

# 飞机可靠性分配方法研究

## A Method of Aircraft Reliability Allocation

曹琦 蔡军 张晓军 / 中国人民解放军驻陕飞公司军事代表室

**摘要:** 针对现行飞机工程研制可靠性分配中存在的数量少、主观因素影响较大的问题,提出了一种融合灰色关联理论与考虑重要度和复杂度的可靠性分配方法。该方法首先统计多型飞机分系统的可靠性指标,并将其代入灰色关联方法中计算各分系统的重要度;然后统计飞机各系统重要和新研改进部件数,利用考虑重要度和复杂度的分配方法对飞机可靠性指标进行分配。以某型飞机为案例进行分析计算,结果表明,该方法简单有效,客观性强。

**Abstract:** For solving the problem of less data and major subjectivity influence in aircraft reliability allocation, a method of reliability allocation based on merging grey relative theory and the method considering importance and complexity was proposed. Firstly, the method added up a quantity of subsystem reliability index of some kind of aircrafts and computed the degree of subsystem importance; Then by counting the number of subsystem components which was important and nearly researched or improved, the method allocated the reliability index considering importance and complexity. The results of computing a kind of aircraft's reliability allocation show that the proposed method is objective, efficient and easily realized.

**关键词:** 可靠性分配;灰色关联;重要度;复杂度

**Keywords:** reliability allocation; grey relative theory; importance; complexity

## 0 引言

可靠性分配是将系统或产品的可靠性指标分配到各功能层次的分系统、设备及元件,用以确定各个低层次产品的可靠性指标<sup>[1]</sup>。对于飞机系统这样一个大型的复杂系统,其可靠性设计问题是一个非常复杂的过程,涉及系统体制的选择、系统的简化、各种冗余方案的采用。对于不同的系统结构,需要根据重要度、复杂度、致命性、成熟性等不同情况给出相应的可靠性指标,使设计人员尽早明确其设计要求,研究实现这个要求的可能性;为提出外购件、外协件可靠性指标提供初步依据;根据所分配的可靠性要求,估算所需人力和资源等管理信息。目前飞机系统采用的可靠性分配方法主要有等分配法<sup>[2]</sup>、评分分配法<sup>[3]</sup>、比例组合法<sup>[4]</sup>、考虑重要度和复杂度的分配

法<sup>[5]</sup>等。等分配法是当产品定义并不十分清楚时采用的简单分配方法。当缺乏产品的可靠性数据时,可以采用评分分配法,但该方法是由有经验的工程技术人员用打分的方式给出,主观性较强。如果一个新设计的系统与老系统相类似,则新系统可以根据新的需求采用比例分配法。考虑重要度和复杂度的分配方法一般用于详细设计阶段,该方法综合考虑了系统或设备的重要度、复杂度和工作时间等信息,能够较好的满足可靠性指标分配要求。但是在工程实践中各系统的重要度往往通过人为给定,或者为了简化计算,通常将各系统重要度取相同值,在一定程度上造成可靠性指标分配的偏离。为了解决上述存在的问题,本文利用灰色关联理论应用到可靠性分配方法中,较好的解决了飞机系统可靠性分

配中存在的数量少、主观性影响问题。

## 1 方法的提出与模型的建立

### 1.1 考虑重要度和复杂度的分配方法

这种分配方法是既考虑重要度又考虑复杂度的一种分配方法。假设系统是由 $I$ 个寿命服从指数分布的分系统组成,且分配的可靠性指标以故障间隔时间TBF表示,则分配给第 $i$ 个分系统的可靠性指标为<sup>[5]</sup>:

$$TBF_i = \frac{NW_i t_i}{n_i [-\ln R(t)]} \quad (1)$$

式中: $i$ —分系统编号,

$(i=1, 2, 3, \dots, I)$ ;

$t_i$ —分系统工作时间;

$W_i$ —以第 $i$ 个分系统发生故障将会导致系统发生故障的重要因子;

$n_i$ —第 $i$ 个分系统的部件数;

$N$ ——系统总的部件数,

$$(N = \sum_{i=1}^I n_i);$$

$R(t)$ ——系统规定的可靠度。

在实际工程研制中,由于缺少方法和数据的支撑,同时为了简化计算, $W_i$ 一般取相同值,认为飞机各系统的重要度都是一样。显然,这种处理方法不合适,例如,飞机的动力装置和操纵系统直接影响飞行安全,出现故障有可能会产生机毁人亡的结果,重要度显然要比其他系统的重要度高。

## 1.2 采用灰色关联理论计算重要度因子

灰色关联理论是根据因素之间发展态势的相似或相异程度因素间关联程度的方法。实际上,灰色关联理论是一种就数找数的方法,是通过对实验数据的整理来寻找数的规律。求关联数列的紧密程度关系时,可画出参考曲线与关联曲线,利用关联曲线与参考曲线之间形状的相似程度能直观地表示各曲线间的关联紧密程度。根据灰色理论,曲线越靠近,各几何形状越接近,表明两者关系越紧密,关联度越大;反之,则关联度越小。

灰色关联分析的计算步骤<sup>[6]</sup>如下:

