车试验后的维修记录和履历本中记录的性能数据,研究了压气机、燃烧室、涡轮以及密封性与间隙对发动机性能退化的影响。通过完善维修方案,改善发动机的性能,降低燃油消耗率。国内对于发动机性能退化的研究主要是基于气动热力学原理的趋势分析法、基于小偏差法的气路部件分析法、基于人工智能的气路性能分析法和构建发动机性能衰退模型等方法。综上所述,要分析发动机性能衰退的最可能原因,需要研究发动机的各类数据,文中依据某型涡轴发动机工作时的飞参信息,研究涡轴发动机性能退化规律。

随着使用时间的增加,发动机效率降低,为了获得同等条件下同样的功率(扭矩),就必须增加燃油流量,从而使得排气温度升高。因此发动机的燃油流量和发动机扭矩与排气温度之间存在着一种必然的内在联系,寻找三者之间联系随时间的变化规律能够反映发动机的性能退化情况。

飞参系统显示的参数包括旋翼转速 n_R 、燃气涡轮转速 n_g 、自由涡轮转速 n_{pt} 、涡轮前温度 θ_4 和发动机扭矩 C 等。系统警告包括放气阀警告、功率损失警告、滑油低压警告、发动机控制警告和超转警告等,维护监控数据主要有振动值、滑油消耗、功率保证和燃油消耗等^[1-4]。

1 发动机性能计算模型

收集并分析直升机飞参信息中的发动机参数数据,是研究某型涡轴发动机的外场性能变化规律的前提和基础。文中在统计并分析了某型发动机最大连续工作状态的温度裕度和燃油消耗率变化情况的基础上,研究发动机性能的退化规律。

某型涡轴发动机的发动机参数数据信息包括:最大应急、起飞状态、中间应急状态、最大连续状态下的燃气涡轮转速、涡轮前温度、工作时间、滑油压力等参数,以及飞行中最大值(n_g 、 θ_4 、燃油消耗率、发动机功率、工作时间等参数)。根据计算和分析的需要,建立相关计算模型^[5-6]。

1.1 标准化计算模型

飞参记录的数据是飞机在空中或地面各种工作状态下的飞行参数,实际工作中发动机的工作环境通

常是千差万别的。为了更好地判断发动机的状态,发动机气路参数的实际测量值通常被修正到某种标准状况下得到相应气路参数的修正值。该修正值相对于发动机装机初始状态下参数观测值的偏差量或偏差比才是实际的发动机状态判断所需要的监测参数,通过对它们的监测和分析,可以横向对比发动机的性能,使发动机性能分析更有意义。为此,进行飞参数据的标准化转换,将各种发动机参数换算到标准大气条件下($\theta_0=15\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $P_0=101\ 325\text{ Pa}$)的数据。根据相似条件,发动机在非标准大气条件下(即在 p_H^* 、 θ_H^* 条件下)的飞参数据按照式(1)~(4)进行转化^[7-8]:

$$\text{换算转速 } N_{\text{cor}} = n \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta_H^*}} \quad (1)$$

式中: N_{cor} 为标准大气条件下的换算转速; n 为实际大气条件下的实测转速; θ_H^* 为当前大气条件下气压高度下的大气总温。

$$\text{换算温度 } \theta_{4\text{cor}} = \theta_4 \times \frac{\theta_0}{\theta_H} \quad (2)$$

式中: θ_{cor} 为标准大气条件下的换算温度; θ_4 为实际大气条件下的实测静温。 θ_H 为当前大气条件下气压高度下的大气静温。

$$\text{换算功率 } N_{\text{cor}} = N \times \frac{p_0}{p_H} \times \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta_H}} \quad (3)$$

式中: N_{cor} 为标准大气条件下的换算功率; N 为实际大气条件下的实际功率; p_H 、 θ_H 为实际大气条件下对应气压高度下静压和静温。

$$\text{换算耗油率 } (scf)_{\text{cor}} = scf \times \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta_H^*}} \quad (4)$$

