

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.011

基于改进 AGREE 方法的静叶调节机构可靠性分配*

吴红秋¹, 谢里阳¹, 王 艺², 何雪泓^{1*}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要:在对航空发动机的静叶调节机构进行可靠性分配时,采用传统 AGREE 方法得到其子系统的重要度和复杂度与子系统实际重要程度和复杂情况有偏差,并影响各子系统可靠度分配结果的合理性。针对这一问题,对传统 AGREE 方法中的重要度和复杂度进行了修正,提出了一种改进的 AGREE 方法。首先,考虑了不同子系统故障对系统的影响程度、修正重要度,考虑了子系统中会导致机构故障的关键零件的数目修正复杂度,对传统 AGREE 方法进行了改进;然后,提出了一种改进的 AGREE 分配法,并提出了进行可靠性指标分配的步骤;最后,采用改进的 AGREE 方法,对静叶调节机构可靠性指标进行了分配。研究表明:利用改进的 AGREE 方法可以完成对静叶调节机构的可靠性指标分配,其分配结果实现了为故障危害相对较小子系统分配更低的可靠度指标,为零件数量较多但关键零件较少子系统分配更高的可靠度指标的目标。与传统 AGREE 方法的分配结果相比,采用改进的 AGREE 方法所得到的分配结果更为合理。

关键词:机械系统可靠性分析;AGREE 分配法;系统重要度和复杂度;重要度修正;可靠性关键件;故障模式、影响和危害性分析

中图分类号:TH17;TB114.3;V232

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)03-0399-08

Reliability distribution of adjusting mechanism of variable stator vanes based on improved AGREE method

WU Hong-qiu¹, XIE Li-yang¹, WANG Yi², HE Xue-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In the reliability assignment of the adjusting mechanism of variable stator vanes of an aero-engine, the importance and complexity of its subsystems obtained by the traditional AGREE method deviate from the actual importance and complexity of the subsystems, and affect the rationality of the reliability assignment results of each subsystem. To address this problem, the importance and complexity in the traditional AGREE method were revised and an improved AGREE method was proposed. Firstly, the importance was modified by considering the degree of influence of different subsystem failures on the system, and the complexity was modified by considering the number of critical parts in the subsystem that would lead to mechanism failure, and the traditional AGREE method was improved. Then, the steps of reliability index allocation using the improved AGREE allocation method were proposed. Finally, the allocation of the reliability index of the static leaf adjustment mechanism was completed using the improved AGREE method. The results of the study show that the improved AGREE method can be used to complete the reliability index allocation of the adjusting mechanism of variable stator vanes, and the allocation result achieves the allocation of lower reliability indexes for the subsystem with relatively small failure hazard and higher reliability indexes for the subsystem with more parts but fewer critical parts, and the allocation result is more reasonable compared with the allocation result of the traditional AGREE method.

Key words: reliability analysis of mechanical system; AGREE distributive method; importance and complexity of system; importance correction; reliability key parts; failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)

收稿日期:2022-08-14

基金项目:国家科技重大专项资助项目(J2019-IV-0002-0069)

作者简介:吴红秋(1996-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事机构可靠性设计方面的研究。E-mail:981721398@qq.com

通信联系人:何雪泓,女,副教授,硕士生导师。E-mail:xhhe@me.neu.edu.cn

0 引 言

机械可靠性分配是根据一定的原则和方法,将整机系统可靠性指标自上而下逐级分配到下属各级产品,最终得到整机系统可靠性指标的过程。机械系统的可靠性在一定程度上取决于机械设计初期可靠性指标分配过程的合理性^[1,2]。

具有多种形式和功能的静叶调节机构,是现代航空发动机的重要组成部分,在改善和提高航空发动机的性能等方面起到重要作用。静叶调节机构特点是零件数量多、各零件连接关系多样,在恶劣的服役条件下,静叶调节机构极易出现可靠性问题^[3]。因此,在静叶调节机构设计初期,对其可靠性指标进行合理分配具有重要的意义。

静叶调节机构可看作是由多个子系统组成的复杂串联系统。而针对这类系统的可靠性分配问题,学者们已经做了很多工作。

KUO H E^[4]提出了一种平均分配方法,用于串联系统的可靠性分配;但因为其并没有考虑单元复杂度、重要度和成本等因素,所以该方法仅适用于拟定初步方案时做初步的分配。尤明懿等人^[5]提出了一种考虑单元任务时间的 ARINC 分配法,完成了某卫星电子系统的可靠性分配工作;但是,ARINC 分配法仅适用于新设计的系统与原有系统基本相同的情况。WANG Y 等人^[6]提出了一种评分分配法,通过求解相对失效率,结合专家评分权对数控机床进行可靠性分配;该评分分配法虽然考虑到了多种因素,但其打分情况受人为主观影响太大。YU X 等人^[7]提出了一种基于灰色关联度的 AGREE 方法,有效解决了实际工程中数据不足难以科学分配可靠性的问题。由于 AGREE 方法既考虑了各组成单元的复杂性和重要性,也考虑了工作时间,该方法目前已被广泛应用于复杂的串联系统中^[8]。