1) 确定参考序列。参考序列记为 $x_0(k)$ ,表示各相似系统的规定的可靠性指标;其他数列作为关联数列,表示第 $k$ 个相似系统中第 $i$ 个分系统的可靠性指标,记作 $x_i(k)$ 。

2) 对数列作无量化处理,即将数列转换为无单位的相对数值,令

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\max_k x_i(k)} \quad (2)$$

3) 利用变换所得的数据计算关联数列与参考数列在不同时刻的关联系数 $\zeta_i(k)$ ,计算公式为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_{i,k} |x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_{i,k} |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_{i,k} |x'_0(k) - x'_i(k)|} \quad (3)$$

式中, $\rho$ 为分辨系数,一般在 $[0, 1]$ 范围内取值。

4) 求关联度。计算方法是对不同时刻的关联系数求平均值,计算公式为:

$$\gamma_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \zeta_i(k) \quad (4)$$

式中, $K$ 表示相似系统个数, $\gamma_i$ 表示关联数列 $x_i$ 对参考数列 $x_0$ 的灰色关联度。

飞机制造厂商的可靠性数据是比较充足的,通过一定的处理也能够反映飞机各系统的重要程度。将飞机整机的可靠性指标作为参考曲线,分系统的可靠性指标作为关联曲线,如果分系统关联曲线与整机关联曲线越靠近,认为该分系统的重要程度越高,反之越低<sup>[7-8]</sup>。因此,飞机各系统的重要度因子 $W_i$ 可以用灰色关联度 $\gamma_i$ 来表示。

## 2 飞机系统可靠性分配

以某型飞机为例,该型飞机载机系统主要由机体结构、动力装置、燃油系统、环控系统、液压系统、自控系统、操纵系统、座椅及生活设备、防火系统、氧气系统、电气系统、救生系统、座舱显示系统、通信系统、导航系统和指示记录系统等组成。

### 2.1 载机可靠性模型

由于上述任意各系统发生故障都会影响飞机完成指定的任务,综合考虑计算复杂度和实际飞行环境,因此载机的任务可靠性模型采用串联模型,其载

机任务可靠性框图如图1所示。

### 2.2 可靠性分配求解

基本假设为:

1) 载机飞行即执行相关任务;

2) 载机各系统寿命服从指数分布。

要求载机平均故障间隔飞行小时(MFHBF)为不小于8.5h,任务可靠度不小于0.9。为了减少可靠性分配的重复次数,分配时考虑留出一定的余量,根据其型号飞机的经验和国内其他型号的成熟做法,考虑技术状态的变化,取20%的余量,因此将使用目标值(MFHBF)8.5h折算成目标MTBF规定值,则载机可靠性MTBF的分配值为10.2h;同样任务可靠度也取成熟期目标值20%的余量,则任务可靠度分配值为0.916。

从公式(1)中可以看出系统的复杂程度主要是用系统所含部件数来衡量,系统重要部件数越多,越复杂。如果将技术成熟度纳入考虑范围,可以用重要性与新研改进部件数对 $x_i$ 进行统计。该型飞机重要与新研改进部件数统计结果如表1所示:机体结构15,动力装置96,燃油系统78,环控系统48,液压系统30,自控系统102,操纵系统36,座椅及生活设备7,防火系统10,氧气系统24,电气系统76,救生系统2,座舱显示系统87,通信系统47,导航系统102,指示记录系统75,总计部件总数为835。

统计其他飞机各系统的MFHBF值如表1所示。

将表1中的数据代入公式(3)(4),可算得各系统的重要度 $W_i$ 如表2所示。在计算时,公式(3)中 $\rho$ 取为0.5。计算出各系统的重要度之后,将其代入公式

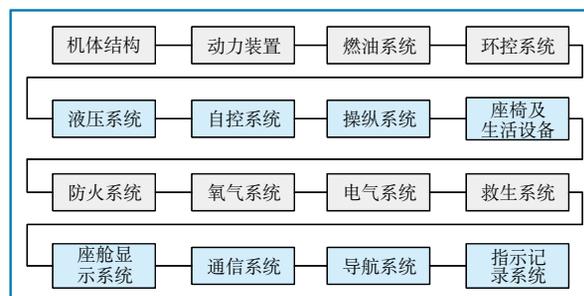


图1 载机任务可靠性框图

表1 各型飞机系统MFHBF值(单位:h)

