

基于 AHP 的火控系统故障诊断策略研究

康 葳,董田沼,杨国振,陈军伟

装甲兵工程学院控制工程系,北京 100072

摘要 在常用的火控系统故障诊断方法中,直观观察判断法对维修人员经验要求较高,备件转换法则应用场合有限,而采用故障树分析方法对火控系统进行故障诊断与排除,当碰到逻辑门时,往往由于诊断路径选择不当,导致工作量大,诊断效率降低。针对上述问题,在故障树分析法的基础上,引入层次分析法,建立诊断层次结构模型,以量化后的经验信息优化故障树诊断搜索策略,得出合理的故障排除方案。通过实例分析和实验验证,证明经层次分析法优化后的故障排除法比盲目排除法耗时更短、效率更高,对提高复杂火控系统的故障诊断效率具有一定的实用价值。

关键词 火控系统;故障诊断;故障树分析法;层次分析法

中图分类号 TP207

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.13.008

Fault Diagnosis Strategy of the Fire Control System Based on the AHP

KANG Wei, DONG Tianzhao, YANG Guozhen, CHEN Junwei

Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

Abstract During fault diagnosing of general fire control system, visual observation method, backup device replacement method, and fault tree analysis method are mainly used. Visual observation method requires maintenance staffs who own much experience and stronger ability. Backup device replacement method could be only used to limited situation. While adopting the method of fault tree analysis on fault diagnosis of fire control system leads to heavy workload and low efficiency caused by choosing diagnosis path incorrectly when it came to logic gates. In view of such problems, the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on fault tree analysis is introduced, and by adopting optimized research strategy for quantizing useful information, the reasonable troubleshooting methods are obtained. The theory analysis and experimental results show that troubleshooting method optimized by AHP not only has shorter time and higher efficiency than that for blind troubleshooting method, but also has certain practical value for improving the diagnosis efficiency of the complex fire control system.

Keywords fire control system; fault diagnosis; fault tree analysis; AHP

0 引言

火控系统是坦克装甲车辆的一个重要组成部分,是充分发挥火力、提高生存能力的关键环节^[1]。由于其结构复杂,且工作环境复杂多样,产生故障因素较多,对其故障的诊断也变得越来越复杂,因此迫切需要一种快速、准确的故障诊断与定位方法。

目前,常见的火控系统故障检测诊断方法主要有:(1)直观法,凭经验观察判断故障发生部位;(2)备件转换法,将可能出现故障的部件用备件更换,重新进行操作验证;(3)故障树分析法^[2-3],根据火控系统工作原理,构造故障树,可以清晰

的反映系统故障与部件故障之间的逻辑关系,指导维修人员利用专门设备进行检测诊断。尽管上述诊断方法在对火控系统故障诊断中起到一定作用,但仍存在一定的局限性:直观法要求故障诊断人员需有丰富的实践经验,主观因素影响大;备件转换法不适合基层级单位应用;故障树法,自顶事件开始向下逐层搜索故障起因,在遇到逻辑门时,常因搜索策略不当而导致诊断效率降低。本文在故障树分析法的基础上,引入层次分析法,充分利用专家们(包括决策者)的经验判断,将汇集的有用信息进行量化,优化选择诊断路径,从而为快速检测方案选择提供决策依据。

收稿日期:2012-02-28;修回日期:2012-04-23

作者简介:康葳,副教授,研究方向为机械故障诊断及计算机网络,电子邮箱:kangwei16@yahoo.com.cn

1 层次分析法原理及步骤

层次分析法(AHP)^[4-6],是由国际著名的运筹学专家、美国教授萨蒂于20世纪70年代中期提出的一种定性与定量相结合的决策方法。层次分析法解决问题的基本思路是:首先把一个复杂的问题分解成各个不同的组成部分(称之为因素),把这些因素按不同的属性分组,形成一个多层次分析结构模型,每层因素的个数一般不超过9个。同一层次的因素作为准则,对下一层的某些因素起支配作用,同时又受上一层因素的支配。其次,相对于支配每一层次的上一层准则,采用比率标度方法,对该层因素进行两两比较,从而构成判断矩阵。再次,根据得到的判断矩阵,采用方根法或和积法计算出同一层的每个因素对上一层某项准则的相对权重,并进行一致性检验,进而计算出本层次各个元素相对于总目标的组合权重及一致性检验。最后,自上而下计算出底层方案层因素对总目标的组合权重,并依据各方案权重的大小进行排序,权重最高者即为最佳解决方案。

层次分析法有效地利用了决策者的经验,成功地解决了难于完全用定量的方法来分析的复杂问题。运用层次分析法解决问题一般分为四个主要步骤:(1)建立层次分析结构模型;(2)构造判断矩阵;(3)层次单排序及一致性检验;(4)层次总排序及一致性检验。图1为层次分析法流程。