但针对某些特定的系统,AGREE 分配法同样存在很多不足。因此,很多专家给出了一些颇具参考价值的解决思路。

LI R 等人^[9]运用二分搜索法确定了基于复杂度和重要度的部件可靠性分配结果,有效解决了传统 AGREE 方法无法对并联模型开展可靠性分配的问题。纪爱敏^[10]针对起重机吊臂系统可靠性分配中存在的平均无故障工作时间出现负值的问题,提出了一种考虑初始失效率的 AGREE 分配法。徐勇等人^[11]为了解决部分子系统由于重复零件的数量多而分配较低的可靠度的问题,引进重复因子对 AGREE 分配法中

的复杂度进行了改进,使得子系统复杂度表示更为客观。

上述研究虽然取得了很好的结果,但在使用 AGREE 方法对静叶调节机构进行可靠性分配时依旧存在以下问题:(1)仅从故障概率的角度对子系统的重要度进行定义,并未考虑不同子系统故障对系统的影响各有不同,使重要度计算结果不能真实地反映其实际的重要程度;(2)计算复杂度时只考虑子系统的零件数,并未考虑子系统中会导致机构故障的关键件数,导致计算的复杂度结果与子系统实际复杂情况存在一定的偏差。

针对上述情况,笔者结合可靠性关键件的概念,考虑子系统故障对系统的影响程度修正概率重要度,考虑子系统中会导致机构故障的可靠性关键件的数目修正复杂度,提出一种改进的 AGREE 分配法;同时,提出使用改进 AGREE 分配法进行可靠性分配的步骤;最后,使用上述方法和步骤完成静叶调节机构可靠性指标的分配。

1 基于改进 AGREE 的可靠性分配法

1.1 传统 AGREE 分配法

常规复杂系统的可靠性分配方法,一般选用 AGREE 分配法。该方法既考虑了各子系统的复杂性和重要性,也考虑了各子系统该与系统之间的失效关系^[12]。

该方法的基本表达式为:

$$R_i(t) = 1 - \frac{1 - [R_s(t)]^{C_i}}{W_i} \quad (1)$$

式中: C_i —子系统 i 的复杂度; W_i —子系统 i 的重要度; $R_s(t)$ —系统期望的可靠度; $R_i(t)$ —子系统 i 的可靠度。

其中,子系统 i 的重要度 W_i 定义为:

$$W_i = \frac{N_i}{r_i} \quad (2)$$

式中: N_i —第 i 个子系统故障引起系统故障的次数; r_i —第 i 个子系统故障的次数。

其中,子系统 i 的复杂度 C_i 定义为:

$$C_i = \frac{n_i}{\sum_{k=1}^k n_k} = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

式中: n_i —子系统 i 包含的零件数量; N —整个系统包含的零件数量。

1.2 复杂度和重要度分析

采用上述的传统 AGREE 分配法进行可靠性分配时,存在如下问题:

(1)根据式(2)可知, W_i 是从故障概率的角度进行定义,也就是概率重要度。在串联系统中,每个子系统的故障都会导致机构故障^[13]。因此,串联系统中各子系统的概率重要度均为1。但是,从工程应用角度看,不同子系统发生故障对机构的影响也是不同的,有的子系统的故障会使机构的功能完全丧失,而有的子系统的故障仅会使机构的部分功能丧失。

接下来,笔者以静叶调节机构为例进行详细说明。静叶调节机构的结构如图1所示。

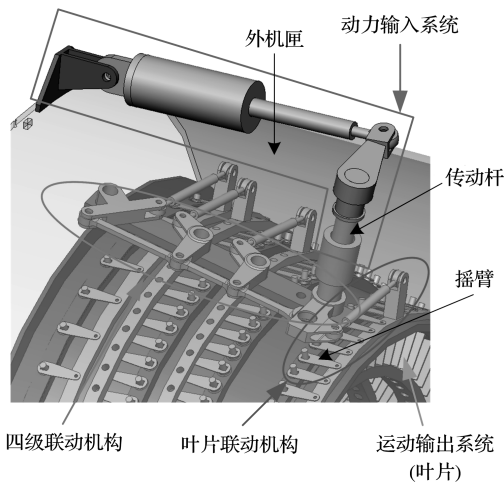


图1 静叶调节机构的结构示意图

静叶调节机构可以看作是由动力输入系统、叶片联动机构、四级联动机构和运动输出系统4个子系统组成的串联系统。

在动力输入系统中,外机匣的筒体变形会使传动杆转动迟缓,进而导致静叶调节机构的调节精度降低。叶片联动机构中摇臂的断裂会使静叶调节机构不能运动。式(2)的定义没有考虑不同子系统故障引起系统故障的后果各有不同。因此,有必要结合各子系统故障对系统的影响程度来对重要度进行修正;