式中: $(scf)_{\text{cor}}$ 为标准大气条件下的换算耗油率; scf 实际大气条件下的实际耗油率。

1.2 发动机稳定工作状态提取模型

确定稳定工作状态(最大应急、起飞状态、中间应急、最大连续、地面慢车、飞行慢车)下发动机正常工作时的功率取值范围,依据飞参数据,计算各个时刻对应的发动机换算功率值 N_{cor} 。如果 N_{cor} 处于对应稳定工作状态下换算功率值的正常范围内,则认为对应时刻发动机处于相应的稳定工作状态。按照这种方法从飞参数据中提取所需的发动机稳定工作状态、参数数据及该稳定工作状态下的工作时间 Δt 。

1.3 稳定工作状态下的功率计算模型

当发动机处于稳定工作状态时,从飞参数据中

获取发动机的扭矩 C 、旋翼转速 n_R 、大气机绝对气压高度 H_p 、大气机真空速 v 、大气机静温 θ_H ;

对应高度下的大气静压为

$$p_H = p_0 \times \left(1 - \frac{\beta z}{\theta_0}\right)^{\frac{g}{R\beta}}$$

(5)

式中: $\beta=0.006\ 5\ \text{K/m}$ 。

发动机的换算功率 N_{cor} 利用公式(3)计算。

1.4 稳定工作状态下的耗油率计算模型

假设飞参数据采样频率为 1/s,从飞参数据中提取发动机的稳定工作状态下的扭矩 C 、旋翼转速 n_R 、大气静温 T_H 、大气机绝对气压高度 H_p 、大气机真空速 v 、燃油瞬时燃油流量 m_t ,及工作时间 $\Delta t^{[9-10]}$ 。

利用大气机真空速,计算马赫数 $M_a = \frac{v}{\sqrt{kR\theta_H}}$,

其中 $R=287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$, $k=1.4$;计算对应气压高度的大气总温 $\theta_H^* = \theta_H\left(1 + \frac{k-1}{2}M_a^2\right)$;计算在对应稳定工作

状态下,各个数据点对应的瞬时功率 $N=1300 \times C \times \frac{n_R}{207}$;利用瞬时燃油流量和瞬时功率计算瞬时燃油消

耗率 $sfc = \frac{m_t}{N}$;利用公式(4)将其转换成标准大气条件下的换算耗油率 $(sfc)_{cor}$;对稳定工作状态下所有点的瞬时耗油率求均值 $\frac{\sum (sfc)_{cor}}{\theta_H^*}$ 。

2 某型涡轴发动机性能退化

文中收集了 10 台某型涡轴发动机近 4~6 年来的飞参信息,以最大连续工作状态的排温裕度、燃油消耗率的变化情况分析发动机性能的退化规律。

首先统计飞参中每个飞行循环里最大连续工作状态的发动机相关信息,剔除奇异点,提取稳定状态下的飞参信息。例如某型 1 号涡轴发动机飞参统计数据见表 1。

表 1 1 号发动机部分飞参数据
Table 1 Partial air data of No.1 engine

日期	相对时间	排气温度/℃	转速 n_g /(r·min ⁻¹)	分扭矩/%	燃油瞬时流量/(kg·h ⁻¹)	旋翼转速 n_g /(r·min ⁻¹)	总扭矩/%	绝对气压高度/m	大气静温/℃
20130726	0:35:26	726.844	33 179	69.744	385.656	203	95.238	68	30.047
	0:36:05	724.906	33 253	69.841	362.453	203	95.043	69.75	30.219
	0:36:28	715.812	32 813	59.194	365.969	209.1	82.247	69.25	29.875
	1:16:21	706.906	33 031	72.576	391.984	207.4	95.043	72	29.125
	1:17:28	701.406	32 669	67.985	379.328	204.9	85.861	71.75	30.906
20130730	0:13:10	693.875	32 669	67.594	364.203	206.3	96.801	93.5	29.219
	0:13:18	693.312	32 669	66.813	359.641	206.9	97.485	94.75	29.219
	0:44:09	693.156	32 598	67.594	362.109	203.9	93.187	93.25	29.234
	0:44:12	689	32 456	65.934	348.047	209.9	96.899	97.75	29.219
	0:44:16	686.5	32 385	64.176	359.641	203.9	89.963	94.25	29.234
20130803	0:18:09	692.875	32 562	67.204	358.234	206.4	90.549	116.25	30.344
	0:18:10	695.094	32 705	67.594	358.594	206.3	93.675	115.5	30.328
	0:18:11	693.75	32 705	67.204	354.016	206.6	93.089	119.75	30.312
	1:17:40	693.906	32 813	68.083	365.969	205.9	90.061	103.5	32.156
	1:17:41	692.781	32 886	68.083	356.125	207.4	92.991	107.25	32.078