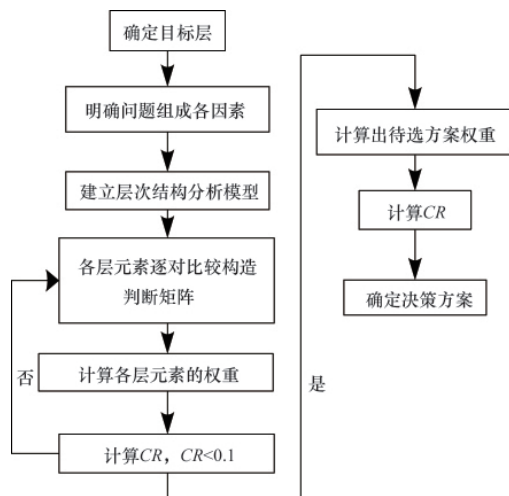


图1 层次分析法分析流程
Fig. 1 Flowchart of AHP analysis

2 故障树的构建

故障树的构建是故障诊断中的一个重要环节,故障树构建的好坏,将直接影响下一步故障诊断方案层次结构模型的建立。本文以某型装备炮塔方位不动的故障为例,结合电路图对炮塔转动的工作原理分析,可得图2所示故障树。

T_1 表示炮塔方位不动故障, M_1 、 M_2 、 M_3 分别表示炮控箱故障、水平功放模块故障和操纵台故障。主要故障原因 X_1 代表接口板故障、 X_2 代表水平控制板故障、 X_3 代表电源板故障、 X_4 代表调制板故障、 X_5 代表脉冲产生板故障、 X_6 代表电阻接触故障。经常出现的故障图中用圆形框表示;因为 X_2 很少出

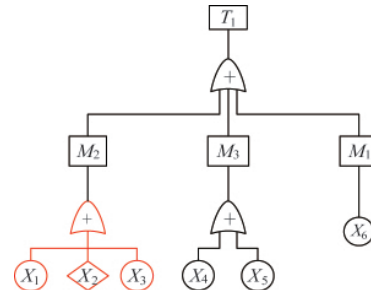


图2 炮塔方位不动故障树
Fig. 2 Fault tree of turret orientation fixed

现,故不予考虑,图中用菱形框表示。

3 故障诊断方案的层次分析

3.1 构建层次结构模型

采用层次分析法制定故障检修方案时,把排除炮塔方位不动故障 F 作为目标层,选择故障概率 A_1 、相对火控系统的重要性 A_2 、检测容易度 A_3 作为准则层中的3个准则。方案层中的 B_1 、 B_2 、 $\dots$ 、 B_5 分别为针对故障原因 X_1 、 X_3 、 $\dots$ 、 X_6 所采取的诊断措施。层次结构模型如图3所示,判断矩阵的标度和含义见表1。

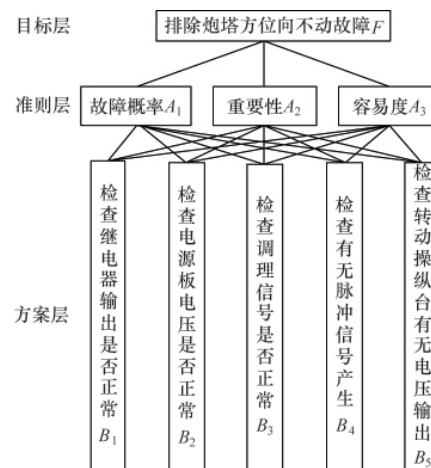


图3 炮塔方位不动故障诊断层次结构模型
Fig. 3 Hierarchical structure model of turret orientation fixed fault diagnosis

表1 判断矩阵标度及含义

Table 1 Scale value and meaning of judgment matrix

标度 a_{ij}	含义(因素 i 与因素 j 相比较)
1	i 与 j 具有同样的重要性
3	i 比 j 稍微重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 强烈重要
9	i 比 j 极端重要
2, 4, 6, 8	上面相邻两个判断的中间值
倒数	i 没有 j 重要, $a_{ji} = 1/a_{ij}$

3.2 构造两两比较的判断矩阵

判断矩阵基本形式为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

判断矩阵表示本层次与上一层次某个因素有关的因素两两之间的相对重要性。 a_{ij} 表示 i 因素对 j 因素的相对重要性,是比较两个因素得到的结果。根据 9 级标度体系规定, a_{ij} 标度方法见表 1。 a_{ij} 一般取 1—9 及其倒数,且必须满足以下条件: $a_{ii}=1, a_{ji}=1/a_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$ 。根据图 3 所示的层次结构模型,可构造出 4 个判断矩阵,如表 2—表 5 所示。

表 2 判断矩阵 ($F-A$)