(2)根据式(3)可知,子系统复杂度的计算仅考虑了子系统零件的数目,即子系统零件的数目在系统零件数中所占的比例越大,其复杂度越大。但是,在工程应用中,由于各子系统中参与系统故障的零件的比例可能是不相同的,单纯以子系统中零件的个数来考虑的话,在进行可靠性分配时,可能会出现与实际工程的偏颇。

笔者按照式(3)计算出的静叶调节机构各子系统的复杂度,其结果如表1所示。

表1 静叶调节机构各子系统的复杂度

| 序号 | 子系统 | 零件数目 | 复杂度 C_i |
|-------|--------|-------|-----------|
| $i=1$ | 动力输入系统 | 27 | 0.011 2 |
| $i=2$ | 四级联动机构 | 38 | 0.015 7 |
| $i=3$ | 叶片联动机构 | 941 | 0.389 0 |
| $i=4$ | 运动输出系统 | 1 413 | 0.584 1 |
| | 合计 | 2 419 | 1 |

由表1可知:运动输出系统的复杂度大于叶片联动机构。但在实际工程中,叶片联动机构各零件间的连接关系比运动输出系统更为复杂,拥有更多参与系统故障的零件。所以,有必要考虑各子系统中参与系统故障的零件数目,对复杂度进行修正。

1.3 复杂度和重要度的修正

1.3.1 可靠性关键件的定义

对于系统的可靠性分配而言,指标分配的重点应该多放在故障危害大的零件和系统上^[14]。而在复杂机构的众多零件中,有两类零件对机构可靠性的影响微乎其微,其可靠度可分配为1,这两类零件分别为:

(1)某零件的制造技术水平非常高,其发生故障的概率极低;

(2)某零件的故障对机构几乎不造成影响。

以上两类零件可定义为机构的非关键零件。对于非关键零件以外的零件,由于其故障发生概率较高,或者是零件发生故障时会对机构造成较为严重的影响,在对其进行可靠性分配时应加以重点考虑,并将其定义为可靠性关键件。由于非关键件的可靠度为1,在对重要度和复杂度进行修正时,仅需考虑可靠性关键件。

可靠性关键件的选取需要结合故障模式、影响和危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)表和可靠性关键件的判别准则。

1.3.2 重要度的修正

根据上述的分析可知,在计算子系统的重要度时,不但要考虑其概率重要度,还应考虑各子系统故障对系统的影响程度。子系统故障对系统的影响程度可使用故障模式的严酷度等级评分,以此来对其进行定义^[15]。

郑裕国等人^[16]在进行复杂系统可靠度分配中,结合概率重要度和子系统故障,修正了系统的影响程度对重要度的计算公式。在此基础上,笔者结合可靠性关键件的概念,对重要度进行修正。

重要度的修正公式为:

$$W_i^* = \sqrt{W_i S_i} \quad (4)$$

式中: W_i^* —子系统*i*的修正重要度; S_i —子系统*i*的故

障严酷度等级评分。

对系统进行 FMECA 分析,可以得到各子系统所有故障模式的故障严酷度等级评分。为比较不同子系统间故障模式的影响程度,笔者使用 max - min 归一化方法^[17]对各子系统所有故障模式的故障严酷度进行等级评分,并做归一化处理。

归一化的公式为:

$$S_{ij}^{\text{norm}} = \frac{S_{ij} - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (5)$$

式中: S_{ij} —子系统 i 中第 f 个故障模式的故障严酷度等级评分,即子系统 i 中各可靠性关键件的故障严酷度等级评分; S_{\max} —系统所有可靠性关键件的故障严酷度等级评分中的最大值; S_{\min} —系统所有可靠性关键件的故障严酷度等级评分中的最小值; S_{ij}^{norm} — S_{ij} 归一化后的值。

其中,子系统 i 的故障严酷度等级评分 S_i 公式^[6]为:

$$S_i = \max(S_{i1}^{\text{norm}}, S_{i2}^{\text{norm}}, \dots, S_{if}^{\text{norm}}) \quad (6)$$

式中: S_i —子系统 i 的故障严酷度等级评分。

1.3.3 复杂度的修正

由上述分析可知,在计算子系统的复杂度时,如果仅考虑子系统零件的数目,计算出的复杂度可能会与实际复杂情况不符。针对这种情况,李威伟^[18]在进行复杂系统的可靠度分配中,考虑了各子系统中会导致机构故障的零件数目,提出了对复杂度修正的方法。