某型涡轴发动机起动时排气温度温度限制值是 750 ℃,若超温应立即停车。换算到标准条件 $\theta_0=15\ \text{℃}$ 和 $P_0=101\ 325\ \text{Pa}$ 下,相对应的燃气发生器转速为 32 500 r/min时,新出厂的和刚经过翻修的发动机的排气温度基准值是 675 ℃。

根据稳定工作状态的计算模型,将 1 号发动机飞

参性能数据换算到标准状况下,见表 2。

根据换算数据,统计发动机在一定功率范围内的排温裕度和燃油消耗率随工作时间的变化情况。10 台发动机的性能变化情况类似,1—4 号发动机性能随工作时间变化情况如图 1—4 所示。可以看出,随着工作时间的增加,几乎所有发动机的效率都在降低,为

表2 1号发动机部分飞参的换算数据
Table 2 Partial conversion data of No.1 engine

日期	换算转速/(r·min ⁻¹)	换算温度/℃	瞬时功率/HP	换算耗油率/(kg/HP·h)	大气静压/bar	换算功率/HP	排温裕度/℃
20120726	32 344.81	690.754 5	1 191.178	0.315 62	1.012 883	1 161.649	15.754 48
	32 407.75	688.521 9	1 192.834	0.296 135	1.012 981	1 162.823	13.521 92
	31 997.09	680.656 6	1 041.401	0.342 682	1.012 833	1 015.924	5.656 561
	32 249.62	673.856 6	1 270.718	0.301 177	1.012 801	1 241.209	1.143 391
	31 802.59	664.695 4	1 158.845	0.318 652	1.012 4	1 129.059	10.304 57
20120730	31 891.23	661.229 1	1 166.412	0.304 808	1.012 102	1 139.934	13.770 89
	31 891.23	660.692 6	1 166.439	0.300 983	1.011 909	1 140.178	14.307 4
	31 821.13	660.511 2	1 162.427	0.304 087	1.012 249	1 135.846	14.488 85
	31 683.3	656.583 5	1 161.088	0.292 623	1.011 65	1 135.238	18.416 53
	31 613.2	654.168 6	1 103.647	0.318 1	1.012 341	1 078.312	20.831 38
20120803	31 867.95	659.96 9	1 165.273	0.299 858	1.009 122	1 140.094	15.031 02
	31 868.79	658.727 6	1 167.606	0.295 446	1.008 786	1 142.787	16.272 35
	31 727.77	657.827 4	1 158.55	0.301 287	1.009 4	1 133.174	17.172 58
	31 877.28	654.894 3	1 174.277	0.302 767	1.011 077	1 143.241	20.105 69
	31 952.28	653.999 7	1 180.584	0.293 087	1.010 668	1 149.995	21.000 28

了满足发动机具有足够的输出功率,发动机的燃油消耗率随时间逐渐增大,从而造成排温裕度随时间不断减小。其中1号发动机在工作100 h后,性能出现恢复的趋势。经调查发现,该飞机在工作一段时期后实施了发动机定期清洗等措施,从而使得发动机燃油消耗