Table 2 Judgment matrix ($F-A$)

F	A_1	A_2	A_3
A_1	1	3	4
A_2	1/3	1	2
A_3	1/4	1/2	1

表 3 判断矩阵 (A_1-B)

Table 3 Judgment matrix (A_1-B)

A_1	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	1/9	1/3	1/2	1/8
B_2	9	1	6	7	2
B_3	3	1/6	1	2	1/6
B_4	2	1/7	1/2	1	1/7
B_5	8	1/2	6	7	1

表 4 判断矩阵 (A_2-B)

Table 4 Judgment matrix (A_2-B)

A_2	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	3	1	1	1
B_2	1/3	1	1/3	1/3	1/3
B_3	1	3	1	1	1
B_4	1	3	1	1	1
B_5	1	3	1	1	1

表 5 判断矩阵 (A_3-B)

Table 5 Judgment matrix (A_3-B)

A_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	1/3	2	1/2	1/5
B_2	3	1	4	2	1/4
B_3	1/2	1/4	1	1/3	1/6
B_4	2	1/2	3	1	1/4
B_5	5	4	6	4	1

表 6 平均随机一致性指标

Table 6 Index of average random consistency

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.5149	0.8931	1.1185	1.2494	1.345	1.42	1.45

表 2 表示的是相对于总目标 F 而言,准则层 A 中各因素之间的相对重要性;表 3 表示的是相对于准则层因素 A_1 而言,方案层 B 中各因素之间的相对重要性;表 4 表示的是相对于准则层因素 A_2 而言,方案层 B 中各因素之间的相对重要性;表 5 表示的是相对于准则层因素 A_3 而言,方案层 B 中各因素之间的相对重要性。

3.3 层次单排序及一致性检验

层次单排序是指根据判断矩阵计算出同一层的每项因素对支配其上一层的某项准则的影响大小,或说是在影响某项准则的因素中,每项因素所占的比例大小(也称权)。此步工作可归结为计算判断矩阵的最大特征值及所对应特征向量的问题,一般有和积法和方根法 2 种方法,这里采用的是简化方根法。对于 $n \times n$ 阶矩阵,计算步骤如下。

(1) 将判断矩阵每行的元素相乘得到 U_i :

$$U_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

(2) 计算 U_i 的 n 次方根 $\bar{W}_i$:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{U_i} \quad (2)$$

(3) 将向量 $\bar{W}=(\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 作归一化处理,即

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

得到特征向量——权向量 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$,即各因素的相对权重。

(4) 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

式中, $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 为判断矩阵, $(AW)_i$ 为判断矩阵 A 与权向量 W 乘积的第 i 个元素。

(5) 一致性检验:判断矩阵偏离的一致性指标为 $CR=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$, RI 为平均随机一致性指标,萨蒂已经给出了 RI 的取值,如表 6 所示。当一致性比率 $CR=CI/RI<0.1$ 时,认为层次单排序的计算结果满足一致性,接受分析结果,否则重新调整判断矩阵。

经计算得:

① 矩阵 $F-A$: $\lambda_{\max}=3.0067, W=(0.625, 0.2385, 0.1365)^T, CI=0.0038, RI=0.5149, CR=0.0074<0.1$, 满足一致性要求。

② 矩阵 A_1-B : $\lambda_{\max}=5.1455, W=(0.0381, 0.4653, 0.0904, 0.0592, 0.3470)^T, CI=0.0364, RI=1.1185, CR=0.0325<0.1$, 满足一致性要求。

③ 矩阵 A_2-B : $\lambda_{\max}=5, W=(0.2308, 0.0769, 0.2308, 0.2308, 0.2308)^T, CI=0, RI=1.1185, CR=0<0.1$, 满足一致性要求。

④ 矩阵 $A_3-B:\lambda_{\max}=5.1493, W=(0.0875, 0.2129, 0.0558, 0.141, 0.502)^T, CI=0.0373, RI=1.1185, CR=0.0333<0.1$, 满足一致性要求。

3.4 层次总排序及一致性检验

层次总排序指的是方案层中的每个因素对目标层的影响大小,即组合权重。根据前面所得到的准则层因素 A_1, A_2, A_3 相对于 F 的权重 $W_{a_1}, W_{a_2}, W_{a_3}$ 以及方案层中所有因素 $B_1, B_2, \dots, B_5$ 和准则层 $A_i(i=1, 2, 3)$ 的单层次权重 $W_{b_{1i}}, W_{b_{2i}}, \dots, W_{b_{5i}}$, 利用公式(5)可得出方案层各因素 $B_1, B_2, \dots, B_5$ 对总目标 F 的组合权重 $W_{b_j}(j=1, 2, \dots, 5)$, 如表 7 所示。

$$W_{b_j} = \sum_{i=1}^3 W_{b_{ji}} W_{a_i} \quad j=1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