笔者在此基础上,结合可靠性关键件的概念,对复杂度进行修正。

对于具有 n 个子系统和 s 种故障模式的机构,其子系统 i ($i=1,2,\dots,n$) 中有 m_k^i 个可靠性关键零件的故障,会导致机构发生第 k ($k=1,2,\dots,s$) 种故障模式。考虑子系统中会导致机构故障的可靠性关键件的数目,对复杂度进行修正。

复杂度的修正公式为:

$$C_i^* = \frac{\sum_{k=1}^s q_{ik} m_k^i}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s q_{ik} m_k^i} \quad (7)$$

式中: C_i^* —子系统 i 的修正复杂度; q_{ik} —机构第 k 种故障模式的权重系数; m_k^i —子系统 i 中参与机构第 k 种故障模式的可靠性关键件数目。

考虑到同一个可靠性关键件可能参与多种故障模式,针对机构的第 k 种故障模式,笔者给出权重系数 q_{ik} ,其与子系统 i 中参与机构第 k 种故障的可靠性关

键件数目有关。

权重系数 q_{ik} 的表达式为:

$$q_{ik} = 1/\sqrt{m_k^i} \quad (8)$$

2 复杂系统可靠性分配步骤

针对复杂系统的可靠性分配步骤如下:

(1)对系统进行故障模式、影响和危害性进行分析(FMECA),对系统进行故障模式与影响进行分析(FMEA);然后,使用定性危害性矩阵分析方法进行危害性分析(CA),得到 FMECA 表;

(2)选出系统的可靠性关键件,提出针对系统的可靠性关键件判别准则,根据 FMECA 表和可靠性关键件判别准则,选出系统的可靠性关键件;

(3)得到简化 FMECA 表。仅保留 FMECA 表中可靠性关键件的信息,得到简化 FMECA 表;

(4)计算修正重要度和修正复杂度。根据简化 FMECA 表中可靠性关键件的信息,利用公式(4)计算修正重要度 W_i^* ,利用公式(7)计算修正复杂度 C_i^* ;

(5)计算子系统的可靠度。将修正复杂度 C_i^* 和修正重要度 W_i^* 代入下式,计算出子系统的可靠度 $R_i(t)$:

$$R_i(t) = 1 - \frac{1 - [R_s(t)]^{C_i^*}}{W_i^*} \quad (9)$$

3 静叶调节机构可靠性分配

3.1 故障模式、影响和危害性分析

笔者分析了航空发动静叶调节机构在服役过程中的主要失效机理,总结、归纳了潜在故障(失效)模式,得到了静叶调节机构常见的故障模式,如表 2 所示。

表 2 静叶调节机构的故障模式

| 机构名称 | 功能 | 机构故障模式序号 | 故障模式 |
|--------|------------|----------|---------------|
| 静叶调节机构 | 改善压气机的级间匹配 | $k=1$ | 静叶调节机构运动精度不足 |
| | | $k=2$ | 静叶调节机构的运动卡滞 |
| | | $k=3$ | 静叶调节机构零件的强度失效 |

注:静叶调节机构的故障模式为子系统的故障影响

参照 GJB/Z1391—2006《故障模式、影响及危害性分析指南》^[19],笔者制定了静叶调节机构的故障严酷度评价准则,如表 3 所示。

表 3 故障严酷度评价准则

| 故障严酷度等级评分 | 故障严酷度类别 | 分级标准 |
|-----------|---------|----------------------------------|
| 9,10 | I 类 | 使静叶调节机构主要功能丧失,使系统毁坏 |
| 7,8 | II 类 | 使静叶调节机构主要功能或部分关键功能丧失,任务失败,系统严重损坏 |
| 4,5,6 | III 类 | 使静叶调节机构部分功能丧失,系统轻度损坏 |
| 1,2,3 | IV 类 | 对任务影响很小或没影响,增加系统非计划的维修 |

注:严酷度表示子系统发生故障对静叶调节机构的危害程度

笔者参照文献[19],制定了静叶调节机构的故障概率等级评价准则,如表 4 所示。

表 4 故障严酷度评价准则

| 故障概率等级 | 故障发生的可能性 | 故障模式发生概率 P_m 的参考范围 |
|--------|----------|---------------------------------|
| E | 极低 | $P_m \leq 1/10\ 000$ |
| D | 较低 | $1/10\ 000 < P_m \leq 1/1\ 000$ |
| C | 中等 | $1/1\ 000 < P_m \leq 1/100$ |
| B | 高 | $1/100 < P_m \leq 1/2$ |
| A | 非常高 | $1/2 < P_m$ |

注:故障概率等级表示子系统故障模式的发生频度

参照 HB/Z281—95《航空发动机故障模式、影响及危害性分析指南》^[20],笔者提出针对静叶调节机构的可靠性关键件判别准则如下:

(1)某零件的故障会使静叶调节机构严重损坏,以致于完全丧失功能,即该件的故障严酷度类别为 I

类时,可确定为可靠性关键件;

