

发动机综合监控系统的效能评估方法研究

谢镇波, 李洪伟, 蔡娜, 滕景奎

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 目的 提高航空发动机地面维护工作的效率。方法 采用融合层次分析法和专家调查法, 对新型航空发动机监控系统的实际工作效能评估方法进行研究和分析。结果 得出10名专家对该系统效能的评估结果。结论 通过分析系统各部分工作能力的效能优劣, 建议相关部门不仅要关注发动机监测方法和措施的提高, 更要重视监测工作中发现的问题和异常情况的及时反馈, 从而提高发动机综合保障能力。

关键词: 航空发动机; 监控系统; 效能评估; 层次分析; 专家调查

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.02.019

中图分类号: V235.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)02-0098-05

Research on the Effectiveness Evaluation Method for Integrated Monitor System of Air-engine

XIE Zhen-bo, LI Hong-wei, CAI Na, TENG Jing-kui

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

ABSTRACT: **Objective** To improve the efficiency of ground maintenance work of aero engine. **Method** Integrated application of analytic hierarchy process and expert investigation method was employed to study and analyze the effectiveness evaluation method for a new integrated monitor system of aero engine. **Result** Ten experts gave the performance evaluation results of system effectiveness. **Conclusion** Analysis of the work capacity of each part in the system suggested that the relevant departments should not only pay attention to the improvement of engine monitoring methods and measures, but also the feedback of problems and uncommon conditions in monitoring work, in order to increase the engine support ability.

KEY WORDS: aero engine; monitor system; effectiveness evaluation; analytic hierarchy; expert investigation

目前,以美国为代表的航空发动机技术成熟的国家,其发动机综合监控系统较为完善,但国内对航空发动机综合监控的研究尚处于探索和逐步完善的

阶段,未形成完善并行之有效的系统。因此,航空发动机综合监控在未来相当长的时期内仍然是我国航空装备需要重视的维修方式,发展地面维护、实施综

收稿日期: 2013-11-21; 修订日期: 2013-12-15

Received: 2013-11-21; Revised: 2013-12-15

作者简介: 谢镇波(1980—),男,辽宁丹东人,硕士,讲师,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, Lecturer, Research focus: aircraft engine condition monitoring and fault diagnosis research.

合监控的保障技术也是当前我国航空装备发展中的一项重要工作。设备系统效能的评估是系统研制、装备和使用过程中不可缺少的步骤,也是衡量航空装备对象保障能力的一个重要综合指标^[1-4]。由于国内发动机监控系统不够完善,因此发动机监控系统效能评估方面的研究很少,缺乏专门的理论研究。

通过对系统效能的评估,可以了解航空发动机状态监控系统满足维修任务需求的程度;并通过对效能指标的分析,评估对比影响监测系统效能的主要因素,改进和提高监测系统的设计水平^[5-10]。笔者针对航空发动机地面监控和维护工作进行了阶段性综合评价,并在阶段性工作中邀请了专业内10名知名专家对监控工作进行了记录和评判。

1 监控系统的层次结构评估模型

根据航空发动机综合监控的工作内容,对发动机综合监控系统指标体系进行分解。第一层为目标层:发动机综合监控系统效能(E);第二层为准则层:主要为影响发动机综合监控系统效能的各个方面;第三层为子准则层,即把第二层的准则具体化,用不同的指标来度量,具体的发动机综合监测层次结构模型如图1所示。