| 飞机系统               | 飞机1  | 飞机2   | 飞机3   | 飞机4    | 飞机5  | 飞机6  | 飞机7  |
|--------------------|------|-------|-------|--------|------|------|------|
| 整机( $x_0$ )        | 6    | 8     | 6     | 6      | 10   | 6.5  | 6    |
| 机体结构( $x_1$ )      | 1314 | 1028  | 840   | 920    | 780  | 780  | 720  |
| 动力装置( $x_2$ )      | 87   | 68.6  | 36.87 | 87     | 84   | 63   | 48   |
| 燃油系统( $x_3$ )      | 132  | 68.6  | 132   | 76.85  | 492  | 91   | 63   |
| 环控系统( $x_4$ )      | 165  | 174.5 | 210   | 43.37  | 197  | 156  | 180  |
| 液压系统( $x_5$ )      | 372  | 80    | 372   | 183    | 791  | 98   | 76   |
| 自控系统( $x_6$ )      | 149  | 320   | 225   | 251.1  | 180  | 260  | 20   |
| 操纵系统( $x_7$ )      | 149  | 320   | 442   | 227    | 547  | 390  | 240  |
| 座椅及生活设备( $x_8$ )   | 3800 | 4800  | 2400  | 960    | 840  | 1560 | 720  |
| 防火系统( $x_9$ )      | 543  | 274.3 | 543   | 149    | 711  | 780  | 686  |
| 氧气系统( $x_{10}$ )   | 980  | 320   | 782   | 298    | 1217 | 390  | 720  |
| 电气系统( $x_{11}$ )   | 88.5 | 101   | 84    | 113.59 | 239  | 118  | 60   |
| 救生系统( $x_{12}$ )   | 4500 | 4500  | 4500  | 4500   | 4500 | 7800 | 1440 |
| 座舱显示系统( $x_{13}$ ) | 35   | 43    | 59    | 34     | 75   | 130  | 212  |
| 通信系统( $x_{14}$ )   | 35   | 147.7 | 146   | 46.7   | 181  | 87   | 144  |
| 导航系统( $x_{15}$ )   | 35   | 128   | 64    | 18     | 91   | 70   | 48   |
| 指示记录系统( $x_{16}$ ) | 35   | 102   | 68    | 49     | 175  | 130  | 111  |

表2 模型求解结果

| 飞机系统    | 重要度因子 $W_i$ | 本文方法分配结果 (MTBF·h) | 比例组合法分配结果 (MTBF·h) |
|---------|-------------|-------------------|--------------------|
| 机体结构    | 0.105077    | 680               | 1020               |
| 动力装置    | 0.34172     | 75                | 66                 |
| 燃油系统    | 0.120529    | 150               | 120                |
| 环控系统    | 0.120158    | 243               | 204                |
| 液压系统    | 0.03245     | 105               | 97                 |
| 自控系统    | 0.168122    | 160               | 136                |
| 操纵系统    | 0.307178    | 289               | 255                |
| 座椅及生活设备 | 0.026176    | 363               | 1020               |
| 防火系统    | 0.023282    | 226               | 291                |
| 氧气系统    | 0.119911    | 485               | 1020               |
| 电气系统    | 0.204912    | 134               | 107                |
| 救生系统    | 0.009436    | 458               | 2040               |
| 座舱显示系统  | 0.205239    | 229               | 340                |
| 通信系统    | 0.153968    | 318               | 255                |
| 导航系统    | 0.078807    | 75                | 64                 |
| 指示记录系统  | 0.120529    | 156               | 107                |

(1)可得到各系统的分配结果,并进行四舍五入到整数位,如表2所示。

## 2.3 结论分析

通过与比例组合法进行对比,发现飞机机体结构、座椅及生活设备,氧气系统和救生系统本来分配了较高的平均故障间隔时间,导致将其他系统的可靠性的降低,而上述系统在飞行过程中,对飞行安全或任务的执行影响不是很大。在本文方法中,通过灰色关联计算出的这些系统的重要度与其他系统

其满足较高的可靠性。

## 3 总结

本文利用灰色关联理论计算飞机各系统的重要度,并将该重要度运用到考虑重要度与复杂度的可靠性分配方法中。实例结果表明,该方法在一定程度上能够解决飞机系统可靠性分配时数据量少,主观性因素影响分配结果的问题,增加了可靠性分配计算的合理性。该方法计算简单,易于工程实现,但

存在以下两个问题:

1) 国内飞机可靠性研究起步较晚,用于灰色关联数据量较少,不能很好地描述各系统的数据曲线。随着时间推移,积累的数据量会越来越多,重要度的计算也就越趋近于精确。

2) 技术成熟度只是用新研改进成品的数量来体现,不能很好地贴近实际工程技术环境,在以后的研究中进一步解决。

AST

## 参考文献

- [1] 商兴华,韩维,李成等.一种新的飞机系统可靠性分配方法[J].兵工自动化,2010,19(12):16-19.
- [2] 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,2012,30(1):32-36.
- [3] 张琳,黄敏,刘婷.航空发动机可靠性评分分配法[J].质量与可靠性,2009,140(2):49-53.
- [4] 曾声奎.任务可靠性指标分配的比例组合法及评分分配法[J].航空学报,1995,16(8):15-20.
- [5] 飞机设计手册编委会.飞机设计手册(第20册)[M].北京:航空工业出版社,2000:85-91.
- [6] 邓聚龙.灰色系统理论[M].武汉:华中科技大学出版社,1989:53-131.
- [7] 姜悦岭等.一种改进的AGREE可靠度分配算法[J].锦州师范学院学报(自然科学版),2001,22(1):17-21.
- [8] 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):42-43.

## 作者简介

曹琦,博士,工程师,主要从事装备可靠性方面的研究。