表 7 层次总排序表

Table 7 Form of hierarchy total sequence

F	A_1	A_2	A_3	组合 权重	总排序
	0.625	0.2385	0.1365		
B_1	0.0381	0.2308	0.0875	0.0908	5
B_2	0.4653	0.0769	0.2129	0.3382	2
B_3	0.0904	0.2308	0.0558	0.1192	3
B_4	0.0592	0.2308	0.141	0.1113	4
B_5	0.347	0.2308	0.502	0.3404	1

对层次总排序也需进行一致性检验,虽然各层次均已通过单层次一致性检验,但是综合考察时,各层次的非一致性仍有可能积累起来,导致总排序的非一致性。层次总排序检验方法与前面层次单排序相似:利用方案层因素中与准则层 A_i 因素相关单排序一致性指标 $CI(i)(i=1, 2, 3)$, 和平均随机一致性指标 $RI(i)$ 以及准则层 A_i 的权重 W_{a_i} , 根据公式(6)可求得层次总排序一致性比例。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\sum_{i=1}^3 CI(i) W_{a_i}}{\sum_{i=1}^3 RI(i) W_{a_i}} \quad (6)$$

层次总排序的一致性检验如下:

$$CI=0.625 \times 0.0364 + 0.2385 \times 0 + 0.1365 \times 0.0373 = 0.0278$$

$$RI=(0.625+0.2385+0.1365) \times 1.1185 = 1.1185$$

$$CR=CI/RI=0.0278/1.1185=0.0249<0.1$$

根据以上计算结果,总排序有满意的一致性,因此排除炮塔方位向不动故障的合理诊断策略应按照 X_6, X_3, X_4, X_5, X_1 的顺序进行故障诊断与排除。

4 实验验证

对 3 辆某型装备出现的炮塔方位向不动故障,在故障树分析法基础上,分别采取非层次分析法排除与层次分析法排除,对其所耗用的时间进行对比,其中排除每项故障原因所

耗用时间是固定的,排除结果如下所示。

第一辆车:最终诊断结果是 X_3 原因引起。非层次分析法排除顺序是: X_3 , 所耗用时间约为 6min; 层次分析法排除所耗用时间约为 9min。第二辆车:最终诊断结果是 X_4 原因引起。非层次分析法排除顺序是: X_1, X_3, X_4 , 耗用时间约为 28min; 层次分析法排除所耗用时间约为 21min。第三辆车:最终诊断结果是 X_6 原因引起。非层次分析法排除顺序是: X_3, X_5, X_1, X_6 , 所耗用时间约为 26min; 层次分析法排除耗时约 3min。

通过验证,层析分析法排除总体而言比非层次分析法排除耗费的时间要少,效率要高。如果对复杂故障按照经层次分析法优化后的策略进行排除,优势将更加明显。

5 结论

在火控系统故障快速诊断策略决策中应用层次分析法,能够充分利用专家们的经验,通过构造判断矩阵,将定性分析与定量计算结合起来,思路简单明了,不需要建立复杂的模型,层次清晰,计算简单,容易操作,不仅能找到最先检测和排除的故障因素,还能得出故障因素排除的优先顺序。

在火控系统故障诊断中,所出现的故障以及故障因素远不止本文中案例中所涉及的内容。但是层次分析法的特点是不受评判因素多少的制约,而且故障因素越复杂,其解决问题优势越明显。因此层次分析法在提高类似火控系统这种复杂系统的故障诊断的效率中具有广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 朱竟夫, 赵碧君, 王钦钊. 现代坦克火控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
Zhu Jingfu, Zhao Bijun, Wang Qinzha. Modern tank fire control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [2] 朱继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
Zhu Jizhou. Principle and application of fault tree [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.
- [3] 刘林茂. 基于故障树分析法的综合路测分析系统研究与实现 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
Liu Linmao. Research and implementation of comprehensive drive test analysis system based on fault tree analysis [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [4] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
Zhao Huanchen, Xu Shubai, He Jinsheng. Analytic hierarchy process—A simple new decision method[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [5] 姚雷, 李国安, 段宏. 层次分析法在大型水面舰船船型多方案优选中的应用[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3): 12–14.
Yao Lei, Li Guo'an, Duan Hong. Chinese Journal of Ship Research, 2006, 1(3): 12–14.
- [6] 曹红兵, 董颖, 陈汉生. 基于层次分析法的电控发动机怠速不稳故障诊断应用研究[J]. 汽车维修与保养, 2009, 15(3): 82–83.
Cao Hongbing, Dong Ying, Chen Hansheng. Motor for Repair & Maintenance, 2009, 15(3): 82–83.

(责任编辑 马骁骁)