(2)某零件的故障会使静叶调节机构性能严重下降,即该件的故障严酷度类别为 II 类时,可确定为可靠性关键件;

(3)某零件的故障严酷度类别小于 I 类和 II 类时,应结合故障概率等级和故障严酷度类别,进行危害性分析来判断其是否为可靠性关键件。

危害性矩阵如图 2 所示。

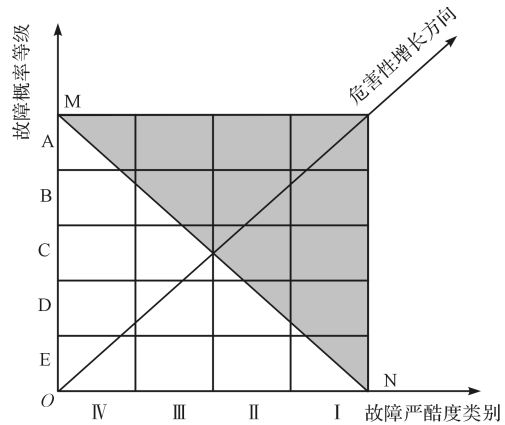


图 2 危害性矩阵图

由图 2 可知:凡是故障点落在危害性矩阵图中阴影区域内的零件,均为可靠性关键件。

笔者根据上述可靠性分配步骤,参照静叶调节机构的故障严酷度评价准则、故障概率等级评价准则和可靠性关键件判别准则,选出了静叶调节机构的可靠性关键件,得到了简化的 FMECA 表^[21]。

简化的 FMECA 表如表 5 所示。

表 5 静叶调节机构的简化 FMECA 表

| 子系统 | 可靠性关键 | 故障序号 | 故障模式 | 故障原因 | 故障影响 | 故障严酷度类别 | 故障严酷度等级评分 S_f | 故障概率等级 |
|--------|-------|------|------------|-------------|----------------|---------|-----------------|--------|
| 动力输入系统 | 液压作动筒 | FM11 | 作动筒导管产生裂纹 | 导管振动在短期残生裂纹 | 使静叶调节机构运动精度不足 | III | 4 | B |
| | 外机匣 | FM12 | 外机匣筒体变形 | 制造缺陷,外物损伤 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | II | 6 | E |
| | 主动臂 | FM13 | 主动臂断裂 | 制造缺陷,外物损伤 | 构件强度失效导致机构不能运动 | II | 6 | E |
| | 传动杆轴套 | FM14 | 传动杆轴套断裂 | 裂纹扩展,制造缺陷 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | III | 5 | B |
| | 传动杆 | FM15 | 传动杆出现疲劳裂纹 | 低周疲劳 | 构件强度失效导致机构不能运动 | II | 6 | E |
| | 压紧螺母 | FM16 | 压紧螺母螺纹损伤失效 | 装配时拧紧力矩过大 | 构件强度失效导致机构不能运动 | III | 5 | B |

续表

| 子系统 | 可靠性关键 | 故障序号 | 故障模式 | 故障原因 | 故障影响 | 故障严酷度类别 | 故障严酷度等级评分 S_{ij} | 故障概率等级 |
|--------|----------|------|------------|----------------------|----------------|---------|--------------------|--------|
| 四级联动机构 | 曲柄 | FM21 | 曲柄变形 | 装配预紧力过大;试验时调节叶片角度超限 | 使静叶调节机构运动精度不足 | Ⅲ | 5 | B |
| | | FM22 | 曲柄破裂 | 裂纹扩展;低周疲劳;制造缺陷;外物损伤 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | Ⅱ | 6 | E |
| | 曲柄衬套 | FM23 | 曲柄衬套磨损 | 制造缺陷;过度摩擦 | 使静叶调节机构运动精度不足 | Ⅲ | 4 | B |
| | 级间连杆 | FM24 | 级间连杆断裂 | 在外力作用下,产生裂纹并扩展 | 构件强度失效导致机构不能运动 | Ⅲ | 6 | B |
| 叶片联动机构 | 拉杆 | FM31 | 拉杆断裂 | 在外力作用下产生裂纹并扩展 | 构件强度失效导致机构不能运动 | Ⅱ | 7 | D |
| | 叶片—内机匣衬套 | FM32 | 叶片—内机匣衬套变形 | 衬套制造缺陷;发动机振动 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | Ⅱ | 8 | C |
| | 联动环搭接段 | FM33 | 联动环搭接段螺纹老化 | 材料温度的影响 | 使静叶调节机构运动精度不足 | Ⅲ | 4 | B |
| | 联动半环 | FM34 | 联动半环变形、断裂 | 裂纹扩展;制造缺陷;外物损伤 | 构件强度失效导致机构不能运动 | Ⅱ | 7 | E |
| | 内机匣 | FM35 | 内机匣变形 | 制造缺陷;外物损伤 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | Ⅰ | 9 | E |
| | 摇臂 | FM36 | 摇臂断裂 | 裂纹扩展;制造缺陷;外物损伤 | 构件强度失效导致机构不能运动 | Ⅱ | 8 | E |
| 运动输出系统 | 叶片 | FM41 | 叶片断裂、掉块 | 裂纹扩展;制造缺陷;外物损伤;发动机振动 | 使静叶调节机构运动精度不足 | Ⅰ | 9 | E |
| | | FM42 | 叶片碰磨 | 叶片与内环、机匣碰磨 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | Ⅱ | 8 | C |
| | 内环 | FM43 | 内环与可调导叶碰磨 | 叶片衬套断裂 | 使静叶调节机构的运动卡滞 | Ⅱ | 7 | C |