根据层次分析法,顶层为效能(E);第二层为“发动机综合监控系统能力”,编号为A,各元素编号为

$A_1, A_2, \dots$;第三层编号为B,第三层各元素编号为 $B_1, B_2, \dots$;依此类推。

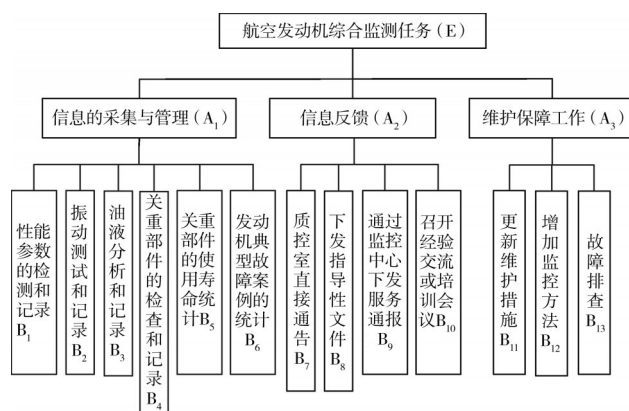


图1 航空发动机综合监测层次结构模型

Fig.1 Hierarchical structure model of integrated monitoring of aero engine

2 构造判断矩阵和获得各级指标的权值

构造间接判断矩阵 L ,具体过程和求解方法见文献[11]中的“判断矩阵”部分。这里判断矩阵的标度方法使用T.L.Saaty提出的1~9比例标度法^[12]。

为了对发动机监控系统的工作效能有一个充分了解和掌握,邀请的10位专家(P1—P10)对以上13项指标进行调查打分,给出判断矩阵,打分结果见表1。

表1 监控系统各能力指标打分结果

Table 1 Grading of monitoring system capacity index

一级指标	二级指标	K_{P1}	K_{P2}	K_{P3}	K_{P4}	K_{P5}	K_{P6}	K_{P7}	K_{P8}	K_{P9}	K_{P10}
信息采集 与管理 能力	性能参数监测	95	90	95	95	90	95	85	95	90	85
	振动测试	90	90	90	85	90	95	90	85	90	90
	油液分析	70	70	75	70	75	80	75	65	65	70
	关重件检查	85	85	90	85	80	90	90	85	85	85
	关重件寿命统计	75	80	80	75	75	80	70	70	75	80
	故障统计	80	80	80	80	80	85	75	70	70	75
信息反馈 能力	质控室通告	85	85	90	90	90	85	90	95	90	85
	下发文件	80	85	85	95	90	85	85	90	80	85
	服务通报	80	80	80	80	75	80	80	80	75	80
	经验交流或培训会	65	70	70	60	70	75	70	65	70	80
维护保障 工作能力	更新维护措施	80	75	75	75	70	75	75	70	80	75
	增加监控方法	70	70	75	75	75	85	75	70	75	75
	故障排查	80	85	85	85	80	80	80	75	80	85

构造监控系统各层的判断矩阵,计算各项能力指标的权值 w ,监控系统两级能力指标的权值见表2、表3。计算监控系统实际的二级指标权值只需在表中二级指标权值的基础上乘以一级指标权值即可。经过一致性检验,判断矩阵均满足一致性条件。

表2 监控系统一级能力指标权值 w_1
Table 2 First-class capacity index weights of monitoring system

一级指标	w_1									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
A_1	0.3985	0.3985	0.3579	0.3985	0.3579	0.3985	0.3985	0.3579	0.3985	0.3579
A_2	0.2685	0.2685	0.2842	0.2685	0.2842	0.2685	0.2685	0.2842	0.2685	0.2842
A_3	0.3330	0.3330	0.3579	0.3330	0.3579	0.3330	0.3330	0.3579	0.3330	0.3579

表3 监控系统二级能力指标权值 w_2
Table 3 Second-class capacity index weights of monitoring system

二级指标	w_2									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
B_1	0.1745	0.1837	0.1745	0.1633	0.1730	0.1633	0.1730	0.1745	0.1745	0.1837
B_2	0.1745	0.1837	0.1745	0.1633	0.1730	0.1633	0.1730	0.1745	0.1745	0.1837
B_3	0.1582	0.1484	0.1745	0.1633	0.1730	0.1633	0.1730	0.1582	0.1582	0.1484
B_4	0.1745	0.1679	0.1745	0.1633	0.1540	0.1633	0.1540	0.1745	0.1745	0.1679
B_5	0.1745	0.1679	0.1582	0.1633	0.1540	0.1633	0.1540	0.1745	0.1745	0.1679
B_6	0.1438	0.1484	0.1438	0.1835	0.1730	0.1835	0.1730	0.1438	0.1438	0.1484
B_7	0.2884	0.2839	0.2884	0.2716	0.2766	0.2884	0.2884	0.2716	0.2884	0.2884
B_8	0.2498	0.2387	0.2498	0.2284	0.2063	0.2498	0.2498	0.2284	0.2498	0.2498
B_9	0.2498	0.2387	0.2498	0.2284	0.2405	0.2498	0.2498	0.2284	0.2498	0.2498
B_{10}	0.2120	0.2387	0.2120	0.2716	0.2766	0.2120	0.2120	0.2716	0.2120	0.2120
B_{11}	0.3068	0.3068	0.2685	0.3068	0.3068	0.3068	0.3068	0.3383	0.3068	0.3068
B_{12}	0.3068	0.3068	0.3330	0.3068	0.3068	0.3068	0.3068	0.2807	0.3068	0.3068
B_{13}	0.3864	0.3864	0.3985	0.3864	0.3864	0.3864	0.3864	0.3810	0.3864	0.3864