率呈下降趋势。通过对多单位普查,正确地使用发动机,定期合理地清洗发动机,以及及时采取防腐控制措施等方法,可以有效减缓发动机性能的退化速度,甚至对于个别情况还会起到一定程度恢复发动机性能的效果。

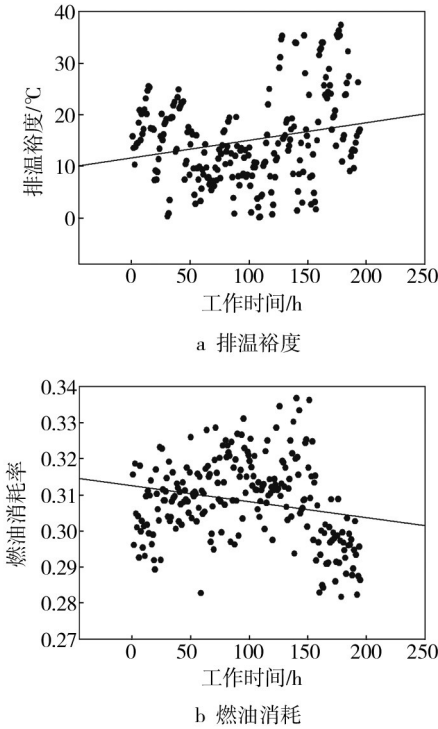


图1 1号发动机排温裕度和燃油消耗率变化趋势
Fig.1 Tendency charts of No.1 engine exhaust temperature tolerance and fuel consumption

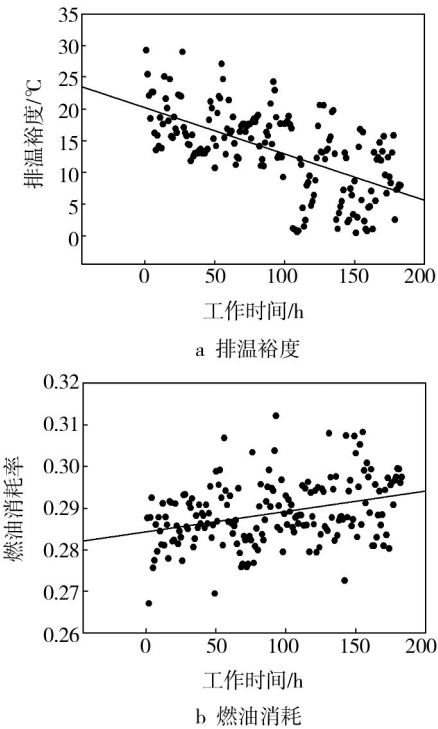


图2 2号发动机排温裕度和燃油消耗率变化趋势
Fig.2 Tendency charts of No.2 engine exhaust temperature tolerance and fuel consumption

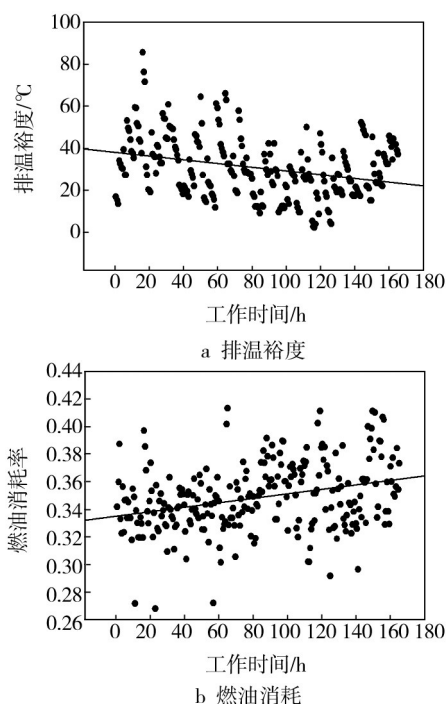


图3 3号发动机排温裕度和燃油消耗率变化趋势

Fig.3 Tendency charts of No.3 engine exhaust temperature tolerance and fuel consumption