3.2 子系统重要度计算

笔者将表 5 中的故障严酷度等级评分 S_{ij} 代入式 (5) 进行归一化处理, 得到 S_{ij}^{norm} , 并将归一化值 S_{ij}^{norm} 代入式 (6), 得到各子系统的严酷度等级评分 S_i , 再将 S_i 代入式 (4), 可得到各子系统的修正重要度 W_i^* 。

子系统的修正重要度如表 6 所示。

根据表 5 FMECA 分析可知: 动力输入系统发生故障对系统的危害远小于叶片联动机构, 但是, 使用传统方法得到两者的重要度 W_i 均为 1, 因此, 上述重要度结果不太合理。

由表 6 可知: 当动力输入系统的修正重要度 $W_1^* = 0.6325$, 叶片联动机构的修正重要度 $W_3^* = 1.0000$, 两者的修正重要度相比, 结果为 $W_1^* < W_3^*$, 更符合子系统实际重要程度。

3.3 子系统复杂度计算

根据表 2 可知, 静叶调节机构的故障模式有 3 种, 静叶调节机构的故障模式为 FMECA 表中子系统的故

表 6 子系统的修正重要度

| 序号 | 子系统 | 故障序号 | S_{ij} | S_{ij}^{norm} | S_i | W_i^* |
|-------|--------|------|----------|-----------------|-------|---------|
| $i=1$ | 动力输入系统 | FM11 | 4 | 0 | 0.4 | 0.6325 |
| | | FM12 | 6 | 0.4 | | |
| | | FM13 | 6 | 0.4 | | |
| | | FM14 | 5 | 0.2 | | |
| | | FM15 | 6 | 0.4 | | |
| | | FM16 | 5 | 0.2 | | |
| $i=2$ | 四级联动机构 | FM21 | 5 | 0.2 | 0.4 | 0.6325 |
| | | FM22 | 6 | 0.4 | | |
| | | FM23 | 4 | 0 | | |
| | | FM24 | 6 | 0.4 | | |
| $i=3$ | 叶片联动机构 | FM31 | 7 | 0.6 | 1.0 | 1.0000 |
| | | FM32 | 8 | 0.8 | | |
| | | FM33 | 4 | 0 | | |
| | | FM34 | 7 | 0.6 | | |
| | | FM35 | 9 | 1 | | |
| | | FM36 | 8 | 0.8 | | |
| $i=4$ | 运动输出系统 | FM41 | 9 | 1 | 1.0 | 1.0000 |
| | | FM42 | 8 | 0.8 | | |
| | | FM43 | 7 | 0.6 | | |

障影响。根据表 5 中各子系统可靠性关键件的故障影响,笔者统计出各子系统中参与机构每种故障模式的可靠性关键件数 m_k^i ,并将其代入式(7)中,求出各子系统的修正复杂度 C_i^* 。

子系统的修正复杂度结果如表 7 所示。

表 7 子系统的修正复杂度

| 序号 | 子系统 | m_1^i | m_2^i | m_3^i | C_i^* |
|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| $i=1$ | 动力输入系统 | 2 | 4 | 12 | 0.128 5 |
| $i=2$ | 四级联动机构 | 16 | 4 | 1 | 0.130 7 |
| $i=3$ | 叶片联动机构 | 8 | 1 | 292 | 0.400 8 |
| $i=4$ | 运动输出系统 | 280 | 4 | 0 | 0.340 0 |

表 7 中, m_1^i 表示子系统 i 中有 m_1^i 个可靠性关键件的故障,会使静叶调节机构运动精度不足; m_2^i 表示子系统 i 中有 m_2^i 个可靠性关键件的故障,会使静叶调节机构的运动发生卡滞; m_3^i 表示子系统 i 中有 m_3^i 个可靠性关键件的强度失效,会使静叶调节机构不能运动。

由表 7 可知:叶片联动机构的修正复杂度 $C_3^* = 0.400 8$,运动输出系统的修正复杂度 $C_4^* = 0.340 0$,两者相比,结果为 $C_3^* > C_4^*$,这与传统 AGREE 方法得到的结果相反。