3 专家相对可信度

由于专家判断的主观性和对象的复杂性,专家往往难以对同一准则下的多个元素的相对重要性作出准确判断,因此,将决策专家的可信度分为主观可信度和客观可信度两部分。主观可信度主要与专家在该领域内的地位、成果以及对决策问题的熟悉程

度等有关,客观可信度主要是专家给出具体判断结果的可信程度。笔者认为被邀请的领域专家基本具有相同的主观可信度,只对专家客观可信度(相对可信度)进行分析,文献[13]对专家相对可信度有详细的分析。
如果决策的备选方案有 n 个,分别记作 $1,2,\cdots,n$;共有 m 位专家参与决策,专家记为 $P_1,P_2,\cdots,P_m$ 。专家 P_k 给出的判断矩阵形式如下所示,且为互反矩阵。

$$\text{判断矩阵: } \mathbf{L}^{Pk} = \begin{bmatrix} 1 & l_{12}^{Pk} & \cdots & l_{1n}^{Pk} \\ l_{21}^{Pk} & 1 & \cdots & l_{2n}^{Pk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1}^{Pk} & l_{n2}^{Pk} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

若 $\mathbf{L}^{Pk}$ 是一致性矩阵,说明专家 P_k 的判断结果是完全可信的。但是,判断矩阵的一致性要受到专家知识结构、判断水平和个人倾向性等主观因素影响,并且被判断事物本身具有模糊性和不精确性,所以实际应用中判断矩阵往往都是不完全一致的。由于专家判断的可信度与专家判断的一致程度相关,因此,可以通过计算专家给出判断信息的一致程度来确定专家可信度。

若专家 P_k 判断信息存在不一致,则可通过选取不同的 β_{ijh}^{Pk} ,实现在对象 i 和 j 判断上的直接判断信息和间接判断信息间的转化关系,如下式所示:

$$l_{ijh}^{Pk} = \sum_{h=1, h \neq i, j}^n l_{ih}^{Pk} l_{hj}^{Pk} \beta_{ijh}^{Pk} \quad (2)$$

若专家 P_k 判断信息完全一致,则在对象 i 和 j 相对重要性的判断上的判断信息可由下式表示:

$$l_{ijh}^{Pk} = \sum_{h=1, h \neq i, j}^n l_{ih}^{Pk} l_{hj}^{Pk} \beta_{ijh}^{Pk*} \quad (3)$$

这样,向量 β_{ij}^{Pk} 与 β_{ij}^{Pk*} 越接近,则专家 P_k 在对象 i 和 j 上的判断越一致;而向量 β_{ij}^{Pk} 与 β_{ij}^{Pk*} 偏差越大,则专家 P_k 在对象 i 和 j 上的判断越混乱。因此,可以通

过确定向量 β_{ij}^{Pk} 与 β_{ij}^{Pk*} 的一致程度 δ^{Pk} ,来决定专家 P_k 在对象 i 和 j 判断的一致程度。用向量间夹角的余弦来确定表示向量之间的接近程度^[14]。通过优化,可以得到:

$$\delta_{ij}^{Pk} = \max \cos \theta_{ij}^{Pk} = \frac{1}{\sqrt{(n-2) \sum_{h=1, h \neq i, j}^n (\beta_{ijh}^{Pk})^2}} \quad (4)$$

由式(4)可计算专家 P_k 对 $n(n-2)$ 个独立判断(两两比较)的一致程度,得到专家 P_k 给出的全部判断信息的一致程度 δ^{Pk} :

$$\delta^{Pk} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n \delta_{ij}^{Pk} \quad (5)$$

专家 P_k 判断矩阵的一致程度 δ^{Pk} 也可反映专家自身判断的一致程度,其值越大说明专家判断一致程度越好。因此,根据各位专家自身判断的一致程度 δ^{Pk} ,可得到专家 P_k 的个体相对可信度:

$$\gamma^{Pk} = \frac{\delta^{Pk}}{\sum_{k=1}^m \delta^{Pk}} \quad (6)$$

当 $\sum_{h=1, h \neq i, j}^n (\beta_{ijh}^{Pk})^2$ 最小时, δ_{ij}^{Pk} 取得最大值,可以分别计算出 β_{ijh}^{Pk} 。因此,可以得到各专家在相应指标上的最优程度和相对可信度见表4。