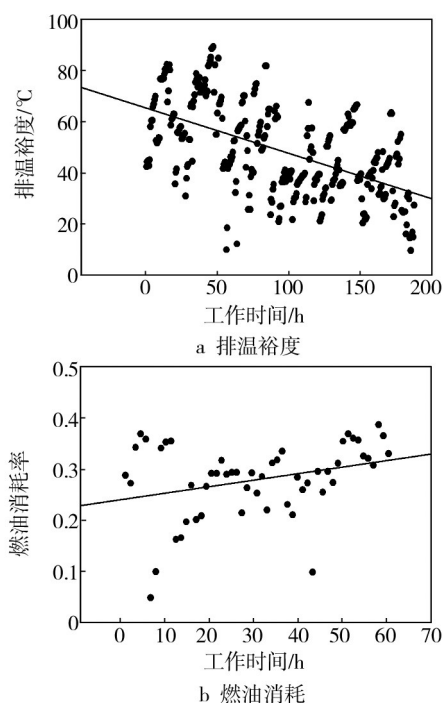


图4 4号发动机排温裕度和燃油消耗率变化趋势

Fig.4 Tendency charts of No.4 engine exhaust temperature tolerance and fuel consumption

3 结论

针对涡轴发动机随使用时间增加而性能退化明显的现状,通过调查、收集某型涡轴发动机4~6年的

工作性能数据和维修信息,根据涡轴发动机性能计算模型以及发动机出厂时的排气温度基线,计算排温裕度和燃油消耗率随工作时间的变化规律。随着工作时间的增加发动机的效率都会降低,发动机的燃油消耗率随时间逐渐增大。通过定期合理地清洗发动机,及时采取防腐控制措施等方法,可以有效减缓发动机性能的退化速度。

参考文献

- [1] 范作民,孙春林,白杰. 航空发动机故障诊断导论[M]. 北京:科学出版社,2004.
FAN Zuo-min, SUN Chun-lin, BAI Jie. Introduction to Aero-engine Fault Diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] CHRISTENSEN D, CANTIN P D. Development and Demonstration of a Stability Management System for Gas Turbine Engines[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(3): 031011(1—9).
- [3] ZAITA A V, BULEY G, KARLSONS G. Performance Deterioration Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine Engine & Power, 1998, 120(2): 344—349.
- [4] ROEMER M J. Development of Diagnostic and Prognostic Technologies for Aerospace Health Management Applications [C]// 2001 IEEE Aerospace Conference. USA: Montana, 2001: 3139—3147.
- [5] 毛景立,李鸣,林健. 某型涡轮轴发动机稳态气路故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 69—74.
MAO Jing-li, LI Ming, LIN Jian. Method of Fault Diagnosis for One Turbo Shaft Engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 69—74.
- [6] 海雯炯,张家峰,赵树峰. 基于飞参数据的发动机状态监控方法研究[J]. 装备制造技术, 2006, (3): 5—7.
HAI Wen-jiong, ZHANG Jia-feng, ZHAO Shu-feng. A Study of Engine Condition Monitoring Method Based on Flight Data [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2006, (3): 5—7.
- [7] 杨蔚华. 航空发动机建模及故障诊断[D]. 南京:南京航空航天大学, 2000: 13—41.
YANG Wei-hua. Aviation Engine Modeling and Fault Diagnosis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000: 13—41.
- [8] 赵健印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
ZHAO Jian-yin. Study on Reliability Modeling and Applications Based on Performance Degradation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [9] MA Ji-ming, ZHAN Xiao-yan, ZENG Sheng-kui. Real Time Reliability Analysis Based on the Performance Degradation

(下转第123页)

院,2004.

LI De-peng, DAI Xiang-jun. Security of Ammunition Storage and Transportation[M]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2004.

- [13] 易建政,李杏军. 有关 Goff-Gratch 公式的简化处理[J]. 包装工程, 1997, 18(6): 21—24.