根据上述对叶片联动机构和运动输出系统复杂情况的分析可知,修正复杂度更符合机构的实际复杂情况。

3.4 机构可靠性指标分配

当子系统间的故障相互独立时,笔者分别计算静叶调节机构期望可靠度 $R_s(t)$ 为 0.99、0.98 和 0.97 时,子系统所分配的可靠性指标。

为了对比分析采用传统 AGREE 分配法和改进的 AGREE 方法得到的各子系统可靠度,笔者分别使用这两种方法对静叶调节机构的可靠性指标进行分配。

3.4.1 使用传统 AGREE 分配法进行分配

由上述分析可知,各子系统的概率重要度 W_i 均为 1,由式(3)计算出各子系统的复杂度 C_i 如表 1 所示。

笔者将 W_i 和 C_i 代入式(1)中,可求出使用传统 AGREE 方法得到的子系统可靠度 $R_i(t)$,其结果如表 8 所示。

3.4.2 使用改进 AGREE 分配法进行分配

笔者将表 6 中的修正重要度 W_i^* 和表 7 中的修正复杂度 C_i^* 代入式(9)中,可求出使用改进 AGREE 方法得到的子系统可靠度 $R_i(t)$,结果如表 9 所示。

表 8 采用传统 AGREE 方法得到的子系统可靠度

| $R_s(t)$ | 序号 | 子系统 | W_i | C_i | $R_i(t)$ |
|----------|-------|--------|-------|---------|----------|
| 0.99 | $i=1$ | 动力输入系统 | 1 | 0.011 2 | 0.999 9 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 1 | 0.015 7 | 0.999 8 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1 | 0.389 0 | 0.996 1 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1 | 0.584 1 | 0.994 1 |
| 0.98 | $i=1$ | 动力输入系统 | 1 | 0.011 2 | 0.999 8 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 1 | 0.015 7 | 0.999 7 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1 | 0.389 0 | 0.992 2 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1 | 0.584 1 | 0.988 3 |
| 0.97 | $i=1$ | 动力输入系统 | 1 | 0.011 2 | 0.999 7 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 1 | 0.015 7 | 0.999 5 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1 | 0.389 0 | 0.988 2 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1 | 0.584 1 | 0.982 4 |

表 9 改进 AGREE 方法得到的子系统可靠度

| $R_s(t)$ | 序号 | 子系统 | W_i^* | C_i^* | $R_i(t)$ |
|----------|-------|--------|---------|---------|----------|
| 0.99 | $i=1$ | 动力输入系统 | 0.632 5 | 0.128 5 | 0.997 9 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 0.632 5 | 0.130 7 | 0.997 8 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1.000 0 | 0.400 8 | 0.995 9 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1.000 0 | 0.340 0 | 0.996 6 |
| 0.98 | $i=1$ | 动力输入系统 | 0.632 5 | 0.128 5 | 0.995 9 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 0.632 5 | 0.130 7 | 0.995 8 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1.000 0 | 0.400 8 | 0.991 9 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1.000 0 | 0.340 0 | 0.993 2 |
| 0.97 | $i=1$ | 动力输入系统 | 0.632 5 | 0.128 5 | 0.993 8 |
| | $i=2$ | 四级联动机构 | 0.632 5 | 0.130 7 | 0.993 7 |
| | $i=3$ | 叶片联动机构 | 1.000 0 | 0.400 8 | 0.987 9 |
| | $i=4$ | 运动输出系统 | 1.000 0 | 0.340 0 | 0.989 7 |

对比分析表(8,9)中两种分配方法得到的子系统可靠度,可以得出以下结论:

(1) 在 3 种系统期望可靠度下,采用改进的 AGREE 方法计算出四级联动机构的可靠度 $R_2(t)$,与传统 AGREE 方法相比,其分别降低了 0.20%、0.39% 和 0.59%,动力输入系统的可靠度 $R_1(t)$ 下降幅度与其基本相同。根据上述结果可知,使用改进方法时,动力输入系统和四级联动机构等故障危害相对较小的子系统的重要度均有所下降,所分配的可靠度指标也相应降低,这符合可靠度分配的原则;

(2) 根据表 1 和表 7 可知,虽然运动输出系统的零件数最多,但其可靠度关键数小于叶片联动机构,在两者重要度相同的情况下,通过改进方法得到两者的可靠度,相比结果为 $R_3(t) < R_4(t)$,与传统 AGREE 方法得到的结果相反。同时,在 3 种系统期望可靠度下,通过改进的 AGREE 方法得到运动输出系统的可靠度 $R_4(t)$ 与传统 AGREE 方法相比,其分别提高了 0.25%、0.50% 和 0.74%;