表4 监控系统各专家的相对可信度

Table 4 Comparative reliability of experts in monitoring system

一致程度	信息采集 与管理 能力	信息反馈 能力	维护保障 能力	一级指标 能力	相对 可信 度	信息采集与管 理 能力	信息反馈 能力	维护保障 能力	一级指标 能力
δ^{P1}	36.2613	9.9495	3.0000	3.4167	γ^{P1}	0.1185	0.1381	0.0966	0.1051
δ^{P2}	20.4841	6.0000	3.0000	3.4167	γ^{P2}	0.0670	0.0833	0.0966	0.1051
δ^{P3}	35.7116	4.4947	3.4167	3.0000	γ^{P3}	0.1167	0.0624	0.1100	0.0923
δ^{P4}	32.1483	7.8472	3.0000	3.4167	γ^{P4}	0.1051	0.1089	0.0966	0.1051
δ^{P5}	28.3548	12.4759	3.0000	3.4167	γ^{P5}	0.0927	0.1732	0.0966	0.1051
δ^{P6}	32.1483	4.4947	3.0000	3.0000	γ^{P6}	0.1051	0.0624	0.0966	0.0923
δ^{P7}	28.3548	9.9495	3.0000	3.4167	γ^{P7}	0.0927	0.1381	0.0966	0.1051
δ^{P8}	35.7116	4.4947	3.4167	3.0000	γ^{P8}	0.1167	0.1089	0.1174	0.0923
δ^{P9}	36.2613	9.9495	3.0000	3.4167	γ^{P9}	0.1185	0.0624	0.0966	0.1051
δ^{P10}	20.4841	6.0000	3.0000	3.4167	γ^{P10}	0.0670	0.0624	0.0966	0.0923

4 计算系统效能

由以上两级指标权数和各个专家的相对可信度,可计算二级指标的系统效能为:

$$M_B = \sum_{k=1}^m \gamma_B^{Pk} M^{Pk} \quad (7)$$

$$\text{其中: } M^{Pk} = \sum_{i=1}^n w_i^{Pk} K_i^{Pk}, \gamma_B^{Pk} = \frac{\delta_B^{Pk}}{\sum_{k=1}^m \delta_B^{Pk}}。$$

监控系统的综合工作效能为:

$$M = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^3 \gamma_A^{Pk} w_{Bx}^{Pk} M_{Bx} \quad (8)$$

根据以上监控系统的打分结果,可以得出系统二级各项指标能力的效能分别为: $M_{B1}=79.6197, M_{B2}=80.3788, M_{B3}=82.0824, M_{B4}=80.4631, M_{B5}=76.1038, M_{B6}=86.6802, M_{B7}=79.8636, M_{B8}=77.2956, M_{B9}=79.2310, M_{B10}=80.8482$ 。系统总的工作效能为: $M=80.1230$

如果将航空发动机监控系统工作效能分为5个等级:优秀(90分以上)、良好(80~90分)、一般(70~80分)、较差(60~70分)和不合格(60分以下),那么根据专家调查,本监控系统的工作效能就属于“良好”。

通过以上对航空发动机监控系统工作效能的评估过程可以看出,本监控系统的数据采集和管理能力较好,对于航空发动机地面工作能够采取多种监测措施,并及时反映发动机工作的实时情况,但对于监测结果的信息反馈能力和采取的维护措施相对效能较差。因此,根据系统的效能分析,应该建议相关部门改进信息反馈的途径和方法,并根据监测结果及时有效地采取应对措施,从而提高发动机地面维护工作的效率。

5 结语

以某新型航空发动机地面监控系统为应用背景,进行了发动机监控系统工作效能的分析,采用层次分析法和专家调查法对监控系统的工作能力进行评估。通过系统的效能评估,该型发动机监控系统的工作能力良好,但在信息反馈和落实维护措施方面仍需提高和改善。建议相关部门不仅要重视发动

机监测方法和措施的提高,更要将监测工作中发现的问题和异常情况及时反馈,并将改进措施落实到实际维护工作中,从而提高发动机综合保障能力。

参考文献:

- [1] 万自明,廖良才,陈英武,等.武器系统效能评估模式研究[J].系统工程与电子技术,2000,22(3):21—23.
WAN Zi-ming, LIAO Liang-cai, CHEN Ying-wu, et al. A Study on the Evaluation Model of Weapon System Effectiveness [J]. Journal of Systems Engineering And Electronics, 2000, 22(3): 21—23.
- [2] 郭齐胜.装备效能评估概论[M].北京:国防工业出版社,2005.
GUO Qi-sheng. Introduction to the Effectiveness Evaluation of Equipment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [3] 杨峰.武器装备作战效能仿真与评估[M].北京:电子工业出版社,2010.
YANG Feng. Weapon Equipment Operational Effectiveness Simulation and Evaluation [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010.
- [4] 张杰.效能评估方法研究[M].北京:国防工业出版社,2009.
ZHANG Jie. Research on the Effectiveness Evaluation Method [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [5] 蔡延曦,孙琰,张卓.武器装备体系作战效能评估方法分析[J].装备环境工程,2008,5(5):24—26.
CAI Yan-xi, SUN Yan, ZHANG Zhuo. Analysis on Assessment Methods for Combat Capability of Weapon Systems [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(5): 24—26.
- [6] 丁勇军,刘法明,周涛,等.基于ADC效能模型的防空导弹系统可靠性分析[J].装备环境工程,2007,4(1):48—51.
DING Yong-jun, LIU Fa-ming, ZHOU Tao, et al. Analysis on Air Defense Missile System Reliability Based on ADC Effectiveness Model [J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 48—51.
- [7] 赵超,文传源.作战系统综合效能评估方法探索[J].电光与控制,2001,8(1):63—65.
ZHAO Chao, WEN Chuan-yuan. Exploration on Comprehensive Effectiveness of a Campaign System [J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(1): 63—65.

(下转第117页)

- sor[J]. Chinese Instrument, 2004(6):1—2.
- [9] 钟东力, 安振涛, 王波. 仓库多传感器温湿度监测系统方案设计中的几个问题[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(7): 870—872.
- ZHONG Dong-li, AN Zhen-tao, WANG Bo. Some Problems in the Design of Multi Sensor Temperature and Humidity Monitoring System in Warehouse[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(7): 870—872.
- [10] ROTHK M H, OREN S S. A Closure Approximation for the Nonstationary M/M/S Queue01[J]. Management Science, 1979, 25: 522—534.
- [11] MATTA I, SHANKAR A U. Z-iteration: A Simple Method for Throughput Estimation in Time-dependent Multi-class Systems[C]//Proc ACM SIGMETRICS / PERFORMANCE. Ottawa, Canada, 1995.
- [12] 陈先禄, 刘渝根, 黄勇. 接地[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- CHEN Xian-lu, LIU Yu-gen, HUANG Yong. Grounding [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2002.
- [13] DIAZ A, FU M C. Models for Multi-echelon Repairable Item Inventory Systems with Limited Repair Capacity[J]. Operational Research, 1997(97): 482.
- [14] 高振洲, 高欣宝, 李天鹏. 军用仓库防雷接地设计探讨[J]. 装备环境工程, 2009, 6(4): 57—60.
- GAO Zhen-zhou, GAO Xin-bao, LI Tian-peng. Lightning Protection and Grounding Design of Military Warehouse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(4): 57—60.
- [15] 林维勇, 黄友根, 焦兴学. 建筑物防雷设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 43—45.
- LIN Wei-yong, HUANG You-gen, JIAO Xing-xue. Design Code for Protection of Structures Against Lightning [M]. Beijing: China Planning Press, 2011: 43—45.

.....

(上接第102页)

- [8] 牛作成, 吴德伟, 雷磊. 军事装备效能评估方法研究[J]. 电光与控制, 2006, 13(5): 98—101.
- NIU Zuo-cheng, WU De-wei, LEI Lei. Study on Effectiveness Evaluation for Military Equipment [J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(5): 98—101.
- [9] 李宗吉, 王树宗. 武器装备系统效能评估的几种方法[J]. 海军工程大学学报, 2000(1): 97—101.
- LI Zong-ji, WANG Shu-zong. Several Methods for Evaluating the Effectiveness of Weapon Equipment System [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(1): 97—101.
- [10] 赵令才. 防空作战训练效能综合评估[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- ZHAO Ling-cai. Air Defense Combat Training Effectiveness Evaluation [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [11] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- WANG Lian-fen, XU Shu-bai. The Theory of the Analytic Hierarchy Process [M]. Beijing: Renmin University of China Press, 1989.
- [12] 左德华. 船艇保障装备设备体系保障效能评估系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- ZUO De-hua. Ship and Light Boat Guarantee Equip Equipment System to Guarantee the Effectiveness Evaluation System Research [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [13] FORMAN E, PENIWATI H. Aggregating Individual Judgments and Priorities with the Analytic Hierarchy Process [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 108: 165—169.
- [14] HERRERA F, HERRERA Viedma E, CHICLANA F. Multiperson Decision Making Based in Multiplicative Preference Relations [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129: 372—385.