YI Jian-zheng, LI Xing-jun. A Simplified Treatment of the Relevant Goff-Gratch Formula[J]. Packaging Engineering, 1997, 18(6): 21—24.

- [14] 王维,宣兆龙,段志强. 基于 ANSYS Workbench 的某弹药储运方舱支撑件力学分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 25—29.

WANG Wei, XUAN Zhao-long, DUAN Zhi-qiang. Mechanics Analysis on Supporting in an Ammunition Storage and Transportation Shelter Based on ANSYS Workbench[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 25—29.

- [15] 靳跃钢,高海波,赵耀辉,等. 美军弹药包装设计与试验要求[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 137—141.

JIN Yue-gang, GAO Hai-bo, ZHAO Yao-hui, et al. Design and Test Requirements of US Military Ammunition Packaging [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 137—141.

- [16] GJB 1444—1992, 弹药包装通用规范[S].
GJB 1444—1992, General Specification for Ammunition Package[S].

(上接第 114 页)

Log-modified Weibull Regression Models with Censored Data: Sensitivity and Residual Analysis[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2008 52(8): 4021—4039.

- [9] KIM Seong-Joon, BAE Suk Joo. Cost-effective Degradation Test Plan for a Nonlinear Random-coefficients Model[J]. In Reliability Engineering and System Safety February, 2013, 110: 68—79

- [10] CHAOS M T. Degradation Analysis and Related Topics: Some Thoughts and a Review[J]. Proc Natl Sci Coun. ROC (A), 1999, 23(5): 555—566.

- [11] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.

ZHANG Zhi-hua. Accelerated Life Test and Statistic Analysis [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002.

- [12] 赵宇,杨军,马小兵. 可靠性数据分析[M]. 北京: 北京航空

航天大学出版社, 2011.

ZHAO Yu, YANG Jun, MA Xiao-bing. Data Analysis of Reliability[M]. Beijing: Beihang University Press.

- [13] YANG Liu-ying, ZHAO Gang, WU Bin-bin, et al. Assembly Sequence Planning for Aircraft Component Based on Improved Clashes Matrix[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 88/89: 22—28.

- [14] 钟强晖,张志华,王磊. 考虑模型选择的退化数据分析方法[J]. 系统工程, 2009, 27(11): 111—114.

ZHONG Qiang-hui, ZHANG Zhi-hua, WANG Lei. About Model Choice of Degradation Data Analysis Methods[J]. Systems engineering, 2009, 27(11): 111—114.

- [15] LI X J. Study on the Confidence Limits for the Mean of Weibull Distributions[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2010, (1): 74—56.

(上接第 119 页)

Data and Bayesian Method[C]// 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 2011: 90—94.

- [10] DASGUPTA A, PECHT M. Material Failure Mechanism sand Damage Models[J]. IEEE Trans on Rel, 1991, 40(5): 531—536.

- [11] 张辉,王陶,李明,等. 基于功能仿真的电子产品性能退化分析方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 43—48.

ZHANG Hui, WANG Tao, LI Ming, et al. Analysis Method of Performance Degradation of Electronic Product Based on Function Simulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 43—48.

- [12] 邓爱民,陈循,张春华,等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546—552.

DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data

[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 546—552.

- [13] 丁少娜,冯诚,陈毓,等. 基于性能退化数据分析的训练装备精度保持性评估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 30—34.

DING Shao-na, FENG Cheng, CHEN Yu, et al. Assessment of Precision Retention of Training Equipment Based on Performance Degradation Data Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 30—34.

- [14] 潘玉娜. 滚动轴承的性能退化特征提取及评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

PAN Yu-na. Research on Feature Extraction and Evaluation Method of Performance Degradation of Rolling Bearings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

- [15] 方峻,魏星,樊黎蔽. 基于多性能参数退化数据的可靠性评估及应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 29—32.

FANG Jun, WEI Xing, FAN Li-bi. Reliability Evaluation and Application Based on Multiple Performance Degradation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(5): 29—32.