(3) 根据以上结果可知,改进方法可以使零件数

量较多但可靠性关键件较少的运动输出系统所分配的可靠度指标增加。

4 结束语

笔者针对传统 AGREE 分配法在实际应用中的问题,提出了一种改进的 AGREE 分配法,同时,提出了使用改进方法进行可靠性分配的步骤;最后,分别使用传统方法和改进方法,计算出了静叶调节机构期望可靠度为 0.99、0.98 和 0.97 时子系统所分配的可靠度,并将结果进行对比,说明了改进方法的合理性。

研究结论如下:

(1) 在 3 种期望可靠度下,与采用传统 AGREE 方法得到的分配结果相比,使用改进的 AGREE 方法使四级联动机构的可靠度分别降低了 0.20%、0.39% 和 0.59%,使运动输出系统的可靠度分别提高了 0.25%、0.50% 和 0.74%;

(2) 改进 AGREE 方法能够为故障危害相对较小的四级联动机构分配更低的可靠度指标,这符合可靠度分配的原则;

(3) 对于含有较少可靠性关键件的运动输出系统,即使其零件总数很大,仍可使用改进的 AGREE 方法为其分配到更高的可靠度指标。

由于上述工作是在各组成单元的失效相互独立的假设下进行的,将这个假设用于有载荷共同作用的机械系统可靠性分配时,会产生一定的误差。

因此,在后续的研究工作中,笔者将在考虑子系统间失效相关性的基础上,对机构进行可靠性分配。

参考文献 (References):

- [1] 胡晓晨. 航空发动机与汽车变速器可靠性分配[D]. 沈阳:东北大学机械工程与自动化学院,2014.
- [2] 王 昊. 国产数控车床可靠性评估方法研究[D]. 沈阳:东北大学机械工程与自动化学院,2018.
- [3] 阚玉祥. 民航发动机 VSV 调节规律及喘振故障诊断研究[D]. 天津:中国民航大学航空工程学院,2018.
- [4] KUO H E. Reliability assurance: application for engineering and management[J]. **Chinese Society for Quality**, 1999 (3):16-23.
- [5] 尤明懿,郑介春. 一种新的电子系统综合可靠性分配法[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2011,29(4):1-6.
- [6] WANG Y, YAM R C, ZUO M J, et al. A comprehensive reliability allocation method for design of CNC lathes[J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2001, 72(3): 247-252.
- [7] YU X, HUANG D R, HUANG L F. Reliability allocation of BA system based on grey relative theory and AGREE[J]. **Application Research of Computers**, 2010, 27(12): 4489-4491.
- [8] BACKALIC T. Reliability reallocation models as a support tool in traffic safety analysis[J]. **Accident Analysis & Prevention**, 2014, 65(4):47-52.
- [9] LI R. Network reliability allocation method based on heuristic algorithm[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2012, 38(2):228-232.
- [10] 纪爱敏. 考虑初始失效率的 AGREE 分配法[J]. 现代机械, 1998(3):12-14.
- [11] 徐 勇,侯朝桢,杨国胜. 系统可靠性分配的神经网络模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001(1):90-92.
- [12] WANG Y, JIA X, ZHAO J, et al. Improvement of Agree Allocation Method [C]//International Conference on Reliability. IEEE, 2009:293-295.
- [13] 卢晓煜. 飞行汽车对接系统的设计及可靠性评估[D]. 西安:长安大学工程机械学院,2021.
- [14] 陈圣斌,周晓光. 直升机可靠性关键件和重要件的确定方法及工程应用[J]. 直升机技术, 2004, 137(1):33-37.
- [15] KIM K O, YANG Y, ZUO M J. A new reliability allocation weight for reducing the occurrence of severe failure effects [J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2013, 117(9):81-88.
- [16] 郑裕国,张康达. 修正的 AGREE 法及其在空分设备可靠度分配中的应用[J]. 机械设计, 1996(5):8-9, 19, 42-43.
- [17] LEEGHIM H, SEO I H, BANG H. Adaptive nonlinear control using input normalized neural networks [J]. **Journal of Mechanical Science & Technology**, 2008, 22(6):1073-1083.
- [18] 李威伟. 基于改进型 AGREE 法的车身控制系统可靠性分配[D]. 合肥:合肥工业大学机械工程学院,2014.
- [19] GJB/Z 1391—2006, 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2006:5-18.
- [20] HB/Z 281—1995, 航空发动机故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:中国航空工业总公司, 2006:1-69.
- [21] 马希金,韩作鹏,宛 航,等. 静叶安放角变化规律对螺旋轴流混输泵流动特性的影响[J]. 流体机械, 2021, 49(10):66-73.

[编辑:司红岩]

本文引用格式:

吴红秋,谢里阳,王 艺,等. 基于改进 AGREE 方法的静叶调节机构可靠性分配[J]. 机电工程, 2023, 40(3):399-406.

WU Hong-qiu, XIE Li-yang, WANG Yi, et al. Reliability distribution of adjusting mechanism of variable stator vanes based on improved AGREE method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(3):399-406.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>